

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**VAKUM İZOLASYON PANELLERİ VE
BUZDOLABI PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ
YAŞLANMA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK
İNCELENMESİ**

Fatih MÜMİNOĞLU

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. M. Turhan ÇOBAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 625.04.00

Sunuş Tarihi: 28.06.2017

Bornova-İZMİR

2017

Fatih MÜMİNOĞLU tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Vakum İzolasyon Panelleri ve Buzdolabı Performansı Üzerindeki Yaşlanma Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 28/06/2017 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri :

İmza

Jüri Başkanı : Yrd. Doç. Dr. M. Turhan ÇOBAN

Raportör Üye : Prof. Dr. Necdet ÖZBALTA

Üye : Prof. Dr. Dilek KUMLUTAŞ



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Vakum İzolasyon Panelleri ve Buzdolabı Performansı Üzerindeki Yaşlanma Etkilerinin Deneysel Olarak İncelenmesi” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

28 / 06 / 2017

İmzası
Adı-Soyadı

Fatih Müminoğlu

ÖZET**VAKUM İZOLASYON PANELLERİ VE BUZDOLABI
PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ YAŞLANMA ETKİLERİNİN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

MÜMİNOĞLU, Fatih

Yüksek Lisans Tezi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. M. Turhan ÇOBAN

Haziran 2017, 187 sayfa

Vakum izolasyon paneli (VİP) ısı yalıtım özellikleri açısından konvansiyonel yalıtım malzemelerine göre daha yüksek performanslı malzemelerdir. Literatürde VİP'lerin zamana bağlı performansını inceleyen sınırlı sayıda bilimsel araştırma ve akademik çalışma vardır. Yakın gelecekte birçok endüstriyel alanda kullanımının yaygınlaşması beklenen VİP'lerin ülke ekonomilerine önemli bir katma değer yaratması, ayrıca sağlanacak enerji tasarrufunun çevreye olumlu katkılar getirmesi beklenmektedir.

Bu tezde yalıtım alanında yürütülecek akademik ve endüstriyel araştırmalara katkı sağlamak amacıyla, VİP ve üzerindeki zamana bağlı yaşlanmanın performans üzerindeki etkileri deneysel ve sayısal olarak incelenmiş ve ürünün performansı hakkında çıktılar elde edilmiştir. Tez konusu up 120 model ev tipi buzdolabı Indesit Laboratuvarlarında test edilmiştir. VİP'nin zamana bağlı ısı transferi değişimini tespit edebilmek için yedi bağımsız enerji tüketimi testi yapılmış ayrıca poliüretan ve VİP'ye ait termo fiziksel özellikler deneysel olarak incelenmiştir. Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen ısı kazancı analizleri ve modellerinde, standartlarda belirtilen enerji tüketim testi koşulları referans alınarak, dondurucu duvarlarında gerçekleşen toplam ısı transferi değerleri zamana bağlı değişkenlere göre incelenmiş ve sonuçlar arasında ortaya çıkan farklılıklar değerlendirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Vakum izolasyon paneli, buzdolabı, yaşlanma, enerji tüketimi

ABSTRACT

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF VACUUM INSULATION PANELS AND AGING PERFORMANCE ON THE HOUSEHOLD REFRIGERATOR

MÜMİNOĞLU, Fatih

MSc in Mechanical Eng.

Supervisor: Assistant Prof. Dr. M. Turhan ÇOBAN

June 2017, 187 pages

Vacuum Insulation Panels (VIPs) represent better thermal insulation performance than conventional materials. In literature there are limited scientific surveys and academic studies about time-dependent thermal performance of VIPs. Given the fact that in near future expectation is increasing industrial usage of VIPs, this subject will create an important added value for national economies and energy saving with significant environmental benefits.

In this thesis, in order to support academic and industrial studies, VIP's and time-dependent aging effect on the thermal performances have been investigated experimentally and thereby product sustainable performance results were obtained. Test subject "up 120" is the type of household refrigerator tested in Indesit Laboratories. Seven independent energy consumption tests performed and in order to evaluate thermal performance of VIP and polyurethane, thermal conductivity measurements have been applied. Obtained experimental test results used for having a comparison between computer aided heat gain analysis and energy consumption measurements of laboratories.

Keywords: Vacuum insulation panel, household refrigerator, aging, energy consumption

TEŞEKKÜR

Bu çalıőmanın yűrűtűlmesi sırasında desteęi ve ilgisini esirgemeyen tez danıőmanım Yrd. Doç. Dr. M. Turhan ÇOBAN'a, bűlűműműzde kapısını űęrencilerine sonuna kadar açık tutan Prof. Dr. Necdet ŐZBALTA'ya, űzellikle çalıőmalarım sırasında gűsterdięi sabırdan dolayı sevgili eőim Tuba YILMAZ MŪMİNOęLU'na ve her daim yanımda olan canım aileme teőekkűrű bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	
ABSTRACT	
TEŞEKKÜR.....	
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	
ÇİZELGELER DİZİNİ	
SİMGELER DİZİNİ.....	
KISALTMALAR DİZİNİ	
1 GİRİŞ	1
2 ISI YALITIMI VE ISI YALITIM MALZEMELERİ.....	10
2.1 Yalıtım Malzemelerinde Isı Transferi	12
2.1.1 İletim yoluyla ısı transferi	14
2.1.2 Isı taşınımı.....	19
2.1.3 Isı ışınımı.....	21
2.2 Isı Yalıtım Malzemeleri	22
2.2.1 İç yapılarına göre ısı yalıtım malzemeleri.....	24
2.3 Geleneksel Isı Yalıtım Malzemeleri.....	25
2.4 Isı Yalıtım Malzemeleri İle İlgili Temel Kavramlar	26
2.4.1 Isı iletim katsayısı.....	26
2.4.2 Yoğunluk.....	26
2.4.3 Sıcaklık dayanımı	26
2.4.4 Mekanik dayanım.....	26
2.4.5 Su emme oranı.....	26
2.4.6 Buhar difüzyon direnci.....	27
2.5 Yaygın olarak kullanılan geleneksel ısı yalıtım malzemeleri.....	27
2.5.1 Camyünü	28
2.5.2 Taşyünü	28
2.5.3 Poliüretan	29
2.5.4 Ekspande polistren köpük (EPS).....	33
2.5.5 Ekstrude polistren köpük (XPS).....	33

2.5.6	Fenol köpük	34
2.5.7	Cam köpük.....	34
2.5.8	Polietilen köpük.....	34
	Yoğunluk: 30-40 kg/m ³	34
2.5.9	Genleştirilmiş perlit (EPB)	35
2.5.10	Genleştirilmiş mantar (ICB)	35
2.5.11	Seramik yünü	35
2.5.12	Mantar levha	35
2.5.13	Polizosiyonat köpük.....	35
2.5.14	PVC köpük	35
2.5.15	Melanin köpüğü	36
2.5.16	Elastomerik kauçuk köpüğü	36
2.6	Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri	36
2.6.1	Vakum izolasyon panelleri	38
2.6.2	Gaz yalıtım panelleri	39
2.6.3	Aerojel	40
2.6.4	Gelecekteki ısı yalıtımı gereksinimleri.....	43
3	LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	47
4	VAKUM İZOLASYON PANELLERİ VE YAŞLANMA	55
4.1	Vakum İzolasyon Panellerinin Yapısı.....	55
4.1.1	İç dolgu malzemesi	57
4.1.2	Koruyucu bariyer	59
4.1.3	Gaz giderici.....	62
4.2	Vakum İzolasyon Panellerinde Isı Transferi.....	63
4.3	Termal Köprü Etkisi	68
4.4	Vakum İzolasyon Panellerinde Yaşlanma	70
4.4.1	Gaz geçirgenliği.....	71
4.4.2	Nem geçirgenliği ve performans üzerinde etkileri	73
4.4.3	Vakum izolasyon panellerinin servis ömürleri	75
5	SAYISAL ÇALIŞMA	82
5.1	Modelleme	82
5.2	Kabuller, Sınır Şartları ve Malzeme Özellikleri	84
5.3	Ağ yapısı (Mesh).....	87

5.4	Analizler	88
6	DENEYSEL ÇALIŞMA	92
6.1	Ev Tipi Dondurucular ve Genel Performans Kriterleri	93
6.2	VİP'ye Ait Termal Özelliklerin Değerlendirilmesi	96
6.3	Poliüretana Ait Termal ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi	98
6.4	Deney Düzenineğin Yapı ve Teknik Özellikleri	101
6.5	Prototip Üretimi	103
6.6	Performans ve Enerji Deneyleri	108
7	SONUÇ VE ÖNERİLER	113
7.1	Sayısal Çalışmaya Ait Sonuçlar	113
7.2	DeneySEL Çalışmaya Ait Sonuçlar	114
7.3	Sayısal ve DeneySEL Sonuçların Karşılaştırılması	118
7.4	Sonuç, Değerlendirme ve Öneriler	120
KAYNAKLAR DİZİNİ		122
ÖZGEÇMİŞ		129
EKLER		

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 ELEKTRİKLİ EV ALETLERİNİN GLOBAL ENERJİ TÜKETİM TRENDLERİ (IEA, ENERGY EFFİCIENCY MARKET REPORT, 2016).....	1
1.2 KONUTLARDA ELEKTRİK TÜKETİMİ (BEYAZ EŞYA SANAYİCİLERİ DERNEĞİ, 2011)	2
1.3 GELİŞMİŞ ÜLKELERDE, KULLANIM ALANLARINA BAĞLI OLARAK KONUTLARDA ELEKTRİK TÜKETİM PAYLARI TAHMİNİ (IEA, 2007)	3
1.4 GELİŞMEKTE OLAN ÜLKELERDE, KULLANIM ALANLARINA BAĞLI OLARAK KONUTLARDA ELEKTRİK TÜKETİM PAYLARI TAHMİNİ (IEA, 2007)	3
1.5 EV TİPİ SOĞUTUCULARDA ENERJİ VERİMLİLİK DEĞERLERİNİN KİYASLANMASI.....	4
1.6 AB VERİMLİLİKLERİNE GÖRE BUZDOLABI SATIŞLARI (TOPTEN INTERNATIONAL SERVICES, 2015).....	5
1.7 AB VE ABD'DE BEYAZ EŞYA STANDARTLARININ KAZANIMI OLAN ENERJİ TASARRUFU GRAFİĞİ (IEA ENERGY EFFİCIENCY MARKET REPORT, 2016)...	5
1.8 ÖRNEK BUZDOLABI ENERJİ ETİKETİ	7
1.9 BİR VAKUM İZOLASYON PANELİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ.....	8
2.1 RADYASYON, İLETİM VE TAŞINIMIN HAVA BOŞLUĞUNDAKİ ISI TRANSFERİNE ETKİSİ (SHİRTLİFFE, 1972).....	11
2.2 GELENEKSEL (ELYAF, KÖPÜK VB.) YALITIMDA ISI TRANSFER MEKANİZMALARI (KİSTLER, 1935).....	12
2.3 İLETİM, TAŞINIM VE İŞİNİM İLE ISI GEÇİŞ ŞEKİLLERİ	14
2.4 İLETİM YOLUYLA BİR BOYUTLU ISI TRANSFERİ GERÇEKLEŞEN DUVAR	15

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.5 GÖZENEKLİ MALZEMELERDEKİ ISI İLETİMİNİN KATI VE GAZ HALİNDE YOĞUNLUKLA BERABER DEĞİŞİMİ (SİMLER, 2005)	16
2.6 ÇEŞİTLİ GAZLARIN ISI İLETİMİ VE MOLEKÜL AĞIRLIKLARI (AGA, 1985)	16
2.7 HAVA İÇİN KARAKTERİSTİK SİSTEM BOYUTLARININ FONKSİYONU OLARAK HESAPLANMIŞ GAZ İLETİMİ	18
2.8 HAVA İÇİN DENKLEM 2.2, 2.3 VE 2.4'E GÖRE FARKLI KARAKTERİSTİK SİSTEM BOYUTLARINA GÖRE HESAPLANMIŞ GAZ İLETİMİ.....	19
2.9 GÖZENEKLİ MALZEMEDE GÖZENEK BOYUTUNA BAĞLI OLARAK MEYDANA GELEN ATMOSFERİK BASINÇTAKİ GAZ İLETKENLİĞİ DEĞİŞİMİ. VİP ÇEKİRDEĞİNDE 10-100 NM BOYUTUNDA TOZ SİLİKA KULLANILMIŞTIR (SİMLER, 2005)	21
2.10 KATI, GAZ VE RADYASYONUN TOPLAM ISI İLETİMİNE ETKİSİ	24
2.11 POLİOLLERİN KİMYASAL YAPISI (THAMSON, 2005).....	30
2.12 ENDÜSTRİDE OLARAK EN ÇOK KULLANILAN İZOSİYONATLAR (THAMSON, 2005).....	31
2.13 POLİÜRETAN OLUŞUM TEPKİMESİ (THAMSON, 2005).....	32
2.14 POLİÜRETAN TEPKİMESİNDE KULLANILAN KABARTICI AJANLAR (ÖZÇAM, 2007).....	33
2.15 HALEN KULLANMAKTA OLAN YALITIM MALZEMELERİNİN R DEĞERİ (MUKHOPADHYAYA, 2006)	37
2.16 1990'LARDA BUZDOLAPLARI İÇİN ÜRETİLEN İLK VİP UYGULAMALARINDAN BİR ÖRNEK (DEGUSSA).....	38

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.17 VAKUM İZOLASYON PANELİNDE ÇEKİRDEK, İÇ ZARF VE DIŞ ZARFIN GÖRÜNÜMÜ (DENİZ VE BİNARK, 2008)	39
2.18 ALEV TORCU ÜZERİNDEKİ BİR AEROJEL (NASA, 2017).	41
2.19 AEROJEL PROSESİ	43
3.1 VİP ARAŞTIRMALARIYLA İLGİLİ YAPILAN YAYIM SAYISI	49
3.2 SOLDA: VİP YAYIMLARININ ÜLKELERE GÖRE DAĞILIMI. SAĞDA: VİP YAYIMLARININ KONU BAŞLIKLARINA GÖRE DAĞILIMI	50
3.3 VİP ÇEPERİNDEKİ ISIL KÖPRÜLER (GHAZİ WAKİLİ, 2011)	54
4.1 VAKUM İZOLASYON PANELİ	56
4.2 BİR VİP'İN İÇYAPISI (MALONE VE WEİR, 2001)	56
4.3 300 K'DE ÇEŞİTLİ SİLİKA DOLGULARIN GAZ BASINCINA BAĞLI OLARAK ISIL İLETKENLİKLERİ (FRICKE, 2005)	58
4.4 FARKLI İÇ DOLGU MALZEMELERİ İÇİN VAKUM SEVİYESİ-ISI İLETİM KATSAYISI İLİŞKİSİ (FRICKE, 2005)	59
4.5 GÖZENEK BASINCI İLE DOLGU MALZEMESİNİN ISIL İLETKENLİĞİNİN DEĞİŞİMİ (FRICKE, 2005)	59
4.6 VİP UYGULAMALARINDAKİ FARKLI BARİYER ÇÖZÜMLERİNİN KESİT GÖRÜNTÜSÜ. BARİYER İSİM VE YAPILARI IEA/ECBCS ANNEX39'A GÖRE VERİLMİŞTİR. RESİM ÜZERİNDEKİ RAKAMLAR TOPLAM KATMAN KALINLIKLARINI SİMGELER	61
4.7 VİP BARİYERİ İÇİN KULLANILAN ÇOK KATMANLI LAMİNASYONIN GÖRSELLEŞTİRİMİ (SİMMLER VE BRUNNER 2005A)	62

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.8 FARKLI GÖZENEK BOYUTLARI (SiO ₂) VE BASINÇLARDA HAVANIN ISIL İLETKENLİĞİ.....	64
4.9 ÇEŞİTLİ MALZEMELERE AİT ISI İLETİMİ, GAZ BASINCI İLİŞKİSİ (TENPIERİK 2009).....	66
4.10 FARKLI GÖZENEK BOYUTLARI VE BASINÇ SEVİYELERİNDE HAVANIN ISI İLETİM KATSAYISI (SİMMLER VE DİĞER., 2005)	67
4.11 FARKLI İÇ DOLGU MALZEMESİNE SAHİP VAKUM İZOLASYON PANELLERİN ISI İLETİM KATSAYILARI (SİMMLER VE DİĞER, 2005).....	68
4.12 VİP İÇİNDE GERÇEKLEŞEN TERMAL KÖPRÜ.....	69
4.13 İKİ VİP ARASINDA GERÇEKLEŞEN TERMAL KÖPRÜ	69
4.14 ALÜMİNYUM BARIYERLİ, ÇOK KATMANLI PLİMER YAPIDAKİ BİR BARIYER FİLMİN OPTİK MİKROSKOP GÖRÜNTÜSÜ.....	76
4.15 6 FARKLI NUMUNEDEN ALINA SU BUHARI TRANSFER ORANI (WVTR) ÖLÇÜM SONUÇLARI (CHALMERS).....	78
5.1 DONDURUCUNUN ÜÇ BOYUTLU MODELİNDEN BİR GÖRÜNÜŞ.....	83
5.2 DONDURUCUNUN ÜÇ BOYUTLU MODELİNDEN BİR GÖRÜNÜŞ.....	83
5.3 ANALİZİ YAPILAN ÜRÜNE AİT BİR KESİT GÖRÜNÜŞ VE SINIR KOŞULLARININ VERİLMESİ (MÜMİNOĞLU,2016)	86
5.4 GÖVDEDEN ALINAN BİR AĞ YAPISI GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	88
5.5 VİP'LERDEN ALINAN BİR AĞ YAPISI GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	88

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.6 VİP'SİZ ÜRÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	89
5.7 VİP'Lİ ÜRÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	89
5.8 VİP'Lİ ÜRÜNÜN 22. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	90
5.9 VİP'Lİ ÜRÜNÜN 32. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	90
5.10 VİP'Lİ ÜRÜNÜN 55. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	90
5.11 VİP'Lİ ÜRÜNÜN 61. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	91
5.12 VİP'Lİ ÜRÜNÜN 116. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	91
5.13 VİP'Lİ ÜRÜNÜN 227. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	91
6.1 UP 120 ÜRÜNE AİT ENERJİ ETİKETİ.....	92
6.2 GÜNÜMÜZDE YAYGIN OLARAK ÜRETİLEN EV TİPİ SOĞUTUCU VE DONDURUCU TİPLERİ (ASHRAE, 2002).....	94
6.3 ÇALIŞMADA KULLANILAN ISI İLETİM KATSATISI ÖLÇÜM CİHAZI (MÜMİNOĞLU, 2016).....	97
6.4 VİP'DEN ELDE EDİLEN ISI İLETİM KATSAYILARININ 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	98

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.5 ISI İLETİM KATSAYISI ÖRNEKLENEN PU NUMUNELERİ (MÜMİNOĞLU, 2015)	99
6.6 POLİÜRETAN'DAN ELDE EDİLEN ISI İLETİM KATSAYILARININ 2. DERECE BİR POLİNOM SAL EĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	100
6.7 TEST ODASI YERLEŞİM PLANI ÜST GÖRÜNÜŞÜ (TS EN 62552)	103
6.8 PU KÜRLENME AŞAMALARI (BASF)	103
6.9 PU BASMA FİKSTÜR SİSTEMLERİ (QS GROUP, 2017).....	104
6.10 POLİÜRETAN BASMA MAKİNESİ PRENSİP ŞEMASI (ÖZÇAM, 2007).....	105
6.11 KAPILAR İÇİN KULLANILAN POLİÜRETAN BASMA SİSTEMLERİ (MÜMİNOĞLU, 2015)	105
6.12 VİP'Lİ YAN PANEL MONTAJ GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2015)	107
6.13 VİP DENEME ÜRETİM HAZIRLIKLARI(MÜMİNOĞLU, 2015).....	107
6.14 VİP'Lİ KAPI MONTAJ VE PU ENJEKSİYON GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2015)	107
6.15 İKLİMLENDİRİLMİŞ TEST ODASI (MÜMİNOĞLU, 2015)	109
6.16 T TİPİ ISIL ÇİFT	109
6.17 ENERJİ VE PERFORMANS TESTLERİ YÜKLEME PLANI (MÜMİNOĞLU, 2015)	112
7.1 ISI KAZANCI ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE VİP'Lİ GÖVDEDE OLUŞAN YAŞLANMANIN 2. DERECE BİR POLİNOM SAL EĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016)	114

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.2 ISI KAZANCI ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE VİP'Lİ KAPIDA OLUŞAN YAŞLANMANIN 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	114
7.3 ENERJİ VE PERFORMANS TESTLERİNE HAZIRLANMIŞ ÜRÜN (MÜMİNOĞLU, 2016)	115
7.4 VİP'Lİ PROTOTİPE AİT ÖRNEK BİR ENERJİ GRAFİĞİ (MÜMİNOĞLU, 2015).....	118
7.5 ENERJİ TESTİ SONUÇLARININ VE DEĞİŞİMİNİN 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016)	119
7.6 ISI KAZANCI ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE VİP'Lİ DONDURUCUDA OLUŞAN YAŞLANMANIN 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....	119

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 1.7.2014'TEN İTİBAREN GEÇERLİ ENERJİ VERİMLİLİK SINIFLARI (EKO TASARIM TEBLİĞ SGM-2011/17, BİLİM, SANAYİ VE TEKNOLOJİ BAKANLIĞI, 2011).....	6
2.1 GELECEKTEKİ YÜKSEK PERFORMANSLI YALITIM MALZEMELERİ İÇİN ÖNGÖRÜLEN PERFORMANS.....	45
2.2 TEKNİĞİN VE TEKNOLOJİNİN GELDİĞİ NOKTADA ÜRETİLEN YALITIM MALZEMELERİNİN, GELECEĞİN YÜKSEK PERFORMANSLI YALITIM ÜRÜNÜ OLMA POTANSİYELİ	46
4.1 VİP'DE KULLANILAN BİR BARİYER FİLMİN KATMANLARI (SİMLER VE BRUNER, 2005B).....	60
4.2 VAKUM İZOLASYON PANELLERİNDE BARİYER FİMLERİN ISI İLETİM KATSAYISINA ETKİSİ (ERB. M. EİCHER VE PAULİ A.G, 2005).....	70
4.3 ÇOK KATMANLI POLİMER YAPILI BARİYER FİMLERİN 23 °C VE %50 RH KOŞULLARINDA GAZ VE NEM GEÇİRGENLİK DEĞERLERİ	76
4.4 ARRHENİUS DENKLEMİNDEKİ PRE EKSPONANSİYEL FAKTÖR VE AKTİVASYON ENERJİSİNİN SİMLER VE BRUNER'İN ELDE ETTİĞİ LABORATUVAR SONUÇLARINA GÖRE HESAPLANMASI (2005)	80
5.1 EV TİPİ SOĞUTUCULARIN KABİNLERİNDE KULLANILAN YAPI MALZEMELERİ (ASHRAE, 2002)	84
5.2 DONDURUCUDA KULLANILAN YAPI ELEMANLARI VE ÖZELLİKLERİ (MÜMİNOĞLU, 2016)	85
5.3 DONDURUCU ÜRÜNDE KULLANILAN VİP'LERE AİT ÜRETİCİ TEKNİK BEYANLARI (MÜMİNOĞLU, 2016)	85

ÇİZELGELER DİZİNİ (devam)

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.1 TESTLERDE KULLANILAN DONDURUCUYA AİT TEKNİK ÖZELLİKLER (MÜMİNOĞLU, 2016).....	93
6.2 EV TİPİ SOĞUTUCULARDA İKLİM SINIFLARI (TS EN 62552)	95
6.3 STANDARTLARCA BELİRLENEN DEPOLAMA SICAKLIKLARI (TS EN 62552) ...	95
6.4 BİRBİRİNDEN FARKLI 6 VİP NUMUNESİNDEN ALINAN ISI İLETİM KATSAYISI DEĞERLERİ. REFERANS PANEL BOYUTU 250 X 250 MM, ISI İLETİMİ W/MK BİRİMİNDİR (MÜMİNOĞLU, 2016)	97
6.5 POLİÜRETAN ISI İLETİM KATSAYISI DEĞİŞİMİ (MÜMİNOĞLU, 2015-2016)	99
6.6 POLİÜRETAN TEST RAPORU, YOĞUNLUK TESTİ (INDESİT LABORATUVARLARI, 2015).....	100
6.7 POLİÜRETAN TEST RAPORU, BASMA MUKAVEMET TESTİ (INDESİT LABORATUVARLARI, 2015).....	101
6.8 DONDURUCU ÜRÜNDE KULLANILAN VİP'LERİN BOYUT VE HACİMLERİ.....	106
6.9 DENEY PAKETLERİNİN BOYUTLARI VE KÜTLESİ (TS ISO EN 62552).....	110
6.10 ENERJİ TÜKETİMİNİN TAYİN EDİLMESİ İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SICAKLIĞI ŞARTLARI (TS ISO EN 62552)	111
7.1 VİP'SİZ VE VİP'Lİ ÜRÜNE AİT ISI KAZANCI ANALİZLERİ	113
7.2 VİP'Lİ ÜRÜN İLK ENERJİ TESTİ DEĞERLENDİRMESİ (MÜMİNOĞLU, 2015).....	116
7.3 ENERJİ TESTİ SONUÇLARI (MÜMİNOĞLU, 2016).....	116
7.4 ÖRNEK BİR ENERJİ TÜKETİM TESTİ RAPORU (MÜMİNOĞLU, 2015)	117

SİMGELER DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
α	Isıl dağılıma gücü, mm^2/s
A	Isı Transfer Yüzeyi Alanı, m^2
c_p	Özgül Isı $\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$
c_{pa}	Havanın Spesifik Özgül Isısı, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
d_g	Gaz molekülü çapı, m
d_t	Penetrasyon derinliği, m
e	Işınım yayılabilirlik katsayısı
E_a	Aktivasyon enerjisi, J/mol
E_b	Siyah cisim yayma gücü
g	Yer çekimi ivmesi, m/s^2
h	Akan Akışkanlar İçin Isı Transfer Katsayısı, $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
I	Işınımın şiddeti
k	Transfer Katsayısı
kB	Boltzmann sabiti
Kn	Knudsen sayısı

SİMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
g	Yer çekimi ivmesi, m/s^2
h	Akan Akışkanlar İçin Isı Transfer Katsayısı, $W/m^2 \cdot K$
I	Işınımın şiddeti
k	Transfer Katsayısı
k_B	Boltzmann sabiti
Kn	Knudsen sayısı
L	VİP çevre uzunluğu, m
l_{mean}	Havanın ortalama serbest yolu, m
Nu	Nusselt Sayısı
P_{app}	Uygulanan dış basınç, Pa
ΔP	Basınç Farkı
Δp_{wv}	Su buharı basınç farkı, Pa
P_g	Basınç, Pa
P_{init}	VİP'in iç basıncı, Pa

SİMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
P_{wv}	Su buharı kısmi basıncı, Pa
$P_{wv,sat}(T)$	Sıcaklığa bağlı su buharı doyma basıncı, Pa
Q	Isı Transfer Oranı, W
q	Isı Akısı, W/m^2
$Q_{wv,tot}$	Toplam su buharı transferi,
Ra	Rayleigh Sayısı
Re	Reynolds Sayısı
T	Sıcaklık, °C
$T_{effective}$	Efektif sıcaklık
T^+	Sıcak yüzeye ait sıcaklık, °C
T^-	Soğuk yüzeye ait sıcaklık, °C
ΔT_m	Logaritmik Sıcaklık Farkı
T_{ref}	Referans Sıcaklık
T_s	Yüzey Sıcaklığı, °C
t	Zaman, s

SİMGELER DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
V	Akışkan Akış Hızı, m/s
V _{eff}	VİP içindeki etkin gözenek hacmi, m ³



SİMGELER DİZİNİ (devam)Yunan Harfleri

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
B	Gaz molekülü ve katı gözenek duvar arasındaki enerji transferini karakterize eden sabit
β_a	Havanın termal genişleme katsayısı, 1/K
λ	Isıl İletkenlik, W/(m.K)
λ_{cd}	Malzeme iskeletindeki katı iletimi, W/(m.K)
λ_{cop}	Panel merkezindeki ısı iletimi, W/(m.K)
λ_{cv}	Gözeneklerdeki hava ve nem taşınımı, W/(m.K)
λ_{cr}	Kritik değer
λ_{eff}	Efektif ısı iletimi, mW/(m.K)
λ_g	Gazın iletkenliği, W/(m.K)
λ_{g0}	Serbest hava iletkenliği, W/(m.K)

SİMGELER DİZİNİ (devam)

λ_m	Gözenekli malzemenin ısı iletim katsayısı, W/(m·K)
λ_r	Gözenek yüzeylerindeki radyatif ısı transferi, W/m·K
λ_{tot}	Homojen bir yapıda ısı iletkenliği
μ	Dinamik Viskozite, kg/(m·s)
ρ	Yoğunluk, kg/m ³
ρ_a	Havanın yoğunluğu, kg/m ³
δ	Karakteristik sistem ölçüsü, nm
σ	Moleküler kesit alanı, m
σ	Stefan-Boltzmann sabiti, Watt/m ² ·K ⁴
ν	Kinematik viskozite, m ² /s
Ψ	Isı geçirgenliği, mW/(m·K)
$\varphi(x_w)$	Su içeriğine bağlı bağlı nem

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
3D	Üç Boyutlu
AB	Avrupa Birliği
AF	Aluminum Film
AGA	American Gas Associations
AR-GE	Araştırma ve Geliştirme
AŞ	Anonim Şirketi
CFD	Computational Fluid Dynamics
EU	European Union
EPS	Expandiertes Polystyrol
FDM	Faz Değiştiren Malzemeler
GTO	Gaz Taşınım Oranı
GYP	Gaz Yalıtım Paneli
HTO	Hava Taşınım Oranı

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

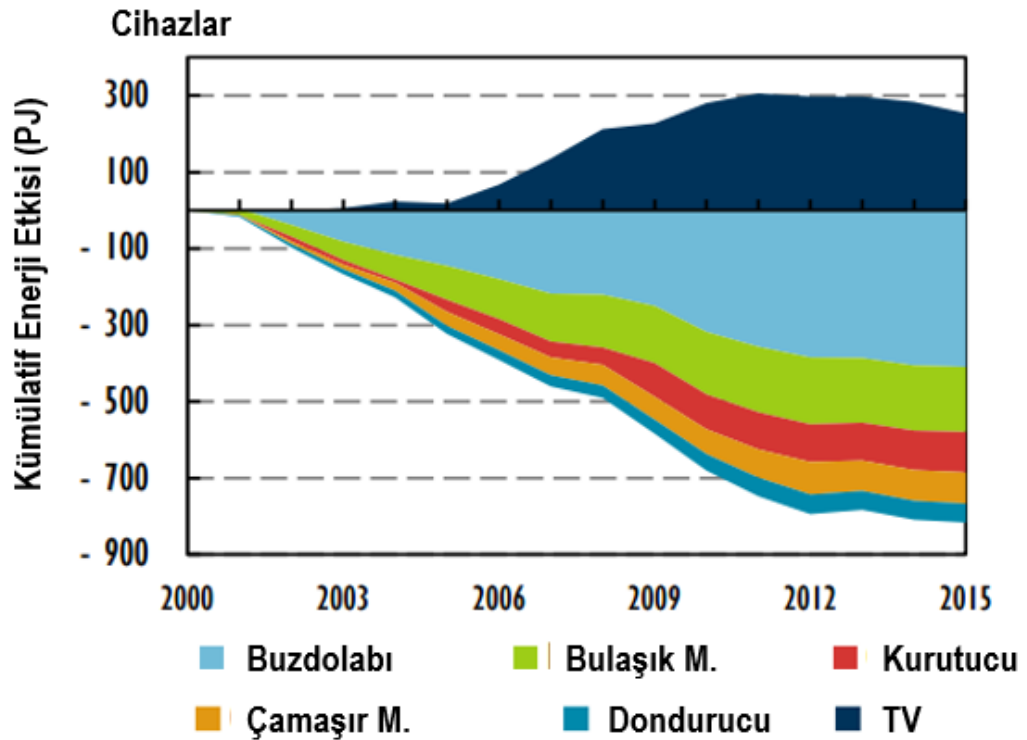
<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
HDPE	High Density Polyethylene
LDPE	Low Density Polyethylene
HİPTI	High Performance Thermal Insulation
IEA	International Energy Agency
ECBCS	Energy Conservation in Buildings and Community Systems
IVIS	International Vacuum Insulation Symposium
MF	Metalized Film
NRC	National Research Council Canada
OTR	Oxygen Transfer Ratio
PE	Polietilen
PE-HDD	High Density Polyethylen
PE-LD	Low Density Polyethylen

KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

PET	Polietilen Terapalat
PLC	Programmable Logic Controller
PP	Polipropilen
Ppm	Particule Per Million
PS	Polystren
PUR	Polyurethane
RH	Relative Humidty
SI	Uluslararası Birim Sistemi
US	United States
XPS	Extrudiertes Polystyrol
VIP	Vacuum Insulation Panel
VİP	Vakum İzolasyon Paneli
WVTR	Water Vapor Transfer Rate

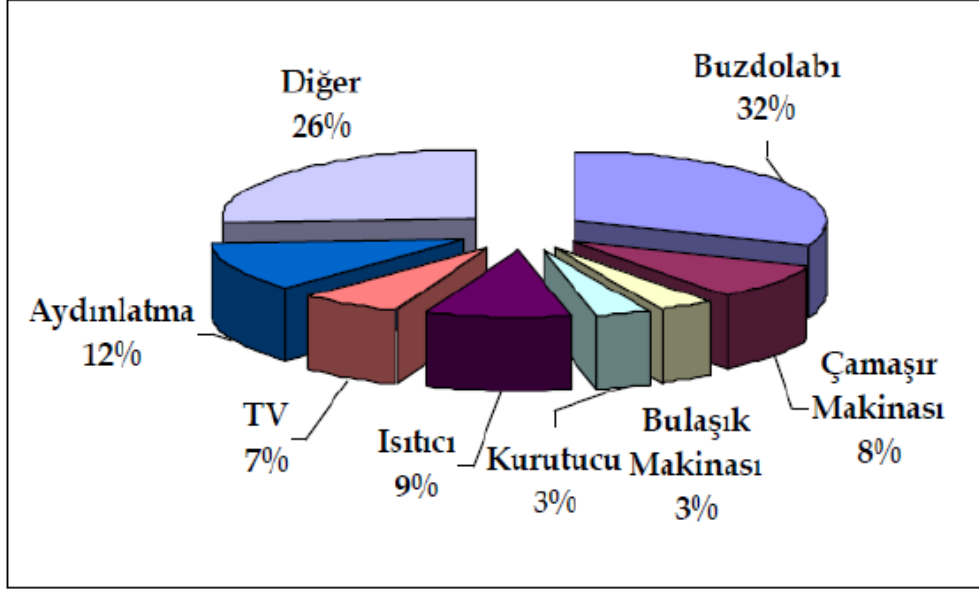
1 GİRİŞ

Günümüzde enerji tüm ekonomik ve sosyal politikaların önemli bir belirleyicisi, enerji sektörü ise kalkınmanın temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir. Rezervlerin tükenmekte olduğu bugünlerde, mevcut enerji tüketimini rasyonel bir şekilde planlamak ve enerji tasarrufuyla tüketimi azaltmak ülkelerin gündeminde önemli bir yer teşkil etmektedir. Tüketiciler, çeşitli organizasyonlar ve devletlerin beyaz eşyalarla ilgili en büyük beklentisi daha az enerji harcayan ve bu sayede çevreye daha az zarar veren ürünlerin geliştirilmesidir. Bu amaçla birçok ülkede beyaz eşyalarda enerji tüketimi ve enerji verimlilik sınıfları ile ilgili düzenlemeler, yasalar ve destekler sürekli olarak güncellenmektedir. Bu destek ve güncellemelerin sonucu olarak elektrikli ev aletlerinde 2000-2015 yılları arasında oluşan enerji tüketimi değişim trendi Şekil 1.1’de gösterilmektedir (IEA, 2016).



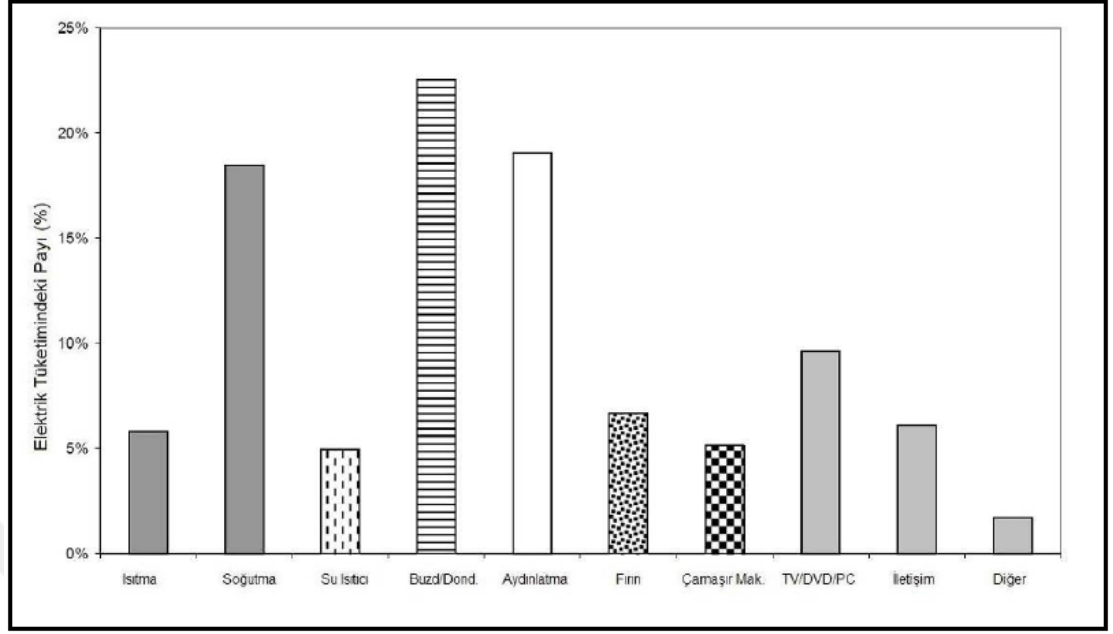
Şekil 1.1 Elektrikli ev aletlerinin global enerji tüketim trendleri (IEA, Energy Efficiency Market Report, 2016)

Ülkemizin konutlarda elektrik enerjisi tüketim yapısı, konuttan konuta, ailenin gelir seviyesi ve cihaz altyapısına göre büyük değişiklikler göstermekle birlikte Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği'nin verilerine göre; konutlarda kullanılan elektriğin %85'i elektrikli ve elektronik eşyalar tarafından tüketilmektedir ve ev içi elektrik tüketimdeki en yüksek pay %32 ile soğutuculara aittir (Şekil 1.2).

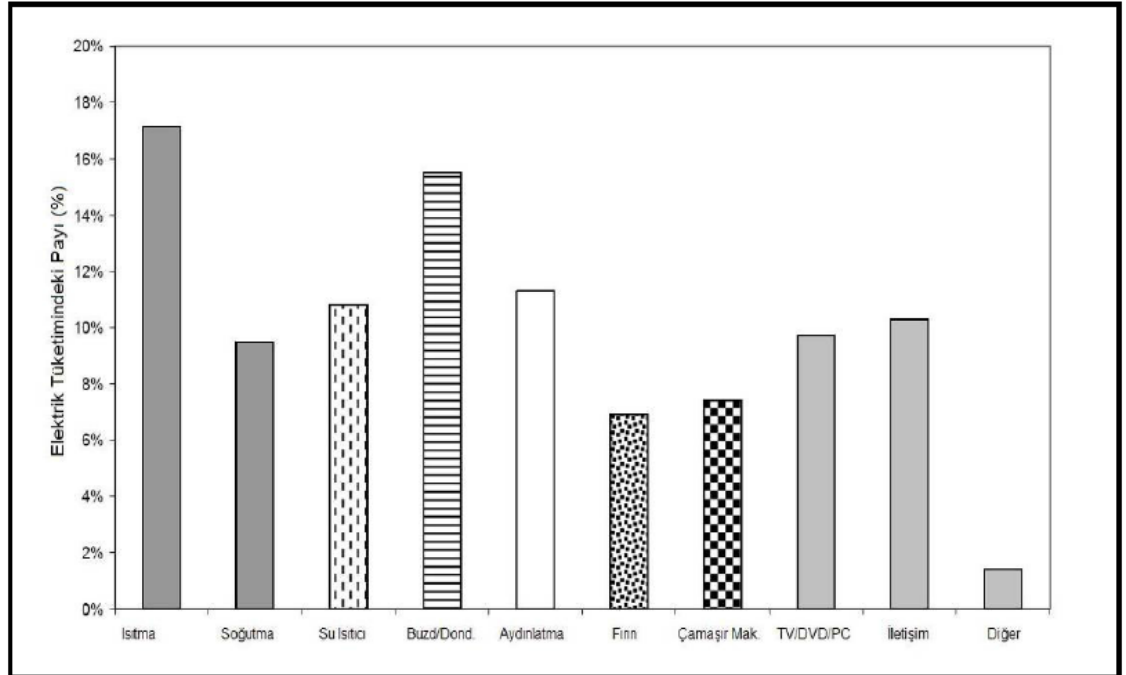


Şekil 1.2 Konutlarda elektrik tüketimi (Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği, 2011)

Dünya çapında ise farklı kültürler ve coğrafi koşullar göz önüne alındığında, konutlarda tüketilen enerjinin kullanım alanlarına göre dağılımı ülkeler arasında farklılık göstermektedir. Şekil 1.3 ve Şekil 1.4'de farklı ülkeler için konutlarda tüketilen enerjinin, kullanım alanlarına bağlı olarak toplam enerji tüketimindeki dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 1.3 Gelişmiş ülkelerde, kullanım alanlarına bağlı olarak konutlarda elektrik tüketim payları tahmini (IEA, 2007)



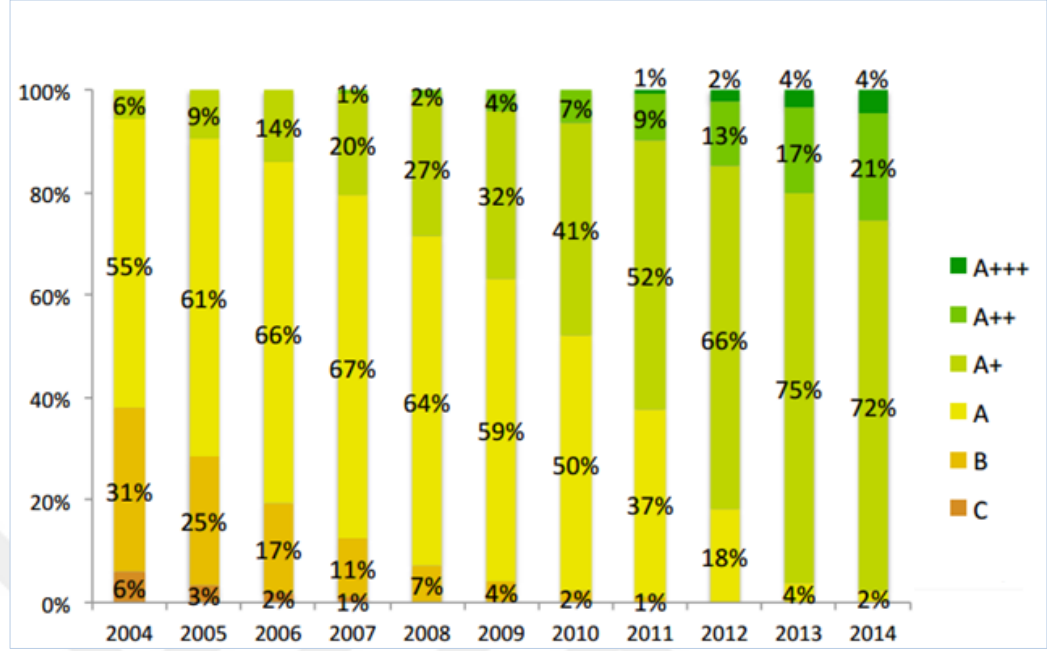
Şekil 1.4 Gelişmekte olan ülkelerde, kullanım alanlarına bağlı olarak konutlarda elektrik tüketim payları tahmini (IEA, 2007)

Dünya genelinde yapılan çalışmalar sonucunda elektrikli ev aletlerinin enerji tüketiminde ciddi iyileştirmeler elde edilmiştir. Bugünün en iyi buzdolabı 1990'lı yıllara göre %75, çamaşır makinesi 1985'lerde çıkan modellere göre yaklaşık olarak enerjide %50 ve su tüketiminde %60 tasarruf sağlamaktadır. Benzer şekilde bulaşık makineleride 1980 yılında ortalama 2 kWh harcarken 2004'te enerji tüketimi yarı yarıya ve su tüketimi ise üçte bire düşmüştür. AB tarafından yapılan bir başka çalışma sonuçlarına göre, 2000 yılında 7 farklı ev aletinin tükettiği elektrik enerjisi miktarı 250 TWh olmuştur ve bu 1990 yılında 30 TWh değerinin altındadır.

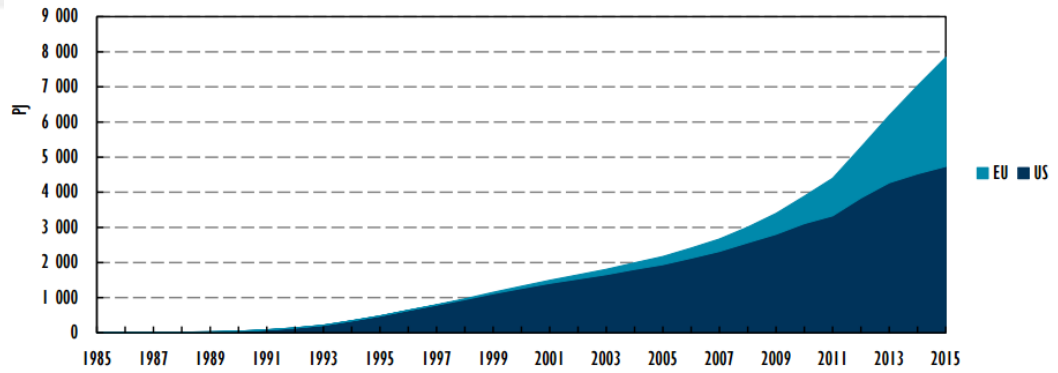
ENERJİ SINIFI	B	A	A+	A++
A++	-%56	-%40	-%29	0
A+	-%38	-%15	0	%40
A	-%27	0	%18	%66
B	0	%36	%61	%126

Şekil 1.5 Ev tipi soğutucularda enerji verimlilik değerlerinin kıyaslanması

Şekil 1,6'da 2004-2014 yılları arasında satın alınan buzdolabı verimliliklerinin sürekli iyileştiği görülmektedir. Bu dönemde ortalama verimlilik artışı 34% olarak gerçekleşmiştir. 2004 yılında A ve B enerji sınıfı ürünler piyasayı domine ederlerken, 10 yıl içerisinde A+ enerji sınıfı ürünler pazarın büyük çoğunluğunu ele geçirmişlerdir. 2009 yılında yayımlanan Eko Dizayn direktifleri A, B, C sınıfı ürünlerin pazardan kaybolmasını sağlamakla beraber A++ ve A+++ ürünlerin pazarda yer bulmasını sağlamıştır.



Şekil 1.6 AB Verimliliklerine göre buzdolabı satışları (Topten International Services, 2015)



Şekil 1.7 AB ve ABD’de beyaz eşya standartlarının kazanımı olan enerji tasarrufu grafiği (IEA Energy Efficiency Market Report, 2016)

Görüldüğü üzere beyaz eşya sektöründeki genel eğilim daha az enerji tüketen cihazlar tasarlamaktır. Avrupa Ev Eşyaları Üreticileri Komitesinin (CECED) verileri incelendiğinde, soğutucu ve dondurucularda 1990’lardan itibaren enerji tüketim sınıfları ve enerji verimlilik indekslerinde yapılan değişiklikler ve tanımlamalar sürekli bir gelişim göstermektedir. Günümüzde ev tipi soğutucu ve dondurucularda A+ enerji sınıfı için verimlilik indeksi 42 ve A++ için 30 değerine kadar düşmüştür.

Çizelge 1.1 1.7.2014'ten itibaren geçerli enerji verimlilik sınıfları (Eko Tasarım Tebliğ SGM-2011/17, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, 2011)

Enerji Verimlilik Sınıfı	Enerji Verimlilik Endeksi
A+++ (en verimli)	$EEI < 22$
A++	$22 \leq EEI < 33$
A+	$33 \leq EEI < 42$
A	$42 \leq EEI < 55$
B	$55 \leq EEI < 75$
C	$75 \leq EEI < 95$
D	$95 \leq EEI < 110$
E	$110 \leq EEI < 125$
F	$125 \leq EEI < 150$
G (en az verimli)	$EEI \geq 150$

Kompresörlü soğutma cihazları

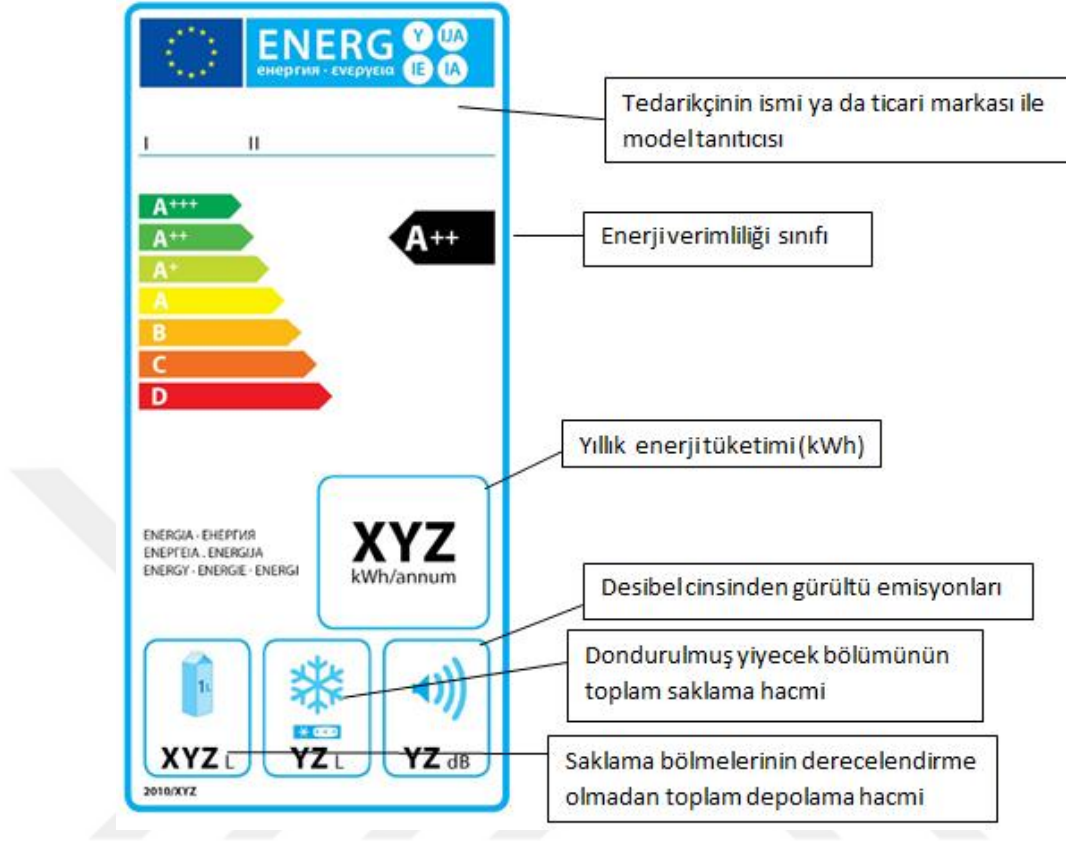
Uygulama tarihi	Enerji Verimlilik Endeksi (EEI)
Yürürlüğe girdiği tarih	$EEI < 55$
1 Temmuz 2012	$EEI < 44$
1 Temmuz 2014	$EEI < 42$

Absorpsiyonlu ve başka tip soğutma cihazları

Uygulama tarihi	Enerji Verimlilik Endeksi (EEI)
Yürürlüğe girdiği tarih	$EEI < 150$
1 Temmuz 2012	$EEI < 125$
1 Temmuz 2015	$EEI < 110$

A+++’dan D’ ye kadar olan 7 enerji sınıfı Çizelge 1.1’de bulunmaktadır. A+ altı ürünlerin EU ve Türkiye pazarındaki satışı yeni gelen güncellemelerle yasaklanmıştır. Renklendirilmiş oklar enerji verimliliğini en düşük enerji sınıflı üründen itibaren sınıflandırır: Yeşil en yüksek enerji verimliliği sınıfını, kırmızı ise en düşük enerji verimliliği sınıfını göstermektedir. Piktogramlarla belirlenmiş olan performans ve özellikler belirtmektedir:

- Yıllık enerji tüketimi (kWh)
- Gürültü emisyonları (dBA)
- Tüm saklama bölmelerinin kapasitesi (litre)
- Dondurulmuş yiyecek bölmelerinin kapasitesi (litre)



Şekil 1.8 Örnek buzdolabı enerji etiketi

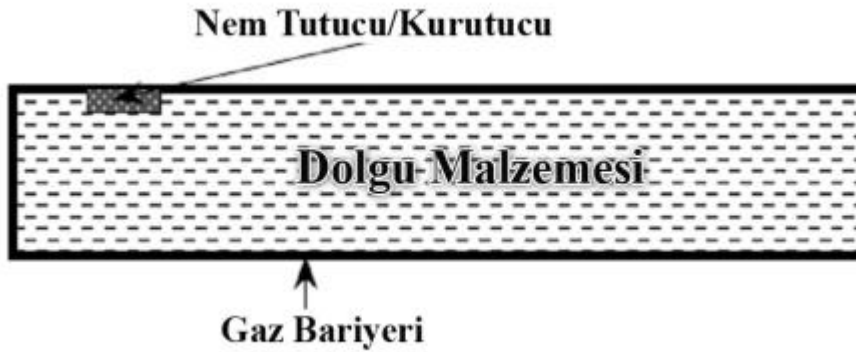
Enerji sınıflandırması, aşağıdaki kriterlere göre hesaplanan enerji verimliliği indeksine dayanmaktadır:

- Yıllık enerji tüketimi
- Hacim
- Soğutma sistemi (no frost veya statik)
- Farklı bölmelerdeki en düşük sıcaklık
- Buzdolabı türü (ankastre veya solo)

Soğutucuların enerji tüketimini etkileyen en önemli unsurlardan biri gövde yalıtımıdır. Bu noktada ısı yalıtım malzemeleri çeşitli özelliklerinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Yalıtım malzemeleri, başta kullanım yerleri ve yalıtım katsayıları olmak üzere birçok çeşitliliğe sahiplerdir. VİP'ler ise, klasik yalıtım malzemelerine göre on

kata kadar daha düşük ısı iletim katsayıları ile dikkat çekmektedirler. Bu paneller, özellikle enerji ihtiyacı fazla ve tasarruf gereksinimi olan yerlerde daha kullanışlıdır ve günümüzde özellikle beyaz eşya ve inşaat gibi sektörlerde kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Geleneksel yalıtım malzemelerinde, yalıtımı genellikle malzeme içerisindeki hava sağlar. Dolayısıyla bu durum malzemenin performansını, havanın ısı iletim katsayısı olan $25 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ değeri ile sınırlandırır. Vakum izolasyon panelleri, gözeneklerden oluşan bir iç dolgu malzemesinin, dolgu malzemesi karakterine bağlı olarak gaz giderici malzeme kullanılarak ya da tek başına bir dış zarfın içine konularak vakumlanması ve sızdırmazlığı sağlanarak atmosfere kapatılması ile üretilirler.



Şekil 1.9 Bir Vakum İzolasyon Panelinin Şematik Gösterimi

Kullanılan iç dolgu malzemelerinin ısı iletim katsayıları, atmosfer basıncında klasik yalıtım malzemeleriyle benzer değerlerde olmakla beraber, vakumlu ortamlarda klasik yalıtım malzemelerine göre çok daha düşük değerler elde edilebilmektedir. İdeal bir VIP'den; ısı iletim katsayısının düşük olması, kritik basınç değerinin yüksek olması, poliüretan malzeme ile kullanılabilir olması, kolay üretilbilir olması, çevre dostu ve geri dönüşümlü olması beklenir.

Beyaz eşya pazarı uzun bir süredir ivmeli olarak büyümekte ve günümüzün ihtiyaçlarına göre sürekli olarak kendini yenilemektedir. Bu yenilenme süreci içerisindeki en büyük araştırma ve geliştirme konusu, daha düşük enerji tüketen ürünlerin tasarlanmasıdır.

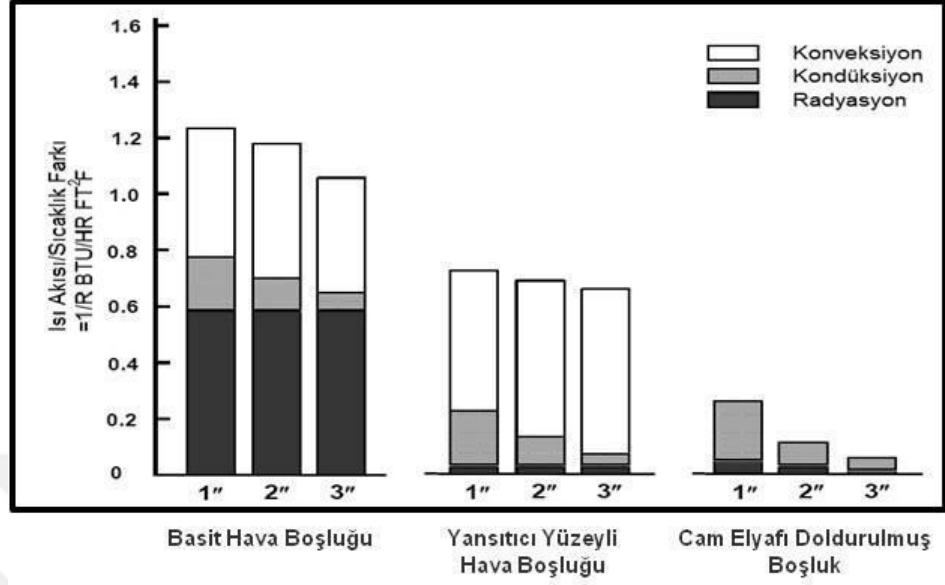
Bu çalışmanın asıl amacı, düşük enerji sınıfı tasarımlarıyla üretilen ev tipi soğutucu ve dondurucularda yeni nesil yalıtım malzemeleri kullanarak üretilen prototiplerin standartlar açısından uzun dönemli performans, verimlilik ve yaşlanmalarının değerlendirilmesidir.



2 ISI YALITIMI VE ISI YALITIM MALZEMELERİ

Isı yalıtımı insanlık tarihiyle yaşıt bir kavram olmakla beraber insanoğlu doğanın olumsuz etkilerinden korumak için hayvan postlarına sarmakla ilk ısı yalıtımı önlemlerini almıştır. 1880’lerde soğuk hava deposu imalatının başlamasıyla beraber, soğutmanın uzun süre korunumu için ısı yalıtım malzemelerine ihtiyaç olduğu ve geleneksel inşaat malzemeleri ile bu görevin yerine getirilemeyeceği anlaşılmıştır. Bu malzemeler genel olarak, "Isı Yalıtım Malzemesi" olarak adlandırılmış, ancak zamanla her yalıtım malzemesinin her tip uygulamada kullanılamayacağı ortaya çıkmıştır. 20. yüzyıl başlarında Almanya seri halde ısı yalıtım malzemeleri üretmeye başlamış ve böylelikle ısı yalıtımı konusunda bilgi toplama ve araştırmalar hız kazanmıştır.

Günümüzde endüstriyel uygulamalar ve yapılara yönelik yüksek performanslı ısı yalıtım malzemeleri ve sistemlerinin gelişimi için büyük Ar-Ge çalışmaları yapılmaktadır. ABD, Japonya ve Almanya gibi teknolojik olarak gelişmiş ülkeler araştırmalarını enerjinin verimli kullanımı ve ısı yalıtımı konularında yoğunlaştırmışlardır. Bu konuda ilerlemeler sağlanması, hava boşlukları boyunca ısı transfer mekanizmasının iyi anlaşılmasına bağlıdır. Hava boşlukları boyunca olan ısı akışı da konveksiyon ve radyasyondan kaynaklıdır.



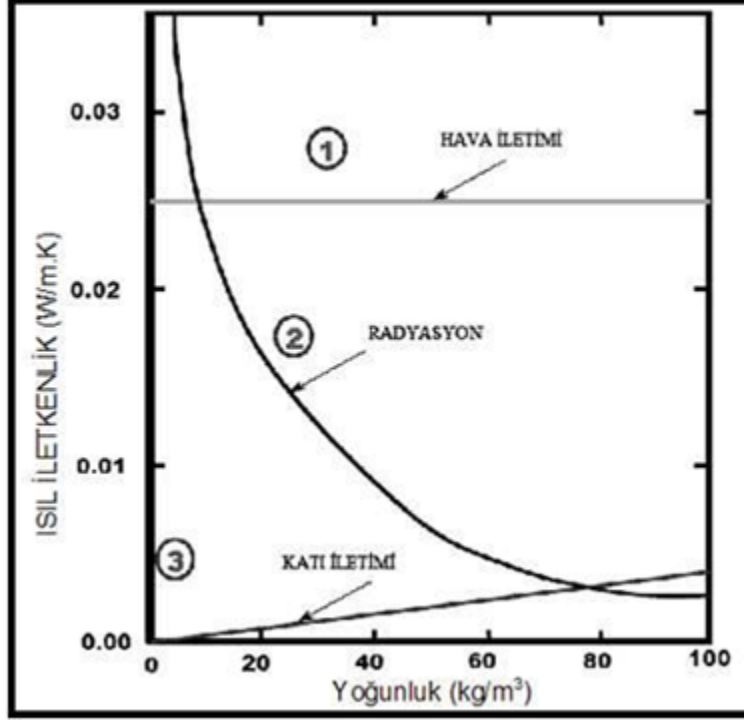
Şekil 2.1 Radyasyon, iletim ve taşınımın hava boşluğundaki ısı transferine etkisi (Shirtliffe, 1972)

Bununla birlikte, hava boşluğunda bir yansıtıcı yüzey, giriş ısı akışı radyasyon etkisini minimum seviyeye indirebilir. Ayrıca cam elyafı benzeri bazı lifli maddelerin eklenmesi boşluk içerisindeki hava akışını sınırlayarak, ısı akışını neredeyse tamamen ortadan kaldırabilir.

Herhangi bir geleneksel yalıtım malzemesinde ısı akışının; hava iletimi, katı iletimi ve radyasyon olmak üzere üç temel bileşeni vardır (Şekil 2.2). Katı iletim ve radyasyon yalıtım malzemesinin yoğunluğuyla ilişkilidir. Malzemedeki ısı iletimi ısı iletkenliği havanınkinden düşük bir gazın havayla yer değiştirmesiyle azaltılabilir. Yalıtım malzemesinin içindeki hava basıncı azalması ısı yalıtımını artırır. Malzeme içerisindeki hava basıncının azalmasıyla yalıtımın arttığı bilinen bir olgudur ve bu durum ısı yalıtım malzemelerinin gözenek büyüklüklerinin etkisinin bir fonksiyonudur. Gözenek boyut etkisinin azalmasıyla birlikte havanın ısı iletkenliği azalmaktadır.

Kullanılan iç dolgu malzemelerinin ısı iletim katsayıları, atmosfer basıncında klasik yalıtım malzemeleriyle benzer olmakla beraber, vakumlu

ortamlarda klasik yalıtım malzemelerine göre çok daha düşük değerlere ulaşabilmektedirler. Yapılan farklı araştırmalar, gözenekli bir malzeme içindeki gaz basıncının azalmasıyla ısı yalıtım potansiyelinin arttığını göstermektedir.



Şekil 2.2 Geleneksel (elyaf, köpük vb.) yalıtımda ısı transfer mekanizmaları (Kistler, 1935)

2.1 Yalıtım Malzemelerinde Isı Transferi

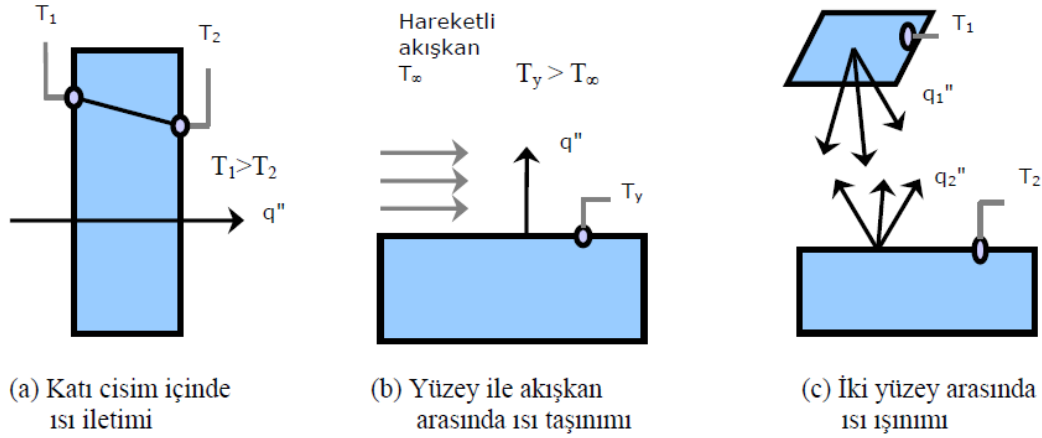
Isı transferi, sıcaklıkları farklı iki veya daha fazla nesne arasında iletim, taşınım ya da ışınım yoluyla (veya bu sistemlerin kombinasyonları yoluyla) gerçekleşen enerji transferidir. Madde alış verişi olmaksızın yalnızca sıcaklık farkından meydana gelen bu enerji transferi “Isı Transferi” olarak tanımlanır. Termodinamiğin ikinci kanununa göre; ısı sıcak bir sistemden daha soğuk bir sisteme doğru kendiliğinden akar. Termodinamik, bu ısı transferinin nasıl ve ne hızda olduğuyla ilgilenmez zira termodinamikte zaman bir değişken olarak ele alınmaz. Termodinamik denge durumundaki sistemler ile ilgilenir. Geçen ısı doğrudan doğruya ölçülemez, ama oluşturduğu etkiler ölçülebilir.

Isı transferi bilim dalı, termodinamiğin birinci ve ikinci, kütlelenin korunumu ve Newton'un ikinci hareket kanunlarına ilave üç özel kanun yardımı ile ısı transferini inceleyerek, ısı transferini etkileyen faktörleri belirler ve bu faktörler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade eder. Çözüm olarak da analitik, sayısal, deneysel ve benzeşim yöntemlerinden biri veya birkaçını kullanır.

Genel olarak katı maddelerde, ısı enerjisinin bir molekülden ya da atomdan diğerine geçmesi ile meydana gelen ısı transferine "Isı İletimi" denir. Yani madde veya cismin bir bölgesinden başka bir bölgesine ısının iletilmesi ile oluşan ısı transferidir. Hareketsiz bir ortamda veya cisimde belirli bir sıcaklık gradyeni mevcutsa ısı transferi için "iletim" terimi kullanılır. Bu ortam katı ya da akışkan olabilir. Yoğun maddeler genelde iyi iletkenlerdir; mesela metaller çok iyi iletkenlerdir. Isı transferi ise her zaman yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru gerçekleşir.

Sıvı ve gazlarda ısı enerjisinin, moleküllerin hareketleri sonucu nakledilmesi ile oluşan ısı transferine "Isı Taşınımı" denir. Yani katı yüzey ile akışkan arasında gerçekleşen ısı transferidir. Akışkan içindeki akımlar vasıtası ile ısı transferi meydana gelir. Akışkan içindeki veya akışkanla sınır yüzey arasındaki sıcaklık farklarından ve bu farkın yoğunluk üzerinde oluşturduğu etkiden doğabilmektedir.

Belirli bir sıcaklığa sahip yüzeyler elektro manyetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Farklı iki sıcaklıktaki yüzeyler arasındaki ısı transferi, yüzeyler arası engelleyici bir ortam olmadığında gerçekleşir. Katıların, sıvıların ve gazların ısı enerjisini elektro manyetik dalgalar şeklinde yayınladıkları veya yuttukları bu ısı transferi şekline "Isı Işınımı" denir. Yani ışınım yolu ile ısı transferi, elektromanyetik radyasyon - fotonlar yolu ile olan ısı transferidir.



Şekil 2.3 İletim, taşınım ve ışıınım ile ısı geçiş şekilleri

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi, (a)’da yüzey sıcaklıkları farklı katı cisim içinde iletimle ısı transferi, (b)’de sıcaklıkları farklı yüzey ve akışkan arasında taşınım ile ısı transferi ve (c)’de iki yüzey arasında ışıınım ile ısı transferi meydana gelmektedir. Herhangi bir ısı transferi mekanizması; bu üç durumun yalnızca biri veya kombinasyonları ile meydana gelebilir.

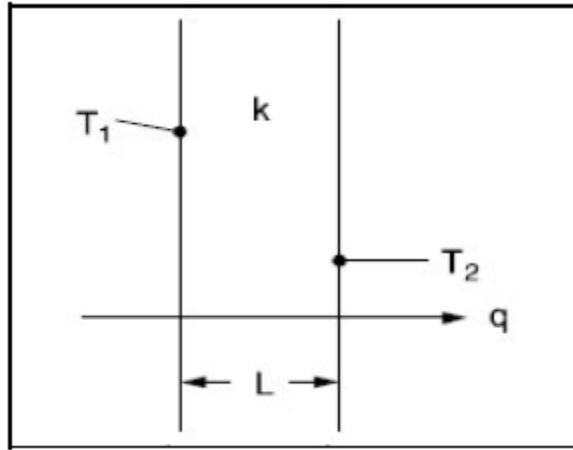
2.1.1 İletim yoluyla ısı transferi

Isı iletimi katı veya akışkan durağan bir ortam içinde, sıcaklık farkı oluşması durumunda meydana gelen ısı transferidir. İletim kelimesi, atomik ve moleküler ısı transferini akla getirmelidir. Çünkü ısı transferi esasen atomik ve moleküler düzeydeki hareketlerle birbir ilişkilidir. İletim bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklardan daha düşük enerjili parçacıklarına, bu parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin aktarımı olarak da düşünülebilir. Yüksek enerjili moleküller her zaman daha yüksek sıcaklıktadırlar ve bu moleküller sürekli olarak çarpışırlarken, daha çok enerjili moleküllerden daha az enerjili moleküllere bir enerji aktarımı gerçekleşir. Bir sıcaklık farkı olması durumunda, sıcaklığın azaldığı yönde iletim ile enerji aktarımı ve ısı transferi gerçekleşir (Incropera, 2003).

Isı transferi mekanizması an denklemleri ile incelenebilir. Isı iletimi için an denklemi, Fourier Yasası olarak bilinir. Bu denklemler, birim zamanda aktarılan enerji miktarını hesaplamak için kullanılırlar. Şekil 2.4’de görülen düz duvar için an denklemi, denklem 2.1 ile ifade edilir.

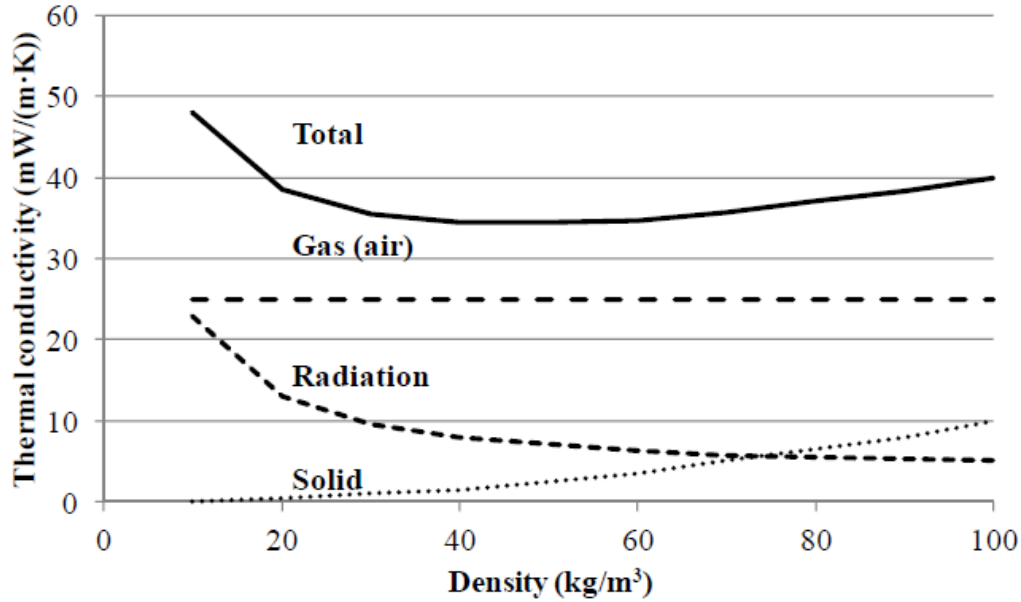
$$q' = -k \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.1)$$

Burada k malzemenin ısı iletim katsayısı, dT ise malzemenin iki duvarı arasındaki sıcaklık farkını ifade ederken, dx terimi de duvarın iki yüzeyi arasındaki x yönündeki uzaklığı belirtir. q' ifadesi, x yönündeki ısı akısındır ve birimi W/m² dir.



Şekil 2.4 İletim yoluyla bir boyutlu ısı transferi gerçekleşen duvar

Farklı katı maddelerin ısı iletimleri arasında katı maddenin sahip olduğu fiziksel özelliklerden ötürü farklılıklar bulunur. Malzemedeki ısı iletimini azaltmak için buna uygun bir katı malzeme belirlenmelidir. Şekil 2.5’de gösterildiği gibi yoğunluk azaldıkça katılardaki ısı iletimi de azalmaktadır. Katı maddeye ait ısı iletimi değişmez fakat belirli bir kesitte ki malzeme miktarı azalır ve bu nedenle gözenekli malzemeye ait ısı iletimi azalır. Tam aksi şekilde azalan yoğunluklar ışınım yoluyla gerçekleşen ısı transferini artırır. Şekil 2.5 ayrıca yoğunluk ve ısı transfer mekanizmaları arasındaki ilişki açıklanmaktadır.



Şekil 2.5 Gözenekli malzemelerdeki ısı iletiminin katı ve gaz halinde yoğunlukla beraber değişimi (Simmler, 2005)

Gazlarda ısı iletimi katı ve sıvılara benzer şekilde gazın türüne göre bir değişiklik gösterir. Daha düşük değerler elde etmek için, ya düşük iletimi olan bir gaz tercih edilmeli ya da gazın ısı iletimi azaltılmalıdır. Farklı türdeki gazların ısı iletkenlikleri ve molekül kütlesi Şekil 2.6'da verilmiştir.

Gas	Thermal conductivity, λ [mW/(m·K)]	Molar weight [g]
Air	25.5	29
Nitrogen, N ₂	24.1 (0°C)	28
Argon, Ar	16.2 (0°C)	40
Carbon dioxide, CO ₂	16.2 (25°C)	44
R-11, CFC ₁₃	8.3 (30°C)	137

Şekil 2.6 Çeşitli gazların ısı iletimi ve molekül ağırlıkları (AGA, 1985)

Gazlar üzerinden oluşan ısı iletimi malzeme gözenekli boyutları küçültülerek azaltılabilir. Gaz molekülü ve katı maddenin birbirine yakın olarak bulunduğu elastik bölgelerde, gaz moleküllerinin birbiriyle temas halinde olduğu kısımlara göre daha düşük bir ısı transferi oluşur. Küçük gözenekli yapılar gas molekülleri arasındaki teması azaltarak ısı iletimini azaltır. Bu durum Knudsen etkisi olarak tanımlanmış olup, Knudsen sayısı Kn ile 2.2 ve 2.3’de gösterilen denklemlere göre hesaplanabilir (Baetens et al, 2011).

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{g0}}{1+2\beta Kn} \left(\frac{W}{m.K} \right) \quad (2.2)$$

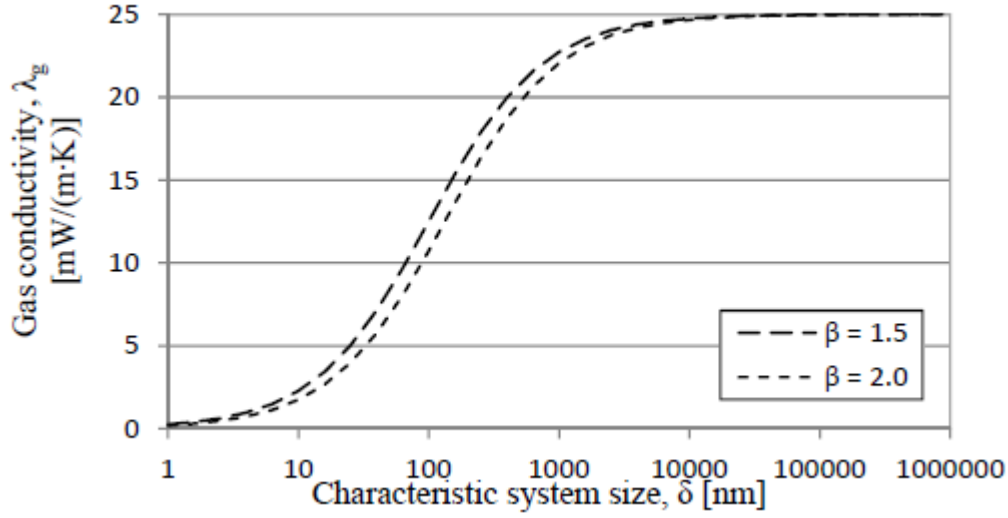
$$Kn = \frac{l_{mean}}{\delta} \quad (-) \quad (2.3)$$

δ [m] karakteristik sistem ölçüsü olmak üzere, l_{mean} [m] paralel iki düzlem arasındaki mesafeyi, g_0 [W/(m·K)] ise gazın serbest dolaşımı sırasındaki iletimi ve β [-] gaz molekülü ve katı yüzey arasında uzaklığa bağlı değişen sabit bir katsayıyı ifade eder (Baetens et al, 2011).

Gazdaki ısı iletimi ortalama serbest yol ve gözenek boyutuna bağlı bir değişim gösterir. Ortalama serbest yol l_{mean} , bir molekülün diğer bir moleküle ulaşana kadar geçirmesi gereken mesafeyi gösterir. Bu uzaklık Denklem 2.4’te gösterildiği gibi hesaplanır.

$$l_{mean} = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \cdot \sigma \cdot P_g} \quad (m) \quad (2.4)$$

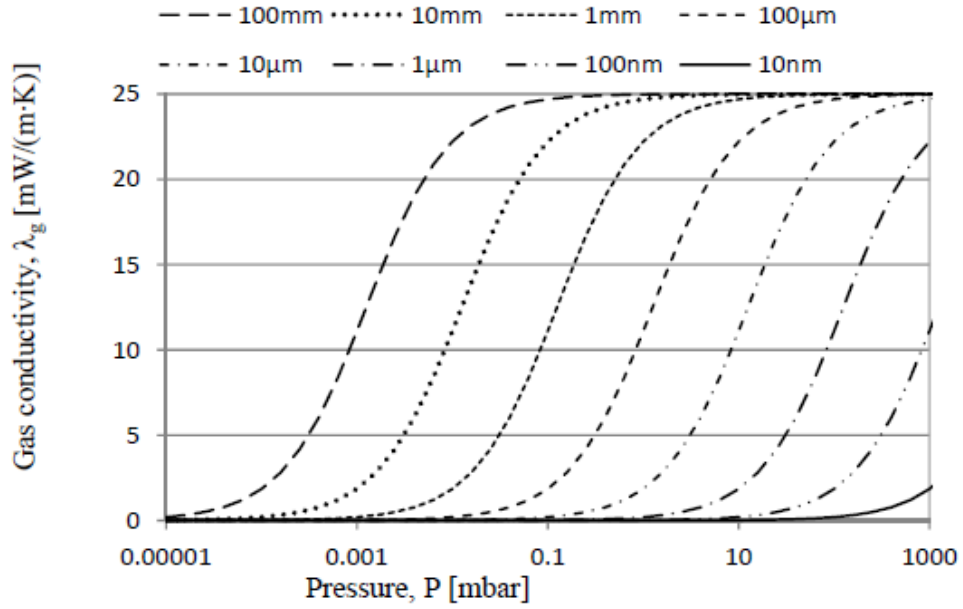
Burada T [K] sıcaklık, P_g [Pa] basınç, σ [m] moleküler boyutta kesit ve k_B [1.38·10⁻²³ J/K] Boltzmann sabitidir. Havanın iki temel yapı taşı Nitrojen ve Oksijen için moleküler kesit alanı yaklaşık olarak 0.4 nm² (Engel and Reid, 2006) ve ortalama serbest yol yaklaşık olarak 70 nm’dir (20°C and 100 kPa). Karakteristik sistem boyutunun gaz iletimi üzerindeki etkisi Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2.7 Hava için karakteristik sistem boyutlarının fonksiyonu olarak hesaplanmış gaz iletimi

Karakteristik sistem boyutunu tespit etmek güç olsa da gözenek boyutuyla bir korelasyon halindedir. Bununla beraber gözenek boyutları arttıkça ısı iletimi gazın standard iletim değerine yaklaşır. Knudsen etkisi gözenek boyutları 10000 nm'den büyük yapılar için ihmal edilebilir.

Düşük basınçlarda ısı iletimi üzerindeki etkisi gözenek boyutuyla önemli derecede ilişkilidir. Denklem 2.4'te, basıncın da ortalama serbest yol hesabında önemli bir faktör olduğu gösterilmektedir. Düşük basınçlar daha uzun ortalama serbest yol verirler bu durum Knudsen etkisini artırır. Denklem 2.2 ve denklem 2.3'de görüldüğü üzere ortalama serbest zamanın artması Knudsen etkisini de etkileyecek ve dolayısıyla gaz iletimini düşürecektir.



Şekil 2.8 Hava için Denklem 2.2, 2.3 ve 2.4'e göre farklı karakteristik sistem boyutlarına göre hesaplanmış gaz iletimi.

2.1.2 Isı taşınımı

Bilinen bir diğer ısı transfer mekanizması ısının taşınım yoluyla transferidir. Taşınım ile ısı transferi, bir akışkan içinde, iletimin ve madde hareketinin birleşik etkileri ile oluşan enerji transferi olarak tanımlanır. Taşınım ile ısı transferi iki mekanizmadan oluşmaktadır. Rasgele moleküler hareket sonucunda enerji transferinin yanı sıra, akışkanın kitle veya mikroskobik hareketi ile de enerji transferi oluşturur. Bu akışkan hareketi herhangi bir anda, çok sayıda molekülün topluca veya kümelenmiş olarak hareket etmesinden ileri gelir. Bir sıcaklık gradyanı oluşması durumunda bu hareket ısı akışına katkıda bulunur (Incropera, 2003).

Gözenekli malzemelerdeki ısı taşınımı, gözenek içerisinde ve makro düzeyde malzeme üzerinde olmak üzere ikiye ayrılır. EPS gibi kapalı gözenek sistemler için makro düzeyde taşınım oluşmaz ve belirli boyutların altında gözeneklerde, gözenek hücre taşınımı hücre duvarlarındaki düşük sıcaklık farklarından ötürü ihmal edilebilir. Dolayısıyla bu durum, taşınım yoluyla ısı

transferinin kapalı gözenek sistemlerinde genellikle ihmal edilebileceği anlamına gelir. Açık hücreli cisimlerde makro düzeydeki taşınım dikkate alınır seviyededir ve ihmal edilemez.

Makro düzeydeki ısı taşınımı doğal veya zorlandırılmış halde oluşabilir. Doğal taşınımda oluşan hava hareketi sıcaklık farkının sonucunda oluşan yoğunluk farkından meydana gelirken zorlandırılmış taşınımda basınç farkı fan ve benzeri bir dış etkenden kaynaklanır.

Doğal taşınım denklem 2.5'te verilen Rayleigh sayısı fonksiyonu olarak 2.6'te aktarılan Nusselt sayısı ile ifade edilir. Nusselt ve Rayleigh sayıları arasındaki ilişki genellikle belirli geometriler ve sınır şartları için belirlenmiş deneysel formüller olarak ifade edilebilir.

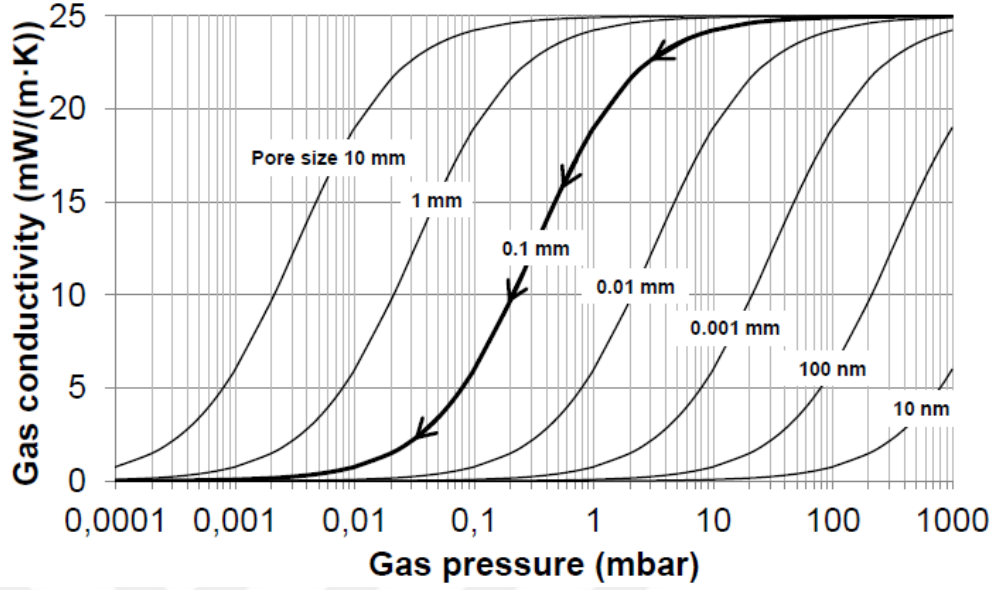
$$Ra_m = \frac{\rho_a \cdot c_{pa} \cdot g \cdot \beta_a \cdot d \cdot k \cdot (T^+ - T^-)}{v \cdot \lambda_m} \quad (-) \quad (2.5)$$

$$Nu = \frac{q_{with\ convection}}{q_{without\ convection}} \quad (-) \quad (2.6)$$

Burada C_{pa} [J/(kg·K)] havanın spesifik özgül ısısı, ρ_a [kg/m³] havanın yoğunluğu, g [m/s²] yerçekimi ivmesi, d [m] gözenekli malzeme kalınlığı, β_a [1/K] havanın termal genişleme katsayısı, k ısıl geçirgenlik, T^+ ve T^- soğuk ve sıcak yüzeylere ait sıcaklıklar, v [m²/s] kinematik viskozite, λ_m [W/(m·K)] gözenekli malzemenin ısı iletim katsayısı ve q [W/m²] malzeme üzerindeki ısı akısıdır. Gözenekli malzemenin bir tabakası üzerinde oluşan hava akışına bağlı zorlandırılmış taşınım Denklem 2.7'deki şekilde hesaplanabilir. Aradaki basınç farkı fan veya rüzgar benzeri bir zorlandırma ile oluşabilir.

$$\dot{V} = A \frac{k \Delta P}{\mu d} \quad (m^3/s) \quad (2.7)$$

Denklemden A [m²] alan, k ısıl geçirgenlik, d [m] yalıtım kalınlığı, μ [kg/(m·s)] dinamik viskozitedir. Isıl geçirgenlik hem doğal taşınım hem zorlandırılmış taşınımda etkili olan malzeme özelliği iken, ısı iletimi yalnızca doğal taşınımda etkili olur.



Şekil 2.9 Gözenekli malzemede gözenek boyutuna bağlı olarak meydana gelen atmosferik basınçtaki gaz iletkenliği değişimi. VIP çekirdeğinde 10-100 nm boyutunda toz silika kullanılmıştır (Simmler, 2005)

Gözenek boyutu ve gaz basıncına bağlı olarak değişen gaz taşınımı Şekil 2.9’da sunulmuştur. Örneğin gözenek boyutu 0,1 mm olarak bir malzeme için alanlar Şekil 2.8’de belirgindir. 20 mbar dolayındaki gaz basıncına kadar taşınım sabit haldedir. Gaz basıncı düştükçe gaz molekülünün ortalama serbest yolu artacak ve bu durum gaz moleküllerinin çarpışma sayılarını azaltacaktır. Bu bölgede gaz taşınımı belirgin bir şekilde basınçtan etkilenir. Çok düşük basınçlarda gaz taşınımı ihmal edilebilir düzeydedir ve meydana gelen tüm ısı transferi katı ve radyasyon kaynaklı kabul edilebilir (Brodt, 1995).

2.1.3 Isı ışıınımı

Isı transfer mekanizmalarından bir diğeri ışıınım yoluyla ısı transferidir. Işıınım, sonlu sıcaklığa sahip bir cismin yaydığı enerjidir. Işıınım yayma, cismin yapısından bağımsız olarak, cismi oluşturan atomların ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişmelerle yorumlanabilir. Işıınım alanının oluşturduğu enerji, elektromanyetik dalgalar veya fotonlarla iletilir.

Isı ışıınıını on dokuzuncu yüzyılda fizikçileri en çok meşgul eden konuların başında gelmiştir. Isı ışıınıının diğer ısı transfer mekanizmalarından en büyük farkı Güneş ve Dünya arasında olduğu gibi ışıınıım için herhangi bir madde ortamına gereksinim olmamasıdır.

1879 yılında Josef Stefan ısı ışıınıma şiddetinin sıcaklığın dördüncü kuvvetine bağlı olduğunu gözledi. Daha sonra Boltzmann, termodinamik yasalarını kullanarak bu bulguyu teorik olarak da ispatlayıp daha sağlam bir zemine oturttu. Stefan-Boltzmann yasası:

$$I = e\sigma T^4 \quad (2.8)$$

Bu formülde I ışıınıımın şiddetini ya da birim alan başına ışıınıım gücünü, e cismin ışıınıım yayabilirlik katsayısını, σ ise Stefan-Boltzmann sabitini temsil etmektedir. e Sayısı 0 ile 1 arasında boyutsuz bir sayıdır. Stefan-Boltzmann sabitinin değeri S.I.'de:

$$\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ Watt/m}^2\text{K}^4$$

Isıl ışıınıma yapan cisim, kendisinden daha soğuk bir ortamda ise ışıınımanın bu ortamda algılanan net şiddetinin belirlenmesi için Stefan-Boltzmann yasası:

$$I_{net} = e\sigma(T^4 - T_{ref}^4) \quad (2.9)$$

Siyah bir madde veya yüzey, ideal bir ışıınıım yayıcısı ve yutucusu olarak tanımlanabilir. Belirli bir sıcaklık ve dalga boyunda, hiçbir yüzey veya madde, siyah cisimden daha fazla radyasyon enerjisi yayamaz. Bir siyah cisim, dalga boyu ve doğrultudan tam bağımsız olarak, üzerine gelen tüm ışıınıımı yutabilir. Siyah cismin, birim zamanda birim yüzey alanından yaydığı ışıınıım enerjisi, siyah cisim yayma gücüdür ve E_b şeklinde adlandırılır.

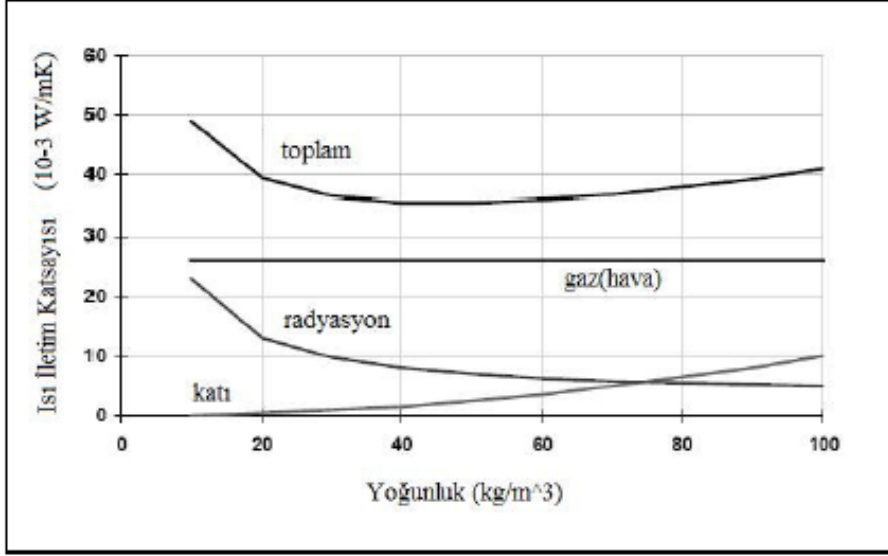
2.2 Isı Yalıtım Malzemeleri

Isı yalıtım malzemeleri, ısı transferi mekanizmalarını mümkün olabilecek en

üst seviyede azaltacak şekilde geliştirilmelidir. Toz, parçacık ve lif tipi yalıtımlarda, katı malzeme ortamdaki hava içerisine homojen olarak dağıtılır. Katı malzeme ile ortam içerisindeki hava katı bir matris oluşturur. Havanın bu sistemle hücrelere hapsedilmesi, hücresel yalıtım olarak da adlandırılır. Belirtilen sistemde efektif ısı iletim katsayısı; hava veya ortam boşluğunun hacimsel oranı ve geometrisi ile havadaki ısıl iletkenliği ve katı malzemenin yüzey ışınım özellikleri ile ısı iletim katsayısına bağlıdır (Incropera, 2003).

Farklı sıcaklıktaki iki malzeme veya ortam arasındaki ısı transferi indirgemek için kullanılan malzemelere ısı yalıtım malzemesi denir. Isı yalıtım malzemelerinin en belirgin özelliği ısı iletim katsayılarının diğer malzemelere göre çok düşük seviyelerde olmasıdır. ISO ve CEN standartlarına göre ısı iletim katsayısı 0,065 W/mK değerinden daha az olan malzemeler, ısı yalıtım malzemesi olarak adlandırılır. Isı iletim katsayısı 0,011 W/mK'den az olan malzemeler de ASTM'ye göre süper yalıtım malzemeleri olarak adlandırılır. Isı yalıtımında kullanılan malzemeler genel olarak bazı fiziksel özelliklerine ve içyapılarına göre gruplandırılır.

Günümüzde çokça üretilen fiber ve köpük bazlı ısı yalıtım malzemelerinde meydana gelen ısı transferi mekanizması incelendiğinde, ısı transferinin katı malzeme bölgesinde iletim yoluyla, boşluklarda iletim ve taşınım yoluyla, katı malzeme yüzeyleri arasındaki ışınım yoluyla gerçekleştiği ve toplam ısı transferinin daha çok gaz ortamda meydana gelen taşınımdan etkilendiği Şekil 2.10'da görülmektedir. Bu durumda hücreler arasında bulunan ve durağan kabul edilen havanın ısı transferi en büyük sorunsalı oluşturmaktadır.



Şekil 2.10 Katı, gaz ve radyasyonun toplam ısı iletimine etkisi

2.2.1 İç yapılarına göre ısı yalıtım malzemeleri

İç yapılarına göre ısı yalıtım malzemeleri 5 ana grupta toplanabilir.

2.2.1.1 Tane yapılı yalıtım malzemeleri

Tane yapılı ısı yalıtım malzemelerinde, malzeme yapısı tanecikli olup malzemeler arasında hava boşlukları bulunmaktadır. Tanecikler düzensiz bir şekilde dizilmişlerdir ve içyapıda genel olarak noktasal temaslar bulunmaktadır. Tanecikler arasında hava hareketi epey yavaştır. Bu nedenle, tanecikler arasında taşınım ile ısı transferi nispeten daha düşüktür (Altınışık, 2006).

2.2.1.2 Hücre yapılı yalıtım malzemeleri

Bu yapılı ısı yalıtım malzemelerinde içyapıda büyük hacimsel boşluklar vardır. Tanecikli yapıdan farklı olarak noktasal temaslardan çok yüzeyel temaslar ve belirli bir ağ yapısı söz konusudur. Çok büyük boşluk oranlarına sahip olan bu yapılarda taşınım yoluyla ve gaz iletimiyle ısı iletiminin düşük olması hücrelerin mümkün olduğunca küçük olmasına bağlıdır (Altınışık, 2006).

2.2.1.3 Lif yapılı yalıtım malzemeleri

Lifler arasında serbest hava kanallarının genişliği ve sayısı nedeniyle düşük yoğunluğa sahiptirler. Lifler arasında oluşan hava filmleri, taşınım yoluyla ısı transferini engeller. Bu sebeple taşınım ile ısı transferi düşüktür. Lifler arasında taşınım yoluyla oluşan ısı transferi, iletim yoluyla oluşan ısı transferinde daha fazladır (Altınışık, 2006).

2.2.1.4 Reflektif yapılı yalıtım malzemeleri

Reflektif malzemeler düşük yutma kapasitesine sahiptirler ve yansım oranları çok yüksektir. Işıma ile ısı transferinin söz konusu olduğu durumlarda büyük avantaj sağlayabilirler (Altınışık, 2006).

2.3 Geleneksel Isı Yalıtım Malzemeleri

Son yıllardaki teknolojik anlamdaki gelişmelerle birlikte ısı yalıtım malzemeleri çokça çeşitlilik kazanmıştır. Isı yalıtım ürünlerinde esas amaç, ısı iletim direncini artırmaktır. Bir malzemenin yalıtım özelliğini ısı iletim katsayıları belirler. Isı iletim katsayısı ne kadar düşükse, o ürüne ait yalıtım özelliği o kadar yüksektir. Yüksek ısı dirence sahip olan ısı yalıtım malzemeleri, ısı kayıp ve kazançlarının azaltılmasında kullanılırlar.

Isı iletim katsayıları $0.06 - 0.10 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 'nin altında olan malzemeler genel olarak ısı yalıtım malzemeleri olarak tanımlanır. Isı yalıtımı amacı ile kullanılan ürünler, açık gözenekli ve kapalı gözenekli olarak sınıflandırılabilir. Açık gözenekli veya elyafli malzemelere; taş yünü, cam yünü, seramik yünü, cüruf yünü; kapalı gözenekli malzemelere ise XPS, EPS, kauçuk, polietilen köpüğü, cam köpüğü örnek verilebilir.

Yalıtım malzemelerinin; ses yalıtım değeri, yanma performansları, su emme değerleri, donma çözülme dayanımı, yük altındaki uygulamalar için basınç

dayanımları malzeme seçiminde önemli rol oynar. Kullanım kolaylığı ve ekonomik olması da ısı yalıtım ürünlerinde aranan diğer özelliklerdir.

2.4 Isı Yalıtım Malzemeleri İle İlgili Temel Kavramlar

2.4.1 Isı iletim katsayısı

İki yalıtım malzemesi birbirine paralel ve yüzey sıcaklıkları arasında 1°K olduğunda birim alandan ve bu alana dik yöndeki birim kalınlıktan geçen ısı miktarıdır. Bu özellik malzemenin ısı yalıtım özelliğini belirler. Isı iletim katsayısı arttıkça malzemenin ısı yalıtım özelliği azalır. Birimi W/mK 'dir.

2.4.2 Yoğunluk

Yalıtım malzemelerinin birim hacminin kütlesine yoğunluk adı verilir. Isı yalıtım malzemelerinde yoğunluk ısı iletim katsayısını pek etkilememekle birlikte malzemenin mekanik özellikleri ve kararlılığı yoğunlukla direkt ilgilidir. Birimi kg/m^3 tür

2.4.3 Sıcaklık dayanımı

Isı yalıtım malzemelerinin özelliklerini kaybetmeye başlayıp deforme olmaya başladığı bir sıcaklık noktası bulunur. Bu nedenle malzemenin uygulandığı yerde maruz kalacağı sıcaklık değeri önceden belirlenmeli ve bu sıcaklıkla uygun malzeme seçilmelidir.

2.4.4 Mekanik dayanım

Isı yalıtım malzemelerinin mekanik dayanımları genellikle, malzemede %10 deformasyon oluşturan basma gerilmesi değeri olarak kabul edilir. Bunun yanı sıra kullanım alanına göre bazı malzemelerin çekme gerilmeleri de basma gerilmeleri ile birlikte mekanik dayanım özelliği olarak verilebilir. Birimi kPa (ton/m^2) dir.

2.4.5 Su emme oranı

Yalıtım malzemelerinin en temel özelliği ısı iletim katsayılarının düşük

olmasıdır. Malzemelerin bünyesinde bulunan durgun hava ve gaz içeren kılcal veya gözenekler sayesinde bu değer diğer malzemelere oranla daha düşük kalır. Bu malzemeler su ile temas ettiklerinde bünyelerine bir miktar su çekebilirler. Bu durum sonucunda malzemelerin ısı iletim katsayıları düşer ve ısı yalıtım özellikleri bozulur. Isı yalıtım malzemelerinde su emme oranlarının sıfır veya sıfıra yakın olması idealdir. % cinsinden ifade edilir.

2.4.6 Buhar difüzyon direnci

Bir malzemenin buhar transferine gösterdiği direnç, o malzemenin buhar difüzyon direnci olarak adlandırılır. Buhar difüzyon direnci arttıkça malzemenin içinden geçebilecek buhar miktarı düşmektedir. Isı yalıtım malzemelerinde kullanım alanına göre değişmekle birlikte, genellikle buhar difüzyon direnci yüksek olması idealdir. Birimsiz bir büyüklüktür.

2.5 Yaygın olarak kullanılan geleneksel ısı yalıtım malzemeleri

Ülkemizde kullanılan ve TSE tarafından da onanarak sınıflandırılmış yalıtım malzemeleri şu şekilde listelenebilir:

- Cam Yünü
- Taş Yünü
- Poliüretan
- Ekspande Polistren
- Ekstrude Polistren
- Fenol Köpük
- Cam Köpük
- Polietilen Köpük
- Genleştirilmiş Perlit
- Genleştirilmiş Mantar
- Mantar Levha
- Seramik Yün

- Melanin Köpük
- Poliizosiyonat Köpük
- PVC Köpük
- Elastomerik Kauçuk Köpüğü

2.5.1 Camyünü

Ergimiş camın lif hale getirilmiş bir şeklidir. Silis kumunun yüksek sıcaklıklarda ergitilerek elyaf hale getirilmesi ile elde edilir. Levha ve şilte halinde kullanılabilir.

Isı iletim katsayısı: 0,04 W/mK (20 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: maks. 230 °C

Yoğunluk: 10-100 kg/m³

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 1

Su emme: Hacimce % 3-10

Su buharı transferi: 542 µgm/Nh

Mekanik dayanım: 1,5-6,5 ton/m² basma dayanımı

2.5.2 Taşyünü

Bazalt, kireçtaşı, diabez benzeri minerallerin yüksek sıcaklıklarda ergitilerek elyaf haline getirilmesi ile elde edilen bir ısı yalıtım malzemesidir.

Isı iletim katsayısı: 0,037-0,043 W/mK (50 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: max. 0-800 °C

Yoğunluk: 30-100 kg/m³

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 1

Su emme: Hacimce % 2,5-10

Su buharı transferi: 542 µgm/Nh

Mekanik dayanım: 1,5-6,5 ton/m² basma dayanımı

2.5.3 Poliüretan

Birden fazla komponentin (Poliol, İzosiyonat vb.) yüksek basınç ve proseslerde reaksiyona girerek oluşturduğu bir malzemedir.

Isı iletim katsayısı: 0,020 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -180 °C / + 110 °C

Yoğunluk: 30-40 kg/m³

Buhar difüzyon direnç katsayısı: =30-100

Su emme: Hacimce % 3-5

Su buharı transferi: 20 µgm/Nh

Mekanik dayanım: 10-40 ton/m² basma dayanımı

Günümüzde genellikle ev tipi soğutucu ve dondurucularda yalıtım malzemesi olarak yalıtkan gazla doldurulmuş poliüretan köpük kullanılmaktadır (ASHRAE, 2002).

Poliüretan köpükler ya da poliüretan esaslı ürünler iki ana malzeme ile bunları kimyasal reaksiyona sokan katalistler ve kabartıcı ajanlardan oluşur. Yapısında iki ana malzeme bulunur.

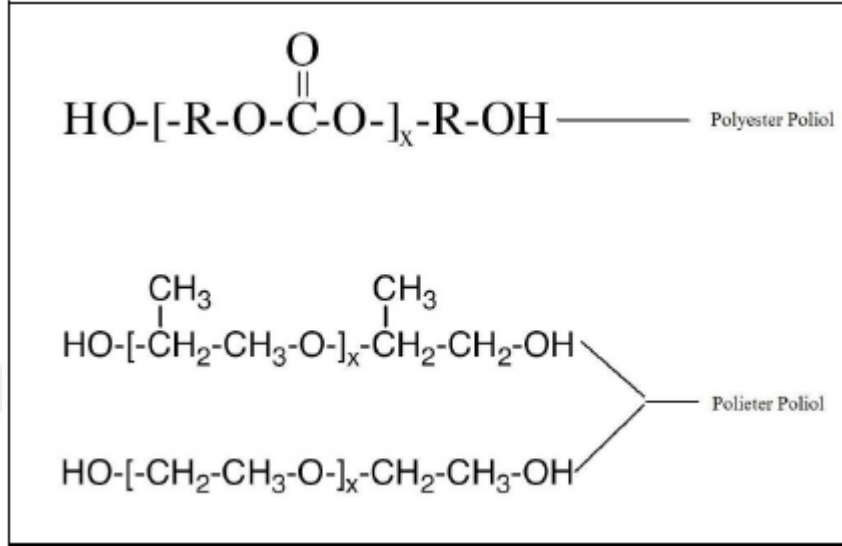
- Polioliol
- İzosiyonat

Polioliol sistemi, polieter veya polyester bazlı poliollerle, bunların içerisinde uygun oranlarda konulan katalist, silikon, renklendirici, kabartıcı ajan ve diğer kimyasalların oluşturduğu bir karışımdır. Poliollerde hidroksil (OH) sayısı molekül ağırlığı ile ters orantılıdır (Thamson, 2005). Polioller;

- Polieter polioller
- Polyester polioller

olmak üzere iki çeşittir (Thamson, 2005). Şekil 2.11'de poliollerin kimyasal

yapıları görülmektedir.

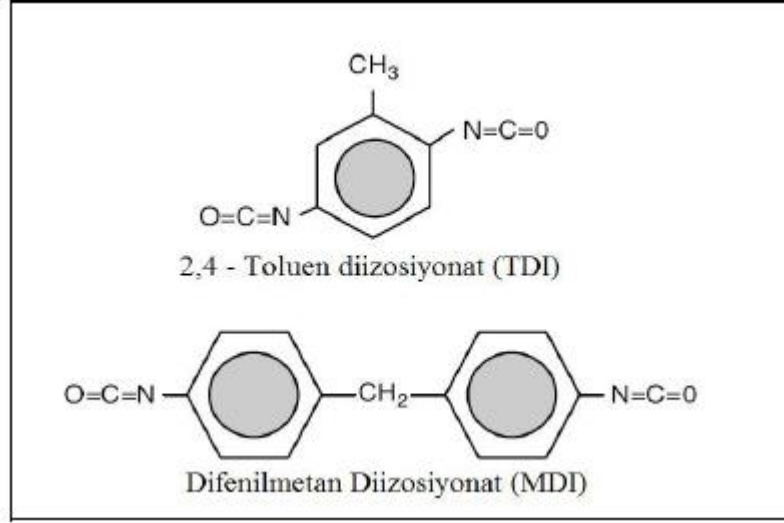


Şekil 2.11 Poliollerin kimyasal yapısı (Thamson, 2005)

İzosiyonatlar poliöl sistemle karıştırıldığında onunla ekzotermik reaksiyona giren ve bünyesinde serbest izosiyonat grubu taşıyan kimyasallardır. İzosiyonatlar, NCO yüzde içeriğine ve fonksiyonuna bakarak adlandırılır. NCO sayıları izosiyonatların ayırt edici bir özelliğidir. En çok bilinen iki aromatik izosiyonat;

- MDI: difenilmetandiizosiyonat (C₁₅H₁₀O₂N₂),
- TDI: toluendiizosiyonat (C₉H₆O₂N₂)

olarak adlandırılır (Thamson, 2005). Şekil 2.12’de bu iki izosiyonatın kimyasal yapısı görülmektedir.



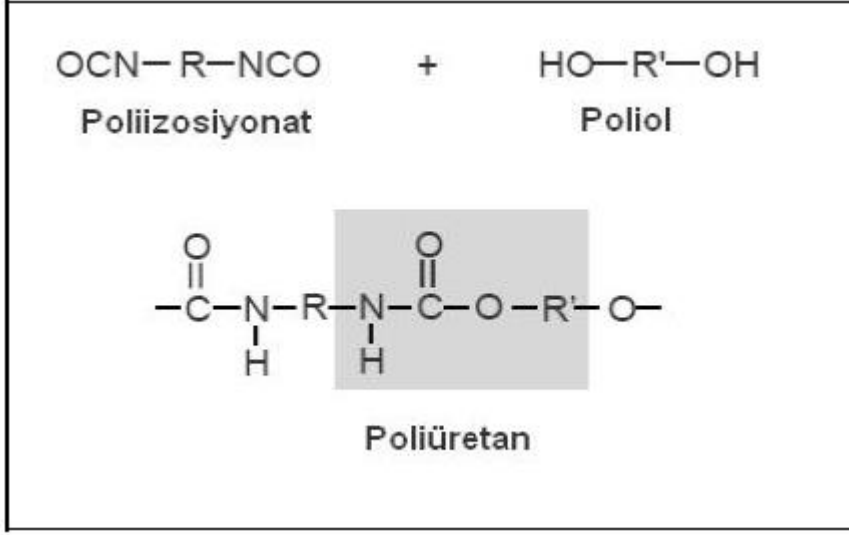
Şekil 2.12 Endüstride olarak en çok kullanılan izosiyonatlar (Thamson, 2005)

Poliüretan köpükler, poliöl sistem ve uygun izosiyonatların belirli oranda karışımı ve bu karışımın bir kabartıcı ile genişmesi suretiyle meydana getirilir. Poliöl ve izosiyonat özel donanımlı makinelerde yüksek basınç altında püskürtme yöntemiyle uygulanır. Polimerizasyon ve gaz reaksiyonlarının hızlarını kontrol edebilmek için reaksiyonu hızlandırıcı ilave edilir. Ayrıca, yüzey gerilmelerini düşüren ve hücre yapısının boyutlarını etkileyen kimyasallarda tepkimeye katılır. Kabartıcılar ya poliöl sisteminin içrisine önceden katılır ya da uygulama sırasında karıştırılır (Thamson, 2005). Kabartıcı miktarı arttıkça genişleme artar ve poliüretan köpüğün yoğunluğu azalır. Poliüretan oluşumu sırasında reaksiyon;



şeklinde gerçekleşir ve bu tepkime tek yönlüdür. Şekil 2.13’de kimyasal tepkime sonucu oluşan yeni bağlar ve poliüretan malzeme oluşum yapısı gösterilmektedir.

Karışımında mevcut karbondioksit (CO₂) gazı, polimerize olmaya başlayan karışımın köpürmesini sağlar. CO₂ tek başına köpük yoğunluğunun istenilen düzeye düşürmekte yeterli olmadığından, karışıma ilaveten yardımcı kabartıcı ajanlar kullanılır.

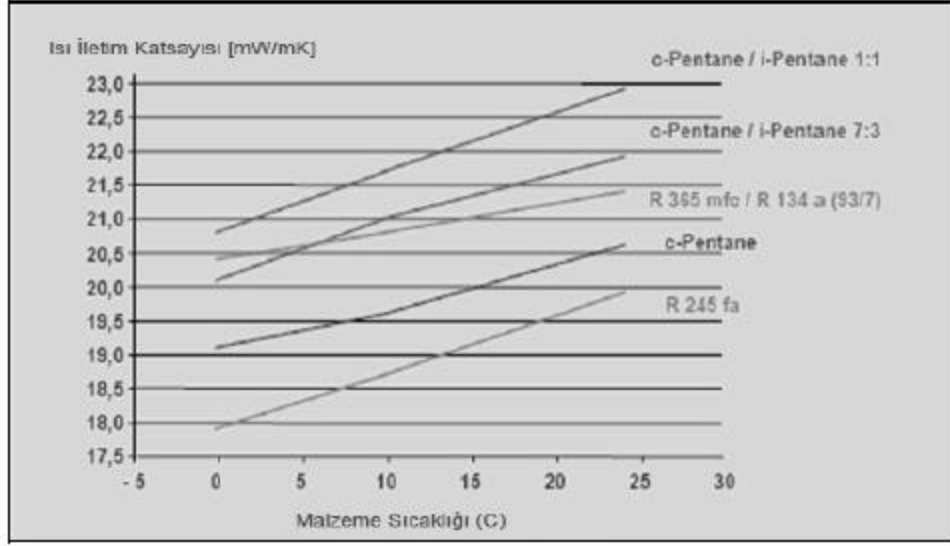


Şekil 2.13 Poliüretan oluşum tepkimesi (Thamson, 2005)

Kabartıcı ajanlar kapalı hücre yapısına sahip olan poliüretanın hücre boşluklarında hapsolür. Bu ajanların diğör bir önemli görevi ise poliüretan malzemenin ısı iletim katsayısının azaltılmasıdır. Bu nedenle genel olarak ısı iletim katsayısı havadan daha küçük olan gazlar kabartıcı ajan olarak kullanılır (Thamson, 2005).

- C-pentan
- I-pentan
- HCFC 141b
- R600a
- CO2

Günümüzde en fazla kullanılan kabartıcı ajanlardır (Özçam, 2007). Şekil 2.14'de kullanılan kabartıcı ve sıcaklık parametrelerine bağılı olarak poliüretanın ısı iletim katsayısının değışimi görölmektedir.



Şekil 2.14 Poliüretan tepkimesinde kullanılan kabartıcı ajanlar (Özçam, 2007)

2.5.4 Ekspande polistren köpük (EPS)

EPS, polistren hammaddesinin genişletilerek blok halinde ve kesilme suretiyle levha haline getirilen organik bir ısı yalıtım malzemesidir. Ayrıca levha şeklinde kalıp içinde genişletilerek de üretimi de mümkündür.

Isı iletim katsayısı: 0,033 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -100 °C / + 80 °C

Yoğunluk: 15-30 kg/m³

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 20-80

Su emme: Hacimce % 0-5

Su buharı transferi: 25 µg/Nh

Mekanik dayanım: 5-15 ton/m² basma dayanımı

2.5.5 Ekstrude polistren köpük (XPS)

XPS; polistren hammaddesinin ekstrüzyonla levha halinde çekilerek üretilen bir ısı yalıtım malzemesidir. Üretim tekniği dolayısıyla genellikle kapalı hücreli ve bünyesine su almayan bir ısı yalıtım malzemesidir.

Isı iletim katsayısı: 0,03 W/mK (10 °C'de)
Kullanım sıcaklığı: -60 °C / + 75 °C
Yoğunluk: 25-45 kg/m³
Buhar difüzyon direnç katsayısı: 80-250
Su emme: Hacimce % 0 – 0,5
Su buharı transferi: 0,15-0,075 µgm/Nh
Mekanik dayanım: 10-50 ton/m² basma dayanımı

2.5.6 Fenol köpük

Isı iletim katsayısı: 0,04 W/mK (20 °C'de)
Kullanım sıcaklığı: -180 °C / + 120 °C
Yoğunluk: 30-35 kg/m³
Buhar difüzyon direnç katsayısı: 10-50
Mekanik dayanım: 10-15 ton/m² basma dayanımı

2.5.7 Cam köpük

Cam Köpüğü levhaları çok sert, basınca dayanıklı, kolay kırılabilen, sürtünmeye dayanıksız ve su buharını hiç geçirmeyen bir yalıtım malzemesidir.

Isı iletim katsayısı: 0,046 W/mK (10 °C'de)
Kullanım sıcaklığı: -260 °C / + 430 °C
Yoğunluk: 135 kg/m³
Buhar difüzyon direnç katsayısı: 10000
Su emme: Su emmez
Su buharı transferi: 0 µgm/Nh
Mekanik dayanım: 43-88 ton/m² basma dayanımı

2.5.8 Polietilen köpük

Isı iletim katsayısı: 0,033 W/mK (10 °C'de)
Kullanım sıcaklığı: 0 °C / 100 °C
Yoğunluk: 30-40 kg/m³

2.5.9 Genleştirilmiş perlit (EPB)

Isı iletim katsayısı: 0,057 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: 250 °C / 1000 °C

Su buharı transferi: 180 µgm/Nh

2.5.10 Genleştirilmiş mantar (ICB)

Isı iletim katsayısı: 0,038 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -180 °C / 100 °C

Buhar difüzyon direnç katsayısı: =1

Su buharı transferi: 20-40 µgm/Nh

2.5.11 Seramik yünü

Isı iletim katsayısı: 0,037 W/mK (50 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: 0 °C / 800 °C

Yoğunluk: 100 kg/m³

Su buharı transferi: 542 µgm/Nh

2.5.12 Mantar levha

Isı iletim katsayısı: 0,04-0,055 W/mK (20 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -180 °C / +100 °C

Yoğunluk: 80-500 kg/m³

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 10-35

2.5.13 Polizosiyonat köpük

Isı iletim katsayısı: 0,034 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -180 °C / 140 °C

Su buharı transferi: 30 µgm/Nh

2.5.14 PVC köpük

Isı iletim katsayısı: 0,029 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -100 °C / 95 °C

Su buharı transferi: 15 µgm/Nh

2.5.15 Melanin köpüğü

Isı iletim katsayısı: 0,034 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -60 °C / 150 °C

Su buharı transferi: 350 µgm/Nh

2.5.16 Elastomerik kauçuk köpüğü

Isı iletim katsayısı: 0,037 W/mK (20 °C'de)

Yoğunluk: 60 kg/m³

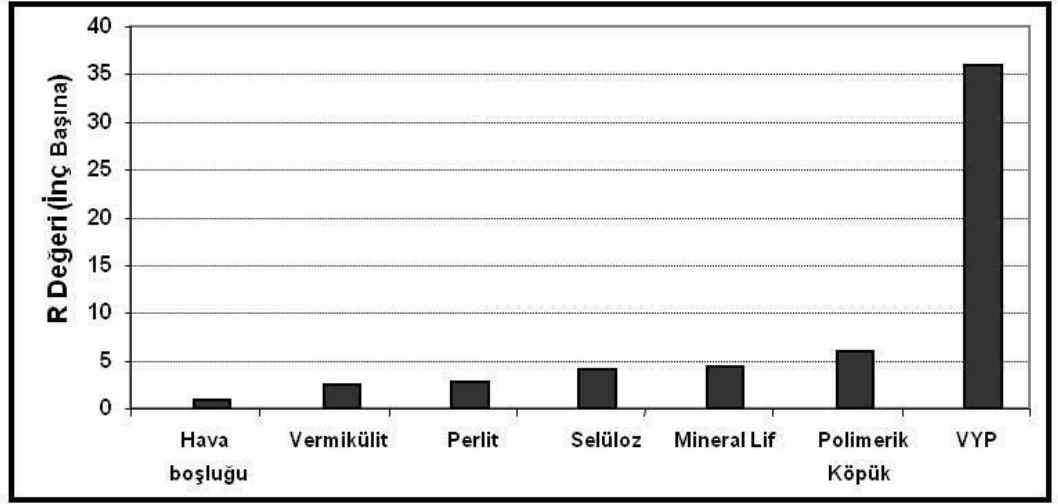
Su buharı transferi: 0,25 µgm/Nh

2.6 Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri

Ürün ve binalarda ısıtma, soğutma ve enerji tüketim ve giderlerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar global normların güncellenmesiyle devam eden bir süreçtir. Bu süreçte mühendislerin kullandığı başlıca çözümlerden biri ısı yalıtım malzemesi çözümleridir. Yalıtım malzemelerinin yalıtım özelliklerinin ve uygulama alanlarının geliştirilmesi konuları birçok araştırmacının çalışmalarını yoğunlaştırdığı bir sektör haline gelmiştir. Az enerji tüketen yapı ve ürünlerin giderek daha popüler olması, araştırmacıları ve üreticileri, daha düşük ısı iletimi katsayısına sahip yalıtım malzemeleri araştırmaya ve üretmeye yöneltmektedir. Yaygın olan yalıtım malzemeleriyle istenilen yalıtım özellikleri ve enerji tüketiminde ürün tasarlamak duruma göre ya çok pahalı ya da teknik anlamda imkânsız olabilir.

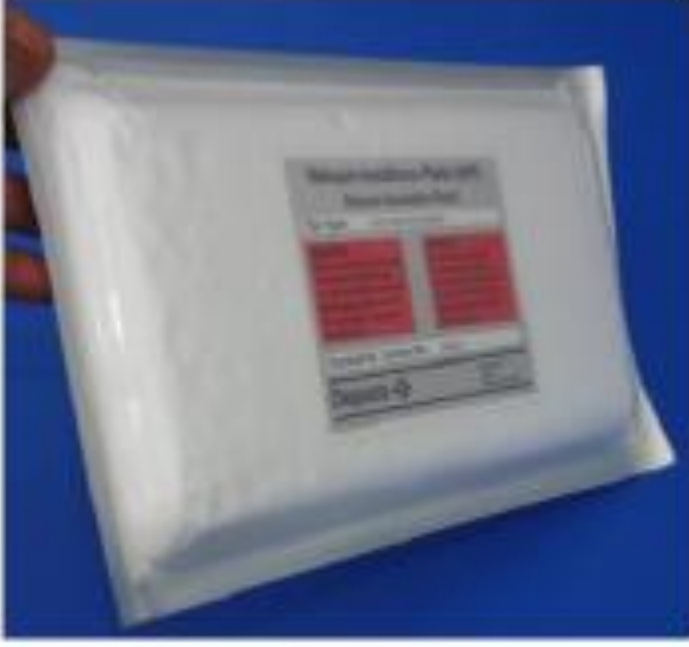
Vakum İzolasyon Panelleri (VİP) konusunda yapılan çalışmalar sayesinde ısı yalıtımı teknolojisinde büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Son yıllarda ki çalışmalar, özellikle mikro-gözenekli yapıdaki ısıl işleminden geçirilmiş silika ve silika aerojel ürünler üzerinde yoğunlaşmıştır. Şekil 2.15'da belirtilen her ısı yalıtımı, bir sonraki daha yüksek R-değerine sahip yalıtım geliştirilinceye kadar yüksek performanslı ısı

yalıtımı olarak kabul edilmiştir (Mukhopadhyaya, 2006).



Şekil 2.15 Halen kullanmakta olan yalıtım malzemelerinin R değeri (Mukhopadhyaya, 2006)

Bu malzemelerin ısı iletim katsayıları 10-22 mW/(m·K) arasında değişmekte olup alışlagelmiş yalıtım malzemelerine göre daha düşüktür. Gerek mikro-gözenekli yapıda gerek geleneksel yalıtım malzemelerinin vakumlanması suretiyle 2-4 mW/(m·K) gibi düşük değerlere ulaşılabilmesi de mümkün olmaktadır. Araştırmalar, geliştirilen yeni ürünlerin iyi bir performansa sahip olduğunu kanıtlamış ancak endüstriyel uygulamalar açısından gelişmeye açık yönlerinin bulunduğunu da göstermektedir.

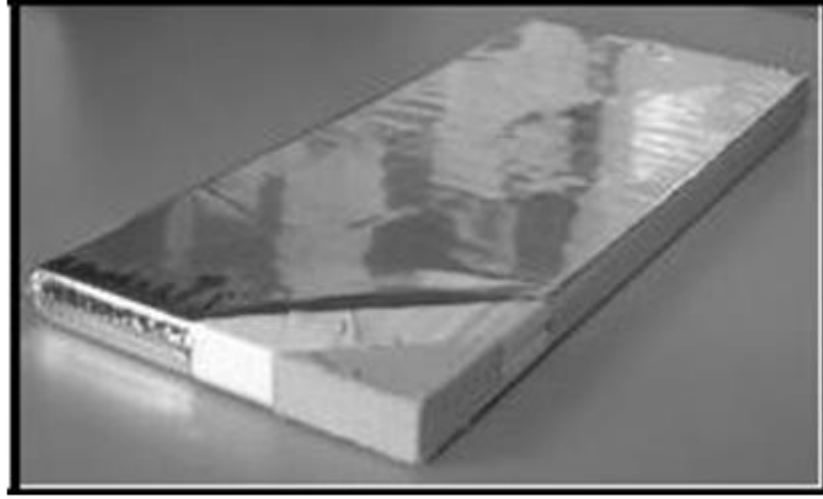


Şekil 2.16 1990'larda buzdolapları için üretilen ilk VIP uygulamalarından bir Örnek (Degussa)

2.6.1 Vakum izolasyon panelleri

Vakum izolasyon panelleri λ ısı yalıtım özellikleri açısından geleneksel ısı yalıtım malzemelerine göre çok daha yüksek performanslı yalıtım malzemeleridir. Endüstriyel ısı yalıtım malzemelerine göre 10-15 kata ulaşan ısı yalıtımı VIP'ler ile sağlanabilmektedir.

VIP'ler, gözenekli yapıdaki bir iç dolgu malzemesinin (çekirdek) karakterine bağlı olarak, gaz giderici malzeme kullanılarak ya da tek başına bir dış zarfın içine konularak vakumlanması ve sızdırmazlığı sağlanarak atmosfere kapatılması ile oluşturulur (Şekil 2.16).



Şekil 2.17 Vakum izolasyon panelinde çekirdek, iç zarf ve dış zarfın görünümü (Deniz ve Binark, 2008)

Fumed silika malzemeli VİP'nin gözenekleri içerisindeki hava tahliye edildiğinde $2-4 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ arasında bir yalıtım değerine ulaşılır (Baetens et al., 2010). Bu değer zaman içerisinde basınç arttığından ve hava-nem difüzyonundan ötürü geri dönüşsüz olarak artar. Buna bağlı olarak 25 yıl yaşlanmış malzemenin iletim katsayısı fumed silika için $7-8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ düzeylerinde kabul edilebilir (Brunner and Simmler, 2008). Eğer panel deformasyonu veya hava geçirgenliği söz konusu ise ısı iletimi $20 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ düzeyine kadar yani birçok yalıtım malzemesinden daha düşük olacak şekilde durağanlaşır.

2.6.2 Gaz yalıtım panelleri

Gaz yalıtım panelleri (GYP) çekirdek malzemeyi vakumlamak yerine, havadan daha düşük ısı iletkenliği olan örneğin argon (Ar) veya ksenon (Xe) gibi gazların uygulanmasıyla elde edilir. Gaz yalıtım paneli içerisinde düşük ısı iletimli gaz konsantrasyonu elde etmek için panelin hava ve nem penetrasyonundan uzak tutulması şarttır. Vakum izolasyona benzer panel sistemleri için gaz yalıtımından daha iyi değerlere ulaşmaktadır. Bununla beraber GYP'lerdeki düşük emisyonlu yüzeyler ışınlama ile oluşan ısı transferini azaltmaktadır. Buna rağmen GYP uygulamalarında ısı yalıtımı teorik hesaplamalara göre VİP'den oldukça yüksektir

(ortalama 40 mW/(mK)).

Bu sebeplerden ötürü GYP'lerin VIP'ye kıyasla birçok dezavantajı vardır. Yalıtım ürünleri olarak GYP ve VIP kıyaslaması yapıldığında hem günümüz hem de yakın gelecek için VIP'nin üstün yanlarının daha fazla olduğu ifade edilebilir.

2.6.3 Aerojel

Bir diğer yüksek performanslı yalıtım malzemesi ısı iletimi 13 mW/(m·K)'ye kadar inebilen aerojeldir (Lu, 1992). Aerojel sıvı fazı kurutulmuş tahliliye edilmiş bir jelden meydana gelmektedir. Aerojel malzemeler ilk kez 1930'larda Kistler tarafından keşfedilmiştir. Kistlerin çekmenin, kurutma esnasında oluşan kılcal kuvvetlerden dolayı oluştuğunu düşünüyordu. Bu hipotezi test etmek için, jeli suyun kritik sıcaklığına kadar ısıtarak basıncıda suyun buharlaşma basıncı üzerinde tutmuştur.

Yeryüzündeki en hafif katı madde olarak tanımlanan aerojeller, içinde yaklaşık olarak 95 - 99,9 % miktarında hava bulunduran köpük olarak tanımlanmakta olup, kalan kısım ise cama benzeyen bir yapıdadır. Nanometrik boyutta sıkışan hava molekülleri hareket imkânı bulamazlar. Bu da bu malzemeye yüksek ısı yalıtım özellikleri sağlar. Hava moleküllerinin sıkışması aynı zamanda ses yalıtımını da arttıran bir etken olup, malzemenin ses dalgalarını geçirmesi minimum düzeyde gerçekleşmekte, dolayısıyla aerjel malzeme iyi bir ses yalıtım malzemesi de olmaktadır. Bunun yanında aerjeller birçok farklı fiziksel ve kimyasal özelliği içinde barındırır. Aerojel, dondurulmuş duman görünümünde, cama benzer bir malzeme olduğundan birçok farklı alanda kullanımı mümkündür.

Aerjeller, jellerin sıvı bileşeninin gaz ile yer değiştirilmesiyle elde edilen gözenekli malzemelerdir. Jel, biri katı madde diğeri dispersiyon maddesi olmak üzere iki bileşenden oluşan bir karışımdan oluşur. Dispersiyon maddenin gaz olması durumunda oluşan yapı aerjel (aerogel), sıvı olması durumunda ise hidrojel (hydrogel) olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın konusu, dispersiyon maddenin

hava olduğu “aerojel”lerdir. Aerojellerin ısı yalıtımlarının iyi olması “Tek kalın kazak giymektense iki ince kazak, aralarındaki hava tabakası nedeniyle daha iyi ısıtır” olgusuyla açıklanabilir. Bunun nedeni tabakalar arasındaki havanın ısı yalıtımı sağlamasıdır. Aerojelde de bu hava tabakası yüksek oranda mevcut olup, bu nedenle ısı yalıtımı oldukça iyidir.

Kistler, silika jelden farklı maddeler (alüminyum, krom, kalay oksitleri) ile de aerojel üretmiştir. Karbon tabanlı aerojellerin üretimi ilk kez 1980’li yılların sonlarında başlamıştır.



Şekil 2.18 Alev torcu üzerindeki bir aerojel (Nasa, 2017).

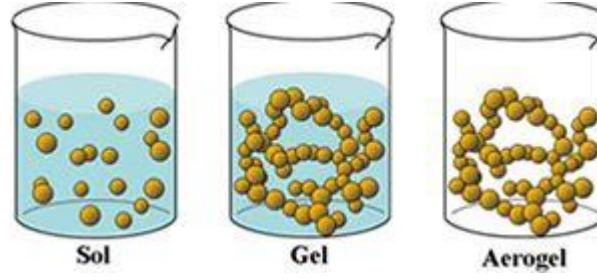
Aerojellerin milyonlarca ufak delikten oluşan yüzeyi, süngeri andırır. Bu yapı büyük oranda havadan oluşmaktadır ve çok iyi bir yalıtıktır. Aerojel, bilinen köpüklerden ve diğer yalıtım maddelerinden çok daha spesifik özelliklere sahiptir.

Öyle ki, oksijen kaynağıyla doğrudan verilen ateşi bile yalıtabilir. En gelişmiş fiberglas yalıtım malzemesinden yaklaşık 40 kat daha fazla yalıtım kabiliyetine sahiptir. Knudsen efekti yüzünden arojeller, içinde bulunan gazlardan bile daha yalıtkan hale gelebilmektedir.

Arojeller, bir başka silika (kum) esaslı madde olan camla kıyaslandığında 1000 kat daha az yoğunlukta iken hücreli bir yapıya sahiptir. Büyüklüğü mikron seviyelerinin altında olan delikler, bir ağ gibi malzemenin içini kuşatır. Deliklerin etrafı başka bir malzeme ile kaplıdır.

Aerojel malzemeler yarı saydamdırlar (transludent) ve Rayleigh saçılımı nedeniyle çeşitli renklerde (silika tabanlılar için mavi renk) gözükebilirler. Rijit ve büyük ağırlık taşıyabilen katı objelerdir ama kırılganlıkları yüksektir. Kütesinin binlerce katını taşıyabilir, ama ufak darbelerle de kırılabilirler. Su tutuculuk açısından hidrofil ve hatta higroskopurlar, dokunma durumunda kuru bir his bırakırlar. Çeşitli işlemlerle, kırılganlıkları giderilebilmekte ve su sevmez haline getirilebilmektedirler.

Aerojel üretimi ilk olarak 1930'larda geliştirilmesine rağmen şimdiye kadar kullanımı daha çok uzay, kimya ve spor endüstrileriyle kısıtlı kalmıştır. Üretim prosesi yüksek enerji tüketimi gerektirmekle beraber oldukça karmaşık proseslerden ibarettir. Bunun yanında saf aorojel üretimi henüz yapılarda kullanım için yüksek maliyetlidir. Aerojeller ilk yıllarda silika esaslı sıvı jellerin, yüksek ısı ve basınç altında daha önceden belirlenen kritik bir seviyeye kadar kurutulmasıyla oluşturulmaktaydı. Günümüzde arojeller, metal oksitlerden organik polimerlere, karbondan karbon nanotüplere kadar çok çeşitli maddelerden üretilebilmektedir.



Şekil 2.19 Aerojel prosesi

2.6.4 Gelecekteki ısı yalıtımı gereksinimleri

Gelecekteki ısı yalıtım malzemeleri ve çözümleri teknikte mümkün olabilecek en düşük ısı iletim seviyelerine sahip olmalıdır. Bunun yanında uzun dönemli performans olarak ısı iletim değeri çok fazla değişim göstermemelidir. Dahası bu malzeme ve çözümler dışarıdan bir etkiye maruz kalsalar bile ısı iletimlerini lokal ısı köprüleri hariç korumalıdır. Vakum odaklı teknolojilerin en büyük sıkıntısı uzun yıllar sonunda birçok dış etkenle beraber oluşan vakum kayıpları ve hava-nem penetrasyonudur.

Geleceğin ısı yalıtım malzemesindeki en önemli ihtiyaçlardan biri de herhangi bir performans kaybına mahal vermeden kesip şekillendirilecek şekilde yapı ve cihazlara adapte edilebilir olmasıdır. Zarf bariyerli vakum panel çözümleri herhangi bir vakum kaybında bu gereksinimleri karşılamayarak ısı iletimi ortalama $20 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ seviyelerine kadar artacaktır.

Bunlarla beraber mekanik mukavemet, su ve yangın dayanımı, sıcaklık değişkenliklerine gösterdiği direnç, dinamik özellikleri, maliyeti ve rakabetçiliği gibi birçok özellik ayrıca adreslenerek değerlendirilmelidir.

Bu sebeplerden dolayı geleceğin yalıtım malzemesi birçok kritik gereksinimi beraber karşılamalıdır. Bu çeşitli özellikler ve ilgili gereksinimler Çizelge 2.1’de özetlenmiştir. Bu malzemedan beklenen ısı iletkenliği hiç yaşanmamış VIP’e ait olan $3\text{-}4 \text{ mW} / (\text{m}\cdot\text{K})$ ’den daha düşük bir değerdir. Doğal olarak belirli bir servis

süresi sonundaki ısı iletimi bir diğer hayati değerdir. Çizelgede verilen idealize durumda bu değer 100 yılsonunda $5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ olarak verilmiştir.



Çizelge 2.1 Gelecekteki yüksek performanslı yalıtım malzemeleri için öngörülen performans

Nitelik	Performans
Isıl iletkenlik— İlk gün	< 4 mW/(mK)
Isıl iletkenlik—100 yıl sonra	< 5 mW/(mK)
Deformasyon Hassasiyeti	~
Sahada Kesme Biçimlendirmeye Uygunluk	Evet
Mekanik dayanım (basma, çekme vb.)	Evet
Yangın Koruma	Diğer önlemlere bağlı olarak değişir
Yanma sırasında gaz salınımı	Zehirli gazlar kullanılmamalıdır
İklim yaşlanma dayanıklılığı	Dayanıklı
Biyolojik büyüme (mantar vb)	Hayır
Donma/Çözünme çevrimleri	Dayanıklı
Su	Dayanıklı
Dinamik Termal Yalıtım	Evet
Maliyet vs diğer termal yalıtım malzemeleri	Rekabetçi
Çevresel etki	Düşük olumsuz etki

Çizelge 2.2 Tekniğin ve teknolojinin geldiği noktada üretilen yalıtım malzemelerinin, geleceğin yüksek performanslı yalıtım ürünü olma potansiyeli

Isı Yalıtım Malzemeleri ve Çözümleri	Düşük Isıl İletkenlik	Düşük, Uzun Vadeli Isıl İletkenlik	Dayanıklılık	Kesim Adaptasyonu	Yük Mukavemeti	Gelecek İçin bir Çözüm müdür?
Geleneksel Çözümler						
Mineral Yünler ve Polistiren	Hayır	Hayır	Evet	Evet	Hayır	Hayır
Bugünün Gelişmiş Çözümü- Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri						
Vakum İzolasyon Panelleri	Evet	Evet	Hayır	Hayır	Hayır	Günümüzde ve Yakın Gelecekte
Gaz Yalıtım Panelleri	Belki	Belki	Hayır	Hayır	Hayır	Muhtemelen yok
Aerogeller	Belki	Belki	Evet	Evet	Hayır	Belki
Faz Değiştiren Malzemeler	–	–	–	–	Hayır	Isı depolama ve serbest bırakma
Geleceğin Çözüm Yöntemleri—Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri						
Vakum Yalıtım Malzemeleri	Evet	Belki	Evet	Evet	Belki	Belki
Gaz Yalıtım Malzemeleri	Evet	Belki	Evet	Evet	Belki	Belki
Nano Yalıtım Malzemeleri	Evet	Evet	Evet	Evet	Belki	Belki
Dinamik Yalıtım Malzemeleri	Belki	Belki	Bilinmiyor	Bilinmiyor	Belki	Belki
Diğer	–	–	–	–	–	Teknolojiye bağlı

3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüzde Vakum İzolasyon Panelleri üzerine birçok çalışma yapıyor olup bu çalışmaların gitgide artış gösterdiği açıkça ortadadır. Bu tez içeriğine destek olacak ve yol gösterir nitelikte, Vakum İzolasyon Panelleri ve yaşlanmanın performans üzerindeki etkileri ile ilgili çalışmalar araştırılıp bu bölümde özetlenmiştir. Özellikle deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile gerçekleştirilmiş çalışmalar daha fazla incelenmiştir. Günümüzde vakum yalıtım teknolojisine; özel yalıtım gerektiren uygulamalarda, sıvılaştırılmış gazların muhafaza edildiği konteynırlarda, organ ve ilaç nakillerinde kullanılan muhafaza kaplarında, ileri derece yalıtım gerektiren uzay, savunma, otomotiv sanayi ve beyaz eşya uygulamalarında örnekler bulunmaktadır.

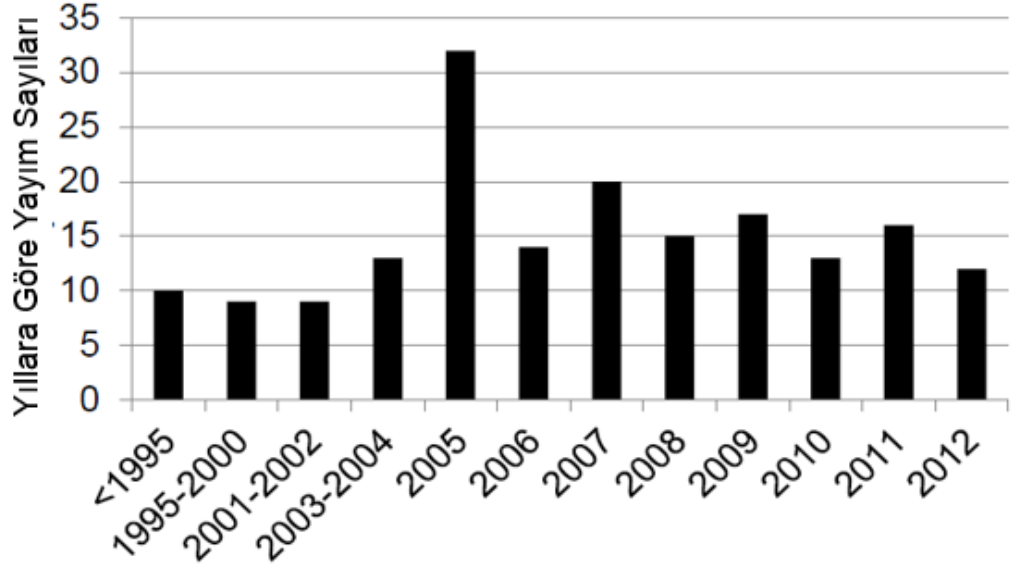
Vakum izolasyon panelleri, poliüretan ya da polistren uygulamaları gibi geleneksel yalıtım yöntemlerine göre kullanılan teknolojiye bağlı olmak üzere ortalama 10 kata kadar daha iyi yalıtım sağlarlar (Sun J. And Lin, J. 1999). Ayrıca kullandıkları uygulamalarda yalıtımın daha ince ve hafif olması sağladıkları avantajlardandır. VIP'ler günümüzde yapı marketlerine kadar yer edinmeyi başarmıştır. Kullanılan zarf ve dolgu malzemelerinde ilerlemeye bağlı olarak panel imalatında da birçok ilerleme kaydedilmiştir. Geçmişte uygulama alanlarını kısıtlayan düz yüzeyle dikdörtgen şekilli panel imalatı yapılıyorken günümüzde uygulama alanına göre değişik şekilli paneller üretilebilmektedir (Manini, P., Rizzi E., Pastore, G and Gregorio, P. 2003).

Vakum sistemlerinin yalıtım amaçlı kullanımı ilk olarak İskoçyalı fizikçi James Dewar (1842-1923) tarafından 1872'de geliştirilen bir sistemle yalıtım boşluğunun kömür tozu ile doldurulup vakumlanması ile elde edilen ısı yalıtımının kullanılması ile gerçekleşmiştir. Termoslar buluşun uzun zamandır en yaygın kullanılan uygulamalarının başında gelmektedir. Termos kapları silindirik metal ya da cam iç ve dış cidardan oluşan ve iki cidar arasında kalan boşluğun vakumlanarak sızdırmaz şekilde kapatıldığı sistemlerdir. Metal ve cam gaz bariyer özellikleri çok iyi malzemeler olup yüzeyleri metalle kaplanarak ısı transferi en aza indirilmektedir (An introduction to VIP technology, 1999).

Vakumlu yalıtım tekniği ile ilgili ilk patentin 1972 yılında “Cryogenic Storage Apparatus” ismi ile alınmış olması tekniğin uzun yıllardır bilinmesine rağmen farklı alanlarda uygulamaya yönelik çalışmaların yaklaşık 50 yıl önce başladığını göstermektedir (An introduction to VIP technology, 1999). İlerleyen zamanlarda dolgu malzemesinin vakumlama sırasında emilimini önlemek amacıyla gözenekli iç kese kullanılmaya başlanmıştır. Toz dolgu malzemelerinin yanı sıra gözenekli yapıdaki açık hücreli köpük malzemeler de denenmiştir. Son yıllarda panel içerisindeki ısı iletim mekanizmasının daha iyi anlaşılması ile birlikte dolgu malzemesi içerisine çeşitli katkı maddeleri eklenerek yalıtımın iyileşmesi amaçlanmaktadır (Simmler & Brunner (2005b))

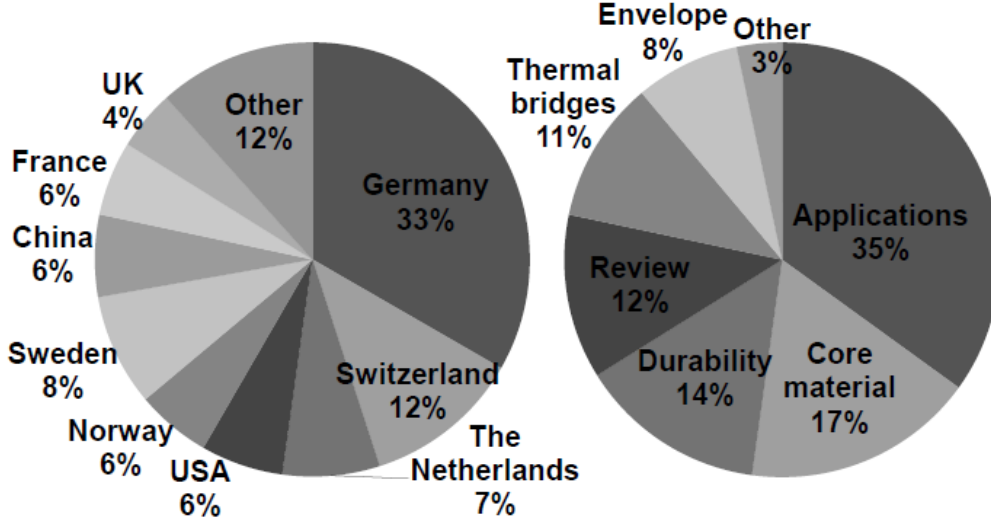
Çekirdek malzeme etrafındaki kaplama veya zarfa ait dayanıklılık ve sızdırmazlığının tasarımdaki esas etkenlerden biri olduğu patentlerin geliştirildiği ilk yıllardan itibaren biliniyordu. Çekirdek malzeme olarak nano boyutta malzemeler, 1930’lı yıllarda aerogeller üzerine yapılan çalışmalarla beraber deneysel olarak kullanıma başlanmıştır. Buna rağmen, aerogel çekirdekli üretimler 1970’li yıllarda askıya alınmış olup alternatif malzeme olan toz silika hammaddesi gelişim göstermiştir. Bu arada gıda paketlenme, eczacılık ve elektronik endüstrisinden düşük gaz sızdırmazlığı ve dayanıklılığın artırılması üzerine gelen talepler, daha ince yapılı kaplamaların geliştirilmesini desteklemiştir. Bu düşük geçirgenlikteki kaplamalar, aerogel dışında kullanılan performanslı çekirdek malzemelerin kullanımını mümkün hale getirmiştir (Fricke, 2008).

Geçtiğimiz 20 yıllık süre içerisinde VIP’lerle ilgili çok sayıda çalışma yayımlanmıştır. Bu çalışmada da 60’dan fazla makale, yayın ve rapor incelenmiş, kaynak ve referans olarak kullanılmıştır. Konuyla ilgili birçok makale İngilizce ve Almanca olarak yayımlanmışken diğer dillerde yalnızca birkaç referans makaleye ulaşılabilmektedir. İnternet üzerinden ulaşılabilen Uluslararası Vakum Yalıtım Sempozyumu (IVIS) ve benzeri konferans makaleleri de kaynaklar dizinine eklenmiştir. Bunların yanında literatürdeki birçok çalışma da IEA/ECBCS (2005a) projesi dâhilinde yürütülmüştür.



Şekil 3.1 VIP araştırmalarıyla ilgili yapılan yayım sayısı.

Şekil 3.1’de açıkça görüleceği üzere 2000 yılı sonrasında VIP ile ilgili yapılan yayınlarda gözle görülür bir artış vardır. 2005 içerisinde yapılan 32 yayın ile bir pik senesi olmuştur. Bunun en büyük sebebi üç yıllık bir süreç alan uluslararası IEA/ECBCS Ek 39’da bulunan Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Sistemleri’nin (HiPTI) tamamlanmasıdır. Bu 180 yayımdan yalnızca 10 tanesi 1995 öncesi yayımlanmıştır ve 2005 yılı sonrası yayımlar her yıl 15’er adet düzeyinde dengeli dağılımlıdır. Önceki yıllardaki yayımlara erişim güçlüğünden ötürü bu çalışmaya eklenmemiş ve kaynak seçimlerinde daha güncel yayımlardan yararlanılmıştır. Şekil 3.2’de yayımların ülke ve konu başlığına göre dağılımları verilmektedir.



Şekil 3.2 Solda: V&I yayımlarının ülkelere göre dağılımı. Sağda: V&I yayımlarının konu başlıklarına göre dağılımı

Araştırmaların büyük bir bölümü Almanya ve İsviçre’de yapılmış olup, V&I ile ilgili birçok yayım ZAE Bayern (Würzburg, Almanya) ve Empa (Dübendorf, İsviçre) orijinelidir. Yayımlardaki en yaygın konu başlığı V&I’lerin binalarda ve diğer uygulamalarda kullanımına ilişkindir. Çekirdek malzeme ve dayanıklılık başlıkları ikinci ve üçüncü sıradaki yaygın araştırmalardır.

Kanada Ulusal Araştırma Kurulu’nun (NRC) Yapı Araştırma Enstitüsü’nde yapılan çalışmalarda, ticari olarak bulunabilen vakum teknolojisi ve zarf malzemeleri, hava ve nemin gaz bariyerden transferine direnç sağlamaktadır (Shirtliffe, 1972). Fakat yapılan çeşitli araştırmalar göstermektedir ki hava ve/veya nem dolgu malzemesine ulaşabilmektedir ve bu transfer dolgu malzemesinin ısı iletkenliğini artırmaktadır. Isı yalıtım malzemesinin kapasitesinin azalma seviyesi, nem alıcı malzemenin kapasitesinin başlangıçtaki seviyesine veya V&I içerisine nüfuz eden atmosferik gazlara ve su buharına bağlıdır. Ancak bu durum, gözenek basıncı ile dolgu malzemesinin ısıl iletkenliğinde meydana gelen değişimine bağlıdır. Literatürde belirtilen ve yaygın olarak kullanılan dolgu malzemeleri cam yünü, açık gözenekli organik köpükler, tozlar ve arojellerdir.

Nano malzemelerde yapılan araştırmalarda önde gelen isim, 1930'lu yıllarda bir ıslak kimyasal süreçle ilk silika aerojelleri yapan Kistler'dir. Kistler, bu aerojellerin havadaki ısı iletkenliklerinin 0.020 W/m·K civarında olduğunu yani diğer yalıtıcılardan önemli ölçüde düşük ısı iletim katsayısına sahip olduğunu biliyordu. Aynı zamanda, gaz termal iletimini bastırmak için çekirdeği 10 mbar'lık bir basınca vakumlamamanın yeterli olduğunu gözlemlemiştir. Kistler'in geliştirmelerini takiben Monsanto, 1950'lerden 1970'lere kadar binlerce ton silika aerojel üretmiş fakat ekonomik sebeplerden dolayı üretimlerini askıya almıştır. 1980'lerde iyi tanımlanmış şartlar altında ve hassas bir şekilde kontrol ederek yapılan ölçümler de Kistler'in heyecan verici sonuçlarını doğrulamıştır. Aynı zamanda aerojellerin diğer birçok silika tozlarından üstün olduğu da açıklık kazanmıştır. 1980'lerde ve 1990'larda birkaç büyük kimya firması ile aerojellerin büyük çaplı üretimi için geliştirme faaliyetleri tekrar arttığı halde, silika aerojeller, seri üretim için yeterince büyük miktarlarda bulunmamıştır. Fiberler, tozlar ve köpükler hakkında yapılan çeşitli çalışmalar göstermiştir ki, yüke dayanıklı vakumlu fiberler, bütün yalıtım malzemeleri arasında en büyük ısı dirence sahip olanlardır. Ancak vakumlu fiberlerde gaz basıncı 1 mbar'ın üzerine çıktığında ısı iletkenlikleri iki katına kadar çıkmaktadır. Yüksek derecede uzun ömürlü vakum izolasyon malzemesi üretmenin pahalı oluşunun bir sebebi de bu dolgu malzemesinin pahalı oluşudur. İnşaat sektöründe vakum izolasyon panellerinin uygulanmasında bu maliyetin önüne geçmek için birçok araştırmacı tarafından çalışmalar yapılmaktadır. Ancak, VİP'lerin iç dolgu malzemeleri ile ilgili çalışmalar çoğunlukla malzeme üreticisi firmalar tarafından yapılmış ve bağımsız araştırmacıların çalışmaları firmaların ticari ürünleri ile sınırlı kalmıştır. Bu nedenle iç dolgu malzemelerindeki gelişmeler genellikle üretici firmalara bağlı olarak devam etmektedir.

VİP üzerine literatürde bulunan çalışmaların tamamına yakını silis tozu (SiO₂), polimer esaslı, hidrojel ve aerojellerden meydana gelen iç malzemeleri ve bunların farklı zarf malzemeleriyle birleşimleri üzerine yapılmış olup, bu bileşimlerin ısı iletim katsayıları araştırılmıştır.

VİP'lerin yaşlanma mekanizmaları hakkında literatürde kısıtlı sayıda

çalışma bulunmaktadır ve bu çalışmalar arasında gerçek anlamda yaşlanma deneyinin nasıl yürütüleceği konusunda bir yöntem birliği yoktur. Simmler ve Brunner neme, ısı şartlarına ve iç basınç artışına dayanan bir korelasyon geliştirdiler (Simmler, H. ve Brunner, S., 2005). Ek olarak Schwab tarafından elde edilen sonuçlar VİP fiziğinin iç yüzünü anlayabilmek ve analitik olarak yaşlanmasını değerlendirebilmek adına çok önemli sonuçlar vermektedir. Bu makale VİP'lerin yaşlanmasındaki teorik hesaplamaları, servis ömrünün öngörülebileceği formül, grafikler ve çeşitli durumlardaki yaşlanma faktörleriyle beraber sunmaktadır (Schwab vd., 2005).

Bir VİP'nin kullanım ömrü çekirdekteki ısı iletiminin tespit edilmiş bir limit değere erişim süresidir (Tenpierik. M. Vd., 2007). Çekirdek malzeme içerisindeki gaz ve su buhar basıncı seviyesindeki değişim VİP içerisindeki ısı transferi değişikliklerini belirler. Bu ısı iletkenliği değişimin oranı VİP'ye ait kullanım ömrünü öngörmeye kullanılabilir (Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K. ve Mukhopadhyaya, 2005). VİP merkezine doğru oluşan nem geçirgenliği, Knudsen difüzyonu ve yüzey difüzyonu üzerinde önemli bir belirleyicidir (Beck, A., Binder, M. ve Frank, O., 2009). Knudsen difüzyonu ise ortalama serbest molekül yolun gözenek boyutuna oranla büyüklüğünden kaynaklanan bir çeşit molekül duvar çarpışması olarak nitelendirilir (Krishna, R. ve Wesselingh, JA., 1997).

Atmosfer ortamı ile VİP iç ortamı arasındaki basınç farkı nedeniyle, VİP içerisine sürekli bir gaz ve nem girişi vardır. Bu durum, hem panelin ömrünü hem de ısı yalıtım özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Konu ile ilgili Simmler'in yaptığı çalışmalara göre; vakum izolasyon panelinin içinde gerçekleşen 3mbar/yıl düzeyindeki bir basınç artışı, vakum izolasyon panelinin ısı iletim katsayısında yaklaşık olarak $0.001 \text{ (W/m}\cdot\text{K)} / 10 \text{ yıl}$ düzeyinde bir artışa neden olmaktadır. Ya da 50% bağıl nem koşullarında ki hava ile denge halinde 4% oranında gerçekleşecek kütleli nem artışı, vakum izolasyon panelinin ısı iletim katsayısında yaklaşık olarak $0.002 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ değerinde bir artışa neden olmaktadır (H. Simmler ve S. Brunner, 2005b).

Simmler ve Brunner Denklem 3.1'de silika çekirdek ve metalize zarftan oluşan bir VİP'nin sabit çevresel koşullarda kullanım ömrünü öngören bir denklem geliştirmişlerdir. Bu denklemlere göre nem ve hava infiltrasyonundan

kaynaklanan çekirdek ısı transfer değişimi 25 yıl için Silika VİP ve alüminyum kaplama için $0.006 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ve metalize polimerik zarf için $0.008 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 'dir. Bu değerler için 20 mm kalınlık ve 250 mm genişliğindeki bir panel referans alınmıştır.

$$\frac{\partial \lambda_c}{\partial t} = \frac{\partial \lambda_c}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t}(T, \varphi) + \frac{\partial \lambda_c}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial t}(T, \varphi) \quad (3.1)$$

Schwab (Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, HP. ve Fricke, J., 2005)'de VİP çekirdeğindeki ısı iletiminin zamana bağlı değişiminin tahmin edilmesi için Denklem 3.2'yi oluşturdular. Bu denkleme göre ısı iletimi yalnızca katı ve radyatif iletimiyle sınırlı olmakla beraber gaz basıncı ve su içeriğindeki artışla orantılı zamana bağlı bir ısı iletimi değişimi gerçekleşmektedir.

$$\lambda(t) = \lambda_{evac} + \frac{\lambda_{free\ gas}}{1+(P_{1/2,gas}/P_{gas(t)})} + b.Xw(t) \quad (3.2)$$

Morel (2007-2009)'de silika çekirdek malzeme üzerinde nem etkilerini gösteren geniş çaplı bir çalışma yaptı. Bu çalışma, Schwab (2005 a,b,c) ve Tenpierik (2009)'ın çalışmaları ile beraber kullanım ömrü, iç basınç artışı ve nem içeriğini modelleyen diğer çalışmalara yardımcı olmuştur.

Tenpierik denklem 3.3'de silika çekirdek ve alüminyum çeperli bir VİP'nin ısı iletkenliğinin değişimi ve kullanım süresini zamana bağlı hesaplayan bir analitik model oluşturmuştur. Denklem 3.3 ısı iletimi değişim oranını gaz ve su buharı için ayrı ayrı tespit etmektedir. [Tenpierik, M, van Der Spoel W, Cauberg, H, 2007]

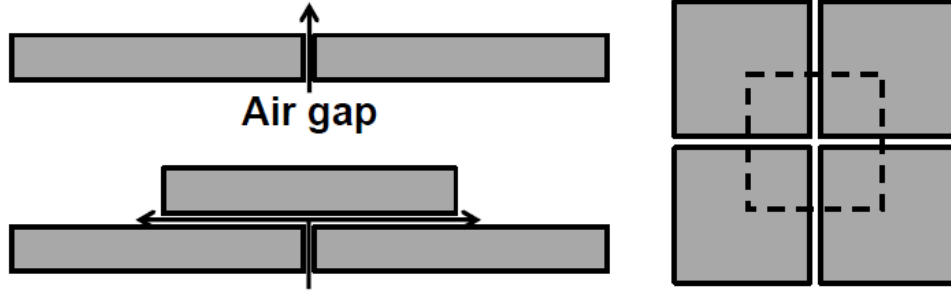
$$\Delta \lambda_c(t) \approx \frac{\partial \lambda_c}{\partial P_g} P_{g,e} \left(1 - e^{-\frac{t-t_{get}}{t_g}} \right) + \frac{\partial \lambda_c}{\partial P_{wv}} P_{wv,e} \left(1 - e^{-\frac{t-t_{des}}{t_{wg}}} \right) + \frac{\partial \lambda_c}{\partial u} \frac{du}{d\varphi} \varphi_e \left(1 - e^{-\frac{t-t_{des}}{t_{wg}}} \right) \quad (3.3)$$

Sıkıştırılmış toz silika için denklem 3.4 VİP'de gaz ve nem giderici kullanımının sıfır katkısı olduğu kabulüyle basitleştirilmiş bir modelle yaklaşık ve hızlı bir kullanım ömrü hesabı için kullanılabilir (BS EN 12667:2001).

$$T_{sl} \approx a e^{b(\lambda_{lim} - \lambda_0 - \lambda_w)} \cdot d_p \cdot \left(\frac{l_p}{s_p}\right) c \cdot \frac{T_0}{T} e^{E_a/R \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (3.4)$$

Bu yaklaşım modeli VİP kalınlığı 0.01-0.05 m, 268-318 K sıcaklık, çevre uzunluğunun yüzey alanına oranı 2-12 aralığında olan ve 50% bağıl nem sabiti için kabul edilir bir yakınlıkta sonuçlar verir. Yine de yapı uygulamaları için sürekli değişen çevre koşulları VİP kullanım ömrünün gerçek anlık yaşam koşullarına göre modellenmesini gerekebilir. Beck dinamik hidrotermal şartlar altındaki silika VİP'ler için bir çeşit dinamik simülasyon modeli önermiş ve bu modelle VİP çekirdeğindeki nem transferi ve sıcaklık profili simultane olarak hesaplanabilmektedir (Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, H.P. and Fricke, J., 2005).

VİP çevresindeki metalize çok katmanlı polimer laminasyonlar VİP'deki toplam ısı akısını arttırır. Şekil 3.3'te temel ısı akış yönleri gösterilmiştir.



Şekil 3.3 VİP çevresindeki ısı köprüleri (Ghazi Wakili, 2011)

Laminasyon üzerindeki ek ısı akısı lineer ısı geçirgenliği ile hesaplanabilir, Ψ (mW/(m·K)). Bu değer nümerik (Binz, 2005; Schwab, 2005; Sprengard ve Spitzner, 2011), analitik olarak hesaplanabilir (Tenpierik ve Cauberg, 2007) veya sıcak plaka yöntemiyle ölçülebilir. Ayrıca ek bir katman uygulamasıyla 64-72% oranında azaltılabilir (Brunner, 2012b; Ghazi Wakili, 2004; Ghazi Wakili, 2011).

4 VAKUM İZOLASYON PANELLERİ VE YAŞLANMA

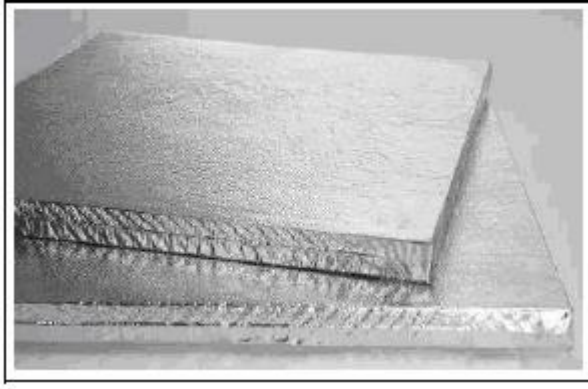
4.1 Vakum İzolasyon Panellerinin Yapısı

VİP'lerin ısı yalıtım kapasitesi geleneksel yalıtım malzemelerinden birkaç kez daha yüksektir. Bu durum uygulama kalınlığı açısından da büyük bir avantaj sağlarken, kullanım alanını da oldukça genişletmektedir. Paneller özellikle enerji talebinin ve maliyetinin azaltılması, verimliliğinin yüksek olması istendiğinde iyi sonuçlar vermektedir.

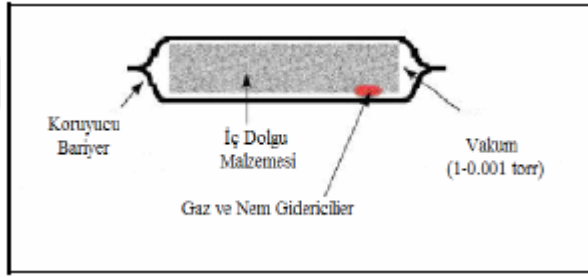
VİP'lerin gitgide artan yalıtım değerleri, makine, bina ve ürün dış boyutlarının ve yalıtım kalınlıklarının azalmasını sağlamaktadır. Yapıyı oluşturan elemanların boyutlarının yapısal mukavemetinden çok yalıtım malzemesi taşıyabilme yeteneğine sahip olduğu durumlarda, yalıtım kesitleri azaltılabilir.

Bu sayede üretim için kullanılan malzemeden tasarruf edilebilir, kullanılabilir bina ve ürün net hacimleri arttırılabilir ve ürün ömrü tamamlandığında ortaya çıkacak olan atık malzemeler azaltılabilir (Deniz, 2008). Hali hazırda mevcut VİP'lerin yaygınlaşmasında en önemli engel yüksek üretim maliyetleridir. Vakumlama ve ambalajlama göreceli ucuz yöntemler olup günümüzde pek çok endüstriyel alanda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. VİP'lerinde maliyeti etkileyen en önemli öğenin çekirdekte kullanılan hammaddeler olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte bu konularda çalışan firma ve araştırma sayısının az olması VİP fiyatlarının diğer yalıtım malzemeleri ile yeterli rekabet düzeyine ulaşmasını geciktirmektedir. Çekirdek hammaddenin birim maliyetinin düşürülmesi VİP'lerin üretim maliyetinide önemli derecede azaltacak, dolayısıyla kullanımı giderek yaygınlaşacaktır.

Vakum izolasyon panelleri; gözenekli yapıdaki bir iç dolgu hammaddesinin, dolgu malzemesi karakterine bağlı gaz giderici malzeme kullanılarak ya da tek başına bir koruyucu bariyer içine konulup vakum ve sızdırmazlığın sağlanması ve atmosfere kapatılması ile oluşturulur (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).



Şekil 4.1 Vakum izolasyon paneli



Şekil 4.2 Bir VIP'nin içyapısı (Malone ve Weir, 2001)

VİP'ler dolgu malzemesi türüne de bağlı olarak birkaç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler gözenekli yapıya sahip “çekirdek”, dolgu maddesi olarak toz malzeme kullanılan çekirdekler için vakum geçirici “iç zarf” ve vakum sonrası çekirdek malzemesini atmosfere kapatmak suretiyle gaz geçirimsizliği sağlayan sızdırmaz “dış zarf (bariyer)” ve çekirdek içerisindeki gazları-nemi absorbe edebilecek gaz ve nem gidericidir.

Toz malzeme kullanılarak elde edilen çekirdeklerin, kâğıt ya da elyaf tela kullanılarak hazırlanan iç zarf malzemesi içerisine yerleştirildikten sonra vakumlanması sağlanmaktadır. İç zarf olarak kullanılan telanın vakumlanabilirliği, birim ağırlığı ve gözenek boyutu tasarımda çok önemlidir. Toz malzeme kullanılan çekirdeklerde tela, vakum esnasında toz malzeme tutabilmeli, vakuma engel olmamalı ve birim ağırlığı nispeten düşük

seçilmelidir. Açık hücreli poliüretan ve fiberglas gibi toz olmayan malzemelerde iç zarf kullanımına gerek kalmamaktadır.

Bariyer film VİP'nin dış yüzeyini oluşturan malzemedir. Bu malzemenin en önemli işlevi atmosferik gazlara ve neme karşı etkin bir geçirimsiz katman oluşturarak vakumun sürdürülebilirliğini sağlamaktır. Ayrıca alüminyum folyo ya da metalize katman içeren filmlerin yüzeyleri parlaktır. Bariyerlerin yüzey yansıtma kabiliyeti, VİP'nin radyasyonla ısı transferinin azaltılması açısından büyük önem taşır.

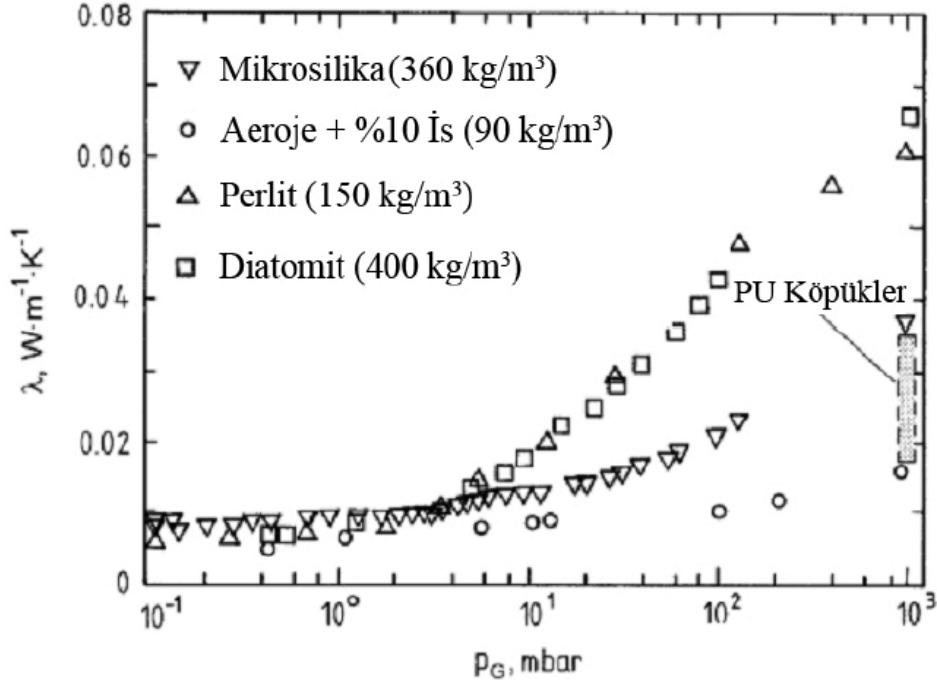
4.1.1 İç dolgu malzemesi

Genellikle açık hücreli olan ve iletim yoluyla gerçekleşen ısı transferini en az seviyeye indirecek özelliğe sahip bir ısı yalıtım malzemesidir. Bu özelliğinin dışında, temel bir diğer görevi de yapıya destek ve dayanıklılık sağlayarak gerekli mekanik dayanımı sağlamaktır.

Literatürde, vakum izolasyon panellerinde iç dolgu malzemesi olarak; silika ve fiber glass, aerojel, açık hücreli poliüretan, geri dönüşümü yapılmış üretan (ruf), açık hücreli ekstrude edilmiş polystren, fiberglas ve toz malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. VİP'yle ilgili olarak literatürde rastlanan çalışmaların birçoğu silis tozu, polimer esaslı, hidrojel ve aerojellerden meydana gelen iç malzemeleri ve bunların farklı zarf malzemeleriyle bileşimleri üzerine yapılmış olup, bu bileşimlerin oluşturduğu ısı iletim katsayıları araştırılmıştır. Şekil 4.4 'te farklı iç dolgu malzemeleri ile yapılan VİP'nin, değişik vakum seviyelerindeki toplam ısı transfer katsayıları karşılaştırılmıştır. Ancak, bu değerlerin VİP'lerin merkez bölgeleri için geçerli değerler olup termal köprü etkisinin dikkate alınmadığını belirtilmelidir.

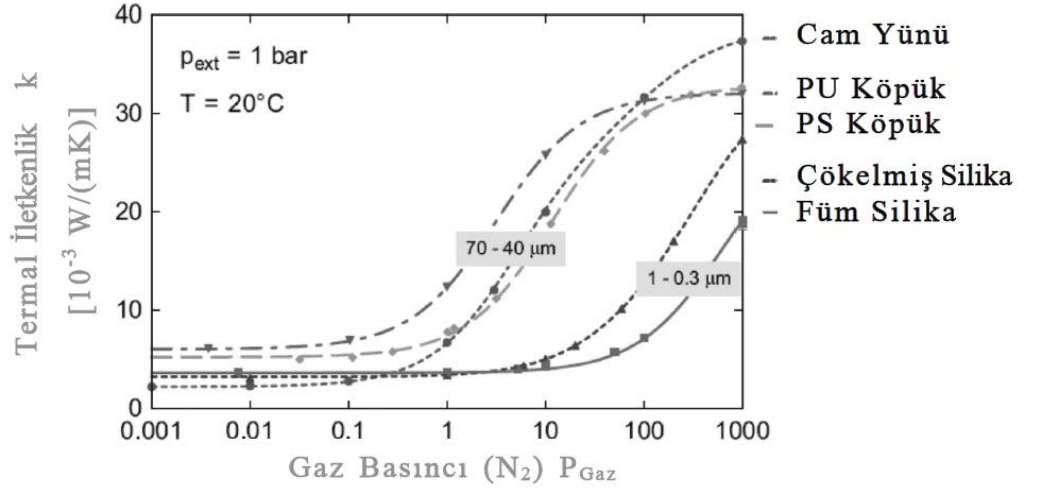
Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 'de VİP üretiminde kullanılan çeşitli malzemelerin ısı iletkenlikleri ve gözenek basınç seviyelerine bağlı değişim gösterilmiştir (Fricke J., 2005). Bu şekillerden de açıkça görülebileceği gibi, dolgu malzemesinin ısı iletkenliğinin logaritmik olarak artışı bir eşik basınç noktası mevcuttur. Bazı dolgu malzemeleri için bu eşik noktası 10 Pa gibi düşük

bir değer olabilirken, bazı dolgu malzemeleri için ise bu değer 10000 Pa gibi yüksek bir değer olabilmektedir. Bu durum, açık hücreli dolgu malzemesinin yüksek gözenek basıncında daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olabilmesinin, malzemenin gözenek yapısı ile ilgili olduğu anlaşılmaktadır (Fricke vd., 2008).

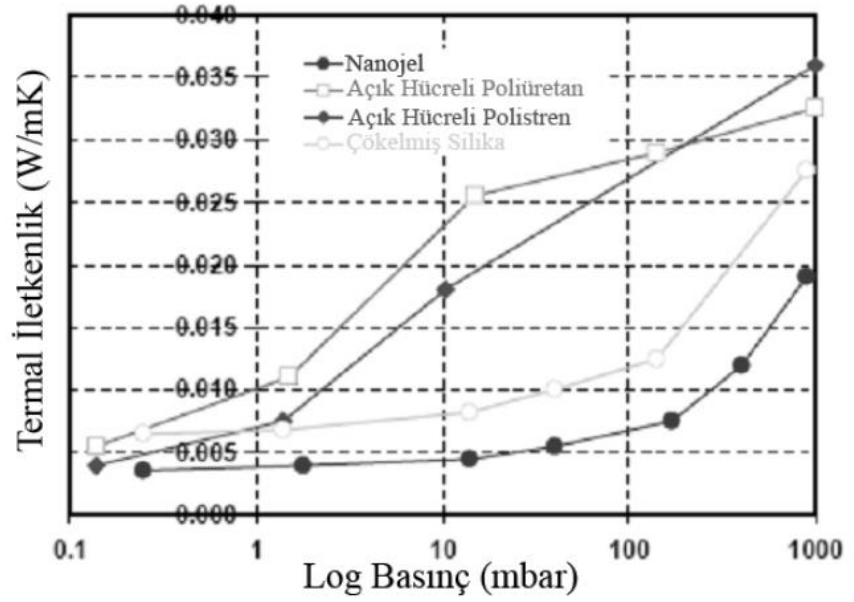


Şekil 4.3 300 K'de çeşitli silika dolguların gaz basıncına bağlı olarak ısıl iletkenlikleri (Fricke, 2005)

Küçük gözenekli dolgu malzemeleri, göreceli yüksek gözenek basınçlarında daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olabilmektedir. Bu sebepten dolayı, mikro veya nano gözenek yapısına sahip çökelmiş silika, füm silika ve nanojel malzemeleri; cam yünü, açık hücreli poliüretan köpüğü, açık hücreli polistren köpüğünden farklı olarak, 10000 Pa gibi düşük vakum seviyelerinde düşük ısıl iletkenlik karakteristiği göstermektedir. Bu arada, nano gözenekli dolgu malzemeleri, mikro veya makro gözenekli dolgu malzemelerine kıyasla çok daha pahalıdır. Bu durum, nano gözenekli dolgu malzemelerinin üretimi için gereken hammaddenin pahalı olması ve üretim prosesinin karmaşıklığından kaynaklıdır.



Şekil 4.4 Farklı iç dolgu malzemeleri için vakum seviyesi-ısı iletim katsayısı ilişkisi (Fricke, 2005)



Şekil 4.5 Gözenek basıncı ile dolgu malzemesinin ısı iletkenliğinin değişimi (Fricke, 2005)

4.1.2 Koruyucu bariyer

Koruyucu bariyerler, vakumlanmış iç malzemenin dışını tamamen saracak şekilde yapıyı dış ortamdan ayıran yapıya sahip genellikle metalize yapıdaki filmlerdir. Genel olarak, AL (alüminyum), PET (polyester), PS (polystren), PP (polypropylene) tabakalardan meydana gelen lamineli bir

yapıdadırlar. Bu filmlerin özelliği, gaz ve nem geçirgenliklerinin çok dk seviyede olmasıdır. Bu sayede, i dolgu malzemesine uygulanan vakum işlemi sonucunda ulaşılan dk basınç değerleri uzun süre korunabilmektedir (Simmler ve Bruner, 2005).

Çizelge 4.1 VİP’de kullanılan bir bariyer filmin katmanları (Simmler ve Bruner, 2005b)

Katman	Madde	Görevi	Kalınlık
1	Polyester (PET)	Koruma katmanı	12 μm
2	Alüminyum Film (ALU)	Bariyer katmanı	30 nm
3	retan Bazlı Yapıştırıcı (PUR)	Yapıştırıcı	2 μm
4	Alüminyum Film (ALU)	Bariyer katmanı	30 nm
5	Polipropilen (PP)	4 için substrat	18 μm
6	retan Bazlı Yapıştırıcı (PUR)	Yapıştırıcı	2 μm
7	Alüminyum Film (ALU)	Bariyer katmanı	30 nm
8	Polyester (PET)	7 için substrat	12 μm
9	retan Bazlı Yapıştırıcı (PUR)	Yapıştırıcı	2 μm
10	Düşük Yoğunluklu Polietilen (PELD)	Sızdırmazlık katmanı	60 μm

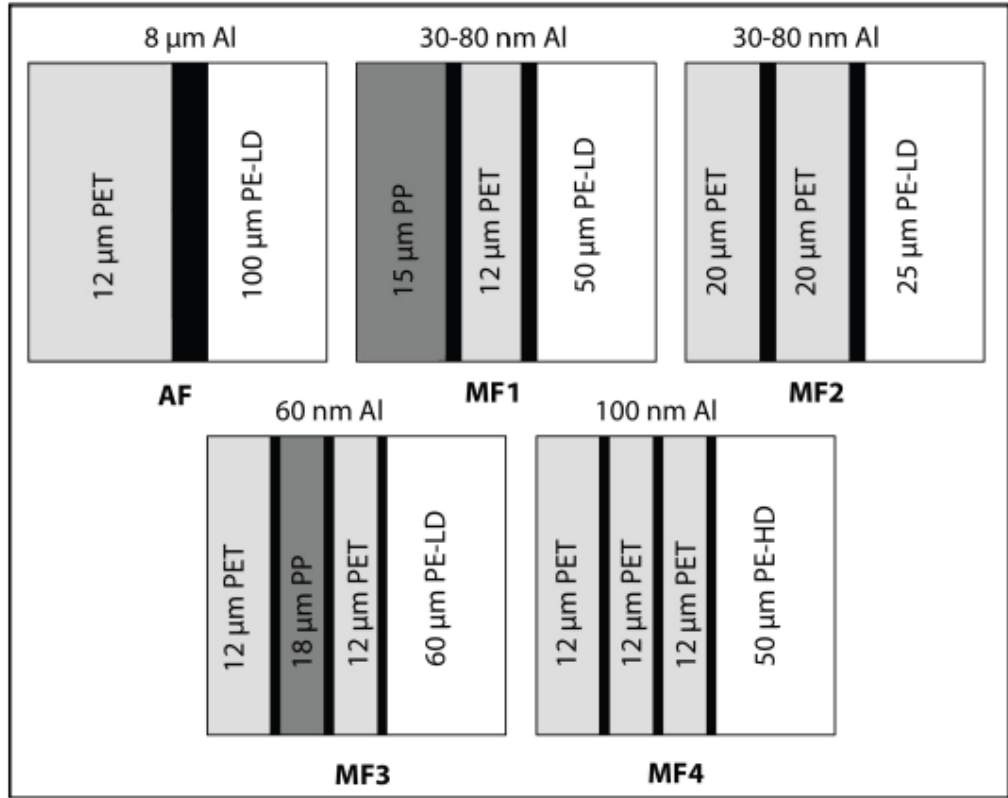
Gaz ve nem geçirgenliğinin düşük olması yanında koruyucu bariyer malzeme zellikleri, VİP kenarlarında oluşacak termal köprüleri minimuma indirecek seviyede düşük ısı iletimine sahip olmalıdır. Birçok durum için yapılan deneyler, VİP kenarlarındaki ısı köprülerin ihmal edilemez düzeyde yüksek olduğunu göstermektedir. (Ghazi Wakili vd., 2004 ; Willems vd., 2005).

En yaygın koruyucu bariyer cinsi birkaç tabakalı metalize polimer film veya alternatif olarak incelti miş metal tabakalardan meydana gelir. Metal bariyerler genel olarak hava ve buhar penetrasyonuna karşı en yüksek korumayı sağlar fakat yüksek ısı iletim katsayıları ve termal köprü etkileri VİP’lerde kullanımını verimsiz hale getirebilir. En yaygın film türleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Willems vd., 2005).

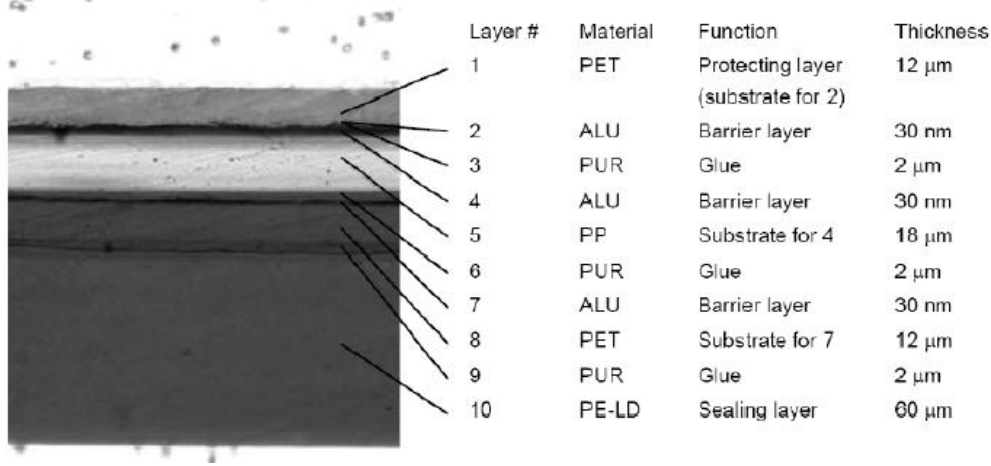
Metal Film (AF) : Kalınlığı 10 μm ’ye ulaşan merkezi bir alüminyum katman kullanılır. Bu katman Polietilen teraptalat (PET) ile lamine edilerek

mekanik dayanım sağlanır ve termal köprüler azaltılır.

Metalize Filmler (MF) : Bu laminasyonlarda birden fazla Alüminyum-Metalize polietilen terepalat (PET) veya polipropilen (PP) tabakası bulundurulur. Şekil 4.6'de dört farklı MF laminasyon türüne ait farklı kesitlerden görüntüler verilmektedir. Tüm laminasyonlarda sızdırmazlık amacıyla bir polietilen (PE) tabaka bulunur. Şekil 4.7'de ise MF3 laminasyonunun mikroskopik şekli görüntülenmiştir.



Şekil 4.6 VIP uygulamalarındaki farklı bariyer çözümlerinin kesit görüntüsü. Bariyer isim ve yapıları IEA/ECBCS Annex39'a göre verilmiştir. Resim üzerindeki rakamlar toplam katman kalınlıklarını simgeler



Şekil 4.7 VİP bariyeri için kullanılan çok katmanlı laminasyonun görselleştirimi (Simmler ve Brunner 2005a).

Nem geçirgenliği MF bariyerlerinin AF bariyerlere göre zayıf olduğu taraftır. Bununla beraber MF bariyerlerinin bina uygulamalarındaki servis ömürlerine ait birçok veri bulunmaktadır (Simmler ve Brunner, 2005b).

4.1.3 Gaz giderici

Vakum seviyesindeki artışın önlenmesi ve kullanım ömrünün artırılması için, VİP içerisine gaz giderici yerleştirilmektedir. Yerleştirilen gaz giderici miktarı VİP servis ömrü ile birinci dereceden ilişkilidir. Gaz gidericiler kimyasal elemanlardır ve panel içindeki atık gazları ve su buharını tutmaktadırlar. VİP'lerin ömrü belirlendikten sonra gaz ve su buharı geçirgenlikleri ile gaz yayılımı değerleri dikkate alınarak tespit edilen ve panel içine yerleştirilen gaz giderici malzemenin ömrü bittiği anda vakum izolasyon paneli de ömrünü tamamlamaktadır (Deniz vd., 2008). Su buharı için nem çekiciler kullanılırken diğer gazlar için farklı gaz gidericiler kullanılabilir. Silika yapılı VİP'lerde çekirdek kendiliğinden nem giderici olarak görev yaparken diğer yapı türlerinde belirli miktarlarda nem giderici kullanımı gereklidir.

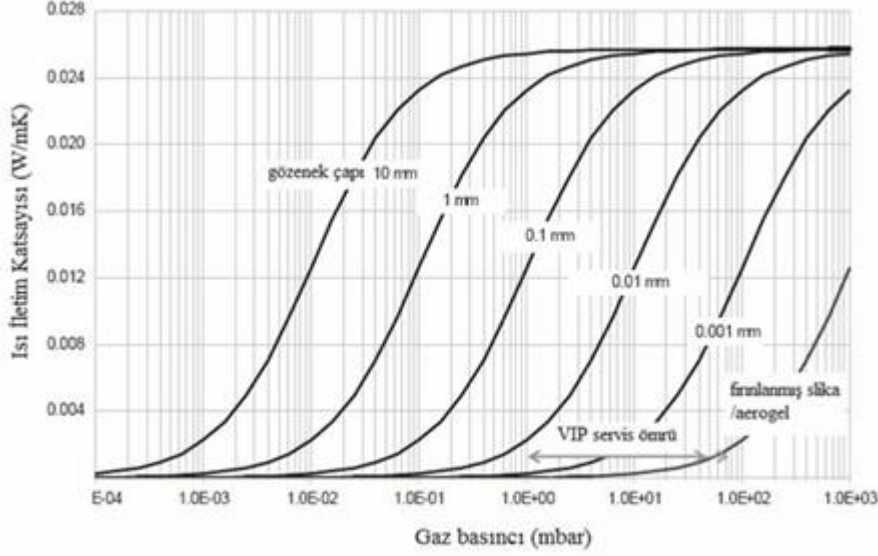
Düşük vakum seviyelerinde iç dolgu malzemesine, dış ortamdan gaz ve nem girişi oldukça kolay gerçekleşmektedir. Desiccant ve getter olarak bilinen malzemeler olası gaz ve nem sızmaları durumunda VİP'nin performansının düşmemesi ve bu kaçakları direkt kendi üzerlerine almaları amacıyla yapıya

eklenmektedir (Simmler ve diğ er., 2005).

4.2 Vakum İzolasyon Panellerinde Isı Transferi

VİP'lerin ısı iletim performansları birçok iç ve dış nedene bağı lık gösterir. Bu bağı mlılıkta teorik ilişkiler esastır ve yaş lanmanın tahmin ve tespit edilebilmesinde gerekli altyapıyı oluşturur. Yüksek basınçta gaz moleküllerinin ortalama hareket yörüngeleri içerisinde hareket ettikleri gözeneklerin boyutlarından daha küçük hale geldiğ inden, gaz molekülleri arasındaki çarpışmalar ısı transferinin çok etkili bir biçimde çalışmasını sağlar. Birim hacimdeki gaz tanecik sayısının artması sonucunda oluşan yüksek basınç ortamı, gaz moleküllerinin ortalama hareket yörüngelerini düşürür ve gaz ile oluşan ısı taşınım mekanizması daha etkin hale gelir.

VİP'de yapılan ise vakum etkisi sayesinde ortamda bulunan gaz molekülü sayısını düşürmek ve gazın basıncını mümkün olduğ unca azaltmaktır. Bu sayede gazın ortalama hareket yörüngesinde bir artış sağ lanmaktadır. Birim hacimde serbest olarak hareket eden gazların çarpışma mekanizması etkinliğini yitirmektedir. Gazın hareket ettiğ i boşluğ un hacmi azaldıkça bu mekanizma daha da iyi çalışmaktadır. Bu nedenle VİP içerisinde kullanılan iç dolgu malzesinde boşlukların bulunduğu gözeneklerin mümkün olan en küçük boyutlarda olması ısı taşınım mekanizmasını mümkün olan en düşük seviyelere getirmektedir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8 Farklı Gözenek Boyutları (SiO₂) ve Basınlarda Havanın Isıl İletkenliği

Homojen ve kaynaşmış bir içyapıda ısı iletkenlik (λ_{tot}) bu şekilde belirtilir (Brodt 1995) :

$$\lambda_{tot} = \lambda_{cd} + \lambda_g + \lambda_r + \lambda_{cv} \text{ mW/mK} \quad (4.1)$$

Şöyle ki;

λ_{cd} = Malzeme iskeletindeki katı iletimi W/mK

λ_g = Malzeme gözeneklerindeki gaz taşınımı W/mK

λ_r = Gözenek yüzeylerindeki radyatif ısı transferi W/mK

λ_{cv} = Gözeneklerdeki hava ve nem taşınımı W/mK

Bununla beraber gaz molekülleri ve gözenek duvarları arasındaki etkileşimi hesaplamak için bağlaşım etkisi dahil edilebilir. Bağlaşım etkisi bu tezin sınırları dışında karmaşık olduğundan sonraki konularda yer etmeyecek ve ihmal edilecektir. VİP ısı performansını ele alan birçok termodinamik hesap yönteminde ve araştırmada bağlaşım (coupling) ihmal edilmektedir.

Bu tip yalıtım malzemelerinde gözenek boyutları 1 μm den daha küçüktür. Oda koşullarına yakın sıcaklık ve bu hücre boyutlarına göre Grashof sayısı hesaplandığında, hücreli ve gözenekli yalıtım malzemelerinde taşınım ile

ısı iletiminin ihmal edilebilir boyutlarda olduğu, hatta gerçekleşmediği kabul edilebilir. Fricke ve Heinemann yaptıkları çalışmalarda yine taşınım ile ısı transferini, vakum ortamı ve küçük gözenek boyutları için ihmal edilebilir olduğunu kabul etmişlerdir.

VİP'nin yüksek yalıtım performansının nedeni esas olarak gaz basıncının azaltılmasıyla beraber azalan gaz taşınımıdır. Performansın en yüksek olduğu yere mutlak vakum seviyesinde yani λ_g sıfır iken ulaşılır. Bu Knudsen etkisi sonucu oluşur. Knudsen etkisi, malzemenin gözenek boyutu ve gaz molekülü sayısına bağlı ısı taşınımını ilişkisidir. Düşük basınçlar daha uzun ortalama serbest yol verirler ve bu durum Knudsen etkisini arttırmaktadır. Denklem 4.2 ve denklem 4.3'te görüldüğü üzere ortalama serbest zamanın arttırılması Knudsen etkisini arttıracak, dolayısıyla gaz iletimini düşürecektir.

Knudsen etkisinin gaz iletimi üzerindeki etkisi bir sonraki ilişki ile hesaplanabilir (IEA/ECBCS 2005a):

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{g0}}{1+2\beta Kn} \quad (4.2)$$

Burada "Kn" Knudsen sayısını ifade eder. Knudsen sayısı, ortalama serbest hareket yolunun (l_{mean}), gazın içerisinde hareket ettiği gözeneklerin karakteristik boyutuna (δ) oranı olarak tanımlanır.

$$Kn = \frac{l_{mean}}{\delta} \text{ ve } l_{mean} = \frac{k_B T}{\sqrt{2\pi} d_g^2 P_g} \quad (4.3)$$

$$\lambda_{g0} = \text{Serbest hava iletkenliği} \frac{W}{mK}$$

β = Gaz molekülü ve katı gözenek duvar arasındaki enerji transferini karakterize eden sabit (1.5 ve 2.0 arasında)

l_{mean} = Havanın ortalama serbest yolu (m)

δ = Gözenek karakteristik boyutu, gözenek çapı (m)

k_B = Boltzmann sabiti (J/K)

T = Sıcaklık (K)

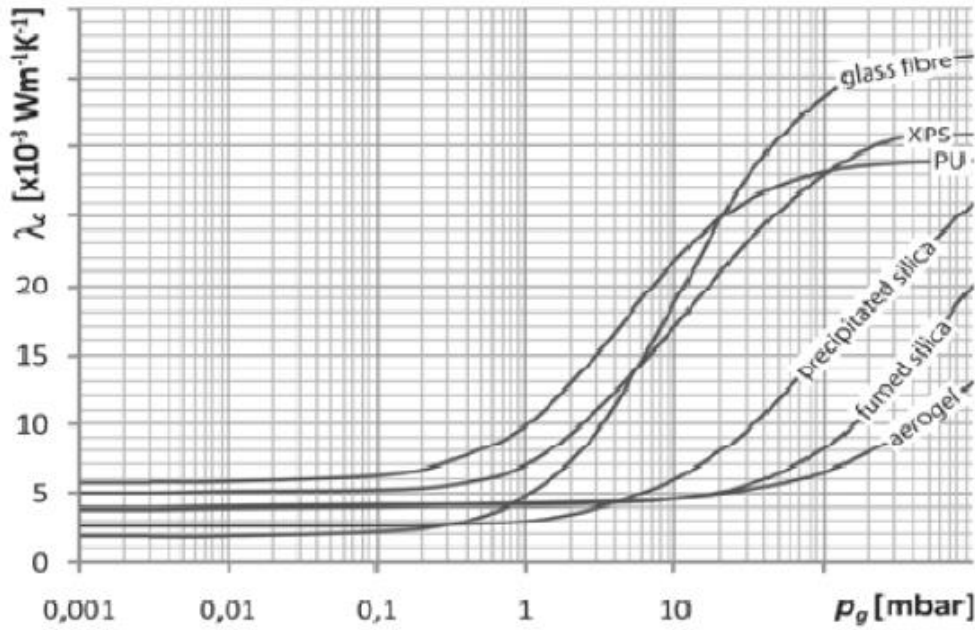
d_g = Gaz molekülü çapı (m)

P_g = Gaz basıncı (Pa)

Denklem 4.2 ve 4.3, denklem 4.4'ü elde etmek için kullanılırken gözenekli malzemedeki gazların ısı iletimine etki eden 3 ana parametreyi göstermektedir. Gaz basıncı, karakteristik gözenek boyutu ve sıcaklık (Baetens vd., 2010a).

$$\lambda_g = \frac{\lambda_{g,0}(T)}{1 + C \frac{T}{\delta P_g}} = \frac{\lambda_{g,0}(T)}{1 + \frac{P_1}{P_g}} \quad (4.4)$$

Burada $P_{1/2,g}$ ısı iletkenliğinin $\lambda_{g,0}$ 'ın yarısına ulaştığı basınç ve $C = \frac{2\beta K b}{\sqrt{2\pi} d_g^2}$ ile ifade edilen sabittir. Bu denklemden de belli olduğu gibi VİP'nin çekirdek malzemesinin seçimi talep edilen termal performansın elde edilmesinde en önemli unsurdur. Isı iletimi ve gaz basıncı ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



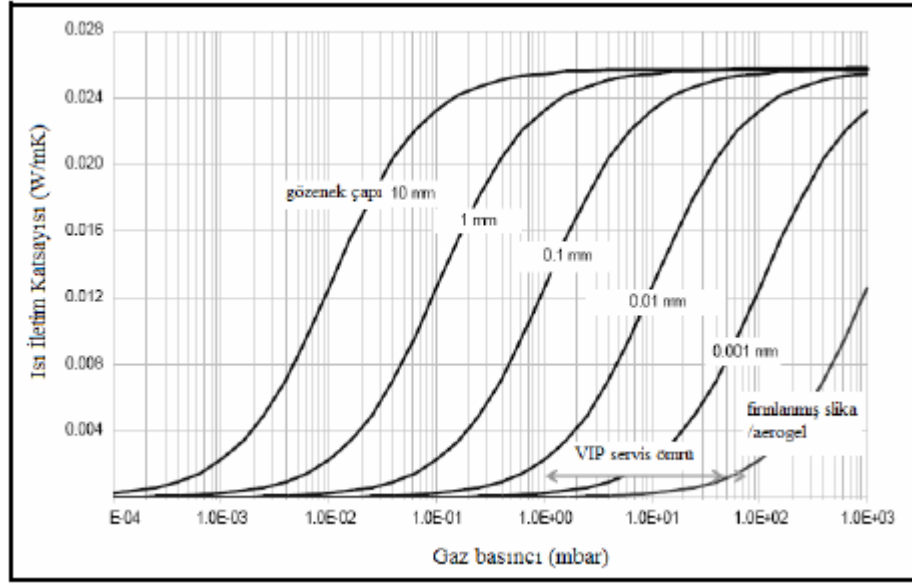
Şekil 4.9 Çeşitli malzemelere ait ısı iletimi, gaz basıncı ilişkisi (Tenpierik 2009)

Şekil 4.10 da görüldüğü üzere mikro veya nano boyutta gözenek yapısına sahip bir malzemenin basıncı 1 mbar seviyesinin altına getirildiğinde malzemenin boşluklarında hapsolan hava ısı iletim katsayısı mutlak sıfır değerine yakınsar ($\lambda_g \sim 0$ W/Mk). Bu duruma ulaşmak için gerekli olan vakum

seviyesi literatürde orta dereceli vakum seviyesi olarak tanımlanır. Bu değerler arasında; viskoz ve moleküler akış arasındaki geçiş bölgesi olarak kabul edilen Knudsen etkisi söz konusudur.

Gözenekli veya hücreli bir malzemenin boşluklarında yer alan hava yoluyla gerçekleşen ısı iletimi düşük vakum seviyelerinde minimuma indirgenebilir. Bu durumda denklem 4.5 halini alır.

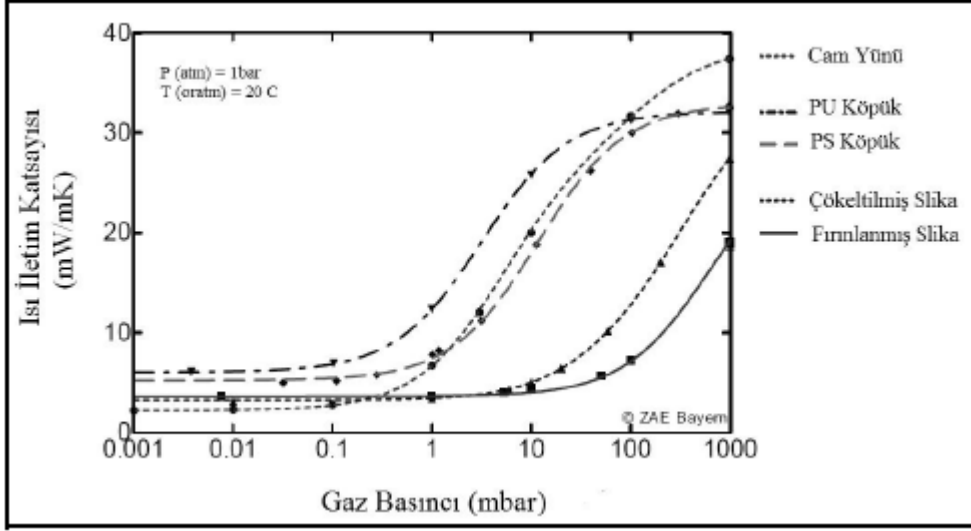
$$\lambda = \lambda_s + \lambda_r \quad (4.5)$$



Şekil 4.10 Farklı gözenek boyutları ve basınç seviyelerinde havanın ısı iletim katsayısı (Simmler ve diğer., 2005)

Denklem 4.5 de görüleceği üzere gözenekli veya hücreli yapıya sahip yalıtım malzemelerinde uygun vakum şartları sağlandığında yalnızca katı yoluyla ısı iletimi ve ısı ışınımı meydana gelir (Fricke, 2005).

Sonuç olarak gözenekli veya hücreli yapıya sahip ısı yalıtım malzemelerinin vakum etkisi altındaki toplam ısı transferi, ısı iletimi, katı iletimine ve ışınım ile ısı transferine bağlıdır. Özellikle silika bazlı iç dolgu malzemelerin kullanıldığı vakum izolasyon panellerinin iç kısmında ulaşılan ısı değerleri, katı ortamdaki ısı iletimi için 0,002-0,003 W/Mk ve termal radyasyon içinde 0,001 W/Mk olmak üzere, toplamda 0,004 W/Mk değerine yaklaşır (Simmler ve Bruner 2005a). Şekil 4.11 de farklı iç dolgu malzemeleri ile yapılan VIP'nin, değişik vakum seviyelerindeki toplam ısı transfer katsayıları karşılaştırılmıştır.



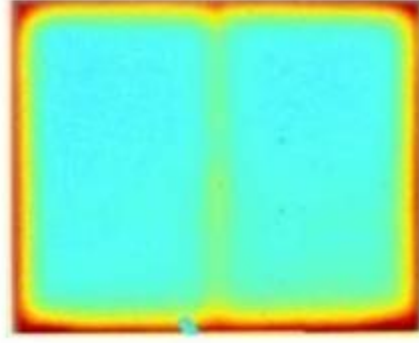
Şekil 4.11 Farklı iç dolgu malzemesine sahip vakum izolasyon panellerin ısı iletim katsayıları (Simmler ve diğer, 2005)

4.3 Termal Köprü Etkisi

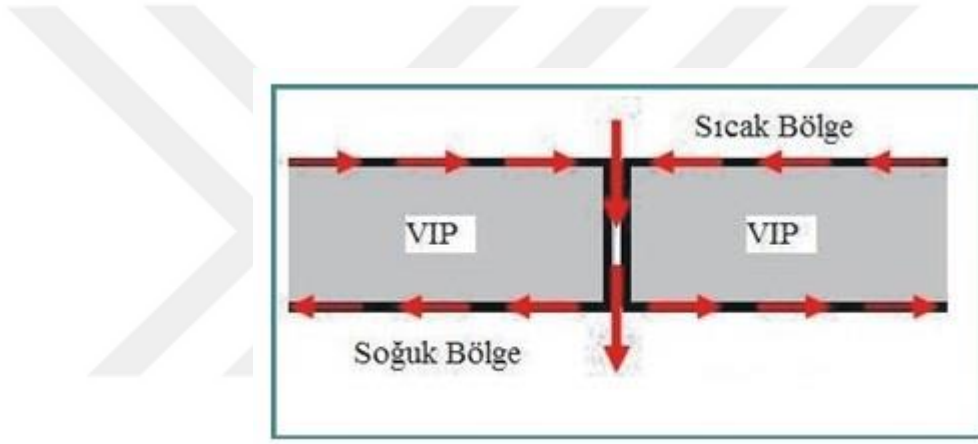
Yapı elemanları içerisinde ve diğer uygulamalarda vakum izolasyon panelin konumlandırılma şekli çok önemlidir. Bunun nedeni ise, vakum izolasyon panellerinde ısı transferinin en önemli etkenlerinden biri olan termal köprü etkisidir. Özellikle silika bazlı iç dolgu malzemelerin kullanıldığı vakum izolasyon panellerinin iç kısmında ulaşılan ısı değerler, katı ortamdaki ısı iletimi için $0.002-0.003 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ve termal radyasyon için de $0.001 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ olmak üzere, toplamda yaklaşık olarak $0.004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ olarak bilinse de, gerçekte bu değerlerin vakum izolasyon panelinin tamamı için ve her noktasında sağlanması mümkün olmamaktadır. Çünkü bu iç dolgu malzemesinin dışını saran alüminize ya da metalize koruyucu bariyer filmlerin ısı iletim katsayıları oldukça fazladır. ($10-250 \text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$) Özellikle, vakum izolasyon panelin yan duvarlarında ve bariyer filmin katlanma detaylarında bu etki, ısı iletimi üzerinde kendini net bir şekilde göstermektedir (Şekil 4.12).

Wakili ve arkadaşlarının yaptığı birçok çalışma sonucunda; termal köprü olayının vakum izolasyon panelindeki ısı iletimine etkisi incelenmiş ve efektif ısı iletim katsayısı için aşağıdaki denklem geliştirilmiştir: Yapı içerisindeki vakum izolasyon panelinin birbirine temas etmesi durumunda ise etki daha da artmaktadır (Şekil 4.13). Yapılan çeşitli ölçüm ve çalışmalara göre; metalize bariyer filmin köşelerinden geçen ısı, iç dolgu malzemesinin tamamından geçen

ıııdan daha fazla olduğu durumlar mevcuttur (Wakili vd., 2011).



Şekil 4.12 VIP içinde gerçekleşen termal köprü



Şekil 4.13 İki VIP arasında gerçekleşen termal köprü

Ayrıca literatürde yapılan çalışmalarda, vakum izolasyon panellerinde kullanılan bariyer filmlerin ısı iletim katsayısına etkisi incelenmiştir. Tablo 4.2 'de, $0.004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ısı iletim katsayısı için tasarlanan bir vakum izolasyon panelinin ısı transfer katsayısının, kullanılan bariyer filme bağılı olarak $0.006\text{-}0.008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ aralığında değıştığı görülmektedir (Erb. M. Eicher ve Pauli A.G, 2005).

VIP çevresindeki metalize çok katmanlı polimer laminasyonlar VIP'deki toplam ısı akısını artırır. Laminasyon üzerindeki ek ısı akısı lineer ısı geçirgenliğı ile hesaplanabilir, Ψ ($\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Bu değer nümerik (Binz, 2005; Schwab, 2005; Sprengard ve Spitzner, 2011) ya da analitik olarak hesaplanabilir (Tenpierik ve Cauberg, 2007). Lineer ısı geçirgenliğini sıcak plaka yöntemiyle ölçmek mümkündür (Brunner, 2012b; Ghazi Wakili, 2004; Ghazi Wakili, 2011).

Wakilli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar sonucunda: termal köprü oluşumunun vakum izolasyona panelindeki ısı iletimine etkisi incelenmiş ve efektif ısı iletim katsayısı için Denklem 4.6 geliştirilmiştir (Wakilli, Nussbaumer ve Bundi, 2005).

$$\lambda_{eff} = \lambda_{cop} + \psi \cdot d \cdot \frac{P}{A} \text{ mW/mK} \quad (4.6)$$

Burada λ_{cop} (mW/(m·K)) panel merkezindeki ısı iletimini, d (m) VİP kalınlığını, P (m) çevre uzunluğunu ve A (m²) VİP alanını gösterir. Lineer ısıl geçirgenliği; panel merkezi ısı iletimine, katmanların ısı iletkenliğine, panelin kalınlığına ve bariyer malzemesine göre değişkenlik gösterir (Binz, 2005).

Ayrıca literatürde yapılan çalışmalarda, vakum izolasyon panellerinde kullanılan bariyer filmlerin ısı iletim katsayısına etkisi incelenmiştir. Çizelge 4.2’de merkezinde 0,004 W/mK ısı iletim katsayısı ölçülen bir vakum izolasyon panelin efektif ısı iletim katsayısının, kullanılan bariyer filme bağlı olarak değişimi sunulmaktadır.

Çizelge 4.2 Vakum izolasyon panellerinde bariyer filmlerin ısı iletim katsayısına etkisi (Erb. M. Eicher ve Pauli A.G, 2005)

Vakum izolasyon panelinde kullanılan bariyer film	λ (W/mK)
Al folyo film	0,006
Metalize polimer film (50x50x2 cm ³)	0,008
Metalize polimer film (100x100x2 cm ³)	0,007

4.4 Vakum İzolasyon Panellerinde Yaşlanma

VİP’lerin yaşlanma mekanizmaları hakkında literatürde yalnızca birkaç çalışma bulunmaktadır. Günümüzde gerçek anlamda yaşlanma deneyinin nasıl yürütüleceği konusunda bir yöntem birliği yoktur. Simmler ve Brunner (2005a,b) nem, ısı şartlarına ve iç basınç artışına dayanan bir korelasyon geliştirdiler. Ek olarak Schwab (2005 a,b,c) tarafından elde edilen sonuçlar VİP fiziğinin iç yüzünü anlayabilmek ve analitik olarak yaşlanmasını değerlendirebilmek adına çok kıymetli sonuçlar sunmaktadır. Bu makalelerde VİP’lerin yaşlanmasındaki teorik arkaplanı, servis ömrünün öngörülebileceği

formül, grafikler ve çeşitli durumlardaki yaşlanma faktörleriyle beraber sunmaktadır.

VİP termal performansı, panel içerisindeki vakum seviyesi ile yüksek oranda ilişkili olduğundan ötürü, zarftan geçen her türlü gaz VİP'nin termal özelliklerinin değişimine katkıda bulunur. Olağandışı mekanik gerilim, kırılmalıklar ve üretim hataları dışında oluşan gaz ve nem geçirgenliği yaşlanmadaki en önemli etken olarak değerlendirilebilir.

VİP iç ve atmosfer ortamı arasındaki basınç farkı nedeniyle, VİP içerisine düşük seviyede de olsa sürekli bir gaz ve nem girişi vardır. Bu durum, panelin ömrünü ve de ısı yalıtım özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Bu konuda Simmler ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalara göre; vakum izolasyon panelinin içinde 3mbar/yıl düzeyinde gerçekleşen basınç artışı, vakum izolasyon paneli ısı iletim katsayısında yaklaşık olarak $0.001 \text{ (W/m}\cdot\text{K)} / 10$ yıl düzeyinde bir artışa neden olmaktadır. Ya da hava ile denge halinde 4% oranında gerçekleşecek kütsel nem artışı, vakum izolasyon panelinin ısı iletim katsayısında yaklaşık olarak $0.002 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ değerinde bir artışa neden olmaktadır (H. Simmler ve S. Brunner, 2005b).

Vakum seviye artışının ve yaşlanmanın önlenmesi veya yavaşlatılması için, VİP'lere gaz gidericiler yerleştirilmektedir. Yerleştirilecek gaz giderici miktarı doğrudan planlanan VİP ömrü ile ilişkilidir. Gaz gidericiler kimyasal elemanlardır ve panel içindeki atık gazları ve nemi tutmaktadırlar. VİP ömrü belirlendikten sonra gaz ve su buharı geçirgenlikleri ile gaz yayılımı değerleri dikkate alınarak panel içine yerleştirilen gaz giderici malzemenin ömrü bittiği anda panel de ömrünü tamamlamaktadır.

4.4.1 Gaz geçirgenliği

Dış atmosfer ve vakum izolasyon panelin iç ortamı arasındaki basınç farkı nedeniyle, vakum izolasyon panel içerisine dış ortamdan sürekli bir gaz girişi söz konusu olacaktır. Bu durum hem panelin ömrünü hem de ısı yalıtım özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Konuyla ilgili Simmler'in yaptığı çalışmaya göre; vakum izolasyon paneli içinde gerçekleşen 3 mbar/yıl düzeyindeki basınç artışı, vakum izolasyon panelin ısı iletim katsayısında yaklaşık olarak $0,001 \text{ (W/mK)} / 10$ yıl seviyesinde bir artışa neden olmaktadır.

(Simmler ve Bruner, 2005a)

VİP zarfındaki ortalama madde alışverişi gaz moleküllerinin boyutu ve özelliklerine bağlıdır. Oksijen ve diğer hava gazları için bu taşınım esas olarak zarf üzerindeki makroskobik seviyedeki kusurlarda meydana gelir. Su buharının nüfuz etmesindeki ana taşıyıcı etken moleküllerin polimer içerisinde ayrışması ve kılcallarda yoğunlaşmasıdır. Genellikle Oksijen için bariyer zarfın makro yapısının hayati olduğunu belirtmekle beraber su buharında mikro yapı ayrıca bir önem arz etmektedir (IEA/ECBCS Annex 39).

VİP zarfı birçok farklı türde katmanlardan oluşan bir yapıdır. Bundan dolayı zarflardaki toplam geçirgenliği tespit etmek ampirik yöntemler dışında bir hayli güçtür. Bu değer Gaz Taşınım Oranı (GTO) veya Hava Taşınım Oranı (HTO) olarak ifade edilir. GTO, gazların VİP zarftan zamana bağlı olarak taşınımını ifade eder. HTO ise hava gazlarına maruz kalmış VİP'nin taşınım miktarıdır. Toplam gaz taşınım oranı (Schwab vd., 2005a)'da denklem 4.7'deki gibi ifade edilir.

$$GTR_{tot} = GTR_A(T, \varphi) \cdot A + GTR_L(T, \varphi) \cdot L \quad (4.7)$$

$$GTRA = \text{Laminasyon katmanından oluşan yüzey gaz yayılımı} \left(\frac{m^3}{m^2} \right)$$

$$A = \text{VYP toplam yüzey alanı} (m^2)$$

$$GTRL = \text{VYP çevresindeki gaz yayılım oranı ile ilgili uzunluk} \left(\frac{m^3}{m^2} \right)$$

$$L = \text{VYP çevre uzunluğu} (m)$$

GTR laminasyon geçirgenliği ile ilgili değerdir (Schwab vd., 2005a).

$$Q_{gas,tot} = \frac{GTR_{tot}}{\Delta P_{gas}} \quad (4.8)$$

Gaz geçirgenliği sonucunda, panel içerisindeki basınç miktarı artar. Bu basınç Schwab vd. (2005a)'ta hesaplanan GTR oranına bağlı olarak değişir.

$$\frac{dp_{gas}}{dt} = \frac{Q_{gas,tot} \Delta P_{gas}}{V_{eff}} \left(\frac{T_m P_0}{T_0} \right) = \frac{GTR_{tot}}{V_{eff}} \left(\frac{T_m P_0}{T_0} \right) \quad (4.9)$$

$$\left(\frac{T_m P_0}{T_0} \right) = \text{standard durum index } 0 \text{ dan ölçüm durumu index } m \text{ e kadar olan çevrim faktörü}$$

iken;

$V_{eff} = VYP$ içindeki etkin gözenek hacmi (m^3)

Servis ömrü hesaplanması için genel olarak Δp_{gaz} ilk olarak atmosfer basıncına eşit kabul edilir P_{atm} . Daha sonra Schwab et al. (2005a)'da belirtildiği gibi lineer olarak artar.

$$p(t) = \frac{Q_{air,tot} P_{atm}}{V_{eff}} \left(\frac{T_m P_0}{T_0} \right) t = \frac{GTR_{tot}}{V_{eff}} \left(\frac{T_m P_0}{T_0} \right) t \quad (4.10)$$

Denklem 4.11 analitik olarak iç basıncın, dış basıncın bir fonksiyonu olarak ifade edilmesiyle çözülebilir.

$$p(t) = P_{app} (P_{app} - P_{init}) e^{-\frac{-T_m P_0 Q_{gas,tot}}{T_0 V_{eff}} t} \quad (4.11)$$

$p_{app} =$ uygulanan dış basınç (Pa)

$p_{init} =$ VYP'nin iç basıncı (Pa)

4.4.2 Nem geçirgenliği ve performans üzerinde etkileri

Atmosfer ile vakum izolasyon panelin iç ortamı arasındaki basınç farkı nedeniyle, vakum izolasyon panel içerisine dış ortamdan sürekli bir nem alışverişi söz konusudur. Bu durum hem panelin ömrünü hem de ısı yalıtım özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Konuyla ilgili Simmler'in yaptığı çalışmaya göre; hava ile denge halinde 4% oranında gerçekleşecek nem artışı, vakum izolasyon panelin ısı iletim katsayısında yaklaşık olarak 0,002 W/mK değerinde bir artışa neden olmaktadır (Simmler ve Bruner, 2005a).

Schwab (2005a,b) ve Simmler&Brunner (2005b) lamine bariyerlerden geçiş yapan su buharı oranını belirlemek için birçok deneyde bulunmuşlardır. Bu oran panel büyüklüğü ve ölçüm koşullarına bağlı bir değişim halindedir. Buna neden olarak koruyucu zarfın farklı katmanlarla birçok farklı malzeme içermesi ve bu özelliğinden dolayı üzerindeki geçirgenliğin tespit edilmesinin güçlüğüdür. Bunun yerine su buharı geçirgenlik oranı (WVTR) değeri kullanılır (Schwab vd., 2005a).

$$WVTR = \frac{dm_w}{dt} = Q_{wv,tot} \Delta p_{wv} \quad (4.12)$$

$$WVTR = \frac{dm_w}{dt} = \text{zamana bağılı kütle artışı}$$

$$Q_{wv,tot} = \text{toplam su buharı geçişi (kg/(s Pa))}$$

$$\Delta p_{wv} = \text{su buharı basınç farkı (Pa)}$$

Denklem 4.12 kullanılarak su içeriğinin artışını teorik olarak hesaplayan bir denklem geliştirilebilir. Kısmi buhar basıncı, denklem 4.13'ye göre eşsıcaklık soğurma eğrisinin ters fonksiyonu kullanılarak hesaplanabilir (Schwab vd., 2005a).

$$P_{wv} = \varphi(x_w)P_{wv,sat}(T) \quad (4.13)$$

$$P_{wv} = \text{su buharı kısmi basıncı (Pa)}$$

$$P_{wv,sat}(T) = \text{sıcaklığa bağılı su buharı doyma basıncı (Pa)}$$

$$\varphi(x_w) = \text{Su içeriğine bağılı bağıl nem}$$

Zamana bağılı su içeriği değişimi (Schwab vd., 2005a) ;

$$\frac{dX_w}{dt} = \frac{Q_{wv,tot}}{m_{VIP,dry}} (p_{wv,out} - p_{wv,in}) = \frac{Q_{wv,tot}}{m_{VIP,dry}} p_{wv,sat} (\varphi_{out} - \varphi_{in}(X_w)) \quad (4.14)$$

$$m_{VIP,dry} = \text{VIP'nin kuru kütlesi (kg)}$$

$$p_{wv,out}, p_{wv,in} = \text{sırasıyla VIP dışındaki ve içindeki su buhar basıncı (Pa)}$$

$$\varphi_{out}, \varphi_{in} = \text{sırasıyla VIP dışındaki ve içindeki bağıl nem (-)}$$

$$X_w(t) = k\varphi_{out} \left(1 - e^{-\frac{Q_{wv,tot} \cdot p_{wv,sat}(T)}{m_{VIP,dry} k} t} \right) \quad (4.15)$$

k bu denklemde emme izoterminin eğimini gösteren sabittir.

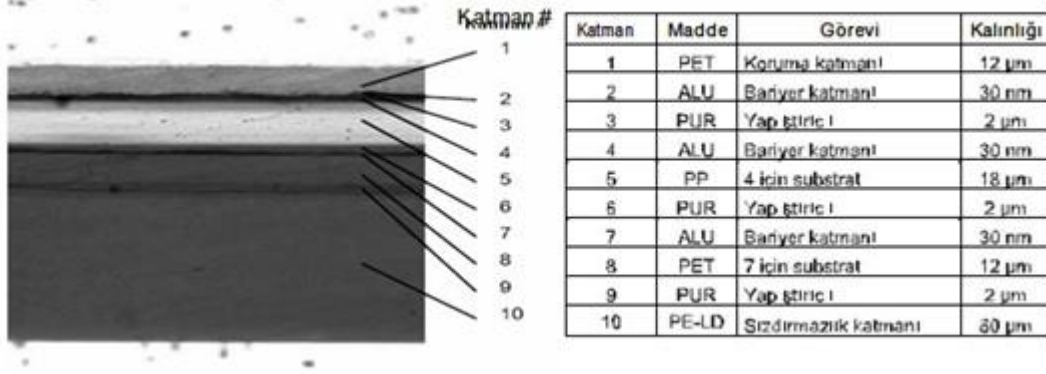
Denklem 4.15'te görüleceği üzere, sıcaklık ve bağıl nem faktörlerinin her ikisi de VİP üzerine etki eden nem taşımına etki eder. Sıcaklığın artmasıyla birlikte doyma basıncı eksponansiyel olarak artış gösterir. Bu değer artışı, bağıl nemde dikkate alındığında, su buharı basınç farkının daha da artmasına neden olacaktır. Bu nedenler nem transferinin önemli biçimde artmasına yol

açacaktır. Denklemden sabit k faktörü, %60'a kadar olan bağıl nemde, silika emme izotermine yaklaşık olarak %0.08 kütle oranlı olarak ele alınabilir.

4.4.3 Vakum izolasyon panellerinin servis ömürleri

VİP'nin ömrünün uzun olması öncelikle gaz bariyerine/zarf malzemesine ve dolgu malzemesine bağlıdır. Dolgu alüminyum geçirilmiş polyethylene (PE) ya da polyethylene terephthalate (PET) içeren birkaç tabakadan oluşan bir bariyer tabakasına kapatılır ve içerisindeki basınç 1 mbar'ın altına inerek şekilde boşaltılır. Bariyer tabakalar ihtiyaç duyulan uzun bir servis süresi için ve nem ile havanın çok düşük oranlardaki sızıntılarına karşı en uygun halde tasarlanır. Gaz bariyeri havaya ve neme karşı yalıtıma yardımcı olurken dolgu malzemesi de yalıtım kapasitesini artırır. İçi boşaltılmış dolgu oda sıcaklığında hemen hemen $0.004 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ısı iletkenliğine sahip olur.

ISO 6707-1'ye göre servis ömrü, ilk kurulum yapıldıktan sonra malzemenin performans şartlarını karşılaması için geçen süre olarak tanımlanır. VİP'lerin servis ömrü esas olarak vakum seviyesi ve çekirdek malzemelerine bağlıdır. VİP'ler, vakumlu oldukları sürece görevlerini yerine getirirler. VİP'lerdeki vakum seviye artışları; dış zarf ve kaynak noktaları boyunca gerçekleşen gaz ve su buharı geçirgenliği, iç dolgu malzemesinden ve zarf malzemesinden kaynaklanan gaz yayılımı gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Günümüzde vakum izolasyon panelleriyle ilgili yapılan araştırmaların birçoğu da doğal olarak bu iki konuyu kapsamaktadır. Bu da koruyucu bariyer filmlerle ilgili çok daha kapsamlı çalışmalar yapılmasına neden olmuştur. Pazarda hali hazırda üretilmekte olan laminize edilmiş polimer yapılı koruyucu bariyer filmlere ait bazı bilgiler Şekil 4.14'de sıralanmıştır.



Şekil 4.14 Alüminyum bariyerli, çok katmanlı plimer yapıdaki bir bariyer filmin optik mikroskop görüntüsü

Benzer yapıdaki bir bariyer film için, gaz ve nem geçirgenlik değerleri Çizelge 4.3’de verildiği gibidir. Bu çizelgede;

OTR: Oksijen geçirgenliği

QVTR: Su buharı geçirgenliği

PE-LD: Düşük yoğunluklu polietilen

PE-HDD: Yüksek yoğunluklu polietileni ifade eder.

Günümüzde üretilen farklı vakum izolasyon panellerin ortalama servis ömürleri 10 ile 50 yıl arasında değişmektedir. Bu değer; iç dolgu malzemesi bariyer film özelliği, ortam şartları ve yapı detayı içerisindeki yerleşime bağlı olarak değişiklik göstermektedir.

Çizelge 4.3 Çok katmanlı polimer yapıli bariyer filmlerin 23 °C ve %50 RH koşullarında gaz ve nem geçirgenlik değerleri

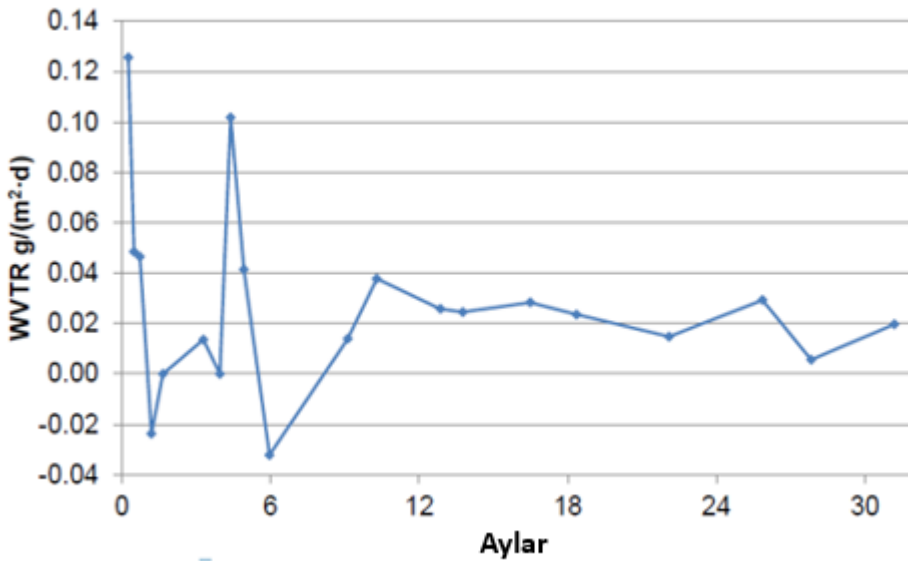
Katman malzemeleri ve kalınlıkları	OTR (c^3/m^2d)	WVTR (g/m^2d)
12µm PET/ 18µm PP/ 12µm PET/ 60µm PE-LD	< 0.05	< 0.025
12µm PET/ 12µm PET/ 12µm PET/ 50 µm PE-HDD	0.0005	0.0025

Avrupa’da yalıtım malzemelerinin ısı iletimi değeri EN 13162 normuna istinaden malzemenin 25 yıllık performans değerinin ortalaması olarak belirlenir. Literatürdeki bilinen tüm malzemeler sıcaklık, nem, radyasyon gibi çevre koşulların değişimine bağlı olarak değişim gösterirler. Garnier ve arkadaşları 2011’de VIP zarfına etkide bulunarak dayanıklılığını etkileyen tüm faktörleri tanımlamıştır. Bu faktörlerin tanımlanması için laminasyon içinde farklı yapıştırıcılar test edilmiştir. Alüminyum-oksit asidik ve bazik ortamlarda stabil bir performans göstermemiştir. İçme suyunun içerisinde bulunan florid iyonları metalle zarfa bozunmaya yol açan başlıca kimyasal bileşiklerdendir. Stabil bir lamine zarf üretimi için, yapıştırıcının klorür ve Ga, Tl, In, Sn, Pb gibi birtakım yabancı maddeleri içermemesi gerekmektedir.

Nem ve sıcaklık değişkeninin etkilerini inceleyen başka bir deneysel çalışma Bruner ve arkadaşları tarafından 2008 yılında tamamlanmıştır. Belirli sayıda VIP, 65°C ve 75% bağıl nem koşullarında 1 yıl boyunca depolanıp çeşitli testlerde bulunulmuştur. 100 gün sonunda VIP zarfı mekanik olarak deforme olmuş fakat fonksiyonelliğini sürdürmeye devam etmiştir. Bir yıl içerisinde, lamine zarf ciddi anlamda zarar görerek içerisindeki vakum bozulmuştur. Başka bir deneyde ise, VIP’ler 8 saat boyunca 80°C ve 80%, 4 saat boyunca da 25°C ve 50% bağıl nemde periyodik olarak depo edilmiştir. 26. Günün sonunda alüminyum okside olmuş zarfın üzerindeki bazı noktalar şeffaflaştırmıştır (Brunner et al., 2008). Fakat yine de bu kimyasal değişim tüm paneller hava ile dolmadığı için servis ömrünün sonu anlamına gelmemektedir (Simmler et al., 2005).

30-50 yıllık bir VIP servis ömrüne ulaşabilmek için, zarf içerisine doğru olan oksijen transfer oranı (OTR) bir barlık basınç farkında 10^{-2} $\text{cm}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{gün})$ ’den ve su buharı transfer oranı (WVTR) ise 10^{-4} $\text{g} / (\text{m}^2 \cdot \text{gün})$ ’den düşük olmalıdır (Simmler et al., 2005). Zamanla VIP içerisinde basınç artışı olacağı için, oksijen ve su buharı transferinde belli oranlarda düşüş meydana gelecektir. Bu nedenle servis ömrünün başında oluşacak basınç artışı maksimum düzeyde olacaktır.

Günümüz ölçüm sistemleriyle laminasyondan oluşan geçirgenliği kabul edilebilir zaman aralıklarında ölçerek değerlendirmek epey zorlu bir süreçtir. Simmler ve arkadaşları farklı geçirgenlik ölçüm yöntemlerinin bir değerlendirmesini metalize çoklu katmanlı alüminyumlar üzerinde yapmıştır. Çalışma sonucu elektrolitik ölçüm sistemleri kullanılmış, WVRT değerleri ise $1.8 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ve $130 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ arasında salınım yapmıştır. Bu çalışma da WVRT tespitinin mevcut ölçüm sistemleriyle yapılmasının hata paylarını ortaya koymaktadır. İlk olarak Chalmers laboratuvarlarında oluşturulan ıslak kap metodunun uygulanabilirliği EN ISO 12572’de açıklanmaktadır. Değerlendirme için 6 adet numune metalize polimer her biri 100 nm olacak şekilde laminasyondan kesilerek çıkarılır. Numuneler 23°C ve 50% RH sabit iklim koşullarında tutulur. Su buharı transfer oranı (WVTR) numunenin 0.01g hassasiyetteki bir hassas tartıda ölçümüyle tespit edilir. 31 ay sonunda elde edilen sonuçlara göre oluşan su buharı transfer oranı grafiği Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.15 6 farklı numuneden alınan su buharı transfer oranı (WVTR) ölçüm sonuçları (Chalmers)

31 aylık ölçüm sonuçlarına göre ortalama $21 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{g})$ 'lük bir WVTR değerine ulaşılmıştır. Elde edilen verinin standart sapması ise $6 \cdot 10^{-3} \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{g})$ değerindedir.

Simmler ve Brunner 2005 yılında VİP'lerin sabit ve dinamik iklim şartlarındaki durumunu incelemişlerdir. Bu çalışmalar neticesinde VİP içerisindeki basınç ve nem artışının Arrhenius denklemine uygun olarak değiştiğini tespit etmişlerdir. Bu yaklaşım sayesinde hava ve nem difüzyonunu dikkate alan bir yaşlanma modeli geliştirdiler.

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \Delta\lambda(t) \cong \lambda_0 + \frac{\delta\lambda}{\delta P_g} \cdot P_a \cdot t + \frac{\delta\lambda}{\delta u_{w,eq}} \cdot u_{w,eq} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) (mW/(m \cdot K)) \quad (4.16)$$

Bu denklemde λ_0 (mW/(m·K)) iç ısı iletimi, $\delta\lambda / \delta P_g$ (mW/(m·K·mbar)) yıllık basınç artışına P_a (mbar/yıl) bağlı olarak değişen ısı iletimi, t (yıl), $\delta\lambda / \delta u_{w,eq}$ (mW/(m·K·m-%)) kütle ve nem artışına bağlı olarak gerçekleşen ısı iletimi artışı, $u_{w,eq}$ (m-%) 80% RH'taki nem dengesi ve $\tau = u_{w,eq} / u_{w,initial}$ (yıl) çekirdek malzemedeki nem doygunluğu için geçen süredir. Basınç artışı, sıcaklık ve süre olarak dağılımlarına bağlıdır. Ağırlıklandırılmış yıllık basınç P_a denklemdeki gibi hesaplanır.

$$P_a = \frac{A_a \cdot \sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_i}\right) \cdot \Delta t_i}{8760} = A_a \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T_{effective}}\right) (mbar/yıl) \quad (4.17)$$

Bu çalışmaya paralel olarak 250 mm x 250 mm x 20 mm (genişlik x yükseklik x kalınlık) ve 500 mm x 500 mm x 20 mm'lik iki farklı VİP numunesinde iç basınç değişimi ve ağırlık artışını takip etmişlerdir. Konu edilen VİP'ler metalize polimer laminasyonlu ve 30 nm (MF1) veya 100 nm (MF2) kalınlığında 3 adet katmana sahipti. Bu değerler Arrhenius denklemiyle çözüldüğünde Çizelge 4.4'deki sonuçlar elde edilir (Simmler ve Brunner, 2005).

Çizelge 4.4 Arrhenius denklemindeki Pre eksponansiyel faktör ve aktivasyon enerjisinin Simmler ve Bruner'in elde ettiği laboratuvar sonuçlarına göre hesaplanması (2005)

VIP properties (mm)	A_a (mbar/year)	E_a (J/mol)
250x250x20 MF1	$2.9 \cdot 10^9$	$4.9 \cdot 10^4$
500x500x20 MF1	$620 \cdot 10^9$	$4.0 \cdot 10^4$
250x250x20 MF2	$0.78 \cdot 10^9$	$6.1 \cdot 10^9$
500x500x20 MF2	$3.1 \cdot 10^9$	$5.3 \cdot 10^9$

Başka bir yaşlanma çalışmasında ise İsviçre'de kullanımda bulunan düz bir çatı katında 2 yıl süresince basınç ve ağırlık artışı ölçümü yapılmıştır. Oluşturulan modele göre basınç artışının 2.7 mbar/yıl olarak hesaplanmış ve bu değer gerçek değerden 17% - 40% arasında daha yüksek tahmin edilmiştir. (Brunner ve Simmler, 2008)

Aynı çatı katı 2013 yılında tekrar açılmış, kurulumu yapılmış VIP'ler ise laboratuvar ölçümleri için taşınmıştır (Brunner ve Ghazi Wakili, 2014). Bu laboratuvarlarda yapılan değerlendirmelere göre ısı iletiminin yaşlandırma modelinden elde edilen sonuçlara göre daha fazla arttığı gözlenmiştir. 8.8 yıl kullanımdan sonra ısı iletimi 6.6 – 7.0 mW/(m·K) değerlerine artmışken beklenen değer ise yalnızca 5.6 mW/(m·K) idi. Yaşlandırma modelinin hassasiyetini arttırmak için Brunner ve Ghazi üçüncü bir yaşlandırma mekanizması ortaya koymuşlardır. Bu yeni düşünceye göre uzun dönemli neme maruz bırakılmalar silika partikülleri arayüzlerindeki teması etkilemekteydi. Su moleküllerinin çekirdeğe doğru transferi silika iskelet molekülleri arasındaki bağlantı yüzeyini arttırıyor bu da ısı iletiminin artmasına sebebiyet veriyordu. Morel 2009'da bu etki üzerinde çalışmalarını devam ettirmiş ve de silikanın su molekülleriyle birlikte yüzey alanını azaltan ve katılığını arttıran bir reaksiyona girdiğini tespit etmiştir.

Brunner'e göre önceki yıllarda yapılan değerlendirmeler, özellikle nemli ortamlar için gerçek duruma göre iyimser denilebilecek düzeydedir ve bu

konuda daha fazla araştırmanın yapılması gereklidir (Brunner, 2013). Yine 2013 yılında Uluslararası Enerji Ajansı, Super-Yalıtım malzemelerinin uzun dönem performanslarının Annex 65'te değerlendirmeye almaya başlamıştır (IEA/EBC, 2013). VİP'lerin uzun dönemli performansları daha birçok araştırma ve bilgi birikimine sahiplik yapabilecek ve bu sayede uzun dönem dayanıklılık daha hassas modellenip, daha gerçekçi servis ömrü tahminleri yapılabilir.



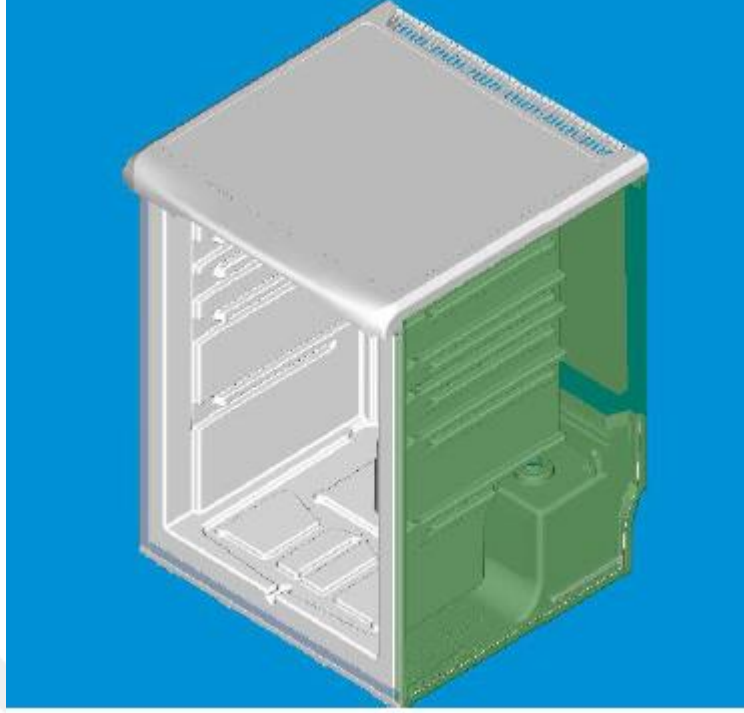
5 SAYISAL ÇALIŞMA

Tez konusunda belirlenen yöntem kapsamında, ev tipi bir dondurucuda vakum izolasyon panel kullanımının enerji tüketimine etkisi ve üzerindeki yaşlanmanın incelenmesi amacıyla, bilgisayar ortamında sayısal analizler ve paralelinde enerji testleri yapılacaktır. Bu analizlerde, enerji tüketimi testi koşullarında kararlı çalışma yapan ürünün, dondurucu duvar ve kapısında gerçekleşen ısı transferi değerleri yaşlanmanın farklı durumları için incelenecek ve bu durumlar arasında ısı kazanç değerlerinde ortaya çıkacak farklılıklar değerlendirilecektir.

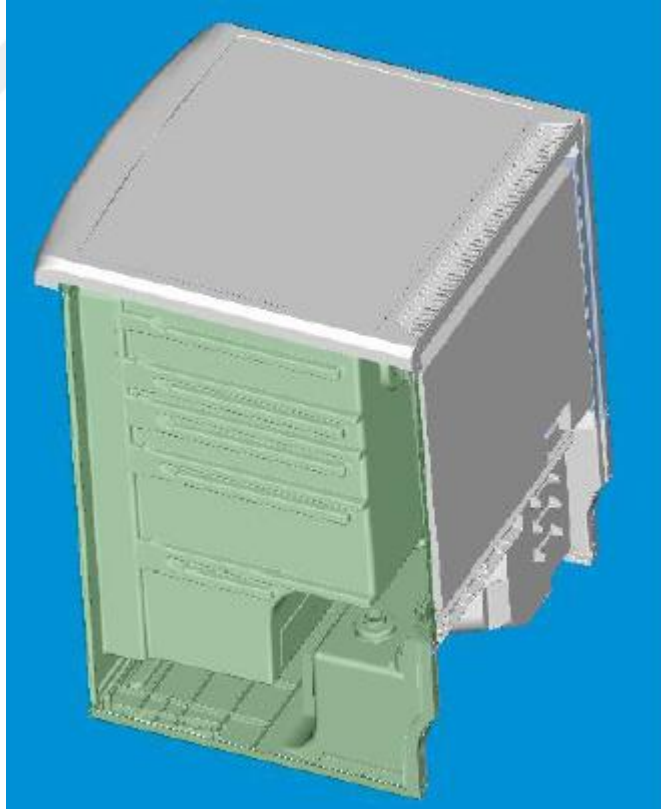
5.1 Modelleme

Tez kapsamında kullanılan katı modelleme programı Solid Edge olup, VİP’li ürün montaj resimleri bu program yardımıyla hazırlanmıştır. Bu modelde tüm ölçüler birebir donruducu üzerinden alınmış olup analiz sürecini sadeleştirmek adına model üzerinde fonksiyonel ve termodinamik açıdan önemsiz bulunan detaylar temizlenmiştir. Örneğin Poliüretan kalınlıkları gerçek duruma uygun olarak modellenmiş iken gövde plastiğindeki birtakım mekanik detaylar modelleme ve analizlere dâhil edilmemiştir.

Analizler için modellerden birinde yalıtım malzemesi olarak poliüretanın tek başına kullanıldığı dondurucu, diğer modelde yalıtım malzemesi olarak vakum izolasyon panelleri poliüretan ile birlikte kullanıldığı dondurucu olmak üzere iki farklı katı model oluşturulmuştur. İki model arasındaki yapısal fark, vakum izolasyon panellerinin kullanıldığı katı modelde, poliüretan bölgelerinde gerekli boşaltmalarının yapılmış olması ve bu hacimlere o bölgede kullanılacak ilgili vakum izolasyon panellerin yerleştirilmiş olmasıdır. Şekil 5.1 ve 5.2’de dondurucuya ait katı model montajından bazı görseller sunulmuştur.



Şekil 5.1 Dondurucunun üç boyutlu modelinden bir görünüş



Şekil 5.2 Dondurucunun üç boyutlu modelinden bir görünüş

Dondurucu duvarlarında gerçekleşen ısı kazançlarının hesaplanması ve iki

katı model arasındaki ısı farkının bilgisayar ortamında analizi için paket program kullanılmıştır.

Her bir bölgede vakum izolasyon panelin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için sıcaklık dağılımları, yöne bağlı ısı akıları, toplam ısı akıları ve bu bölgelerde gerçekleşen toplam ısı transferi değeri bilgisayar ortamında analiz edilmiştir.

5.2 Kabuller, Sınır Şartları ve Malzeme Özellikleri

Ev tipi dondurucuların dış katmanında paslanmaz çelikten imal edilmiş saclar kullanılır. İç gövde malzemesi olarak ise genellikle plastik tercih edilir. Bu iki bölge arasında yer alan boşluk ise poliüretan köpük ile doldurulur. Soğutucu kapısı için kullanılan malzemeler, gövde grubunda kullanılan malzemelerle benzerdir. Kapı ile gövde arasında bulunan conta ve tutucular ise yine birtakım plastik esaslı malzemelerdir. Çizelge 5.1’de ev tipi soğutucu ve dondurucularda kullanılan malzemelerin teknik özellikleri bulunmaktadır (ASHRAE, 2002).

Çizelge 5.1 Ev tipi soğutucuların kabinlerinde kullanılan yapı malzemeleri (ASHRAE, 2002)

Bölge		Malzeme	Kalınlık (mm)
Dış Gövde	Yan duvarlar ve üst	Düşük karbonlu soğuk şekillendirilmiş paslanmaz çelik	0,61–0,91
	Arka		0,56–0,84
	Alt		0,41–0,64
İç Gövde		Parlatılmış demir	0,61–0,91
		Paslanmaz çelik	0,61–0,91
		Alüminyum	0,61–0,91
		Plastik (HIPS, ABS)	1,3–5,1
Kapı İç Gövde		Plastik (HIPS, ABS)	1,9–2,4

Dış sac olarak kalınlığı 0,4-1 mm arasında paslanmaz çelik kullanılır. İç gövde plastiği malzemesi olarak ise genellikle HIPS veya ABS hammaddeleri kullanılır. Yine ürünün bazı bölgelerinde PP ve PET kullanımı da söz konusudur (ASHRAE, 2002).

Dondurucu dış bölgesinde kullanılan sacın kalınlığı 0,5 mm olup ısı iletimi 14,9 W/mK değerindedir (Incropera, 2003). İç gövde de kullanılan plastik

malzeme olan HIPS için belirlenen kalınlık 2 mm olup ısı iletim katsayısı 0,18 W/mK olarak alınmıştır. Çizelge 5.2’de dondurucuda kullanılan yapı elemanları ve özellikleri bir arada verilmiştir.

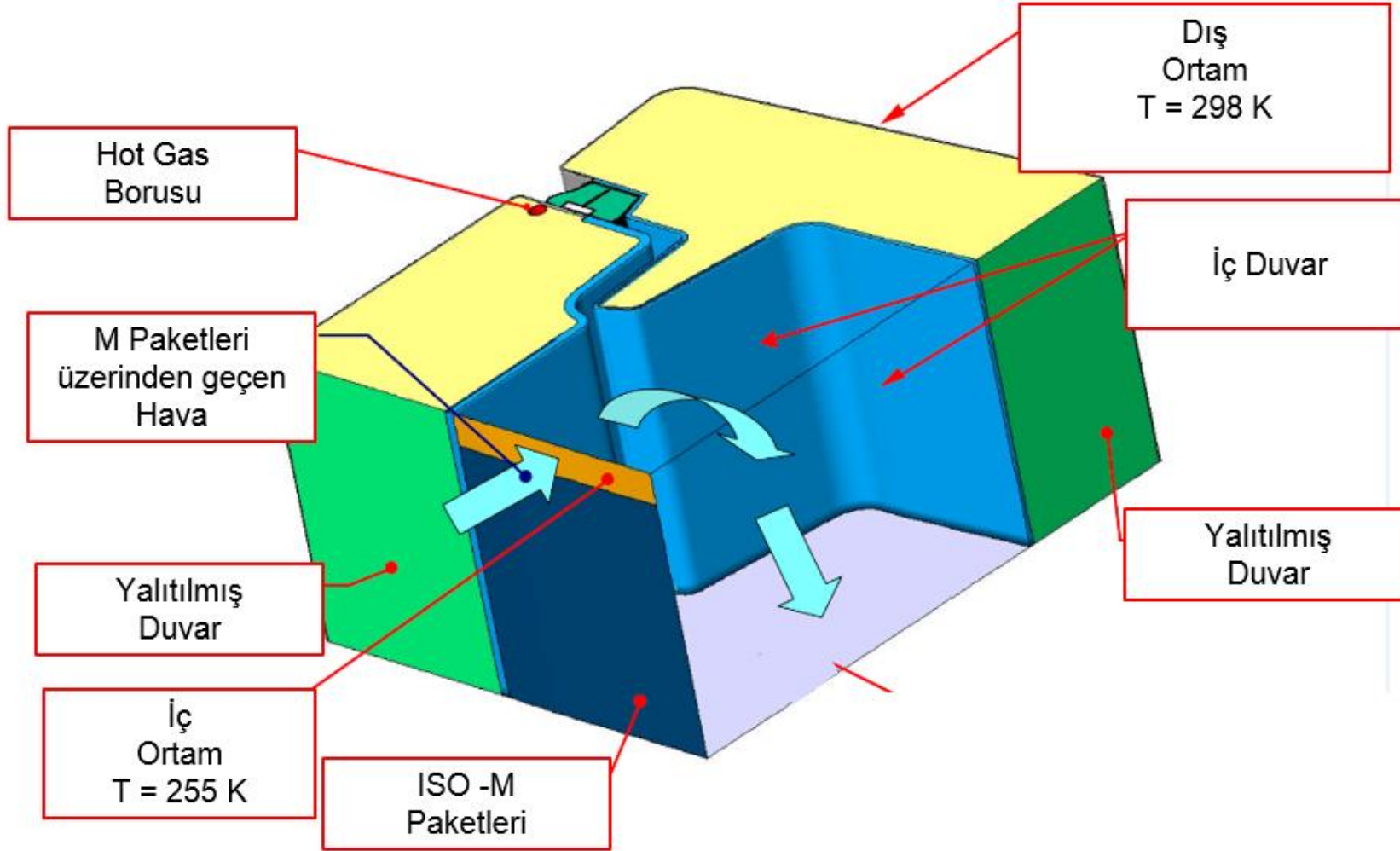
Çizelge 5.2 Dondurucuda kullanılan yapı elemanları ve özellikleri (Müminoğlu, 2016)

Malzeme	Kalınlık mm	Isı İletim Katsayısı W / m.K
VİP	16-20	0,002
PU	40-70	0,0195
Gövde Plastiği	1,8	0,18
Çelik Sac	0,5	14,9

Bilgisayar ısıl analizi için gerekli olan sınır şartları ve özellikleri bir kısmı deneysel ölçümlere, bir kısmı standartlarda belirtilen değerlere bir kısmı ise bazı teorik hesaplara göre belirlenmiştir. Dondurucu dış ve iç yüzeylerinde analiz için gerekli kritik sıcaklıkların belirlenmesinde, ısıl çiftlerden yararlanılmış ve bu değerler TS EN 62552 standardında belirtilen yöntemlere uygun olarak yapılmıştır.

Çizelge 5.3 Dondurucu üründe kullanılan VİP'lere ait üretici teknik beyanları (Müminoğlu, 2016)

Panel Pozisyonu	Kalınlık mm	Boy mm	Genişlik mm	Adet	Hammadde	Yoğunluk kg / m ³	Isı İletimi W / m.K
Yan Panel	20	500	645	2	Fiber Glass	250	0,0020
Üst Panel	20	430	580	1	Fiber Glass	250	0,0020
Arka Duvar	16	420	550	1	Fiber Glass	250	0,0020
Kapı	20	490	640	1	Fiber Glass	250	0,0020



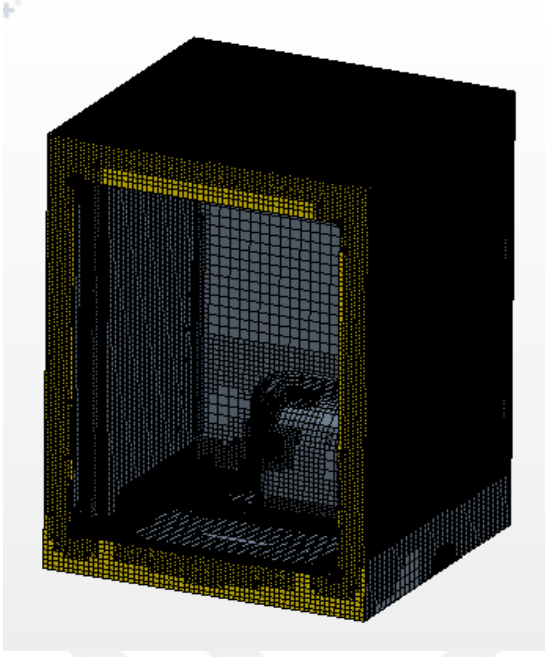
Şekil 5.3 Analizi yapılan ürüne ait bir kesit görünüş ve sınır koşullarının verilmesi (Müminoğlu,2016)

Vakum izolasyon panellerinin ısı iletim katsayısı üretici tarafından 0,0020 W/m.K olarak beyan edilse de yapılan tüm bilgisayar analizleri ve hesaplamalar bölüm 6.2'de gerçek numuneler üzerinden alınan ölçümlerin aritmetik ortalamasına göre yapılmıştır. Vakum izolasyon panelleri kompozit olarak değil, katı olarak modellenmiştir. VIP'ler montaj uygunluğuna göre ısı geçişe dik yönde 16-20 mm kalınlıkta seçilmişlerdir (Bölüm 6.2).

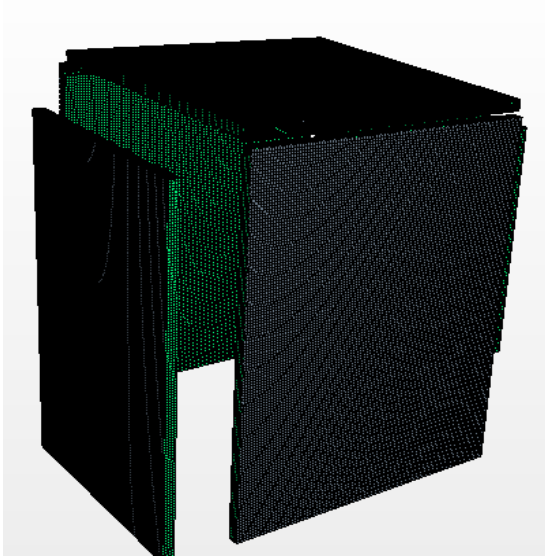
Kullanılan PU'nın ısı iletim katsayısı ilk örneklemede 0,01946 W/mK olarak ölçülmüştür. Bu değer, dondurucudan belli bir düzende alınan numunelerle gerçekleştirilen ısı iletim katsayısı ölçüm deneylerinden elde edilen değerdir. PU kalınlıkları gövde kısımlarına göre değişkendir. Bölüm 6.3'te yapılan ölçümler ve alınan sonuçlar detaylı olarak incelenmiştir. Bu değerlerden de yorumlanabileceği üzere yalıtım malzemesi yaşlanma etkisi ile beraber performansını belirli bir seviyede gün ve gün yitirmektedir (Bölüm 6.3).

5.3 Ağ yapısı (Mesh)

Bilgisayar ortamında yapılan analizler için genel ağ boyutu olarak belirlenmiş ve katı modeller montaj halinde olduğu için, montajda yer alan her parça arasındaki temas yüzeylerinde kontak ağ boyutu belirlenmiştir. Ağ yapısı ile ilgili daha detaylı modeller kullanmanın, sonuçlar üzerinde önemli bir değişim yaratmadığı görülmüştür.



Şekil 5.4 Gövdeden alınan bir ağ yapısı görüntüsü (Müminoğlu, 2016)



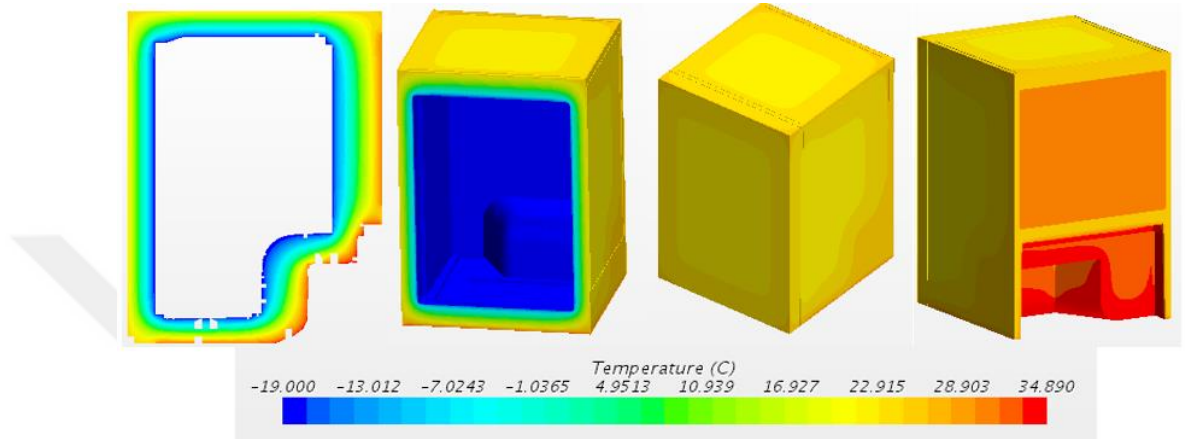
Şekil 5.5 VIP'lerden alınan bir ağ yapısı görüntüsü (Müminoğlu, 2016)

5.4 Analizler

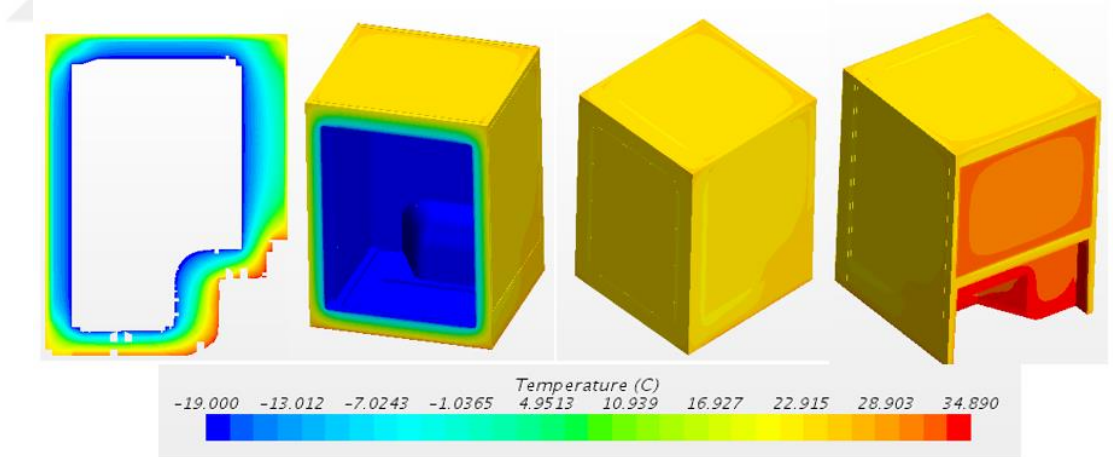
Yapılan bilgisayar analizlerinde standart ve VIP'li dondurucunun farklı yaşlanma koşullarındaki ısı analizleri yapılmıştır. Toplam olarak 8 farklı analiz yapılmış olup her bir analiz için toplam ısı kazancı değeri ayrı ayrı elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda elde edilen bu değerler, gerçek ürün üzerinde yapılan enerji tüketim değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde çalışılan yaşlanma analizlerinde VIP için Bölüm 6.2'de,

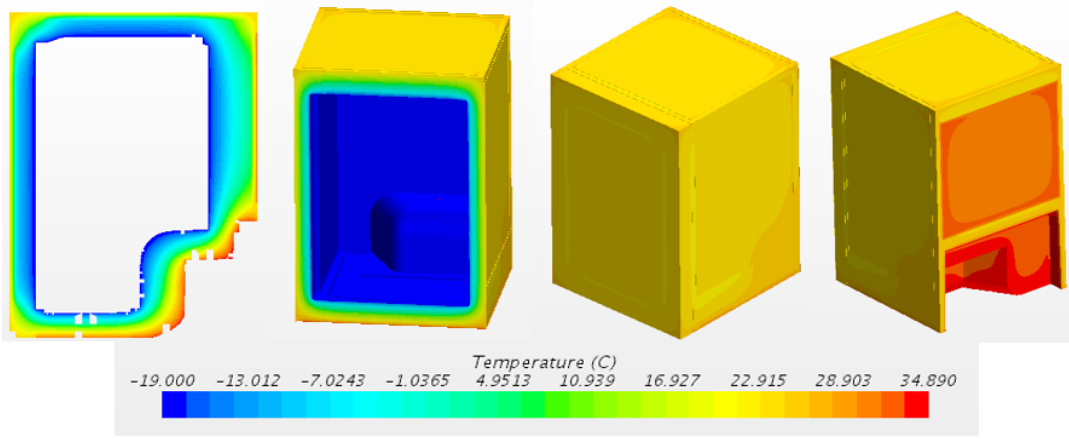
poliüretan için Bölüm 6.3’de yapılan ısı transferi katsayısı ölçümleri referans alınmıştır. Analizlerde kullanılan sağ ve sol duvarlar özdeş olarak kabul edilip, dış duvar sıcaklığı 25.0°C , iç duvar sıcaklığı -18.0°C olarak alınmıştır. Kompresör ve kondansör bölgesi için ısı transfer katsayısı değeri $6 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak dikkate alınmıştır. Şekil 5.6 – Şekil 5.13 arasında elde edilen sıcaklık profili grafikleri sunulmuştur.



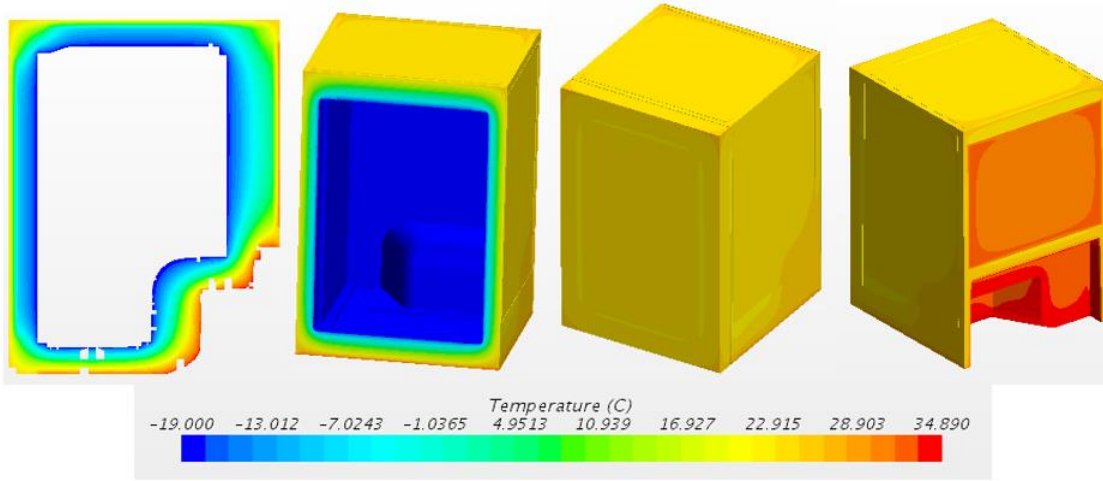
Şekil 5.6 VÍP’siz ürüne ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



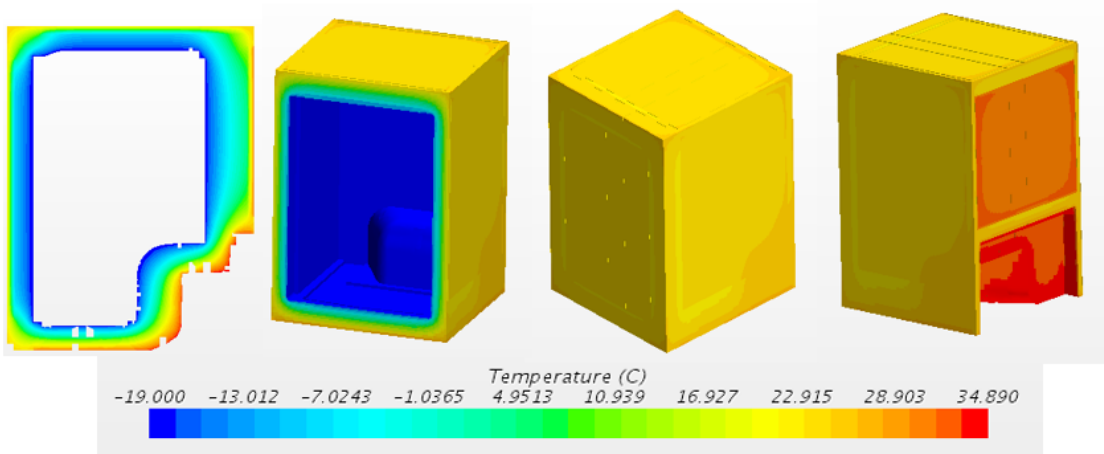
Şekil 5.7 VÍP’li ürüne ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



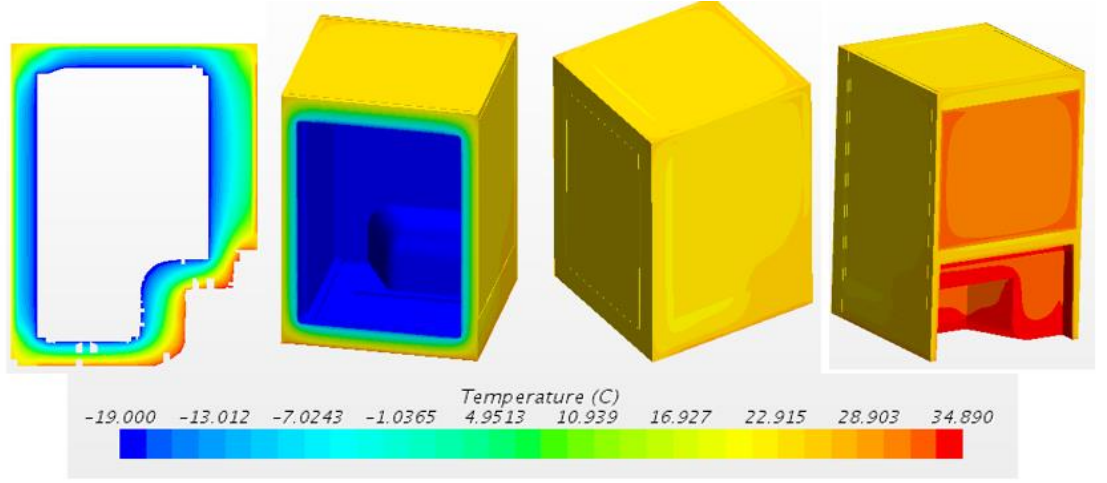
Şekil 5.8 VIP'li ürünün 22. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



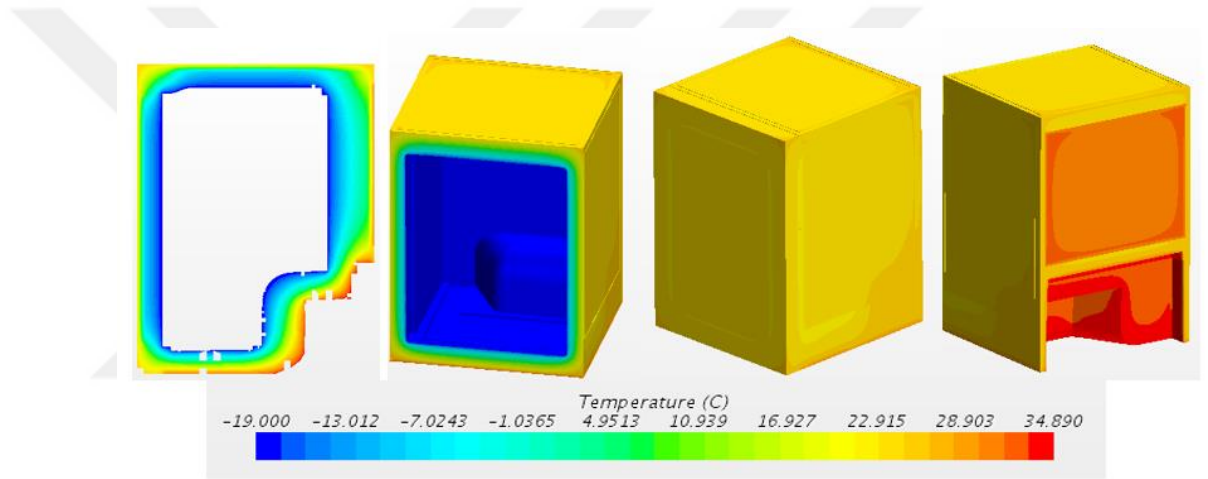
Şekil 5.9 VIP'li ürünün 32. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



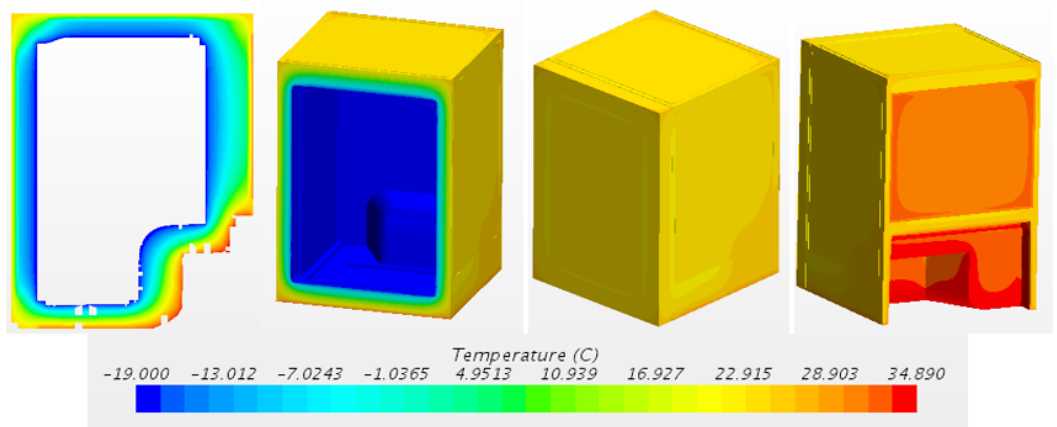
Şekil 5.10 VIP'li ürünün 55. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



Şekil 5.11 VİP'li ürünün 61. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



Şekil 5.12 VİP'li ürünün 116. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



Şekil 5.13 VİP'li ürünün 227. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)

6 DENEYSSEL ÇALIŞMA

DeneySEL çalışmalar kapsamında, Bölüm 6.5’de açıklanan yöntemeye uygun olarak bir adet standart dondurucu ve bir adet VİP’li dondurucunun üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında ürünün üretim standartlarına uygun olarak üretilebilmesi için ön deneme üretimleri düzenlenmiştir. Üretimi takip eden aşamalarda ürünler uluslararası standartlara uygun olarak teste alınmıştır. Çalışma kapsamında, ev tipi dondurucularda vakum izolasyon panellerinin kullanılması durumunda, enerji tüketiminde meydana gelecek değişimlerin ve yaşlanmanın ölçülmesi amacıyla, ev tipi tezgah seviyesi bir dondurucu üzerinde deneyler yapılmıştır.



Şekil 6.1 up 120 ürüne ait enerji etiketi

Standart tipteki dondurucu: 90 lt iç hacme sahip, TS EN 62552 standartlarında belirtilen tanımlara uygun olarak dört yıldızlı ve T iklim sınıfında, A+ enerji sınıfında bir ev tipi derin dondurucudur.

Çizelge 6.1 Testlerde kullanılan dondurucuya ait teknik özellikler (Müminoğlu, 2016)

Model	-	RZA36
Enerji Sınıfı	-	A+
Enerji Tüketimi - Yıllık	kWh	193
Net Hacim	l	90
Yıldız Beyanı	****	****
Tasarım Sıcaklığı	°C	-18
İklim Sınıfı	SN-N-ST-T	SN-T
Ses Beyanı	dB(A) Re 1 pW	44

Dondurucu ürün üzerinde yapılan enerji ölçümlerine paralel, bölüm 6.2’de VİP ve bölüm 6.3’de poliüretana ait ısı iletim katsayıları kayıt altına alınmış bu sayede ürün ve komponent bazlı ölçümler arasındaki ilişki modellenmiştir. Çalışmanın son bölümünde ise deneysel ölçümlerin, bilgisayar analizleriyle beraber yorumuna ve korelasyonuna ilişkin değerlendirmeler yapılmıştır.

6.1 Ev Tipi Dondurucular ve Genel Performans Kriterleri

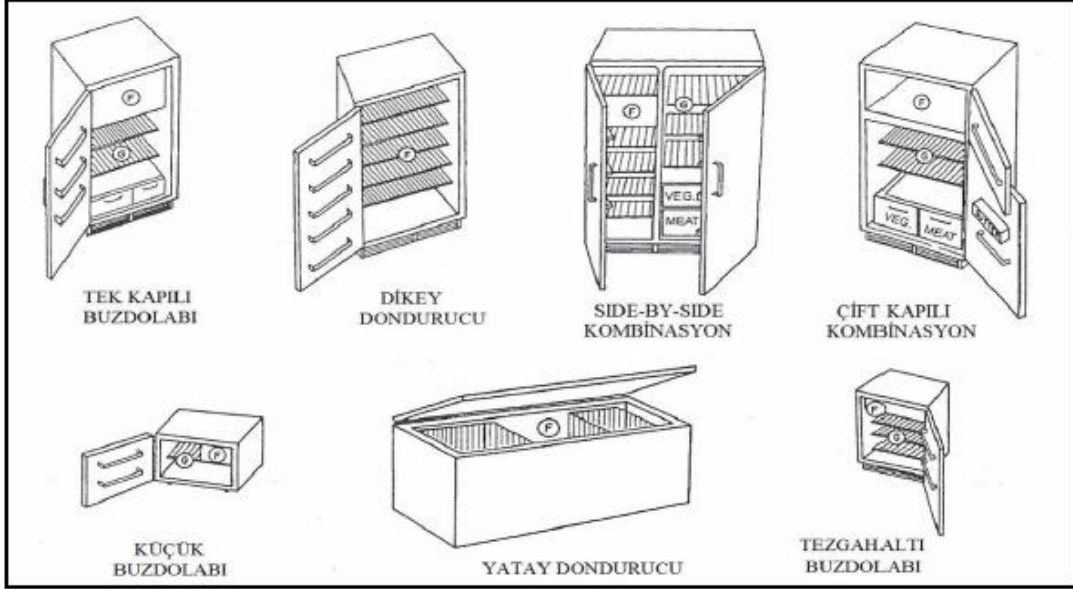
Standartlara göre soğutma cihazı; soğutmanın bir veya birden fazla enerji tüketim düzeneği ile sağlandığı doğal dolaşım veya buzlanma yapmayan bir sistem vasıtasıyla soğutulan, konutlarda kullanım için bir veya birden fazla bölmelere ve uygun hacme ve donanımına sahip fabrikada monte edilen yalıtılmış dolap olarak tanımlanmaktadır. Montaj bakımından değerlendirildiğinde, konutlarda kullanılan soğutma cihazlarının duvara monte edilen, gömülü gibi çeşitli tipleri bulunmaktadır (TS EN 62552).

Farklı coğrafi bölgelerde, değişik ihtiyaçlar için, çeşitli tiplerde soğutucu tasarımları söz konusudur. ASHRAE 2002’de ev tipi soğutucu ve dondurucu tipleri yedi ana grupta verilmiştir. Bu tipler ticari olarak soğutucu pazarında en çok payı olan modellerdir ve ASHRAE, 2002’de “Refrigeration Handbook

Chapter 49 – Household Refrigerators and Freezers” başlıklı bölümde 7 kategoride sınıflandırmıştır;

- Tek kapılı buzdolapları
- Dikey dondurucular
- Side-By-Side Buzdolabı
- Çift Kapılı Buzdolabı
- Mini Buzdolapları
- Yatay Dondurucular
- Tezgah Altı Buzdolapları

Bu modellere ait örnek çizimler şekil 6.2’de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.2 Günümüzde yaygın olarak üretilen ev tipi soğutucu ve dondurucu tipleri (ASHRAE, 2002)

Tez konusu up 120 ürün ise yine standartlara göre gıda maddelerini ortam sıcaklığından $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a indirerek dondurmak ve ayrıca dondurulmuş gıdaları bu depolama şartlarında depolamak için uygun olan soğutma cihazı olarak tasvir edilir (TS EN 62552).

- Bir yıldızlı bölme; Sıcaklığın $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'tan daha sıcak olmadığı dondurulmuş gıda depolama bölmesi.
- İki yıldızlı bölme; Sıcaklığın $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'tan daha sıcak olmadığı

dondurulmuş gıda depolama bölmesi.

- Üç yıldızlı bölme; Sıcaklığın $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'tan daha sıcak olmadığı dondurulmuş gıda depolama bölmesi.
- Dört yıldızlı bölme; Gıda maddelerini, ortam sıcaklığından $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a düşürerek dondurmak için ve ayrıca dondurulmuş gıdanın üç yıldızlı depolama şartlarında depolanması için uygun bölmedir.

Ev tipi dondurucuların soğutma sistemleri tasarımındaki en temel parametrelerden biri cihazın çalıştığı ortam sıcaklığıdır. Bu sıcaklık değeri, dondurucunun hem soğutma tasarımı hem de mekanik sistemi tasarımında önemli derecede etkilidir.

Dış ortam sıcaklıklarına bağlı olarak ev tipi soğutucular ve dondurucular için dört farklı sıcaklık aralığı ve bu sıcaklık aralıklarına bağlı olarak da dört iklim sınıfı standartlarda belirlenmiştir. Dondurucuların tasarımı öncelikli olarak bu iklim sınıflarına göre yapılmaktadır. Bu iklim sınıfları Çizelge 6.1'de görüldüğü gibidir. Bu değerler Şekil 6.2'de görülen tüm ev tipi soğutucu, dondurucu ve her ikisinin kombinasyonlarından oluşan ürünler için geçerlidir.

Çizelge 6.2 Ev tipi soğutucularda iklim sınıfları (TS EN 62552)

Sınıf	Sembol	Ortam sıcaklığı aralığı $^{\circ}\text{C}$
Genişletilmiş ılıman	SN	+ 10 ila + 32
İlman	N	+ 16 ila + 32
Alt tropikal	ST	+ 16 ila + 38
Tropikal	T	+ 16 ila + 43

Ev tipi dondurucuların tasarımı sırasında çok önemi olan diğer bir karakteristik özellik de dondurucu iç hacmindeki depolama sıcaklığıdır. Depolama sıcaklıklarının depolanacak olan gıdanın özelliklerine ve saklanması istenen süreye göre belirlenmesi soğutma tekniği açısından en doğru yöntemdir. Fakat ev tipi soğutucularda gerek iç hacmin küçük olması gerekse bu küçük hacimde çok farklı gıda maddelerinin bir arada saklanması nedeniyle soğutucu, dondurucu ve özel bölmelerin sıcaklıkları ile ilgili bazı standart depolama sıcaklık değerleri kabul edilmiştir. Çizelge 6.3'de ev tipi soğutucular ve dondurucular için depolama sıcaklıkları verilmektedir.

Çizelge 6.3 Standartlarca belirlenen depolama sıcaklıkları (TS EN 62552)

Taze gıda depolama bölümü		Gıda dondurucu ve üç yıldızlı bölme/dolap	İki yıldızlı bölme/dolap	Bir yıldızlı bölme/dolap	Kiler bölümü	Soğutma bölümü
t_{1m}, t_{2m}, t_{3m}	t_{ma}	t^{***}	t^{**}	t^*	t_{cm}	t_{cc}
$0 \leq t_{1m}, t_{2m}, t_{3m} \leq 8$	$\leq +4$	$\leq -18^a$	$\leq -12^a$	≤ -6	$+8 \leq t_{cm} \leq +14$	$-2 \leq t_{cc} \leq +3$

Çizelgelerde beyan edilen verilerden anlaşılacağı üzere soğutucu ve dondurucu bölme içerisinde yer alan her bir kısım özelliklerine bağlı olarak standartlaştırılmış depolama sıcaklığı değerleri tanımlanmıştır.

6.2 VİP'ye Ait Termal Özelliklerin Değerlendirilmesi

Bu tez kapsamında üretilen ürünlerde, ısı iletim katsayısı beyanı 0,0020 W/mK olan, 16-20 mm kalınlıklarında ve destek malzemesi olarak fiber bazlı vakum izolasyon panelleri kullanılmıştır. Üretici firma verilerine göre iç dolgu malzemesinin kütleli kompozisyonu,

- O = % 46.7
- Al = % 7.8
- Si = % 28.4
- Ca = % 16.2

Üretimde kullanılan vakum izolasyon panelleriyle ilgili beyan edilen bu değerlere ek olarak yaşlanma etkilerinin doğru değerlendirilmesi ve modellenmesi için 300 x 300 x 12 mm boyutlarında VİP numuneleri tez çalışması kapsamında ısı iletim katsayısı testine tabi tutulmuştur. Bu testler için HESTO marka ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, vakum izolasyon panellerle ilgili ASTM C1484-07 numaralı standartta atıfta bulunan ve vakum izolasyon panellerde ısı iletim katsayısı ölçüm yöntemini belirleyen ASTM-177 ve ASTM C-518 standartlarında belirtilen sıcak levha (hot-plate) yöntemine uygun olarak ölçüm yapan bir cihazdır. Cihaza ait bir görsel Şekil 6.3'de sunulmuştur.



Şekil 6.3 Çalışmada kullanılan ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı (Müminoğlu, 2016)

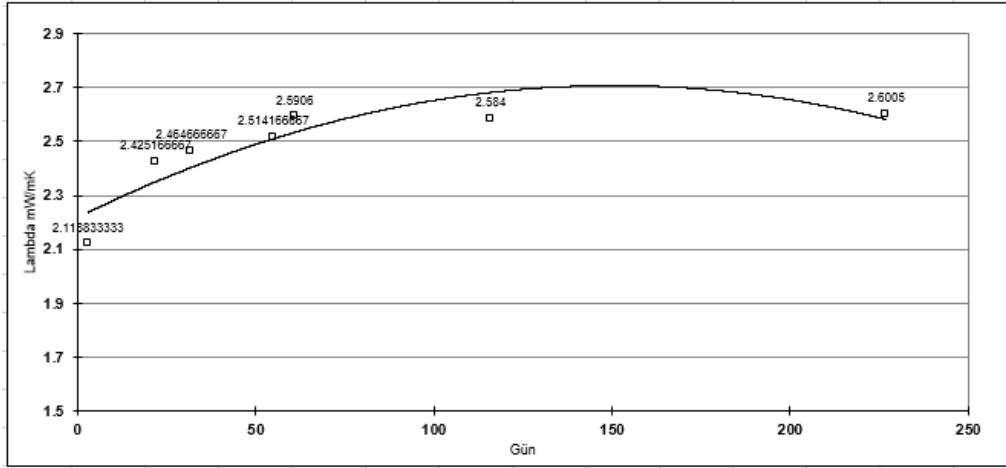
Cihaz içerisine numune vakum izolasyon panelleri yerleştirilmiş ve soğuk levha 10°C ve sıcak levha 36°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Durgun hal koşulları sağlandıktan sonra ısı iletim katsayısı olarak Çizelge 6.5'teki değerler elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda 227. Günde alınmak üzere 7 farklı güne yayılarak malzeme özelliklerindeki değişim ve yaşlanma etkileri takip edilmiştir.

Çizelge 6.4 Birbirinden farklı 6 VIP numunesinden alınan ısı iletim katsayısı değerleri. Referans panel boyutu 250 x 250 mm, ısı iletimi W/mK birimindedir (Müminoğlu, 2016)

Numune / Gün	0	22	32	55	61	116	227
P 1-1	0.001899	0.002035	0.002071	0.002024	0.002211	0.002266	0.002313
P 1-2	0.001991	0.002179	0.002271	0.002274	0.002446	0.002475	0.002527
P 1-3	0.002112	0.002477	0.002254	0.002768	0.002967	0.002981	0.003029
P 1-4	0.002389	0.002771	0.002842	0.002779	0.002771	0.002651	0.002624
P 1-5	0.002075	0.002444	0.002578	0.002562	0.002558	0.002516	0.002475
P 1-6	0.002247	0.002645	0.002772	0.002678	-	0.002615	0.002635
Ortalama	0.002119	0.002425	0.002465	0.002514	0.002591	0.002584	0.002601

Malzemelerin ısıl özellikleri farklı metodlar kullanılarak tespit edilebilir. Kararlı haldeki sıcak plaka yöntemi en çok kullanılan ısı iletim katsayısı tespit yöntemlerinden birisidir, λ (mW/(m·K)). Bu methodta ölçüm yapılabilmesi için, test düzeneğinin kararlı hallere gelebilmesi gerektiğinden bu süreç genelde birkaç saat alır.

Şekil 6.4'te elde edilen değerler oluşturulan Java yazılımıyla 2. Derece bir polinomsal eğriye benzetilerek, grafiksel olarak yaşlanmanın dağılımı ortaya konmuştur (Ek-1 Java Programı, 2016)



Şekil 6.4 VİP'den elde edilen ısı iletim katsayılarının 2. derece bir polinomsal eğriyle temsili
(Müminoğlu, 2016)

6.3 Poliüretana Ait Termal ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

Poliüretan üzerindeki ısı iletim tespiti için VİP'dekine benzer olmak üzere Şekil 6.7'de sunulan HESTO marka ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz, sıcak levha (hot-plate) yöntemine uygun olarak ölçüm yapan bir cihazdır. Cihaz içerisine numune poliüretan levhalar yerleştirilmiş ve soğuk levha 10°C ve sıcak levha 36°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Durgun hal koşulları sağlandıktan sonra ısı iletim katsayısı olarak Çizelge 6.6'daki değerler elde edilmiştir. Yapılan ölçümler sonuncusu 227. Günde alınmak üzere 7 farklı güne yayılarak malzeme özelliklerindeki değişim ve yaşlanma etkileri takip edilmiştir.

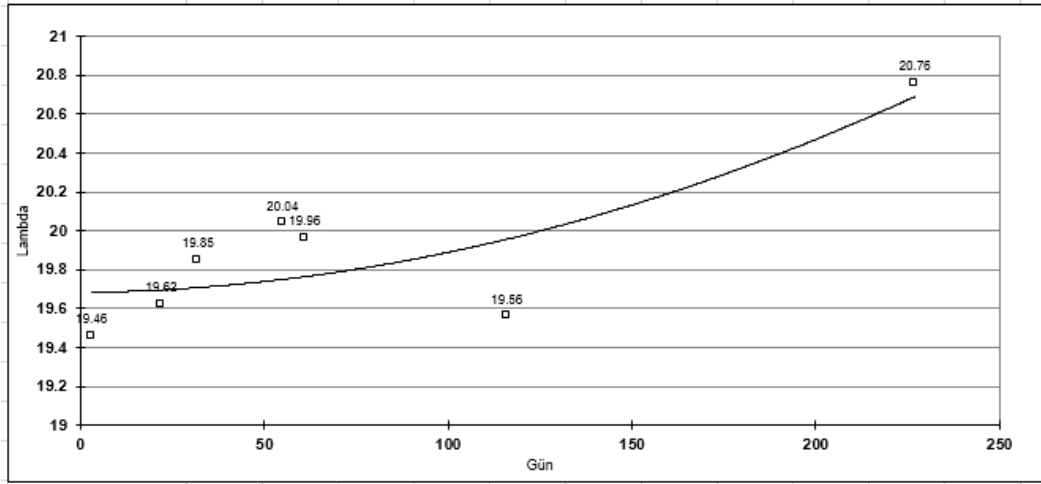


Şekil 6.5 Isı iletim katsayısı örneklenen PU numuneleri (Müminoğlu, 2015)

Çizelge 6.5 Poliüretan ısı iletim katsayısı değişimi (Müminoğlu, 2015-2016)

PU Isı İletim Katsayısı	Gün	mW/m.K
1. Ölçüm	1	19.46
2. Ölçüm	22	19.62
3. Ölçüm	32	19.85
4. Ölçüm	55	20.04
5. Ölçüm	61	19.96
6. Ölçüm	116	19.56
7. Ölçüm	227	20.76

Çizelge 6.5’de elde edilen değerler, oluşturulan yazılımla 2. Derece bir polinomsal eğriye benzetilerek, grafiksel olarak yaşlanmanın dağılımı ortaya konmuştur (Şekil 6.6).



Şekil 6.6 Poliüretan'dan elde edilen ısı iletim katsayılarının 2. derece bir polinomsal eğriyle temsili (Müminoğlu, 2016)

Mekanik ölçüm laboratuvarında incelenen PU örneklerinde ortalama yoğunluk değerinin gereken alt değerlerle örtüştüğü gözlemlenmiştir.

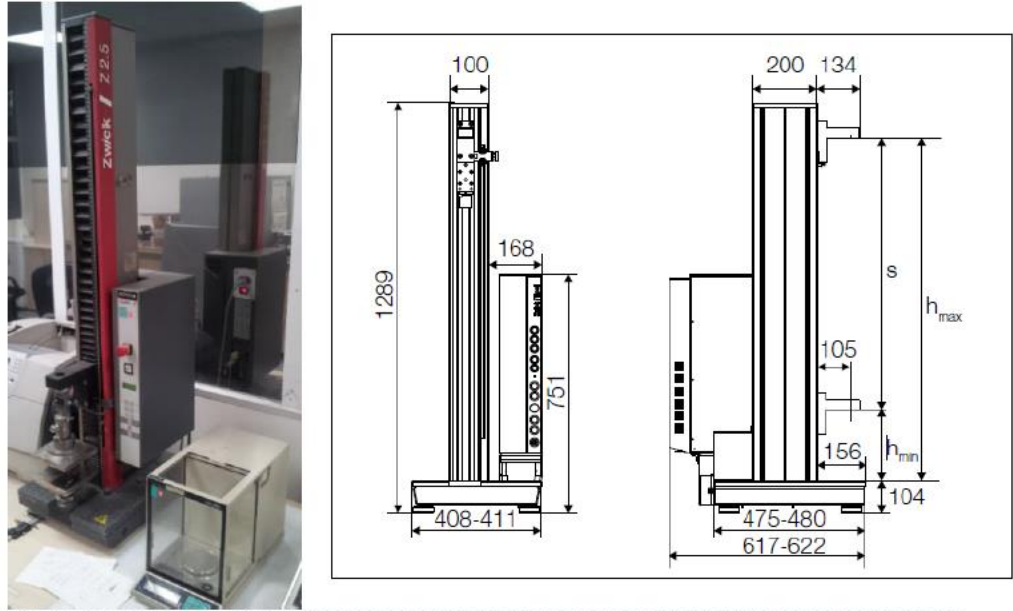
Çizelge 6.6 Poliüretan Test Raporu, Yoğunluk Testi (Indesit Laboratuvarları, 2015)

Indesit Company Business Unit Cooling Manisa Fabrikası		Form Poliüretan Test Raporu / Polyurethane Test Reports		Rapor No/Report Nr: G:22 Tarih/Date: 19/02/2015								
Model / Model : TT 60 RZA WIP GÖVDE		Basılan Miktar / Injected quantity : 3260 gr										
Tesis adı / Unit: FLOW D CABINET		Miktar listesindeki değer / Quantity in Pa list : gr.										
1- YOĞUNLUK DAĞILIM TESTİ / CORE DENSITY TEST :												
<p>Gövde(Cabinet)</p>	1	2	3	4	5	6	7	8	9(Ara böl.)	10	Ortalama / Average (kg/m³)	
	31.01	31.98	32.66	31.62	31.50	30.44					31.54	
<p>Kabul kriteri : Ortalama min.30 - 34 kg/m³ olmalıdır.</p> <p>Resimlerle belirtilen Gövde/Alt-üst kapılarda rakamlarla işaretlenen bölgelerden plü.parçaları alınır.Bu parçaların saca ve plastiğe değen kısımlarından min.3mm.kesilerek atılır.Kalan parça terazide tartılarak ağırlığı(gr.) alınır.İçerisinde yeter miktarda su bulunan kap terazi üzerine konur.Terazi sıfırlanır.(darası alınır).Parça kaba alt'tan değmeyecek ve üstten'de suya batacak şekilde batırılarak(taşın su miktarı) terazi üzerindeki değer alınır.Bu değer m³ olarak hacmi verir.</p>												
Yoğunluk(kg/m³)= $\frac{\text{Ağırlık(gram)}}{\text{Hacim(m}^3\text{)}} \times 1000$ Olarak hesaplanır.										Max.	32.66	Fark
										Min.	30.44	2.22
<p>Alt kapı/Lower door</p>	<p>Üst kapı / Upper door</p>			Açıklamalar /Conclusion : OK								

Çizelge 6.7 Poliüretan Test Raporu, Basma Mukavemet Testi (Indesit Laboratuvarları, 2015)

2- BASMA MUKAVEMETİ TESTİ / COMPRESSIVE STRENGTH TEST : Alınan numunelerde; Minimum bulunan değer / Minimum value : 0,128 N/mm ² Maximum bulunan değer / Maximum value : 0,172 N/mm ² Ortalama değer / Average : 0,149 N/mm ²	Ref: J2-26-MA SONUÇ / RESULT : OK
---	--

Basma mukavemeti testleri için Zwick marka mukavemet ölçüm cihazı kullanılmıştır. Elde edilen mukavemet değerleri final üründe kullanıma uygun görülmüştür.



Şekil 6.12 Basma Mukavemet Ölçüm Cihazı (Zwick, 2015)

6.4 Deney Düzenəğinin Yapı ve Teknik Özellikleri

Ev tipi soğutucu ve dondurucularda enerji verimlilik sınıflarının bulunması için yapılan testlerde belirli koşulların sağlanması gerekmektedir. Enerji tüketimi, sıcaklık artış süresi ve gıda dondurma kapasitesinin kontrolü için;

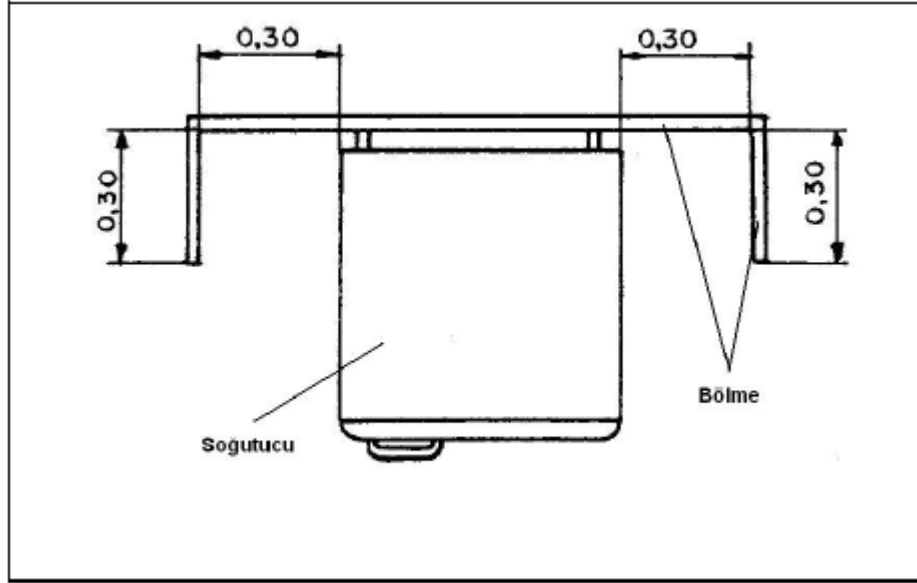
- SN, N ve ST sınıfı cihazlar +25°C’de,
- T sınıfı cihazlar +32°C’de teste alınırlar.

Her bir ölçme noktasında çalışma şartları için gereken periyotlar ve deneyler sırasında, ortam sıcaklığı $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ içinde sabit tutulmalıdır. Düşey ortam sıcaklık gradyanı soğutucunun üzerine koyulduğu platformdan 2 m. yükseğe kadar $2^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 'yi aşmamalıdır. Test odasının bağıl nemi 45% ile 75% arasında tutulmalıdır (TS EN 62552).

Cihaz, deney odasındaki soğutma ve ısıtma donanımından veya bu donanımdan yayılan doğrudan ışınımına engel olunacak biçimde yerleştirilmeli veya korunmalıdır. Cihaz, deney odasında içinde bulunduğu mekânın herhangi bir noktasındaki ortam sıcaklığından başka tesirleri ortadan kaldıracak kadar diğer çizimlerden yeterli uzaklıkta yerleştirilmelidir (TS EN 62552).

Deney odasındaki hava dolaşımı, belirtilen tolerans sınırları içinde, belirtilen ortam sıcaklıkları elde edilecek kadar olmalıdır. Deneyi yapılmakta olan cihaz, hızı $0,25 \text{ m/s}$ 'nin üzerindeki herhangi bir hava akımına karşı korunmalıdır (TS EN 62552).

Her bir cihaz, mat siyah boyalı, serbest hava akımı için altı açık, ancak üst tablası ahşap malzemeden yapılmış bir platform üstüne yerleştirilmelidir. Platformun üstü deney odası zemininden $0,3 \text{ m}$ yukarıda olmalı ve cihazın arka tarafı hariç bütün diğer kenarlarından itibaren düşey bölme kadar en az $0,3 \text{ m}$ taşmalı, bu taşma $0,6 \text{ m}$ 'yi geçmemelidir. Şekil 6.8'de cihazın test odası içindeki standart yerleşim planı gösterilmektedir (TS EN 62552).



Şekil 6.7 Test odası yerleşim planı üst görünüşü (TS EN 62552)

6.5 Prototip Üretimi

Gövdeye PU uygulanması seri üretim sürecinin önmontaj aşaması sonrasında gerçekleştirilir. Gövde yalıtım hacmi içerisine soğutma ve elektriksel sistem komponentleri yerleştirildikten sonra, dış gövde sacı ve arka duvar malzemesi ile soğutucu kabinin dış kısmı kapatılır. Bu sırada iç gövde plastiği ile sac arasındaki temas, kapı yüzeyinin oturacağı bölgedeki bağlantılarla sağlanır. İç gövde plastiği ve dış sac arasında kalan ve kalınlığı değişken boşluklar yüzünden yapı rijit bir biçimde ayakta kalamaz.



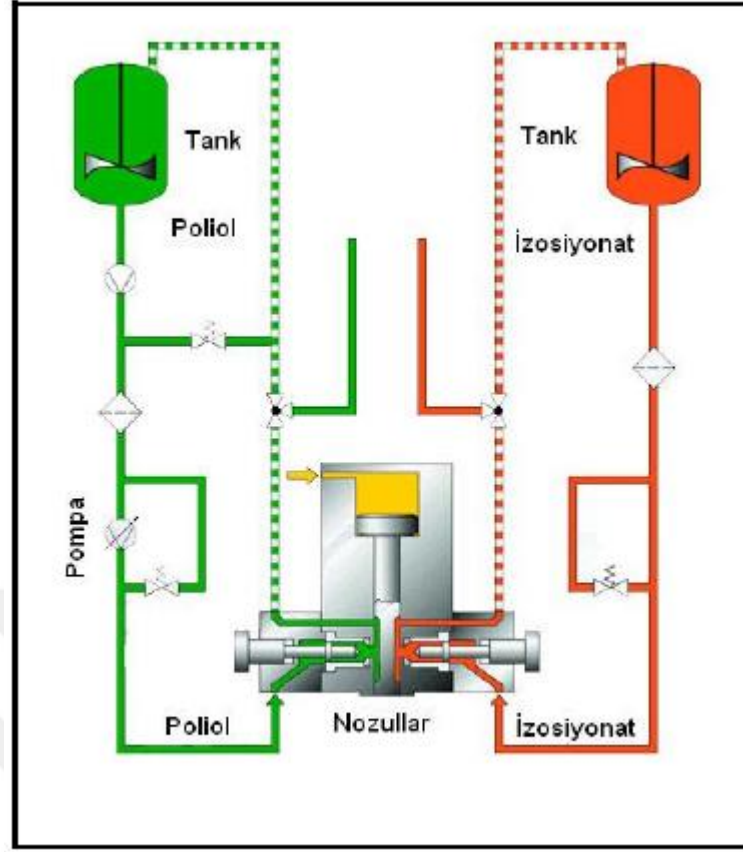
Şekil 6.8 PU kürlenme aşamaları (BASF)

Bu aşamada dondurucu gövdesinin genellikle alt kısmında yer alan kompresör boşluğuna yakın bir bölgedeki nozuldan veya tasarıma göre bir başka bölgeden gövdeye poliüretan basılır. Bu işlem sırasında özel makineler

kullanılmaktadır. Poliüretan malzemesini oluşturan Poliöl, İzosiyonat ve C-Pentan, nozulun dondurucu gövdesine giren son kısmında sıvı halde karışır. Şekil 6.9'da seri üretim esnasında gövdeye poliüretan basan makineler ve Şekil 6.10'da bu makinelerin prensip şeması görülmektedir (Özçam, 2007).



Şekil 6.9 PU basma fişstür sistemleri (QS Group, 2017)



Şekil 6.10 Poliüretan basma makinesi prensip şeması (Özçam, 2007)

Böylece poliüretanın kimyasal reaksiyon ve hacimsel genişleme süreci gövde ve kapı içerisinde gerçekleşir. Bu süreçte karışım oranı, dış ortam sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı gibi birçok dış etken rol oynar (Özçam, 2007).

Kürlenme süresi sonunda poliüretan dış gövde sacı ile iç gövde plastiği arasındaki tüm detaylara yayılır. Bu sayede poliüretan katı bir hale gelir ve kendi başına ayakta durma özelliğine kavuşur. Poliüretanın kürlenme süreci, karışımın gövdeye basılmasından sonraki ilk birkaç dakikanın sonunda çok yavaşlar



Şekil 6.11 Kapılar için kullanılan poliüretan basma sistemleri (Müminoğlu, 2015)

(Özçam, 2007). Şekil 6.11’de dondurucu kapı üzerine uygulanan poliüretan enjeksiyon prosesi gösterilmektedir.

Vakum izolasyon panelleri ile üretilecek ürünün prototip işlemlerine, içerisinde VİP’lerin yer alacağı gövde ve kapıya enjekte edilecek olan poliüretan miktarının hesaplanmasıyla başlanmıştır. İstenen mekanik ve termodinamik özellikleri yakalamak için ürüne eklenecek hacim eşleniğinde poliüretan miktarı enjeksiyondan düşülmelidir. Bu hacim Çizelge 6.8’de hesaplanmıştır.

Çizelge 6.8 Dondurucu üründe kullanılan VİP’lerin boyut ve hacimleri

Panel Pozisyonu	Kalınlık mm	Boy mm	Genişlik mm	Adet	Toplam Hacim (m ³)
Yan Panel	20	500	645	2	0.0129
Üst Panel	20	430	580	1	0.004988
Arka Duvar	16	420	550	1	0.003696
Kapı	20	490	640	1	0.006272
					0.027856

Birim malzeme yoğunluğu için VİP ile yerdeğıştiren poliüretan malzeme kütlesi hesaplanarak ürüne 3260 gr. poliüretan enjekte edilmesine karar verilmiştir. Belirlenen değerin üretim açısından kabul edilebilmesi için, üretilen ürünlerde taşma vb. gibi herhangi bir estetik hatanın oluşmaması, mekanik ve termodinamik testler için alınan numunelerin daha önce belirlenmiş alt limitleri karşılaması gerekmektedir.



Şekil 6.12 VİP deneme üretim hazırlıkları(Müminoğlu, 2015)



Şekil 6.12 VİP'li yan panel montaj görüntüsü (Müminoğlu, 2015)



Şekil 6.13 VİP'li kapı montaj ve PU enjeksiyon görüntüsü (Müminoğlu, 2015)

6.6 Performans ve Enerji Deneyleri

Bölüm 6.4’de anlatıldığı üzere hazırlanan VİP’li dondurucu performans ve enerji ölçümleri için TS ISO EN 62552’e uygun olarak teste hazırlanmıştır. Yüklü bir cihazda deney yapılırken dikdörtgen prizma biçimindeki deney paketleri kullanılmalıdır. Enerji testi sırasında dondurucu içerisinde sıcaklık ölçülmesi için 500 g’lık birkaç paket (50 mm x 100 mm x 100 mm), paketin geometrik merkezine doldurulan madde ile doğrudan temaslı olarak sokulmuş ısıl çiftle donatılır. Bu paketler, M paketleri ismi ile anılır.

Deneyler aşağıda ölçülen ortam sıcaklığı şartlarında yapılmalıdır:

a) Depolama sıcaklıklarının kontrolü için:

SN sınıfı soğutma cihazlarında	+ 10 ° C ve + 32 ° C.
N sınıfı soğutma cihazlarında	+ 16 ° C ve + 32 ° C.
ST sınıfı soğutma cihazlarında	+ 16 ° C ve + 38 ° C.
T sınıfı soğutma cihazlarında	+ 16 ° C ve + 43 ° C.

İklim sınıfına ait bir beyan bölgesinde, deneyler beyan sınıflarına ait bölgenin sınırlarındaki ortam sıcaklıklarında yapılmalıdır. Uygulanabilmesi durumunda, bütün soğutma cihazlarının enerji tüketiminin, sıcaklık artış süresinin, dondurma kapasitesinin ve buz yapma kapasitesinin kontrolü için;

SN sınıfı, N sınıfı ve ST sınıfı soğutma cihazlarında	+ 25 ° C.
T sınıfı soğutma cihazlarında	+ 32 ° C.


Başkaca belirtilmedikçe, bağıl nem % 75’i aşmamalıdır.

Bu standartta soğutucunun teste alınacağı dış ortam sıcaklığı ve nemi, dondurucu iç sıcaklığı, dondurucu içerisinde ısı çiftlerinin yerleşim koşulları ve ölçüm alma yöntemleri, dondurucu iç hacmine yerleştirilecek yükler, sıcaklık ve enerji değerlerinin alınacağı aralıklar ve testin olması gereken koşullar bölüm 6.6.1’de anlatılan deney şartlarına göre hazırlanmıştır. Testlerde ölçümler için,

- 5-50°C ve 30-90 % bağıl nem aralığında çalışan test odası
- A2000 model güç analizörü
- T103 model veri kaydedici
- T tipi ısıl çift
- Ölçüm sistemi programı



Şekil 6.14 İklimlendirilmiş test odası (Müminoğlu, 2015)

	Üretici	Omega Engineering
	Tip	Type T-type
	Min. Sıcaklık °C	-200
	Maks. Sıcaklık °C	300
	AWG No	30
	Nominal Ölçü	0.6 mm x 1 mm
	Hassaslık	±0.5°C

Şekil 6.15 T tipi ısıl çift

Deneylerde kullanılan deney paketleri, dikdörtgen paralel yüzü biçimde

olmalıdır. Dondurulmadan önceki büyüklüğü ve ambalajı dâhil kütleleri, Çizelge 6.9'a uygun olmalıdır. Deney paketleri düzenli olarak kontrol edilmeli ve sargısının üzerinde gözle görülür hasarlar olmamalıdır.

Çizelge 6.9 Deney paketlerinin boyutları ve kütlesi (TS ISO EN 62552)

Boyutlar mm	Tolerans mm	Kütle g	Tolerans %
25 x 50 x 100	25 ve 50	125	
50 x 50 x 100	boyutları için	250	
50 x 100 x 100	$\pm 2,0$	500	± 2
25 x 100 x 200	100 ve 200	500	
50 x 100 x 200	boyutları için $\pm 3,0$	1000	

Soğutma cihazının imalatçının talimatına uygun olarak asgari süre ile ve bu süre içinde sıcaklık kontrol ayarında herhangi bir ayar yapılmadan çalışmaya bırakıldığında ve en az 24 saatlik iki periyot (her ikisi de tam sayıda çalışma çevriminden meydana gelmiş) sırasında ölçülen depolama sıcaklıklarının ve enerji tüketim değerlerinin sırasıyla 0,5 K ve % 3 içinde kaldığı takdirde, kararlı çalışma şartlarının mevcut olduğu kabul edilir. Tek bir çalışma çevriminin 48 saatten daha uzun olması durumunda, ardışık iki çalışma çevriminin ilk 24 saatlik diliminden elde edilen depolama sıcaklıkları ve enerji tüketim değerleri karşılaştırılır (TS ISO EN 62552).

Kararlı çalışma şartlarının elde edilmesinden sonra, deney periyodu bir çalışma çevriminin başlatılması ile başlar. Deney periyodu, en az 24 saat olmalı ve tam sayıda çalışma çevrimlerinden meydana gelmelidir. Bir çalışma çevriminin başlatılması, ancak 24 saatte tamamlanmaması durumunda, deney o çalışma çevriminin sonuna kadar devam etmelidir. Bir çalışma çevriminin 48 saatlik sürede tamamlanmaması durumunda, deneye 48 saat sonra son verilmelidir. Ancak gıda dondurma bölmesi ile diğer bölmeler arasında hava değişiminin olmadığı gıda dondurucularında ve soğutucu/dondurucularında ise

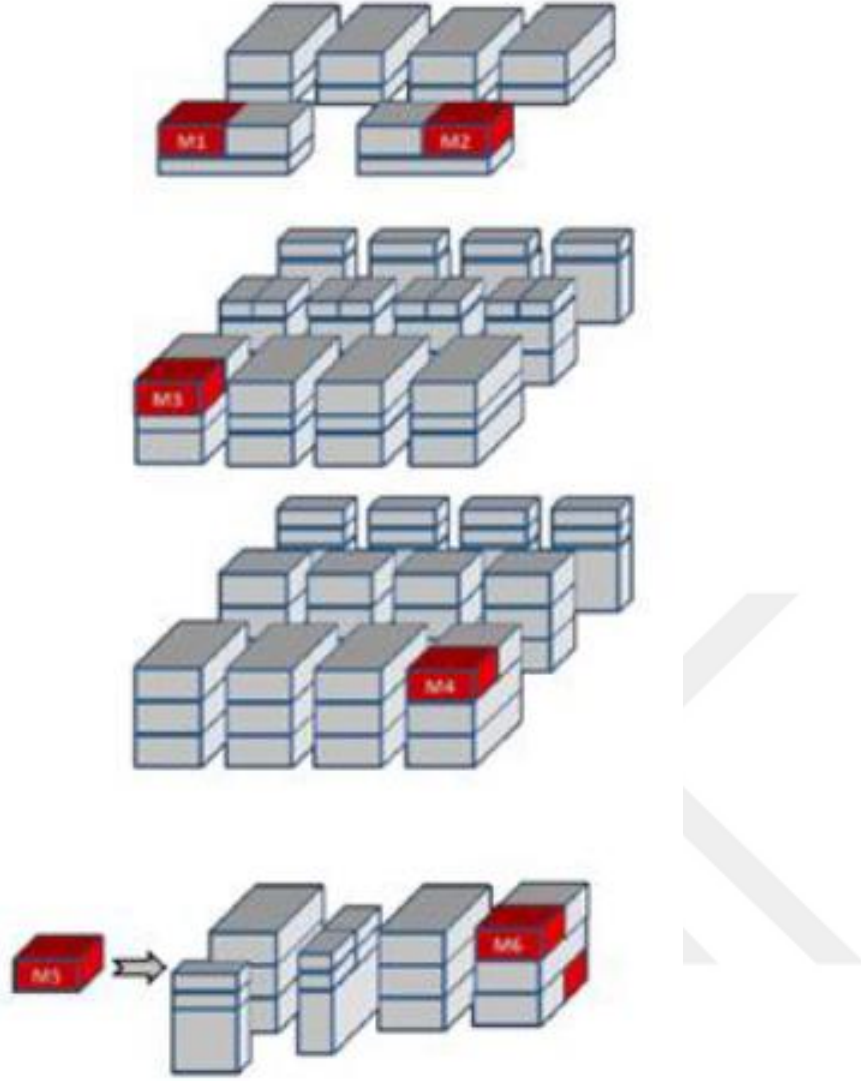
deney 72 saat sonra sonlandırılmalıdır (TS ISO EN 62552).

Çizelge 6.10 Enerji tüketiminin tayin edilmesi için enerji depolama sıcaklığı şartları (TS ISO EN 62552)

Enerji deneyi için depolama sıcaklığı	°C									
	Soğutucular ve Tip I soğutucu-dondurucular				Gıda dondurma bölümü sıcaklık kontrol elemanına sahip Tip II soğutucu-dondurucular				Dondurulmuş gıda depolama dolapları ve gıda dondurucuları	
	a	b	c	d	e	f	g	h		
t^{***ag}	-18 _b	≤ -18	≤ -18	≤ -18	-18 _c	≤ -18	-18 _c	≤ -18	-18	≤ -18
t^{**dg}	≤ -12	-12 _b	≤ -12	≤ -12	≤ -12	-12 _c	≤ -12	-12 _c	≤ -12	-12
t_{ma}^{ef}	≤ +5	≤ +5	+5 _b	≤ +5	+5 _c		≤ +5		-	-
t_{cma}^f	≤ +12	≤ +12	≤ +12	+12 _b	≤ +12		+12 _c		-	-
t_{cc}	≤ +3	≤ +3	≤ +3	≤ +3	≤ +3		≤ +3		-	-

$t_{ma} \leq +5$ °C olması şartıyla, $t_{cma} = +12$ °C (ancak mümkün olduğunca +5 °C'a yakın - örneğin hareketli kapakçıklarla ayarlama mümkün ise).

Enerji deneyinin asıl amacı, standartlarca belirtilen şartlar altında soğutma cihazlarının enerji tüketimini ölçmektir. Enerji testi deneyleri için test odası koşulları, 25°C sıcaklık ve % 50 bağıl nem olarak ayarlanmıştır. Dondurucunun termostat ayarı -18°C'yi sağlayacak konuma getirilmiştir. Standartta anlatılan yükleme planlarına uygun olarak yüklenip teste alınan soğutucular Enerji testi boyunca test odasında rejim koşullarında tutulmuştur. Dondurucuya ait test yükleme planı Şekil 6.12'de görüldüğü gibidir.



Şekil 6.16 Enerji ve Performans Testleri Yükleme Planı (Müminoğlu, 2015)

Bu test sonucunda kararlı çalışma koşulları sonrası 24 saatlik zaman dilimi için VİP kullanılmayan ürünün enerji tüketimi 0.505 kwh/24h olarak gerçekleşmiştir.

7 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada günümüzün yenilikçi ısı yalıtım malzemelerinden biri olan VİP'ler ve bir dondurucu ürün uygulamasında yaşlanmasının anlaşılması için bir dizi test ve analiz yapılmıştır.

Bu amaçla VİP uygulamasının üretim şartlarına adapte edilmesiyle beraber iki adet prototip hazırlanmıştır. Tez kapsamında belirtilen standartlardaki koşullara uygun olarak bilgisayar destekli analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Hazırlanan dondurucular üzerinde çok sayıda enerji ve performans testi yapılmıştır. Bu testler sonucunda, her bir durum için soğutucuların enerji tüketimi ölçülmüştür. Elde edilen sayısal ve deneysel çalışmalardan biraraya getirilen veriler incelenmiş ve sonuçları değerlendirilmiştir.

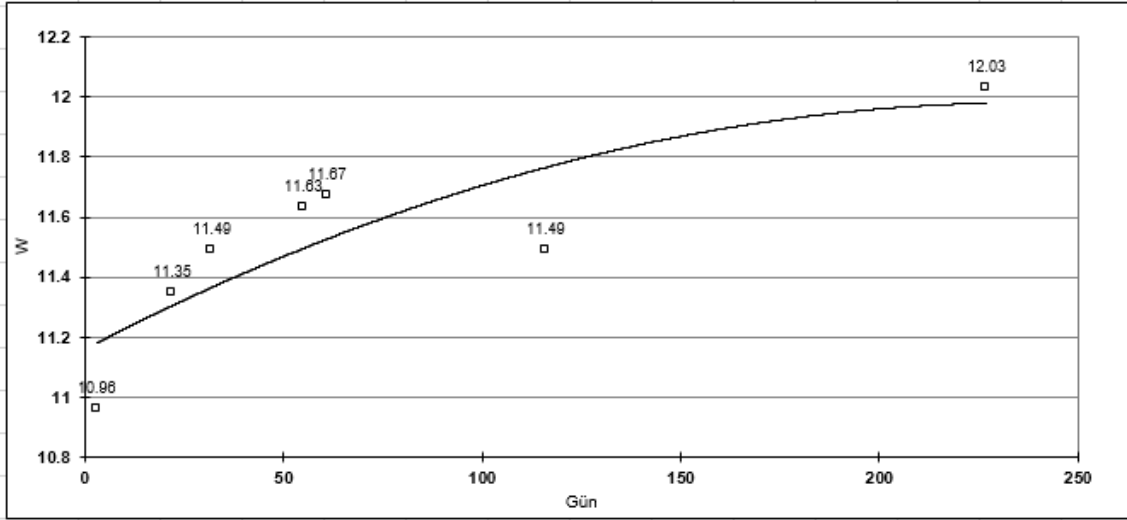
7.1 Sayısal Çalışmaya Ait Sonuçlar

Bilgisayar analizleri sonucunda VİP'siz ve VİP'li ürüne ait Çizelge 7.1'de sunulan sonuçlar elde edilmiştir. VİP'li ürün özelinde ise farklı sürelerde yaşlanmaya tabi bırakılmış dondurucunun, kapı, gövde ve toplamda gerçekleşen ısı kazancı değerleri detaylarıyla sunulmuştur.

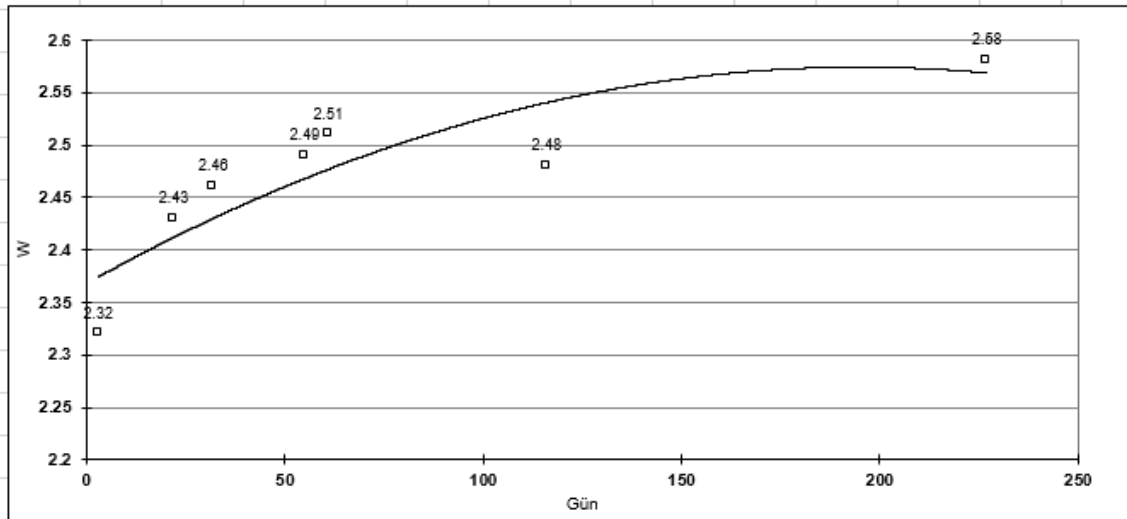
Çizelge 7.1 VİP'siz ve VİP'li ürüne ait ısı kazancı analizleri

Modelleme	VİP K (W/mK)	PU K (w/mK)	Gövde Isı Kazancı (W)	Kapı Isı Kazancı (W)	Toplam Isı Kazancı (W)
VİP'siz	0.01946	0.01946	17.56225	4.52862	22.09087
VİP'li 1. gün	0.002119	0.01946	10.96388	2.325609	13.289489
VİP'li 22. gün	0.002425	0.01962	11.35684	2.437077	13.793917
VİP'li 32. gün	0.002465	0.01985	11.49784	2.468521	13.966361
VİP'li 55. gün	0.002514	0.02004	11.63046	2.499449	14.129909
VİP'li 61. gün	0.002591	0.01996	11.67308	2.516609	14.189689
VİP'li 116. gün	0.002584	0.01956	11.49066	2.481194	13.971854
VİP'li 227. gün	0.002601	0.02076	12.03193	2.585769	14.617699

Şekil 7.1'de gövdede oluşan yaşlanma için yapılan analizler 2. dereceden bir polinomsal eğriyle temsil edilmişlerdir. Buna benzer biçimde Şekil 7.2'de kapı için 2. dereceden polinomsal bir eğri benzetmesi uygulanmıştır.



Şekil 7.1 Isı kazancı analiz sonuçlarına göre VIP'li gövdede oluşan yaşlanmanın 2. derece bir polinomsal eğriyle temsili (Müminoğlu, 2016)



Şekil 7.2 Isı kazancı analiz sonuçlarına göre VIP'li kapıda oluşan yaşlanmanın 2. derece bir polinomsal eğriyle temsili (Müminoğlu, 2016)

7.2 Deneysel Çalışmaya Ait Sonuçlar

Tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada aynı ürün farklı zamanlarda enerji testine tabi tutularak yaşlanmadan ötürü gerçekleşen enerji tüketimi farkları tespit edilmiştir. Ürünün kararlı durum sırasında harcadığı enerji tüketim değerleri TS EN 62552 standardında belirtilen koşullara göre ölçülmüştür.



Şekil 7.3 Enerji ve performans testlerine hazırlanmış ürün (Müminoğlu, 2016)

Enerji testine alınan VİP'li donduru ürünün 24 saatlik dilimde tükettiği enerji; 0.370 kwh/24 h olarak gerçekleştirilmiştir. Bu değer ürünün A+ enerji tüketimi beyanı 0.529 kwh/24 h dikkate alındığında 30% düzeyinde daha düşük bir enerji tüketimi anlamına gelmektedir (Çizelge 7.2).

Çizelge 7.2 VIP'li ürün İlk Enerji Testi Değerlendirmesi (Müminoğlu, 2015)

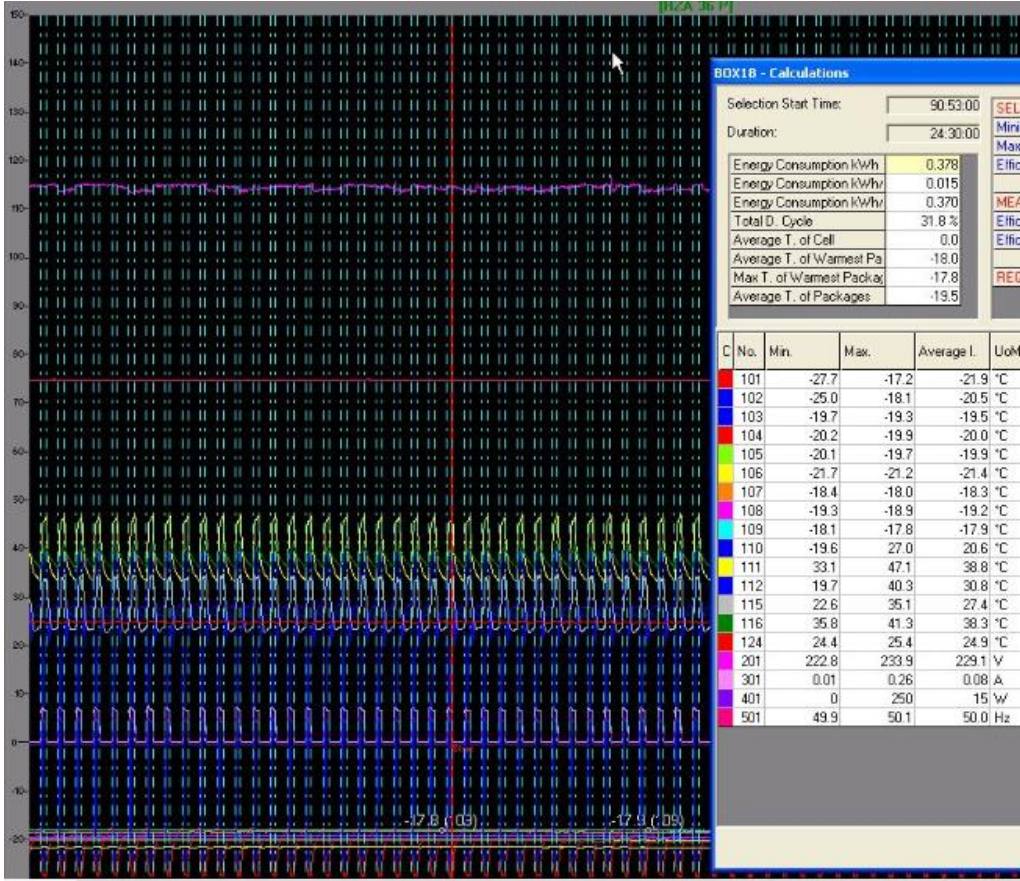
Numune		VIP		
Ankastre	[Ever,Hayır]		Hayır	
İklim Katsayısı	[ST _ T]		T	
Soğutucu Net Hacim	[l]		-	
Dondurucu Net Hacim	[l]		90	
** Net Hacim	[l]		-	
Chiller Hacim	[l]		-	
Deklare edilen Enerji Tük	[kWh/24h]	0.529		
Ölçülen Enerji Tük	[kWh/24h]	0.370		
Deklare edilen Index		43.9		
Ölçülen Index		-		
Toerans	[%]	-30		
Sonuç	[OK, NOK]	OK		
tolerance average	[%]		-30	
Sonuç	[OK, NOK]		OK	
energy consumption average [kWh/24h]			0.370	

Sonrasında 227 günlük süreçte alınan enerji sonuçları Çizelge 7.3'de sunulmuştur.

Çizelge 7.3 Enerji testi sonuçları (Müminoğlu, 2016)

MODEL : HOTPOINT UP 120 AA									
YAKUM İZOLASYON PANELLERİ VE BUZDOLABI PERFORMANSI ÜZERİNDEKİ YAŞLANMA ETKİLERİNİN DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ									
Gün		No VIP	0	22	32	55	61	116	227
Test İstasyonu		REF	STAND 14	STAND 18	STAND 15	STAND 15	STAND 14	STAND 14	STAND 14
Sorumlu		F.M	F.M	F.M	F.M	F.M	F.M	F.M	F.M
Ortam Sıcaklığı	(°C)	25	25	25	25	25	25	25	25
Termostat Konumu		2,3	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,2
% Çalışma oranı	%	42,3	31,8	31,8	31,8	31,8	31,9	31,9	32,1
M1	(°C)	-	-19,3	-19,3	-19,4	-19,5	-19,5	-19,4	-19,7
M2	(°C)	-	-19,9	-19,9	-19,9	-20,0	-20,0	-19,9	-20,0
M3	(°C)	-	-19,7	-19,7	-19,7	-19,5	-19,5	-19,7	-19,5
M4	(°C)	-	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9	-19,9
M5	(°C)	-	-18,0	-18,0	-18,2	-18,4	-18,3	-18,2	-18,3
M6	(°C)	-	-18,9	-18,7	-18,7	-18,6	-18,6	-18,6	-18,7
M7	(°C)	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0	-18,0
M8	(°C)	-	-	-	-	-	-	-	-
M9	(°C)	-	-	-	-	-	-	-	-
Enerji Tüketimi	[kWh/24h]	0,505	0,370	0,371	0,370	0,371	0,372	0,373	0,378

Çalışma kapsamında elde edilen enerji testi sonuçları TS EN 62552 standartlarına göre değerlendirilmiştir. Çizelge 7.4'de örnek bir enerji tüketim raporu sunulmuştur.

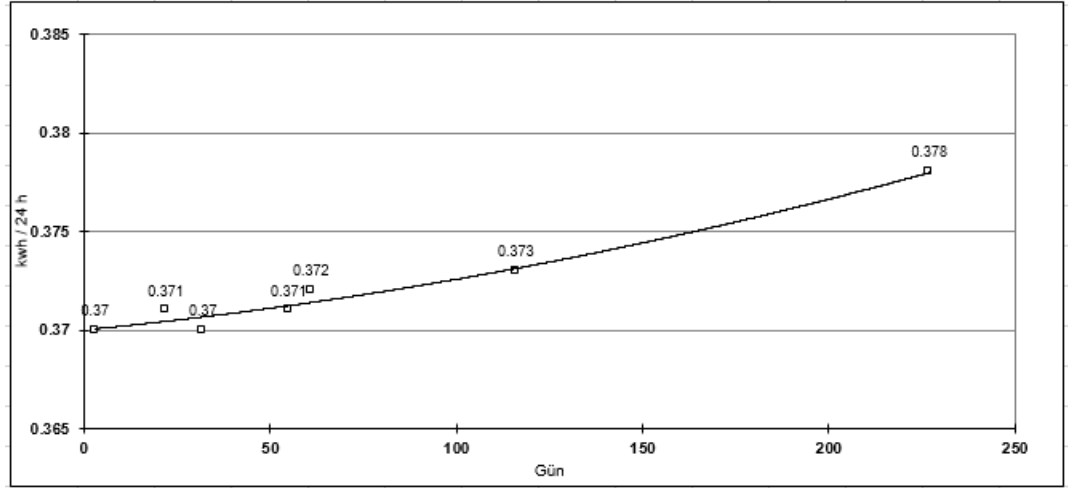


Şekil 7.4 VIP'li Prototipe Ait Örnek Bir Enerji Grafiği (Müminoğlu, 2015)

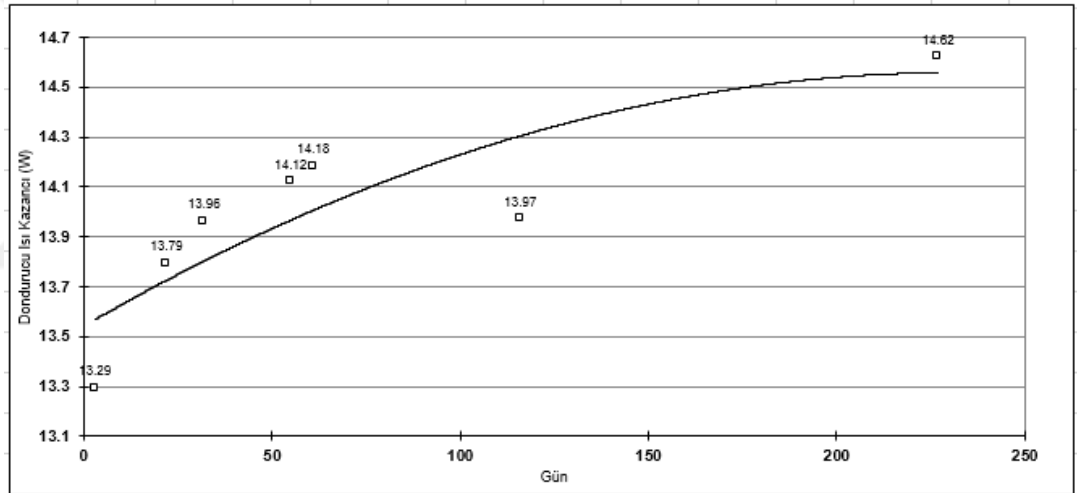
7.3 Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

Bölüm 7.1'de VIP'li gövdeya ait sayısal çalışmalar sonucunda malzemelerdeki yaşlanmanın dondurucu enerji tüketimi üzerindeki etkileri, Bölüm 7.2'de ise yine aynı konuda deneysel olarak elde edilen değerler sunulmuştur. Alınan bu sonuçlarla beraber her iki durumda da VIP'siz ürüne ait deney ve analiz sonuçları da çalışma kapsamında değerlendirilen bir başka veridir.

Şekil 7.5'de elde edilen enerji tüketimleri kullanılarak 2. derece bir polinomsal eğriye oluşturulmuş ve bu sayede grafiksel olarak yaşlanmanın dağılımı ortaya konmuştur.



Şekil 7.5 Enerji testi sonuçlarının ve değişiminin 2. derece bir polinomsal eğriyle temsili
(Müminoğlu, 2016)



Şekil 7.6 Isı kazancı analiz sonuçlarına göre VIP'li dondurucuda oluşan yaşlanmanın 2. derece bir polinomsal eğriyle temsili (Müminoğlu, 2016)

Şekil 7.5'de verilen dondurucu enerji tüketimi değerleri değişimi, Şekil 7.6'de verilen bilgisayar analiz sonuçları değişimiyle karşılaştırıldığında, bilgisayar analizi sonuçlarında ki yaşlanmanın daha yüksek boyutlarda hesaplandığı yorumu yapılabilir. Buna sebep veren en önemli nedenlerden birkaçı, ürün içerisinde VIP ve PU'da oluşan yaşlanma seviyelerinin dışarıda muhafaza edilen komponent numunelere göre daha düşük miktarda kalması gösterilebilir. Ayrıca ısı kazancı analizinde elde edilen değerler ile gerçek durumda gerçekleşen enerji deneyi sonuçlarının göstereceği paralellik referans alınan ürün ve test standartlarına göre farklılıklar gösterecektir.

7.4 Sonuç, Değerlendirme ve Öneriler

Tez içeriğinde bir dondurucu üzerine uygulanan VİP'ye ait yaşlanmanın ve parametrelerinin anlaşılabilmesi için birçok deney ve bilgisayar modeli içeren geniş bir çalışma yapılmıştır. Dondurucuya ait yaşlanmanın bütünsel olarak değerlendirilmesi enerji tüketimi sonuçlarına istinaden yapılırken, bu değerler komponent bazlı yaşlanma ölçümlerini referans alan bilgisayar modeliyle karşılaştırılmıştır.

Dondurucu gövde ve kapıda ısı yalıtım malzemesi olarak vakum izolasyon panellerinin poliüretan ile birlikte kullanılması durumunda, enerji tüketiminde 30 %'luk düşüş meydana geldiği TS EN 62552'e uygun olarak gerçekleştirilen enerji testleriyle beraber doğrulanmıştır. Elde edilen bu değer VİP boyut ve lokasyonları optimize edilerek daha da düşük seviyelere çekilebilir.

Yapılan testler göstermektedir ki VİP kullanımı ile beraber A++/A+++ gibi düşük enerji sınıflarına ulaşmak mümkün olabilmektedir. Bir başka açıdan ifade etmek gerekirse, vakum panelleri kullanılarak gövde yalıtım kalınlıkları daha düşük seviyelere indirilebilir. Bu da ürünlerin dış boyutları değiştirilmeksizin müşterilere daha geniş kullanım hacmi sağlamaya yarayacaktır.

VİP'li ve VİP'siz dondurucu ürün enerji tüketimleri arasında yıllık bazda 49,275 kwh bir değişim meydana gelmektedir.

- VİP'siz dondurucu = $0,505 \text{ kWh} / 24\text{h} \times 365 \text{ gün} = 184,325 \text{ kWh}$
- VİP'li dondurucu = $0,370 \text{ kWh} / 24\text{h} \times 365 \text{ gün} = 135,05 \text{ kWh}$

Bu tasarruf 10 yıllık bir kullanım süresi için 492,75 kWh enerji tasarrufu anlamına gelir. Ocak 2017 konut elektrik fiyatları baz alındığında ülkemizde 1 kWh'lik elektrik kullanım bedeli 0,41TL'dir. Buna göre VİP'li soğutucu kullanımı ile tüketicinin bu süre zarfında toplam getirisi 202,03 TL olacaktır. Elde edilen kazanç hesabında herhangi bir elektrik fiyatı veya ürün performansında değişim dikkate alınmamıştır, buna rağmen VİP kullanımın

küçük ölçekte tüketiciler ve büyük ölçekte ülke ekonomileri açısından ciddi bir tasarruf meydana getireceği aşikârdır.

Çalışmadan elde edilen VIP'li enerji sonuçları ve Şekil 1.1'de bulunan Energy Efficiency Market Report, 2016 ile harmanlanırsa yıllık 280 PJ'e tekabül eden global dondurucu enerji tüketim değerinde yıllık ortalama 23333333333.33 kWh'lik bir tasarruf potansiyelinden söz edilebilir. Bu potansiyel değer ekonomik büyüklüğü, önümüzdeki yıllarda VIP üretim ve uygulamalarının gitgide artacağına göstergelerinden biridir.

Enerji alanındaki potansiyeline kıyasla ülkemizde ve dünyada VIP konusunda yapılmış bilimsel araştırma sayısı bir hayli azdır. Bu konuda yürütülen Ar-Ge çalışmaları da yeni yeni artış göstermeye başlamıştır. Oysa birçok sektöre ait ürün trendleri ve standartlar göz önüne alındığında VIP kullanımı giderek bir zorunluluk haline gelmektedir. Günümüzde VIP'lerinin üretimi ve yalıtım performanslarının geliştirilmesi konularında ilgili sanayi kuruluşlarımız ve üniversitelerimiz hızlı bir şekilde harekete geçmek durumundadır.

Analiz ve test sonuçlarında sunulduğu üzere, servis ömrü boyunca VIP'lere ait ısı iletim katsayısı birçok faktöre bağımlı olarak artış göstermektedir. Sıcaklık, nem, zarf malzemesi ve çekirdek malzeme gibi birçok etmen VIP'deki yaşlanmanın fonksiyonuna etki ederken, ürün üzerindeki enerji tüketimi değişiminin yalnızca VIP kaynaklı olduğu yorumlanamaz. Yaşlanmanın ürün performansı etkilerinin daha iyi anlaşılması için PU üzerindeki yaşlanma da bu tezden ayrı tutulmamış ve incelenmiştir. 227 günlük bir dönem üzere ele alınan toplam yaşlanmanın enerji tüketimine etkisi 2,27% enerji artışı olarak tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Altınışık, K., 2006, Isı Yalıtımı, Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, 358s.

Ahlberg, K., 1986, Gas Handbook, Aga AB, 582p.

ASHRAE, 2002, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Refrigeration Handbook, 770p.

Alam, M., Singh, H., and Limbachiya, M.C., 2011, Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions. Applied Energy, 24p.

Baetens, R., Jelle, B. P. and Gustavsen, A., 2011, Aerogel Insulation for Building Applications: A State-of-the-Art Review, Energy and Buildings, p. 761-769.

Baetens, R., Jelle B.P., Thue J.V, Tenpierik M.J., Grynning S., Uvsløkk. S and Gustavsen A., 2010, Vacuum Insulation Panels for Building Applications: A Review and Beyond , Energy and Buildings, p. 147-172.

Beck, A., Oswald, F. and Binder, M., 2007, Influence of water content on the thermal conductivity of vacuum panels with fumed silica kernels, 8th International Vacuum Insulation Symposium, Würzburg.

Brunner, S., Tharian, P.J., Simmler H. and Ghazi, Wakili K., 2008, Focused Ion Beam (FIB) Etching to Investigate Aluminum-coated Polymer Laminates Subjected to Heat and Moisture Loads, Surface & Coatings Technology, p.6054-6063.

Brunner, S. and Ghazi Wakili, K., 2014, Hints for an additional aging factor regarding the thermal performance of vacuum insulation panels with pyrogenic silica core, Vacuum.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Balard, H., Donnet, J. B., Oulanti, H., Gottschalk-Gaudig, T., and Barthel, H., 2011, Study of aging of pyrogenic silicas by gravimetry and microcalorimetry. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 378p.

Brunner, S., 2013, Discussions on the long-term durability prediction of VIP, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Dübendorf.

Brunner, S., Tharian, P.J., Simmler, H. and Ghazi Wakili, K., 2008 , Focused Ion Beam (FIB) Etching to Investigate Aluminum-coated Polymer Laminates Subjected to Heat and Moisture Loads, Surface & Coatings Technology, p.6054-6063.

Brunner, S., Stahl, T., and Ghazi Wakili, K., 2012, Single and double layered vacuum insulation panels of same thickness in comparison, Proceedings of the Building Enclosure Science & Technology Conference, Atlanta.

Brodt, K., 1995, Thermal insulations: cfc-alternatives and vacuum insulation, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.

Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler, H., Brunner, S., Ghazi, K., Bundi, R., Heinemann, U., Schwab, H., Cauberg, H., Tenpıerık, M., Johannesson, G., Thorsell, T., Erb, M. and Nussbaumer, B., 2005, Vacuum Insulation in the Building Sector-Systems and Applications, HiPTI – High Performance Thermal Insulation, IEA/ECBCS Annex 39.

BS EN 12667, 2001, İnşaat malzeme ve ürünlerinin termal performansı – Isı yalıtımının muhafazalı sıcak yüzeyler ve ısı akı ölçer yöntemi ile belirlenmesi – Yüksek ve orta ısı yalıtımlı ürünler, London.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Caps, R., 2004, Determination of the Gas Pressure in an Evacuated Thermal Insulating Board (Vacuum Panel) by using a Heat Sink and Test Layer that are Integrated therein.

Caps, R., Beyrichien. and Kraus, D. & Weismann, S., 2008, Quality Control of Vacuum Insulation Panels: Methods of Measuring Gas Pressure.

Caps, R., Heinemann, U., Ehrmanntraut, M. and Fricke, J., 2001 ,Evacuated insulation panels filled with pyrogenic silica powders; properties and applications, High Temperatures – High pressures, p.151-156.

Çoban, M. T., Soğutma Sistemlerinin Modellenmesi. <http://www.turhancoban.com/kitap/sogutma.pdf> (Erişim Tarihi: 09 Şubat 2017)

Çoban, M. T., Soğutucu Akışkanların Termodinamik Özellikleri, III. Ege Enerji Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Muğla Üniversitesi, Muğla

Deniz, E. ve Binark, A., 2008, Vakumlu Yalıtım Panelleri, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES, İstanbul.

Erbenich, G., 2009, How to Identify a High Quality VIP: Methods and Techniques to Guarantee High Quality Production and Application. Proceedings of the 9th International Vacuum Insulation Symposium.

Fricke, J., Heinemann, U. and Ebert, H. P., 2008, Vacuum insulation panels – From research to market, p.680-690.

Krishna, R. and Wesselingh, JA., 1997, Kütle transferinde Maxwell-Stefan yaklaşımı, Chem.Eng. Science.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ghazi Wakili, K., Stahl, T. and Brunner, S., 2011 , Effective Thermal Conductivity of a Staggered Double Layer of Vacuum Insulation Panels, Energy and Buildings, p.1241-1246.

Ghazi Wakili K., R. Bundi. and B. Binder., 2004, Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels , Building Research and Information, p.293-299.

Garnier, G., Marouani, S., Yrieix, B., Pompeo, C., Chauvois, M., Flandin, L. and Brechet, Y., 2011, Interest and durability of multilayers: from model films to complex films, Polymers for Advanced Technologies.

International Energy Agency (IEA), 2007, Worldwide Trends in Energy Usage and Efficiency, 94p.

International Energy Agency (IEA), 2016, Energy Efficiency Market Report, https://www.iea.org/eemr16/files/medium-term-energy-efficiency-2016_WEB.PDF (Erişim Tarihi: 24 Aralık 2016).

IEA/EBC, 2013, Annex 65 Long-Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems, p.125-130.

Manini, P., Rizzi E., Pastore, G and Gregorio, P., 2003, Advances in VIP design for super insulation of domestic appliances, 54th Annivarsy International Appliance Technical Conferences, West Lafayette.

Morel B., D. Autissier and L. Autissier, 2007, Modifications of pyrogenic silica exposed to moist air, Proceedings of the 8th International Vacuum Insulation Symposium, ZAE Bayern/UniWue, Würzburg.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

M.K. Willems., K. Schild. and G. Hellinger., 2005, Numerical investigation on thermal bridge effects in vacuum insulating elements, Proceedings of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, EMPA, Duebendorf.

Mukhopadhyaya, P., 2006, High performance vacuum insulation panel-research update from Canada, Global Insulation Magazine.

NASA, Aerojel <https://stardust.jpl.nasa.gov/tech/aerogel.html> (Erişim Tarihi: 27 Mayıs 2017).

Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, H.P. and Fricke, J., 2005, Prediction of service life for vacuum insulation panels with fumed silica kernel and foil cover, Journal of thermal envelope and building science.

Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, H.P. and Fricke, J., 2005, Permeation of different gases through foils used as envelopes for vacuum insulation panels, Journal of Thermal Envelope and Building Science.

Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, H.P. and Fricke, J., 2005, Dependence of thermal conductivity on water content in vacuum insulation panels with fumed silica kernels, Journal of Thermal Envelope and Building Science.

Simmler, H. and Brunner, S., 2005, Aging and service life of VIP in buildings, In 7th international vacuum insulation symposium proceedings.

Simmler, H. and Brunner, S., 2005, Vacuum insulation panels for building application. Basic properties, ageing mechanisms and service life, Energy and Buildings 37.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Shirtliffe, C.J., 1972, Thermal Resistance of Building Insulation, Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa.

Sun J. And Lin, J., 1999, The development of energy efficient refrigerators by Industrial Technology and Research Institute, 50th Anniversary International Appliance Technical Conferences, Taiwan.

Heinemann U., 2008, Influence of water on the total heat transfer in 'evacuated' insulations, International Journal of Thermophysics, 29 p.

Özçam, M., 2006, Poliüretan Teknik Rapor

Topten International Services, 2015, Energy Efficiency of White Goods In Europe

TS EN 13162, 2010, Isı Yalıtım Ürünleri – Binalarda Kullanılan – Fabrika yapımı mineral yün (mw) – Özellikler, 35 s.

TS EN 13163, 2010, Isı Yalıtım Mamulleri – Binalar İçin– Fabrikasyon olarak İmal Edilen – Genleştirilmiş Polistiren Köpük (EPS) – Özellikler, 40 s.

TS EN 13164, 2013, Isı Yalıtım Mamulleri – Binalar İçin – Fabrikasyon Olarak Ekstrüzyonla İmal Edilen Polistiren Köpük (XPS) – Özellikler, 39 s.

TS EN 13165, 2010, Isı Yalıtım Mamulleri – Binalar İçin – Fabrikasyon Olarak İmal Edilen Sert Poliüretan Köpük (PUR) – Özellikler, 36 s.

TS EN 13166, 2010, Isı Yalıtım Mamulleri – Binalar İçin – Fabrikasyon Olarak İmal Edilen Fenolik Köpük (PF)- Özellikler, 32 s.

TS EN 13167, 2010, Isı Yalıtım Ürünleri – Binalarda Kullanılan – Fabrika Yapımı Cam Yünü Ürünleri – Özellikler, 27 s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

TS EN 13169, 2010, Isı Yalıtım Malzemeleri – Binalarda Kullanılan – Genleştirilmiş Perlitten Fabrikada İmal Edilmiş Mamuller (EPB) – Özellikler, 35 s.

TS EN 13170, 2010, Isı Yalıtım Mamülleri – Binalarda Kullanılan – Fabrika Yapımı Genleştirilmiş Meşe Mantarı Levhaları (ICB) – Özellikler, 38 s.

TS EN 62552, 2013, Ev Tipi Soğutma Cihazları – Karakteristikler ve Deney Yöntemleri, 213 s.

Tenpierik, M. J., Cauberg, J. J. M. and Thorsell, T. I., 2007, Integrating Vacuum Insulation Panels in Building Constructions: an Integral Perspective, Construction Innovation.

Vacuum Insulation Panel Symposium, 1999, An introduction to VIP technology, Baltimore.

Yılmaz, U., 2008, Ev Tipi Dondurucularda Vakum İzolasyon Panel Kullanımının Enerji Tüketimi Üzerindeki Etkisinin Bilgisayar Destekli ve Deneysel İncelenmesi.

Zhuravlev L.T., 2000, The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model, Colloids and Surfaces A:Physiochemical and Engineering Aspects, 173 p.

ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Bursa'nın Osmangazi ilçesinde dünyaya gelen Fatih Müminoğlu, ilköğretimini Bursa Uludağ İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise eğitimini Bursa Cumhuriyet Lisesi'nde gerçekleştirmiştir. Lisans öğrenimini Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde tamamlayıp, eğitim hayatına halen aynı bölümde yaptığı yüksek lisans ile devam etmektedir. Akademik kariyerinin yanı sıra; Vestel Beyaz Eşya ve Indesit Company Beyaz Eşya San. ve Tic. A.ř. şirketleri soğutucu Ar-Ge bölümlerinde çeşitli görevlerde bulunmuştur. 2011 yılından bu yana çalışmakta olduğu Indesit Company şirketinde çalışma hayatına devam etmektedir.



EKLER

Ek-1 Java programı

Ek-2 Örnek bir enerji testi verisi



EK-1 JAVA PROGRAMI

Kübik şerit interpolasyon ile vakum paneldeki yaşlanmanın Java analizi

```
//Cubic spline curve fitting
```

```
import java.io.*;
```

```
import javax.swing.*;
```

```
class NA49
```

```
{
```

```
    public static double [] thomas(double f[],double e[],double g[],double r[])
```

```
    {
```

```
        // 3 band matrix system of equation solving algorithm
```

```
        int n=f.length;
```

```
        double x[]=new double[n];
```

```
        for(int k=1;k<n;k++)
```

```
            {e[k]=e[k]/f[k-1];
```

```
            f[k]=f[k]-e[k]*g[k-1];
```

```
        }
```

```
        for(int k=1;k<n;k++)
```

```
            {r[k]=r[k]-e[k]*r[k-1];
```

```

    }

    x[n-1]=r[n-1]/f[n-1];

    for(int k=(n-2);k>=0;k--)

        {x[k]=(r[k]-g[k]*x[k+1])/f[k];}

    return x;

}

public static double [][] cubic_spline(double xi[],double yi[],double c0,double
cn)

{

int n=xi.length;

double h[]=new double[n];

double w[]=new double[n];

double f[]=new double[n];

double e[]=new double[n];

double g[]=new double[n];

double d[]=new double[n];

double x[]=new double[n];

double S[][]=new double[4][n];

int k;

```

```
for(k=0;k<(n-1);k++)
```

```
{h[k]=xi[k+1]-xi[k];
```

```
w[k]=(yi[k+1]-yi[k])/h[k];
```

```
}
```

```
d[0]=c0;
```

```
d[n-1]=cn;
```

```
for(k=1;k<(n-1);k++)
```

```
{d[k]=6.0*(w[k]-w[k-1]);}
```

```
f[0]=1.0;
```

```
f[n-1]=1.0;
```

```
g[0]=0.0;
```

```
g[n-1]=0.0;
```

```
e[0]=0.0;
```

```
e[n-1]=0.0;
```

```
for(k=1;k<(n-1);k++)
```

```
{f[k]=2.0*(h[k]+h[k-1]);e[k]=h[k-1];g[k]=h[k];}
```

```
S[2]=thomas(f,e,g,d);
```

```
S[3]=xi;
```

```

for(k=0;k<(n-1);k++)

    {S[0][k]=(6.*yi[k+1]-h[k]*h[k]*S[2][k+1])/(6.0*h[k]);

    S[1][k]=(6.*yi[k]-h[k]*h[k]*S[2][k])/(6.0*h[k]);

    }

```

```

return S;

```

```

}

```

```

public static double funcSpline(double S[][],double x)

```

```

{

```

```

int n=S[0].length;

```

```

double xx1=0;

```

```

double xx2=0;

```

```

double y=0;

```

```

double hk=0;

```

```

for(int k=0;k<(n-1);k++)

```

```

    {if(S[3][k]<=x && x<=S[3][k+1])

```

```

        {hk=(S[3][k+1]-S[3][k]);

```

```

            xx1=(x-S[3][k]);

```

```

            xx2=(S[3][k+1]-x);

```



```
y=S[0][k]*xx1+S[1][k]*xx2+(xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]+xx2*xx2*xx2*S[2][k]
)/(6.0*hk);
```

```
break;
```

```
}
```

```
}
```

```
if(y==0 && S[3][n-2]<=x )
```

```
{
```

```
int k=n-2;
```

```
hk=(S[3][k+1]-S[3][k]);
```

```
xx1=(x-S[3][k]);
```

```
xx2=(S[3][k+1]-x);
```

```
y=S[0][k]*xx1+S[1][k]*xx2+(xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]+xx2*xx2*xx2*S[2][k]
)/(6.0*hk);
```

```
}
```

```
return y;
```

```
}
```

```
public static double[][] funcSpline(double xi[],double yi[],int
numberofmidpoints, double x0, double xn)
```

```
{
```

```
    //numberofmidpoints : in x--o--o--x--o--o--x chain if x's are  
    esxperimental points
```

```
    // numberofmidpoints is 2
```

```
    int n=xi.length;
```

```
    int nn=(n-1)*(numberofmidpoints+1)+1;
```

```
    double z[][]=new double[2][nn];
```

```
    double S[][]=cubic_spline(xi,yi,x0,xn);
```

```
    double dx=0;
```

```
    int k=0;
```

```
    int i;
```

```
    for(i=0;i<(n-1);i++)
```

```
    { z[0][k]=xi[i];z[1][k]=funcSpline(S,z[0][k]);k++;
```

```
      for(int j=0;j<numberofmidpoints;j++)
```

```
      { dx=(xi[i+1]-xi[i])/((double)numberofmidpoints+1.0);
```

```
        z[0][k]=z[0][k-1]+dx;z[1][k]=funcSpline(S,z[0][k]);k++;}
```

```
    }
```

```
    z[0][k]=xi[i];z[1][k]=funcSpline(S,z[0][k]);
```

```
    return z;
```

```
}
```

```

// Türev formülleri

// =====

public static double dfSpline(double xi[],double yi[],double c0,double
cn,double x)

{ //kübik şerit türev formülü

    double S[][]=cubic_spline(xi,yi,c0,cn);

    return dfSpline(S,x);
}

public static double dfSpline(double S[][],double x)

{

//kübik şerit türev formülü

int n=S[0].length;

double xx1=0;

double xx2=0;

double y=0;

double hk=0;

for(int k=0;k<(n-1);k++)

    {if(S[3][k]<=x && x<=S[3][k+1])

        {hk=(S[3][k+1]-S[3][k]);

```

```

xx1=(x-S[3][k]);

xx2=(S[3][k+1]-x);

y=S[0][k]-S[1][k]+(xx1*xx1*S[2][k+1]-xx2*xx2*S[2][k])/(2.0*hk);

break;

}

}

if(y==0 && S[3][n-2]<=x )
{
    int k=n-2;

    hk=(S[3][k+1]-S[3][k]);

    xx1=(x-S[3][k]);

    xx2=(S[3][k+1]-x);

    y=S[0][k]*xx1+S[1][k]*xx2+(xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]+xx2*xx2*xx2*S[2][k]
)/(6.0*hk);

}

return y;

}

public static double dfSpline(double xi[],double yi[],double x)

{

```

```
//doğal kübik şerit türev formülü
```

```
double S[][]=cubic_spline(xi,yi,0,0);
```

```
return dfSpline(S,x);
```

```
}
```

```
public static double intSpline(double S[][],double a,double b)
```

```
{
```

```
//kübik şerit integral formülü
```

```
int n=S[0].length;
```

```
double xx1=0;
```

```
double xx2=0;
```

```
double y1,y2;
```

```
double hk=0;
```

```
double toplam=0;
```

```
y1=0;y2=0;
```

```
for(int k=0;k<(n-1);k++)
```

```
{ hk=(S[3][k+1]-S[3][k]);
```

```
//System.out.println("x1="+S[3][k]+"x2="+S[3][k+1]+"a="+a+"b="+b);
```

```
if(a>S[3][k+1])
```

```

{toplam=0;//System.out.println("şart 1 toplam = "+toplam);

}

else if(S[3][k]<=a && a<=S[3][k+1] && b>S[3][k+1])//şart 2

{

xx1=(a-S[3][k]);

xx2=(S[3][k+1]-a);

y1=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);

xx1=hk;

xx2=0;

y2=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);

toplam+=(y2-y1);

//System.out.println("şart 2toplam = "+toplam+"y1="+y1+"y2="+y2);

}

else if(S[3][k]<=a && a<=S[3][k+1] && S[3][k]<=b &&
b<=S[3][k+1])//şart 3

{

xx1=(a-S[3][k]);

```

```
xx2=(S[3][k+1]-a);
```

```
y1=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-  
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-  
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);
```

```
xx1=(b-S[3][k]);
```

```
xx2=(S[3][k+1]-b);
```

```
y2=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-  
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-  
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);
```

```
toplam+=(y2-y1);
```

```
//System.out.println("şart 3 toplam = "+toplam+"y1="+y1+"y2="+y2);
```

```
}
```

```
else if(a<S[3][k] && b>=S[3][k+1]) //şart 4
```

```
{
```

```
xx1=0;
```

```
xx2=hk;
```

```
y1=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-  
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-  
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);
```

```
xx1=hk;
```

```
xx2=0;
```

```
y2=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-  
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-  
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);
```

```
toplam+=(y2-y1);
```

```
//System.out.println("şart 4 toplam = "+toplam+"y1="+y1+"y2="+y2);
```

```
}
```

```
else if(S[3][k]<=b && b<=S[3][k+1])//şart 5
```

```
{xx1=0;
```

```
xx2=hk;
```

```
y1=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-  
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-  
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);
```

```
xx1=(b-S[3][k]);
```

```
xx2=(S[3][k+1]-b);
```

```
y2=S[0][k]*xx1*xx1/2.0-  
S[1][k]*xx2*xx2/2.0+(xx1*xx1*xx1*xx1*S[2][k+1]-  
xx2*xx2*xx2*xx2*S[2][k])/(24.0*hk);
```

```
toplam+=(y2-y1);
```

```
//System.out.println("şart 5 toplam = "+toplam+"y1="+y1+"y2="+y2);
```

```
}
```

```
else break;
```



```
}  
  
return toplam;  
  
}  
  
public static double s0(double S[][],double a,double b)  
  
{  
  
    //kübik şerit integral formülü integral(S(x)/x)  
  
    int n=S[0].length;  
  
    double xx1=0; //x  
  
    //ak S[0][k]  
  
    //bk S[1][k]  
  
    //ck S[2][k]  
  
    //xk s[3][k]  
  
    double xx2=0;  
  
    double y1,y2;  
  
    double hk=0;  
  
    double toplam=0;  
  
    y1=0;y2=0;  
  
    double xk1=0,xk=0,ak=0,bk=0,ck=0,ck1=0;
```

```

for(int k=0;k<(n-1);k++)

{ hk=(S[3][k+1]-S[3][k]);

xk=S[3][k];

xk1=S[3][k+1];

ak=S[0][k];

bk=S[1][k];

ck=S[2][k];

ck1=S[2][k+1];

//System.out.println("x1="+S[3][k]+"x2="+S[3][k+1]+"a="+a+"b="+b);

if(a>xk1)

{toplam=0;//System.out.println("şart 1 toplam = "+toplam);

}

else if(xk<=a && a<=xk1 && b>xk1)//şart 2

{

xx1=(xk1-a);

xx2=(xk1/a);

y1=(ak-bk)*xx1+(bk*xk1-ak*xk)*Math.log(xx2);

xx1=xk1;

```

```
xx2=a;
```

```
y1+=ck1*((xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2)/3.0-
```

```
1.5*(xx1*xx1-xx2*xx2)*xk+
```

```
3.0*xk*xk*(xx1-xx2)-
```

```
xk*xk*xk*Math.log(xx1/xx2))/6/hk;
```

```
y1+=ck*(xk1*xk1*xk1*Math.log(xx1/xx2)-
```

```
3.0*xk1*xk1*(xx1-xx2)+1.5*xk1*(xx1*xx1-xx2*xx2)-
```

```
1.0/3.0*(xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2))/6/hk;
```

```
toplam+=y1;
```

```
//System.out.println("şart 2toplam = "+toplam+"y1="+y1+"y2="+y2);
```

```
}
```

```
else if(S[3][k]<=a && a<=S[3][k+1] && S[3][k]<=b &&  
b<=S[3][k+1])//şart 3
```

```
{
```

```
xx1=(b-a);
```

```
xx2=(b/a);
```

```
y1=(ak-bk)*xx1+(bk*xk1-ak*xk)*Math.log(xx2);
```

```
xx1=b;
```

```
xx2=a;
```

```
y1+=ck1*((xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2)/3.0-
```

```
1.5*(xx1*xx1-xx2*xx2)*xk+
```

```
3.0*xk*xk*(xx1-xx2)-
```

```
xk*xk*xk*Math.log(xx1/xx2))/6/hk;
```

```
y1+=ck*(xk1*xk1*xk1*Math.log(xx1/xx2)-
```

```
3.0*xk1*xk1*(xx1-xx2)+1.5*xk1*(xx1*xx1-xx2*xx2)-
```

```
1.0/3.0*(xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2))/6/hk;
```

```
toplam+=y1;
```

```
}
```

```
else if(a<S[3][k] && b>=S[3][k+1]) //şart 4
```

```
{
```

```
xx1=(xk1-xk);
```

```
xx2=(xk1/xk);
```

```
y1=(ak-bk)*xx1+(bk*xk1-ak*xk)*Math.log(xx2);
```

```
xx1=xk1;
```

```
xx2=xk;
```

```
y1+=ck1*((xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2)/3.0-
```

```
1.5*(xx1*xx1-xx2*xx2)*xk+
```

```
3.0*xk*xk*(xx1-xx2)-
```

```
xk*xk*xk*Math.log(xx1/xx2))/6/hk;
```

```
y1+=ck*(xk1*xk1*xk1*Math.log(xx1/xx2)-
```

```
3.0*xk1*xk1*(xx1-xx2)+1.5*xk1*(xx1*xx1-xx2*xx2)-
```

```
1.0/3.0*(xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2))/6/hk;
```

```
toplam+=y1;
```

```
//System.out.println("şart 4 toplam = "+toplam+"y1="+y1+"y2="+y2);
```

```
}
```

```
else if(S[3][k]<=b && b<=S[3][k+1])//şart 5
```

```
{ xx1=(b-xk);
```

```
xx2=(b/xk);
```

```
y1=(ak-bk)*xx1+(bk*xk1-ak*xk)*Math.log(xx2);
```

```
xx1=b;
```

```
xx2=xk;
```

```
y1+=ck1*((xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2)/3.0-
```

```
1.5*(xx1*xx1-xx2*xx2)*xk+
```

```
3.0*xk*xk*(xx1-xx2)-
```

```
xk*xk*xk*Math.log(xx1/xx2))/6/hk;
```

```

y1+=ck*(xk1*xk1*xk1*Math.log(xx1/xx2)-
3.0*xk1*xk1*(xx1-xx2)+1.5*xk1*(xx1*xx1-xx2*xx2)-
1.0/3.0*(xx1*xx1*xx1-xx2*xx2*xx2))/6/hk;

toplam+=y1;

//System.out.println("şart 5 toplam = "+toplam+"y1="+y1+"y2="+y2);

}

else break;

}

return toplam;

}

public static double intSpline(double xi[],double yi[],double c0,double
cn,double a,double b)

{double S[][]=cubic_spline(xi,yi,c0,cn);

return intSpline(S,a,b);

}

//Optimisation

public static double golden(double xi[],double yi[],double c0,double cn,double
a,double b)

{double S[][]=cubic_spline(xi,yi,c0,cn);

```

```
return golden(S,a,b);
```

```
}
```

```
public static double golden(double S[],double a,double b)
```

```
{
```

```
// find the minimum of the function
```

```
// note maximum  $f(x) = \text{minimum}(-f(x))$ 
```

```
double epsilon=1.0e-10;
```

```
double delta=1.0e-8;
```

```
int print=0;
```

```
double r1 = (Math.sqrt(5.0)-1.0)/2.0; // golden ratio
```

```
double r2 = r1*r1;
```

```
double h = b - a;
```

```
double ya = -funcSpline(S,a);
```

```
double yb = -funcSpline(S,b);
```

```
double c = a + r2*h;
```

```
double d = a + r1*h;
```

```
double yc = -funcSpline(S,c);
```

```
double yd = -funcSpline(S,d);
```

```
int k = 1;

double dp,dy,p,yp;

while ((Math.abs(yb-ya)>epsilon) || (h>delta))

{

    k++;

    if (yc<yd)

    {

        b = d;

        yb = yd;

        d = c;

        yd = yc;

        h = b - a;

        c = a + r2 * h;

        yc = -funcSpline(S,c);

    }

    else

    {

        a = c;
```



```
ya = yc;
```

```
c = d;
```

```
yc = yd;
```

```
h = b - a;
```

```
d = a + r1 * h;
```

```
yd = -funcSpline(S,d);
```

```
    }//end of if
```

```
  }//end of while
```

```
dp = Math.abs(b-a);
```

```
dy = Math.abs(yb-ya);
```

```
p = a;
```

```
yp = ya;
```

```
if (yb<ya)
```

```
{
```

```
  p = b;
```

```
  yp = yb;
```

```
}
```

```
if(print==1)
```

```
    {System.out.println("x min = "+p+"ymin = "+yp+"error of x =" +dp+"error of  
y"+dy); }
```

```
    return p;
```

```
}
```

```
public static void main(String args[]) throws IOException
```

```
{
```

```
    //double
```

```
x[]={0.9,1.3,1.9,2.1,2.6,3.0,3.9,4.4,4.7,5.0,6.0,7.0,8.0,9.2,10.5,11.3,11.6,12.0,1  
2.6,13.0,13.3};
```

```
    //double
```

```
y[]={1.3,1.5,1.85,2.1,2.6,2.7,2.4,2.15,2.05,2.1,2.25,2.3,2.25,1.95,1.4,0.9,0.7,0.  
6,0.5,0.4,0.25};
```

```
    //String s1=JOptionPane.showInputDialog("file name : ");
```

```
    //double c[][]=Text.readDoubleT(s1);
```

```
    double a[][]=Text.readDoubleT("a.txt");
```

```
    Text.print (a);
```

```
    double x[]=a[0];
```

```
    double y[]=a[1];
```

```
    double z3[][]=funcSpline(x,y,20,0.0,0.0);
```

```
    System.out.println("Cubic spline \n"+Matrix.toStringT(z3));
```

```
Text.print(Text.T(z3),"Curve fitting with cubic spline interpolation  
polinomial");
```

```
Plot pp=new Plot(x,y);
```

```
pp.setLabel("Curve fitting with cubic spline interpolation polinomial");
```

```
pp.setPlotType(0,20);
```

```
pp.addData(z3[0],z3[1]);
```

```
pp.plot();
```

```
}
```

```
}
```

EK-2 ÖRNEK BİR ENERJİ TESTİ VERİSİ

Time	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	115	116
90:53:00		-27.20	-21.90	-19.40	-20.00	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	20.50	46.60	39.50	34.00
90:53:30		-27.20	-21.70	-19.40	-20.00	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	21.60	46.80	39.40	34.20
90:54:00		-25.10	-21.50	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	23.30	43.70	35.70	34.60
90:54:30		-23.50	-21.20	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	24.00	41.10	32.70	32.50
90:55:00		-22.60	-21.00	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	24.50	39.50	29.70	29.90
90:55:30		-21.80	-20.70	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	25.10	38.30	24.80	29.00
90:56:00		-21.20	-20.40	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	25.60	37.50	20.30	28.10
90:56:30		-20.80	-20.20	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.00	37.00	22.80	27.00
90:57:00		-20.50	-20.00	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.30	36.50	24.30	25.80
90:57:30		-20.10	-19.70	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.50	36.20	25.40	24.90
90:58:00		-19.70	-19.40	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.60	35.80	26.30	24.30
90:58:30		-19.40	-19.30	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.70	35.50	26.90	23.90
90:59:00		-19.20	-19.10	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.80	35.20	27.40	23.70
90:59:30		-18.90	-18.90	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.90	35.00	27.70	23.60
91:00:00		-18.70	-18.80	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.90	34.80	27.90	23.60
91:00:30		-18.50	-18.70	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.80	34.60	28.10	23.60
91:01:00		-18.40	-18.60	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.80	34.40	28.20	23.60
91:01:30		-18.20	-18.50	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.70	34.30	28.30	23.60
91:02:00		-18.10	-18.40	-19.50	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.50	34.10	28.30	23.70
91:02:30		-17.90	-18.30	-19.40	-20.00	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	26.40	34.00	28.40	23.70
91:03:00		-17.80	-18.30	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.20	33.80	28.40	23.70
91:03:30		-17.70	-18.20	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.10	33.70	28.30	23.80
91:04:00		-17.60	-18.20	-19.40	-20.00	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	26.00	33.60	28.30	23.80
91:04:30		-17.50	-18.10	-19.40	-20.00	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	25.90	33.40	28.30	23.80
91:05:00		-17.40	-18.10	-19.40	-19.90	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	25.80	33.30	28.20	23.90
91:05:30		-23.00	-20.20	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	19.20	36.60	28.30	25.90
91:06:00		-25.00	-22.30	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	-17.40	41.80	32.70	28.00
91:06:30		-25.00	-23.00	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	-14.10	44.00	35.60	27.70
91:07:00		-25.70	-23.70	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	-0.90	45.10	37.10	28.60
91:07:30		-26.90	-24.60	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	7.90	45.60	38.10	31.60
91:08:00		-27.30	-24.30	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	13.20	45.80	38.60	34.20
91:08:30		-27.00	-23.50	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	16.40	46.00	39.10	34.20
91:09:00		-26.90	-22.90	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	18.30	46.20	39.60	33.90
91:09:30		-27.10	-22.40	-19.30	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	19.50	46.40	39.70	33.90
91:10:00		-27.20	-22.00	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	20.60	46.60	39.90	34.40
91:10:30		-27.20	-21.80	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.80	21.60	46.90	40.10	34.70
91:11:00		-25.80	-21.60	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.00	-19.00	-17.90	23.10	44.90	37.10	34.70
91:11:30		-23.80	-21.30	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	24.10	42.00	33.90	33.50
91:12:00		-22.80	-21.10	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	24.60	40.00	31.00	30.80
91:12:30		-22.00	-20.80	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	25.10	38.70	27.10	29.60
91:13:00		-21.30	-20.60	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.00	-19.00	-17.80	25.60	37.80	20.50	28.70
91:13:30		-20.90	-20.40	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.00	37.20	21.80	27.60
91:14:00		-20.60	-20.10	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.30	36.70	23.90	26.40
91:14:30		-20.20	-19.80	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.50	36.30	25.20	25.30
91:15:00		-19.80	-19.60	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.70	36.00	26.10	24.60
91:15:30		-19.50	-19.40	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.80	35.60	26.80	24.10
91:16:00		-19.20	-19.10	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.90	35.40	27.30	23.80
91:16:30		-19.00	-19.00	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.90	35.10	27.70	23.70
91:17:00		-18.70	-18.90	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.90	34.90	27.90	23.70
91:17:30		-18.60	-18.70	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.90	34.70	28.20	23.70
91:18:00		-18.40	-18.60	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.80	34.60	28.40	23.80
91:18:30		-18.20	-18.50	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.70	34.40	28.50	23.80
91:19:00		-18.10	-18.40	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.70	34.20	28.50	23.80
91:19:30		-17.90	-18.30	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.50	34.00	28.50	23.90
91:20:00		-17.80	-18.30	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.40	33.90	28.50	23.90
91:20:30		-17.70	-18.20	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.40	33.70	28.50	23.90
91:21:00		-17.60	-18.20	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.80	26.20	33.70	28.50	24.00
91:21:30		-17.50	-18.10	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.00	-19.00	-17.90	26.10	33.60	28.50	24.10
91:22:00		-17.40	-18.10	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.10	-19.00	-17.90	26.00	33.50	28.50	24.10
91:22:30		-19.40	-18.40	-19.40	-20.00	-19.70	-21.30	-18.00	-19.00	-17.90	23.10	34.70	28.10	24.80
91:23:00		-24.90	-22.10	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	-4.60	40.90	31.40	28.30
91:23:30		-24.80	-22.70	-19.40	-20.00	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	-18.60	43.50	34.80	27.80
91:24:00		-25.30	-23.40	-19.40	-19.90	-19.70	-21.20	-18.10	-19.00	-17.90	-5.40	44.80	36.90	28.00

Probe	Minimum	Maximum	I.	Average		
Inlet Fz Evap	-27.70	-17.20	-21.90			
Outlet Fz Evap	-25.00	-18.10	-20.50			
Package conservation n°01			-19.70	-19.30	-19.50	
Package conservation n°02			-20.20	-19.90	-20.00	
Package conservation n°03			-20.10	-19.70	-19.90	
Package conservation n°04			-21.70	-21.20	-21.40	
Package conservation n°05			-18.40	-18.00	-18.30	
Package conservation n°06			-19.30	-18.90	-19.20	
Package conservation n°07			-18.10	-17.80	-17.90	
Suction line	-19.60	27.00	20.60			
Compressor output		33.10	47.10	38.80		
INLET COND		19.70	40.30	30.80		
Filter	22.60	35.10	27.40			
Compessore		35.80	41.30	38.30		
Temperature of chamber			24.40	25.40	24.90	
Voltage	222.80	233.90	229.10			
Current	0.01	0.26	0.08			
Power	0.00	250.00	15.00			
Frequency		49.90	50.10	50.00		
Energy Consumption kWh	0.378					
Energy Consumption kWh/h		0.015				
Energy Consumption kWh/24h (*)	0.370					
Total D. Cycle	31.8					