



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM TOZ PATLAMALARININ İNCELENMESİ VE
REAKTİF-PROAKTİF ÖNLEM ÇALIŞMALARI**

**PINAR SEZER
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin KALAYCI
Prof. Dr. Selahattin GÖKMEN**

İSTANBUL, 2019



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
SAĞLIK BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ALÜMİNYUM TOZ PATLAMALARININ İNCELENMESİ VE
REAKTİF-PROAKTİF ÖNLEM ÇALIŞMALARI**

**PINAR SEZER
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI

**DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin KALAYCI
Prof. Dr. Selahattin GÖKMEN**

İSTANBUL, 2019

TEZ ONAYI

Kurum : İstanbul Gedik Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü
Programın seviyesi : Yüksek Lisans
Anabilim Dalı : İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı
Tez Sahibi : Pınar SEZER
Tez Başlığı : Alüminyum Toz Patlamalarının İncelenmesi ve Reaktif-Proaktif Önlem Çalışması
Sınav Yeri : C Blok 5. Kat 504 Numaralı Derslik
Sınav Tarihi : 28.01.2019

Tez tarafımızdan okunmuş, kapsam ve kalite yönünden Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Danışman (Unvan, Adı, Soyadı)

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin KALAYCI
(Danışman)

Kurumu

İstanbul Gedik Üniversitesi

İmza**Sınav Jüri Üyeleri (Unvan, Adı, Soyadı)**

Prof. Dr. Ulvi AVCIATA

İstanbul Esenyurt
Üniversitesi



Prof. Dr. Selahattin GÖKMEN

İstanbul Gedik Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Mustafa YAĞIMLI

İstanbul Gedik Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Fatih YALÇIN

İstanbul Gedik Üniversitesi



Yukarıdaki jüri kararı Enstitü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

- Dr. Öğr. Üyesi Hasan Uğur ÖNCEL
Sağlık Bilimleri Enstitüsü Müdür V.

-Sınav evrakları 3 iş günü içinde ıslak imzalı tek kopya halinde Enstitüye teslim edilmelidir.
-Bu form bilgisayar ortamında doldurulacaktır.+

BEYAN YAZISI

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütünsafhalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmayla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

...../...../2018

Pınar SEZER
İmza

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmamda, alüminyum konusunda uzun soluklu bilgi ve deneyimlerini, her ihtiyacım olduğunda benimle paylaőan sayın Erman Car'a, tez sürecinde ve akademik çalışma yapmamda beni teővik eden ve akademik çalışma konusunda desteklerini esirgemeyen saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi Hasan Tahsin Kalaycı'ya, analiz çalıőmalarına katkılarından dolayı tüm Gedik Kaynak Laboratuvar bölümü çalışanlarına, çalışmam sırasında olabildiğince bilgi aktaran ve deneyimlerini paylaőan uygulama tesisi çalışanlarına ve engin bilgi ve tecrübelerini bıkmadan, yorulmadan benimle paylaőan ve tez çalıőmamın her anında zaman yaratarak destek olan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Selahattin Gökmen'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, uzun tez çalışmam sırasında manevi desteğini esirgemeyen sevgili eőim Buğra Sezer'e, güzel aileme, tez sürecinde yaőından büyük anlayıő ve destek gösteren canım oğlum Uzay Sezer'e teőekkürlerimi bir borç bilirim.

Pınar SEZER

İÇİNDEKİLER

BEYAN YAZISI	i
TEŞEKKÜR	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
TABLolar LİSTESİ	xvi
KISALTMA VE SEMBOLLER	xix
ÖZET	xxv
ABSTRACT	xxvii
BÖLÜM 1: GİRİŞ	1
1.1. Problem	4
1.2. Araştırmanın Konusu	4
1.3. Araştırmanın Amacı	5
1.5. Araştırmanın Önemi	6
1.6. Araştırmanın Sayıtları	6
1.7. Araştırmanın Sınırlılıkları	7
BÖLÜM 2: PATLAMA VE TÜRLERİ	7
2.1. Yanma Üçgeni, Yangın Dörtüzlüsü	7
2.1.1. Yanmanın fiziksel ve kimyasal olarak incelenmesi.....	9
2.2. Patlama	9
2.2.1. Patlama çeşitleri.....	11
2.2.1.1. Kimyasal ve/veya fizikokimyasal patlamalar	12
2.2.1.1.1. Ayrışma reaksiyonu.....	12
2.2.1.1.2. Birleşme Reaksiyonu	14
2.2.1.1.2.1. Alüminyum İlavesi	14
2.2.1.1.3. Deflagrasyon ve detonasyon	15
2.2.1.1.3.1. Toz patlamasında detonasyon.....	18
2.2.1.1.3.1.1. Patlayıcılar, havai fişekler, iticiler (ateşleyiciler)	18
2.2.1.1.4. Gaz/buhar patlamaları	20

2.2.1.1.4.1. Buhar bulutu patlamaları (VCE, UVCE, PVCE (<i>Partially Confined Vapour Cloud Explosion</i>))	20
2.2.1.1.4.1.1. Gaz patlamalarının önlenmesi	24
2.2.1.1.5. Spray/sis patlamaları	25
2.2.1.1.6. Toz patlamaları.....	26
2.2.1.1.6.1. Patlayıcı gaz/buhar karışımları ile patlayıcı sprej/sis ve toz bulutunun ortamda bulunması ile gösterdikleri çok benzer özellikler;	27
2.2.1.1.6.2. Alevlenebilir gaz/buhar, sprej/sis ile yanıcı tozlar arasındaki yedi temel fark;	28
2.2.1.1.6.3. Patlayıcı bulut oluşturan yakıtların fiziksel özelliklerine göre tehlike oluşturma analizi	29
2.2.1.2. Fiziksel Patlamalar.....	29
2.2.1.2.1. BLEVE □ Kaynayan sıvı genişleyen buhar patlaması (<i>Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion</i>).....	30
2.2.1.2.1.1. BLEVE Mekanizması.....	31
2.2.1.2.2. Ani faz değişimi patlamaları	34
2.2.1.3. Nükleer patlamalar.....	35

BÖLÜM 3: PATLAMA İLE İLGİLİ MEVZUAT VE

STANDARTLAR37

3.1. Yasal Mevzuat ve Standartlar.....	37
3.1.1. Türk mevzuatı ve standartları	37
3.1.1.1. Türk standardı	39
3.1.2. Uluslararası standartlar	42
3.1.3. Seveso direktifleri.....	42
3.1.4. Toz patlamaları ile ilgili NFPA standartları	43
3.1.5. ATEX yönergeleri	46
3.2. Mevzuat ve Standartlara Göre Tehlikeli Bölge Tanımı ve Sınıflandırılması. 47	
3.3. Patlamadan Korunma Dokümanı	50
3.3.1. Tutuşturma kaynakları	56
3.3.2. Boşalma kaynakları	62
3.3.3. Bölge sınıflandırması.....	62

3.3.4. Ekipman seçimi	63
3.3.5. Patlayıcı bölge sınıflandırması	64
3.3.5.1. Patlayıcı bölge örnekleri	65
3.3.6. Patlama etkileri	67
3.3.6.1. Patlamanın yapılar üzerinde meydana getireceği hasarın belirlenmesi	68
3.4. Patlama Etkilerinin Azaltılması.....	71
BÖLÜM 4: TOZ PATLAMALARI	76
4.1. Toz Patlamaları.....	76
4.1.1. Birincil patlamalar	79
4.1.2. İkincil Patlamalar.....	80
4.2. Toz ve Toz Oluşumu	82
4.2.1. Toz oluşumu	83
4.2.1.1. Toz bulutu	85
4.2.1.2. Toz tabakası	87
4.3. Tozların Sınıflandırılması.....	89
4.3.1. Tesis Gözetim Departmanı – Birleşik Krallık	89
4.3.2. Yanma sınıfı sınıflandırması (CC□Combustion Class).....	90
4.3.3. Tozun patlama şiddetine göre sınıflandırma.....	90
4.3.4. Amerika Birleşik Devletleri Maden Bürosu (<i>U.S. Bureau of Mine</i>) patlayıcı toz sınıflandırması.....	91
4.4. Tozlar için Yanıcılık ve Patlayıcılığın Belirlenmesi	92
4.4.1. Yanıcı/parlayıcı/patlayıcı tozlar için standart tanımları	92
4.4.2. Yanıcılık ve patlayıcılığın belirlenmesi.....	93
4.4.2.1. Toz bulutunun yanıcılık ve patlayıcılık parametreleri	95
4.4.2.1.1. Toz patlama şiddeti (P_{max} , dP / dt_{max} ve K_{St}).....	98
4.4.2.1.2. Minimum patlama sınırı – MPK (<i>MEC – Minimum Explosive Concentration</i>) ASTM E 1515	99
4.4.2.1.3. Minimum tutuşma enerjisi □MTE (<i>MIE- Minimum Ignition Energy</i>) ASTM E 2019	102

4.4.2.1.4. Sınırlandırılmış oksijen konsantrasyonu □SOK (<i>LOC- Limiting Oxygen Concentration / MOC – Minimum Oxygen Concentration</i>) /	
Oksitleyici gazın oksijen içeriği ve bulut oksijen konsantrasyonu	104
4.4.2.1.5. Minimum Tutuşma Sıcaklığı – MTS (<i>MIT- Minimum Ignition Temperature</i>).....	109
4.4.2.1.5.1. Bir Toz Bulutu ya da Toz Tabakasının Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı – KTS (<i>AIT □Autoignition Temperature of Dust Cloud and Dust Layer</i>) ASTM E 1491.....	110
4.4.3. Patlama Riski Olan Metal tozları.....	110
4.4.4. Toz ve toz bulutunun tutuşturulma hassasiyeti ve patlama şiddetini etkileyen faktörler	111
4.4.4.1. Nem içeriği de dahil olmak üzere tozun kimyasal bileşimi	111
4.4.4.2. Homojen ve heterojen kimyasal reaksiyonlar	115
4.4.4.3. Toz içinde parçacık büyüklüklerinin ve şekillerinin dağılımları, tamamen dağınık halde tozun spesifik yüzey alanı.....	115
4.4.4.3.1. Toz dispersiyonu etkili partikül büyüklüğü derecesi	116
4.4.4.4. Minimum inert toz konsantrasyonu – MİK (<i>MIC- Minimum Inerting Concentration</i>)	119
4.4.4.5. Gerçek bir bulutta başlangıç türbülansı dağılımı	121
4.4.4.6. Bir toz bulutunun başlangıç sıcaklığı.....	123
4.4.4.7. Bir toz bulutunun başlangıç basıncı.....	124
4.4.4.8. Bir toz bulutu ile karışan yanıcı gaz veya buhar (“Hibrit” karışımlar)	125
4.5.1. JGS Yem Fabrikası Tahıl Tozu Patlaması □Gürcistan.....	127
4.5.2. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Alüminyum Tozu Patlaması □ABD.....	128
4.5.3. Imperial Şeker Rafinerisi Şeker Tozu Patlaması □Gürcistan.....	132
4.5.4. Pemex Devlet Petrol Şirketi LPG Dolum Tesisindeki Patlama □Meksika	138
BÖLÜM 5: ALÜMİNYUM TOZU PATLAMALARI	144
5.1. Alüminyuma Genel Bakış	144
5.2. Birincil Alüminyum Üretimi	146
5.3. İkincil Alüminyum Üretimi	149

5.4. Alüminyum Kullanım Alanları ve Avantajları.....	150
5.5. Alüminyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	151
5.5.1. Alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri	152
5.5.2. Alüminyumun kimyasal özellikleri	153
5.5.2.1. Alüminyum yüzeyindeki pasivasyon tabakasının karakteristiği....	156
5.5.2.1.1. Alüminyum toz partiküllerindeki pasivasyon tabakasının karakteristiği.....	157
5.5.3. Mukavemet artırılması için alüminyum alaşımları.....	159
5.5.3.1. Alüminyum – silisyum – magnezyum döküm alaşımları	159
5.5.4. Toz halinde alüminyum	160
5.5.4.1. Alüminyum tozunun stabil ve reaktif olduğu durumlar.....	160
5.5.4.1.1. Tehlikeli reaksiyonlar.....	161
5.5.4.1.2. Sağlık riskleri	161
5.5.4.1.3. Hijyen.....	161
5.5.4.2. Alüminyum tozu üretimi □toz metalurjisi (T/M) ve avantajları	161
5.5.4.3. Alüminyum tozunun kullanım alanları	164
5.5.4.4. Saf ergimiş alüminyum tozu sınıflandırması	172
5.5.4.4.1. Atomize alüminyum tozu (<i>powder</i>)	173
5.5.4.4.2. Pul (<i>flake</i>)	173
5.5.4.4.3. Granül.....	174
5.5.4.4.4. Pastalar (<i>Pastes</i>)	174
5.5.4.5. Alüminyum tozu eldesi	175
5.5.4.6. Alüminyum tozunun, patlayıcılık parametreleri incelemesi.....	177
5.5.4.6.1. Alüminyum tozu spesifik yüzey alanının basınç artış maksimum hızına ve toz patlama şiddetine etkisi (P_{max} , dP / dt_{max} ve K_{St})	182
5.5.4.6.2. Alüminyum tozu nun MPK, MTE, MTS ve K_{st} patlayıcılık parametreleri ile partikül boyut dağılımı arasındaki ilişki	184
5.5.4.6.3. Alüminyum tozunun sınırlandırılmış oksijen konsantrasyonu □ SOK.....	190
5.5.4.6.3.1. Alüminyum toz partiküllerinin oksijen ve nem içeriği açısından incelenmesi.....	192

5.5.4.6.4. Alüminyum tozu tutuşmasında türbülansın etkisi.....	193
5.5.4.6.5. Alüminyum tozunun patlama riskinin ortadan kaldırılması..	194

BÖLÜM 6: GEREÇ VE YÖNTEM 197

6.1. Araştırmanın Yöntemi.....	197
6.2. Araştırmanın Evreni	197
6.3. Araştırmanın Örneklemi.....	197
6.4. Tezin İşleniş Planı	198
6.5. Verilerin Toplanması.....	199
6.6. Verilerin Analizi.....	200

BÖLÜM 7: BULGULAR VE DEĞERLENDİRME 201

7.1. Tesis Tanıtımı.....	201
7.1.1. Tesis 1 (Alüminyum tozu üretim tesisi – Uşak).....	201
7.1.1.1. Üretim durumu ve kapasitesi	201
7.1.1.2. Fabrika bina ve eklentilerinin fiziki yapısı, bölümlerin krokisi....	202
7.1.1.3. Üretim metodu ve tesis iş akış şeması	202
7.1.1.3.1. Atık kabulü.....	203
7.1.1.3.2. Kırıcı, parçalayıcı ünitesi	204
7.1.1.3.3. Döner fırın ve değirmen silo	205
7.1.1.3.4. Değirmen, birinci siklon separator ve jet filtre	206
7.1.1.3.5. Elek.....	208
7.1.2. Tesis 2 (alüminyum jant üretim tesisi □Manisa).....	208
7.1.2.1. Tesisin tanımı.....	208
7.1.2.2. Üretim durumu ve kapasitesi	209
7.1.2.3. Fabrika organizasyon şeması, bina ve eklentilerinin fiziki yapısı, bölümlerin krokisi.....	209
7.1.2.4. Üretim metodu	209
7.1.2.5. Tesiste meydana gelen alüminyum tozu patlama olayları	210
7.1.2.6. Yan ürün olarak alüminyum tozu	211
7.1.2.7. Kuşlama ünitesi	212
7.1.2.7.1. Türbin.....	213
7.1.2.7.2. Elevatör sistemi	215
7.1.2.7.3. Seperatör (Elek).....	216

7.1.2.7.4. Siklon	217
7.1.2.7.5. Filtre ünitesi ve parlama – patlamanın oluştuğu yerler	217
7.2. Laboratuvar Analizleri	218
7.2.1. Tesis 1 □Uşak için laboratuvar analizleri	218
7.2.1.1. Elek analizi.....	218
7.2.1.2. Folyo alüminyum miktarı tayini	220
7.2.1.3. ICP□OES cihazı ve çalışma prensibi	221
7.2.1.3.1. ICP□OES Cihazı çalıştırma.....	223
7.2.2. Tesis 2 (Manisa) için laboratuvar analizleri	223
7.2.2.1. Elek analizi.....	223
7.2.2.2. Yoğunluk analizi	224
7.2.2.3. Analiz değerlendirme	225
7.3. Risk Değerlendirmesi	227
7.3.1. Bir toz patlamasının olası etkilerinin değerlendirilmesi.....	227
7.3.1.1. Patlama riski tanımlamasında aşamalar	227
7.3.2. Risk Analizi ve Değerlendirmesi	230
7.3.2.1. Risk Analiz Metotları	230
7.3.3. Tesis 1 ve Tesis 2 risk değerlendirme metodu ve risk analiz uygulaması	231
7.3.3.1 Hata türleri ve etkileri analizi □HTEA	231
7.3.3.1.1. HTEA Tarihsel gelişimi ve uygulanması	234
7.3.3.1.2. HTEA terminolojisi	235
7.3.3.1.3. Uygulama	237
7.3.4. HTEA yöntemine göre tesis risk değerlendirme uygulaması	241
7.3.4.1. Tesis 1 risk analizi ve risk dağılımı	241
7.3.4.2. Tesis 2 risk analizi ve risk dağılımı	274
BÖLÜM 8: SONUÇ VE ÖNERİLER	289
KAYNAKLAR.....	296
ÖZGEÇMİŞ.....	311

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yanma Üçgeni	8
Şekil 2.2. Yangın Dörtüzlüsü	8
Şekil 2.3. Patlama Çeşitleri	11
Şekil 2.4. Bir Patlayıcının Ayrışma Hızına Tutuşturma Sıcaklığının Etkisi.....	13
Şekil 2.5. Detonasyon ve Deflagrasyon.	17
Şekil 2.6. Yoğunluk ve Sınırlandırmaya Bağlı Alev Hızı İvmelenmesi	22
Şekil: 2.7. Endüstriyel Bir Tesiste UVCE ve BLEVE Patlama Oluşumu için Akış Diyagramı.....	23
Şekil 2.8. Gaz Yakıt için Tipik Yanma Bölgesi ile Üçgen Kompozisyon Diyagramı	24
Şekil 2.9. Harici Bir Yangına Maruz Kalmış LPG Silindiri	30
Şekil 2.10. İki Adımda BLEVE	32
Şekil 2.11. Çıkarılan Buhar / Sıvının Ateşlenmesinden Sonra Başlıca İkincil Ateş Topunun Dahil Olduğu Bir BLEVE Şematik Gösterimi	33
Şekil 2.12. Ani Faz Değişim Patlamasının Şematik Gösterimi	35
Şekil 3.1. Bölge Sınıflandırma Örnekleri.....	49
Şekil 3.2. Patlamadan Korunma Dokümanı Hazırlama	53
Şekil 3.3. Yanıcı Toz İçeren Boşaltma Torbalarının Bölge 20 ve 22 Olarak Gösterimi	66
Şekil 3.4. Siklon ve Filtrenin Bulunduğu Toz Toplama Sistemi	67
Şekil 3.5. Yüksek Basınç ile Ölçekli Uzaklık Arasındaki İlişki	69
Şekil 4.1. Patlama Beşgeni.....	77
Şekil 4.2. Toz Patlama Beşgeninin Açılımı ile Toz Patlamasının İlerlemesine Genel Bir Bakış	78
Şekil 4.3. Domino Etkisi	80
Şekil 4.4. Toz Tabakası Üzerine Hava Üflemesinden Üretilen Mısır Nişastası Toz Bulutı.....	81
Şekil 4.5. Birincil ve İkincil Patlamalar	82
Şekil 4.6. Toz Üretim Esnasında Toz Oluşumu (Khambekar ve Pittenger, 2013)	85
Şekil 4.7. Toz Konsantrasyonunun Minimum Tutuşturma Enerjisi ve Patlama Oranına Etkisi.....	102

Şekil 4.8. Minimum Tutuştırma Enerjisinin (MTE)' nin belirlenmesi için MIKE 3 Aparatı.....	103
Şekil 4.9. Godbert-Greenwald Fırında <74 µm Pittsburgh Kömür Tozunun Minimum Tutuşma Sıcaklığına Göre Gazın Oksijen İçeriğinin Etkisi	106
Şekil 4.10. 1m ³ Kapalı ISO Tankında, Çeşitli Patlama Başlangıç Basınçlarındaki Polimer Tozu için Gaz İçeriğindeki Oksijen İçeriğinin Maksimum Patlama Basıncına Etkisi	107
Şekil 4.11. Gazın Oksijen İçeriğinin, Yüksek Uçuculuk İçeren Kömür Tozunun Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu ve Partikül Çapına Etkisi	108
Şekil 4.12. Toz Bulutlarının Minimum Tutuşma Enerjisi Üzerinde Gazın Oksijen İçeriğinin Etkisi.....	108
Şekil 4.13. Üç Farklı Toz için Toz Nem İçeriğinin Minimum Tutuştırulma Enerjisine Etkisi	113
Şekil 4.14. Mısır Nişastasındaki Nem İçeriğinin, Çeşitli Tutuşma Gecikmeleri (Toz Dağılımından Tutuşmaya Kadar Geçen Süre) İçin Hartmann Bombasında Azami Basınç Artışına Etkisi.....	114
Şekil 4.15. (A) Kümülatif Toz Partikül Büyüklüğü Dağılımları. (B) Toz Partikül Büyüklüğünün Diferansiyel Dağılımı: (A) Yüzey Alanı Ağırlıklı ve (B) Kütle veya Hacim Ağırlıklı	116
Şekil 4.16. Tozun Mükemmel Dağılımı ve Kümeleşmesi	119
Şekil 4.17. Patlamanın Önlenmesi için Gereken Birim Zamandaki İnert Ajan Miktarı.	120
Şekil 4.18. İlk Türbülansın Bir Toz Bulutunun Patlama Hızına Etkisi. 1,2 Litrelik Hartmann Bombasında Havada 420 g / m ³ Likopodyum ile Gecikme Başına Beş Deney Yapılarak Bulunan Değerler	122
Şekil 4.19. 1 m ³ Kapalı Tanktaki, Bitümlü Kömür Tozu Kullanarak – Hava Karışımının Gelişiminin Üzerinde Başlangıç Sıcaklığı Etkisi.....	124
Şekil 4.20. Kahverengi Kömür Tozu Kullanılarak Farklı Başlangıç Basınçları için Toz Konsantrasyonunun Fonksiyonu Olarak 1 m ³ Kapalı Bir Kaptaki Maksimum Patlama Basıncı.....	125
Şekil 4.21. Başlangıç Basıncının Minimum Tutuştırulma Enerjisi Üzerine Etkisi	125
Şekil 4.22. Hibrit Karışımların Alt Patlama Sınırı.....	126

Şekil 4.23. JGS Yem Fabrikası Tahıl Tozu Patlaması Olay Künyesi.....	127
Şekil 4.24. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Alüminyum Tozu Patlaması Olay Künyesi.....	128
Şekil 4.25. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Patlama Anı.....	129
Şekil 4.26. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Hurda İş Akış Diyagramı	130
Şekil 4.27. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Toz Toplama Ünitesi Şeması	131
Şekil 4.28. Imperial Şeker Rafinerisi Şeker Tozu Patlaması Olay Künyesi	133
Şekil 4.29. Imperial Şeker Rafinerisi, Toz Patlamasından Sonra Fabrika	134
Şekil 4.30. Imperial Şeker Rafinerisi, Toz Patlamasından Sonra Liman Güvenlik Kamerasından Alınan 16. Saniyedeki Patlama Görüntüleri ve Oluşan Ateş Topları	134
Şekil 4.31. Imperial Şeker Rafinerisinde, Makine, Bağlantılar ve Zeminde Görülen Büyük Miktarda Şeker Yığılı	135
Şekil 4.32. Imperial Şeker Rafinerisi, Toz Patlaması Tutuşma Senaryosu.....	136
Şekil 4.33. Imperial Şeker Rafinerisi, Toz Patlaması Olay Şeması	137
Şekil 4.34. Pemex Devlet Petrol Şirketi Olay Künyesi	139
Şekil 4.35. Patlamadan Önce Pemex Devlet Petrol Şirketinde Depolama Tankları	139
Şekil 4.36. Pemex Devlet Petrol Şirketi Patlaması Neticesinde Meydana Gelen BLEVE.....	140
Şekil 4.37. Pemex Devlet Petrol Şirketi Patlaması Neticesinde Yıkılmış Bir Ev....	140
Şekil 4.38 Pemex Devlet Petrol Şirketi Patlamasında Meydana Gelen Şarapnel Etkisi	142
Şekil 5.1. Dünya Alüminyum Rezerv Dağılımı	145
Şekil 5.2. Birincil Alüminyum Üretiminin Dünyadaki Durumu.....	150
Şekil 5.3. Birincil Alüminyum Üretiminde Üretim Kademeleri.....	148
Şekil 5.4. Alüminyum Kullanım Alanları	151
Şekil 5.5. Boksitten Alümina Üretim Süreci.....	154
Şekil 5.6. Katı Şarj ile, Alüminyum Üzerindeki Oksit Tabakasının Kırılması.....	157
Şekil 5.7. 20 C / dk Isıtma Oranıyla Maksimum 1.400 °c Sıcaklıkta Oksitlendikten Sonra Alüminyum Partikülleri; (a) Eriyik Alüminyumun Oksit Kabuğunun Dışına (Özellikle Tane Sınırlarında) Nüfuz Etmesi ve Kabuğundan Çıktıktan Hemen Sonra	

Oksidasyonu (b) Bir Alüminyum Parçacığının Patlaması ve Yırtılmış Oksit Kabuğunun Kalan Kısmı.....	158
Şekil 5.8. Pres ve Sinterleme Toz Metalurjisi Rotası.....	163
Şekil 5.9. Konvensiyonel Pres ve Sinterleme Tekniği İle Üretilmiş Çeşitli Parçalar	164
Şekil 5.10. Mercedes-Benz'in Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Silindir Gömleklerine Sahip Motor Karteri	170
Şekil 5.11. (1) Alüminyum Pasta, (2) Alüminyum Pul, (3) Alüminyum Granül.....	172
Şekil 5.12. 1 m ³ ISO Tankında, Alüminyum Tozu Spesifik Yüzey Alanının Basınç Artış Maksimum Hızına Etkisi.....	183
Şekil 5.13. Nifuku ve Arkadaşlarının (2007) Deneysel Çalışmaları Neticesindeki Bulgulara Göre, Birinci ve İkinci Alüminyum Numuneleri için Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu ve Partikül Büyüklüğü Arasındaki İlişki.....	185
Şekil 5.14. Nifuku ve Arkadaşlarının (2007) Deneysel Çalışmaları Neticesindeki Bulgulara Göre, Üçüncü Alüminyum Numuneleri için Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu ve Partikül Büyüklüğü Arasındaki İlişki.....	186
Şekil 5.15. Özel Alev Yayılımı. Metal Tozlarının Sınırlanmamış Bulutlarında Toz Konsantrasyonunun Bir Fonksiyonu Olarak Alev Hızı	189
Şekil 5.16. Oksijen Konsantrasyonu (Nitrojen İle Seyreltilmiş) ve Alüminyum Tozunun Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu Arasındaki İlişki.....	190
Şekil 5.17. Atmosferdeki Oksijen İçeriğinin, Çeşitli Malzemelerin Toz Bulutlarının Minimum (Elektriksel Kıvılcım) Tutuşturma Enerjisi Üzerindeki Etkisi.....	192
Şekil 5.18. Havadaki 10 µm Boyutundaki Alüminyum Partiküllerinin Oluşturduğu Sınırlanmamış Bulutun Merkezi Tutuşturma Zamanının Bir Fonksiyonu Olarak Alev Topu Yarıçapı.....	194
Şekil 5.19. Alüminyum Tozu İnertlemesinde, İnert Madde Olarak Sodyum Bikarbonat Kullanarak 20 L ve 1 m ³ Test Odasındaki Karşılaştırma Eğrileri.....	195
Şekil 5.20: Alüminyum Tozu İnertlemesinde, İnert Madde Olarak Mono Amonyum Fosfat Kullanarak 20 L ve 1 m ³ Test Odasındaki Karşılaştırma Eğrileri	196
Şekil 7.1. Tesis □ (Uşak) Kroki□	202
Şekil 7.2. Tesis □ (Uşak) Kroki□2	202
Şekil 7.3. Tesis □ (Uşak) İş Akış Şeması	203

Şekil 7.4. Tesis 1 (Uşak) Katı Atık Ünitesi	204
Şekil 7.5. Tesis 1 (Uşak) Geçici Atık Depolama Alanı	204
Şekil 7.6. Tesis 1 (Uşak) Balyalar Halinde Alüminyum Hurdaları	204
Şekil 7.7. Tesis 1 (Uşak) Kırıcı – Parçalayıcı (Öğütme) Ünitesi.....	205
Şekil 7.8. Tesis 1 (Uşak) KırıcıParçalayıcı Ünitesi.....	205
Şekil 7.9. Tesis 1 (Uşak) Döner Fırın	205
Şekil 7.10. Tesis 1 (Uşak) Jet Filtre.....	206
Şekil 7.11. Jet Filtre Bölümleri (Genel).....	207
Şekil 7.12. Tesis 1 (Uşak) Elek Sistemi	208
Şekil 7.13. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Ünitesinde Kullanılan Demir Bilyalar	209
Şekil 7.14. Tesis 2 (Manisa) Filtre Cidarında Meydana Gelen Korlaşma	211
Şekil 7.15. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Ünitesinden Yan Ürün Olarak Çıkan Alüminyum Alaşım Tozu.....	211
Şekil 7.16. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Makinesi Ana Üniteleri ve Makinede Kullanılan Yağlar	212
Şekil 7.17. Tesis 2 (Manisa) Türbin	214
Şekil 7.18. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Sistemi – Elevatör	214
Şekil 7.19. Tesis 2 (Manisa) Türbin Ana Elemanları	215
Şekil 7.20. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Sistemi Separatör	216
Şekil 7.21. Tesis 2 (Manisa) Döner Elek	216
Şekil 7.22. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Sistemi – Siklon	217
Şekil 7.23. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Sistemi – Filtre Ünitesi	217
Şekil 7.24. Elek analiz yöntemi (Eğri, 2008).....	218
Şekil 7.25. 0.01 Gram Hassasiyette Elektronik Terazı	219
Şekil 7.26. Titreşimli 50045 Mesh Elek	219
Şekil 7.27. Şilifli Erlen.....	220
Şekil 7.28. Metalik Alüminyum Tayin Cihazı	221
Şekil 7.29. ICP-OES Cihazı ve %99 Saflıkta Alüminyum Numunesi.....	222
Şekil 7.30. HTEA Adımları	234
Şekil 7.31. Tesis 1’de HTEA Yöntemine Göre Risklerin Düzeylerine Göre Yüzde Dağılımı	271

Şekil 7.32. Tesis 2 Kumlama Ünitesinde HTEA Yöntemine Göre Risklerin
Düzeylerine Göre Yüzde Dağılımı 286



TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Bir Dizi Toz için Toz Patlama Özellikleri	2
Tablo 1.2. 21. Yüzyılda Meydana Gelmiş Büyük Toz Patlaması Olayları.....	2
Tablo 1.3. Alüminyum Üretimi NACE (Tehlike Sınıfı Listesi)	3
Tablo 2.1. Oda Sıcaklığı ve Atmosfer Basıncında Bazı Genel Yanabilir Maddeler için Oksijen gazı Bakımından Alt ve Üst Patlama Sınırları.....	25
Tablo 3.1. Almanya’da Gerçekleşen 426 Toz Patlamasının Tutuşturucu Kaynaklara Göre Dağılımı.....	57
Tablo 3.2. Patlayıcı Ortamlarda Kullanılacak Ekipman Grupları ve Kategorileri.....	63
Tablo 3.3. Ekipman Koruma Seviyesi ile Koruma Tipi Arasındaki İlişki.....	64
Tablo 3.4. Yüksek Basınç Sonucu Meydana Gelecek Hasarlar	70
Tablo 4.1. Toz Tabakalarının Yama Davranışı.....	88
Tablo 4.2. 1 m ³ ’lük Aparat İçerisinde 10 kJ Tutuşturma Enerjisi ile Toz Patlama Sınıflandırması	91
Tablo 4.3. Amerika Birleşik Devletleri Maden Bürosu Patlayıcılık İndeksi	92
Tablo 4.4. Önemli Toz Patlama Parametreleri ve Patlama Önlemedeki Yeri	95
Tablo 4.5. Bazı Metallerin Patlayıcılık Özellikleri	96_Toc432579
Tablo 4.6. Toz Patlama Parametreleri için Test Metotları	97_Toc432581
Tablo 4.7. Zehr Teorisi ile Hesaplanan Minimum Patlayabilir Toz Konsantrasyonları ve Deneysel Karşılaştırması.....	101
Tablo 4.8. Ortalama Partikül Boyutu ve Minimum O ₂ Konsantrasyonu Arasındaki İlişki	105
Tablo 4.9. Bir Dizi Toz için Toz Patlama Özellikleri	111
Tablo 4.10. Çeşitli Maddelerin Bir Mol Oksijen Tüketiminde Ortaya Çıkan Yanma (Oksidasyon) Isıları.....	112
Tablo 4.11. Toz Patlaması Parametrelerinde Toz Özellikleri/ Karakteristikleri.....	118
Tablo 4.12. İnert Katı Madde İlavesiyle Yanıcı Tozların İnertleştirilmesi.....	121
Tablo 5.1. Alüminyum Endüstrisi ve Alternatif Olduğu Malzemeler	150
Tablo 5.2. 20°C’de Metallerin Karşılaştırmalı Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikler.....	152
Tablo 5.3. Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	153

Tablo 5.4. Genel Olarak Boksit İçerisinde Bulunan Oksitli Alüminyum Minerallerinin Başlıcaları.....	155
Tablo 5.5. Alüminyum Saflık Derecesi.....	155
Tablo 5.6. Bazı Elementlerin Piling Bedworth Oranları	157
Tablo 5.7. Alüminyum Döküm Alaşımının Ticari Sınıflandırması.....	159
Tablo 5.8. TNT/Al Sisteminde Alüminyum Partikül Büyüklüğü Etkisi.....	167
Tablo 5.9. Alüminize RDX/HMX/TNT Sistemlerinin Karakteristikleri	168
Tablo 5.10. Çeşitli Üretim Tekniği ile Alüminyum Tozu Karakteristiği.....	176
Tablo 5.11. Çeşitli Tipteki Granül Alüminyum Tozunun Patlama Karakteristikleri	178
Tablo 5.12. NFPA 652 1 m ³ test Çemberinde Alüminyum Tozu Patlama Parametreleri	184
Tablo 5.13. Tanecik Boyutundaki Azalmanın Alüminyum Tozunun Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonuna Etkisi	186
Tablo 5.14. BIA, 1987 'den Alınan Alüminyum Tozunun Boyutsal Dağılımda Patlayıcılık ve Tutuşabilirlik Parametre Değerleri.....	187
Tablo 5.15. Atmosfer Basıncında Çeşitli Oksitleyici Gazlar İçerisindeki 6 µm Alüminyum Partiküllerinin Düz, Laminar Alevleri için Yanma Hızları ve Parlama Sıcaklığı	188
Tablo 5.16. Alev Yayılım Deneylerinde Kullanılan Beş Metal Tozunun Boyut Dağılımları	189
Tablo 5.17. Çeşitli Tozların Oksijen ile İnertlenmesinde Minimum Oksijen Konsantrasyonu.....	191
Tablo 5.18. O ₂ +N ₂ Atmosferinde İnertlenen Alüminyum ve Alüminyum Alaşım Toz Bulutları için İzin Verilen Maksimum O ₂ Konsantrasyonu.....	191
Tablo 5.19. 17 µm Ortalama Çapındaki Alüminyum Tozunun İnertlenmesinde Kullanılan İnert Maddeler İçin Alüminyum Tozu Konsantrasyon Aralığı.....	195
Tablo 7.1. Tesis 2 (Manisa)'nin Alüminyum Jant Sertleştirilmesi için Kullandığı Alaşım Standartı.....	210
Tablo 7.2. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Makinesi Teknik Özellikleri	213
Tablo 7.3. ICP-OES Cihazı ile Yapılan Element Tayinindeki Analiz Parametreleri Tablosu (Taslak).....	222

Tablo 7.4. Tesis 2 (Manisa) 100 Gram Numune için Elek Analizi Sonuçları.....	223
Tablo 7.5. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Ünitesi Son Ürünü 15 Gram Alüminyum Alaşımli Toz Yoğunluk Analizi	224
Tablo 7.6. Tesis 1 (Uşak) Tutuşturma Kaynakları	228
Tablo 7.7. HTEA Hata Olasılığı Derecelendirme	238
Tablo 7.8. HTEA Şiddet Derecelendirme	239
Tablo 7.9. HTEA Fark Edilebilirlik Derecelendirilmesi.....	240
Tablo 7.10. RÖS Derecelendirme	241
Tablo 7.11. HTEA Kontrol Tablosu	242
Tablo 7.12. Tesis 1 (Uşak) Risk Dağılımı	269
Tablo 7.13. HTEA Kontrol Tablosu	275
Tablo 7.14. HTEA Yöntemine Göre Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Ünitesi Risk Dağılımı	285

KISALTMA VE SEMBOLLER

μ :	mikron (10^{-6} m)
AA:	Alüminyum Birliği (Aluminium Association)
Al:	Alüminyum
Al_2O_3 :	Alüminyum Oksit
API:	Amerika Petrol Enstitüsü
APS:	Alt Patlama Sınırı
ASME:	American Society of Mechanical Engineers
ASTM:	American Society for Testing and Materials
Bar:	Basınç birimi
BLEVE:	Kaynayan Sıvı Genleşen Buhar Patlaması
BS:	İngiliz Standartları (British Standards)
BTE:	Bulut Tutuşma Enerjisi
BTS:	Bulut Tutuşma Sıcaklığı
$^{\circ}C$:	Derece Santigrat (Sıcaklık birimi)
CC:	Yanma Sınıfı (Combustion Class)
CNC:	Computer Numerical Control
CSB:	Chemical Safety and Hazard Investigation Board
ÇSB:	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
ÇSGB:	Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı
EN:	Avrupa Normu
EPA:	ABD Çevre Koruma Ajansı (U.S. Environmental Protection Agency)
ESD:	Elektrostatik Boşalma (Electrostatic Discharge)
ETA:	Olay Ağacı Analizi (Event Tree Analysis)
Exp-proof:	Patlamaya Dayanıklı
Fe:	Demir
Fe_2O_3 :	Demir Oksit
FMEA:	Hata Modu ve Etkileri Analizi (Failure Mode and Effects Analysis)
FTA:	Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis)

g:	Gram
H ₃ BO ₃ :	Borik Asit
HAZOP:	Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi (Hazards and Operability Analysis)
HETAB:	Tehlike Değerlendirme ve Teknik Destek Şubesi (Hazard Evaluations and Technical Assistance Branch)
HTEA:	Hata Türü ve Etkileri Analizi
Hz:	Hertz
ICC:	ICC Uluslararası Kod Konseyi (International Code Council)
ICP-OES:	Endüktif Olarak Eşleşmiş Plazma-Optik Emisyon Spektrometresi (Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry)
IEC:	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IFC:	Uluslararası Yangın Kodu (International Fire Code)
ISO:	Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization)
km/sn:	Hız birimi
L:	Litre
SOK:	Sınırlayıcı Oksijen Konsantrasyonu
LPG:	Sıvılaştırılmış Petrol Gazı (Liquified Petroleum Gas)
m/sn:	Hız birimi
m:	Metre
m ² /g:	Spesifik yüzey alanı birimi
m ³ :	Metreküp
mbar:	Milibar
MBYH:	Maksimum Basınç Yükselme Hızı
Mg:	Magnezyum
MİK:	Minimum İnert Toz Konsantrasyonu
mJ:	Milijoule
ml:	Mililitre
mm:	Milimetre
MOK:	Minimum Oksijen Konsantrasyonu

MPK:	Minimum Patlama Konsantrasyonu
ms:	Milisaneye
MTE:	Minimum Tutuşma Enerjisi
MTS:	Minimum Tutuşma Sıcaklığı
NACE:	Avrupa Topluluğunda Ekonomik Faaliyetlerin İstatistik Sınıflaması
NaHCO ₃ :	Sodyum Bikarbonat
NaOH:	Sodyum Hidroksit
NFPA:	National Fire Protection Association (Ulusal Yangından Korunma Derneği)
NIOSH:	Ulusal Mesleki Güvenlik ve Sağlık Enstitüsü (National Institute For Occupational Safety And Health)
OSGB:	Ortak Sağlık Güvenlik Birimi
OSHA:	Mesleki Güvenlik ve Sağlık Derneği (Occupational Safety and Health Association)
PB:	Patlama Basıncı
P _i :	Başlangıç Basıncı (P initial)
PKD:	Patlamadan Korunma Dokümanı
PLG:	Basınölandırılarak Sıvılaştırılmış Gaz (Pressurized Liquid Gas)
P _{max} :	Maksimum Basınç
ppm:	Milyonda Bir Partikül (Parts Per Million)
PVCE:	Kısmen Sınırlanmış Buhar Bulutu Patlaması (Partially Confined Vapour Cloud Explosion)
RDX:	Royal Demolition Explosive
SDS:	Güvenlik Bilgi Formu (Safety Data Sheet)
TCDD:	Tetraklorodibenzo <p>dioksin</p>
TCP:	Triklorofenol
T _{kn} :	Kaynama Noktası
TLOC:	Sınırlandırma Kaybı (Total Loss of Confinement)
TNT:	Trinitrotoluene
TS:	Türk Standartları

UVCE: Sınırlandırılmamış Buhar Bulutu Patlaması (Unconfined Vapour Cloud Explosion)

ÜPS: Üst Patlama Sınırı

VCE: Buhar Bulutu Patlaması (Vapour Cloud Explosion)

XRF: X ışınları Floresans Spektroskopisi (X-Ray Fluorescence)

ρ : Yoğunluk (Özkütle)

σD : Parçacık Büyüklüğü Polidispersitesi



ÖZET

“ALÜMİNYUM TOZ PATLAMALARININ İNCELENMESİ VE REAKTİF- PROAKTİF ÖNLEM ÇALIŞMALARI”

Pınar SEZER

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selahattin GÖKMEN

Ocak 2019, Sayfa 329

Endüstrinin değişik kollarında (Boya, plastik, katalizör endüstrileri, gaz beton üretimi vb.) kullanılan alüminyum tozu üretimi dünyadaki ileri toz metalürjisine paralel olarak değişik boyutlarda olmak üzere hızla gelişme göstermiştir. Alüminyum tozunun üretiminde ve tozlanmanın meydana geldiği yüzey hazırlama gibi işlemlerde veya alüminyum tozunun kullanıldığı alanlarda en önemli sorun metalik tozun patlama riskidir. Alüminyum tozuyla yapılan çalışmalarda ise alınması gereken önlemlerle ilgili yönergelerin ve talimatların hazırlanması mutlaka gereklidir. Bu araştırmada genelden özele patlama türleri, toz patlamaları, alüminyum tozu patlamaları incelenmiş ve alüminyum toz patlaması ile ilgili iki farklı tesiste incelemelerde bulunmuş ve özellikle, tozlanmanın ve küçük çapta bazı patlamaların meydana geldiği bir alüminyum jant fabrikasında, ilgili risk değerlendirmesi ve toz numunesi analizleri yapılarak literatür bilgileri ışığında yorumlanmış ve proaktif önlemler önerilmiştir. Alüminyum jant fabrikasında mevcut olan risk analizlerinde patlama özelinde çalışma yapılmadığı ve patlama önleme için yanlış uygulama yapıldığı tespit edilmiştir. Alüminyum jant fabrikasında boya öncesi hazırlık olan kumlama ünitesinin filtre bölümünde önceden meydana gelmiş olan bazı patlamaların tekrar gerçekleşmemesi kullanmakta oldukları otomatik köpüklü söndürme sisteminin; önlemenin aksine, sıcakta demir tozlarıyla yanıcı hidrojen gazı oluşturarak patlama tehlikesinin büyümesine yol açacağından, bunun yerine alüminyum tozu ve/veya oksijen konsantrasyonlarının azaltılması gerekir. Ayrıca, Al'un ortamdaki demir oksitle (Fe_2O_3) aluminotermi tepkimesi verebilecek olması tehlikeyi artıracaktır. Ortamda kullanılan borik asitin

toz taneciği boyutunun azaltılması ve miktarının artırılmasıyla asılı Al tozu konsantrasyonu dűşürűlműş olacaktır. Uygulanabilmesi halinde filtre ortamına verilecek inert gaz olan, ticari sahada kolaylıkla bulunabilen ve maliyeti makul seviyede olan azot gazı (N₂) ile ortamın oksijen konsantrasyonu da dűşürűlebilir. Ayrıca, jant üretimi tesisinin Al tozunun bulunduğu kısımlarda ilave önlem bakımından patlama korumalı ekipmanlarla (exproof) çalışılmasının ve iyi topraklama yapılmasının çok önemli olduğu unutulmamalıdır.

Anahtar Kelimeler:

Alüminyum Tozu, Alüminyum Toz Patlaması, Toz Patlamaları, İş Sağlığı ve Güvenliği, Patlama Riski ve Güvenliği

ABSTRACT

“INVESTIGATION OF ALUMINUM DUST EXPLOSION AND REACTIVE-PROACTIVE PREVENTION APPLICATION STUDIES”

Thesis Consultant: Prof. Dr. Selahattin GÖKMEN

December 2018, 329 pages

The production of aluminum powder used in different branches of industry (paint, plastic, catalyst industries, gas concrete production, etc.) has developed rapidly in parallel with the advanced powder metallurgy in the world. The most important problem is the risk of explosion of metallic dust in the production of aluminum powder and in the processes such as surface preparation where dusting occurs, or in areas where aluminum powder is used. In the case of work done with aluminum powder, it is absolutely necessary to prepare the instructions and guidelines regarding the precautions to be taken. In this study, from the general to the particular, explosion types, dust explosions, aluminum powder explosions were investigated and examined in two different facilities related to aluminum powder explosion and especially in an aluminum wheel factory where dusting and some small explosions occurred, the related risk assessment and powder sample analysis have been carried out and proactive measures have been proposed. Existing risk analysis in the aluminum wheel factory have been determined that the explosion specific work hasn't been done and the explosion prevention application which is currently used is inappropriate. In the aluminum wheel factory, it is determined that the automatic foamed extinguishing system, which is used in the filter section of the sandblasting unit in order to prevent to occur the explosions that already occurred, will bring a number of dangers by producing hydrogen gas with hot iron powders that are contrary to the prevention, instead, by reducing the concentration of dust or concentration of oxygen have been highlighted. Furthermore, the fact that aluminum can react with iron(III) oxide (Fe_2O_3) in the filter atmosphere and this will increase the danger. It has been concluded that by reducing the powder particle size and

increasing concentration of the boric acid which is already using for suppression, will reduce the concentration of the aluminum powder in the filter medium. If applicable, the oxygen concentration of the filter medium can be reduced by the use of nitrogen (N₂), which is an easily available inert gas in the commercial area at a reasonable cost. It should also be noted that it is very important to work with explosion-proof equipment (exproof) and good grounding in the presence of aluminum dust in the wheel production facility.

Key words:

Aluminum Powder, Aluminum Dust Explosion, Dust Explosions, Occupational Health and Safety, Explosion Risk and Safety

BÖLÜM 1: GİRİŞ

Tüm metal ve metal dışı sektörlerde, üretim, işleme ve taşıma esnasında meydana gelen tozlaşma dolayısı ile toz patlama riski oluşmaktadır. Özellikle çok ince toz halinde patlama riski bulunan alüminyum gibi yüksek yanıcılık ve patlayıcılık gösteren tozların üretimi, işlenmesi, taşınması ve hatta yan ürün olarak ortaya çıkması durumlarında toz patlaması riski büyük artış göstermektedir.

Yanıcı tozların kullanıldığı endüstriyel tesislerde toz patlamalarının oluşmasını önlemek oldukça güçtür. Sanayide kullanılan kömür, odun, ilaçlar, bazı metaller ve hatta un, nişasta gibi organik maddeler dahil olmak üzere endüstride kullanılan birçok toz, uygun ortam oluştuğunda–havadaki konsantrasyonu yeter düzeye ulaştığında ve uygun bir ateşleyici ile karşılaştığında–patlayabilir. İnce dağılmış katı maddeler (ince tozlar), havada dağıldıklarında, şiddetli ve tahribatlı patlamalar meydana getirebilir. Aspirin, alüminyum, şeker veya süt tozu gibi normalde yanıcı olmadığı düşünülen materyaller bile, dağılmış tozlar halinde yakıldığında patlamalar meydana gelebilir (NFPA, 921, s. 245). Patlamanın olabilirliği ve meydana gelmesi halinde şiddeti; malzemenin patlayıcılık özelliğine, partikül boyutuna, tozun bir toz bulutu olarak yayılacağı veya asılı kalacağı atmosferin ihtiva ettiği ve yanmayı destekleyecek oksitleyici maddenin yeterli düzeyde olmasına, toz bulutunun patlama aralığındaki konsantrasyona ulaşmış olmasına, toz bulutunun, tutuşmayı başlatacak düzeyde enerjiye sahip bir ateşleyiciyle karşılaşmasına bağlı olarak değişim gösterecektir (Barton, 2002).

Toz patlaması, şiddeti ve yıkıcılığı yönünden genel bir önyargı olarak, gaz patlamalarına nazaran daha masum bilinmektedir. Ancak bilinenin aksine, tetik mekanizması içinde ise domino etkisi ile zincirleme patlamalara neden olmakta ve büyük can ve mal kayıplarına neden olmaktadır (Tablo 1.2) Alüminyum tozunun Tablo 1.1.'de görüldüğü gibi, diğer organik tozlara ve hatta metal tozlarına nazaran K_{st} oranı da oldukça yüksektir ve patlama şiddetinin oldukça yüksek ve sonuçları bir o kadar yıkıcıdır.

Tablo 1. 1. Bir Dizi Toz için Toz Patlama Özellikleri

Toz Tipi	MTE (Toz bulutu) mJ	MTS (Toz bulutu) °C	MTS (Toz katmanı) °C	P _{max} bar	K _{st} ** bar ms ⁻¹	MPK g m ⁻³	SOK % hacim
Antrakinin	3	550	Süblimleşme	9.1	298	30	□
Leblebi tozu	40	560	260	□	□	□	15
Linyit Kömürü	30	390	180	11.0	151	60	12
Alüminyum	15	550	740	13.0	750	60	5
Kömür	60	610	170	9.8	114	15	14
Selüloz	80	480	270	11.0	125	30	9
Mısır unu	40	380	330	10.3	125	60	9
Tahta	40	470	260	10.2	142	60	10
Buğday unu	50	380	360	9.8	70	125	11
Odu kömürü	20	530	180	10.0	10	60	□
Yağsız süt	50	490	200	9.8	125	60	□
Şeker	30	370	400	9.5	138	60	□
Sülfür	5	280	113	6.8	151	30	□
Magnezyum	80	450	240	18.5	508	30	□
Çinko	9600	690	540	7.8	93	250	6

Kaynak: (Barton, 2002, s.9)

Tablo 1. 2. 21. Yüzyılda Meydana Gelmiş Büyük Toz Patlaması Olayları

Toz	Yıl	Lokasyon	Ölüm	Yaralanma
Polietilen	2003	Kinston, Amerika	6	38
Fenolik Reçine	2003	Corbin, Amerika	7	37
Alüminyum	2003	Huntington, Hindistan	1	6
Şeker	2008	Wentworth Limanı, Gürcistan	14	36

Kaynak: (Amyotte, 2013, s. 23)

Patlamalar, yangın, şok dalgası ve kimyasal bozunum ile ortaya çıkan zehirli gazlara neden olabilir. Neticeleri can ve mal kaybına neden olabilecek patlama olaylarının proaktif çalışmalarla önüne geçmek adına gerekli risk değerlendirmeleri yapılmalı, olası patlama şiddetini azaltmak veya olası patlamanın önlenmesi için patlamadan korunma dokümanı hazırlanmalı, var ise son değerlendirmeler

neticesinde revize edilmeli ve gerekli tüm tedbirler alınmalıdır. Bu tedbirler, Avrupa Parlamentosu ve Komisyonu'nun ülkemizde Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik olarak kabul edilmiş olan 1999/92/EC direktifi ışığında patlamaların önlenmesi ve patlamadan korunma; patlama riskinin değerlendirilmesi, işyerinin güvenli hale getirilmesi, koordine görev dağılımının sağlanması, TS EN 60079-10 ve TS EN 60079-10-2 standartlarına göre patlayıcı ortam oluşabilecek yerlerin sınıflandırılması, bölge haritalarının çıkarılması ve patlamadan korunma dokümanı hazırlanması ile yapılır.

Tablo 1. 3. Alüminyum Üretimi NACE (Tehlike Sınıfı Listesi)

07.29.02	Alüminyum madenciliği	Çok tehlikeli
24.42	Alüminyum üretimi	
24.42.16	Alüminyum folyo imalatı (alaşımdan olanlar dahil)	Tehlikeli
24.42.17	Alüminyum imalatı (işlenmemiş halde)	Çok tehlikeli
24.42.18	Alüminyum sac, levha, tabaka, şerit imalatı (alaşımdan olanlar dahil)	Tehlikeli
24.42.20	Alüminyum oksit imalatı (suni korindon hariç) (alümina)	Çok tehlikeli
24.42.21	Alüminyum bar, çubuk, tel ve profil, tüp, boru ve bağlantı parçaları imalatı (alaşımdan olanlar dahil)	Tehlikeli
25.12.04	Alüminyum kapı, pencere, bunların kasaları, kapı eşiği, panjur vb. imalatı	Tehlikeli
25.99.09	Alüminyum jaluzi perde imalatı	Tehlikeli

Kaynak: www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/yonetmelik/9.5.16909-Ek.xls, Erişim tarihi: 25 Eylül 2018

Araştırmanın bu bölümünde problem, araştırmanın önemi, araştırmanın amacı, araştırmanın konusu, amacı, hipotez ve sınırları açıklanmaktadır.

1.1. Problem

Alüminyum üretim tesislerinin Tablo 1.3.'de görüleceği gibi NACE tehlike sınıflandırması tehlikeli ve çok tehlikeli bölge olarak tanımlanmıştır. Alüminyumun fiziksel, kimyasal ve mekanik özelliklerinden ve kolay işlenebilirliğinden, ayrıca dünyada ve Türkiye'de oldukça tatmin edici bir düzeyde rezerv bulunduğundan, diğer metallere nazaran geç farkedilmiş genç bir metal olmasına rağmen alüminyum sanayiinin gün geçtikçe ilerlemesi, beraberinde bir çok problemi getirmektedir. Yüksek yanıcılık ve patlayıcılık özelliği gösteren mikron düzeyinde alüminyum tozunun da dahil olduğu toz patlamaları, yaralanmalar ve can kayıplarının yanı sıra mali olarak da kayıplara neden olmaktadır. Maliyeti etkileyen faktörler;

- a) Çalışanların ölümü veya yaralanma riski (iş yeri çalışma ve gün kaybı),
- b) Tesisin kapatılması veya yeniden yapılanması,
- c) Ekipman değişimi,
- d) Değiştirilebilir ürün çeşitliliğinin gözden geçirilmesi,
- e) Çalışma süresinin düşmesi,
- f) Ürün tesliminde sorunların ortaya çıkması,
- g) Pazarda hisse senetlerinin düşmesi,
- h) Ortakların güvenlerini yitirmeleri,
- ı) Yıllık kar kaybının önlenememesi,
- i) Sigorta işlemlerinde ağır şartların ortaya çıkması şeklinde özetlenebilir (Ergür, 2012).

Yangın ve patlama tedbirleri konusunda organizasyonel ve teknik tedbirler hakkında özellikle firma yöneticilerin ve firma dahilinde tam zamanlı çalışan veya OSGB tarafından atanmış iş güvenliği uzmanlarının bilgi sahibi olması gerekmektedir.

1.2. Araştırmanın Konusu

Araştırmanın konusu, bir toz üretimi yapan fabrikada ve yan ürün olarak çok ince mikron düzeyinde alüminyum tozu meydana gelen bir alüminyum jant

tesisinde, olası bir toz patlamasının önüne geçmek için gereken reaktif ve proaktif önlem çalışmaları hususunda mevcut uygulamaların incelenmesi ve revize edilmesidir.

1.3. Araştırmanın Amacı

Bu tez çalışmasının amacı, yüksek yanıcılık ve patlayıcılık özelliği gösteren alüminyum tozunun sebep olduğu kazaları meydana getiren nedenleri anlaşılır kılmak ve reaktif-proaktif yaklaşımla risklerin belirlenip, gerekli önlemlerin alınabilmesi adına araştırmacılara ışık tutması ve benzer nitelikteki tesislere rehber niteliği taşıması olup, dört alt başlık altında toplanabilir;

- Alüminyum tozu ile çalışan, alüminyum tozu üreten ve atık ürün olarak mikron düzeyinde alüminyum tozu meydana gelen tesislerde iş güvenliği alanında yangın ve patlama özelinde tamamlayıcı bilgileri sunmak,
- İş güvenliği ile ilgili şirket politikaları oluşturulmasına yardımcı olmak,
- Kalitatif ve kantitatif değerlendirme yolu ile kaza ve riskleri azaltmak
- Alüminyum tozu üretimi, işlenmesi, depolanması sırasında oluşabilecek risklerin tahmin edilebilir düzeyini artırmaktır.

1.4. Hipotez

Genelden özele patlamalar, toz patlamaları ve alüminyum tozu patlamaları ile ilgili tamamlayıcı bilgiler ve ilgili mevzuat/standartlar ışığında, alüminyum tozu üretimi yapılan ve atık ürün olarak mikron düzeyinde alüminyum tozu meydana gelen gerçek üretim tesislerinde patlama özelinde yapılan reaktif-proaktif yaklaşımlı risk değerlendirmeleri ile tesislerden alınan alüminyum tozu numunelerinin analizlerinin yapılması suretiyle, toz patlamasının meydana geleceği şartlar ve alüminyum tozunun tutuşabilirlik eşik değerlerinin saptanması, böylece mevcut yangın-patlama olayları ve ramak kaza vakalarının incelenmesi ile reaktif; olası tehlikelerin belirlenerek ise proaktif önlemlerin alınması ve böylece yangın-patlama tehlikelerinin yok edilmesi veya tolere edilebilir seviyelere indirilmesi mümkündür.

1.5. Araştırmanın Önemi

İş sağlığı ve güvenliği kuralları genel olarak bütüne yayılarak tüm iş yapılan iş kollarına atfedilmiş ancak, tehlikeli madde kullanımı, yüksekte çalışma ve kapalı alanda çalışma gibi konularda diğer tüm iş kollarına göre çok daha tehlikeli kabul edilerek kendi özelinde maden, inşaat gibi bazı iş kollarına yönetmelik çıkarılmıştır. Yönetmeliklerde bu iş kolları için detaylı güvenlik önlemleri verilmiştir. Diğer iş kolları için ise güvenlik önlemleri genel olarak ele alınmıştır.

Parlayıcı, patlayıcı, tehlikeli ve zararlı maddelerle çalışılan iş yerlerinde, mevzuatımızda yer alan ve spesifik olarak zararlı ve/veya tehlikeli madde için değil, genel içeriğe yer veren ve bu yönde güvenlik önlemleri sunan yönetmelikler mevcuttur. Tez için yapılan çalışmalarda, özellikle alüminyum tozu patlamaları ile ilgili spesifik bir çalışmaya rastlanmamıştır. Çalışma sahası olarak geniş yer bulan alüminyum birincil, ikincil üretim ve alüminyum metali işlenmesi ile ilgili sektörlerde ve dünyada önemli yer bulan ve Türkiye’de, özellikle güvenlik bilgisi eksikliği nedeni ile uygulamadan kaçınılan alüminyum tozu üretim tesisleri için önlem kılavuzu bulunmamaktadır. Bu gibi, spesifik önlemler gerektiren birçok iş kolunda mevzuata paralel ve özel olarak hazırlanmış teknik güvenlik kılavuzları oluşturulması, iş sağlığı ve güvenliği konusunda belirli standartların oluşmasında temel oluşturabilecek ve ülke olarak iş sağlığı ve güvenliği konularında güçlenmemizi ve hatta sanayi alanında gelişmemizi sağlayabilecektir.

Bu tez çalışması, alüminyum tozu üreten veya atık ürün olarak mikron düzeyinde alüminyum tozu meydana gelen iki ayrı tesiste, toz patlamaları özelinde yapılacak risk değerlendirmeleri ve alınacak toz numuneleri ile yapılacak toz analizleri ile, toz patlama parametreleri karakteristikleri ve birbirleriyle etkileşimleri açısından toz patlamaları olasılığını oluşturan çok önemli veriler sunacaktır.

1.6. Araştırmanın Sayıtları

- Bu tez çalışmasında kullanılan alüminyum tozu patlayıcılık eşik değerleri olarak literatürde laboratuvar deneyleri ile saptanmış veriler (minimum

patlayabilir alüminyum tozu partikül boyutu: 70 mikron, MPK: 60 g/m³, MTE: 15 mJ, MTS (toz bulutu): 650°C, MTS (toz katmanı): 740°C, SOK: 5 g/m³) kabul edilmiştir.

- Tez çalışması örneklerinden biri olan alüminyum jant tesisinden alınan Al tozu numunelerinin, şirket yöneticilerinin ve firma bünyesinde tam zamanlı çalışan A sınıfı İSG uzmanının verdiği bilgiler doğrultusunda, araştırmanın yapıldığı kumlama makinesinde daha önce meydana gelmiş ufak çaplı toz patlamalarını meydana getiren tozları temsil edecek şekilde, Al dökümde kullanılan Al ve diğer sertleştirme maddelerinin dünyada kullanılan standartlar doğrultusunda belirlenmiş oranlarda katıldığı, kumlama ünitesinde kullanılan demir bilyaların da standartlar doğrultusunda belirli oranlarda katıldığı kabul edilmiştir.

1.7. Araştırmanın Sınırlılıkları

- Tez çalışması, araştırma örneğine dahil edilen iki tesis ile sınırlı tutulmuştur. Çalışma, Uşak Organize Sanayi Bölgesi (U.O.S.B)'nde bulunan ve alüminyum folyodan atık geri dönüşümü ile alüminyum tozu üretimi yapan tesisin tümü ve Manisa Organize Sanayi Bölgesi (M.OS.B)'nde yer alan alaşımlı alüminyum jant üretimi yapan tesiste, ufak çaplı patlamaların meydana geldiği kumlama ünitesi araştırması ile sınırlı tutulmuştur.
- Bu tez çalışmasında, uygulama yeri olarak, Uşak Organize Sanayi Bölgesi'nde yer alan Türkiye'de ilk kez alüminyum folyodan alüminyum tozu üretimi yapan bir alüminyum tozu üretim tesisi ve Manisa Organize Sanayi Bölgesi'nde yer alan alüminyum jant üretim tesisi kullanılmıştır.
- Ölçme aracı olarak, literatür araştırmasında patlamalar için en uygun risk analiz yöntemlerinin Fine Kinney, HTEA (FMEA) ve HAZOP olduğu bilgisine varılmıştır. Bu tezde, toz patlamalarına uygunluğu nedeni ile HTEA yöntemi uygulanmıştır.

- Laboratuvar deneyleri olarak, Türkiye’de alüminyum patlama parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan cihaz yetersizliği nedeni ile alüminyum jant tesissinden alınan toz numunesinin yanıcılık ve patlayıcılığını belirleyecek olan partikül boyutu ve kuşlama ünitesi filtre ortamındaki konsantrasyonunu ölçmek için elek analiz yöntemi ve xrf cihazı ile % elementel analiz yöntemi kullanılmıştır. Cihazlarla ilgili genel bilgi Bölüm 7’de verilecektir.



BÖLÜM 2: PATLAMA VE TÜRLERİ

Tez çalışmasının bu bölümünde, genel olarak tüm endüstriyel tesislere bilgi verecek nitelikte yangın ve patlama konusunda genel güncel literatür bilgisi, patlama çeşitleri ve örnek patlama vakaları anlatılmaktadır.

2.1. Yanma Üçgeni, Yangın Dörtüzlüsü

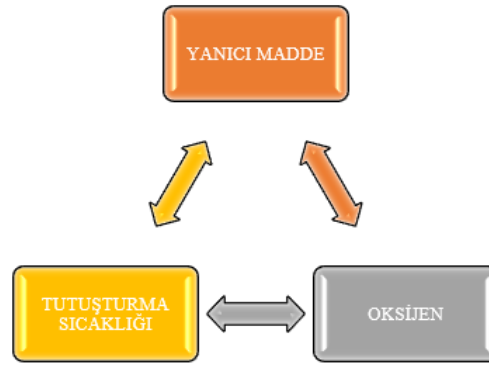
Yanma, ısının açığa çıkması ve alev ile karakterize olmuş, bir yakıt ile oksitleyici madde arasındaki tepkimeyle kendi kendine sürdürülebilir bir tepkimedir (Colannino, 2006). Başka bir ifade ile yanma, tutuşmuş bir yakıtın hızlı ekzotermik oksidasyonudur. Yakıt katı, sıvı veya buhar formunda olabilir, ancak buhar ve sıvı yakıtların tutuşturulması genellikle daha kolaydır. Yanma daima buhar fazında gerçekleşir; sıvılar uçucudur ve katı maddeler yanmadan önce buharlaşır (Crowl ve Louvar, 2001).

Genel olarak yanma reaksiyonu;

$C_xH_y + (x+y/2)O_2 \rightarrow xCO_2 + (y/2)H_2O + \text{Enerji}$ olarak gösterilebilir (Öztop ve Uçar, 2009)

Yanma olayının başlaması için gerekli olan öğeler yakıt, oksijen ve bir tutuşturma kaynağı olup, bu üç öğeden herhangi birinin noksanlığı neticesinde yanma olayı gerçekleşmeyecektir. Yani, alevlenebilir veya yanabilir bir materyal (yakıt), bir oksiteyici (Oksijen gazı veya oksijen bakımından zengin olan bir bileşik) ve ısı kaynağı (direkt ısı kaynağı olabileceği gibi, yakıt veya oksitleyici madde karışımları için gerekli olan tutuşma sıcaklığına ulaşmış ortam ısısı da aynı işlevi görecektir). Bu üç öğe “Yanma Üçgeni” olarak adlandırılmaktadır. En basit tanımı ile yanma, yakıt ile oksijenin, yakıtın depoladığı ısıl enerjiyi, yüksek sıcaklığa sahip gazlar üreterek, açığa çıkmasına yol açan kimyasal tepkimedir. Yangının oluşması için ise, bu üçgeni oluşturan öğelere ilaveten “kimyasal reaksiyon zinciri” eklenir.

Yanmanın başlamasından sonra tekrarlanan oksidasyon oranı ise bu “kimyasal reaksiyon zinciri”nin oluşmasına sebep olacaktır. Ancak, bu dört öge bir araya geldiğinde yangın olayı meydana gelecektir. Bu dört ögenin birlikteliğine “Yangın Dörtüzlüsü – *Fire Tetrahedron*” adı verilmiştir. Yangının çıkmasını engellemek ya da başlayan bir yangını söndürmek aslında bu kimyasal reaksiyon zincirinin kırılması esasına dayanmaktadır.



Şekil 2.1. Yanma Üçgeni



Şekil 2.2. Yangın Dörtüzlüsü

2.1.1. Yanmanın fiziksel ve kimyasal olarak incelenmesi

Yanma, yanıcı maddelerin özelliklerine bağlı olan ve birçok adımı içeren karmaşık bir süreçtir. Düşük sıcaklıklarda, yanıcı maddelerin oksidasyonu alev olmadan çok yavaş bir şekilde oluşabilir. Sıcaklık yükseltildiğinde, örneğin dışarıdan ısıtma ile oksidasyon oranı artacaktır. Reaksiyon maddelerinin sıcaklığı ise ‘tutuşma sıcaklığının’ üstüne çıktıkça, üretilen ısı ortamda kaybolan ısıdan daha büyük olacaktır ve bir alev gözlenecektir (Akhavan, 2011).

2.2. Patlama

Bir yangın ve patlama arasındaki fark, bu olayların meydana geldiği zaman çerçevesine bağlıdır (Crowl, 2010) ve yangınla patlama arasındaki en önemli fark, enerji salınım oranıdır¹. Yangında enerji salınımı çok yavaş olurken, patlamada enerji salınımı mikrosaniyeler mertebesinde gerçekleşecektir (Crowl ve Louvar, 2001). Yangınlar tipik olarak malzemelerin yanmasını içeren daha yavaş olaylardır.

Patlamalar, çok kısa bir süre içerisinde ani enerji salınımından kaynaklanır ve yanma veya diğer kimyasal reaksiyonları içerebilir veya içermeyebilir. Yangının bir patlamaya öncülük etmesi veya tam tersi olarak patlamanın bir yangına öncülük etmesi olasıdır ve hatta ortamda yanıcı gazların veya sıvıların bulunması ikincil patlamalara yol açabilir. Çoğunlukla patlamanın ne olduğu anlaşılabilmesine rağmen, detaylı teknik tanımlar çok basit değildir (Crowl, 2010).

Bir yangın neticesinde patlama veya bir patlama neticesinde yangın olayı vuku bulabilir. Literatürde, patlama ile ilgili birçok tanım yapılmıştır. Patlama fenomeninin tanımındaki bu karmaşa, patlamanın görünür sonuçlarından ziyade, patlamanın kaynağındaki farklılıklardan meydana gelmektedir.

Literatürde iki kategoriye ayrılan farklı tanımlar verilmektedir. Birincisi, güçlü bir basınç dalgasının veya patlama dalgasının aniden serbest bırakılması nedeniyle gürültüye odaklanmaktadır. Bu basıncın menşei, ister kimyasal isterse mekanik

¹Enerji salınımının, olası kaza sonuçlarına nasıl etki edeceğine en basit ve en günlük hayatta rastlanabilecek örnek olarak, otomobil lastikleri verilebilir. Otomobil lastiğinin içinde sıkıştırılmış hava vardır ve tahliye nozulundan yavaş yavaş gaz salınımı yapıldığında, lastik herhangi bir zarara uğramadan inecektir. Ancak, lastik, ani bir darbe ile yarılrısa, içerisindeki sıkıştırılmış hava aniden salınıverecek ve tehlikeli bir patlamaya neden olacaktır (Crowl ve Louvar, 2002).

enerji salınımı olsun, ikincil bir durumdur (ikincil patlama). Bu patlama tanımı, “ani patlama”nın basit tanımıdır. Tanımların ikinci kategorisi, kimyasal enerjinin ani bırakılmasından kaynaklanan patlamaları ifade eder. Bu, gazların, tozların ve katı patlayıcıların patlamalarını içerir. Buna binaen, kimyasal enerjinin serbest kalması üzerinde vurgu yapılır ve patlama buna göre tanımlanır. Bu durumda olası bir tanım "Patlama, sabit hacimde meydana geldiğinde ani ve belirgin bir basınç yükselmesine neden olan bir ekzotermal kimyasal işlem" olan birincil durum olarak (birincil patlama nitelendirilebilir (Eckhoff, 2016). Birincil ve ikincil patlamalar ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.1. 'de verilecektir.

Bir operatör gözünden açıklanacak olursa, patlama, yeterince küçük bir hacimden ve kısa bir zaman içerisinde, patlama kaynağından hareketle sonlu genlikte basınç dalgaları oluşturmak üzere enerjinin atmosfere salınımı olarak nitelendirilebilir. Daha önce belirtildiği gibi, literatürde patlama ile ilgili birçok tanım bulunmasına karşın, bahsi geçen bu tanım, endüstriyel tesis güvenliği ile ilgili patlamaları kapsamı açısından önemli olarak nitelendirilebilir (http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_5/431_448_ing.pdf ; Erişim tarihi: 25 Ekim 2017).

Kabaca ifade edilecek olursa, patlama; sıcaklık veya basıncın veya her ikisinin ani yükselmesi ile gerçekleşen fiziksel veya kimyasal ve fiziksel bozunmayı içeren ani bir reaksiyondur. Genel olarak, yanıcı gaz, buhar, sis veya tozların, yeteri kadar oksijen ihtiva eden bir hava ile temasında oluşur. Yani, bir başka deyişle, yanıcı toz, gaz veya buharın, hava ile oluşturduğu karışımın uygun oranlar dahilinde olması halinde tutuşturma enerjisi ile temas etmesi sonucunda yanma (oksidasyon) olayının çok kısa sürede meydana gelmesini sağlayan ve çok yüksek sıcaklık ve basınçta gaz açığa çıkaran fiziksel ve çoğunlukla fiziko-kimyasal tepkimelerdir.

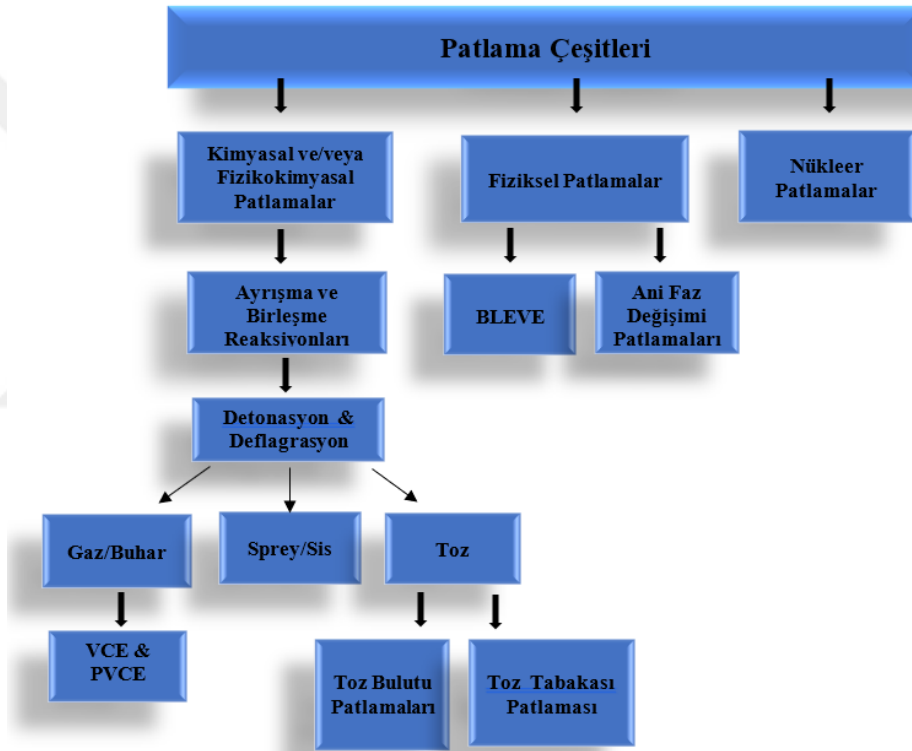
Patlamada asıl zarar veren, yani insan hayatı veya maddi kayba neden olan, sanılanın aksine, başlı başına patlama neticesinde oluşan basınç dalgaları değil, bu basınç dalgaları ile şarapnel etkisine neden olan parçalanmış veya çökmüş bina, çelik konstrüksiyon veya infilak eden tank sacı vb. katı parçalardır. Tüm bunların

yanı sıra, tesiste bulunan ve atmosfere salınan gazların yanıcı veya toksik olması halinde, domino etkisi ile hem büyük yangınlara neden olacak hem de toksik gaz bulutlarının oluşmasına neden olacaktır

(http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_5/431_448_ing.pdf ; Erişim tarihi: 25 Ekim 2017).

2.2.1. Patlama çeşitleri

Patlamalar; Kimyasal/Fizikokimyasal, Fiziksel ve Nükleer Patlamalar olmak üzere üç temel başlıkta incelenebilir:



Şekil 2.3. Patlama Çeşitleri

Patlayıcıların genellikle dengesiz bileşikler olduğu unutulmamalıdır. Ekzotermik ayrışma veya birleşme reaksiyonu başladıktan sonra sıcaklık yükselir ve reaksiyon hızlanır; genellikle durdurulamaz (<http://www.chemistryexplained.com/DiFa/Explosions.html>, Erişim tarihi: 18 Şubat 2018).

2.2.1.1. Kimyasal ve/veya fizikokimyasal patlamalar

Kimyasal / fizikokimyasal patlamalar kabaca ifade edilecek olursa, mekanik ve/veya ani bir kimyasal reaksiyon neticesinde kimyasal bozunma ve fiziksel bozunma içeren gazın ani genişmesi neticesinde oluşan basıncın, ani ve hızlı bir biçimde yer değiştirmesinin neden olduğu şok dalgalarının meydana geldiği patlamalardır (Crowl ve Louvar, 2001).

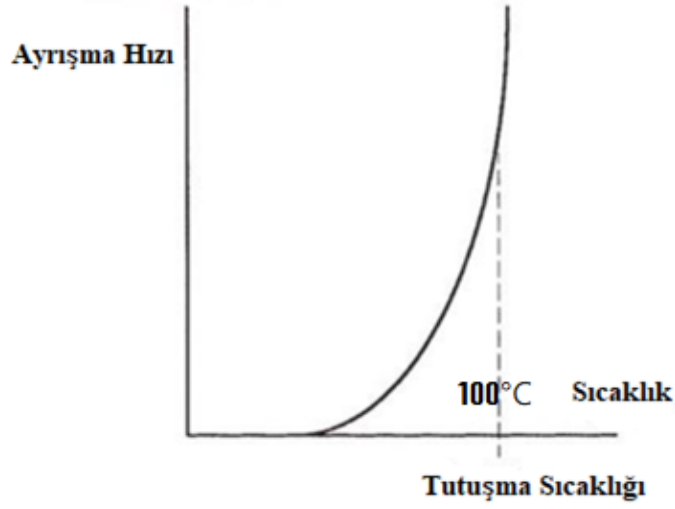
Örnek olarak, fiziksel bir patlama olan BLEVE patlamasında, basınçlandırılmış şekilde depolanan yanıcı gaz veya sıvının gaz fazında atmosfere salınması ve herhangi bir tutuşturucu ile reakte olması fiziksel bir patlama neticesinde sekonder bir kimyasal patlamanın meydana gelmesine neden olabilir. Bu patlama “fizikokimyasal” bir olay olarak nitelendirilebilir (Crowl ve Louvar, 2001).

Kimyasal patlamalar, kimyasal ayrışma veya birleşme reaksiyonları olup, her iki durumda da netice ekzotermiktir.

Kimyasal / fizikokimyasal patlamalar; UVCE, VCE, PVCE, toz patlamaları, Gaz/buhar patlamaları, Sprey/sis Patlamaları olarak sınıflandırılabilir.

2.2.1.1.1. Ayrışma reaksiyonu

Tüm patlayıcı maddeler, patlamaların gerçekleştiği sıcaklığın çok altındaki sıcaklıklarda termal ayrışmaya maruz kalırlar. Termal ayrışma sırasında, çok fazla ısı üreten ekzotermik reaksiyonlar gerçekleşir. Bu ısının bir kısmı atmosfere salınır (kayıp ısı) ancak kalan ısı patlayıcıların sıcaklığının yükselmesine neden olur. Meydana gelen ısı oranı, kayıp ısı oranından daha büyük olduğunda kendiliğinden ayrışma, yani tutuşma meydana gelecektir (Akhavan, 2011).



Şekil 2.4. Bir Patlayıcının Ayrışma Hızına Tutuşturma Sıcaklığının Etkisi (Akhavan, 2011, s. 182)

Patlayıcı maddelerin ayrışması genel olarak yukarıdaki grafikte verilen eğriyi takip eder. Şekil 2.4, 100°C'nin altındaki sıcaklıklarda oranın çok yavaş yükseldiği ve sonra sıcaklığın, patlayıcının tutuşturma sıcaklığına yaklaştıkça aşırı yükseldiği görülmektedir (Akhavan, 2011).

TNT, TNG, TATB, HMX, HNS gibi yüksek tutuşturma sıcaklıklarına sahip patlayıcılar ayrıca ısıya karşı yüksek kararlılığa sahiptir, oysa düşük tutuşturma sıcaklıklarında ısıya karşı düşük bir kararlılığa sahiptir (Akhavan, 2011).

Kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ve salınan enerjinin ancak bir kısmı işe dönüştürülebilir. Ayrışma reaksiyonlarına örnek TNT (trinitrotoulen veya nitrogliserin) verilebilir. Bu bileşiklerin molekülleri oksijen ihtiva ettiğinden, moleküller ayrıştığında ürünler yüksek sıcaklıkta ürün olarak elde edilen yanma gazları olacaktır (Akhavan, 2011). Oluşan bu gazlar, hacmen, patlayıcıya kıyasla daha büyüktür ve reaksiyon bölgelerinde yüksek basınç meydana getirecektir. 2.2.1.1. 'de de bahsi geçtiği gibi, bu gazların hızla genişmesi ve genişleyen bu gazların hızlı ve ani bir biçimde yer değiştirmesi şok dalgalarını oluşturacaktır.

Asetilen gibi moleküllerinde oksijeni olmayan bazı hidrokarbonlar ayrışma sırasında patlayabilir. (<http://www.chemistryexplained.com/Di-Fa/Explosions.html>, Erişim tarihi: 18 Şubat 2018)

2.2.1.1.2. Birleşme Reaksiyonu

Birleşme reaksiyonlarında ise iki ayrı komponentin sıcak gaz üretmek için ekzotermik olarak reaksiyona girmesini gerektirir. ANFO (Amonyum nitrat ve fuel oil, barut, potasyum nitrat, karbon ve sülfür ile havai fişekler bu ekzotermik birleşmeye örnek olarak verilebilir. Bu tür patlama reaksiyonlarında, patlamayı oluşturan reaktif maddeler, reaksiyonun devamını sağlamak amacı ile dikkatli bir biçimde karıştırılmalıdır. Bunun nedeni, patlamanın meydana getirdiği hasarın, kısmen de olsa, patlayıcı reaksiyonun ne kadar hızlı gerçekleştiği ile ilintilidir (Akhavan, 2011).

Patlayıcı kompozisyonlara eklenen birçok bileşen vardır. Kendi içinde patlayıcı olmayan ancak patlayıcıların gücünü artıran ve aynı zamanda hassasiyeti azaltan birçok element, bir araya geldiğinde birleşme reaksiyonu neticesinde patlayıcılık özelliği gösterirler (Akhavan, 2011).

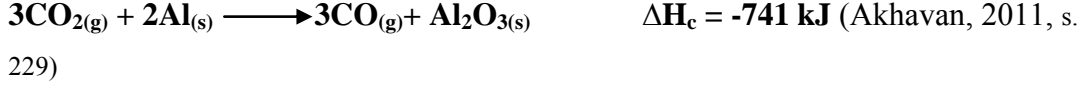
Ayrışma ve birleşme reaksiyonları karşılaştırıldığında, ayrışma reaksiyonlarının daha hızlı gerçekleştiği görülür. Daha yıkıcı ve tahribat verici etkiye sahip oldukları için, daha çok askeri uygulamalarda kullanılmaktadır. Birleşme reaksiyonu patlamaları ise daha yavaş oranlarda gerçekleştiği ve daha az tahribata neden olduğu için madencilik ve inşaat faaliyetlerinde sıkça kullanılır (Akhavan, 2011).

2.2.1.1.2.1. Alüminyum İlavesi

Alüminyumun hava ile reaksiyonundaki oksidasyonu 1590 kJ'luk enerji açığa çıkaracak şekilde ekzotermik bir reaksiyondur;



Patlayıcı bileşiklerinde oksijen noksanlığı durumunda, alüminyum özellikle gazlı ürünlerle reakte olacaktır.



2.2.1.1.3. Deflagrasyon ve detonasyon

Genel olarak, iki tür kendiliğinden yayılan yanma dalgası vardır: Deflagrasyon ve detonasyon (infilak).

Deflagrasyon, basıncın tepkime cephesi boyunca yayıldığı bir genişleme dalgasıdır ve yanma ürünleri, dalganın yayılmasının tersine bir doğrultuda hızla uzaklaştırılır. Deflagrasyon dalgaları, karşısındaki reaktanlara nazaran ses hızından daha düşük hızda yayılır (Lees, 2012).

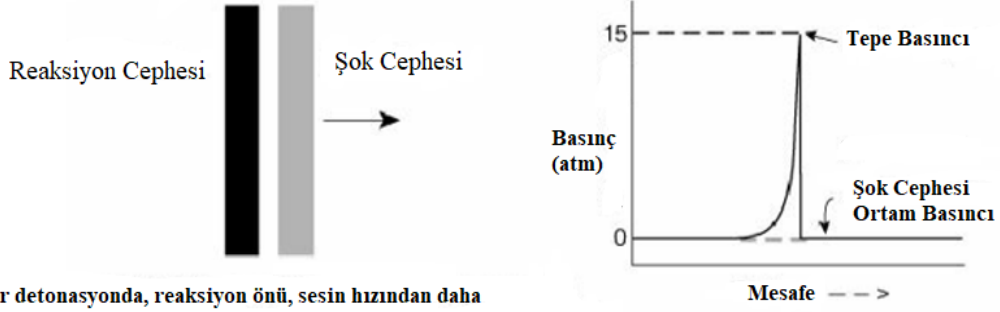
Deflagrasyon genellikle termal iletkenlik yoluyla yayılan ses hızından düşük (*subsonic*) yanmayı tanımlayan teknik bir terimdir (sıcak yanan malzeme bir sonraki soğuk malzeme tabakasını ısıtır ve tutuşturur). Gündelik hayatta bulunan, alevlerden patlamaya kadar çoğu “yangın” teknik olarak deflagrasyondur. Deflagrasyon, seston hızlı (*supersonic*) olan ve şok sıkıştırması yoluyla yayılan patlamadan (detonasyon) farklıdır. Mühendislik uygulamalarında deflagrasyon patlamaları, detonasyondan daha kolay kontrol altına alınabilmektedir. Sonuç olarak, deflagrasyon, hedef bir nesneyi, genişleyen gazın gücü ile (silahdaki bir mermi veya içten yanmalı bir motordaki pistonu) hareket ettirmek için daha uygundur. Tipik olarak deflagrasyon örnekleri, bir fırındaki hava-yakıt karışımının veya içten yanmalı bir motorda hava-yakıt karışımının yanması, bir gaz sobası yanmasıdır.

Deflagrasyon, aynı zamanda yanıcı toz patlamalarını tanımlamak için sıklıkla kullanılan bir terimdir. Bir ateşli silahın içinde bir barutun ya da havai fişeklerde piroteknik² karışımların hızlı bir şekilde yanması olarak örneklendirilebilir.

Tutuşma sonrasında, yanma dalgası tutuşma kaynağından dışarı doğru yayılır. Yanma dalgaları reaksiyona giren maddeleri ürünlere dönüştürerek, reaksiyona giren maddelerin moleküllerinin kimyasal bağlarında depolanan potansiyel enerjiyi serbest bırakır ve daha sonra yanma ürünlerinin iç (termal) ve kinetik enerjisine dönüştürülür. Termodinamik ve gazların dinamiği ile ilgili durumlardaki büyük değişiklikler, açığa çıkan enerjinin bir sonucu olarak patlama reaksiyonları süreci içerisinde meydana gelir (https://www.osha.gov/dte/grant_materials/fy08/sh1779708/cd_instuctor_manual.pdf, Erişim tarihi: 7 Eylül 2018)

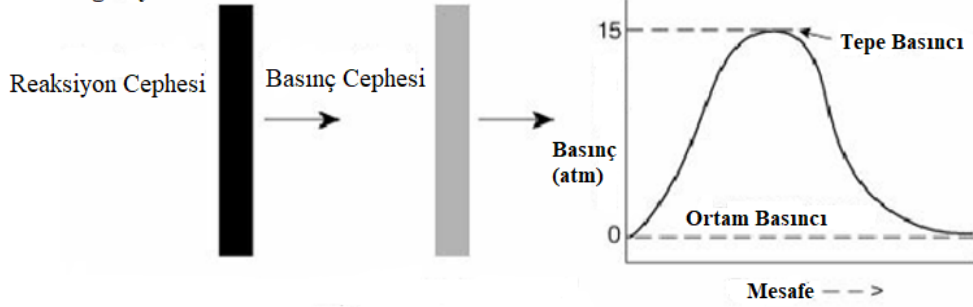
²Piroteknik, kimyasal bir reaksiyona girdiğinde ısı, ışık, gaz, sis veya ses verme özelliği olan maddelerdir (Akhavan, 2011).

Detonasyon



Bir detonasyonda, reaksiyon ötü, sesin hızından daha yüksek bir hızda hareket eder ve şok cephesini derhal harekete geçirir. Her iki cephede de aynı hızda hareket eder.

Deflagrasyon



Bir deflagrasyonda, basınç cephesi reaksiyon cephesinden ses hızında uzaklaşırken, reaksiyon cephesi sesin hızından daha düşük bir hızda hareket eder.

Şekil 2.5. Detonasyon ve Deflagrasyon (Crowl ve Louvar, 2001).

Detonasyon, önceden karıştırılmış bir gaz veya toz bulutu boyunca alevin şiddetli bir şekilde yayılmasıdır. Deflagrasyonun karakteristiği olan, yanmış buluttan yanmamış buluta moleküler veya türbülanslı ısı transferinin tersine, patlamanın kendisi tarafından meydana gelen buluttan geçen bir şok dalgasında, bulutun aşırı sıkıştırılmasıyla doğrudan tutuşma ile detonasyon meydana gelir (Eckhoff, 2006)

Buhar bulutu patlamasında, şok dalgaları ses hızından daha yavaş hareket ederse “deflagrasyon”, şok dalgası ses hızından daha hızlı hareket ederse “detonasyon” olarak anılır. Detonasyon, şok dalgalarının daha güçlü olması sebebi ile deflagrasyona kıyasla daha yıkıcıdır (<http://www.chemistryexplained.com/Di-Fa/Explosions.html>, Erişim Tarihi: 18 Şubat 2018).

2.2.1.1.3.1. Toz patlamasında detonasyon

Yanıcı bir toz bulutu içindeki patlama, bulut boyunca tek yönlü aşırı alev yayılımıdır. Patlama yayılımının deflagrasyon modunun karakteristik özelliği olan, ısının yanmış olan buluttan yanmamış olan buluta aktarımı ilgili değil bunun yerine ısı, süpersonik hızda bulut boyunca hareket ettirilen bir şok dalgasında yakalanan, yanmamış bulutun, aşırı, çok hızlı sıkıştırılmasıyla aktarılır. Toz bulutu içindeki patlama sadece yeterince güçlü bir şok dalgasıyla başlatılabilir. Böyle bir dalga, ya bulutun içinde patlatılan bir patlayıcı yüküyle ya da patlamanın kendisinin çalkantılı ivmelenmesiyle güçlü bir şokun kademeli olarak birikmesiyle sağlanabilir. Daha geniş bilgi Bölüm 4.1.'de verilmiştir.

Bir gaz bombası, odun ya da kağıdın yakılması ve hatta bir otomobilin silindiri içindeki benzin buharının yakılması gibi bir "sıradan" yanmadır. Bir deflagrasyonda, yanan bir madde, ateşi tutuşturacak ve yayılan ısı, sıcak gazlar, ısı enerjisi yüklü partiküller veya kıvılcımlar açığa çıkacaktır. Bir toz patlamasında, detonasyon o kadar hızlı gerçekleşir ki, ısıtılmış hava ve gaz halindeki yanma ürünleri (karbondioksit gibi) duvarları havaya uçurabilecek ve yapıları tahrip edebilecek aşırı hava basıncı üretir

(https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/combustible_dust.html, Erişim tarihi: 16 Mart 2018).

2.2.1.1.3.1.1. Patlayıcılar, havai fişekler, iticiler (ateşleyiciler)

Kimyasal patlayıcı madde sınıflandırmasına göre ele aldığımızda, daha yalın bir şekilde ifade edilecek olursa, genelde patlama (detonasyon) dalgası şeklinde yayılmayan fakat yanarak (deflagrasyon) kimyasal süreçlerini tamamlayan patlayıcılara en iyi örnek baruttur (<http://delmepatlatma.org/acikocakmadenciligindepatlatma%20syndromu%20110603060205d.pdf>, Erişim tarihi: 26 Haziran 2018). Barut, potasyum nitrat, kükürt ve odun kömürünün ağırlıkça yaklaşık %75: 10: 15 oranında mekanik olarak karıştırılması ile hazırlanan kuvvetli bir malzemedir. Kolayca ateşlenir ve yüksek oranda yanar. Yanma ürünleri, büyük miktarda yoğunlaştırılmış faz içerdiğinden, bu faktör, yanma ürünlerini yangın bombası durumuna getirir (Ermolaev ve ark., 2010)

Barut ve deflagrasyon-detonasyon ilişkisine baktığımızda, siyah tozun patlayıcı ve detonasyon özellikleri, amonyum nitrat (NH_4NO_3) veya amonyum perklorat (NH_4ClO_4) bazlı modern iticilerin ve bileşiklerinkinden büyük ölçüde farklıdır. Yüksek bir yanma özelliğine sahip olan barut, çelik kovanlar veya ince duvarlı plastik tüpler içerisinde dahi deflagrasyondan detonasyona geçiş olmaksızın çeşitli muhafazalarda yüksek hızlarda stabil yanmayı koruyabilmektedir. Güçlü bir güçlendirici detonatörle bile, siyah tozu (barut) patlatmak son derece zordur. Siyah toz tutuşturulduğu zaman ince sülfür ve kömür parçacıkları yanmaya başlar, üretilen ısı potasyum nitratı bozar (çok reaktif serbest oksijen radikali olarak saf oksijeni açığa çıkarır) ve böylece "yakıtın" yanması daha da hızlı olur. Gaz halinde tepkime ürünleri "duman çıkarmazsa", içerisindeki basınç ve sıcaklık hızla yükselir. Basınç yükseldiğinde ve kabın daha fazla tutamayacağı bir noktaya ulaştığında patlayacaktır (<http://guns.connect.fi/gow/nitro.html>, Erişim tarihi: 23 Mayıs 2018).

Bazı patlayıcı maddeler ise her iki kategoride de değerlendirilebilir. Buna örnek olarak, nitroselüloz ateşlendiğinde yanacak (deflagrasyon) fakat kuvvetli bir başlatıcı ile ateşlendiğinde patlayacaktır (detonasyon).

İtici (*propellants*) ve patlayıcı maddelerin yanma süreci; kendi kendine sürdürülen, ekzotermik, hızlı oksitleyici bir reaksiyon olarak tanımlanabilir. İtici ve patlayıcı maddeler, yanma sırasında yüksek sıcaklıklarda büyük miktarlarda gazı serbest bırakacaklardır ve çevreleyen atmosferde oksijenin varlığı olmadan süreci kendi kendine devam ettireceklerdir. İticiler ve patlayıcılar bileşimlerinde oksitleyici ve yakıtı içerir ve her ikisi de yanıcı madde olarak sınıflandırılır. Patlayıcıların ve iticilerin kimyasal bileşenleri esas olarak aynıdır ve sonuç olarak bazı iticiler patlayıcı olarak, bazı patlayıcılar ise itici olarak kullanılabilir. Genel olarak, itici gazlar, deflagrasyon prosesi ile yanma gazları üretirken, patlayıcılar bu gazları deflagrasyon veya detonasyonla üretir. İticilerin deflagrasyon sırasında yanma süreci genellikle subsonik (ses hızından daha yavaş) iken, patlayıcıların detonasyon sırasında yanma süreci sırasında süpersoniktir (Akhavan, 2011)

2.2.1.1.4. Gaz/buhar patlamaları

2.2.1.1.4.1. Buhar bulutu patlamaları (VCE, UVCE, PVCE (*Partially Confined Vapour Cloud Explosion*))

‘Kimyasal patlama’, 2.2.1.1.1 ve 2.2.1.1.2 ‘de anlatılan kimyasal birleşme veya ayrışma reaksiyonlarıdır

(<http://www.chemistryexplained.com/Di/Fa/Explosions.html>, Erişim Tarihi: 18 Şubat 2018).

Bölüm 2.2.1.1. ‘de belirtildiği gibi ‘fizikokimyasal patlama’ basınçlandırılmış bir tankın, mekanik patlamayı da ihtiva edecek şekilde dış etkenler (radyant ısı vb.) nedeni ile içerisindeki gazın genişmesi ile aniden yırtılması olarak örneklendirilebilir. Bu olay neticesinde tank içerisinde yanıcı bir gaz var ise, yırtılma sonrası atmosfere salınacak ve oksijen ile temasında, yeterli şartlar oluştuğunda “Buhar Bulutu Patlaması (VCE□*Vapour Cloud Explosion*)” meydana gelecektir.

VCE, kolay alevlenebilir bir kimyasal buhar bulutunun, sınırlandırılmış ya da yarı sınırlandırılmış bir alan içerisinde aniden veya gecikmeli olarak kendiliğinden ateşlenmesi sonucu vuku bulan buhar bulutu patlaması (VCE) veya sınırlandırılmamış / kısmen sınırlandırılmış buhar bulutu patlaması (PVCE□*Partially Confined Vapour Cloud Explosion*)’dır. 1980’lerin başına kadar, bir buhar bulutu patlaması (VCE) genellikle *sınırlandırılmamış* buhar bulutu patlaması (UVCE□*Unconfined Vapour Cloud Explosion*) olarak adlandırılmıştır (Khan ve Abbasi,1998). Bununla birlikte, Khan ve Abbasi’ ye (1998) göre bir buhar bulutunun yanma sırasında yüksek basınç eğiliminin bir yapı, bir engel veya herhangi sınırlandırılmış alan mevcudiyetine bağlı olarak oluştuğu ve ibarenin günümüzde ihmal edildiğini belirtmeleriyle beraber, bazı kaynaklarda sınırlandırılmamış buhar bulutu patlamalarına (UVCE) yer verilmektedir.

Khan ve Abbasi’ ye (1998) göre, sınırlandırılmamış ya da yarı sınırlandırılmamış alan içerisindeki yanıcı kimyasaldan oluşan buhar bulutunun

gecikmeli olarak kendiliğinden tutuşması VCE'yi meydana getirir. Bu bulut, genel olarak, BLEVE'ye neden olabilecek yeterli enerji olmaması durumunda, gaz veya kaynayan sıvının, genellikle tesisatın hasarlı bir kısmından (bağlantı parçaları, borular vb.) ani ve devamlı salınımı neticesinde gerçekleşir. VCE, aynı zamanda, patlamanın gerçekleşmesinin, salınımdan bir süre sonra, bulut içerisinde patlamaya neden olabilecek maddenin patlama (alevlenebilirlik) sınırına gelmesi ile gerçekleşeceğinden “Gecikmeli Buhar Bulutu Patlaması – Delayed Vapour Cloud Explosion” olarak da bilinir. Salınan gaz yanıcı değilse ve/veya herhangi bir tutuşma kaynağı yoksa, daha fazla enerji salınımı olmayacaktır ve sonuç olarak ardıcıl patlamalar meydana gelmeyecektir. Fakat, eğer gaz yanıcı ise ve tutuşma kaynağı gazın atmosfere salındığı noktaya yakın ise hava ile karışan az miktardaki gaz alevlenecek ve henüz hava ile karışmamış olan gazı da (üst alevlenebilirlik sınırından daha büyük bir konsantrasyon) alevin dağılması ile ilave edecektir. Bu durumda, yanma enerjisinin serbest kalma karakteristik süresi, alevlenme için gereken yakıt ve hava transfer oranı ile tesbit edilir ve sonuçta bu durum büyük patlama meydana getirir (Khan ve Abbasi,1998).

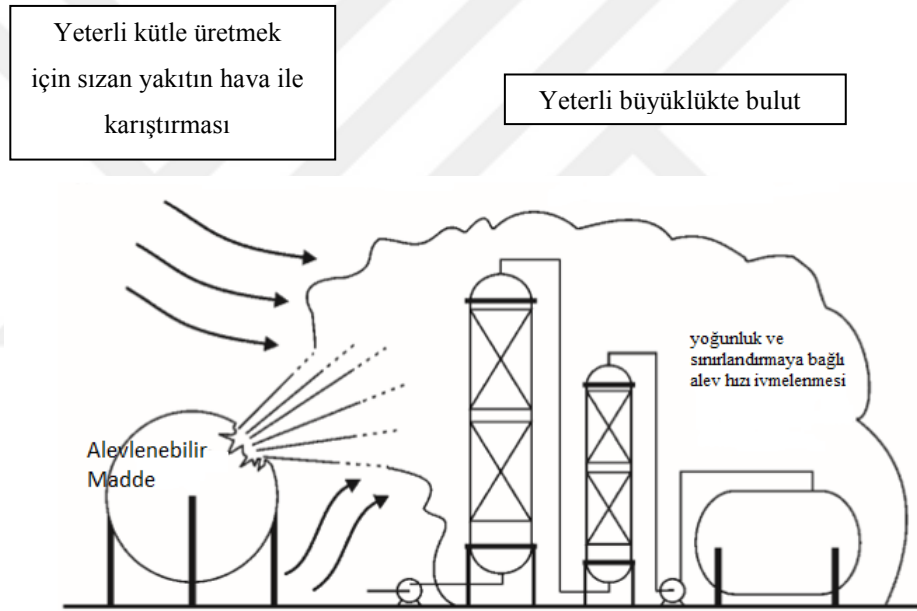
İkincil bir durum olarak, tutuşma geciktiği takdirde, yanıcı gaz bulutu hava ile karışacak ve alevlenebilirlik sınırları içerisinde oldukça büyük bir yakıt-hava karışımına neden olacaktır. Bu durumda, tutuşmayı müteakiben, yanma enerjisinin serbest kalma karakteristik süresi yanıcı karışım içerisinde büyüyen alevin hızıyla tesbit edilebilir ve bu patlamayı meydana getirmek için oldukça kısa bir süre gerektirecektir (Khan ve Abbasi,1998), (http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_5/431_448_ing.pdf; Erişim tarihi: 25 Ekim 2017).

Özetlenecek olursa, bir buhar patlamasının meydana gelmesi için aşağıdaki şartların oluşması gerekir;

- Salınan madde alevlenebilir olmalıdır.
- İlk tutuşmanın gerçekleşmesi için buhar bulutunun tatmin edici düzeyde olması gerekmektedir. Eğer buhar bulutu çok küçük veya sızıntı olan

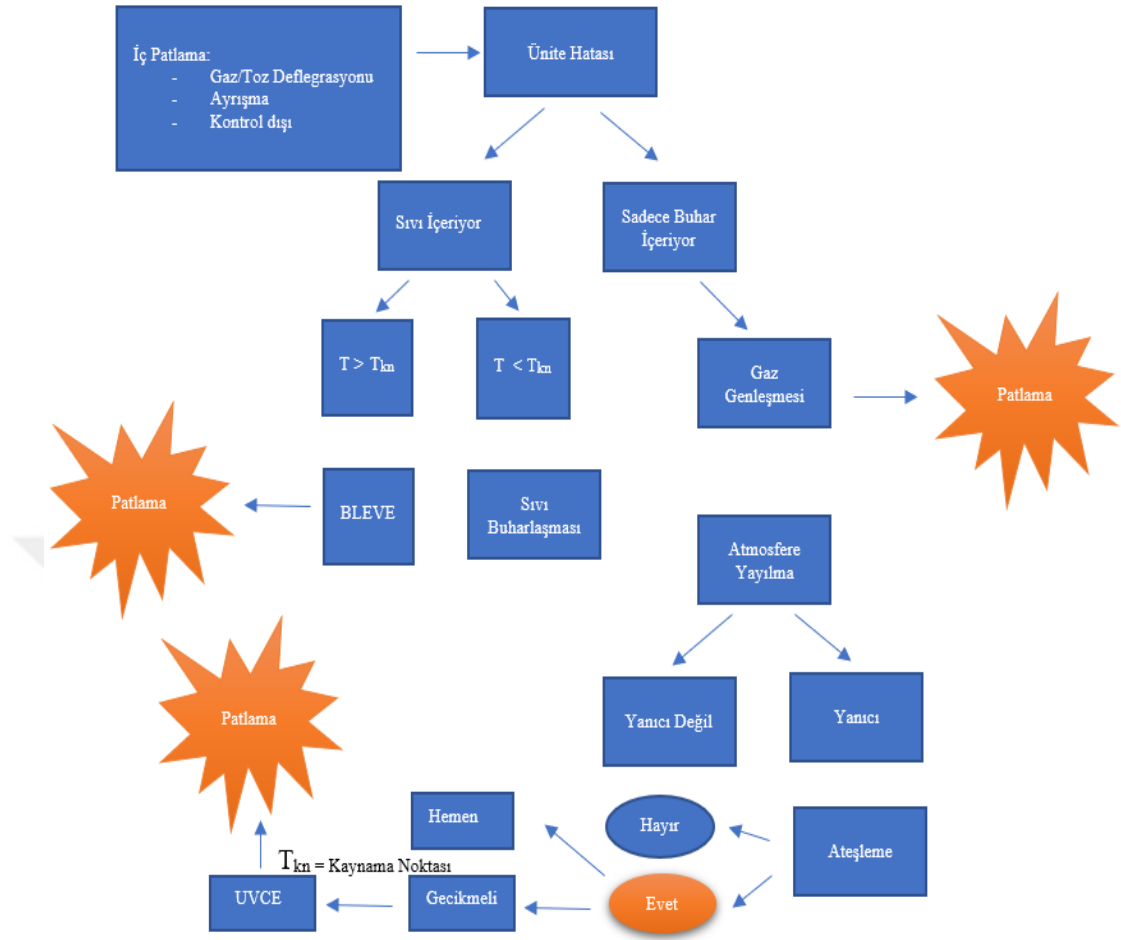
noktaya yakın bir noktadan ateşlenirse, sadece küçük bir ateş topu oluşacak ve yüksek basınç oluşturmayacaktır. Bunun neticesinde ise havuz yangını oluşacaktır.

- Buhar bulutunun hava ile karışımının alevlenebilir düzeyde yeterli kütle oluşturması gerekmektedir. Yeterli miktarda olmayan karışım, difüze olmadan ateş topu oluşturacak ve yüksek basınç meydana getirmeyecektir.
- Alevin yayılma hızı buhar bulutu yandıkça hızlanmalıdır. Bu hızlanma olmazsa sadece ani bir yangınla sonuçlanacak ve termal radyasyon ve doğrudan alev çarpmasına neden olacaktır (Crowl, 2010).



Şekil 2.6. Yoğunluk ve Sınırlandırmaya Bağlı Alev Hızı İvmelenmesi (Crowl, 2010).

Buhar bulutu patlamaları, genellikle prosesteki herhangi bir işlem kaybı (borularda çatlak, yarık, depolama tankındaki herhangi bir mekanik hasar, reaktör hatası vb.) neticesinde sızan büyük miktarlardaki alevlenebilir gazın veya buharın sızması ve müteakiben ateşlenmesiyle meydana gelen patlamalardır. Ayrıca, basınç altında depolanan sıvıların ortam basıncına gaz fazına aniden gerçekleşmesinden de kaynaklanabilir (Crowl, 2010).



Şekil: 2.7. Endüstriyel Bir Tesiste UVCE ve BLEVE Patlama Oluşumu için Akış Diyagramı(http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_5/431_448_ing.pdf; Erişim tarihi: 25 Ekim 2017)

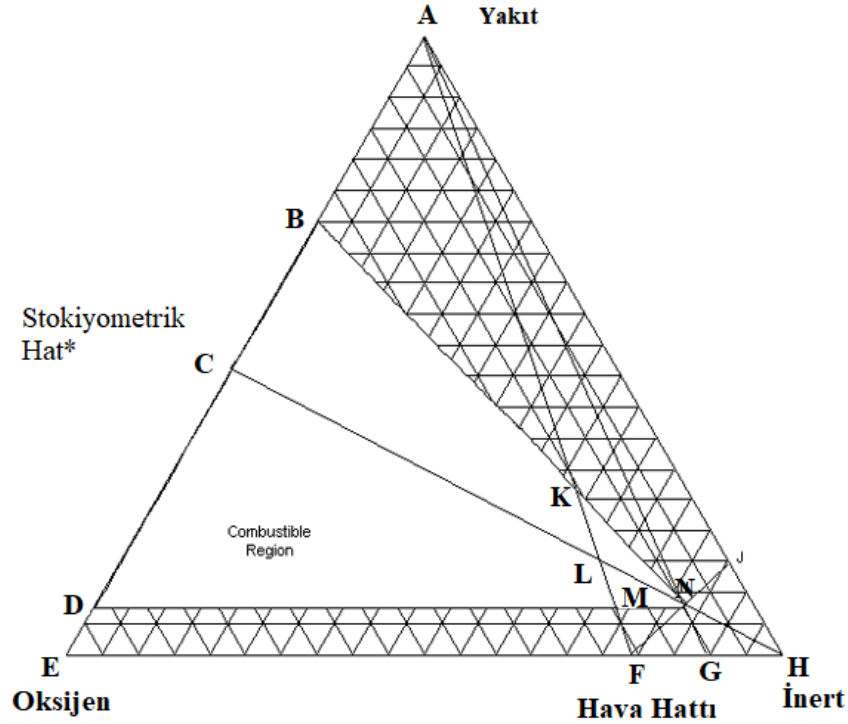
UVCE, herhangi bir tutuşma kaynağı ile buluşmadan ve ardıcıl patlamalar yaşanmadan önce de rüzgar vasıtası ile popülasyon olan alanlara taşındığında, oldukça yıkıcı sonuçlar doğurabilir. UVCE, yüksek basınç, şok dalgaları, yüksek sıcaklık ve hatta boru ve/veya tank yırtılmalarına bağlı olarak şarapnel oluşumuna neden olacaktır. Şok dalgaları 2 atm'in üstünde ve 400 m/s hıza erişebilmektedir (http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_aree/Tecnologia_e_Scienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_5/431_448_ing.pdf ; Erişim tarihi: 25 Ekim 2017).

Netice olarak, sınırlandırılmamış buhar bulutu patlamasının belirli yıkıcı etkileri; şok dalgaları, yüksek sıcaklıktaki alev topları ve zehirli/tehlikeli gaz salınımı olarak tanımlanabilir (Lei ve ark., 2010).

Dünyada meydana gelen büyük gaz patlamaları ile ilgili örnek Bölüm 6'da verilmiştir.

2.2.1.1.4.1.1. Gaz patlamalarının önlenmesi

Gaz patlamaların önüne geçebilmenin en basit yolu, karışımda, asla yanıcı bir konsantrasyona ulaşamayacak olan yanmayan özelliğe sahip inert gaz kullanmaktır. Yakıt, oksijen ve inert gaz karışımları, tüm bu yakıt ve gaz kompozisyonu aralığında yanıcılık özellik göstermeyecektir. Şekil 2.8. tipik bir gaz karışımı olan yakıt, oksijen ve inert gaz kompozisyonundaki yanıcı ve yanıcı olmayan bölgeleri gösteren “Üçgen Kompozisyon (dizilim) Diyagramı”dır (Book ve ark., 2001).



Şekil 2.8. Gaz Yakıt için Tipik Yanma Bölgesi ile Üçgen Kompozisyon Diyagramı (Book ve ark., 2001)

Diyagramdaki A, E ve H noktaları, saf yakıtı (ya da yanıcı madde

karışımını), saf oksijen ve saf inert gaz (ya da inert gaz karışımını) göstermektedir. F ile gösterilen nokta ise basit atmosfer havasını (%21 Oksijen, %79 inert gaz ve %0 yakıt karışımı) belirtmektedir.

Yanıcı bölge tipik olarak bir yarımada şekline sahiptir ve diyagramda DBN noktası ile sınırlanan bölge ile gösterilir. D ile gösterilen nokta ise belirli sıcaklık ve basınçta, saf oksijen (APS O₂) içindeki yakıt için daha düşük alevlenebilirlik limitini göstermektedir. Şekil’de, Oksijen için APS (Alt Patlama Sınırı) yaklaşık %7,5 yakıt (%92,5 Oksijen ve %0 inert gaz) olarak görülmektedir. B ile gösterilen nokta, belirli sıcaklık ve basınçtaki saf oksijen içerisindeki ÜPS (Üst Patlama Sınırı) belirtmektedir. Şekil 2.8.’de, Oksijen için ÜPS %70’dir. Tablo, oda sıcaklığı ve atmosfer basıncında bazı genel yanabilir maddeler için daha yüksek ve daha düşük alevlenebilirlik limitlerini göstermektedir.

Tablo 2.1. Oda Sıcaklığı ve Atmosfer Basıncında Bazı Genel Yanabilir Maddeler için Oksijen gazı Bakımından Alt ve Üst Patlama Sınırları

Yakıt	Formül	Alevlenebilirlik Limitleri (mol %)	
		APS O ₂	ÜPS O ₂
Hidrojen	H ₂	4.0	94
Döteryum	D ₂	5.0	95
Karbon Monoksit	CO	15.5	94
Amonyak	NH ₃	15.0	79
Metan	CH ₄	5.1	61
Etan	C ₂ H ₆	3.0	66
Etilen	C ₂ H ₄	3.0	80
Propilen	C ₃ H ₆	2.1	53
Siklopropan	C ₃ H ₆	2.5	60
Dietil Eter	C ₄ H ₁₀ O	2.0	82
Divinil Eter	C ₄ H ₆ O	1.8	85

Kaynak: (Levis ve Elbe,1961).

2.2.1.1.5. Spray/sis patlamaları

Spreyler ve yanıcı sıvıların sisleri, örneğin hidrokarbonlar, atmosferik basınçta ve normal sıcaklıkta, <100 µm damlacık büyüklüğünde ve 100-500 g / m³ aralığında damlacık kütle yoğunluğunda patlayıcıdır. Bu, sıvının düşük veya yüksek kaynama

noktasına sahip olup olmadığına bakılmaksızın böyledir. Düşük bir kaynama noktası sıvısı durumunda, damlacıklar kolayca buharlaşacak ve bulut çok kısa bir sürede yanıcı buhar ve hava karışımı haline gelecektir (Eckhoff, 2006).

Sprey ve sis genel olarak birbiri ile karıştırılsa da aralarında büyük bir fark vardır. Spray, bir veya birkaç nozuldan sızıntı ile meydana gelen sıvı damlacıklar olarak nitelendirilebilir. Sis ise süper doymuş bir yakıt buharından yoğuşmanın oluşturduğu bir buluttur. Sis damlacıkları, spray damlacıklarına nispeten daha küçüktür (Eckhoff, 2006).

Havada bulut oluşturan spray/sis patlamaları olayı karmaşıktır. Bunun nedeni, damlacıkları oluşturan yakıtın kaynama noktası ile ilintilidir. Kaynama noktası yüksekse, yani normal ortam koşullarındaki buhar basıncı düşükse yanma işlemine göre damlacıklar, hava içerisinde dağılarak kümelenmiş inorganik ince katı partiküller gibi davranacaktır. Buna göre, gaz veya toz patlamasına benzer şekilde, patlayıcı bir bulutun meydana gelmesi ve yanması iki ana ardışık işlem sonucudur. Tutuşma, bu iki ana süreç arasındaki bağlantı gibi kabul edilebilir (Eckhoff, 2006).

Her bir damlacık minimal birer küre olduğundan, yüzey alanı açısından oksijenle temas oldukça hızlı ve tatmin edici olacaktır.

2.2.1.1.6. Toz patlamaları

Toz patlaması, aslında günlük yaşam içerisinde oldukça basit bir şekilde ifade edilebilir. Hayatımızın her alanında karşımıza çıkabilecek odunu ele alırsak, odun parçasının bütün halde tutuşturulması zaman aldığı gibi sıcaklığını uzun bir süre ortama bırakacak şekilde yavaş yanma gerçekleştirecektir. Ancak, aynı odun parçası, küçük parçalar halinde kesildiğinde, yanma hızı artacaktır. Bunun nedeni, ahşap ile hava arasındaki temas yüzeyinin artmış olması ve tutuşmanın kolaylaşmış olmasıdır. Aynı şekilde, 0,1 mm veya daha küçük boyutta toz haline getirilirse ve her parçacığın hava ile teması tam olacak şekilde yeterli büyüklükte bir hava hacmi içerisinde asılı kalırlarsa, yanma hızı çok yükselecektir. Bunun temel nedeni, boyut küçüldükçe hava temas yüzeyi artacak ve neticesinde de tutuşma için verilecek

enerji ihtiyacı azalacaktır. Bu şekilde toz bulutu hızla yanacak ve toz patlaması gerçekleşecektir (Eckhoff, 2003).

Detaylı olarak Bölüm 4' te toz patlamaları verilecektir.

Büyük toz patlama vakaları ile ilgili örnekler Bölüm 6'da verilmiştir.

2.2.1.1.6.1.Patlayıcı gaz/buhar karışımları ile patlayıcı sprej/sis ve toz bulutunun ortamda bulunması ile gösterdikleri çok benzer özellikler;

- ✚ Alevlenebilirlik/patlayıcılık limitleri
- ✚ Laminer yanma hızları ve söndürme mesafeleri
- ✚ Yanma hızının bulut türbülansına tepkisi
- ✚ Patlama fenomeni
- ✚ Benzer büyüklüklerde adyabatik sabit hacim patlama basınçları
- ✚ İyi tanımlanmış minimum tutuşma enerjileri
- ✚ Verilen deneysel şartlar için minimum tutuşma sıcaklıkları

Bu benzerliklerin tanınması, kaza sonucu oluşan gaz, sprej / sis ve toz patlamalarının az ya da çok benzer olduğu düşüncesinin gelişimine katkıda bulunmuş olabilir. Bu yanlış bir yorumdur. Ayrıca, tozlar, sprejler / sisler ve gazlar arasında, tehlike yaratabilecek konsantrasyon oranlarında da temel farklar vardır. Yanıcı gazlar ve sprejler / sisler için alev yayılımı ancak hava ile yakıt karışım oranlarının alt ve üst alevlenme limitleri arasında olması halinde mümkündür. Bununla birlikte, toz alevi yayılımı yalnızca bulutların yanıcı toz konsantrasyonu aralıklarıyla sınırlı değildir. Yerleşmiş toz katmanları ve birikintiler alev yayılımı için ek bir ayrı rejim oluşturmaktadır. Bunun nedeni, yanıcı gazların ve sıvıların aksine, çöktürülmüş toz / tozların parçacıklar arasındaki boşluklara hava sıkışmasından kaynaklanmaktadır; bu da çoğu zaman çok yavaş fakat sürekli devam eden yanma ve alev yayılımı için ortam oluşturmaktadır (Eckhoff, 2016).

Üç farklı yakıt kategorisi (toz, sprej/sis, gaz) tarafından üretilen ve sürdürülen bulutların, gerekli şartlar oluştuğunda yaşanacak olan patlamaların önlenmesi veya

hafiletilebilmesi için önleme opsiyonlarının seçiminde, bu bulutların oluşma ve sürdürülme yolları ve şartlarının önemli ölçüde etkisi vardır. En önemli soru, ortamda patlayıcı bulutun bulunup bulunmadığıdır. Toz, sprej/sis ve gaz bulutlarının oluşumu ve sürdürülebilmesi fiziksel olarak çok büyük farklar gösterir (Eckhoff, 2003).

2.2.1.1.6.2. Alevlenebilir gaz/buhar, sprej/sis ile yanıcı tozlar arasındaki yedi temel fark;

Gaz dinamiği olayı da bazı parametrelere bağılı olarak gerçekleşmektedir. Bu parametreler, basınç yükselmesi, alevin yayılım hızı, sınırlandırma, türbülans ve yayılım dinamiği olarak açıklanabilir. Toz yayılımı ile tesiste gerçekleşen patlama; tozun yayılımı, yetersiz limit konsantrasyonu ve tozun tutuşturulabilirlik karakteristiği (termal, kimyasal ve elektriksel) olarak nicelendirilebilir. Toz patlamalarını gaz patlamalarından ayıran başlıca parametreler bunlardır. Toz patlamaları için diğere değışkenler; uçuculuk, partikül boyutu, tozun yayılım gösterdiği hava içerisindeki oksijen, tutuşturma sıcaklığı, tutuşturma basıncı, yakıt gazlarının varlığı ve tepkisizleştirme veya söndürme ihtiyacıdır (Cashdollar, 2000).

Tüm bunlar gözönüne alındığında, alevlenebilir gaz/buhar, sprej/sis ile yanıcı tozlar arasındaki farklar şu şekilde sıralanabilir;

- Deflagrasyon için gerekli şartlar
- Yakıtın kimyasal saflığı
- Partikül büyüklüğü ve şekli
- Yakıt konsantrasyonunun tekdüzenliliği ve başlangıç türbülansı
- Tutuşturulabilir yakıt konsantrasyonları aralığı
- Heterojen ve homojen kimyasal reaksiyonlar
- Tamamlanmamış yanma (Ogle, 2016), (Eckhoff, 2016).

Toz patlamaları ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 4.1 'de verilecektir.

2.2.1.1.6.3. Patlayıcı bulut oluşturan yakıtların fiziksel özelliklerine göre tehlike oluşturma analizi

Gazlar ve buharlar, hava ile moleküler düzeyde karışır. Bu da gazların ve buharların atmosfere salındığında kolaylıkla patlayıcı bulut oluşturmaya neden olur. Tesislerde, gaz buhar patlamaları, proses ekipmanları içinde başlayabilir, ancak, çoğu zaman, ekipman arızası nedeni ile oluşan sınır kaybı sonrasında atmosfere sızması ile oluşur. Basınçlı yanıcı sıvıların proses ekipmanından dar delikler, yarıklar veya çatlaklar vasıtasıyla serbest bırakıldığı durumlarda patlayıcı sprey bulutları da çoğu durumda proses ekipmanının dışında üretilir ve sıvı mekanik olarak ince damlacıklara ayrılır. Oluşan bu patlayıcı sis, yanabilen buharın ve havanın sıcak karışımları soğutulduğunda oluşur ve buharın bir kısmı çok ince damlacıklar halinde yoğunlaşır. Bu olay hem proses ekipmanları içinde hem de dışında meydana gelebilir.

Bununla birlikte, toz halinde, birincil patlayıcı bulutlar, pratik olarak proses ekipmanı içinde bulunur. İç üniteler, karıştırıcılar, kepçe asansörleri, pnömatik taşıma sistemleri, silolar ve huniler, siklonlar ve filtreler, tozu, tüm ünitenin dönüşü, eklerin hareketi veya hava akışı ile az ya da çok devamlı süspansiyon halinde tutulabilir. Bu nedenle, patlamaya neden olan toz bulutları, operasyonun temel niteliği nedeniyle normal çalışmada az çok devam edebilir.

2.2.1.2. Fiziksel Patlamalar

Fiziksel patlamalar hiçbir kimyasal veya nükleer reaksiyon gerçekleşmeyen patlamalardır. Kuchta 'ya (1985) göre yanmanın gerçekleşmediği tüm patlamalar fiziksel patlamadır. En sık rastlanılan örnek, gaz veya sıvı içeriği yüksek basınç altında bulunan bir tankın yarılmasıdır. Tank patlarsa, tank içerisindeki basınçlandırılmış gaz genişler ve bir şok dalgası oluşur. Günlük hayatta sıkça karşılaşılan bir örnek ise bir otomobil lastiğinin aşırı derecede şişirilirse patlayabileceğidir.

Yüksek sıcaklıktaki bir sıvının, düşük sıcaklıktaki bir uçucu sıvı ile doğrudan teması girmesi ve uçucu sıvının buharının, artan buhar hacmini karşılamak için

akustik olarak genişleyen çevre sıvısından daha hızlı üretilmesi durumunda, bir buhar patlaması meydana gelir. Bu koşullar bir şok dalgasına neden olur. Buhar patlamaları aynı zamanda fiziksel (veya termal) patlamalar olarak da karakterize edilir, çünkü bunlar herhangi bir kimyasal reaksiyonun yokluğunda ortaya çıkabilir (Henry ve ark., 2015).

Fiziksel patlamalar, BLEVE ve ani faz değişimi patlamaları olarak ele alınabilir:

2.2.1.2.1. BLEVE- Kaynayan sıvı genişleyen buhar patlaması (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*)

Basınçlandırılmış gaz veya yüksek basınç altında işlenen veya depolanan kaynayan sıvının ani salınımı BLEVE oluşmasına neden olur. Yüksek basınca bağlı olarak yüksek enerji edinmiş moleküllerin bulunduğu herhangi bir yarık, çatlak vs. yerlerden kaçma eğilimi yüksek olması, ani salınım ile atmosfer basıncına maruz kalan moleküllerin çok hızlı genişlemesine ve neticesinde de şok dalgalarının oluşmasına neden olacaktır. Eğer, madde yanıcı ise aynı zamanda yangın oluşumuna da elverişli bir durum yaratmış olacaktır. BLEVE’de şok dalgalarının hız oranı 330-450 m/s arasında değişir ve 0,5-1,0 atm. aralığında da pozitif yüksek basınç oluşturur. Bu şok dalgası ve dinamik basınç birkaç saniye sürer. Genellikle, BLEVE’nin zararlı etkisi 200-700 m yarıçapı içerisindeki alanlarla sınırlıdır (Khan ve Abbasi, 1999).



Şekil 2.9. Harici Bir Yangına Maruz Kalmış LPG Silindiri (NFPA 921, 2017)

BLEVE patlamaları, kimya endüstrisinde karşılaşılan ve vuku bulduğunda yüksek düzeyde tahribat etkisi yaratan en feci patlamalardan biri olarak

gösterilebilir. 1940-2005 yılları arasında kaydedilen rakamlara göre yaklaşık 80'den fazla vaka yaşanmış ve neticesinde de 1000'den fazla yaşamın sonlanmasına, 10.000'den fazla insanın yaralanmasına ve milyar dolarlık yatırımlara mal olduğu saptanmıştır (Abbasi ve Abbasi, 2007).

BLEVE, “Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion” kelimelerinin baş harflerinden türetilip akrostiş bir kelime halinde ilk kez 1957 yılında Amerika Birleşik Devletleri *Factory Mutual Research Corp.*'de Smith, Marsh ve Walls tarafından, yüksek ısıda formalin ve fenol karışımının bulunduğu tanktaki bir hatayı analiz etmeleri ve tankın “kaynayan sıvının genişleyen buhar patlaması – boiling liquid expanding vapour explosion” ile zarar görmesi sonucu vakayı bu isim ile adlandırmaları ile literatüre girmiştir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

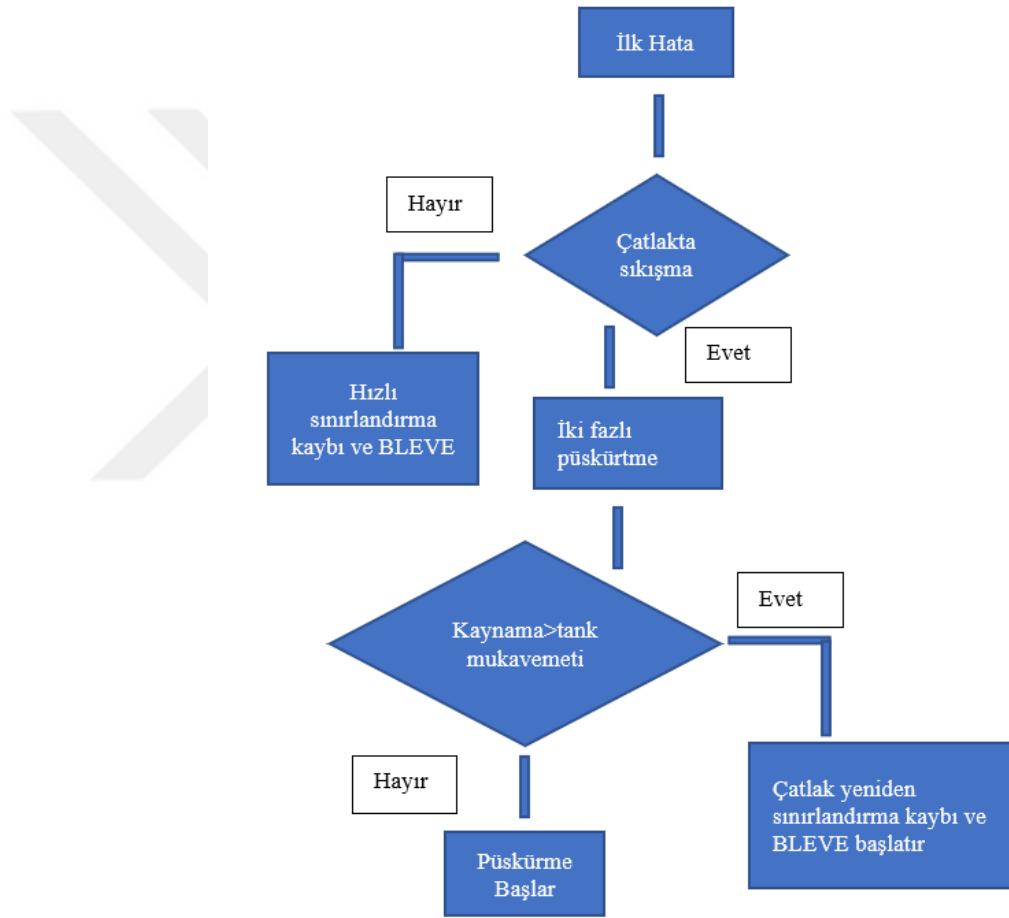
Kimyasal Üretim Güvenliği Merkezi – *The Centre for Chemical Process Safety* 'ye göre ise BLEVE tanımı; “Yüksek miktardaki basınçlandırılmış çok yüksek ısıdaki sıvının aniden atmosfere salınımı” olarak nitelendirmiştir (Safety, C. C. P., 2010).

Birk ve Cunningham'a (1994) göre ise BLEVE; “Konteyner içerisindeki basınçlandırılarak sıvılaştırılmış gazın feci bir hata ile genişleyen buharın ya da kaynayan sıvının patlayıcı bir şekilde salınımı” olarak nitelendirilmiştir. Bu tanımlamayla başka bir tanımlama ortaya çıkmış, “feci hata” olarak tankın aniden açılmasıyla içeriğinin ansızın salınımına neden olarak adlandırılmıştır. Sınırlandırılmış alan içerisindeki basınçlandırılmış ve sıvılaştırılmış buharın ani salınımı, anlık ve patlayıcı kaynama-buharlaşmaya neden olup, bir seri feci etkiye neden olabilmektedir (Birk ve Cunningham, 1994), (Eckhoff, 2014).

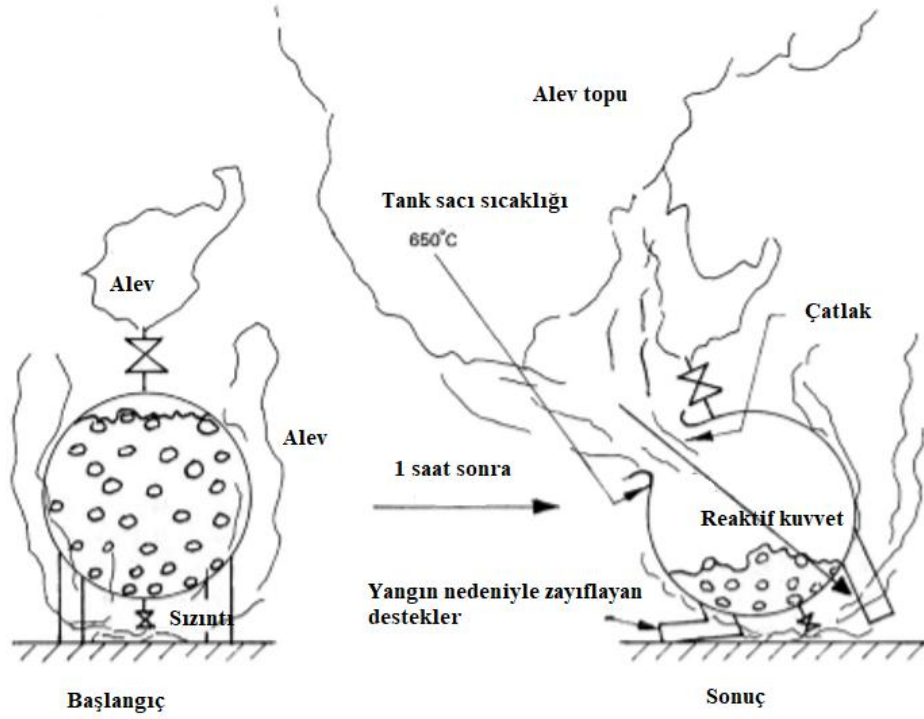
2.2.1.2.1.1. BLEVE Mekanizması

Basınçlandırılarak sıvılaştırılmış gaz (PLG) ihtiva eden tank, şarapnel etkisi, metal yorulması veya korozyon gibi nedenlerle ısı yüküyle karşılaşır veya arızalanır. Bir başka deyişle, basınçlandırılarak sıvılaştırılmış gaz, kendi atmosfer basıncındaki kaynama noktası üzerinde bir sıcaklıkta sınırlandırılırsa, kazaen – yakınındaki bir

yangın neticesinde oluşan ısı radyasyonu gibi – tankın içerisindeki basınç yükselecektir. Bunun neticesinde, basınç tahliye vanası, önceden ayarlanmış olduğu basınca yükselince açılacak ve içerisindeki sıvı seviyesi, tahliye vanasının çalışıp sıvı buharı tahliye etmesiyle düşecektir. Oysa ki, tank içerisindeki sıvı, tank duvarlarını soğutucu etki yapacakken, buhar aynı şekilde davranmayacak ve tank içi duvarlardaki metal dengesini bozacaktır. Neticesinde, sıvı ile soğutulamayan metal ısı yüküne maruz kalacak, zayıflayacak ve belki de yırtılacaktır (Abbasi ve Abbasi, 2007).



Şekil 2.10. İki Adımda BLEVE (Abbasi ve Abbasi, 2007).



Şekil 2.11. Çıkarılan Buhar / Sıvının Ateşlenmesinden Sonra Başlıca İkincil Ateş Topunun Dahil Olduğu Bir BLEVE Şematik Gösterimi (Marshall, 1987).

BLEVE kendi başına fiziksel bir patlama olmasına rağmen, BLEVE zinciri neticesinde kimyasal patlamaya ilişkin olaylar vuku bulacaktır:

BLEVE zinciri:

- Basınçlandırılarak sıvılaştırılmış gaz içeren tank (PLG), kazaen ısıya (ısı radyasyon) maruziyeti
- Isı yüküne maruz kalan metalin (tank sacının) yırtılması
- Ani basınç düşümüyle birlikte sıcak sıvının buharlaşarak tahliyesi
- Şok dalgası yayılımı
- İkincil tankların, birinci tankın infilakı neticesinde oluşan metallerin mermi etkisiyle parçalanması
- Ateş toplarının oluşumu
- Havuz yangınları – Sıvının sıçramasıyla birlikte oluşacak olan kısa süreli havuzlar, sıvı alevlenebilir özelliğe sahip ise yangın oluşumuna neden olacaktır (Abbasi ve Abbasi, 2007).
- Toksik gaz ve buharların yayılımı

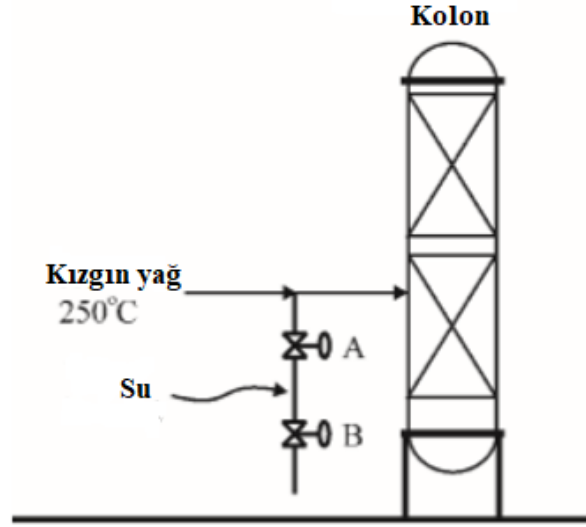
i) Soğuk, zehirsiz gaz yayılımı (Eckhoff, 2014).

2.2.1.2.2. Ani faz değişimi patlamaları

Ani faz değişim patlamaları, sıvı veya katıların çok hızlı faz değişimleridir. Eğer faz değişimi sıvıdan gaza ise veya katıdan gaza (süblimleşme) ise maddenin hacmi yüzlerce veya binlerce katı olacak şekilde artacak ve çoğu kez patlama ile sonuçlanacaktır. Buna çok genel örnek olarak patlamış mısır verilebilir. Verilen ısı ile birlikte çekirdek içindeki nem ani olarak faz değiştirip genişleyecektir.

En yaygın hızlı faz geçişi patlaması, bir malzemenin faz değişikliğine neden olacak kadar yüksek bir sıcaklıkta olan başka bir malzemeye aniden maruz kalmasından kaynaklanır. Hızlı faz geçişli patlamalardaki ana faktörler arasında büyük bir sıcaklık farkı, ısı kaynağının sıcaklığından çok daha düşük olan malzemenin faz değişimi için bir kaynama noktası, ısı kapasitesinde büyük bir fark ve malzeme ile ısı kaynağı arasında geniş bir temas alanı bulunur (Crowl, 2010).

Şekil 2.12. 'de, 250 °C'lik bir sıcaklıkta sıcak bir yağ, işleme için bir damıtma sütununa pompalanmıştır. Başlangıçta, A ve B vanaları kapatılmıştır. Daha önceki bir bakım operasyonu nedeniyle, A ve B valfleri arasındaki tıkanmış boru kesitinde su mevcuttur. Operasyon sırasında su, yüksek sıcaklıktaki yağa maruz bırakılarak, valf A kazaen açılmıştır. Su yüksek sıcaklıkta yağa maruz kalmış ve aniden patlayarak kolonda geniş çaplı iç hasara neden olmuştur. Nispeten düşük bir kaynama noktası olan bir maddenin yüksek sıcaklıkta bir madde ile temas ettirilebildiği herhangi bir durumda, mutlaka, hızlı bir faz geçişi patlaması potansiyelinin bir değerlendirmesi yapılmalıdır (Crowl, 2010).



Şekil 2.12. Ani Faz Değişim Patlamasının Şematik Gösterimi (Crowl, 2010, s. 67)

2.2.1.3. Nükleer patlamalar

Atomik veya nükleer bir patlamadan üretilen enerji, bir kimyasal patlamayla üretilen enerjiden bir milyon ila bir milyar kat daha fazladır. Atomik bir patlamadan gelen şok dalgaları kimyasal patlamayla üretilenlere benzer, ancak daha uzun sürecek ve pozitif eğilimde daha yüksek bir basınca ve negatif fazda daha düşük bir basınca sahip olacaktır. Atomik bir patlamadan üretilen ağır nötron akışı, patlamanın yakınında bulunan kimseye ölümcül etkiye neden olurken, patlamadan biraz uzak mesafede bulunan kişiler gama radyasyonu tarafından zarar görecektir. Atomik patlamalar ayrıca yoğun kızıl ötesi ve ultra mor radyasyon yayar (Akhavan, 2011).

Nükleer patlamalara füzyon veya fisyon reaksiyonları neden olabilir. Bir füzyon reaksiyonunda, iki küçük atomun çekirdeği, bazen bir nötron eşliğinde tek bir büyük atom oluşturmak üzere birleşir. Reaksiyon ürünlerinin kütlesi reaktanların kütlesinden daha düşüktür ve bu kütle farkı *Einstein*'ın iyi bilinen $E = mc^2$ formülüne göre enerjiye dönüştürülür; burada E üretilen enerji, m enerjiye dönüştürülen kütle ve c ışığın hızı. Işık hızı çok büyüktür ve yalnızca küçük bir miktar kütleinin dönüştürülmesi önemli bir patlamaya neden olmalıdır (Akhavan, 2011).

Fisyon reaksiyonunda uranyum gibi tek bir büyük atomun çekirdeğinin iki küçük çekirdeğe ve birkaç nötrona ayrılmasına neden olarak nötronlarla bombardımana tutulur. Ürün atomlarının ve nötronların birleşik kütlesi orijinal atomun kütlesinden daha azdır ve kütle kaybı *Einstein*'ın denklemine göre enerjiye dönüştürülür. Fisyon reaksiyonu ile üretilen nötronlar, diğer büyük atomların parçalanmasına neden olur ve nötron üretimi, hala diğer atomların parçalanmasına neden olur ve bu da katlanarak devam eden bir zincirleme reaksiyona (yani, 2,4, 8, 16, 32, 64 ...) neden olur. Tüm süreç çok hızlı, yalnızca birkaç milyonuncu saniyede gerçekleşir. Elde edilen enerji üretimi çevredeki havayı ısıtır ve bir patlama dalgası şeklinde genişlemesine neden olur (<http://www.chemistryexplained.com/DiFa/Explosions.html>, Erişim Tarihi: 18 Şubat 2018).

Hem füzyon hem de fisyon reaksiyonları bombalarda kullanılabilir. Füzyon reaksiyonları başlatmak için çok yüksek sıcaklık gerektirir, bu nedenle fisyon reaksiyonları ile başlatılırlar. (Nükleer reaktörlerde daha düşük oranlarda kontrol edildiğinde, fisyon reaksiyonları güç ve ek nükleer yakıt üretmek için kullanılır (<http://www.chemistryexplained.com/DiFa/Explosions.html>, Erişim Tarihi: 18 Şubat 2018).

BÖLÜM 3: PATLAMA İLE İLGİLİ MEVZUAT VE STANDARTLAR

3.1. Yasal Mevzuat ve Standartlar

3.1.1. Türk mevzuatı ve standartları

Endüstriyel işletmelerde patlamadan korunma ile ilgili ilk Türk standardı, Bakanlar Kurulu'nca 9/12/2013 yürürlükten kaldırılmış olan 24.12.1973 tarih ve 14752 no'lu Resmi Gazete'de yayınlanan "*Tehlikeli ve Zararlı Maddelerle Çalışılan İşyerlerinde ve İşlerde Alınacak Tedbirler Hakkında Tüzük*" tür. (T.C. Resmi Gazete, 24.12.1973, sayı: 14752).

17.07. 2014 tarihli ve 29063 sayılı RG ile kaldırılan 1973 tarih ve 1452 RG sayılı tüzükte bulunan maddelere benzer maddeler içeren, 11370 sayılı "*Yangın Önleme, Parlama ve Patlama, Genel*" Türk Standardı, patlama tehlikesi barındıran tesislerde alınacak yangın önlemlerini içermektedir.

28/6/1990 tarihli ve 90/394/EC sayılı, 27/6/1997 tarihli ve 97/42/EC sayılı ve 29/4/1999 tarihli ve 1999/38/EC sayılı Avrupa Birliği Direktifleri (ATEX 99/92 /AT)'e paralel olarak hazırlanmış "*Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Çalışanların Korunması Hakkında Yönetmelik*", ilk olarak 26.12.2003 tarihinde ve 25328 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanmış olup, 20/6/2012, tarihli ve 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanununun 30 uncu maddesine dayanılarak ve 16/12/1999 tarihli ve 1999/92/EC sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konseyi Direktifine paralel olarak "*Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik*" olarak değiştirilerek, 30.04.2013 Resmi Gazete Sayısı: 28633'de yayınlanmıştır (T.C. Resmi Gazete, 30 Nisan 2013, sayı: 28633).

İşyerlerinde elektrik tesisatının yangın ve patlamaya neden olmayacak şekilde projelendirilip, tesis edilmesini gerektiğini ve patlama tehlikesi olan işyerlerinin "*Muhtemel Patlayıcı Ortamda Kullanılan Teçhizat ve Koruyucu Sistemler ile ilgili*

Yönetmelik” (T.C. Resmi Gazete, 30 Haziran 2016, sayı: 29758) hükümlerine uygun şekilde tesis edilmesi gerektiğini işaret eden 17/7/2013 tarihli ve 28710 sayılı Resmi Gazetede ki “*İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik*” bulunmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 17 Temmuz 2013, sayı: 28710).

Muhtemel patlayıcı ortamda kullanılan teçhizatın ve koruyucu sistemlerin güvenli olarak piyasaya arzı için gerekli temel sağlık ve güvenlik kuralları ile uygunluk değerlendirme işlemlerine ve piyasa gözetimi ve denetimine ilişkin usul ve esasları belirlemek amacı ile ilk kez ATEX 94/9 /AT’ye paralel olarak hazırlanmış, 27/10/2002 tarihli ve 24919 sayılı Resmi Gazetede yayımlanarak yürürlüğe girmiş, daha sonra 30/12/2006 tarihli ve 26392 sayılı Resmi Gazetede ki güncellenmiş olan ve son hali 30 Haziran 2016 tarihli ve 29758 sayılı resmi gazetede “*Muhtemel Patlayıcı Ortamda Kullanılan Teçhizat ve Koruyucu Sistemler ile ilgili Yönetmelik*” bulunmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 30 Haziran 2016, sayı:29758).

Özellikle patlama riski olan işyerlerinde risk değerlendirmesi yaparken (tutuşturma kaynakları vb.) rehber niteliğinde olan 29/12/2012 tarihli ve 28512 sayılı Resmi Gazetede ki “*İş Sağlığı ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği*” bulunmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 29 Aralık 2012, sayı:28512).

Kimyasal Madde güvenlik bilgi formlarının bulunması kararını hüküm altına almış olan 26/12/2008 tarihli ve 27092 sayılı Resmi Gazetede ki “*Tehlikeli Madde ve Müstahzarlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formlarının Hazırlanması ve Dağıtılması Hakkında Yönetmelik*” yönetmelik yerine 13/12/2014 tarihli ve 29204 sayılı “*Zararlı Maddeler ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik*” yürürlüğe girmiştir. (T.C. Resmi Gazete, 13 Aralık 2014, sayı:29204).

İşyerlerinde, yanma, parlama, patlama ihtimali olan maddelerin işlenmesi, depolanması, sevkiyatı ve imha edilmesi sırasında çalışanları kimyasalların fiziksel ve kimyasal risklerinden koruma hususunda 12/8/2013 tarihli ve 28733 sayılı Resmi

Gazetede ki “*Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik*” bulunmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 12 Ağustos 2013, sayı:28733).

Acil durum planlarının hazırlanarak, patlamanın da dahil edildiği acil durumların etkilerini azaltmaya yönelik güvenlik tedbirleri amacı ile düzenlenen 18/6/2013 tarihli ve 28681 sayılı Resmi Gazetede ki “*İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik*” bulunmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 18 Haziran 2013, sayı:28681).

İşyerinde tüm iş ekipmanlarının yangın patlamanın yayılmasına neden olan gaz, toz, buhar, aşırı ekipman ısınması gibi durumlara olanak vermeyecek şekilde hüküm altına alan 25/4/2013 tarihli ve 28628 sayılı Resmi Gazetede ki “*İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği*” bulunmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 25 Nisan 2013, sayı:28628).

Endüstriyel kazalar açısından tarihte önemli yer bulan İtalyanın Seveso (İtalya, 1976) kazasının ardından benzer kazaların yaşanmasını ve önlenmesini amaçlayarak kabul edilen Seveso Direktifi’ne (Bölüm 3.1.3.) uyum çerçevesinde SEVESO II direktifi esas alınarak düzenlenen ve tehlikeli maddeler bulunduran kuruluşlarda büyük endüstriyel kazaların önlenmesi ve muhtemel kazaların insanlara ve çevreye olan zararlarının en aza indirilmesi amacıyla, yüksek seviyede, etkili ve sürekli korumayı sağlamak için alınması gerekli önlemler ile ilgili usul ve esasları belirleyen “*Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik*” 30.12.2013 tarihli ve 28867 sayılı resmi gazetede yayınlanmış ve yürürlüğe girmiştir (T.C. Resmi Gazete, 30 Aralık 2013, sayı:28867).

3.1.1.1. Türk standardı

TS 3491 EN 60079-10-1:2015: Patlayıcı ortamlar- Bölüm 10-1: Alanların sınıflandırılması- Patlayıcı gaz ortamları

Yerini Aldığı: TS EN 60079-10-1:2009 :2011;

Yararlanılan Kaynak: EN 60079-10-1:2015

ICS Kodu: 29.260.20 Patlayıcı Atmosferlerde Çalışan Elektrik Cihazları

Cen/Cenelec: CENELEC/IEC

Kapsam:IEC60079'un bu bölümü, alevlenebilir gaz veya buhar tehlikelerinin ortaya çıkabildiği alanların sınıflandırılmasını kapsar ve ayrıca tehlikeli alanlarda kullanılması amaçlanan donanımın uygun bir şekilde seçilmesi ve tesis edilmesine yardımcı olmak için bir temel doküman olarak kullanılabilir (<https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073081100082049048100056086049113097>, Erişim tarihi: 26 Aralık 2017).

Türk Standardının oluşturulmasında “EN 60079-10-1:2009:2011” esas alınmıştır.

Türk Standardı TS 3491 EN 60079-10-1:2015'e göre;

Patlayıcı Atmosfer:

Normal atmosfer şartları altında, tutuşmadan sonra alev yayılımının kendi kendine sürdürülebilmesine olanak sağlayan; hava ile alevlenebilir gaz, buhar, toz, lif formundaki maddelerin yaptığı karışım (TS EN 60079-10-1: 2015, Bölüm 10-1, Madde:3.1).

Patlayıcı Gaz Atmosferi: Normal atmosfer şartları altında, tutuşmadan sonra alev yayılımının kendi kendine sürdürülebilmesine olanak sağlayan; hava ile alevlenebilir gaz veya buhar formundaki maddelerin yaptığı karışım (TS EN 60079-10-1: 2015, Bölüm 10-1, Madde:3.2).

Tehlikeli Bölge: (Patlayıcı Gaz Atmosferi Nedeni ile):

İçinde cihazların yapılması, kurulması ve kullanılması için özel tedbirlerin alınmasını gerektirecek miktarlarda patlayıcı gaz ortamı bulunan veya bulunması beklenen bölge (TS EN 60079-10-1: 2015, Bölüm 10-1, Madde:3.3.1).

Tehlikeli Olmayan Bölge (Patlayıcı Gaz Atmosferi Nedeni ile):

İçinde cihazların yapılması, kurulması ve kullanılması için özel tedbirlerin alınmasını gerektirecek miktarlarda patlayıcı gaz ortamı bulunması beklenmeyen bölge (TS EN 60079-10-1: 2015, Bölüm 10-1, Madde:3.3.2).

Bölge (Zone):

Tehlikeli alan sınıflandırması, meydana gelme sıklığı ve süresine göre patlayıcı atmosferin meydana gelme sıklığı ve süresine göre tehlikeli alan sınıflandırması (TS EN 60079-10-1: 2015, Bölüm 10-1, Madde:3.3.3).

TS 3491 EN 60079-10-2:2015***Patlayıcı ortamlar-Bölüm 10-2: Alanların sınıflandırılması- Patlayıcı tozlu ortamlar (IEC 60079-10-2:2015)***

Yerini Aldığı: TS EN 60079-10-2 :2010;

Yararlanılan Kaynak: EN 60079-10-2:2015

Uluslararası Karşılıklar: EN 60079-10-2 E V; IEC 60079-10-2 E V

Tercüme Edildiği STD: EN 60079-10-2

ICS Kodu: 29.260.20 Patlayıcı Atmosferlerde Çalışan Elektrik Cihazları

Atıf Yapılan STD: TS EN 60079-0 :2013; TS EN 60079-10-1 :2015;

Cen/Cenelec: CENELEC/IEC

Kapsam: IEC60079'un bu bölümü, patlayıcı tozlu ortamların ve yanıcı toz katmanlarının bulunduğu alanlardaki tutuşturma kaynaklarının doğru bir biçimde değerlendirilmesine imkan vermek için bu gibi alanların tanıtılması ve sınıflandırılmasını kapsar (TS EN 60079-10-2:2015, Bölüm 10-2: Tehlikeli bölgelerin sınıflandırılması).

TS EN 60079-10-2: 2015 standardında tozun jenerik terim olarak yanıcı toz ve yanıcı uçucuları kapsadığı belirtilmiştir. Standartta yanıcı toz; nominal büyüklüğü 500 µm ve daha düşük olan, atmosferik basınçta ve normal sıcaklıkta havayla patlayıcı karışım oluşturabilen ince bölünmüş katı parçacık olarak tanımlanmış,

yanıcı uçucu ise nominal boyutu 500 µm'den daha büyük olan, atmosferik basınçta ve normal sıcaklıkta havayla patlayıcı karışım oluşturabilen katı parçacık olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, yanıcı uçucuların lifleri de kapsadığı belirtilmiştir (TS EN 60079-10-2:2015, Bölüm 10-2: Tehlikeli bölgelerin sınıflandırılması).

3.1.2. Uluslararası standartlar

Elektrik tesisatları için standartlar, tehlikeli bölgelerde güvenliği sağlamak amacı ile dünya çapında çeşitli organizasyonlar tarafından oluşturulmuş ve yürütülmektedir. *NEC (National Electric Code)* ve *CEC (Canadian Electric Code)* Kuzey Amerika tarafından yürütülmekte olup, Avrupa'da birçok Avrupa ülkesi tarafından kabul gören *Euronorm (EN)* standartları Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi – (CENELEC) tarafından geliştirilmiştir. Diğer ülke standartları ise ağırlıklı olarak “Uluslararası Elektroteknik Komisyonu – *IEC*” tarafından yürütülen uluslararası standartlarını temel almış veya ürün veya sistemlerini Avrupa veya Kuzey Amerika standartlarına göre sertifikalı olacak şekilde kabul etmişlerdir.

- IEC 60079-0:2009 Patlayıcı Atmosferler – Bölüm 0: Ekipman – Genel Gereksinimler
- IEC 60079-10-1:2009 Patlayıcı Atmosferler – Bölüm 10-1: Bölge Sınıflandırması – Patlayıcı gaz Atmosferler
- IEC 60079-10-2:2009 Patlayıcı Atmosferler – Bölüm 10-2: Bölge Sınıflandırması – Patlayıcı toz Atmosferler
- IEC 60079-14: 2008 Patlayıcı Atmosferler. Elektrik tesisatı tasarımı, seçimi ve kurulumu.
- EN 1127-1:2007 Patlayıcı Atmosferler. Patlama önleme ve korunma. Temel kavramlar ve metodoloji.
- EN 13463-1:2009 Patlama tehlikesi olan ortamlarda kullanım için elektrikli olmayan ekipman Bölüm 1: Temel metotlar ve gereksinimler.

3.1.3. Seveso direktifleri

Seveso, İtalya/Milano'ya yaklaşık 20 km uzaklıkta bulunan yaklaşık 17.000 nüfuslu küçük bir kasabadır. Kasabanın yakınında bulunan 10 Temmuz 1976'da

Icmesa Chemical Company adlı firmaya ait olan ve triklorofenol (TCP) üretimi yapan bir fabrikada, normal operasyon sırasında TCP reaktörü kontrol dışı çalışarak normal çalışma sıcaklığının çok üzerinde çalışarak yoğun bir biçimde TCDD (tetraklorodibenzoparadioksin) üretmeye başlamıştır. Yaklaşık 2 kg TCDD gazı sızarak (yapılan çalışmalar çok küçük miktarda – vücut ağırlığının yaklaşık 10^9 'u – öldürücü etkidedir) beyaz bir bulut olarak kasabanın üzerini kaplamıştır.

Seveso kasabasında gerçekleşen bu kaza sonrasında, endüstriyel kazaların oluşmasının engellenmesi ve gerekli önlemlerin alınması adına hazırlanmış olan Seveso Direktifi (82/501/EEC) kabul edilmiştir. 9 Aralık 1996'da ise 96/82/EC sayılı “Tehlikeli Maddeleri İçeren Büyük Kaza Risklerinin Kontrolüne İlişkin Direktif (Seveso II Direktifi [Direktif 96/82/EC])” yayımlanmıştır. Seveso III Direktifinin ülkemiz mevzuatına uyumlaştıran “Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik” ÇSB ve ÇSGB oluşturulan bir komisyon ile hazırlanarak, 30 Aralık 2013 tarih ve 28867 Mükerrer sayılı Resmi Gazete'de yayımlanarak yürürlüğe girmiştir. Kimyasal sınıflandırma sisteminin değişmesi nedeniyle güncellenerek 2012 yılında Seveso III direktifi yayımlanmıştır (Direktif 2012/18/EU) ve 1 Haziran 2015 tarihinde yürürlüğe girmiştir (<http://ced.csb.gov.tr/bekra/Seveso/82669>, Erişim Tarihi: 26.12.2017).

3.1.4. Toz patlamaları ile ilgili NFPA standartları

Ulusal Yangından Korunma Derneği (NFPA) 1896 yılında kurulan, yangın, elektrik ve ilgili tehlikeler nedeniyle ölüm, yaralanma, mal ve ekonomik kayıpları ortadan kaldırmak için kurulmuş küresel bir sivil toplum kuruluşudur (<https://www.nfpa.org/About/NFPA> Erişim Tarihi: 02.09.2018).

Patlamalarla ilgili başlıca NFPA standartları:

1. NFPA 36, Solvent Ekstraksiyon Tesisleri için Standart (*Standard for Solvent Extraction Plants*)

2. NFPA 61, Tarım ve Gıda İşleme Tesislerinde Yangın ve Toz Patlamaları Önleme Standardı, (*Standard for the Prevention of Fires and Dust Explosions in Agricultural and Food Processing Facilities*)
3. NFPA 68, Deflasyon Havalandırması ile Patlamadan Korunma Standardı, (*Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting*)
4. NFPA 69, Patlama Önleme Sistemleri Standardı, (*Standard on Explosion Prevention Systems*)
5. NFPA 70, Ulusal Elektrik Kodu (*National Electric Code*)
6. NFPA 484, Yanıcı Metaller için Standart (*Standard for Combustible Metals*)
7. NFPA 654, Yanıcı Katı Partiküllerin Kullanılması, İşlenmesi ve Üretilmesinden Kaynaklanan Toz Patlamalarının ve Yangınlarının Önlenmesi Standardı (*Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from the Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids*)
8. NFPA 655, Sülfür Yangınları ve Patlamalarını Önleme Standardı (*Standard for Prevention of Sulfur Fires and Explosions*)
9. NFPA 664, Ağaç İşleme ve Ağaç İşleme Tesislerinde Yangın ve Patlamaların Önlenmesi için Standart (*Standard for the Prevention of Fires and Explosions in Wood Processing and Woodworking Facilities*)

Spesifik olarak toz patlaması ile ilgili gerekli kontrollerin sağlanması ve risklerin önlenmesine yönelik NFPA standartları;

1. NFPA 654, “Yanıcı Katı Partiküllerin Kullanılması, İşlenmesi ve Üretilmesinden Kaynaklanan Toz Patlamalarının ve Yangınlarının Önlenmesi Standardı”

Bu standardın amacı, hibrit karışımları da ihtiva eden yanıcı katı partiküllerin kaynaklanacak yangın ve patlama tehlikesinin önüne geçmek ve yangın/patlama meydana gelmesinden kaynaklanacak her türlü hasarı minimize etmek amacı ile teknik gereksinimlerdir (<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=654>, Erişim Tarihi:2 Eylül 2018).

NFPA 654 yanıcı tozların tehlikeleri hakkında detayları verir, binaların yapısal gerekliliklerini ve tozlarla yapılan çalışmalarda kullanılacak ekipman türlerini belirler. Diğer NFPA standartlarını referans alarak, işyerlerinde uygulanabilecek patlamadan korunma sistemlerinin seçimi ve tasarımına ilişkin esasları kapsayan bu standartta ayrıca, işyerlerinde toz patlamalarından korunulmasına yönelik aşağıdaki bileşenleri içeren yönetim sistemlerinin geliştirilmesini ve yürütülmesini önerir (Asana, 2015):

- Tehlike değerlendirme,
- Değişiklik yönetimi,
- Bakım ve kontrol,
- Düzen,
- Prosedürler ve eğitim.

2. NFPA 484, “Yanıcı Metaller Standardı”

Bu standart, yanıcı toz üretiminde kullanılan yanma veya patlama yeteneğine sahip metal veya metal alaşımlarının; üretim, işleme, tamamlama, taşınması, geri dönüştürülmesi, depolama gibi operasyonlar için geçerlidir

(https://www.nfpa.org/standard_items/search_results?searchStr=NFPA%20484, Erişim tarihi: 2 Eylül 2018).

İnce toz, tanecikler halinde alüminyum ve magnezyum gibi kolay ateşlenmeye ve alevlenebilir metaller tozlarını kapsayan bir standarttır. Bu tozlar yüksek enerji ile patlayacakları yanma ve patlamadan korunma sistemleri için NFPA 654 yeterli ve uygun olmayacaktır.

Bölüm 6.2’ de incelenen Hayes Lemmerz patlamasında, bahsi geçen ve patlamaya neden olan toz toplama sisteminin NFPA 484’e uygun tasarlanmadığı görülmüştür.

NFPA 69' a göre patlama:

“..Bir yanma sonucu oluşan iç basınç etkisiyle bir kapalı alanın veya kabın tahrip olması veya parçalanması ..yüksek basınçlı bir gazın ortama çok hızlı birşekilde yayılması” olarak tanımlanmıştır.

NFPA (National Fire Protection Association), NFPA 68'de “NFPA Amerikan Ulusal Yangın Önleme standardına göre yanıcı tozlar:

2006 yılına kadar:

“...Havada yayıldığı ve tuttuğu takdirde patlamaya neden olan 420 mikron veya daha küçük çaptaki partiküllere ayrılmış katı maddeler..” (NFPA 654, Madde: 3.3.4).

2006 yılından itibaren:

“...Partikül boyutu veya şekli ne olursa olsun, konsantrasyon sınırlarının üzerinde olacak şekilde havada veya diğer oksitleyici ortamda asılı halde bulunan, parlama veya patlama tehlikesi taşıyan yanıcı katı madde partikülleri..” (NFPA 654, Madde: 3.3.4).

3.1.5. ATEX yönergeleri

ATEX, Fransızca “Atmosphere Exposable” olarak patlayıcı ortamları ifade eden kelimelerin ilk heceleri kullanılarak meydana gelmiş, patlayıcı ortamlarda kullanılmak üzere üretilmiş ekipman ve koruyucu sistemler olarak ifade edilebilir. Bu kurallar sistemi, patlayıcı ortamlarda kullanılacak elektrikli ekipmanlara uygulanacak teknik zorunlulukları içerir (Ergür, 2012).

Patlayıcı ortamlara ait bölümler ve ürünler için sınıflamalar yapılmasını ve bu ortamlarda kullanılacak ürünlerde CE sertifikasına uygunluk gerekliliğini ortaya koymuştur. Tozlu ortamlardaki koruma göz önüne alınarak ilk olarak oluşturulmuş ATEX direktifleri, daha sonraki aşamalarda, toz koruma, gaz koruma talimatlarına göre, bölge ve ürünler temel alınarak alt başlıklara bölünmüştür (Ergür, 2012).

ATEX sertifikası patlayıcı ve kolay yanıcı ortamlarda kullanılan ürünlerin yapıldığı yer için alınan uluslararası bir sertifikadır. Patlayıcı, patlayıcı ve kolay

yanıcı ortamlarda kullanılan ürünlere ve üretimin yapıldığı yere alınan uluslararası sertifikadır (Ergür, 2012).

ATEX Direktifi 2014/34 / EU, 1 Temmuz 2013-19 Nisan 2016 tarihleri arasında geçerli olan 94/9 / EC sayılı ATEX Direktifinin yerini almıştır. Ulusal mevzuata göre, 2014/34 / EU sayılı Direktif, 20 Nisan 2016 itibariyle, AB Üye Devletleri, geçerli olan tek yasal araçtır (ATEX 2014/34/EU Guidelines, 2017, s.5).

2014/34 / EU sayılı Direktif, toz ve gaz tehlikeleri nedeniyle potansiyel olarak patlayıcı olan ortamlarda ve koruyucu sistemlerde kullanılmak üzere tasarlanmış elektrikli ve elektrikli olmayan ekipmanlara yönelik uyumlaştırılmış gereklilikleri sağlamaktadır. Patlama riski dışında ekipmanın veya koruyucu sistemlerin emniyetli çalışması için gerekli olan veya katkıda bulunan patlayıcı ortamların dışında kullanım için tasarlanan güvenlik cihazları da dahildir (ATEX 2014/34/EU Guidelines, 2017, s.19).

ATEX direktiflerine göre, patlayıcı ortam oluşma sıklığı ve olasılığını göz önünde bulundurularak risk bölgeleri belirlenmiştir. Bu risk bölgelerine göre, tozlar için bu bölgelere, madenler, kimyasal fabrikalar, enerji santralleri, un ve tahıl değirmenleri ve siloları, boya ve çimento fabrikaları örnek gösterilebilir. Bu bölgelerde kullanılabilecek ekipmanlar da gruplandırılmış olup, “Uygunluk Kategorileri” olarak adlandırılmıştır (Ergür, 2012).

ATEX’e göre, toz içeren patlayıcı ortamlara örnek olarak, madenler, kimyasal fabrikalar, enerji santralleri, boya ve çimento fabrikaları, un değirmenleri gösterilebilir (Ergür, 2012).

3.2. Mevzuat ve Standartlara Göre Tehlikeli Bölge Tanımı ve Sınıflandırılması

Elektrik tesisatı ile donatılmış endüstriyel tesislerin oldukça farklı yapıları nedeniyle, gaz-hava, buhar-hava veya toz-hava karışımları tarafından oluşturulan farklı potansiyel patlayıcı atmosferlerin bulunma olasılığı vardır. Ekonomik

nedenlerle, elektrik aparatları ve sistemleri için patlama koruma tipleri, kurulum noktasındaki patlama riskine büyük ölçüde bağlı olacaktır (Groh, 2003).

Patlama korumalı tüm elektrikli aparatları, sürekli olarak yanıcı gaz, buhar ve toz ile çevrelenmiş biçimde çalışabilecek şekilde inşa etmek ve oldukça alışılmadık bir tutumdur. En uygun yol ise bir endüstriyel tesisteki her bir alanın tehlikeli bir atmosferin varlığı konusunda sınıflandırılması ve uygun tipte patlama korumasının oluşturulmasıdır. Bu sınıflandırma, tehlike ve potansiyele göre “bölgelere” ayrılarak gerçekleştirilir (Groh, 2003).

Elektrik mühendisliği ve patlama korumasının tarihsel gelişiminin ardından, bölge sınıflandırması ulusal standartların ve NFPA tarzı standartlara yön veren kuruluşların amacı haline gelmiştir. Önde gelen sanayi ülkelerinin çoğu, gaz veya buhar-hava karışımları ve tehlikeli toz-hava karışımları bulunan alanları kapsayan tehlikeli bölgeler için iki veya üç bölge kimyasal tesisler ve petrol / gaz endüstrisi için bir kurulum uygulaması oluşturmuştur. Bu felsefenin yanı sıra, çoğu ülkede kömür madenciliği sektörü, bir alan sınıflandırmasından kaçınmaya eğilimlidir ve yalnızca bir patlama koruması kategorisi tanımlar “yangına karşı dayanıklı”. Daha yeni standartlar veya direktifler, yanıcı gaz tarafından tehlike altında olan alanlar için üç alanlı bir konsept sunmaktadır: Endüstriyel tesislerde (kömür madenleri hariç) gaz, buhar/sis-hava karışımları ve toz-hava karışımları. Zaman geçtikçe, alan sınıflandırmasına yönelik ulusal standartlar, uluslararası standartların (IEC, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu, Cenevre / İsviçre ve EN, Avrupa Standardı veya Avrupa Normu, CENELEC, *Comité Européen de Normalization Electrotechnique*, Brüksel / Belçika tarafından kurulan) yerini almıştır (Groh, 2003).

Patlayıcı gaz ve buhar atmosferi için tehlike sınıflandırması şu şekildedir (TS EN 60079-10: 2015 Bölüm 10);

Bölge 0: Bir patlayıcı gaz atmosferinin sürekli olarak veya uzun süre veya sıklıkla mevcut olduğu bir alan.

Bölge 1: Patlayıcı gaz atmosferinin normal çalışma sırasında periyodik olarak veya zaman zaman meydana gelmesi muhtemel bir alan.

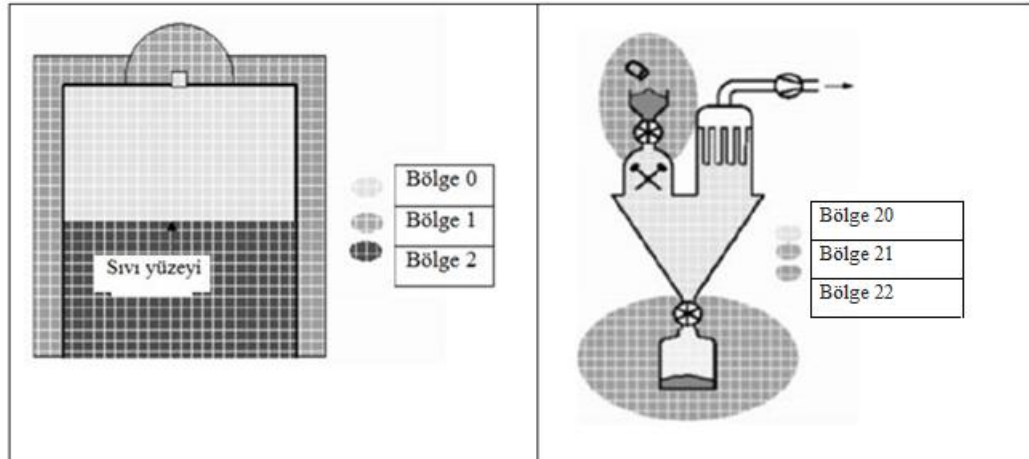
Bölge 2: Normal çalışma sırasında patlayıcı gaz atmosferinin oluşma ihtimali olmayan ancak meydana gelmesi durumunda kısa bir süre için var olacak bir alan.

Patlayıcı toz atmosferi için tehlike sınıflandırması şu şekildedir (TS EN 60079-10:2015 Bölüm 10);

Bölge 20: Havadaki toz bulutu şeklinde patlayıcı bir toz atmosferinin sürekli olarak veya uzun süre veya sık olarak bulunduğu bir yer

Bölge 21: Havadaki toz bulutu biçimindeki patlayıcı bir toz atmosferinin, bazen normal koşullarda meydana gelmesi muhtemel bir yer.

Bölge 22: Havadaki toz bulutu şeklinde patlayıcı bir toz atmosferinin normal bir durumda oluşma ihtimali yoktur ancak meydana gelirse, sadece kısa bir süre devam eder.



Şekil 3.1. Bölge Sınıflandırma Örnekleri (TS EN 60079-10:2015 Bölüm 10)

Alevlenebilir gazlar, buharlar ve yanıcı tozlar her yerde bulunmasına rağmen, çok kısa süreli olarak ortamda kalırlar. Çünkü, basitçe, alevlenebilir gazlar veya buharlar veya yanıcı tozlar bulunsun bile, o bölgenin tehlikeli bölge olarak adlandırılabilmesi için, potansiyel tehlikeli bölgelerde miktar veya konsantrasyon olarak yeter miktarda bulunması gerekmektedir

(https://www.rstahl.com/fileadmin/Dateien/tgus/Documents/ExProtection_Global_America_Basics.pdf, Erişim tarihi: 13 Haziran 2018).

Hiç şüphe yok ki endüstriyel tesislerin temel endişe kaynağı yangın ve patlamalardır. Bu sebeple, endüstriyel güvenliğin diğer yönlerine göre kodlar, standartlar, teknik dokümanlar ve mühendislik dizaynı gibi konularda daha fazla dikkat çekmektedir. İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi – *Occupational Safety and Health Agency (OSHA)* – gibi kuruluşlar, belirtilen tehlike derecesine göre potansiyel tehlikeli koşullar oluşturduğunu gösteren alanların sınıflandırılmasına yönelik sistem kurmuşlardır

(https://www.rstahl.com/fileadmin/Dateien/tgus/Documents/ExProtection_Global_America_Basics.pdf, Erişim tarihi: 13 Haziran 2018).

Tehlikeli bölgeler ayrıca, genel bir ifade ile elektrikli ekipmanların tesis edileceği yerlerin doğası gereği patlayıcı etki yaratacak koşulları sağlayan elementleri ihtiva etmesi ile elektrikli ekipmanların tutuşturucu etki yapması nedeniyle tehlikeli ortam oluşturduğu bölge olarak da ifade edilebilir. Maalesef, özellikle madenlerde tabiatı gereği bulunan metan gazı ve kömür tozu gibi alevlenebilir maddelerin mevcudiyeti önlenememektedir

(https://www.rstahl.com/fileadmin/Dateien/tgus/Documents/ExProtection_Global_America_Basics.pdf, Erişim tarihi: 13 Haziran 2018).

3.3. Patlamadan Korunma Dokümanı

Patlamadan korunma dokümanı, “Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik” dahilinde, patlama riski olan işyerlerinde güvenlik risklerin tanımlanması, gerekli önlemler için teknik ve organizasyonel tedbirler planlanması ve hayata geçirilmesi hem çalışan hem de işyerinin maliyetinin korunması açısından büyük önem arz etmektedir.

Patlama riskinin değerlendirilmesi yapılırken “*Patlamadan Korunma Dokümanı*” olarak anılacak dokümanda özellikle bulunması gerekenler (T.C. ResmiGazete, 30 Nisan 2013, sayı: 28633);

- Patlama riskinin belirlendiği ve değerlendirildiği,

- “Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik” te belirlenen yükümlülüklerin yerine getirilmesi için alınacak önlemler,
- İşyerinde patlayıcı ortam oluşturabilecek sınıflandırılmış yerler,
- Patlayıcı ortam risklerinden korunma için asgari gereklerin uygulanacağı yerler,
- Çalışma yerleri ile uyarı cihazları da dahil iş ekipmanının tasarımı, işletilmesi, kontrol ve bakımının güvenlik kurallarına uygun olarak sağlandığı,
- İşyerinde kullanılan tüm ekipmanların “İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları Yönetmeliği” ne uygun olduğu, hususlarının yazılı olarak yer alması gerekmektedir.

Patlamadan korunma dokümanı, işin başlamasından önce hazırlanır ve işyerinde, iş ekipmanında veya organizasyonda önemli değişiklik, genişleme veya tadilat yapıldığında yniden gözden geçirilir ve güncelleştirilir (T.C. ResmiGazete, 30 Nisan 2013, sayı: 28633).

Patlayıcı ortamlara rehber niteliğindeki yasal mevzuat ve standart bilgileri Bölüm 3.1.’de verilmiştir.

1999/92/EC sayılı Avrupa Parlamentosu ve Konseyi Direktifine paralel olarak “Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik” in rehber alındığı patlamadan korunma dokümanı içeriğinde, patlama riskinin özel olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Patlayıcı ortamdan kaynaklanan özel risklerin değerlendirmesinde aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır (T.C. Resmi Gazete, 30 Nisan 2013, sayı: 28633);

- a. Patlayıcı ortam oluşma ihtimali ve bu ortamın kalıcılığı,
- b. Statik elektrik de dâhil tutuşturucu kaynakların bulunma, aktif ve etkili hale gelme ihtimalleri,
- c. İşyerinde bulunan tesis, kullanılan maddeler, prosesler ile bunların muhtemel karşılıklı etkileşimleri,

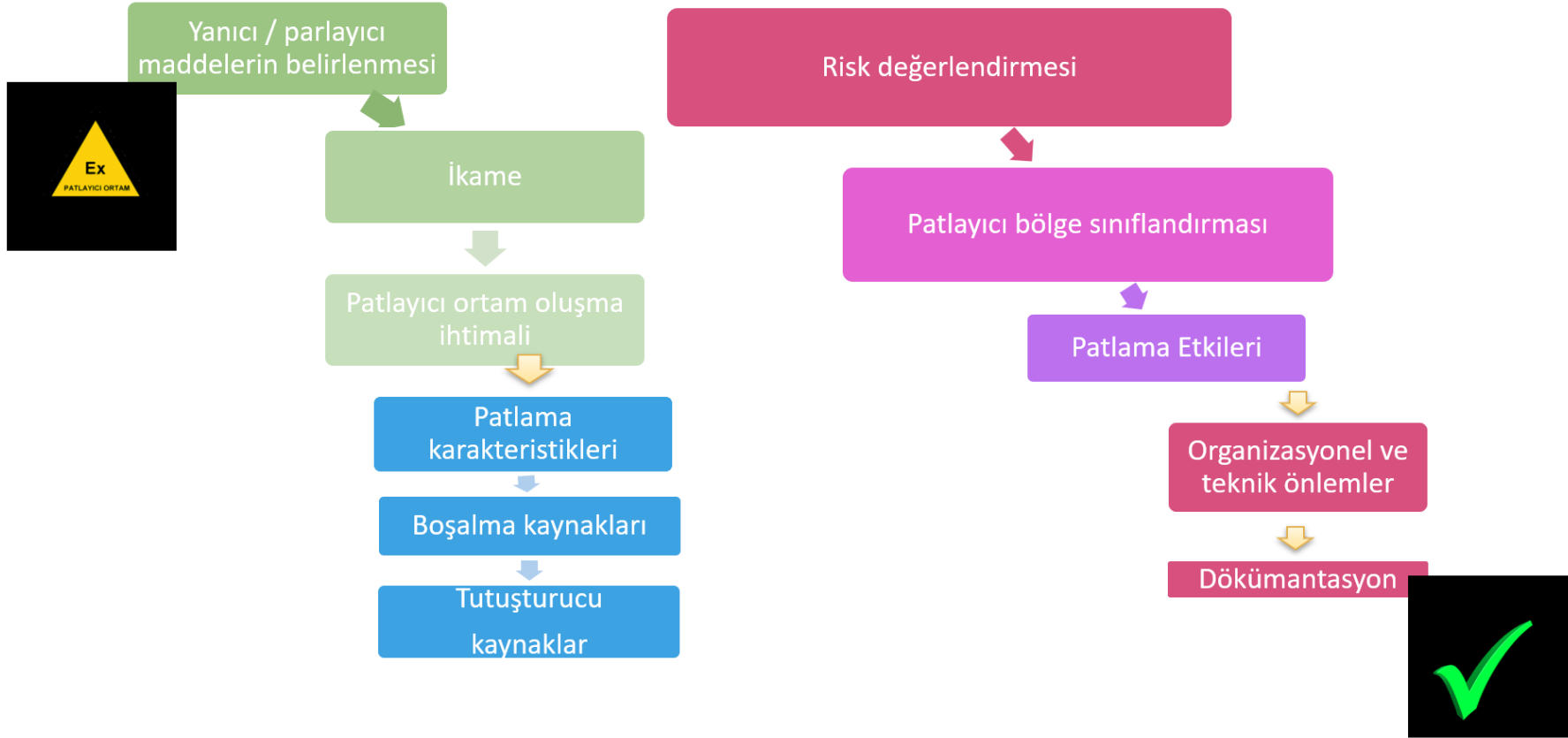
d. Olabilecek patlama etkisinin büyüklüğü,

Patlayıcı ortamlara dair önlemler alınırken, yönetmeliğin beşinci maddesi gereğince aşağıda yer alan öncelik sırasına uyulması gerekmektedir;

1. Patlayıcı ortam oluşmasını önlemek,
2. Yapılan işlemlerin doğası gereği patlayıcı ortam oluşmasının önlenmesi mümkün değilse patlayıcı ortamın tutuşmasını önlemek,
3. Çalışanların sağlık ve güvenliklerini sağlayacak şekilde patlamanın zararlı etkilerini azaltacak önlemleri almak (T.C. Resmi Gazete, 30 Nisan 2013, sayı: 2863



Patlama Önlenmesinde Adımlar



Şekil 3.2. Patlamadan Korunma Dokümanı Hazırlama (Layık, 2016), (Tuncay ve ark., 2015), (Eğri, 2008), (T.C. Resmi Gazete, 30 Nisan 2013, sayı: 28)

Tüm bu adımlar doğrultusunda;

1. Birinci adım: Tesisteki tüm patlayıcı maddelerin tespit edilmeli
2. İkinci adım: Mümkünse, patlayıcı özelliği olmayan başka bir madde ile ikame
3. Yanıcı maddelerin olduğu ortamlarda patlayıcı ortamın oluşması, havayla oluşturdukları karışımın yoğunluğunun alt ve üst patlama sınırları arasında olmasına bağlıdır. Eğer yanıcı madde gaz ise ortamda yeterli dağılıma ulaşmışsa ve havadaki yoğunluğu patlama sınırlarına erişmişse, patlayıcı ortam oluşmuş demektir. Ancak, toz konsantrasyonu, toz katmanları havaya yükseldiğinde veya toz bulutu yere çöktüğünde ciddi ölçüde değişmekte, bu sebeple toz patlaması için patlayıcı ortam oluşması başka kriterlere de bağlıdır (toz patlaması için alt patlama sınırı yeterlidir, üst patlama sınırı ihmal edilebilir (Bölüm 4.4.2.1.2.). Çoğu patlayıcı toz için, tüm odanın yüzeyini kaplayan 1 mm'den az derinlikteki toz katmanının havalandığı takdirde, tüm odayı kaplayacak büyüklükte patlayıcı toz atmosferi oluşturabileceği kabul edilmektedir (Layık, 2016). Kapalı kaplardaki patlayıcı gaz atmosferi oluşturabilen maddelerin sıcaklığı, kap içerisindeki patlayıcı gazın parlama noktasının yeterli düzeyde ($5 \pm 5^\circ\text{C}$) altında tutulursa, kap içinde patlayıcı ortam oluşmamaktadır (Layık, 2016). Kapalı bir ortamda (odada) 10 litreden büyük hacme sahip patlayıcı ortamın sürekli varlığı, ortam büyüklüğüne bakılmaksızın tehlikeli patlayıcı ortam olarak kabul edilmelidir. Ayrıca, kaba bir tahminle odanın hacminin 1/10.000'i kadar hacim kaplayan patlayıcı hacim tehlikeli kabul edilmelidir. Örneğin; 80 m³ hacme sahip olan bir odada gaz fazında 8 litrelik hacim kaplayan maddenin varlığında, odanın tehlikeli patlayıcı ortam içerdiği kabul edilmelidir. Ancak bu durum, tüm odanın patlayıcı ortam kabul edilmesi gerektiği anlamına gelmemektedir. Odanın patlayıcı maddenin bulunduğu kısmı belirlenmeli ve yalnızca o hacim tehlikeli patlayıcı ortam kabul edilmelidir (Layık, 2016).
4. Patlamadan korunma dokümanı hazırlanırken, mutlaka patlayıcı ortamın oluşmasının engellenip engellenemeyeceği incelenmeli, mümkünse patlayıcı ortamın oluşması engellenmelidir. Patlayıcı ortam oluşumunun güvenli

şekilde engellenemediği durumlarda, patlayıcı bölge sınıflandırması yapılması gerekmektedir (Layık, 2016).

5. Patlamadan korunma dokümanı kapsamında söz konusu maddenin patlama karakteristiklerinin mutlaka belirlenmesi gerekmektedir. Tesiste patlayıcı toz atmosfer varsa, literatür taraması yapılarak tesiste işlenen tozun partikül büyüklüğü, nem içeriği vb. özelliklerine uygun patlama karakteristikleri belirlenebilir. Literatür taraması sonucu patlama karakteristiklerinin bulunamadığı durumlarda, tesisteki patlayıcı tozdan alınan numune ile laboratuvarında standartlara uygun şekilde testler yaptırılarak patlama karakteristiklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde; yanlış hesaplamalar yapılarak, uygun olmayan ekipman ve patlamadan korunma yöntemleri seçilebilmektedir (Layık, 2016).
6. Patlama karakteristikleri belirlendikten sonra, tesisteki patlayıcı maddelerin patlayıcı atmosfer oluşturmak üzere ortama yayıldığı boşalma kaynakları (vana, flanş, dolum noktası vb.) ile patlayıcı maddelerin hava ile karışarak patlayıcı atmosfer oluşturduğu ortamların (silolar, ekipmanların içi, depo vb.) belirlenmesi gerekmektedir (Layık, 2016).
7. Belirlenen patlayıcı atmosferlerin bulunduğu ortamlardaki tutuşturucu kaynaklar ve tutuşturucu kaynakların bulunma ve aktif hale gelme olasılıkları belirlenmelidir (Layık, 2016).
8. Belirlenen tüm bu bilgiler ışığında Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik gereği tesiste patlamaya yönelik risk değerlendirmesi yapılması gerekmektedir. Bu aşamada tesisteki süreçler ve patlayıcı ortamlar göz önünde bulundurularak, tesise uygun risk değerlendirmesi yöntemi belirlenmeli ve belirlenen yöntemle risk değerlendirmesi yapılmalıdır (Layık, 2016).
9. Risk değerlendirmesinin ardından, tesisteki tüm patlayıcı bölge sınıfları ve bölge genişlikleri hesaplanarak dokümante edilmelidir. Ayrıca, belirlenen patlayıcı bölgelerin yandan ve üstten teknik çizimlerinin yapılarak patlamadan korunma dokümanına eklenmesi gerekmektedir. Belirlenen tüm patlayıcı ortam oluşabilecek yerlere “Çalışanların Patlayıcı Ortamların

Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik, Ek-4' te yer alan uyarı işaretinin asılması gerekmektedir (Layık, 2016).

10. Patlamadan korunma dokümanı hazırlanırken alınan tüm önlemlere rağmen meydana gelecek bir patlamanın, yapılar ve çalışanlar üzerindeki muhtemel etkilerinin belirlenmesi gerekmektedir (Layık, 2016).
11. Tüm bu işlemlerin ardından, tesiste patlamaya karşı alınacak organizasyonel ve teknik önlemlerin belirlenerek dokümanite edilmesi ve patlamadan korunma dokümanına eklenmesi gerekmektedir. Teknik önlemler kapsamında, tesiste belirlenen patlayıcı bölge sınıfları ile ortamda bulunan patlayıcıların yapısına ve sıcaklık sınıfına göre kullanılması gereken ekipmanlar belirlenmeli, tesisteki ekipmanların uygunluğu değerlendirilmeli ve tesise alınacak ekipmanların mutlaka belirlenen bu kriterler doğrultusunda seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca, alınan tüm önlemlere rağmen meydana gelebilecek patlamalarının etkilerini azaltacak önlemler alınarak, dokümanite edilmeli ve patlamadan korunma dokümanına eklenmelidir (Layık, 2016).

3.3.1. Tutuşturma kaynakları

Yanıcı bir toz bulutu, yeterli güçte bir ısı kaynağıyla ateşlenmedikçe yanmaya başlamaz (Eckhoff, 2003). Toz patlamasının meydana gelmesi için pentagonu oluşturan etmenlerden tutuşturma kaynağının bertarafı (patlayıcı ortam oluşması engellenemiyorsa) toz patlamalarının önlenmesinde birincil önlemdir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Tutuşma kaynakları oluşma sıklığına göre aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir (Tuncay ve ark., 2015);

- Sürekli veya kendiliğinden oluşan tutuşturucu kaynaklar
- Nadiren oluşan tutuşturucu kaynaklar
- Çok nadir oluşan tutuşturucu kaynaklar

Ekipmanlar, koruyucu sistemler ve parçaları için ise aşağıdaki sınıflandırma kullanılabilir;

- Normal çalışma boyunca oluşan tutuşma kaynakları
- Bakım-onarım esnasında oluşan tutuşma kaynakları
- Yalnızca arızalardan kaynaklı tutuşma kaynakları

En yaygın tutuşma kaynakları; (Eckhoff, 2003), (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Tablo 3.1. Almanya’da Gerçekleşen 426 Toz Patlamasının Tutuşturucu Kaynaklara Göre Dağılımı

Tutuşturma Kaynağı	426 patlamanın tümü		Ahşap ve Ahşap Ürünleri	Kömür	Gıda ve Yem	Plastik	Metal
	Sayı	%					
Mekanik Kıvılcım	112	26,2	26,6	5,1	22,8	21,2	56,1
İçten Yanma	48	11,3	19,5	20,05	5,7	9,6	0
Mekanik Isınma ve Sürtünme	38	9,0	9,4	5,1	12,4	9,6	3,5
Elektrostatik yüklenme	37	8,7	2,3	0	6,7	34,6	5,3
Yangın	33	7,6	14,6	12,8	4,8	2	2
Kendiliğinden Tutuşma	21	4,9	3,1	15,4	6,7	2	3,5
Sıcak yüzeyler	21	4,9	5,5	10,3	2,8	3,9	3,5
Kaynak ve Kesim	21	4,9	2,3	2,6	12,4	2	2
Elektrikli Aletler	12	2,8	0	2,6	5,7	2	0
Bilinmeyen veya Raporlanmayan	68	16,0	16,5	25,6	20,0	13,1	24,1
Diğer	15	3,5					
Toplam	426	100	100	100	100	100	100

Kaynak: (Eckhoff, 2003)

❖ Kendiliğinden Isınma

Bir tozun tutuşması için ısıtma kaynağı mutlaka bir alev veya sıcak yüzey olmak zorunda değildir. Proses tesisinin içinde ve çevresinde biriken özellikle organik toz ve yığın depolamada tutulan malzeme tabakaları, bir süre boyunca bozulmadan bırakıldıklarında, kimyasal bozunmayla birlikte kendiliğinden ısınmaya maruz kalabilirler (Barton,2002). Deponun içindeki ilk oksidasyon bazen planlanandan daha yüksek bir sıcaklığa sahip olan toz veya tozdan kaynaklanabilir. Bununla birlikte, bazı organik maddeler, yağ veya nem içeriği yüksekse, biyokimyasal

aktiviteye bağlı olarak normal ortam sıcaklıklarında bile ilk kendiliğinden yanma gelişebilir (Eckhoff, 2003)

❖ **Açık alevler**

Kaynak ve kesme brülörlerinin alevleri, yeterli konsantrasyon aralığındaki toz bulutlarında patlamalar başlatmak için yeterince güçlüdür. Kesme işleminin yakıcı alevi özellikle tehlikelidir, çünkü çalışma bölgesine fazla oksijen verir. Yanıcı tozlar, havaya göre daha fazla oksijen içeren atmosferlerde dağıldıklarında, havada meydana getirdikleri toz bulutlarının hem tutuşma hassasiyeti hem de patlama şiddetleri artacaktır (Bölüm 4.4.2.1.4.) (Eckhoff, 2003).

Kaynak ve kesme gibi işlemler sırasında oluşan aşırı ısı da yakınlarda bulunan düşük tutuşturma sıcaklığına sahip (100–200 °C) bir toz olduğunda daha belirgin bir tetikleyici olacaktır. Kazalar genellikle ortaya çıkar, çünkü bu tehlike genellikle önceden değerlendirmeye alınmaz ve sıcak çalışma başlamadan önce toz ekipmandan temizlenmez (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Bunların yanı sıra, çakmak, sigara, kibrit vb. açık alev yayan kaynaklar da büyük tehlike arz etmektedir.

❖ **Sıcak yüzeyler**

Sıcak yüzey tutuşması, yüzey sıcaklığı ve geometrisi, temas süresi, hava akışı, kirlenme ve malzemenin kimyası ile ilgilidir. Sıcak rulmanlar, kurutucular, ısıtıcılar vb. sıcak yüzeylerde toz tabakalarının birikmesinin önlenmesi, iyi bir temizlik ile bu kaynağın tutuşma riskini önemli ölçüde azaltabilir (Barton, 2002).

❖ **Elektrikli ekipmanı veya kaynaktan kaynaklanan kıvılcım veya ark**

Elektrik kıvılcımları, anahtarların ve rölelerin normal çalışmasında ve arızalı elektrikli ekipmanlarda meydana gelir. Elektrik kıvılcımlarına karşı korunmak için tehlikeli alan sınıflandırılmalı ve korunmalıdır. Özellikle, aleve dayanıklı ekipman kullanılmalı ve tozları içermemelidir. Toz geçirmez olan ve tozdan arındırılmış ekipmanlar ile tozdan arındırılmış ekipman arasında bir ayırım yapılabilir ve

yalnızca çok az miktarda tozun içine girmesine izin verilir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

❖ Sıcak gaz

Normal çalışma sırasında ve herhangi bir hata meydana geldiğinde içten yanmalı motorlar ve analiz ekipmanlarında oluşabilir. Oluşan sıcak gazların muhafaza dışına çıkmasının önlenmesi ve sürekliliğinin korunması gerekmektedir. Örnek olarak: İçten yanmalı motorlardan veya şalter kontaklarının aşınan parçalarından çıkan partiküller sayılabilir (<https://www.bartec.de/en/downloads/safetyacademy/exprotection.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018).

❖ Yıldırım

Yıldırımın etkisi patlayıcı bir atmosferin tutuşmasına neden olabilir. Bununla birlikte, yıldırımla ulaşılan yüksek sıcaklık nedeniyle tutuşma olasılığı da vardır. Yıldırımındüştüğü yerden boşalan büyük akımlar, çarpma noktasında kıvılcımlar oluşturabilir (<https://www.bartec.de/en/downloads/safetyacademy/exprotection.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018)

❖ Adyabatik basınç ve şok dalgaları

Negatif basınçta çalıştırılan tüp şeklindeki yapılar da bir tutuşma kaynağı haline gelebilir. Örnekler: bir hidrojen / hava atmosferi ile doldurulmuş uzun floresan tüplerinin kırılması verilebilir (<https://www.bartec.de/en/downloads/safetyacademy/exprotection.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018).

❖ Statik elektrik

Yanıcı toz işleme sırasında ve kesme ve taşlama ile ilgili bakım / onarım sırasında darbe ve sürtünme ısınması birçok toz patlamasını tutuşmaktan sorumlu olmuştur. Bazı toz işleme tesislerinde statik elektrik kolayca üretilir (Abbasi ve Abbasi, 2007). Öğütücüler, değirmenler ve diğer boyut küçültme ekipmanları, konveyörler, taşıyıcı bantlar özellikle çalışma sırasında tutuşmaya eğilimlidir (Zalosh, 2011).

Normal çalışma artlarında statik elektrik boşalmaları (Tuncay, 2015), (Eckhoff, 2003);

- Kıvılcım boşalması

Topraklama yapılmaması durumunda iletken parçalar üzerinde yük birikmesi ile meydana gelen boşalma

- Fırça deşarjı

İçi yalıtkan metal borularla pnömatik taşıma veya konveyörlerle taşımalarda meydana gelebilir.

- Korona deşarjı

Plastik, ebonit gibi yalıtkan malzemelerin yüklü parçaların üzerinde meydana statik elektrik

- Koni boşalması

Silo veya siklonların doldurulması esnasında meydana gelen statik elektrik boşalması

❖ Şok dalgaları

Şok dalgalarında, patlayıcı ortamların ve toz katmanlarının tutuşabileceği derecede yüksek sıcaklıklar oluşabilmektedir. Sıcaklık artışı, basınç farkına değil basınç oranına bağlıdır. Yüksek basınçlı gazların aniden boru hattına bırakılması sırasında şok dalgaları oluşmaktadır. Bu işlemde şok dalgaları, düşük basınçlı bölgelere ses hızından daha hızlı ilerlemektedir. (Bölüm 4.1.1. ve 4.1.2) Şok dalgalarının yönü, boru dirsekleri, borunun daralan kısımları, bağlantı flanşları, kapalı vanalar vb. tarafından değiştirildiğinde çok yüksek sıcaklıklar oluşabilmektedir (Layık,2016).

❖ Radyasyon enerjisi (şiddetli elektromanyetik reaksiyon)

Radyasyon enerjisinin patlayıcı karışımı tutuşturabildiği kaynaklar arasında, 10^4 Hz ila 3×10^{11} Hz arasındaki radyo frekansı (RF) elektromanyetik dalgalar arasında şunlar yer almaktadır:

- Ultrasonik
- Elektromanyetik radyasyon □ radyo dalgaları

- Elektromanyetik radyasyon
- IR radyasyonu, görünür ışık
- İyonlaştırıcı radyasyon
- UV radyasyonu

Tesiste kullanılan radyasyondan yararlanan sistemler, cihazlar ve bileşenlerin karakteristik özellikleri kalıcı ve güvenli bir şekilde sınırlandırılmış ve test edilmiş ise, patlayıcı ortamlarda çalıştırılabilir, aksi takdirde potansiyel tehlike oluşturacağı, patlayıcı atmosfer bulunan bölgeye girmesi engellenmelidir. Örnekler: verici ve alıcı cihazlar, cep telefonları, fotoelektrik bariyerler ve tarayıcılar (<https://www.bartec.de/en/downloads/safetyacademy/exprotection.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018).

❖ Mekanik darbe kaynaklı ısı (termik reaksiyon)

Termit reaksiyonu³ genellikle alüminyum ve pas içeren darbelerden kaynaklanan potansiyel bir tutuşturma kaynağı olarak belirtilir (<https://www.bartec.de/en/downloads/safetyacademy/exprotection.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018). Refrakter metal oksitlerin alüminotermi indirgenmesi ferromolibden, ferroniobium, ferrotungsten vb. üretiminde kullanılır (Neikov ve ark., 2009). %75 Fe₂O₃ ve %25 Al içeren termit karışımı, 2500 °C'lik bir yanma sıcaklığı sağlar (Neikov ve ark., 2009).

Bununla birlikte, normal yumuşak bir alüminyum parçası paslı çelik yüzeyle çarpışır, bir termit reaksiyonunun gerçekleşmesi gerekmez. Aslında, alüminyumun yumuşaklığından dolayı, sonuç genellikle pasın üstünde alüminyumun ince bir lekesi ile sonuçlanacaktır. Bununla birlikte, eğer bu alüminyum ve pas, üçüncü bir nesne tarafından sert bir darbe alırsa, toz bulutlarını ateşleyebilen bir termit flaş kolaylıkla üretilebilir. Aynı şey, boya pigment içeriği nispeten yüksekse, alüminyum boya ile boyanmış paslı bir yüzey için de geçerlidir (<https://www.bartec.de/en/downloads/safetyacademy/exprotection.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018).

³Fe₂O₃ + 2Al → Al₂O₃ + 2Fe; ΔH = 851.5 kJ/Mol

3.3.2. Boşalma kaynakları

Boşalma kaynağı yanıcı gaz veya tozun patlayıcı ortam oluşturmak üzere ortama yayıldığı nokta veya yeri ifade etmektedir.

Boşalmanın gerçekleşme sıklığına ve süresine göre ayrılmış üç tip boşalma kaynağı bulunmaktadır.

a) *Sürekli boşalma kaynağı*: Boşalmanın sürekli veya uzun süreli veya kısa süreli ve sık sık meydana geldiği durumları,

b) *Ana boşalma kaynağı*: Boşalmanın normal proses koşullarında periyodik olarak veya ara sıra meydana geldiği durumları,

c) *Tali boşalma kaynağı*: Boşalmanın normal proses koşullarında meydana gelmesinin beklenmediği, ancak seyrek ve kısa süreli gerçekleşebildiği durumları kapsamaktadır (Layık,2016).

3.3.3. Bölge sınıflandırması

Bölge sınıflandırmaları ile ilgili bilgi Bölüm 3.1.'de verilmiştir.

Bölge sınıflandırması yapılırken toz katmanları ve patlayıcı toz yığıları da patlayıcı ortam oluşturabilecek kaynaklar olarak düşünülmeli ve bölge sınıflandırmasına ilave edilmelidir (Barton, 2002).

Patlama konsantrasyonuna ulaşmış toz bulutları yoğun en fazla bir metrelik görüş alanına izin verir. Buna göre, toz doldurma ve boşaltma sırasında zon 21'in kapsamı, bir dereceye kadar görsel olarak değerlendirilebilir. Bölge 21'de etkin bir şekilde çalışamaz ve tahliye edilen havalandırma noktalarında uygun bir havalandırma tasarımı, binanın neredeyse tüm açık kısımlarında zon 21'i ortadan kaldırır. Açık havada rüzgar hızları minimum da olsa hesaba katılacağından, herhangi Bölge 21 oluşması mümkün olmayacaktır ya minimum ölçüde olacaktır. Zon 21, 20 nolu bölge olarak belirlenemeyecek ölçüde seyrek olarak doldurulmuş olan proses tesisinin iç kısmı olarak belirlenebilir. Toz tutma sisteminin önemli miktarda toz dökülebildiği yerlerde toz bulutlarının oluşması olasılığı nedeniyle, bir alanın 22 büyüklüğünün değerlendirilmesi olasıdır (Barton, 2002).

3.3.4. Ekipman seçimi

Patlayıcı ortam ihtiva eden işyerlerinde patlayıcı ortamlarda kullanılmak üzere özel olarak tasarlanmış ATEX sertifikalı ekipman kullanılmalıdır. Ancak; sürekli patlayıcı kıvamda gaz olan bir yerde alınacak tedbirler ve konulacak elektrik aygıtları ile, “tesadüfen, arada bir ve çok kısa süreli” patlayıcı ortam teşekkül eden bir yerde alınacak önlemler ile çalıştırılacak elektrik aygıtları aynı olmayacaktır (TS EN 60079-14 bölüm 14, 2014).

Patlayıcı ortamlarda gerekli ekipman seçimine yönelik hukuki dayanak, Bölüm 3.1.5.’te detaylandırılan Atex direktifi doğrultusunda hazırlanmış 30 Haziran 2016 tarihli ve 29758 sayılı Resmi gazetede “*Muhtemel Patlayıcı Ortamda Kullanılan Teçhizat ve Koruyucu Sistemler ile ilgili Yönetmelik*” tir (T.C Resmi Gazete, 30 Haziran 2016, 29758).

ATEX sertifikalı ekipmanlar kullanılacağı patlayıcı ortamda bulunan patlayıcı maddenin türüne göre gruplara, patlayıcı bölge sınıfına göre kategorilere ayrılmıştır. Patlayıcı ortam ihtiva eden işyerlerindeki donanım ve ekipman seçiminde; ekipman grubu ve kategorisinin yanı sıra ekipmanın sıcaklık sınıfı belirlenerek uygun ekipmanlar seçilmelidir (TS EN 60079-14 bölüm 14, 2014).

Tablo 3.2. Patlayıcı Ortamlarda Kullanılacak Ekipman Grupları ve Kategorileri

Bölgeler	Ekipman Grubu	Ekipman kategorisi	Kullanılacak ortam
	I	M1, M2	Madenler
0	II	1G	Gaz, buhar ve sis
1	II	2G	Gaz, buhar ve sis
2	II veya III	3G	Gaz, buhar ve sis
20	II	1D	Toz
21	II	2D	Toz

Kaynak: (Eğri, 2008)

Tablo 3.3. Ekipman Koruma Seviyesi ile Koruma Tipi Arasındaki İlişki

EPL	Koruma tipi	Kod	Standart
"Da"	Kapsül içine alma	"ma"	IEC 60079-18
	Muhafaza ile koruma	"ta"	IEC 60079-31
	Kendinden güvenlik	"ia" veya "iaD"	IEC 60079-11 veya IEC 61241-11
	Özel koruma	"sb"	IEC 60079-33
"Db"	Kapsül içine alma	"mb"	IEC 60079-18
	Muhafaza ile koruma	"tb" veya "tD"	IEC 60079-31 IEC 61241-1
	Basıncılı muhafaza	"pD"	IEC 61241-4
	Kendinden güvenlik	"ib" veya "ibD"	IEC 60079-11 veya IEC 61241-11
	Özel koruma	"sb"	IEC 60079-33
"Dc"	Kapsül içine alma	"mc"	IEC 60079-18
	Muhafaza ile koruma	"tc" veya "tD"	IEC 60079-31 IEC 61241-1
	Basıncılı muhafaza	"pD"	IEC 61241-4
	Kendinden güvenlik	"ic"	IEC 60079-11
	Özel koruma	"sc"	IEC 60079-33

Kaynak: (Layık, 2016)

3.3.5. Patlayıcı bölge sınıflandırması

Bölge sınıflarının belirlenmesi için izlenmesi gereken adımlar şu şekildedir;

- Tesiste bulunan tüm yanıcı maddeler tespit edilmeli ve bu maddelerin; parçacık boyutu, nem içeriği, bulut ve katman tutuşma sıcaklığı ve toz grubu belirlenmelidir.
- Tesisteki patlayıcı tozların bulunduğu ortamların, ekipmanların tespit edilmesi ve boşalma kaynaklarının belirlenmesi gerekmektedir. Bu aşamada toz katmanı oluşabilecek yerlerin de belirlenmesi gerekmektedir.
- Tozun boşalma kaynaklarından ortama yayılma olasılığı değerlendirilerek boşalma kaynağı türünün belirlenmesi gerekmektedir (TS EN 60079-10:2015 Bölüm 10.2).

3.3.5.1. Patlayıcı bölge örnekleri

Bölge 20:

Patlayıcı toz atmosferin sürekli, uzun süreli veya sık sık var olduğu ekipmanların içi ve sürekli boşalma kaynakları bölge 20 olarak kabul edilmektedir. Filtreler, toz taşıma sistemleri, öğütücüler, kurutucular, paketleme ekipmanları Bölge 20'ye örnek gösterilebilir (Layık, 2016).

Bölge 21:

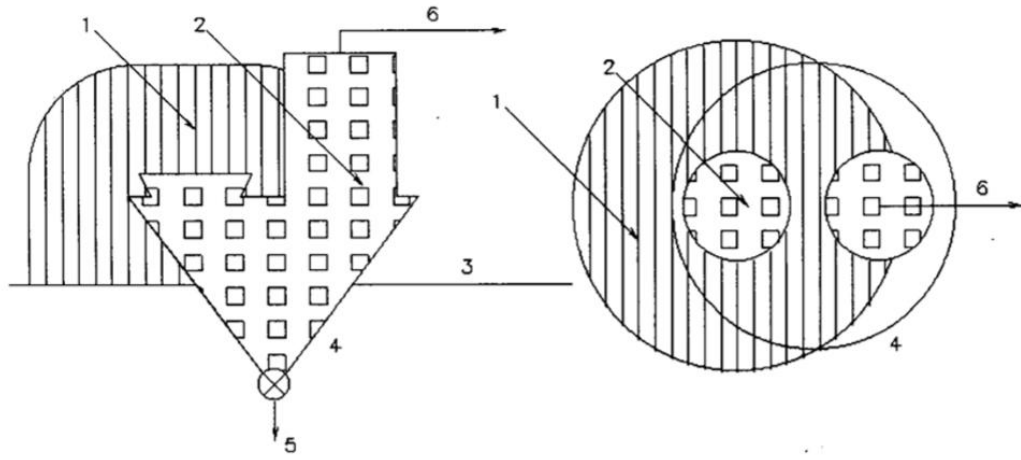
Patlayıcı toz atmosferinin kapatma, çalıştırma, doldurma gibi belirli periyotlarla meydana geldiği ekipmanların içi; parçacık büyüklüğüne, nem içeriğine ve toz miktarına bağlı olarak ana boşalma kaynaklarının etrafı Bölge 21 olarak değerlendirilmektedir. Genelde boşalma kaynağından itibaren 1 metre uzunluğa kadar olan hacmin Bölge 21 olarak kabul edilmesinin yeterli olabileceği değerlendirilmektedir. Tesiste Bölge 21 ile Bölge 22 arasındaki sınır net şekilde çizilemiyorsa ilgili tüm bölge Bölge 21 olarak değerlendirilmelidir. Eğer belirlenen Bölge 21'in dışında toz katmanı oluşumu varsa bölgenin tamamının Bölge 21 olarak değerlendirilmesi gerekmektedir (Layık, 2016).

Bölge 22:

Tesiste Bölge 21 olarak belirlenen hacim sınırlandırılmamış ise bu bölgenin etrafını Bölge 22 saracaktır. Parçacık büyüklüğüne, nem içeriğine ve toz miktarına bağlı olmak kaydıyla tali boşalma kaynaklarının etrafı Bölge 22 olarak değerlendirilmektedir. Bölge 22 olarak belirlenen bölge duvar vb. sebeplerle sınırlandırılmakta ise sınıra kadar olan hacmin tamamı Bölge 22 kabul edilmektedir. Eğer belirlenen Bölge 22'nin dışında toz katmanı oluşumu varsa bölgenin tamamı Bölge 22 olarak değerlendirilmektedir. Genellikle boşalma kaynağının veya Bölge 21'in bittiği sınırın 3 metre uzağını kapsayan hacmin Bölge 22 olarak kabul edilmesinin yeterli olabileceği değerlendirilmektedir (Layık, 2016).

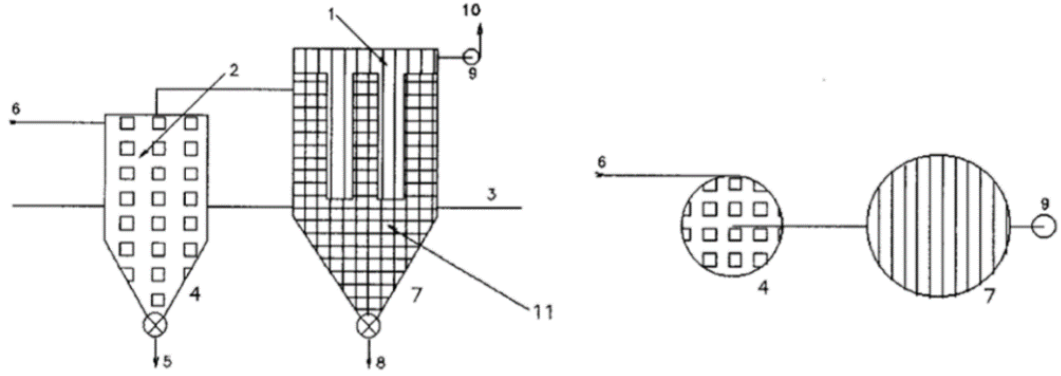
Şekil 3.3'teki haznenin iç kısmı, Bölge 20 olarak sınıflandırılmıştır, çünkü torbaların hazneye oldukça sık boşaltılması sırasında patlayıcı toz bulutu oluşacaktır. Toz emme sistemi nedeniyle, patlayıcı toz bulutlarının normal çalışma

koşullarında haznenin dışına uzanması beklenmez. Bununla birlikte, ortaya çıkabilecek durumlarda anormal durumlar ortaya çıkabilir, örn. Bir torba boşaltılırken patlarsa veya toz emme sistemi arızalanırsa. Bu nedenle, 22 nolu bir Bölge, hazne açıklığının hemen dışında sınırlı bir alana tahsis edilmiştir. Şekil 3.4' teki siklonun iç kısmı, uzun süreler boyunca sık sık veya hatta sürekli olarak patlayıcı bir toz bulutu bulunması nedeniyle Bölge 20 olarak sınıflandırılmaktadır. Bununla birlikte, siklondan çıkan ve filtrenin tozlu tarafına giren gazdaki toz konsantrasyonu, filtre torbalarının birikmiş tozu serbest bırakmak için üflendiği veya çalkalandığı kısa süreler hariç olmak üzere normalde minimum patlayıcı konsantrasyonunun altındadır. Bu nedenle, filtrenin tozlu tarafı, Alan 21 olarak sınıflandırılmıştır. Normalde, filtrenin temiz tarafında sadece önemsiz miktarda toz bulunacaktır. Bununla birlikte, filtre torbaları patlayabilir ya da filtrenin temiz tarafında patlayıcı toz bulutlarının oluşmasına neden olan diğer anormal durumlar oluşabilir, bu nedenle Bölge 22 olarak sınıflandırılır (Eckhof, 2016).



1. Genellikle 1 metre çapında (Bölge 22)
2. Bölge 20
3. Zemin
4. Toz boşaltma torbası
5. Prosese giden
6. Çıkarılan

Şekil 3.3. Yanıcı Toz İçeren Boşaltma Torbalarının Bölge 20 ve 22 Olarak Gösterimi (Eckhof, 2016).



- | | |
|----------------|----------------------|
| 1. Bölge 22 | 6. Giriş |
| 2. Bölge 20 | 7. Filtre |
| 3. Zemin | 8. İnce toz atıkları |
| 4. Siklon | 9. Fan |
| 5. Ürün (Silo) | 10. Çıkış |
| | 11. Bölge 21 |

Şekil 3.4. Siklon ve Filtrenin Bulunduğu Toz Toplama Sistemi (Eckhof, 2016).
Patlayıcı Bölge ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.2.'de verilmiştir.

3.3.6. Patlama etkileri

Kapalı bir kaptaki veya yapıda meydana gelen bir patlama, kabı veya yapıyı parçalayabilir, bu da geniş bir alan üzerinde büyük bir enkaz meydana gelmesine sebep olacaktır. Bu enkaz veya mermi etkisiyle savrulan parçalar, insanlar için kayda değer yaralanmalara ve yapılara, işlem ekipmanlarına zarar verebilir. Sınırlanmamış patlamalar şok dalgasının etkisi ile mermi etkisi yaratacaktır. Tesisin bir bölgesinde meydana gelen patlama tüm tesis boyunca etkisini gösterecektir. Enkaz parçaları, mermi etkisi ile depolama tanklarına, proses ekipmanlarına ve boru hatlarına çarparak ikincil yangın veya patlamalara neden olabilecektir (Crowl, 2010).

Bu bölümde, kumlama ünitesinin filtre bölümünde zaman zaman ufak çaplı patlama yaşanan Tesis 2'de gerçekleşecek olası bir patlamanın yapılar üzerindeki etkisi incelenmiştir.

3.3.6.1. Patlamanın yapılar üzerinde meydana getireceği hasarın belirlenmesi

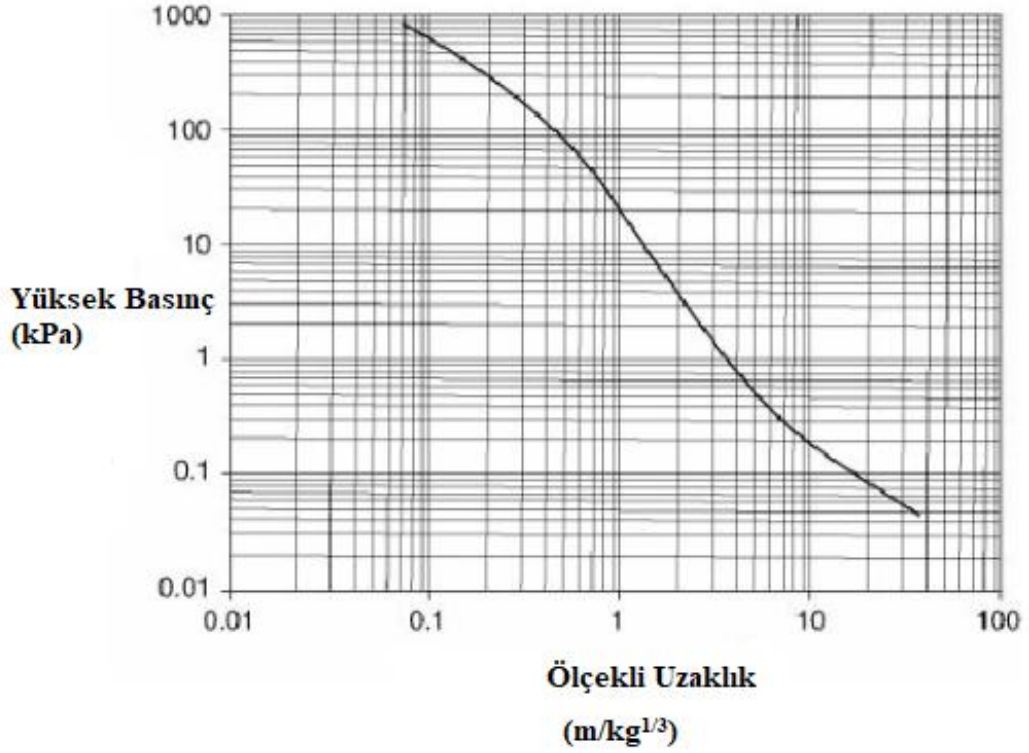
Kapalı bir kap veya yapıda meydana gelen birincil patlama, kabı veya yapıyı parçalayabilir ve yapının parçaları mermi etkisi yaratabilir. Birincil patlamanın meydana getirdiği şok dalgaları ise Bölüm 6' da incelenen patlama örneklerinde görüldüğü gibi çevredeki yapılar ve insanlar için büyük hasar ve yaralanmalara sebep olabilir (Crowl ve Louvar, 2001).

Birincil patlama ile meydana gelen şok dalgaları enkaz parçalarına mermi etkisi yaratarak parçalar depolama tanklarına, proses ekipmanlarına ve boru hatlarına çarparak ikincil yangın ve patlamalara neden olmaktadır (Crowl ve Louvar, 2001).

Patlamanın meydana getireceği zararlı etkileri belirlemek için oluşan şok dalgası basıncının, patlama merkezinden uzaklığına göre değişimi göz önünde bulundurulmaktadır (Crowl ve Louvar, 2001).

Patlayıcı maddelerle yapılan deneyler, aşırı basıncın, m_{TNT} ile gösterilen eşdeğer TNT kitlesi kullanılarak tahmin edilebileceğini ve patlamanın sıfır noktasından, etki edeceği noktaya olan mesafe, r olarak belirtilebileceğini göstermiştir. Deneysel olarak ortaya çıkarılan ölçeklendirme kanunu şu şekildedir (Crowl ve Louvar, 2001);

$$Z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}}$$



Şekil 3.5. Yüksek Basınç ile Ölçekli Uzaklık Arasındaki İlişki
 Olası patlamanın muhtemel etkilerini belirlemek için aşağıdaki adımlar izlenmelidir (Crowl ve Louvar, 2001);

1. Yanıcı maddelerin toplam miktarı:

Patlamada yer alan yanıcı maddelerin toplam miktarı belirlenir.

2. TNT eşdeğer kütle hesabı:

Patlama etkisi değerlendirilip, TNT eşdeğer kütlesi hesaplanır;

$$m_{TNT} = (\eta m \Delta H_c) / E_{TNT}$$

Buradaki eşitlikte;

m_{TNT} : TNT eşdeğer kütle (kg)

η : Deneysel patlama etkisi (birimsiz)

m : Hidrokarbon kütlesi (kg)

ΔH_c : Alevlenebilir gaz, toz

E_{TNT} : TNT patlama enerjisi

TNT'nin patlama enerjisi için tipik bir değer $1120 \text{ cal / g} = 4686 \text{ kJ / kg}$ 'dır (Crowl ve Louvar, 2001).

3. Tepe basıncı hesabı:

Patlayıcı maddenin TNT kütle eşdeğeri hesaplandıktan sonra belirli bir uzaklıktaki basıncın hesaplanabilmesi için öncelikle o uzaklıktaki Z_e ölçekli uzaklık değerinin bulunması gerekmektedir. Z_e ölçekli uzaklık değeri aşağıda yer alan eşitlikle hesaplanabilmektedir (Crowl ve Louvar, 2001);

$$Z_e = \frac{r}{m_{TNT}^{1/3}}$$

Belirlenen uzaklık için hesaplanan ölçekli uzaklık “ Z_e ” değeri ile **Şekil 3.5**'te yer alan grafik kullanılarak, hesaplama yapılan uzaklıktaki tepe basıncı belirlenmektedir.

4. Yapılar üzerinde meydana gelecek hasar:

Belirlenen noktadaki yüksek basıncın belirlenmesinin ardından, **Tablo 3.4**'ten patlamanın aynı noktada meydana getireceği hasar belirlenebilmektedir.

Tablo 3.4. Yüksek Basınç Sonucu Meydana Gelecek Hasarlar

Yüksek Basınç (kPa)	Hasar
0,20571	Çatlak büyük pencereler kırılabilir.
0,27428	Güçlü ses ortaya çıkar.
1,02855	Cam kırılması için sınır değer.
2,0571	%95 oranında ciddi hasar olmaz.
3,4285	Büyük ve küçük pencereler genellikle kırılır.
4,7999	Bina yapısında küçük hasarlar olabilir.
6,857	Binalarda kısımlar yıkılabilir.
8,9141	Binaların çelik kısımları hafifçe eğilebilir.
13,714	Güçlendirilmemiş beton çökebilir.
15,7711	Ciddi yapısal hasarlar için alt sınır.
20,571	Çelik yapı binalar eğilebilir.
23,9995	Yağ depolama tankları zarar görebilir.
34,285	Tahta yapılar çökebilir.
41,142	Hemen hemen bütün evler yıkılır.
47,999	Yüklü tren vagonları ters dönebilir.
61,713	Yüklü tren vagonları tamamen yok olur.
68,57	Binalar tamamen yıkılır.
2057,1	Krater çukuru oluşur.

Kaynak:(Crowl, 2002)

Örnek olarak, yaklaşık 38 kPa değerinde bir yüksek basınç, o bölgedeki hemen hemen bütün evlerin yıkılacağını gösterir.

3.4. Patlama Etkilerinin Azaltılması

Bölüm 3.2.1'de detaylandırıldığı gibi, endüstride toz patlaması çeşitli tutuşturma kaynakları tarafından başlatılabilir. Tutuşturma kaynaklarının bertaraf edilmesi, toz bulutunun inertlenmesi ve bazı durumlarda toz konsantrasyonunun alt patlama limitinin altında tutulması ile tutuşturma önlenir.

Genel ve temel olarak (Amyotte, 2013), (Abbasi ve Abbasi, 2007).

- *Küçültme*: Mümkün olan en az sayıda personelle, mümkün olan en küçük miktarda patlayabilir malzeme ile mümkün olan en kısa sürede işlemi bitirmek ve iş bitiminde ihtiyaç duyulmayanların bertarafı,
- *Yerine koyma* □ Daha az toksik, daha az yanıcı veya daha az reaktif malzeme ile ikame
- *Makul* □ Tehlikeli gazlar, sıvılar ve katı maddeler, bir olayla karşılaşıldığında insanların, mülkün, üretimin ve çevrenin bozulmasını önlemek için mümkün olduğu kadar uzakta depolama
- *Basitleştirme* □ Tüm kılavuzlar, kılavuzlar ve eğitim materyalleri, özellikle acil durumlarda kullanılanları anlaşılır anlaşılır olarak düzenleme

Bu temel kurallar ışığında, genel olarak, gaz, sıvı, toz haldeki patlayıcılarla çalışmada olası patlama etkilerini azaltmada alınması gereken tedbirler;

i. Patlama basıncına dayanıklı tasarım

Patlamaya dayanıklı ekipman seçimi yapılırken; patlama esnasında meydana gelecek maksimum patlama basıncı ve bu basıncın alınacak önlemlerle azaltılması sonucu ortaya çıkacak yeni basınç dikkate alınmalıdır (Amyotte, 2013).

Aparat Tasarımı İçin İyi Uygulamalar (Eckhoff, 2016).

- Yapı malzemelerinin seçimi
- Hareketli ekipman / aparat parçaları etrafında serbest alan
- Ekipman / cihaz tasarımı ve seçimi:
 - Tüm yüzeyler pürüzsüz, tercihen honlanmış veya cilalı,
 - Patlayıcı malzemenin temizlik işleminden kaçabileceği dar boşluklar, oluklar, delikler veya çatlaklar olmamalı,
 - Kullanımı kolay ve iyi boyutlandırılmış kaplinler ve diğer sabitleme elemanları vardır ve cıvata ve somunlar uygun bir şekilde sabitlenir
 - Boru hatlarının sökülmesi ve incelenmesi kolay olmalı,
 - Patlayıcı malzemenin dökülmesini ve bu malzemelerden toz birikmesini önlemek için etkili düzenlemeler ve prosedürler olmalı,

Yazılı Çalışma Talimatları

- Patlayıcı madde (ler) in özellikleri,
- Üstlenilecek iş operasyonları,
- İş ile ilişkili riskler,
- Güvenli çalışma prosedürlerini sağlamak için yönergeler / yönetmelikler,
- Normal malzeme ve işlem koşullarından sapma durumunda alınacak önlemler,
- Temizlik / kat hizmetleri için rutinler,
- Üretim ekipmanının kontrolü ve bakımı,
- Daha kapsamlı ve zor kurulum ve bakım çalışmaları için özel çalışma talimatları,

ii. Alev ve patlamanın yayılmasının engellenmesi

Patlayıcı madde ile çalışan tesislerde, tesiste yer alan ek ve bağlantı bölümleri patlama basıncı veya patlama basıncının şok dalgasına dayanıklı tasarlanmadığı durumlarda, patlama esnasında oluşan basıncın artarak devam etmesi sonucu, ekipmanlar maksimum patlama basıncından daha yüksek basınca maruz kalabilmekte, bu nedenle patlamanın yayılmasının engellenerek oluşan basınç sınırlandırılmalıdır (Layık, 2016), (Amyotte, 2013).

Patlamanın yayılması şu yöntemlerle engellenebilir:

- ❖ Hızlı devreye giren mekanik izolasyon,
- ❖ Dar boşluklarda alev sönmesi veya söndürme kimyasallarının kullanımı
- ❖ Alevlerin karşı akış (anafor) yöntemiyle tutulması
- ❖ Patlama saptırıcılar
- ❖ Su perdesi
- ❖ Döner valf (Amyotte, 2013), (Layık, 2016).

Patlama yayılmasının engellenmesinde hızlı devreye giren mekanik izolasyonda kullanılan valfler (iki tank arası boru bağlantılarına eklenen hızlı devreye giren

kapatma valfi), basınç sensörlü patlama detektörleri ile devreye girmektedir (Amyotte, 2013).

Gaz, buhar veya sislerin hava ile karışımları sonucu meydana gelen patlamaların ilerleme hızları oldukça değişken olduğundan, söndürme sistemleri ve aktif izolasyon yöntemleri genellikle çok yavaş kalmaktadır. Bu ortamlar için alev tutucular gibi pasif yöntemlerin tercih edilmesi daha uygun olacaktır (Layık, 2016).

iii. Patlamanın bastırılması

Toz patlaması tehlikesi taşıyan proses ekipmanında bir patlama meydana geldiği anda devreye giren bir sistem devreye sokulabilir, uygun inert maddeler hızla eklenerek bastırılır ve yeniden meydana gelmesini önler. Patlama riski büyük ölçüde azaltılabilir. Otomatik patlatma bastırma cihazları bu hedefe ulaşmayı amaçlamaktadır.

Bir patlama bastırma sistemi dört temel özelliğe sahip olmalıdır:

(i) Hızlı bir şekilde devreye girerek minimum zaman gecikmesi ile bir patlamaya tepki vermelidir.

(ii) Başlatıcı patlamaya karşı koyacak ve yayılan alevi durduracak şekilde, çok kısa sürede yeterli miktarlarda bir baskılayıcıyı enjekte etmelidir.

(iii) Tesisin tümünü durdurabilmelidir.

(iv) Patlama tehlikesi azaltılıncaya kadar tesisin yeniden başlatılmasını engellemeyebilmelidir (Amyotte, 2013).

iv. Patlama tahliye sistemleri

Bir toz patlamasını engelleme girişimleri başarısız olduğunda, patlama meydana gelecektir. Patlama etkin bir şekilde havalandırılıyorsa, olumsuz etkisi en aza indirilebilir. Toksik tozlar olmazsa, havalandırma, toz patlamasının yıkıcı potansiyelini önemli ölçüde azaltabilir (Eckhoff, 2003).

Patlama tahliye sistemlerinde ekipmana, ince panellerden oluşan ve patlamanın etkisiyle basınç yükseldiğinde yırtılarak yüksek basıncın hızlı bir şekilde güvenli bir alana yönlendirilmesini sağlayan menfez plakaları yerleştirilmektedir. Toz patlaması riski bulunan ekipmanlarda kullanılacak menfez plakalarının alanlarının doğru şekilde hesaplanması alınan önlemin etkinliği açısından son derece önemlidir (Eckhoff, 2003)



BÖLÜM 4: TOZ PATLAMALARI

4.1. Toz Patlamaları

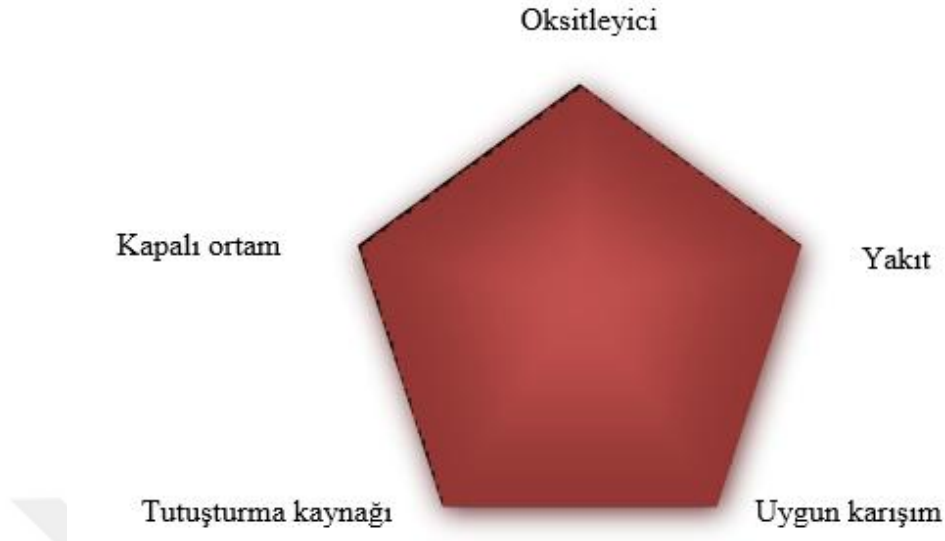
Toz patlaması, reaktif çoklu faz sisteminde, eş zamanlı momentum, enerji ve kütle transferi içeren, kompleks bir olaydır (Abbasi ve Abbasi, 2007).

İstatistiklere bakıldığında, tahıl siloları, yemek üretimi, gıda üretimi, kimyasal üretim (kauçuk, plastik, ecza vb.), ağaç işleme tesisleri, metal işleme tesisleri (çinko, magnezyum, alüminyum, demir vb.), geri dönüşüm tesisleri (kağıt, plastik, metal vb.), kömürle çalışan elektrik santralleri gibi farklı bir çok endüstriyel tesiste toz patlamaları meydana gelmiştir (https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/combustible_dust.html, Erişim tarihi: 16 Mart 2018).

Toz patlama kazalarına genel olarak bakıldığında, patlamaların genel olarak değirmen, kurutucu, mikser, konveyör, besleme hunisi ve depolama siloları gibi üretim ekipmanlarının içinde başladığı görülmektedir (Kosinski ve Hoffmann, 2005).

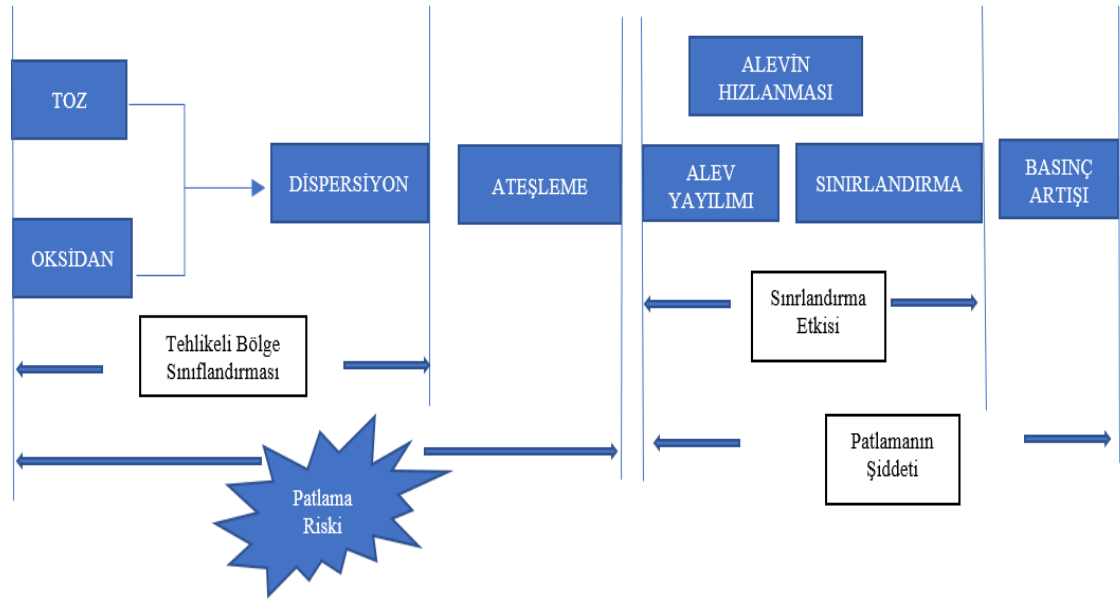
Son yıllarda ise, proses birimleri arasındaki bir patlamanın boru ve kanallardan yayılması dikkati çekmektedir. Patlama, birbiri ile bağlantılı proses ünitelerine havalandırma kanalları ile yayılan bir patlamalar dizisi oluşturmaktadır. (Kosinski ve Hoffmann, 2005).

Yanıcı bir tozun patlaması için yanma üçgenine ilaveten iki öge daha gerekmektedir. Bunlar, uygun konsantrasyondaki dağılmış toz parçaları ve sınırlandırılmış toz bulutudur. “Toz Patlama Beşgeni – *Dust Explosion Pentagon*” olarak adlandırılan bu beşli yapı (şekil 4.1.) toz patlamasına neden olacaktır. Eğer, bir toz bulutu sınırlandırılmış veya yarı sınırlandırılmış bir kap, alan veya bina içerisinde tutuşturulursa, hızla yanacak ve patlaması olasılık dahilinde olacaktır (Eckhoff, 2013).



Şekil 4.1. Patlama Beşgeni

Herhangi yanıcı bir katı partikülün hızlı ve şiddetli bir şekilde yanması, partiküllerin boyutunun küçülmesi ile doğru orantılıdır ki partikül boyutu ne kadar küçülürse (Bölüm 4.4.4.3.) ve yanıcı partiküller biraraya geldiğinde konsantrasyon açısından yeterli limite ulaştığında (Bölüm 4.4.2.1.2.) yanma o denli hızlı ve patlayıcı tesirli olacaktır. Eğer oluşan toz bulutu sınırlandırılmamış ise, sadece kısa süreli ani bir parlamaya neden olacaktır. Ani parlama tetrahedronu (*Flash fire square*) olarak anılan bu olay, yanma üçgenine ilave gelen “katı parçacıkların tutuşma konsantrasyonu aralığına gelecek şekilde havada asılı kalması” şartı ile gerçekleşir (Ogle, 2016). Ancak, eğer toz bulutu kısmen de olsa sınırlandırılmış ise yanma ısı basıncı aniden artıracak, aynı zamanda toz bulutuna doğru alev yayılımı olacak ve büyük miktarda ısı ile birlikte yanma ürünleri oluşacaktır. Bu denli hızlıdaki reaksiyon ise patlamaya neden olacaktır (Abbasi ve Abbasi, 2007).



Şekil 4.2. Toz Patlama Beşgeninin Açılımı ile Toz Patlamasının İlerlemesine Genel Bir Bakış (Xingqing ve Jianliang, 2012).

Tipik olarak bir toz patlamasının meydana gelmesi için en genel şekli ile şu şartlar oluşmalıdır:

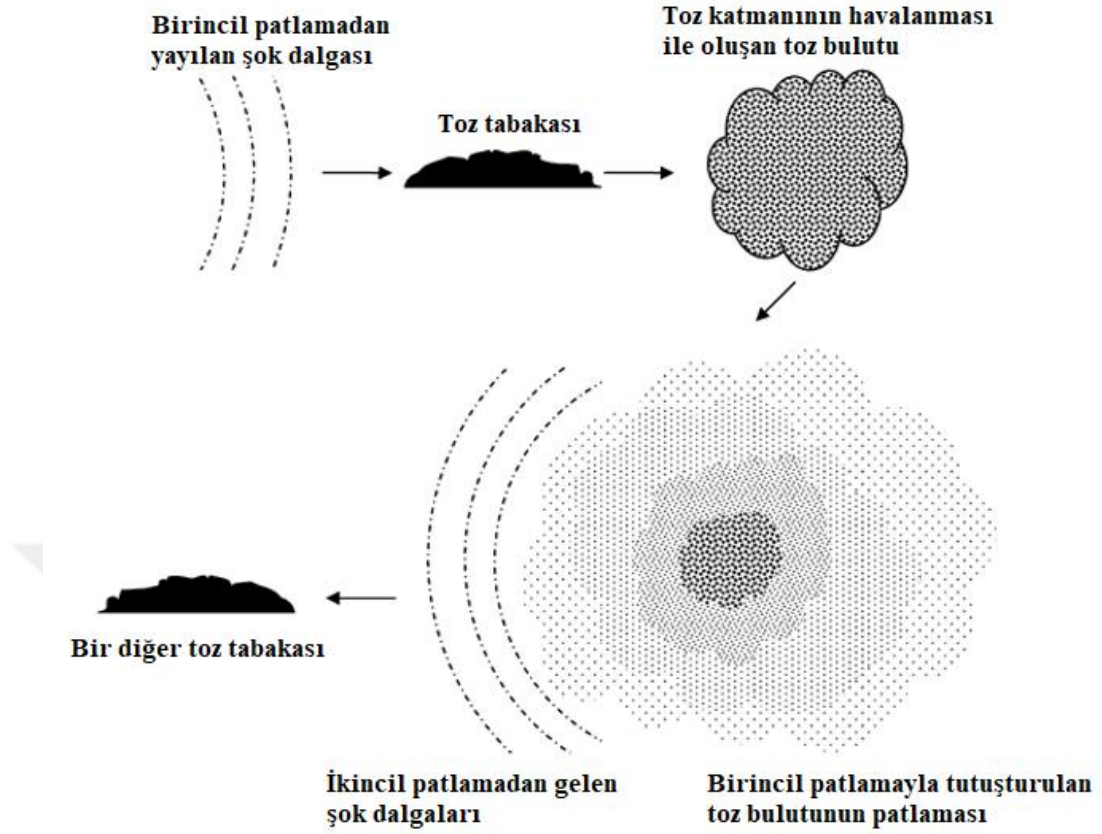
- Toz yanıcı olmalıdır (*Yakıt*).
- Toz askıda katı madde haline gelebilmelidir. Partikül boyutu ne kadar küçükse tozun oksitlenmesi o kadar kolaylaşacak ve patlama potansiyeli o denli büyük olacaktır ve toz bulutundaki havadaki toz parçacıklarının konsantrasyonu kritik tutuşturma sınırı aralığında olmalıdır (*Uygun konsantrasyon*).
- Havadaki bir tutuşturma kaynağıyla temas halinde bulunan askıda katı madde, alev yayılımının başlatılması ve sürdürülmesi kapasitesine sahip olmalı, yani yeterli konsantrasyona ulaşmış olmalıdır ve bu şartın oluşması için sınırlandırılmış bir alan içerisinde olmalıdır. Çoğu tozun patlayıcı süspansiyonu opak bir bulut gibi görünür ve birçok malzeme için “nefes alınabilir” olarak kabul edilen miktardan daha yoğundur (*Uygun konsantrasyon + Tutuşturma kaynağı + Sınırlandırılmış alan*).
- Tozun askıya alındığı atmosfer yanmayı desteklemek için yeterli oksijen içermelidir (*Oksitleyici*).
- Etrafta biriken toz tabakaları ateşlenip alevsiz şekilde yanmaya başlayabilir, ancak, bu toz tabakası havalanırsa toz patlaması

gerçekleşebilir. Bu olay ‘ikincil toz patlaması’ olarak adlandırılır (Şekil 4.3.) (<https://www.csb.gov/hayes-lemmerz-dust-explosions-and-fire/>, Erişim tarihi: 20.08.2018).

4.1.1. Birincil patlamalar

Toz konsantrasyonları, işlem tankları (sınırlandırılmış alan) dışında nadiren oluşur, bu nedenle en şiddetli toz patlamaları, bir ekipman parçası (örneğin, değirmenler, karıştırıcılar, elekler, kurutucular, siklonlar, hazneler, filtreler, kovalı elevatörler, silolar, aspirasyon kanalları ve pnömatik geçiş sistemleri) içinde başlar. Bunlara birincil patlamalar dense bile, gerçekte başlangıç bir kazanın meydana gelmesinden sonra oluşan olaylardır. Toz patlaması ve yanıcı gaz patlaması arasındaki temel farklardan biri, patlamaları destekleyecek hava eksikliği nedeniyle, gaz / buhar patlamalarının nadiren borular içinde meydana gelmesidir. Bununla birlikte, toz, genellikle toz patlama koşullarının meydana gelmesine izin veren işlem ekipmanında havada asılı haldedir. Bu, yetersiz basınç tahliye cihazlarına / havalandırmasına sahip olduğunda veya tasarım basıncı çok düşük olduğunda ekipmanın patlamasına neden olabilir (Xingqing ve Jianliang, 2012).

Birincil patlama, yukarıda da belirtildiği gibi siklon, depolama silosu veya üretim tesisinin kapalı kısmı gibi sınırlı bir atmosferde gerçekleşir. Patlamadan sonra, şok dalgası zarar verebilir ve çoğu zaman duvarları patlatabilir ve patlamanın yanmasından gelen toz ve gazların çevreye yayılmasına izin verir (Zalosh, 2011). Tüm büyük ölçekli toz patlamaları bu tip zincir reaksiyonlarından kaynaklanır (Xingqing ve Jianliang, 2012).



Şekil 4.3. Domino Etkisi (Xingqing ve Jianliang, 2012).

4.1.2. İkincil Patlamalar

Birincil patlama, yakınında bulunan tabaka halindeki birikmiş tozu harekete geçirebilir ve bu da birincil patlamadan salınan ısı ile tutuşturulabilecek bir bulut oluşturur (Şekil 4.3.). Yerleşen toz çok az yer kaplar, ama bir kez hareketlenmesine neden olduğunda kolaylıkla tehlikeli bulutların oluşmasına neden olabilir. 1 mm'lik 500 kg/m^3 lük bir toz tabakası, 100 kg/m^3 lük 5m derinliğinde bir bulut oluşturabilir.

İkincil patlama, binadaki maruz kalan yüzeylerdeki toz birikintileri, hasar gören ekipmandan/muhafazadan çıkan patlama dalgası tarafından kaldırıldığında ve daha sonra hasar gören ekipman/muhafazadan çıkan alev tarafından tutuşturulduğunda ortaya çıkar. Şekil 4.4., Scherpa (2002) tarafından yapılan deneylerde bir mısır nişastası tabakası üzerinde bir hava üfleme dalgası yayıldığında oluşan bir toz bulutunu göstermektedir. 12 ila 48 m/sn 'lik hava

üfleme hızları, depolanmış mısır nişastasının %13 ila %44'ünü kaldırmıştır (Zalosh, 2011).



Şekil 4.4. Toz Tabakası Üzerine Hava Üflemesinden Üretilen Mısır Nişastası Toz Bulutu (Zalosh, 2011).

Toz taşıma sisteminin bir kısmında meydana gelen toz patlaması, diğer ekipmanlara bağlantılı borular vasıtasıyla basınç ve/veya alev yayılmasına neden olabilir. Örneğin, tipik olarak azaltılmış patlama basıncının 500 mbar'dan daha az olduğu havalandırılmalı torba filtresindeki bir patlamada, testler patlamanın giriş borusuna yayılabildiğini göstermiştir. Bu, sistem genelinde artan şiddete neden olan bir patlamaya yol açabilir, çünkü kanalda yayılan alevin türbülans (Bölüm 4.4.4.5.) nedeniyle hızlanması eğilimi vardır ve ikinci kaba giren bir jet alevi ile sonuçlanır. Sonuç olarak, ikinci tank havalandırılırsa ve içerdiği toz miktarı kendi başına çok fazla tehlike arz etmese bile yüksek basınçta yüksek yanma oranları elde edilir (Abbasi ve Abbasi, 2007).



Şekil 4.5. Birincil ve İkincil Patlamalar

(<https://www.osha.gov/dts/shib/shib073105.html> , Erişim tarihi: 25 Ağustos 2018)

4.2. Toz ve Toz Oluşumu

İnce toz, modern teknolojide yeri doldurulamayan bir role sahiptir. Dünyada elektrik tüketiminin en azından %1'lik kısmı kırma ve öğütme operasyonlarında harcanmaktadır. Katı partiküller, katı maddenin en kullanışlı olduğu formudur. Özellikle depolama, ambalajlama, taşıma ve üretim operasyonlarında oldukça uygundur. Ancak, katı kütlenin toz partikülleri haline getirilmesi yeni tehlikelere yol açmaktadır (Ogle, 2016). Örneğin bir kuvars kütlesi patlayıcılık bakımından tehlikeli olmamasına rağmen, kum halinde bir siloya döküldüğünde, silodaki bir personel tarafından yutulması sağlık açısından oldukça tehlikelidir.

Genel olarak tozlar, kaynağına göre ve biyolojik etki açısından iki grupta toplanabilir:

Kaynağına göre tozlar iki grupta ele alınabilir;

✚ İnsan kaynaklı tozlar

Maden, tarım, araç tarfiği, malzeme üretimi ve taşınması vb.

✚ Doğal kaynaklı tozlar

Toprak kaymaları, deprem, çığ, yanardağ lav püskürmesi veya su kaynakları tarafından yayılım (W.H.O., 1999).

Kimyasal kökenine göre tozlar iki grupta ele alınabilir;

1. Organik tozlar

- Bitkisel kökenli (pamuk, tahta, un, saman tozları vb.)
- Hayvansal (saç, tüy vb.)
- Sentetik bileşenler (DDT, trinitro toluen vb.)

2. İnorganik Tozlar

- Metalik (alüminyum, demir, çinko tozu vb.)
- Metalik olmayan (silis, kükürt, kömür tozu)
- Kimyasal bileşikler (alüminyum oksit, çinko oksit, gibi).
- Doğal bileşikler (mineraller, killer, maden cevherleri vb.)

➤ Biyolojik Etkisi Açısından Tozlar (Modanlıoğlu, 2013).

- Fibrojenik tozlar
- Toksik tozlar
- Kanserojen tozlar
- Radyoaktif tozlar
- Alerjik tozlar
- İnert tozlar (Modanlıoğlu, 2013).

Asbest, kuvarz gibi inert fakat insan sağlığı açısından zararlı tozlar konumuz dışında olduğundan, bu tezde yanıcı ve patlayıcı tozlar ve aynı zamanda biyolojik etkisi açısından değil ancak tepkisizleştirme bakımından “inert tozlar” incelenecektir.

4.2.1. Toz oluşumu

Endüstriyel çerçevede baktığımızda, toz, üretim ve paketleme safhasında meydana gelmektedir (Khambekar ve Pittenger, 2013), Toz ve buhar ile gaz emisyonunun ana kaynağı eritme fırınları, pota ve tandişlerin ısıtma stantları,

atomizasyon üniteleri, toz kurutma, sınıflandırma, yükleme ve boşaltma üniteleri, dozlama ve paketlemedir (Neikov ve ark., 2009).

Örnek olarak, toz üretim endüstrisindeki üretim operasyonları üzerinde duracak olursak, öğütme esnasında, metal oksit ve indirgenmiş metallerin ezilmesiyle toz meydana gelmektedir. Metal parçalarının üretimi sırasında, farklı metal tozları ve katkı maddeleri karışıkça toz oluşur. Bu karışımın çeşitli ekipman tiplerinde kullanılması tozun ayrılması ve konsantre edilebilmesi için daha fazla fırsat sağlar. Bunlar, hazne dolum, harmanlama/blender boşaltma ve sıkıştırma gibi işlemleri içerir. Toz, toz üretim işlemleriyle de üretilebilir. Toz üreten ve havada asılı tutan mekanizmalar aerodinamik kuvvetlerden kaynaklanmaktadır. Oluşan toz, hava akımı sonucu başka bir yere taşınabilir (Khambekar ve Pittenger, 2013).

Literatürde, birçok toz tanımı bulunmaktadır. Bu tanımlamalar, partikül boyutu ve süspansiyon özelliklerine göre çeşitlilik gösterir.

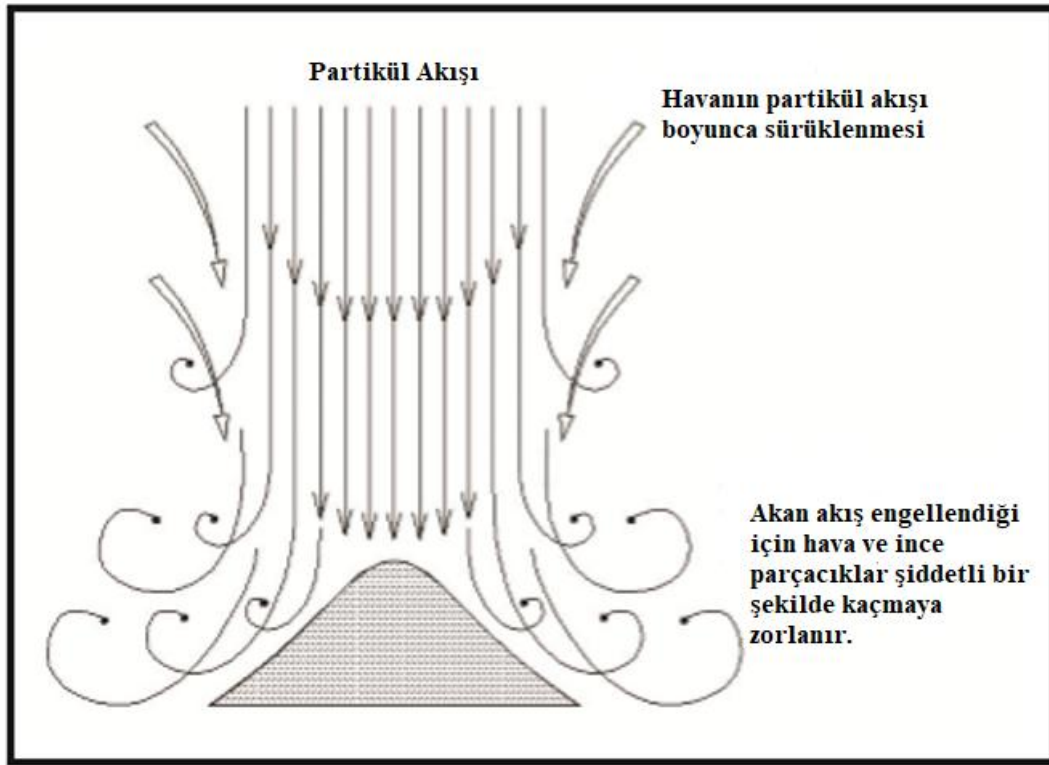
International Organisation for Standardization (ISO 4225 ISO, 1994)'a göre toz, "...Çapı 75 μm 'den küçük ve bir süre askıda kalmayı sürdürebilen katıparçacıklar.." olarak nitelendirilmiştir.

Glossary of Atmospheric Chemistry Terms" (IUPAC, 1990)'a göre ise, toz; "Rüzgar, volkanik püskürtmeler gibi doğal kuvvetlerin yanı sıra, ezme, öğütme, delme, yıkım, kürekleme, taşıma, eleme, paketleme ve süpürme gibi insan gücü ile oluşabilecek ve havaya karışabilecek her türlü küçük, kuru ve katı parçacıklar" olarak tanımlanmaktadır.

İngiliz standardı BS 2955:1958'e göre ise partikül boyutu 1000 μm 'dan küçük olan malzemeler "pudra", 76 μm 'dan küçük partikül boyutlu malzemeler "toz" olarak tanımlanmaktadır (BS 2955: 1958).

“Tozla Mücadele Yönetmeliği”ne göre toz, “İşyeri ortam havasına yayılan veya yayılma potansiyeli olan parçacıklar” olarak tanımlanmaktadır (T.C. Resmi Gazete, 5 Kasım 2013, sayı: 28812).

Tüm bu tanımlara baktığımızda, kabaca, tozun, $1000 \mu\text{m}$ ' den küçük, havada asılı kalabilen ve ortam şartlarına bağlı olarak çökebilen parçacıklar olduğunu söyleyebiliriz (Khambekar ve Pittenger, 2013). Her ne şekilde sınıflandırılırsa sınıflandırılırsın belirli bir hacim içindeki ağırlık (m^3/mg) ve toz sayısı (m^3/tane) cinsinden tanımlanırlar.



Şekil 4.6. Toz Üretim Esnasında Toz Oluşumu (Khambekar ve Pittenger, 2013)

4.2.1.1. Toz bulutu

Bir toz bulutu mekanik bir süspansiyon, yani çevredeki ortamda moleküler hareketle değil, karıştırma ile dağılmış ince parçacıkların bir sistemidir. Pratikte karşılaşılan çoğu sistem için bu, akışın doğal olarak türbülanslı olduğunu gösterir. Ayrıca, türbülanslı yapıların dinamikleri bölgesel konsantrasyon eğimleri oluşturur. Çoğu toz numunesi nispeten geniş bir partikül büyüklüğü dağılımına sahiptir ve farklı boyuttaki partiküller akış alanındaki varyasyonlara farklı şekilde

tepki gösterir. Hem laboratuvar hem de büyük ölçekli deneylerden elde edilen sonuçlar, toz partikülü dağılımının patlama tehlikesi üzerinde önemli etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Dolum sırasında silolarda veya diğer işlem kaplarında gerçek toz konsantrasyonu hakkında bilgi, risk değerlendirmeleri açısından önemlidir (Skjold ve Rolf, 2016).

Bölüm 4.1’de değinildiği gibi bir toz bulutunun patlaması için bazı şartların eş zamanlı olarak gerçekleşmesi gerekir:

✓ **Toz patlayabilir olmalıdır:**

Öncelikle hava içerisinde asılı halde süspansiyon olan tozların patlayabilirliğinin kantitatif yöntemlerle tayin edilmesi gerekmektedir. Bunun için toz numunesinin “Patlama Sınıflandırma Testi”nden geçirilmesi gerekmektedir. Alev yayılımının gözlenmesi için yapılan bu test, askıdaki tozun patlamanın başlatılıp sürdürülebileceğini belirler. Toz bulutları söz konusu olduğunda, yanıcı, alevlenebilir veya patlayıcı terimlerin hepsinin aynı anlamı taşıdığı ve birbirinin yerine kullanılabileceği belirtilmelidir (http://www.redalyc.org/pdf/2651/265146984002.pdf, Erişim tarihi: 14 Haziran 2018).

✓ **Toz partikülleri havada asılı olmalıdır:**

Partikül yüzeyinde oksitlenmenin sağlanabilmesi için, tozun, uygun bir oksitleyici gaz ortamında homojen bir şekilde dağılması gerekir. Her bir partikülü çevreleyen oksijen nedeni ile yanma aniden gerçekleşecek ve toz patlaması ve basınç artışı gerçekleşecektir (http://www.redalyc.org/pdf/2651/265146984002.pdf, Erişim tarihi: 14 Haziran 2018).

✓ **Toz konsantrasyonunun patlama aralığında olması gerekir:**

Eğer toz bulutu “Minimum Patlama Konsantrasyonu” (MPK) altında kalırsa, alevlenebilir atmosfer çok zayıf olacağından patlama gerçekleşmeyecektir. Patlamanın hassasiyeti ve şiddetinin büyüklüğü, toz konsantrasyonunun artması ile

artacaktır ve optimum konsantrasyona geldiğinde en yüksek patlama şiddetine erişecektir. Eğer konsantrasyon MPK üzerine çıkmaya devam ederse patlama şiddeti oldukça düşecek ve bir noktaya ulaştığında zengin karışım nedeni ile patlama gerçekleşmeyecektir (<http://www.redalyc.org/pdf/2651/265146984002.pdf>, Erişim tarihi: 14 Haziran 2018).

Toz bulutunun tutuşturulma şiddetini ve patlama hassasiyetini etkileyen faktörler ve toz patlama parametreleri Bölüm 4.4.2.1’de detaylı olarak verilmiştir.

4.2.1.2. Toz tabakası

Yanıcı bir toz tabakası tutuşabilir ve yanabilir. İnce bir toz tabakasının bir tutuşturma kaynağı ile temasında, içten içe yanma tehlikesi baş gösterebilir. Bir toz tabakasının tutuşmasıyla içten içe yanma (alevsiz yanma) dalgaları, bir toz bulutu patlamasında tutuşturucu görevi görebilir (Ogle, 2016), başka bir deyişle toz bulutu için potansiyel bir tutuşturma kaynağı sunar (Barton, 2002).

Bu durum, toz bulutunun ani patlaması için gereken şartlardan farklı şartlara sahip bir durumdur. Toz tabakasının alevsiz yanması için, yanma üçgeninden farklı olarak yanıcı toz, tutuşturma kaynağı, oksitleyici ve farklı olarak minimum (kritik) toz tabakası kalınlığı gerekmektedir ve bu şartlar alevsiz yanma tetrahedronu (*smoldering square*) olarak anılır

Toz tabakalarının havalanmasıyla meydana gelen alev yayılımı, endüstride detay ve genel olarak gözden kaçırılan bir tehlikeyi temsil eder (Skjold ve Rolf, 2016). Bu sebeple, işlenmekte olan toz tabakalarının yanıcılık özelliklerinin farkında olmak önemlidir. Bu yanıcılık özellikleri ise aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir;

- ✓ **Alevlenebilirlik:** Bir toz birikintisinin veya tabakasının yanıcılığı, bir veya daha fazla tutuşturma kaynağı tarafından tozun tutuşabilme kolaylığını belirtir. Toz birikintisi testte tutuşabilirse tozun yanıcı olduğu kabul edilir (Barton, 2002).

- ✓ **Yanma Davranışı:** Bir toz birikintisi yanıcı ise, yanma davranışı bulunduğu alandaki yangının niteliğini (Tablo 4.1) tanımlamak için kullanılır (Barton, 2002).

Tablo 4.1. Toz Tabakalarının Yanma Davranışı

Sınıf	Reaksiyon Tipi
1	Yanma yok, tutuşma yok.
2	Kısa yanma, hızlı sönme
3	Lokal yanma veya alevsiz yanma (hiç veya çok küçük alev yayılımı)
4	Alevsiz yanma yayılımı veya yavaş, alevsiz ayrışma
5	Açık alev yayılımı (Alev büyümesiyle yanma)
6	Alev yayılımı ile çok hızlı yanma veya ani, alevsiz ayrışma

Kaynak: (Barton, 2002)

➤ **Toz Tabakasının Minimum Tutuşma Sıcaklığı**

Belirli test koşulları altında 5mm kalınlığında bir toz tabakasında tutuşmanın meydana geldiği sıcak bir yüzeyin en düşük sıcaklığıdır (Beck ve ark., 1997).

5mm kalınlığında bir toz tabakası için, MTS (Bkz. Bölüm 4.4.2.1.5.) genellikle alevsiz yanma sıcaklığı veya bazen kızdırma sıcaklığı olarak adlandırılır. Ölçüm, toz taşıma tesislerinde elde edilen sıcaklıkların sınırlandırılması ihtiyacının değerlendirilmesinde önemlidir. Toz tabakası tutuşturma sıcaklıkları neredeyse her zaman bulut tutuşma sıcaklıklarından daha düşüktür (Barton, 2002).

Toz tabakalarının genel tutuşma ve yanma davranışı tayini için, toz birikintileri farklı tutuşturma kaynaklarının etkisine karşı ön testlere tabi tutulurlar. Bu kaynaklar, endüstriyel vakalarda önemli bir rol oynamaktadır. Tutuşturma kaynakları şunları içerir: kıvılcımlar, mekanik kıvılcımlar, yanabilir kibritler, sigara közü ve gaz alevleri (Siwek, 1996).

Tutuşturma kaynakları ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 3.3.1' de verilmiştir.

4.3. Tozların Sınıflandırılması

Standartlaştırılmış ve en çok karşılaşılabilecek sınıflandırmalar şu şekildedir:

4.3.1. Tesis Gözetim Departmanı – Birleşik Krallık

Patlama önleme ve korunma sistemlerinin tasarımındaki ilk aşama, bir tozun patlama testine girerek bir patlamaya dahil olabilmesinin nitel değerlendirmesini yapmaktır. İngiltere'de bu, tozları iki gruba ayırmak için kullanılır:

A grubu □ Tutuşturulduğunda bir alevin oluştuğu ve bu alevin yayılabildiği tozlar

B grubu □ Tutuşturulduğunda bir alevin oluşmadığı tozlar (Barton, 2002), (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Tesis Gözetim Departmanı tarafından yapılan bu testler, tüm patlama testlerinde olduğu gibi, test için seğilen örnek, risk altındaki tesiste bulunan malzemeyi temsil etmelidir. En iyi uygulama, numunenin tesisteki en kuru malzeme kadar kuru olmasını ve test tozunun boyut dağılımının, işlemin herhangi bir bölümünde meydana gelebilecek en ince boyut olmasını sağlamakla olacaktır. Ayrıca, sınıflandırmada, tozun işleneceği sıcaklık gibi koşullar önemlidir. (Barton, 2002). Sınıflandırma, tutuşturma esnasında 25°C oda sıcaklığında yapıldığında standarda uygun olmaktadır (Abbasi ve Abbasi, 2007). Ancak, proses sıcaklığı büyük ölçüde yüksek olduğunda, oda sıcaklığında bir patlayıcılık değerlendirmesi yapmak mantıklı değildir. Oda sıcaklığında B Grubu olarak sınıflandırılan bazı tozlar, daha yüksek sıcaklıklarda tutuşabilir (Barton, 2002). Bazı tutuşan ancak patlama özelliği göstermeyen tozlar ise yakıt özelliği gösteren uçucu kül gibi tozlar, pulvarize kömür ve petrol koku gibi tozlarla karıştırıldığında (hibrit karışım – Bölüm 4.4.4.8.) karışım içerisinde yakıt tozları tarafından meydana gelen uçuculuğun artması ile patlayıcılık özelliği gösterecektir.

4.3.2. Yanma sınıfı sınıflandırması (CC- Combustion Class)

Başka bir sınıflandırma sistemi ise toz tabakasının tutuşturulması ve bu tabakanın yanma yoğunluğunu baz alarak yapılan “yanıcı sınıf” sınıflandırmasıdır. Bu sınıflandırma, belirli bir toz kütlesinin gaz alevi veya sıcak platin tel teması ile yanma davranışlarının incelenmesi prensibine dayanır.

CC sınıflandırması:

- CC1: Tutuşmaz (tutuşma yok ve yanma kendiliğinden sürdürülemez.)
- CC2: Kısa süreli tutuşur ve çabuk söner, kısa süreli bölgesel yanmalar oluşturur.
- CC3: Bölgesel yanar veya yayılmadan parlar, (bölgesel ancak yayılmayan yanma)
- CC4: Parlamayla meydana gelen yanmanın yayılımı ve içten içe yanmanın devam etmesi.
- CC5: Açık alevli yanma gerçekleşir ve alevler tamamen yayılabilir.
- CC6: Patlayabilir, yanma gerçekleşir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

4.3.3. Tozun patlama şiddetine göre sınıflandırma

K_{st} , diğer tozlara kıyasla tozun patlama şiddetini ifade eder, bu sebeple K_{st} ile toz patlamalarının şiddeti sınıflandırılmaktadır. Buradaki ölçüm, $1m^3$ 'lük bir kaptan, $10 kJ$ 'lük bir tutuşma kaynağıyla gerçekleştirilir (Asana, 2015).

Tozlar, patlayabilirliklerine ve meydana gelen patlama şiddetine göre sınıflandırılırlar. Patlama şiddeti, iki parametre için standartlaştırılmış testlere tabi tutularak ölçülebilmektedir. Bu iki parametre, meydana gelebilecek maksimum patlama şiddetini tanımlayan ve K_{st} değeri ile ilişkilendirilen patlama basıncı artışının (patlama hızı) maksimum oranını ifade eden parametrelerdir. Uygun patlama koruma ölçümlendirilmesi ve buna bağlı olarak uygun dizayn yapılabilmesi adına patlama hızını bilmek (K_{st} değeri) önemli bir husustur (Khambekar ve Pittenger, 2013).

Bir toz patlamasının sonuçlarının şiddetini belirlemek için, aşağıdaki ASTM Standardı kullanılabilir:

➤ Patlama şiddeti testi ASTM E 1226

Bu test, toz konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak basınç çıkışına ve basınç artış hızına göre patlama büyüklüğünün nispi bir ölçüsünü sağlar.

Bu özellikleri ölçmek için prosedürler, BS 6713 (1986) olarak mevcut olan bir ISO standardında verilmiştir. Bu tespitler için standart test kabı, yukarıda da belirtildiği gibi 1 m³ 'tür, ancak standartta ayrıca belirtildiği takdirde, karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek amacı ile alternatif kapların kullanılmasına izin verir. Uygunluk gösterme kriterleri standart olarak verilmiştir. 1 m³ aparatı ve alternatif 20 L küre CEN Teknik Komitesi 305, ISO prosedürünü hafifletmektedir. Standart aparat olarak 1 m³ aparat kullanımını tavsiye edeceklerdir, ancak uygunluk gösterilebiliyorsa 20 L'lik küre gibi alternatiflerin kullanılmasına izin verecektir (Barton, 2002).

Tablo 4.2. 1 m³'lük Aparat İçerisinde 10 kJ Tutuşturma Enerjisi ile Toz Patlama Sınıflandırması

Toz Patlama Sınıfı	K_{st} (bar m s⁻¹)	Karakteristik
St 0	0	Patlamaz
St 1	0 < K _{st} < 200	Zayıf Patlayıcı
St 2	200 < K _{st} < 300	Kuvvetli Patlayıcı
St 3	300 < K _{st} < 800	Çok Kuvvetli Patlayıcı

Kaynak: (Barton, 2002)

4.3.4. Amerika Birleşik Devletleri Maden Bürosu (U.S. Bureau of Mine) patlayıcı toz sınıflandırması

Bu sınıflandırmada ise Pittsburgh kömürü baz alınarak tozların patlayıcılık şiddeti sınıflandırılması yapılmıştır. Buna göre (Abbasi ve Abbasi, 2007):

IE: Patlayabilirlik İndeksi □ *Index of Explosibility*

ES: Patlama Şiddeti □ *Explosion Severity*

IS: Patlama Hassasiyeti □ *Ignition Sensivity*

CP: Pittsburgh kömürü □ *Pittsburgh Coal*

Tutuşturma hassasiyetinin, tutuşturma sıcaklığı, minimum tutuşturma enerjisi ve minimum patlama konsantrasyonunun bir fonksiyonu olduğu varsayılmaktadır. Patlama hassasiyeti ise maksimum patlama basıncı ve basınç yukselme oranı ile ilişkilendirilir (<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b270510.pdf>, Erişim tarihi: 09 Eylöl 2018).

$$IE = IS \times ES$$

$$IS = ((MTS \times MTE \times MPK)_{PK^*}) / ((MTS \times MTE \times MPK)_{numune})$$

$$ES = ((MEP \times MBYH)_{PK^*}) / ((MEP \times MBYH)_{numune})$$

*PK: Patlama Konsantrasyonu

Tablo 4.3. Amerika Birleşik Devletleri Maden Bşrosu Patlayıcılık İndeksi

Bağıl Patlama Tehlikesi İndeksi	Patlayabilirlik İndeksi
Patlamaz	0
Zayıf	$0 < 0.1$
Makul	$0.1 - 10.0$
Güçlü	$1.0 - 10.0$
şidetli	>10

Kaynak: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b270510.pdf>, Erişim tarihi: 09 Eylöl 2018

Toz bulutlunun tutuşturulma şiddetini ve patlama hassasiyetini etkileyen faktörler ve toz patlama parametreleri Bölüm 4.4.2.1’de verilmiştir.

4.4. Tozlar için Yanıcılık ve Patlayıcılığın Belirlenmesi

4.4.1. Yanıcı/patlayıcı/patlayıcı tozlar için standart tanımları

Ulusal Yangından Korunma Derneği (NFPA), yıllar içinde birçok yanıcı toz tanımına sahiptir. NFPA 654 ’teki mevcut tanım, “Partiköl büyüklüğü veya şekli ne olursa olsun, havada veya başka bir oksitleyici ortamda asılı haldeyken, yangın veya deflagrasyon tehlikesi veren yanıcı bir katı partiköldür”

(<https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=654>, Erişim Tarihi: 2 Eylöl 2018).

NFPA 654' ün önceki sürümlerindeki NFPA Terimler Sözlüğü'nde, yanıcı bir tozu “420 mikron veya daha küçük çaplı, havada dağıldığında yangın veya patlama tehlikesi oluşturan herhangi bir ince bölünmüş katı madde” olarak tanımlar (Zalosh, 2011).

TS EN 60079-10-2: 2015 standardında tozun jenerik terim olarak yanıcı toz ve yanıcı uçucuları kapsadığı belirtilmiştir. Standartta yanıcı toz; nominal büyüklüğü 500 µm ve daha düşük olan, atmosferik basınçta ve normal sıcaklıkta havayla patlayıcı karışım oluşturabilen ince bölünmüş katı parçacık olarak tanımlanmış, yanıcı uçucu ise nominal boyutu 500 µm'den daha büyük olan, atmosferik basınçta ve normal sıcaklıkta havayla patlayıcı karışım oluşturabilen katı parçacık olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, yanıcı uçucuların lifleri de kapsadığı belirtilmiştir (https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/combustible_dust.html, Erişim tarihi: 16 Mart 2018).

OSHA 3371-08 2009 'a göre ise yanıcı tozlar daha genel bir ifade ile ele alınmış ve “Yanıcı tozlar, belirli koşullar altında havada asılı kaldıklarında patlama tehlikesi gösteren ince parçacıklar” olarak tanımlanmıştır (https://www.osha.gov/Publications/3371combustible_dust.pdf, Erişim tarihi: 9 Kasım 2018).

4.4.2. Yanıcılık ve patlayıcılığın belirlenmesi

Genel bir tanım olarak kolaylıkla oksitlenebilen çok ince parçacıklara ayrılmış materyaller yanıcı toz olarak (Ogle, 2016) veya toz tabakalarının dışarıdan bir kaynakla tutuşturulup, bir süre sonra tutuşturma kaynağı ortamdan uzaklaştırıldığında o bölgedeki yanma büyüyerek devam ediyorsa, ‘yanıcı tozlar’ olarak adlandırılabilir (Siwek, 1996).

Bütün patlayıcı tozlar yanıcı olmak zorundadır, ancak, her yanıcı toz kolaylıkla patlamaz (Vijayaraghavan, 2004). Toz halindeki tüm metal veya metal alaşımları ise potansiyel patlayıcı değildir. En önemli unsurlardan biri, metal tozlarının partikül boyutlarıdır.

Toz patlamasına neden olabilecek maddeler;

- Doğal organik maddeler (tahıl, keten, şeker vb.),
- Sentetik organik maddeler (plastikler, organik pigmentler, pestisitler vb.),
- Kömür ve turba,
- Metaller (alüminyum, titanyum, magnezyum, lityum, çinko, demir vb.)
(Eckhoff, 2003).

Örnek verecek olursak, antrasit ve grafit, yüksek yanma ısılarına sahip olmalarına rağmen, kolaylıkla patlamaz. Bir tozun patlayıcı olup olmadığına, tozun kimyasal ve fiziksel karakteristiklerine göre titizlikle ortaya atılan teoriler ve testlere göre karar verilebilmektedir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Birçok açıdan, patlama pentagonu bize toz patlaması nedeni hakkında temel düzeyde bilmesi gereken her şeyi verir. Pentagonun gereksinimleri karşılandığında toz patlaması riski doğar. Bu gereklilikler arasında, yakıt, oksitleyici ve yakıt ile oksitleyici karıştırılarak elde edilen ilave bir tutuşturma kaynağının yanı sıra elde edilen karışımın sınırlandırılması gibi bilindik gerekler mevcuttur. Bu ilave bileşenlerden birincisi, toz ve gaz patlaması arasındaki temel farkı göstermektedir. Bölüm 2.2.1.1.6.3. 'te bahsi geçtiği gibi, bir toz/hava karışımında, toz parçacıkları yerçekiminden çok etkilenir. Toz patlaması için gerekli bir ön şart, toz / oksitleyici süspansiyonunun oluşmasıdır.

Bu karışımın yanması oluştuğunda, sınırlandırma (kısmi veya tamamen) aşırı basıncın oluşmasına izin verir ve böylece hızla yanan toz alevi, toz patlamasına geçiş yapar (Eckhoff, 2003). Başka bir deyişle, bütün bu unsurlar yerine getirildiğinde, Bölüm 2.2.1.1.3 'te detaylandırıldığı gibi 'deflagrasyon' olarak bilinen hızlı yanma meydana gelebilir. Bu olay bir bina, oda, kap veya proses ekipmanı gibi bir muhafaza tarafından sınırlanırsa, oluşan basınç artışı bir 'detonasyon' a neden olabilir (Geddie, 2012).

4.4.2.1. Toz bulutunun yanıcılık ve patlayıcılık parametreleri

Yanıcılık ve patlayıcılığın belirlenmesi ve önlenmesi için kantitatif bir değerlendirme yapmak şarttır. Bunun için, toz patlamasını belirleyen parametreler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir (Amyotte, 2013, s. 43).

Tablo 4.4. Önemli Toz Patlama Parametreleri ve Patlama Önlemedeki Yeri

Parametre	Birim	Açıklama	Endüstride Kullanımı
P_{max}	bar(g)	Sabit hacim patlamasında maksimum patlama basıncı	Tutma (sıkıştırma) Havalandırma Durdurma İzolasyon Kısmi Tepkisizleştirme
$(dP/dT)_{max}$	bar/s	Sabit hacim patlamasında maksimum basınç yükselme oranı	P_{max} ' a göre
K_{st}	bar m/s	Standartlaştırılmış ölçü veya hacimde maksimum basınç yükselme oranı	P_{max} ' a göre
MPK	g/m ³	Minimum patlayabilir toz konsantrasyonu	Toz konsantrasyonunun kontrolü, topraklama
MTE	mJ	Toz bulutunun minimum tutuşma enerjisi (elektriksel kıvılcım)	Tutuşma kaynaklarının bertarafı
MTS (bulut)	°C	Toz bulutunun minimum tutuşma sıcaklığı	Proses ve yüzey sıcaklıklarının kontrolü (toz bulutu)
MTS (toz tabakası)	°C	Toz tabakasının minimum tutuşma sıcaklığı	Proses ve yüzey sıcaklıklarının kontrolü (toz tabakası)
SOK	% Hacim	Sınırlanmış oksijen konsantrasyonu	Inert gaz ile birlikte tepkisizleştirme

Kaynak:(<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Safe%20Handling%20of%20Powder%20and%20Paste.pdf>, Erişim Tarihi: 12 Nisan 2018), (Amyotte, 2013, s. 43)

Tablo 4.5. Bazı Metallerin Patlayıcılık Özellikleri

Metal	Medyan Çapı (µm)	K _{st} (bar m/s)	P _{max} (bar g)	BTS (°C)*	MTE (mJ)	MPK (g/m ³)	UN Y.K. **	SOK *** (V%)	Kaynak
Alüminyum	~7	□	8	□	□	90			Cashdollar&ZS OKhow er
Alüminyum	22	110	11.5	□	□	30	□	5 (N)	BGIA, Eckhoff
Alüminyum	<44	□	5.8	650	50	45		2 (C)	BuMines RIs RI 6516
Alüminyum pul	<44		6.1	650	20	45		<3 (C)	BuMines RIs RI 6516
Alüminyum	<10	515	11.2	560	□	60	□	□	BGIA
Alüminyum	580	Tutuş maz	□	□	□	□	□	□	BGIA
Berilyum	4	Tutuş maz	□	□	□	□	□	□	BuMines RIs RI 6516
Bor	<44	□	□	470	60	<100	□	□	BuMines RIs RI 6516
Bor	~3	□	6.0			~100			Cashdollar&ZS OKhow er
Bronz	18	31	4.1	390	□	750	BZ4		Eckhoff
Krom	6	□	3.3	660	5120	770		14 (C)	BuMines RIs RI 6516
Krom	3	□	3.9	580	140	230	□	□	BuMines RIs RI 6516
Bakır	~30	Tutuş maz							Cashdollar&ZS OKhow er
Hafniyum	~8	□	4.2	□	□	~180	□	□	Cashdollar&ZS OKhow er
Demir	12	50	5.2	580		500	□		Eckhoff
Demir	~45	□	2.1	□	□	~500	□	□	Cashdollar&ZS OKhow er
Demir	<44	□	2.8	430	80	170	□	13 (C)	BuMines RIs RI 6516
Demir, karbonil	<10	111	6.1	310		125	BZ3		Eckhoff
Manganez	<44	□	□	460	305	125		□	BuMines RIs RI 6516
Manganez (Elektrolitik)	16	157	6.3	330	□	□	□	□	Eckhoff

Tablo 4.5. (devamı)

Manganez (Elektrolitik)	33	69	6.6	□	□	□	□	□	Eckhoff
Magnezyum	28	508	17.5	□	□	□	□		Eckhoff
Magnezyum	240	12	7	760		500	BZ5		Eckhoff
Magnezyum	<44	□	□	620	40	40		□	BuMine s RI 6516
Magnezyum	<44	□	7.5	600	240	30	□	~3 (C)	BuMine s RI 6516
Magnezyum	~16	□		□	□	55	□	□	Cashdollar&ZS OKhow er

*BTS: Bulut tutuşma sıcaklığı

**BM Toz Tabakası Yanabilirlik Kategorileri aşağıdaki gibidir: BZ1 Kendiliğinden kalıcı yanma yok; BZ2 Kısa süreli yerel yanma; BZ3 Yerel sürekli yanma, ancak hiçbir yayılma; BZ4 Yanan tutuşturma yayılması; BZ5 Açık alev yayma; BZ6 Patlayıcı yanma

*** UN Yanıcılık Kategorisi: Parantez içindeki harfler, oksijen konsantrasyonunu düşürmek için ilave edilmiş inert gazlardır: C = Karbon Dioksit, N = nitrojen.

(Kaynak: https://www.nfpa.org/assets/files/AboutTheCodes/652/652_A2018_CMD_AAC_SD_SCRReport.pdf, Erişim tarihi: 23 Ağustos 2018)

Tablo 4.6. Toz Patlama Parametreleri için Test Metotları

Parametre	Birim	Tanım	Endüstriyel Uygulama Örneği	Test Metodu	Amaç
P_{max}	bar(g)	Sabit hacim patlamasında, maksimum patlama basıncı	Önleme Havalandırma Bastırma İzolasyon Kısmi inertleştirme	ASTM E 1226	Muhafazaları tasarlamak ve sonuçların ciddiyetini tahmin etmek için kullanılır.
$(dP/dt)_{max}$	bar/s	Sabit hacim patlamasında, basınç yükselmesinin maksimum oranı	P_{max} 'a göre	ASTM E 1226	Kst hesaplamak için kullanılan bir patlama şiddetini tahmin eder.
Kst	bar.m/s	Sabit hacimli bir patlamada standart boyut veya hacim maksimum basınç artışı oranı	P_{max} 'a göre	ASTM E 1226	Diğer tozlarla karşılaştırıldığında nispi patlama şiddetini ölçer.

Tablo 4.6. (devamı)

MPK	g/m ³	Minimum patlayabilir (veya patlayıcı) toz konsantrasyonu	Toz konsantrasyonu kontrolü	ASTM E 1515	Bir patlamayı yaymak için gerekli olan havada yayılmış minimum toz bulutu miktarını ölçer.
MTE	mJ	Toz bulutunun minimum tutuşma enerjisi (elektrik kıvılcımı)	Tutuşma kaynaklarının topraklanması ve bağlanması	ASTM E 2019	Dağılmış toz bulutunun tutuşma olasılığını tahmin eder.
MTS (toz bulutu)	°C	Toz bulutunun minimum tutuşma sıcaklığı	Proses ve yüzey sıcaklığı kontrolü (toz bulutu)	ASTM E1491	Bir toz patlamasını başlatmak için gereken en az miktarda kıvılcım tutuşma enerjisini nispi olarak belirler.
MTS (toz tabakası)	°C	Toz tabakasının veya tortusunun minimum tutuşma sıcaklığı	Proses ve yüzey sıcaklığı kontrolü (toz tabakası)	ASTM E2021	Belirli test koşulları altında 5mm kalınlığında bir toz tabakasında tutuşmanın meydana geldiği sıcak bir yüzeyin en düşük sıcaklığıdır
SOK	Hacim %	Toz bulutundaki alev yayılımı için atmosferde sınırlayıcı oksijen konsantrasyonu	Inert gaz ile tepkisizleştirme		Bir toz bulutu aracılığıyla patlamanın yayılması için gereken en az oksijen miktarını belirler

Kaynak: [(Dastidar ve ark., 2005), (Amyotte, 2013)].

4.4.2.1.1. Toz patlama şiddeti (P_{max} , dP / dt_{max} ve K_{St})

Bölüm 4.3.3.'de değinildiği gibi, maksimum basınç yükselme hızı $(dP/dt)_{max}$, elbette, patlama odasının hacmine bağlıdır ve bu nedenle kendi başına sınırlı kullanım içindir. Daha büyük hacimlere ölçeklendirme için, patlama odası hacminin küp köküyle çarpılarak maksimum basınç artış oranları normalleştirilir (Amyotte, 2013).

$$K_{St} = (dP / dt) \times V^{1/3}$$

Buradaki “st” indisi ise, toz anlamına gelen Almanca “staub” kelimesinden gelmektedir (Asana, 2015).

P_{max} 'ın gerçek bir endüstriyel ölçekli işlemde biraz daha yüksek olduğunu hatırlamak önemlidir (yaygın olarak kullanılan test odası sadece 20 L'dir ve bu sınırlı boyut bazı tozlar için tam alev büyümesine izin vermeyebilir). Ek olarak, basınç artış hızı büyük ölçüde toz türbülans seviyesine bağlıdır (Bölüm. 4.4.4.5.) İşlem ortamı, standart test kabında bulunandan daha düşük veya daha büyük bir türbülansa sahip olabilir. Test sonuçları gerçek endüstriyel toz patlaması senaryolarına uygulandığında bu türbülans farkı dikkate alınmalıdır (Dastidar ve ark., 2005).

Tablo 4.5'te bazı metal tozlarının, çeşitli kaynaklardan alınan K_{st} değerlerine ulaşılabilir.

4.4.2.1.2. Minimum patlama sınırı – MPK (*MEC – Minimum Explosive Concentration*) ASTM E 1515

Bu test, bir toz patlamasının meydana gelmesi için havada yayıldığına gerekli olan toz miktarını ölçer. Bu, gazlar için alt patlama sınırı kavramına eşittir. MPK ne kadar düşük olursa, toz patlaması yaratmak için gereken toz miktarı o kadar küçük olur. Ayrıca, MPK değeri ne kadar düşükse, yeterli miktarda tozun dağılması ve bir süreçte yanma için kullanılabilir hale gelmesi olasılığı artar. MPK' in tutuşturma enerjisine bağlı olduğunu unutmamak önemlidir. Tutuşturma enerjisi çok yüksekse, sonuç, konsantrasyonun gerçekçi olmayacak şekilde düşük olduğudur veya tutuşturma olmadığında tozun patlayabileceğini gösterebilir (Dastidar ve ark., 2005).

MPK partikül boyutu ile doğrudan ilgilidir ancak çok ince tozlar için boyuttan bağımsızdır, ancak kolayca tutuşamayan bir boyuta ulaşıncaya kadar MPK 30 mm'nin üzerindeki partiküller için artmaya başlar (Kosinski ve Hoffmann, 2005).

Havada bir bulut olarak dağıtılan belirli bir patlayıcı toz türü için, toz bulutunun alev yaymayacağı birim hava hacminin başına oldukça iyi tanımlanmış bir minimum toz miktarı vardır. Örnek olarak, toz konsantrasyonunun yeterince düşük tutulmasıyla korunabilen bir ekipman türü, elektrostatik toz boyama sistemleridir. Bu tür sistemlerde, havadaki parçacıkların konsantrasyonu nispeten eşittir ve kontrol edilmesi oldukça kolaydır. Aslında, birçok ülke, minimum patlayıcı toz konsantrasyonunun tahminlerine dayanarak, boya püskürtme kabininde belirli maksimum izin verilebilir ortalama toz konsantrasyonlarını belirlemiştir (Eckhoff, 2003).

MPK ölçümü dikey tüp aparatı ile yapılır.

Havada dağılmış olan alevlenebilir tozlar, konsantrasyon açısından gazlarınkine benzer bir tavır sergilerler (Bond, 2017). Patlama limitleri, patlamaların mümkün olduğu toz / hava karışımlarının konsantrasyon aralığını tanımlar (Barton, 2002). Genellikle, gazlar için üst ve alt patlama sınırı belirlenirken, tozlar için sadece alt patlama sınırı (APS) belirlenerek “minimum patlayıcılık konsantrasyonu” olarak adlandırılır ve hacimce ölçümü g/m^3 ile ifade edilir (Bond, 2017). Bu ölçümler, bir tür toz bulutunun önlenmesinin, güvenlik için temelin bir parçasını oluşturması durumunda önemlidir.

Alt patlama limitinin belirlenmesi için hem $1 m^3$ aparatı hem de 20 litrelik küre aparatı yaygın olarak kullanılmaktadır (Barton, 2002).

Eckhoff (2003), minimum patlayabilir toz konsantrasyonunun hesaplamalar ile sabit hacim ve sabit basınçta yapılan deneysel çalışmaların (**Tablo 4.7**) farklılık gösterdiğini belirtmiştir (Eckhoff, 2003).

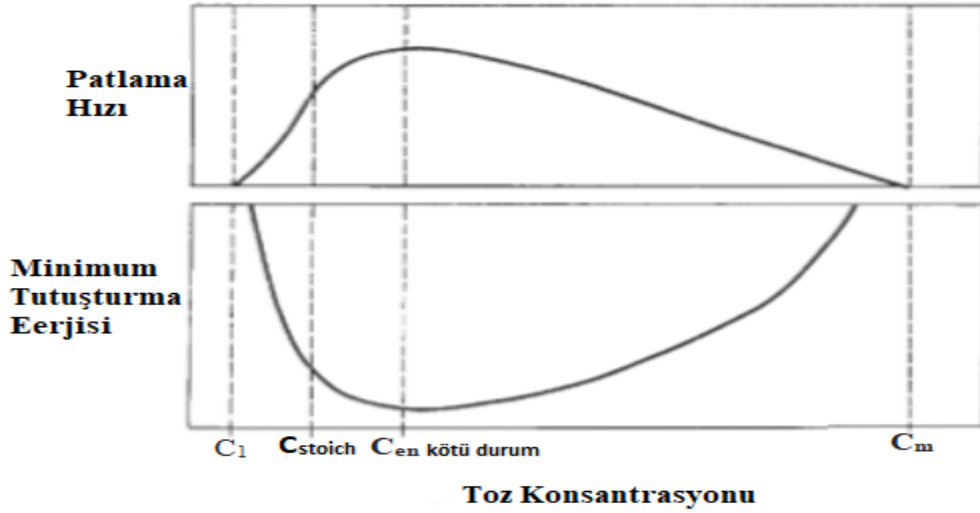
Tablo 4.7. Zehr Teorisi ile Hesaplanan Minimum Patlayabilir Toz Konsantrasyonları ve Deneysel Karşılaştırması

Toz Tipi	Hesaplanan Minimum Patlayabilir Toz Konsantrasyonu (g/m ³)		Deney Sonucu Ulaşılmış Minimum Patlayıcı Toz Konsantrasyonu (g/m ³)	
	Sabit Hacim	Sabit Basınç		
Alüminyum	37	50	Sabit basınçta 90	Schlapfer, 1951
Grafit	36	45	Grafit/hava karışımında, normal şartlar altında alev büyümesi gözlemlenmemiştir.	
Magnezyum	44	59		
Sülfür	120	160		
Çinko	212	284	Sabit hacim ve sabit basınçta 500-600	Eckhoff, 1988
Zirkonyum	92	123		
Polietilen	26	35	Sabit hacimde 33	Cashdollar, Hertzberg, Zlochower, 1988
Mısır Nişastası	90	120	Sabit Hacimde 70	Proust ve Veyssiere, 1988
Bitümlü Kömür	35	48	Sabit hacimde, 70-130	(Cashdollar, Hertzberg, and Zlochower, 1988)

Kaynak: (Eckhoff, 2003).

▪ Gerçek bir bulutta toz konsantrasyon dağılımı

Toz süspansiyonunun artık ateşlenemediği bir dizi testte, patlayıcı bir tozun konsantrasyonu sistematik olarak azaltılır. Testlerde toz / hava karışımının artık tutuşamadığı en yüksek toz konsantrasyonu “APS” olarak belirtilir (Barton, 2002). Toz bulutlarının patlayıcı yanması, Şekil 4.7 'de gösterildiği gibi, toz konsantrasyonu, yani birim hacimdeki toz bulutu kütlesi belli sınırlar dahilinde olmadığı sürece gerçekleşemez. Bu, üst ve alt alevlenme limitlerinin iyi oluşturulduğu gaz halindeki yakıtların ve havanın homojen karışımlarının yanması ile benzerdir (Eckhoff, 2016).



Şekil 4.7. Toz Konsantrasyonunun Minimum Tutuşturma Enerjisi ve Patlama Oranına Etkisi (Eckhoff, 2003, s.35)

4.4.2.1.3. Minimum tutuşma enerjisi- MTE (*MIE- Minimum Ignition Energy*) ASTM E 2019

Bu test, bir toz patlamasını başlatmak için gereken en az miktarda kıvılcım tutuşturma enerjisini nispi olarak belirler. MTE ne kadar düşük olursa, tutuşması o kadar kolay olur ve aynı zamanda küçük tutuşturmalar daha büyük olanlardan daha kolay meydana geldiği için MTE azaldıkça olasılık artar. Bu test yöntemiyle bildirilen MTE, kullanılan test çevrimine bağlı olarak değişebilir. Proseste meydana gelen bir bozukluk veya kaza sırasında oluşabilecek gerçek tutuşturma geometrisi ve çevrimi, standarttaki test çevrimine benzer olmayabilir. Sonuç olarak, toz test yöntemiyle belirlendiğinden biraz daha düşük (veya daha yüksek) enerjilerde tutuşabilir (Dastidar ve ark., 2005)

Bir toz bulutunu bir elektrik kıvılcımı ile tutuşturmak için gerekli minimum enerjiyi etkileyen parametreler arasında, kıvılcım aralığındaki voltaj ve akım karakteristikleri, kıvılcım aralığı geometrisi ve elektrot malzemesi ile tüm toz bulutu parametrelerini içerir. Belirli bir toz malzemenin bulutlarının minimum tutuşturma enerjileri, tozun inceliği ile güçlü bir şekilde azalır (Eckhoff, 2005).

Toz bulutu içindeki etkili türbülans, MTE' yi yükseltir ve bu nedenle bir güvenlik faktörü sağlar (Eckhoff, 2003).

Glor'a (1988) göre, modern endüstriyel tesislerde iletken olmayan yapı parçalarının kullanımının artmasından dolayı, iletken malzemenin kullanım ihtiyacının yüksek olduğunu vurgulamış, bu nedenle, özellikle düşük MTE tozları ile çalışan tesislerde tüm iletken parçaların düzgün bir şekilde topraklanmasının sağlanması gerektiğini belirtmiştir (Eckhoff, 2003).

Bir toz hava karışımının minimum tutuşturma enerjisi, bir kondansatörde depolanan bir kıvılcım aralığındaki enerjinin boşalmasından sonra en fazla tutuşabilir toz / hava karışımını tutuşturan en düşük elektrik enerjisi değeri olarak tanımlanır. Bu ölçüm, tutuşturma kaynaklarının güvenlik temelinin bir parçası olarak bertarafında önemlidir (Barton, 2002).

Bir madde için tek bir MTE değeri tozun fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. (örneğin, kıvılcımı üretmek için kullanılan elektrik devresi). BS 5958 (1991) ve IEC 61241-2-3 (1994) standartlarında, MTE belirlenmesi için güncel metotlar bulunabilmektedir. Ticari olarak temin edilebilen bir cihaz olan Mike 3 aparatı, tüm standartlar için ortak kullanımdadır (Barton, 2002).



Şekil 4.8. Minimum Tutuşturma Enerjisinin (MTE)' nin belirlenmesi için MIKE 3 Aparatı (Abbasi ve Abbasi, 2007)

MTE genellikle iki değer olarak belirtilir. Alt değer, tutuşturmanın artık gerçekleşmediği enerjisi, daha yüksek değer ise en fazla tutuşabilen toz / hava karışımının ateşlenebileceği enerjisi belirtir. MTE' nin kullanılan aparata bağlı göz

önüne alındığında, bu değerler belirtilirken, kullanılan yöntem de belirtilmelidir (Barton, 2002).

4.4.2.1.4. Sınırlandırılmış oksijen konsantrasyonu- SOK (*LOC- Limiting Oxygen Concentration / MOC – Minimum Oxygen Concentration*) / Oksitleyici gazın oksijen içeriği ve bulut oksijen konsantrasyonu

“Toz patlaması” pentagonunun bir maddesi, genellikle havadaki oksijen olan oksitleyicidir. Oksijen, toz patlaması sürecini büyük ölçüde etkiler. Oksijen konsantrasyonu %21'den daha fazla olduğunda, yakıtın yanma hızını artırır. Ancak %21 'den az konsantrasyon için yanma hızı azalacaktır. Bu, oksijenin yanma prosesinde yakıt tarafından tüketilmesi ve böylece oksijen konsantrasyonunun azalması nedeniyle gerçekleşir, bunun sonucu olarak da tozun yanma hızı azalır. Sonuç olarak, yanma düşebilir veya bir patlama meydana gelirse, daha az şiddetli olabilir. Yanma, oksitleyici olarak yalnızca havadaki oksijen konsantrasyonunun %10'dan fazla olması durumunda devam edecektir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Bir toz bulutu patlaması ancak yeterli miktarda oksitleyici varsa mevcut olacaktır. Uygulamada havadaki oksijen en yaygın oksitleyicidir. Diğer oksitleyiciler arasında klor, flor, azot oksit, nitrik oksit ve azot tetraoksit bulunur (Ebadat, 2010).

Sınırlandırılmış oksijen konsantrasyonu (SOK), bir patlamanın gerçekleşmediği toz / hava / inert gaz karışımında en yüksek oksijen konsantrasyonu olarak tanımlanır (Amyotte, 2013). Bir başka deyişle, yangın çıkmasına neden olan bir tutuşturma kaynağı yaşanmış olsa bile, bir patlamanın meydana gelmemesi için tesisatta aşılması gereken konsantrasyondur (Hoppe ve Jaeger 2005). Endüstriyel işlemlerde güvenli inertleme seviyeleri oluşturmak için SOK verileri uygun bir güvenlik faktörü ile birlikte kullanılır (Mondolfo, 2013). SOK, kullanılan toz ve inert gazın her ikisine de bağlıdır, bu sebeple belirli bir oksijen konsantrasyon sınırlandırmasında kullanılan inert gaz da belirtilmelidir (Crowl, 2010).

SOK, hacim bazında yüzde olarak ifade edilir (ideal davranış koşullarında gazlar için mol bazına eşdeğerdir) (Crowl, 2010).

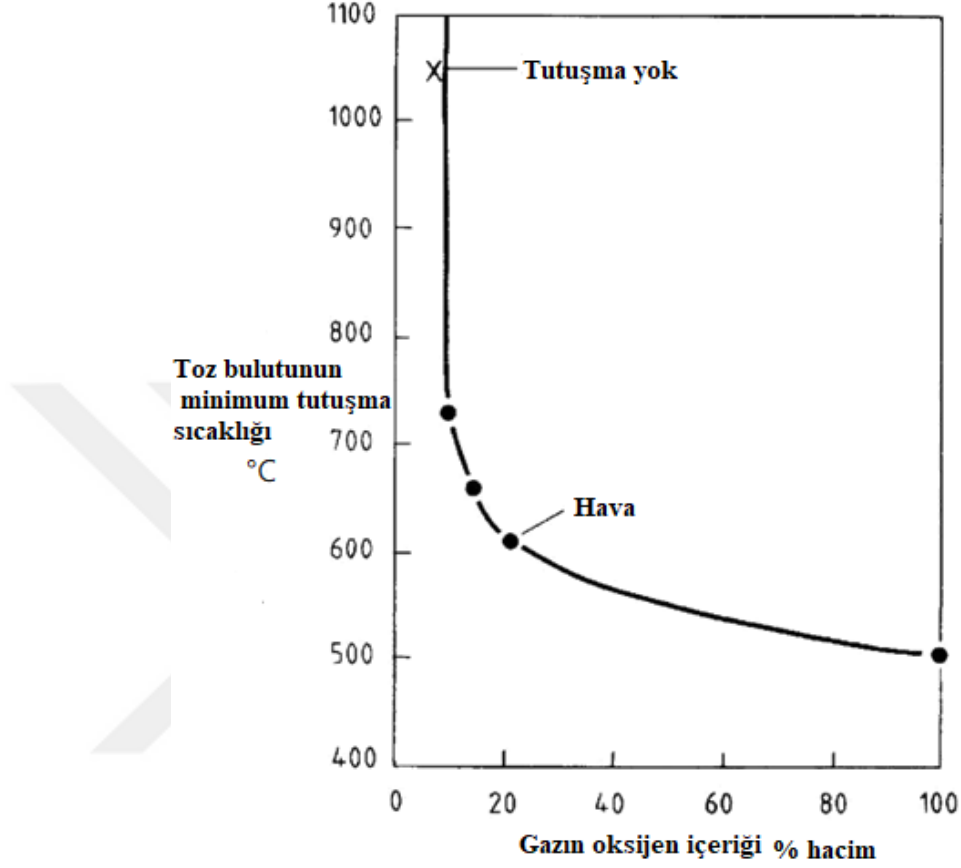
Tablo 4.8. Ortalama Partikül Boyutu ve Minimum O₂ Konsantrasyonu Arasındaki İlişki

Toz Tipi	Ortalama Partikül Boyutu (µm)	Minimum O ₂ Konsantrasyonu
<i>Selülozik Madde</i>		
Selüloz	51	11
Tahta	27	10
<i>Gıda ve Yem</i>		
Mısır Nişastası	17	9
Çavdar Unu 1150	29	13
<i>Kömürler</i>		
Kahverengi Kömür	42	12
Kahverengi Kömür	63	12
Kahverengi Kömür	66	12
Bitümlü Kömür	17	14
<i>Plastikler, Kauçuklar, Reçine</i>		
Poliakrilnitril	26	11
Poliakrilnitril	26	10
<i>İlaç ve Tarım İlaç</i>		
Metiyonin	< 10	12
<i>Ara Ürünler, Katkı Maddeleri</i>		
Baryum Stearat	< 63	13
Benzoil Peroksit	59	10
Metil Selüloz	29	15
Metil Selüloz	49	14
Metil Selüloz	70	10
Paraformaldehit	23	6
<i>Diğer Teknik Kimyasal Ürünler</i>		
Çivit	< 10	13
Organik Pigment	< 10	12
<i>Metaller, Alaşım</i>		
Alüminyum	22	5
Alüminyum	22	6
Magnezyum Alaşım	21	3
<i>Diğer İnorganik Ürünler</i>		
İs (Kurum)	< 10	12
İs (Kurum)	13	12
İs (Kurum)	16	12

Kaynak: (Crowl, 2010, s.45)

Aerosoller ve metal tozu için, izin verilen maksimum kantitatif oksijen konsantrasyonu deneysel olarak belirlenmelidir. İnertli koşullar altında çalışan

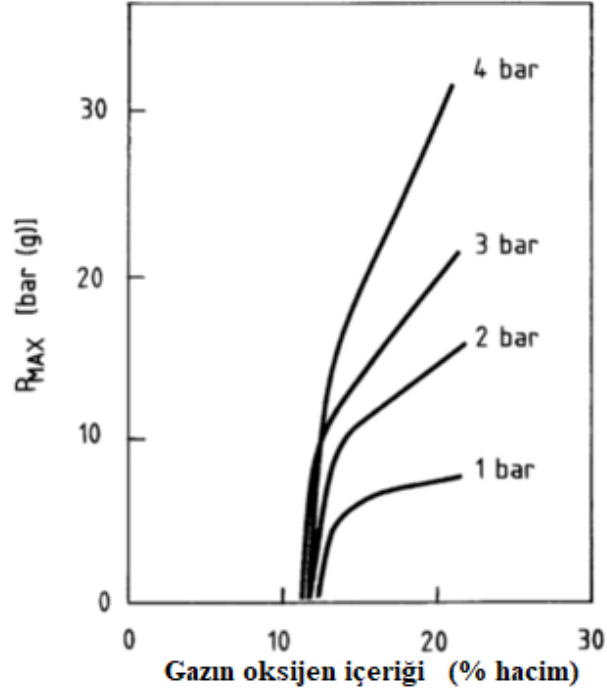
tesisler, havanın nüfuzuna ve patlayıcı gazların ve buharların kaçmasına karşı yeterince korunmalıdır (Hoppe ve Jaeger 2005).



Şekil 4.9. Godbert Greenwald Fırında <74 µm Pittsburgh Kömür Tozunun Minimum Tutuşma Sıcaklığına Göre Gazın Oksijen İçeriğinin Etkisi (Eckhoff, 2004).

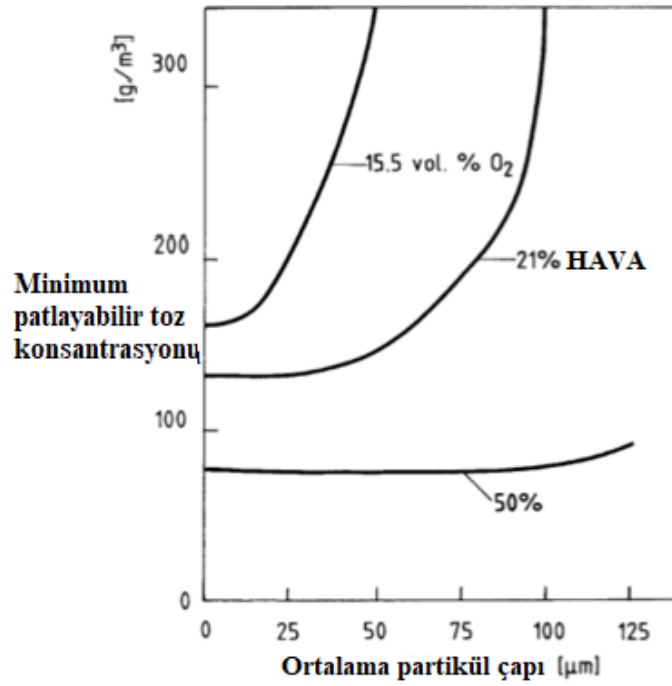
Şekil 4.9’ da, bir toz bulutunun minimum tutuşma sıcaklığı üzerindeki gaz fazının oksijen içeriğinin etkisini göstermektedir. Test edilen <74 µm Pittsburgh kömür tozu için, havadaki 610 °C’den 10 hacim% oksijen içinde 730 °C’ye sadece orta derecede bir artış olduğu görülmektedir.

Bu sonuç Zeeuwen (1996) tarafından desteklenerek, atmosferdeki oksijen içeriğinin azaltılmasında toz bulutlarının ve katmanların minimum tutuşma sıcaklıklarının önemli ölçüde artmadığı bulunmuştur (Eckhoff, 2004).



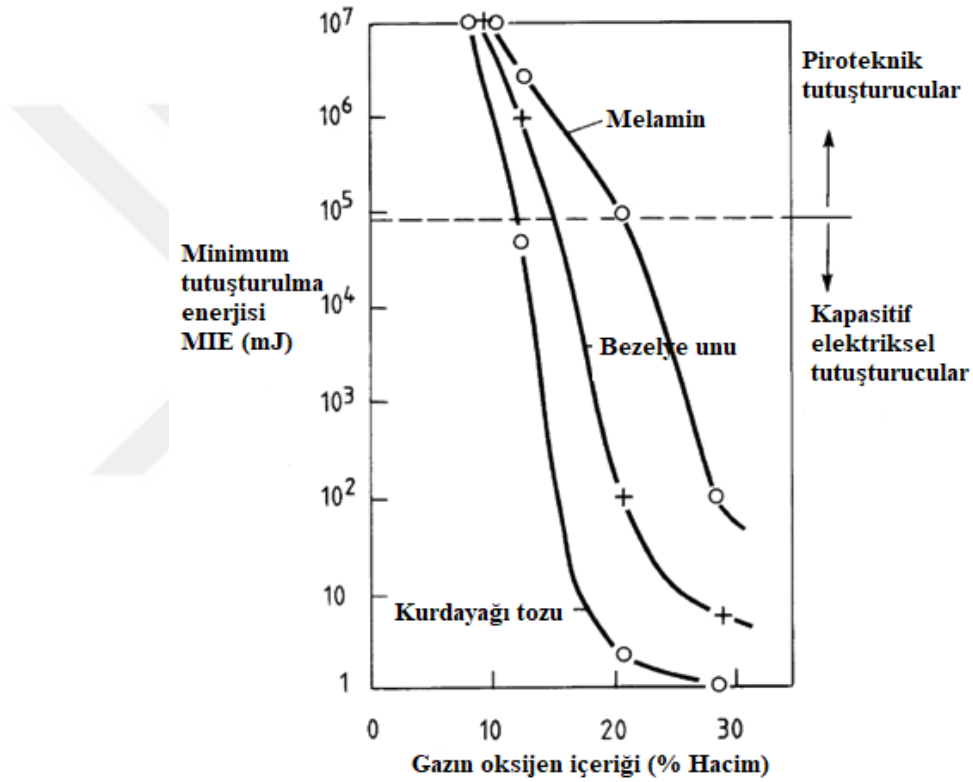
Şekil 4.10. 1m³ Kapalı ISO Tankında, Çeşitli Patlama Başlangıç Basınçlarındaki Polimer Tozu için Gaz İçeriğindeki Oksijen İçeriğinin Maksimum Patlama Basıncına Etkisi (Eckhoff, 2004).

Şekil 4.10' da, polimer tozunun SOK değerinin, 1-4 bar (abs.) aralığındaki ilk bulut basıncından bağımsız olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.11. Gazın Oksijen İçeriğinin, Yüksek Uçuculuk İçeren Kömür Tozunun Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu ve Partikül Çapına Etkisi (Eckhoff, 2004).

Şekil 4.11' de, yaklaşık 10 μm 'den küçük partiküller için, havanın oksijen içeriğinin %15.5' e indirgenmesi, minimum patlayıcı konsantrasyonun 130 ila 160 g/m^3 'lük bir orta artışa neden olmuştur. Bununla birlikte, ortalama parçacık büyüklüğü arttıkça, oksijen içeriğinin azaltılmasının etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Bu nedenle, 40 μm 'lik bir ortalama parçacık boyutunda, havanın oksijen içeriğini %15.5' e düşürerek MPK' i 135'ten 300 g/m^3 'e yükseltmiştir.



Şekil 4.12. Toz Bulutlarının Minimum Tutuşma Enerjisi Üzerinde Gazın Oksijen İçeriğinin Etkisi (Eckhoff, 2004).

Toz bulutlarının gazın oksijen içeriğinin, minimum tutuşma enerjisi üzerindeki belirgin etkisi Şekil 4.12'de görülmektedir. Grafikte, gaz içeriğindeki oksijen oranı %21'den %10 civarına düştüğünde, MTE'nin 10⁵ ve daha yüksek seviyelere çıktığı görülmektedir.

Bu test, bir toz bulutu aracılığıyla patlamanın yayılması için gereken en az oksijen miktarını belirler. Yine, önceki iki test yönteminde olduğu gibi: SOK değeri ne kadar düşükse, tozunun yanmasını sağlamak için gerekli olan oksijen

miktarı o kadar düşük olur. Bu nedenle, SOK seviyesi ne kadar düşük olursa, yanmayı kolaylaştırmak için yeterli oksijen bulunma ihtimali o kadar fazla olur. SOK için bir ASTM test standardı şu anda geliştirilmektedir (Dastidar ve ark., 2005).

4.4.2.1.5. Minimum Tutuşma Sıcaklığı – MTS (*MIT- Minimum Ignition Temperature*)

Bir toz bulutunun minimum tutuşturulma sıcaklığı (MTS), bir toz / hava karışımının sıcak bir yüzeyde tutuşma davranışını tanımlar. MTS, en fazla tutuşabilen toz / hava karışımının ateşlenebileceği en düşük sıcaklık olarak belirtilir (Barton, 2002).

Tutuşabilir toz ve hava karışımı ısıtılırsa, bir noktada alev alacaktır. Böyle bir tutuşmanın meydana geldiği en düşük sıcaklık, "minimum tutuşturulma sıcaklığı" olarak karakterize edilir. MTS, toz bulutu içinde nem veya diğer inert maddelerin varlığıyla artar, ancak azalan partikül büyüklüğü ve artan uçucu madde, oksijen konsantrasyonu ve toz tabakasının kalınlığı ile azalır (Abbasi ve Abbasi, 2007).

MTS ölçümü, tutuşturulma kaynaklarını ortadan kaldırmak ve patlama bastırma sistemleri tasarlamak için gereklidir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Oksitli toz bulutları, MTS'den daha yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, düşük alevlenme sınırı düşecek ve bulutların minimum patlayabilir konsantrasyonu azalacaktır. Fakat maksimum mutlak patlama basıncı da düşecektir (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Nem oranı %30–90 olan genel tozların tipik tutuşturulma sıcaklıkları:(Abbasi ve Abbasi, 2007).

- buğday unu: 410–430 °C;

- mısır nişastası: 410–450 °C;
- çavdar tozu: 430–500 °C.

MTS 'den daha yüksek yüzey sıcaklıklarının mevcut olduğu biliniyorsa, tutuşturulma beklenmelidir. Genellikle 50 °C güvenlik faktörü yeterlidir. Tesisin dışındaki yanıcı tozlarla kirlenmeye maruz kalan alanlarda, yüzey sıcaklıkları 5 mm kalınlığındaki bir tabakanın ölçülen tutuşma sıcaklığının 75°C değerini geçmemeli ve bir toz süspansiyonunun tutuşma sıcaklığının 2/3 'ünü aşmamalıdır (Barton, 2002).

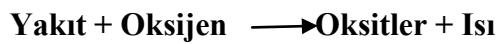
4.4.2.1.5.1. Bir Toz Bulutu ya da Toz Tabakasının Kendiliğinden Tutuşma Sıcaklığı – KTS (AIT- *Autoignition Temperature of Dust Cloud and Dust Layer*) ASTM E 1491

Bu test yöntemleri, bir toz bulutunda asılı haldeki toz veya bir tutuşturulma kaynağı olmayan bir toz tabakasında yanmanın çoğalması için gereken en düşük sıcaklık ortamını ölçer. Bu KTS' ler ne kadar düşükse, yanma olasılığı da o kadar yüksektir. Bu testler ayrıca test cihazının yapısıyla da sınırlıdır ve böylece riskin iyi bir nispi ölçüsünü sağlarlar (Barton, 2002)

4.4.3. Patlama Riski Olan Metal tozları

Bütün metaller veya metal alaşımları değil, bütün tozlar potansiyel patlayıcı olabilir (Zangiacomi ve ark., 2005)

Toz yakıtların özelliği, yüksek oranda uçucu organik katılardan, herhangi bir gaz üretmeyen sert metallere kadar değişebilir. Toz patlamaları genel olarak kimyasal reaksiyona bağlı hızlı ısının açığa çıkmasından kaynaklanır (Zangiacomi ve ark., 2005)



Tablo 4.9. Bir Dizi Toz için Toz Patlama Özellikleri

Toz Tipi	MTE (Toz bulutu) mJ	MTS (Toz bulutu) °C	MTS (Toz katmanı) °C	P _{max} bar	K _{st} ** bar ms ⁻¹	MPK g m ⁻³	SOK % hacim
Antrakinin	3	550	Süblimleşme	9.1	298	30	□
Leblebi tozu	40	560	260	□	□	□	15
Linyit Kömürü	30	390	180	11.0	151	60	12
Alüminyum	15	550	740	13.0	750	60	5
Kömür	60	610	170	9.8	114	15	14
Selüloz	80	480	270	11.0	125	30	9
Mısır unu	40	380	330	10.3	125	60	9
Tahta	40	470	260	10.2	142	60	10
Buğday unu	50	380	360	9.8	70	125	11
Oğun kömürü	20	530	180	10.0	10	60	□
Yağsız süt	50	490	200	9.8	125	60	□
Şeker	30	370	400	9.5	138	60	□
Sülfür	5	280	113	6.8	151	30	□
Magnezyum	80	450	240	18.5	508	30	□
Çinko	9600	690	540	7.8	93	250	6

Kaynak: (Barton, 2002, s. 9)

4.4.4. Toz ve toz bulutunun tutuşturulma hassasiyeti ve patlama şiddetini etkileyen faktörler

Partikül boyutu/spesifik yüzey alanı, patlama şiddetini etkileyen faktörler içerisinde merkez noktalar olsa da azımsanmayacak önem derecesindeki diğer faktörler kapsamlı bir biçimde aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Eckhoff, 2003).

4.4.4.1. Nem içeriği de dahil olmak üzere tozun kimyasal bileşimi

Göz önünde bulundurulması gereken iki husus vardır: patlamanın termodinamiği ve kinetiği. Termodinamik, yanma esnasında açığa çıkan ısı miktarı ile ilgili olup, kinetikler, ısının serbest bırakılma oranı ile ilgilidir (Eckhoff, 2003).

Toz kimyası hem termodinamiği hem de kinetikleri etkiler ve bunların bir kısmı da birbirine bağlıdır. Tablo 4.10., farklı materyallerin açığa çıkan ısı için tükettikleri oksijen miktarı arasındaki farklılığı göstermektedir. 1100-1300 kJ/mol

O₂ ile kalsiyum, magnezyum ve alüminyum listenin başında olduğu görülmektedir. En düşük değer ise bakır ve kükürt için 300 kJ/mol O₂'dir. Bu farkın, sabit hacimde adyabatik⁴ olarak gerçekleştirildiğinde, bir dereceye kadar patlamaların maksimum basıncına yansıdığı düşünülmektedir.

Tablo 4.10. Çeşitli Maddelerin Bir Mol Oksijen Tüketiminde Ortaya Çıkan Yanma (Oksidasyon) Isıları

Madde	Oksidasyon Ürünü	kJ/mol O ₂
Kalsiyum	CaO	1270
Magnezyum	MgO	1240
Alüminyum	Al ₂ O ₃	1100
Silisyum	SiO ₂	830
Krom	Cr ₂ O ₃	750
Çinko	ZnO	700
Demir	Fe ₂ O ₃	530
Bakır	CuO	300
Sakaroz (Şeker)	CO ₂ ve H ₂ O	470
Nişasta	CO ₂ ve H ₂ O	470
Polietilen	CO ₂ ve H ₂ O	390
Karbon	CO ₂	400
Kömür	CO ₂ ve H ₂ O	400
Sülfür	SO ₂	300

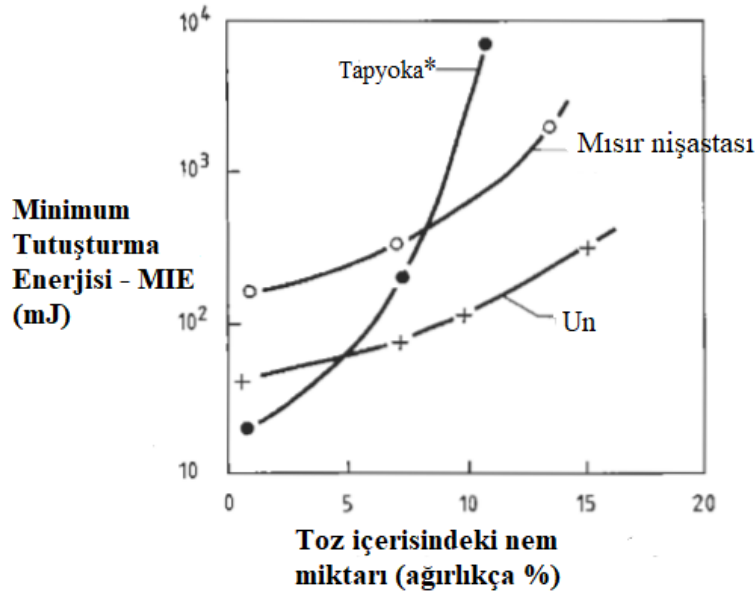
Kaynak: (Eckhoff, 2003, s.6)

⁴Termodinamikte, adyabatik bir proses, çalışma akışkanında ısı kaybı veya kazancı olmadığı haldeki prosestir. Adyabatik bir ortam oluşturabilmek için sınırlanmış alanın ısıya karşı tamamı ile izole edilmiş olması gereklidir

(http://taner.balikesir.edu.tr/dersler/fiziksel_kimya_ii/adyabatik_genlesme.htm, Erişim Tarihi: 3 Ekim 2018)

Birçok tozun yüzey kimyasal bileşimleri ile iç kimyasal bileşimleri farklılık göstermektedir. Tozlar iyi ve verimli adsorban⁵ olduklarından, çevrelerindeki veya atmosferdeki diğer yabancı maddeleri yakalayacaklardır. Bu kontaminasyonlar⁶ da tozun özelliğini değiştirme potansiyeline sahiptir (Ogle, 2016).

En bilinen kirleticiler, çevreden alınabilecek olan su ve havadır. Örnek olarak, bilindiği gibi metal ve metal alaşımları hava ile temasa maruz kaldığında dış yüzeylerinde oksit tabakası oluşacaktır. Birçok organik toz da atmosferden nemi adsorbe etme, bazı durumlarda da absorbe⁷ etme kabiliyetine sahiptir. Partikül haldeki maddelerin yüzey bileşimi, tutuşturulma özelliklerine ve hatta patlama alev hızına büyük ölçüde etki etmektedir (Ogle, 2016).



Şekil 4.13. Üç Farklı Toz için Toz Nem İçeriğinin Minimum Tutuşturulma Enerjisine Etkisi (Eckhoff, 2003, s. 28)

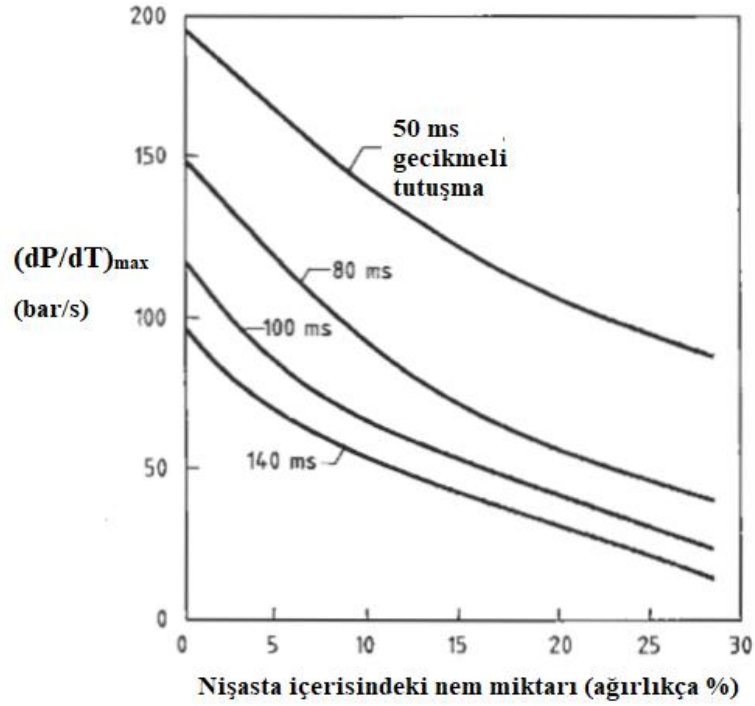
Tozdaki nem ise toz bulutlarının hem tutuşturulma hassasiyetini hem de patlama şiddetini azaltacaktır. Van Laar ve Zeeuwen (1985) nem içeriğinin MTE'ye etkisi Şekil 4.13'te farklı üç toz için karşılaştırmıştır (Eckhoff, 2003). Dikey eksen logaritmiktir ve etkinin oldukça önemli olduğu görülmektedir.

⁵Adsorban: Adsorbsiyon, malzeme(lerin) derişiminin ara yüzeyde (katı yüzeyinde) yığın derişimine göre artışı şeklinde tanımlanabilir. Yüzeyde tutunan malzemeye “adsorblanan madde veya adsorbat” ve üzerinde adsorbsiyonun gerçekleştiği katıya ise “adsorbent veya adsorban” ismi verilmektedir (Ünlü, 2004).

⁶Bulaşma, kirlenme

⁷Soğurma, emme (https://tr.wiktionary.org/wiki/absorbe_etmek , Erişim tarihi: 2 Aralık 2018)

Elektriksel tutuşturma kaynağına karşı güvenlik önlemleri, sonlu bir toz nem içeriği için MTE verilerine dayanıyorsa, bu nem içeriğinin uygulamada azalmaması esastır. Toz bulutlarının minimum tutuşturulma sıcaklığı üzerindeki toz neminin etkisi daha az belirgindir. Örneğin, van Laar ve Zeeuwen (1985), %14 nem oranındaki unun minimum 470  C tutuşma sıcaklığına sahip olduğunu, buna karşılık kuru unun 440  C olduğunu bildirmiştir. Nişasta için, değerler kuru toz için 400  C ve %13 nem ile 460  C olmuştur.



şekil 4.14. Mısır Nişastasındaki Nem Ieriğinin, eşitli Tutuşma Gecikmeleri (Toz Dağılımından Tutuşmaya Kadar Geçen Süre) Için Hartmann Bombasında Azami Basınç Artışına Etkisi (Eckhoff ve Mathisen, 1978), (Eckhoff, 2003, s.28)

şekil 4.14., patlama şiddetinin artan toz nem içeriği ile sistematik olarak nasıl azaltılacağını göstermektedir. Tutuşturulma gecikmesi arttığa türbülans yoğunluğunun azalacaktır.

4.4.4.2. Homojen ve heterojen kimyasal reaksiyonlar

Tek tek parçacıklar için yanma mekanizması, toz alevlenebilirliğini sınıflandırmanın uygun bir yolunu temsil etmektedir. Karbon ve refrakter metaller gibi materyaller için yanma, partiküllerin yüzeyi üzerinde kesinlikle heterojen reaksiyonlar gerektirir (Goroshin ve ark., 2011). Organik maddelerin çoğu, önce, gaz fazında yanma veya uçucu alevler olarak tanımlanan buhar üretirler. Yani, karbonlu katı maddeler, katı parçacıktan çevreye bir yakıt buharı akışı yaratarak pirolize⁸ girerler (Eckhoff, 2003). Çoğu organik katı malzeme için, yakıt parçacıklarının harici olarak ısıtılması, piroliz yoluyla termal bozunmaya ve uçucuların serbest kalmasına neden olur, uçucular daha sonra çevreleyen atmosferde yanarlar (Skjold ve Rolf, 2016).

Piroliz sonucunda geride kalan karbonlu partiküller ise oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak okside olabilir. Bu, bir heterojen reaksiyondur. Heterojen reaksiyonlar, sıvı/katı arayüzünde reaksiyonlar içerir. Heterojen reaksiyonlara verilebilecek en iyi örnekler ise kömür oluşturmaya maddeler (kömür, odun vb.) ve metallerdir (Eckhoff, 2003).

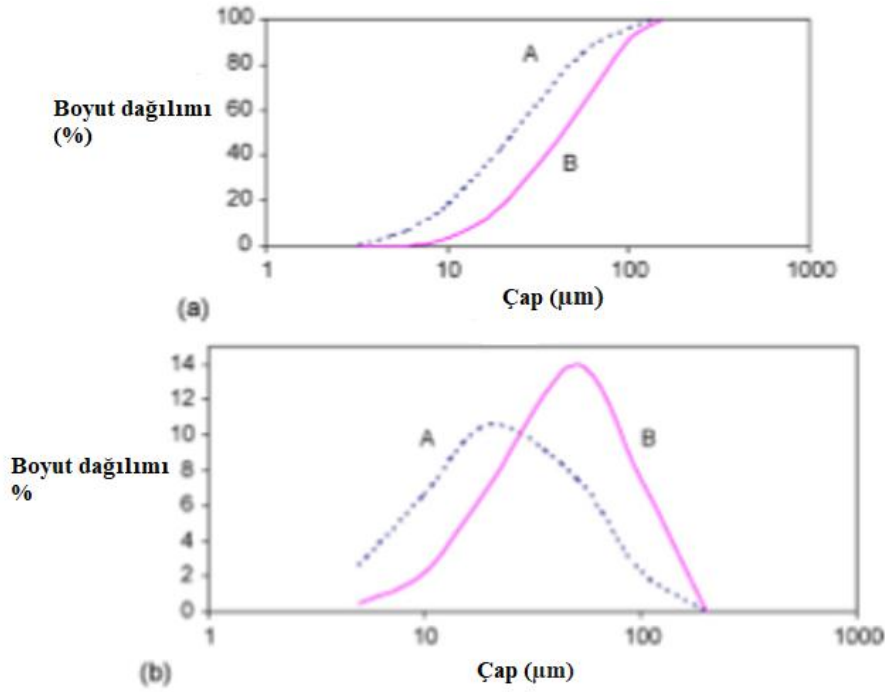
4.4.4.3. Toz içinde parçacık büyüklüklerinin ve şekillerinin dağılımları, tamamen dağınmış halde tozun spesifik yüzey alanı

Toz, alev yayılımını tetikleyecek parçacık büyüklüğü dağılımına sahip olmalıdır. Toz bulutu boyunca alev yayılımı iki şekilde gerçekleşir:

- Buharlaştırma veya piroliz noktasına kadar ısıtılan parçacıkların yaydığı yanıcı gazların yanmasıyla
- Toz parçacık yüzeyinde doğrudan oksidasyon yoluyla (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Her iki durumda da parçacık boyutu yanma sürecinde önemli bir rol oynar.

⁸Piroliz, Yunanca ısı anlamına gelen “pyro” ve parçalanmak anlamına gelen “lyse” kelimelerinden oluşan; yüksek sıcaklıkta ve oksijensiz ortamda organik maddelerin termal kırılmaya uğradığı termo kimyasal sürecin adıdır. Süreç sonunda organik maddelerin içerisindeki sabit karbon ve uçucu ayrılır. Uçucunun daha sonra yoğunlaştırılmasıyla sıvı ve gaz formda iki farklı yakıt elde edilir. Piroliz kabaca, büyük moleküllerin daha küçük gaz, sıvı ve katı moleküllere dönüşmesidir (<http://www.enoven.com.tr/teknolojilerimiz/piroliz-nedir/>, Erişim tarihi: 2 Kasım 2018).



Şekil 4.15. (A) Kümülatif Toz Partikül Büyüklüğü Dağılımları. (B) Toz Partikül Büyüklüğünün Diferansiyel Dağılımı: (A) Yüzey Alanı Ağırlıklı ve (B) Kütle veya Hacim Ağırlıklı (Abbasi ve Abbasi, 2007)

Daha büyük toz partikülleri alev yayılımı sürecine etkin bir şekilde katılmazken, aynı malzemedeki daha ince toz partikülleri yanma sırasında daha hızlı ve daha verimli reaksiyona girebilir. Bunun nedeni, daha ince parçacıkların kütle başına daha büyük bir yüzey alanına sahip olmaları, havada daha kolay dağılmaları ve daha uzun süreler boyunca havada kalmalarıdır. Şekil 4.15, tipik bir tozun kümülatif ve diferansiyel parçacık boyutu dağılımını göstermektedir. Bu diferansiyel eğriler, toz partikül büyüklüğü dağılımının görselleştirilmesinde faydalıdır (Abbasi ve Abbasi, 2007).

4.4.4.3.1. Toz dispersiyonu etkili partikül büyüklüğü derecesi

Spesifik yüzey alanı şu şekilde belirlenebilir (Ogle, 2016):

$$A_v = (\pi d_p^2) / ((\pi/6) d_p^3) = 6 / d_p$$

A_v = Tozun spesifik yüzey alanı (m^2)

d_p = Partikül çapı (m)

Taneciklerin partikül boyutu veya daha da önemlisi partikül boyutu dağılımı patlamaya etki edebilir. Bazı durumlarda çok küçük toz partikülleri biraraya gelip kümeleşebilmekte ve bu durumda patlama olasılığı düşmektedir. Tablo 4.11’de görülebileceği gibi eğer toz kümesinin çapı 500 µm’den yüksekse, tutuşmayacaktır (Abbasi ve Abbasi, 2007). Az miktarda toz mono boyuttadır veya boyut dağılımlarına sahip olması tozun tamamen isim ile basit bir şekilde belirtilebilmesini sağlar (Amyotte, 2013).

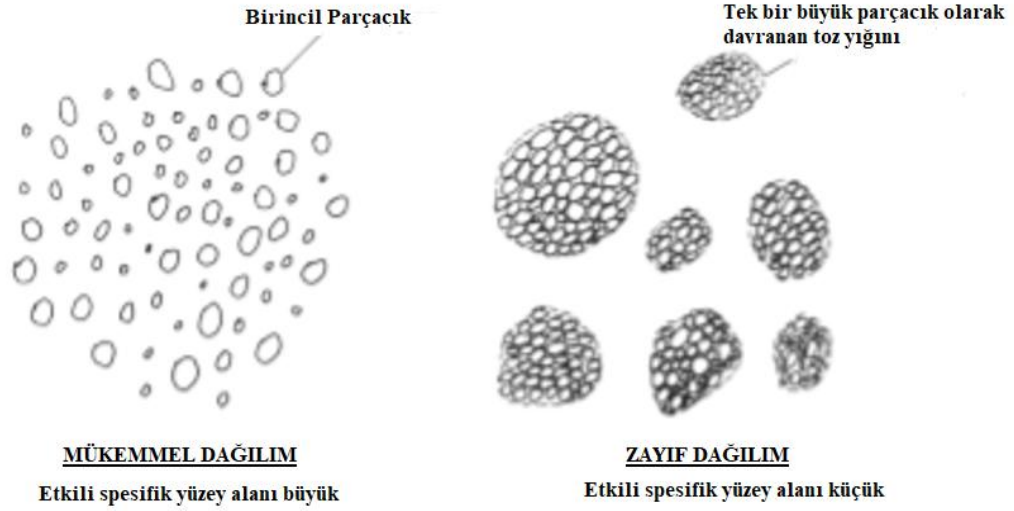
Tabi istisnalar meydana gelebilmektedir. Eğer bir sanayi prosesi sınırlı ölçüde bir toz üretmek için tasarlanırsa, o zaman elbette, son ürün iyi tanımlanmış ve belirli bir dağılıma sahip olacaktır. Bununla birlikte, eğer prosesin bir aşamasında bir dökme malzemenin toz haline getirilmesi ve elenmesi söz konusu ise daha büyük boyutlu dağılımlar mevcut olabilir (Amyotte, 2013).

Partikül boyutu ne kadar küçülürse, patlamanın şiddeti de o denli artacaktır. Bunun nedeni, partikül boyutu ne kadar küçülürse birim kütle başına yüzey alanı o kadar artacak ve bu da oksidasyonda net bir artışa neden olacaktır. Unutulmamalıdır ki, bir toz bulutu, çok ince partiküllerden iri taneciklere kadar farklı ebatlarda partiküllerden oluşur. İnce partiküller kolaylıkla askıda kalabileceğinden, başlangıç tutuşması ve patlamanın meydana gelmesinde büyük rol oynayacaktır (Directive 2014/34/EU). Yakıt olabilecek parçacık büyüklüğünün karakteristik boyutu tipik olarak 1-100 µm aralığındadır (Skjold ve Rolf, 2016).

Tablo 4.11. Toz Patlaması Parametrelerinde Toz Özellikleri/ Karakteristikleri

Yükseltici Etken	Parametre	Azaltıcı Etken
<ol style="list-style-type: none"> Düşük patlama konsantrasyonu Minimum tutuşturma sıcaklığı Düşük minimum tutuşturma enerjisi Yanma hızı Maksimum basınç artış hızı COOH, OH, NH₂, NO₂ gibi kimyasal grupların varlığı Toz içerisinde %10'dan fazla uçucu madde bulunması Nispeten küçük ince tanecikler Oksijen konsantrasyonunun yükselmesi 	<p style="text-align: center;">Tozun Patlayabilirliği</p>	<ol style="list-style-type: none"> Klor, Brom, Flor kimyasal gruplarının varlığı %10-%20 üzerindeki konsantrasyonda inert madde varlığı %30 üzerinde nem içeriği
50-70 µm <partikül büyüklüğü (µm) <500 µm	Parçacık Büyüklüğünün Patlama Başlangıcı Olasılığına Etkisi	500 µm <partikül büyüklüğü (µm) <50-70 µm
<ol style="list-style-type: none"> Artan nem içeriği Sonradan karıştırılarak artırılan inert toz konsantrasyonu 	Minimum Patlama Konsantrasyonu	<ol style="list-style-type: none"> Azalan partikül boyutu Artan uçucu madde Artan oksijen konsantrasyonu
<ol style="list-style-type: none"> Artan nem içeriği Sonradan karıştırılarak artırılan inert toz konsantrasyonu 	Minimum Tutuşturma Sıcaklığı	<ol style="list-style-type: none"> Azalan partikül boyutu Artan uçucu madde Artan oksijen konsantrasyonu Artan toz tabakası kalınlığı
Azalan toz sıcaklığı	İzin Verilen Maksimum Oksijen Konsantrasyonu	Artan toz sıcaklığı
Zayıf da olsa azalan partikül büyüklüğü	Maksimum Patlama Basıncı	
<ol style="list-style-type: none"> Azalan partikül boyutu Artan uçucu madde içeriği Artan oksijen konsantrasyonu 	Maksimum Basınç Yükselme Oranı	<ol style="list-style-type: none"> Artan nem içeriği Sonradan karıştırılarak artırılan inert toz konsantrasyonu

Kaynak: (Abbasi ve Abbasi, 2007, s.24)



Şekil 4.16. Tozun Mükemmel Dağılımı ve Kümeleşmesi (Eckhoff, 2016),
(Eckhoff, 2003)

4.4.4.4. Minimum inert toz konsantrasyonu – MİK (*MIC- Minimum Inerting Concentration*)

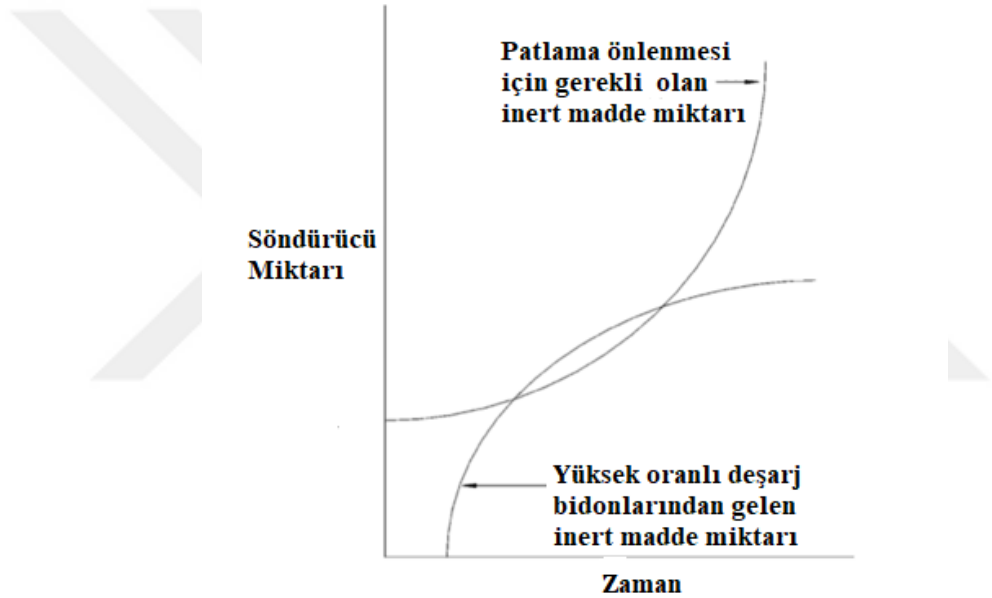
MİK, herhangi bir yakıt konsantrasyonunda toz patlaması oluşmaması için gereken minimum tepkisizleştirme konsantrasyonudur.

‘İnertleştirme’, toz bulutunun, kendiliğinden devam eden bir alev yaymayacağı seviyeye, bir inert gaz ekleyerek, prosesin veya kabın içerisindeki oksijen konsantrasyonunun azaltılması ile gerçekleştirilir. Bu inertleştirme, toz patlamasındaki pentagonun şekil almasını yavaşlatır veya tamamen önler ve böylece patlama tehlikesini azaltır. İnertleştirme, daha az yaygın olarak, yanıcı bir tozu yanmaz bir toz ile karıştırarak da uygulanır (Abbasi ve Abbasi, 2007).

Patlayıcı tozlar, kalsiyum sülfat, kireç taşı, sodyum bikarbonat, çeşitli silikatlar veya taş tozu gibi inert bir tozla seyreltilerek patlamaları önlenebilir. Bu tür malzemeler bir soğutucu olarak işlev görebilir veya başka bir şekilde alev yayılmasına engel olabilir. Çoğu durumda en az %60 oranında inert toz gereklidir ve seyreltici tozun patlayıcı toz ile iyice karışması gerekir. Kömür madenlerinin yoğun olarak uygulandığı yerlerde, toz inertlemesi, ihtiyaç duyulan büyük

miktarlar ve bunun sonucunda oluşan kirlilik sorunu nedeniyle nadiren kullanılır (Abbasi ve Abbasi, 2007).

MİK, endüstriyel ekipmanların patlama önleme ekipmanları dizaynı ve borulardaki kimyasal izolasyon bariyerleri için önemli bir parametredir. Önleme sistemleri ve izolasyon dizaynında MİK altında bir konsantrasyonda kullanılan inert ajan konsantrasyonu, patlamanın oluşmasına davetiye çıkaracaktır. Bu sebeple, MİK, patlama önleme ekipmanları tasarımı ve kimyasal bariyer kullanımı açısından bir kılavuz oluşturmaktadır (Dastidar ve Amyotte, 2002).



Şekil 4.17. Patlamanın Önlenmesi için Gereken Birim Zamandaki İnert Ajan Miktarı (Dastidar ve Amyotte, 2002).

Kömür, mısır nişastası, polietilen, antrakinon vb. tozu üzerinde, sodyum bikarbonat, potasyum bikarbonat, monoamonyumfosfat ve kalsiyum karbonatın önleyici etkisi üzerine Chatrathi ve Going'in deneyleri yakıt/inert toz karışımları için yanıcılık eğrileri yaratılabildiğini göstermiştir (Chatrathi ve Going, 2000). Tozların yanıcılık eğrileri gaz karışımlarının yanıcılığıyla aynı karakteristiğe sahiptir ve alt patlama sınırı, üst patlama sınırı ve inertleşme konsantrasyonu ile karakterize edilir. İnceleme sonuçları, yüksek K_{st} indisi ve metal toz parlamalarının söndürülebildiğini ve maksimum patlama basıncının kabul edilebilir bir seviyeye düşürülebildiğini göstermiştir. Kullanılan söndürme ajanının etkililiği, yakıt

tozunun ve inert tozun uyumluluğuna bağlıdır. Özgül ısı, ısıl iletkenlik, emicilik, parçacık geometrisi ve parçacık ayrışımı, söndürücülerin etkililiğinde önemli rol oynamaktadır. Kıvılcım sıcaklığı ve yanma ısıyla birlikte bu faktörler söndürme etkililiğindeki ve patlama şiddetindeki varyasyonu açıklayabilir (Chatrathi ve Going, 2000).

Kısmi inertlemenin prensibi şu şekildedir: atmosferdeki oksijen içeriği hava ile inert gazın karıştırılmasıyla azaldığında hem tutuşturulma hassasiyeti hem de toz bulutunun patlama şiddetini azaltır. Bazı durumlarda bu, klasik koruyucu yöntemlerden birini, yani tam hapsetme, patlama havalandırması veya otomatik patlama bastırma ve / veya otomatik olarak tetiklenen izolasyon sistemlerinden birini gerçekleştirmeyi mümkün kılabilir, aksi takdirde bu mümkün olmazdı (Eckhoff, 2004).

Tablo 4.12. Inert Katı Madde İlavesiyle Yanıcı Tozların İnertleştirilmesi

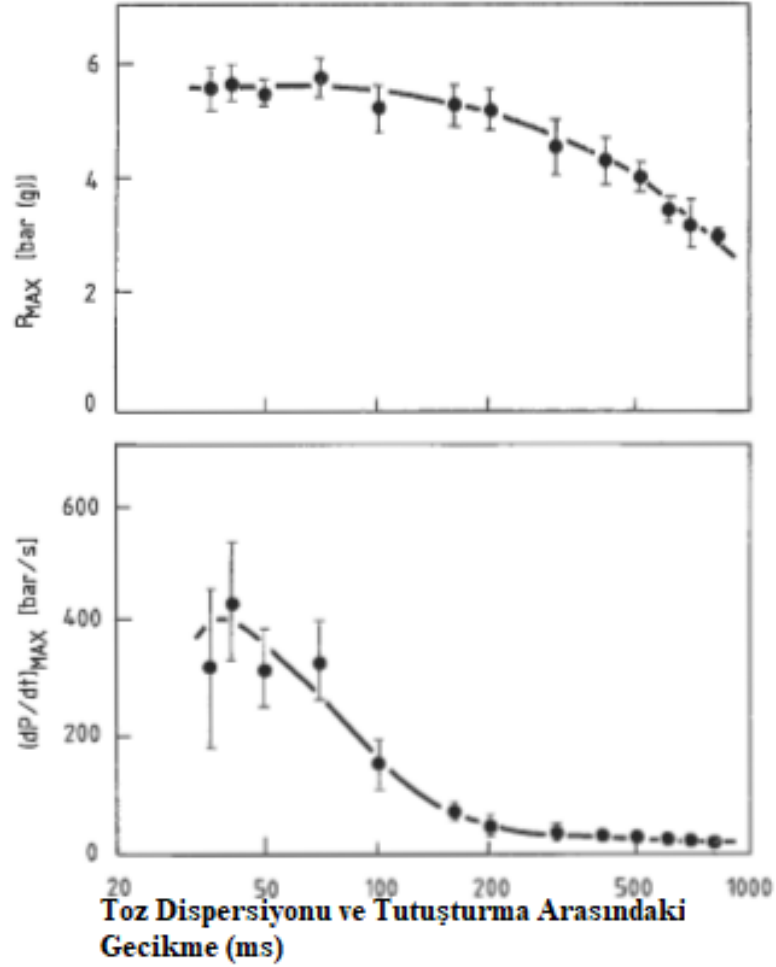
Yakıt	Ortalama Değer	Inert Katı Madde	Ortalama Değer	Toplam Ağırlıktaki Oran
	µm		µm	Ağırlıkça %
Metil Selüloz	70	Kalsiyum Sülfat (CaSO ₄)	< 15	70
Organik Pigment	< 10	Amonyum Dihidrojen Fosfat (NH ₄ H ₂ PO ₄)	29	65
Bitümlü Kömür	20	Kalsiyum Karbonat (CaCO ₃)	14	65
Bitümlü Kömür	20	Sodyum Hidrojen Karbonat (NaHCO ₃)	35	65
Şeker	30	Sodyum Hidrojen Karbonat (NaHCO ₃)	35	50

Kaynak: (Beck ve ark., 1997)

4.4.4.5. Gerçek bir bulutta başlangıç türbülansı dağılımı

Toz bulutunu oluşturan küçük elementlerin üç boyutlu uzayda hızlı, az ya da çok rastgele hareketi, türbülans meydana getirir. Türbülans neticesinde, bulut içine eşit miktarda toz dağılır. Böyle bir bulutun tutuşması durumunda, değirmen

benzeri bir etkiye neden olacaktır: Alev, çok yüksek bir türbülansa sahipse, bir toz bulutu içinden çok hızlı bir şekilde yayılacak ve şiddetli bir patlamayla sonuçlanacaktır (Abbasi ve Abbasi, 2007).



Şekil 4.18. İlk Türbülansın Bir Toz Bulutunun Patlama Hızına Etkisi. 1,2 Litrelik Hartmann Bombasında Havada 420 g / m^3 Likopodyum ile Gecikme Başına Beş Deney Yapılarak Bulunan Değerler (Eckhoff, 2003).

Diğer taraftan, daha az türbülanslı bir bulut tutuşturulduğunda, düşük ısı yayılım oranı nedeniyle lokal olarak konsantre olan büyük miktarda ısı açığa çıkarır. Toz bulutu içinde üretilen herhangi bir alevin daha fazla yayılması tamamen toz dağılım derecesine bağlıdır. Daha düzgün dağılmış bir toz daha kolay yanar (Abbasi ve Abbasi, 2007).

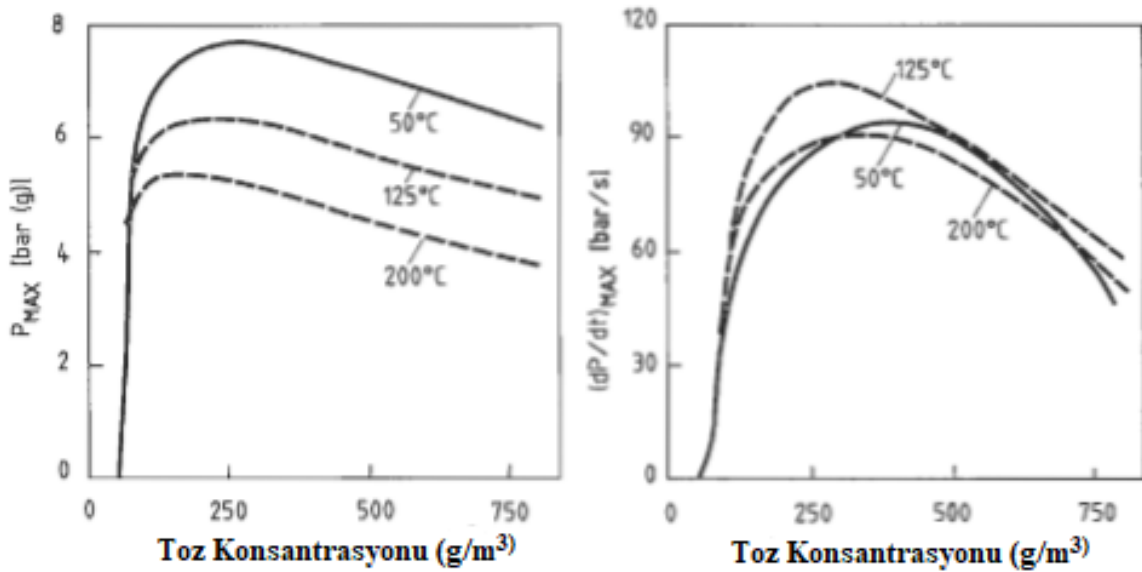
Türbülanslı bir bulut, tek bir düzlem alev tabakasının durgun bir bulut boyunca yayılmasından çok daha hızlı yanar. Toz bulutunun tutuşması durumunda, ister elektrik kaynaklı kıvılcım olsun isterse sıcak bir yüzey olsun, türbülans, hızlı

konveksiyon ile tutuştirulma bölgesinden ısıyı çıkararak ısı transferini bozar. Bu nedenle, türbülanslı bir toz bulutunun tutuşması, genellikle, durgun bulutların tutuşmasından daha yüksek bir enerji veya sıcaklık gerektirir (Eckhoff, 2003).

Tozları içeren endüstriyel süreç tarafından üretilen ve kökenleri arasında farklılık gösteren iki tür türbülans vardır. Bunlardan ilki, hava jetli değirmen, mikser, torba filtre, pnömatik taşıma borusu gibi toz üretim operasyonları ile üretilmektedir. Bu tür türbülans genellikle ilk türbülanstır. İkinci tür türbülans, toz bulutu tutuştuktan sonra yanma işlemi sırasında ortaya çıkar. Yayılma alevinin önünde genişlemeden kaynaklanan yanmamış toz bulutu akışıdır. Akışın hızı ve operasyon sahasında mevcut olan geometrik daralmalar, üretilen türbülans derecesini yönetir. Alev cephesi tarafından üretilen türbülans, ilk türbülanstan çok daha büyüktür (Eckhoff, 2003).

4.4.4.6. Bir toz bulutunun başlangıç sıcaklığı

Başlangıç sıcaklığının maksimum patlama basıncını ve basınç artış hızını nasıl etkilediğini Şekil 4.19 göstermektedir. Başlangıç sıcaklığının artması ile P_{max} 'ın azaltılması, başlangıç sıcaklığının arttırılmasıyla belirli bir başlangıç basıncında birim bulut toz hacmi başına oksijen konsantrasyonunun azalmasından kaynaklanmaktadır (Eckhoff, 2003).

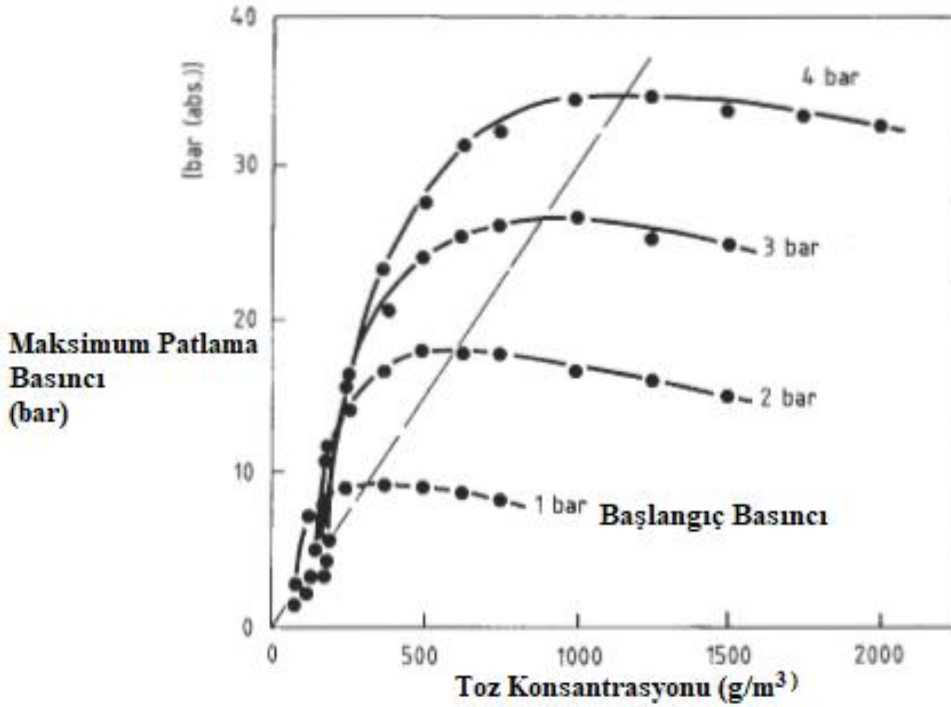


Şekil 4.19. 1 m³ Kapalı Tanktaki, Bitümlü Kömür Tozu Kullanarak – Hava Karışımının Gelişiminin Üzerinde Başlangıç Sıcaklığı Etkisi (Weimann, 1987), (Eckhoff, 2003, s.46)

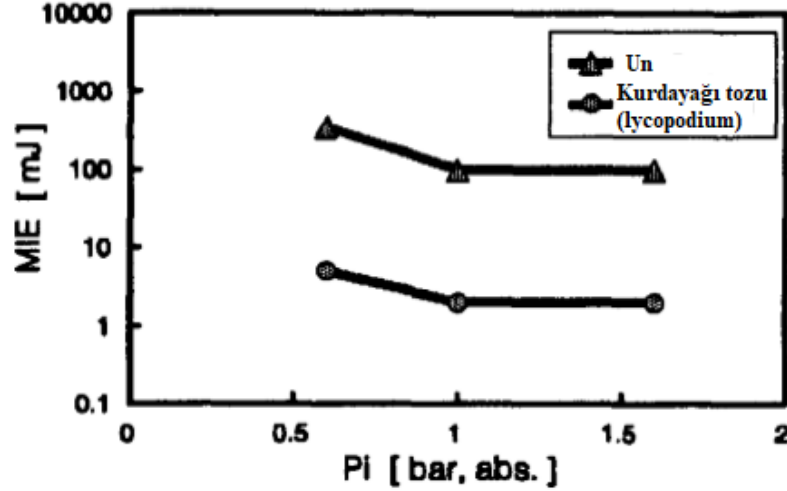
4.4.4.7. Bir toz bulutunun başlangıç basıncı

Başlangıç basıncındaki bir artış, P_{max} 'da orantısız bir yükselmeye neden olur. Başlangıç basıncının düşürülmesi, patlama şiddetinin azalmasına neden olacaktır (Siwek, 1996).

Şekil 4.20, Wiemann'ın (1987) havada dağılmış haldeki kahverengi kömür tozunun sabit hacimli kapalı kaplardaki başlangıç basıncının, maksimum patlama basıncı üzerindeki etkisinin karakteristik modelini göstermektedir. İki özellik belirgindir. İlk olarak, maksimum tepe basıncı (P_{max}), başlangıç basıncı (P_i) ile orantılıdır. İkincisi, en yüksek maksimum basıncı veren toz konsantrasyonu ayrıca başlangıçtaki basınç ile yaklaşık olarak orantılıdır (başlangıçtaki düz çizgi ve basınç-konsantrasyon kıvrımlarının tepe noktaları ile belirtildiği gibi). Bu, ilk basınçtan bağımsız olarak en verimli yanmayı sağlayan kütle tozunun, kütle havaya oranını gösterir.



Şekil 4.20. Kahverengi Kömür Tozu Kullanılarak Farklı Başlangıç Basınçları için Toz Konsantrasyonunun Fonksiyonu Olarak 1 m³ Kapalı Bir Kaptaki Maksimum Patlama Basıncı (Eckhoff, 2003, S.47)



Şekil 4.21. Başlangıç Basıncının Minimum Tutuşturulma Enerjisi Üzerine Etkisi (Siwek, 1996, s.30)

Şekil 4.21, başlangıç basıncı ve iki farklı toz için MTE arasındaki ilişkiyi göstermektedir. İlk basınç için 1-1.6 bar aralığında, gözle görülür bir etki yoktur. Bununla birlikte, negatif basınç $P_i < 1$ bar için, tozların tutuşabilirliği azalır. Bu anlaşılabilir bir durumdur çünkü en kolay tutuşabilir toz konsantrasyonu, azalmış başlangıç basıncı ile azalır ve bu da MTE değerinde bir artışa neden olabilir. Tozlardan kaynaklanan patlama tehlikesine maruz kalan çalışma alanlarında tozların MTS değeri özellikle önemlidir. Burada, sadece yüzey sıcaklıkları sürekli çalışmada MTS'nin maksimum üçte ikisine erişen ekipman kullanılabilir (Siwek, 1996).

4.4.4.8. Bir toz bulutu ile karışan yanıcı gaz veya buhar (“Hibrit” karışımlar)

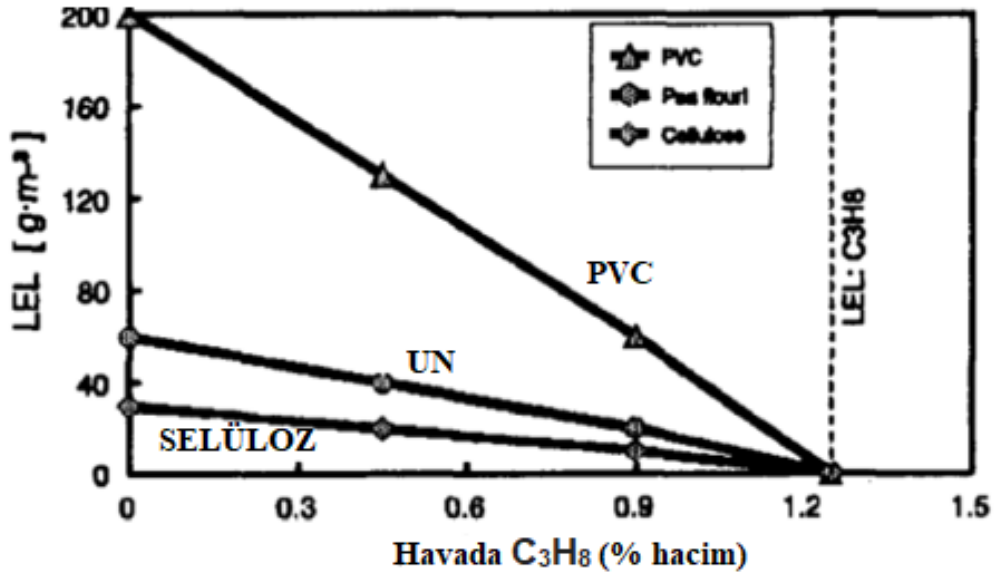
Yanıcı çözücüler içeren ürünler, hibrit karışımlar oluşturabilir. Bunlar, çözücü içermeyen toz-hava karışımları ile kıyaslandığında daha kolay patlar. Bu artan tehlike, çözücü buhar konsantrasyonu alt patlama sınırının %20'sini aştığında önemli olabilir. Ağırlıkça %0,5' ten fazla yanıcı çözücü içermeyen ürünlerle bu beklenmemektedir. Daha yüksek bir çözücü içeriğine sahip tozlar detaylı bir araştırma gerektirir (Siwek, 1996).

⁹ P_i: Başlangıç Basıncı (*initial pressure*)

Patlamayan toz-hava karışımları ve patlayıcı olmayan yanıcı gaz (çözücü buharı) -hava karışımları patlayıcı hibrit karışımlar oluşturabilir. Hibrit karışımın alt patlama sınırı (APS), yanıcı toz ile yanıcı gazın alt patlama sınırı aralığındadır (örn. Propan) (Şekil 4.22).

Hibrit karışımın MTE ve SOK değeri, en düşük limit değerine sahip yanıcı madde ile belirlenir.

Eksik yanma ve bir atık akımının yakıt kontaminasyonu ciddi bir patlama tehlikesi oluşturabilir. Örnek olarak ele alınacak olursa, uçucu kül, geleneksel düşüncede patlayıcı değildir, çünkü, yanma sonrası geriye kalan son ürün olarak düşünülür. Fakat, eğer yanma tamamlanmamışsa ve atık uçucu kül yanmamış yakıt ile kontamine olursa, patlayıcı bir karışım haline gelebilir. Bu senaryo, “yakıt taşınması” olarak bilinmekle birlikte, pulverize kömür santralleri için belgelenmiştir (Dastidar ve Amyotte, 2002).



Şekil 4.22. Hibrit Karışımların Alt Patlama Sınırı (Siwek, 1996).

Vaka örneği olarak, 29 Aralık 1999 ‘da Nebraska Kamu İktidar Bölgesinin (NPPD) Sheldon İstasyonu'na ait iki kül silosunda, iki çalışan öldüğü ve bir kişinin yaralandığı bir patlama olayını ele aldığımızda, kaza araştırmasına göre verilen

raporda külün yüksek miktarda karbon içerdiğini ortaya koymuştur (<https://www.cbsnews.com/news/two-killed-in-power-plant-blast/> Erişim tarihi: 22 Kasım 2017).

Bu karbonun olası kaynağı, kısmen yanmış olan ve toz hale getirilmiş kömürün, uçucu kül ile birlikte sürüklenip kül silosuna sürüklenmesidir.

4.5. Dünyada Önemli Toz Patlamaları

4.5.1. JGS Yem Fabrikası Tahıl Tozu Patlaması- Gürcistan

Tarım endüstrisinde, aşırı toz birikiminin, ciddi ve bazen ölümcül patlamalara ve yangınlara neden olabilecek bir yakıt olduğuna bir örnek olarak verilebilecek bu olayda, Gürcistan'da bir tavuk yem fabrikasında 1 kişi ölmüş ve 5 kişi yaralanmıştır.

OSHA raporuna göre Rockmart'daki JCG Çiftliklerinin trajediyi önleyebilecek güvenlik standartlarını ihlal ettiğini belirlenmiştir. Bu ihlaller, çekiç değirmen alanında aşırı miktarda toz biriktiği ve bununla ilgili herhangi bir proaktif önlem alınmadığı yönündedir.

Tarih	26.01.2016
Lokasyon	Rockmart / Gürcistan
Yakıt	Tahıl
Rapor edilen ekipman	Çekiçli değirmen
Rapor edilen kaza nedeni	Toz birikmesi
Endüstri	Yem
Firma	JCG Farms
Daha önce Kaydedilen vakalar	Kayıtlı bir vaka bulunmamaktadır.
Kayıp	1 ölü, 5 yaralı

Şekil 4.23. JGS Yem Fabrikası Tahıl Tozu Patlaması Olay Künyesi
(Vorderbrueggen, 2011).

Vaka ile ilgili OSHA'nın rapor etmiş olduğu ihlal ve ihmaller;

- Çalışanların, yanıcı toz birikimi nedeni ile olası bir yangın ve patlama tehlikesine maruz bırakılması.
- Gerekli uyarı işaretlerinin asılmaması ve çalışanların yangın ve patlama tehlikelerine karşı bilgilendirilmemesi.
- Herhangi bir acil durum esnasında, çalışanların, makinelerde maruz kalmasına neden olmak.
- Bir 'Acil Durum Eylem Planı' geliştirmemek ve buna göre gerekli düzenlemeleri yapmamak.
- Yanıcı tozlardan kaynaklanabilecek yangın, patlama ve diğer tehlikelere karşı gerekli eğitimlerin verilmemesi ve rutin eğitimlerin yapılmaması.
- Tahıl tozu birikimini önlemek amacı ile yazılı bir rutin temizlik kontrol çizelgesi oluşturulmamış olması.
- Çalışanların elektrik şoku tehlikesine maruz bırakılması
(<https://www.osha.gov/news/newsreleases/region4/08012016-1>, Erişim tarihi: 26 Kasım 2018).

4.5.2. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Alüminyum Tozu Patlaması- ABD

Tarih	29.10.2003
Lokasyon	Huntington, INDIANA
Yakıt	Alüminyum tozu
Rapor edilen ekipman	Havalandırma borusu
Rapor edilen kaza nedeni	Yanıcı toz patlaması
Endüstri	Alüminyum döküm jantlar
Firma	Hayes Lemmerz
Kayıp	1 ölü, 6 yaralı

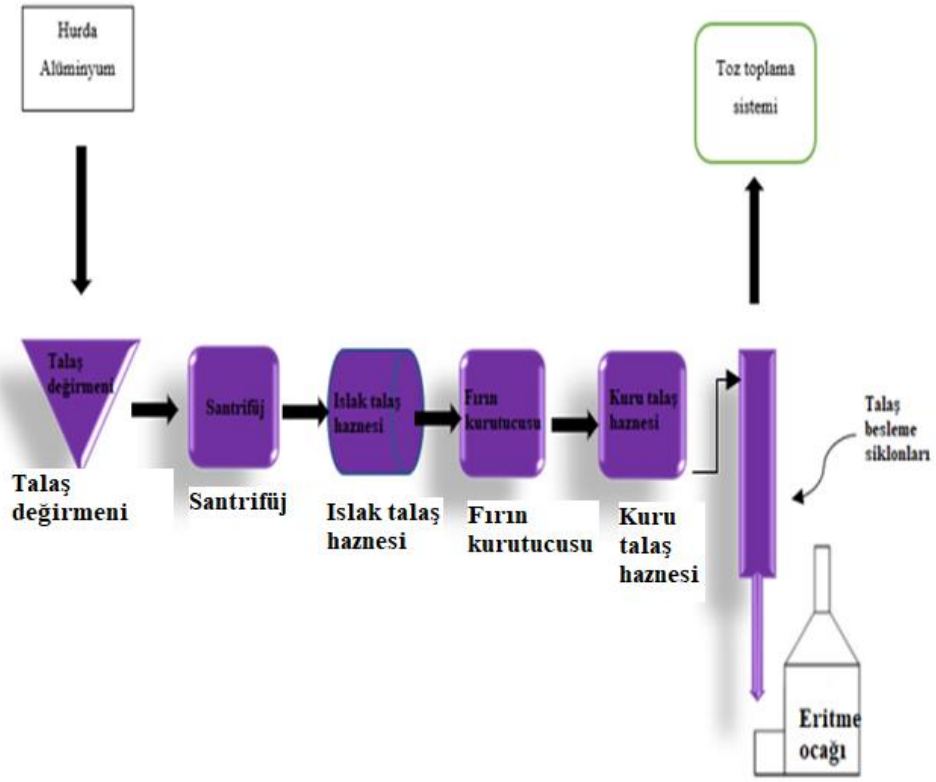
Şekil 4.24. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Alüminyum Tozu Patlaması Olay Künyesi (Vorderbrueggen, 2011).



Şekil 4.25. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Patlama Anı (Amyotte, 2003)

Amerika Birleşik Devletleri'nin Indiana Eyaleti'nin Huntington kentinde bulunan Hayes Lemmerz International jant üretim tesisinde 29 Ekim 2003 tarihinde, saat 20:30 sularında meydana gelen patlamanın kaynağının, alüminyum tozu olduğu bildirilmiştir. Yaralanma ve ölümler, patlamanın ardından çıkan yangın sebebiyle meydana gelmiştir (<https://www.csb.gov/hayes-lemmerz-dust-explosions-and-fire/>, Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2018).

Hurda işlemenin ilk adımı susuzlaştırmadır. Bir parça işlendiğinde, sıcaklığı dengelemeye ve kesme ucunun ömrünü yağlayarak koruyabilmesine yardımcı olmak için kesme yağı (tipik olarak bir yağ-su emülsiyonu) kullanılır. Sudan arındırma işleminde, bu yağ-su emülsiyonunu gidermek için hurda bir santrifüjde eğrilir. Daha sonra bunlar ıslak hurda silolarına aktarılır. Hurdalar, kurutma ve yüzeylerindeki yağ kalıntılarının giderilmesi için silolardan fırınlara aktarılır. Bu fırınlarda veya kurutucularda, hurdalar kurutulur. Bu, hurdaların daha küçük parçalara ayrılmasına ve toz oluşumuna neden olur. Proses, toz sorunlarının en aza indirilmesi ve metal hurdalarının oksidasyonunun en aza indirilmesi için işlemin bu kısmı boyunca minimum hava akışı ile tasarlanmıştır. Hurdalar (ve toz) kuruduktan sonra, basınçlı hava ile kuru hurda silolarına aktarılır.

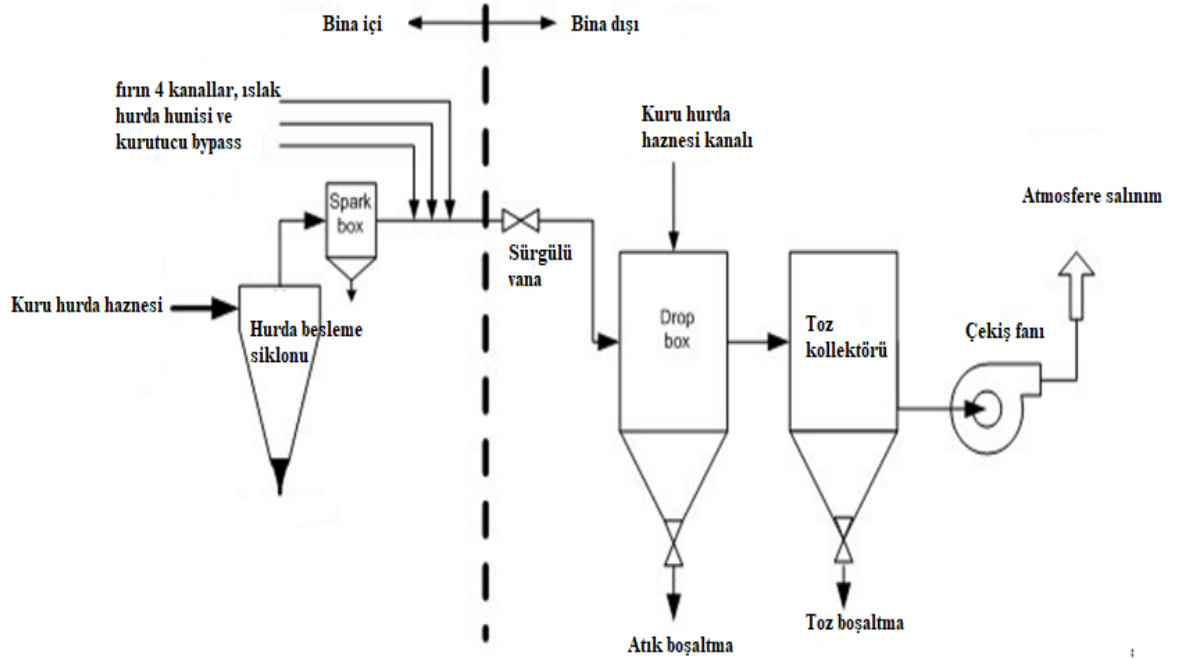


Şekil 4.26. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Hurda İş Akış Diyagramı (<https://www.csb.gov/hayes-lemmerz-dust-explosions-and-fire/>, Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2018).

Rapora göre, yangın, fabrikadaki ventilasyon ve filtrasyon ünitesinin sonundaki tıkalı bir havalandırma borusunda başlamıştır. İtfaiyeciler, yüksek ısıdaki metal tozunu kazma ile kazarak gevşetmiş, bu da aniden oksijene maruz kalan alüminyum tozunun patlamasına sebep olmuştur (<https://www.csb.gov/hayes-lemmerz-dust-explosions-and-fire/>, Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2018).

Yangının çok şiddetli olması nedeni ile alüminyum tozunun, yangının zemine sıçramasından önce yanmış olmasıdır. Ergimiş metal ise zeminde yaklaşık 1,5 metrelik bir delik açmıştır. Fabrika, alüminyum tozunun tahliyesi için kullanılan 3 adet daha fan sistemine sahiptir (<https://www.csb.gov/hayes-lemmerz-dust-explosions-and-fire/>, Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2018).

Toz toplayıcı, toz / hava karışımını, her bir taraftaki titreşim jetlerine sahip bir kanal aracılığıyla çeker. Bu titreşim jetleri 90 saniyelik bir döngüde çalışır ve kanalda biriken tozları çıkarır. Toz / hava karışımı daha sonra bir torbalı filtreye aktarılır. Torbalı filtrede toz partiküllerini yakalayan ve havanın artık parçacıklardan arındırılıp atmosfere temiz bir şekilde yayılmasına izin veren birçok filtre vardır.



Şekil 4.27. Hayes Lemmerz Alüminyum Jant Fabrikası Toz Toplama Ünitesi Şeması (<https://www.csb.gov/hayes-lemmerz-dust-explosions-and-fire/>, Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2018)

Süreç, işçilerin hurda besleme sistemini çıkan yangın sebebi ile kapatmaları ancak bu süreçte, toz toplayıcı fanını kapatmamaları nedeni ile başlamıştır. Yangın tespit edilip duman kanalı açılmış ve kalıntı temizlenmiştir. İki saat sonra kuru hurda beslemesi tekrar başlamış ve on dakikalık bir süre içerisinde kıvılcımın toz toplayıcı kanalına düştüğü fark edilmiştir. Fırın davlumbazının altından bir ateş topu fırlamıştır. Ateş topu genişlemiş ve yukarı doğru yükselerek çatıyı havaya uçurmuştur.

ABD Kimyasal Güvenlik ve Tehlike Soruşturma Kurulu (CSB) raporuna göre, toz toplayıcısındaki bir patlama, sistem kanalı boyunca bir basınç dalgası

göndermiş ve tekrar binanın içine girmiştir. Daha sonra kirişler ve ekipman üzerinde birikmiş olan tabaka halindeki alüminyum tozu tutuşmuş ve ateş topu oluşturarak çatıyı havaya uçurmuştur. CSB' nin ana bulguları, dökümhanede yetersiz temizlik ve hurda işleme ekipmanının yetersiz bakımı nedeni ile ikincil patlamayı besleyen toz birikmesinin olduğu yönündedir. Özellikle, bulgular toz toplayıcı filtrelerinin seyrek olarak temizlendiğini, bazı kanalların aşındığı için tozları sızdırdığını, bakım işçilerinin kaza anında anti statik giysiler giymediklerini ve şirketin, toz toplama sistemi için resmi yazılı bakım prosedürlerine sahip olmadığı ve çalışan eğitiminin rutin olarak yapılmadığıdır. CSB ayrıca, Hayes Lemmerz' in sipariş ettiği toz toplama sisteminin Ulusal Yangın Koruma Derneği (NFPA) tarafından yayınlanan önemli bir yangın yönetmeliğine göre tasarlanmadığını bildirmiştir. Alüminyum tozu, en patlayıcı metal tozları arasındadır ve toz toplayıcılarının düzgün tasarlanmadığı, kurulmadığı veya korunmadığı durumda patlama ve yangın riski taşıdığı koşullar oluşmaktadır (Khambekar ve Pittenger, 2013).

Sonuç olarak; fabrikanın iç ve dış kısmı büyük hasar almış, altı kişinin yaralanması ve bir kişinin ölümü ile sonuçlanmıştır.

4.5.3. Imperial Şeker Rafinerisi Şeker Tozu Patlaması- Gürcistan

Toz patlaması olayı ile ilgili verilebilecek vaka örneklerinden en çarpıcı olanlarından biri Gürcistan şeker patlaması vakasıdır.

80 yıldan fazla bir süredir üretim yapan tesiste, 1960'lardan olay yılına kadar (2008) ciddi derecede bir yangın veya patlama kazası kayda geçmemiştir. Ancak, kalite enspektörlerinin yapmış olduğu değerlendirmeye göre, patlamanın olduğu yıl içerisinde tesisteki bazı bölgelerde diz seviyesine kadar dökülmüş şeker olduğu tespit edilmiştir.

Tarih	07.02.2008
Lokasyon	Wentworth Limanı / Gürcistan
Yakıt	Şeker tozu
Rapor edilen ekipman	Taşıyıcı çelik konveyör
Rapor edilen kaza nedeni	Şeker tozu üretimi
Endüstri	Şeker tozu üretimi
Firma	Imperial Şeker Rafinerisi

Şekil 4.28. Imperial Şeker Rafinerisi Şeker Tozu Patlaması Olay Künyesi
(https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2011-02-07-imperialsugarcompanydustexplosion-vits.pdf?sfvrsn=7eae1ef8_4, Erişim tarihi: 30 Ağustos 2018), (Vorderbrueggen, 2011).

Çalışanların verdiği bilgilere göre zaman zaman küçük yangınlar çıkmış ancak büyük bir kazaya mahal vermeden söndürülmüştür. Olaydan yaklaşık 2 hafta önce paketleme binasının çatısındaki kuru toz kollektöründe küçük bir patlama meydana gelmiş ve bu olay toz kollektörüne hasar vermiş ancak güvenli bir şekilde deflagrasyon havalandırma panelleri boyunca havalandırılmıştır.

- Port Wentworth şeker fabrikası 1917'de inşa edilmiş ve büyük bir olay olmaksızın 80 yıldan fazla bir süredir faaliyet göstermişti.
- Tesiste, ham şekerin garnül şekere dönüştürülmesi ve paketlenmesi yapılmaktaydı.
- Üretim sürecinde kullanılan çekiçli değirmenler, konveyör bantları ve kovalı elevatörler şeker tozunun havaya yayılmasına ve yere dökülmesine sebep olmaktaydı.
- Bazı yerlerde, birkaç metreye kadar toz birikintisi olabilmekteydi. Ayrıca, havada yayılan şeker tozu kirişler ve bağlantı noktaları gibi birçok yerde katman oluşturmaktaydı.
- Toz toplama ekipmanı eski ve artık etkisini yitmiş durumdaydı.
(<https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage->

20110207imperialssugarcompanydustexplosion
vits.pdf?sfvrsn=7eae1ef8_4, Erişim tarihi: 30 Ağustos 2018)



şekil 4.29. Imperial şeker Rafinerisi, Toz Patlamasından Sonra Fabrika (Vorderbrueggen, 2011).

Wentworth limanı/Gürcistan'da, 7 şubat 2008 tarihi akşam saat 7.15'te, "Imperial Sugar Company" 'de, granüle edilmiş şeker depolama silolarının alt kısmındaki çelik konveyör bantı içerisinde "şeker tozu patlaması" meydana gelmiştir. Saniyeler içerisinde, yıkıcı tesirli ikincil patlamalar granül ve toz halindeki şeker paketleme binalarında, dökme şeker yükleme binalarında ve işlenmemiş şeker rafinerisinin bir bölümünde meydana gelmiştir. Patlamayla birlikte beton zemin parçalanmış ve bahsi geçen binalar yerle bir olmuştur. 8 çalışan hayatını kaybetmiş, 36 çalışan ciddi şekilde yaralanmıştır.

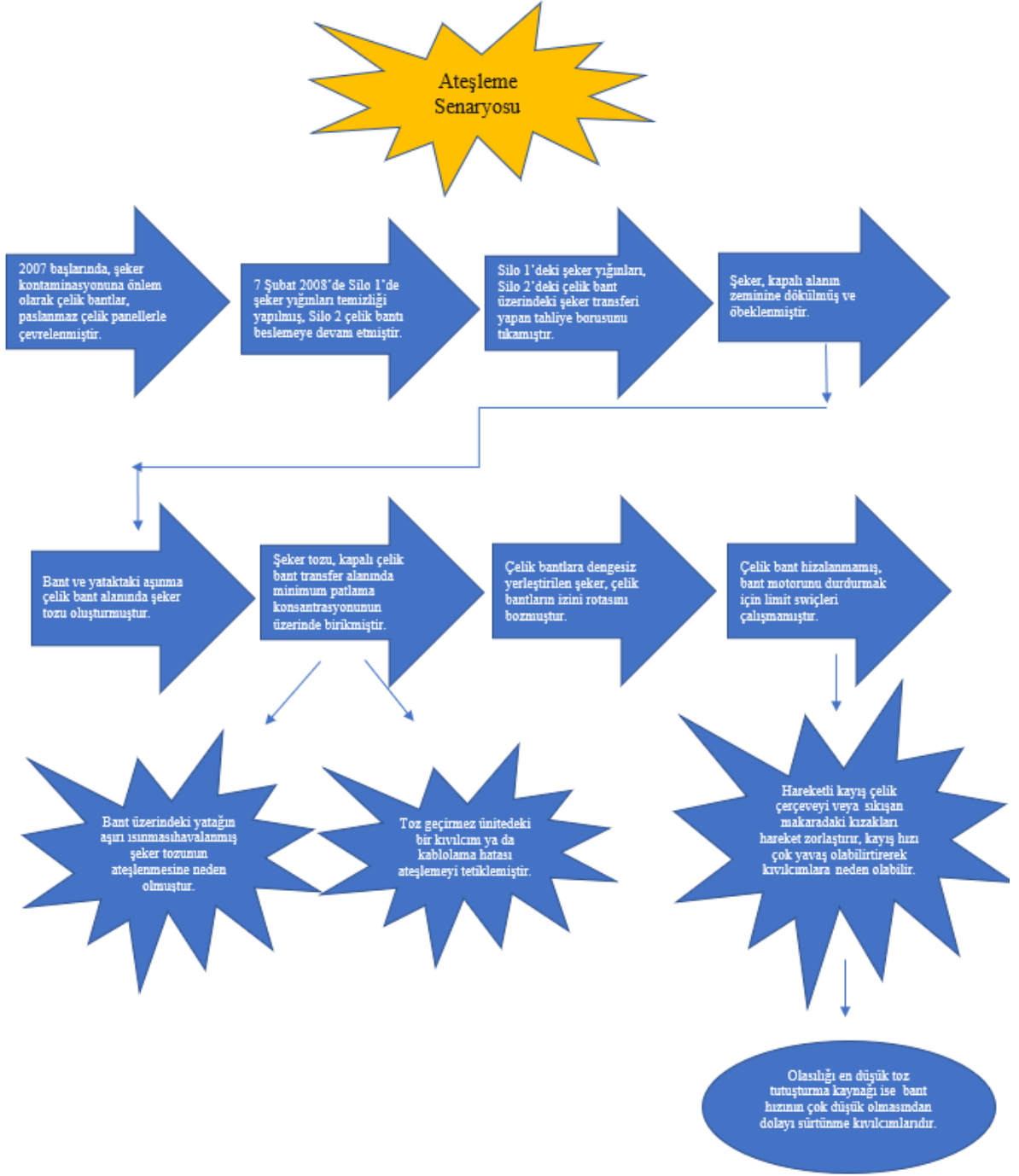


şekil 4.30. Imperial şeker Rafinerisi, Toz Patlamasından Sonra Liman Güvenlik Kamerasından Alınan 16. Saniyedeki Patlama Görüntüleri ve Oluşan Ateş Topları (Eckhoff, 2003)

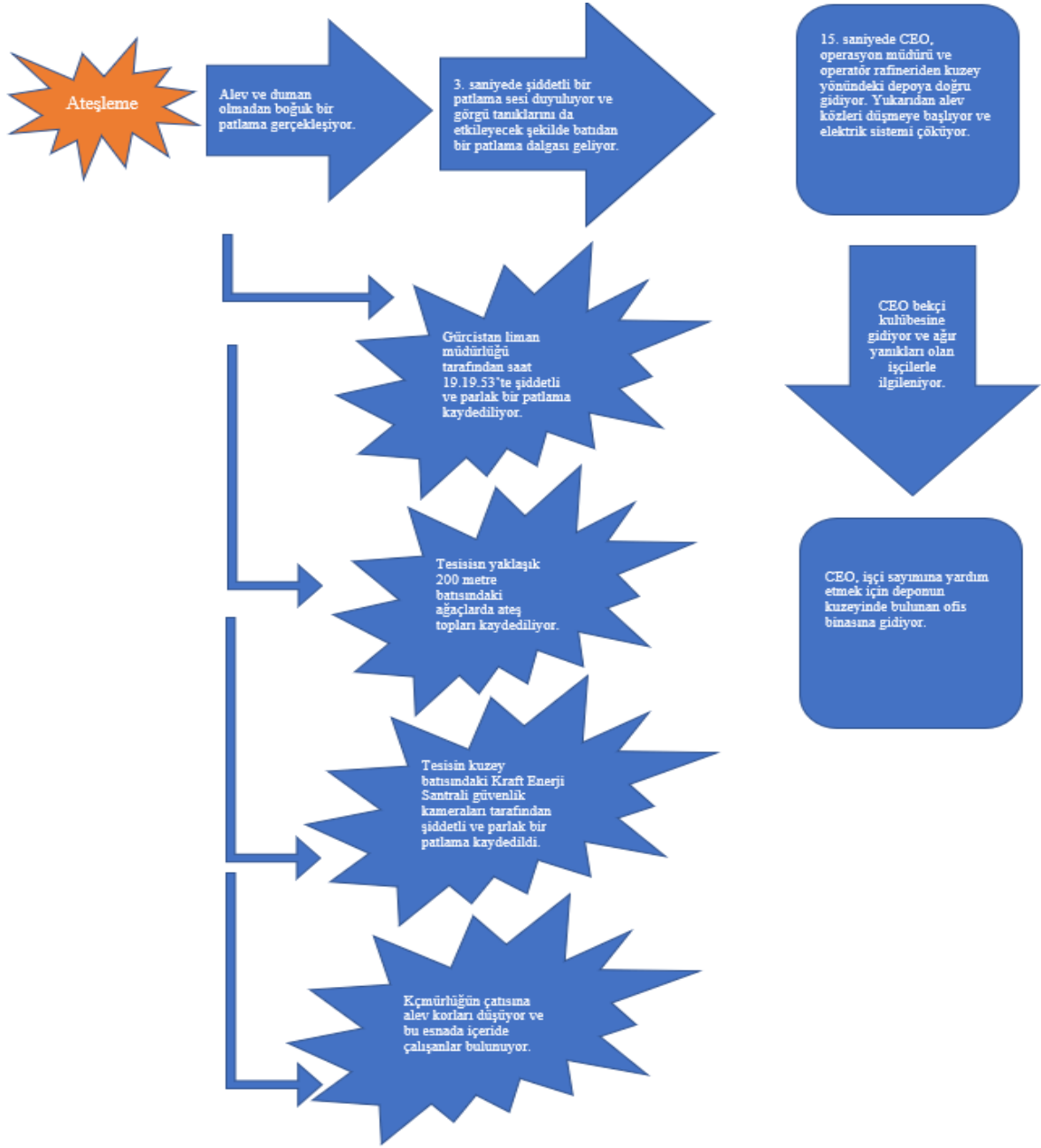
CSB'nin raporuna göre granül şeker, hareketli çelik konveyörün kapalı çıkışına dökülmüş ve şeker tozu kapalı konveyör içerisinde minimum patlama konsantrasyonunun üzerine çıkmış ve tutuşmuştur. Birinci patlama, ikincil patlamaları tetiklemiş ve kısa sürede paketleme binaları, istif odaları ve yığın istasyonları patlamıştır (<https://www.csb.gov/videos/inferno-dust-explosion-at-imperial-sugar/>, Erişim tarihi: 18 Nisan 2018).



Şekil 4.31. Imperial Şeker Rafinerisinde, Makine, Bağlantılar ve Zeminde Görülen Büyük Miktarda Şeker Yığını (https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2011-02-07-imperialsugarcompanydustexplosion-vits.pdf?sfvrsn=7eae1ef8_4, Erişim tarihi: 30 Ağustos 2018)



Şekil 4.32. Imperial Şeker Rafinerisi, Toz Patlaması Tutuşma Senaryosu (Vorderbrueggen, 2011)



Şekil 4.33. Imperial Şeker Rafinerisi, Toz Patlaması Olay Şeması (Vorderbrueggen, 2011)

CSB raporuna göre;

1. Şeker ve mısır nişastası taşıma ekipmanı, şeker ve şeker tozunun çalışma alanına salınmasını en aza indirecek şekilde tasarlanmamış veya korunmamıştır

2. Yetersiz temizlik uygulamaları, yüzeylerde yanıcı granül ve pudra şekeri ile yanıcı pudra tozlarının birikimine ve paketlenme binaları boyunca birikmesine sebep olmuştur.
3. Silindirin 1 ve 2 altındaki yeni kapalı çelik kemer montajının içine minimum patlayıcı konsantrasyonun üzerinde havalanmış şeker tozu birikmiştir.
4. Çelik bant konveyöründe aşırı ısınmış bir yatak, büyük olasılıkla bir birincil toz patlamasını ateşlemiştir.
5. 1. ve 2. silolar altındaki kapalı çelik konveyör bandındaki birincil toz patlaması, paketlenme binalarındaki büyük ikincil toz patlamalarını ve yangınları tetiklemiştir.
6. Birikmiş şeker tozu ve dökülen şeker ikincil patlamalarda yakıt vazifesi görmüştür. 14 kişinin ölümü de bu ikincil patlamaların sonucunda gerçekleşmiştir (Vorderbrueggen, 2011).

Wentworth Limanı kazası neticesinde, CSB, 2005'te endüstriyel toz patlamaları ile ilgili problemin çözülmesine yönelik çalışmaların devamına başlamıştır. 2008'e kadar, yaklaşık 25 yıllık bir periyotta toz ile ilgili, 100'den fazla kişinin ölümüne ve 600 kişinin yaralanmasına neden olan yaklaşık 200 yangın ve patlama belirlemiştir. Wentworth Limanı vakası, toz patlamalarının endüstride büyük bir problem olmaya devam ettiğini göstermiştir (Blair ve Angela, 2005).

4.5.4. Pemex Devlet Petrol Şirketi LPG Dolum Tesisindeki Patlama- Meksika

Kimyasal/Fizikokimyasal, fiziksel, mekanik patlamaları içeren çarpıcı bir patlama vakası örnek olarak aşağıda incelenmiştir.

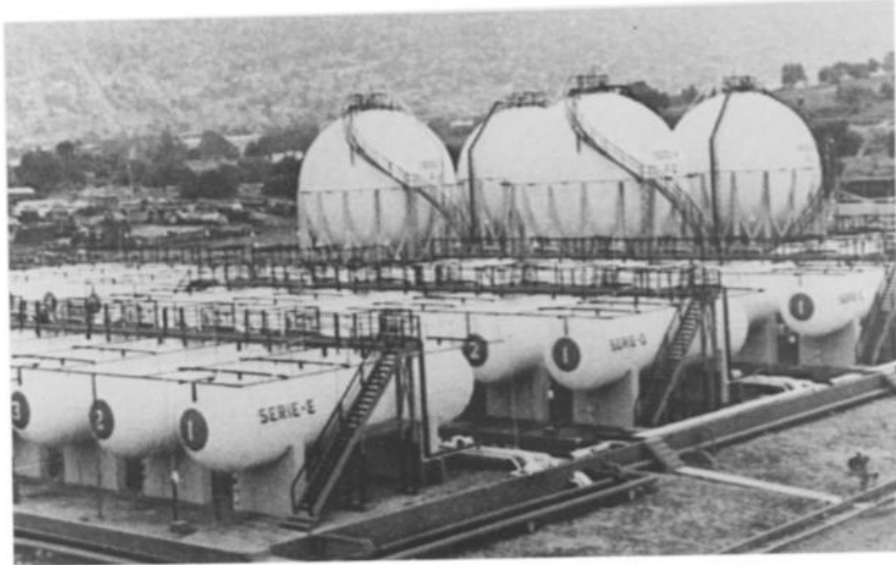
19 Kasım 1984'te, Meksika'nın 20 km dışında, *San Juanico*'da son derece yıkıcı bir patlama gerçekleşmiştir. Bu facia, 500'den fazla kişinin ölümüyle sonuçlanmış ve kazanın niteliği ile tarihi vakalar arasına girmiştir.

Tarih	19.10.1984
Lokasyon	San Juanico / Meksika
Yakıt	LPG gazı
Rapor edilen ekipman	LPG tankı
Rapor edilen kaza nedeni	LPG sızıntısı
Endüstri	LPG depolama ve dağıtım
Firma	Pemex Devlet Petrol Şirketi

Şekil 4.34. Pemex Devlet Petrol Şirketi Olay Künyesi (Eckhoff, 2016)

“Pemex Devler Petrol Şirketi” adındaki tesis, sıvılaştırılmış petrol gazı (LPG) depolayan ve dağıtan bir tesis olup, LPG bu tesise üç ayrı rafineriden gelmektedir. Yaklaşık 16.000 m³ kapasiteli, 54 LPG depolama tankı bulunmaktadır. Tesis, API (*the American Petroleum Institute*) standartlarında inşa edilmiştir.

Pietersen (1988) ’in raporuna göre, incelemeler iki konu üzerinde yoğunlaşmıştır; birincisinde proaktif önlem çalışmalarında herhangi bir senaryoda olası zarar ve tedbirler üzerine yoğunlaşmış, bir diğerinde ise Meksika’da yaşanan bu faciada olduğu gibi olası diğer facialarda doğru müdahale ve mücadele teknikleri irdelenmiştir.



Şekil 4.35. Patlamadan Önce Pemex Devlet Petrol Şirketinde Depolama Tankları (Pietersen,1988)

Facia, LPG sızıntısı sonrasında bir ateşleyici ile karşılaşması sonucu seri patlamalar ve neticesinde tüm depolama alanının yıkılmasıyla sonuçlanmıştır. Pemex'te 5 kişi ölmüş ve 2 kişi yaralanmıştır. Buna karşılık, asıl daramatik etki depolama alanının güney kısmında yer alan yerleşim alanında oluşmuştur (Şekil 6.13.). Yaklaşık 500 kişi ölmüş ve 7000'den fazla yaralı ciddi şekilde yaralanmıştır. Bunun nedeni yerleşim alanındaki evlere sızan gazın lokal patlamalara ve yangınlara sebep olmasıdır Olay, sabah 5.45'te gerçekleştiğinden, insanların çoğu patlamaya uyku sırasında yakalanmıştır. Olay sonrasında, 200.000 civarında kişi tahliye edilmiştir. Şekil 2.16 'da ardı ardına gerçekleşen BLEVE zincirinden bir tanesi görülmektedir (Pietersen,1988).



Şekil 4.36. Pemex Devlet Petrol Şirketi Patlaması Neticesinde Meydana Gelen BLEVE (Eckhoff, 2016)



Şekil 4.37. Pemex Devlet Petrol Şirketi Patlaması Neticesinde Yıkılmış Bir Ev (Eckhoff, 2016)

Ardıcıl patlamalar, yaklaşık 20 mil uzaklıktaki Mexico City Üniversitesi'nin sismografında kaydedilmiştir. Toplamda dokuz patlama kaydedilmiş olup, ilk patlama yaklaşık 5.45, sonuncusu yaklaşık 7.01'de kaydedilmiştir. 0,5 hassasiyetli Richter ölçeğine göre ikinci ve yedinci patlama en şiddetli olanlarıdır. İkinci patlama, ilk patlamadan yaklaşık bir dakika sonra meydana gelmiştir.

Çeşitli kaynaklardan ve görgü tanıklarından edinilen bilgilere dayanılarak oluşturulan bu bilir kişi raporunda, olayın gelişimi şu şekildedir;

Tahminlere göre, olay sabahı, büyük oranda LPG, yaklaşık 1 m yüksekliğinde bir duvar ile bölmelenmiş olan boru hattı veya tanktan sızmıştır. Pietersen (2013)'e göre buhar bulutu patlaması, muhtemelen dokuz ardıcıl patlamanın ilki olan, depolama alanında meydana gelen ve boru hatlarıyla beslenen patlama olarak belirlenmiştir (Pietersen, 1988). Patlama LPG istasyonundaki bit tankın sızıntı bir yapan bir flanşından sızan ve gaz fazına dönüşerek buhar bulutu oluşturmasıyla meydana gelmiştir. Patlamayı meydana getiren sızıntıda büyük rolün, bir tankın aşırı doldurulması ve yeraltı besleme boruları pompasının aşırı basıncının olabileceği belirtilmiştir (Pietersen, 2013).

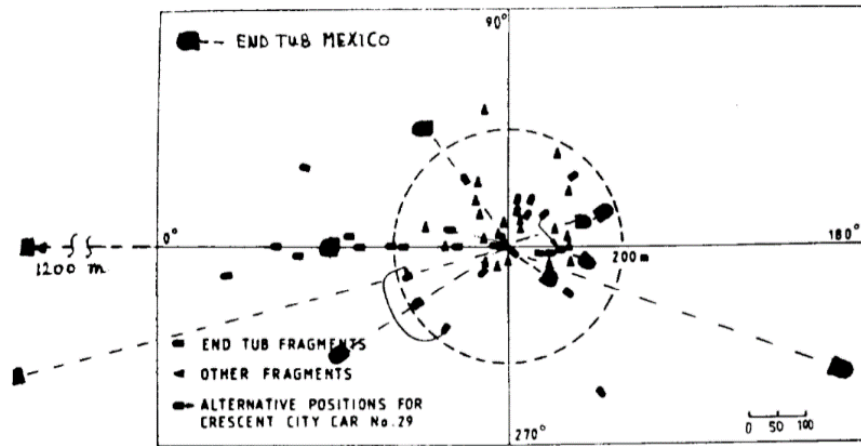
Sıvılaştırılmış gaz, basınçtan kurtulup gaz haline gelerek duvarı aşarak etrafa yayılmıştır. Güvenlik görevlileri, tehlikeden korunmak için insanları uyarmaya çalışmışlardır. Gaz bulutu yaklaşık 2 m görünür yüksekliğe eriştiğinde şişeleme tesisindeki ocaktaki bir parlamayla karşılaşmış ve muhtemelen o anda ilk tutuşturma gerçekleşmiştir. Bu olay, ani parlayan bir yangınla sonuçlanmış ve alevi, sınırlandırılmış buhar bulutu derecesine bağlı olarak, bazen hızlanarak bölgesel yüksek basınçlara neden olmuştur. Görgü tanıklarına göre, patlamalar çevrede çeşitli mahallerde meydana gelmiştir (Pietersen, 1988).

Buhar bulutunun ateşlenmesiyle meydana gelen yüksek basınç, ortamdaki boru hatlarının hasar görmesine sebep olmuştur (Pietersen, 1988). Buhar bulutu patlaması, kısmen tanklardaki borulara zarar verip bazı tankların bağlantılarını

havaya uçurmuştur. Aşırı basınç, depolama alanının duvarları ve birbirine çok yakın yerleştirilmiş depolama tanklarının arasına hapsolmuş olan yüksek miktarda gazın hapsedilmesiyle yaratılmıştır. Bu ise hasarlı borulardan daha fazla LPG gazı salınmasına neden olmuştur (Pietersen, 2013).

Akabinde, yaklaşık bir dakika sonra, şiddetli BLEVE patlaması meydana gelmiştir. Patlama, muhtemelen, birkaç tankın birlikte patlamasıyla meydana gelmiştir.

Ardı ardına oluşan BLEVE'lerin temel nedeni, diğer tankların ısısından veya parçalanan tankların şarapnel etkisinden kaynaklanan penetrasyon olarak görülmüştür (Şekil 6.16.) Güvenilir kaynaklardan alınan bilgiler bir araya getirildiğinde, buhar bulutu patlaması ve ilk BLEVE arasındaki oldukça kısa zaman dilimi göz önüne alındığında, bu aşırı yüklemenin silindir ve boru hatlarındaki yüksek pompa basıncı kaynaklı olabileceği tezini güçlendirmektedir.



Şekil 4.38 Pemex Devlet Petrol Şirketi Patlamasında Meydana Gelen Şarapnel Etkisi (Pietersen, 1988).

Şekilde görüldüğü gibi, bu vakada, LPG sızıntısından oluşan enerji, BLEVE patlamasıyla birlikte mekanik patlamaya dönüşmüş ve parçalara akatarılan kinetik enerji, parçaların çok uzak mesafelere fırlaması ile sonuçlanmıştır (Pietersen, 1988).

Sonuç olarak, bu büyük felakette, yüksek basınç etkisinin cüzi miktarda olmasına rağmen, yaşanan felaketin tesirini artırdığı neticesine varılmıştır. Bununla birlikte, fiziksel bir patlama olan BLEVE' nin meydana getirdiği yüksek basıncın etkisiyle, tanklar, bağlantı noktalarından kopup uzak mesafelere fırlamıştır. Görgü tanıklarının ifadelerine göre de muhtemelen ikincil patlamadan kaynaklı yer sarsıntısı da meskenlere zarar vermiştir. Bu yer sarsıntıları, fiziksel patlamanın sonucu olarak oluşan yüksek basınca bağlı olarak gerçekleşmiştir.

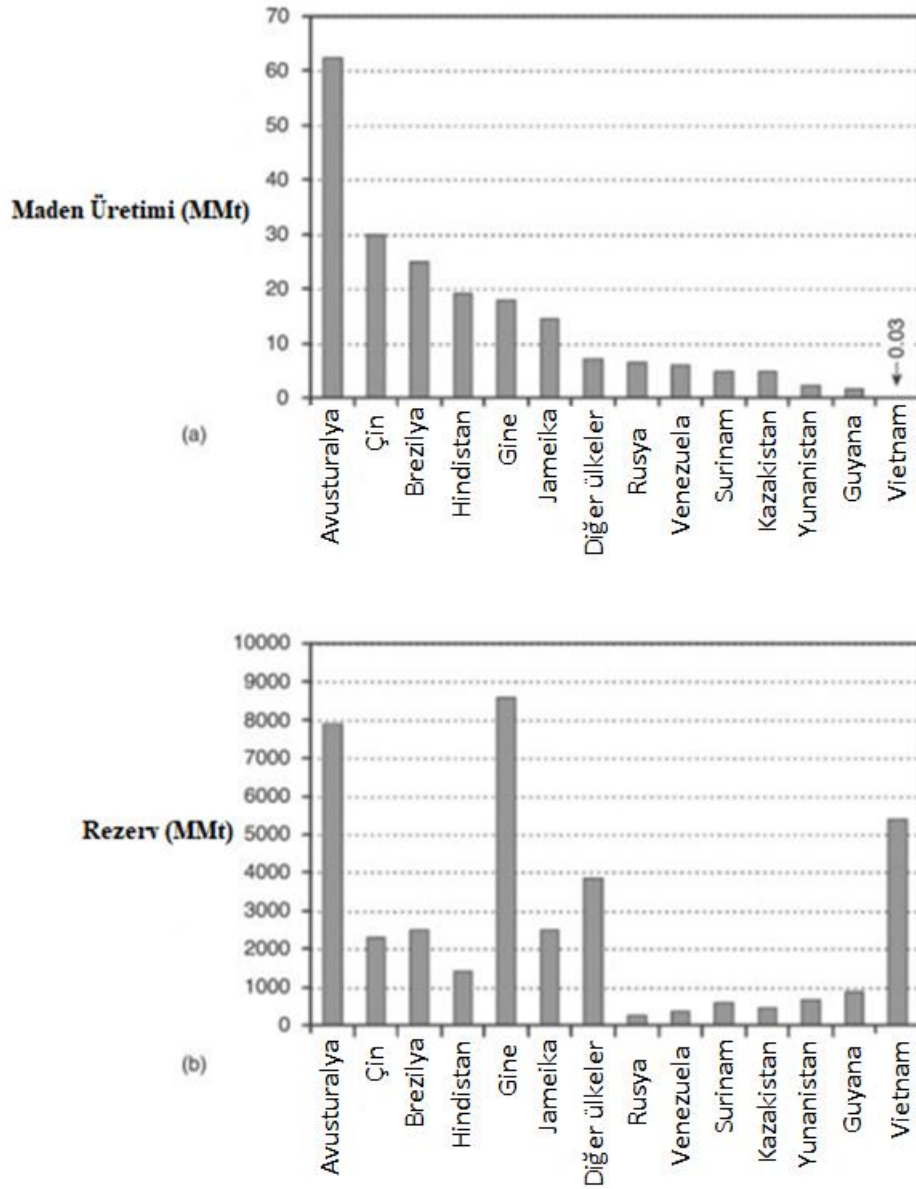
Araştırma ekibinin gözünden kaçan kısım ise alandaki cam kırıkları olmuştur. Daha sonra raporlanan ve fotoğraflanan cam kırıkları LPG deposunun kuzey ve güney kısmının yaklaşık 600 m uzaklığında olup, muhtemelen radyal ısı ve kısmi yüksek basınç kombinasyonundan meydana gelmiştir. Fiziksel patlamalar, konutların bulunduğu kısımdaki fiziksel patlamaların etkisiyle oluşan yüksek basınç hasarlarına neden olmuştur. Hasarın büyük kısmı ise çeşitli alanlardaki şiddetli ısı ve zemin seviyesindeki ateş toplarından kaynaklanmıştır (Pietersen, 1988).

BÖLÜM 5: ALÜMİNYUM TOZU PATLAMALARI

5.1. Alüminyuma Genel Bakış

1886 yılında endüstriyel olarak üretilmeye başlanan alüminyum, yerkabuğunun %8'ini oluşturur ve bu miktar, alüminyumu, yerkabuğunun %50'sini oluşturan oksijen ve %27'sini oluşturan silisyumun ardından elementler arasında en çok bulunan üçüncü element, metaller arasında ise birinci element olmasını sağlar (Türkiye Mühendisler ve Mimarlar Odası [TMMOB], Alüminyum Raporu, 2006).

İnsanlığın başlangıcından itibaren değerli ve/veya işlenebilirliği açısından değerli addedilen metallerin çoğu çağlara adını verecek mahiyette tarihe damga vurmuşken, alüminyumun bu denli geri kalmasının nedeni keşfedilememesi değil, aksine cevherden rafine edilmesinin karmaşıklığı nedeni ile oldukça karmaşık geldiğinden, altın ve gümüşten daha nadir ve daha değerli metal olarak görülmesiydi. Yani, alüminyumun oldukça genç bir metal olmasını düşündüren araştırmaların aksine, alüminyum farkında olunan, ancak saf metalin keşfi uzun sürdüğünden 19. yüzyılın başlarında kullanımı yaygınlaşan bir metaldir (Vargel, 2004).



Şekil 5.1. Dünya Alüminyum Rezerv Dağılımı (Odası, T. M. M. (2006). Alüminyum Raporu)

Alüminyum; altın, platin ve zaman zaman rastlandığı üzere bakır gibi doğada metalik halde bulunmaz. Genellikle oksit, hidroksit ve silikat formundadır. En bilinen ve fazla olan stokiometrik¹⁰ formu ise Al_2O_3 'tür. Alüminyum metalurjisinin hammaddesi oksitli minerallerdir. Alüminyumlu silikatlar ise genellikle sodyum, potasyum, demir, kalsiyum ve magnezyum gibi diğer metal silikatlarla birlikte

¹⁰Stokiyometri, kimyasal bir tepkimede bulunan reaktanların ve ürünlerin miktarlarının bir birleriyle olan sayısal ilişkilerini inceler (<https://kimya.net/stokiyometri/inedemek.html> , Erişim tarihi: 2 Kasım 2018)

bulunur ve bunlardan alümina¹¹ ve metalik alüminyum üretimi ekonomik değildir (Vargel, 2004).

Dünya üzerinde geniş bir alana yayılmasına rağmen alüminyum, 19. Yüzyıl sonuna kadar endüstriyel bir metal olarak kullanılmamıştır. Alümina, kararlılığı en yüksek olan oksitlerden biridir. Bu oksiti indirgemek oldukça güçtür. Metalik alüminyumun keşfi Sir Humphry Davy'e dayanır (1778-1829). Demir katot kullanarak yaptığı ergimiş alüminyumun tuzlarının elektrolizi ile alüminyum-demir alaşımı elde etmiştir. Kimyager Hans Christian Oersted (1777-1851) ve daha sonraları Friedrich Wohler (1800-1882) alüminyum klorid indirgemisini potasyumla yapmıştır. Klorid, karbon içerisinde bulunan boksitin klorlanması ile hazırlanmıştır (Vargel, 2004).

5.2. Birincil Alüminyum Üretimi

Birincil hammadde boksit cevherlerinden Bayer işlemi ile ve alüminadan ergimiş tuz elektrolizi yöntemi ile metalik alüminyum üretim süreci sonunda elde edilen, metal saflığı %99,0 ile %99,8 arasında olan işlenmemiş, ham alüminyumdur (https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi160/d160_4250.pdf , Erişim tarihi: 12 Ocak 2018)

Genel bir kural olarak, 1 ton alüminyum elde etmek için iki ton alümina üretmek gerekir, bunun için de dört ton kuru boksit gereklidir (Lumley, 2010).

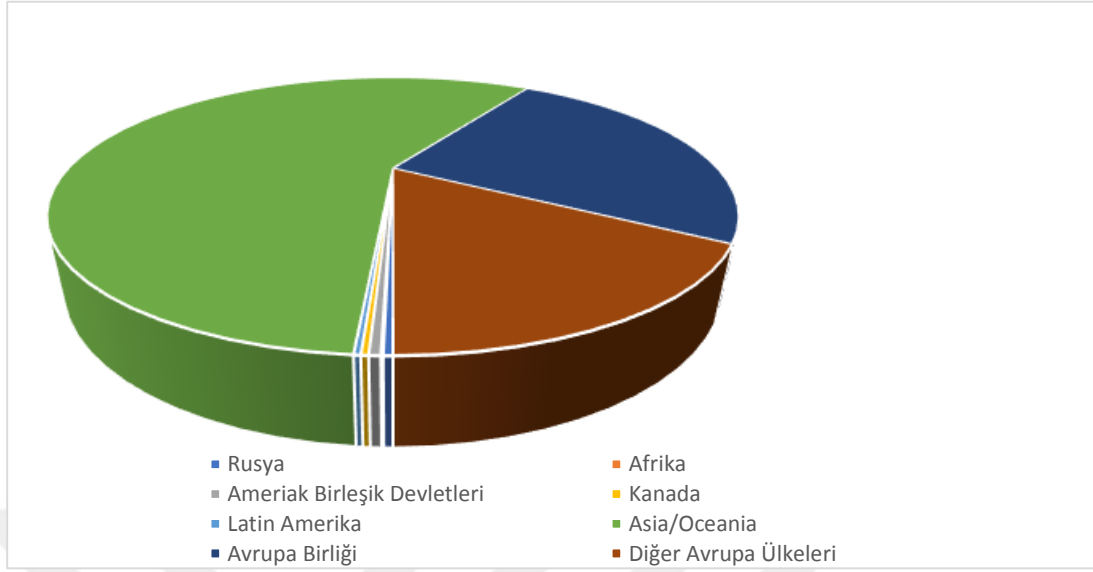
Alüminyum, yıllık 24 milyon ton ile dünyada en çok tüketilen demir dışı metaldir. Bu miktarın yaklaşık %75'lik kısmını birincil üretim oluşturmakta olup, birincil alüminyum, farklı üretim sahaları ile üç ayrı kategoride üretilmektedir (Totten ve MacKenzie 2003);

Boksit ve diğer çeşitli cevherlerden gerekli hammaddelerin eldesi

Cevherin işlenmesi ve alüminyum oksit (alümina) hazırlanması;

¹¹Alümina: Alüminyum metalinin oksitlenmiş halidir (Alüminyum oksit). Bayer prosesinde üretilen Alüminyum hidroksitin kalsine edilmesi ile üretilir. Boksit cevherinden Bayer prosesi ile üretilen alüminanın yaklaşık % 93'ü alüminyum metal eldesinde, geriye kalan kısmı ise özel alümina kimyasalları ve kalsine alümina üretiminde kullanılmaktadır (https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi141/d141_2530.pdf , Erişim tarihi: 4 Kasım 2018)

Alümina (Alüminyum oksit)' dan birincil alüminyum üretimi



Şekil 5.2. Birincil Alüminyum Üretiminin Dünyadaki Durumu (Totten ve Mackenzie, 2003)

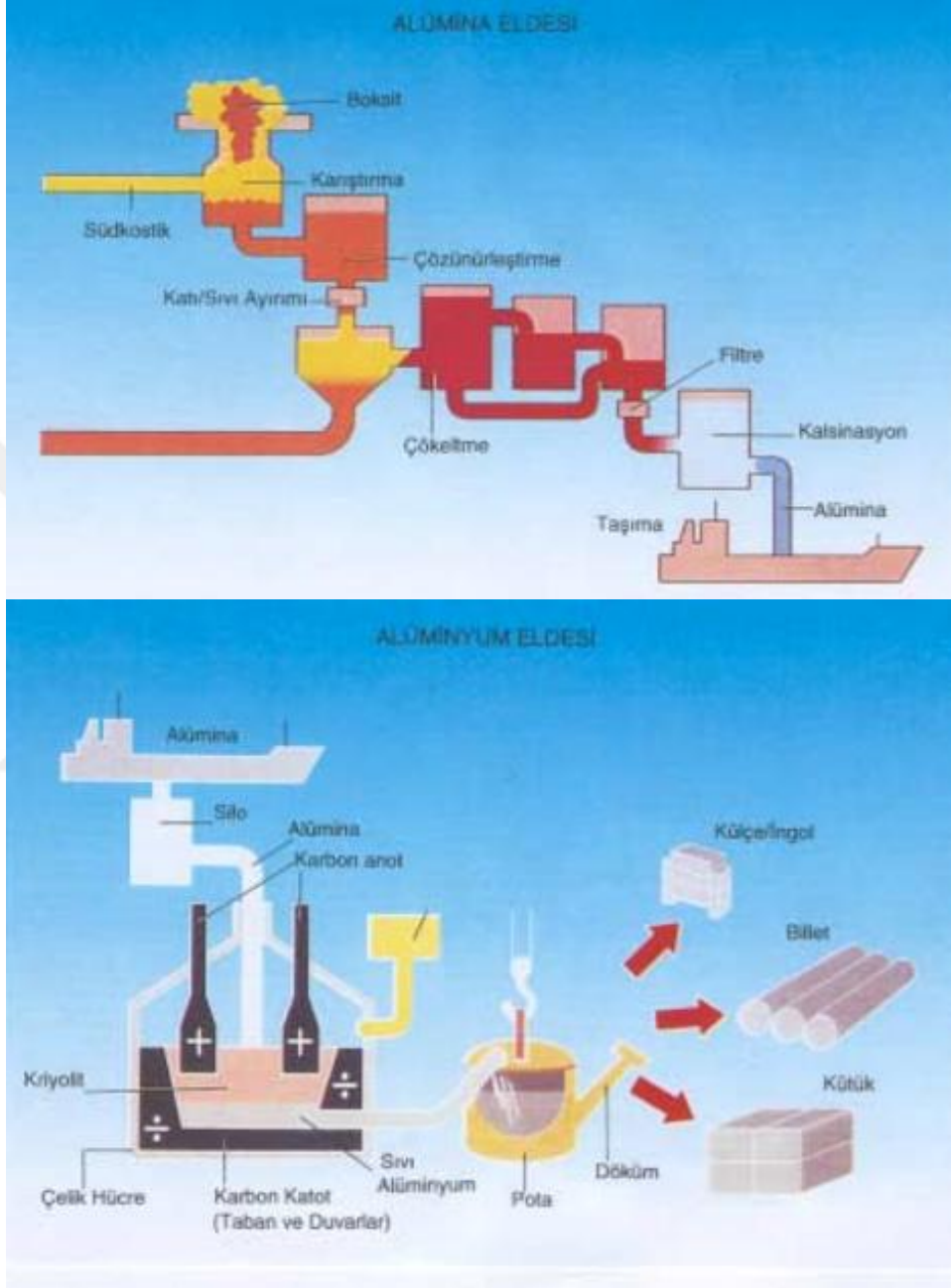
Alüminyum metalurjisinin hammaddesi oksitli mineraller olmasından dolayı, bu cevherlerden, metalik alüminyum kazanımı karmaşık ve maliyetli bir prosestir. Çünkü bu cevherler, alüminyumlu oksitler ile beraber, bunlardan daha kolay indirgenen bir takım diğer oksitleri de içerirler. Bu nedenle doğrudan cevher indirgenmesi hem proses koşulları hem de bu yol ile elde edilen alüminyumun, teknik olarak kullanılamayacak kadar katışkılı olması nedeni ile uygulanamaz. Ve yaklaşık 100 yıldır, temel ilkeleri aynı kalan üretim yöntemi ‘Ergimiş Tuz Elektrolizi’ yöntemidir (https://metalurji.org.tr/dergi/dergi153/d153_2027.pdf, Erişim tarihi: 15 Haziran 2018).

Alüminyum, alüminanın bir elektrolitik indirgeme (ergimiş tuz elektrolizi) işleminden geçirilerek üretilir. Boksit¹² cevherinden elde edilen rafine alümina, eritilmiş bir kriyolit¹³ (Na_3AlF_6) banyosunda 950°C 'ye çözülür. Kriyolit elektrolit görevi görür ve elektrik akımı karbon kaplı reaksiyon banyosundan geçirildiğinde, alüminyum metali serbest kalır. Sıvı alüminyum yoğunluğu elektrolitten daha yüksektir ve bu sebeple sıvı alüminyum banyo dibinde toplanır. Alüminyumun

¹²Sertliği 1-3, yoğunluğu 2,5-3,5 gr/cm³ arasında değişen, alüminyum oksit ve hidroksitlerin bir karışımı (hidroksit formunda %60 alümina içeren) olan boksit, alüminyum metali üretiminde kullanılan başlıca cevherdir (www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi/merkezi/boksit, Erişim tarihi: 4 Kasım 2018)

¹³Kriyolit: Sodyum alüminyum florür: Na_3AlF_6 . Alüminyumun elektrolitik yoldan elde edilmesinde kullanılır (<http://www.askimya.com/urunler/sentetik/kriyolit/145.html>, Erişim tarihi: 2 Kasım 2018)

saflığı, silikon, demir ve gazların çıkarılmasıyla tamamlanır (Alonso Peña ve ark., 2015).



Şekil 5.3. Birincil Alüminyum Üretiminde Üretim Kademeleri (Sırasıyla; Alümina ve Alüminyum Üretimi) (Doğan, 2006)

5.3. İkincil Alüminyum Üretimi

İkincil alüminyum üretimi, aktif olarak işlevini yitirmiş alüminyum alaşım hurdalarının yeniden üretilmesi (Doğan, 2006) ve birincil veya ikincil alüminyumun ergitilme sırasında oluşan curufungeri kazanılmasıdır (Car, 2016). Netice olarak, alüminyumun, cevherden atık geri dönüşümüne kadar yadsınamaz bir kullanım yeri ve hacmi vardır.

Alüminyum ticari olarak üretilmeye başlandığından itibaren geri dönüştürülmekte ve bugün ikincil alüminyum, dünya alüminyum tüketiminin üçte birini oluşturmaktadır.

Geri dönüşümün başlangıç nedeni çevresel faktörler olsa da ekonomiyi de yakından ilgilendirmiştir. Alüminyum geri dönüşümünde önemli ölçüde enerji kazancı vardır. Birincil alüminyum üretiminde kullanılan enerjinin %5 'i kadarı, geri dönüşüm için yeterli olmaktadır. Batı ülkelerinde alüminyum geri dönüşümü büyük ölçüde uygulanmakta olup, alüminyum içecek kutularının yaklaşık %60'ı geri dönüştürülmektedir. Bu oranın %85'i inşaatta, %95'i ise taşımacılıkta kullanılmaktadır (Lumley, 2010).

Alüminyum, tekrar tekrar geri dönüştürülebildiği ve malzeme kalitesinden bir şey kaybetmediği için de yüksek bir hurda değeri vardır. Ortaya çıkanın hurdanın yaklaşık %100'lük kısmı alüminyum ürünleri üretmek üzere geri dönüştürülür (Lumley, 2010).

İkincil alüminyum hurda kaynakları arasında yeni üretim kesintileri, kullanılmış alüminyum ürünleri, işleme talaşı ve eritme işleminde üretilen cüruflar sayılabilir. Her bir hurda kategorisinin kimyasal bileşimi, nihai kullanım ürünü için uygun endüstriyel sektörün belirlenmesini sağlar. Silikon içeren alüminyum döküm alaşımlarının kirlilik limitleri dövme alaşımlarından daha geniş olduğundan, daha fazla çeşitlilikte hurdaya sahip olabilirler (Lumley, 2010).

5.4. Alüminyum Kullanım Alanları ve Avantajları

Alüminyum dövme ve dökme işlemlerinin her ikisi için de uygun bir metaldir. Dövme, sıcak ve soğuk haddelenmiş sac, levha, çubuk, tel ve folyo işlemlerini kapsar. Alüminyumun yumuşaklığı ve işlenebilirliği, karmaşık parçaların, I ve H profiller gibi uzun ve yapısal parçaların, dirseklerin, bağlantı parçalarının, borular ve kanalların ekstrüzyon işlemi ile üretilmesine uygundur. Kolay parçaların üretimi, hızlı ve ekonomikliğinden dolayı sıcak ve soğuk dövme işlemi yaygın olarak uygulanmaktadır (Mathers, 2002).

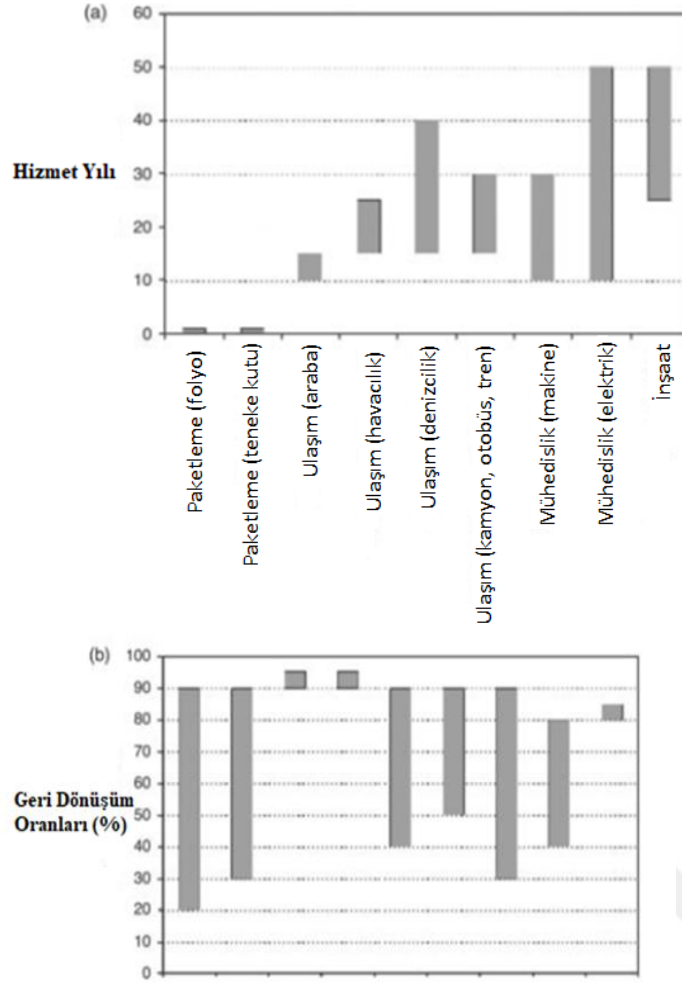
Tablo 5.1. Alüminyum Endüstrisi ve Alternatif Olduğu Malzemeler

Sektör	Önemli Kullanım Yerleri	Alternatif Olduğu Malzeme
Ulaşım	Radyatörler Motor Parçaları Kaportalar	Bakır / Pirinç Dökme Demir Galvanizli veya Kaplamalı Saclar
Uçak / Uzay	Yapı Elemanları Uçak Gövdeleri	Çelik / Plastik / Magnezyum Karbon Elyafı / Kompozitler
Tren	Yolcu ve Yük Vagonları	Çelik
Deniz Araçları	Tekne Gövdeleri	Ağaç / Cam Elyafı / Çelik
İnşaat	Duvar Kaplama Çatı Kaplamaları	Ağaç / Çelik / Plastik Ağaç / Galvanizli Çelik / Kurşun Plaka
Ambalaj	Meşrubat Kutuları Konserve Kutuları Aerosol Kutuları Folyo Kapaklar	Teneke / Plastik / Cam / Kompozit Teneke Plastik / Kağıt Plastik / Teneke
Elektrik	İletkenler Baralar Transformatörler Jeneratörler Telefon Kabloları	Bakır
Makine	Yataklar Isı Eşanjörleri Hidrolik Sistemler	Döküm Malzemeler Bakır / Paslanmaz Çelik
Dayanıklı Tüketim Malları	Buzdolapları / Klimalar	Özel Çelikler / Bakır / Plastik
Diğer Uygulamalar	Sulama boruları, ziraat aletleri, kimyasal tesisler	Dökme Demir / Çelik / Plastik Paslanmaz Çelik

Kaynak: <http://www.kalkinma.com.tr/data/file/raporlar/ESA/ga/2006-GA/GA-06-07>

08 Alüminyum Sektörü Hakkında Bir Değerlendirme.pdf; Erişim tarihi: 10 Ekim 2018

Genel olarak alüminyum, taşımacılık, havacılık, askeriye, uzay, kimyasal, yiyecek, paketleme, ev gereçleri, otomotiv sanayi, elektrik gibi çok geniş alanda kullanıma sahiptir (Mathers, 2002).



Şekil 5.4. Alüminyum Kullanım Alanları (Lumley, 2010, s. 52)

5.5. Alüminyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Alüminyumun fiziksel ve kimyasal özellikleri özetlenecek olursa;

- Hafiflik
- Termal iletkenlik
- Elektrik iletkenliği
- Yüzey işlemlerine elverişli olması
- Korozyon direnci
- Alüminyum alaşımlarının çeşitliliği
- Yarı mamul çeşitliliği
- Preslenmiş ve dökme yarı mamullerin fonksiyonel avantajları

- Alüminyumun şekillenebilme kolaylığı gibi özellikleri ile alüminyumun, metal sektöründe rekabet edebilir olması için, malzeme maliyetinin birinci etmen olmadığı pazarlar için, alaşım ve malzeme işlenirliği konusunda uzmanlaşmayı sağlamak gerekmektedir (Vargel, 2004).

5.5.1. Alüminyumun fiziksel ve mekanik özellikleri

Alüminyumun hafif bir metal olması, çelik ve diğer demir dışı metallere göre mukavemet/ağırlık oranı açısından daha iyi özellikte bir metal olması açısından kullanım alanı çok geniştir. Yüksek ısı iletimi vardır ve elektrik iletkenliğinin oldukça yüksek olması, bakırdan sonra ikinci sırada aranan bir metal olmasını sağlar. Düşük sertlikte olması, soğuk ve sıcak olarak şekillendirilebilmesi, talaşlı/talaşsız imalata elverişli olması kolay şekil verme avantajı sunmaktadır.

Tablo 5.2. 20°C’de Metallerin Karşılaştırmalı Fiziksel, Kimyasal ve Mekanik Özellikler

Özellik	Alüminyum	Demir	Nikel	Bakır	Titanyum
Kristal Yapı	FCC ³⁰	BCC ³⁰	FCC ³⁰	FCC ³⁰	HCP ³⁰
Yoğunluk (g/cm ³)	2.7	7.85	8.9	8.93	4.5
Ergime Noktası (°C)	660	1536	1455	1083	1670
Özısı (J/kgK)	930	448	440	385	470
Termal İletkenlik (W/mK)	235	79.6	92.1	389.4	15.5
Termal Genleşme Katsayısı (Δl/l°C)	23.9 x 10 ⁻⁶	12 x 10 ⁻⁶	1 x 10 ⁻⁶	16.5 x 10 ⁻⁶	8.2 x 10 ⁻⁶
Elektrik Direnci (μΩcm)	2.65	9.7	6.8	1.67	55
Elastisite Modülü – Young’s Modulus (N/mm ²)	6.7 x 10 ⁴	21 x 10 ⁴	21 x 10 ⁴	12.4 x 10 ⁴	10.8 x 10 ⁴
Nihai Çekme Mukavemeti (N/mm ²)	65	235	300	210	245

Kaynak: (Mathers, 2002)

Tablo 5.3. Alüminyumun Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Özellik	Birim	Değer	Not
Atom Numarası	13		
Anahtar İzotop	²⁷ Al		
Periyod	3		
Blok	P		
Kristal Yapı			FCC (Face Centered Cubic)
Ortam Sıcaklığında Faz Durumu	Katı		25°C'de
Ergime Noktası	°C	660.45	<1013 x 10 ⁻³ bar
Kaynama Noktası	°C	2056	<1013 x 10 ⁻³ bar
Ortalama Özgül Isı	cal/g. °C	0.219	0-100°C
Termal İletkenlik	cal/cms. °C	0.57	0-100°C
Doğrusal Genleşme Katsayısı	x10 ⁻⁶ /°C	23.5	0-100°C
Ortam Sıcaklığındaki Elektrik Direnci	Ω.cm	2.69	25°C'de
Yoğunluk	Kg.m ⁻³	2.6898	
Boylamsal Elastisite Modülü	MPa	69000	
Zehir Oranı		0.33	
Elektron Konfigurasyonu	[Ne] 3 s ² 3p ¹		
Kütle İç Enerjisi	j.Kg ⁻¹	3.98 x 10 ⁵	
Kütle Termal Kapasitesi	j.Kg ⁻¹ . K ⁻¹		25°C'de
Buhar Basıncı	Pa	3.7 x 10 ⁻³	927°C'de
Atom Ağırlığı	g/mol	26.98	

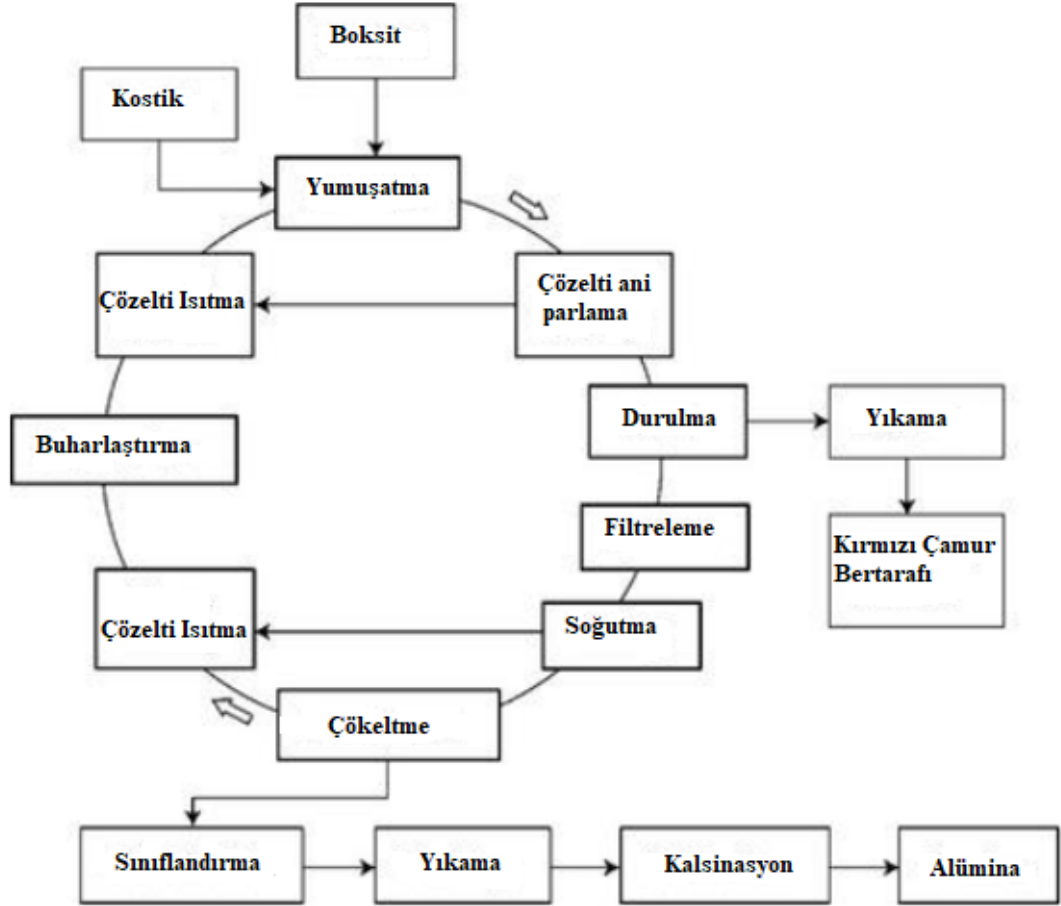
Kaynak: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2863>, (Aluminum Association,1984), (Vargel, 2004, (Mathers, 2002).

5.5.2. Alüminyumun kimyasal özellikleri

Alüminyum, oksijene olan yüksek kimyasal ilgisinden dolayı yer kabuğunda metal olarak bulunmaz (Totten ve MacKenzie 2003). Yer kabuğundaki üçüncü en bol element olan alüminyum, doğada silikon ve oksijen (yani alüminyum silikat olarak) ile bir arada bulunur. Tropikal hava koşullarına maruz kaldığında, alüminyum silikat, alüminyum hidroksit oluşturmak için reaksiyona girebilir. Yüksek konsantrasyonlarda alüminyum hidroksit içeren kayaya boksit denir. Bu kaya alüminyum üretimi için alışılmış başlangıç malzemesidir. Bayer prosesi ile

boksitten çıkarılan metalürjik dereceli alümina (Al_2O_3) genellikle cevher olarak adlandırılır (Vargel, 2004).

Bayar prosesi, yumuşatma, temizleme, çöktme ve kalsinasyon adımlarından oluşan bir yöntemdir.



Şekil 5.5. Boksitten Alümina Üretim Süreci (Vargel, 2004)

Tablo 5.4. Genel Olarak Boksit İçerisinde Bulunan Oksitli Alüminyum Minerallerinin Başlıcaları

Mineraller	Kimyasal Bileşim
Gibbsit	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Böhmit	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Diasporit	$\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Brokit	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Alüminyum Silikat	$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Korundum	Al_2O_3

Kaynak:(Totten ve MacKenzie 2003), (https://metalurji.org.tr/dergi/dergi153/d153_2027.pdf, Erişim tarihi: 15 Haziran 2018)

Birincil alüminyum, normalde %99'dan %99.9999'a kadar değişen bir çeşitlilik kademesinde üretilir. Farklı üretim yöntemlerine cevap veren üç farklı tip vardır:

1. Ticari olarak saf alüminyum, elektrolitik hücrede Al_2O_3 'ün indirgenmesinden gelen metaldir ve ticari üretimin bir parçasıdır. %1'e kadar kirlilik içerebilir ve çok nadiren %99,9'u geçebilir.
2. Rafine alüminyum, üç katmanlı hücrede ticari olarak saf metalin elektrolyt ile inceltmesiyle üretilir. Saflık %99,9'dan %99,99 +a kadar değişmektedir.
3. Zonlu rafine alüminyum, zon rafinasyonu ile üretilir ve uygun başlangıç materyali tekniğiyle, bir ppm'den az kirlilik içeren metal üretebilir. Bu saflık, organik banyolardan elektrolizle çöktürülmüş zon rafine metal tarafından üretilir (Mondolfo, 2013).

Alüminyumu saflık derecesi için genel bir adlandırma olmasa da aşağıdaki tablodaki adlandırma uygun olacaktır (Aluminum Association, 1984):

Tablo 5.5. Alüminyum Saflık Derecesi

Alüminyum, %	Anma Adı
99.50 – 99.70	Ticari Saflıkta
99.80 – 99.949	Yüksek Saflıkta
99.950 – 99.9959	Süper Saflıkta
99.9960 – 99.9990	İleri Düzeyde Saflıkta
99.9990 üstü	Aşırı Saflıkta

Kaynak: (Aluminum Association, 1984)

Alüminyum üzerinde doğal olarak gelişen oksit tabaka (pasivasyon tabakası), alüminyumun elektrolitik potansiyeline büyük ölçüde etki etmektedir. Yüzeyinde doğal olarak oluşan oksit tabakası sayesinde birçok atmosferik ortam ve kimyasal ortamda korozyon dayanımı mükemmeldir

5.5.2.1. Alüminyum yüzeyindeki pasivasyon tabakasının karakteristiği

Alüminyumun üzerinde doğal olarak oluşan oksit tabakası, az ya da çok hava geçirmez bir izolasyon sağlayarak, metalin hava veya oksijen ile temasını bloke etmektedir. Başka bir deyişle alüminyumun yanması ve oksitlenmesi iki rakip işlem sayılabilir (Vargel, 2004).

Bir başka deyişle, alüminyumun atmosfer ile teması sonucu yüzeyinde oluşan oksit tabakası inert ve koruyucudur. Bu nedenle katı alüminyum, eğer toz halinde değilse, yanma ya da patlama riski taşımaz. Ancak toz halinde ise, tutuşma sıcaklığına geldiğinde aniden okside olur.

Alüminyum sıvı halde iken, sıcaklık artışı ile birlikte yüzeyindeki oksit tabakası kırıldığında, oksijen, tabakanın altından gelen taze sıvı metal ile temas ettiğinde risk başlar (Car ve ark., 2017)

Pilling-Bedworth oranı (PBO), metallerin oksitlenmeye olan yatkınlığını belirlemede kullanılan önemli bir parametredir.

$PBO_{\text{metal}} = \text{oksitlerin hacmi} / \text{metalın hacmi}$

$PBO_{\text{alaşım}} = B_xO_y$ alaşımının bir molünün hacmi/alaşım içindeki x mol B elementinin hacmi bağıntısı ile tanımlanır.

$PBO < 1$ ise poröz oksidasyon tabakası, sürekli oksidasyon, oluşan oksit tabakası ardıcıl oksidasyonları önleyecek bir tabaka oluşturmaz (örneğin Na, Mg),

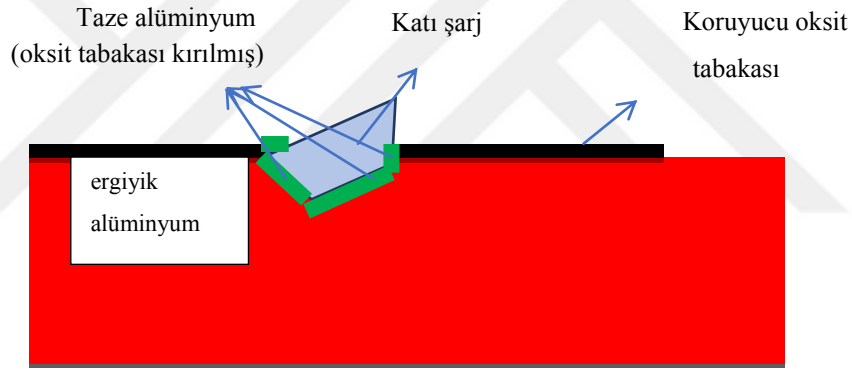
$1 > PBO > 2$ yoğun oksit tabakası, pasivasyon, oluşan ince ve sert oksit tabakası tüm yüzeyi kaplar ve ardıcıl oksidasyonlardan korur (örneğin Al, Ti, Cr),

PBO>2 oksit tabakası çok kalın gelişir ve kırılımandır, kırık aralıklarından oksitlenme sürekli devam eder (örneğin Fe).

Tablo 5.6. Bazı Elementlerin Piling Bedworth Oranları

Element	PBO
Cu	1,74
Fe	2,18
Ni	1,50
Mg	0,81
Al	10,27
Zn	1,64
Pb	1,27
Sn	1,33
Ca	0,65
Na	0,58
K	0,45
Be	1,68
Si	1,88

Kaynak: (Car ve ark., 2017)



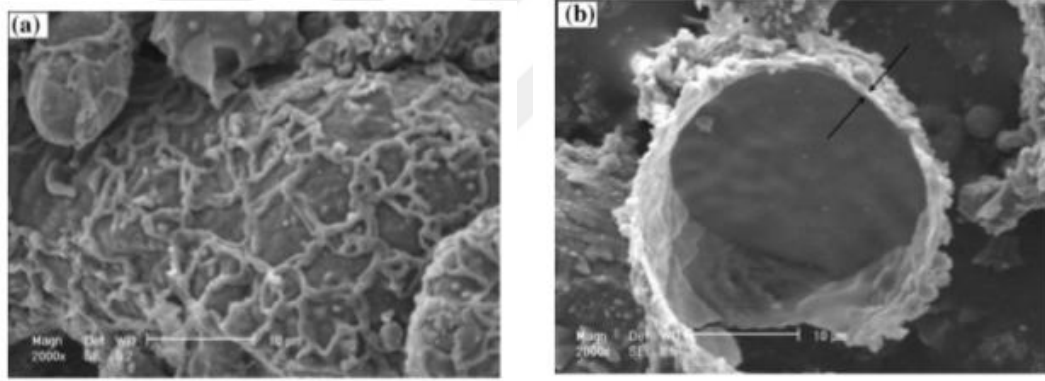
Şekil 5.6. Katı Şarj ile, Alüminyum Üzerindeki Oksit Tabakasının Kırılması (Car ve Ark., 2017)

5.5.2.1.1. Alüminyum toz partiküllerindeki pasivasyon tabakasının karakteristiği

Aşamalı toz yanma prosesi, alüminyum gibi bazı metaller durumunda olduğu gibi bir katı, bir dış oksit tabakasının ek komplikasyonunu içerebilir (Barton, 2002).

Hasani ve arkadaşlarının, 25–1400°C sıcaklık aralığında saf alüminyum tozu partiküllerinin oksidasyon sürecinin mekanizması üzerinde çalışması neticesinde şu sonuçlar çıkmıştır. Alüminyum tozlarının oksidasyonu farklı aşamalarda meydana

gelmiştir. İlk aşamada, oksidasyon oranı önemsiz seviyededir; buradaki amorf¹⁴ oksidasyon tortusunun, alüminyum bu limite kadar tamamen koruduğu gözlenmiştir. Devamında, amorf oksit tortusu, sıcaklığı 600 °C'ye kadar yükseltmek suretiyle kristalin faza dönüştürülmüş ve kristalizasyon yoluyla kabuğun yapısında tane sınırının oluşması nedeniyle, oksidasyon oranı artmıştır. Ancak, 700 °C'ye kadar sıcaklığı arttırarak, oksidasyon sürecinin etkisi ile difüzyon yolları yok edilmiş, böylece oksidasyon oranı aniden azaldığı gözlenmiştir. Dolayısıyla, oksidasyondan kaynaklanan belirgin bir kütle kazanım artışı meydana gelmemiştir. Ayrıca, bu aşamada, partiküllerde bulunan kalan alüminyum eritilmiştir ve devamında, kabuk içindeki ergiyik alüminyum, sıcaklık artışı ile genleşmiştir. Ayrıca bu aşamada, tortuda büzülme meydana gelmiştir. Ergimiş alüminyumun bu şekilde genişlemesi ve tortunun büzülmesinden dolayı, kabuk üzerinde yoğun bir gerilim yaratmıştır. 1000-1150°C sıcaklık aralığında ergiyik alüminyum tortuyu yırtmış ve dışarı sızmıştır (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. 20 C / dk Isıtma Oranıyla Maksimum 1.400 °c Sıcaklıkta Oksitlendikten Sonra Alüminyum Partikülleri; (a) Eriyik Alüminyumun Oksit Kabuğunun Dışına (Özellikle Tane Sınırlarında) Nüfuz Etmesi ve Kabuğundan Çıktıktan Hemen Sonra Oksidasyonu (b) Bir Alüminyum Parçacığının Patlaması ve Yırtılmış Oksit Kabuğunun Kalan Kısmı (Hasani ve ark., 2012)

Bu eriyiğin oksit atmosferi ile teması yoğun bir oksidasyona neden olmuştur. Saf alüminyum toz partiküllerinin oksidasyonu bu aşamada gerçekleşmiştir. Bu nedenle, tüm aşamalardaki sıcaklık göz önüne alındığında, alüminyum parçacıklarının yüzeyindeki oksidasyon mekanizmasının kontrollü difüzyon olduğu sonucuna varılabilir. Öte yandan, alüminyum partiküllerinin tam oksidasyonunun da

¹⁴Amorf: Düzensiz, gelişigüzel istiflenen katı tanecikler

1,400 °C'ye kadar gerçekleşmediği sonucuna varılabilir. Ancak, oksidasyonun toplam değerinin ısıtma oranıyla değiştirilebileceği eklenmesi gerekir (Hasani ve ark., 2012).

5.5.3. Mukavemet artırılması için alüminyum alaşımları

Alüminyum döküm kalıp tasarımında, ergiyik alüminyumun katılaşması esnasında %3,5 ile %8,5 arasındaki hacimsel büzülme oranı göz önüne alınmalıdır. Alüminyum alaşımlarının bazıları ısıtma işlemine tabi tutularak daha üstün mekanik özelliklere kavuşturulabilmektedir (Demir, 2008).

Tablo 5.7. Alüminyum Döküm Alaşımlarının Ticari Sınıflandırması

Temel Alaşım Elementi	Sınıflandırma*
Al \geq %99 saflık	1xx.x
Bakır	2xx.x
Manganez	3xx.x
Silisyum	4xx.x
Magnezyum	5xx.x
Magnezyum-Silisyum	6xx.x
Çinko	7xx.x
Diğer elementler	9xx.x

Kaynak: (https://www.aluminum.org/sites/default/files/TCPS_Technical_Procedure_Manual_April_2015.pdf, Erişim tarihi: 26 Kasım 2018)

*Minimum alüminyum içeriği yüzde 99,00 ve daha büyük olarak belirlendiğinde, atanan atama 1xxx grubunda olacaktır. Diğer tüm alaşımlar 2xxx ile 8xxx arası alaşım gruplarına uygundur. 2xxx ile 8xxx alaşım gruplarına atama, en büyük ortalama yüzdesinde bulunan alaşım elementi (veya Mg ve Si kombinasyonu) ile belirlenir.

5.5.3.1. Alüminyum – silisyum – magnezyum döküm alaşımları

Otomotiv sanayinde, alüminyum-silisyum alaşımları hafiflik, yüksek mukavemet, yüksek ısı iletkenliği ve düşük ısıl genleşme özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Kullanılan alaşımlarda yorulma, darbe dayanımı, mukavemet, işlenebilirlik ve mikro yapı büyük önem arz etmektedir (Demir, 2008).

Alüminyuma silisyum ilavesinde temel amaç, döküm karakteristiğinin geliştirilmesinin yanı sıra korozyon dayanımı ve mekanik özelliklerinin de kuvvetlenmesidir. Magnezyum ise alaşımın akma ve kopma mukavemet değerleri üzerinde önemli rol oynar (Demir, 2008).

Al-Si alaşımlarında, yapının güçlendirilmesi için az miktarda magnezyum, bakır ve nikel de ilave edilmektedir. Silisyum döküm özelliklerini iyileştirirken, akma ve koma mukavemet artırımını magnezyum ile sağlanmaktadır (Mondolfo, 2013).

5.5.4. Toz halinde alüminyum

Bilyalı öğütme tekniği ile mekanik alaşımlama (MA) amorf alaşımlar, intermetalik¹⁵ bileşikler, yarı kristal malzemeler, nanokompozit¹⁶ ve kompozit¹⁷ malzemeler dahil olmak üzere karmaşık malzemeler üretmek için büyük ilgi çekmiştir. Toz metalurjisi tekniğinin bir parçası olan MA, diğer geleneksel ergitme veya döküm tekniklerine kıyasla basit ve düşük maliyetli bir imalat metodu içerir. John Benjamin, daha sonra kontrollü mikro yapıya sahip tozları üretmek için yaygın olarak kullanılan MA'yı icat etmiştir. MA sürecinin temel mekanizması bilyalar ile toz çarpışmasını içerir. MA prosesi sırasında, toz partikülleri çarpışan bilyalar ve konteyner arasında sürekli olarak sıkışır. Bu yüksek enerji etkisi, tekrar tekrar deformasyona, soğuk kaynak ve toz partiküllerinin kırılma işlemine yol açarak mekanik ve fiziksel özelliklerini artırır. Bu süreçler, kararlı durumuna ulaşılan kadar sürekli olarak devam ederler. Bu denge durumu, kaynaklama oranı (ortalama parçacık büyüklüğü artma eğilimi) ile kırılma oranı (ortalama parçacık büyüklüğü azalma eğilimi) arasında bir denge reaksiyonunu ifade eder (Jamal ve ark., 2014)

5.5.4.1. Alüminyum tozunun stabil ve reaktif olduğu durumlar

Alüminyum tozu yandığında, alüminyum oksit oluşacaktır. Herhangi bir tehlikeli reaksiyon ürünü oluşmayacaktır. Doğal olarak oluşan oksit film tabakası, alüminyum yüzeyini koruyacaktır (pH 4,5-8,5 aralığında çözünmez) (https://www.eckart.net/fileadmin/eckart/Service/GDA_Alupulver_Safety_engl.pdf , Erişim tarihi: 9 Ağustos 2017).

¹⁵Intermetalik bileşik: Metal-metal bileşikleridir. Alaşımlardan farklı olarak kararlı bir stokiyometri ve düzenli kristal yapıya sahiptir (http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/57237/31916/1._ders_notu.pdf, Erişim tarihi: 4 Kasım 2018)

¹⁶Nanokompozitler, sürekli bir polimer matris içerisine dağılmış en az bir boyutu 100 nanometreden küçük olan parçacıkları içeren heterofazlı kompozit yapılardır <https://polen.itu.edu.tr/xmlui/handle/11527/12917>, Erişim tarihi: 4 Kasım 2018

¹⁷En az iki farklı malzemenin makro boyutlarda birleşerek oluşturduğu yeni malzemedir (<https://malzembilimi.net/kompozit-malzemenin-kullanim-alanlari.html> , Erişim tarihi: 2 Kasım 2018)

5.5.4.1.1. Tehlikeli reaksiyonlar

- Alüminyum, asitler, alkaliler ve hatta uzun süreli teması halinde su ile reakte olup, oldukça yanıcı hidrojen ortaya çıkacaktır. Bu durumda yangın ve patlama tehlikesi kaçınılmazdır.
- Alüminyumun nitrat, sülfat, halojen ve peroksitler gibi oksidanlarla güçlü reaksiyonu neticesinde yangın veya patlama riski oluşacaktır.
- Alüminyumun halojenlerle ve basit halojenli hidrokarbonlarla, örneğin hidrojen klorid veya hidroklorik asit buharı ile teması ile güçlü bir reaksiyona girecektir (https://www.eckart.net/fileadmin/eckart/Service/GDA_Alupulver_Safety_engl.pdf , Erişim tarihi: 9 Ağustos 2017).

5.5.4.1.2. Sağlık riskleri

- Uzun yıllara dayanan deneyimler, doğru kullanıldığı takdirde herhangi bir zararlı etki oluşturmadığını göstermektedir.
- Alüminyum tozu, göz iritasyonu ve solunum rahatsızlığına neden olabilir (https://www.eckart.net/fileadmin/eckart/Service/GDA_Alupulver_Safety_engl.pdf , Erişim tarihi: 9 Ağustos 2017).

5.5.4.1.3. Hijyen

- Alüminyum ile çalışmada hijyene dikkat edilmelidir: Çalışma sırasında yeme-içme, sigara kullanımına izin verilmemelidir.
- Alüminyum teması var ise su ve sabunla cilt temizliği yapılmalıdır. Çalışma kıyafetlerine bulaşması durumunda veya iş yerinden ayrılmadan önce kıyafet değişimi yapılmalıdır (https://www.eckart.net/fileadmin/eckart/Service/GDA_Alupulver_Safety_engl.pdf , Erişim tarihi: 9 Ağustos 2017).

5.5.4.2. Alüminyum tozu üretimi-toz metalurjisi (T/M) ve avantajları

Toz metalurjisi, özellikle hassas, karmaşık şekilli ve üretimi zor ve maliyetli parçaların üretiminde, diğer üretim yöntemlerine göre kısa üretim süresi, yüksek kalitede malzeme üretimi gibi ekonomik nedenlerle en çok tercih edilen üretim tekniklerinden biridir. Son üretimdeki malzeme hassasiyeti, mukavemeti ve kalitesi

dışında, piroteknik özellikleri olarak direkt toz malzeme olarak da özellikle savunma sanayi ve kimya endüstrisinde de büyük oranda kullanılmaktadır.

Dezavantaj olarak, boyut ve ağırlık sınırlılığı nedeni ile kullanım kısıtları sunsa da T/M'nin başlıca avantajları şu şekilde özetlenebilir:

- Yüksek kalitede ve eşsiz özellikte, neredeyse sınırsız sayıda alaşım ve kompozitmalzeme üretmek mümkündür;

T/M, son ürün üretim yöntemi olmasının yanı sıra, özellikle piroteknik özellikleri nedeni ile önemli bir malzeme ve yarı mamul üretim yöntemidir. Periyodik cetvelde metal olarak kabul edilebilen 86 kadar elementten yaklaşık 8000 kadar alaşım üretilebilmiştir. Halbuki bu 86 elementten ikili, üçlü, dörtlü gibi farklı kombinasyonlarla 1025 mertebelerinde alaşım üretebilmek mümkün olabilir. Bunu mümkün kılabilen yegane yöntem olarak T/M ortaya çıkmaktadır (Zeytin, 2000).

- Porozitenin kontrolü avantajı;

Segregasyon¹⁸ ve gaz absorpsiyonu gibi nedenlerle meydana gelen döküm hatalarının minimizasyonu.

- İstenen mikroyapıda, fiziksel ve mekanik özelliklerde malzeme üretimine imkan verir;
 - Alaşım ile istenilen mekanik ve fiziksel özellikte, istenilen partikül büyüklüğünde malzeme üretimi imkanı.
 - Neredeyse sınırsız şekilde parça üretimi
 - Malzeme seçiminden, nihai ürüne kadar aradaki kademelerde üretim optimizasyonu avantajı (Zeytin, 2000).
- Üretim döngüsünün kısaltılmasına olanak verir;
 - Son ölçülerde parça üretimi mümkün olduğu için talaş, çapak vs. gibi artıklar yoktur,

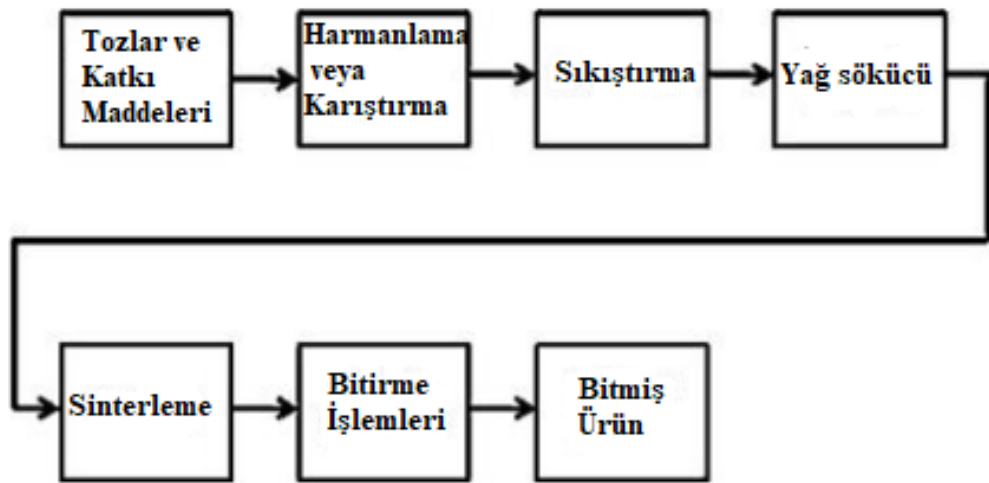
¹⁸ **Segregasyon** Çelik döküm üretimine has bir katılaşma olayıdır. Bu durumu önlemek için, oksijenle ilgileri karbonunkinden daha fazla olan Al ve Si (%0,15 oranında) eklenir (<http://www.dokumtek.com/segregasyon-nedir/> , Erişim tarihi: 2 Kasım 2018)

- Döküm, dövme ve talaşlı imalat gibi yöntemlere nazaran metal işleme/şekillendirme maliyet oranı açısından daha avantajlı yöntemdir (Zeytin, 2000).

Metal tozu üretimi, genel ve geleneksel yaklaşım olarak, nihai ürün üretiminde, diğer üretim metotlarına göre daha ekonomik olması dolayısı ile oldukça yaygın olarak kullanılan bir üretim şeklidir. Alüminyum tozu üretiminde ise tercih sebebi ekonomik olmasından dolayı değil, başka sebeplere dayanmaktadır. Öyle ki alüminyum nihai ürün üretimi, diğer metotlara kıyasla daha ekonomik olabilmektedir. Bu sebepler, bileşik oluşturmak için hızlı katılaşması ve *dispersoid* ilavesi olarak belirtilebilir (Totten ve MacKenzie 2003).

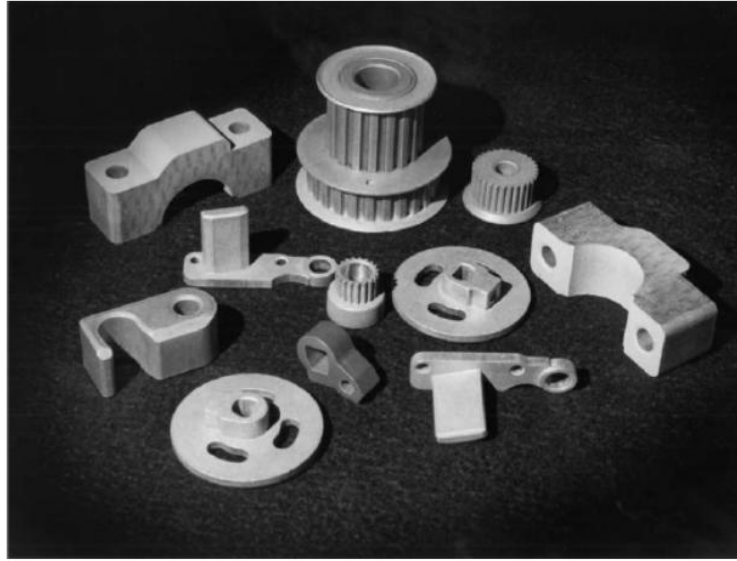
Çeşitli tekniklerle üretilen alüminyum tozu, üretim metoduna göre farklı fiziksel ve metalurjik karakteristiğe sahiptir. Ayrıca, çeşitli metalurjik üretim yöntemleri ile oldukça büyük yapıdaki bileşenlere takviye edilebilir (Aluminum Association, 1984).

Konvensiyonel pres ve sinter alüminyum tozu metalurjisi karmaşık parçaların şekillendirilmesi adına, kalıp sıkıştırma ve sinterleme yoluyla geliştirilmiş bir üretim şeklidir (Lumley, 2010).



Şekil 5.8. Pres ve Sinterleme Toz Metalurjisi Rotası (Lumley, 2010)

İleri alüminyum alaşımları, alaşım elementlerindeki mekanik özellikler ile ani katılma özelliğinin birleştirilmesi ile yüksek mukavemet, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımı gerektiren çalışmalar için kullanılan maddelere, ağırlıkça daha hafif bir alternatif olarak tasarlanmıştır. Örnek olarak, havacılıkta orta sıcaklık uygulamalarında kullanılan titanyum alaşımlarının yerini alabilecek yüksek sıcaklıkta alüminyum alaşımlar geliştirilmiştir (Totten ve MacKenzie 2003).



Şekil 5.9. Konvensiyonel Pres ve Sinterleme Tekniği İle Üretilmiş Çeşitli Parçalar (Totten ve Mackenzie 2003).

5.5.4.3. Alüminyum tozunun kullanım alanları

Alüminyum, alüminyum metali özelliğinden daha çok toz halindeki karakteristik özellikleri nedeni ile yaygın bir kullanım alanına sahiptir.

İnce alüminyum tozunun oksidasyonu ekzotermiktir ve geniş yüzey alanı nedeniyle reaksiyon hızla gerçekleşir. Sonuç olarak, patlayıcılarda alüminyum tozu kullanılmaktadır. Roket fırlatmada oksijenle birleşmiş alüminyum tozu kullanılır. Diğer kullanımlar arasında çelik ve demir döküm endüstrisinde sıcak presler, çeliğin oksit giderme işlemi ve alüminyum kimyasalların üretimi yer alır. Alüminyum tozunun kullanımı en çok toz metalurjisinde artış göstermektedir. Daha gelişmiş bir şekilde toz oluşturma süreçlerine önderlik etmektedir. Hızlı katılma teknolojisi, metal matrisli kompozitler ve mekanik alaşımlar, örneğin, toz ekstrüzyonu,

haddeleme ve dövme ile birleştirildiğinde yeni alaşımlar ve malzeme formları yaratma fırsatları ortaya çıkarmaktadır. Bunlar, havacılık, otomobil ve diğer endüstriler için daha çekici olan özel yapım özelliklere sahip metal alaşımlarıdır. Özellikle patlayıcılar ve roketler için alüminyum tozunun birçok kullanımında yer alan enerji, bu ürünün üretim, depolama ve kullanım sırasında ele alınması gereken potansiyel olarak tehlikeli doğasını göstermektedir (Neikov ve ark., 2009).

Kullanım alanına göre alüminyum tozunu sınıflandıracak olursak; (Totten ve MacKenzie 2003), (Lumley, 2010), (Neikov ve ark., 2009).

Metalurji Endüstrisi – Direkt Kullanım

- Aluminotermi reaksiyon
- Alaşım
- Pres ve sinter toz prosesi ana parçaları
- Dövme toz metalürjisi ürünleri
- Çelik yapımı
- Çelik parçalar ve kabloların kaplanması

Demir metalurjisinde alüminyum tozlar (granüller) bir indirgeme maddesi olarak kullanılır. Alüminyum tozları, külçenin yükseltici kısmını demirli metallerin dökümünde ısıtmak için de kullanılır. Döküm açıklığı ve yükselticinin etrafında eritilmiş ve yanma sırasında tutuşan oksitlerin ve alüminyum tozlarının bir karışımı, sıvı halde döküm metalini uzun süre korur, böylece katılaştan külçeyi besler ve büzülme boşlukları oluşumunu engeller (Neikov ve ark., 2009).

Piroteknikler (Aluminotermi)

Alüminyum tozu sıklıkla etkiyi artırmak için patlayıcı ve itici bileşimlere eklenmektedir.

Toz ve *flake* (pul) alüminyum, maden endüstrisinde kullanılan birçok endüstriyel patlayıcı içerisinde kullanılır (amonal, amonit, alum trinitrotoulen) (Neikov ve ark., 2009). Yüksek bir enerji taşıyıcısı olarak, alüminyum özellikle

patlama transformasyonu için patlayıcının ısısını yükseltir ve patlama işleminin verimliliğini artırır (Vadhe ve ark., 2008).

i. Roket yakıtı / itici patlayıcı (kuvvetli patlayıcı madde)

Alüminyum, başlıca itici maddeler arasında çeşitli şekillerde benzersizdir:

- Yanan yüzeyde buharlaşmaz. Kaynama noktası 2467 °C'dir (basınca bağlı olarak).
- İtici yanma yüzeylerinin olağan sıcaklığı, 600 °C, alüminyumun 660°C'lik erime noktasının 60 derece altındadır.
- Yoğunluğu yaklaşık 2,70 (özgül ağırlık) ve tipik hidrokarbon bağlayıcıların 3 katıdır.
- Termal iletkenlik 0.503 cal / cm s °C, tipik hidrokarbon bağlayıcıların 1400 katıdır.
- Isıl kapasitesi 0.214 cal / g °C ve tipik hidrokarbon bağlayıcıların 0.46 katıdır.
- Parçacık yüzeyleri, partikül kütesinin yaklaşık %0,5' ini oluşturan (25µm partiküller için) Al₂O₃'lerin (Alüminyum Oksit) (erime noktası 2072 °C) dayanıklı bir refrakter kaplaması ile kaplanır.
- Alüminyum Oksit tabakası bozulduktan sonra, Al yanma bölgesinde aşırı derecede reaktiftir, ancak bu oran düşük buhar basıncı (yüksek kaynama noktası) ile sınırlıdır.
- Her ne kadar yanma yüzeyindeki kalma süresinde bir miktar oksidasyon meydana gelebilse de çoğu koşullar altında, önceki özellikler, alüminyumun itici alevler içerisinde her zamanki yanma bölgesinin içinde ve ötesinde sıcak sıcak gaz fazı bölgesindeki damlacıklar gibi öncelikli olarak yanmasını sağlar.
- Yüksek sıcaklıklarda, Al ve Al₂O₃ çözünmez olduğundan, damlacıklar, damlacıklardan loblara ayrılma eğilimi gösterecektir, bu sebeple damlacıklar Al ve ergiyik Al₂O₃ içerebilir (Price ve ark, 2000)

Alüminyumun yüksek yoğunluğu, oksidasyon sırasında meydana gelen yüksek ısı salınımı, düşük maliyetli olması nedeni ile özellikle mermi füzesi ve uzay fırlatma aracı patlayıcılarında katı roket yakıtında kullanılır (Price ve ark, 2000).

Alüminyum tozu uzay ve askeri uygulamalarda, özellikle roket yakıtının güçlendirilmesinde olmak üzere oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir. Alüminyum tozu, katı iticilerin yanmasıyla salınan oksitleyicilerle reakte olur ve bunun neticesinde sıcaklıkta yükselme olurken, karışım moleküler kütlelerinde düşüş meydana gelir. Bu sebeple, yaklaşık kütlelerin %15-20'si civarında alüminyum, bu iticiler içerisine karıştırılır. Genel olarak 100 µm ve üzerindeki alüminyum tozları, yayılan alevin ısıyla buharlaşarak, bir oksidanla (genelde itici atmosferindeki CO₂ veya H₂O) buhar fazında yanma gerçekleştirir (Price ve ark, 2000).

ii. Askeri amaçla kullanılan kuvvetli patlayıcılar (TNT, RDX, HMX vb.)

RDX ve HMX geleneksel TNT bazlı döküm bileşimlerinde üstün ısı formasyonu, oksijen dengesi ve yoğunluğa bağlı olarak patlayıcı bileşiğin detonasyon hızına büyük oranda katkı sağlamaktadır (Vadhe ve ark., 2008).

RDX ve HMX bazlı alüminize bileşimler için çeşitli araştırmacılar, patlamanın hızı açısından, %15-20 Al içeriğinin optimum olarak önerildiğini ileri sürmüşlerdir. Bununla birlikte, daha yüksek bir alüminyum muhteviyatı, alüminyumun detonasyon ürünlerinin ikincil reaksiyonlarının potansiyelinden ötürü, sürekli bir patlama potansiyeli olduğu öngörülmektedir. Alüminyum parçacık büyüklüğünün performans parametreleri üzerindeki etkisi (detonasyon hızı vb.) dahil edilmiştir (Tablo 5.8.) (Vadhe ve ark., 2008).

Tablo 5.8. TNT/Al Sisteminde Alüminyum Partikül Büyüklüğü Etkisi

Alüminyum Konsantrasyonu (%)	Partikül Boyutu (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Hız (km/sn)	Özgül Enerji (kJ/kg)
10	12	1,67	5,72	5307
			6,51	5479
30	21	1,82	5,74	6184
	12		6,23	6519
	2		6,48	6660
			6,63	6749

Kaynak: (Vadhe ve ark., 2008)

Tablo 5.9. Alüminize RDX/HMX/TNT Sistemlerinin Karakteristikleri

Patlayıcı	Yoğunluk (g/cm ³)	Hız (km/sn)	Basınç* (GPa)	Enerji (kJ/mol)	Doğrusal Hız (m/sn)
<i>BileşimB: 59/40/1 RDX/TNT/Wax(Al)</i>	1,68	7,50	29,3	3,35	2680
<i>Cyclotol:70/30 RDX/TNT</i>	1,71	8,06	32,0	-11,6	2710
<i>Dentex:8,5/33,5/18/0,5 RDX/TNT/Al/Wax ve %100 üzerinde parafin ilavesi</i>	1,75	7,78	-	-	-
<i>Torpex:42/40/18 RDX/TNT/Al</i>	1,81	7,60	23,2	0,50	2710
<i>H-6:45.1/29.2/21.0/4.7 RDX/TNT/Al/D2 Wax</i>	1,76	7,49	24,5	-4,56	2620
<i>HBX-1: 40.4/37.8/17.1/4.7RDX/TNT/Al/D2 Wax</i>	1,712	7,31	22,0	8,25	2470
<i>HBX-3: 31.3/29.0/34.8/4.9 RDX/TNT/Al/D2 Wax</i>	1,85	7,53	20,6	8,71	2230
<i>Tritonal:80/20 TNT/Al</i>	1,72	6,52	20,9	22,11	2320
<i>Destex:74.7/18.7/4.7/1.9 TNT/Al/D2 Wax/CB</i>	1,69	6,74	17,9	29,64	□

*Basınç, detonasyon dalgasındaki maksimum basıncı göstermektedir

Kaynak: (Vadhe ve ark., 2008)

iii. Havai fişek (Russell, 2009)

- Tipik bir gümüşi renkte yıldız havai fişegi için formül: barut (ağırlıkça 72%) antimon nitrat (16%), alüminyum tozu (5%) dekstrin (7%)
- Altın renkli yıldız havai fişegi için formül: barut, (58%), alüminyum tozu (4.5%), antimon sülfid (24.5%) sodyum oksalat (6%), dekstrin (7%).
- Çağlayan veya şelale etkisi yaratmak için gerekli formül: Potasyum klorat (%52,2), Potasyum nitrat (%8,7), Kırmızı reçine (%4,3), Alüminyum (%17,4)

🔧 Kimyasal prosesler

Kimya endüstrisinde, alüminyum tozları ve granülleri, asitlerin veya alkalin ortamlarının sulu çözeltilerinde hızla reaksiyona girdiklerinden aktif indirgeyicilerdir. Hidrojen emisyonu ile 1.0 kg alüminyum tozu 1240 L hidrojen verir (Russell, 2009).

🔧 İnşa

- Beton katkı maddesi (Gaz bloğu üretimi)

Gaz bloğu üretiminde gaz üretim katkı maddesi olarak alüminyum kullanımı hızla artmaktadır. Alüminyum tozu, hidrojen üretmek için su ile reaksiyona girdiğinde, oluşan gaz kabarcıkları beton içerisinde sabitlenir. Böylece gözenekli, hafif bir beton üretimi sağlanmış olur.

Granit ve çakıl gibi materyallerin kaynakları azalmakta, bunun yanı sıra beton işlerinde çakıl veya granit kullanımı, yapının ağırlığını artırmaktadır. Bu sebeple, mukavemet ve hafiflik özellikleri nedeni ile inşaat sektöründe hafif betonun uygulanması bu problemlerin üstesinden gelebilmektedir. Hafif beton hafif yapılar üretebilir ve çoğunlukla granit veya çakıl kullanmaz. Bununla birlikte, hafif betonun performansı geçirgenliğine bağlıdır. Betonun yüksek geçirgen olması durumunda, yani, alüminyum tozunun aşırı kullanımı nedeniyle gözeneklerin artması durumunda suyun gözeneklerden içeri girmesi betonun dayanıklılığını azaltacak bir etken olacaktır (Tan, 2015).

Boya pigmenti

Alüminyum tozlar ve macunlar, çeşitli boyalar, vernikler ve emayelerin bileşimlerinde renkli ve koruyucu bir pigment olarak kullanılır. Boyalar elde edilen güzel bir gümüş rengi, ürünleri nemden, ısıdan ve ışıktan korur (Lumley, 2010).

Ulaşım

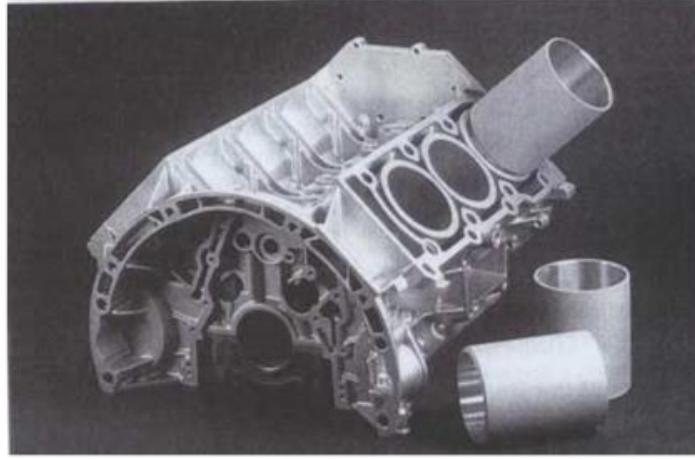
i. Otomotiv

Alüminyum alaşım tozu ile yapılan ekipmanları, alüminyum alaşımları ile aynı spesifik özellikleri gösterecektir. Bu özellikler, özellikle havacılıkta önemli yer tutan düşük yoğunluk, korozyon dayanımı, yüksek ısı ve elektriksel iletkenlik, iyi işlenebilirlik ve birçok son uygulamaya dayanıklı ve uygun olmasıdır. Otomotiv ve havacılık uzay, yol, tren yolu ve hızlı deniz ulaşım araçlarında önemli bir yere sahiptir (Totten ve MacKenzie 2003), (Neikov ve ark., 2009).

Alüminyum, mukavemet, güvenlik ve konfordan vazgeçmeden, hafif olmasında dolayı boyutları küçültmeye gerek kalmayan bir otomobil dizaynında en önemli konstrüksiyon malzemesi olma niteliğindedir. Alüminyumun hafif bir

materyal olması, düşük yakıt tüketimi ve düşük emisyon üretimi açısından da, otomobil ve havacılık endüstrisinde büyük önem kazanmasına neden olan en önemli özelliğidir (Zeytin, 2000).

Alüminyum ve alaşımları otomobillerde genellikle döküm alaşımı olarak, hareket sistemi, motor ve vites gibi parçaların üretiminde kullanılırken, döküm alaşımları dışında levha, profil gibi değişik üretim teknikleri ile üretilmiş parçaları kasa ve soğutma sistemi gibi aksamalarda kullanılmaktadır. Otomobil aşınma aksamlarından piston ve silindir gömleği, piston için alüminyum, silindir gömleği için dökme demir kullanılmaktaydı. Ancak, dökme demirin aşınma özelliklerinde, motor bloklarında gri dökme demirin alüminyum ile aynı termal davranışı göstermesi silindir gömleğinde de alüminyumun kullanılabilceğini göstermiştir (Zeytin, 2000).



Şekil 5.10. Mercedes Benz'in Toz Metalurjisi ile Üretilmiş Silindir Gömleklerine Sahip Motor Karteri (Zeytin, 2000).

ii. Havacılık

Havacılık sanayinde, yüksek yapısal hafiflik, yüksek hasar toleransı ve yüksek dayanım özelliklerini karşılamak için yüksek yapısal dayanım, yüksek yorulma performansı, yüksek şekillendirilebilirlik ve süper esneklik özelliklerine sahip ileri alüminyum alaşımları gerekli olmuştur (Nakai ve Eto, 2000).

Yeni malzemelerin geliştirilmesi ve mevcut malzemelerin daha iyi kullanılması, havacılık mühendisliğinin ilerlemesinde merkezi olmuştur. Uçakların yapısal performansı, güvenliği, yakıt ekonomisi, hızı, menzili ve çalışma ömürlerindeki

gelişmeler, uçak ve motor malzemelerine yapılan iyileştirmelere dayanmaktadır (Mouritz, 2012).

Yeni geliştirilen 2 x 24 alüminyum alaşımlı levhalar, daha az ağırlık, daha yüksek hasar toleransı ve havacılık uygulamaları için daha uzun süreli dayanıklılık sağlamak için mükemmel kırılma tokluğu ve yorulma toleransı özelliklerine sahiptir (Nakai ve Eto, 2000).

1920'lerde ve öncesinde ahşap ile yapımına başlanan uçaklar, daha güçlü motor talebi ile daha büyük gövde ve kanat ihtiyacına neden olmuştur. Kanatlara, kuyruk kısmına ve gövdeye ağırlık artması ile yeterli sertlik, dayanıklılık ve tokluğa sahip olmayan ahşap kullanımı yetersiz kalmış ve yüksek mukavemetli ve hafif materyal arayışını artırmıştır. Bu nedenlerden dolayı, çelik çok ağır olduğu için, 1920'lerde uçak endüstrisi, alüminyum alaşımlarına yöneldi. Hafifliği, yüksek mukavemeti ve ince cidarlı panel, kanat ana kirişi, kanat ve gövde yapımında kolay işlenebilirliği ile kurtarıcı olmuştur (Mouritz, 2012).

Alaşımsız alüminyum, 1900 yılların başında uçak üreticilerine ticari miktarlarda verilmiş, ancak yumuşak olması nedeni ile Zeppelin uçakları haricinde ağır yüklü uçaklarda kullanılamıyordu. Yirminci yüzyılın ilk on yıllarında alaşım elementlerinin eklenmesi ve alüminyumun ısıtma süreçlerinin geliştirilmesi ile alüminyum dayanım özellikleri artırılmaya başlanmıştır (Mouritz, 2012).

Duralumin, 1906'da keşfedilen ve ısıtma ile güçlendirilen bakır (%4,4), magnezyum (%1,5) ve manganez (%0,6) içeren bir alüminyum alaşımıdır. Duralumin, kanatların ve gövde gövdesindeki kaplama, iskelet ve güçlendiriciler gibi yüksek gerilimli uçak yapılarında alüminyumun kullanılmasında bir patlama etkisi yaratmıştır. Alüminyum kullanımı ayrıca, uçakların hızını, menzilini ve boyutlarını, yük taşıma kapasitesini en üst seviyeye çıkarmıştır. Duralumin'in ilk başarısının ardından, devam eden araştırma ve geliştirme çalışmaları sonucunda, Al□ Li alaşımlarının, daha yüksek sertlik, mukavemet, hasar toleransı, korozyon direnci

ve daha düşük bir ağırlığa sahip olması açısından daha iyi mekanik özelliklere sahip olduğu ispatlanmıştır (Mouritz, 2012).

Diğer uygulama alanları:

✚ **Eczacılık**

✚ **Paketleme**

- Kutu teneke
- Elastik paketleme
- Yarı sert konteyner
- Diğer alüminyum paketleme uygulamaları

5.5.4.4. Saf ergimiş alüminyum tozu sınıflandırması

Alüminyum tozu, Alüminyum Birliği (AA – *Aluminum Association*) tarafından üç sınıfta ele alınmıştır: Granül, pul (powder) ve atomize. Granül; 74 µm ‘den daha büyük boyuttaki alüminyum toz partikülleri, pul (*flake*); birbirinden birkaç yüz kat büyük ya da küçük bir veya iki farklı boyutta partikülleri, atomize ise aynı boyutta dizilime sahip tozları ifade eder (<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Safe%20Handling%20of%20Powder%20and%20Paste.pdf>, Erişim tarihi: 13 Nisan 2018).

(1)



(2)



(3)



Şekil 5.11. (1) Alüminyum Pasta, (2) Alüminyum Pul, (3) Alüminyum Granül

Alüminyum ganül tozu, saf eriyik alüminyum metalden elde edilen granül bir tozdur. Alüminyum pasta (*paste*), alüminyum tozu veya öğütölmüş pul (*flake*) tozundan ıslak bilyeli öğütme işlemlle üretilir (<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Safe%20Handling%20of%20Powder%20and%20Paste.pdf>, Erişim tarihi: 13 Nisan 2018).

Alüminyum veya alüminyum alaşım tozları için yaygın bir sınıflandırma ise şu şekilde yapılabilir;

5.5.4.4.1. Atomize alüminyum tozu (*powder*)

1.0 mm'ye kadar olan (genellikle 0.5 mm'den fazla olmayan), Birkaç mikrondan 1.0 mm'ye kadar (genellikle 0.5 mm'den fazla olmayan) küresel, oval, damla şeklinde, düzensiz, parçalar halinde veya dendritik bir şekle sahip tozlardır (Neikov ve ark., 2009).

Atomize alüminyum tozu, saf eriyik alüminyum metalinin, basınçlı bir gaz jetine sunulması ve daha sonra katılaşılan ve toplanan ince damlacıklara dönüştürölmesiyle üretilir. Bu şekilde toplanan tozlar, boyut, özellik ve uygulamaya bağılı olarak daha sonra derecelendirilir. Bu şekilde üretilen ürünün parçacık boyutlarının aralığı, nozöl açıklığı, hava basıncını ve diğler faktörleri değıştirerek bir dereceye kadar kontrol edilebilir. Çok çeşitli partiköl büyüklüğü 5 mikrondan 1000 mikrona kadar mevcuttur (Neikov ve ark., 2009).

Pullar ve pastalar ise mekanik presleme ya da bilyeli öğütme ile düzleştirilmiş plakalardır:

5.5.4.4.2. Pul (*flake*)

1.0 µm 'den daha küçük çapta ve lineer boyutları 50–200 µm aralığında olan tozlar. Partikölle genellikle %0,2 – 4,0 oranında ince bir stearin, stearik asit tuzu, parafin veya başka bir yağ katmanı ile kaplanmıştır (Neikov ve ark., 2009). Alüminyum pul (*flake*), alüminyum tozuyla kuru bilyalı öğütme işlemlinden gelir. Mikroskobik inceleme altında düzensiz şekillidir (<http://www.alcircle>.

com/news/downstream-products/detail/27648/top-five Erişim tarihi: 25 Ekim 2018).

Bu, inert atmosfer altında atomize alüminyumun kuru bilyeli öğütülmesi veya kontrollü koşullar altında ıslak öğütülmüş atomize alüminyumdan çözücünün ayrılmasıyla yapılır. Uygulamaya bağlı olarak, bazı pullar reaktiviteyi sınırlamak için bir kaplama ile "stabilize edilebilir".

Kullanım Alanları:

- a. Gaz betonunda (hafif beton) üretimde
- b. Patlayıcılarda (hassaslaştırıcı olarak)
- c. Baskı mürekkeplerinde.

5.5.4.4.3. Granül

0.5–1.0 µm'den daha büyük küresel, oval, damla şeklinde, disk şeklinde, iğne şeklinde ve düzensiz şekilli partiküller (Neikov ve ark., 2009).

5.5.4.4.4. Pastalar (*Pastes*)

%65–75 oranında pul partiküllerinin ve likit faz (su, hidrokarbonlar) bileşimidir.

Alüminyum pastalar yüksek ısıya dayanıklı alüminyum taneleri, pigment olarak kullanılan, dış etkenlere dayanıklı, gümüşü parlak görünümlü, bir pastadır. 40 °C / + 1100 °C ısı aralıklarında rahatlıkla çalışır. Metalik gümüş görünümlüdür (<http://www.daglar.com.tr/files/product/21425368AL.PA.pdf> Erişim tarihi: 27 Ekim 2018).

Kullanım Alanları:

Boya, köprüler, parmaklıklar, elektrik direkleri, petrol tanklarının dış kısımları, borular vb. demir ve çelik yüzeylerin boyanmasında ve güneş ışınlarının yansımalarının istenildiği yerlerde kullanılır. Muhtelif ihtiyaçlar için çok geniş bir alanda uygulanırlar. Alüminyum pastalar plastik sektöründe özellikle *masterbatch*

üretiminde alüminyum yıldız efektini alma amaçlı kullanılırlar. Endüstriyel boyalarda, dekoratif boyalarda, otomotiv boyalarında ve soba boyalarında kullanılırlar (<http://www.daglar.com.tr/files/product/21425368AL.PA.pdf> Erişim tarihi: 27 Ekim 2018).

5.5.4.5. Alüminyum tozu eldesi

Fizikokimyasal Yöntemler: Çözeltilerden veya eriyiklerden elektrolitik çökeltme; alüminyum bileşiklerinin indirgenmesi (veya termal ayrışması); metalin buhar fazından buharlaştırılması ve yoğunlaştırılması.

Fizikomekanik Yöntemler: İlk malzemenin faz yapısında ve kimyasında bir değişiklik olmadan, alüminyumun, talaşların kırılma alaşımlarının, folyonun mekanik kırılması, eriyiğin atomizasyonu (Neikov ve ark., 2009).

Alüminyum tozu üretim metotları genel olarak;

- Hafif parça üretimi için çoğu uygulamada ticari gaz atomizasyon yöntemi ile yüksek hızdaki inert gaz akışının, eriyik alüminyumunu kırarak oldukça ince partiküller oluşturması esasına dayanır. Ergiyik alüminyum, serbest düşüşü esnasında katılarak genellikle küresel şekil alır. Neticede yüksek derecede homojenize ve oldukça ince mikroyapıdaki toz üretimi gerçekleşir (Totten ve MacKenzie 2003). Tane boyutu 0,5 mm'den büyük olan granül üretimi veya boyut olarak 100 µm'den daha büyük tozların üretiminde kullanılır (Neikov ve ark., 2009).
- Bilyalı değirmenlerde veya diğer ezme cihazlarında kırılma alaşımlarının (Al-Ni, Al - Mg, Al-Si) kırılması (partikül şekli parçalar halindedir) (Neikov ve ark., 2009).
- Oksijen içeriği izlenen koruyucu gaz atmosferinde, yüzey aktif madde varlığında alüminyum tozu veya folyonun kuru öğütülmesi (pigment, piroteknik ve topaklı toz üretiminde) (Neikov ve ark., 2009).
- Alüminyum partiküllerinin, stearin veya diğer yüzey aktif katkı maddelerinin bulunduğu sıvı fazda (hidrokarbonlar, su) öğütülmesi (Neikov ve ark., 2009).

- Alüminyum tozunu hidrokarbonlarla veya sulu çözeltiler ve özel katkı maddeleri ile karıştırmak suretiyle pasta üretimi (Neikov ve ark., 2009).
- Ergimiş alüminyumun zemindeki ergitme pota boşluğuna soğutma ortamından geçirerek dökümü ile granül boyutu 4/20 mm ve disk granülasyon üretimi (Neikov ve ark., 2009)

Tablo 5.10. Çeşitli Üretim Tekniği ile Alüminyum Tozu Karakteristiği

Toz Tipi, Üretim Metodu	Partikül Şekli	Kütle Ortalama Partikül Büyüklüğü (µm)	Yoğunluk (g/cm ³)		Al ₂ O ₃ (%ağırlık)	Al İçeriği (%ağırlık)
			Görünen	Üst yoğunluk		
Toz Üretim Yöntemi:						
Hava	Pürüzlü yüzey ve oval şeklinde, düzensiz	50-200	0.73-1.24	1.15-1.25	0.1-1.0	99.5
İnert gaz atomizasyonu	Küresimsi	45-100	0.5-1.4	0.90-1.70	0.1-1.7	99.5
Gaz ortamında yoğunlaştırma ile çok ince üretimpartikül üretimi	Küresimsi	0.2-0.5	...	...	...	>99
Al-Mg, Al-Ni, Al-Si sistemlerinin kırılma alaşımlarının öğütülmesi	Fizyon parçası	40-2000	...	...	...	70-90
Kuru Öğütme ile Pul Üretimi:						
İnce	Pul pul	45	0.27-0.41	0.41-0.68	2-21	96-98
Topak halinde	Plaka Şeklinde	150-1170	0.22	0.36	1	>99.5
Pul halinde	Pul pul partikül yığı halinde	210	1.08-1.21	1.35-1.49	6-14	Geri kalan
Granül Üretimi:						
Ergiyik atomizasyonu ile granül üretimi	Oval, damla şeklinde, düzensiz, iğnemsis	500-5000	1.8-1.5	1.6-1.8	...	87-99.5
Suya veya soğutulmuş yüzeye serbest ergiyik dökümü ile granül üretimi	Disk şeklinde	500-20000	1.5-1.7	...	...	87-99.9
Pasta Üretimi:						
Sıvı hidrokarbon içerisinde öğütme ile üretim	Pul pul	45	...	...	2.20	...

Kaynak: (Neikov ve ark., 2009, s. 801)

5.5.4.6. Alüminyum tozunun, patlayıcılık parametreleri incelemesi

Alüminyum tozunun yıkıcı patlama kazalarına karıştığı düşünülürse, partikül büyüklüğünün P_{max} ve K_{St} gibi patlama tehlikesi parametrelerine etkisini incelemek için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu yanma parametreleri, parçacık büyüklüğünün varyasyonuna çok duyarlıdır (Castellanos ve ark., 2014).

Çok ince alüminyum tozlarının bulunduğu havadaki toz bulutları, son derece düşük minimum tutuşma enerjilerine sahiptir ve olağanüstü derecede şiddetli patlamalar meydana getirir. Öte yandan, 100 µm gibi partikül çapı daha kalın alüminyum tozları, sadece ortalama şiddette bir patlama tehlikesi sergiler. Bununla birlikte, nispeten kaba bir alüminyum tozu ince bir toz fraksiyonu içeriyorsa, kütle olarak sadece az bir kısmını temsil etse bile, patlama tehlikesi önemli ölçüde artmaktadır. Bölüm 4.4.4.3'te detaylandırıldığı gibi, alüminyum gibi metal tozlar için, patlama şiddeti, partikül boyutu küçülmesiyle yakından ilgilidir (Eckhoff, 2003).

Polidispersite, toz karakterizasyonu literatüründe, partikül büyüklüğünün heterojenlik derecesini belirtmek için kullanılır.

$$\sigma_D = (D_{90} - D_{10}) / D_{50}$$

Burada σ_D partikül boyutu polidispersitesi, D_{90} partiküllerin hacimce% 90'ından daha büyük olan çaptır, D_{10} partiküllerin hacimce% 10'undan daha büyük çaptır ve D_{50} hacimce% 50'nin çapından daha büyük parçacıklardır (yani, hacim ortalama çapı) (Amyotte, 2013), (Castellanos ve ark., 2014).

Tablo 5.11. Çeşitli Tipteki Granül Alüminyum Tozunun Patlama Karakteristikleri

Tozun Şekli	Partikül Boyutu (d50)µm	Yüzey Alanı (m ² /gm)	MEC (gm/m ³)	P _{max} d	P/dt _{max} x	K _{st}	P _{max} ve dP/dt _{max} 'a uygun numune konsantrasyonu	MIE (mJ)	LOC O ₂ (%)	Çok kolay tutuşabilir konsantrasyon
				(psig)	(psi/sec.)					(bar·m/sec.)	(gm/m^{3})
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	53	0,18	170	123	3,13	59	1250			
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	42	0,19	70	133	5,72	107	1,250 – P _{max} 1,000 – dP/dt _{max}			
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	32	0,34	60	142	7,95	149	1250	10		
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	32	0,58	65	133	8,88	167	750 – P _{max} 1,500 – dP/dt _{max}	11	Tutuşma 8.0%, Tutuşmama, 7.5%	1000
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	30	0,1	60					10		

Tablo 5.11. (devamı)

Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	28	0,11	55	140	6,36	119	1,000 – Pmax	11		
							1,250 – dP/dtmax			
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	28	0,21	55	146	8,374	157	1500	11		
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	9	0,09	65	165	15,37	288	750 – Pmax	4		
							1,000 – dP/dtmax			
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	7	0,74	90	153	17,702	332	1,000 – Pmax	12		
							500 – dP/dtmax			
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	6	0,15	80	176	15,58	292	750	3,5		
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	6	0,7	75	174	15,69	294	500 – Pmax	3		
							1,000 – dP/dtmax			

Tablo 5.11. (devamı)

Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	5	1	70					4		
Küresel olmayan, nodüler (boğumlu)veya düzensiz	4	0,78	75	167	15,48	291	1,000 – Pmax	3,5		
							750 – dP/dtmax			
Küresel	63	0,15	120	101	1,22	23	1,250 – Pmax	Tutuşmamıştı ³²	Tutuşma 8.0%,	1750
							1,000 dP/dtmax		Tutuşmam a, 17.5%	
Küresel	36	0,25	60	124	4,77	90	1250	13		
Küresel	30	0,1	60	140	5,94	111	1000	13		
Küresel	25	0,53	55	150	9,33	175	750 – Pmax	9		
							1,250 – dP/dtmax			
Küresel	21	0,35	50	148	11,024	207	1,000 – Pmax	10	Tutuşma 8.0%,	1000
							1,250 – dP/dtmax		Tutuşmam a, 7.5%	
Küresel	15	0,5	45	148	10,812	203	1000	7		
Küresel	15	0,3	55					8		
Küresel	6	0,53	75	174	16,324	306	750	6		

Tablo 5.11. (devamı)

Küresel	5	1,30		167	14,31	269	750		Tutuşma 6.0%,	750
									Tutuşmam a, 5.5%	
Küresel	5	1.00	70	155	14,73	276	1250	6	Tutuşma 6.0%,	1250
									Tutuşmam a, 5.5%	
Küresel	3	2.May	95	165	15,9	298	1250	4		
Küresel	2	3.00	130							

Kaynak: https://www.nfpa.org/assets/files/AboutTheCodes/652/652_A2018_CMD_AAC_SD_SCREport.pdf Erişim tarihi: 23 Ağustos 2018

*1 bar/sn = 14.5 psi/sn; 1 bar·m/sn = 0.226 psi·ft/sec.

** Her bir karakteristik parametre, tablo 4.6'daki testlerle belirlenmiştir.

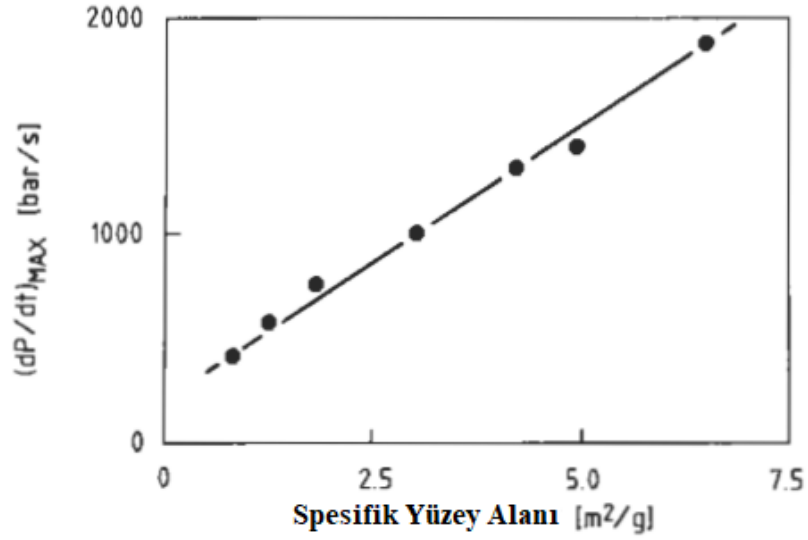
Toz malzeme, maksimum patlama basıncı (P_{max}) ve maksimum basınç artışı oranı (K_{st}) sistematik olarak parça boyutunun ve nem içeriğinin düşürülmesi ile sistematik olarak artar. Minimum tutuşma enerjisi (MTE), genellikle parçacık büyüklüğü ve nem içeriğinin azalmasıyla azalır. Nem içeriğinin ve partikül büyüklüğünün azalması aynı zamanda toz bulutunun minimum patlayabilir toz konsantrasyonu ve minimum tutuşma sıcaklığında düşüşe neden olur (Eckhoff, 2003).

Bu bölümde ele alınan alüminyum tozunun patlayıcılık karakterizasyon parametreleri, Bölüm 4.4.'deki, tozların genel yanıcılık-patlayıcılık parametrelerine dayanarak incelenmiştir.

Tablo 4.4.'te, tozlar için önemli patlayıcılık parametreleri verilmiştir.

5.5.4.6.1. Alüminyum tozu spesifik yüzey alanının basınç artış maksimum hızına ve toz patlama şiddetine etkisi (P_{max} , dP / dt_{max} ve K_{St})

Uygun patlama koruma ölçümlendirmesi ve buna bağlı olarak uygun dizayn yapılabilmesi adına patlama hızını bilmek (K_{st} değeri) önemli bir husustur. Ancak, yüksek basınç meydana gelmesi halinde ve nispeten yavaş gerçekleşen bir olay vuku bulması halinde de (düşük K_{st} değeri) halen büyük zararlara yol açabileceği unutulmamalıdır. Kömür tozu ile aspirin tozu karşılaştırıldığında, kömür tozunun patlayabilirliği ve patlama şiddeti aspirin tozuna göre çok daha düşük, bu durum, kömür tozu ve saf alüminyum tozu ele alındığında, kömür tozunun patlayabilirliği ve patlama şiddetinin saf alüminyuma nispeten çok çok daha düşük olduğu bilinmektedir. Ölçütü böylece nitel bir şekilde ele almak afaki olacaktır, ancak örneklendirecek olursak, kömür madenlerinde meydana gelen patlamaların ve patlama şiddetinin ne derece ölümcül ve yıkıcı olduğu uzun yıllardır hazin bir şekilde görülmektedir (Khambekar ve Pittenger, 2013).



Şekil 5.12. 1 m³ ISO Tankında, Alüminyum Tozu Spesifik Yüzey Alanının Basınç Artış Maksimum Hızına Etkisi (Eckhoff, 2003, s. 30)

Şekil 5.12’de, alüminyum toz bulutlarının yanma oranının, tozun belirli yüzey alanı ile sistematik olarak nasıl arttığını göstermektedir. Alüminyum tozu için, 6.5 m²/g spesifik yüzey alanı, 0.34 µm çapındaki tek boyutlu kürelere veya 0.11 µm kalınlıktaki tabakalara karşılık gelir; bu, Şekil 5.12’deki en şiddetli şekilde patlayan tozlar için muhtemel bir parçacık şeklidir.

Castellanos ve arkadaşları (2014) ise parçacık büyüklüğü polidispersitesinin (σ_D) alüminyum toz patlamalarının yayılımı üzerindeki etkisi üzerine, sınırlı boyut dağılımları olan orjinal numunelerin karıştırılmasıyla, ortalanmış bir ortalama çapta ($D_{50} \sim 15 \mu\text{m}$) değişen bir dizi toz numunesi ile yapılan çalışmada, Sabit D_{50} 'de, patlama tehlikelerinin σ_D ile dramatik bir şekilde arttığı tespit etmişlerdir. En düşük σ_D (0,95) olan örnek, daha düşük bir patlama tehlikesi ve P_{max} değeri 9,15 barg ve K_{St} değeri 179 bar·m /sn ile sonuçlanmıştır. En yüksek σ_D (2,51) değerine sahip numune, 10,25 barg'lık P_{max} ve K_{St} değeri 413 bar·m / s ile en büyük patlama tehlikesini göstermiştir. Bu etki, toz bulutunda asılı kalan küçük çaplı alüminyum partiküllerinin konsantrasyonuna bağlanmıştır. Büyük boyutlu alüminyum tozu ile karşılaştırıldığında, partiküller yalnızca düşük sıcaklıklarda tutuşmakla kalmaz, aynı zamanda geniş yüzey alanı nedeniyle daha hızlı yanarlar. (Castellanos ve ark., 2014).

5.5.4.6.2. Alüminyum tozu nun MPK, MTE, MTS ve K_{st} patlayıcılık parametreleri ile partikül boyut dağılımı arasındaki ilişki

Patlama limitleri, patlamaların mümkün olduğu toz / hava karışımlarının konsantrasyon aralığını tanımlar. genellikle sadece alt patlama sınırı (APS) belirlenir. Bu ölçümler, bir tür toz bulutunun önlenmesinin, güvenlik için temelin bir parçasını oluşturması durumunda önemlidir. Alt patlama limitinin belirlenmesi için hem 1 m³ aparatı hem de 20 litrelik küre aparatı yaygın olarak kullanılmaktadır. CEN, toz süspansiyonunun artık tutuşmadığı bir dizi testte, Bölüm 4.4.2.1.2'de bahsi geçtiği gibi, patlayıcı bir tozun konsantrasyonu sistematik olarak azaltılır. Testlerde toz / hava karışımının artık tutuşmadığı en yüksek toz konsantrasyonu APS olarak belirtilir (Barton, 2002).

MEC ile ilgili genel bilgi Bölüm 4.4.2.1.2'de verilmiştir.

Tablo 5.12. NFPA 652 □ 1 m³ test Çemberinde Alüminyum Tozu Patlama Parametreleri

Metal	Kütleli ortalamaya çap (µm)	Minimum alevlenebilirlik konsantrasyonu (g/m ³)	P _{max} (bar)	K _{st} (bar-m/s)	Tehlike Sınıfı
Alüminyum	29	30	12.4	415	3
Bronz	18	750	4.1	31	1
Magnezyum	28	30	17.5	508	3
Çinko	10	250	6.7	125	1

Kaynak: (https://www.nfpa.org/assets/files/AboutTheCodes/652/652_A2018_CMD_AAC_SD_SCRRep.ort.pdf Erişim tarihi: 23 Ağustos 2018)

Nifuku ve arkadaşlarının (2007), deneysel çalışmaları neticesindeki bulgulara göre;

Hazırlık Aşaması:

Deney: Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu

Toz Numunesi Tedariği: Alüminyum toz patlaması yaşanan bir fabrikadan alınmıştır.

Numune Özellikleri:

Orijinal: Numunenin elekten geçirilmemiş hali

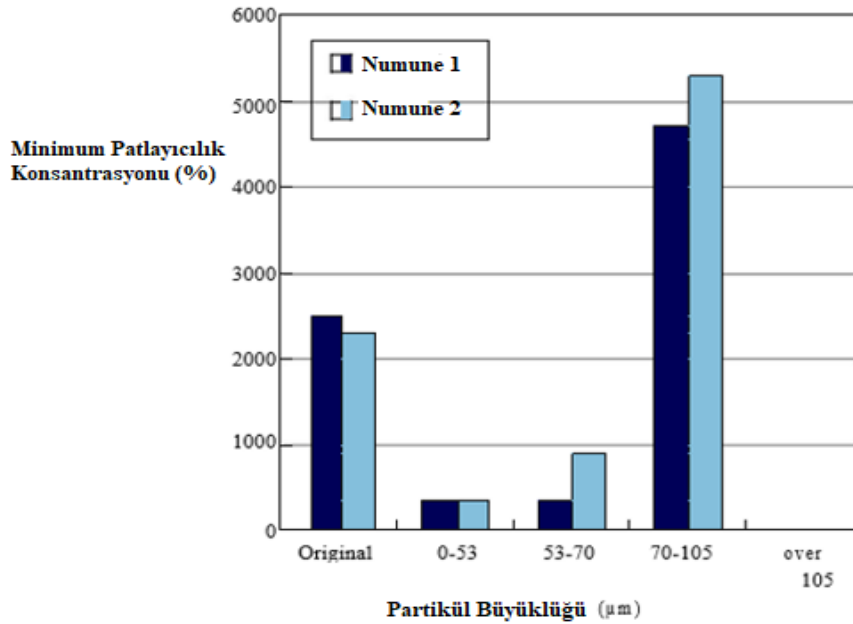
Numune 1- 2: Elendikten sonra 105 µm ve üzerindeki tozlar (ağırlıkça yaklaşık %65)

Numune 3: Elendikten sonra 8-20 µm aralığındaki tozlar (ağırlıkça yaklaşık %82)

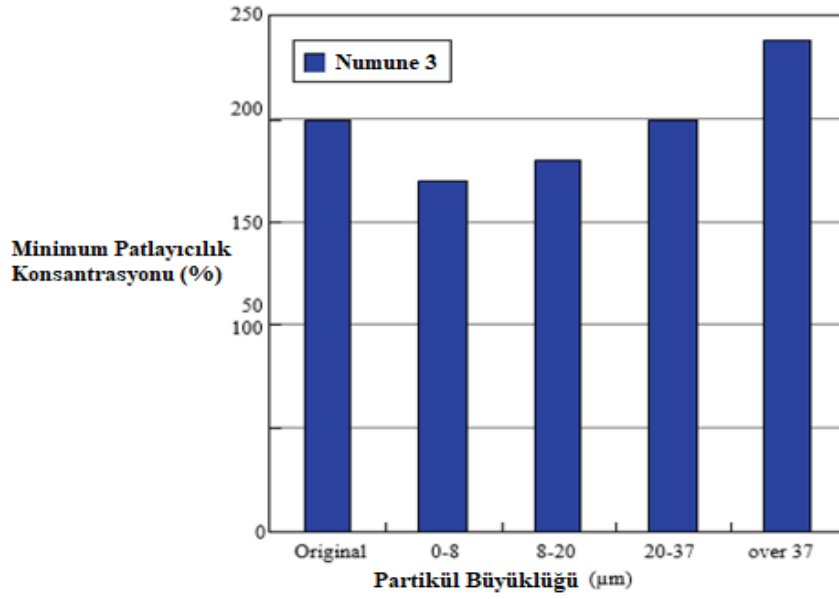
Deney tüpü: Hartman Patlama Tüpü

Inert Ortam: İnceltirilmiş atmosfer veya Hartman tüpü içerisindeki oksijen oranını düşürmek için spesifik oksijen konsantrasyonunda gaz silindirleri hazırlanmış, inert toz olarak kalsiyum oksit veya kalsiyum karbonat kullanılmıştır (Nifuku ve ark., 2007).

Tablo 5.12 ve Tablo 5.13 karşılaştırıldığında, normal başlangıç şartlarında ve hava oksijeni ile temasında, 29 µm ortalama çapındaki alüminyum toz bulutunun MEC değerinin ~30 g/m³ olduğu görülmektedir.



Şekil 5.13. Nifuku ve Arkadaşlarının (2007) Deneysel Çalışmaları Neticesindeki Bulgulara Göre, Birinci ve İkinci Alüminyum Numuneleri için Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu ve Partikül Büyüklüğü Arasındaki İlişki (Nifuku ve Ark., 2007)



Şekil 5.14. Nifuku ve Arkadaşlarının (2007) Deneysel Çalışmaları Neticesindeki Bulgulara Göre, Üçüncü Alüminyum Numuneleri için Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu ve Partikül Büyüklüğü Arasındaki İlişki (Nifuku ve ark., 2007)

Tozlar için Bölüm 4.4.4.3.1. 'de spesifik yüzey alanı için verilen bilgilere dayanarak, toz bulutlarının patlayıcılığında partikül boyutu dağılımının önemli bir etkisi olduğunu söyleyebiliriz. Şekil 5.13 ve 5.14 karşılaştırıldığında, bir dereceye kadar, Numune 3'ün patlayıcılığının Numune 1 ve 2'ye göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Numune 1 ve 2, partikül boyutu 105 µm üzerine çıktığında tutuşturulamamıştır. Numune 3 ise, diğer iki numuneye göre daha yüksek patlayıcılık göstermiş ve MEC yaklaşık 170 g/ m³ 'tür (Nifuku ve ark., 2007).

Grafiklerden de anlaşılacağı gibi aynı ortam koşulları altında daha küçük boyutlu partiküller daha büyük patlayıcılığa sahiptir. Minimum patlama konsantrasyonu ve partikül boyutu arasındaki ilişkiye bakıldığında, 74 µm 'den daha küçük toz partikülleri patlayacaktır (Tablo 5.14.) (Nifuku ve ark., 2007).

Tablo 5.13. Tanecik Boyutundaki Azalmanın Alüminyum Tozunun Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonuna Etkisi

Ortalama Tanecik Boyutu (µm)	Minimum Patlayabilir Konsantrasyon (g/m ³)
20	30
35	25
40	35
90	45

Kaynak: Field, (2012)

Tablo 5.14. BIA, 1987 'den Alınan Alüminyum Tozunun Boyutsal Dağılımda Patlayıcılık ve Tutuşabilirlik Parametre Değerleri

Toz Tipi	Partikül Büyüklüğü Dağılımı						Toz bulutlarının tutuşturulabilirliği ve patlayabilirliği				Toz Katmanları	
	% Ağırlık <Boyut (µm)**						Ortalama (µm)	1m ³ veya 20 L tank			MIT (°C)	Parlama Sıcaklığı (°C)
	500	250	125	71	32	20		C _{min} (g/m ³)	P _{max} (bar(g))	K _{st} (bar.m/sn)		
Alüminyum tozu				94	88	79	<10	60	11,2	515	560	430
Alüminyum tozu				98	70	45	22		12,5	400	650	270
Alüminyum tozu				99	64	47	22	30	11,5	1100	500	□450
Alüminyum tozu				94	60	17	29	30	12,4	415	710	□450
Alüminyum grit*				100	96		23	30	11,0	320	850	□450
Alüminyum grit				99	16	2	41	60	10,2	100	□850	□450
Alüminyum grit				6			170	Tutuşma yok			□850	□450

Kaynak: (Eckhoff, 2003)

*Kum taşı.

** Mesh aralıklarının altında verilen değerler, her bir mesh aralığına sahip elek üzerinde kalan tozları göstermektedir.

Genel olarak, P_{max} ve belirli koşullar altında da $(dP/dt)_{max}$ veya Kst, mutlak başlangıç basıncı ile orantılı olarak artar. Atmosferdeki artan oksijen fraksiyonu hem tutuşturabilirliği hem de patlayabilirliği arttırırken, havaya göre daha düşük oksijen içeriği buna bağlı olarak tehlikeyi azaltacaktır. Artan başlangıç sıcaklığı, tutuşma hassasiyetini artırır (MTE'yi azaltır). Normal olarak, standart test koşullarından önemli ölçüde sapan koşullar için veriler, her durumda spesifik olarak belirlenmelidir. Gaz fazı, yanıcı gaz veya buhar içeriyorsa, gaz veya buhar için alt patlama limitinin büyük ölçüde altında olan konsantrasyonlarda bile, hibrit karışımlarda (Bölüm 4.4.4.8), hem tutuşma duyarlılığı hem de patlamanın önemli ölçüde artmasına neden olabilir.

Tablo 5.15. Atmosfer Basıncında Çeşitli Oksitleyici Gazlar İçerisindeki 6 µm Alüminyum Partiküllerinin Düz, Laminar Alevleri için Yanma Hızları ve Parlama Sıcaklığı

Gaz karışımı	Toz konsantrasyonu (g/m ³)	Nozul çapı (cm)	Alev alanı (cm ²)	Alev hızı (m/sn)	Parlama sıcaklığı (°K)
Hava	200	0,95	1,13	0,21	1790
	250	0,95	1,33	0,30	1910
	300	0,95	1,54	0,35	2060
O ₂ +4 Ar	200	0,45	0,21	0,21	1850
	250	0,45	0,26	0,28	1910
	300	0,45	0,31	0,32	1960
O ₂ +4 Ar	200	0,95	0,87	0,23	1980
	250	0,95	1,08	0,32	2080
	300	0,95	1,17	0,38	2140
O ₂ +4 Ar	200	1,30	1,30	0,27	2070
	250	1,30	1,42	0,36	2230
	300	1,30	1,48	0,41	2320
O ₂ +4 He	200	0,95	0,87	0,70	2090
	250	0,95	1,08	1,00	2320
	300	0,95	1,23	1,15	2430

Kaynak: (Eckhoff, 2003, s.271)

Tablo 5.15'teki veriler için sabit tutulan değerler;

- Atmosfer basıncı (0.2 +0.2 bar(g)).
- Havanın oksijen içeriği (Hacimce %18 – 22)
- Normal ortam sıcaklığı (0 – 40°C).

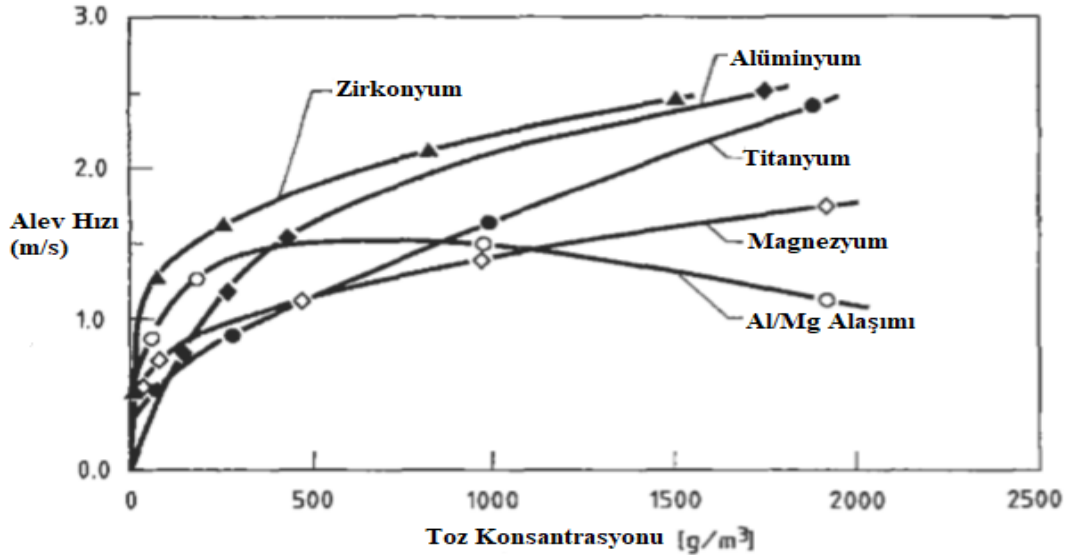
6 µm alüminyum parçacıkların toz bulutları için bazı sonuçlar Tablo 5.14'te verilmiştir. Argon hava karışımlarının sonuçları hem yanma hızının hem de parlaklık sıcaklığının, meme çapı veya alev alanı ile bir miktar arttığını

göstermektedir. Bu, Tablo 5.15' deki değerlerin toz patlaması bağlamında minimum değerler olduğunu gösterir (Eckhoff, 2003).

Tablo 5.16. Alev Yayılım Deneğinde Kullanılan Beş Metal Tozunun Boyut Dağılımları

Toz Tipi	Belirtilen partikül büyüklüğünden daha ince kümülatif kütle fraksiyonu (%)					
	6 μm	10 μm	16 μm	25 μm	40 μm	50 μm
Zirkonyum	6	14	23	39	92	100
Alüminyum	21	58	88	97	99	100
Titanyum	1	1	4	8	22	100
Magnezyum	2	5	10	20	75	100
Al/Mg Alaşım	2	3	6	29	74	100

Kaynak: (Eckhoff, 2003, s. 273)

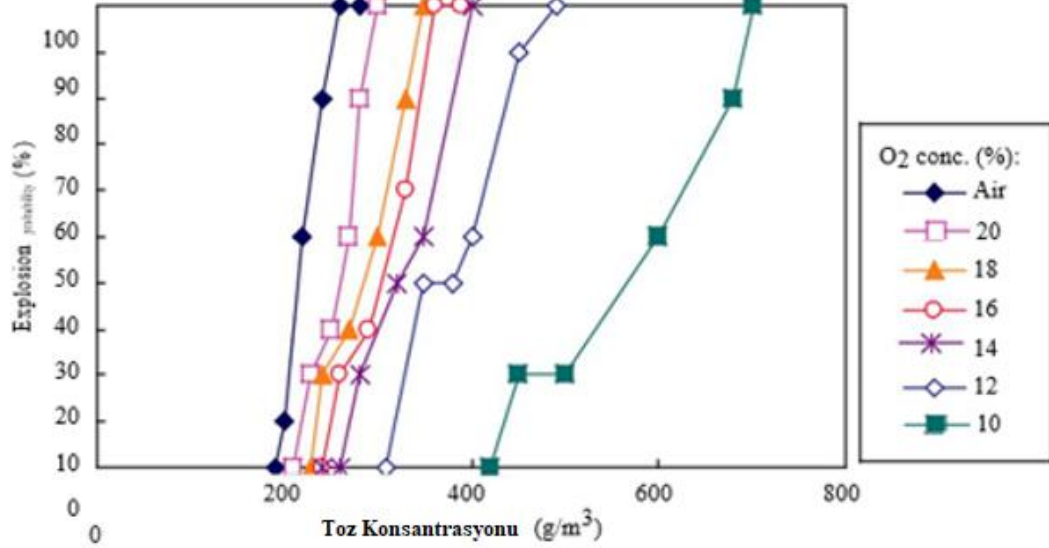


Şekil 5.15. Özel Alev Yayılımı. Metal Tozlarının Sınırlanmamış Bulutlarında Toz Konsantrasyonunun Bir Fonksiyonu Olarak Alev Hızı (Eckhoff, 2003)

Şekil 5.15, Tablo 5.16'da belirtilen beş toz için bazı sonuçlar vermektedir. Grafikte, partikül büyüklüğünün oldukça önemli bir rol oynadığı görülmektedir. Örnek olarak magnezyum tozunun (yaklaşık 45 μm 'lik ortalama partikül büyüklüğü) alüminyum tozundan (yaklaşık 9 μm 'lik ortalama partikül büyüklüğünden) neden önemli ölçüde daha düşük bir alev hızı verdiğini açıklar. Şekil 5.14'te görüldüğü gibi, 300 g/m^3 'lük alüminyum tozu için radyal alev hızı yaklaşık 1,5 m/s'dir (Eckhoff, 2003).

5.5.4.6.3. Alüminyum tozunun sınırlandırılmış oksijen konsantrasyonu- SOK

Yanma, oksijen konsantrasyonu ile önemli ölçüde kontrol altına alınabilir. Bu nedenle, parçalama işlemindeki (T/M veya yan ürün) oksijen konsantrasyonunu kontrol ederek, toz bulutlarının patlayabilirliği kontrol altına alınabilir (Nifuku ve ark., 2007).



Şekil 5.16. Oksijen Konsantrasyonu (Nitrojen İle Seyreltilmiş) ve Alüminyum Tozunun Minimum Patlayıcılık Konsantrasyonu Arasındaki İlişki (Nifuku ve ark., 2007)

Şekil 5.16, oksijen konsantrasyonundaki azalma ile patlayabilirliğin azaldığını ve alüminyum için %10 'dan daha az konsantrasyonlarda patlamanın önlendiğini göstermektedir (Nifuku ve ark., 2007).

LOC hesaplamaları genel olarak 1 m³ tank veya 20 litrelik küre içerisinde yapılmaktadır. Bu test tanklarında yapılan standart testler CEN Teknik Komitesi tarafından hazırlanmaktadır (Amyotte, 2013).

LOC hesaplanırken, beklenmedik koşullara veya işletim hatalarına karşı koruma sağlamak için normal olarak bir güvenlik payı (örneğin, LOC±2%) kullanılır (Amyotte, 2013).

Tablo 5.17. Çeşitli Tozların Oksijen ile İnertlenmesinde Minimum Oksijen Konsantrasyonu

Toz Tipi	SOK – Sınırlayıcı Oksijen Konsantrasyonu (% Hacim)
Bezelye unu	15,5
Organik pigment	12,0
Kadmiyum Stearik Asit Tuzu	12,0
Buğday unu	11,0
Polietilen	10,0
Sülfür	7,0
Alüminyum	5,0

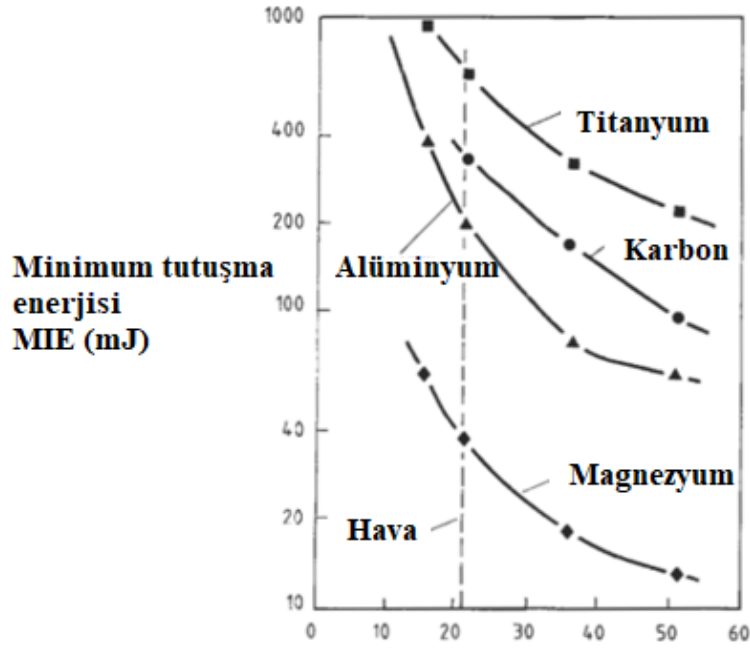
Kaynak: (Hoppe ve Jaeger 2005).

Ballal, (1980) 'in, 0.2 bar başlangıç basıncında ve ortalama 40 µm çapındaki toz partikülleri ile alüminyumun da içinde olduğu çeşitli metallerle yapmış olduğu çalışmada, 0.65'lik eşdeğer oranda (yanma için fazla oksijen miktarı), MTE %80 tutuşma olasılığı için tanımlanmıştır (Şekil 5.17.). Bu oran, Hartman (1948)'nın; hacimce %21 ile %15 aralığındaki oksijen azalması, minimum tutuşturma enerjisini 1,4 kat, %21 ile %8,5 aralığında oksijen azalması ise minimum tutuşturma enerjisinin 2,0 kat artırılacağını gösteren çalışmasını doğrulamaktadır (Eckhoff, 2003).

Tablo 5.18. O₂ + N₂ Atmosferinde İnertlenen Alüminyum ve Alüminyum Alaşım Toz Bulutları için İzin Verilen Maksimum O₂ Konsantrasyonu

Toz Tipi	Kitle Ortalama Partikül Çapı (µm)	Azotla inertlemede hacimce maksimum oksijen konsantrasyonu
Alüminyum	22	5
Alüminyum	22	6
Kalsiyum/Alüminyum alaşım	22	6

Kaynak: (Eckhoff, 2003)



Şekil 5.17. Atmosferdeki Oksijen İçeriğinin, Çeşitli Malzemelerin Toz Bulutlarının Minimum (Elektriksel Kıvılcım) Tutuşurma Enerjisi Üzerindeki Etkisi (Eckhoff, 2003, s. 43)

Çeşitli tozlar için sınırlayıcı oksijen konsantrasyonu Tablo 5.17.'de ve alüminyum tozunun ortalama 22 µm partikül büyüklüğü için O₂ + N₂ atmosferinde izin verilen maksimum oksijen miktarları Tablo 5.18'de verilmiştir.

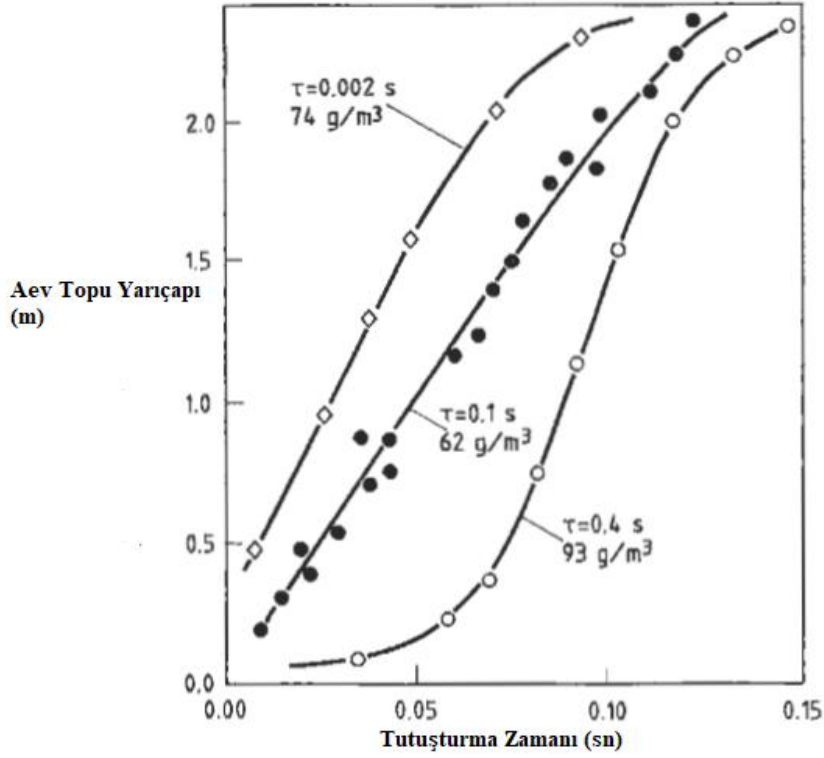
5.5.4.6.3.1. Alüminyum toz partiküllerinin oksijen ve nem içeriği açısından incelenmesi

Friedman ve Macek (1962, 1963), alüminyum partiküllerin değişen oksijen içeriğine sahip sıcak gazlarda tutuşmasını ve yanmasını incelediklerinde, tutuşmanın, sadece partikülü kaplayan oksit tabakasının (erime noktası 2300 °K) erimesinden sonra meydana geldiği sonucuna varmışlardır. Çalışmada, tutuşurma işlemi, sıcak ortam gazının nem içeriğinden etkilenmemiş ve oksijen içeriğinden sadece biraz etkilenmiş olduğu görülmüştür. Sadece %23 mol oksijen içeriğinde, 2300 °K'da tutuşma meydana gelmiştir, oysa %35 mol oksijende, 2200 °K'da meydana gelmiştir. Diğer taraftan, oksijen ve su buharının konsantrasyonlarının, metalin yanmasında, önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Oksijen güçlü yanmayı desteklemiştir. Nemin yokluğunda, difüzyon ve yanma gaz fazında serbest bir şekilde yer alırken, nem varlığında, işlem engellenmiş ve küçük bir bölgeyle

sınırlı kalmıştır, çünkü reaksiyona giren maddeler, ergiyik partikül yüzeyindeki yoğunlaşan bir oksit tabakası içinden yayılmak zorunda kalmıştır. Cassel (1964), sadece 60 µm çapında alüminyum partikülleri, belirli bölgesel sıcaklık dağılımının laminar alüminyum toz alevinin bilinen ortam sıcaklığı dağılım merkezine enjekte etmiş ve taneciklerin tutuşması 2570 °K'de meydana gelmiştir, ancak bu muhtemelen, tutuşma için gerekli minimum sıcaklıktan daha yüksek olmuştur çünkü partikülün sıcak ortamda kalma süresi 2 msn'den az sürmüştür. Bu, partikülün minimum tutuşma sıcaklığından kendi kendine sürdürülen oksidasyon için gereken minimum sıcaklığa kendiliğinden ısınması için gerekli olan indüksiyon periyodundan daha kısadır. Cassel ayrıca, tutuşmadan sonra 2 msn içinde, partikül çevresinde yaklaşık olarak orijinal partikül çapının yaklaşık dokuz katı olan bir eş merkezli yanma bölgesinin oluştuğunu gözlemlemiştir. 3 ms sonra, önce partikül eş merkezli olarak çevrelenmiş fakat daha önce ince uzun bir yapı almış daha sonrasında ise kademe kademe çapı 10 kattan fazla olan bir silindir şeklini alan bağımsız bir katman ortaya çıkmıştır. Bu sıvı haldeki genişleyen oksit tabaka, ortam atmosferinin göreceli hareketini takip etmiştir. Alüminyum tozu alevlerinin lobları arasında yer alan 60 µm'lik alüminyum partiküllerin yanma süreleri, 10.5 msn (aynı şartlar altında yanan magnezyum parçacıklarına göre yaklaşık 4,5 kat daha uzun) olarak bulunmuştur. Cassel, bunu, alüminyum oksidasyonu için daha büyük oksijen ihtiyacına dayandırmıştır (Eckhoff, 2003).

5.5.4.6.4. Alüminyum tozu tutuşmasında türbülansın etkisi

Shevchuk ve diğ. (1986), eğimli türbülanssız alüminyum toz bulutlarında alevin yayılmasının çeşitli seviyelerde tutuşturma öncesi türbülansında çalışmışlardır. Bulutlar, kompresörün kısa bir patlamasıyla dört toz dağıtıcı setinden üretilmiş ve her dağıtıcıya 1 □ 10 kg toz doldurulmuştur. Toz dispersiyonunun tamamlanmasından sonra toz bulutu istenen bir gecikmeden sonra ateşlenmiştir. En yüksek tutuşturulma öncesi türbülansının, dispersiyonun tamamlanmasından hemen sonra mevcut olduğu gözlenmiştir. Tutuşma gecikmesi arttıkça türbülans bozulmuş ve yeterince uzun bir gecikmeden sonra, toz bulutu esas olarak hareketsiz kaldığı kaydedilmiştir (Şekil 5.18) (Eckhoff, 2003)



Şekil 5.18. Havadaki 10 µm Boyutundaki Alüminyum Partiküllerinin Oluşturduğu Sınırlandırılmamış Bulutun Merkezi Tutuşturma Zamanının Bir Fonksiyonu Olarak Alev Topu Yarıçapı (Eckhoff, 2003)

5.5.4.6.5. Alüminyum tozunun patlama riskinin ortadan kaldırılması

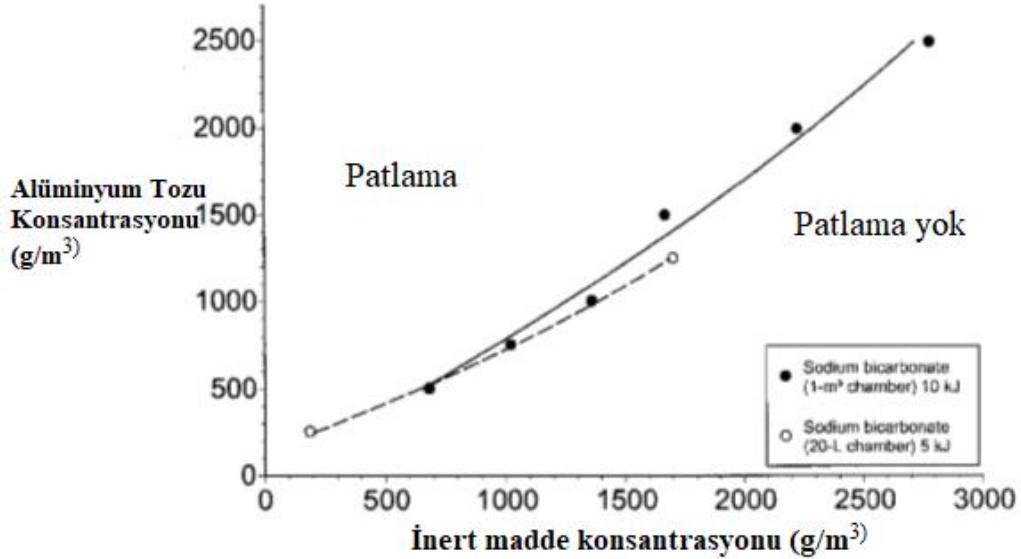
Dastidar ve Amyotte (2002) 'un, hacim ortalama çapı 17 µm'lik 250-1000 g/m³ konsantrasyon aralığında 5 kJ tutuşturma enerjisi ve iki farklı inert madde (Tablo 5.19) kullanarak yaptığı test sonuçları Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de görülmektedir. Testler, 20 L ve 1 m³ lük iki farklı test odasında gerçekleştirilmiş, böylece inert madde ve alüminyum tozu dispersiyonunun iki farklı hacim içerisinde tutuşturulma imkanı sağlanmıştır. 1000 g/m³ altındaki alüminyum toz konsantrasyonu için her iki test odası için inert madde miktarı benzerdir. Ancak, 1000 g/m³ ve daha yüksek yakıt konsantrasyonları için, 5 kJ'lik bir tutuşma kaynağı kullanarak 20 L'lik test odasındaki bir patlamayı önlemek için gerekli olan inert madde konsantrasyonunun, 1 m³ lük test odasında gerekli olandan daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 5.19. 17 µm Ortalama Çapındaki Alüminyum Tozunun İneretlenmesinde Kullanılan İner Maddeler İçin Alüminyum Tozu Konsantrasyon Aralığı

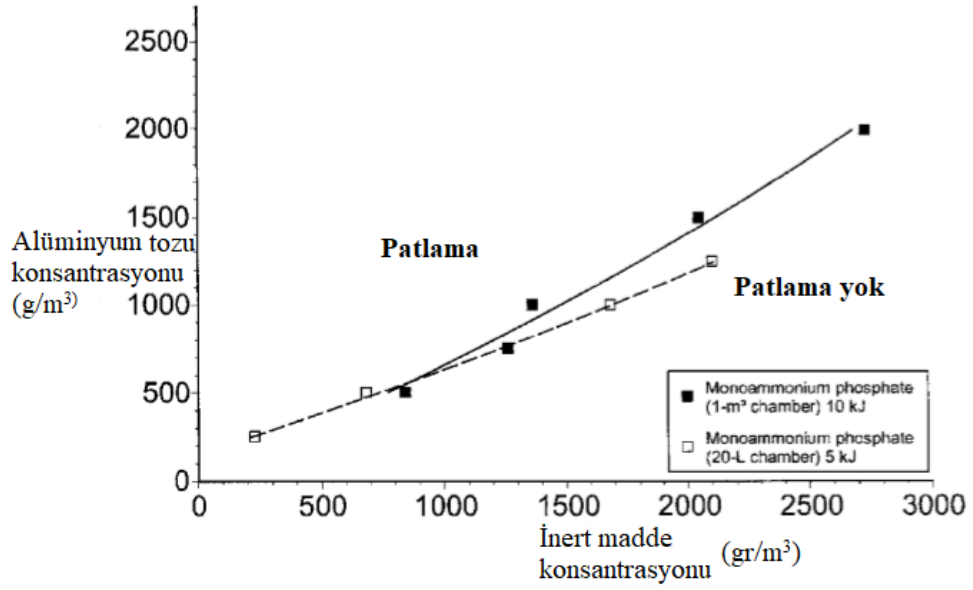
Toz	Konsantrasyon Aralığı (g/m ³)	Partikül Büyüklüğü		Hacim Ortalama Çapı, D _w (µm)	İner Madde	Tutuşma Enerjisi (kJ)
		<100µm	<25µm (% ağırlık)			
Alüminyum	250-1000	90	50	17	Monoamonyum Fosfat	5
Alüminyum	250-1000	90	50	17	Sodyum Bikarbonat	5

Kaynak: (Dastidar ve Amyotte, 2002)

Şekil 5.19 ve 5.20' de gösterilen 1 m³ eğrilerinde, çizilen hatların hafif bir yükselme eğilimi vardır, ancak gözlemlenen minimum inerteleme konsantrasyonu yoktur. Eğrilik, daha yüksek alüminyum konsantrasyonlarının, daha düşük alüminyum konsantrasyonlarına göre bir patlamayı engellemek için nispeten daha az inert maddeye ihtiyaç duyduğunun bir göstergesidir. Bir patlamanın şiddetinin hafifletilmesi için yakıt konsantrasyonunun gereken inert madde ihtiyacı üzerindeki etkisi, 20 L'de 1m³ odasından farklıdır. 20 L'lik bir kaptaki, daha yüksek alüminyum konsantrasyonlarına kıyasla, daha düşük alüminyum konsantrasyonlarının nispeten daha az inert madde ihtiyacı olmaktadır (Dastidar ve Amyotte, 2002).



Şekil 5.19. Alüminyum Tozu İneretlenmesinde, İner Madde Olarak Sodyum Bikarbonat Kullanarak 20 L ve 1 m³ Test Odasındaki Karşılaştırma Eğrileri (Dastidar ve Amyotte, 2002)



Şekil 5.20: Alüminyum Tozu İnertlemesinde, İnert Madde Olarak Mono Amonyum Fosfat Kullanarak 20 L ve 1 m³ Test Odasındaki Karşılaştırma Eğrileri (Dastidar ve Amyotte, 2002)

Sonuç olarak, sodyum bikarbonat, alüminyum toz patlamalarını hafifletmede mono amonyum fosfattan daha etkilidir. Mono amonyum fosfat ise, her iki test odasındaki karbonlu tozlar için daha etkilidir.

BÖLÜM 6: GEREÇ VE YÖNTEM

Bu bölümde araştırmanın yöntemi ve uygulanması açıklanacaktır. Araştırmada kullanılan yöntem, tezin işleniş planı, verilerin toplanması ile ilgili yapılan çalışmalar, verilerin analizi ve araştırmada kullanılan teknikler açıklanacaktır.

6.1. Araştırmanın Yöntemi

Bu araştırma ile alüminyum tozu üretimi yapan ve/veya alüminyum tozunun yan ürün olarak ortaya çıktığı endüstriyel tesislerde toz patlama riskleri ve bu riskler karşısında alınacak önlemler belirlenmiştir. Bu önlemlerin bazıları uygulama ile desteklenmiştir.

Tez araştırmasında, nicel araştırma yöntemi kullanılmış, örnekleme yer alana tesisler maksimum çeşitlilik esasına dayanarak seçkisiz olmayan örnekleme yöntemi ile alüminyum tozunun ürün olarak ve atık olarak meydana geldiği tesisler seçilmiştir.

6.2. Araştırmanın Evreni

Araştırmanın evrenini alüminyum tozu üretimi yapan fabrikalar ile yan ürün olarak alüminyum tozu oluşan tüm endüstriyel tesisler oluşturmaktadır

6.3. Araştırmanın Örnekleme

Araştırmanın örneklemini Uşak ili Uşak Organize Sanayi Bölgesi'nde yer alan Türkiye'nin ilk alüminyum folyodan alüminyum toz üretimi yapan firması ile Manisa ili Manisa Organize Sanayi Bölgesi'nde yer alan bir alüminyum jant üretim tesisi oluşturmaktadır. Çalışma 2017 yılı Eylül ayı ile 2018 yılı Kasım ayları içinde yapılmıştır.

Örneklemin bu şekilde belirlenmesinin nedeni ile ilgili olarak; U.O.S.B’de yer tesisin, Türkiye’de ilk kez alüminyum folyo atığı geri dönüşümü ile mikron mertebesinde alüminyum toz ve granül üretimi yapması ile alüminyum tozu üretim aşamasında meydana gelen risklerin önlenmesi için genel tamamlayıcı ve önleyici bilgilerin verilmesi, M.O.S.B’de yer alan tesisin ise ürün atığı olarak yanıcılık ve patlayıcılık özelliği gösteren mikron mertebesinde alüminyum tozunun meydana gelerek, bunun gibi üretim atığı olarak alüminyum tozu meydana gelen diğer tesislere tamamlayıcı ve önleyici bilgiler açısından genelleme imkanı verecektir.

6.4. Tezin İşleniş Planı



Şekil 6.1: Tez Konusu Araştırma ve Tamamlanma Safhaları

6.5. Verilerin Toplanması

Bu tez çalışmasında, çalışma konusunun belirlenmesini müteakiben, hipotezin sınanması için öncelikle genel olarak patlamalar, toz patlamaları, alüminyum özellikleri ve spesifik olarak alüminyum tozu ile ilgili literatür taraması yapılmıştır. Literatür taramasının ardından, yanıcı ve patlayıcı tozlar, patlayıcı bölge hesaplamaları ve patlayıcı ortamlarda kullanılan ekipmanlar ile ilgili kullanılan uluslararası güncel standartlar ve bu standartlar ışığında düzenlenmiş yasal mevzuat taraması yapılmış ve incelenmiştir. İlgili mevzuat ve standartlar rehberliğinde patlamadan korunma dokümanı kapsamına dahil olan ve özellikle toz patlamaları ile ilgili risk değerlendirme yöntemlerinin araştırılması yapılmıştır.

Tezin tesis uygulamasına rehberlik edecek ve örnek teşkil edecek dünyada meydana gelen toz patlamaları ve alüminyum tozu patlamaları ile ilgili istatistik araştırması yapılmış ve yaşanan patlama vakaları, neticeleri ve güvenlik eksikleri ile ilgili bilgi sahibi olunmuştur.

Alüminyum toz üretim tesisi ve alüminyum jant tesisi ile irtibata geçilerek saha ziyaretleri yapılmıştır. Alüminyum toz üretim tesisinde aynı zamanda üretim müdürü olan C sınıfı iş güvenliği uzmanı ve ikinci tesis olan alüminyum jant üretim tesisindeki tam zamanlı A sınıfı iş güvenliği uzmanı ile iş akım şeması rotası izlenerek özellikle toz patlama tehlikesi olabilecek üniteler gezilmiş, mevcut risk değerlendirme raporları, kullanılan üretim ekipmanlarının teknik dokümanları ve patlamadan korunma dokümanları ile acil kaçış eylem planları incelenmiştir. Ayrıca, her iki tesiste de toz patlaması ile ilgili geçmiş vaka olayları incelenmiştir.

Literatür, mevzuat, istatistik araştırmaları ve örneklem dahilinde saptanmış tesislerdeki geçmiş dönem vaka incelemelerinin yanı sıra, tesislerde uygulanacak risk analiz yöntemlerinin belirlenmiş ve örneklem dahilinde olan alüminyum jant tesisi kumlama ünitesinden alınan toz numunesinin yanıcılık ve patlayıcılık düzeyinin belirlenmesinde kullanılacak olan deney cihazı araştırması ve laboratuvar tespiti yapılmıştır.

6.6. Verilerin Analizi

Verilerin analizi için risk değerlendirmesi yapılmış olup, risk değerlendirmesi ile riskler belirlenmiş, mevcut risk analiz raporu ile karşılaştırılmış, bu riskler önem derecesine göre incelenerek önlemler belirlenmiştir.

Alüminyum jant tesisinden alınan toz numunesi ile alüminyum tozunun patlayabilirlik düzeyinin belirlenmesi amacı ile laboratuvar ortamında elek analizi ve xrf cihazı ile % element analizi yapılmıştır. Alüminyum tozu üretim tesisinde ise üretilen tozun partikül büyüklüğünün, patlayabilir alüminyum tozu büyüklüğünün üzerinde olduğu tespit edildiğinden analiz yapılmamış, ancak, firmanın kendi bünyesinde bulunan laboratuvarda yapılan elek analizi ve ICP-OES cihazı ile ilgili bilgi verilmiştir.

BÖLÜM 7: BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde öncelikle saha çalışmasının yapıldığı faaliyetleri ve tanecik boyutu farklı olan metal tozlarının üretildiği ve üretim esnasında yan ürün olarak oluştuğu iki ayrı tesis hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra olası yangın ve toz patlama olayları ve hatta toz patlamasının veya bir yangının tetikleyici olarak rol oynayabileceği durumlar için risk değerlendirmesi yapılmış ve sonuçları verilmiştir.

7.1. Tesis Tanıtımı

7.1.1. Tesis 1 (Alüminyum tozu üretim tesisi – Uşak)

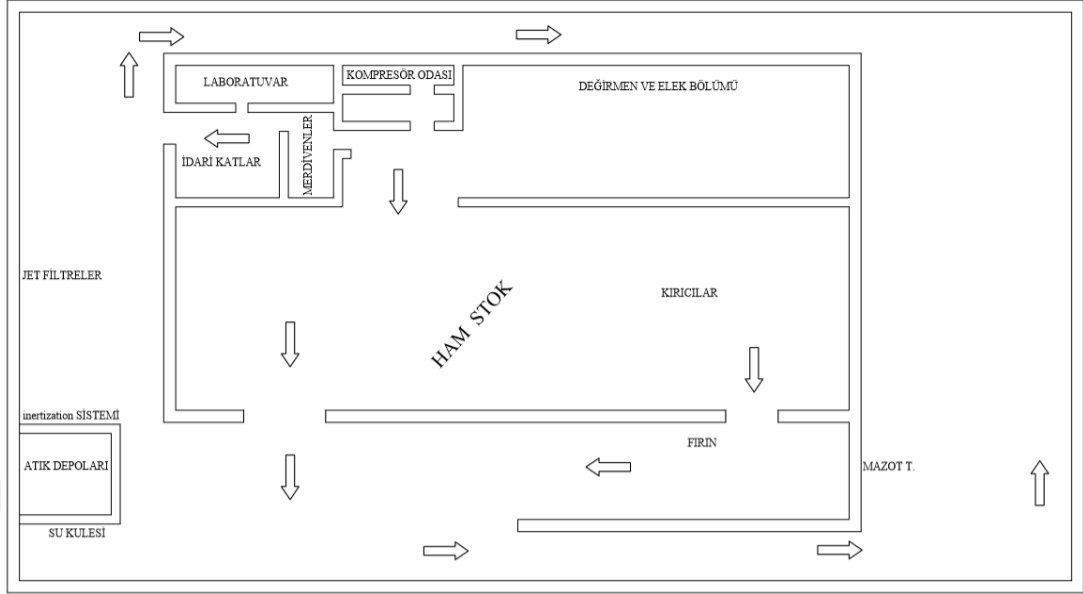
Tezin bu kısmında ve devamında “Tesis 1” olarak anılacak olan “Alüminyum Tozu Üretim Tesisi”, Uşak Organize Sanayi Bölgesi’nde yer alan, içerisinde alüminyum bulunan kağıt ve plastik lamine folyo atıkları işlemlerden geçirerek granül ve toz üretimi yapan ve satan Türkiye’deki ilk tescilli firmadır.

Tesis, 2.046 m² alan üzerine kurulmuştur. Üretim, 24 saatlik çalışma ile 3 vardiya tam kapasite sürdürülmektedir. NACE kodu: 2 7490 1 1 1034632 64 1 44 0 olup, tehlikeli sınıfta yer alan bir üretim tesisidir. Üretimin yapılabilmesi için gerekli olan basınçlı ekipmanlar da üretimde bina içinde ya da bina dışında bulunmaktadır. Bunlar; kompresörler, lpg tüpleri, azot tüpleri, argon tüpü, hava tanklarıdır.

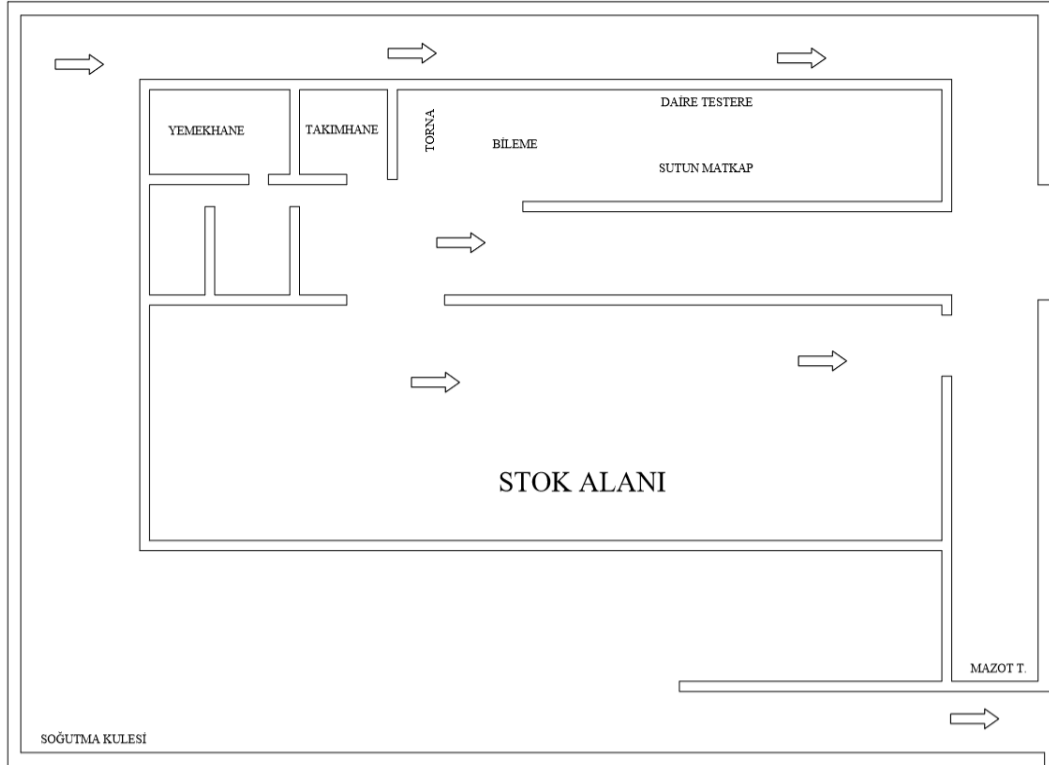
7.1.1.1. Üretim durumu ve kapasitesi

Tesis, kağıt laminasyonlu ve plastik laminasyonlu folyo hurdasını ayıklayıp 200×700 µm aralığında alüminyum granül ve alüminyum tozu üretmektedir. Tesis, 24 saat ve 3 vardiya tam kapasite çalışarak Türkiye’nin 3.000 ton/yıl’lık alüminyum tozu ihtiyacının 500 bin ton/yıl’lık kısmını karşılamaktadır.

7.1.1.2. Fabrika bina ve eklentilerinin fiziki yapısı, bölümlerin krokisi



Şekil 7.1. Tesis 1 (Uşak) Kroki 1

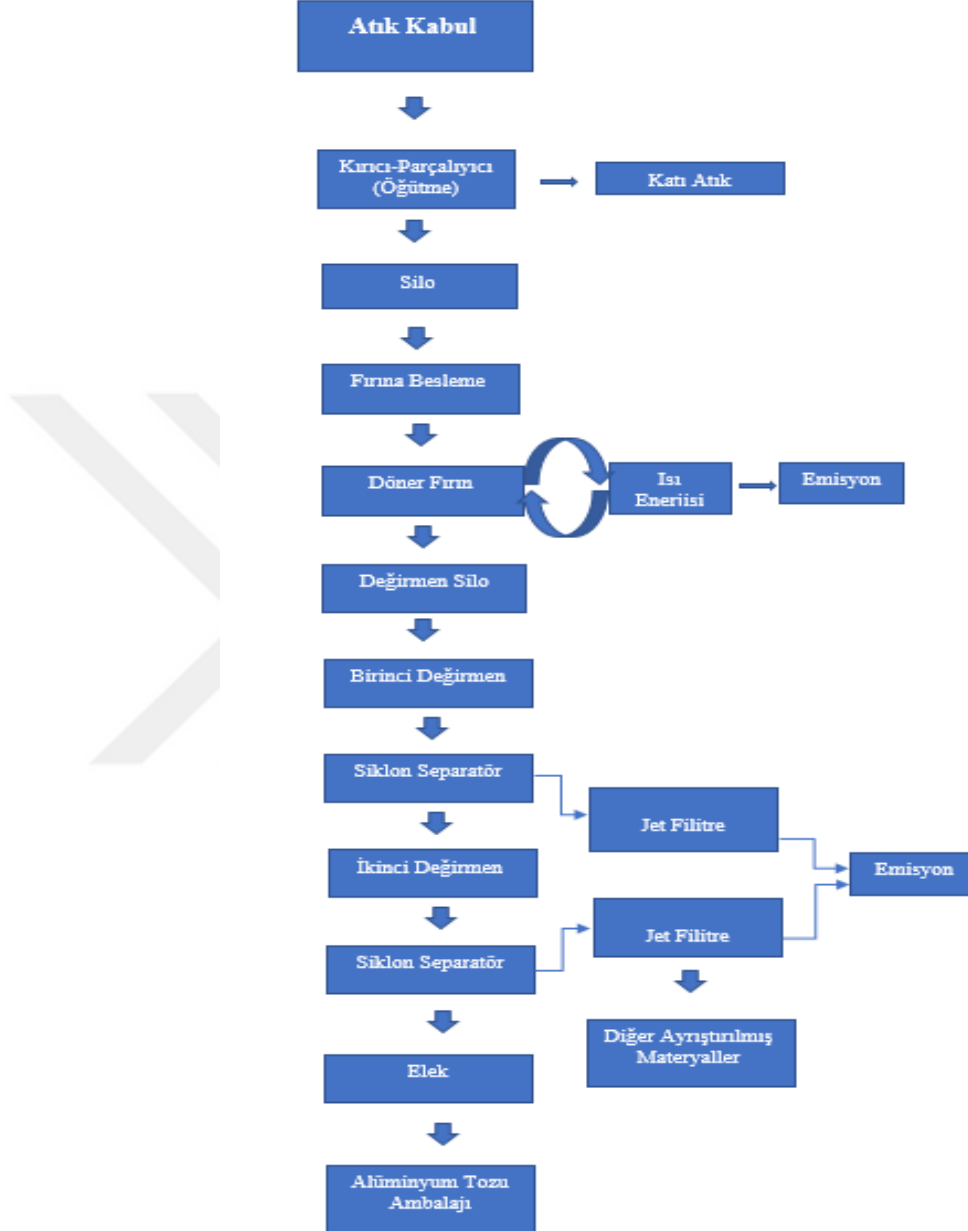


Şekil 7.2. Tesis 1 (Uşak) Kroki 2

7.1.1.3. Üretim metodu ve tesis iş akış şeması

Yakma işleminin dışında geri dönüşümü mümkün olmayan tonlarca tehlikesiz lamine alüminyum folyo atık, toplam 2.046 m² üretim alanı üzerinde tehlikesiz atık

geri dönüşüm faaliyeti olarak ayrıştırılıp, parçalanıp, fırından geçirildikten sonra separatörlerde yoğunluk farkından yararlanılarak alüminyum geri kazanımı gerçekleştirilmektedir.



Şekil 7.3. Tesis □ (Uşak) İş Akış Şeması

7.1.1.3.1. Atık kabulü

Çeşitli yerlerden folyo hurdaları, öncelikle geçici atık depolama alanında, daha sonra ayıklanıp, partiler halinde ana toplama alanında toplanmaktadır.



Şekil 7.4. Tesis -1 (Uşak) Katı Atık Ünitesi



Şekil 7.5. Tesis -1 (Uşak) Geçici Atık Depolama Alanı



Şekil 7.6. Tesis □ (Uşak) Balyalar Halinde Alüminyum Hurdaları

7.1.1.3.2. Kırıcı, parçalayıcı ünitesi

Kırıcı-parçalayıcıdan geçtikten sonra silolarda toplanan ufalmış parçalar, fırın ünitesine gönderilmektedir.



Şekil 7.7. Tesis □ (Uşak) Kırıcı – Parçalayıcı (Öğütme) Ünitesi



Şekil 7.8. Tesis □ (Uşak) Kırıcı Parçalayıcı Ünitesi

7.1.1.3.3. Döner fırın ve değirmen silo

Mazot ile ön ısıtma yapılan endirekt ısıtmalı döner fırında 600-700 °C sıcaklığa ulaşan cehennemlikte, plastik lamine folyo 3-4 dakika, kağıt lamine folyo ise 2-3 dakika olacak şekilde fırınlanmakta ve son ürün olarak karbon içerikli alüminyum tozu oluşmaktadır. Yakıt olarak başlangıçta mazot, devamında ise organik moleküllerin parçalanmasından oluşan atık gaz yakılarak emisyon azaltılması sağlanmaktadır.

Değirmen Silo



Şekil 7.9. Tesis □ (Uşak) Döner Fırın

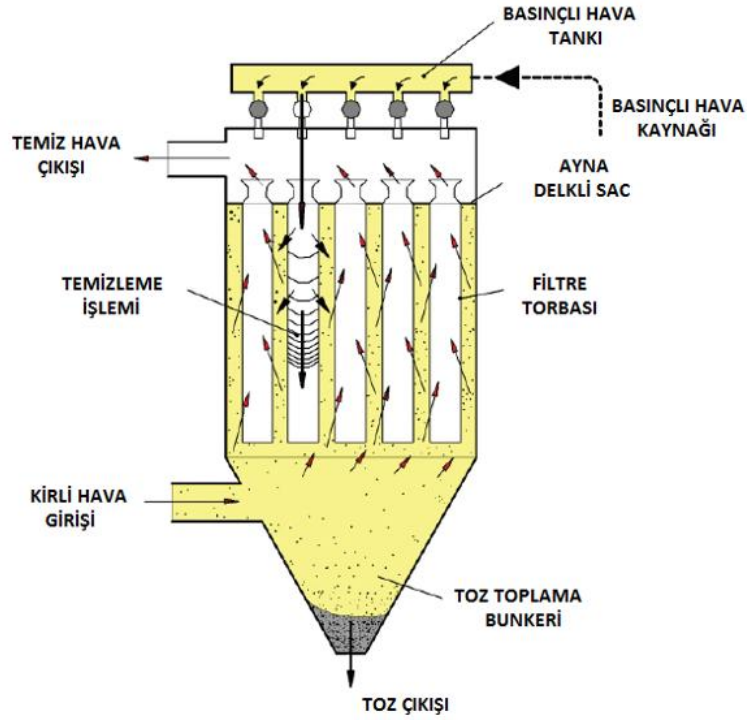
7.1.1.3.4. Değirmen, birinci siklon separator ve jet filtre

Değirmen siloya gönderilen karbonlu alüminyum tanecikleri, burada özel bıçaklar vasıtası ile gtlerek daha ince partiküller haline getirilmektedir.

Birinci siklon separator, hava ile birlikte karbonlaşan tanecikleri geçirip filtre öncesi birinci kademe toz tutucu görevi yaparak 10 μm gözenek açıklığına sahip jet filtreye göndermektedir. İri taneli alüminyum partikülleri ise tutularak 2. değirmene gönderilir. İkinici değirmende daha ince hale getirilen alüminyum partikülleri ikinci siklon separatora gönderilerek buradan 1 μm gözenek açıklığına sahip jet filtreye göndermektedir. 1 μm 'den daha ufak partiküller jet filtre vasıtası ile dışarı atılır.



şekil 7.10. Tesis □ (Uşak) Jet Filtre



Şekil 7.11. Jet Filtre Bölümleri (Genel) (<http://teknofilter.com/blog/jet-filtre/>, Erişim tarihi: 30 Ekim 2018)

Jet filtreler, kompresör kaynaklı basınçlı hava ile dahili filtre ortamını temizlemektedir. Alüminyum toz partiküllerini ihtiva eden hava mahfazaya girer ve böylece toz-hava karışımı filtre ortamının dışından iç kısma girer. Temizlenen hava yukarı doğru akarken tozu filtrenin dış yüzeyinde toplar ve filtrenin üstündeki açıklıktan temiz hava çıkışına gider. Ayarlanabilir zamanlayıcı yüksek kapasiteli bir diyafram valfi çalıştırdığında temizleme döngüsü başlar. Bu valf 20 ila 60 milisaniye arasındaki filtrelerin üstündeki valf borularını açar. Başlık borusunda bulunan sıkıştırılmış hava püskürtme uçları, havayı filtreler yönlendirir. Sıkıştırılmış hava kabarcığı, filtrenin uzunluğunu boyunca tozu filtre yüzeyinden uzaklaştırır (<http://teknofilter.com/blog/jet-filtre/>, Erişim tarihi: 30 Ekim 2018).

Filtre ortamı elastik sınırına ulaştığında, hareketi durdurulur, ancak atalet, tozun filtre yüzeyinden ayrılmasına neden olur. Toz, filtrenin alt toz toplama bunkerine boşaltılır (<http://teknofilter.com/blog/jet-filtre/>, Erişim tarihi: 30.10.2018).

7.1.1.3.5. Elek

Siklon separatörde tutulan alüminyum partikülleri 200 µm ve/veya 700 µm gözenek açıklığına sahip eleklerden geçirilerek, istenilen partikül boyutundaki alüminyum tozu ambalajlanır.



Şekil 7.12. Tesis 1 (Uşak) Elek Sistemi

7.1.2. Tesis 2 (alüminyum jant üretim tesisi- Manisa)

Tezin bu kısmında ve devamında “Tesis 2” olarak anılacak olan “Alüminyum Tozu Üretim Tesisi”, Manisa Organize Sanayi Bölgesi’nde yer alan, döküm alüminyum jant üretimi yapan firmadır.

7.1.2.1. Tesisin tanımı

Manisa Organize Sanayi Bölgesi’nde yer alan, alüminyum jant üretimi yapan firma, ilk olarak alüminyum döküm tesisi olarak 1970’li yılların başında Bursa’da faaliyete geçmiş, daha sonra bir kuzey Avrupa firması ile hisse ortaklığı kurup, yakın tarihte tüm hisseleri alarak tek bir Türk firması adı altında demir döküm, alüminyum döküm ve jant üretim tesisi olarak üç ayrı tesiste üretim yapmaktadır.

Tesis, Manisa Organize Sanayi Bölgesi’nde 45.026m² açık alan, 19.660m² kapalı alan üzerine kurulmuştur.

7.1.2.2. Üretim durumu ve kapasitesi

Tesis, yıllık ortalama 1.440.000 jant/yıl 'dır. 320 kişilik çalışan ile 3 vardiya 24 saat üretim yapılmaktadır.

7.1.2.3. Fabrika organizasyon şeması, bina ve eklentilerinin fiziki yapısı, bölümlerin krokisi

Şirketin kendi politikası gereği, fiziki yapı ve üretim ile ilgili fotoğraf ve krokilerin tesis dışına çıkarılmasına, yayınlanmasına izin verilmemiştir.

7.1.2.4. Üretim metodu

Dökümhanede, 750 °C'de erimiş halde alüminyum çelik kalıplara basılıp soğutulmaktadır. Kalıptan çıkarılan ürünler, CNC tezgahta çapakları alındıktan sonra, kumlama ünitesinde 0,6 – 2,8 mm boyutundaki demir bilyalarla (Şekil 7.13) dövülmek suretiyle kılcal çatlakları alınmakta ve boyaya hazırlanmaktadır. Daha sonra boyahaneye gidip son ürün halini almaktadır.



Şekil 7.13. Tesis □ (Manisa) Kumlama Ünitesinde Kullanılan Demir Bilyalar

Tablo 7.1. Tesis 2 (Manisa)'nin Alüminyum Jant Sertleştirilmesi için Kullandığı Alaşım Standartı

Malzeme Adı	DA 177	DA 177/1
%Si	10,5 12	6,5 7,5
%Fe	Maksimum 0,15	Maksimum 0,15
%Cu	Maksimum 0,02	Maksimum 0,02
%Mn	Maksimum 0,04	Maksimum 0,04
%Mg	0,1 0,2	0,25 0,40
%Zn	Maksimum 0,04	Maksimum 0,04
%Ni	Maksimum 0,02	Maksimum 0,02
%Ti	0,09 0,15	0,07 0,16
%Sr	0,020 0,040	0,020 0,030
%Pb	Maksimum 0,005	Maksimum 0,005
%Sn	Maksimum 0,005	Maksimum 0,005

7.1.2.5. Tesiste meydana gelen alüminyum tozu patlama olayları

Filtrede toz tutma haznesinde biriken tozda zaman zaman ufak çaplı patlamalar meydana geldiği ve bu patlamalarda filtrede bekleyen atık tozun alev aldığı, filtre cidarını korlaştırdığı (Şekil 7.14), boraks ve köpük ile söndürme girişiminde bulunulduğu bilgisi verilmiştir.



Şekil 7.14. Tesis 2 (Manisa) Filtre Cidarında Meydana Gelen Korlaşma

7.1.2.6. Yan ürün olarak alüminyum tozu

Boya ünitesinden önce kumlama ünitesine giren alüminyum jantlar, kumlama ünitesi içerisinde demir bilyalar ile dövülerek hem kılcal çatlaklar düzeltilmekte hem de boya için hazır olmaları amacıyla yüzey pürüzlülüğü giderilmektedir (metal yüzeyi hazırlanması). Bu esnada, talaş olarak çıkan tozlar (Şekil 7.15), içerideki ventilasyon sistemi ile silolarda toplanmakta, daha küçük mikron boyutundaki tozlar ise siklonlara gönderilmekte, oradan da toz filtresine gönderilmektedir.



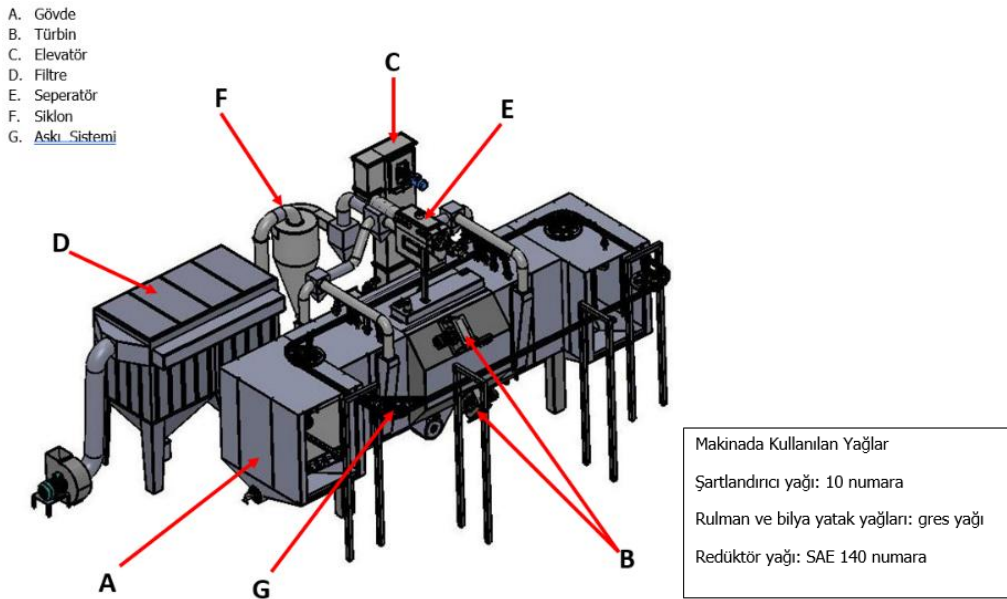
Şekil 7.15. Tesis 2 (Manisa) Kumlama Ünitesinden Yan Ürün Olarak Çıkan Alüminyum Alaşım Tozu

Tesis 2’de, şirket politikası gereği tesisin tümünün gezilmesine müsaade edilmemiş, bu sebeple yalnız toz patlama riskinin olduğu ve zaman zaman ufak çaplı patlamaların yaşandığı “Kumlama Ünitesi” nde çalışma yapılmıştır.

7.1.2.7. Kumlama ünitesi

Presten çıkmış sac aksamına yüzey pürüzlendirme yaparak boya ve kauçuk kaplama öncesi hazırlık yapımında, sıcak dövme parçaların tufallarının alınmasında, eski parçaların revizyonunda, alüminyum enjeksiyon döküm ve pirinç dövme parça temizliğinde, baskı yaylarının geriliminin alınmasında, her türlü alüminyum, çelik döküm, büyük çelik dökme parçaları, ebat olarak büyük parçaların üzerinde döküm kumu, tufal, oksitlerin temizlenmesinde ve boya öncesi hazırlık yapımında kullanılır.

Sistemdeki bilyalar türbin vasıtası ile kabin içerisindeki iş parçası üzerine bombardıman edilerek temizlik sağlanır. Daha sonra bilyalar toz çapak vs. ile karışık halde elavator yardımı ile bu istenmeyen kirlerden ayrıştırılmak üzere separatöre taşınır. Separatör sisteminde bilyalar toz tutucu filtre emişi sayesinde temizlenerek tekrar bombardıman edilmek üzere türbinlere iletilir. Dolayısıyla kabin içerisinde kapalı bir çevrim ve hava emişinden dolayı sürekli bir hava basıncı vardır ([https://tr.scribd.com/doc/46488244/Kumlama Makinasi Aksam ve Ayarlari](https://tr.scribd.com/doc/46488244/Kumlama-Makinasi-Aksam-ve-Ayarlari), Erişim tarihi: 1 Kasım 2018).



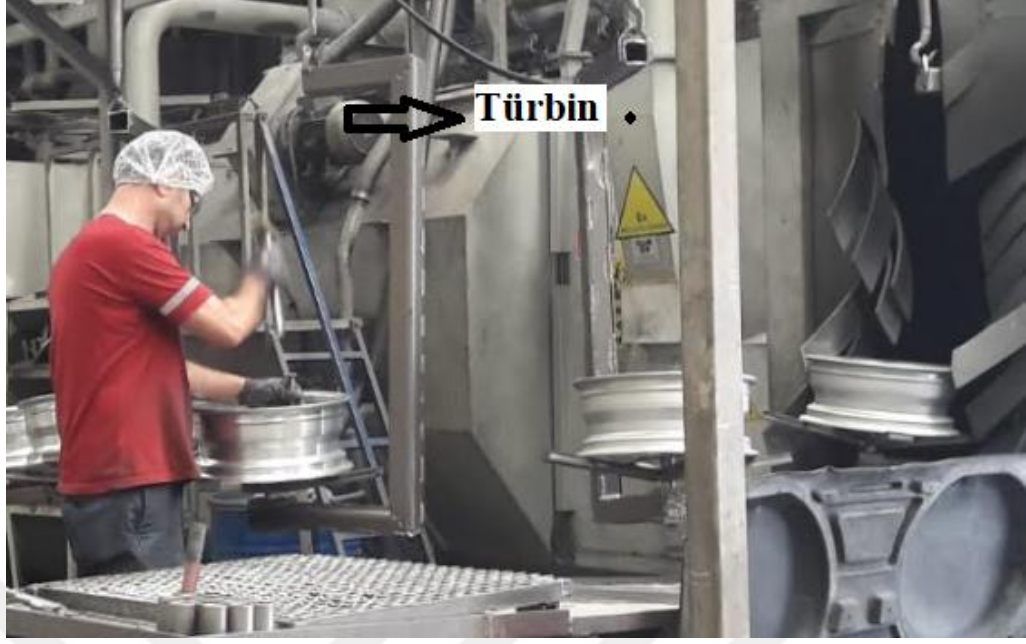
Şekil 7.16. Tesis 2 (Manisa) Kumlama Makinesi Ana Üniteleri ve Makinede Kullanılan Yağlar

Tablo 7.2. Tesis 2 (Manisa) Kumlama Makinesi Teknik Özellikleri

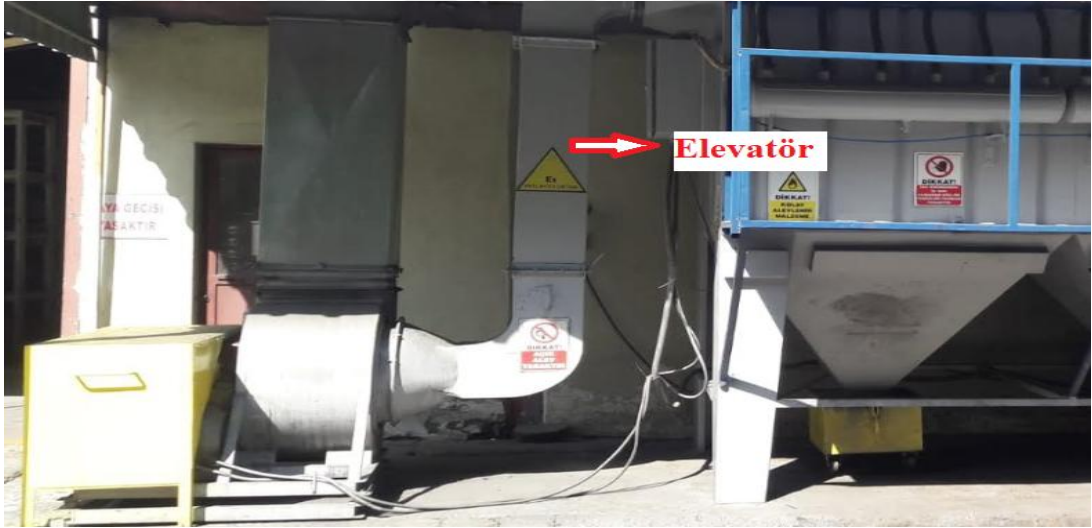
MAKİNA TİPİ	KONTİNÜ ASKILI KUMLAMA MAKİNASI
ASKI KAPASİTESİ	600 Kg.
TÜRBİN SAYISI	6 Adet
ASKI SAYISI	12 Adet
TÜRBİN ÇAPI	Ø320 mm.
PALET SAYISI	8 X 2 Adet
TÜRBİN MOTORU	7,5 Kw 3000 D/Dk.
TÜRBİN TİPİ	Ø320 DÜZ DİSK VE PALET
ASKI DÖNDÜRME MOTORU	1,5 Kw 6,5 D/Dk.
TÜRBİN GRANÜL DEBİSİ	125 Kg/Min
FİLTRE TEMİZLEME SİSTEMİ TİPİ	Jet-Pulse / 24V-DC
PATLAÇ TİPİ	PAT502 VALF / 6 Adet
FİLTRE TORBA ADEDİ/BOY	48 Adet / 1250 mm
FAN HAVA DEBİSİ	15.000 m ³ /h
FAN MOTORU	15 Kw 2300 D/Dk.
ASKI ÇEVİRME MOTORU	2,2 Kw 6,5 D/Dk.
ELEVATÖR MOTORU	3 Kw 103 D/Dk.
SEPERATÖR MOTORU	2,2 Kw 50 D/Dk.
HELEZON MOTORU(uzun)	1,5 Kw 64 D/Dk.
HELEZON MOTORU(kısa)	2,2 Kw 70 D/Dk.
TOPLAM GÜÇ	48 Kw
BESLEME GERİLİMİ	380/50 V/Hz
ANA ŞALTER	3x110 A
BESLEME KABLOSU	3x50x35 mm ² .
AĞIRLIK	28.000 Kg.
PNÖMATİK GÜÇ	7 Atm. 1,8 m ³ /h kuru hava
SES EMİSYONU	99.8 db(A)
KONSTRÜKSİYON TİPİ	SABİT
KORUMA SINIFI	TOPRAKLAMA
SUYA KARŞI KORUMA	IP 53
ENERJİ BAĞLANTISI	SÖKÜLEBİLİR
MAKİNA RENGİ	RAL 7038 + RAL5005

7.1.2.7.1. Türbin

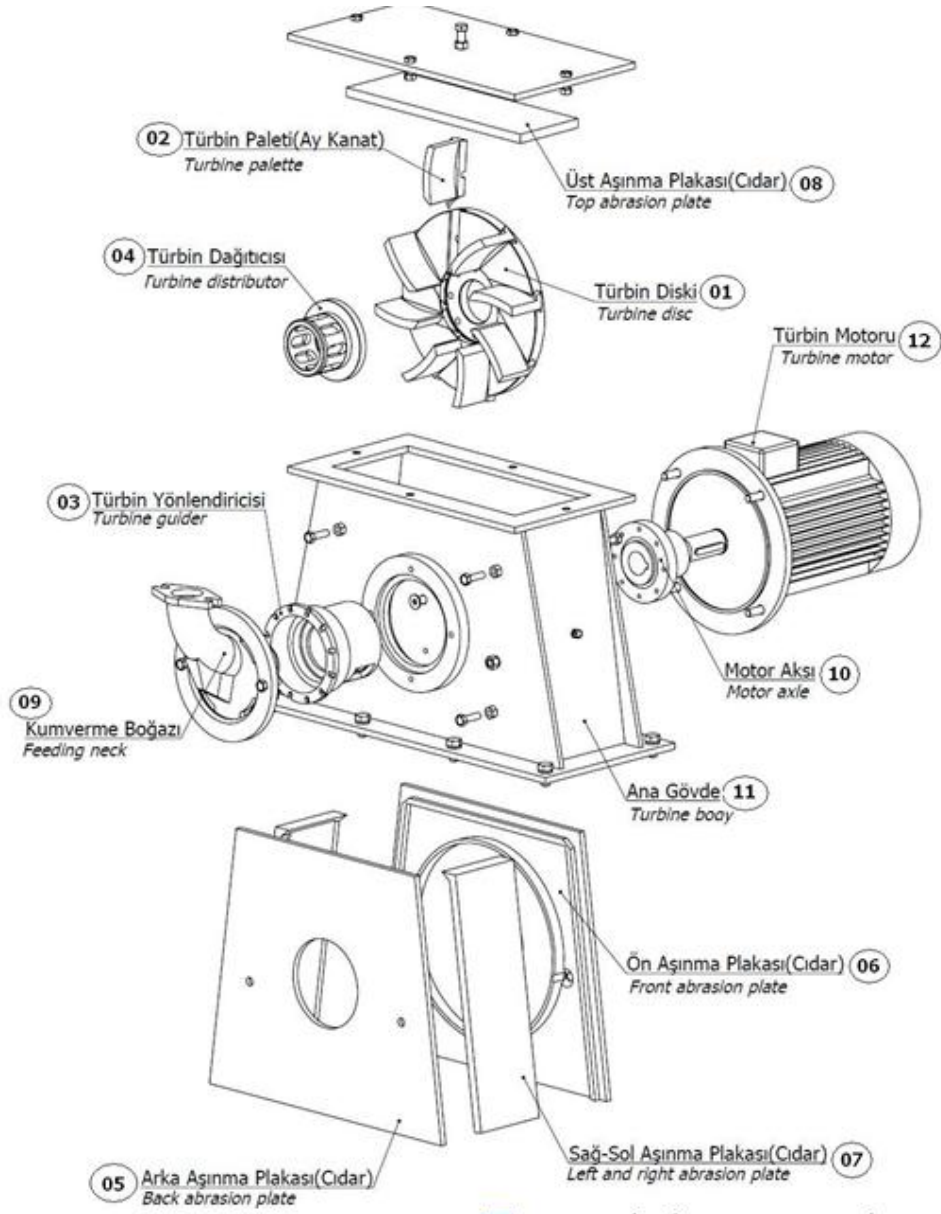
Kumlama sisteminde aşındırıcı bilyaların kabinde belirli bir rotasyon ve hız ile yüzey temizliği yapılacak parça üzerine fırlatılmasını sağlayan en önemli kısımdır ([https://tr.scribd.com/doc/46488244/Kumlama Makinasi Aksam Ve Ayarlari](https://tr.scribd.com/doc/46488244/Kumlama-Makinasi-Aksam-Ve-Ayarlari), Erişim tarihi: 1 Kasım 2018).



Şekil 7.17. Tesis 2 (Manisa) Türbin



Şekil 7.18. Tesis 2 (Manisa) Kumlama Sistemi – Elevatör



Şekil 7.19. Tesis 2 (Manisa) Türbin Ana Elemanları

7.1.2.7.2. Elevatör sistemi

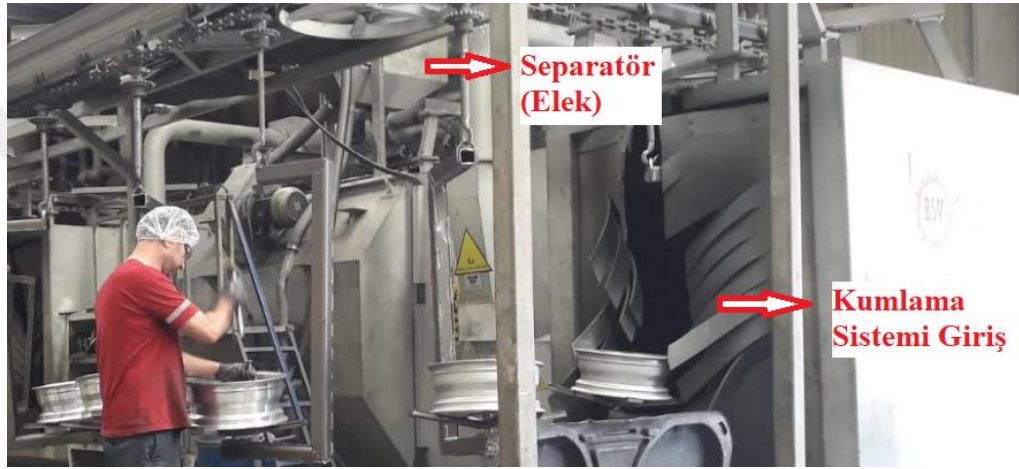
Kabin içerisinde gerçekleşen bilyalı bombardıman sonrası iş parçası üzerindeki toz vb. yabancı maddelerle karışım haldeki bilyalar, yukarı separatör sistemine kepçeli veya kovalı elavatörler ile taşınır (Şekil 7.18.)

([https://tr.scribd.com/doc/46488244/Kumlama Makinasi Aksam Ve Ayarlari](https://tr.scribd.com/doc/46488244/Kumlama%20Makinasi%20Aksam%20Ve%20Ayarlari), Erişim tarihi: 1 Kasım 2018).

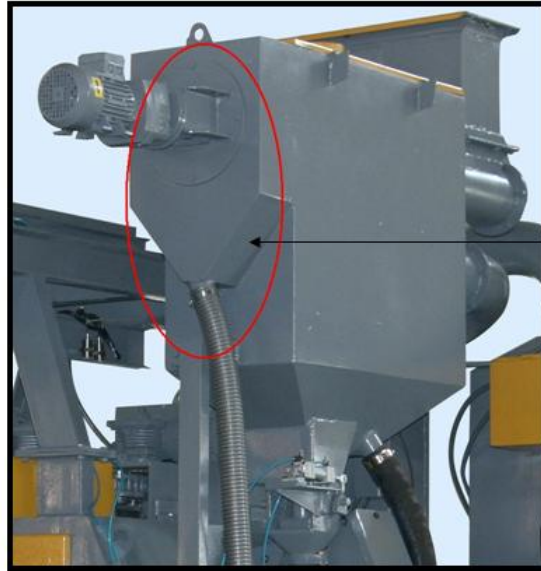
7.1.2.7.3. Separatör (Elek)

Separatörün üç fonksiyonu mevcuttur:

- İlk olarak separatör, karışım içindeki aşındırıcıların büyüklüğünü kontrol eder.
- İkinci olarak, karışımındaki istenmeyen toz vs. yabancı maddelerin uzaklaştırılmasını kontrol eder.
- Son olarak, karışım içerisindeki tanecik büyüklüğünü kontrol eder.



Şekil 7.20. Tesis 2 (Manisa) Kuşlama Sistemi (Separatör)

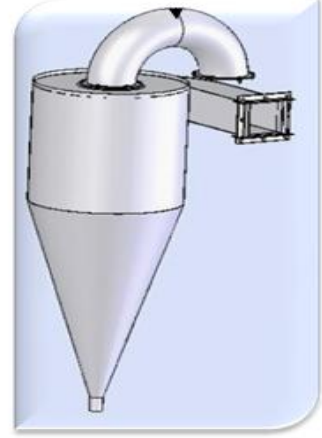


Döner elekten geçen bilyalar aşağıya türbinlere dökülür, elekten geçemeyen kalın ve atık parçalar buradan spiral hortumla dışarı atılır.

Şekil 7.21. Tesis 2 (Manisa) Döner Elek

7.1.2.7.4. Siklon

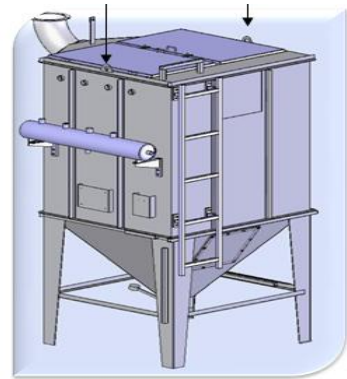
Siklonun, hava ile birlikte karbonlaşan tanecikleri ve diğer artık tozları geçirip filtre öncesi birinci kademe toz tutucu görevi yaparak 10 µm gözenek açıklığına sahip jet filtreye göndermektedir.



Şekil 7.22. Tesis 2 (Manisa) Kumlama Sistemi – Siklon

7.1.2.7.5. Filtre ünitesi ve parlama – patlamanın oluştuğu yerler

Sistemin görevi karışım içerisindeki yabancı maddeleri ve kumlama makinası içinde havada uçan tozları tutucu sistemde az bir basınç oluşturmak suretiyle uzaklaştırmaktır. Bu yüzden kumlama makinası içerisinde bir hava akışı mevcuttur.



Şekil 7.23. Tesis 2 (Manisa) Kumlama Sistemi – Filtre Ünitesi

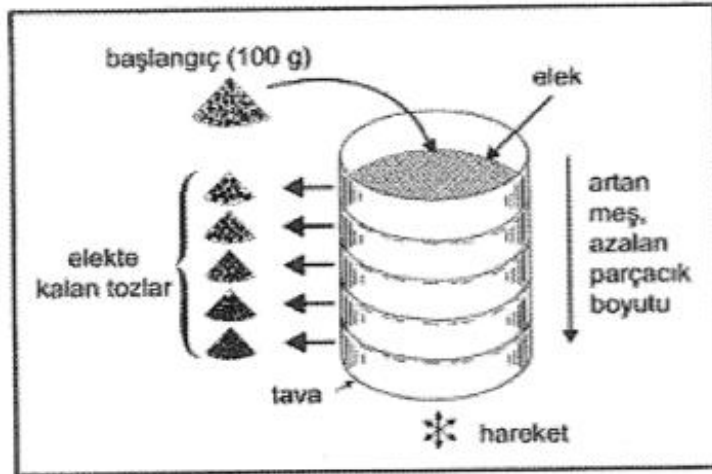
7.2. Laboratuvar Analizleri

7.2.1. Tesis 1 -Uşak için laboratuvar analizleri

İncelemeler ve değerlendirmeler sonucunda, tesiste üretilen alüminyum tozunun 200-700 µm aralığında yapıldığı belirlenmiş, literatür incelemelerine dayanarak, toz bulutu patlaması için gerekli olan minimum toz boyutunun üzerinde olduğu saptanmıştır. Bu sebeple, firmanın bünyesinde bulunan analiz cihazları ile ilgili bilgi verilmiş ancak analiz yapılmamıştır.

7.2.1.1. Elek analizi

Elek analizi yöntemi, 45µm üzeri toz partiküllerinin boyut dağılımı ölçümünde kullanılan bir yöntemdir. Birim uzunluktaki tellerin sayısı ile belirlenen elek boyutu mesh olarak ifade edilir. Analize, en küçük açıklık boyutu en altta olmak üzere, eleklerin azalan elek açıklıklarında istiflenmesi ile başlar. Belirlemiş süre ile genel itibari ile 50-100 gram toz titreşime maruz bırakıldıktan sonra her bir boyut aralığındaki toz miktarı tartılır ve aralıktaki yüzde her bir bölüm için hesaplanır. Elek altı olan toz (□) işareti ile, elek üstü olan toz ise (+) işareti ile belirtilir (Eğri, 2008).



Şekil 7.24. Elek analiz yöntemi (Eğri, 2008)

Gereçler:

- 0.01 gram hassasiyette elektronik terazi (Şekil 7.25)



Şekil 7.25. 0.01 Gram Hassasiyette Elektronik Terazı

- 50 gram alüminyum tozu numunesi
- Titreşimli elek cihazı (elek aralıkları: 0.710, 0.500, 0.355, 0.250, 0.180, 0.125, 0.090, 0.063 (mm) (Şekil 7.26)



Şekil 7.26. Titreşimli 500 \times 45 Mesh Elek

İşlem:

0,01 gram hassasiyette 50 gram alüminyum numunesi tartılır. Kap içindeki numune titreşimli eleğe koyulur. Titreşimli elek 10 dakikaya ayarlanıp çalıştırılır. Süre bitiminde her bir elekte kalan alüminyum numuneleri ölçülür.

7.2.1.2. Folyo alüminyum miktarı tayini

Gereçler:

- 0.01 gram hassasiyette elektronik terazi (Şekil 7.25)
- Metalik alüminyum tayin cihazı (Şekil 7.28)
- Alüminyum kap
- 150 ml'lik şilifli erlen:



Şekil 7.27. Şilifli Erlen

Ayırıcılar:

%5'lik NaOH çözeltisi

İşlem:

Gram hassasiyette 1 veya 0.3 gram numune alüminyum kap içerisine tartılır. Kap içindeki numune 150 ml'lik erlen içine koyulur ve üzerine 100 ml %5'lik NaOH eklenir. Metalik alüminyum tayin cihazının tıpası zaman kaybetmeden erlerin ağzına takılır. NaOH'lar çözülürken çıkan gazlar suyu iterek su bölmesinden dereceli kaba toplanır, su gelme işi bitince toplanan su miktarı¹⁹ ml olarak okunur.

¹⁹Alüminyum pudra veya toz için test yapılırken 0,3 gram, alüminyum curuf için test yapılırken 1 gram numune ile çalışır.



Şekil 7.28. Metalik Alüminyum Tayin Cihazı
 $\% \text{Metalik alüminyum} = \frac{\text{Dereceli kaptaki toplanan su miktarı (ml)}}{13,80} \times 3,33$

7.2.1.3. ICP- OES cihazı ve çalışma prensibi

İndüktif olarak eşleşmiş plazma optik emisyon spektrometresi (ICP-OES), birleştirilmiş ağır metallerin tespiti için kullanılan analitik bir tekniktir. Cihaz, plazma kullanarak uyarılmış atom ve iyonlar üretir. Her elementin dalga boyu özelliği farklı elektromanyetik radyasyon yaydıklarından emisyon şiddeti farklı olacaktır. Emisyonun şiddeti, numune içindeki elementin konsantrasyonuna işaret eder (http://www.derilkim.com/urunler/analitik_cihazlar/icp_oes/icp_oes_nedir_calisma_prensibi/, Erişim tarihi: 16 Eylül 2018).

ICP-OES, katyon ve elektronlardan meydana gelen ve elektrik iletkenliğe sahip gaz ortamı olarak argon gazı (plazma) ile iyon akımı sağlayarak atomlaştırma meydana getiren bir cihazdır.

Numuneden buharlaşan atomların katyonları miktar olarak argon katyonları ve elektronlardan azdır. Argon katyonları enerji absorblayarak ortamın sıcaklığı yaklaşık 10.000 °K de sabit olarak tutulur. Stabil bir plazmanın oluşumu için gereken iyonizasyonu sağlar. Burada numune bir argon akışlı sisleştirici (*nebulizer*) içinde sisleştirilir ve oluşan çok küçük damlacıklar bir spray hücresi vasıtasıyla plazmaya taşınır. Bunun sonucunda iyi bir atomlaşma meydana gelir. Elementlere has emisyon spektrumları dağıtıcı bir spektrometreden geçirilir ve ışığa duyarlı bir

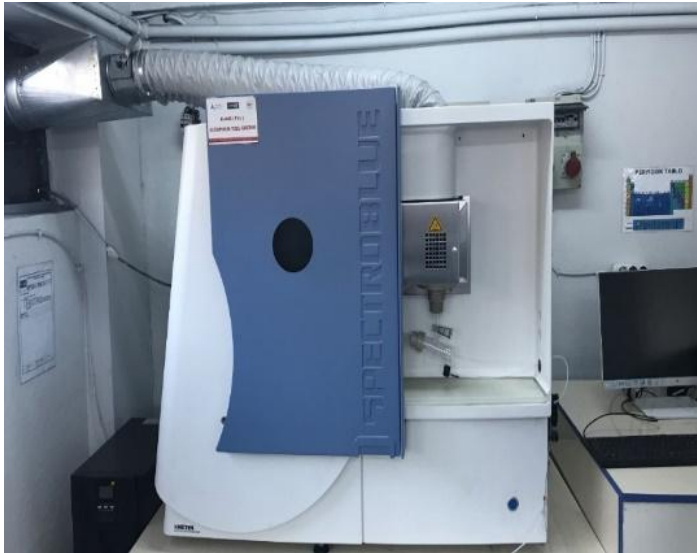
cihaz (CCD detektör *Charge Coupled Device* detektör) ile şiddetleri özgün dalga boylarında izlenir. Bu da bir bilgisayar sistemi tarafından işlenir ve kontrol edilir (<https://maulab.amasya.edu.tr/cihazlarimiz/induktif-eslesmis-plazma-optik-emisyon-spektrometresi-icp-oes.aspx>, Erişim tarihi: 20 Ekim 2018).

Nitrik asit ve HCl (Hidroklorik asit) ile seyreltilerek sıvılaştırılmış %99 saflıkta bir alüminyum numunesi ile karşılaştırma yapma esasına dayanır.

Tablo 7.3. ICP-OES Cihazı ile Yapılan Element Tayinindeki Analiz Parametreleri Tablosu (Taslak)

Cihaz		
Detektör		
RF Jeneratörü		
Pompa Hızı		
Güç (W)		
Gaz Akış Oranı (l/dk)	Plazma Gazı	
	Yardımcı Gaz	
	Sisleştirici Gaz	
Örnek Akış Oranı (ml/dk)		
Hamlaç (Torch)		
Oto örnekleyişi		
Okuma süresi (s)		
Gecikme süresi (s)		
Yıkama süresi (s)		

Kaynak: Reference not sited



Şekil 7.29. ICP-OES Cihazı ve %99 Saflıkta Alüminyum Numunesi

7.2.1.3.1. ICP-OES Cihazı çalıştırma

- Cihaz üzerinde bulunan anahtar açılır/kapanır,
- Cihazın fanı açılır,
- Argon gazı açılır ve 6-7 bar arası bir basınca ayarlanır,
- Bilgisayar açılır
- Cihazın yazılım programı açılır,
- Cihazın yazılım giriş/çıkış boruları peristaltik pompaya²⁰ yerleştirilir.
- Cihazın çözelti alıp vermesi kontrol edilir.
- Plazma yakılır,
- Analizi yapılacak numuneler sisteme beslenir,
- Her bir numuneden sonra sistem yıkama çözelti ile temizlenir,
- Analiz bittikten sonra plazma kapatılır,
- Yazılım ve bilgisayar kapatılır,
- Peristaltik pompadaki borular çıkartılır,
- Argon gazı ve cihazın fanı kapatılır,
- Doğru ölçüm yapılması için cihazın kapatılmaması ve sıcaklığın 20-25 °C arasında olması gerekir.

7.2.2. Tesis 2 (Manisa) için laboratuvar analizleri

7.2.2.1. Elek analizi

Filtrede biriken tozdan alınan 100 gram numune, laboratuvar ölçümüne gönderilmiş ve Bölüm 7.2.1.1'de anlatılan elek analizi yöntemi ile 3 dakika boyunca 8 şiddetinde titreşime maruz bırakılmıştır. Analiz sonuçları aşağıdaki gibidir;

Tablo 7.4. Tesis 2 (Manisa) 100 Gram Numune için Elek Analizi Sonuçları

<u>MICRON</u>	<u>MESH</u>	<u>TEK</u>	<u>KÜMÜLATİF</u>
<u>+300</u>	<u>+50</u>	<u>2,189</u>	<u>2,189</u>
<u>+250</u>	<u>+60</u>	<u>17,287</u>	<u>19,476</u>
<u>+150</u>	<u>+100</u>	<u>65,886</u>	<u>85,362</u>
<u>+75</u>	<u>+200</u>	<u>9,122</u>	<u>94,484</u>
<u>+45</u>	<u>+325</u>	<u>2,318</u>	<u>96,802</u>
<u>45</u>	<u>325</u>	<u>3,198</u>	<u>100</u>

²⁰Peristaltik Pompalar: Peristaltik hareket mantığı ile, hortumun belirli bölgelerinin elektrik motoruna bağlı rotor tarafından senkronize olarak sıkıp gevşetilmesi ile oluşan basıncın sıvı hareketini sağladığı pompa türüdür (<http://www.leonteknik.com/pompa/peristaltik-pompa>, Erişim tarihi: 5 Kasım 2018)

7.2.2.2. Yoğunluk analizi

X ışınları Floresans (xrf) spektroskopisi elementel kompozisyonu belirlemede kullanılan önemli yöntemlerden biridir yani kantitatif (nicel) analiz yapar. X ışınları Floresans Spektrometresi ile; Si, Al, Ti, Mn, Mg ... gibi ana element oksitleri yüzde (%) ağırlık cinsinden (MnO, MgO ...) analiz eder. Atom numarası 9 ile 92 arasında olan elementlerin kantitatif analizini yapar. Atom numarası 9'un altında olan elementleri inceleyemez. Kimyasal bağ derecesinde yeterince hassas değildir.

Tablo 7.5. Tesis 2 (Manisa) Kumlama Ünitesi Son Ürünü 15 Gram Alüminyum Alaşımılı Toz Yoğunluk Analizi

Madde	Kütleli %
O	10,7179
Na	0,0747
Mg	0,0501
Al	2,0056
Si	0,4329
P	0,0223
S	0,0315
Cl	0,0250
K	0,0143
Ca	0,1965
Ti	0,0117
Cr	0,1278
Mn	0,5730
Fe	85,5636
Ni	0,0439
Cu	0,0465
Ge	0,0034
As	0,0038
Nb	0,0055
Mo	0,0130
Re	0,0299
U	0,0072

XRF çalışma prensibi; temel olarak eğer atom yüksek enerjili bir X ışını fotonu düşürülecek olursa atomdan fotoelektronlar kopartılacaktır. Bu koşulda atomun yörüngelerinde bir ya da daha fazla elektron boşlukları oluşacak ve kararsız olan atom dış yörüngelerdeki elektronların boşlukları doldurması ile kararlı duruma gelecektir. Fakat her bir elektron boşluğu doldurmada atom orbital enerji farkı ile orantılı bir foton yayınlayacaktır. Bu karakteristik foton enerjiler algılanarak kimyasal kompozisyon nitel ve nicel olarak hesaplanabilir (<http://yebim.ankara>).

edu.tr/2013/04/25/x[isinlari]floresans[spektrometresi]xrf/, Erişim tarihi: 5 Aralık 2018).

Filtreden alınmış 100 gram alüminyum alaşımlı toz numunesinin, xrf cihazından alınan kütlelel yüzde bileşik analizi aşağıdaki gibidir;

7.2.2.3. Analiz değerlendirmesi

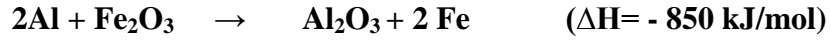
a) Elek analizi sonuçlarına bakıldığında (Tablo 7.4.), virgülden sonra iki hane alınarak yaklaşık değer olarak elek altı yüzdelerinden, havada asılı toz halinde kalarak patlama bakımından en riskli toz fraksiyonunu 75 mikron ve altı olduğunu düşünenecek olursak, bunun oranı yaklaşık %14,64'tür. Haliyle bu toz karışımındaki asıl patlayıcı metal olan Al'un Fe metaline oranı oldukça düşüktür (Ortalama kimyasal analiz değeri yaklaşık olarak Fe için: %85,56, Al için: %2,01 alırsak (Tablo 7.5.)). Ancak demire göre yoğunluğu yaklaşık 2,9 kat daha düşük olan alüminyum tozları filtre atmosferinde daha fazla miktarda (demir tozlarına oranla) havada asılı olarak bulunacaktır. Alüminyum tozları patlama konsantrasyonuna (60 g/m³ (Tablo 4.9)) ulaşmış ve tablo 4.9.'da görüleceği gibi 15 mJ gibi çok düşük bir MTE değerine sahip olduğundan patlama gerçekleşmiştir. Bu düşük enerji, patlamaya karşı izole edilmemiş bir elektrik kaynağından hatta bir statik elektrikten kolaylıkla sağlanabilir. Önemli olan Al toz konsantrasyonunun oluşması önlenmelidir. Bunun yanında patlamaya karşı patlama korunmalı (exproof) cihazlar kullanılmalı, statik elektrik iyi bir topraklama (bara sistemi) ile mutlaka önlenmelidir.

b) Kumlama ünitesinde kullanılan demir bilyalar, malzeme yüzeyine hızla çarparken, malzeme yüzeyini aşındırmakta ve aynı zamanda kendi yüzeyinden de toz partikülleri ayrılmaktadır. Ayrılan demir (Fe) tozları, ortamdaki hava ile Fe₂O₃ oluşturmakta ve yüzey temizliği yapılan alaşımlı alüminyum jant (alaşımda kullanılan maddeler Tablo 7.1.'de verilmiştir) yüzeyinden kopan alüminyum tozu partikülleri, Fe₂O₃ ile aluminotermi tepkimesi oluşturabilir. a şıkında belirtilen Al'un oksidasyonu ile oluşan patlama enerjisi etkisiyle, ortamdaki az da olsa bulunabilen Fe₂O₃ in etkisiyle sözü edilen tepkime de gerçekleşerek (aşağıda

yazılan reaksiyonla gösterildiği gibi) oksidasyon bir başka şekilde devam edecektir ya da devam edeceği düşünülebilir. Bu durum tehlikeyi artıracaktır.

Alüminotermi tepkimesi;

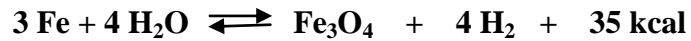
Metal oksit (toz) + Alüminyum (toz) = Alüminyum oksit + Metal + Isı olarak gerçekleşmektedir. Demir için söz konusu reaksiyon;



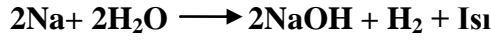
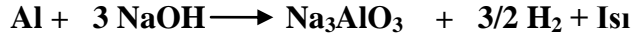
Tesiste çok büyük bir patlamanın meydana gelmemesi Al tozlarının konsantrasyonun çok kısa bir zaman aralığında küçük bir hacimde patlama sınırını oluşturması ve ikincil patlamayı oluşturacak yeterli toz bulutuna erişilememesi olarak değerlendirilebilir.

c) Tozun patlamayı ilgilendiren açıklamayla ilgili kimyasal yapısına tekrar bakıldığında, yaklaşık olarak %2,01 Fe, %85,56 Al, %0,0501 Mg, %10,72 O ve diğer bileşenler görülmektedir. Buradaki O oranı düşük olduğundan yapılan işlemler sırasında Fe'nin, Al'nin, Mg'nin önemli bir bölümünün metalik halde bulunduğu, az miktarının oksit durumunda olduğu anlaşılmaktadır.

d) Tesis 2'de (Manisa) meydana gelen patlamalara karşı alınan önlemlerde, söndürme maddesi olarak filtre içerisinde borik asit ve köpük bulundurulmaktadır. Borik asit söndürmede etkili olabilir. Köpüğün içerisinde bulunan su ise ortamdaki Fe ile sıcakta tepkimeye girerek yanıcı H₂ gazı açığa çıkmasına neden olur ve tehlikeli olur.



Hatta üretimde alaşıma sodyum metali katıldığı belirtilmiştir. Sodyum metali de su ile yine yanıcı H₂ gazı verir ve NaOH oluşturur. Oluşan NaOH de Al metali ile tepkime vererek tekrar yanıcı ve patlayıcı H₂ gazı verir. Bu bakımdan köpük sıkılması son derece sakıncalıdır.



7.3. Risk Değerlendirmesi

Risk değerlendirme yapılırken cevaplanması gereken sorular şu şekilde tanımlanabilir;

- Ortamda patlama potansiyeli olan tozlar, yanıcı, parlayıcı gaz veya sıvılar mevcut mu?
- Ortamdaki tozlar Bölüm 4.4.2.1’de açıklanan parametreler (konsantrasyon, partikül boyutu, nem, tutuşma kaynakları vb.) testleri mevcut mu?
- Ortamda hibrit karışımlar oluşma imkanı var mı?
- Ortamda patlamaya yetecek enerjiyi üretecek tutuşma kaynakları var mı?
- Anormal ortam sıcaklıkları, yüzeyleri ısınan makine ve ekipmanlar, elektriksel cihaz ve bağlantılar mevcut mu?

(<http://www.isteguenlik.tc/tozpatlamalari.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018)

7.3.1. Bir toz patlamasının olası etkilerinin değerlendirilmesi

Bölüm 4.4.2.1.1. ‘de açıklanan P_{max} ve K_{st} gibi değerler olabilecek patlamanın şiddeti hakkında ipuçları verebilir. Bu tip patlamalarda en fazla zararı havada uçan bina ve ekipman parçaları oluşturmaktadır. Yapının patlama olan bölümündeki hasar ve titreşim, ortak olan duvar, temel ve diğer hacimlere de zarar verecektir. Örneğin bir siloda olan bir patlama, bağlantılı olan diğerlerini de etkileyecektir. Ayrıca sekonder bir patlamanın hasar verebileceği bölümler de analiz edilmelidir. Patlama riski az olan ancak üretimi kesintiye uğratabilecek bölümler buna örnektir. Ters olarak patlama riski olan ama izole edilmiş, herhangi bir yaralanmaya ve üretim kesintisine nispeten daha az neden olabilecek alanlar daha düşük risk puanı ile değerlendirilmelidir (<http://www.isteguenlik.tc/tozpatlamalari.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018).

7.3.1.1. Patlama riski tanımlamasında aşamalar

1. Tüm potansiyel tutuşturucu kaynakların tanımlanması:

Potansiyel tutuşturucu kaynaklar için Bölüm 3.3.1. baz alınarak ve tesis incelemesi yapılarak aşağıdaki tablo oluşturulmuştur;

Tablo 7.6. Tesis □ (Uşak) Tutuşturma Kaynakları

Tutuşturucu Kaynaklar	Ekipman / Bölge	Efektif Bir Kaynak mı?	Etkin Hale Gelebilir mi?
Sıcak Yüzeyler	Separatör	Evet	EVET, kumlama ünitesi çalıma esnasında ve bilyaların cidara çarpma etkisiyle meydana gelen mekanik kıvılcımlarla oluşan yüzey sıcaklığı
	Filtre		EVET, kumlama ünitesi çalıma esnasında ve bilyaların cidara çarpma etkisiyle meydana gelen mekanik kıvılcımlarla oluşan yüzey sıcaklığı
Alev ve Sıcak Gazlar	Separatör	Hayır	EVET, ekipman çevresinde açık alevli çalışma yoktur ve sigara yasağı vardır.
	Kumlama Ünitesi	Hayır	EVET, ekipman çevresinde açık alevli çalışma yoktur ve sigara yasağı vardır.
	Filtre	Evet	Evet, tutuşturucu olarak sigaraya maruziyet
Mekanik Olarak Oluşan Kıvılcımlar	Filtre	Evet	EVET, kaçak bilya ve tozların cidara yaptığı çarpma sonucu
	Elevatör	Evet	EVET, kaçak bilya ve tozların cidara yaptığı çarpma sonucu
Elektrikli Cihazlar	Mazot Tankı	Evet	EVET, Ekipman ve çevresinde elektrikli cihazlar mevcuttur.
Kontrolsüz elektrik akımları	Elektrik Panosu	Hayır	HAYIR. Kontrolsüz elektrik akımlarına karşı kaçak akım rölesi ve topraklama mevcuttur. Kaçak akım rölesinde bir arıza oluşması durumunda efektif olabilir.
	Türbin	Hayır	EVET, ekipman çevresinde bulunan açık kablo uçları ve yıpranmış kablo bulunduğunda efektif olabilir.

Tablo 7.6. (devam)

Statik elektrik	Elevatör	Hayır	EVET, ekipman çevresinde bulunan açık kablo uçları ve yıpranmış kablo bulunduğu efektif olabilir
	Separatör	Evet	EVET, ekipman çevresinde bulunan açık kablo uçları ve yıpranmış kablo bulunduğu efektif olabilir
	Genel Ünite	Hayır	EVET, ekipman çevresinde bulunan açık kablo uçları ve yıpranmış kablo bulunduğu efektif olabilir
	Türbin	Evet	HAYIR, ekipmanın gövde topraklaması yapılmış durumdadır. EVET, tozların çevrimi sırasında oluşabilir.
	Elevatör	Evet	HAYIR, ekipmanın gövde topraklaması yapılmış durumdadır. EVET, tozların separatöre gönderimi sırasında oluşabilir.
	Separatör	Evet	HAYIR, ekipmanın gövde topraklaması yapılmış durumdadır. EVET, tozların tahliyesi sırasında oluşabilir.
	Siklon	Evet	HAYIR, ekipmanın gövde topraklaması yapılmış durumdadır. EVET, siklonlara dolum esnasında sürtünme nedeniyle oluşabilir.
	Ekipman Geneli	Hayır	HAYIR, ekipmanın gövde topraklaması yapılmış durumdadır.
Yıldırım	Ekipman Geneli	Evet	HAYIR, Paratoner mevcuttur.
Egzotermik Reaksiyon	Elevatör	Hayır	EVET, elevatör bantının sıkışması ile birikecek tozların oksijen ile egzotermik reaksiyonu
	Filtre	Evet	Silolarda biriken tozun uzun süre bekletilmesi neticesinde alüminyum tozunun kendiliğinden ısınması, demir bilyaların oksitlenmesi
	Siklon	Hayır	Klape ayarı hatası ile fazla oksijen girişi ile egzotermik reaksiyon

2. Patlama ortamının patlayıcı atmosferi tutuşturma olasılığının belirlenmesi:

Bkz. Bölüm 7.3.4.6

3. Bir tutuşmanın ve ortaya çıkan patlamanın olası etkilerini belirleme:

Bkz. Bölüm 7.3.4.6

4. Riskin değerlendirilmesi.

Bkz. Bölüm 7.3.4

5. Riskleri en aza indirecek önlemlerin göz önünde bulundurulması (Barton, 2002).

Bunlara ilave olarak genelde gözden kaçan detaylar olan katmanlar, birikintiler ve patlayıcı toz yığınları, patlayıcı bir ortam oluşturabilecek kaynaklar olarak düşünülmelidir. Belirli bir tesis ve toz için, tozun nispeten yoğun olması halinde, bir toz tabakasından bir bulut oluşturma hiçbir yolu olmayabilir, düşük hava hızları her zaman beklenir, toz higroskopiktir²¹ veya aglomere²² veya diğer kuvvetli bir eğilime sahiptir. Bu faktörlerin yerel bir değerlendirmesi gereklidir. Bir bölgeleme çalışmasının sonuçları genellikle, farklı bölgeler için farklı semboller kullanarak çizimler biçiminde belgelenir (Barton, 2002).

Patlayıcı ortam ile ilgili bir risk değerlendirmesinde, patlayıcı ortamların meydana gelmesini sağlayacak şartların mevcudiyetine ve patlayıcı ortam oluşturma olasılığı ile ilk tutuşmayı başlatacak tutuşma kaynağının mevcudiyetinin aynı anda oluşması durumu analiz edilmelidir.

7.3.2. Risk Analizi ve Değerlendirmesi

7.3.2.1. Risk Analiz Metotları

- i. Kantitatif Metotlar (Nicel Sayısal)
 - Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA) (FMEA (Failure Modes and Effects Analysis))

²¹Higroskopik Madde: Genel kimyada herhangi bir maddenin içinde bulunduğu ortamdaki su moleküllerini difüzyon veya çeperinde yoğunlaştırma yöntemi ile azaltabilme yeteneğine sahip madde (<https://tr.wikipedia.org/wiki/Higroskopi>, Erişim tarihi: 24 Kasım 2018)

²²Aglomere: İki veya daha fazla adetteki parçaların mekanik veya fiziksel kuvvetlerle birbirlerine zayıfça bağlanmaları ile meydana gelen kütle (<https://insapedia.com/aglomere%20aglomera%20nedir/> , Erişim tarihi: 24 Kasım 2018)

- Fine –Kinney Analiz Metodu
 - Jhon –Ridley Analiz Metodu
 - Risk Değerlendirme Karar Matrisleri (Risk Assessment Decision Matris)
 - L Tipi (5x5) Matris
 - Çok Değişkenli X Tipi Matris
 - İş Güvenliği Analizi (Job Safety Analysis) JSA
- ii. Kalitatif Metotlar (Nitel tanımlayıcı)
- Tehlike ve işletilebilme Çalışması Analizi HAZOP (Hazard and Operability Studies)
 - Olursa Ne Olur Analizi (What if...Analysis?)
 - Ön Tehlike Analizi (PHA □ Preliminary Hazard Analysis)
 - Birincil Risk Analizi (PRA □ Preliminary Risk Analysis)
 - İş Güvenliği Analizi JSA (Job Safety Analysis)
- iii. Yarı Kantitatif Metotlar (Karma)
- Olay Ağacı Analizi Yöntemi (ETA □ Event Tree Analysis)
 - Hata Ağacı Analizi Yöntemi (FTA □ Fault Tree Analysis)
 - Sebep–Sonuç Analizi (Cause –Consequence Analysis) (Yılmaz, 2010).

Bu çalışmada, HTEA yöntemi ile risk analizi çalışması yapılmıştır.

7.3.3. Tesis 1 ve Tesis 2 risk değerlendirmesi metodu ve risk analiz uygulaması

Her iki tesiste kullanılan yöntemin 5x5 matris olduğu sonucuna varılmıştır. Bu yöntem, uygulama kolaylığından dolayı yaygın olarak kullanılan bir yöntem olup, literatür araştırmasında patlamalar için en uygun yöntemlerin Fine Kinney, HTEA (FMEA) ve HAZOP olduğu bilgisine varılmıştır. Bu tezde, toz patlamalarına uygunluğu nedeni ile HTEA yöntemi uygulanmıştır.

7.3.3.1 Hata türleri ve etkileri analizi- HTEA

HTEA prosedürü, tesisteki tüm risk yaratabilecek madde, olay, durum ve bileşeni sırasıyla almak, olası tüm başarısızlık modlarını listelemek ve her birinin sonuçlarını değerlendirmektir. Sonuçlar, eylem önerilerinin dahil edilebileceği

standart bir formatta kaydedilir. HTEA'nın zayıflığı, başarısızlık modlarını ve etkilerini tanımlamak için belirli bir yöntem bulunmamasıdır. Mühendisin bunu ilk prensiplerden ya da geçmiş deneyimlerden yapması beklenir ve kendisine uygulanan tek disiplin, raporlama formatının kendisidir (Eckhoff, 2016).

Bir HTEA aşağıdakileri amaçlayan sistematik bir faaliyetler grubu olarak tanımlanabilir (Down ve Ark., 2008):

(a) Bir ürünün / sürecin potansiyel hatasını ve bu hatanın etkilerini tanımak ve değerlendirmek,

(b) Tehlike potansiyelinin meydana gelme olasılığını ortadan kaldıracak veya azaltacak eylemleri tanımlamak.

(c) Bütün prosesi tümüyle dokümante etmek

Bir HTEA programının başarılı bir şekilde uygulanması için en önemli faktörlerden biri güncelliktir. Reaktif değil, proaktif yaklaşımdadır. En yüksek değere ulaşmak için, HTEA, bir ürün veya süreç hatası modunun bir ürün veya sürece dahil edilmesinden önce yapılmalıdır. Ürün / süreç değişiklikleri en kolay ve ucuz bir şekilde uygulanabildiğinde, bir HTEA'nın düzgün bir şekilde tamamlanması için harcanan zaman, geç değişim krizlerini en aza indirecektir. Bir HTEA, daha da büyük bir endişe yaratacak bir önleyici / düzeltici değişiklik yapma şansını azaltabilir veya ortadan kaldırabilir. Tüm HTEA ekipleri arasında iletişim ve koordinasyon meydana gelmelidir (Down ve Ark., 2008).

Üç çeşit HTEA vardır: Sistem, tasarım ve süreç HTEA (Basu, 2016). Bunlara ilaveten bazı kaynaklarda Servis HTEA olarak çeşitlendirilmektedir.

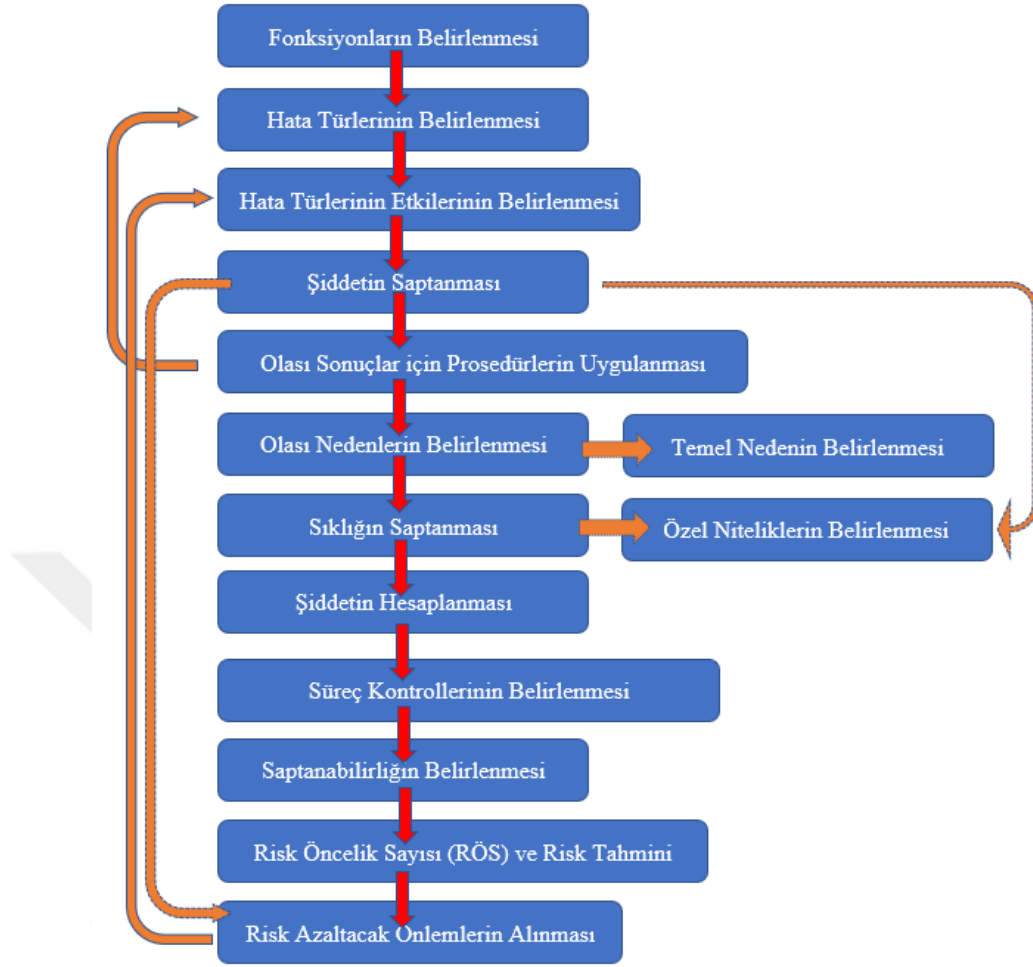
Tasarım HTEA,

- Sürekli revize edilmesi gereken bir dokümandır,
- Tasarım konseptinin sonuçlandırılması sırasında veya sonra başlatılmalıdır,
- Ürün geliştirme aşamalarında değişiklikler meydana geldiğinde veya ek bilgiler elde edildiğinde sürekli olarak güncellenmelidir

- Üretim çizimleri yayımlanmadan önce temel olarak tamamlanmalıdır. (Down ve Ark., 2008).

Proses HTEA,

- Süreç işlevlerini ve gereksinimlerini tanımlar,
- Potansiyel ürün ve süreçle ilgili arıza modlarını tanımlar,
- Potansiyel hataların etkilerini değerlendirir,
- Potansiyel üretim veya montaj sürecinin nedenlerini tanımlar ve kontrollerin olay için odaklanacağı süreç değişkenlerini tanımlar. Hata koşullarının azaltılması veya tespit edilmesini sağlar,
- Süreç kontrollerinin odaklanacağı süreç değişkenlerini tanımlar,
- Potansiyel hata modlarının sıralı bir listesini geliştirir, böylece önleyici / düzeltici eylem hususları için bir öncelik sistemi oluşturur,
- Montaj sürecini veya üretimin sonuçlarını gösterir (Down ve Ark., 2008).



Şekil 7.30. HTEA Adımları
(http://www.nurdogan.net/fmea_dosyalar/FMEA_Ornegi.pdf, Erişim Tarihi: 30 Ekim 2018)

7.3.3.1.1. HTEA Tarihsel gelişimi ve uygulanması

HTEA'nın tarihi İkinci Dünya Savaşı yıllarına kadar dayanmakta olup, ilk kez Amerika'da uygulanmaya başlanmıştır. Sistem ve ekipmanlarda meydana gelebilecek sorunların ve arızaların proaktif olarak değerlendirilmesi için kullanılmıştır. HTEA tekniği, Amerikan ordusu tarafından Askeri Prosedür *MIL-PI629* adı altında roket ve havacılık alanlarında 9 Kasım 1949 yılında kullanılmaya başlanmıştır ve "Hata Modu, Etkileri ve Kritiklik Analizi Yapma Prosedürleri" adı ile prosedürlerin yer aldığı bir standart yayınlanmıştır (Özkılıç, 2005). Tasarım HTEA üzerinde durulmuştur. Amerikan ordusu bu standardı 1965'te roket ve havacılık alanında uygulamaya başlamıştır (MIL-STD 1629A, 1980).

- Günümüzde Amerikan ordusunun *MIL – STD 1629 A* kodlu askeri standardı olarak kullanılmaktadır.
- NASA tarafından 1960'lı yıllarda kullanılmıştır.
- 1975'te nükleer teknoloji alanında uygulanmıştır.
- 1978'de Ford Motor Şirketi tarafından otomotiv sektöründe uygulamaya konulmuştur.
- 1980'de Almanya'da standartlaştırılmış ve kullanım kılavuzu niteliğinde yayınlanmıştır.
- 1986'da otomotiv sektöründe Chrysler, Ford, General Motors gibi firmalar ile geniş uygulama alanı bulmuştur.
- 1990'larda ise elektronik ve bilgisayar sektöründe kullanılmaya başlanmıştır.
- Otomotiv Endüstrisi Eylem Grubu (*Automotive Industry Action Group*) ve Amerikan Kalite Kontrol Topluluğu (*American Society for Quality Control*) tarafından 1993'te endüstri geneli için HTEA standardı yayınlamıştır.
- Günümüzde otomotive sektörü ve metal sanayinde de geniş kullanım alanına sahiptir (Çeber, 2010).

7.3.3.1.2. HTEA terminolojisi

Hata ve Hata Türü: Hata, bir ürün ya da sürecin, bu ürün ya da süreçten beklenen fonksiyonları yerine getirememesidir. Bu fonksiyonlar göz önüne alınarak, oluşan her hata sınıflandırılırsa hata türleri belirlenmiş olur (Çeber, 2010).

Hata Nedeni: Hata oluşumunu tetikleyen unsurdur. Bir hataya birden çok unsur neden olabilir. HTEA çalışması içinde hata nedenlerini incelerken, kök sebeplere inmek gerekir (Çeber, 2010). Fiziksel veya kimyasal süreçler, tasarım kusurları, kalite kusurları, parça yanlış uygulama ya da başarısızlığın temel nedeni olan ya da bozulmanın başarısızlığa uğradığı fiziksel süreci başlatan diğer işlemlerdir.

Hata Etkisi: Hata türü önlenmediğinde veya düzeltilmediğinde, hatanın son ürün halindeki etkisi/sonucunun belirlenmesi aşamasıdır. Müşterinin neyi fark edebileceği veya müşterinin başına ne gelebileceğinin tanımlanmasıdır. Etki belirlenirken, benzer özellik taşıyan ürünlerin sonuçları ve geçmişteki hata türleri

dikkate alınmalıdır (Çeber, 2010). Bir arıza modunun sonucu bir ögenin çalışması, işlevi veya durumu üzerinde bulunur. Başarısızlık etkileri yerel etki, bir üst seviye ve son etki olarak sınıflandırılır (MIL-STD-1629A, 1980).

Mevcut Kontroller: Nihai ürünün ya da yarımamülün fonksiyonlarının istenildiği şekilde çalışıp çalışmadığını belirlemek için yapılan işlemlerdir. Bu kontroller son adımda üründeki hatayı tespit etmek amaçlı değil, başta hata oluşumu yakalayacak ya da önleyecek özellikteki çalışmalar olmalıdır (Çeber, 2010).

HTEA Elemanı: HTEA kapsamında incelenecek, uygulanacak, değerlendirilecek unsurlar, adımlar, verilerdir.

Saptama Mekanizması: Bir operatör tarafından normal sistem çalışması altında bir arızanın tespit edilebildiği veya bazı işlemlerle bakım ekibi tarafından keşfedilebildiği araç veya yöntem (MIL-STD 1629A, 1980).

Saptama (Fark edilebilirlik): Hata oluşmadan önce yakalanabilme olasılığıdır (Çeber, 2010).

Şiddet: Bir hata modunun sonucunda, meydana gelebilecek yaralanma derecesi, mal hasarı veya sistem hasarı ile belirlenen bir hatanın en kötü potansiyel sonucunu ele alır (MIL-STD 1629A, 1980). Olası hatanın ciddiyetini ve büyüklüğünü temsil eden faktördür. Şiddet derecelendirmesi 1 ile 10 arasında tahmin yürütülerek, nitel değerlendirme ile yapılır. Kayıp miktar ve çeşitleri, hata etkisinin derecesini belirlemektedir.

Olasılık (Ortaya Çıkma): Belirlenen her bir hatanın ortaya çıkma sıklığını ve her bir hata türünün meydana gelme olasılığını ifade eder. Olasılık sıralamasının gerçekleşme olasılığı mutlak bir değerden ziyade göreceli bir anlama sahiptir (Down ve Ark., 2008).

Tez çalışması içerisinde, her iki işletmede meydana gelebilecek olası hata veya ramakkala kayıtları bulunmadığından, olasılık değeri, iş güvenliği uzmanları, proses

mühendisleri ve çalışanlar ile geçmiş deneyimler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

Risk Öncelik Sayısı: Hatanın risk değerini belirten bir ölçümdür. Uygulanacak düzeltici faaliyetlerin sıralamasında kullanılır. Şiddet, saptama ve olasılık değerlerinin çarpılmasıyla bulunur. RÖS değeri en yüksekten en düşüğe doğru olacak şekilde hatalar sıralanır. En yüksek RÖS değerine sahip hata için düzeltici önleyici faaliyet ilk sırada uygulanır (Çeber, 2010).

7.3.3.1.3. Uygulama

Bir sistem, tasarım, süreç veya servis genellikle çoklu arıza modlarına veya sebeplerine ve etkilerine sahip olabilir. Bu durumda, her bir arıza modu veya sebebi riskleri açısından değerlendirilmeli ve önceliklendirilmelidir, böylece yüksek riskli (veya en tehlikeli) arıza modları en öncelikli olarak düzeltilebilir. Geleneksel HTEA, olası başarısızlık modlarını üç kritere dayanarak sıralar: meydana gelme sıklığı, hatanın şiddeti ve fark edilebilme zorluğu. Her bir hata için, bu üç kriterin her biri sıralı bir skalada, daha büyük bir sıra puanının daha az arzu edilen bir durumu gösterdiği puanlar atanır. Geleneksel HTEA'da, üç sıra skorunu çarparak her bir hata modu için bir risk öncelik numarası RÖS (*RPN-Risk Priority Number*) hesaplanır. Arıza modları daha sonra RÖS tarafından önceliklendirilir: Arızaları azaltma çabaları, en büyük RÖS değerlerine sahip arıza modlarına odaklanır (Bradley ve Guerrero, 2011).

$$\text{RÖS} = \text{Ş (Şiddet)} * \text{S (Saptama)} * \text{O (Ortaya Çıkma)}$$

HTEA'nın Temel Aşamaları:

1. Amaç ve düzey planlaması,
2. Uygulama öncesi özel prosedürlerin, temel kuralların ve kriterlerin tanımlanması.
3. Fonksiyonlara, etkileşim alanlarına, faaliyet aşamalarına, faaliyet türlerine ve çevreye göre sistemin analizi.

4. Proseslerin, karşılıklı bağlantıların ve bağımlılıkların gösterilmesi için hata ağacı şemalarının, görev ve güvenilirlik şemalarının oluşturulması ve analizi.
5. Potansiyel hata türlerinin tanımlanması.
6. Hata türlerinin ve etkilerinin değerlendirilmesi ve sınıflandırılması.
7. Hataları önleyecek ve kontrol edecek önlemlerin tanımlanması.
8. Önerilen önlemlerin etkilerinin değerlendirilmesi.
9. Sonuçların belgelendirilmesi (Özkılıç, 2005).

Olasılık (Ortaya Çıkma): Belirlenen her bir hatanın ortaya çıkma sıklığı derecelendirmesi aşağıdaki tablo yardımı ile yapılır.

Tablo 7.7. HTEA Hata Olasılığı Derecelendirme

Olası Hata Oranları	Hata Olasılığı	Derece
Oldukça Yüksek: Neredeyse kaçınılmaz	½'den fazla	10
	1/3	9
Yüksek: Tekrarlanan Hata	1/8	8
	1/20	7
Orta: Ara sıra meydana gelen hata	1/80	6
	1/400	5
	1/2000	4
Düşük: Nispeten Az Meydana Gelen Hata	1/15000	3
	1/150000	2
Çok Nadir: Hemen hemen olanaksız	1/150000'den düşük	1

Kaynak: (Wang ve ark., 2009)

Şiddet: Olası hatanın ciddiyetini ve büyüklüğünü temsil eden faktördür. Şiddet derecelendirmesi 1 ile 10 arasında tahmin yürütülerek, nitel değerlendirme ile yapılır. Kayıp miktar ve çeşitleri, hata etkisinin derecesini belirlemektedir.

Kategori 1; Felaket Getirici Hata

- Can kaybına neden olan, birimin fonksiyonel çıktısında ciddi ölçüde azalmaya yol açan,
- Sistem veya ürün düzeyinde etkisi gözlenen hatalar.

Kategori 2; Kritik Hata

- Çalışanların yaralanmasına neden olan,

□ Birimin fonksiyonel çıktısında ciddi ölçüde azalmaya neden olacak şekilde sistem hasarına yol açan,

□ Bakım görevlileri tarafından tamir edilemeyen hatalar.

Kategori 3; Küçük Hata

□ Birimin fonksiyonel çıktısında küçük etkilere, çalışanlarda küçük yaralanmalara neden olan,

□ Sistemde küçük hasara yol açan,

□ Duruşlara veya çıktıda çok az azalmaya yol açan hatalar.

Kategori 4; Çok Küçük Hata

□ Çalışanların yaralanmasına, sistemin bozulmasına yol açacak kadar ciddi olmayan, planlanmamış bakım veya tamirle giderilebilecek hatalar

Tablo 7.8. HTEA Şiddet Derecelendirme

Kategori	Derece	Kriter: Şiddetin Etkisi	Etki
Kategori 1	10	Çok yüksek önem derecesi: Herhangi bir ikaz olmadan meydana gelen ve felakete yol açabilecek potansiyel hata	İkazsız gelen tehlike
	9	Çok yüksek önem derecesi: İkaz ile meydana gelen hata	İkaz ile gelen tehlike
	8	Sistemin tamamen zarar görmesine neden olarak sistem kaybına neden olan yıkıcı etkide olan potansiyel hata (akut ölüm, 3. derece yanık, ağır yaralanma vb.)	Çok yüksek
Kategori 2	7	Ürün/süreç üzerinde kalıcı hasara neden olan büyük etkili ve akut ölüm, 3. derece yanık, ağır yaralanma vb. neden olan potansiyel hata	Yüksek
	6	Sistemin performansını etkileyen ve uzuv, organ kaybı ile kanser, ağır yaralanma vb. yol açan potansiyel hata	Orta

Tablo 7.8 (devam)

Kategori 3	5	Ürün/proses üzerinde orta şiddette etki ve küçük sıyrık, kırık, kısa süreli iş görmezliğe neden olan düşük düzeyde potansiyel hata	Düşük
	4	Ürün/proses üzerinde çok düşük düzeyde etki ve küçük sıyrık ve yaralanmalara neden olan potansiyel hata	Çok düşük
Kategori 4	3	Sistem performansını düşürecek etki meydana getiren potansiyel hata	Küçük
	2	Sistem üzerinde önemsiz sayılabilecek etki yaratarak kargaşaya yol açan potansiyel hata	Çok küçük
	1	Ürün/Proses üzerinde hiç etkisi olmayan hata	Etkisiz

Kaynak: (Wang ve ark., 2009), (Down ve Ark., 2008).

Saptama (Fark edilebilirlik): Hatanın meydana gelmeden önce oluşma olasılığının değerlendirilmesi için aşağıdaki tablodan yararlanılır:

Tablo 7.9. HTEA Fark Edilebilirlik Derecelendirilmesi

Fark edilebilirlik	Kriter	Derece
Fark edilemez	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması mümkün değil	10
Çok az	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması çok zor ihtimal	9
Az	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması zor ihtimal	8
Çok düşük	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması çok düşük ihtimal	7
Düşük	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması düşük ihtimal	6
Orta	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması orta seviyede ihtimal	5
Yüksek ortalama	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması yüksek orta seviyede ihtimal	4
Yüksek	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması yüksek ihtimal	3
Çok yüksek	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması yüksek ihtimal	2
Hemen hemen kesin	Potansiyel hatanın sebebinin ve müteakip hatanın saptanması hemen hemen kesin	1

Kaynak: (Wang ve ark., 2009), (Down ve Ark., 2008).

Tablo 7.10. RÖS Derecelendirme

Derece	RÖS Değeri	HTEA-Önlem
Çok düşük	RÖS <20	İlgililere durumu bildir
Düşük	20 <RÖS <40	Kontrolleri ve işbaşı eğitimleri artır
Orta	40 <RÖS <100	Kontrol sistemini gözden geçir ve eğitim ver
Yüksek	100 <RÖS <250	Öncelikli olanlardan başlayarak önlemleri planla ve al
Çok yüksek	250 <RÖS	İşi durdur, hemen önlem al, sonra çalışmasına müsaade et

Kaynak: http://www.nurdogan.net/fmea_dosyalar/FMEA_Ornegi.pdf, Erişim tarihi: 12 Kasım 2018

7.3.4. HTEA yöntemine göre tesis risk değerlendirme uygulaması

7.3.4.1. Tesis 1 risk analizi ve risk dağılımı

Tesis 1’de toplam 35 adet riskli ekipman/bölge tespit edilmiştir. Risk analiz raporları ve sonuçları aşağıda verilmiştir.

Tablo 7.11. HTEA Kontrol Tablosu

		Kontrol Edilen Bölge: Tüm tesis				Hazırlayanlar: Pınar Sezer				Tarih: 23.10.2017							
		Kontrol Edilen Durum: Tesis içerisinde meydana gelen/gelebilecek alüminyum toz yangını/patlama ve diğer yanıcı sıvı ve gazlar ile meydana gelecek yangın/patlama															
Sıra No	proses/ işlem	HATA TÜRLERİ	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	Tutuşturma kaynakları	MEVCUT DURUM				İYİLEŞTİRME FAALİYETLERİ				İYİLEŞTİRME SONUCU*			
						Kontrol önlemleri	O	Ş	S	RÖS	Önerilen iyileştirmeler	Tamamlama Planı ve sorumluluk	Tamamlanan önlemler ve tamamlanma tarihi	O	Ş	S	RÖS
1	Geçici Depolama Bölümü	Mikrobiyal atıklarda oluşabilecek kendiliğinden ısınma	Yangın	Proses tesisinin içinde ve çevresinde biriken özellikle organik toz ve yağın depolamada tutulan malzeme tabakaları, bir süre boyunca bozulmadan bırakıldıklarında, kimyasal bozunmayla birlikte kendiliğinden ısınmaya maruz kalabilirler	Egzotermik reaksiyonlar (Kimyasal Reaksiyon) Açık alev	Gerekli KKD kullanan çalışanlar tarafından mikrobiyal etkiye sebep olmayacak azami süre içerisinde ayıklama yapılmaktadır.	5	2	9	90	Rutin temizlik yapılmalı ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	2	2	5	20

Tablo 7.11 (devam)

2	Kesme Bölümü (Kırırcı-Parçalayıcı)	Taşıma Bandı Besleme	Yangın	Taşıma bandında meydana gelebilecek statik elektrik sonucu tutuşma olması, kaçak elektrik akımlarından kaynaklı tutuşmalar, hurda içinde kalabilecek metal parçalarının sürtünme sonucu kıvılcım çıkarması, açık alevli çalışmalar	Kontrolsüz elektrik akımı Statik Elektrik	Bölüm etrafında açık alevli çalışma yapılmamakta ancak diğer hatalar için herhangi bir önlem alınmamıştır. Makine topraklaması mevcuttur.	5	6	5	150	Kaçak akım rölesi her gün kontrol edilmelidir.	İSG Uzmanı	Sürekli	3	6	3	48
3	Kesme Bölümü (Kırırcı-Parçalayıcı)	Öğütme kısmı ile ayıklanan ve preslenerek istiflenen alüminyum hurdaların bir arada olması	Yangın	Taşıma bandında meydana gelebilecek statik elektrik sonucu tutuşma olması, kaçak elektrik akımlarından kaynaklı tutuşmalar, hurda içinde kalabilecek metal parçalarının sürtünme sonucu kıvılcım çıkarması gibi nedenlerle etrafta ve yerde bulunan hurdaların tutuşması	Mekanik kıvılcım Kontrolsüz elektrik akımları Statik elektrik	Herhangi bir önlem alınmamıştır	3	4	5	60	Rutin temizlik yapılmalı ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulmalıdır. Bölüm etrafında açık alevli çalışma yapılmamakta ancak diğer hatalar için herhangi bir önlem alınmamıştır. Makine topraklaması mevcuttur.	İSG Uzmanı	Sürekli	2	4	3	24

Tablo 7.11 (devam)

4	Silo	Silolar içerisinde toz bulutu oluşumu	Yangın / Toz Patlaması (Primer Patlama)	Toz tutucuların bakım tutumunun ihmali sonucubekletilen tozlar içerisinde meydana gelebilecek kendiliğinden ısınma sonucu tutuşma ve yeterli konsantrasyona ulaşmış toz bulutu ile karşılaşıldığında toz patlaması meydana gelmesi	Egzotermik reaksiyonlar (Kimyasal Reaksiyon)	Toz tutucular belirli aralıklarla boşaltılmakta, ancak herhangi bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	6	6	7	252	Tahliye kapakları kontrolleri, ara ara basınç gösterge kontrolleri yapılmalı, kayıtları tutulmalı, toz tutucular doldukça tesisten uzaklaştırılmalıdır. Filtre temizliği belirli periyotlarda yapılmalı ve kontrol çizelgesi tutulmalıdır.	İSG Uzmanı	Süreklili	4	6	4	96
---	-------------	---------------------------------------	---	--	--	--	---	---	---	-----	--	------------	-----------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

5	Silo	Silolar etrafında açık prizler	Yangın / Toz Patlaması (Primer Patlama)	Alüminyum tozunun boşaltıldığı silolar üzerinde kalan bölgede ve etrafında açıkta bulunan prizlerin içinde biriken tozun tutuşması sonucu çıkan yangının silolara sıçraması, silolarda depolanan alüminyum tozunun ısınma sonucu kendiliğinden tutuşması, silo çevresinde yapılacak sıcak çalışma sonucunda oluşacak sıcak yüzeylerden tutuşma gerçekleşmesi neticelerinde domino etkisi ile toz patlaması	Egzotermik reaksiyonlar (Kimyasal Reaksiyon) Açık alev Mekanik kıvılcım Kontrolsüz elektrik akımları Statik elektrik	Silo etrafında sıcak çalışma yapılmamaktadır. Silolar içerisinde alüminyum tozu uzun süre beklememektedir.	5	6	7	252	Açık prizler üzerinde koruyucu kapak bulunmalıdır. Rutin temizlik yapılmalı ve temizlik kontrol çizelgesi tutulmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	3	6	4	72
---	-------------	--------------------------------	---	--	--	--	---	---	---	-----	---	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

6	Silo	Toz sıkışması ve basınç artışı	Toz Patlaması (Primer Patlama)	Toz sıkışmasına karşı tahliye kapakları mekanik arızası nedeniyle ekipman içerisindeki toz konsantrasyonunun patlama konsantrasyonuna ulaşması, bunun neticesinde herhangi bir statik elektrik ve/veya elektrik kaçağı nedeni ile meydana gelebilecek patlama	Statik elektrik Kontrolsüz elektrik akımı	Tahliye kapakları belirli aralıklarla kontrol edilmekte, ancak bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	4	3	8	96	Tahliye kapakları kontrolleri, ara ara basınç göstere kontrolleri yapılmalı, kayıtları tutulmalı, toz tutucular doldukça tesisten uzaklaştırılmalıdır. Filtre temizliği belirli periyotlarda yapılmalı ve kontrol çizelgesi tutulmalıdır.	İSG Uzmanı	Süreklili	3	3	5	45
---	-------------	--------------------------------	--------------------------------	---	---	---	---	---	---	----	---	------------	-----------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

7	Silo	Statik elektrik ve yıldırım düşmesi	Yangın/Patlama (Primer Patlama)	Yükleme ve boşaltım sırasında statik elektrik sonucu meydana gelebilecek tutuşmanın siloya sıçraması, yıldırım düşmesi sonucu tutuşma, depolama sırasında alüminyum tozunda meydana gelecek içten ısınma sonucu tutuşma meydana gelmesi	Statik elektrik Yıldırım EgEgzotermik reaksiyonlar (Kimyasal Reaksiyon)	Paratoner mevcuttur	4	2	1	8	Tüm sabit ve hareketli sistemler için topraklama yapılmalı, yükleme ve boşaltma iletken metaller ile yapılmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	1	2	1	2
8	Silo	Basınç artışı	Yangın/Patlama	Basınç gösterge arızası nedeni ile oluşan yüksek basınç, yükleme/boşaltma esnasında meydana gelebilecek statik elektrik ile tutuşabilir	Statik elektrik	Basınç gösterge kontrolleri belirli aralıklarla yapılmakta, ancak bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	4	2	1	8	Kontrol çizelgesi oluşturulmalı ve İSG uzmanı tarafından kontrol ve onayı sağlanmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	2	1	8
9	Mazot brülörü	Gaz kaçağı	Gaz Patlaması (VCE)	Mazot brülörü ile fırın cehennemliği arası bağlantı borularında korozif yıpranma ve çatlak nedeniyle yüksek basınçtan kurtulacak olan mazotun gaz fazında ortama dağılması ve sıcak yüzeyler, statik elektrik gibi tutuşturuculara maruziyetinde VCE'ye neden olması	Statik Elektrik Sıcak yüzeyler	Çatlak olan bölgeler kaynak ile yamanmıştır.	8	8	5	320	Yarık ve çatlak bulunan boru bağlantıları derhal değiştirilmelidir.	İSG Uzmanı İşveren	Derhal	5	8	2	80

Tablo 7.11 (devam)

10	Fırın Bacası	Patlayıcı toz bulutu oluşması	Toz Patlaması	Fırın bacasından hava akımı ile çekilen tozların, türbülans azaldığında ve/veya hava akımının zayıflaması nedeni ile toz bulutu oluşturması ve bu toz bulutunun cehennemlik, bağlantı boruları vb. sıcak yüzeylere maruz kalması	Sıcak yüzeyler	Ters hava akımı ile güçlü türbülans sağlanmıştır ancak herhangi bir tali önlem alınmamıştır	7	8	4	224	Rutin kontroller yapılmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	5	8	2	80
11	Fırın / Dönel Aksamlar	Gaz Kaçağı	Gaz Patlaması (VCE)	Dönel fırında, ilk ısıtma mazot fırını ile başlatılmakta, daha sonra son ürünlerinyüksek ısıda yanmış gazlarından ısıtma için faydalanılmaktadır. Dişli kısmın fırın gazının geçtiği boru hattına yakın olmasından kaynaklı sürtünme ile yırtılma meydana gelmiştir ve ve yanma gazı sızıntısı sıcak yüzey ile temasa geçtiğinde ile UVCE meydana gelebilir.	Sıcak yüzeyler	Mesafe ayarlaması yapılmamış ve deforme kısım yenilenmemiştir	8	8	5	320	Deforme olmuş boru hattının değiştirilmesi gerekmektedir.	İSG Uzmanı/Şveren	Derhal	5	8	2	80

Tablo 7.11 (devam)

12	Fırın Sıcaklık ve Basınç Göstergeleri	Fırın ve soğutma suyu üzerinde yer alan arızalı basınç ve sıcaklık göstergeleri	BLEVE	Soğutma suyu üzerindeki arızalı sıcaklık ve basınç göstergeleri, soğutma suyunun kaynama sıcaklığına gelmesine ve artan basınçla birlikte fırın sacının yorulmasına meydan vererek BLEVE 'ye neden olabilir.	Sıcak yüzeyler	<input type="checkbox"/>	Arızalı olduğu tespit edilen soğutma su göstergeleri yenisi ile değiştirilecektir.	5	8	2	80	Sıcaklık ve basınç göstergeleri için kontrol çizelgesi oluşturulmalı ve her gün kontrol edilmelidir.	İSG Uzmanı	Sürekli	5	8	1	40
----	--	---	-------	--	----------------	--------------------------	--	---	---	---	----	--	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

13	Fırın Bölümü / Elektrik Kabloları	Fırın yan yüzeyinde açıkta bulunan ve ısıya maruz kalan elektrik kabloları	Yangın/Toz Patlaması/Gaz Patlaması	Elektrostatik enerji boşalımı ve radyal ısı enerjisi nedeni ile meydana gelebilecek yangın, toz ve/veya gaz patlaması	Kontrolsüz elektrik akımı	Elektrik kabloları, tesisin genelinde olduğu gibi açıktadır, refrakter bir kılıf içerisinden geçirilmemiştir.	8	8	5	320	Elektrik kabloları refrakter kılıf içerisinden geçirilmelidir.	iSG Uzmanı	Derhal	3	8	1	24
----	--	--	------------------------------------	---	---------------------------	---	---	---	---	-----	--	------------	--------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

14	Değirmen Bölümü	Değirmen bölümünde tozmadan kaynaklanan yağın halinde ve tabaka halinde oluşan tozların temizlenmesi	Toz Patlaması (İkincil patlama)	Toz katmanlarının havalanması ile meydana gelen toz bulutunun sıcak çalışma, açık alev (Sigara, çakmak vb.), açıkta bulunan elektrik kabloları gibi tutuşturma kaynağı ile teması neticesinde patlama	Açık alev Kontrolsüz elektrik akımı Mekanik kıvılcım (darbe kaynaklı)	Bölüm içerisinde sigara yasağı uygulanmakta, açık alev oluşturabilecek herhangi bir ekipman kullanılmamakta ancak, açıkta olan kablo uçları elektrostatik deşarj potansiyeli taşımaktadır. Yetkili personel sınırlandırması uyarı halinde mevcut ancak bariyer bulunmamaktadır. Temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	7	7	5	245	Tozmadan kaynaklanan toz birikintilerinin belirli aralıklarda temizlenmesi ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulması gerekmektedir.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	7	2	56
----	------------------------	--	---------------------------------	---	---	---	---	---	---	-----	---	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

15	Seperatör Bölümü	Seperatörde ekipman içerisinde toz bulutu oluşumu	Toz Patlaması (Primer Patlama)	Oluşan patlayıcı toz bulutlarının statik elektrik, açık alev veya açıkta olan kablolardan meydana gelebilecek elektrostatik deşarj ile tutuşturma kaynağı ile teması Ekipman içerisinde elekler ve ürün arasında oluşabilecek statik elektrik sonucu kıvılcım çıkması, elektrik kaçakları ve ateşli çalışma sonucu oluşabilecek sıcak yüzeyden tutuşma gerçekleşmesi	Açık alev/Kontrolsüz elektrik akımıStatik elektrik	Bölüm içerisinde sigara yasağı uygulanmakta, açık alev oluşturabilecek herhangi bir ekipman kullanılmamakta ancak, açıkta olan kablo uçları elektrostatik deşarj potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, yetkili personel sınırlandırması uyarı bariyer bulunmamaktadır.	7	7	5	245	Elektrik kabloları refrakter kılıf içerisinden geçirilmelidir. Bölümler arası yangına dayanıklı yangın kapısı, yangın perdesi vb. bariyer koyulmalıdır.	iSG Uzmanıİşveren	En kısa sürede	4	7	3	84
----	-------------------------	---	--------------------------------	--	--	--	---	---	---	-----	---	-------------------	----------------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

16	Seperatör Bölümü	Seperatör bölümünde tozmadan kaynaklanan yığın halinde ve tabaka halinde oluşan tozların temizlenmemesi	Toz Patlaması (İkincil patlama)	Toz katmanlarının havalanması ile tozmasonucunda oluşan patlayıcı toz bulutlarının statik elektrik, açık alev veya açıkta olan kablolardan meydana gelebilecek elektrostatik deşarj gibi tutuşturma kaynağı ile teması	Açık alev/Kontrolsüz elektrik akımı/Statik elektrik	Bölüm içerisinde sigara yasağı uygulanmakta, açık alev oluşturabilecek herhangi bir ekipman kullanılmamakta ancak, açıkta olan kablo uçları elektrostatik deşarj potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, yetkili personel sınırlandırması uyarı halinde mevcut ancak bulunmamaktadır. Ayrıca düzenli temizlik için bir temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	7	7	5	245	Tozmadan kaynaklanan toz birikintilerinin belirli aralıklarda temizlenmesi ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulması gerekmektedir.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	7	2	56
----	-------------------------	---	---------------------------------	--	---	--	---	---	---	-----	---	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

17	Jet Filtre	Jet filtre bölümünde tozmadan kaynaklanan yağın halinde ve tabaka halinde oluşan tozların temizlenmesi	Toz Patlaması (İkincil patlama)	Toz katmanlarının havalanması ile meydana gelen toz bulutunun sıcak çalışma, açık alev (Sigara, çakmak vb.), açıkta bulunan elektrik kabloları gibi tutuşturma kaynağı ile teması neticesinde patlama	Açık alev Kontrolsüz elektrik akımı Statik elektrik	Yeterli temizlik yapılmamakta ve bir temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır. Jet filtreler ATEX belgelidir.	8	8	5	320	Tozmadan kaynaklanan toz birikintilerinin belirli aralıklarda temizlenmesi ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulması gerekmektedir.	İSG Uzmanı	Süreklili	3	8	1	24
----	-------------------	--	---------------------------------	---	---	---	---	---	---	-----	---	------------	-----------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

18	Değirmen & Seperasyon & Jet Filtre Ana Kontrol Odası	Ana kontrol odasının zemininin yanabilir malzeme ile kaplanmış olması	Yangın & Toz Patlaması	Bölümde bulunan tüm ünitelerin ince toz üretimi yapması ve toz bulutu oluşma ihtimali ve halihazırd olan toz katmanlarının havalanması ile meydana gelebilecek toz bulutlarının, kontrol odası zemininin herhangi bir açık alev (sigara, çakmak, vb.) veya elektrik kaçağı ile teması sonucunda yanmasından kaynaklı bir yangının tutuşturucu etkisi ile toz patlaması meydana gelmesi	Açık alevKontrolsüz elektrik akımıStatik elektrik	Bölüm içerisinde sigara yasağı uygulanmakta, bölüme statik elektrik topraklama levhası kullanılmakta, açık alev oluşturabilecek herhangi bir ekipman kullanılmamakta ancak, açıkta olan kablo uçları elektrostatik deşarj potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca düzenli temizlik için bir temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	8	8	5	320	Tozumadan kaynaklanan toz birikintilerinin belirli aralıklarda temizlenmesi ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulması gerekmektedir. Elektrik kabloları refrakter kılıf içerisinde geçirilmelidir. Ana kontrol odasının zemini refrakter malzeme ile kaplanmalıdır.	İSG Uzmanıİşveren	Sürekli	2	8	2	32
----	---	---	------------------------	--	---	--	---	---	---	-----	---	-------------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

19	Dolum	Big Bag dolumu sırasında meydana gelecek tozuma	Toz Patlaması	Oluşacak toz bulutunun yeterli toz konsantrasyonuna ulaşması ve sıcak çalışma, açık alev (Sigara, çakmak vb.), açıkta bulunan elektrik kabloları gibi tutuşturma kaynağı ile teması neticesinde patlama	Açık alev/Kontrolsüz elektrik akımı/Statik elektrik	Rutin cebri havalandırma yapılmaktadır	5	5	5	125	Tozumadan kaynaklanan toz birikintilerinin belirli aralıklarda temizlenmesi ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulması gerekmektedir. Elektrik kabloları refrakter kılıf içerisinden geçirilmelidir.	iSG Uzmanı	Sürekli	3	5	3	45
----	--------------	---	---------------	---	---	--	---	---	---	-----	---	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

20	Dolum	Jet filitre bölümünde tozmadan kaynaklanan yağın halinde ve tabaka halinde oluşan tozların temizlenmesi	Toz Patlaması (İkincil patlama)	Toz katmanlarının havalanması ile meydana gelen toz bulutunun sıcak çalışma, açık alev (Sigara, çakmak vb.), açıkta bulunan elektrik kabloları gibi tutuşturma kaynağı ile teması neticesinde patlama	Açık alev/Kontrolsüz elektrik akımı/Statik elektrik	Bölüm içerisinde sigara yasağı uygulanmakta, açık alev oluşturabilecek herhangi bir ekipman kullanılmamakta ancak, açıkta olan kablo uçları elektrostatik deşarj potansiyeli taşımaktadır. Ayrıca, yetkili personel sınırlandırması uyarı halinde mevcut ancak bariyer bulunmamaktadır. Düzenli temizlik için bir temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır. Yeterli temizlik yapılmamakta ve bir temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	7	7	5	245	Tozmadan kaynaklanan toz birikintilerinin belirli aralıklarda temizlenmesi ve temizlik kontrol çizelgesi oluşturulması gerekmektedir. Elektrik kabloları refrakter kılıf içerisinden geçirilmelidir.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	7	2	56
----	--------------	---	---------------------------------	---	---	--	---	---	---	-----	--	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

21	Bakımhane	Deforme olmuş ve ucu açıkta olan kablolar (özellikle elektrikli el aletlerinde) bulunmakta ve kablolar koruyucu kılıf içerisinde bulunmamaktadır.	Yangın/Patlama	Elektrostatik enerji boşalımı, sıcak çalışma ile açık alev ve radyal ısı enerjisi nedeni ile meydana gelebilecek yangın ve yangının tetikleyici etkisiyle oluşabilecek toz ve/veya gaz patlaması	Açık alev/Kontrolsüz elektrik akımı/Statik elektrik/Mekanik kıvılcım (darbe kaynaklı)	Deforme kablolar ve ek yapılmış kablolar ile açıkta bulunan kablolar koruyucu kılıf içerisinde değildir.	8	8	6	384	Deforme olmuş kablolar ile ek yapılmış kablolar yenileri ile değiştirilmeli ve refrakter kılıf içerisine alınmalıdır.	iSG Uzmanı	Derhal	4	8	2	64
----	------------------	---	----------------	--	---	--	---	---	---	-----	---	------------	--------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

22	Bakımhane - Oksijen Tüpü	Oksijen Tüpünün alev geri tepme valfinin arızalı olması	Yangın/Patlama	Basınçlı oksijen tüpünde geri tepme valfinin olmaması nedeniyle meydana gelebilecek yaptırma	Açık Alev	Alev geri tepme valfinin çalışırılık kontrolünün düzenli olarak tutulduğu bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	8	8	6	384	Oksijen tüpünün periyodik kontrolü yapılmalı ve kayıtlı bulunmalı, gösterge kontrolleri için kontrol çizelgesi bulunmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	8	2	64
23	Bakımhane - Oksijen Tüpü	Oksijen Tüpünün bakımhanede bulunması	Yangın/Patlama	Oksijen tüpünün emniyet valfi kontrolü, periyodik muayenesinde eksiklik, yağlı çalışmaların olduğu ortamda bulunması sonucu yağlı elle müdahale, yatık tutulması ve basınç gösterge arızaları nedeni ile oluşabilecek basınç artışı ve gaz sızıntısı ile meydana gelen gaz bulutunun, açık alev çalışmaları olan kesme, kaynak vb. işlemlerle aynı ortamda bulunması, açık kablo ve prizlerden elektrik kaçağı sonucu patlama	Açık Alev	Oksijen kaynağı makinesi topraklaması yapılmış, dik konumda depolanmakta, ancak kaynak makinesi üzerindeki kablolar aşınma görülmektedir. Bunların yanı sıra yağlı çalışmada kullanılan eldivenler solventler ile birlikte gelişigüzel atılmıştır. Basınçlı ekipmanlar yönetmeliğine göre yapılması gereken periyodik kontrollere ait herhangi bir döküman bulunamamıştır.	7	8	6	336	Bakımhanede genel olarak temizliğe önem verilmeli, atıl veya kullanılmayan tüm ekipman ve atıklar uzaklaştırılmalı, aşınmış kablolar değiştirilmelidir.	İSG Uzmanı	En kısa sürede	4	8	2	64

Tablo 7.11 (devam)

24	Bakımhane	Bez, kağıt, açık kablo, elyaf vb. kullanılmış malzemelerin etrafa gelişigüzel atılmış olması	Yangın/Patlama	Bakımhanede yapılan kesme işlemi ve oksijen kaynağı nedeni ile oluşabilecek açık alev ve kıvılcımların, etrafta düzensiz olarak bulunan kullanılmış yanıcı malzemelere teması halinde olası yangın ve yetersiz temizlik nedeni ile ekipmanlar üzerinde ve duvar kenarlarında biriken toz katmanlarının havalanması işle oluşabilecek toz bulutlarının açık alev ile temasında ve/veya olası yangının tutuşturucu etki yapmasıyla meydana gelebilecek toz patlaması	Açık alev Kontrolsüz elektrik akımı Statik elektrik Mekanik kıvılcım (darbe kaynaklı)	Düzenli temizlik yapılmamakta ve temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	6	7	4	168	Bakımhanede genel olarak temizliğe önem verilmeli, atıl veya kullanılmayan tüm ekipman ve atıklar uzaklaştırılmalı, aşınmış kablolar değiştirilmelidir.	İSG Uzmanı	En kısa sürede	4	7	2	56
----	------------------	--	----------------	--	---	--	---	---	---	-----	---	------------	----------------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

25	Ana Elektrik Panosu	Kapak topraklaması olmaması, arızalı kaçak akım rölesi	Yangın / Patlama	Elektrik kaçağı, kıvılcım boşalması gibi nedenlerle toz bulutunun tutuşması	Kontrolsüz elektrik akımı Statik elektrik	Panoların hepsinde kaçak akım rölesi bulunmaktadır. Pano önlerinde yalıtkan paspas bulunmakta olup, kapak topraklaması yapılmamıştır.	6	8	4	192	Elektrik panoları sürekli kilitli olmalı, kapakları kapalı tutulmalı ve kpak topraklaması yapılmalıdır. Yetkisiz personel müdahalesi önlenmelidir. Her yıl elektrik test raporu hazırlanmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	3	8	2	48
26	Ana Elektrik Panosu	Halonlu yangın tüpü eksikliği	Yangın / Patlama	Kaçak elektrik akımı gibi bir tutuşturucu nedeni ile meydana gelebilecek bir ana elektrik panosu yangınında müdahale yetersizliği	Kontrolsüz elektrik akımı	Pano yangınları için halonlu yangın tüpü bulunmamaktadır.	9	9	6	486	Yetkisiz personel müdahalesi yasaklanmalı, elektrik arızasında amire bilgi verilmelidir.	İSG Uzmanı	Sürekli	2	9	2	36

Tablo 7.11 (devam)

27	Ana Elektrik Panosu	Ana elektrik panosunda birikmiş alüminyum toz katmanı	Yangın / Patlama	Ana elektrik panosunda birikmiş olan tozun herhangi bir kaçak elektrik akımı ile tutuşturulması neticesinde meydana gelebilecek yangın ve toz patlaması	Kontrolsüz elektrik akımı	Panolarda birikmiş olabilecek alüminyum tozu için belirli aralıklarda temizlik yapılmakta, ancak temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	8	8	5	320	Yangın tüpü pano bölümüne konulmalıdır.	İSG Uzmanı	Derhal	4	8	2	64
28	Kompresör	Kompresörün tesis içerisinde bulunması	Patlama	Kompresörün yönetmelik ve standart dışı olarak tesis içerisinde bulunması ve malzeme deposu ile yan yana odalarda bulunması	Sıcak yüzeyler Elektrikli cihazlar Kontrolsüz elektrik akımı	Çalışanlardan en az 10 metre uzaklıkta olması ve koruyucu bölme içine alınması gereken kompresör tesis içerisinde yer almaktadır	8	8	5	320	Kompresör basınç göstergeleri her iki saatte bir kontrol edilip kayıt tutulmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	8	2	64

Tablo 7.11 (devam)

29	Kompresör	Arızalı basınç göstergesi	Patlama	Basınç gösterge arızası nedeni ile müsaade edilen çalışma basınç barının üzerinde oluşan yüksek basınç etkisiyle patlama meydana gelmesi, basıncın ayarlanmış basınca ulaştığında, kompresör motorunun otomatik olarak durması sağlanacak ve motorun durması geciktiğinde, basınçlı havayı boşa verecek güvenlik tertibatının arızalı olması nedeni ile patlama meydana gelmesi	Sıcak yüzeyler Elektrikli cihazlar Kontrolsüz elektrik akımı	Basınç göstergelerinin kontrol edilmediği kayıtların tutulmadığı görülmüştür.	8	8	5	320	Gösterge kontrolleri için kontrol çizelgesi bulunmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	8	2	64
----	------------------	---------------------------	---------	---	--	---	---	---	---	-----	---	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

30	Kompresör	Kompresörün periyodik kontrollerinin düzenli olarak yapılması	Patlama	Periyodik kontrollerinin düzenli yapılmaması ile meydana gelecek patlama	Sıcak yüzeyler Elektrikli cihazlar Kontrolsüz elektrik akımı	TS 1203 EN 286□, TS EN 1012□:2010, TS EN 13445□5 standartlarında belirtilen kriterlere uygun senede 1 periyodik kontrollerin TS EN 473 standardına göre eğitim almış mühendisler ve aynı eğitimi almış tekniker veya yüksek teknikerler tarafından yapılması gereken bakım □onarım kayıtları bulunamamıştır.	8	8	5	320	Kompresörün periyodik kontrollerinin düzenli olarak yapılması gerekmektedir.	İSG Uzmanı	Sürekli	4	8	2	64
----	------------------	---	---------	--	--	--	---	---	---	-----	--	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

31	Kompresör Hava kompresörü ile hava tankları arasında, yağ ve nem ayırıcıları (seperatör) bulunacak ve bunlar hiç bir şekilde çıkarılmayacaktır	Patlama	Sıcak yüzey teması ile meydana gelebilecek patlama	Sıcak yüzeyler Elektrikli cihazlar Kontrolsüz elektrik akımı	Separatörler bulunmaktadır.	8	8	5	320	Nem ve yağ ayırıcıları kontrolü düzenli olarak yapılmalıdır.	İSG Uzmanı	Süreklili	4	8	2	64
----	--	---------	--	--	-----------------------------	---	---	---	-----	--	------------	-----------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

32	Kompresör	Kompresörlerin hava depolarında güvenlik subapı kontrolü için uygun uyarı tertibatı	Patlama	Arızalı hava blöf vanası nedeni ile meydana gelen yüksek basınç nedeniyle patlama	Yüksek basınç nedeni ile sıcak gaz	Hava tankı blöf vanası tedarigi yapılmıştır. Kontrol kayıt çizelgesi bulunmamaktadır.	8	8	5	320	Hava tankı blöf vanasının çalışıp çalışmadığı bakımlar sırasında kontrol edilmelidir.	İSG Uzmanı	Sürekli	5	8	2	80
----	------------------	---	---------	---	------------------------------------	---	---	---	---	-----	---	------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.11 (devam)

33	Mazot Tankı	Mazot tankı besleme borularında korozif aşınma	Patlama	Aşınma nedeniyle meydana gelecek çatlak ve yırtıklardan mazot sızması ile oluşacak patlayıcı gaz bulutu (UVCE & VCE)	Elektrikli cihazlar Kontrolsüz elektrik akımıStatik Elektrik Yıldırım	Borularda belirli bölgelere kaynak yapılmıştır. Mazot tankı dış mekanda kapalı bir odada kilitli olarak yer almaktadır. Uyarı ve ikaz levhası bulunmaktadır.	7	8	3	168	Uyarı ve ikaz levhası asılmalı, ateş ve sigara ile yaklaşılması yasaklanmalı, etrafındaki otlar temizlenmeli, hammadde atıklarının civarda birikmesi önlenmelidir. Boruların yenilenmesi gerekmektedir.	İSG UzmanıŞveren	En kısa sürede	4	8	2	64
34	Ürün Deposu	Ürün deposunun kompresör odası ile yanyana olması ve düzensiz istif	Yangın / Patlama	Kolay alevlenebilir malzemeler nedeni ile kompresör odasında veya sigara vb. açık alevler nedeni ile çıkabilecek yangın	Elektrikli cihazlar Kontrolsüz elektrik akımı Statik Elektrik Açık alev ve sıcak gazlar	Temizlik ve düzen zayıf ve temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	6	7	3	126	Temizlik kontrol çizelgesi oluşturulmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	2	7	2	28

Tablo 7.11 (devam)

35	Laboratuvar Argon Tüpü	ICP cihazına gönderilen argon tüpünde basınç regülâtör eksikliği veya arızası, arızalı basınç göstergesi	Yangın / Patlama	ICP cihazına gönderilen argon tüpünde basınç regülâtör eksikliği veya arızası, arızalı basınç göstergesi nedeniyle basınç yükselmesi ve ICP cihazındaki ısınmadan kaynaklı patlama	Sıcak yüzeyler	Basınç göstergesi ve regülâtör çalışmakta, ancak, periyodik kontroller için bir çizelge bulunmamaktadır.	7	9	2	126	Gösterge kontrolleri için kontrol çizelgesi bulunmalıdır.	İSG Uzmanı	Sürekli	3	9	3	81
----	-------------------------------	--	------------------	--	----------------	--	---	---	---	-----	---	------------	---------	---	---	---	----

*İyileştirme sonucu, verilen iyileştirme önerilerinin uygulanması durumunda elde edilecek sonuçlardır.

Tablo 7.12. Tesis (Uşak) Risk Dağılımı

Sıra No	Bölüm/ Faaliyet ²³	RÖS
1	Geçici Depolama Bölümü	90
2	Öğütücü (Kırıcı-Parçalayıcı)	150
3	Öğütücü (Kırıcı-Parçalayıcı)	60
4	Silo	252
5	Silo	252
6	Silo	96
7	Silo	8
8	Silo	8
9	Mazot brülörü	320
10	Fırın Bacası	224
11	Fırın / Dönel Aksamlar	320
12	Fırın Sıcaklık ve Basınç Göstergeleri	80
13	Fırın Bölümü / Elektrik Kabloları	320
14	Değirmen Bölümü	245
15	Seperatör Bölümü	245
16	Seperatör Bölümü	245
17	Jet Filtre	320
18	Değirmen & Seperasyon & Jet Filtre Ana	320
19	Dolum	125
20	Dolum	245
21	Bakımhane	384
22	Bakımhane - Oksijen Tüpü	384
23	Bakımhane - Oksijen Tüpü	336
24	Bakımhane	168
25	Ana Elektrik Panosu	192

²³Bölmelerdeki (birden fazla risk belirlenmiş olan) en yüksek risk skoru baz alınmıştır.

Tablo 7.12. (devamı)

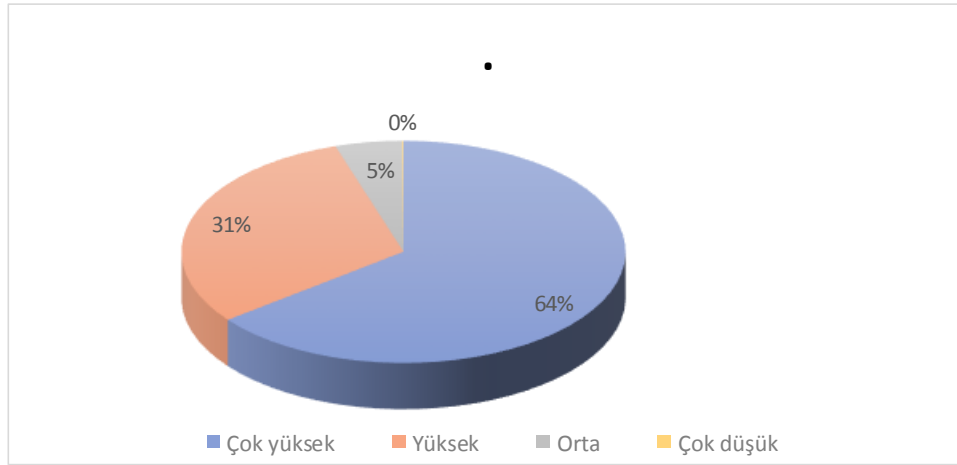
26	Ana Elektrik Panosu	486
27	Ana Elektrik Panosu	320
28	Kompresör	320
29	Kompresör	320
30	Kompresör	320
31	Kompresör	320
32	Kompresör	320
33	Mazot Tankı	168
34	Ürün Deposu	126
35	Laboratuvar Argon Tüpü	126

HTEA yöntemiyle yapılan risk değerlendirmesi sonuçlarına göre Tesis 1’de en riskli ekipman/bölgeler sırasıyla;

- Silo
- Mazot brülörü
- Fırın / Dönel Aksamlar
- Fırın Bölümü / Elektrik Kabloları
- Fırın Bölümü ve Hammadde Ayırma
- Değirmen Bölümü
- Jet Filtre
- Değirmen & Seperasyon & Jet Filtre Ana Kontrol Odası
- Bakımhane
- Oksijen Tüpü
- Ana Elektrik Panosu
- Kompresör

HTEA yöntemiyle yapılan risk değerlendirmesi sonuçlarına göre Tesis 1’de en düşük riskli ekipman/bölgeler sırasıyla;

- Geçici Depolama Bölümü
- Öğütücü (Kırıcı Parçalayıcı)



Şekil 7.31. Tesis 1’de HTEA Yöntemine Göre Risklerin Düzeylerine Göre Yüzde Dağılımı

HTEA yöntemi ile Tesis 1’de yapılan patlamaya yönelik risk değerlendirmesinde 35 ekipman/bölgede hesaplanan risklerin;

- 2’si “çok düşük risk” düzeyinde olup toplam risklerin %0,1’ini
- 6’sı “orta riskli” düzeyde olup toplam risklerin %4,86’sını
- 12’si “yüksek riskli” düzeyde olup toplam risklerin %30,5’ini oluşturmaktadır.
- 19’u “çok yüksek riskli” düzeyde olup toplam risklerin %64,54’ünü oluşturmaktadır.

Tesis 1 (Uşak)’taki mevcut pozitif uygulamalar;

1. Firma, OSGB ile çalışmakta ve düzenli periyotlarda patlamadan korunma dokümanı hazırlamakta ve herhangi bir teknik veya organizasyonel değişimde revize edilmektedir.
2. Firmanın, olası yangın ve patlama veya olağanüstü durumlar için acil durum eylem planı bulunmaktadır.
3. Tesis genelinde sigara içme yasağı mevcuttur.
4. Düzenli olarak baca gazı analizi yapılmaktadır.
5. Firma, KKD ve ekipman sağlama ve kullanımda önerilere açıktır.
6. Tesisteki sabit ve seyyar tüm ekipmanlarda topraklama mevcuttur.
7. Tesis tesis içerisindeki kendi laboratuvarında toz analizlerini yapmaktadır.
8. Paratoner mevcuttur.

9. Tozla mücadele yönetmeliğine ve hava kalitesini koruma yönetmeliğine göre havaya atılan alüminyum toz emisyon oranı uygundur.
10. Toz üretim alanına giriş öncesinde statik elektrik topraklama levhası kullanılmaktadır.
11. Toz üretimi yapılan bölümlerde gaz ve duman detektörü bulunmaktadır.

Tesis ile ilgili patlama / yangın olasılıkları ile ilgili eksiklikler aşağıdaki gibidir;

1. Tesisteki mevcut risk değerlendirmesinde, patlamalar özelinde bir değerlendirmesi yapılmadığı, genel olarak tüm risklerin ele alındığı 5x5 matris yöntemi ile yapılmış risk değerlendirmesi bulunmaktadır ve analizde patlamalar ile ilgili kısımların eksik olduğu belirlenmiştir.
2. Tesis, jet filtre ünitelerinin exproof olarak değiştirilmesinden önce NACE sınıflandırmasında “çok tehlikeli” sınıfta olup, patlamadan korunma dokümanı bu sınıfa göre yapılmıştır ancak dokümanda bölge sınıflandırmalarının eksik ve zayıf olduğu belirlenmiştir. Jet filtre ünitelerinin exproof olarak yenilenmesinin ardından NACE sınıflandırmasında “tehlikeli” sınıfa alınmış ve bölge sınıflandırılması sistemi yenilenmemiştir.
3. Firma bünyesinde alüminyum toz üretimi yanı sıra oksijen kaynağı, basınçlı hava kompresörü, mazot tankı gibi tehlikeli sayılan basınçlı gazlar bulunmasına rağmen, çalışanlara verilen iş güvenliği eğitimlerinin genel olarak verildiği, patlama özelinde eğitim verilmediği bilgisine ulaşılmıştır.
4. Tesis genelinde yangına dayanıklı kapı kullanılmadığı ve ahşap malzemeden yapılan kapıların kullanıldığı gözlemlenmiştir.
5. Toz tutucular belirli aralıklarla boşaltılmakta, ancak herhangi bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.
6. Fırın bölgesinde, fırındaki yüksek sıcaklıktan dolayı sıcaklık sensörü bulunmamaktadır.
7. Öğütme kısmı ile ayıklanan ve preslenerek istiflenen alüminyum hurdaları bir aradadır.
8. Toz tutucular belirli aralıklarla boşaltılmakta, ancak herhangi bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.
9. Silo tahliye kapakları belirli aralıklarla kontrol edilmekte, ancak bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.

10. Silolarda basınç gösterge kontrolleri belirli aralıklarla yapılmakta, ancak bir kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.
11. Mazot brülörü ve fırın cehennemliği arası bağlantı borularında çatlak olan bölgeler kaynak ile yamanmıştır.
12. Fırın bacasından hava akımı ile çekilen tozların, türbülans azaldığında ve/veya hava akımının zayıflaması nedeni ile toz bulutu oluşturması ve bu toz bulutunun cehennemlik, bağlantı boruları vb. sıcak yüzeylere maruz kalması nedeni ile parlama ve yangın ihtimali bulunmaktadır.
13. Soğutma suyu üzerindeki arızalı sıcaklık ve basınç göstergeleri, soğutma suyunun kaynama sıcaklığına gelmesine ve artan basınçla birlikte fırın sacının yorulmasına meydan vererek BLEVE 'ye neden olabileceği saptanmıştır. Göstergelerin belirli periyotlarda bakımının yapılması, gerekiyorsa değiştirilmesi ve bunun için kontrol çizelgesi oluşturulması gerekmektedir.
14. Tesis genelinde olduğu gibi, fırın yan yüzeyinde açıkta bulunan ve ısıya maruz kalan elektrik kabloları yangın ve patlama için uygun bir tutuşturma kaynağıdır. Bu durumun önüne geçilmesi için tesis genelinde açıkta bulunan tüm kabloların refrakter kılıf içerisinden geçirilmelidir.
15. Bölüm 7.1.1.2.'deki krokide de görüleceği gibi, değirmen ve elek bölümü, fırın bölümü ve ham madde stok bölümleri arasında bariyer bulunmamaktadır. Bölümler arası herhangi gaz/toz sızıntısı önlenmesi amacı ile yangına dayanıklı kapı gerekmektedir.
16. Tesis genelinde konvansiyonel yangın paneli kullanılmakta olup, olası yangına derhal müdahale edebilmek adına adresli yangın paneli tedarik edilmelidir.
17. Değirmen ve separatör bölümünde yoğun olmak üzere, tesis genelinde temizlik eksikliği olduğu tespit edilmiştir. Her bölümün ayrı olmak üzere, özellikle toz tabakalarının oluşabileceği yerlerde belirli periyotlarda temizlik yapılmalı ve kontrol çizelgesi oluşturulmalıdır.
18. Ana kontrol odasının zemininin yanabilir malzeme ile kaplanmış olduğu tespit edilmiştir. Kontrol odası zemininin herhangi bir açık alev (sigara, çakmak, vb.) veya açıkta bulunan kablolar nedeni ile elektrik kaçağı ile teması sonucunda yanmasından kaynaklı bir yangının oluşmasını önlemek adına, zeminin refrakter madde kaplanması ile değiştirilmelidir.

19. Deforme olmuş ve ucu açıkta olan kablolar (özellikle elektrikli el aletlerinde) bulunmakta ve kablolar koruyucu kılıf içerisinde bulunmamaktadır. Açıkta olan tüm kabloların refrakter kılıf içerisine alınmalı ve deforme kabloların derhal değiştirilmelidir.
20. Oksijen tüpünün, bakımhanede, yağlı çalışmaların olduğu ortamda bulunan sonucu yağlı elle müdahaleden kaçınılması gerektiği ve bu konuda çalışanların bilgilendirilmesi gerekmektedir.
21. Bakımhanede yapılan kesme işlemi ve oksijen kaynağı nedeni ile oluşabilecek açık alev ve kıvılcımların, etrafta düzensiz olarak bulunan kullanılmış yanıcı malzemelere teması halinde olası yangın ve yetersiz temizlik nedeni ile ekipmanlar üzerinde ve duvar kenarlarında biriken toz katmanlarının bulunduğu tespit edilmiş olup temizlik için kontrol çizelgesi tutulmalıdır.
22. Kaçak elektrik akımı gibi bir tutuşturucu nedeni ile meydana gelebilecek bir ana elektrik panosu yangınında müdahale için gereken halonlu yangın söndürücü bulunmamaktadır.
23. Ana elektrik panosunda birikmiş alüminyum toz tabakası bulunduğu tespit edilmiştir.
24. Kompresörün tesis içerisinde bulunması, yönetmelik gereğince gereken mesafede tesis dışında tutulmadığı ve ayrıca malzeme deposu ile yan yana odalarda bulunduğu gözlemlenmiştir.
25. Mazot tankı besleme borularında korozyon aşınma tespit edilmiş, çatlak ve yırtıklardan mazot sızması ile oluşacak patlayıcı gaz bulutu (UVCE & VCE) önüne geçmek için derhal değiştirilmelidir.

7.3.4.2. Tesis 2 risk analizi ve risk dağılımı

Tesis 2’de kumlama ünitesinde toplam 10 adet riskli ekipman/bölge tespit edilmiştir.

Tablo 7.13. HTEA Kontrol Tablosu

HTEA KONTROL TABLOSU																	
Kontrol Edilen Makina: Kumlama Ünitesi				Hazırlayanlar: Pınar Sezer				Tarih: 22.09.2018									
Kontrol Edilen Durum: Filtre ünitesi içerisinde meydana gelen/gelebilecek alüminyum toz yangını/patlaması																	
Sıra No	proses/ işlem	HATA TÜRLERİ	HATA ETKİLERİ	HATA NEDENLERİ	Tutuşurma kaynakları	MEVCUT DURUM				İYİLEŞTİRME FAALİYETLERİ		İYİLEŞTİRME SONUCU*					
						Kontrol önlemleri				Önerilen iyileştirmeler		sorumluluk ve tamamlanma tarihi					
						O	Ş	S	RÖS			O	Ş	S	RÖS		
1	Elektrik Panosu	Makinanın elektrik panosuna giden aşınmış kablolar, Arızalı kaçak akım rölesi, Panoda birikmiş tozlar	Yangın / Toz Patlaması	Kaçak elektrik akımı nedeni ile panoda birikmiş toz katmanının tutuşması	Kontrolsüz elektrik akımı					Günlük periyodik kontrol yapılmakta ve kontrol çizelgesi tutulmaktadır.	Aşınmış kablolar derhal değiştirilmeli, yedek kaçak akım rölesi bulundurulmalı ve temizlik için kontrol çizelgesi İSG uzmanı tarafından takip edilmelidir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	8	2	48

Tablo 7.13. (devamı)

2	Türbin	Türbin aşınma plakalarında meydana gelecek aşınma ile toz tahliyesi zorluğu neticesinde toz birikmesi	Yangın / Toz Patlaması	Biriken tozun oluşturduğu toz bulutunun, tozun ve bilyaların türbin cidarıyla sürtünmesinden doğan statik elektrik, kaçak akım, yıldırım, sıcak yüzey vb. tutuşturma kaynakları ile tamsında toz patlaması	Statik elektrik Kontrolsüz elektrik akımı Yıldırım Sıcak Yüzey	Günlük ve aylık periyodik kontrol yapılmakta ve kontrol çizelgesi tutulmaktadır. Makine topraklaması ve paratoner mevcuttur. Atex belgesi yoktur.	4	8	3	96	Aşınma plakaları için gerekli kontrol periyodik olarak yapılmalı, temizlik kontrol çizelgesi İSG uzmanı tarafından onaylanmalı, kumlama ünitesinin ATEX belgeli olması gerekmektedir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	2	8	1	16
---	--------	---	------------------------	--	--	---	---	---	---	----	---	-----------------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.13. (devamı)

3	Elevatör	Elevatör bantının kaymadan veya malzeme girmesinden dolayı sıkışması	Yangın / Toz Patlaması	Sıkışma dolayısıyla separatör gönderilemeyen bilyalar ve diğer atık partiküller elevatör içerisinde sıkışarak patlayıcı toz bulutu oluşturup, statik elektrik, bilyalar ve elevatör yüzeyi arasındaki mekanik çarpma kaynaklı meydana gelen kıvılcım, kaçak elektrik, sıcak yüzey ve oksijen birikimi ile oluşabilecek egzotermik reaksiyon ısıları nedeniyle patlayabilir	Statik elektrik; Mekanik kıvılcım; Kontrolsüz elektrik akımı; Sıcak yüzey; Egzotermik Reaksiyon; Yıldırım	Günlük ve aylık periyodik kontrol yapılmakta ve kontrol çizelgesi tutulmaktadır. Topraklama ve paratoner mevcuttur. Atex belgesi yoktur.	6	9	7	378	Elevatör bantının gözle muayenesi her gün yapılmalı, kumlama ünitesinin ATEX belgeli olması gerekmektedir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	9	3	81
---	----------	--	------------------------	--	---	--	---	---	---	-----	--	-----------------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.13. (devamı)

4	Filtre	Hava emiş klepelerinin fazla açık olması Yangın / Toz Patlaması	Klapelerin fazla açık olması, atık toz ile bilyaların da tahliye edilmesine, fazla oksijen nedeni ile oluşabilecek zotermik reaksiyon ve bilyaların cidara çarpması ile oluşabilecek mekanik kıvılcımların, sıcak yüzeylerin 45µm altındaki alüminyum tozunu tutuşturması, filtrenin tesis dışında olması sebebiyle sigara içilmesi	Mekanik kıvılcımEgzotermik reaksiyonSıcak yüzeyAçık alev	Filtrede aylık periyodik temizlik yapılmakta, kontrol çizelgesi tutulmakta, paratoner bulunmaktadır. Filtre zeminine boraskoruması yapılmaktadır. Atex belgesi yoktur. Ayrıca, filtrede meydana gelecek yangına müdahale için otomatik köpüksöndürme sistemi mevcuttur. Tekrarlayan yangın vakaları olmuş, filtre cidarındaki korlaşma ile fark edilebilmiştir.	5	6	2	60	Filtrede yapılan aylık temizlik periyodu kısaltılmalı, filtre zeminine dökülen borik asit, filtre ortamında alüminyum tozunun konsantrasyonunu düşürmek için partikül boyutu inceltilecek kullanılmalı, köpüklü söndürme sistemi iptal edilmeli, ortam içi oksijen miktarı, ısı ve alev kontrolü için exproof teknik uyarı cihazları temin edilmeli, kumlama ünitesinin ATEX belgesi olması gerekmektedir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	6	2	36
---	--------	--	---	--	---	---	---	---	----	--	-----------------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.13. (devamı)

5	Filtre	Demir bilya kullanımı	Yangın / Toz Patlaması	Demir bilya kullanımı nedeniyle oluşan demir oksitten, alüminyumun oksijen alması ve termit reaksiyon oluşması	Mekanik kıvılcımEgzotermik reaksiyonSıcak yüzeyAçık alev	□	10	7	700	Demir bilya yerine daha sert çelik bilyalar kullanılabilir. Filtrede yapılan aylık temizlik periyodu kısaltılmalı, filtre zeminine dökülen borik asit, filtre ortamında alüminyum tozunun konsantrasyonunu düşürmek için partikül boyutu inceltilecek kullanılmalı, köpüklü söndürme sistemi iptal edilmeli, ortam içi oksijen miktarı, ısı ve alev kontrolü için exproof teknik uyarı cihazları temin edilmeli, kumlama ünitesinin ATEX belgesi olması gerekmektedir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	10	3	90
---	--------	-----------------------	------------------------	--	--	---	----	---	-----	--	-----------------------	---------	---	----	---	----

Tablo 7.13. (devamı)

6	Separatör	Separatördeki eleklerin tıkalı olması	Yangın / Toz Patlaması	Makinenin çalışması sırasında oluşacak sıcak yüzey veya statik elektrik nedeni ile patlama konsantrasyonuna ulaşan tozun tutuşması	Sıcak yüzey, Statik elektrik	Günlük kontroller yapılmakta ancak kontrol çizelgesi tutulmamaktadır. Atex belgesi yoktur.	7	8	7	392	Eleklerin kontrolleri günlük olarak yapılmalı ve kontrol çizelgesi tutulmalı, İSG uzmanı tarafından onaylanmalıdır. Kumlama ünitesinin ATEX belgesi olması gerekmektedir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	8	3	72
---	-----------	---------------------------------------	------------------------	--	------------------------------	--	---	---	---	-----	---	-----------------------	---------	---	---	---	----

7	Separatör	Separatör içerisinde toz bulutu oluşması	Yarım / Toz Patlaması	Ekipman içerisinde elekler ve ürün arasında oluşabilecek statik elektrik sonucu kıvılcım çıkması, elektrik kaçakları sonucu oluşabilecek sıcak yüzeyden tutuşma gerçekleşmesi	Statik Elektrik Kontrolsüz elektrik akımı Sıcak yüzey	Günlük kontroller yapılmakta ancak temizlik kontrol çizelgesi bulunmamaktadır.	7	8	7	392	Eleklerin kontrolleri günlük olarak yapılmalı ve kontrol çizelgesi tutulmalı, İSG uzmanı tarafından onaylanmalıdır. Kumlama ünitesinin ATEX belgesi olması gerekmektedir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	8	4	96
---	-----------	--	-----------------------	---	---	--	---	---	---	-----	---	-----------------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.13. (devamı)

8	Separatör	Separatörün etrafında ve yüzeyinde birikmiş olan toz katmanı	reaksyona neden olmaktadır.	Toz katmanlarının havalanması ile toz masonucunda oluşan patlayıcı toz bulutlarının statik elektrik, açık alev veya açıkta olan kablolardan meydana gelebilecek elektrostatik deşarj gibi tutuşturma kaynağı ile teması	Statik Elektrik Kontrolsüz elektrik akımı Sıcak yüzey Açık alev	Rutin temizlik yapılmakta ve temizlik kontrol çizelgesi bulunmaktadır. Ekipman çevresinde ateşli çalışma yapılmamakta ve sigara yasağı uygulanmaktadır. Atex belgesi yoktur.	4	8	3	96	Temizlik kontrol çizelgesi İSG uzmanı tarafından onaylanmalı, gerekli durumlarda ateşli çalışma izni alınmalıdır ve sistem durdurulup temizlenmelidir. Kumlama ünitesinin ATEX belgesi olması gerekmektedir.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	8	2	48
---	-----------	--	-----------------------------	---	---	--	---	---	---	----	--	-----------------------	---------	---	---	---	----

Tablo 7.13. (devamı)

9	Siklon	Toz birikmesi Yangın / Toz Patlaması	Separatörden gönderilen 60 µm altı alüminyum içerikli toz karışımının egzotermik reaksiyon, yıldırım vb. tutuşturma kaynaklarıyla temasında neticesinde meydana gelen tutuşmayla veya fazla oksijen girişi ile egzotermik reaksiyon sonrası oluşacak yangın ve patlama	Statik elektrik Yıldırım Egzotermik reaksiyon	Klape ayarı için kontrol çizelgesimevcuttur. Siklon içinde oksijen sensörü bulunmamaktadır. Atex belgesi yoktur.	9	10	8	720	Kontrol çizelgesi İSG uzmanı tarafından onaylanmalı, exproof oksijen sensörü temin edilmeli ve kumlama ünitesi ATEX belgeli olmalıdır.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	3	10	3	90
---	--------	---	--	---	--	---	----	---	-----	--	-----------------------	---------	---	----	---	----

Tablo 7.13. (devamı)

10	Kumlama Ünitesi (Genel)	1.Kapı lastiklerinin(Fitil) özelliğini kaybetmesi 2.Aşınmaya bağlı delinmeler	Yangın / Toz Patlaması	Toz sızıntısı ile etrafta ve ekipman üzerinde toz katmanları birikmesi ve toz bulutu oluşması ve statik elektrik, kaçak elektrik akımı, açık alev, yıldırım, makine sıcak yüzeyi gibi tutuşturma kaynaklarıyla teması	Statik elektrik Sıcak yüzey Kontrolsüz elektrik akımı Yıldırım Açık alev	Aylık periyodik kontrol yapılmaktadır, paratoner mevcuttur, makine çevresinde sıcak çalışma yapılmamaktadır. Sigara yasağı mevcuttur. Atex belgesi yoktur.	4	10	4	160	Periyodik kontrol çizelgesi tutulmalı ve İSG uzmanı tarafından onaylanmalıdır. Kumlama ünitesi ATEX belgeli olmalıdır.	İSG uzmanı ve işveren	Sürekli	2	10	3	60
----	----------------------------	--	------------------------	---	--	--	---	----	---	-----	--	-----------------------	---------	---	----	---	----

*İyileştirme sonucu, verilen iyileştirme önerilerinin uygulanması durumunda elde edilecek sonuçlardır.

Tablo 7.14. HTEA Yöntemine Göre Tesis 2 (Manisa) Kumlama Ünitesi Risk Dağılımı

Sıra No	Bölüm/ Faaliyet*	RÖS
1	Elektrik Panosu	224
2	Türbin	96
3	Elevatör	378
4	Filtre (Hava Emiş Klapesi)	60
5	Filtre (Demir Bilyalar)	700
6	Separatör (Elekler)	392
7	Separatör (Genel)	392
8	Separatör (Çevresi)	96
9	Siklon	720
10	Kumlama Ünitesi (Genel)	160

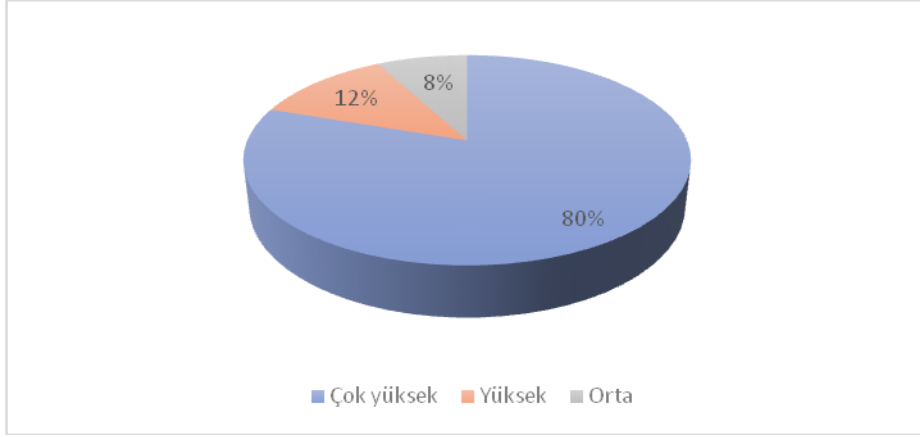
HTEA yöntemiyle yapılan risk değerlendirmesi sonuçlarına göre Tesis 2 kumlama ünitesinde en riskli ekipman/bölgeler sırasıyla;²⁴

- Siklon
- Filtre
- Separatör
- Elevatör
- Elektrik Panosu
- Kumlama Ünitesi (Genel)

HTEA yöntemiyle yapılan risk değerlendirmesi sonuçlarına göre Tesis 2 kumlama ünitesinde en düşük riskli ekipman/bölge;

- Türbin

²⁴Bölmelerdeki (birden fazla risk belirlenmiş olan) en yüksek risk skoru baz alınmıştır.



Şekil 7.32. Tesis 2 Kuşlama Ünitesinde HTEA Yöntemine Göre Risklerin Düzeylerine Göre Yüzde Dağılımı

HTEA yöntemi ile Tesis 2’de yapılan patlamaya yönelik risk değerlendirmesinde 10 ekipman/bölgede hesaplanan risklerin;

- 3’ü “orta riskli” düzeyde olup toplam risklerin %30’unu
- 2’si “yüksek riskli” düzeyde olup toplam risklerin %20’sini oluşturmaktadır.
- 5’i “çok yüksek riskli” düzeyde olup toplam risklerin %50’sini oluşturmaktadır.

Tesis 2’deki (Manisa) mevcut pozitif uygulamalar (tesiste sadece, toz patlaması tekrarlı vakalarının yaşandığı kuşlama ünitesi için çalışma yapılmıştır):

1. Firma, OSGB ile çalışmakta ve düzenli periyotlarda patlamadan korunma dokümanı hazırlamakta ve herhangi bir teknik veya organizasyonel değişimde revize edilmektedir.
2. Firmanın, olası yangın ve patlama veya olağanüstü durumlar için acil durum eylem planı bulunmaktadır.
3. Tesis genelinde sigara içme yasağı mevcuttur.
4. Kuşlama ünitesinin bulunduğu alanın yakınında açık alevli çalışma yapılmamaktadır.
5. Ünite üzerinde çalışma metot ve yönergesi bulunmaktadır.
6. Kuşlama ünitesinin, aylık, haftalık ve günlük bakımı yapılmakta ve kontrol çizelgesi tutulmaktadır.
7. Kuşlama ünitesinin filtre bölümünde toplanan tozlar için ayda bir filtre temizliği yapılmaktadır.

8. Kumlama ünitesinde meydana gelmiş olan tekrarlı ufak çaplı alüminyum tozu patlamaları nedeniyle, tedbiren, filtre iç kısmına boraks dökülmektedir.
9. Kumlama ünitesinde, hava dışında başka bir basınçlı gaz kullanılmamaktadır.
10. Firma, KKD ve ekipman sağlama ve kullanımda önerilere açıktır.
11. Genel olarak üniteye topraklama yapılmıştır.
12. Kumlama ünitesi ana kontrol panelinde kaçak akım rölesi bulunmaktadır.
13. Kumlama ünitesi üzerinde ve etrafında toz birikintilerinin önlenmesi amacı ile temizlik yapılmaktadır.
14. Paratoner mevcuttur.
15. Tozla mücadele yönetmeliğine ve hava kalitesini koruma yönetmeliğine göre havaya atılan alüminyum toz emisyon oranı uygundur.

İncelemeler ve değerlendirmeler sonucunda, kumlama ünitesinde tespit edilen uygunsuzluklar;

1. Tesisteki mevcut risk değerlendirmesinde, yüksek tehlike potansiyeli olan kumlama ünitesi ile detaylı ve patlama özelinde bir risk değerlendirmesi yapılmadığı, tutuşturma kaynaklarının tespit edilmediği ve etkin hale gelme olasılıklarının değerlendirilmediği görülmüştür.
2. Tesis, NACE sınıflandırmasında “tehlikeli” sınıfta olup, yüksek patlayıcılık riski bulunan alüminyum tozu ile çalışma, bertaraf, patlama önleme ve bastırma konularında çalışanlara herhangi bir eğitim verilmediği tespit edilmiştir.
3. Kumlama ünitesinin genelinde ve ana kontrol pano bağlantılarında aşınmış kablolar mevcuttur.
4. Kumlama ünitesinin filtre kısmında, alüminyum tozu kaynaklı olduğu düşünülen ve birkaç defa meydana gelen ufak çaplı patlamaların kayıtlı olmadığı tespit edilmiştir.
5. Filtre kısmında meydana gelen yanmanın, filtre cidarında meydana gelen korlaşma ile gözle tespit edildiği; duman, ısı, oksijen, alev detektörü gibi herhangi bir teknik uyarı alınmadığı tespit edilmiştir.
6. Tesis genelinde konvansiyonel yangın alarm paneli kullanılmaktadır.

7. Tez çalışmasında risk analizi yapılan kumlama ünitesinde ATEX belgesi mevcut olmadığı ve patlama etkilerini azaltıcı önlem olarak yetersiz kalındığı ve yanlış uygulama yapıldığı belirlenmiştir.
8. Filtre içerisinde meydana gelen ufak çaplı patlamalardan sonra, filtre kısmında meydana gelen yanmaya acil müdahale etmek için otomatik köpüklü yangın söndürme sistemi kurulmuştur. Alüminyumun oksijene büyük kimyasal ilgisinden dolayı, köpük muhteviyatında olan H₂O ile meydana getireceği reaksiyon neticesinde açığa çıkacak olan H₂'nin, ardıcıl bir tehlike meydana getireceği tespit edilmiştir.



9. Temizlik yapılırken, özellikle filtre iç aksamaları üzerinde kalan alüminyum toz katmanlarının temizliğinin gözden kaçırıldığı tespit edilmiştir.
10. Kumlama ünitesinde meydana gelen yüzey pürüzlülüğünü alma işlemi sırasında çıkan tozların (alüminyum tozu ve ergiyik alüminyum alaşımlandırma sırasında katılan diğer maddelerin tozlarının (Tablo 7.1.) çok küçük partikül boyutlarında olduğu gözlemlenmiştir ancak, firma herhangi bir numune testi yaptırmamıştır.
11. Tez araştırması sırasında yapılan laboratuvar analizleri neticesinde, elek analizi (Tablo 7.4) sonucu çıkan tozların %14,64' ünün 75 µm ve altı olduğu ve xrf cihazı ile yapılan analiz neticesinde bu miktarın da %2,0056 'sının Al tozu olduğu tespit edilmiştir.
12. Yapılan analiz sonucunda, filtre ünitesinde demir tozu ve alüminyum tozlarının ortamda fazla olduğu tespit edilmiştir. Alüminyum toz miktarı az olduğu için, demir tozları ortamı inertlemektedir. Bu yüzden çok tehlikeli reaksiyonlar görülmemiştir. Ancak, zaman zaman alüminyum toz konsantrasyonu partikül büyüklüğüne bağlı olarak artarak patlamalar olabilmektedir. Bazı durumlarda yoğunluğu daha düşük olan alüminyum tozlarının (Al ρ: 2.7 g/cm³, Fe ρ: 7,86 g/cm³) ince partikül boyutunda olmasından dolayı havada asılı kalma olasılığı yüksek olduğundan, havadaki konsantrasyonu artmaktadır. Toz karışımındaki alüminyum oranının ve partikül inceliğinin bilinmesinde yarar vardır.

BÖLÜM 8: SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında; granüle alüminyum üretimi yapan bir tesisteki çalışma sırasında oluşabilecek tozlar ile özellikle bir alüminyum jant üretim tesisindeki boya öncesi yapılan kumlama işlemi esnasında meydana gelen alüminyum tozlarının oluşturabileceği patlama riskleri incelenmiş ve bu risklerin önlenmesi için alınacak önlemler belirlenmiştir.

Alüminyum tozunun yanıcılık ve patlayıcılık özellik göstermesinde, toz partikül büyüklüğü ve tutuşturma kaynakları ile alınan önlemler yönünden durum tespiti yapılmış ve jant üretimi tesisinin metal tozları filtresinde zaman zaman görülen alüminyum tozu patlamalarına karşı; risk değerlendirmesi, diğer inceleme ve analizlerin yapılmasından sonra uygulanabilir çözüm yolları proaktif ve reaktif önlemler olarak ortaya konulmuştur.

8.1. Sonuç

1. İncelemeler ve değerlendirmeler sonucunda, **Tesis-1**' de (**Uşak**) üretilen alüminyum tozunun 200-700 µm aralığında yapıldığı belirlenmiş, literatür incelemelerine dayanarak, toz bulutu patlaması için gerekli olan minimum toz boyutunun üzerinde olduğu saptanmıştır. Ancak, mekanik işlemler sırasında çevrede oluşabilecek ve çalışma ortamlarında az da olsa zamanla birikebilecek alüminyum tozlarının da tutuşacağı ihtimali göz önünde bulundurulmuştur. Genel olarak, tesiste periyodik temizlik olmadığı ve kontrol çizelgesi tutulmadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, genel olarak elektrik tesisat kablolarının açıkta olduğu, çalışanların patlama konusunda yeterli bilgisinin olmadığı, ekipman periyodik bakımında eksiklikler ve bölüm ayırma üniteleri (kapı, paravan) hata ve eksiklikleri olduğu sonucuna varılmıştır. Buna rağmen, planlanan ve şimdiki üretimin yapıldığı granüle alüminyum taneciklerinin, tanecik boyutu ve yapılan işlemler bakımından mevcut üretim itibarıyla, havada asılı alüminyum tozu üretilmediğinden herhangi bir tehlike oluşturmadığı tespit edilmiştir.

2. **Tesis 2 (Manisa)** için Tablo 7.4'teki analiz sonucuna göre, elek altında kalan toz dağılımında küçük mikronize tozların az olduğu ve metal tozlarındaki alüminyum tozlarının az oranda olduğu, buna rağmen zaman zaman filtre içindeki havada patlama konsantrasyonuna erişilerekere bir kıvılcımla patlamaların olduğu anlaşılmıştır. Başlatılan bu patlama enerjisiyle alüminotermi reaksiyonunun da katılabileceği ve patlama şiddetinin artabileceği; büyük zararların meydana gelebileceği düşünülmektedir. Ayrıca üretim sırasında meydana gelebilecek alüminyum tozu miktarının ve tanecik boyutunun artması halinde, patlama basıncının çok daha yüksek olabileceği önem taşımaktadır.

8.2. Öneriler

8.2.1. Reaktif önlem önerileri

1. Filtre bölümünde, Bölüm 7.2.2.3' te belirtilen alüminotermi reaksiyonunun oluşmasını engellemek için daha sert çelik bilyalar kullanılarak bilyaların daha az aşınması sonunda ortamdaki demir ve dolayısıyla demir(III)oksit oranının azaltılarak alüminotermi reaksiyonu riskinin en az düzeye indirgenmesi sağlanabilir.
2. Filtre bölümündeki alüminyum tozunun ortalama partikül çapının 75 µm ve altı olduğu hesaba katıldığında, literatür taramasında 75 µm ve altı ince tozların minimum tutuşma enerjisi (Wu ve arkadaşlarına (2010) göre 40 µm boyutunda alüminyum tozları için yaklaşık MTE ~60 mJ gibi (Wu ve ark., 2010)) yüksek tutuşma hassasiyeti belirttiğinden, tutuşabilir toz bulutu oluşumu önlenmelidir. Havada toz bulutu oluşturmayan işleme operasyonları yapılmalıdır. Bütün adımlar, toz yayılmasını giderme veya toz meydana gelmesine elverişli olmayacak şekilde düzenlenmelidir. Ünite içerisinde bu durumların oluşturulması zor olduğundan, elektrostatik boşalmaları mutlaka önlenmelidir.
3. Bir tozun tutuşması için ısıtma kaynağı mutlaka bir alev veya sıcak yüzey olmak zorunda değildir. Proses tesisinin içinde ve çevresinde biriken toz ve yığın depolamada tutulan malzeme tabakaları, bir süre boyunca bozulmadan bırakıldıklarında kendiliğinden ısınmaya maruz kalabildiğinden (Bölüm 3.3.1.) ısınma, malzemenin oksijen ile reaksiyonlarla yavaş ekzotermik reaksiyonlarının bir

sonucu olarak ortaya çıkabilir. Ekzotermik reaksiyon ile serbest bırakılan ısı, ısı kayıplarının aşmak için yeterli olan bir seviyeye yükseltir ise tutuşma meydana gelebilir. Kendiliğinden ısınma mutlaka hızlı olmamakta ve genellikle tutuşmadan önce önemli ölçüde gecikme olmaktadır. Kendiliğinden tutuşma için minimum sıcaklık esas olarak malzeme kütesinin genel boyutlarına ve ısıya maruz kalma süresine bağlı olacaktır. Bu sebeple, ayda bir yapılan filtre temizliği, daha kısa periyotlarda yapılmalıdır.

4. Filtre ortamında, toz konsantrasyonu düşürülmesi önemlidir. Bunun için, halihazırda kullanmakta olan borik asidin toz tanecik boyutunu düşürmek suretiyle filtre içindeki alüminyum toz konsantrasyonunun düşürülmesi mümkündür. Borik asitin, alüminyumdan daha hafif (ρ (H_3BO_3): 1,44 g/m³, ρ (Al): 2.7 g/cm³) olduğu göz önüne alındığında, ortamdaki türbülans ile havada asılı halde kalacak olan inceltmiş borik asit tozları, ortamdaki alüminyum konsantrasyonunu düşürecek ve aynı zamanda havada asılı halde olan alüminyum tozları üzerine çökerek D tozu söndürme görevi yapacaktır. Patlama oluşsa dahi, alüminyum üzerini kaplayan borik asit tozu endotermik reaksiyon neticesinde ortamdaki ısıyı alacak ve su buharı oluşturarak yüksek ısıdaki alüminyum tozunun ısını alarak patlama şiddetini düşürecektir.



5. Bölüm 7.2.2.3'te belirtildiği gibi tesis edilen otomatik köpüklü yangın söndürme sisteminin diğer tehlikeleri beraberinde getirdiğinden yanlış bir uygulamadır. Ancak, olası bir vakada, dış cidarı soğutmak için ince pulvarize su püskürtme sistemi kullanılabilirdiği düşünülüp, filtre içine giden bağlantıların iptal edilip, filtre dış cidarına dışarıdan soğutma yapılabileceği düşünülmüştür.

6. Alüminyum tozunun, yanıcı sıvıların veya başka yanıcı maddelerin bulunduğu alanlarda depolanmasının, yangın durumunda farklı yangın söndürme tekniklerinin kullanılması nedeni ile ardıcıl reaksiyonlara sebep olabileceğinden, çıkan alüminyum tozu için ayrı, serin ve doğrudan güneş ışığına karşı korunaklı bir alanda depolanmalıdır. Mümkünse depolama, sık kullanılan alanlardan uzak olmalıdır.

7. Alüminyum tozunun, oksijene olan yüksek kimyasal ilgisinden dolayı oksitleyici maddelerle birlikte depolanmamalıdır.

8. Tesis genelinde, konvensiyonel yerine, acil müdahale için adresli yangın alarm paneli kullanılmalıdır.

8.2.2. Proaktif Önlem Önerileri

1. Alüminyum tozunun kumlama ünitesi içerisinde oluşturacağı sürtünme kaynaklı statik elektrik yüklenmesinin önüne geçmek için, üniteler arası (separatör, elevatör, filtre) sadece iletken ekipman ile transfer yapılmalıdır ve topraklamanın uygunluğundan emin olunmalıdır.

2. Portatif ekipmanlar (doldurma tankerleri veya içeriğın birinden diğerine boşaltıldığı konteynerler), iletken malzeme ile bağlanmalı ve topraklanmalıdır.

3. Yapılan elek analizi sonuçlarına göre, elek altında kalan tozlar tüm tozun yaklaşık %15'ini oluşturmakta ve kimyasal analiz sonuçlarına göre de Fe tozunun, asıl patlayıcı toz olan Al tozuna göre daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak, demire göre yoğunluğu yaklaşık 2,9 kat daha düşük olan alüminyum tozları filtre atmosferinde daha fazla miktarda (demir tozlarına oranla) havada asılı olarak bulunacaktır ($\rho_{(Fe)} : 7,86 \text{ g/cm}^3 \text{ g/m}^3$, $\rho_{(Al)} : 2.7 \text{ g/cm}^3$). Filtre ünitesinde meydana gelen toz patlamaları göz önüne alındığında, havada asılı olan Al tozlarının patlama konsantrasyonuna (MPK: 60 g/m^3 (Tablo 4.9)) ulaşmış ve tablo 4.9.'da görüleceği gibi patlamaya karşı izole edilmemiş bir elektrik kaynağından hatta bir statik elektrikten kolaylıkla sağlanabilecek 15 mJ gibi çok düşük bir MTE değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sebeple, Al toz konsantrasyonunun oluşması önlenmeli ve bunun yanında patlamaya karşı patlama korunmalı (exproof) cihazlar kullanılmalı, statik elektrik iyi bir topraklama (bara sistemi) ile mutlaka önlenmelidir.

4. Literatür taramasında edinilen bilgilerden, oksijen konsantrasyonunun %5 ve altında tutulması gerekmekte, bu sebeple kullanılacak inert malzeme konsantrasyonu (MİK) hesaplanırken, beklenmedik koşullara veya işletim hatalarına karşı koruma sağlamak için normal olarak bir güvenlik payı (örneğin, $SOK \geq 2\%$)

mutlaka koyulmalıdır. Büyük çaplı yeni bir yüzey oluşturulurken, örneğin ikincil öğütme esnasında, tamamiyle inert bir ortam oluşturulmamalıdır. İkincil bir öğütme sırasında, yeni yüzeyde, doygunluğu sağlamak için %5 civarında oksijen ihtiyacı olacaktır. Ancak, burada meydana gelen alüminyum tozu atık toz olduğundan ve ikincil bir işleme girmeyeceğinden, güvenlik payı koyulmasında bir sakınca yoktur.

5. İnert malzeme olarak, halihazırda dondurulmuş veya basınçlandırılmış olarak ticari sahada kolaylıkla bulunabilen ve maliyeti makul seviyede olan azot gazı (N₂) önerilebilir. Filtre ortamına verilecek inert gaz olan azot gazı ile oksijen konsantrasyonu azaltılabilir. Azot ile patlama riskinin giderilmesi, tesisin bir bölümünde veya ekipmanda (yüksek oranda alüminyum ihtiva eden tozların dolumu, transferi ve boşaltılması gibi), belirgin bir şekilde güvenliği artırdığı kesinleşmiştir. Azot ile inertlemede, SOK %5 olacak şekilde oksijen seviyesinin MPK altına düşürülmesi mümkündür. 75 µm ve altı alüminyum tozlarının SOK değeri Tablo 4.5'te verilmiştir. Herhangi bir boğulma riskine karşı, azot, çalışma alanından dikkatli bir şekilde uzaklaştırılmalıdır. Ayrıca azot gazı beraberinde ince grafit tozunun da kullanımı, riski oldukça azaltacaktır.

6. Ortamda oluşan patlayıcı toz karışımı için oksijen miktarını patlama konsantrasyonunun altında tutulması amacı ile ortam oksijenini ölçen exproof cihaz bulundurulmalıdır.

7. Güçlü inert maddeler olan argon ve helyumun, ürünlerle kontamine olma veya bunlarla reaksiyona girme olasılığı düşüktür veya yoktur, ancak maliyetinin yüksek olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.

8. Sodyum bikarbonat (NaHCO₃) gibi toz halinde inert maddeler, üretimde kullanılan patlayabilir tozun inertlemede kullanıldığında, üretilen tozun kontaminasyonu sebebi ile tercih edilmemektedir. Ancak, Tesis 2'de (Manisa), operasyonun yarattığı alüminyum tozu atık bir materyaldir ve tozun bir söndürücü veya inert madde ile kirlenmesi sakınca meydana getirmeyecektir. Bölüm 5.5.4.6.5'de Dastidar ve Amyotte' un (2002) yapmış olduğu deneysel çalışmalar sonucunda, sodyum bikarbonatın, alüminyum tozu patlama bastırılmasında, ortamdaki (sabit bir hacimdeki filtre ortamında) oluşabilecek alüminyum tozlarının

konsantrasyonunu azaltacağından ve patlama/ısınma olmayacağından etkili bir inert madde olduğunu işaret etmeleri göz önünde bulundurulmalıdır.

9. Bir diğer yöntem olarak baca gazı geri dönüşümü ile baca gazının, inert madde olarak kullanılması mümkündür. Ancak, tozlarla reaksiyona girebilecek akkor veya yüksek ısıdaki materyalleri, alevlenebilir buharları, kirleticileri, uzaklaştırmak ve izlemek, ayrıca baca gazını soğutmak için ilave ekipmanlar gerekmektedir ve bunun yanı sıra baca gazını toplamak ve depolamak pratik bir çözüm değildir.

10. Filtre ünitesinin ve çevresinin dışında, depolama alanlarında zeminlerde, duvarlarda ve diğer yerlerde toz birikmesinin önüne geçilmesi için temizlik kontrol çizelgesi tutulmalı ve sık periyotlarla kontrol edilmelidir.

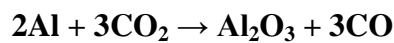
11. Tesis içinde uygulanan sigara yasağı ve açık alev çalışması yasağının, depolama alanlarında ve kumlama ünitesinin, tesisin dış kısmında bulunan filtre kısmında da sıkı bir şekilde takip edilmesi ve yazılı talimatların yer alması (ihtar) ve kuralların kesinlikle uygulanması gerekmektedir.

12. Alüminyum tozunun (beraberinde Fe tozu içeren) depolandığı alanlarda otomatik sulu yangın söndürme sistemleri (sprinkler sistemi vb.) bulunmamalıdır. Ortamdaki su ile Fe'in sıcakta reaksiyon neticesinde H₂ gazı açığa çıkacak ve ardıcıl tehlike meydana getirecektir.



Ayrıca Al tozu yangınlarında suyun olumsuz etkileri bulunmaktadır.

13. Alüminyum tozunun depolandığı alanda CO₂ otomatik söndürme sistemi kesinlikle bulunmamalıdır. Alüminyum tozunun CO₂ gazı ile tepkimeye girerek şiddetli patlamaya neden olabileceği göz önüne alınmalıdır. CO₂ ayrıca basınçla püskürtüldüğünde tozlaşmayı artıracaktır. Bunun yanı sıra, CO₂ akışı sırasında önemli miktarda elektrostatik yüklenmeye neden olabilir.



14. Firma çalışanlarına, patlama ile ilgili özel eğitim verilmelidir.

15. Üretim prosesinin oluşan tozların sürekli izlenip konsantrasyon, bileşim, tanecik boyutu, O₂ konsantrasyonu, elektrik kıvılcımı vb. bakımından incelenmeli düzeltici önlemler mutlaka alınmalıdır.

Yukarıda, yapılan risk analizi sonuçlarına göre tespit edilen uygunsuzluklar, değerlendirmeler, çözüm yolları ve reaktif-proaktif önlem önerileri verilmiştir. Araştırma konusu uyarınca firmada yan ürün olarak çıkan alüminyum tozunun, Hayes Lemmerz vakasında (Bölüm 4.5.2.) büyük eksiklik olan toz toplama sistemi için resmi yazılı bakım prosedürlerine sahip olduğu, ancak, sistemin ATEX belgeli olmadığı, çalışan eğitiminin rutin olarak yapılmadığı, çıkan toz numunelerinin analizinin yaptırılmadığı, toz filtre temizliğinin bir ay gibi uzun bir periyotta yapıldığı, yanlış bir söndürme sistemi uygulandığı görülmüştür. Meydana gelen yanma/patlama vakasında reaktif önlem alındığı ve proaktif bir çalışma (alüminyum toz patlaması özelinde bir risk analizi) yapılmadığı sonuçlarına varılmıştır ve gerekli çözüm önerileri sunulmuştur.

Bu araştırma sonucunda bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ve önerilerin, özellikle alüminyum metali işlenen tesislerde oluşan alüminyum ve alüminyum içeren tozların bulunduğu ortamlarda, alüminyum tozunun üretildiği ya da kullanıldığı proseslerde, yeterince risk değerlendirmelerinin yapılarak inert ortamlarda çalışma, kıvılcım oluşumunun önüne geçilmesi başta olmak üzere gerekli olan güvenli çalışma ile ilgili önlemlerin ve kontrollerinin sağlanması amacı ile ayrıca, teknik bilgiler bakımından yardımcı olacağı ve ülkemizde sayısı ve üretim miktarı oldukça düşük olan toz alüminyum üretiminin gelişmesine yararlı olacağı kanaatini taşımaktayım.

KAYNAKLAR

Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2007). Dust explosions–Cases, causes, consequences, and control. *Journal of hazardous materials*, 140(1-2), 7-44.

Akhavan, J. (2011). *The chemistry of explosives*. Royal Society of Chemistry.

Alonso-Peña, D., Arnáiz-García, M. E., Valero-Gasalla, J. L., Arnáiz-García, A. M., Campillo-Campaña, R., Alonso-Peña, J., ... & Arnáiz, J. (2015). Feet sunk in molten aluminium: The burn and its prevention. *Burns*, 41(5), 1122-1125

Aluminum Association. (1984). *Aluminum: properties and physical metallurgy*. ASM International.

Amyotte, P. D. (2013). *An introduction to dust explosions: understanding the myths and realities of dust explosions for a safer workplace*. Butterworth-Heinemann.

Asana, M. M., (2015). *Endüstriyel Tesislerde Toz Patlamaları, modellenmesi Ve Risk Azaltılması*. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

ATEX 2014/34/EU Guidelines, 2017

Barton, K. (2002). *Dust explosion prevention and protection: A practical guide*. Elsevier.

Basu, S. (2016). *Plant hazard analysis and safety instrumentation systems*. Academic Press.

Beck, H., Glienke, N., & Mohlmann, C. (1997). Combustion and explosion characteristics of dusts, BIA-Report 13/97.

Birk, A. M., & Cunningham, M. H. (1994). The boiling liquid expanding vapour explosion. *Journal of loss prevention in the process industries*, 7(6), 474-480.

Blair, J., & Angela, G. (2005). *CSB Reports Chemical Dust Explosions are Serious Problem*. US Chemical Safety and Hazard Investigation Board.

Bond, J. (2017). Sources of ignition: flammability characteristics of chemicals and products. Elsevier.

Book, N. L., Ludlow, D. K., & Sitton, O. C. (2001). Development and implementation of a computer-based learning system in chemical engineering. page, 6, 1.

Bradley, J. R., & Guerrero, H. H. (2011). An alternative FMEA method for simple and accurate ranking of failure modes. *Decision Sciences*, 42(3), 743-771.

BS 2955: 1958, Glossary of Terms Relating to Powder, London: British Standard Institute, 1958.

Büyük Endüstriyel Kazaların Önlenmesi ve Etkilerinin Azaltılması Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 28867, Tarih:30 Aralık 2013, Ankara.

Car E., Gencer M., Sezer P. (2017). Ergimiş alüminyum metali ile çalışan işletmelerde patlama riskleri ve önlenmesi, ALUS' 08

Cashdollar, K. L. (2000). Overview of dust explosibility characteristics. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3-5), 183-199.

Castellanos, D., Carreto-Vazquez, V. H., Mashuga, C. V., Trottier, R., Mejia, A. F., & Mannan, M. S. (2014). The effect of particle size polydispersity on the explosibility characteristics of aluminum dust. *Powder Technology*, 254, 331-337.

Chatrathi, K., & Going, J. (2000). Dust deflagration extinction. *Process Safety Progress*, 19(3), 146-153.

Colannino, J. (2006). Modeling of combustion systems: A practical approach. CRC Press.

Crowl, D. A. (2010). Understanding explosions (Vol. 16). John Wiley & Sons.

Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2001). Chemical process safety: fundamentals with applications. Pearson Education.

Çalışanların Patlayıcı Ortamların Tehlikelerinden Korunması Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 28633, Tarihi: 30 Nisan 2013.

Çeber, Y. (2010). Hata türü ve etkileri analizi yönteminin (FMEA) üretim sektöründe uygulanması (Doctoral dissertation, DEÜ Sosyal Bilimleri Enstitüsü).

Dastidar, A. G., Nalda-Reyes, B., & Dahn, C. J. (2005). Evaluation of dust and hybrid mixture explosion potential in process plants. *Process Safety Progress*, 24(4), 294-298

Dastidar, A., & Amyotte, P. (2002). Determination of minimum inerting concentrations for combustible dusts in a laboratory-scale chamber. *Process Safety and Environmental Protection*, 80(6), 287-297.

Demir, E. (2008). Alüminyum alaşımlarda ısıl işlem etkilerinin incelenmesi (Doctoral dissertation, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).

Directive, E. U. (2014). Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonisation of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres (recast). *Official Journal of the European Union*, L, 96(309), 29-3.

Doğan, E. (2006). 1050 Ve 8006 Alüminyum Alaşımlarının Deformasyon Ve Yeniden Kristalleşme Davranışı (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

Down, M., Brozowski, L., Younis, H., BENEDICT, D., FEGHALI, J., SCHUBERT, M., ... & HAUGHEY, W. (2008). Potential failure mode and effect analysis (FMEA) reference manual. Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Dearborn, 1-77.

Ebadat, V. (2010). Dust explosion hazard assessment. *Journal of loss prevention in the process industries*, 23(6), 907-912.

Eckhoff, R. K. (2003). *Dust explosions in the process industries: identification, assessment and control of dust hazards*. Elsevier.

Eckhoff, R. K. (2004). Partial inerting—an additional degree of freedom in dust explosion protection. *Journal of loss prevention in the process industries*, 17(3), 187–193.

Eckhoff, R. K. (2005). Current status and expected future trends in dust explosion research. *Journal of loss prevention in the process industries*, 18(4), 225–237.

Eckhoff, R. K. (2006). Differences and similarities of gas and dust explosions: a critical evaluation of the European ‘ATEX’ directives in relation to dusts. *Journal of loss prevention in the process industries*, 19(6), 553–560.

Eckhoff, R. K. (2014). Boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs): A brief review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 32, 30–43.

Eckhoff, R. K. (2016). *Explosion hazards in the process industries*. Gulf Professional Publishing.

Eckhoff, R. K., & Mathisen, K. P. (1978). A critical examination of the effect of dust moisture on the rate of pressure rise in Hartmann bomb tests. *Fire Safety Journal*, 1(4), 273–280.

Eğri, N. (2008). *Patlayıcı Ortamlarda İş Güvenliği*. Ç.S.G.B., Ankara.

Ergür, H. S. (2012). Makine endüstrisinde karşılaşılan toz patlaması olayı ve atex yönergeleri. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 25(2).

Ermolaev, B. S., Belyaev, A. A., Viktorov, S. B., Sleptsov, K. A., & Zharikova, S. Y. (2010). Nonideal regimes of deflagration and detonation of black powder. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 4(3), 428–439.

Field, P. (2012). *Dust explosions* (Vol. 4). Elsevier.

Geddie, J. E. (2012). *A guide to combustible dusts*.

Goroshin, S., Tang, F. D., Higgins, A. J., & Lee, J. H. (2011). Laminar dust flames in a reduced gravity environment. *Acta Astronautica*, 68(7-8), 656-666.

Groh, H. (2003). *Explosion protection*. Elsevier.

Hasani, S., Panjepour, M., & Shamanian, M. (2012). The oxidation mechanism of pure aluminum powder particles. *Oxidation of Metals*, 78(3-4), 179-195

Henry, R. E., Epstein, M., & Fauske, H. K. (2015). The Magnitude of Combined Physical and Chemical Explosions: A Mechanism for a Steam-Metal Chemical Explosion with Highly Reactive Metals. *Nuclear Science and Engineering*, 180(3), 312-334.

Hoppe, T., & Jaeger, N. (2005). Reliable and effective inerting methods to prevent explosions. *Process safety progress*, 24(4), 266-272.

<http://ced.csb.gov.tr/bekra-seveso-82669>, Erişim Tarihi: 26.12.2017

http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/57237/31916/1._ders_notu.pdf, Erişim tarihi: 4 Kasım 2018

<http://delmepatlatma.org/acik-ocak-madenciliginde-patlatma-syindr-20110603060205d.pdf>, Erişim tarihi: 26 Haziran 2018

<http://guns.connect.fi/gow/nitro.html>, Erişim tarihi: 23 Mayıs 2018

http://taner.balikesir.edu.tr/dersler/fiziksel_kimya_ii/adyabatik_genlesme.htm, Erişim Tarihi: 3 Ekim 2018

<http://teknofilter.com/blog/jet-filtre/>, Erişim tarihi: 30 Ekim 2018

<http://www.alcircle.com/news/downstream-products/detail/27648/top-five>, Erişim tarihi: 25 Ekim 2018

<http://www.askimya.com/urunler/sentetik-kriyolit-45.html>, Erişim tarihi: 2 Kasım 2018

<http://www.chemistryexplained.com/Di/Fa/Explosions.html>, Erişim Tarihi: 18 Şubat 2018

<http://www.daglar.com.tr/files/product/21425368AL.PA.pdf>, Erişim tarihi: 27 Ekim 2018

<http://www.derilkim.com/urunler/analitik-cihazlar/icp-oes/icp-oes-nerdir-calisma-prensibi/>, Erişim tarihi: 16 Eylül 2018

<http://www.dokumtek.com/segregasyon-nerdir/>, Erişim tarihi: 2 Kasım 2018

<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/b270510.pdf>, Erişim tarihi: 09 Kasım 2018

<http://www.enoven.com.tr/teknolojilerimiz/piroliz-nerdir/>, Erişim tarihi: 2 Kasım 2018

<http://www.isteguvanlik.tc/tozpatlamalari.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018

<http://www.kalkinma.com.tr/data/file/raporlar/ESA/ga/2006-GA/GA-06-07>

[08_Aluminyum_Sektoru_Hakkinda_Bir_Degerlendirme.pdf](#); Erişim tarihi: 10 Ekim 2018

<http://www.leonteknik.com/pompa/peristaltik-pompa>, Erişim tarihi: 5 Kasım 2018

http://www.nurdogan.net/fmea_dosyalar/FMEA_Ornegi.pdf, Erişim tarihi: 12 Kasım 2018

<http://www.redalyc.org/pdf/2651/265146984002.pdf>, Erişim tarihi: 14 Haziran 2018

http://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/sito/altre_ree/Tecnologia_e_Sienze_applicate/enciclopedia/inglese/inglese_vol_5/431_448_ing.pdf, Erişim tarihi: 25 Ekim 2017

<http://yebim.ankara.edu.tr/2013/04/25/x-isinlari-floresans-spektrometresi-xrf/> ,
Erişim tarihi: 5 Aralık 2018

<https://insapedia.com/aglomere-aglomera-nedir/> , Erişim tarihi: 24 Kasım 2018

<https://intweb.tse.org.tr/standard/standard/Standard.aspx?081118051115108051104119110104055047105102120088111043113104073081100082049048100056086049113097>, Erişim tarihi: 26 Aralık 2017

<https://kimya.net/stokiyometri-nedemek.html> , Erişim tarihi: 2 Kasım 2018

<https://malzemebilimi.net/kompozit-malzemenin-kullanim-alanlari.html> ,
Erişim tarihi: 2 Kasım 2018

<https://maulab.amasya.edu.tr/cihazlarimiz/induktif-eslesmis-plazma-optik-emisyon-spektrometresi-icp-oes.aspx>, Erişim tarihi: 20 Ekim 2018

https://metalurji.org.tr/dergi/dergi153/d153_2027.pdf, Erişim tarihi: 15 Haziran 2018

<https://polen.itu.edu.tr/xmlui/handle/11527/12917>, Erişim tarihi: 4 Kasım 2018

https://sma.nasa.gov/docs/default-source/safety-messages/safetymessage-2011-02-07-imperialsugarcompanydustexplosion-vits.pdf?sfvrsn=7eae1ef8_4, Erişim tarihi: 30 Ağustos 2018

<https://tr.scribd.com/doc/46488244/Kumlama-Makinasi-Aksam-Ve-Ayarlari>,
Erişim tarihi: 1 Kasım 2018

<https://tr.wikipedia.org/wiki/Higroskop>, Erişim tarihi: 24 Kasım 2018

https://tr.wiktionary.org/wiki/absorbe_etmek , Erişim tarihi: 2 Aralık 2018

<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Safe%20Handling%20of%20Powder%20and%20Paste.pdf>, Erişim tarihi: 13 Nisan 2018

<https://www.aluminum.org/sites/default/files/Safe%20Handling%20of%20Powder%20and%20Paste.pdf> , Erişim Tarihi: 12 Nisan 2018

https://www.aluminum.org/sites/default/files/TCPS_Technical_Procedure_Manual_April_2015.pdf ,Erişim tarihi: 26 Kasım 2018

<https://www.bartec.de/en/downloads/safetyacademy/exprotection.pdf>, Erişim tarihi: 28 Ekim 2018

<https://www.cbsnews.com/news/two-killed-in-power-plant-blast/> Erişim Tarihi: 22 Kasım 2017

https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/combustible_dust.html, Erişim tarihi: 16 Mart 2018

<https://www.csb.gov/hayes-lemmerz-dust-explosions-and-fire/>, Erişim Tarihi: 20 Ağustos 2018

<https://www.csb.gov/videos/inferno-dust-explosion-at-imperial-sugar/>, Erişim tarihi: 18 Nisan 2018

https://www.eckart.net/fileadmin/eckart/Service/GDA_Alupulver_Safety_engl.pdf , Erişim tarihi: 9 Ağustos 2017

https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi141/d141_2530.pdf , Erişim tarihi: 4 Kasım 2018

https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi160/d160_4250.pdf , Erişim tarihi: 12 Ocak 2018

<https://www.nfpa.org/AboutNFPA> Erişim Tarihi: 02 Eylül 2018

https://www.nfpa.org/assets/files/AboutTheCodes/652/652_A2018_CMD_AA_C_SD_SCREport.pdf Erişim tarihi: 23 Ağustos 2018

<https://www.nfpa.org/codesandstandards/allcodesandstandards/listofcodesandstandards/detail?code=654>, Erişim Tarihi: 2 Eylül 2018

https://www.nfpa.org/standard_items/search_results?searchStr=NFPA%20484, Erişim tarihi: 2 Eylül 2018

https://www.osha.gov/dte/grant_materials/fy08/sh17797108/cd_instructor_manual.pdf, Erişim tarihi: 07 Eylül 2018

<https://www.osha.gov/dts/shib/shib073105.html>, Erişim tarihi: 25 Ağustos 2018

<https://www.osha.gov/news/newsreleases/region4/080120161>, Erişim tarihi: 26 Kasım 2018

<https://www.osha.gov/Publications/3371combustible1dust.pdf>, Erişim tarihi: 09 Kasım 2018

https://www.rstahl.com/fileadmin/Dateien/tgus/Documents/ExProtection_Globa11America1Basics.pdf, Erişim tarihi: 13 Haziran 2018

ISO 4225 ISO, 1994 International Standards Organization, Explosion Protection Systems. Part 1. Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air, ISO 6184/1, Geneva: ISO, 1985.

IUPAC, O. D., Yefimov, N. V., & Naboychenko, S. (2009). Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications. Elsevier.

İş Ekipmanlarının Kullanımında Sağlık Ve Güvenlik şartları Yönetmeliği, Resmi Gazete Sayısı: 28628, Tarihi: 25 Nisan 2013, Ankara.

İş Sağlığı Ve Güvenliği Risk Değerlendirmesi Yönetmeliği, Resmi Gazete Sayısı: 28512, Tarihi: 29 Aralık 2012, Ankara.

İşyeri Bina ve Eklentilerinde Alınacak Sağlık ve Güvenlik Önlemlerine İlişkin Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 28710, Tarihi: 17 Temmuz 2013, Ankara.

İşyerlerinde Acil Durumlar Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 28681, Tarihi: 18 Haziran 2013, Ankara.

Jamal, N. A., Farazila, Y., Ramesh, S., & Anuar, H. (2014). Role of mechanical alloying parameters on powder distribution of Al/Cu alloy and Al/Cu composite. Materials Research Innovations, 18(sup6), S6190.

Khambekar, J. & Pittenger, B. H., (2013), Understanding and Preventing Metal Dust Hazards, *The International Journal of Powder Metallurgy*, 49, 39-47)

Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1998). Risk assessment in chemical process industries. Discovery Publishing House.

Khan, F. I., & Abbasi, S. A. (1999). TORAP—a new tool for conducting rapid risk assessment in petroleum refineries and petrochemical industries. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, 12(4), 299-313.

Kimyasal Maddelerle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 28733, Tarihi: 18 Haziran 2013, Ankara.

Kosinski, P., & Hoffmann, A. C. (2005). Dust explosions in connected vessels: Mathematical modelling. *Powder technology*, 155(2), 108-116.

Kuchta, J. M. (1985). Investigation of fire and explosion accidents in the chemical, mining, and fuel-related industries. *Bull. / US. Dep. of the interior Bureau of mines*.

Layık, N. (2016). Gıda Sektöründe Toz Patlamalarının Araştırılması Ve Patlamadan Korunma Dokümanının Hazırlanması Bir Uygulama Örneği. Ç.S.G.B., Ankara.

Lees, F. (2012). Lees' Loss prevention in the process industries: Hazard identification, assessment and control. Butterworth-Heinemann.

Lei, P. A. N. G., & ZHANG, Q. (2010). Influence of vapor cloud shape on temperature field of unconfined vapor cloud explosion. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(1), 164-169.

Levis, B., & Elbe, G. (1961). *Combustion Flames Explosions Gases*. Academic Press.

Lumley, R. (Ed.). (2010). *Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications*. Elsevier.

Marshall, V. C. (1987). Major chemical hazards.

Mathers, G. (2002). The welding of aluminium and its alloys. Woodhead publishing.

Modanlıoğlu, C. (2013). Granüler üretim yapan bir işletmede toz probleminin incelenmesi ve örnek bir çalışma.

Mondolfo, L. F. (2013). Aluminum alloys: structure and properties. Elsevier.

Mouritz, A. P. (2012). Introduction to aerospace materials. Elsevier.

Muhtemel Patlayıcı Ortamda Kullanılan Teçhizat Ve Koruyucu Sistemler İle İlgili Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 29758, Tarihi: 30 Haziran 2016.

Myers, T. J. (2008). Reducing aluminum dust explosion hazards: case study of dust inerting in an aluminum buffing operation. Journal of hazardous materials, 159(1), 72-80.

Nakai, M., & Eto, T. (2000). New aspect of development of high strength aluminum alloys for aerospace applications. Materials Science and Engineering: A, 285(1-2), 62-68

Neikov, O. D., Yefimov, N. V., & Naboychenko, S. (2009). Handbook of non-ferrous metal powders: technologies and applications. Elsevier.

NFPA 654, «Standard for the prevention of fire and dust explosions from the manufacturing, processing, and handling of combustible particulate solids,» National Fire Protection Association, Quincy, 2006.

NFPA, N. (2017). 921: Guide for Fire and Explosion Investigations. National Fire Protection Association, Quincy, MA

Nifuku, M., Koyanaka, S., Ohya, H., Barre, C., Hatori, M., Fujiwara, S., ... & Sochet, I. (2007). Ignitability characteristics of aluminium and magnesium dusts that are generated during the shredding of post-consumer wastes. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 20(4-6), 322-329.

- Ogle, R. A. (2016). Dust explosion dynamics. Butterworth-Heinemann.
- ÖZKILIÇ, Ö. (2005). İş Sağlığı ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri. Türk İş yayını.
- Öztop F, Uçar S. Yangın, Yangının Etkileri ve Yangın Yeri İnceleme. Jandarma Kriminal Daire Başkanlığı. Ankara; 2009, 1-13.
- Pietersen, C. M. (1988). Analysis of the LPG-disaster in Mexico City. Journal of hazardous materials, 20, 85-107.
- Pietersen, M. C. (2013). The Two Largest Industrial Disasters in History with Hazardous Material. KW Publishers Pvt Ltd.
- Press, D. (2003). Guidelines for Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), for Automotive, Aerospace, and General Manufacturing Industries. CRC Press.
- Price, E. W., & Sigman, R. K. (2000). Combustion of aluminized solid propellants. Solid propellant chemistry, combustion, and motor interior ballistics, 185, 663-687.
- Russell, M. S. (2009). The chemistry of fireworks. Royal Society of Chemistry
- Safety, C. C. P. (2010). Guidelines for Consequence Analysis of Chemical Releases.
- Siwek, R. (1996). Determination of technical safety indices and factors influencing hazard evaluation of dusts. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 9(1), 21-31
- Skjold, T., & Rolf, K. E. (2016). Dust explosions in the process industries: Research in the twenty-first century. Chemical Engineering Transactions, 48, 337-342
- Standard, U. M. (1980). MIL-STD-1629A. Procedures for Performing a Failure Mode, Effect and Criticality Analysis, Department of Defense, USA.

Tan, K. W. (2015). Use of Aluminium Powder in the Production of Lightweight Concrete (Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia).

Tehlikeli Madde ve Müstahzarlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formlarının Hazırlanması ve Dağıtılması Hakkında Yönetmelik ile Tehlikeli Maddelerin ve Müstahzarların Sınıflandırılması, Ambalajlandırılması ve Etiketlenmesi Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 28512, Tarihi: 26 Aralık 2008, Ankara.

Tehlikeli ve Zararlı Maddelerle Çalışılan İşyerlerinde ve İşlerde Alınacak Tedbirler Hakkında Tüzük, Resmi Gazete Sayısı :14752, Tarihi: 24 Aralık 1973, Ankara.

Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). Handbook of Aluminum: Vol. 1: Physical Metallurgy and Processes (Vol. 1). CRC press.

Tozla Mücadele Yönetmeliği, Resmi Gazete Sayısı :28812, Tarihi: 5 Kasım 2013, Ankara.

TS EN 60079-10-1: 2015 Patlayıcı ortamlar-Bölüm 10-1: Tehlikeli bölgelerin sınıflandırılması-Patlayıcı gaz atmosferler

TS EN 60079-10-2:2015 Patlayıcı ortamlar-Bölüm 10-2: Tehlikeli bölgelerin sınıflandırılması-Yanıcı toz atmosferler

Tuncay, H.S. (2015), Çalışanların patlayıcı ortamların tehlikelerinden korunmalarına ilişkin uygulama rehberi, Ç. V. S. G., Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü, TS EN 60079-14 Elektrikli cihazlar -Patlayıcı ortamlarda kullanılan -bölüm 14: Elektriksel tesislerin tasarımı, seçimi ve monte edilmesi, 2014.

Türkiye Mühendisler ve Mimarlar Odası [TMMOB], Alüminyum Raporu, 2006.

Ünlü, N. (2004). Bazı toksit metallerin fonksiyonel grup bağlanmış sporopellenin üzerine adsorpsiyonu ve termodinamik özelliklerin incelenmesi (Doctoral dissertation, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

Vadhe, P. P., Pawar, R. B., Sinha, R. K., Asthana, S. N., & Rao, A. S. (2008). Cast aluminized explosives. *Combustion, explosion, and Shock waves*, 44(4), 461-477.

Vargel, C. (2004). *Corrosion of aluminium*. Elsevier.

Vijayaraghavan, G. (2004). Impact assessment, modelling, and control of dust explosions in chemical process industries. MTEch Thesis, Department of Chemical Engineering, Coimbatore Institute of Technology, (2004).

Vorderbrueggen, J. B. (2011). Imperial sugar refinery combustible dust explosion investigation. *Process Safety Progress*, 30(1), 66-81.

Wang, Y. M., Chin, K. S., Poon, G. K. K., & Yang, J. B. (2009). Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean. *Expert systems with applications*, 36(2), 1195-1207.

World Health Organization. (1999). *Hazard prevention and control in the work environment: airborne dust*.

Wu, H. C., Ou, H. J., Hsiao, H. C., & Shih, T. S. (2010). Explosion characteristics of aluminum nanopowders. *Aerosol and Air Quality Research*, 10(1), 38-42.

www.mevzuat.gov.tr/MevzuatMetin/yonetmelik/9.5.16909%Ek.xls, Erişim tarihi: 25 Eylül 2018

www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi%merkezi/boksit , Erişim tarihi: 4 Kasım 2018

Xingqing, Y., Di, L., & Jianliang, Y. (2012). Secondary explosions in relief duct during aluminum dust explosion venting. *Procedia Engineering*, 45, 431-434.

YILMAZ, F. (2010). Risk Değerlendirmesi'nde Yöntem Tartışması.

Zalosh, R. (2011). Dust explosion fundamentals: Ignition criteria and pressure development.

Zangiacomi, C., Pandolfelli, V., Paulino, L., Lindsay, S. J., & Kvande, H. (2005). Preheating study of smelting cells. Proceedings of TMS Light Metals, 333-336

Zararlı Maddeler Ve Karışımlara İlişkin Güvenlik Bilgi Formları Hakkında Yönetmelik, Resmi Gazete Sayısı: 29204, Tarihi: 13 Aralık 2014, Ankara.

Zeytin, H. (2000). Alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve geleceği. MAM MKTAE Proje, (50H5602)

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	Pınar SEZER
Doğum Yeri Tarihi	Üsküdar/İstanbul, 09.05.1983
Uyruğu	T.C.
Cep telefonu	+90 532 701 08 79
E-mail	muhpınarsezer@gmail.com



Eğitim Düzeyi

	Mezun Olduğu Kurumun Adı	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	T.C. İstanbul Gedik Üniversitesi – İSG Tezli Y.L.	2017 Devam ediyor
Lisans	Balıkesir Üniversitesi – Makine Mühendisliği	2007
Lise	Pendik Süper Lisesi	2001

İş Deneyimi

Görevi	Kurum	Süre (Yıl-Yıl)
Inside Sales Engineer – Maritime & Sanitary & Equipmenty	Alfa Laval	2013|2015
Sales Manager □Maritime	Seapart Ltd. Şti.	2011|2013
Project Leader	Refleks Fire Extinguishing Systems	2010|2011
Energy Engineer	Escon Energy Savings Consultancy	2008|2010

Yabancı Dil	Okuduğunu Anlama	Konuşma	Yazma
İngilizce	İyi	İyi	İyi

Yabancı Dil Sınav Notu

YÖKDİL	70
--------	----

ALES Puanı	Sayısal	Eşit Ağırlık	Sözel
	64,11526	68,22453	71,20935