

GEDİZ ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STATİK ELEKTRİK KAYNAKLI TOZ PATLAMALARININ FMEA RİSK
ANALİZİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ ve DENEYSEL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cengiz DİRİK

İş Sağlığı ve Güvenliği Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Durmuş UYGUN

NİSAN / 2015

GEDİZ ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STATİK ELEKTRİK KAYNAKLI TOZ PATLAMALARININ FMEA
RİSK ANALİZİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ ve DENEYSEL ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cengiz DİRİK
601113057**

İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı

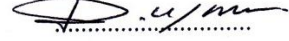
Tezli Yüksek Lisans Programı

**Yrd.Doç.Dr.Durmuş UYGUN (Tez Danışmanı)
Doç.Dr.Selim SOLMAZ
Doç.Dr.Hüseyin GÜNERHAN**

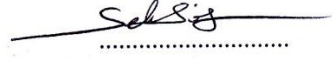
Nisan / 2015

GÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 601113057 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Cengiz DİRİK**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**STATİK ELEKTRİK KAYNAKLI TOZ PATLAMALARININ FMEA RİSK ANALİZİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ ve DENEYSEL ANALİZİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

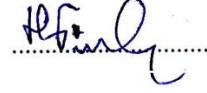
Tez Danışmanı : **Yrd.Doç.Dr.Durmuş UYGUN**
Gediz Üniversitesi



Jüri Üyeleri : **Doç.Dr.Selim SOLMAZ**
Gediz Üniversitesi



Doç.Dr.Hüseyin GÜNERHAN
Ege Üniversitesi



Teslim Tarihi : 17 Nisan 2015
Savunma Tarihi : 7 Mayıs 2015

ÖNSÖZ

Statik elektrik kaynaklı tehlikeler konusunda maalesef ülkemizde yeterli akademik çalışma mevcut değildir. Bu konuda büyük bilgi ve bilinç eksikliği göze çarpmaktadır. En temel yanılığın başında, “toz veya her hangi bir madde patlayabilir mi?” sorusu gelmektedir. Ne yazık ki istatistikler (Bkz. EK-A.2) incelendiğinde yüzlerce yangın ve patlamanın bu sebepten meydana geldiği ve büyük can ve mal kayıplarının yaşandığı görülmektedir. Yanıcı, parlayıcı ve patlayıcı katı sıvı ve gaz tüm ortamlarda çalışanlar bir ölçüde risk altında bulunmaktadır. Bu çalışmada yanıcılığı etkileyen temel faktörleri ve patlama dinamiğini ve gelişim, ilerleme sürecini, bunlara etki eden temel faktörlerin (ısı, nem vb.) birbirleriyle olan etkileşimi ve sonuca olan etkisi ayrıntılı bir şekilde incelenmiş, yaşanmış iki endüstriyel kaza üzerine hata türü ve etki analizi (FMEA) yapılarak risk öncelik sayısı (RÖS) değerleri düşük seviyelere çekilmiş, saha araştırması (Bkz. EK-A.8) ile teorik bilgiler kullanılarak risklerin tolere edilebilir düzeylere inmesi amaçlanmıştır. Ayrıca laboratuvar ortamında deney seti kurularak tüm teorik bilgiler uygulamaya geçirilmiş, sonuçlar grafik ve tablolar halinde sunulmuştur.

Bu çalışmada Yrd.Doç.Dr. Durmuş UYGUN’a değerli katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Nisan 2015

Cengiz DİRİK

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	iv
KISALTMALAR	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	x
SUMMARY	xii
GİRİŞ	1
1. YANGIN VE PATLAMA TEHLİKESİ	3
1.1. Temel Tanımlar	3
1.2. Alev Alma Koşulları	3
1.2.1. Yakıt.....	4
1.2.2. Minimum tutuşturucu enerji (MTE)	4
1.2.3. Sıvı ve gaz yakıtlar.....	4
2. STATİK ELEKTRİK DEŞARJİ (SED)	7
2.1. Tanımlar	7
2.2. Tutuşabilirlik tablosu	7
3. KATILARDA (TOZLARDA) YANGIN VE PATLAMA RİSKİ	8
3.1. Toz ve Toz Karışımlarının Patlamaları	8
3.2. Toz Patlama Riski	9
3.3. Toz Yoğunluğunun Patlamaya Etkisi	13
3.4. Toz ve Karışımlarının Sıcaklığının Patlama ve Alev Almaya Etkisi	14
3.5. Toz Parçacık Büyüklüğünün ve Yüzey Alanının Yangın ve Patlamaya Etkisi.....	16
3.6. Yığılma	17
3.7. Nemin Patlama Basıncı ve MTE Üzerine Etkisi	18
3.8. Domino Etkisi	19
3.9. İlerleyen Saçaklı Deşarj	20
3.10. Toz Yığını Yüzeyinde Meydana Gelen Statik Elektrik Deşarjı	20
3.11. Yıldırım Şeklinde Deşarj	21
4. TEKNİK ÖNLEMLER	22
4.1. Statik Elektrik Yüklenme Eğilimin Azaltılması	22
4.2. Yüzeyler Arasındaki Alanın Minimize Edilmesi.....	22
4.3. Risk Yönetimi	28
4.4. Toz patlaması olasılığı için Hata Ağacı Analiz Örneği	29

5. FMEA RİSK ANALİZLERİ.....	30
5.1. Olası Hata Türleri ve Etkileri Analizi Metodolojisi.....	30
5.2. Balık Konserve Fabrikası Patlaması (Norveç, 1975).....	37
5.3. FMEA Risk Analizi	41
6. TOZ PATLAMALARI ÜZERİNE DENEYSEL ARAŞTIRMA	43
6.1. Temel parametreler	43
6.2. Deney Ekipmanı ve Kullanılan Metotlar	44
6.3. Mısır Nişastası Deneyi	49
6.3.1. Mısır Nişastası İçin MTE –Optimum Elektrotlararası Mesafe Değeri Tespiti.....	49
6.3.2. Mısır Nişastası İçin MTE – Bağlı Nem Tablosu.....	51
6.3.3. Mısır Nişastası İçin MTE- Sıcaklık Deneyi.....	52
6.3.4. Mısır Nişastası İçin Oksijen Yoğunluğu Deneyi	53
6.4. Buğday Nişastası Deneyi	54
6.4.1. Buğday Nişastası İçin MTE – Elektrot Aralığı Deneyi	54
6.4.2. Buğday Nişastası İçin MTE-Sıcaklık Deneyi.....	55
6.4.3. Buğday Nişastası İçin MTE –Oksijen Yüzdesi Deneyi.....	56
6.4.4. Buğday Nişastası İçin Kıvılcım Enerjisi-Bağlı Nem Deneyi	57
6.5. Pudra Şekeri Deneyi.....	58
6.5.1. Pudra Şekeri İçin MTE-Optimum Elektrot Aralığı Deneyi	58
6.5.2. Pudra Şekeri için MTE –Bağlı Nem ilişkisi Deneyi.....	59
6.5.3. Pudra Şekeri İçin MTE-Sıcaklık Deneyi	60
6.5.4. Pudra Şekeri İçin MTE- Oksijen Yoğunluğu Deneyi.....	61
6.6. Sonuç ve Öneriler.....	62
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
8. KAYNAKÇA	65
9. EKLER	68
A.1. Temel Elektrik Bilgisi ve Birimleri.....	68
A.2. Toz ve Toz Karışımlarının Sebep Olduğu Patlama ve Yangın İstatistikleri.....	70
A.3. Maksimum Teorik Kıvılcım Enerjisi	72
A.4. Toz yoğunluğu Tahmin Yöntemi	72
A.5. Uluslararası İlgili Standartlar	73
A.6. Minimum Tutuşturma Enerjisinin Belirlenmesi	73
A.6.1. Gazlarda ve Buharlarda.....	74
A.6.2. Tozlar	74
A.7. dP/dt ve P_{max} Tespiti.....	74
A.8. Saha Araştırması	76
10. ÖZGEÇMİŞ.....	83

KISALTMALAR

AM	Amplitude Modulation (Genlik Modulasyonu)
D	Hatanın Farkedilebilirliği (Detectability of the Failure)
ESD	Electrostatic Discharge (Statik Elektrik Deşarjı)
FMEA	Hata Türü ve Etkileri Analiz Metodu (Failure Mode and Effect Analysis)
FTA	Fault Tree Analysis (Hata Ağacı Analizi)
FIBC	Esnek Konteyner (Flexible Intermediate Bulk Container)
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği
MSDS	Material Safety Data Sheets (Ürün Güvenlik Bilgi Formu)
MTE	Minimum Tutuşturucu Enerji
NFPA	Amerika Birleşik Devletleri Yangından Korunma Kurumu (National Fire Protection Association)
O	Olasılık
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetimi)
RPN	Risk Priority Number (Risk Öncelik Sayısı)
RÖS	Risk öncelik sayısı
S	Hatanın şiddeti (Severity of the failure)
SED	Statik elektrik deşarjı (Electrostatic discharge)

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1: MTE değeri için test sonuçları	6
Çizelge 2.1: Farklı yakıtların gaz deşarjına karşı tepkileri	7
Çizelge 3.1: Toz patlama parametreleri.....	10
Çizelge 3.2: Patlama sınıfları.....	10
Çizelge 3.3: 20-L pudra şekeri için patlayabilirlik verisi örneği	11
Çizelge 4.1: Birincil teknik önlemler	22
Çizelge 4.2: Risk yönetimi	27
Çizelge 5.1: FMEA olasılık tablosu	31
Çizelge 5.2: FMEA şiddet derecelendirme tablosu	32
Çizelge 5.3: FMEA farkedilebilirlik tablosu	32
Çizelge 5.4: Alüminyum toz öğütme birimi FMEA risk analizi tablosu.....	35
Çizelge 5.5: Toplam RÖS değerlendirme.....	36
Çizelge 5.6: Balık konserve fabrikası FMEA risk analizi	41
Çizelge 5.7: Toplam RÖS değeri ve yorumu	42
Çizelge 6.1: Mısır nişastası için MTE – optimum elektrotlar arası mesafe değeri tablosu	50
Çizelge 6.2: Mısır nişastası için MTE-bağıl nem tablosu	51
Çizelge 6.3: Mısır nişastası için kıvılcım enerjisi-sıcaklık tablosu	52
Çizelge 6.4: Mısır nişastası için kıvılcım enerjisi-oksijen yoğunluğu tablosu	53
Çizelge 6.5: Buğday nişastası için MTE-elektrotlara arası optimum uzaklık tablosu	54
Çizelge 6.6: Buğday nişastası için MTE-sıcaklık tablosu	55
Çizelge 6.7: Buğday nişastası için kıvılcım enerjisi-oksijen yüzdesi.....	56
Çizelge 6.8: Buğday nişastası için bağıl nem yüzdesi.....	57
Çizelge 6.9: Pudra şekeri için kıvılcım enerjisi-elektrot aralığı tablosu.....	58
Çizelge 6.10: Pudra şekeri için MTE –bağıl nem tablosu	59
Çizelge 6.11: Pudra şekeri için MTE –sıcaklık tablosu.....	60
Çizelge 6.12: Pudra şekeri için MTE-oksijen yoğunluğu tablosu	61
Ek Çizelge 1: 1900-1956 yılları ABD toz patlamaları istatistiği	70
Ek Çizelge 2: ABD hububat tozu patlama istatistiği	71
Çizelge A.3.1: Farklı iletken ekipmanlar üzerinde deşarj olan maksimum teorik kıvılcım enerjisi	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Yanma tehlike üçgeni.....	3
Şekil 1.2: Etanol için buhar basıncı-buhar yoğunluğu grafiği.....	5
Şekil 1.3: Yakıt patlama üçgeni.....	5
Şekil 3.1: Tozlar için yanma tehlike üçgeni	9
Şekil 3.2: Tozlar için patlama tehlike beşgeni.....	9
Şekil 3.3: Kahverengi kömür tozu konsantrasyonunun, oksijen etkisiyle maksimum basıncın ve basınç artış hızının değişimi	12
Şekil 3.4: Oksijen yüzdesi –MTE ilişkisi grafiği	12
Şekil 3.5: Toz yoğunluğu –patlama hızı grafiği	13
Şekil 3.6: Toz konsantrasyonu dP/dt ve P_{max} grafiği.....	13
Şekil 3.7: Patlama toz konsantrasyonu eşik değeri -sıcaklık grafiği	15
Şekil 3.8: Sıcaklık –MTE ilişkisi.....	15
Şekil 3.9: Çeşitli tozların parçacık büyüklüğü ile dP/dt grafiği	16
Şekil 3.10: Toz parçacıkları yığılması	17
Şekil 3.11: Elektron mikroskobu altında mısır unun yığılması.....	17
Şekil 3.12: Mısır unu çeşitleri için patlama basınç hızı grafiği	18
Şekil 3.13: Nem –MTE ilişkisi grafikleri	18
Şekil 3.14: Domino etkisi	19
Şekil 3.15: Pnömatik toz transferi	20
Şekil 3.16: Gaz ve tozlarda SED MTE kıyaslaması.....	21
Şekil 4.1: P_{RED} -zaman grafiği ve şeması	23
Şekil 4.2: Basınç zaman grafiği ve boşaltım hattı açıldığında değişim	24
Şekil 4.3: Patlama öncesi ve patlama sonrası epoksi panel.....	25
Şekil 4.5: Güvenlik algoritması	28
Şekil 4.6: FTA toz patlama olasılığı şeması	29
Şekil 5.1: Alüminyum toz öğütücü.....	33
Şekil 5.2: Patlama sonrası çevre	33
Şekil 5.3: Öğütücü dişler	34
Şekil 5.4: Balık fabrikası	37
Şekil 5.5: Yabancı cisim	39
Şekil 5.6: Silo boşaltım	39
Şekil 6.1: Elektrotlar arası optimum mesafe grafiği	43
Şekil 6.2: Deney şeması.....	44
Şekil 6.3: Deney seti.....	45
Şekil 6.4: Deney kabı.....	46
Şekil 6.5: Elektrotlar arası uzaklık tespiti.....	47
Şekil 6.6: Sistemin oksijen yoğunluğu tespiti	47
Şekil 6.7: Sistemin bağıl nem ve sıcaklık ölçümü	48
Şekil 6.8: Mısır nişastası için elektrotlar arası optimum uzaklık grafiği	50
Şekil 6.9: Mısır nişastası için bağıl nem kıvılcım enerjisi grafiği	51
Şekil 6.10: Mısır nişastası için ortam sıcaklığı grafiği	52
Şekil 6.11: Mısır nişastası için oksijen yoğunluğu grafiği.....	53
Şekil 6.12: Buğday nişastası için elektrot aralığı grafiği	54
Şekil 6.13: Buğday nişastası için sıcaklık grafiği	55
Şekil 6.14: Buğday nişastası için oksijen grafiği	56

Şekil 6.15: Buğday nişastası için nem grafiği.....	57
Şekil 6.16: Pudra şekeri için elektrotlar arası uzaklık grafiği.....	58
Şekil 6.17: Pudra şekeri için nem grafiği.....	59
Şekil 6.18: Pudra şekeri için sıcaklık grafiği.....	60
Şekil 6.19: Pudra şekeri için oksijen yoğunluğu grafiği.....	61
Şekil A.2.1: Sektörlere göre toz patlaması dağılımı.....	71
Şekil A.4.1: Pratik toz yoğunluğu tahmin yöntemi.....	72
Şekil A.7.1: SİWEK 20L test küresi şeması.....	75
Şekil A.7.2: Bilgisayar arayüzü görüntüsü ve elde edilen değerler.....	75
Şekil A.8.1: Statik elektrik deşarj noktası.....	76
Şekil A.8.2: Flanşlar arası iletken ile statik yük nötrleyici iletim borusu Örneği.....	77
Şekil A.8.3: Yer altı depo kapakları.....	77
Şekil A.8.4: Kimyasal madde taşıyıcı aracın yük boşaltımı sırasında kullanılan topraklama.....	78
Şekil A.8.5: Hammadde transfer borularının flanşlar arası iletken kablo ile statik elektrik birikimi önlemi.....	78
Şekil A.8.6: Kimyasal işlem sırasında çözücünün geçici taşıma kazanlarına doldurulması işlemi.....	79
Şekil A.8.7: Yazılım destekli boşaltım vanası.....	79
Şekil A.8.8: Çözücünün taşınması sırasında elektronik panele bağlı taşıyıcı kazan örneği.....	80
Şekil A.8.9: Yarı mamül kimyasal madde deposu topraklama örneği.....	81
Şekil A.8.10: Depo topraklama örneği.....	81
Şekil A.8.11: Pnömatik sistem sıvı transferi ve flanşlar arası iletken kablo ile statik deşarj topraklama örneği.....	82
Şekil A.8.12: Personel üzerinde birikebilecek statik yük deşarj levhası.....	82
Şekil A.8.13: Statik topraklama maşası.....	83

STATİK ELEKTRİK KAYNAKLI TOZ PATLAMALARININ FMEA RİSK ANALİZİ YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ ve DENEYSEL ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, geniş anlamda, statik elektrik deşarjı güvenliği, mühendislik yaklaşımları ve risklerin tanımlanması ayrıca çalışma ortamındaki risklerin nicelenmesi amaçlanmıştır. İş güvenliği mühendisliği genellikle mühendislik ve temel bilimler prensiplerini kullanarak, yangın ve patlamanın insan hayatı ve çevreye verdiği zararı en aza indirme bilimi olarak tanımlanabilir.

Statik elektrik deşarjı konusunda hangi faktörler nasıl ve ne şekilde ele alınmalı? Gerçek anlamda statik elektrik deşarjı şartları nelerdir? Hangi durumları kapsar? Diğer önemli faktörler nelerdir? Tutuşma ve patlama doğası gereği tahmin edilebilme zorluğu nasıl aşılabilir? Bu ve buna benzer bir çok soru büyük yapıların statik elektrik deşarjı güvenliği konusuyla yakından ilgilidir. Bu çalışma sadece anahtar soruların yanıtlarını incelemekle kalmayıp, tehlikeyi endüstriyel kazalar üzerinden, toz patlamaları için tanımlama ve FMEA risk analizi kullanarak risk değerini tolere edilebilir seviyelere indirme amaçlıdır.

Bu çalışmada statik elektrik kaynaklı tehlikelerin önlenmesi 3 grupta incelenebilir. Birinci-Üçüncü bölümde; patlama, yangın ve statik elektrikle ilgili temel kavramların irdelenmesi, temel bilimsel teori ve yaklaşımların tanımlanması yapılmıştır. Statik elektrik deşarjı şekilleri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Statik elektrik kaynakları oluşum şartları ayrıntılı bir şekilde vurgulanmıştır, Temel fizik konsept bilgiler temel alınarak birimler (Bkz. EK-A.1) (elektiriksel yük, yüzeysel yük yoğunluğu, hacimsel yük yoğunluğu, öz direnç vb.) tanımlanmış ve sığa (kapasitör) kavramı ile maddelerin veya insanın biriktirdiği yük miktarı ve deşarjı şekli ilişkilendirilmiştir.

Dördüncü bölümde toz tutuşabilirlik kinetiği üzerinde durulmuş, toz karakteristikleri ve bunların etkilerinin toz patlaması oluşma olasılığı ve şiddetinin büyüklüğü üzerindeki etkileri tanımlanmış, toz patlamaları üzerindeki temel parametreler (parçacık büyüklüğü, nem, sıcaklık) ve birbirleriyle olan etkileşimleri vurgulanmıştır. Domino etkisinin toz patlamalarına olan etkisi ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir.

Beşinci bölümde mühendislik güvenlik önlemleriyle tehlikelerin gerçekleşme olasılığı ve şiddetinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Mühendislik güvenlik yaklaşımları irdelenmiş, örneğin patlama boşaltım paneli, açılarak aşırı basıncın tahliyesi örneği verilmiştir. Diğer güvenlik ekipmanı ise sensörler olduğu ve buna ek olarak sistem güvenliğinde ısı, oksijen, nem detektörleri çok önemli bir rol oynamakta olduğu vurgulanmıştır. Sistemin inert edilmesi teknik zorunluluk olduğu belirtilmiş, toz patlamalarının önlenmesinde N₂ ve CO₂ kullanımı örneği verilmiştir.

Altıncı bölümde ise 1970’li yıllarda Norveçte yaşanmış iki toz patlaması örneği kullanılmıştır. 1970’li yıllara ait bu teknolojilerin halen ülkemizde yaygın bir biçimde kullanıldığını görmekteyiz. Bu örnekler güncelliğini hala sürdürmektedir. FMEA risk analizi ile tüm teorik bilgiler ile olayın kavranması sağlanmış ve bu bilgiler sahaya uygulanmış, riskin kabul edilebilir seviyelere düşmesi sağlanmıştır. Teorik bilgiler ile yaşanmış iki endüstriyel kaza ilişkilendirilmiş, elde edilen bilgiler ve bilimsel ipuçları ışığında yorumlanması sağlanmış ve gerçek anlamda problemler tanımlanmış, statik elektriğin anlaşılabilirlik durumu açığa kavuşturulmuştur. Bu çalışma sonucunda, belirgin bir sonuç (risklerin 50 den düşük RÖS değerine indirilmesi) elde edilmiştir.

Bu örnekler metal ve gıda endüstrisine ait toz patlamaları örnekleridir. Bütün anlatılanlar gerçek olaylardan alınmış ve tam olarak nasıl meydana gelmişse o şekilde aktarılmıştır.

Son bölümde ise incelenmiş tüm teorik bilgiler, ASTM standartları temel alınarak düzenlenen deney seti yardımıyla, laboratuvar ortamında hububat tozları için uygulanmış, elde edilen veriler tablo haline getirilerek, grafikler çizilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Statik elektrik deşarjı, toz patlamaları, FMEA risk analizi.

SUMMARY

RESEARCH ON DUST EXPLOSIONS THAT CAUSED DUE TO ELECTROSTATIC DISCHARGE BY EVALUATION OF FMEA and EXPERIMENTAL ANALYSIS

This study is aimed at providing a broad picture of electrostatic discharge engineering approaches and the identification of risks followed by quantifying the risks and hazards involved in accidents occurring at work environment. Electrostatic discharge (ESD) safety engineering generally can be defined as the application of scientific and engineering principles to the effects of fire and explosion in order to reduce the loss of life and damage to property.

How do we and how should we decide on values for factors of electrostatic discharge safety? What indeed are electrostatic discharge safety factors? What are they intended to cover? How are the other matters important for safety dealt with? What is the nature of ignition and explosion uncertainties? How and why static charge builds up on people and items? The research will attempt to analyze and examine these essential questions and many other aspects that relate to the electrostatic discharge safety of large units. This research not only answers the questions stated but also focuses on hazard identification via notable industrial accidents for dust explosions, followed by FMEA risk analysis.

Recommended practice on static electricity maybe divided into three main sections. Chapter1 to Chapter3 include basic background information dealing with the dangers of fire and explosion, the origins of static electricity and the fundamentals of gas discharges. It is necessary to address the fundamental theory on which they are partly based. Electrostatic discharge types are defined by means of fundamental physics concept (See EK-A.1) such as charge density, volume charge density, electric field. Principle of capacitor charge accumulation is reviewed to fully understand the ESD mechanism.

Chapter 4 mainly focuses on dust flammability mechanism, this chapter discusses the importance of dust characteristics and their effect on the probability and severity of dust explosions. The main parameters affecting dust explosion such as dust particle size, moisture, agglomeration, humidity are introduced and an overview of domino effect on dust explosions is analyzed.

This section refers to engineered safety features that reduce the probability and consequences of any hazard. Engineered safety devices are such as explosion relief vents, thoroughly reviewed. The relief vents open to release explosion pressure when the pressure rises. The other engineered safety devices are sensors and detectors such as heat, humidity, oxygen detectors. These devices play important role in the prevention of dust explosions and fire. In addition, inerting is given as an example of a dust explosion prevention, which is adding N_2 , to a dust cloud by an automatic explosion suppression process.

This latter section relates two different descriptions of real industrial accidents, occurred in Norway about mid 1970's.

Summarizes the principles of safety and acts as a connection between the technical fundamentals and the industrial accidents histories that follow in chapter 6. It's tried to describe the individual cases by identifying different clues and interpretations, systematically evaluating them and then arrive to deductions, finally conclude the root cause of the explosions. Unpredictable nature of electrostatic discharge hazard is made clear. The risks are lowered to tolerable level in terms of RPN (Risk priority number) below 50. The examples cover metal and food industries and involve hazards associated with powders. All industrial accidents are reviewed are based upon fact and are presented exactly as how they happened.

The final section was experimental study aimed at determining the minimum ignition energy (MIE) of 3 different grain dust samples with changing fundamental explosion parameters. The circuit has been set up for creating the sparks in the experiments: a replica of the American Society for Testing and Materials (ASTM) apparatus (ASTM, 2007)

Keywords: Electrostatic discharge, dust explosions, FMEA risk analysis.

1. GİRİŞ

Statik elektrik kaynaklı tehlikeler ve kazalar çoğu zaman yanlış anlaşılmiş bir konudur. Çoklukla yapılan hatalar iki kısımda incelenebilir, sık yaşanan ve sebebi bilinmeyen her kazanın nedeninin statik elektrik olduğu zanni, diğeri ise anlaşılammazlık ve tahmin edilebilme zorluğudur. Bu çalışmada temel elektrik bilgi üzerine modellemeler yapılarak SED'in kavranmasını kolaylaştırma amacı gözetilmektedir.

Statik elektrik kaynaklı risklerin yol açtığı tehlikeleri anlayabilmek için yanıcılık ve patlama risklerinin dinamiği ve gelişimini, ilerleme sürecini, bunlara etki eden temel faktörlerin (ısı, nem vb.) tehlike eşik aralığı değerlerinin bilinmesi, kontrol altında tutulması gereklidir. Statik elektrik yükü çoğu zaman yangın ve patlamaya yol açmaz (NFPA, 2007). Ancak belirli eşik değerlerin aşıldığı ve kontrol dışına çıktığı durumlarda en tehlikeli silah haline gelir. Yanıcılık ve patlama 3 temel durumda (katı, sıvı, gaz) ele alınabilir. Pratikte çoğu zaman toz ve gazlar hatta sıvılar saf halde bulunmazlar hibrit karışım halde olurlar, hibrit gaz ve toz karışımları ayrıca incelenmesi ve tetkik edilmesi gerekir örneğin metan gazının toz ile karışımı çok tehlikeli sonuçlar doğurabilir.

Toz patlamaları sıvı ve gaz patlamalarına benzer olarak, 5 önemli bileşenin aynı anda bulunması ile gerçekleşebilir buna patlama pentagonu da denir (yakıt, oksijen, ateşleme kaynağı, toz ile havanın karışımı ve kapalı alan) (Kauffman, 1982). Ayrıca 6 önemli parametrenin kontrol altında tutulmasını gerektirir (parçacık yarıçapı, MTE, Minimum patlayabilir konsantrasyon, minimum ateşleme ısı, azami oksijen oranı, patlama basıncı), bu değerler patlama eşik değerleri arasında olduğu durumlarda patlama veya yangın gerçekleşir (Abbasi ve Abbasi, 2007). Toz patlamaları ile ilgili yapılacak deneylerde bu parametrelerin karakteristikleri, birbirleriyle etkileşimleri ve kapsamı toz patlamaları olasılığını oluşturan, çok önemli veriler sunar.

Bu çalışmanın amacı; etkili bir model ve strateji geliştirmek sureti ile parlayıcı ve patlayıcı maddelerin sebep olduğu kazaları meydana getiren nedenleri anlamak ve önlemek olup, üç alt başlıkta toplanabilir:

- Çalışma şartları içinde risklerin tahmin edilebilirliğini arttırmak,
- Kalitatif değerlendirme yolu ile kaza ve risklerin azaltılması,
- Parlayıcı ve patlayıcı maddelerin işlenmesi ile ilgili İş güvenliği alanında stratejilerin geliştirilmesine, şirket içi, iş güvenliği politikaları oluşturulmasına yardımcı olmaktır.

Bu çalışmada öncelikle statik elektriğin temel prensiplerini, yangın ve patlama dinamiğini ayrıntılı bir şekilde inceleyerek, statik elektrik kaynaklı patlama riski taşıyan , gıda sektöründe, yaşanmış iki büyük patlamanın ayrıntılı FMEA risk analizi yapmaktır.

Hipotez

Temel statik elektrik bilgileri ışığında insan ve malzemelerin(gaz, sıvı, toz) nasıl statik yüklendiğini, hangi şartlar ve parametrelerle tutuşurma eşik değerlerine ulaştığını kavramamız, modellememiz yoluyla, SED kaynaklı yangın ve patlama tehlikelerini yok etmek veya tolere edilebilir seviyelere indirmek mümkündür. Bu şekilde statik elektrik deşarjının oluşum belirsizliği ortadan kaldırılmış olur.

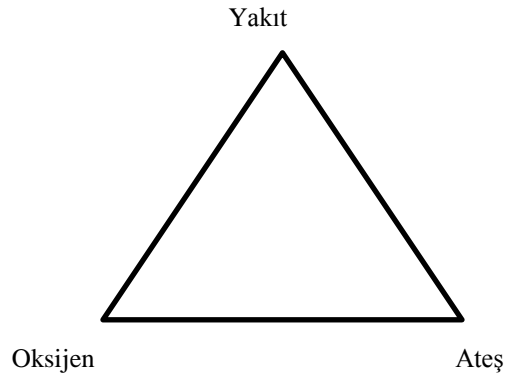
1. YANGIN VE PATLAMA TEHLİKESİ

1.1. Temel Tanımlar

Yangın ve patlama, gelişimine göre farklılık gösteren yanma çeşididir. Yangın genellikle durağan alevlerin oluşturduğu patlamaya yol açan, kapalı bir alan içerisinde (örneğin tanker), yanıcı ortamda, meydana gelen reaksiyon olarak karakterize edilebilir. Alev kaynağından itibaren 10 m/s hızla her yöne doğru yayılır. Alevin ısı etkisi basınca neden olur (10 bar), eğer alevlenme kapalı bir alanda meydana gelmişse, reaksiyonun ısı patlamaya sebep olur. Bu durumda alev yaklaşık 1 km/s hızla yol alır, basınçta 100 bara kadar çıkabilir. Büyük hasara yol açabilir (Lüttgens & Wilson, 1997).

1.2. Alev Alma Koşulları

Yanma, yakıtın en küçük parçacık seviyesinde başlar, sıvı yakıtlarda yakıt oksijen karışımı kolaylıkla yakıt buharından elde edilir, katı yakıtlarda oksijenle reaksiyona girebilmesi için hidrokarbon kimyasal bağların kırılması gereklidir, Yangın veya patlama oksijen, ateş ve yakıtın aynı anda, yeterli miktarda bulunmasıyla meydana gelir, buna yangın tehlike üçgeni de denir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1: Yanma tehlike üçgeni

Bu bileşenlerden her hangi birisinin yokluğu tehlikeyi ortadan kaldırmaya yeterlidir. Fakat her zaman bu üç bileşenin bir arada bulunması yangına sebep olmaz örneğin yanan bir kibrit gaz yağı üzerine atılırsa tutuşma olmadan söner,

fakat yakıt 45°C kadar ısıtılırsa ateşlemeye sebep olur ve yakıtın yüzeyinde yanmaya başlar (Lüttgens & Wilson, 1997).

1.2.1. Yakıt

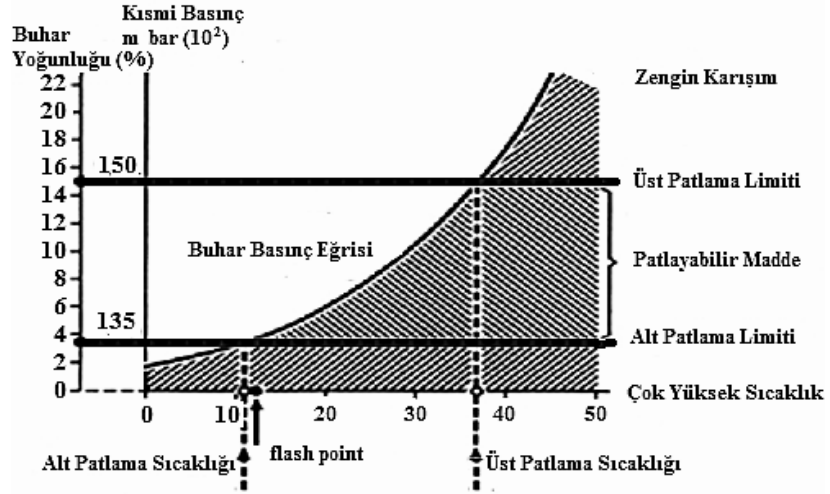
Katı, sıvı ve gaz yakıtlar en temel özelliği, yanma olayının gerçekleşebilmesi sadece tüm şartların patlama aralığında olması gereklidir. Burada alt patlama ve üst patlama limitinden bahsedebilir. Gazlar ve buharlar için alt ve üst patlama limiti, hacim yoğunluğu ile ifade edilir. Yakıt hava karışımının yüzdesi, yanıcı tozlar için birim metreküp başına kg cinsinden kütle ile belirtilir (kg/m^3) (Lüttgens & Wilson, 1997).

1.2.2. Minimum tutuşturucu enerji (MTE)

Ateşlemenin olabilmesi için, kaynağın en az MTE kadar enerji sağlaması gerekmektedir. Bir diğer önemli faktör de, enerjinin zamanla ve uzaysal olarak nasıl dağılım gösterdiğidir. Bir maddenin MTE değerini hesaplarken kıvılcımın zamansal ve uzaysal dağılımının optimum değerde olması gereklidir. Elektrotlar arası potansiyel ve uzaklık, elektrotların şekli ve büyüklüğü ve direnci dikkatli bir şekilde seçilmelidir. Genellikle devre tasarımı direnci ve indüksiyonu en aza indirecek şekilde tasarlanır.

1.2.3. Sıvı ve gaz yakıtlar

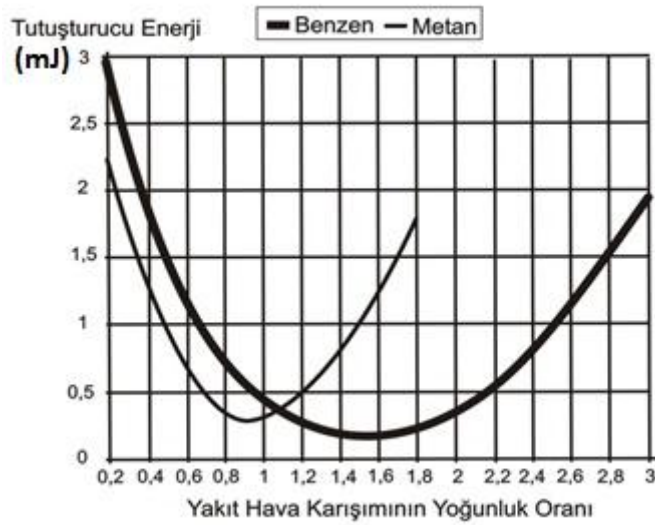
Gaz yağı örneğinde belirttiğimiz gibi, yakıtın davranışı buhar basıncı ile yakından ilgilidir. Gaz yağı buharı yakıtın hemen üzerinde sıcaklıkla beraber oluşur. Sıvının üzerinde buhar konsantrasyonu hızla artar bu şekilde alt ve üst patlama limitini belirlenmiş olur.



Şekil 1.2: Etanol için buhar basıncı-sıcaklık ve buhar yoğunluğu sıcaklık grafiği (Lüttgens&Wilson, 1997)

Şekil 1.2’de görüldüğü gibi, alt patlama sıcaklığı Bu grafiği kullanarak sıcaklığın alt ve üst patlama limitleri ile ilişkisini flash noktası olarak da adlandırılır (NFPA 68: 3.3.12.1). Bu noktadan daha soğuk veya patlama üst sıcaklığından daha sıcak sıvıların tutuşması mümkün değildir.

Tutuşturmanın gerçekleşebilmesi için yakıtın yanma aralığında olması gerekir. Üst limitte yetersiz oksijen alt limitte de yetersiz yakıt alevlenmeyi önler. Şekil 1.3’te görüldüğü gibi, U şekilli eğrinin en alt noktası MTE değerini verir.



Şekil 1.3: Yakıt –hava karışımı oranı –MTE ilişkisi (Lüttgens & Wilson, 1997).

Pratikte hiç bir zaman %100 saf yakıt bulmak mümkün değildir. Bu yanma reaksiyonunda hesaplanan değerin üzerinde veya altında değer çıkmasına yol açar. Yakıtın mol ağırlığının oksijenden çok düşük olması, difüzyon hızını arttırması nedeniyle yakıt yoğunluğunun beklenenden daha çok olmasını sağlar. Bu aynı zamanda reaksiyonun zayıf olan tarafa yönelmesini sağlar. (Lüttgens & Wilson, 1997).

Çizelge 1.1: MTE Değeri için test sonuçları. (BS EN 13821, 2002).

MTE değeri için Test sonuçları	
Örnek	MTE (mJ)
Kömür tozu	>1000
Un	300-1000
Şeker	10-30
Aluminyum tozu	100-300
Kanalizasyon atık	30-100

2. STATİK ELEKTRİK DEŞARJI (SED)

2.1. Tanımlar

Görülebilir ve duyulabilir SED gaz deşarjı olarak adlandırılır. Bu gruba tüm SED'ler dahildir.

Kaçınılmaz olarak her zaman serbest elektron, negatif yük, atmosferde üretilir. Elektrik alan içerisinde elektronlar ters yöne hareket ederler. Hızları alan şiddetine bağlıdır. Elektronlar elektrik alanın şiddetiyle doğru orantılı olarak elastik çarpışma yaparlar, kritik eşik değeri aşıldığı durumda hava atom ve molekülleriyle in elastik çarpışma yapmaya başlarlar.

Eğer elektrik alan homojen değilse gaz deşarjı elektrik alanın en şiddetli olduğu alanda, çığ etkisini oluşturabilecek bölgede meydana gelir. Parlamayla birlikte görülür. Atomlar uyarılmış düzeyden temel düzeye foton yayarak, ışıma yaparak geçerler. Bu parlama genelde mor ve kırmızıdır. Havadaki azot ve oksijenin spektrum çizgilerini yansıtır.

2.2. Tutuşabilirlik tablosu

Yakıt–hava karışımının normal atmosferik koşullarda, farklı gaz deşarjlarına verdikleri tutuşma ihtimali aşağıdaki çizelgede verilmiştir (Çizelge 2.1).

Çizelge 2.1. Farklı yakıtların gaz deşarjına karşı tepkileri

Artan SED şiddeti ↓	Gaz ve buharlar MTE:0.2-1 mJ	Yanıcı tozlar MTE :1-10 mJ	Tozlar MTE>10 mJ
	Hayır	Hayır	Hayır
İhtimal	İhtimal	İhtimal	
İhtimal	İhtimal	Hayır	
İhtimal	İhtimal	Hayır	
Evet	Evet	Evet	
Evet	Evet	Evet	

Çift taraflı yüklenmelerde yalıtkan plastik tabakanın kalınlığı 10 mm den fazla, eşik potansiyel değeri 4 kV'dan düşükse SED oluşmaz. Kıvılcım kapasitansı 3pF tan küçük olan küçük iletkenlerin hidrokarbon-hava karışımının ve yanıcı gazları ateşlemesi mümkün değildir (Amyotte & Eckhoff, 2010).

3. KATILARDA (TOZLARDA) YANGIN VE PATLAMA RİSKİ

3.1. Toz ve Toz Karışımlarının Patlamaları

İngiliz standartlar enstitüsüne göre (BS 2955:1958); yarıçapı 76 µm'den küçük parçacıkları barındıran katı maddelerdir. (NFPA 654 ya göre ise 420 µm ve daha küçük parçacıklar barındıran katı maddedir) Toz patlamaları, havada asılı bulunan yanıcı özellikteki tozların, hızlı reaksiyonu olarak da tanımlanabilir.

Endüstride daha çok karışım tozlar ve bunların çeşitli kombinasyonları ile karşılaşmaktayız. Karışımlar yanıcı gaz ve yanıcı toz kombinasyonu olarak ele alınır. Bazen gazlar tutuşma limitini altında (LFL), tozlarda minimum patlama yoğunluğunun (MEC) altı da olabilir. Buna rağmen patlayıcı karışım oluşturabilirler. Pratikte toz karışımı içerisinde yanıcı gaz karışımı eklenmesiyle patlamanın şiddetini çok arttırdığını bilmekteyiz (Amyotte et al., 2010). Deneysel olarak maksimum patlama basıncının (Bkz. EK-A.7) P_{max} ve maksimum birim hacimde basıncın artma oranının (K_{st}) arttığı birim hacimde etilen/polietilen, hekzan/polietilen, propan/polietilen karışımlarında bu gözlemlenmiştir. Metan/kömür tozu karışımlarının en tehlikeli hibrit karışım olduğu söylenebilir.

Teorik olarak üç bileşenden (Şekil 3.1) her hangi birini yok ederek patlama veya yangına engel olunabilir. Pratikte birçok farklı hesaplamanın ve etkenin dikkate alınması şarttır.

Buna ek olarak birçok karışım formları, doğal gaz/uçucu kül, plastik tozların üretimi sırasında hidrokarbon/ reçine karışımları örnek olarak verilebilir. Toz ve hibrit karışımların patlama meydana getirebilmesi için 5 temel bileşenin (Şekil 3.2) aynı anda bulunması gerekir: (i) yakıt, (ii) oksijen, (iii) tutuşturucu kaynak, (iv) oksijen ile yakıtın karışım halinde bulunması, (v) kapalı alan (Amyotte, Kahn, & Dastidar, 2003) sıklıkla patlama işleme ünitelerinin (öğütücüler, spiral konveyörler, karıştırıcılar, taşıyıcı kanallar) içinde meydana gelir.



Şekil 3.1 : Tozlar için yanma tehlike üçgeni. (Abuswer, Dalhousie Univ.).



Şekil 3.2 : Tozlar için patlama tehlike beşgeni (NFPA, 2008).

3.2. Toz Patlama Riski

Toz patlamasının tanımlanabilmesi için şu soruların cevaplanması gereklidir:

1. Örnek materyal havaya dağıldığı durumda patlamaya sebep olabilir mi?
2. Hangi yoğunlukta toz karışımı patlamaya sebep olabilir?

Çizelge 3.1'de bu soruların cevaplarının bir kısmını bulmak mümkündür (Amyotte & Eckhoff, 2010).

Çizelge 3.1 : Toz patlama parametreleri (Amyotte & Eckhoff, 2010)

Parametre	Birim	Tanım	Risk Bileşeni Seviyesi
P_{max}	bar	Maksimum patlama basıncı (birim hacimde)	Şiddetinin büyüklüğü oranında etkili
$(dP/dt)_{max}$	bar/s	Maksimum basınç artış oranı (birim hacimde)	Şiddetinin büyüklüğü oranında etkili
K_{st}	bar.m/s	Şekli veya hacmi normalize edilmiş basınç artış oranı (birim hacimde)	Şiddetinin büyüklüğü oranında etkili
MEC	gr/m ³	Minimum patlayıcı toz yoğunluğu	Mevcut olma durumunda etkili
MTE	mJ	Minimum tutuşturma enerjisi (elektrik ark)	Mevcut olma durumunda etkili
MİT	°C	Toz bulutunu Minimum tutuşturma sıcaklığı	Mevcut olma durumunda etkili
MOC(LOC)	Hacim %	Minimum veya kısıtlayıcı oksijen yoğunluğu	Mevcut olma durumunda etkili

Patlamanın gücü ve şiddeti K_{st} değeri ile sınıflandırılabilir (Çizelge 3.2). Önemli olan maksimum (dP/dt) değerinin toz yoğunluğuna oranıdır (Bkz. EK-A.7). Kapalı alanın hacmine bağlıdır.

$$K_{st} = (\sqrt[3]{V}) \left(\frac{dP}{dt} \right)$$

dP/dt = Maksimum basınç artış oranı

K_{st} = Basınç artış oranı

V = Patlama ortamı hacmi

Çizelge 3.2 : Patlama sınıfları (OSHA, 2011)

Patlama sınıfı	K_{st} (bar.m/s)
St 0	0
St 1	> 0 ve ≤ 200
St 2	> 200 ve ≤ 300
St 3	> 300

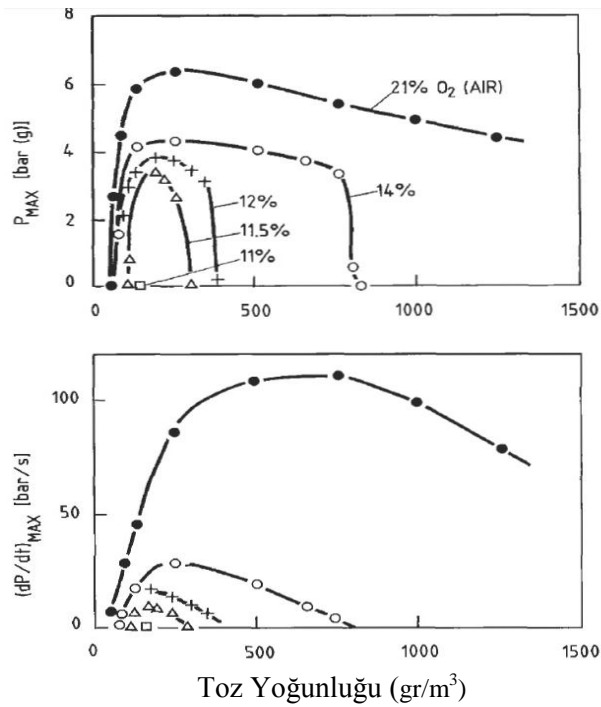
Çizelge 3.3 : 20-L Pudra şekeri için patlayabilirlik verisi örneği
(Abuswer, Dalhousie Univ.).

Konsantrasyon [gr/m ³]	P _m [bar(g)]	(dP/dt) _m [bar/s]	K _{St} [bar.m/s]
125	2,2	51	14
250	4,3	71	19
500	6,7	210	57
750	7,3	344	93
1000	7,1	305	83
1250	6,6	237	64
1500	6,1	166	45

Oksijen ve oksitleyici gazların patlamaya olan etkisi:

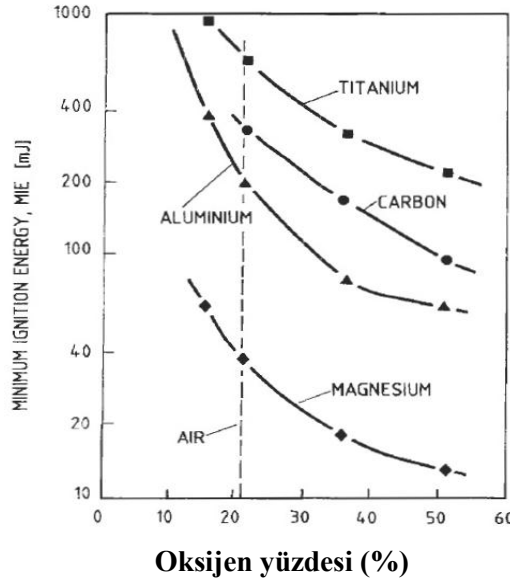
Daha önce de belirtildiği gibi oksijen miktarının, toz bulutu içerisinde azalmasıyla birlikte patlama şiddeti ve tutuşma duyarlılığı azalır (Wiemann, 1984).

1 m³'lük kapalı ortamda yapılan deneyde hava azot karışımına oksijen etkisi incelendiğinde oksijen miktarı azaldıkça basınç artış hızının ve maksimum basınç değerinin düştüğü gözlenmiştir (Çizelge 3.3).



Şekil 3.3 : Kahverengi kömür tozu konsantrasyonunun, oksijen etkisiyle maksimum basıncının ve basınç artış hızının değişimi (Wiemann, 1984).

Şekil 3.3'den anlaşılacağı üzere oksijen oranının yanma kinetiğine büyük katkısı vardır. 1 m³ azot hareketsiz gaz olarak hazırlanmıştır. ISO standart patlama donanım 750°C ve atm basınçta hesaplanmıştır.



Şekil 3.4 : Oksijen yüzdesi –MTE ilişkisi grafiği

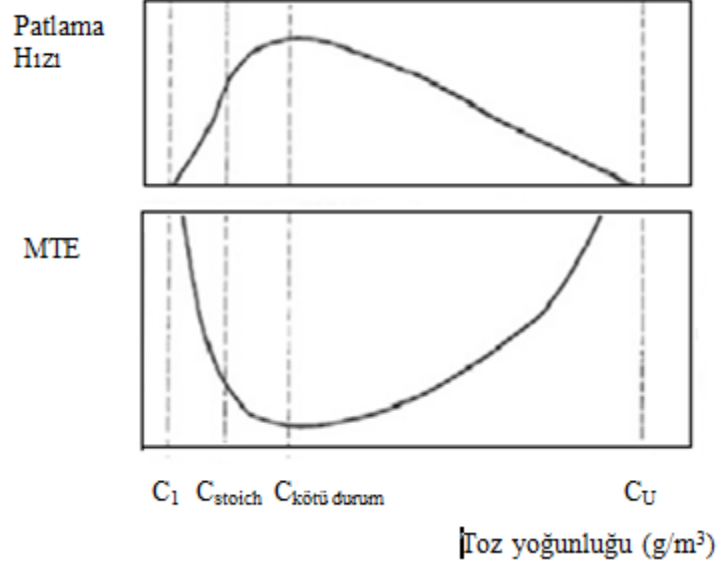
Şekil 3.4'te farklı elementlerin toz bulutlarının 0.2 bar basınçta, 40µm parçacık yarıçapı alınarak, yapılan deney sonucu elde edilen tabloda MTE değerlerin üstel bir biçimde düştüğü yani yanma duyarlılığının arttığı görülmektedir (Ballal, 1980).

3.3. Toz Yoğunluğunun Patlamaya Etkisi

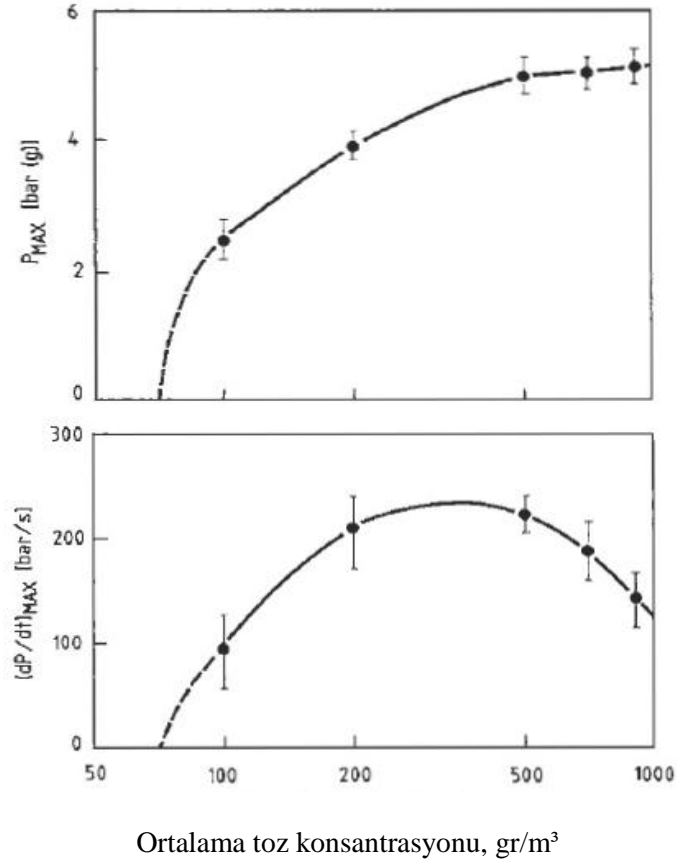
Şekil 3.5'de görüldüğü üzere, hava ortamda patlama, çok küçük bir konsantrasyon aralığı için mevcuttur. Bu C_J minimum C_U'da maksimum patlama konsantrasyonudur. Patlama hızı ve ateşleme duyarlılığı hiç bir zaman sabit kalmamaktadır.

Mısır unu için gerçekleştirilmiş bu deneyde normal şartlar altında ve sıcaklıkta minimum patlayabilir toz yoğunluğu 70 gr/m³ olarak bulunmuştur. Stokiyometrik

konsantrasyon (C_{stoic}) ise 235 gr/m^3 'tür. En tehlikeli yoğunluk 500 gr/m^3 olduğu görülmektedir.



Şekil 3.5 : Toz yoğunluğu –patlama hızı grafiği



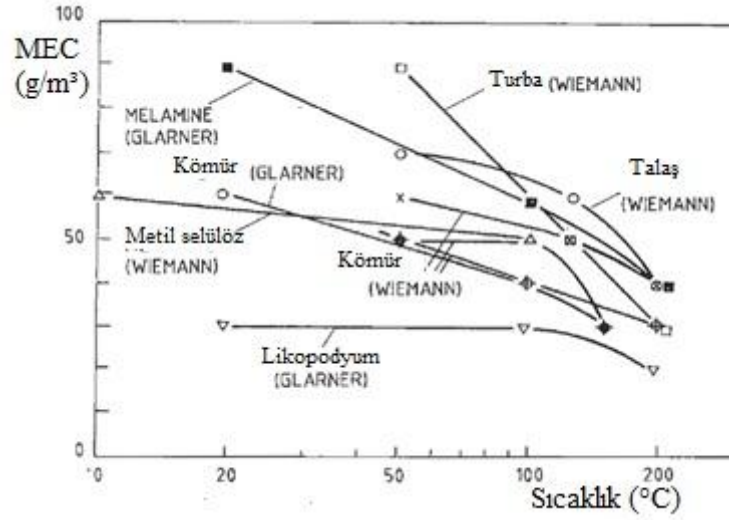
Şekil 3.6 : Toz konsantrasyonu dP/dt ve P_{max} grafiği (Fuhre&Pedersen,1985)

Toz yoğunluğunun maksimum basınç artış hızı ve maksimum patlama basıncı Şekil 3.6'da verilmiştir. Örnekte mısır ununun nemi %11'dir.

Maksimum basınç artış oranı 400-500 gr/m³ arasındadır. Maksimum basınç 500 gr/m³ ve üzeri değerlerde görülmektedir. P_{max} değer azalan hızda artarak maksimum seviyeye ulaşıp düşüşe geçer.

3.4. Toz ve Karışımlarının Sıcaklığının Patlama ve Alev Almaya Etkisi

Farklı kömür tozları ve organik maddeler üzerinde yapılan deneylerde sıcaklık artışı ile patlama eşik toz yoğunluğu değerinin düştüğü gözlenmiştir (Şekil 3.7) (Wiemann, 1987 & Glarner, 1983).

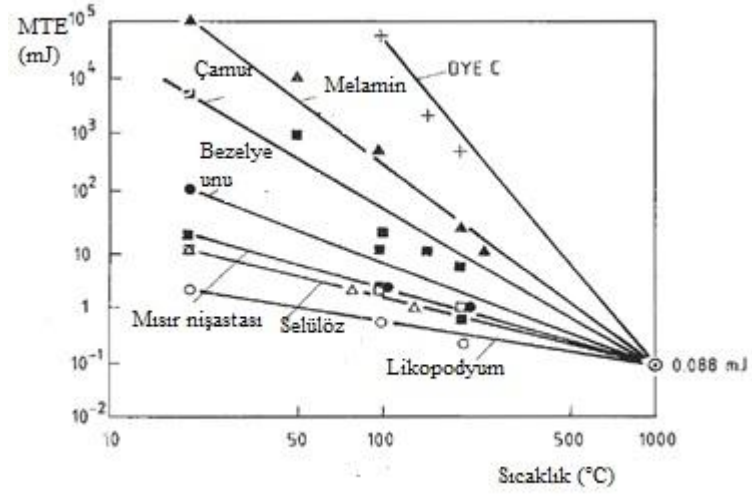


Şekil 3.7 : Patlama toz konsantrasyonu eşik değeri -sıcaklık grafiği

Toz bulutunun sıcaklık etkisi minimum patlama konsantrasyonu eşik değeri bu deneyde 7 bar basınç, 7 m³ kapalı ortam hacminde, 10 kJ ateşleme enerjisi kullanılmıştır (Glarner, 1983).

Wiemann ise 20 litre hacim 10 kJ ateşleme enerjisi kullanmıştır.

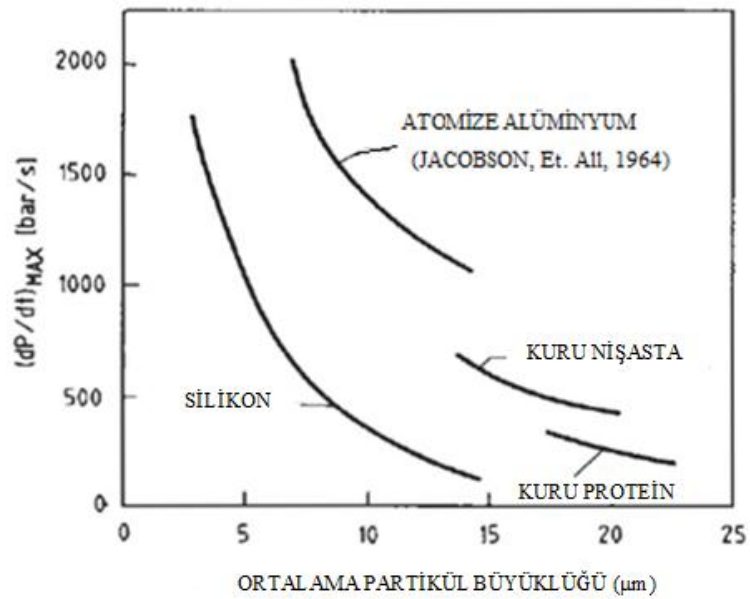
Statik elektrik nedeniyle oluşan kıvılcımın toz bulutu patlama değerleri, beklendiği gibi sıcaklık artışı ile ters orantılı olarak MTE değeri düşmektedir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 : Sıcaklık –MTE ilişkisi (Glarnar, 1984)

Şekil 3.8’ sıcaklık 1000°C’ye ulaştığında MTE değerinin tüm malzemeler için 0.088 mJ olduğu ve MTE değeri ile sıcaklık arasında lineer bir ilişki olduğu gözlenmektedir.

3.5. Toz Parçacık Büyüklüğünün ve Yüzey Alanının Yangın ve Patlamaya Etkisi

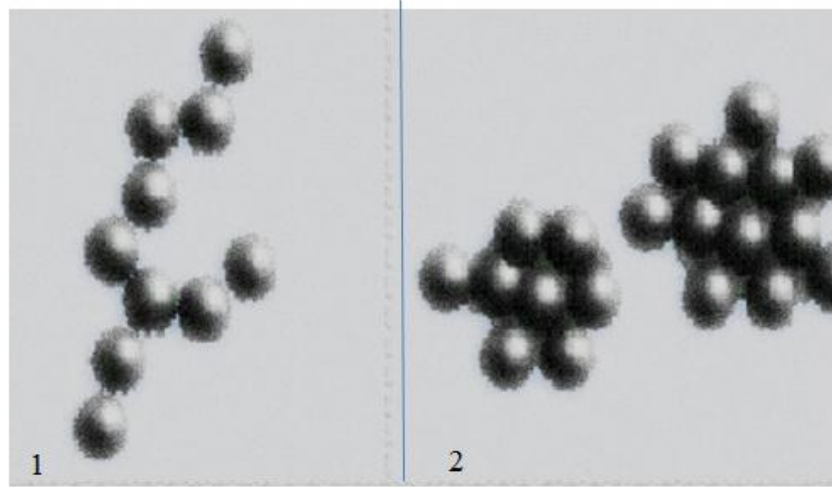


Şekil 3.9 : Kuru protein, kuru mısır unu, silikon, alüminyum tozlarının ortalama parçacık büyüklüğü ile dP/dt ilişkisi grafiği. (Eckhoff et.al, 1986)

Parçacık büyüklüğü arttıkça basınç artış hızı düşmektedir. Parçacık büyüklüğü arttıkça, azalan ivme ile MTE nin arttığı görülmektedir (Şekil 3.9).

Bir diğer önemli faktör de toz parçacıklarının yığılması ve birbirine yapışması (Agglumeration) faktörüdür.

3.6. Yığılma Etkisi

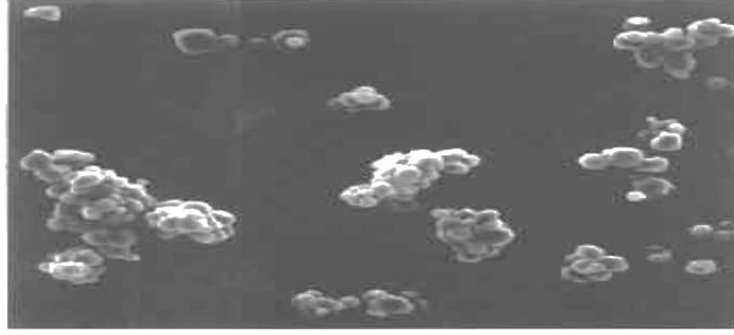


1. Düzgün dağılım gösteren toz partikülleri

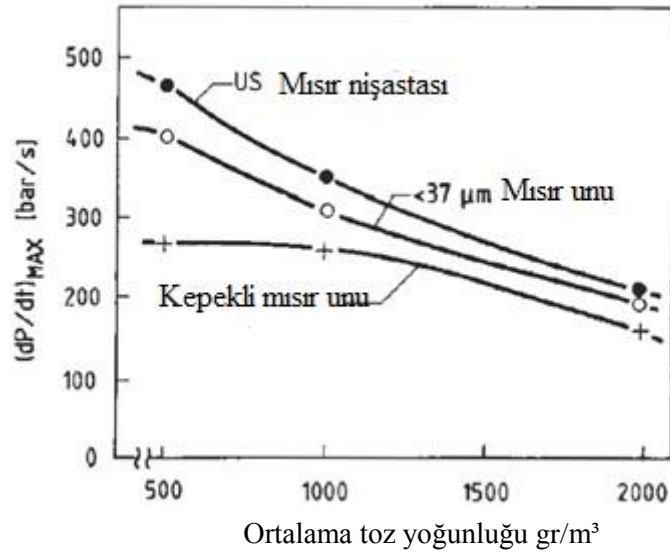
2. Birbirine yapışık toz partikülleri

Şekil 3.10 : Toz parçacıkları yığılması

Birincisinde efektif yüzey alan daha genişken ikincisinde yığılma nedeniyle, efektif yüzey alan daha küçüktür (Şekil 3.10, Şekil 3.11)).



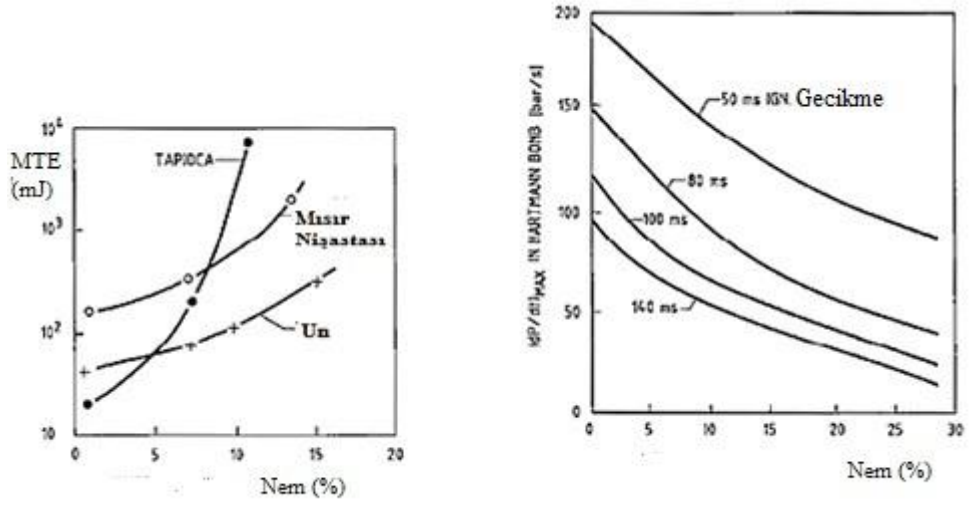
Şekil 3.11 : Elektron mikroskopu altında mısır unun yığılması (aggloramation) açıkça görülmektedir (W. C. Wedberg).



Şekil 3.12 : Mısır unu çeşitleri için patlama basınç değişim hızı, toz yoğunluğu grafiği (Eckhoff & Mathisen, 1977/1978)

Elenmemiş mısır unu , diğer elenmiş ve inceltilmiş mısır unu örneklerinden farklılık göstererek, patlama basınç değişim hızının daha düşük değerden hızla indiği görülmektedir (Şekil 3.12).

3.7. Nemin Patlama Basıncı ve MTE Üzerine Etkisi



Tozun içerisindeki nemin elektrik kıvılcım kaynaklı MTE üzerine etkisi (Zeeuwen, 1985).

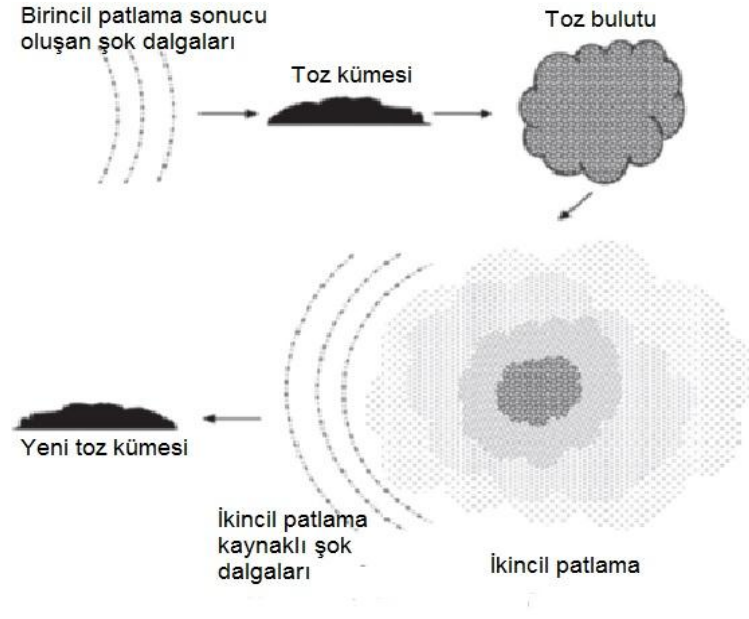
4 ayrı nişasta unu örneğinin unun içindeki nemin artış miktarıyla dP/dt değerinin ve ateşleme süresinin uzaması gözlenmektedir (Eckhoff & Mathisen, 1977/1978)

Şekil 3.13: Nem–MTE ilişkisi grafikleri

Şekil 3.13 incelendiğinde, nemin önemli ateşleme hassaslığını ve patlama şiddetini düşürdüğü söylenebilir. Nem gaz moleküllerin daha az aktif olmasını ve toz parçacıkları arası çekim kuvvetini artırarak yığılmasına birbirine yapışmasına yol açar. Bu şekilde tozun efektif alanında düşürmüş olur.

3.8. Domino Etkisi

İlk patlama çevrede bulunan diğer tozları da havaya kaldırıp ikinci patlama için uygun bir ortam yaratır. Domino etkisi hesaplanması toplam patlama şiddetini verir (Şekil 3.14).



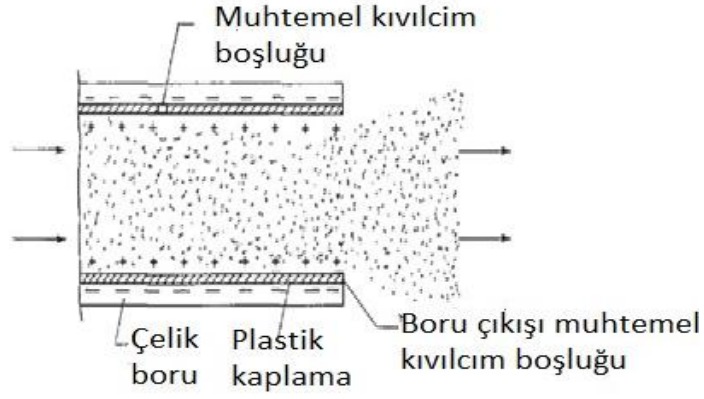
Şekil 3.14: Domino etkisi (Abbasi & Abbasi, 2007)

Birincil ve ikincil patlamalar birincil patlamanın basınç dalgaları ile diğer patlamaları tetikleyebilir. Bu güçlü şok dalgaları ikincil toz bulutu yaratarak, birincil patlamadan açığa çıkan enerji sayesinde parlayarak, ikincil patlamaya sebep olabilirler. İkincil patlama, birincil patlama sebebiyle miktarı ve yoğunluğu artan toz-hibrit karışımı sebebiyle çoğu zaman ilkinden çok daha şiddetli ve yıkıcı olmaktadır.

Toz ve karışımları patlama tehlikesi endüstride çok geniş bir alanı tehdit etmektedir. Örneğin; kömür, hububat, kağıt, gıda, metal, kauçuk, farmasötik, plastik, tekstil gibi.

3.9. İlerleyen Saçaklı Deşarj

Yüksek enerji taşıyan toz muhtemel toz patlamalarına yol açabilecek türde bir deşarjdır. Çift taraflı, ters kutuplu, ince (4mm) yalıtkan materyallerin olduğu ortamlarda meydana gelir. Nedeni ise üzere zıt kutuplu yüklerin çift taraflı yalıtkan yüzeylerinde oluşturduğu yüksek yük yoğunluğudur.



Şekil 3.15 : Pnömatik toz transferi (Eckhoff, 2011).

Pnömatik toz transferi gerçekleşen iletken çelik üzerine yalıtkan plastik kaplı boru kullanılmaktadır (Şekil 3.15). Tozun plastik çepere sürtünmesi neticesinde plastik yüzeyde yük birikimi meydana gelir. Bu yükler çelik üzerinde serbest elektronları çekerek elektrik alan oluşturur. Artan yüksek yük yoğunluğu, çeperde oluşan küçük delikler vasıtasıyla, borunun bitiminde ilerleyen saçaklı deşarj meydana getirir.

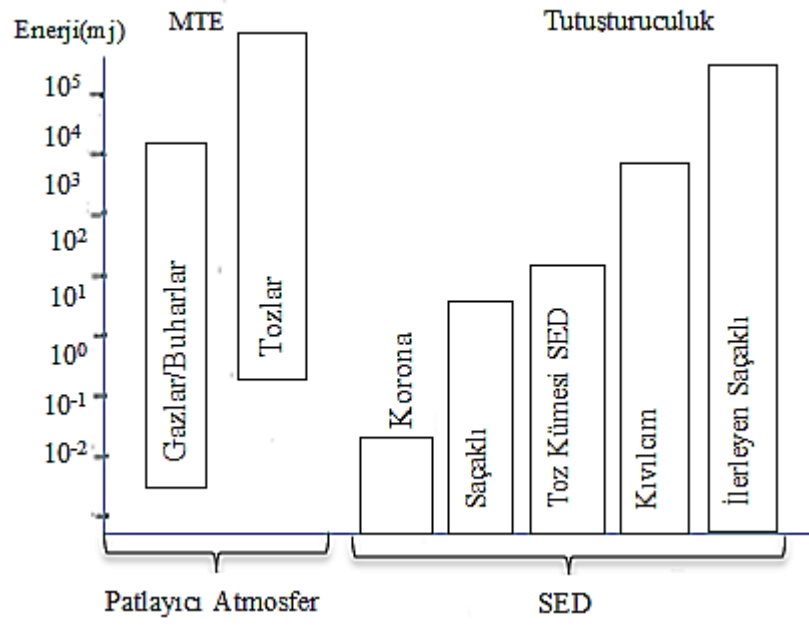
3.10. Toz Yığını Yüzeyinde Meydana Gelen Statik Elektrik Deşarjı

Yalıtkan toz, büyük konteynerlere, silolara püskürtüldüğünde veya boşaltıldığında meydana gelir. Çok yüksek alan yük yoğunluğu oluşturur, toz yığının üzerinde görünür deşarj meydana gelir (Glor, 1988).

Bu tarz bir deşarj meydana gelebilme ihtimalinin artışı, yük-kütle oranının artışı ve yüksek hızlı toz transferi ile artar.

3.11. Yıldırım Şeklinde Deşarj

Topraklanmamış yalıtkan kabın varlığında meydana gelir. Düşük enerjili deşarj olduğu için çoğu toz karışımını ateşleyemez. Şekil 3.16'da gaz ve buharlar ile tozların yanma ve patlama riskini oluşturan deşarjların, kıyaslaması görülmektedir (Glor, 1988).



Şekil 3.16: Gaz ve tozlarda SED MTE kıyaslaması.

4. TEKNİK ÖNLEMLER

Teknik anlamda önlemler birincil ve ikincil önlemler olarak 2 gruba ayrılabilir. Birincil önlemler çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1: Birincil teknik önlemler

Prensip	Tanım
Miktarı En aza indirme	Tehlikeli maddenin mümkün olan en az miktarını kullanmak
İkame etmek	Mümkünse Tehlikeli maddeyi daha az zararlı olanıyla değiştirmek
Sistemi yenilemek Basitleştirmek	İşleme ünitelerinin teknolojilerini yenilemek İşlem safhasında ve sonrasında insan kaynaklı hataların en aza indirilmesi veya ekipman, prosedürlerin en az hata ile çalışmasını sağlamak

İkincil önlemler; kıvılcım kaynaklarını yok etmeye yönelik önlemlerdir.

1. Alanın patlama bölgelerine ayrılması (NFPA 499, 2013)
2. Kıvılcım kaynaklarının belirlenmesi

Başlıca kıvılcım kaynakları

- Sıcak yüzeyler
- Mekanik kıvılcımlar
- Alev ve sıcak gazlar
- Sürtünme
- Elektrostatik desarj
- Yıldırım
- Ekzotermik reaksiyonlar olarak değerlendirilir (NFPA 68:B 5).

4.1. Statik Elektrik Yüklenme Eğiliminin Azaltılması

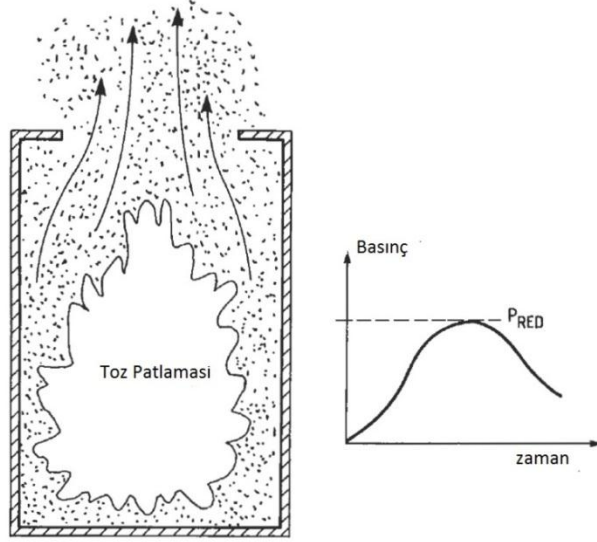
Aşağıdaki metotlar statik yüklerin oluşumunu minimize edebilir.

4.2. Yüzeyler Arasındaki Alanın Minimize Edilmesi

Yukarıda belirtildiği gibi statik yüklenme daha çok yüzeyler arasında meydana gelmektedir. Birbirinden ayrılacak tabakalar arasındaki temas yüzeyi en aza

indirilerek buna çözüm bulunabilir. Parlak yüzeyler matlaştırılarak ve sertleştirilerek bu sağlanabilir.

1. Patlamaya dayanıklı tasarım
2. Patlama boşaltma hattı (explosion venting)



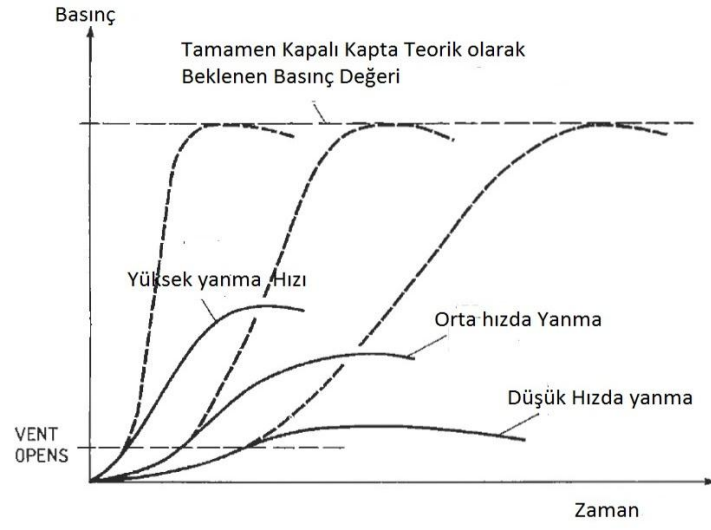
P_{RED} : Maksimum tolere edilebilir basınç değeri

Şekil 4.1 : P_{RED} -zaman grafiği ve şeması (Eckhoff, 2011).

Maksimum kabul edilebilir basınç P_{RED} , alanın tasarımına, reaksiyon veya işlem türüne göre farklılık göstermektedir (Şekil 4.1).

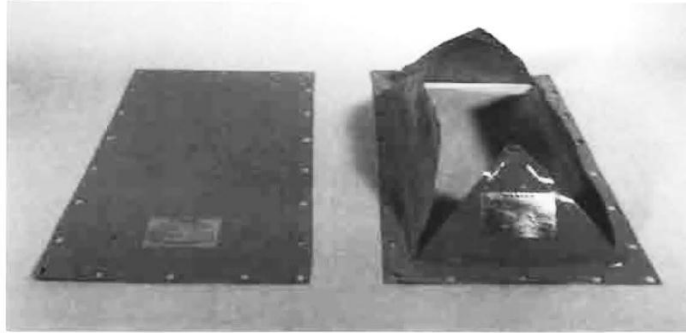
Patlama boşaltılmasının temel prensibi şekilde görüldüğü gibi maksimum basıncın izole edilmesi sistemin patlamadan korunması amaçlıdır. Burada oluşan basınç iki kaynaklıdır.

- Birincil patlama neticesi oluşan sıcaklık ve artan basınç
- Yanmamış, yanmış veya yanmakta olan tozların ısı etkisiyle çeperde oluşturduğu basınç

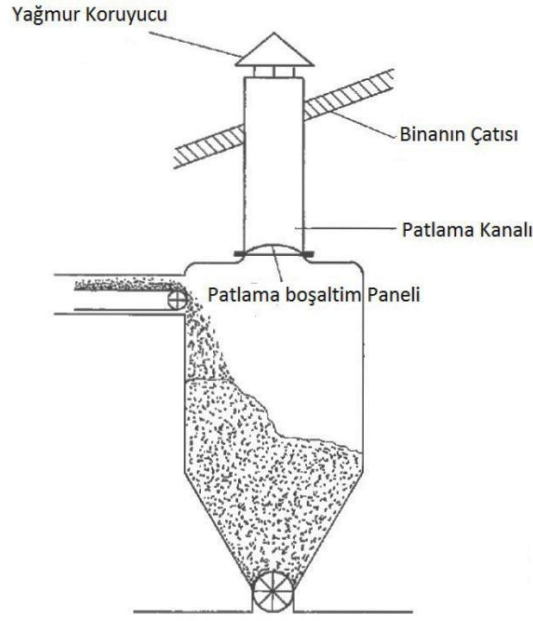


Şekil 4.2 : Basınç-zaman grafiği ve boşaltım hattı açıldığında değişim.

Şekil 4.2’de deneysel olarak patlama boşaltımının yüksek basınç değerini (kesikli çizgiyle gösterilen) önemli miktarda düşürdüğü görülmektedir.



Şekil 4.3 : Patlama öncesi ve patlama sonrası epoksi panel



Şekil 4.4 : Acil boşaltım tasarımı örneği (Eckhoff, 2011).

Şekil 4.4’de patlama boşaltım paneli ve patlama kanalı vasıtasıyla patlama basıncı atmosfere verilmiş olur. Patlama kanalının uzunluğu, kabın yarıçapının küçüklüğü, yapı içinde çok köşeli düz olmayan tasarımların maksimum basıncı arttırdığı deneysel olarak ispat edilmiştir.

- Patlamayı bastırma: Patlama bastırıcı materyaller söndürücü ve itici gaz karışımından ibarettir. Genelde 60-120 bar basınçta azot kullanılır. Birincil patlama sonrası gelişen toz alevi sensörler aracılığıyla supresör valfini tetikler. Nozül sayesinde hacme eşit miktarda dağıtılarak patlama bastırılmış veya büyümeden söndürülmüş olur. Çift basınç sensörü karşılıklı olarak konumlandırılarak yanlış alarm olasılığı elimine edilir.
- Alev yayılmasını engelleme: Patlama meydana getiren 5 temel unsurun bir veya bir kaç tanesinin yok edilmesi ile yangın ve patlama riski bertaraf edilmiş olur. Bunun dışında tozun karakteristiği de çok önemli parametreleri barındırır MTE, MIT, P_{max} , K_{st} , MEC. Ayrıca toz parçacıklarının büyüklüğü, toz parçacıklarının yığılma karakteri, yüzey alanı, nemi, yanıcı gaz bileşeni olup olmaması, hareketsiz ortamın yoğunluğu ayrıca, toz ve hibrit karışımın kapalı alanda olup

olmaması ve alan hacmi de çok önemli parametreler olarak söylenebilir.

Diğer önemli faktörler de aşağıdaki sıralanabilir:

- (i) Toz ve gaz karışımının başlangıç basıncı ve sıcaklığı,
- (ii) Toz parçacıklarının dağılımı, efektif yüzey alanı,
- (iii) Toz yoğunluğunun uzayda dağılımı,
- (iv) Birincil patlama kaynaklı oluşan türbülansın, yanmamış bölgede oluşma ihtimali,
- (v) Alev dağılımı geometrisinin türbülans etkisiyle değişikliğe uğraması.

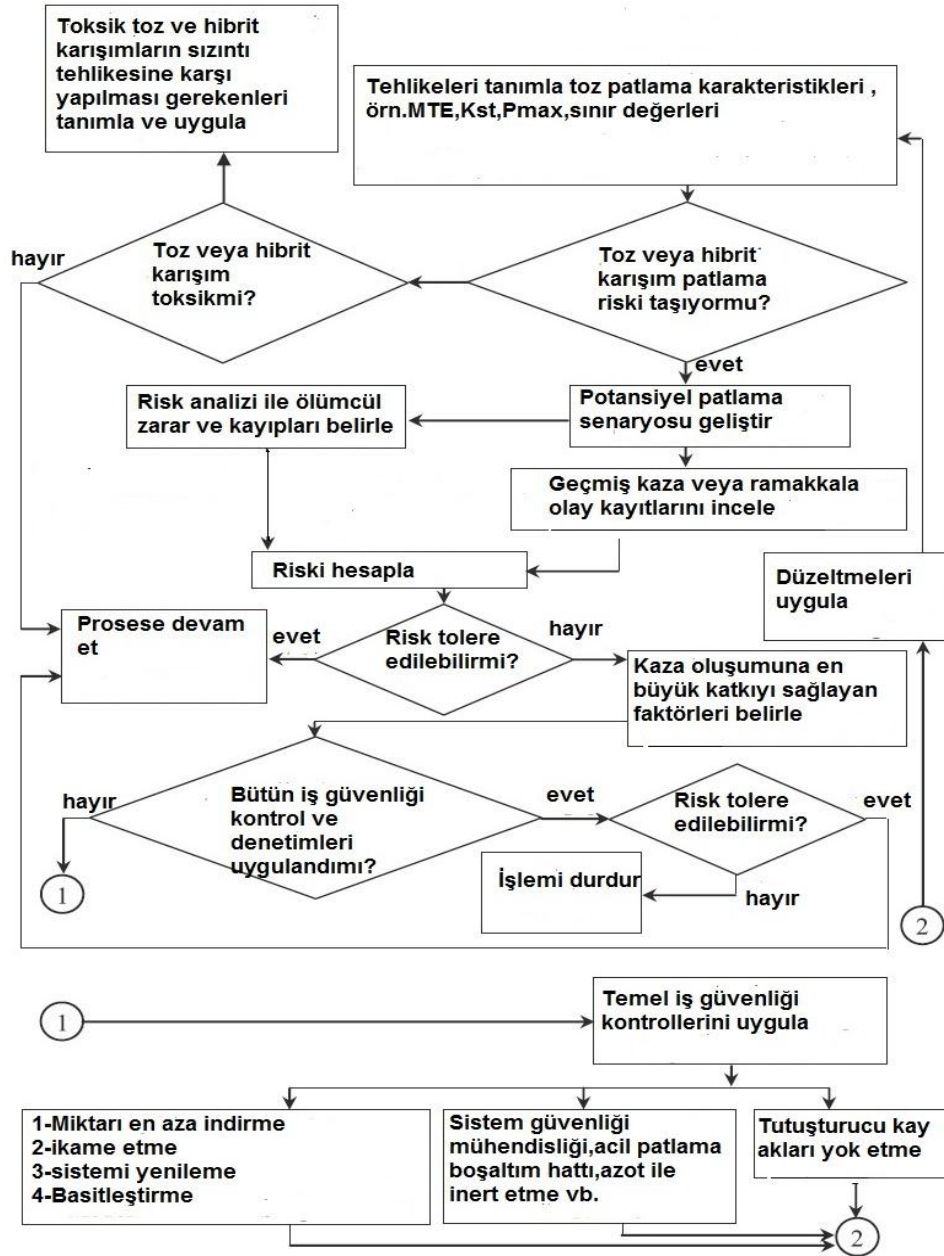
Çizelge 4.2: Risk yönetimi

Önlemler	Uygulama örnekleri
Minimize etmek	<p>Depolanan tehlikeli katı, sıvı ve gaz maddelerin miktarı minimize edilir.</p> <p>Girişi yapılan tehlikeli hemen işleme alınmalıdır.</p> <p>Tehlikeli maddelere ihtiyaç kalmadığında veya X gün ihtiyaç olmadığında ortamdan izole edilmeli veya standartlara uygun olarak imha edilmelidir.</p> <p>Yanıcı patlayıcı bu maddelerin taşınması, sırasında tehlikeler en aza indirilmelidir.</p> <p>Daha az yanıcı, daha az toksik ve reaktif maddeler tercih edilmelidir.</p>
İkame etmek	<p>Su bazlı ürünler çözücü veya yağ bazlı ürünlere tercih edilmeli, mümkünse değiştirilmelidir.</p> <p>İnsan hatasını en aza indirecek ürün ve ekipman seçimi yapılmalıdır.</p> <p>Mümkünse alerjik ürün ve mamuller alerjik olmayanlar ile değiştirilmelidir.</p> <p>Daha düşük sıcaklıkta veya basınçta imkanı araştırılmalı, buna uygun ekipman temin edilmelidir.</p>
Yenilemek	<p>Bütün tehlikeli gazlar, sıvılar ve tozlar insanlardan, binalardan, ürünlerden ve çevreden mümkün olduğunca uzak tutulmalıdır.</p> <p>Yeni ekipman alındığında daha düşük hızda, basınç, sıcaklıkta, hacimde çalışması tercih edilmelidir.</p> <p>Çalışanların çalışma ortamları tenha, başkalarından uzak yerde olmamasına dikkat edilmelidir.</p>
Basitleştirmek	<p>Bütün kullanım kılavuzları, MSDS'ler kolay anlaşılabilir, kolay erişilebilir durumda olmalıdır.</p> <p>Ekipman ve işlemler yanlış komuta kapalı veya cevap vermeyen yapıda dizayn edilmelidir.</p> <p>Makinaların kontrol düğmeleri istemsiz olarak açıp kapamaya uzak olmalıdır.</p> <p>Makina ekipman ve elektrik aksam bütün ateş kaynaklarından uzak tutulmalıdır.</p>

Kıvılcımın oluştuğu noktada büyük önem taşımaktadır. Bu sayılan parametreler yangın ve patlama ihtimalinin yorumunda en önemli faktörlerdir.

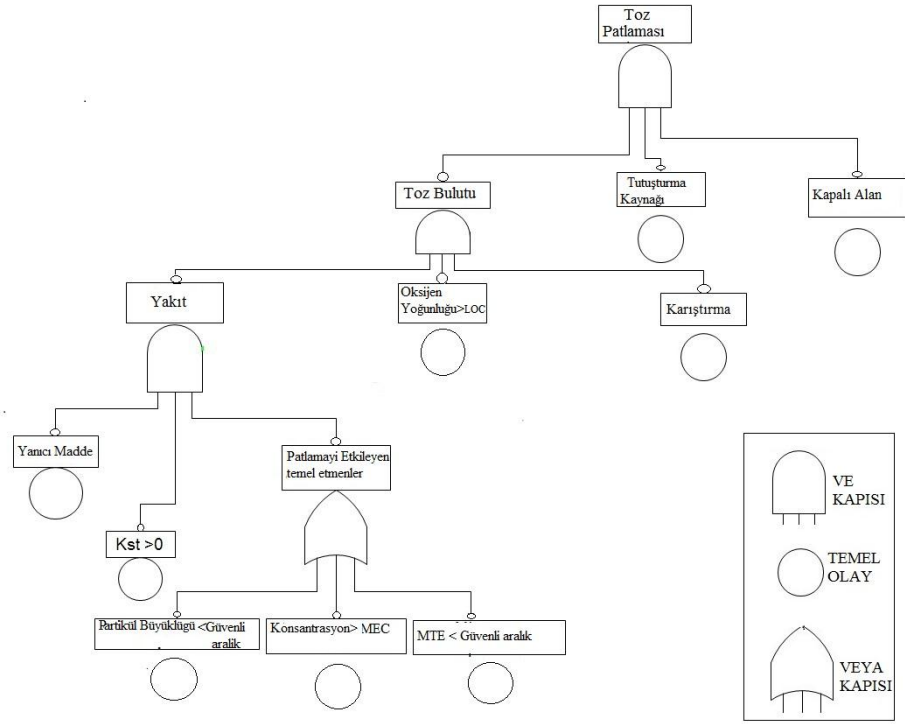
4.3. Risk Yönetimi

Çerçeve olarak figür de akış şeması belirtildiği gibi nicel FMEA risk analizi, önleyici mühendislik tasarım, modellemeler, patlama öncesi ve sonrası parametreler, güvenlik kontrolü sağlanabilir



Şekil 4.5 : Güvenlik algoritması

4.4. Toz patlaması olasılığı için Hata Ağacı Analiz Örneği



Şekil.4.6 : Hata Ağacı Analizi(FTA) Toz patlaması olasılık şeması

Temel amacı mantık devreleri kullanarak tanılayıcı metotlar yardımıyla tepe olayın kök sebebinin tespitidir (Şekil 4.6). Ayrıca toz patlamasına sebep olan hata veya hatalar zincirinin, risk önceliğini ve önem listesini hazırlayarak, ölçülmesine yardımcı olmaktadır.

Patlama kinetiği ile ilgili tüm teorik ve deneysel bilgiler ve kavramlar ışığında FTA, hatanın kaynağının tespitinde, sistemin anlaşılmasının kolaylaştırılmasında önemli katkılar sağlayacaktır.

5. FMEA RİSK ANALİZLERİ

5.1. Olası Hata Türleri ve Etkileri Analizi Metodolojisi

Hata Türü ve Etki Analizi dokuz temel aşamadan oluşmaktadır:

1. FMEA amaçları ve düzeylerinin belirlenmesi için FMEA planlaması.
2. FMEA'nin gerçekleştirilmesi için 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).

Muhtemel Zarar Modu: Sistem içerisinde zarara neden olabilecek işlemler esnasında meydana gelebilecek rastlantısal ve doğal olaylardır. İşletmenin bütünü içerisindeki parçalar ayrı ayrı ele alınır, olası zarar verici olaylar tespit edilir, bu olaylara zarar modları denilmektedir.

Zararların Etkileri- Sonuçları: Gerçekleşmesi olası durumların meydana getirdiği zararların işletme üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. O, S, D, RÖS, harfleriyle gösterilen sembollerin anlamları aşağıda verilmiştir (Özkılıç, 2005):

- O** : Her bir zarar modunun oluşma olasılık değeri (Çizelge 5.1),
- S** : Zararın ne kadar önemli olduğunun değeri, şiddet, ciddiyeti (Çizelge 5.2),
- D** : Zarar meydana getirecek durumun keşfedilmesinin zorluk derecelendirilmesi (Çizelge 5.3).

RÖS : Risk öncelik sayısı

RÖS değeri P, S ve D değerlerinin çarpımıyla elde edilir.

$$\text{RÖS} = P(\text{olasılık}) \times S(\text{şiddet}) \times D(\text{fark edilebilirlik})$$

Örnekte RÖS değeri 50 ve üzeri tüm işlemler iyileştirmeye tabi tutulmak zorundadır.

Çizelge 5.1 : FMEA Olasılık tablosu

Hata olasılığı	İhtimali	Derecesi
Çok Yüksek:	½ den fazla	10
Kaçınılmaz hata	1/3	9
Yüksek:	1/8	8
Tekrar eden hata	1/20	7
Orta:	1/80	6
Arasıra olan hata	1/400	5
	1/2000	4
Düşük:	1/15.000	3
Nispeten az hata	1/150.000	2
Çok az:	1/1.500.000 den az	1
İmkansız hata		

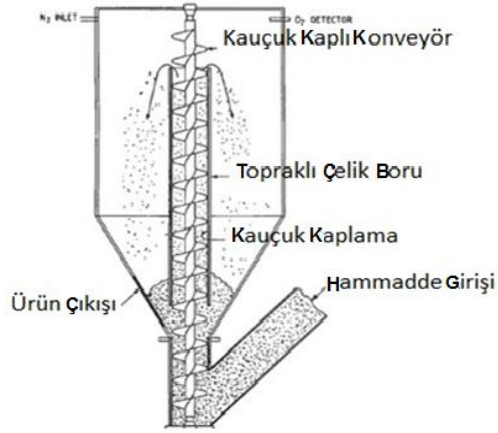
Çizelge 5.2: FMEA şiddet derecelendirme tablosu.

FMEA şiddet derecelendirme Tablosu		
Etki	Şiddetin etkisi	Derece
Uyarısız gelen tehlike	Felaketlere yol açabilecek etkiye ve güce sahip potansiyel hata	10
Uyarısız gelen tehlike	Yüksek hasara ve çoklu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip, uyarısız gelen hata	9
Çok yüksek	Sistemin hasar görmesini sağlayan, ağır yaralanmalara ve ölüme yol açan hata	8
Yüksek	Ekipmanın hasar görmesini sebep olan ölüme sakat kalmaya, 3.derece yanığa neden olan hata	7
Orta	Sistemin verimliliğini etkileyen, ağır yaralanma uzuv, organ kaybına yol açan hata	6
Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmezlik, ikinci derece yanık	5
Çok Düşük	Incinme küçük sıyrıklar, burkulmalar, kısa süreli rahatsızlık	4
Küçük	Sistemin verimliliğini azaltan hata	3
Çok küçük	Sistemin çalışmasını bazen aksatan küçük hata	2
Yok	Yok	1

Çizelge 5.3: FMEA Farkedilebilirlik tablosu.

Farkedilebilirlik	Farkedilme olasılığı	Derece
Fark edilemez	Potansiyel hatanın fark edilebilirliği mümkün değil	10
Çok az	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği çok zor	9
Az	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği uzak	8
Çok düşük	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği düşük	7
Düşük	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği çok düşük	6
Orta	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği orta	5
Yüksek ortalama	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği yüksek ortalama	4
Yüksek	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği yüksek	3
Çok Yüksek	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği çok yüksek	2
Kesin	Potansiyel hatanın farkedilebilirliği hemen hemen kesin	1

Alüminyum toz karıştırıcı bölüm patlaması (Gullaug, Norveç,1973):

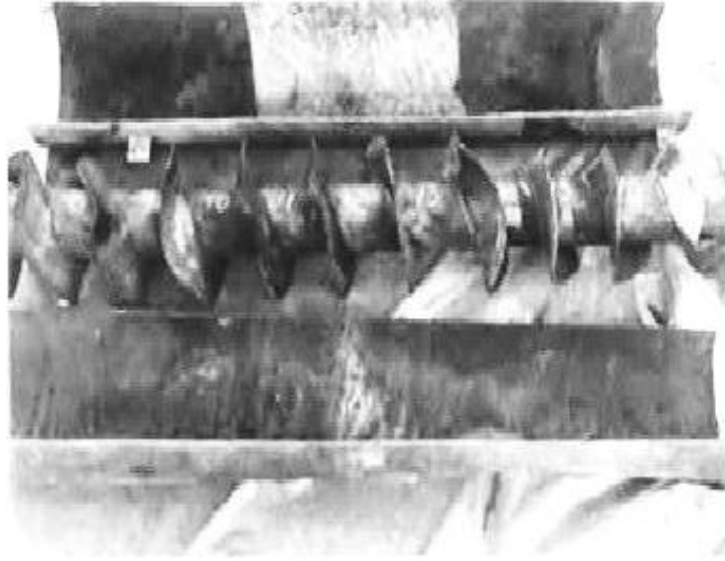


Şekil 5.1 : Alüminyum toz öğütücü birimi

Patlama çalışma saatleri içerisinde, 10 işçinin aynı binada bulunduğu sırada meydana gelmiştir. 5 işçi hayatını kaybetmiş, ikisi ağır yaralanmış diğer ikisi de hafif yaralanmıştır resimdeki ünite tamamen patlamış, tüm ekipman çevreye saçılmıştır (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 : Patlama sonrasında karıştırıcı ve ön karıştırıcı 12 metre ötede bulunan parçaları (Berg, 1989).



Şekil 5.3 : Patlama sonrası öğütücü dişleri (Berg, 1989)

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi, çift yönlü deformasyon konveyörün dişleri arasında görülmektedir. Kauçuk kaplama üst kısımdan tamamen ayrılmış durumdadır (Courtesy of E. Berg, 1973).

Bina tamamen kullanılamaz hale gelmiş, ünitenin parçaları 75 metre ötede bulunmuştur.

200 kg alüminyum, kükürt ve diğer çok ince metal tozları patlama esnasında statik elektrik yüklenmiştir.

Üst bölgesi silindirik, alt kısmı ise ters koni biçiminde olan ve besleme ünitesi alt kısımda, öğütücü kısım ise vida şekilli konveyör çevresinde kauçuk kaplı çelik silindirik boru içerisinde olan bir yapıdır. Çelik boru topraklıdır.

İşlem sırasında sistem azot ile hareketsiz hale getirilmiştir. Sağ ve sol üst köşede azot girişi diğerinde de oksijen sensörü bulunmaktadır. Sistemdeki oksijen sürekli analiz edilmektedir. Patlamanın olduğu anda göstergeler oksijen limitinin güvenli aralıkta olduğunu göstermektedir.

Patlama sonrası fotoğraflardan açıkça görüldüğü gibi mikser kısmı binadan 12 metre uzakta bulunmuştur. Patlama iki zıt yönde eşit şiddette meydana gelmiş olması çok önemli ipucu vermektedir. Patlama çelik borunun içinde konveyörün çevresinde meydana gelmiştir. Birincil patlamanın neticesinde, daha geniş bir

alandanda metal tozları ikincil patlamayı meydana getirmiş sonuç olarak tüm birim yerle bir olmuş vaziyettedir.

Daha ileri araştırmaların neticesinde Chr. Michelsen Institute, Bergen, Norway, açıkladığı gibi alüminyum toz bulutu çok hassas, kolay alevlenebilir ve aşırı derecede patlayıcı bir özellik göstermektedir. Örnekteki toz bulutunun MTE'si 1 mJ'dur. Deneysel olarak aynı ortamın hartmann küresi içerisinde tekrarı yapıldığında dP/dt değerinin 2600 bar/s olduğu görülmektedir. Tüm bu değerler olağan üstü patlamaya hassas bir durum oluşturmaktadır. Alüminyum tozlarının ortalama kalınlığı 0.1 µm ve buna karşılık yüzey alanı 7.5 m²/gr seviyesindedir.

İleri aşama teknik raporlardan anlaşıldığına göre azot hareketsiz sisteminin yetersiz olduğu, oksijen oranını %10'nun altına indiremediği görülmüştür. Azot besleme ünitesi ve oksijen detektörünün yapının üstünde olması da patlamaya neden olan diğer büyük hatalardan birisidir. Bu şekilde oksijen konsantrasyonu yanlış hesaplanmış alt kısım mikserde oksijen oranı tehlikeli sınırı aştığı halde detektör üstte olduğu için sistem oksijen oranını yanlış tespit etmiş ve patlama meydana gelmiştir.

Sonuç olarak patlamanın sebebi statik elektrik kaynaklı olduğu, büyük olasılıkla ilerleyen saçaklı deşarj neticesi yüksek yoğunluklu elektrik yükü kauçuk kaplama üzerinde birikmiş, çelik borunun topraklanması ilk bölümde açıkladığımız gibi yüksek elektrik alan yaratmış ve neticesinde patlamaya sebep olmuştur.

Çizelge 5.4 : Alüminyum toz öğütme birimi FMEA risk analizi tablosu

İşlem Aşaması	Hata ve Sebebi	O	S	D	RÖS	Düzeltilici Davranış	O	S	D	Düzeltilme Sonrası RÖS
Alüminyum Tozlarının Öğütülmesi	Yetersiz azot kaynağı	10	10	5	500	Azot kaynağının yenilenmesi ve yeterli seviyeye getirilmesi	1	10	5	50
	Sadece üst kısımda azot girişi olması, sistemin diğer alt bölümlerinde azot girişi olmaması	10	10	1	100	Kazanın orta ve alt bölümlerinde de azot gaz girişi olmalı	1	10	1	10
	Yetersiz oksijen detektörü	10	10	5	500	Oksijen detektörünün teknolojisinin yenilenmesi ve oksijen seviyesinin sık sık kontrolü	1	10	5	50
	Oksijen detektörünün yanlış konumlandırılması	10	10	1	500	Oksijen dedektörü sadece üst bölgede değil tüm kazanın içinde eşit olarak yerleştirilmeli	1	10	5	50
	Oksijen detektörün eksik sayıda olması	8	10	1	240	Oksijen dedektörü karşılıklı olarak en az 4 adet olmalı	1	10	4	40
	Yalıtkan kauçuk kaplama kullanılması	10	10	1	100	Yalıtkan kauçuk, yüksek oranda statik elektrik yükü barındırır. Ayrıca arkasında topraklı çelik yapının olması elektrik alanı ve potansiyeli çok büyük değerlere taşır.	1	10	1	10
	Bağıl nem ve sıcaklık detektörlerinin olmayışı	10	10	1	100	Bağıl nem ve sıcaklık belirttiğimiz gibi patlayabilirlikte çok önemli bir faktördür. Güvenli aralıkta kontrol altında tutulmalı.	1	10	1	10
	Patlama boşaltım panelinin olmayışı	10	10	1	100	Tasarımsal olarak yapılması şart bir gerekliliktir.	1	10	1	10
	Patlama bastırma basınç sensorlerinin olmayışı	10	10	1	100	Kazana çift taraflı yerleştirilen patlama basınç dedektörleri vasıtasıyla söndürücü sistemler güvenle kullanılmakta ve ikincil patlamaya ortam vermemektedir.	1	10	1	10
	Sisteme topraklanmamış hammadde tozu girişi	10	10	2	200	Alüminyum tozu taşıyan konveyörlerin topraklanmamış olması ve tozun boşaltımı sırasında ayrılma, sürtünme, gibi nedenlerle yüksek miktar statik elektrik biriktirmesi	2	10	2	40
	Sistemden topraklanmamış mamul toz çıkışı	10	10	2	200	Sistemden topraklanmamış yanıcı toz mamul çıkışı başka bölümlerde ayrıyeten yangın ve patlamalara sebep olması önlenir.	2	10	2	40
	Sisteme yabancı cisim girmesi nedeniyle mekanik kıvılcım oluşumu	10	10	1	100	Sistemin tüm bileşenlerinin özellikle küçük metal parçaların güvenilirliği sürekli kontrol edilmeli	2	10	2	40
	Temizlik ve bakım eksikliği	10	10	1	100	Tozların birikimi etkin toz emici, temizleyici sistemlerle bertaraf edilmelidir.	2	10	2	40

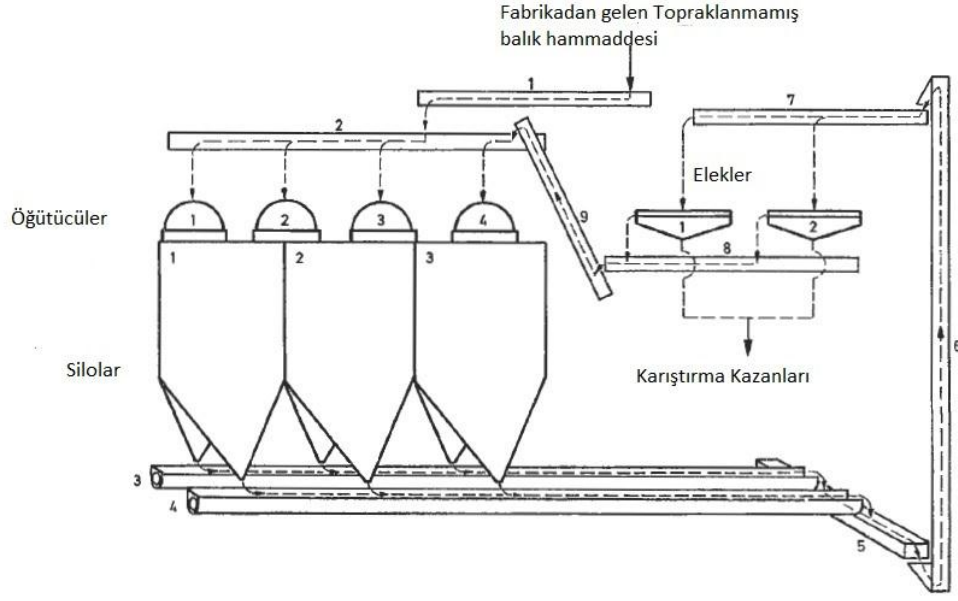
Çizelge 5.5 : Toplam RÖS değerlendirme

RÖS	
Düzeltilme öncesi toplam RÖS	2840
Düzeltilme sonrası toplam RÖS	400

FMEA risk analiz metodu kullanılarak Çizelge 5.4’de incelenmiştir. Sistemde oluşabilecek muhtemel hatalar tespit edilerek listelenmiş, çalışmalar çerçevesinde hataların ortaya çıkma olasılığı, şiddeti ve saptanabilirliği sayısal değerler atanarak derecelendirilmiştir. Bu değerlerin çarpılmasıyla oluşabilecek her bir hata için bir risk öncelik sayısı (RÖS) elde edilmiştir (Çizelge 5.5). Risklerin en aza indirilebilmesi ve RÖS’ün 50’nin altında değer alabilmesi için üretim sürecinde uygulanabilecek düzeltici önlemler belirlenmiştir. Öngörülen önlemlerin hayata geçirilmesinin ardından hata oluşmasını etkileyebilecek faktörler tekrar derecelendirilmiş ve yeni bir RÖS sayısı oluşturulmuştur. İşlem sürecindeki RÖS değerlerinin bir araya getirilmesiyle bir “toplam RÖS” değeri hesaplanmış bu değer sistemde önlem alınmadan önceki ve sonraki risk düzeyinin karşılaştırılmasında kullanılmıştır. FMEA uygulamasının toplam RÖS değerini %86’nın üzerinde düşürebileceği saptanmıştır.

5.2. Balık Konserve Fabrikası patlaması (Norveç, 1975)

1975 yılında, sıcak ve kuru bir Ağustos gününde, Norveç’in batı kıyısında bulunan birçok balık işleme tesisinin bulunduğu bölgede patlama meydana geldi. Bir işçi hayatını kaybederken, bir diğeri ağır yaralanmıştır. Bu olayın olduğu tarihlerde Norveç’te toz patlama risklerine karşı alınması gereken önlemler yetersizlikle karşı karşıyaydı. Toz patlamalarına karşı bilinçlenme ve eğitim eksiklikleri mevcut idi. Şekil 5.4’de görüldüğü üzere, patlama balık öğütme ünitesinde meydana gelmiştir.



Şekil 5.4 : Balık işleme fabrikası, Norveç Balık işleme fabrikası yanıcı toz patlaması (Eckhoff, 2003).

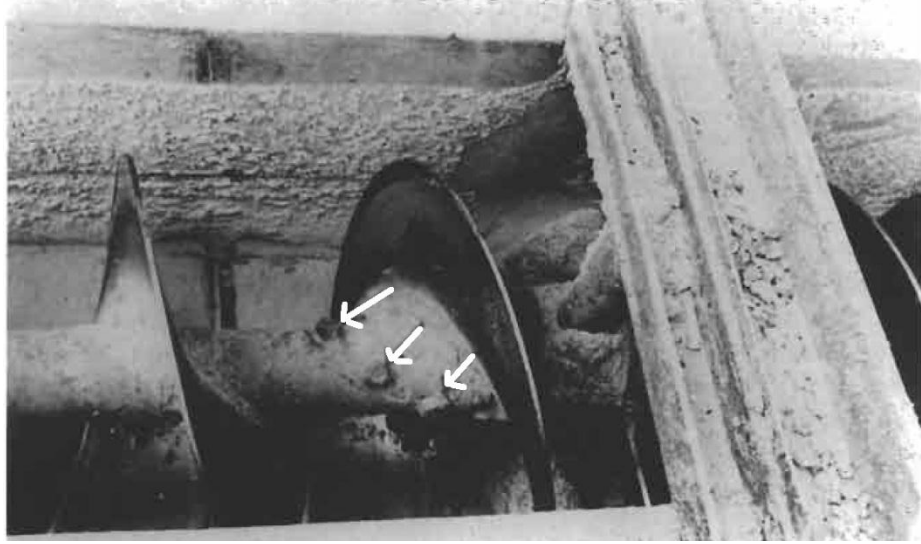
30 m yüksekliğinde silolardan oluşan, geniş karıştırma birimleridir. Yan yana bulunan 3 silo patlamanın gelişiminde önemli bir rol üstlenmiştir. Patlama 12 m yüksekliğinde 3 metre yarıçapında, silolar arasında 0,1x1 m'lik açıklık bulunmaktadır. Silo 1 ile silo 2 ve silo 3 arasında ki duvarlar ortaktır. Siloların amacı gece vardiyası sırasında üretilen ürünlerin depolanması, elekten geçirilmesi ve gündüz vardiyasından zaman kazanmaktır.

Ürün boşaltma hunisi düzgün bir şekilde yerleştirilmemiştir. Neticesinde konveyörler vasıtasıyla boşaltma hunilerine akış problem oluşmuş, siloların buffer depolama özelliği kalmamış, öğütücüden doğrudan eleklerle gelmesi yerine uzun dönel konveyörler ile silolar kullanılmış, konveyörlerin büyük kapasitesi nedeniyle silolar genellikle boş kalmış, siloların içerisinde akış tıkanıklığı nedeniyle, işçiler tarafından sık sık müdahale edilmek zorunda kalmıştır. Buna rağmen huni çıkışındaki tıkanıklık giderilememiştir.

Balık öğütücünün işlemi sırasında oluşan, büyük miktarda ince toz hiç bir şekilde vakum temizleyici ortamla temizlenmemiş, neticesinde 3 siloda da iç duvarlarında toz birikimi meydana gelmiştir. Buradan arta kalan diğer birimlere de toz ulaşmış durumdadır.

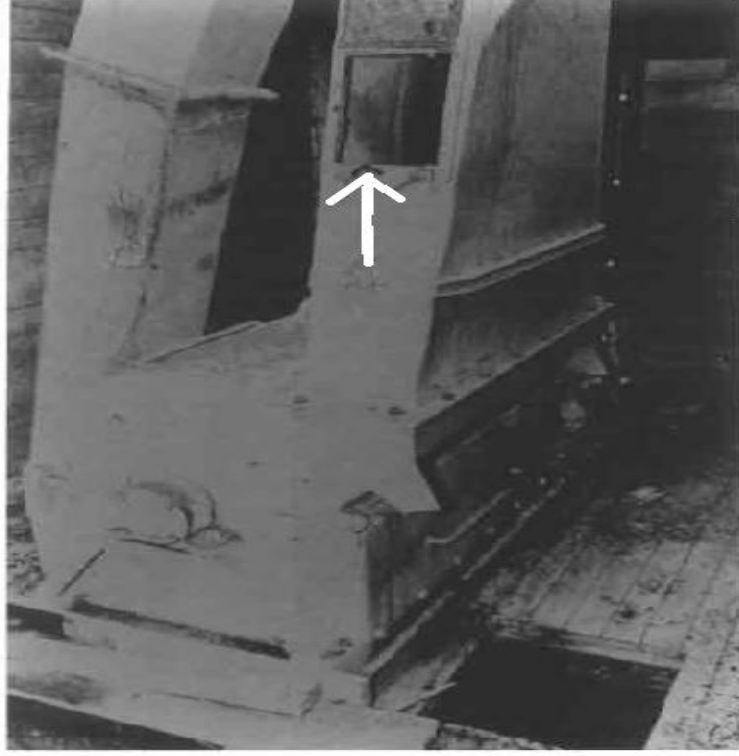
Patlamanın olduğu gün, ortam sıcak ve kuru hava ile ve tozlarda kuru bir vaziyettedir. Silonun üst çatı kısmında sıcaklık 25-30°C arasındadır. Fakat patlamanın olduğu gün, öğle saatlerinde sıcaklık 45°C ölçülmüştür. Burada oluşan fazladan ısı, proses neticesi oluşan ısıdır.

Vidalı konveyörlerde, cıvata ile döner kısmın şafta bağlanması sağlanır. Bu cıvataların sık sık yerinden çıkması ve kazan içine düşmesiyle birlikte, yüksek gürültü oluşturur. Bu üzerine işçiler sık sık, besleyici üniteyi açarak yabancı cisimleri, cıvataları alırlar.



Şekil 5.5 : Ünite içindeki yabancı cisimler (Eckhoff, 2003).

Şekil 5.5’de oklarla gösterilen cıvata başları sistemin hata vermesine çoğu zaman işlemin durmasına yol açmaktadır bu yabancı cisimler öğütücü kısma gelmeden temizleme işlemi yapılmamış, bu hatalar oluşmadan önce önleme risklere karşı proaktif yaklaşım gösterilmemiştir.



Şekil 5.6 : 1 nolu silo boşaltım çıkışı (Eckhoff, 2003).

Şekil 5.6'da görüldüğü üzere, yerde görülen boşluk 1 no'lu silo için acil patlama boşaltım çıkışıdır.

Öğütücü kısımdaki cıvatanın çıkardığı yüksek gürültü nedeniyle görevli kişi resimde okla gösterilen kapağı açıp, yabancı cismin kapağa ulaşmasını bekledikten sonra temizlenir.

Olayın olduğu gece, görevli yabancı cisim olduğunu anlayıp önce 2 ve 4 no'lu öğütücülerden cıvataları temizlemiş, fakat gürültünün kesilmemesi üzerine 1 no'lu öğütücüye gitmiş resimde görülen kapağı açtığı anda kıvılcım demetiyle birlikte alev topunun çıkışı gözlenmiştir.

Bir olmuş, alevler çatıya doğru yükselmiştir. Birincil patlamadan sonra alevler 1 no'lu silodan 4 no'lu siloya ulaşmıştır. Çalışanların ifadesine göre 30-45 saniye içerisinde alevler çatıdan 4-5 metre yukarıya ulaşmış ve patlamanın şiddeti binayı havaya uçurmaya yetmiştir.

Çalışanların ifadelerinden anlaşıldığı kadarıyla 1 no'lu öğütücüde, yabancı metal cisim nedeniyle kıvılcım oluşmuş ve birincil patlama ve alev topu meydana

gelmiştir. Ayrıca vidalı konveyörün dönüş hızı 25 devir/s olması metal aksamın sıcaklığını arttıran bir diğer etkidir.

Bu olayla birlikte deniz ürünlerinin tozları da yanıcı ve patlayıcı özellik gösterebilmektedir. Bu olayda temizlik ve bakım hizmetlerinin çok yetersiz olması, derli toplu olmayan çalışma ortamı patlamaya yardımcı diğer yan etmenler arasında söylenebilir. Ünite içerisinde ve binada biriken ince yanıcı toz ikincil patlamanın sebebidir.

Kuru havanın etkisiyle toz parçacıkları daha hızlı ve etkili yayılmakta ve buna yetersiz eksik fabrika tasarımı eklendiğinde çok ürkütücü bir sonuç çıkmaktadır. Öğütücülerin altındaki büyük silolar patlamaya hazır toz bombalarını barındırmaktadır.

Potansiyel tutuşturucu kıvılcım kaynaklarını önleme ve tolere edilebilir sınırlar içinde tutma bilgisi ve becerisi bu örnekte görülmemektedir.

Burada toz patlamasını meydana getiren 3 önemli faktörü söyleyecek olursak;

(i) Büyük kapalı boş alan

(ii) Büyük miktarda toz

(iii) Kıvılcım kaynağı

5.3. FMEA Risk Analizi

FMEA uygulamasının (Çizelge 5.6) toplam RÖS değerini % 87'in üzerinde düşürebileceği saptanmıştır (Çizelge 5.7).

Çizelge 5.6: Balık konserve fabrikası FMEA risk analizi

İşlem aşaması	Hata ve sebebi	O	S	D	RÖS	Düzeltilici davranış	O	S	D	Düzeltilme sonrası RÖS
Deniz Ürünlerinin İşlenmesi	Sisteme topraklanmamış hammadde Girişi	5	10	5	250	Hammadde taşıyan konveyörlerin topraklanmamış olması ve tozun boşaltımı sırasında ayrılma ,sürtünme ,gibi nedenlerle yüksek miktar statik elektrik birikimi oluşabilir, NPFA atandardlarına göre topraklama gerçekleştirilir	1	10	5	50
	Toz emici,hava temizleyici sistemin olmaması	10	10	1	100	Tozun silo içinde ve bina içersinde birikmesi büyük patlama riski yaratır. Öncelikli olarak ele alınıp önlenmesi gerekir	1	10	1	10
	Termal dedektörün olmaması	10	10	5	500	Termal dedektörler yeterli sayıda ve karşılıklı olarak farklı konumlarda silo içine yerleştirilir. Çalışması düzenli aralıklarla kontrol edilir	1	10	5	50
	Vidalı konveyörün dönüş hızının yüksek olması	10	10	1	500	Mekanik sistem yenilenerek 10 devir /saniye dönüş hızına çevrilir	1	10	5	50
	Bağıl nem dedektörü olmaması	8	10	1	240	Yeterli sayıda ve karşılıklı olarak farklı konumlarda silo içine yerleştirilir	1	10	4	40
	Patlama bastırıcı sistem olmaması	10	10	1	100	Yalıtkan kauçuk, yüksek oranda statik elektrik yükü barındırır. Ayrıca arkasında topraklı çelik yapının olması elektrik alanı ve potansiyeli çok büyük değerlere taşır.	1	10	1	10
	Sistemin düzgün topraklanmaması	10	10	1	100	Patlayabilirlikte çok önemli bir faktördür. Topraklamanın standartlara uygunluğu mutlaka kontrol edilmelidir.	1	10	1	10
	Bina içi temizlik ve bakım eksikliği	10	10	1	100	Ünite dışında ve içinde toz birikimine izin verilmemelidir.	1	10	1	10
	Gereksiz uzunlukta konveyörlerle hammadde taşınması	10	10	1	100	Hammaddenin fazladan statik yüklenmesi önlenir	1	10	1	10
	Sistemden topraklanmamış mamül tozu çıkışı	10	10	2	200	Sistemden topraklanmamış yanıcı toz mamul çıkışı başka birimlerde ayrıca yangın ve patlamalara sebep olması önlenir.	2	10	2	40
Yabancı cisimlerin sisteme girmesi	10	10	4	400	Hareketli sistemin tüm metal bileşenleri tek tek kontrol edilip kopması veya içeriye düşmesi önlenir.	2	10	2	40	

Çizelge 5.7 : Toplam RÖS değeri ve yorumu

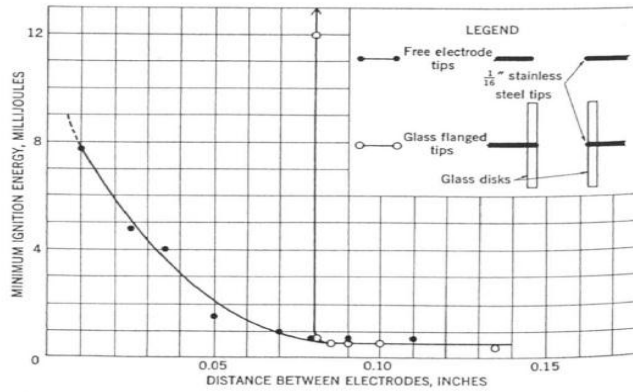
RÖS	
Düzeltilme öncesi RÖS	2640
Düzeltilme sonrası RÖS	320

6. TOZ PATLAMALARI ÜZERİNE DENEYSEL ARAŞTIRMA

Amaç: Bu çalışmada ince parçacık yapısına sahip 3 değişik toz maddenin tutuşabilirlik ve patlama mekanizması 3 temel faktörün (ısı, nem, oksijen) birbirleriyle olan etkileşimi temelinde araştırılmış, gözlemlenmiş ve sonuçlar tablo haline getirilmiştir. Bu şekilde toz maddelerin yangın ve patlama tehlike eşik aralığının tespiti endüstriyel anlamda iş hijyeni ve güvenliğinin artırılması hedeflenmiştir.

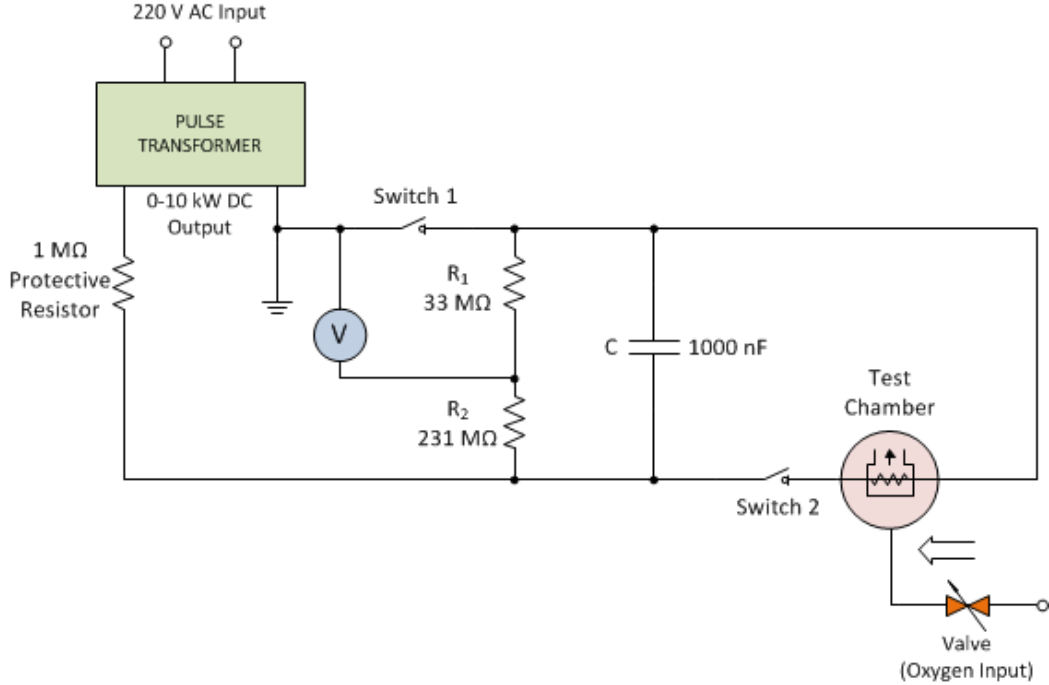
6.1. Temel parametreler

Sönümlenme mesafesi, iki yüzey arasında bulunan, gaz veya hibrit karışım içinde, düzlemsel kıvılcım oluşumuna izin veren, en kısa mesafedir. Buradaki mesafe genellikle elektrotlar arasındaki minimum enerji için optimal kıvılcım oluşumuna izin veren en kısa uzaklıktır. Bu mesafe ayrıca elektrotlardan kaybedilen enerjinin minimum değeridir. Sönümlenme mesafesi MTE'nin tespitinde çok önemli bir parametredir. MTE ve elektrotlar arası sönümlenme mesafesi ortam nem ve sıcaklığı ayrıca basınç değerleri ile ters orantılı olarak değişir. MTE değeri numunenin en yanıcı konsantrasyonda olduğu durumda elde edilir. Elektrotlar arası sönümlenme mesafesi propan-hava karışımı için %5, 1 atm'da 1.8 mm değerindedir (Şekil 6.1) (Lewis & von Elbe, 1961). Ek olarak, Elektrotlar arası kıvılcım aralığı elektrotların şekline ve büyüklüğüne bağlı değildir (Babrauskas, 2003).



Şekil 6.1 : Propan için MTE – Optimum elektrot aralığı mesafesi grafiği ,Lewis and von Elbe (1961)

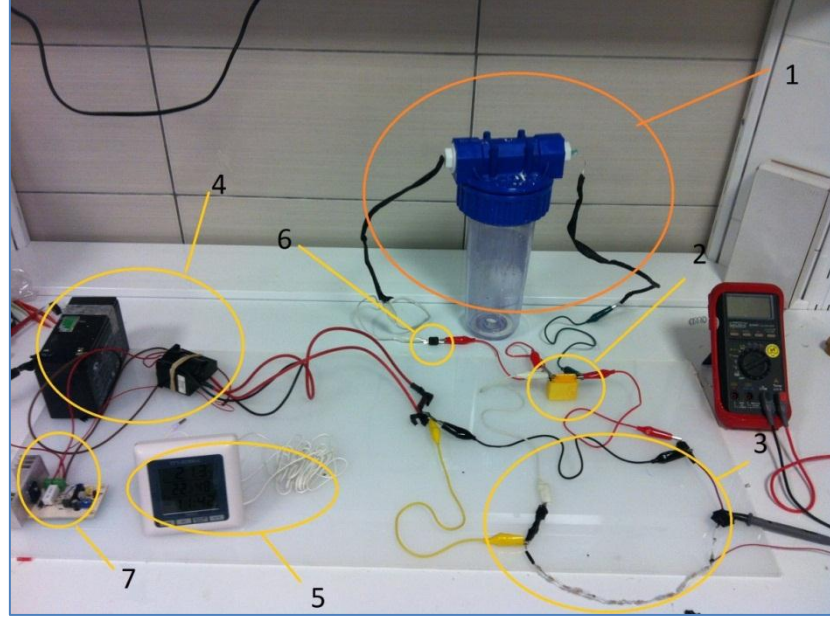
6.2. Deney Ekipmanı ve Kullanılan Metotlar



Şekil 6.2 : Deney Şeması

Yüksek voltaj, potansiyel bölücü vasıtası ile voltmetre değerlerine indirilerek okunmuştur.(Sekil A.9.2) R1 değeri 33 MΩ R2 değeri 231 MΩ olarak alınmıştır. Netice olarak kondansatör gerilimi: $R_1 / (R_1 + R_2)$ formülü yardımıyla hesap edilerek $33 / (33 + 231)$ yüksek gerilim değerleri 4 kV ile 6 kV arasında ölçülebilmıştır. İkinci aşamada anahtar açılarak aynı zamanda switch2 kapatılarak kondansatörün deney tüpü içerisine deşarjı sağlanmıştır. Burada sisteme verilen enerji miktarı $E = 1/2 C (V_0 - V_1)^2$ formülü (yardımıyla hesaplanmıştır. V_0 Başlangıç kapasitör gerilimi, V_1 ise deşarj sonrası gerilim voltaj değeridir ASTM (2007).

Şekil 6.2’de görülen devrede yüksek gerilim koruyucu direnç üzerinden kapasitöre, daha sonra iletken tungsten tel aracılığıyla elektrotlara deşarjı sağlanmıştır. Yüksek değere sahip kapasitörler nedeniyle gecikme zamanı sıklıkla tekrar ettiği gözlenmiştir. Kapasitör ve voltmetre paralel bağlanarak, voltaj depolanması amaçlanmıştır (Şekil 6.3). Deneyde kullanılan kapasitör 1000 nF 6 kV değere sahip kapasitördür.



Şekil 6.3 : Deney seti

- 1: Patlama kabı
- 2: Kondansatör
- 3: Potansiyel bölücü devre
- 4: Doğru akım yüksek gerilim trafosu
- 5: Probu sıcaklık ve nemölçer
- 6: Anahtar
- 7: Trafo tetikleyici

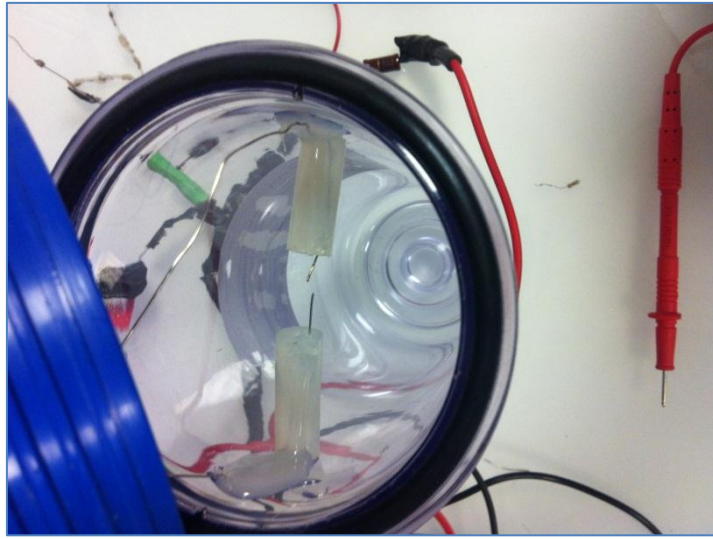
Patlama kabı 2 dm^3 hacimli ani sıcaklık ve basınç artışına dayanıklı yapıya, 6 atm basınçta acil basınç izale kapağına sahip yapıdadır. Deney kabına ulaşan tungsten tel plastik ile kaplanmış bu sayede ortamdaki yalıtılmıştır. Kondansatör: 1000 nF 6 kV kapasitede kıvılcım sağlayıcıdır.

Potansiyel bölücü devre, tamamı yalıtkan silikon ile kaplanmış ve bu sayede devre üzerinde, yüksek gerilim atlamaları aynı zamanda kıvılcım kaçakları önlenmiştir, 33 M Ω direncin uçları arasında direkt olarak voltmetreye bağlı olarak üzerindeki gerilimin 8 katı alınıp, kondansatör üzerindeki toplam gerilim değerine ulaşılmıştır.

Anahtar, kapasitör üzerinde biriken enerjiyi deney kabına aktarma amaçlı kullanılmıştır. Trafo yardımıyla 12V D.C gerilim 6 kV seviyelerine kadar çıkarılmıştır.

Trafo tetikleyici üzerindeki entegre yardımıyla sürücü olarak trafoya bağlanmış gerilim değerinin 10 kV seviyesine çıkarmıştır.

Sıcaklık ve nemölçer dijital olarak deney kabının sıcaklık ve nem değerini veren donanımdır.



Şekil 6.4 : Deney kabı

Şekil 6.4’de görülen ve deneyde kullanılan patlama kabının üst resmidir. 2 adet 1.6 mm tungsten elektrot, silikon flanşlı olarak kullanılmıştır. Elektrotlar arası optimum uzaklığın tespiti (Şekil 6.4) için elektrotların bir tarafı sabit diğer tarafı hareketli olacak şekilde tasarlanmıştır. Silikon flanşların çapı 15 mm’dir.



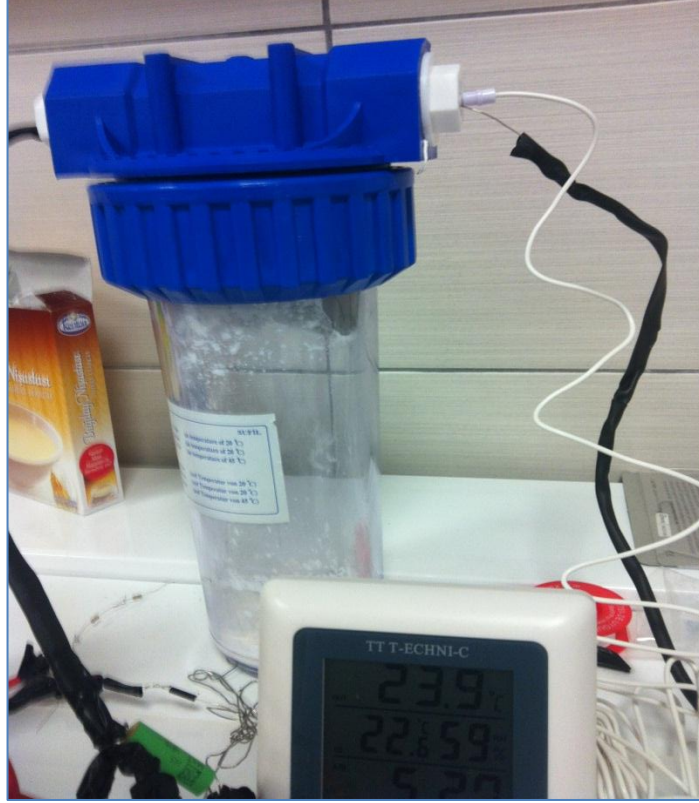
Şekil 6.5 : Elektrotlar arası optimum uzaklık tespiti.

Elektrotlar arası hassas uzaklık tespitinde sürmeli kompas kullanılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.6: Sistemin oksijen yoğunluğu tespiti

Sistemin oksijen yoğunluğu tespiti amacıyla ortamın oksijeni yanma reaksiyonuyla tamamen yok edildikten sonra Şekil 6.6'da görüldüğü gibi saf oksijen ortama verilmiştir.



Şekil 6.7 : Sistemdeki bağlı nem ve sıcaklık ölçümü

Deney ortamının sıcaklık ve nem ölçümü (Şekil 6.7) dijital olarak kaydedilmiş ve veriler grafiğe dökülmüştür.

Kuru toz örnekleri hazırlama amacıyla 50 °C de tamamen vakum ortamda toz numunesi iki saat bekletilmiş hemen akabinde deney kabına valf yardımıyla enjekte edildikten sonra, toz parçacıklarının, türbülans durumundan denge durumuna ulaşması beklenmiş, ve akabinde başlangıç nem değeri alınmıştır.

Elektrotlar arası optimum uzaklık için oksijen, sıcaklık, nem, yoğunluk değeri sabit tutulmuştur. Bu deney için mısır nişastası yoğunluğu 105 gr/m³, pudra şekeri 95 gr/m³, buğday nişastası içinde 95 gr/m³ yoğunluk değeri alınmıştır.

Türbülans kaynaklı olarak tüm deney boyunca tüm parametreler aynı kalsa dahi voltaj değerlerinde küçük sapmalar meydana geldiği, aynı voltaj değerinin üst üste iki defa elde edilemediği görülmüştür.

Tüm deney boyunca endüstriyel kaynaklı toz patlamalarının oluşum ortamı replikası oluşturulmaya çalışılmış, beş temel patlama parametresinden birisinde karışım olması gerekliliği göz ardı edilmemiştir.

Teorik ve deneysel veriler arasındaki fark irdelendiğinde, sistemde ısı kaybı iki şekilde meydana gelmekte olduğu görülmektedir. Bunlar:

- Radyasyon
- Temas

ile meydana gelmiş olduğu, bu etkinin basınç ve tutuşma olasılığını düşüren bir etki yarattığı görülmektedir. Radyasyon yoluyla ısı kaybı yaklaşık %15 seviyelerinde deneysel verilerin teorik verilerden farklı çıkmasına yol açmıştır. Flanşların ısıyı emme özelliği özelliği en yakın mesafede en yüksek kıvılcım enerjisi değerine ulaşmamızı sağladığı, grafik ve tablo değerlerinden anlaşılmaktadır.

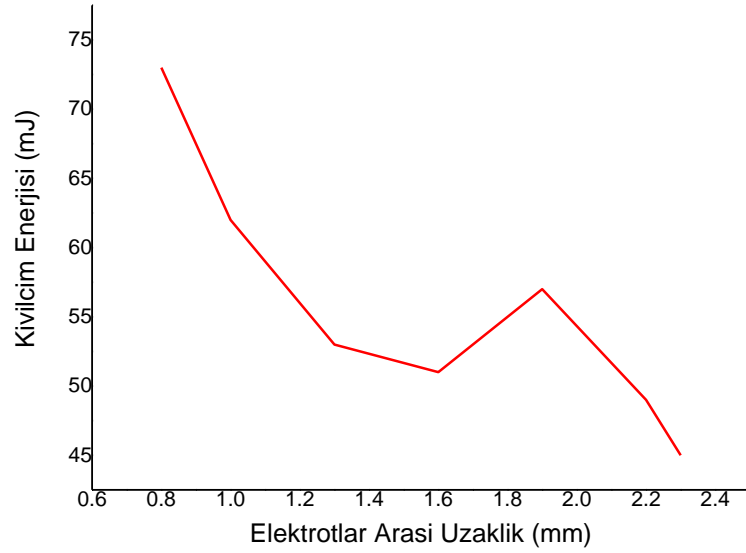
6.3. Mısır Nişastası Deneyi

6.3.1. Mısır Nişastası İçin MTE –Optimum Elektrotlararası Mesafe Değeri Tespiti

Çizelge 6.1’de tablo değerleri yardımıyla elektrotlar arası optimum uzaklığın eşik değeri olarak 2.3 mm olduğu görülmektedir. Bu deney süresince laboratuvar koşulları sıcaklık değeri yaklaşık olarak 19°C ile 21°C arasında ölçülmüş, oksijen oranı, konsantrasyon, nem miktarı sabit tutulmuş, bunun dışındaki tüm etmenlerin sonuca etkisi olmadığı kabul edilmiştir.

Çizelge 6.1 : Mısır nişastası için MTE –optimum elektrotlar arası mesafe değeri tablosu

V_0 (kV)	V_1 (kV)	C(mF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu(1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Elektrotlar arası Aralık (mm)
4.856	4.556	1000	1	45	2.3
6.088	5.774		0	49	2.2
5.984	5.646		0	57	1.9
5.376	5.056		1	51	1.6
5.608	5.282		1	53	1.3
6.554	6.201		1	62	1.0
4.688	4.305		0	73	0.8



Şekil 6.8 : Mısır nişastası için elektrotlar arası optimum uzaklık grafiği

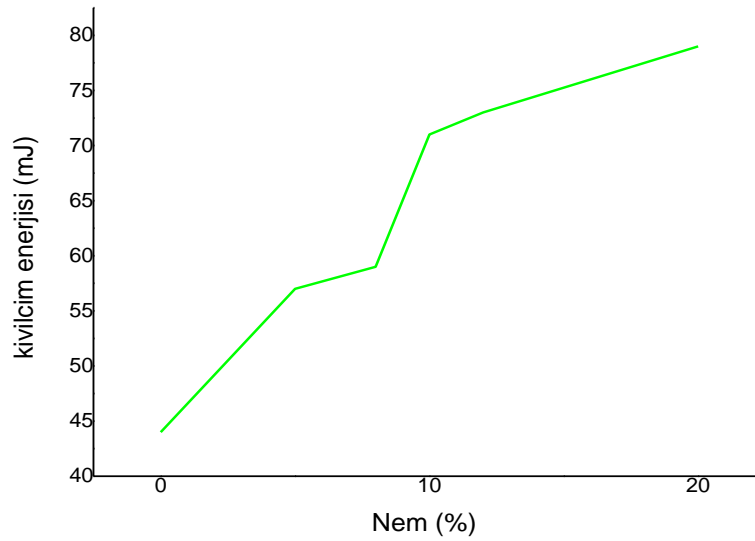
Şekil 6.8 üzerinde elde edilen sonuç (2.3 mm), Lewis & von (Elbe, 1961) deneysel sonuçlarıyla paralellik gösterdiği açıkça görülmektedir.

6.3.2. Mısır Nişastası İçin MTE – Bağlı nem Tablosu

Çizelge 6.2’de kıvılcım enerjisinin nem miktarının artışı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bu sonuç van Laar ve Zeeuwen (1985) deneysel sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.

Çizelge 6.2 : Mısır nişastası için MTE-bağlı nem tablosu

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Bağlı Nem (%)
5.520	5.223	1000	1	44	0
6.440	6.102		0	57	5
6.565	6.221		0	59	8
5.984	5.607		0	71	10
7.408	7.025		0	73	12
6.552	6.154		0	79	20



Şekil 6.9 : Mısır nişastası için bağlı nem grafiği

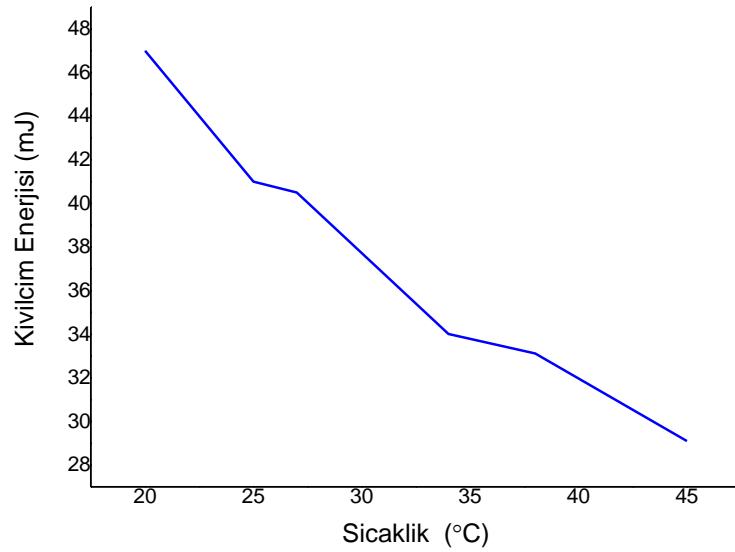
Şekil 6.9’deki grafik değerleri incelendiğinde %5 ile %8 arasında kıvılcım enerjisi değeri üzerinde hemen hemen hiç ölçülebilir bir etki yapamadığı görülmektedir. Mısır nişastası için elde edilen değerlerin bağlı olarak pudra şekeri ve buğday nişastasından daha yüksek olduğu görülmektedir.

6.3.3. Mısır Nişastası İçin MTE- Sıcaklık Deneyi

Şekil 6.10 incelediğinde, Wiemann (1987) ve Glarner (1983) ile benzer karakterde eğri elde edildiği anlaşılmaktadır. Kıvılcım enerjisi değerinin 25°C ile 35°C arasında en sert düşüşe geçtiği görülmektedir.

Çizelge 6.3 : Mısır nişastası için kıvılcım enerjisi-sıcaklık tablosu

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Sıcaklık (Celcius)
5.135	4.828	1000	1	47	20
4.888	4.162		0	41	25
4.528	4.412		0	40.5	27
4.392	3.848		0	34.01	34
5.216	4.958		1	33.12	38
4.808	2.812		1	29.1	45

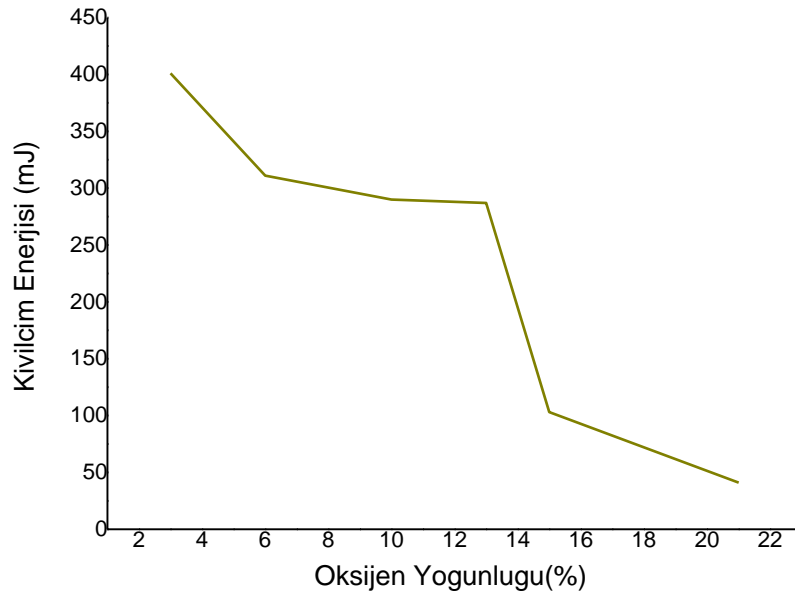


Şekil 6.10 : Mısır nişastası için MTE –ortam sıcaklığı grafiği

6.3.4. Mısır Nişastası İçin Oksijen Yoğunluğu Deneyi

Çizelge 6.4 : Mısır nişastası için kıvılcım enerjisi-oksijen yoğunluğu tablosu

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Oksijen (%)
5.176	4.282	1000	1	401	3
4.952	4.163		1	311	6
5.032	4.270		0	290	10
4.944	4.186		0	287	13
4.088	3.634		0	103	15
4.232	3.945		1	41	21



Şekil 6.11 : Mısır nişastası için kıvılcım enerjisi oksijen yoğunluğu grafiği

Şekil 6.11'in verileri incelendiğinde, oksijen miktarıyla kıvılcım enerjisinin ters orantılı olarak değiştiği, oksijen yoğunluğu %12 ile %15 arasında kıvılcım enerjisinin çok hızlı düştüğü anlaşılmaktadır.

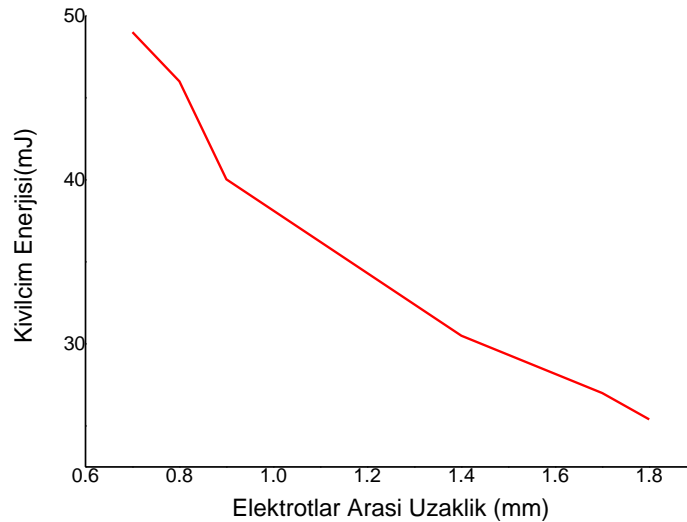
6.4. Buğday Nişastası Deneyi

6.4.1. Buğday Nişastası İçin MTE – Elektrot Aralığı Deneyi

Çizelge 6.5’de tablo değerleri yardımıyla elektrotlar arası optimum uzaklığın eşik değeri olarak 1.7 mm olduğu görülmektedir. Bu deney süresince laboratuvar koşulları sıcaklık değeri yaklaşık olarak 20°C-21°C ölçülmüş, oksijen oranı, konsantrasyon, nem miktarı sabit tutulmuş, bunun dışındaki tüm etmenlerin sonuca etkisi olmadığı kabul edilmiştir.

Çizelge 6.5 : Buğday nişastası için MTE-elektrotlara arası optimum uzaklık tablosu

V_0 (kV)	V_1 (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Elektrotlar Arası Uzaklık (mm)
4.672	4.448	1000	1	25	1.7
4.292	4.066		0	25.4	1.8
4.432	4.185		0	30.5	1.4
5.188	4.905		1	40.03	0.9
6.175	5.871		1	46	0.7
5.265	4.964		1	45.1	0.8



Şekil 6.12 : Buğday nişastası için kıvılcım enerjisi-optimum elektrot mesafesi grafiği

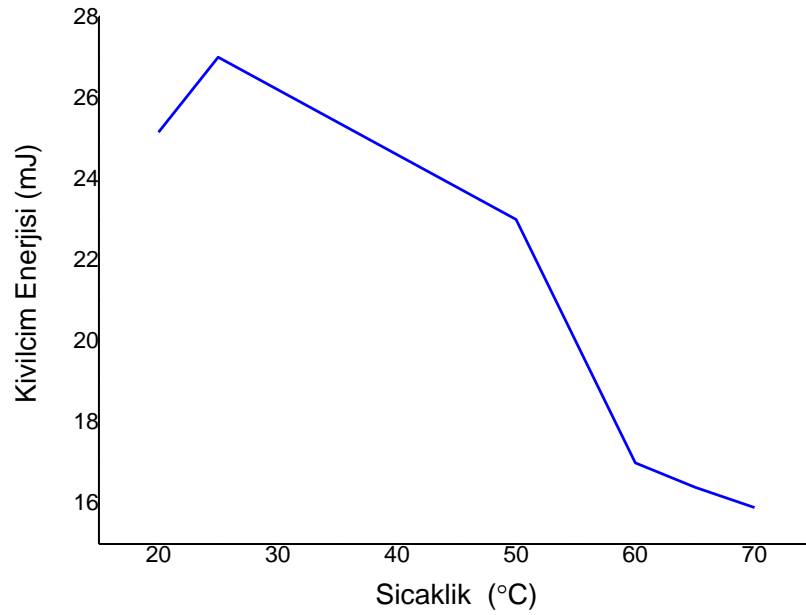
Şekil 6.12 grafik eğri karakteri incelediğinde (Lewis & von Elbe, 1961) ile uyumlu sonuç verdiği görülmektedir.

6.4.2. Buğday Nişastası İçin MTE-Sıcaklık Deneyi

Şekil 6.13 incelediğinde, Wiemann (1987) ve Glarner (1983) ile benzer karakterde eğri elde edildiği anlaşılmaktadır. Kıvılcım enerjisi değerinin 25°C ile 60°C arasında en sert düşüşe geçtiği görülmektedir.

Çizelge 6.6 : Buğday nişastası için MTE-sıcaklık tablosu

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Sıcaklık (Celcius)
4.088	3.004	1000	0	25.15	20
4.704	2.636		0	27	25
4.352	4.137		1	23	50
3.896	3.711		1	17	60
3.968	3.786		0	16.4	65
4.232	4.053		1	15.9	70



Şekil 6.13 : Buğday nişastası için MTE-sıcaklık grafiği

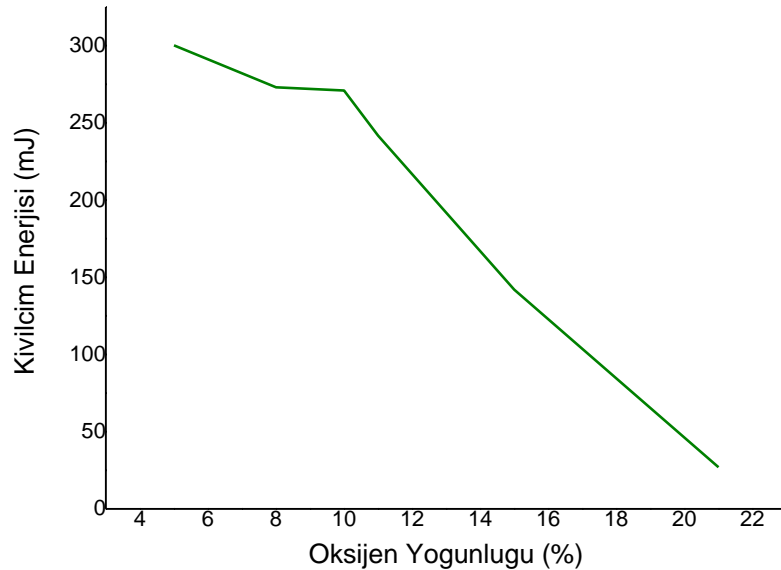
6.4.3. Buğday Nişastası İçin MTE –Oksijen Yüzdesi Deneyi

Çizelge 6.7 değerleri incelendiğinde, en fazla tutuşma durumunun %15 ile %21 oksijen yoğunluğu arasında olduğu görülmektedir.

Şekil 6.14'ün verileri incelendiğinde, oksijen miktarıyla kıvılcım enerjisinin ters orantılı olarak değiştiği, oksijen yoğunluğu %10 ile %20 arasında kıvılcım enerjisinin çok hızlı düştüğü anlaşılmaktadır.

Çizelge 6.7 : Buğday nişastası için kıvılcım enerjisi-oksijen yüzdesi

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma/ Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Oksijen (%)
4.608	4.060	1000	0	300.2	5
4.312	3.573		1	273	8
4.176	3.439		0	270.9	10
4.120	3.424		0	241.7	11
4.200	3.667		1	142	15
4.280	4.095		1	27	21



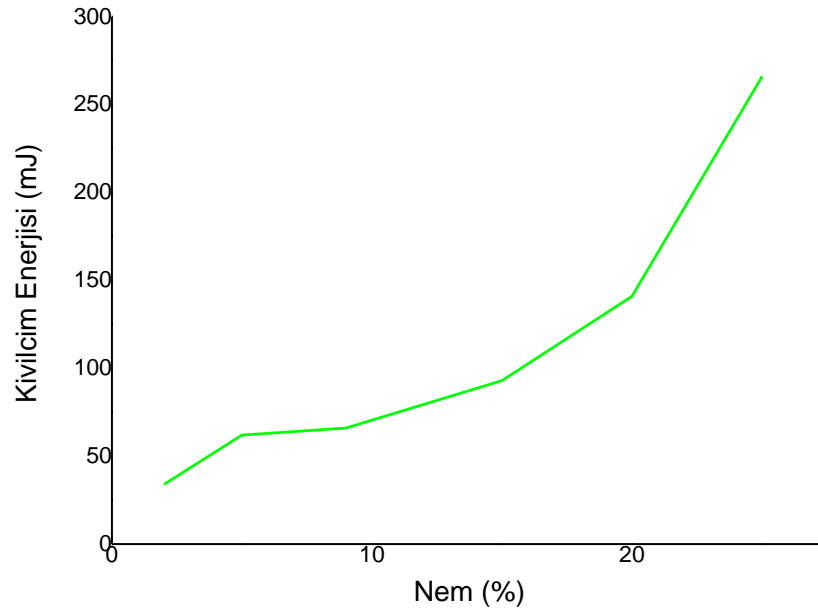
Şekil 6.14 : Buğday nişastası için MTE-oksijen yüzdesi grafiği

6.4.4. Buğday Nişastası İçin Kıvılcım Enerjisi-Bağlı Nem Deneyi

Buğday nişastası için bağıl nem değeri %20 ile %25 arasında çok hızlı artış gösterdiği, %5 ile %9 değerleri arasında kayda değer bir farkın olmadığı görülmektedir.

Çizelge 6.8 : Buğday nişastası için bağıl nem yüzdesi

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutusma /- Tutusmama (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Nem (%)
4.536	4.273	1000	0	34	2
4.208	3.855		0	62	5
4.616	4.252		0	66	9
3.888	3.456		1	93	15
3.968	3.436		1	141	20
3.688	2.958		1	266	25



Şekil 6.15 : Buğday nişastası için MTE-bağılı nem grafiği

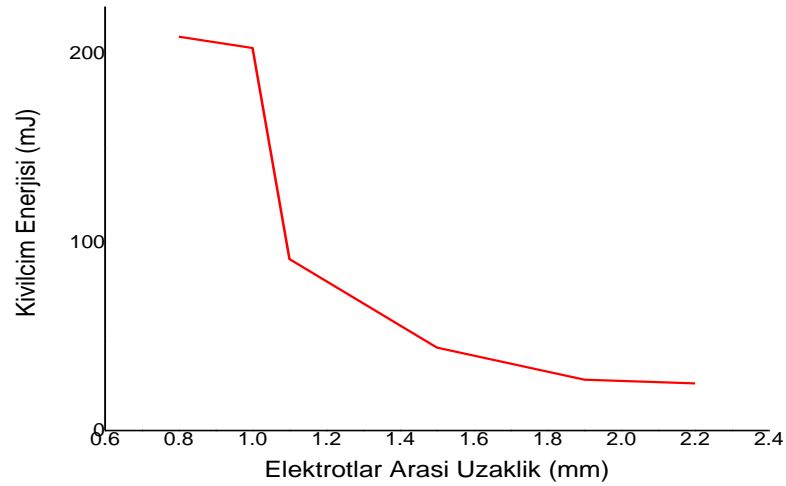
6.5. Pudra Şekeri Deneyi

6.5.1. Pudra Şekeri İçin MTE-Optimum Elektrot Aralığı Deneyi

Çizelge 6.9'da tablo değerleri yardımıyla elektrotlar arası optimum uzaklığın eşik değeri olarak 2.2 mm olduğu görülmektedir. Bu deney süresince laboratuvar koşulları sıcaklık değeri, yaklaşık olarak 19°C ile 21 °C ölçülmüş, oksijen oranı, konsantrasyon, nem miktarı sabit tutulmuş, bunun dışındaki tüm etmenlerin sonuca etkisi olmadığı kabul edilmiştir.

Çizelge 6.9 : Pudra şekeri için kıvılcım enerjisi-elektrot aralığı tablosu

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Elektrotlar Arası Uzaklık (mm)
4.616	4.392	1000	0	25.01	2.2
3.784	3.551		0	27	1.9
3.776	3.479		1	44	1.5
3.888	3.461		1	91	1.1
3.728	3.090		0	203	1
3.552	2.905		0	209	0.8



Şekil 6.16 : Pudra şekeri için MTE-elektrotlar arası uzaklık grafiği.

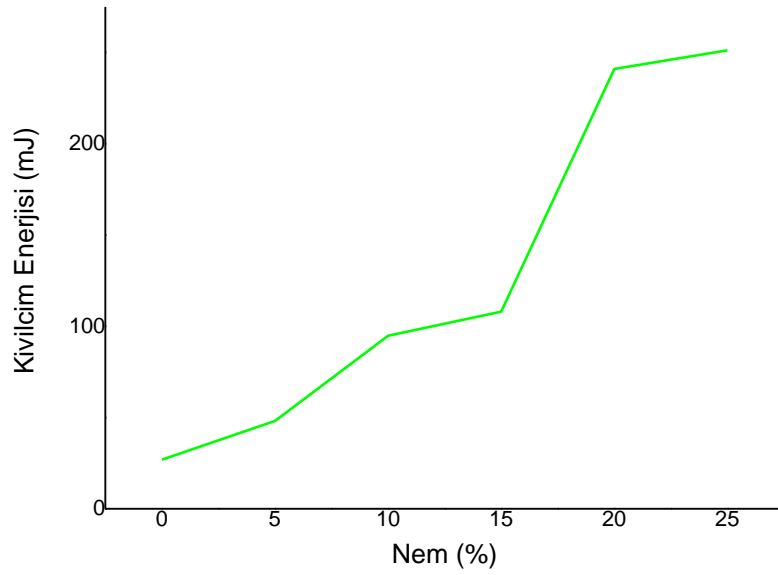
Şekil 6.16 grafiğinin eşik değeri 2.2 mm değeri Lewis von elbe (1961) ile uyumlu sonuç vermiştir. Ayrıca grafik değerinin 0.8 mm ile 1.1 mm arasında çok sert bir düşüş yaşadığı görülmektedir.

6.5.2. Pudra Şekeri için MTE –Bağlı Nem ilişkisi deneyi

Çizelge 6.10 kıvılcım enerjisinin nem miktarının artışı ile birlikte arttığı görülmektedir. Bu sonuç van Laar ve Zeeuwen (1985) deneysel sonuçlarıyla paralellik göstermektedir.

Çizelge 6.10 : Pudra şekeri için MTE-bağlı nem tablosu

V_0 (kV)	V_1 (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Bağlı Nem (%)
4.376	4.144	1000	0	26.9	0
3.864	3.553		0	48.1	5
3.752	3.316		0	94.8	10
3.764	3.299		1	108	15
3.448	2.753		1	241	20
4.488	3.779		0	251.2	25



Şekil 6.17 : Pudra şekeri için MTE-bağlı nem grafiği

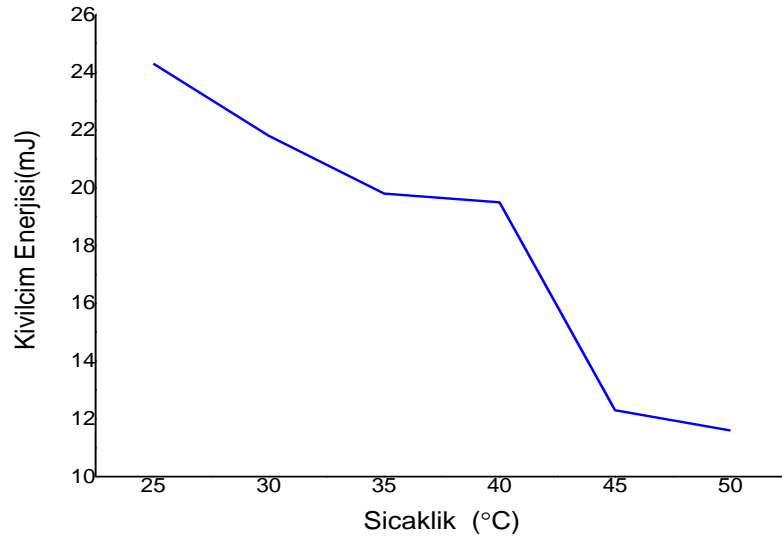
Şekil 6.17 grafik değerlerini incelendiğinde nem değeri %15 ile %25 arasında kıvılcım enerjisinin yüksek ivmeli artışı görülmektedir.

6.5.3. Pudra Şekeri İçin MTE-Sıcaklık Deneyi

Şekil 6.11 incelediğinde, Wiemann (1987) ve Glarner (1983) ile benzer karakterde eğri elde edildiği anlaşılmaktadır. Kıvılcım enerjisi değerinin 25°C ile 60°C arasında çok hızlı düşüşe geçtiği görülmektedir.

Çizelge 6.11 : Pudra şekeri için MTE-sıcaklık tablosu

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Sıcaklık (Celcius)
3.912	3.691	1000	0	24.3	25
3.688	3.479		0	21.8	30
3.528	3.329		0	19.8	35
3.688	3.440		1	19.5	40
3.976	3.819		0	12.3	45
5.128	4.975		1	11.6	50



Şekil 6.18 : Pudra şekeri için MTE-sıcaklık grafiği

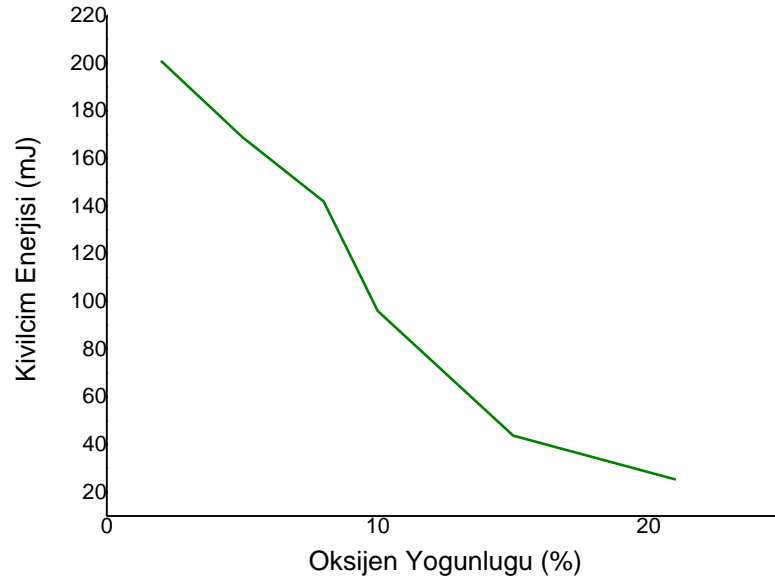
Şekil 6.18’de Wiemann (1987) ve Glarner (1983) ile benzer karakterde eğri elde edildiği anlaşılmaktadır. Kıvılcım enerjisi değerinin 40°C ile 45°C arasında en sert düşüşe geçtiği görülmektedir.

6.5.4. Pudra Şekeri İçin MTE- Oksijen Yoğunluğu Deneyi

Bu deneyde, numune girişi sonrası türbülans durumunun dengeye kavuşması beklenmiş ve akabinde ölçümlere ancak başlanmıştır. Ortam sıcaklığı yaklaşık olarak 20°C ile 22°C arasında ölçülmüş, diğer temel parametreler deney süresince sabit tutulmuştur. Beklendiği gibi oksijen seviyesinin düşmesiyle kıvılcım enerjisi miktarı ters orantılı olarak değişmektedir.

Çizelge 6.12 : Pudra şekeri için MTE-oksijen yoğunluğu tablosu

V ₀ (kV)	V ₁ (kV)	C(nF)	Tutuşma /Tutuşmama Durumu (1/0)	Kıvılcım Enerjisi (mJ)	Oksijen Yoğunluğu (%)
4.976	4.341	1000	0	201	2
5.288	4.706		1	169	5
4.688	4.151		0	142	8
5.096	4.657		0	96	10
5.112	4.816		1	43.7	15
4.464	4.239		0	25.3	21



Şekil 6.19 : Pudra şekeri için MTE-oksijen yoğunluğu grafiği

Şekil 6.19 incelendiğinde oksijen seviyesinin %2 ile %5 arasında, kıvılcım enerjisinin çok yüksek rakamlara çıktığı gözlenmiştir.

6.6. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, yanıcılık ve patlama bilimlerinde üç temel faktör (ısı, nem ve oksijen yoğunluğu) değerlerinden her hangi birisinin en küçük değişiminde yanıcılık, patlama eşik değerlerinin büyük ölçüde değiştiği anlaşılmaktadır. Bu üç parametreden tutuşma üzerinde en etkili olanı oksijen yoğunluğu olduğu grafik ve tablo değerlerinden görülmektedir. Küçük miktarda oksijen yoğunluğunun düşürülmesi bile tehlike eşik aralığı üzerinde büyük etkiye sahip olduğu ifade edilebilir. Büyük toz patlamalarının genellikle sıcak ve düşük nemli yaz aylarında olduğu istatistiki veriler içinde görülmektedir. Yüksek sıcaklık, düşük nem değerlerinin MTE üzerinde ciddi düşüslere yol açtığı ihmal edilemez bir gerçektir. Bu sonuç sıcaklık, nem değerlerinin sürekli kontrol altında tutulması zorunluluğunu doğurmaktadır. Tablolar analiz edildiğinde tutuşma olasılığının %15 ile %50 arasında değiştiği görülmektedir.

Bu çalışma, ısı sıcaklık ve oksijen yoğunluğunun nispeten küçük değerleri için alınmış ve numunenin genel yanıcılık karakteristiği anlaşılmaya çalışılmıştır. Sıcaklık deney setinin maksimum güvenlik sınırlarının kapsamında ele alınmış 90°C üzerine çıkılamamıştır. Daha net sonuç alınabilmesi için ASTM E 1515-7 standartları ışığında deney patlama seti tasarımı yapılmalı, 100°C üzeri sıcaklıklar test edilmelidir. Bu konuda daha ileri sonuçların alınabilmesi için toz parçacıklarının yığılma, ortalama parçacık büyüklüğü, parçacık dağılımı elektron mikroskop altında incelenmeli, parçacık büyüklüğü analizi yapılmalıdır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma neticesinde SED kaynaklı tehlikeler tanımlanmış ve karakterize edilmiştir. Teorik ve deneysel olarak tehlikeler irdelenmiş, olası patlama senaryolarıyla, nitel risk tahmini yapılmış, risk değerlendirilmesi ve akabinde patlama ve yangına sebebiyet verebilecek yanlış uygulama, davranış ve birimler tanımlanmıştır. Kontrol hiyerarşisi kurularak (mühendislik teknik ve yönetsel önlemler, FTA grafikleri)uygulanmış, yangın ve patlama tehlike ve tehditleri önlenmesi, patlamaya neden olabilecek kök sebepler tespit edilmesi ve zararları minimize edilmesi hedeflenmiştir. Buna ek olarak SED güvenlik akış şemaları ile sistem kolay anlaşılır hale getirilmiştir. Sonuç olarak riskler, RÖS 50'nin altına düşürülmüştür.

Öncelikle yanıcı ve patlayıcı; gaz, toz ve sıvıların her türlü işlem aşaması İSG yönetim politikası oluşturmayı ve finansal kaynak ayırmayı gerektirir. Yönetim bu konuda uluslararası standartlara (Bkz. EK-A.5) uymayı taahhüt etmeli, her zaman yeni teknolojik gelişimlere açık olmalı ve sistemi revize etmelidir. Sistem üzerinde her türlü eksiklik veya hata mutlaka kayda geçirilmelidir. Statik elektrik kaynaklı tehlikelerin bertaraf edilmesi öncelikle personel eğitimini ve bilinçlendirilmesini gerektirir. Statik elektrik deşarjına çok hassas sektörlerde (örneğin: kimya, elektronik vb.) ileri teknoloji teknik donanımın (statik alan ölçer, aktif ve pasif nötrleyici ekipman vb.) mutlaka sağlanması gerekmektedir. Gıda, kimya, mobilya, ağaç işleri, metal, kömür vb yanıcı gaz, toz ve sıvı barındıran sektörlerde mutlaka toz veya hibrit karışım numunelerinin patlama ve tutuşma karakteristiği analizi yapılmalıdır. Bu tez çalışmasında SİWEK 20L (Bkz. EK-A.7) test çemberi tanıtılmış ve DESC yazılım programı örneği verilmiştir.

Muhtemel kaza senaryoları ve neticeleri analizi, olasılık analizi, risk tahmini ve değerlendirilmesi birincil öneme sahiptir. Önleyici mühendislik yaklaşımlar (patlama bastırma, hareketsiz gaz kullanımı vb.), İSG genel prensipleri uygulanmalı eğer sonuçta değişim yapılmıyorsa mutlaka işlem durdurulmalıdır. Her iki örnekte de incelendiği üzere, temel İSG prensiplerinden biriside etkin temizlik ve bakım uygulamalarıdır. Bu sistemde ve çevrede hiç bir surette gaz ve

toz birikimine izin verilmemelidir. Uluslararası standartlara (NFPA 654) uyulmalıdır. Etkin toz ve gaz emici sistemler kurulmalı ve yeterli temizlik ve bakım uygulamaları, mutlaka etkin bir şekilde uygulanmalı ve kontrol edilmelidir (önemi, 3. bölümde incelendiği gibi, ünite dışında biriken tozlar domino etkisi yaratarak çok büyük ikincil patlamalara da sebep olmaktadır).

Risk analizleri yapılırken mutlaka geçmiş ramak kala kaza kayıtları, çalışanların fikirleri değerlendirilmeli, hesaba katılmalıdır.

KAYNAKÇA

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A.** (2007). Dust explosions–Cases, causes, consequences, and control. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1-2), 7-44.
- Abuswer, M.A.**, (2012), A Quantitative Risk Management Framework for Dust and Hybrid Mixture Explosions, Doctorate Thesis, Dalhousie University, Canada.
- Amyotte, P., Kahn, F., & Dastidar, A. G.** (2003). Reduce dust explosions the inherently safer way. *Chemical Engineering Progress*, 99(10), 36-43.
- Amyotte, P. R., & Eckhoff, R. K.** (2010). Dust explosion causation, prevention and mitigation: An overview. *Journal of Chemical Health and Safety*, 17(1), 15-28.
- ASTM E2019 – 03** (2007). Standard Test Method for Minimum Ignition Energy of a Dust Cloud in Air.
- Babrauskas, V.** (2003). *Ignition Handbook*, Published by Fire Science Publishers, A division of Fire Science and Technology Inc., Issaquad, WA 98027, USA.
- Berg, E.**, (1989). Private Communication to R.K. Eckhoff from E. Berg, Dyno Industries, Gullaug, Norway.
- British Standards-5958:** (1991). Code of Practice for Control of Undesirable static electricity Part 1, General considerations; Part 2: Recommendations for particular industrial situations, British Standard Institutions, London.
- BS PD CLC/TR 50404:** (2003). Code of Practice for Control of Undesirable Static Electricity, British Standard Institutions, London.
- Combustion Controls**, North American Combustion Handbook, Ed. E. C. Baukal, 3rd ed., vol. 1, p. 283
- Denkevits, A., & Dorofeev, S.** (2004). Dust Explosion Experiments. No. TW3-TSSSEA5.2.
- Dorsett, H.G., M. Jacobson, J. Nagy, et al.** (1960). Laboratory Equipment and Test Procedures for Evaluating Explosibility of Dusts. Report Inv. 5624. Washington, DC: US. Bureau of Mines.
- Eckhoff, R. K.** (1975). Towards Absolute Minimum Ignition Energies for Dust Clouds? *Combustion*.
- Eckhoff, R. K., and K. P. Mathisen.** (1977/1978). A Critical Examination of the Effect of Dust Moisture on the Rate of Pressure Rise in Hartmann Bomb Tests. *Fire Research* 1, pp. 273-280.

- Eckhoff, R. K., K. Fuhre, and G.H. Pedersen.** (1985). Vented Maize Starch Explosions in a 236 m³ Experimental Silo. Report No. 843307-2. Bergen, Norway: Chr. Michelsen Institute
- EN1149-1:** (1995). Protective clothing – Electrostatic properties. Part1: Surface resistivity (test methods and requirements).
- European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)** 50404 CLC/TR 50404, Brussels.
- Glarner, T.** (1984). “Mindestziindenergie-Einfluss der Temperatur.” VDZ-Berichte, VDI-Verlag GmbH, Dusseldorf 494, pp. 109-118.
- Glor, M.** (1988). Electrostatic Hazards in Powder Handling. Letchworth, Hertfordshire, UK: Research Studies Press Ltd.; John Wiley and Sons, New York.
- Hertzberg, M., and Cashdollar, K.L.** (1987). “Introduction to Dust Explosions”, In Industrial Dust Explosions, ed. K.L. Cashdollar and M. Hertzberg, ASTM Special Technical Publication 958, Philadelphia, pp. 5-32.
- International Standards Organization.** (1985). Explosion Protection Systems, Part 1: Determination of Explosion Indices of Combustible Dusts in Air, International Standard ISO/DIS 6184/1, Geneva.
- Kalkert, N., and H.-G. Schecker.** (1979). Theoretische Überlegungen zum Einfluss der Teilchengröße auf die Mindestziindenergie von Stäuben. Chem.-Ing.-Tech. 51, pp. 1248-1249.
- Kauffman, C. W.** (1982). Agricultural Dust Explosions in Grain Handling Facilities, In Fuel-Air Explosions, ed. J. H. S. Lee and C. M. Guirao. University of Waterloo Press, Buxton, Canada, pp. 305-347.
- Lewis, B. and Elbe, G. Von.** (1961). Combustion, flames and explosions of gases, 2nd edition, Academic Press, Florida and London
- Lüttgens, G. and Wilson, N.** (2003). Electrostatic Hazards, Butterworth, Oxford.
- NFPA 68: 3.3.12.1.** (2013). Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting
- NFPA 68:3.3.22.** (2013). Standard on Explosion Protection by Deflagration Venting.
- NFPA 654.** (2006). Standard for the Prevention of Fire and Dust Explosions from The Manufacturing, Processing, and Handling of Combustible Particulate Solids, National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- NFPA 77.** (2007). Recommended Practice on Static Electricity.

NFPA 499. (2013). Tehlikeli bölge sınıflandırılması (Combustible Dust Classification, and Hazardous Locations).

OSHA 3371-08. (2011), Hazard Communication Guidance for Combustible Dusts, Department of Labour, USA.

Özkılıç, Ö. (2005). İş Sağlığı ve Güvenliği, Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri, TİSK, Ankara.

Rolf K. Eckhoff. (2003). Dust Explosions in the Process Industries, Third Edition, Elsevier, USA.

Testing of insulating materials; relative resistance of insulating materials to breakdown by surface discharges; identical with IEC 15B 65, DIN VDE 0303-7, Beuth Verlag, Deutschland.

Wiemann, W. (1984). Einfluss der Temperatur auf Explosionskenngrößen und Sauerstoffkonzentrationen. VDI-Berichte [VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf] 494, pp. 89-97.

Wiemann, W. (1987). Influence of Temperature and Pressure on the Explosion Characteristics of Dust Air and Dust/Air/Inert Gas Mixtures.

Zeeuwen, J.P., Van Laar, G.F.M., On the minimum ignition energy of dust-air mixtures, Archivum Combustionis, Vol. 5(2).

Url-1 <http://www.gexcon.com/DESC>, alındığı tarih: 11.03.2015.

EKLER

A.1. Temel Elektrik Bilgisi ve Birimleri

Yük

Sembol Q

Birim: amper saniye (As) coulomb (C)

- Yükler pozitif veya negatif olabilir.
- Yükler elektrik alanın yükselmesine sebep olur.
- Coloumb kanununa göre yükler den elektrik kuvvet meydana gelir

$$F = Q \cdot Q / D^2$$

F = Kuvvet (N)

D = Uzaklık (m)

Q = Yük miktarı (C)

- Yükler enerjini korunumu kanununa uyar.

$$e = 1.6 \cdot 10^{-19} C$$

e = En küçük elektrik yükü

- İnsan vücudunun kapasitansı ortalama 200pF, potansiyeli 10 kV yükü ise 2 coloumb'dur.
- Pnömatik konveyörlerin taşıdığı tozların statik elektrik yükü 1 Mc/kg kadar ulaşabilir.

Yüzey Yük Yoğunluğu

Sembol σ

Birim: C/m²

- Katı yüzeylerde her zaman maksimum yük yoğunluğu limiti vardır. Normal şartlar altında maksimum yük yoğunluğu 26 $\mu C/m^2$ değerini geçemez. (CLC/TR 50404)

Hacim Yük Yoğunluğu

Sembol ρ

Birim: C/m³

Potansiyel

Sembol ϕ

Birim: Volt (V)=joule/coulomb

Birim yükü sonsuzdan belirlenen noktaya getirmek için yapılan iş olarak tanımlanabilir.

Voltaaj

Sembol U

Birim: volt V

- İki iletken nokta arasındaki potansiyel farkıdır U.
- Uzayda bir nokta tanımlandığında toprak veya sonsuz potansiyel 0 olarak alınır
- Topraklanmamış bir kişinin kazağını çıkarırken üzerinde biriken potansiyel 10 kV çıkabilir.
- Van de Graaf jeneratörü yere göre yaklaşık 100 kV potansiyel farkı üretir.

Alan kuvveti

Sembol E

Birim: V/m

Özellikleri

- Elektrik alan elektrik yükler tarafından oluşturulur.
- Elektrik alanın yönü pozitiften negatife doğrudur.
- Elektrik alan vektörel bir büyüklüktür
- Normal şartlar altında 3MV/m, elektrik alan gaz deşarjına neden olur. (CLC/TR 50404)

Akım

Sembol I

Birim: Ampere A

Akım Birim zamanda birim kesit alandan geçen yük miktarıdır. Akımın yönü pozitif yüklerin yönüyle aynıdır.

Akım pnömatik konveyörlerin malzeme taşınması sırasında 50 μ A kadar çıkabilir.

Direnç

Sembol R

Birim: volt/ampere= Ω ohm

Birçok malzemenin direnci uygulanan voltaja bağlı değildir. Ohm kanununa uyar. Fakat zayıf iletken maddelerin ve yalıtkan maddelerin direnci voltaja bağlıdır.

Öz Direnç

Sembol ρ

Birim: Ω m

Öz direnç, elektrotların direnci ile uzunluğuna çarpımının, kesit alana bölümüyle hesaplanır. Sıvılarda ise hacim direncinin tersi olarak;

Birim $1/\Omega$ m veya S/m, S siemenstir

Yüzey Öz direnci

Sembol σ

Birim: $\Omega\epsilon$

Özellikleri:

Yüzey Öz direnç, elektrotların direncinin ile uzunluğuna çarpımının aralarındaki uzaklığa Bölümüyle hesaplanır. Kare şekilli malzemenin karşılıklı iki kenarı arasındaki dirence eşittir. Karenin büyüklüğü önemli değildir.

Geçirgenlik

Sembol ϵ_0

Rakamsal değeri ve Birimi: 8.85 pF/m serbest alanın geçirgenliği ϵ_0 , dielektrik sabiti ile bağlı geçirgenliğe bağlıdır.

A.2. Toz ve Toz Karışımlarının Sebep Olduğu Patlama ve Yangın İstatistikleri

The National Fire Protection Association (NFPA) yayınladığı, ABD’de gerçekleşen önemli toz patlamaları istatistiği, patlamaların ayrıntıları hakkında önemli bilgi sunmaktadır. Burada sanayinin çeşitli alanlarında farklı materyal tozlarının patlamaları görülmektedir.

Tabloda görüldüğü gibi metal sektörü patlamaları toplam rakamın %7’si seviyesindedir.

Gıda sektörü patlamaları en yüksek ölümcül ve yaralamalı kaza oranını göstermekte ve patlama başına en yüksek maddi zararı vermektedir. Yer üstü kömür işleme sektörü beklenenin aksine toplam ölümcül ve yaralamalı kazalar içinde düşük bir orana sahiptir.

Ek Çizelge 1 : 1900-1956 yılları ABD toz patlamaları istatistiği(NPFA)

Toz Türü	Patlamalar		Ölümlü kazalar			Yaralanmalar			Maddi kayıplar	
	Sayı	%	Sayı	%	Kaza başına ölüm oranı	Sayı	%	Kaza başına yaralanma oranı	Milyon Dolar	Patlama Başına
Ahşap talaş	162	14.5	38	5.6	0.23	160	9	0.99	11.4	0.070
Gıda	577	51.4	409	60.5	0.71	1061	60	1.84	75.8	0.131
Metal	80	7.1	108	16	1.35	198	11.2	2.48	3.2	0.040
Plastik	61	5.4	44	6,5	0.72	121	6.8	1.98	3.7	0,061
Kömür (madenler hariç)	63	5.6	30	4.4	0.48	37	2.1	0.59	1.6	0.025
Kağıt	9	0.8	0	0	0	0	0	0	0.5	0.056
Diğerleri	171	15.2	47	7	0.27	193	10.9	1.13	4.3	0.025
Tümü	1123	100	676	100		1770	100		100.5	

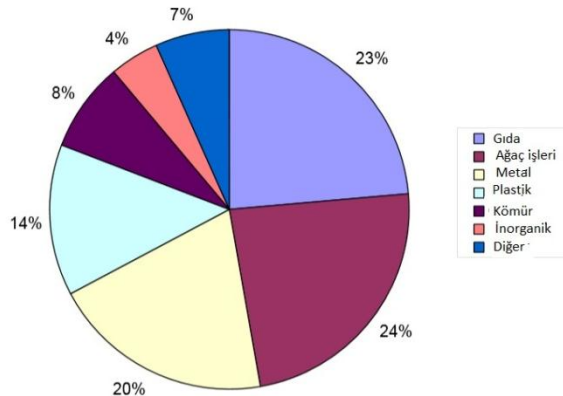
Ek Çizelge 2 : ABD Hububat tozu patlama istatistiği(NFPA)

Kayıp katagorisi	1900-1956		1957-1975		1979-1988	
	Toplam	Yıl başına	Toplam	Yıl başına	Toplam	Yıl başına
Patlama sayısı	490	8.6	192	10.1	202	20.2
Ölümlü kazalar	361	6.8	68	3.6	54	5.4
Yaralanmalı kazalar	991	17.4	346	18.2	267	26.7
Maddi zarar (milyon dolar)	70	1.3	55	2.9	169	16.9

ABD 1980-2005 yılları arası yılda ortalama 10 toz patlaması gerçekleşmekte ilerleyen yıllarda bu rakamın daha da tırmanmakta olduğu görülmektedir.

Endüstriyel işlemler sırasında toz ve karışımlarının patlama vakaları sıklıkla yaşanmaktadır. Her yıl yüzlerce kişi hayatını kaybetmekte veya sakat kalmakta milyonlarca dolar zarara ve çevre kirliliğine yol açmaktadır.

Saskatchewan hububat tozu patlaması 1952 (6 ölü ve 14 yaralı); Kampffmeyer, Avusturya, hububat deposu patlaması 1960; silikon toz öğütme birimi patlaması Bremanger, Norveç, 1972 (5 ölü ve 4 yaralı); tekstil sanayi patlaması, Çin,1987 (58 ölü ve 177 yaralı, Massachusetts, USA, 1999 (3 ölü ve 12 yaralı); Imperial Sugar Company, şeker fabrikası toz patlaması, 2008 Port Wentworth, Georgia, ABD, 14 ölü and 38 yaralı (Abbasi & Abbasi, 2007). Ayrıca toz patlamaları 1911-2004 (OSHA, 2007) incelenebilir.



Şekil A.2.1 : Sektörlere göre toz patlaması dağılımı

Şekil 4.22’de görüldüğü üzere gıda sektörü %23, ağaç işleri %24 ile en yüksek orana sahiptirler. Tozlardan nasıl bir tehlike geleceğini önceden tahmin

edebilmek tozların teknik güvenlik parametreleri ve tutuşma mekanizmaları hakkında bilgi verir.

A.3. Maksimum Teorik Kıvılcım Enerjisi

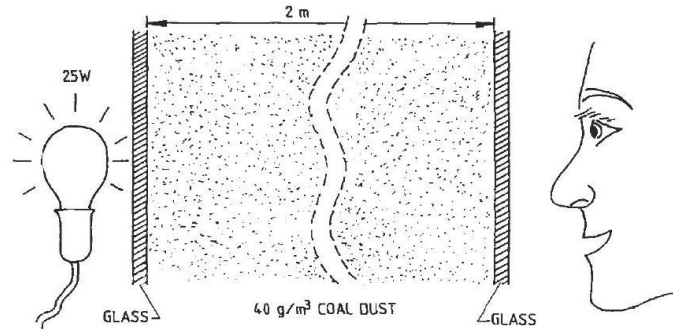
Çizelge A.3.1 : Farklı iletken ekipmanlar üzerinde deşarj olan maksimum teorik kıvılcım enerjisi (Glor, 1988)

Araç	Kapasitans (pF)	$\frac{1}{2} CV^2$ (mJ) Değişik potansiyel farklarında		
		10kV	20kV	30kV
Vida	1	0,05	0,2	0,45
Flanş (ortalama 100mm yarıçapı)	10	0,5	2	4,5
Kürek	20	1	4	9
Varil (50 litre)	10-100	0,5-5	2-20	4,5-45
Huni	10-100	0,5-5	2-20	4,5-45
Varil (200litre)	100-300	5-15	20-60	45-135
İnsan	100-300	5-15	20-60	45-135
Büyük konteynerler, reaksiyon kazanları	100-1000	5-50	20-200	45-450

Ortalama kapasitans–toprak değerleri sıralanmıştır. Bu verilerin tamamı teorik hesaplamaları kapsar bunun dışındaki etkili tüm etmenler göz ardı edilmiştir.

Glor (1988) endüstriyel alanda yalıtkan malzemelerin özellikle plastik ve türevlerinin artan oranda kullanımı ve yaygınlaşması çoğu zaman tüm dikkatleri üstüne toplamasına sebep olmakta, iletkenlerin düzgün bir biçimde topraklanması bazen gözden kaçmaktadır.

A.4. Toz Yoğunluğu Tahmin Yöntemi



Şekil A.4.1. Pratik toz yoğunluğu tahmin yöntemi

25 watt ampul ışığı Yoğunluğu 40 gr/cm₃ olan kömür tozları 2 metre mesafeden çok zor görülebilir.

Zehr (1965), uygulaması kolay bir test olarak kullanılabilir. 25 watt'lık ampul 2 metre mesafeden Yoğunluğu 40 gr/m³ üzeri toz bulutu içinde görülemez. Bu durum genellikle işlem ünitelerinin içinde gerçekleşir. Örneğin öğütücü, karıştırıcı, eleyici, ayırıcı, kurutucu, filtreler, havalandırma kanalları, tozların pnömatik transferi vb. sırasında oluşur. Birincil patlama ortamıdır

A.5. Uluslararası İlgili Standartlar

OSHA Standartları :

- 1910.22 – Temizlik ve bakım
- 1910.38 – Acil durum eylem planı
- 1910.94 – Havalandırma
- 1910.119 – Proses güvenlik yönetimi
- 1910.269 – Güvenli elektrik üretimi
- 1910.272 – Hububat işleme ünitesi
- 1910.307 – Tehlikeli bölgeler
- 1910.1200 – Acil durum haberleşme
- NFPA 654 – Yanıcı tozların yangın ve patlama tehlikelerini önleme
- NFPA 499 – Tehlikeli bölge sınıflandırılması
- NFPA 61 – Tarım ve gıda sanayii işleme üniteleri
- NFPA 69 – Patlama önleme sistemleri

NFPA Standartları

- NFPA 654 – Yanıcı tozların yangın ve patlama tehlikelerini önleme,
- NFPA 499 – Tehlikeli bölge sınıflandırılması
- NFPA 61 – Tarım ve gıda sanayii işleme üniteleri
- NFPA 69 – Patlama önleme sistemleri
- NFPA 484-Yanıcı metal tozları standartları
- NFPA 704-Tehlikeli maddeleri tanımlama sistemleri standartları

ASTM Standartları

- ASTM. (1988) – Yanıcı tozların, basınç ve basınç artış oranı test metodları standardı.
- E789 –Toz patlamaları için 1.2 litre kapalı silindir ortamda test metodu
- E1226-Toz bulutu patlayabilirlik test metodu.
- E1445 -Tehlike potansiyeli olan kimyasal madde terminolojisi
- E1515- Yanıcı tozlar için minimum patlama konsantrasyonu belirleme test metodu
- E3175 –Hareketli kömür toz örneği için test metodu

EU Standartları

- CENELEC, CLC/TR 50404- Statik elektrik kaynaklı tehlikelerden korunma standartları
- EN 14491:2006- Toz patlamaları acil boşaltım hattı sistemleri
- EN 13237-1:2003-Potansiyel patlayıcı atmosferler
- EN 15089:2009-Patlama izale sistemleri standartları
- EN 14373:2005 - Toz patlama bastırma sistemleri

A.6. Minimum Tutuşturma Enerjisinin Belirlenmesi

MTE'nin belirlenmesi; maddenin üç halinde, yani katı-sıvı-gaz olarak ayrı ayrı incelenir.

A.6.1. Gazlarda ve Buharlarda

Yukarıda da bahsedildiği gibi bu değerin tespitinde çok farklı etmenler göz önünde bulundurulmalıdır. Yakıt hava karışımının konsantrasyonu belirlenmeli, MTE değerinde tutuşana kadar beklenilmelidir. İki elektrot arasında yakıt hava karışımının, SED nedeniyle meydana getirdiği kıvılcım test edilmeli. Elektrotların büyüklüğü ve uzunluğu minimum MTE değerini sağlayabilecek değerlerde olmalıdır. Elektrotların yarıçapları korona deşarjını önleyecek büyüklükte ve aralarındaki mesafede oluşacak alevin sönmemesini sağlayacak uzaklıkta olmalıdır.

Örneğin çoğu hava - hidrokarbon karışımı gazların MTE değeri 0,2 ile 0,3 mJ arasındadır. Kritik elektrot uzaklığı ise 2 mmdir. Patlama gerilimi 7 kV kapasitansı 8 pF dır.

A.6.2. Tozlar

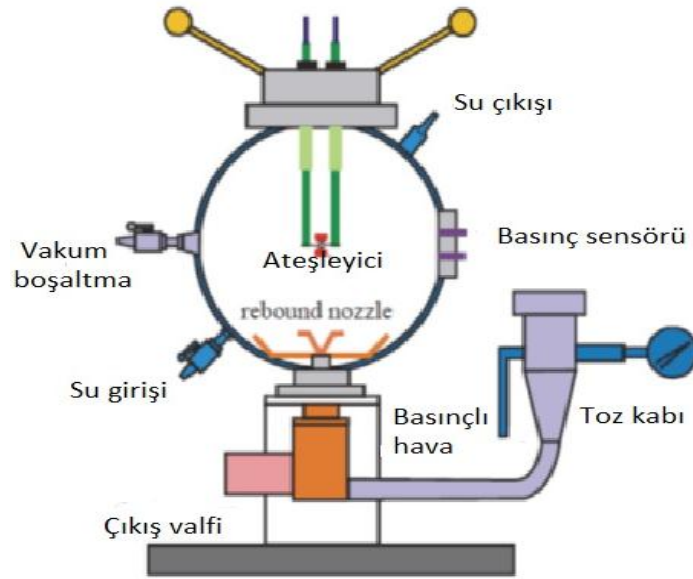
Toz örneği boronsilikat tüp içerisine yerleştirilir. Dispersiyon kabının içerisine yerleştirilecek iki elektrot vasıtasıyla, basınçlı hava ortamında, kıvılcım çıkana kadar gerilim artırılır, daha sonra hava basıncı yavaş yavaş düşürülerek en

küçük MTE değeri hesaplanır. Bu deney en az 6 defa tekrarlanarak ortalaması alınır. Test sonuçları enerji aralığı olarak ifade edilir.

A.7. dP/dt ve P_{max} Tespiti

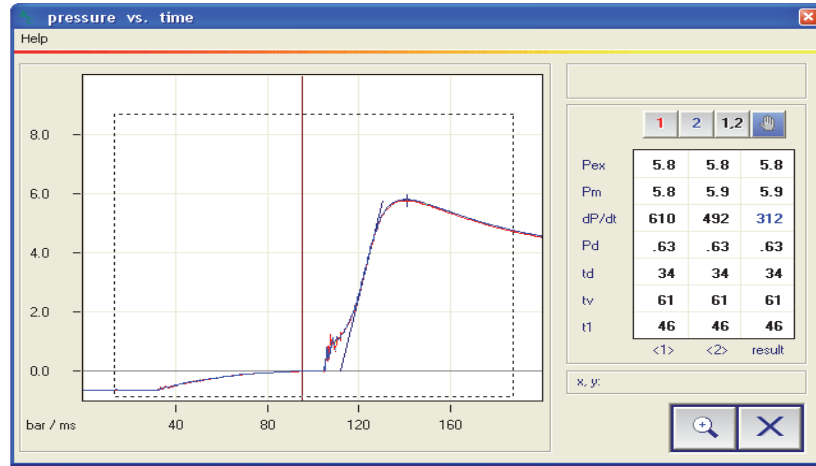
Yanıcı toz ve karışımların dP/dt ve P_{max} değerleri kapalı SIWEK çemberi aracılığıyla tayin edilir. İlk olarak çembere verilen basınçlı havanın, 20 bar en üst değer kabul edilerek regüle edilir. Örnek tartılarak toz kabına konur. Ateşleyiciler hazır konuma getirilir. Çember kapatılır, 20 litrelik küre 0,4 bara kadar boşaltılır. Bir sonraki adım ise test parametreleri bilgisayara girilir örneğin konsantrasyon, nem ateşleme enerjisi vb.

Akabinde, toz örneği basınçlı hava karışımının 20 bara kadar basıncı artırılır ve patlama reaksiyonunun gerçekleşmesi beklenir. Bilgisayar üzerinde kullanılan yazılım vasıtasıyla, açığa çıkan değerler grafik olarak P_{max} ve (dP/dt) değerini verir. (Denkevits & Dorofeev, 2004).



Şekil A.7.1 : SIWEK 20L test küresi şeması, (Denkevits & Dorofeev, 2004).

Rebound nozülün altındaki valf açılarak, iki kaynak arası basınç farkı nedeniyle toz haznesinden hava-toz karışımı rebound nozula gelir. 60 ms sonrası bilgisayar aracılığıyla ateşleme gerçekleşir. Basınç sensörü veriyi bilgisayara yollar, yazılım yardımıyla basınç zaman grafiği ve basınç artış hızı (dP/dt) değeri, P_{max} maksimum basınç değeri elde edilmiş olur (Denkevits&Dorofeev, 2004).



Şekil A.7.2 : Bilgisayar arayüzü görüntüsü ve elde edilen değerler ([http : //www.gexcon.com/DESC](http://www.gexcon.com/DESC)).

A.8. Saha Araştırması

Bu bölümde DYO boya fabrikaları üretim ve hammadde depolama alanlarında saha içi uygulama örnekleri verilmiştir



Şekil A.8.1 : Statik elektrik deşarj noktası.

Parlayıcı ve patlayıcı kimyasal madde kamyonları burada yaklaşık 45 dakika süreyle bekletilmektedir.



Şekil A.8.2 : Flaşlar arası iletken ile statik yük nötrleyici iletim borusu rneği.

Bu aşamada hammadde yer altı depolarına güvenli bir şekilde iletilir



Şekil A.8.3 : Yer altı depo kapakları



Şekil A.8.4 : Kimyasal madde taşıyıcı aracın yük boşaltımı sırasında kullanılan topraklama maşası



Şekil A.8.5 : Hammadde transfer borularının flanşlar arası iletken kablo ile statik yük birikimi önlemi



Şekil A.8.6 : Kimyasal işlem sırasında çözücününün geçici taşıma kazanlarına doldurulması işlemi



Şekil A.8.7 : Yazılım destekli boşaltım vanası

Çözücü transferi sırasında taşıyıcı kazan üzerindeki statik yükün deşarjının bitiminde otomatik olarak vana açılmasını sağlayan elektronik ortamdır.



Şekil A.8.8 : Çözücünün taşınması sırasında elektronik panele bağlı taşıyıcı kazan örneği,

Maşa ile statik yüklerin güvenli bir şekilde deşarjı tamamlandıktan sonra otomatik olarak vana açılarak, çözücü kazana yüklenmektedir.



Şekil A.8.9: Yarı mamul kimyasal madde deposu topraklama örneği



Şekil A.8.10: Depo topraklama örneği



Şekil A.8.11: Pnömatik sistem sıvı transferi ve flanşlar arası iletken kablo ile statik deşarj topraklama örneği



Şekil A.8.12 : Personel üzerinde birikebilecek statik yükün deşarj levhası



Şekil A.8.13 : Statik topraklama maşası

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Cengiz DİRİK

Doğum Yeri ve Tarihi: Karşıyaka 11/02/1974

Adres: Karşıyaka /izmir

E-Posta:Fiziksel@hotmail.com

Lisans: Yıldız Üniverisitesi Fen Fak. Fizik Bölümü.

Yüksek Lisans (Varsa):