

**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: XX.XX.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 XX/12/2016 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.

.... / 03 / 2017

İmzası

Adı-Soyadı

**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

Mart 2017, 185 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 Company Manisa 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. Elde edilen deneysel test sonuçları ile beraber java tabanlı bir kübik şerit interpolasyon programı oluşturulmuş böylece zamana bağlı değişimlerim modellenmesi sadeleştirilerek bilgisayar destekli model analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

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

## **ABSTRACT**

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

MUMINOGLU, Fatih

MSc in Mechanical Eng. Supervisor:

Yrd. Doç. Dr. M. Turhan COBAN

March 2017, 185 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-depended 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-depended 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 Company Manisa Laboratories. Seven independed 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 creating a Cubic spline interpolation programme on Java and thus simplified to evaluate time-depended gradient and compared with computer aided analysis results.

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

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında desteği ve ilgisini esirgemeyen tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. M. Turhan ÇOBAN'a, özellikle çalışmalarım sırasında gösterdiği sabırdan dolayı sevgili eşim Tuba Yılmaz MÜMİNOĞLU'na ve her daim yanımda olan canım aileme teşekkürü bir borç bilirim.





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|                                                                      |       |
|----------------------------------------------------------------------|-------|
| ÖZET .....                                                           | vi    |
| ABSTRACT .....                                                       | vii   |
| TEŞEKKÜR .....                                                       | viii  |
| İÇİNDEKİLER.....                                                     | x     |
| ŞEKİLLER DİZİNİ.....                                                 | xiii  |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                                              | xix   |
| SİMGELER DİZİNİ.....                                                 | xxii  |
| KISALTMALAR DİZİNİ .....                                             | xxvii |
| 1 GİRİŞ .....                                                        | 1     |
| 2 ISI YALITIMI VE ISI YALITIM MALZEMELERİ .....                      | 10    |
| 2.1 Yalıtım Malzemelerinde Isı Transferi .....                       | 12    |
| 2.1.1 İletim Yoluyla Isı Transferi .....                             | 14    |
| 2.1.2 Isı Taşınımı .....                                             | 19    |
| 2.1.3 Isı Işınımı.....                                               | 21    |
| 2.2 Isı Yalıtım Malzemeleri .....                                    | 23    |
| 2.2.1 Yapılarına Göre Isı Yalıtım Malzemeleri.....                   | 24    |
| 2.3 Geleneksel Isı Yalıtım Malzemeleri.....                          | 25    |
| 2.4 Isı Yalıtım Malzemeleri İle İlgili Temel Kavramlar.....          | 26    |
| 2.4.1 Isı İletim Katsayısı .....                                     | 26    |
| 2.4.2 Yoğunluk .....                                                 | 26    |
| 2.4.3 Sıcaklık Dayanımı .....                                        | 26    |
| 2.4.4 Mekanik Dayanım .....                                          | 26    |
| 2.4.5 Buhar Difüzyon Direnci .....                                   | 27    |
| 2.4.6 Su Emme Oranı .....                                            | 27    |
| 2.5 Yaygın Olarak Kullanılan Geleneksel Isı Yalıtım Malzemeleri..... | 27    |

|        |                                                       |    |
|--------|-------------------------------------------------------|----|
| 2.5.1  | Camyünü.....                                          | 28 |
| 2.5.2  | Taşıyünü .....                                        | 28 |
| 2.5.3  | Ekspande Polistren Köpük (EPS) .....                  | 29 |
| 2.5.4  | Ekstrude Polistren Köpük (XPS) .....                  | 29 |
| 2.5.5  | Poliüretan.....                                       | 29 |
| 2.5.6  | Fenol Köpüğü .....                                    | 34 |
| 2.5.7  | Cam Köpüğü.....                                       | 34 |
| 2.5.8  | Genleştirilmiş Perlit (EPB) .....                     | 35 |
| 2.5.9  | Genleştirilmiş Mantar (ICB).....                      | 35 |
| 2.5.10 | Polietilen Köpük .....                                | 35 |
| 2.5.11 | Mantar Levhalar.....                                  | 35 |
| 2.5.12 | Seramik Yünü .....                                    | 35 |
| 2.5.13 | Melanin Köpüğü .....                                  | 36 |
| 2.5.14 | Polizosiyonat Köpük.....                              | 36 |
| 2.5.15 | PVC Köpük.....                                        | 36 |
| 2.5.16 | Elastomerik Kauçuk Köpüğü .....                       | 36 |
| 2.6    | Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri .....     | 36 |
| 2.6.1  | Vakum İzolasyon Panelleri.....                        | 38 |
| 2.6.2  | Gaz Yalıtım Panelleri .....                           | 39 |
| 2.6.3  | Aerojel .....                                         | 40 |
| 2.6.4  | Gelecekteki Isı 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 İzolasyon Panellerinin Servis Ömürleri .....    | 75 |

|     |                                                                        |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5   | SAYISAL ÇALIŞMA .....                                                  | 81  |
| 5.1 | Modelleme .....                                                        | 81  |
| 5.2 | Kabuller, Sınır Şartları ve Malzeme Özellikleri .....                  | 83  |
| 5.3 | Ağ yapısı (Mesh) .....                                                 | 87  |
| 5.4 | Analizler .....                                                        | 88  |
| 6   | DENEYSEL ÇALIŞMA .....                                                 | 92  |
| 6.1 | Ev Tipi Soğutucular ve Genel Performans Kriterleri .....               | 94  |
| 6.2 | VİP'ye Ait Termal Özelliklerin Değerlendirilmesi .....                 | 97  |
| 6.3 | Poliüretana Ait Termal ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi ..... | 99  |
| 6.4 | Deney Düzenekinin Yapı ve Teknik Özellikleri .....                     | 102 |
| 6.5 | Prototip Üretimi .....                                                 | 104 |
| 6.6 | Performans ve Enerji Deneyleri .....                                   | 109 |
| 7   | SONUÇ VE ÖNERİLER .....                                                | 114 |
| 7.1 | Sayısal Çalışmaya Ait Sonuçlar .....                                   | 115 |
| 7.2 | Deneysel Çalışmaya Ait Sonuçlar .....                                  | 116 |
| 7.3 | Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması .....                 | 120 |
| 7.4 | Sonuç, Değerlendirme ve Öneriler .....                                 | 122 |
|     | KAYNAKLAR DİZİNİ .....                                                 | 124 |
|     | ÖZGEÇMİŞ .....                                                         | 132 |
|     | EK-1 JAVA PROGRAMI .....                                               | 133 |
|     | EK-2 FLUENT ANALİZLERİ .....                                           | 156 |
|     | EK-3 ÖRNEK BİR ENERJİ TESTİ VERİSİ .....                               | 159 |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>                                                                                                                                    | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ŞEKİL 1.1 ELEKTRİKLİ EV ALETLERİNİN GLOBAL ENERJİ TÜKETİM TRENDLERİ<br>(IEA, ENERGY EFFICIENCY MARKET REPORT, 2016) .....                       | 2            |
| ŞEKİL 1.2 EVLERDE ELEKTRİK TÜKETİMİ (BEYAZ EŞYA SANAYİCİLERİ<br>DERNEĞİ, 2011).....                                                             | 3            |
| ŞEKİL 1.3 GELİŞMİŞ ÜLKELERDE, KULLANIM ALANLARINA BAĞLI OLARAK<br>KONUTLARDA ELEKTRİK TÜKETİM PAYLARI TAHMİNİ (IEA, 2007) .....                 | 4            |
| ŞEKİL 1.4 GELİŞMEKTE OLAN ÜLKELERDE, KULLANIM ALANLARINA BAĞLI<br>OLARAK KONUTLARDA ELEKTRİK TÜKETİM PAYLARI TAHMİNİ (IEA, 2007)<br>.....       | 5            |
| ŞEKİL 1.5 EV TİPİ SOĞUTUCULARDA ENERJİ VERİMLİLİK DEĞERLERİNİN<br>KIYASLANMASI .....                                                            | 5            |
| ŞEKİL 1.6 AB VERİMLİLİKLERİNE GÖRE BUZDOLABI SATIŞLARI (TOPTEN<br>INTERNATIONAL SERVICES, 2015) .....                                           | 6            |
| ŞEKİL 1.7 AB VE ABD'DE BEYAZ EŞYA STANDARTLARININ KAZANIMI OLAN<br>ENERJİ TASARRUFU GRAFİĞİ (IEA ENERGY EFFICIENCY MARKET REPORT,<br>2016)..... | 6            |
| ŞEKİL 1.8 ÖRNEK BUZDOLABI ENERJİ ETİKETİ .....                                                                                                  | 8            |
| ŞEKİL 1.9 BİR VAKUM İZOLASYON PANELİNİN ŞEMATİK GÖSTERİMİ .....                                                                                 | 9            |

|                                                                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ŞEKİL 2.1 RADYASYON, İLETİM VE TAŞINIMIN HAVA BOŞLUĞUNDAKİ ISI TRANSFERİNE ETKİSİ (SHIRTLİFFE, 1972) .....                                                                                                    | 11 |
| ŞEKİL 2.2 GELENEKSEL (ELYAF, KÖPÜK VB.) YALITIMDA ISI TRANSFER MEKANİZMALARI (KİSTLER, 1935) .....                                                                                                            | 12 |
| ŞEKİL 2.3 İLETİM, TAŞINIM VE İŞİNIM İLE ISI GEÇİŞ ŞEKİLLERİ .....                                                                                                                                             | 14 |
| ŞEKİL 2.4 İLETİM YOLUYLA BİR BOYUTLU ISI TRANSFERİ GERÇEKLEŞEN DUVAR .....                                                                                                                                    | 15 |
| ŞEKİL 2.5 GÖZENEKLİ MALZEMELERDEKİ ISI İLETİMİNİN KATI VE GAZ HALİNDE YOĞUNLUKLA BERABER DEĞİŞİMİ (SİMMER, 2005) .....                                                                                        | 16 |
| ŞEKİL 2.6 ÇEŞİTLİ GAZLARIN ISI İLETİMİ VE MOLEKÜL AĞIRLIKLARI (AGA, 1985) .....                                                                                                                               | 17 |
| ŞEKİL 2.7 HAVA İÇİN KARAKTERİSTİK SİSTEM BOYUTLARININ FONKSİYONU OLARAK HESAPLANMIŞ GAZ İLETİMİ .....                                                                                                         | 18 |
| ŞEKİL 2.8 HAVA İÇİN DENKLEM 2.2, 2.3 VE 2.4'E GÖRE FARKLI KARAKTERİSTİK SİSTEM BOYUTLARINA GÖRE HESAPLANMIŞ GAZ İLETİMİ .....                                                                                 | 19 |
| ŞEKİL 2.9 GÖZENEKLİ MALZEMEDE GÖZENEK BOYUTUNA BAĞLI OLARAK MEYDANA GELEN ATMOSFERİK BASINÇTAKİ GAZ İLETKENLİĞİ DEĞİŞİMİ. VİP ÇEKİRDEĞİNDE 10-100 NM BOYUTUNDA TOZ SİLİKA KULLANILMIŞTIR (SİMMER, 2005) ..... | 21 |
| ŞEKİL 2.10 KATI, GAZ VE RADYASYONUN TOPLAM ISI İLETİMİNE ETKİSİ .....                                                                                                                                         | 24 |
| ŞEKİL 2.11 POLİOLLERİN KİMYASAL YAPISI (THAMSON, 2005) .....                                                                                                                                                  | 31 |
| ŞEKİL 2.12 TİCARİ OLARAK EN ÇOK KULLANILAN İZOSİYONATLAR (THAMSON, 2005) .....                                                                                                                                | 32 |
| ŞEKİL 2.13 POLİÜRETAN OLUŞUM TEPKİMESİ (THAMSON, 2005) .....                                                                                                                                                  | 33 |
| ŞEKİL 2.14 POLİÜRETAN TEPKİMESİNDE KULLANILAN KABARTICI AJANLAR (ÖZÇAM, 2007) .....                                                                                                                           | 34 |

|                                                                                                                                                                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ŞEKİL 2.15 HALEN KULLANMAKTA OLAN YALITIM MALZEMELERİNİN R DEĞERİ<br>(MUKHOPADHYAYA, 2006) .....                                                                                                                          | 37 |
| ŞEKİL 2.16 1990'LARDA BUZDOLAPLARI İÇİN ÜRETİLEN İLK VİP<br>UYGULAMALARINDAN BİR ÖRNEK (DEGUSSA) .....                                                                                                                    | 38 |
| ŞEKİL 2.17 VAKUM İZOLASYON PANELİNDE ÇEKİRDEK, İÇ ZARF VE DIŞ ZARFIN<br>GÖRÜNÜMÜ (DENİZ VE BİNARK, 2008).....                                                                                                             | 39 |
| ŞEKİL 2.18 ALEV TORCU ÜZERİNDEKİ BİR AEROJEL. (AEROGEL, 2012). ....                                                                                                                                                       | 41 |
| ŞEKİL 2.19 AEROJEL PROSESİ .....                                                                                                                                                                                          | 43 |
| ŞEKİL 3.1 VİP ARAŞTIRMALARIYLA İLGİLİ YAPILAN YAYIM SAYISI. ....                                                                                                                                                          | 49 |
| ŞEKİL 3.2 SOLDA: VİP YAYIMLARININ ÜLKELERE GÖRE DAĞILIMI. SAĞDA: VİP<br>YAYIMLARININ KONU BAŞLIKLARINA GÖRE DAĞILIMI .....                                                                                                | 50 |
| ŞEKİL 3.3 VİP ÇEPERİNDEKİ ISIL KÖPRÜLER (GHAZİ WAKİLİ, 2011).....                                                                                                                                                         | 54 |
| ŞEKİL 4.1 VAKUM İZOLASYON PANELİ .....                                                                                                                                                                                    | 56 |
| ŞEKİL 4.2 BİR VİP'NİN İÇYAPISI (MALONE VE WEİR, 2001).....                                                                                                                                                                | 56 |
| ŞEKİL 4.3 300 K'DE ÇEŞİTLİ SİLİKA DOLGULARIN GAZ BASINCINA BAĞLI<br>OLARAK ISIL İLETKENLİKLERİ (FRICKE, 2005) .....                                                                                                       | 58 |
| ŞEKİL 4.4 FARKLI İÇ DOLGU MALZEMELERİ İÇİN VAKUM SEVİYESİ-ISI İLETİM<br>KATSAYISI İLİŞKİSİ (FRICKE, 2005).....                                                                                                            | 59 |
| ŞEKİL 4.5 GÖZENEK BASINCI İLE DOLGU MALZEMESİNİN ISIL İLETKENLİĞİNİN<br>DEĞİŞİMİ (FRICKE, 2005) .....                                                                                                                     | 59 |
| ŞEKİL 4.6 VİP UYGULAMALARINDAKİ FARKLI BARIYER ÇÖZÜMLERİNİN KESİT<br>GÖRÜNTÜSÜ. BARIYER İSİM VE YAPILARI IEA/ECBCS ANNEX39'A GÖRE<br>VERİLMİŞTİR. RESİM ÜZERİNDEKİ RAKAMLAR TOPLAM KATMAN<br>KALINLIKLARINI SİMGELER..... | 61 |
| ŞEKİL 4.7 VİP BARIYERİ İÇİN KULLANILAN ÇOK KATMANLI LAMİNASYONIN<br>GÖRSELLEŞTİRİMİ (SİMMER VE BRUNNER 2005A).....                                                                                                        | 62 |

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ŞEKİL 4.8 FARKLI GÖZENEK BOYUTLARI ( $\text{SiO}_2$ ) VE BASINÇLARDA HAVANIN<br>ISIL İLETKENLİĞİ .....                           | 64 |
| ŞEKİL 4.9 ÇEŞİTLİ MALZEMELERE AİT ISI İLETİMİ, GAZ BASINCI İLİŞKİSİ<br>(TENPIERİK 2009).....                                     | 66 |
| ŞEKİL 4.10 FARKLI GÖZENEK BOYUTLARI VE BASINÇ SEVİYELERİNDE HAVANIN<br>ISI İLETİM KATSAYISI (SİMMLER VE DİĞER., 2005).....       | 67 |
| ŞEKİL 4.11 FARKLI İÇ DOLGU MALZEMESİNE SAHİP VAKUM İZOLASYON<br>PANELLERİN ISI İLETİM KATSAYILARI (SİMMLER VE DİĞER, 2005) ..... | 68 |
| ŞEKİL 4.12 VIP İÇİNDE GERÇEKLEŞEN TERMAL KÖPRÜ .....                                                                             | 69 |
| ŞEKİL 4.13 İKİ VIP ARASINDA GERÇEKLEŞEN TERMAL KÖPRÜ .....                                                                       | 69 |
| ŞEKİL 4.14 ALÜMİNYUM BARIYERLİ, ÇOK KATMANLI PLİMER YAPIDAKİ BİR<br>BARIYER FİLMİN OPTİK MİKROSKOP GÖRÜNTÜSÜ .....               | 76 |
| ŞEKİL 4.15 6 FARKLI NUMUNEDEN ALINA SU BUHARI TRANSFER ORANI (WVTR)<br>ÖLÇÜM SONUÇLARI (CHALMERS).....                           | 78 |
| ŞEKİL 5.1 DONDURUCUNUN ÜÇ BOYUTLU MODELİNDEN BİR GÖRÜNÜŞ.....                                                                    | 82 |
| ŞEKİL 5.2 DONDURUCUNUN ÜÇ BOYUTLU MODELİNDEN BİR GÖRÜNÜŞ.....                                                                    | 83 |
| ŞEKİL 5.3 ANALİZİ YAPILAN ÜRÜNE AİT BİR KESİT GÖRÜNÜŞ VE SINIR<br>KOŞULLARININ VERİLMESİ (MÜMİNOĞLU,2016) .....                  | 86 |
| ŞEKİL 5.4 GÖVDEDEN ALINAN BİR AĞ YAPISI GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2016)<br>.....                                                     | 88 |
| ŞEKİL 5.5 VIP'LERDEN ALINAN BİR AĞ YAPISI GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2016)<br>.....                                                   | 88 |
| ŞEKİL 5.6 VIP'SİZ ÜRÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK<br>PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                             | 89 |
| ŞEKİL 5.7 VIP'LI ÜRÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAKLIK<br>PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                              | 89 |



|                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ŞEKİL 5.8 VIP’Lİ ÜRÜNÜN 22. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAĞLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                    | 90  |
| ŞEKİL 5.9 VIP’Lİ ÜRÜNÜN 32. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAĞLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                    | 90  |
| ŞEKİL 5.10 VIP’Lİ ÜRÜNÜN 55. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAĞLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                   | 90  |
| ŞEKİL 5.11 VIP’Lİ ÜRÜNÜN 61. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAĞLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                   | 91  |
| ŞEKİL 5.12 VIP’Lİ ÜRÜNÜN 116. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAĞLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                  | 91  |
| ŞEKİL 5.13 VIP’Lİ ÜRÜNÜN 227. GÜNÜNE AİT ENERJİ TÜKETİM KOŞULLARINDAKİ SICAĞLIK PROFİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....                  | 91  |
| ŞEKİL 6.1 UP 120 ÜRÜNE AİT ENERJİ ETİKETİ.....                                                                                  | 93  |
| ŞEKİL 6.2 GÜNÜMÜZDE YAYGIN OLARAK ÜRETİLEN EV TİPİ SOĞUTUCU VE DONDURUCU TİPLERİ (ASHRAE, 2002) .....                           | 95  |
| ŞEKİL 6.3 ÇALIŞMADA KULLANILAN ISI İLETİM KATSATISI ÖLÇÜM CİHAZI (MÜMİNOĞLU, 2016) .....                                        | 98  |
| ŞEKİL 6.4 VIP’DEN ELDE EDİLEN ISI İLETİM KATSAYILARININ 2. DERECE BİR POLİNOM SAL EĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016).....        | 99  |
| ŞEKİL 6.5 ISI İLETİM KATSAYISI ÖRNEKLENEN PU NUMUNELERİ (MÜMİNOĞLU, 2015).....                                                  | 100 |
| ŞEKİL 6.6 POLİÜRETAN’DAN ELDE EDİLEN ISI İLETİM KATSAYILARININ 2. DERECE BİR POLİNOM SAL EĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016)..... | 101 |
| ŞEKİL 6.7 TEST ODASI YERLEŞİM PLANI ÜST GÖRÜNÜŞÜ (TS EN 62552).....                                                             | 104 |
| ŞEKİL 6.8 PU KÜRLENME AŞAMALARI (BASF) .....                                                                                    | 104 |
| ŞEKİL 6.9 PU BASMA FİKSTÜR SİSTEMLERİ (QS GROUP, 2017).....                                                                     | 105 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ŞEKİL 6.10 PU BASMA MAKİNESİ PRENSİP ŞEMASI (ÖZÇAM, 2007) .....                                                                                     | 106 |
| ŞEKİL 6.11 KAPILAR İÇİN KULLANILAN PU BASMA SİSTEMLERİ (MÜMİNOĞLU, 2015).....                                                                       | 106 |
| ŞEKİL 6.12 VIP’Lİ YAN PANEL MONTAJ GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2015) .....                                                                                | 108 |
| ŞEKİL 6.13 VIP DENEME ÜRETİM HAZIRLIKLARI(MÜMİNOĞLU, 2015) .....                                                                                    | 108 |
| ŞEKİL 6.14 VIP’Lİ KAPI MONTAJ VE PU ENJEKSİYON GÖRÜNTÜSÜ (MÜMİNOĞLU, 2015).....                                                                     | 108 |
| ŞEKİL 6.15 İKLİMLENDİRİLMİŞ TEST ODASI (MÜMİNOĞLU, 2015).....                                                                                       | 110 |
| ŞEKİL 6.16 T TİPİ ISIL ÇİFT .....                                                                                                                   | 111 |
| ŞEKİL 6.17 ENERJİ VE PERFORMANS TESTLERİ YÜKLEME PLANI (MÜMİNOĞLU, 2015).....                                                                       | 114 |
| ŞEKİL 7.1 ISI KAZANCI ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE VIP’Lİ GÖVDEDE OLUŞAN YAŞLANMANIN 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016) .....     | 116 |
| ŞEKİL 7.2 ISI KAZANCI ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE VIP’Lİ KAPIDA OLUŞAN YAŞLANMANIN 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016) .....      | 116 |
| ŞEKİL 7.3 ENERJİ VE PERFORMANS TESTLERİNE HAZIRLANMIŞ ÜRÜN (MÜMİNOĞLU, 2016) .....                                                                  | 117 |
| ŞEKİL 7.4 VIP’Lİ PROTOTİPE AİT ÖRNEK BİR ENERJİ GRAFİĞİ (MÜMİNOĞLU, 2015).....                                                                      | 120 |
| ŞEKİL 7.5 ENERJİ TESTİ SONUÇLARININ VE DEĞİŞİMİNİN 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016) .....                                  | 121 |
| ŞEKİL 7.6 ISI KAZANCI ANALİZ SONUÇLARINA GÖRE VIP’Lİ DONDURUCUDA OLUŞAN YAŞLANMANIN 2. DERECE BİR POLİNOMSALEĞRİYLE TEMSİLİ (MÜMİNOĞLU, 2016) ..... | 121 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

| <u>Çizelge</u>                                                                                                                                                                     | <u>Sayfa</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| ÇİZELGE 1.1 1.7.2014'TEN İTİBAREN GEÇERLİ ENERJİ VERİMLİLİK SINIFLARI<br>(EKO TASARIM TEBLİĞ SGM-2011/17, BİLİM, SANAYİ VE TEKNOLOJİ<br>BAKANLIĞI, 2011) .....                     | 7            |
| ÇİZELGE 2.1 GELECEKTEKİ YÜKSEK PERFORMANSLI YALITIM MALZEMELERİ<br>İÇİN ÖNGÖRÜLEN PERFORMANS .....                                                                                 | 45           |
| ÇİZELGE 2.2 TEKNİĞİN VE TEKNOLOJİNİN GELDİĞİ NOKTADA ÜRETİLEN<br>YALITIM MALZEMELERİNİN, GELECEĞİN YÜKSEK PERFORMANSLI<br>YALITIM ÜRÜNÜ OLMA POTANSİYELİ.....                      | 46           |
| ÇİZELGE 4.1 VIP DE KULLANILAN BİR BARIYER FİLMİN KATMANLARI (SİMLER<br>VE BRUNER, 2005B).....                                                                                      | 60           |
| ÇİZELGE 4.2 VAKUM İZOLASYON PANELLERİNDE BARIYER FİMLERİN ISI<br>İLETİM KATSAYISINA ETKİSİ (ERB. M. EİCHER VE PAULİ A.G, 2005) .....                                               | 70           |
| ÇİZELGE 4.3 ÇOK KATMANLI POLİMER YAPILI BARIYER FİMLERİN 23 °C VE %50<br>RH KOŞULLARINDA GAZ VE NEM GEÇİRGENLİK DEĞERLERİ.....                                                     | 76           |
| ÇİZELGE 4.4 ARRHENİUS DENKLEMİNDEKİ PRE EKSPONANSİYEL FAKTÖR VE<br>AKTİVASYON ENERJİSİNİN SİMLER VE BRUNER'İN ELDE ETTİĞİ<br>LABORATUVAR SONUÇLARINA GÖRE HESAPLANMASI (2005)..... | 79           |
| ÇİZELGE 5.1 EV TİPİ SOĞUTUCULARIN KABİNLERİNDE KULLANILAN YAPI<br>MALZEMELERİ (ASHRAE, 2002).....                                                                                  | 84           |
| ÇİZELGE 5.2 DONDURUCUDA KULLANILAN YAPI ELEMANLARI VE ÖZELLİKLERİ<br>(MÜMİNOĞLU, 2016) .....                                                                                       | 84           |

|                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ÇİZELGE 5.3 DONDURUCU ÜRÜNDE KULLANILAN VIP'LERE AİT ÜRETİCİ TEKNİK BEYANLARI (MÜMİNOĞLU, 2016) .....                                                                               | 85  |
| ÇİZELGE 6.1 TESTLERDE KULLANILAN DONDURUCUYA AİT TEKNİK ÖZELLİKLER (MÜMİNOĞLU, 2016) .....                                                                                          | 93  |
| ÇİZELGE 6.2 EV TİPİ SOĞUTUCULARDA İKLİM SINIFLARI (TS EN 62552) .....                                                                                                               | 96  |
| ÇİZELGE 6.3 STANDARTLARCA BELİRLENEN DEPOLAMA SICAKLIKLARI (TS EN 62552) .....                                                                                                      | 96  |
| ÇİZELGE 6.5 BİRBİRİNDEN FARKLI 6 VIP NUMUNESİNDEN ALINAN ISI İLETİM KATSAYISI DEĞERLERİ. REFERANS PANEL BOYUTU 250 X 250 MM, ISI İLETİMİ W/MK BİRİMİNDENDİR (MÜMİNOĞLU, 2016) ..... | 98  |
| ÇİZELGE 6.5 POLİÜRETAN ISI İLETİM KATSAYISI DEĞİŞİMİ (MÜMİNOĞLU, 2015-2016) .....                                                                                                   | 100 |
| ÇİZELGE 6.6 POLİÜRETAN TEST RAPORU, YOĞUNLUK TESTİ (İNDESİT LABORATUVARLARI, 2015) .....                                                                                            | 101 |
| ÇİZELGE 6.7 POLİÜRETAN TEST RAPORU, BASMA MUKAVEMET TESTİ (İNDESİT LABORATUVARLARI, 2015) .....                                                                                     | 102 |
| ÇİZELGE 6.8 DONDURUCU ÜRÜNDE KULLANILAN VIP'LERİN BOYUT VE HACİMLERİ .....                                                                                                          | 107 |
| ÇİZELGE 6.9 DENEY PAKETLERİNİN BOYUTLARI VE KÜTLESİ (TS ISO EN 62552) .....                                                                                                         | 111 |
| ÇİZELGE 6.10 ENERJİ TÜKETİMİNİN TAYİN EDİLMESİ İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SICAKLIĞI ŞARTLARI (TS ISO EN 62552) .....                                                                      | 112 |
| ÇİZELGE 7.1 VIP'SİZ VE VIP'Lİ ÜRÜNE AİT ISI KAZANCI ANALİZLERİ .....                                                                                                                | 115 |
| ÇİZELGE 7.2 VIP'Lİ ÜRÜN İLK ENERJİ TESTİ DEĞERLENDİRMESİ (MÜMİNOĞLU, 2015) .....                                                                                                    | 118 |
| ÇİZELGE 7.3 ENERJİ TESTİ SONUÇLARI (MÜMİNOĞLU, 2016) .....                                                                                                                          | 118 |
| ÇİZELGE 7.4 ÖRNEK BİR ENERJİ TÜKETİM TESTİ RAPORU (MÜMİNOĞLU, 2015) .....                                                                                                           | 119 |



## SİMGELER DİZİNİ

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

$K_n$  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                                             |
| $K_n$           | Knudsen sayısı                                               |
| $L$             | VİP çevre uzunluğu, m                                        |
| $l_{mean}$      | Havanın ortalama serbest yolu, m                             |
| $Nu$            | Nusselt Sayısı                                               |
| $P_{app}$       | Uygulanan dış basınç, Pa                                     |
| $\Delta P$      | Basınç Farkı                                                 |
| $\Delta p_{wv}$ | 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 geçişi,                    |
| $Ra$            | Rayleigh Sayısı                             |
| $Re$            | Reynolds Sayısı                             |
| $T$             | Sıcaklık, °C                                |
| $T_{effective}$ | Efektif sıcaklık                            |
| $T^+$           | Sıcak yüzeye ait sıcaklık, °C               |
| $T^-$           | Soğuk yüzeye ait sıcaklık, °C               |
| $\Delta T_m$    | 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 <sub>eff</sub> | VİP içindeki etkin gözenek hacmi, m <sup>3</sup> |

## SİMGELER DİZİNİ ( Devam )

### Yunan Harfleri

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

## SİMGELER DİZİNİ (Devam )

|                 |                                                              |
|-----------------|--------------------------------------------------------------|
| $\lambda_m$     | Gözenekli malzemenin ısı iletim katsayısı, W/(m·K)           |
| $\lambda_r$     | Gözenek yüzeylerindeki radyatif ısı transferi, W/m·K         |
| $\lambda_{tot}$ | Homojen bir yapıda ısı iletkenliği                           |
| $\mu$           | Dinamik Viskozite, kg/(m·s)                                  |
| $\rho$          | Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>                                  |
| $\rho_a$        | Havanın yoğunluğu, kg/m <sup>3</sup>                         |
| $\delta$        | Karakteristik sistem ölçüsü, nm                              |
| $\sigma$        | Moleküler kesit alanı, m                                     |
| $\sigma$        | Stefan-Boltzmann sabiti, Watt/m <sup>2</sup> ·K <sup>4</sup> |
| $\nu$           | Kinematik viskozite, m <sup>2</sup> /s                       |
| $\Psi$          | Isı geçirgenliği, mW/(m·K)                                   |
| $\varphi(x_w)$  | Su içeriğine bağlı bağıl 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)**

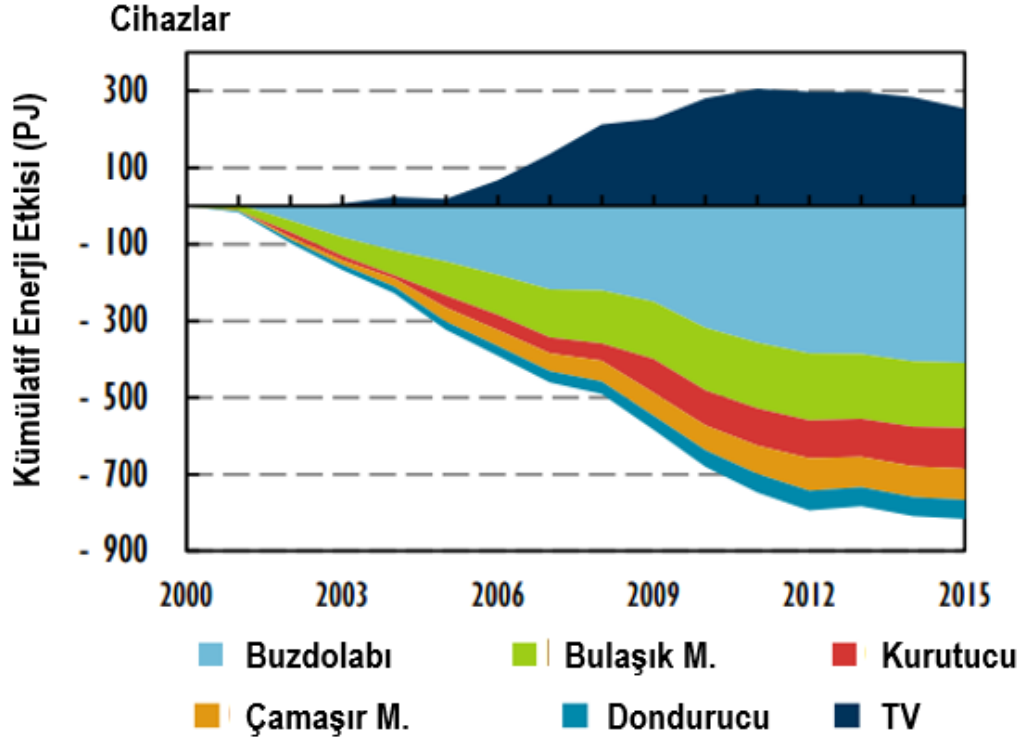
KısaltmaAçıklama

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

|      |                               |
|------|-------------------------------|
| PLC  | Programmable Logic Controller |
| PP   | Polipropilen                  |
| Ppm  | Particule Per Million         |
| PS   | Polystren                     |
| PUR  | Polyurethane                  |
| RH   | Relative Humidity             |
| 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

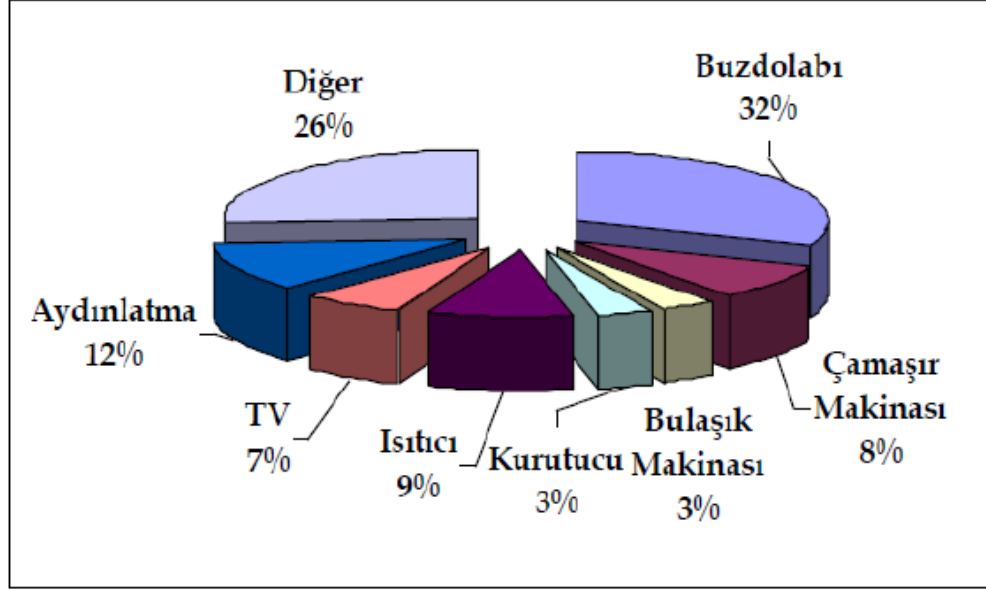
Günümüzde enerji tüm ekonomik ve sosyal politikaların önemli bir belirleyicisi, enerji sektörü ise kalkınmanın temel yapı taşlarından biri haline gelmiştir. Rezervlerin tükenmekte olduğu bugünlerde, mevcut enerji tüketimini rasyonel bir şekilde planlamak ve enerji tasarrufuyla tüketimi azaltmak ülkelerin 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)

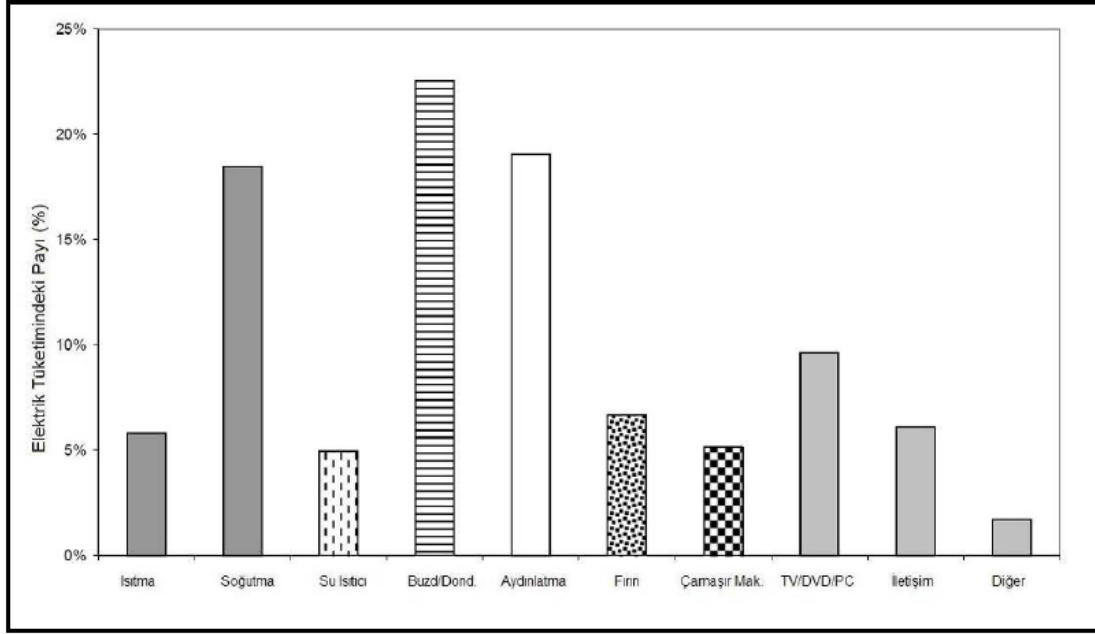
Ülkemizin konutlarda elektrik enerjisi tüketim yapısı, konuttan konuta, ailenin geçim seviyesi ve cihaz altyapısına göre büyük değişiklikler göstermekle birlikte Türkiye Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği'nin verilerine göre; evlerde kullanılan elektriğin %85'i elektrikli ve elektronik eşyalar tarafından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



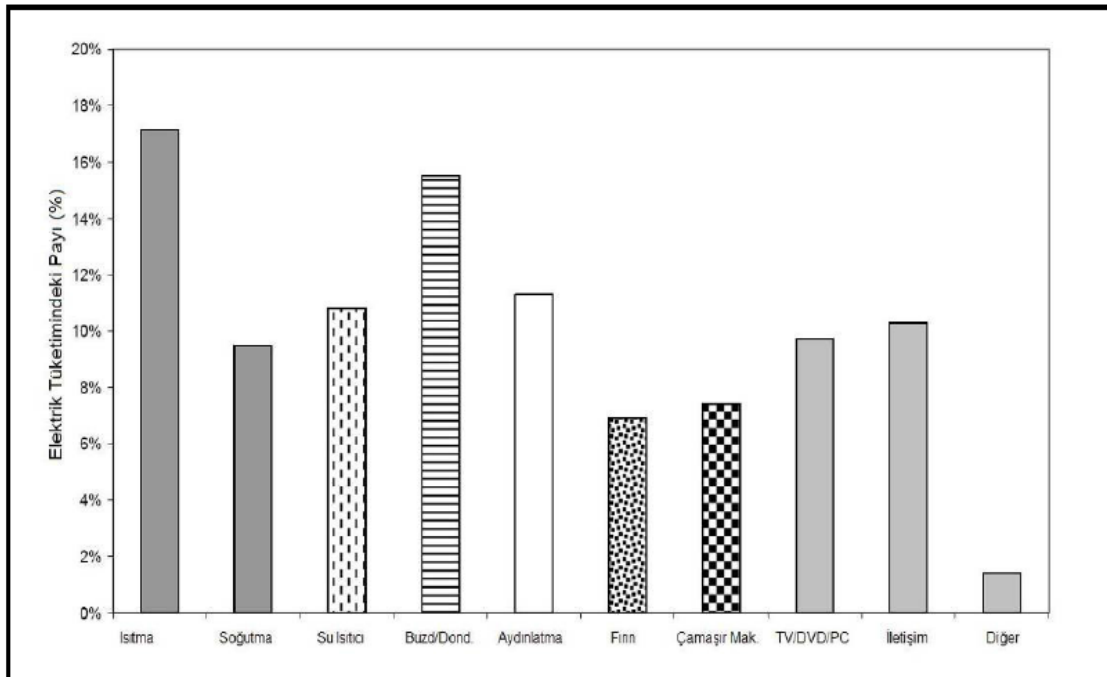


Şekil 1.2 Evlerde elektrik tüketimi (Beyaz Eşya Sanayicileri Derneği, 2011)

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)

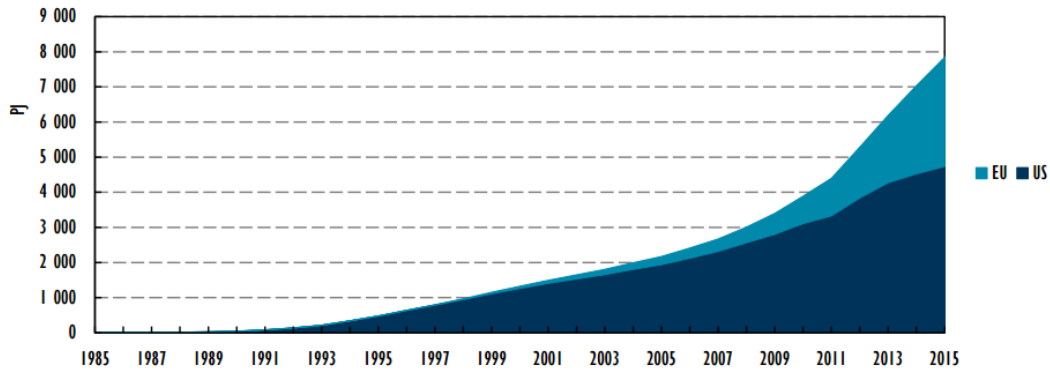
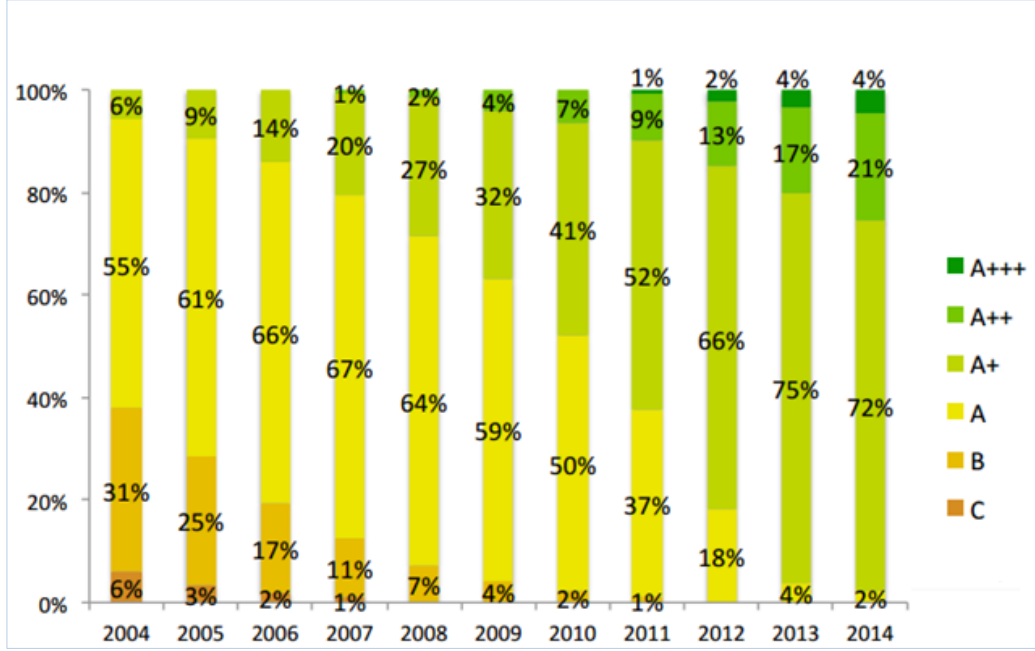
Dünya genelinde yapılan çalışmalar sonucunda elektrikli ev aletlerinin enerji tüketiminde ciddi iyileştirmeler elde edilmiştir. Bugünün en iyi buzdolabı 1990 yılına göre %75, çamaşır makinesi 1985’lerde çıkan modellere göre enerjide %44 ve suda %62 tasarruf sağlamaktadır. Aynı şekilde bulaşık makineleri 60 °C çevrimde 1980 yılında ortalama 2 kWh harcarken 2004’te tüketim 1 kWh’a ve su tüketimi ise üçte bire düşmüştür. AB tarafından yapılan bir başka çalışmada tespit edildiğine göre, bu gelişmelerin sonucunda, 2000 yılında 7 değişik ev aletinin tükettiği elektrik enerjisi miktarı 250 TWh olmuştur ve bu 1990 yılı değerinin 30

| 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 |

TWh altındadır.

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 yaratmaktır. Avrupa Ev Eşyaları Üreticileri Komitesinin (CECED) verileri incelendiğinde, buzdolapları 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**

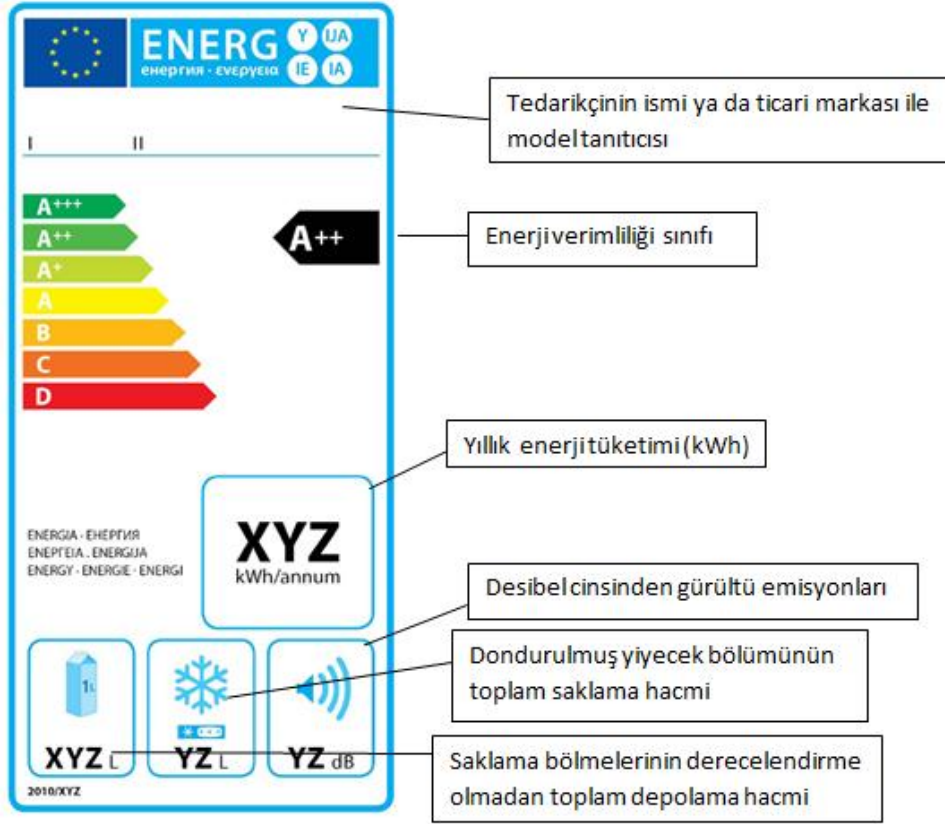
| Uygulama tarihi         | Enerji Verimlilik Endeksi (EEI) |
|-------------------------|---------------------------------|
| Yürürlüğe girdiği tarih | $EEI < 55$                      |
| 1 Temmuz 2012           | $EEI < 44$                      |
| 1 Temmuz 2014           | $EEI < 42$              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

**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           | $EEI < 110$                     |

Şekil 1.8'de gösterilen A+++’dan D’ ye maksimum 7 sınıf bulunmaktadır. A+ altı ürünlerin EU ve Türkiye pazarındaki satışı yeni gelen güncellemelerle yasaklanmıştır. Renklendirilmiş oklar enerji verimliliğini en düşük enerji sınıflı üründen itibaren sınıflandırır: Koyu yeşil en yüksek enerji verimliliği sınıfını, kırmızı ise en düşük enerji verimliliği sınıfını göstermektedir. Piktogramlar seçilmiş olan performans ve özellikleri belirtmektedir:

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



Şekil 1.8 Örnek buzdolabı enerji etiketi

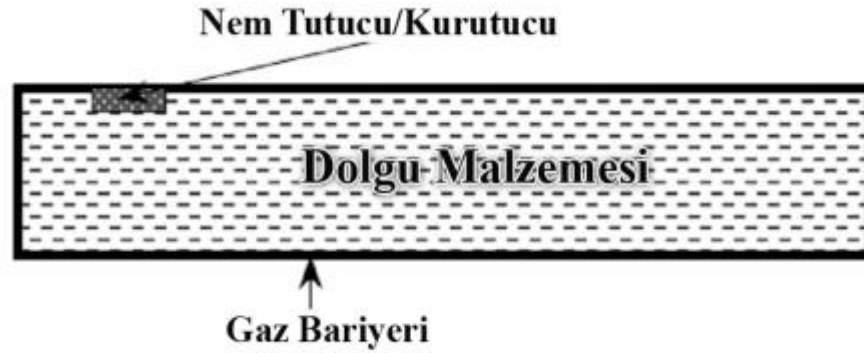
Enerji sınıflandırması, aşağıdaki kriterlere göre hesaplanan enerji verimliliği indeksine dayanmaktadır:

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

Buzdolaplarının enerji tüketimini etkileyen en önemli unsurlardan biri kabin yalıtımıdır. Bu noktada ısı yalıtım malzemeleri çeşitli özelliklerinden dolayı ön plana çıkmaktadır. Yalıtım malzemeleri, başta kullanım yerlerinin özellikleri olmak üzere birçok çeşitliliğe sahiptir. VIP'ler ise, klasik yalıtım malzemelerine göre on kata

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

Alışlagelmiş yalıtım malzemelerinde, genel olarak, yalıtımı sağlayan havadır. Dolayısıyla, yalıtım malzemesinin performansı, havanın ısı iletim katsayısı olan  $25 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$  değeri ile sınırlıdır. Vakum izolasyon panelleri, gözenekli yapıdaki bir iç dolgu malzemesinin, iç 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 oluşturulur.



Şekil 1.9 Bir Vakum İzolasyon Panelinin Şematik Gösterimi

Kullanılan iç dolgu malzemelerinin ısı iletim katsayıları, atmosfer basıncında klasik yalıtım malzemelerine eş değer veya daha yüksek olmakla beraber, vakumlu ortamlarda klasik yalıtım malzemelerine göre daha düşük olmaktadır. İdeal bir VIP'den; kritik basınç değerinin yüksek olması, ısı iletim katsayısının düşük olması, konvansiyonel poliüretan ile kullanılabilir olması, kolay elde edilebilir olması, çevre dostu olması ve geri dönüşümlü olması özellikleri beklenir.

Beyaz eşya pazarı son yıllarda büyük bir ivme ile büyümekte ve günün ihtiyaçlarına göre sürekli olarak kendini yenilemektedir. Bu yenilenme süreci

içerisindeki en büyük araştırma ve geliştirme konusu ise, daha az enerji harcayan beyaz eşyaların tasarlanmasıdır.

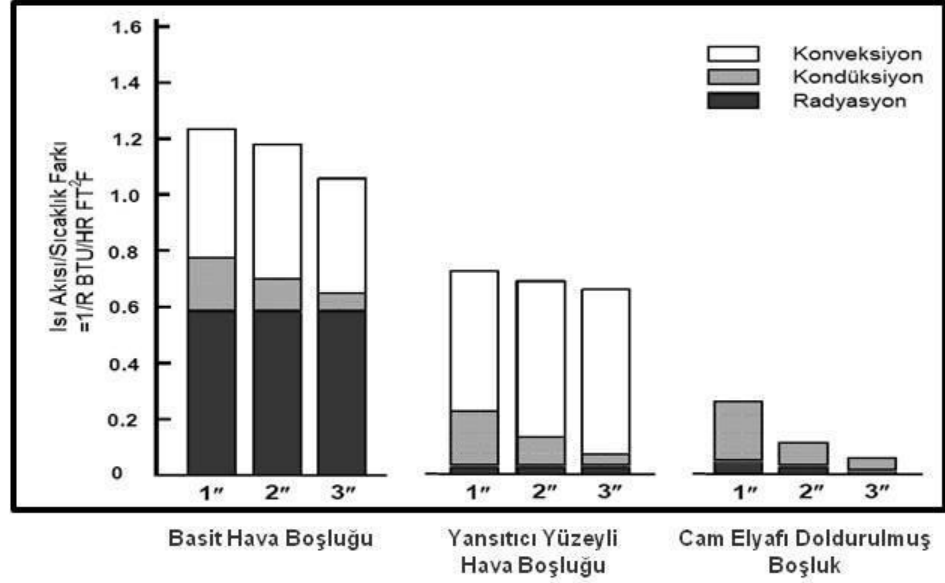
Bu çalışmanın amacı, düşük enerji sınıfı tasarımlarıyla üretilen ev tipi soğutucu ve dondurucularda yeni nesil yalıtım malzemeleri kullanarak üretilen prototiplerin standartlar açısından uzun dönemli performans, verimlilik ve yaşlanmasının tespit edilmesidir.

## **2 ISI YALITIMI VE ISI YALITIM MALZEMELERİ**

İnsanlık kendisini doğanın olumsuz etkilerinden korumak için avladıkları hayvan postlarına sarmakla ilk ısı yalıtımı önlemlerini almıştır. 1882 yılında Cari Von Linde'nin ilk soğutma makinesini yapmasıyla soğuk hava deposu imalatı başlamıştır. Bu kez, soğuk hava depolarında elde edilen soğutmanın uzun süre korunumu için ısı yalıtım malzemelerine ihtiyaç olduğu ve geleneksel inşaat malzemeleri ile bu görevin yerine getirilemeyeceği anlaşılmıştır. Bu malzemelere genel olarak, "Isı Yalıtım Malzemesi" denilmiş, ancak zamanla her yalıtım malzemesinin hem soğuk hava depoları için hem de buhar kazanlarında kullanılamayacağı ortaya çıkmıştır. 20. yüzyılın başlarında Almanya'da seri halde ısı yalıtım malzemeleri üretilmeye başlanmış ve araştırmacılar bu malzemeleri çeşitli yönlerden araştırmaya ve böylelikle bunlar hakkında bilgi toplamaya başlamışlardır.

Günümüzde yapılar ve endüstriyel uygulamalara yönelik yüksek performanslı ısı yalıtım malzemeleri ve sistemlerinin gelişimi için büyük çaba sarf edilmektedir. ABD, Kanada, Japonya, Almanya gibi gelişmiş ülkeler araştırmalarını enerjinin verimli kullanımı ve ısı yalıtımı konularında yoğunlaştırmışlardır. Bu konuda sağlanacak gelişmeler, hava boşlukları boyunca ısı transfer mekanizmasının iyi anlaşılmasına bağlıdır. Hava boşlukları boyunca olan ısı akışı da konveksiyon ve radyasyondan kaynaklanmaktadır.





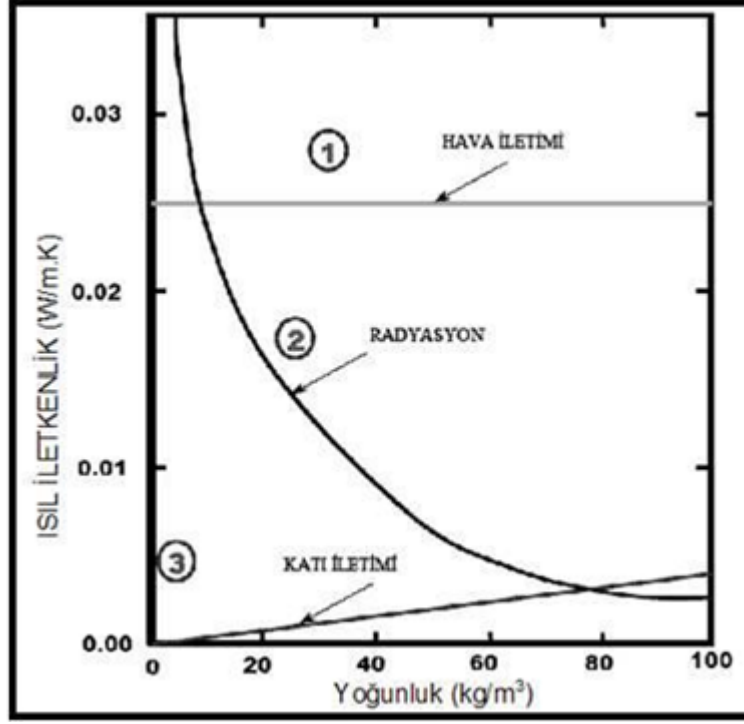
Şekil 2.1 Radyasyon, iletim ve taşınımın hava boşluğundaki ısı transferine etkisi (Shirtliffe, 1972)

Bununla birlikte, hava boşluğunda bir yansıtıcı yüzey, giriş ısı akışı (radyasyon) bileşenini minimum seviyeye azaltabilir. Ayrıca, bazı lifli maddelerin eklenmesi (cam elyafı vb.) boşluk içerisindeki hava akışını sınırlayarak, ısı akışını neredeyse tamamen ortadan kaldırabilir.

Herhangi bir geleneksel yalıtım malzemesinde ısı akışının; hava iletimi, radyasyon ve katı iletimi olarak üç temel bileşeni vardır (Şekil 2.2). Katı iletim ve radyasyon yalıtım malzemesinin yoğunluğuyla ilişkilidir. Isı iletimi (örneğin, hava iletimi) ısı iletkenliği havanınkinden düşük bir gazın havayla yer değiştirmesiyle azaltılabilir. Ayrıca, yalıtım malzemesinin içindeki hava basıncı azalırsa ısı yalıtımı artar. Hava basıncının azalmasıyla yalıtımın arttığı bilinen bir olgudur ve ısı yalıtım malzemelerinin gözenek büyüklüklerinin etkisinin bir fonksiyonudur. Gözenek boyutunun etkisinin azalmasıyla birlikte havanın ısı iletkenliği azalır.

Kullanılan iç dolgu malzemelerinin ısı iletim katsayıları, atmosfer basıncında klasik yalıtım malzemelerine eşdeğer veya daha yüksek olmakla beraber, vakumlu ortamlarda klasik yalıtım malzemelerine göre çok daha

düşüktür. Yapılan 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

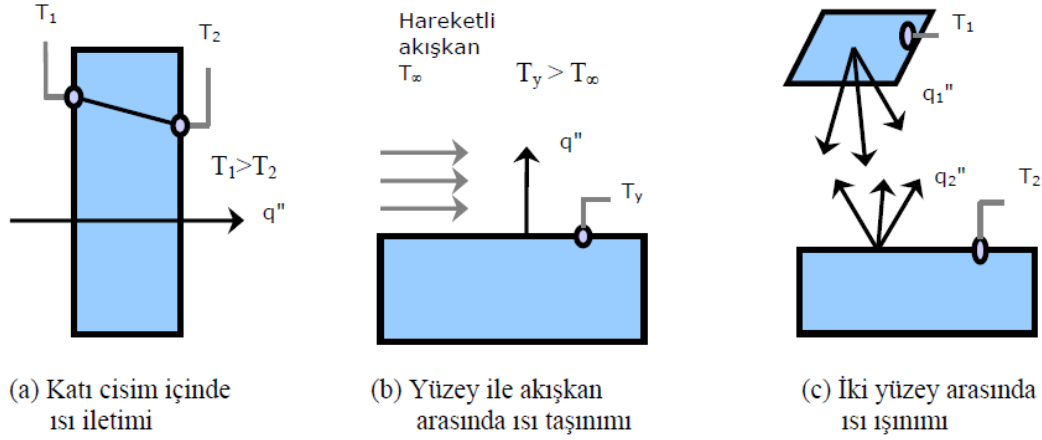
Isı geçişi, sıcaklıkları farklı iki veya daha fazla nesne arasında iletim, taşınım ya da ışıyım yoluyla (veya bu sistemlerin kombinasyonları yoluyla) gerçekleşen enerji geçişidir. Madde alış verişi olmaksızın sadece sıcaklık farkından meydana gelen bu enerji geçişi “Isı Geçişi” olarak tanımlanır. Termodinamiğin ikinci kanununa göre; ısı sıcak bir sistemden daha soğuk bir sisteme doğru kendiliğinden akar. Termodinamik, bu ısı geçişinin nasıl ve ne hızda olduğunu açıklamaz. Çünkü termodinamikte zaman bir değişken olarak ele alınmaz. Termodinamik denge durumundaki sistemler ile ilgilenir. Geçen ısı doğrudan doğruya ölçülemez, ama meydana getirdiği tesirler gözlenebilir ve ölçülebilir.

Isı geçişi bilim dalı, termodinamiğin birinci ve ikinci, kütlenin korunumu ve Newton'un ikinci hareket kanunlarına ilave üç özel kanun yardımı ile ısı geçişi olayının yapısını inceleyerek, ısı geçişini etkileyen büyüklükleri belirler ve bu büyüklükler arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak ifade eder. Çözüm yöntemi olarak da analitik, sayısal, deneysel ve benzeşim yöntemlerini kullanır.

Genel olarak katı cisimlerde, ısı enerjisinin serbest elektron hareketiyle bir molekülden ya da atomdan diğeriine geçmesi ile meydana gelen ısı geçişine “Isı İletimi” denir. Yani madde veya cismin bir tarafından diğeri tarafına ısının iletilmesi ile oluşan ısı geçişidir. Hareketsiz bir ortamda sıcaklık gradyeni mevcutsa ısı geçişi için “iletim” (kondüksiyon) terimi kullanılır. Ortam akışkan veya katı olabilir. Isı geçişi, daima yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğrudur. Yoğun maddeler genelde iyi iletkenlerdir; örneğin metaller çok iyi iletkenlerdir.

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

Sonlu sıcaklığa sahip tüm yüzeyler elektro manyetik dalgalar halinde enerji yayarlar. Farklı sıcaklıklardaki iki yüzey arasında ısı geçişi, yüzeyler arasında engelleyici bir ortam olmadığında gerçekleşir. Katıların, sıvıların ve gazların ısı enerjisini elektro manyetik dalgalar şeklinde yayınladıkları veya yuttukları bu ısı geçiş şekline “Isı Işınımı” denir. Yani ışınım yolu ile ısı geçişi, fotonlar (elektromanyetik radyasyon) yolu ile olan ısı geçişidir.



Şekil 2.3 İletim, taşınım ve ışıınım ile ısı geçiş şekilleri

Şekil 2.3’de gösterildiği gibi, yüzey sıcaklıkları farklı katı cisim içinde iletimle ısı geçişi, (b)’ de sıcaklıkları farklı yüzey ve akışkan arasında taşınım ile ısı geçişi ve (c)’ de iki yüzey arasında ışıınım ile ısı geçişi meydana gelmektedir. Herhangi bir ısı geçişi olayı; bu üç şeklin birisi ile herhangi ikisi ile ya da üçü ile birlikte meydana gelebilir.

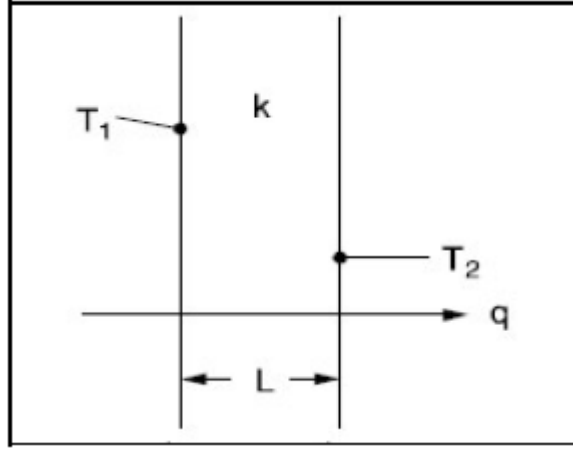
### 2.1.1 İletim Yoluyla Isı Transferi

Katı veya akışkan bir durgun ortam içinde, bir sıcaklık farkı olması durumunda, ortam içinde gerçekleşen ısı transferidir. İletim kelimesi, atomik ve moleküler faaliyeti çağrıştırmalıdır. Çünkü ısı geçişi atomik ve moleküler düzeydeki hareketlerle ilişkilidir. İletim bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklardan daha düşük enerjili parçacıklarına, bu parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin aktarılması olarak düşünülebilir. Daha yüksek enerjili moleküller daha yüksek sıcaklıktadırlar ve komşu moleküller sürekli olarak çarpışırken, daha çok enerjili moleküllerden daha az enerjili moleküllere bir enerji aktarımı gerçekleşir. Bir sıcaklık farkı olması durumunda, sıcaklığın azaldığı yönde iletim ile enerji aktarımı dolayısıyla ısı transferi gerçekleşir (Incropera, 2003).

Isı transferi işlemleri an denklemleri ile incelenir. Bu denklemler, birim zamanda aktarılan enerji miktarını hesaplamak için kullanılabilirler. Isı iletimi için an denklemi, Fourier Yasası olarak bilinir. Şekil 2.xde görülen düz duvar için an denklemi, denklem 2.1 ile ifade edilir.

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

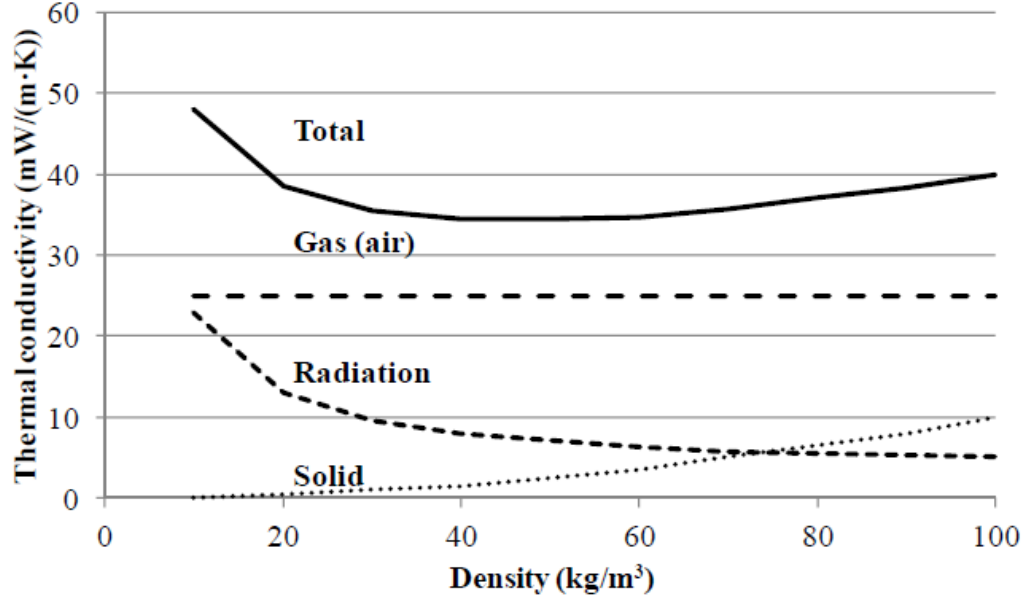
Burada  $k$  malzemenin ısı iletim katsayısı,  $dT$  ise malzemenin iki duvarı arasındaki sıcaklık farkını verirken,  $dx$  terimi de duvarın iki yüzeyi arasındaki  $x$  yönündeki mesafeyi belirtir.  $q'$  ifadesi,  $x$  yönündeki ısı akısını belirtir ve birimi  $W/m^2$  dir.



Şekil 2.4 İletim yoluyla bir boyutlu ısı transferi gerçekleşen duvar

Farklı katı maddelerin ısı iletimleri arasında farklılıklar vardır. Bu durum katı madde ve ona ait fiziksel özellikleri ısı iletimi mekanizmasına önemli kılar. Katılardaki ısı iletimizi 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 değişmemekle beraber belirli bir kesitte ki malzeme miktarı azalır ve bu nedenle metrekareye düşen gözenekli malzemeye ait ısı iletimi azalır. Bunun tam aksine azalan yoğunluklar ışıyım yoluyla

gerçekleşen ısı akışını artırır. Şekil 2.5 ayrıca yoğunluk ve ısı transfer mekanizmaları arasındaki güçlü korelasyonu açıklamaktadır.



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

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

| Gas                             | Thermal conductivity, $\lambda$<br>[mW/(m·K)] | Molar weight<br>[g] |
|---------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------|
| Air                             | 25.5                                          | 29                  |
| Nitrogen, N <sub>2</sub>        | 24.1 (0°C)                                    | 28                  |
| Argon, Ar                       | 16.2 (0°C)                                    | 40                  |
| Carbon dioxide, CO <sub>2</sub> | 16.2 (25°C)                                   | 44                  |
| R-11, CFCl <sub>3</sub>         | 8.3 (30°C)                                    | 137                 |

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

Gazlar üzerinden olan ısı iletimi malzemenin gözenekli yapısı küçültülerek azaltılabilir. Gaz molekülü ve katı maddenin temas halinde olduğu elastik bölgelerde gaz moleküllerinin birbiriyle temas halinde olduğu bölgelere nazaran daha düşük bir enerji transferi vardır. Küçük gözenekli yapılar gas molekülleri arasındaki teması azaltarak ısı iletimini düşürür. Bu durum Knudsen etkisi olarak tanımlanıp Knudsen sayısı  $Kn$  ile 2.2 ve 2.3’de gösterilen denklemlere göre hesaplanabilir (Baetens et al, 2011).

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

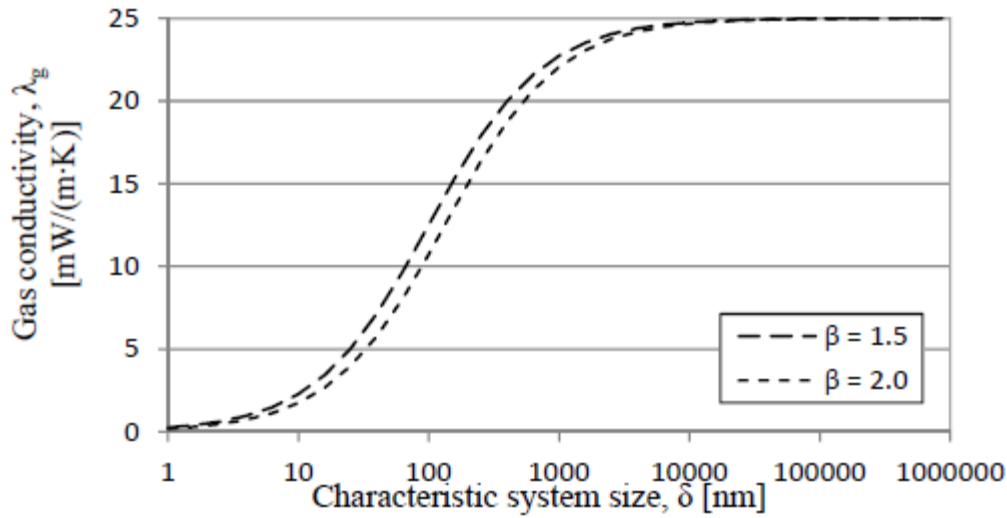
$$K_n = \frac{l_{mean}}{\delta} \quad (-) \quad (2.3)$$

$\delta$  [m] karakteristik sistem ölçüsü olmak üzere,  $l_{mean}$  [m] iki paralel duvar arasındaki mesafeyi,  $g_0$  [W/(m·K)] ise gazın serbest dolaşımı sırasındaki iletimi ve  $\beta$  [-] gaz molekülü ve katı yüzey arasında 1,5 – 2 arasında değişen sabit bir katsayıyı ifade eder (Baetens et al, 2011).

Gazdaki ısı iletimi esas olarak gözenek boyutu ve ortalama serbest yola bağlı olarak değişim gösterir. Ortalama serbest yol  $l_{mean}$ , bir molekülün diğer bir moleküle temas edene kadar geçirdiği uzunluğu gösterir. Bu uzaklık Denklem 2.4’e göre hesaplanır.

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

Burada  $T$  [K] sıcaklık olmak üzere,  $P_g$  [Pa] basınç,  $\sigma$  [m] moleküler kesit alanı ve  $k_B$  [ $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K] Boltzmann sabitidir. Havanın iki temel yapı taşı Nitrojen ve Oksijen için moleküler kesit alanı yaklaşık olarak  $0.4 \text{ nm}^2$  (Engel and Reid, 2006) ve ortalama serbest yol yaklaşık olarak  $70 \text{ nm}$ 'dir ( $20^\circ\text{C}$  and  $100 \text{ kPa}$ ). Karakteristik sistem boyutunun gaz iletimi üzerindeki etkisi Şekil 2.7'de gösterilmiştir.



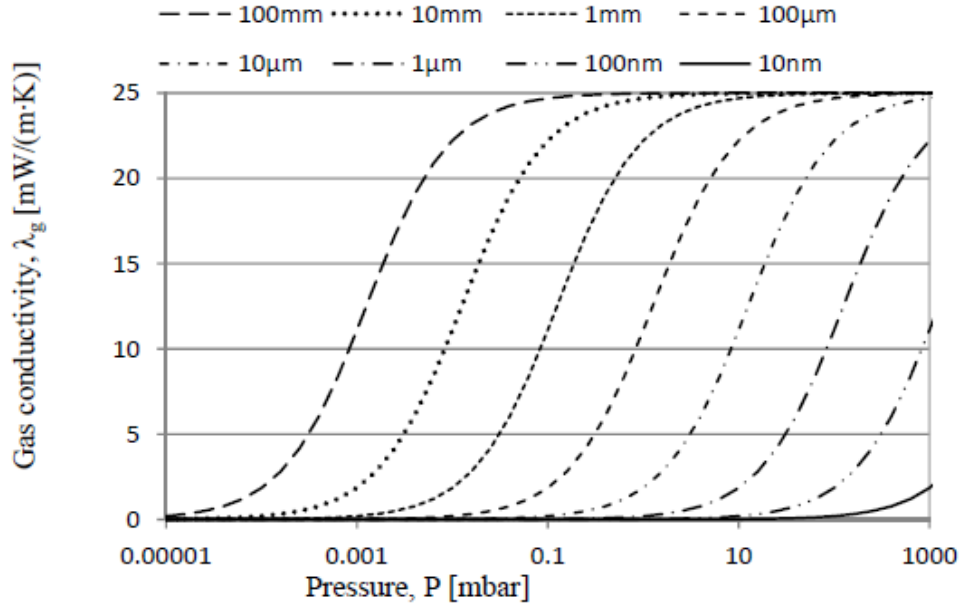
Şekil 2.7 Hava için karakteristik sistem boyutlarının fonksiyonu olarak hesaplanmış gaz iletimi

Karakteristik sistem boyutunu tespit etmek zordur ancak gözenek boyutuyla her zaman korelasyon halindedir. Bununla beraber gözenek boyutları arttıkça ısı iletimi gazın standard iletim değerine yakınsar. Knudsen etkisi gözenek boyutları  $10000 \text{ nm}$  veya  $0.01 \text{ mm}$ 'den büyük yapılar için ihmal edilebilir.

Düşük basınçlarda ısı iletimi üzerindeki etkisi gözenek boyutuyla önemli derecede ilişkilidir. Denklem 2.4'te, basıncın ortalama serbest yolun hesabında önemli bir payda olduğu görünmektedir. Düşük basınçlar daha uzun ortalama serbest yol verirler bu da Knudsen etkisini arttırmaktadır. Denklem 2.2 ve



denklem 2.3’de görüldüğü üzere ortalama serbest zamanın artırılması Knudsen etkisini arttıracak 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

Isı transfer mekanizmalarından bir diğeri de ısıнын taşınım yoluyla geçiştir. Taşınım ile ısı geçişi, bir akışkan içinde, iletimin ve kitle hareketinin birleşik etkileri ile oluşan enerji aktarımı olarak tanımlanır. Taşınım ile ısı transferi iki mekanizmadan oluşmaktadır. Rasgele moleküler hareket sonucunda enerji aktarımının yanı sıra, akışkanın kitle veya mikroskobik hareketi ile de enerji aktarımı olur. Bu akışkan hareketi herhangi bir anda, çok sayıda molekülün topluca veya kümelenmiş olarak hareket edilmesiyle ilgilidir. Bir sıcaklık gradyanı olması durumunda bu hareket ısı geçişine katkıda bulunur (Incropera, 2003).

Gözenekli malzemelerdeki taşınım, gözenek içerisindeki taşınım ve makro düzeyde malzeme üzerinden olmak üzere ikiye ayrılır. EPS gibi kapalı gözenek sistemleri için makro düzeyde taşınım oluşmaz ve küçük gözeneklerde gözenek

hücre taşınımı hücre duvarlarındaki düşük sıcaklık farklarından ötürü ihmal edilebilir. Bu taşınım yoluyla ısı transferinin kapalı gözenek sistemlerinde genellikle ihmal edilebileceği anlamını taşır. Açık hücreli malzemelerde makro düzeydeki taşınım dikkate alınır düzeydedir ve ihmal edilemez.

Makro düzeyde taşınım doğal veya zorlandırılmış halde olabilir. Doğal taşınımda hava hareketi sıcaklık farkının sonucunda oluşan yoğunluk farkından meydana gelirken zorlandırılmış taşınımda basınç farkı fan veya rüzgâr gibi bir dış etkenden kaynaklanır.

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

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

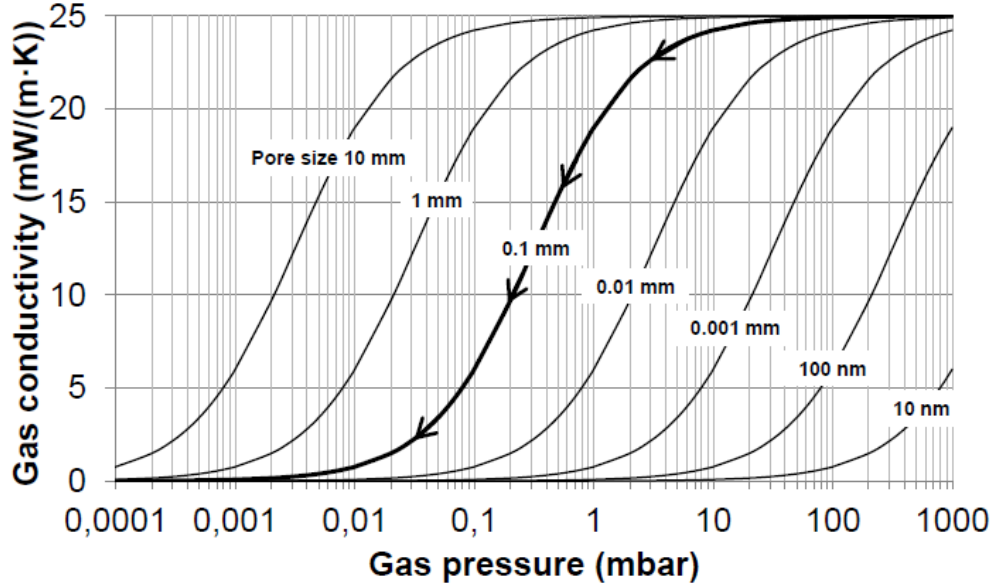
$$Nu = \frac{q_{with\ convection}}{q_{without\ convection}} \quad (-)$$

Burada  $\rho_a$  [kg/m<sup>3</sup>] havanın yoğunluğu,  $C_{pa}$  [J/(kg·K)] havanın spesifik özgül ısısı,  $g$  [m/s<sup>2</sup>] yerçekimi ivmesi,  $\beta_a$  [1/K] havanın termal genişleme katsayısı,  $d$  [m] gözenekli malzeme kalınlığı,  $k$  ısıl geçirgenlik,  $T^+$  ve  $T^-$  soğuk ve sıcak yüzeylere ait sıcaklıklar,  $v$  [m<sup>2</sup>/s] kinematik viskozite,  $\lambda_m$  [W/(m·K)] gözenekli malzemenin ısı iletim katsayısı ve  $q$  [W/m<sup>2</sup>] 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 rüzgâr nedeniyle oluşabilir.

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

Denklemden  $A$  [m<sup>2</sup>] alan,  $k$  ısıl geçirgenlik,  $\mu$  [kg/(m·s)] dinamik viskozite ve  $d$  [m] yalıtım kalınlığıdır. Isıl geçirgenlik hem doğal taşınım hem

zorlandırılmış taşınımında etkili olan malzeme özelliği iken, ısı iletimi sadece doğal taşınımında etkili olur.



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

Gaz basıncı ve gözenek boyutuna bağlı olarak değişen gaz taşınımı Şekil 2.9'da sunulmuştur. Örneğin gözenek boyutu 0,1 mm olarak bir malzeme için, 3 alan Şekil 2.8'de belirgindir. Gaz basıncı 20 mbar civarına düşene kadar gaz taşınımı sabit haldedir. Gaz basıncı düştükçe gaz molekülünün ortalama serbest yolu artacak ve gaz moleküllerinin çarpışma sayılarını düşürecektir. Bu bölgede gaz taşınımı belirgin bir şekilde basınçtan etkilenir. Çok düşük basınç seviyelerinde gaz taşınımı ihmal edilebilir düzeydedir ve tüm ısı transferi katı ve radyasyon halinde oluşur (Brodt, 1995).

### 2.1.3 Isı Işınımı

Isı transfer mekanizmalarından sonuncusu ışıınım yoluyla ısı transferidir. Isıl ışıınım, sonlu sıcaklığa sahip bir cismin yaydığı enerjidir. Işıınım yayma,

cismin yapısından bağımsız olarak, cismi oluşturan atomların ve moleküllerin elektron düzenlerindeki değişmelerle yorumlanabilir. Işınım alanının enerjisi, elektromanyetik dalgalar veya fotonlarla iletilir.

Isı ışıınımı on dokuzuncu yüzyılda fizikçileri en çok meşgul eden konuların başında geliyordu. Isı ışıınının diğer ısı transfer mekanizmalarından en önemli farkı Güneş ve Dünya arasında olduğu gibi ışıınım için herhangi bir madde ortamına gereksinim olmamasıdır.

Josef Stefan, John Tyndall'ın deneysel verilerinden faydalanarak 1879 yılında ısı ışıma şiddetinin sıcaklığın dördüncü kuvvetine bağlı olduğunu gözledi. Daha sonra Boltzmann, termodinamik yasalarını kullanarak bu bulguyu teorik olarak da ispatlayarak daha da sağlamlaştırdı. Stefan-Boltzmann yasasının ifadesi:

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

Burada  $I$  ışıının şiddetini ya da birim alan başına gücü,  $e$  cisim yüzeyinin ışıınım yayabilirlik katsayısını,  $\sigma$  ise Stefan-Boltzmann sabitini temsil etmektedir.  $e$  Sayısı 0 ile 1 arasında boyutsuz bir sayıdır. Stefan-Boltzman sabitinin değeri S.I.'de:

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

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

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

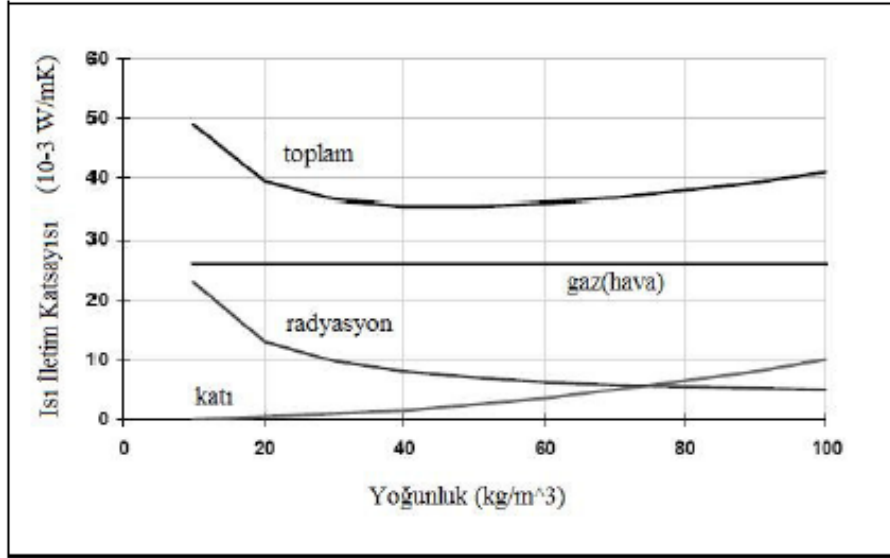
Siyah bir cisim veya yüzey, ideal bir ışıınım yayıcısı ve yutucusu olarak tanımlanır. Belirli bir sıcaklık ve dalga boyunda, hiçbir yüzey siyah cisimden daha fazla enerji yayamaz. Bir siyah cisim, dalga boyu ve doğrultudan bağımsız olarak, üzerine gelen tüm ışıınımı yutar. Siyah cismin, birim zamanda birim yüzey alanından yaydığı ışıınım enerjisi, siyah cisim yayma gücü veya  $E_b$  (veya  $E_s$ ) olarak adlandırılır.

## 2.2 Isı Yalıtım Malzemeleri

Isı yalıtım malzemeleri, ısı transferi mekanizmalarını mümkün olabilecek en üst mertebede engelleyecek şekilde geliştirilmelidir. Lifli, toz ve parçacık tip yalıtımlarda, katı malzeme hava içerisinde homojen olarak dağıtılmıştır. Katı malzeme ile içindeki hava katı bir matris oluşturur. Havanın bu şekilde hücrelerde hapsedilmesi, hücresel yalıtım olarak bilinir. Bu sistemlerin efektif ısı iletim katsayısı; boşluk veya havanın hacimsel oranı ve geometrisi ile havanın ısı iletkenliğine ve katı malzemenin yüzey ışıyım özellikleri ile ısı iletim katsayısına bağlıdır (Incropera, 2003).

Farklı sıcaklıktaki iki ortam arasındaki ısı transferi azaltmak için kullanılan özel malzemelere ısı yalıtım malzemesi denir. Isı yalıtım malzemelerinin en temel özelliği ısı iletim katsayılarının diğer malzemelere göre çok düşük değerlere sahip olmasıdır. ISO ve CEN standardına göre ısı iletim katsayısı  $0,065 \text{ W/mK}$  değerinden küçük olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi olarak tanımlanır. Isı iletim katsayısı  $0,011 \text{ W/mK}$ 'den küçük olan malzemelere de süper yalıtım malzemeleri adı verilir (ASTM C 1484-7). Isı yalıtımında kullanılan malzemeler genel olarak bazı fiziksel özelliklerine ve içyapılarına göre gruplandırılır.

Günümüz teknolojisi ile üretilen fiber ve köpük bazlı ısı yalıtım malzemelerindeki ısı transferi mekanizması incelendiğinde, ısı geçişinin katı malzeme içerisinde iletim yoluyla, boşluklardaki hava içerisinde iletim veya taşınım yoluyla, katı matris yüzeyleri arasındaki ışıyım yoluyla gerçekleştiği ve toplam ısı transferinin daha çok gaz ortamda meydana gelen ısı geçişinden etkilendiği Şekil 2.10'da görülmektedir. Bu durumda en büyük sorunsal, açık veya kapalı hücre yapıya sahip olan bu ısı yalıtım malzemelerinde hücreler arasında bulunan ve durağan olarak kabul edilen havanın ısı iletkenliğidir.



Şekil 2.10 Katı, gaz ve radyasyonun toplam ısı iletimine etkisi

## 2.2.1 Yapılarına Göre Isı Yalıtım Malzemeleri

İçyapılarına göre ısı yalıtım malzemeleri 5 ana grupta toplanabilir.

### 2.2.1.1 Taneli Yapılı Yalıtım Malzemeleri

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

### 2.2.1.2 Hücreli Yapılı Yalıtım Malzemeleri

Bu yapılı ısı yalıtım malzemelerinde içyapıda büyük boşluklar vardır. Tanecikli yapıdan farklı olarak noktasal temaslardan çok yüzeysel 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 Lifli 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 (Altınışik, 2006).

### 2.2.1.4 Reflektif Yapılı Yalıtım Malzemeleri

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

## 2.3 Geleneksel Isı Yalıtım Malzemeleri

Son yıllardaki teknolojik gelişmelerle birlikte ısı yalıtım malzemeleri çeşitlilik kazanmıştır. Isı yalıtım ürünlerinde esas amaç, ısı iletim direncini artırmaktır. Bu ürünlerin yalıtım özelliğini ısı iletim katsayıları belirler. Isı iletim katsayısı ne kadar düşükse bir ürünün yalıtım özelliği o kadar yüksektir. Yüksek ısı direnci sahip olan ısı yalıtım malzemeleri, ısı kaybı ve kazançlarının azaltılmasında kullanılırlar.

Isı iletim katsayıları  $0.06 - 0.10 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ '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; cam yünü, taş yünü (mineral yünler), ahşap yünü, seramik yünü, cüruf yünü; kapalı gözenekli malzemelere ise EPS genleştirilmiş polistiren, XPS ekstrüde polistiren, elastomerik kauçuk, polietilen köpüğü, cam köpüğü örnek verilebilir.

Yalıtım malzemelerinin; ses sönümleme değerleri, yangın karşısındaki

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 İletim Katsayısı**

Yalıtım malzemelerinin birbirine paralel iki yüzeyinin sıcaklıklarının arasında  $1^{\circ}\text{K}$  olduğundaki birim alandan ve bu alana dik yöndeki birim kalınlıktan geçen ısı miktarıdır. Bu özellik malzemenin ısı yalıtım özelliğini belirler. Isı iletim katsayısı yükseldikçe malzemenin ısı yalıtım özelliği azalır. Birimi  $\text{W/mK}$ 'dir.

### **2.4.2 Yoğunluk**

Yalıtım malzemelerinin birim hacminin kütlesine yoğunluk adı verilir. Isı yalıtım malzemelerinde yoğunluk ısı iletim katsayısını pek etkilememekle birlikte malzemenin kararlılığı ve mekanik dayanımı yoğunlukla direkt ilgilidir. Birimi  $\text{kg/m}^3$  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 bazı malzemelerin çekme gerilmeleri de basma gerilmeleri ile birlikte mekanik dayanım özelliği olarak verilebilir. Birimi  $\text{kPa}$  ( $\text{ton/m}^2$ ) dir.



### 2.4.5 Buhar Difüzyon Direnci

Bir malzemenin bünyesinden buhar geçişine gösterdiği direnç, o malzemenin buhar difüzyon direnci olarak adlandırılır. Buhar difüzyon direnci yükseldikçe malzemenin içinden geçebilecek buhar miktarı azalır. Isı yalıtım malzemelerinde, detaya göre değişmekle birlikte, genellikle buhar difüzyon direnci yüksek olması idealdir. Birimsiz bir büyüklüktür.

### 2.4.6 Su Emme Oranı

Yalıtım malzemelerinin en temel özelliği ısı iletim katsayılarının düşük olmasıdır. Malzemelerin bünyesinde bulunan durgun hava veya gaz içeren kılcal aralıklar veya gözenekler sayesinde bu değer diğer malzemelere oranla daha düşük kalır. Isı yalıtım malzemeleri su ile temas ettiklerinde bünyelerine bir miktar su emebilirler. Bunun sonucunda malzemelerin ısı iletim katsayıları düşer, yani ısı yalıtım özellikleri bozulur. Isı yalıtım malzemelerinde su emme oranlarının sıfır veya sıfıra yakın olması idealdir. % cinsinden ifade edilir.

## 2.5 Yaygın Olarak Kullanılan Geleneksel Isı Yalıtım Malzemeleri

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

- Cam Yünü
- Taş Yünü
- Ekspande Polistren (EPS)
- Ekstrude Polistren
- Poliüretan
- Fenol Köpüğü
- Cam Köpüğü
- Genleştirilmiş Perlit (EPB)
- Genleştirilmiş Mantar (ICB)
- Polietilen Köpük

- Mantar Levhalar
- Seramik Yünü
- Melanin Köpük
- Poliizosiyonat Köpük
- PVC Köpük
- Elastomerik Kauçuk Köpüğü

### 2.5.1 Camyünü

Ergimiş camın lif haline getirilmiş halidir. Silis kumunun yüksek sıcaklıklarda ergitilerek elyaf hale getirilmesi ile elde edilir. Şilte ve levha halinde kullanılabilir.

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

Kullanım sıcaklığı: maks. 230 °C

Yoğunluk: 10-100 kg/m<sup>3</sup>

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 1

Su emme: Hacimce % 3-10

Su buharı geçişi: 542 µgm/Nh

Mekanik dayanım: 1,5-6,5 ton/m<sup>2</sup> basma dayanımı

### 2.5.2 Taşyünü

Bazalt, diabez, kireçtaşı, dolomit gibi 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/m<sup>3</sup>

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 1

Su emme: Hacimce % 2,5-10

Su buharı geçişi: 542 µgm/Nh

Mekanik dayanım: 1,5-6,5 ton/m<sup>2</sup> basma dayanımı

### 2.5.3 Ekspande Polistren Köpük (EPS)

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

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

Kullanım sıcaklığı: -100 °C / + 80 °C

Yoğunluk: 15-30 kg/m<sup>3</sup>

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 20-80

Su emme: Hacimce % 0-5

Su buharı geçişi: 25 µgm/Nh

Mekanik dayanım: 5-15 ton/m<sup>2</sup> basma dayanımı

### 2.5.4 Ekstrude Polistren Köpük (XPS)

XPS levha, polistren hammaddesinin ekstrüzyonla levha halinde çekilmesiyle üretilen bir ısı yalıtım malzemesidir. Üretim tekniği dolayısıyla kapalı gözenekli 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/m<sup>3</sup>

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 80-250

Su emme: Hacimce % 0 – 0,5

Su buharı geçişi: 0,15-0,075 µgm/Nh

Mekanik dayanım: 10-50 ton/m<sup>2</sup> basma dayanımı

### 2.5.5 Poliüretan

Birden fazla komponentin (Poliol, İzosiyonat, MDI vb.) yüksek basınçlarda reaksiyona girerek oluşturduğu bir malzemedir.

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

Kullanım sıcaklığı:  $-180^{\circ}\text{C} / + 110^{\circ}\text{C}$

Yoğunluk:  $30\text{-}40\text{ kg/m}^3$

Buhar difüzyon direnç katsayısı:  $\approx 30\text{-}100$

Su emme: Hacimce % 3-5

Su buharı geçişi:  $20\text{ }\mu\text{gm/Nh}$

Mekanik dayanım:  $10\text{-}40\text{ ton/m}^2$  basma dayanımı

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

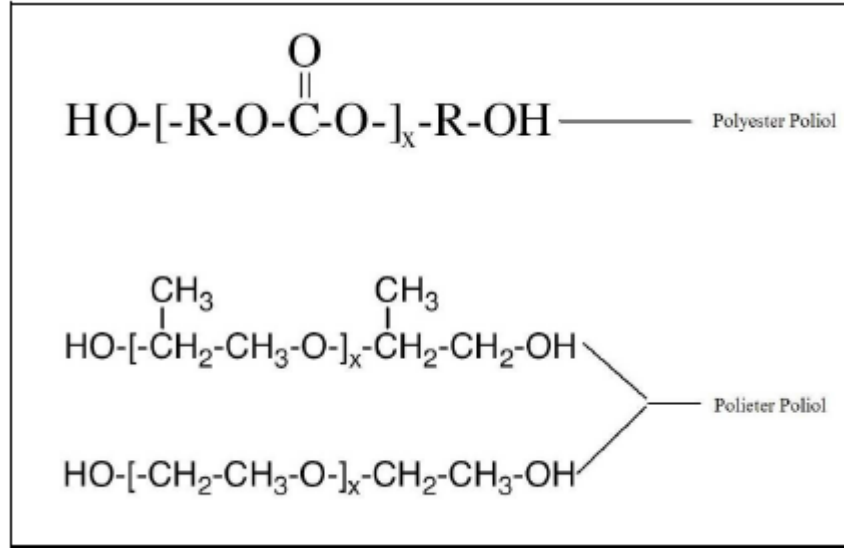
Poliüretan köpükler ya da poliüretan esaslı ürünler iki ana malzeme ile bunları kimyasal reaksiyona sokan katalistler ve kabarmalarını sağlayan ajanlardan oluşur. Yapısında iki ana malzeme bulunur.

- Poliöl
- İzosiyanat

Poliöl sistem, polieter veya polyester bazlı poliollerle, bunların içerisinde uygun oranlarda konulan katalist, silikon, renklendirici, kabartıcı ajan ve diğer kimyasalların oluşturduğu bir karışımdır. Bu karışımlar bünyelerinde serbest hidroksil (OH) taşırlar. Polioller, serbest OH sayısı ya da molekül ağırlıklarına göre tanımlanırlar. 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.

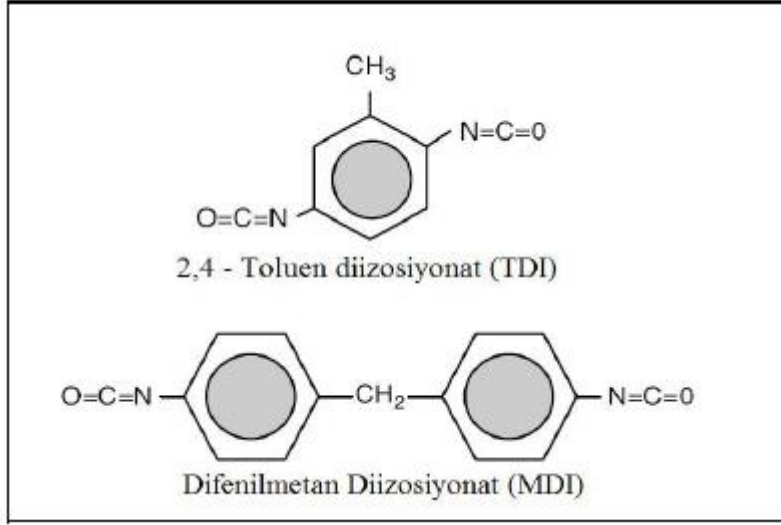


Şekil 2.11 Poliollerin kimyasal yapısı (Thamson, 2005)

İzosiyanat, poliöl sistemle karıştırıldığında onunla ekzotermik reaksiyona giren ve bünyesinde serbest NCO (izosiyanat grubu) taşıyan kimyasallardır. İzosiyanatlar, NCO yüzde içeriğine ve fonksiyonuna ya da bir moleküldeki NCO sayısına bakılarak adlandırılır. NCO sayıları izosiyanatların ayırt edici bir özelliğidir. En çok bilinen iki aromatik izosiyanat;

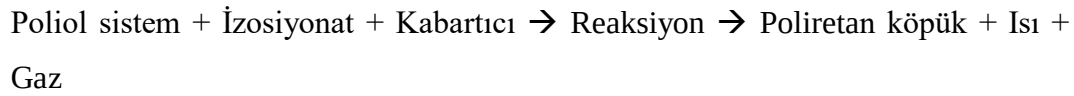
- MDI: difenilmetandiizosiyanat ( $\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{O}_2\text{N}_2$ ),
- TDI: toluendiizosiyanat ( $\text{C}_9\text{H}_6\text{O}_2\text{N}_2$ )

olarak adlandırılır (Thamson, 2005). Şekil 2.11’de bu iki izosiyanatın kimyasal yapısı görülmektedir.



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

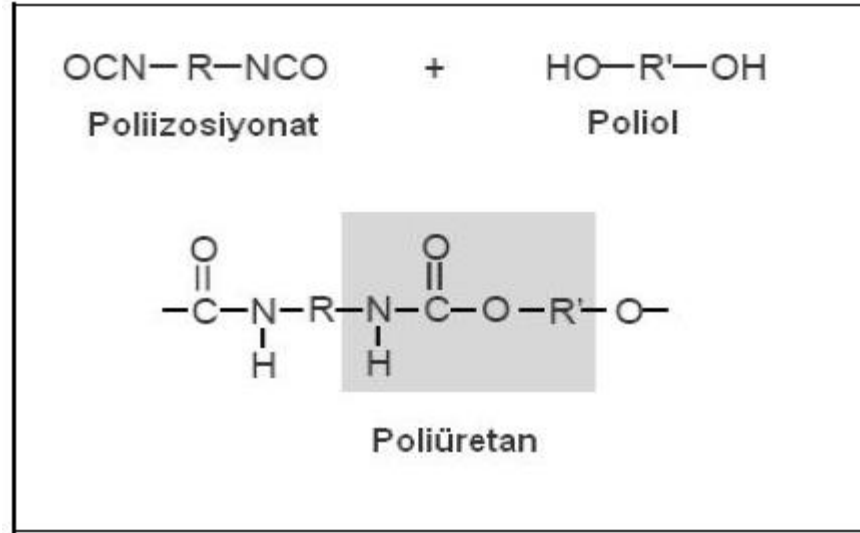
Poliüretan köpükler, poliöl sistem ile ona uygun izosiyonatın belli oranda karışımı ve bu karışımın bir kabartıcı ile genişmesi suretiyle oluşur. Poliöl ve izosiyonat özel donanımlı makinelerde yüksek basınç altında püskürtme yöntemiyle yüzyüze uygulanır. Polimerizasyon ve gaz reaksiyonlarının hızlarını hassas olarak kontrol edebilmek için özel hızlandırıcılar 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 köpüğün yoğunluğu düşer. Poliüretan oluşumu sırasında reaksiyon;



şeklinde gerçekleşir. Tepkime tek yönlü bir tepkimedir. Şekil 2.13’de kimyasal tepkime sonucu oluşan yeni bağlar ve poliüretan oluşumu gösterilmektedir.

Tepkime satırı incelendiğinde tepkimede kabartıcı ajanların kullanıldığı görülmektedir. Karışımda mevcut karbondioksit (CO<sub>2</sub>) gazı, polimerize olmaya

başlayan karışımın köpürmesini sağlar. CO<sub>2</sub> tek başına köpük yoğunluğunun istenilen düzeye düşürmekte yeterli olmadığından, karışımda yardımcı kabartıcı ajanlar kullanılır.

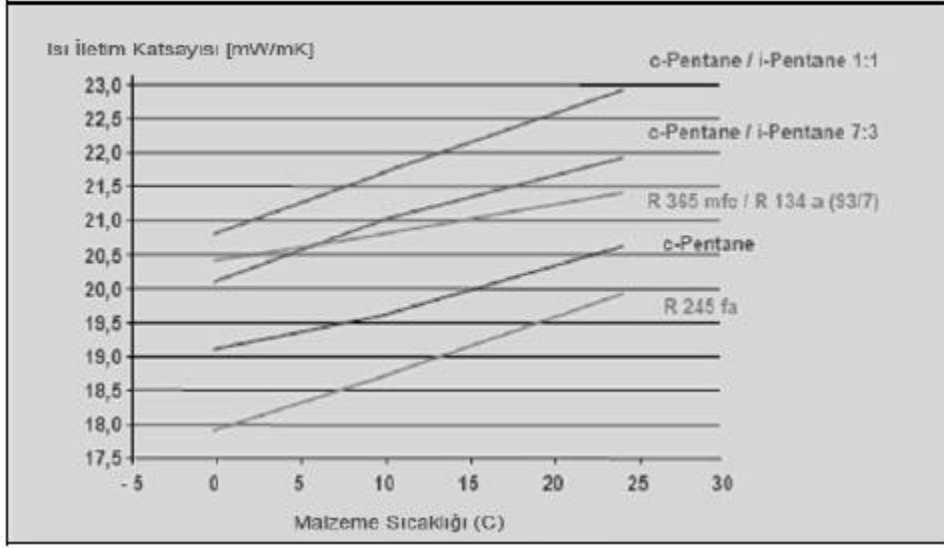


Şekil 2.13 Poliüretan oluşum tepkimesi (Thamson, 2005)

Kabartıcı ajanlar kapalı hücre yapısına sahip olan poliüretanın hücre boşluklarında hapsolur. Bu ajanların diğer bir önemli görevi ise poliüretanın ısı iletim katsayısını düşürmektir. Bu nedenle genel olarak ısı iletim katsayısı havadan daha küçük olan gazla kabartıcı ajan olarak kullanılır (Thamson, 2005).

- C-pentan
- I-pentan
- R600a
- HCFC 141b
- CO<sub>2</sub>

Günümüzde en fazla kullanılan kabartıcı ajanlardır(Özçam, 2007). Şekil 3.10 da kullanılan kabartıcı ajan ve sıcaklık parametrelerine bağlı olarak poliüretanın ısı iletim katsayısının değişimi görülmektedir.



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

## 2.5.6 Fenol Köpüğü

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

Kullanım sıcaklığı: -180 °C / + 120 °C

Yoğunluk: 30-35 kg/m<sup>3</sup>

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 10-50

Mekanik dayanım: 10-15 ton/m<sup>2</sup> basma dayanımı

## 2.5.7 Cam Köpüğü

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

Isı iletim katsayısı: 0,046 W/mK (10 °C'de)

Kullanım sıcaklığı: -260 °C / + 430 °C

Yoğunluk: 135 kg/m<sup>3</sup>

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 10000

Su emme: Su emmez

Su buharı geçişi: 0 µgm/Nh



Mekanik dayanım: 43-88 ton/m<sup>2</sup> basma dayanımı

### **2.5.8 Genleştirilmiş Perlit (EPB)**

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

Kullanım sıcaklığı: 250 °C / 1000 °C

Su buharı geçişi: 180 µgm/Nh

### **2.5.9 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 geçişi: 20-40 µgm/Nh

### **2.5.10 Polietilen Köpük**

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

Kullanım sıcaklığı: 0 °C / 100 °C

Yoğunluk: 30-40 kg/m<sup>3</sup>

### **2.5.11 Mantar Levhalar**

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

Kullanım sıcaklığı: -180 °C / +100 °C

Yoğunluk: 80-500 kg/m<sup>3</sup>

Buhar difüzyon direnç katsayısı: 10-35

### **2.5.12 Seramik Yünü**

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

Kullanım sıcaklığı: 0 °C / 800 °C

Yoğunluk: 100 kg/m<sup>3</sup>

Su buharı geçişi: 542 µgm/Nh

### 2.5.13 Melanin Köpüğü

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

Kullanım sıcaklığı: -60 °C / 150 °C

Su buharı geçişi: 350 µgm/Nh

### 2.5.14 Polizosiyonat Köpük

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

Kullanım sıcaklığı: -180 °C / 140 °C

Su buharı geçişi: 30 µgm/Nh

### 2.5.15 PVC Köpük

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

Kullanım sıcaklığı: -100 °C / 95 °C

Su buharı geçişi: 15 µgm/Nh

### 2.5.16 Elastomerik Kauçuk Köpüğü

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

Yoğunluk: 60 kg/m<sup>3</sup>

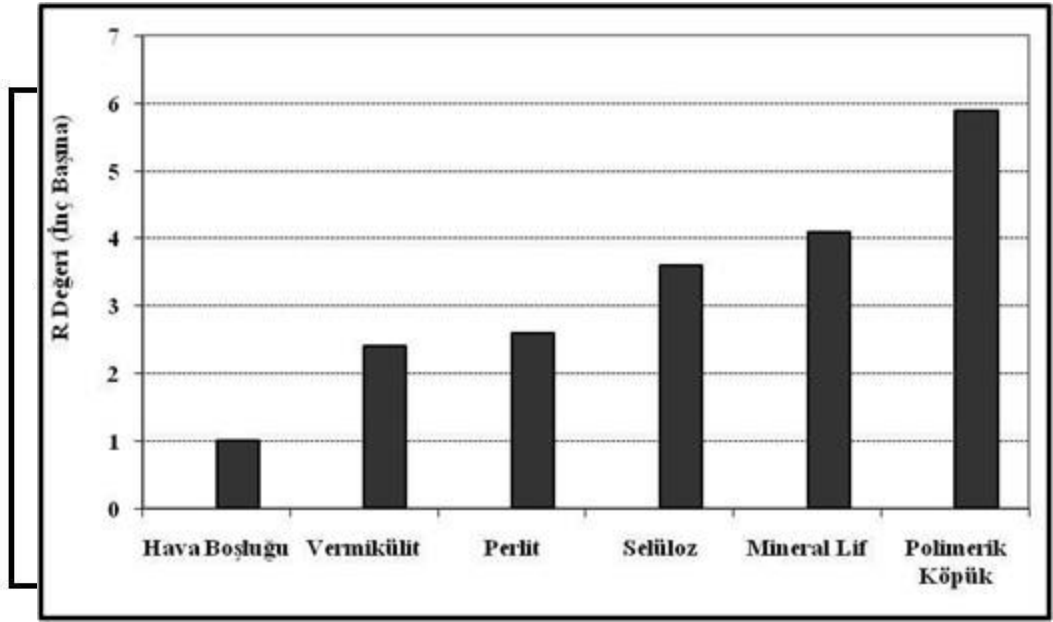
Su buharı geçişi: 0,25 µgm/Nh

## 2.6 Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri

Ürün veya binaların ısıtma ve soğutma enerji tüketim ve giderlerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar global normların güncellenmesiyle devam eden bir süreçtir. Bu süreçte mühendislerin kullandığı başlıca çözümlerden biri ısı yalıtım malzemesi alternatifleridir. Yalıtım malzemelerinin yalıtım özelliklerinin ve uygulama alanlarının geliştirilmesi konuları birçok araştırmacının çalışmalarını yoğunlaştırdığı bir alan 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 yöneltmiştir. Yaygın olan yalıtım malzemeleriyle istenilen yalıtım özelliklerini sağlamak ya çok

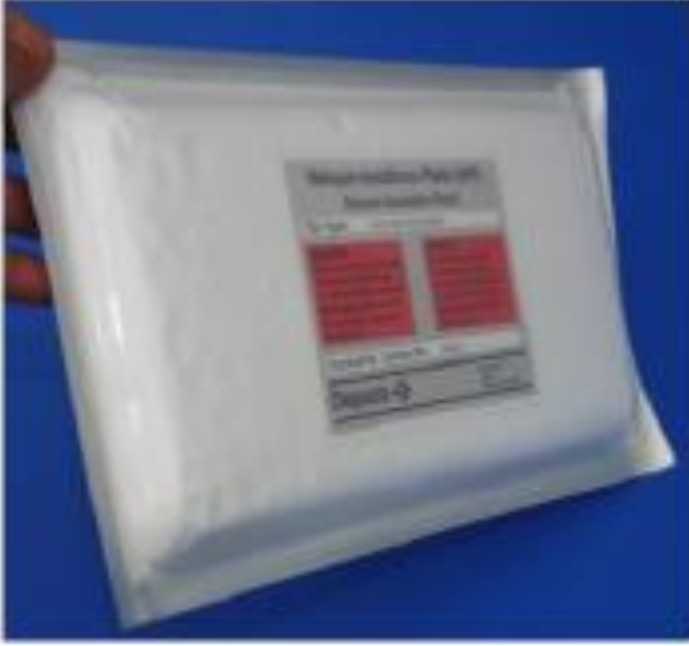
pahalı ya da uygulamalarında alan kısıtlılığı nedeniyle imkânsızdır.

Özellikle Vakum İzolasyon Panelleri (VIP) konusunda yapılan çalışmalar sayesinde ısı yalıtımı teknolojisinde büyük ilerlemeler sağlanmıştır. Son yıllarda 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)

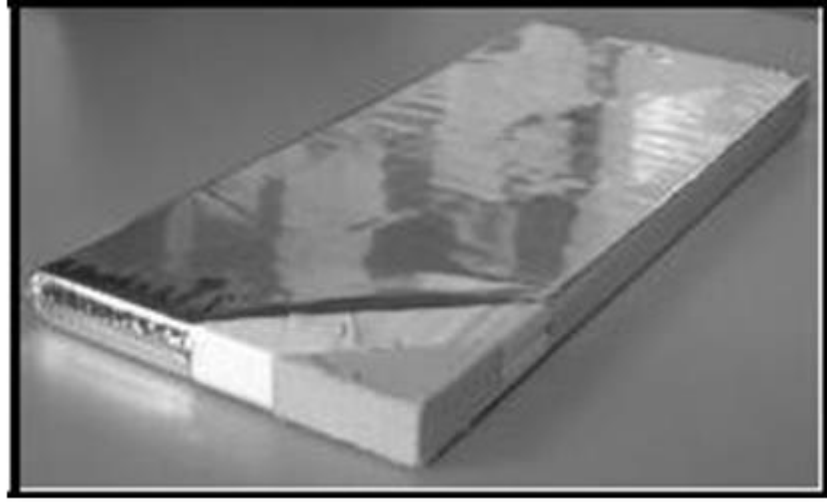
Bu malzemelerin ısı iletim katsayıları 10-22 mW/(m·K) arasında değişmekte olup alışlagelmiş yalıtım malzemelerine göre daha düşüktür. Gerek mikro-gözenekli yapıda gerekse alışlagelmiş yalıtım malzemelerinin vakumlanması suretiyle 2-4 mW/(m·K) gibi düşük değerlere ulaşılabilmesi de mümkün olmaktadır.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



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

### 2.6.1 Vakum İzolasyon Panelleri

Vakum izolasyon panelleri ısı yalıtım özellikleri açısından bilinen ısı yalıtım malzemelerine göre çok daha yüksek performanslı yalıtım malzemeleridir. Geleneksel 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 VIP'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 artışı ve hava ve nem difüzyonundan ötürü geri dönüşümsüz olarak artar. Buna bağlı olarak 25 yıl yaşlanmış malzemenin tasarım katsayısı fumed silika için  $7-8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$  olarak alınabilir (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) malzemeyi vakumlamak yerine havadan daha düşük iletkenliği olan örneğin argon (Ar), kripton (Kr) 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 prototiplerinin ısı yalıtımı teorik hesaplamalara göre VIP'den oldukça yüksektir

(ortalama 40 mW/(mK)).

Bu sebeplerden ötürü GYP'lerin VIP'ye kıyasla birçok avantaj ve dezavantajı vardır. Yine de 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

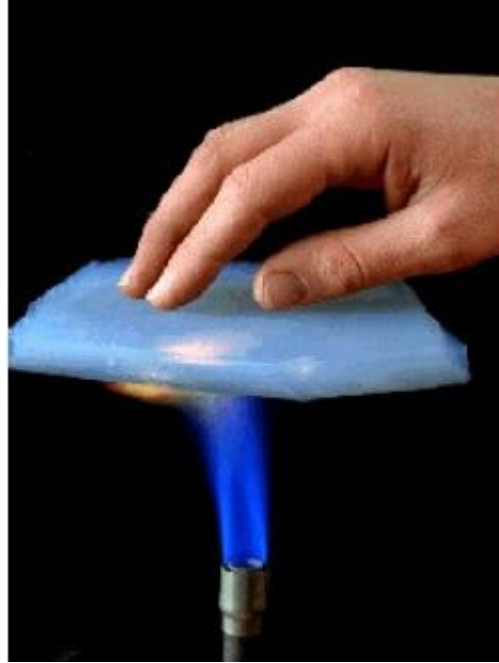
Bir diğer yüksek performanslı yalıtım malzemesi ısı iletimi atmosferik basınçta 13 mW/(m·K)'ye kadar inebilen aerojel'dir. (Lu, 1992). Aerojel sıvı fazı kurutularak tahliye edilmiş bir jelden meydana gelir. Aerojel konsepti ilk kez 1930'larda Kistler tarafından keşfedilmiştir. Kistlerin hipotezine göre çekme, kurutma esnasında oluşan kılcal kuvvetlerden dolayı oluşmaktaydı. Bu hipotezi test etmek için Kistler jel numunesini suyun kritik sıcaklığına kadar ısıtarak basıncıda suyun buharlaşma basıncı üzerinde tutmuştur.

Yeryüzündeki en hafif katı madde olarak tanımlanan arojeller, içinde %95 ile %99,9 miktarında hava bulunduran havalandırılmış köpük olarak tanımlanmakta olup, kalan kısım ise cama benzeyen bir malzemedir, örneğin silika adıyla bilinen silikon dioksit. Nanometrik boyutta sıkışan hava molekülleri hareket edemezler. Bu da bu malzemeye yüksek ısı yalıtımı özelliğini kazandırır. Bu durum aynı zamanda ses yalıtımı için de geçerli olup, sıkışan hava molekülleri nedeniyle malzemenin ses dalgalarını geçirmesi minimum düzeyde gerçekleşmekte, dolayısıyla aerojel malzeme iyi bir ses yalıtım malzemesi de olmaktadır. Bunun yanı sıra birçok farklı fiziksel ve kimyasal özelliği içinde barındırır. Aerojel, dondurulmuş duman görünümünde, cama benzer bir malzeme olup, bundan dolayı bina cephelerinde kullanımı mümkündür.

Arojeller, jellerin sıvı bileşeninin gaz ile değiştirilmesiyle elde edilen gözenekli sentetik maddelerdir. Her ne kadar ismi bir sıvıyı andırsa da bunun aksine katı ve kuru malzemedir. Jel, biri katı madde diğeri dispersiyon (dağılım)

maddesi olmak üzere iki bileşenden oluşan bir karışımı tanımlar. Dispersiyon maddenin hava olması durumunda oluşan yapı aerogel (aerogel), su olması durumunda ise hidrojel (hydrogel) olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmanın konusu, dispersiyon maddenin hava olduğu “aerogel”lerdir. Aerojellerin ısı yalıtımlarının iyi olması şu şekilde açıklanabilir: Tek kalın kazak giymektense iki ince kazak, aralarındaki hava tabakası nedeniyle daha iyi ısıtır. Bunun nedeni iki tabaka arasındaki hava tabakasının ısı yalıtımı sağlamasıdır. Aerogelde de bu hava tabakası yüksek oranda mevcut olup, bu nedenle ısı yalıtımı oldukça iyidir.

Steven Kistler, silika jel'den başka çeşitli metal oksitleri (aluminyum, krom, kalay oksitleri) ile de aerogel üretmiştir. Karbon tabanlı aerojeller, ilk kez 1980'li



yılların sonlarında üretilmeye başlandı.

Şekil 2.18 Alev torcu üzerindeki bir aerogel. (Aerogel, 2012).

Aerogellerin milyonlarca ufak delikten oluşan yüzeyi, sünger andırır. Büyük

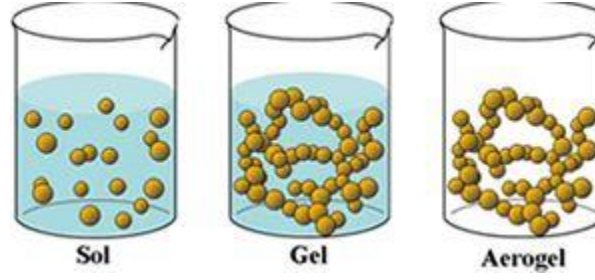
oranda havadan oluşmaktadır ve çok iyi yalıtıcıdır. Aerojel, bilinen köpüklerden ve diğer yalıtım maddelerinden çok daha üstün özelliklere sahiptir. Öyle ki, oksijen kaynağıyla doğrudan verilen ateşi bile yalıtılabilmektedir. En gelişmiş fiberglas yalıtım malzemesinden 39 kat daha fazla yalıtım kabiliyetine sahiptir. Knudsen efekti yüzünden arojeller, içinde bulunan havadan bile daha yalıtıcı hale gelebilmektedir.

Arojeller, bir başka silika (kum) esaslı madde olan camla kıyaslandığında 1000 kat daha az yoğunluğa ve delikli bir yapıya sahiptir. Büyüklüğü milimetrenin milyarda biri kadar olan delikler, bir ağ gibi malzemenin içini kuşatır. Deliklerin etrafı başka bir malzeme ile kaplıdır.

Yarı saydamdırlar (translulent) ve Rayleigh saçılımı nedeniyle çeşitli renklerde (silika jel tabanlılar için mavi renkte) gözükürler. Rijit ve büyük ağırlık taşıyabilen katı objelerdir ama kırılırlar. Kütlesinin binlerce katını taşıyabilir, ama ufak darbelerle de kırılabilirler. Su sevmeye açısından hidrofil ve hatta higroskop turlar, dokunma durumunda kuru bir his bırakırlar. Çeşitli işlemlerle, kırılabilirlikleri giderilebilmekte ve su sevmeyen haline getirilebilmektedirler.

Aerojel üretim yöntemi 1930’larda geliştirilmesine rağmen şimdiye kadar kullanımı daha çok uzay, kimya ve spor endüstrileriyle sınırlı kalmıştır. Üretim prosesi yüksek enerji tüketimi gerektirmekle beraber oldukça karmaşık işlemlerden ibarettir. Bunun yanında saf aorojel üretimi henüz yapılabildiği kadar 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 üretilmektedir.





Şekil 2.19 Aerojel prosesi

#### 2.6.4 Gelecekteki Isı Yalıtımı Gereksinimleri

Gelecekteki ısı yalıtım malzemeleri ve çözümleri mümkün olabilecek en düşük seviyelerde ısı iletimine sahip olmalıdır. Bunun yanında 100 yıl ve sonrasında ısı iletim değeri çok fazla değişim göstermemelidir. Dahası bu malzeme veya çözümler ısı iletimlerini çivi vb. bir nesneyle delinse lokal ısıl köprüleri hariç korumalıdır. Vakum odaklı teknolojilerin en büyük sıkıntısı uzun yıllar sonunda birçok dış etkenle beraber oluşan vakum kayıpları veya hava ve nem penetrasyonudur.

Geleceğin ısı yalıtım malzemesindeki hayati gereksinimlerden biri de herhangi bir performans kaybına mahal vermeden kesip-şekillendirilecek şekilde yapı ve cihazlara adapte edilebilir olmasıdır. Zarf bariyerli VİP 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-yangın dayanımı, ısınma-soğuma değişkenliklerine gösterdiği direnç, dinamik özellikleri, maliyeti ve rakabetçiliği gibi birçok özellik ayrıca adreslenerek değerlendirilmelidir.

Bu sebeplerden dolayı geleceğin yalıtım malzemesi birçok kritik gereksinimi karşılamalıdır. Bu çeşitli özellikler ve ilgili gereksinimler Çizelge 2.1'de özetlenmiştir. Önerilen ısı iletkenliği hiç yaşanmamış VİP'e ait olan  $4 \text{ mW} / (\text{m} \cdot \text{K})$ '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?   |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|--------------|-------------------|----------------|---------------------------------|
|                                      | <b>Geleneksel Çözümler</b>                                                    |                                    |              |                   |                |                                 |
| Mineral Yünler ve Polistiren         | Hayır                                                                         | Hayır                              | Evet         | Evet              | Hayır          | Hayır                           |
|                                      | <b>Bugünün Gelişmiş Çözümü- Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri</b>   |                                    |              |                   |                |                                 |
| 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 |
|                                      | <b>Geleceğin Çözüm Yöntemleri—Yüksek Performanslı Isı Yalıtım Malzemeleri</b> |                                    |              |                   |                |                                 |
| Vakum Yalıtım Malzemeleri            | Evet                                                                          | Belki                              | Evet         | Evet              | Hayır/Belki    | Belki                           |
| Gaz Yalıtım Malzemeleri              | Evet                                                                          | Belki                              | Evet         | Evet              | Hayır/Belki    | Belki                           |
| Nano Yalıtım Malzemeleri             | Evet                                                                          | Evet                               | Evet         | Evet              | Hayır/Belki    | Belki                           |
| Dinamik Yalıtım Malzemeleri          | Belki                                                                         | Belki                              | Bilinmiyor   | Bilinmiyor        | Hayır/Belki    | Belki                           |
| Diğer                                | –                                                                             | –                                  | –            | –                 | –              | Teknolojiye bağlı               |

### 3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Günümüze kadar Vakum İzolasyon Panelleri üzerine birçok çalışma yapılmış olup bu çalışmaların gitgide artış gösterdiği açıkça ortadadır. Bu tez içeriğine destek olacak ve yol gösterir nitelikte, Vakum İzolasyon Panelleri ve yaşlanma etkileri ile ilgili çalışmalar araştırılıp bu bölümde özetlenmiştir. Özellikle deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile gerçekleştirilen çalışmalar daha fazla incelenmiştir. Günümüzde vakumlu 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 10 kata kadar daha iyi yalıtım sağlarlar (Sun J. And Lin, J. 1999). Ayrıca kullanıldıkları uygulamalarda yalıtımın daha ince ve hafif olması sağladıkları avantajlardandır. VIP'ler günümüzde konstrüksiyon yapı marketlere kadar yer edinmeyi başarmıştır. Kullanılan zarf ve dolgu malzemelerinde ilerlemeye bağlı olarak panel imalatında da ilerleme kaydedilmiştir. Geçmişte uygulama alanlarını kısıtlayan düz yüzeyle dikdörtgen şekilli panel imalatı yapılırken günümüzde uygulama koşullarına göre değişik şekilli paneller yapılabilir (Manini, P., Rizzi E., Pastore, G and Gregorio, P. 2003).

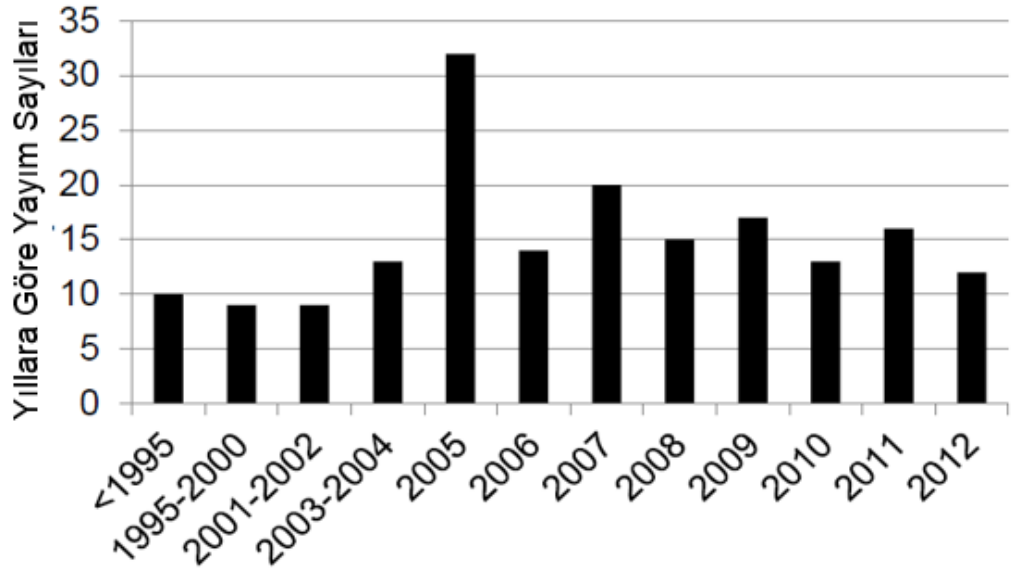
Vakumun yalıtım amaçlı kullanımı ilk olarak İskoçyalı fizikçi James Dewar (1842-1923) tarafından 1872'de geliştirilen sistemle yalıtım boşluğunun kömür tozu ile doldurulup vakumlanması ile elde edilen ısıl izolasyonun uygulamasında kullanılması ile gerçekleşmiştir. Termoslar buluşun uzun zamandır yaygınca kullanılan uygulamalarının başında gelmektedirler. 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 iyi malzemeler olup yüzeyleri metal ile

kaplanarak ısı geçişi en aza indirilmektedir (An introduction to VIP technology, 1999).

Vakumlu yalıtım tekniği ile ilgili ilk patentin 1972 yılında “Cyrogenic Storage Apparatus” ismi ile alınmış olması tekniğin uzun yıllardır bilinmesine rağmen farklı alanlarda uygulamaya yönelik çalışmaların yaklaşık 45 yıl önce başladığını göstermektedir (An introduction to VIP technology, 1999). İlerleyen yıllarda dolgu malzemesinin vakumlama sırasında emilmesini 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 sağlanmaktadır (Simmler & Brunner (2005b))

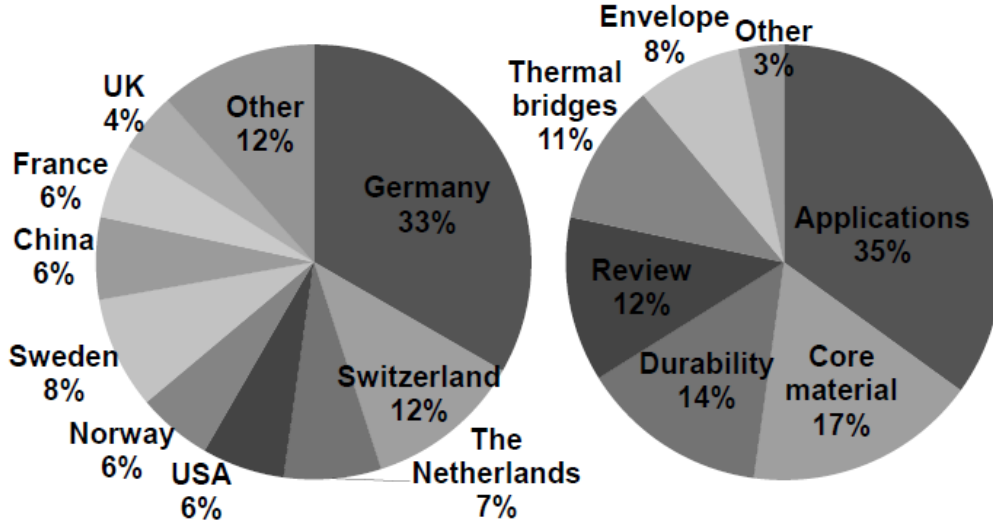
Çekirdek malzeme etrafındaki kaplama veya zarfa ait dayanıklılık ve sızdırmazlığının tasarımıdaki esas etken olduğu patentlerin geliştirildiği ilk yıllarda biliniyordu. Çekirdek malzeme olarak nano boyutta malzemeler, 1930’lı yıllarda aerojeller üzerine yapılan çalışmalarla beraber deneysel olarak kullanıma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

Geçtiğimiz 20 yıllık süre içerisinde VİP ile 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 sadece 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 dahilinde yürütölmüştür.



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 sadece 10 tanesi 1995 öncesi yayımlanmıştır ve 2005 yılı sonrası yayımlar her yıl 15’er adet düzeyinde dengeli dağılımlıdır. Önceki yıllardaki yayınlara 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, havanın ve nemin gaz bariyerden geçişine efektif olarak direnç sağlamaktadır (Shirtliffe, 1972). Fakat yapılan çeşitli araştırmalar göstermektedir ki, yavaş olarak da ilerlese, 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 ısı iletkenliğinde meydana gelen değişimine bağlıdır. Literatürde belirtilen ve yaygın olarak kullanılan dolgu malzemeleri cam yünü, açık gözenekli organik köpükler, tozlar ve arojelldir.



Nano malzemeler için önde gelen araştırmacılardan biri, 1930'lu yıllarda bir ıslak kimyasal süreçle ilk silika aerojelleri yapan Kistler'dir. Kistler, bu aerojellerin havadaki ısı iletkenliklerinin  $0.020 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  civarında olduğunu yani diğer yalıtıcılardan önemli ölçüde düşük ısı iletim katsayısına sahip olduğunu bulmuştur. Aynı zamanda, en azından aerjel monolitleri ve ince aerjel tozları için gaz termal iletimini bastırmak için 10 mbar'lık bir basınca vakumlamanın yeterli olduğunu gözlemlemiştir. Kistler'in geliştirmelerini takiben Monsanto, 1950'lerden 1970'lere kadar binlerce ton silika aerjel üretmiş fakat ekonomik sebeplerden dolayı üretimi askıya almıştır. 1980'lerde iyi tanımlanmış şartlar altında ve dış yükü 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 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, VIP'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.

VIP üzerine literatürde bulunan çalışmaların tamamına yakını silis tozu, polimer esaslı, hidrojel ve aerojellerden ( $\text{SiO}_2$ ) meydana gelen iç malzemeleri ve bunların farklı zarf malzemeleriyle birleşimleri üzerine yapılmış olup, bu bileşimlerin ısı iletim katsayıları araştırılmıştır.

VIP'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 nem, ısı şartlara ve iç basınç artışına dayanan bir korelasyon geliştirdiler (Simmler, H. ve Brunner, S., 2005). Ek olarak Schwab tarafından elde edilen sonuçlar VIP fiziğinin iç yüzünü anlayabilmek ve analitik olarak yaşlanmasını değerlendirebilmek adına çok kıymetli sonuçlar sunmaktadır. Bu makale VIP'lerin yaşlanmasındaki teorik arkaplanı, servis ömrünün öngörülebileceği formül, grafikler ve çeşitli durumlardaki yaşlanma faktörleriyle beraber sunmaktadır (Schwab vd., 2005).

Bir VIP'nin kullanım ömrü belli bir noktadaki ısı iletiminin tespit edilmiş bir limit değere erişim süresidir (Tenpierik. M. Vd., 2007). Çekirdek malzeme içerisindeki gaz ve su buhar basıncı seviyesindeki değişim VIP içerisindeki ısı transferi değişikliklerini belirler. Bu ısı iletkenliği değişimin oranı VIP'ye ait kullanım ömrünü öngörmeye kullanılabilir (Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K. ve Mukhopadhyaya, 2005). VIP 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 VIP iç ortamı arasındaki basınç farkı nedeniyle, VIP 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 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 kütlelesel 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 VIP'nin sabit çevresel koşullarda kullanım ömrünü öngören bir denklem geliştirmişlerdir. Bu denklemlere göre nem ve hava infiltrasyonundan

kaynaklanan çekirdek ısı transfer değişimi tasarım önerisi 25 yıl için Silika VIP 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.

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

Schwab (Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, HP. ve Fricke, J., 2005)'de VIP çekirdeğindeki ısı iletiminin zamana bağlı değişiminin tahmin edilmesi için bir Denklem 3.2'yi yayımladı. 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.

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

Morel (2007-2009)'de silika çekirdek malzeme üzerinde nemim 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 önayak olmuştur.

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

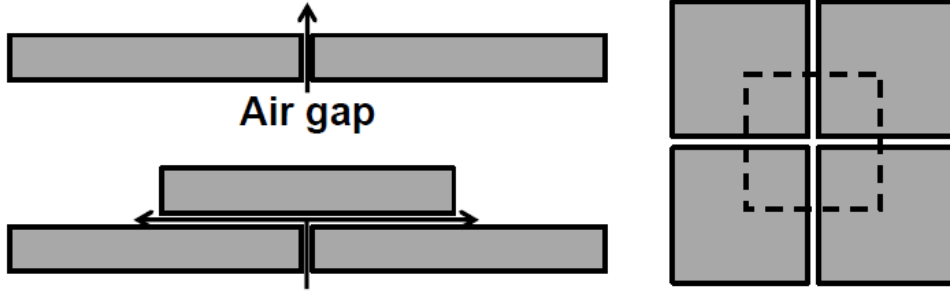
$$\Delta \lambda_c(t) \approx \frac{\partial \lambda_c}{\partial P_g} P_{g,e} \left( 1 - e^{-\frac{t-t_{get}}{t_g}} \right) + \frac{\partial \lambda_c}{\partial P_{wv}} P_{wv,e} \left( 1 - e^{-\frac{t-t_{des}}{t_{wg}}} \right) + \frac{\partial \lambda_c}{\partial u} \frac{du}{d\varphi} \varphi_e \left(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

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

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

Bu yaklaşım modeli VIP 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 sonuçlar verir. Yine de yapı uygulamaları için sürekli değişen çevre koşulları VIP kullanım ömrünün gerçek anlık yaşam koşullarına göre modellenmesini gerektirir. Beck dinamik hidrotermal şartlar altındaki silika VIP’ler için bir çeşit dinamik simülasyon modeli önermiştir ve bu modelle VIP çekirdeğindeki nem transferi ve sıcaklık profili simultane olarak hesaplanabilmektedir (Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, H.P. and Fricke, J., 2005).

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



Şekil 3.3 VIP çeperindeki ısı köprüleri (Ghazi Wakili, 2011)

Laminasyon üzerindeki ek ısı akısı lineer ısı geçirgenliği ile hesaplanabilir,  $\Psi$  (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**

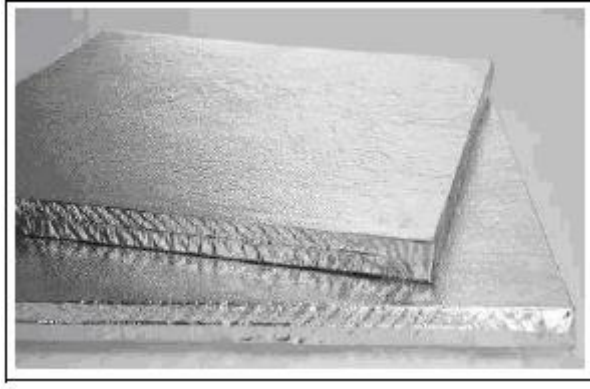
VİP'lerinin ısı yalıtım kapasitesi geleneksel yalıtım malzemelerinden birkaç kez daha yüksektir. Bu durum uygulama kalınlığı açısından da büyük bir avantaj sağlarken, kullanım alanını da oldukça genişletmektedir. Paneller özellikle enerji talebinin, maliyetinin, verimliliğinin yüksek olması istendiğinde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

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

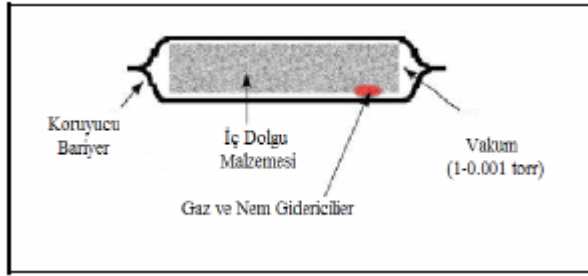
Bu sayede kullanılan malzemedan tasarruf edilebilir, kullanılabilir bina ve ürün net hacimleri arttırılabilir ve ömrü tamamlandığında ortaya çıkacak olan atık malzemeler azaltılabilir (Deniz, 2008). Hali hazırda mevcut VİP'lerin yaygınlaşmasında en önemli engel yüksek üretim maliyetleridir. Vakumlama ve ambalajlama pahalı bir yöntem olmayıp günümüzde pek çok endüstriyel alanda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. VİP'lerinde maliyeti etkileyen en önemli öğenin çekirdek materyalleri olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte bu konuda çalışan üretici firmaların sayısının az olması ve VİP'leri üreten firma sayısının henüz yeterli olmaması, VİP fiyatlarının diğer yalıtım malzemeleri ile yeterli rekabet düzeyine ulaşmasını geciktirmektedir. Çekirdek materyalinin daha ekonomik koşullarda üretimi VİP'lerin üretim maliyetinide önemli derecede azaltacak, dolayısıyla kullanımı giderek yaygınlaşacaktır.

Vakum izolasyon panelleri; gözenekli yapıdaki bir iç dolgu malzemesinin, dolgu malzemesi karakterine bağlı gaz giderici malzeme kullanılarak ya da tek başına bir koruyucu bariyer içine konulup vakumlanması ve sızdırmazlığın sağlanarak 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'leri dolgu malzemesi türüne bağlı olarak birkaç ana bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler gözenekli yapıya sahip “çekirdek”, dolgu maddesi olarak toz malzeme kullanılan çekirdekler için geçirimli “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 gidericidir.

Toz malzeme kullanılarak elde edilen çekirdekler, kâğıt ya da elyaf tela kullanılarak hazırlanan iç zarf malzemesi içerisine yerleştirildikten sonra vakumlanabilmektedir. İç zarf olarak kullanılan telanın vakumlanabilirliği, birim ağırlığı ve gözenek boyutu önemlidir. Toz malzeme kullanılan çekirdeklerde tela, vakum esnasında toz malzemeyi tutabilmeli, vakuma engel olmamalı ve birim ağırlığı nispeten düşük seçilmelidir. Açık hücreli poliüretan

ya da polistren, fiberglas gibi toz olmayan malzemelerde iç zarf kullanımına gerek yoktur.

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

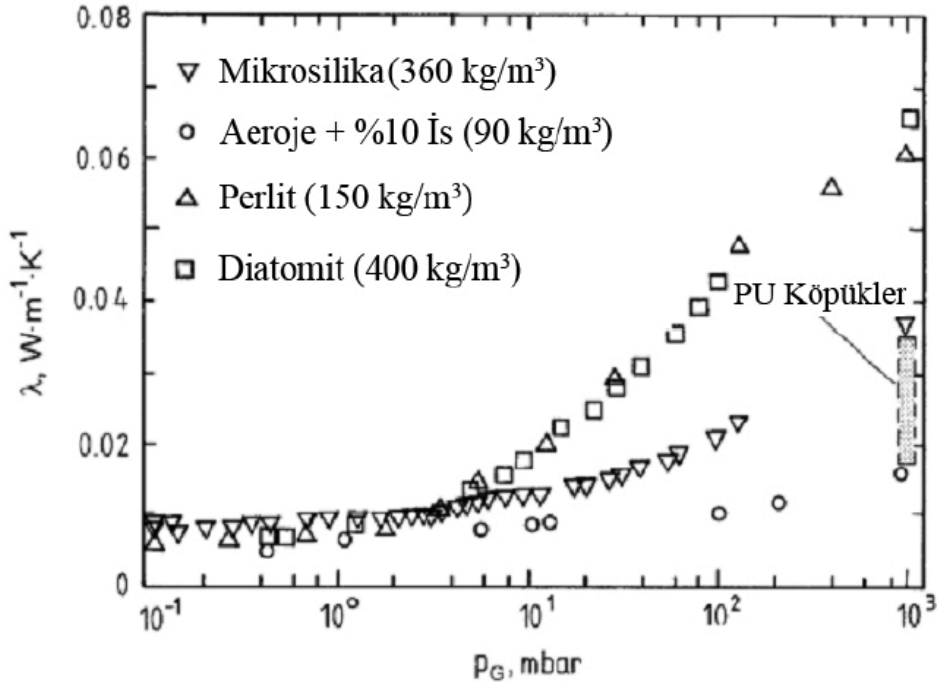
#### 4.1.1 İç Dolgu Malzemesi

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 sağlamaktır.

Literatürde, vakum izolasyon panellerinde iç dolgu malzemesi olarak; aerogel, açık hücreli poliüretan, geri dönüşümü yapılmış üretan (ruf), açık hücreli ekstrude edilmiş polystren, fiberglas ve toz malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. VIP'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 ısı iletim katsayıları araştırılmıştır. Şekil 4.4 'te farklı iç dolgu malzemeleri ile yapılan VIP'nin, değişik vakum seviyelerindeki toplam ısı transfer katsayıları karşılaştırılmıştır. Ancak, bu değerlerin VIP'lerin merkez bölgeleri için geçerli değerler olup termal köprü etkisinin dikkate alınmadığını belirtmek gereklidir.

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

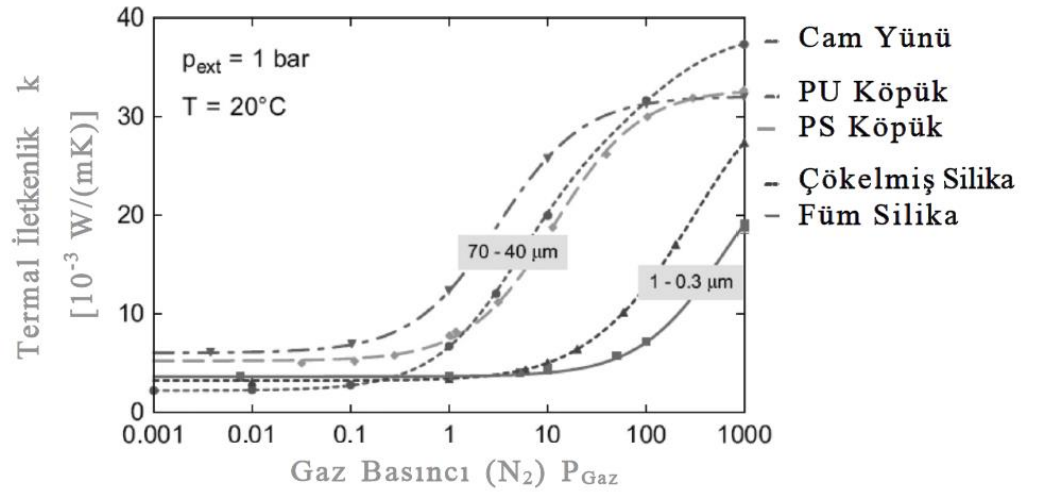
dolgu malzemeleri için ise bu değer 10000 Pa gibi yüksek bir değer olabilmektedir. Bu durum, açık hücreli dolgu malzemesinin yüksek gözenek basıncında daha düşük ısı iletim katsayısına sahip olabilmesinin, malzemenin gözenek yapısı ile ilgili olduğunu göstermektedir (Fricke vd., 2008).



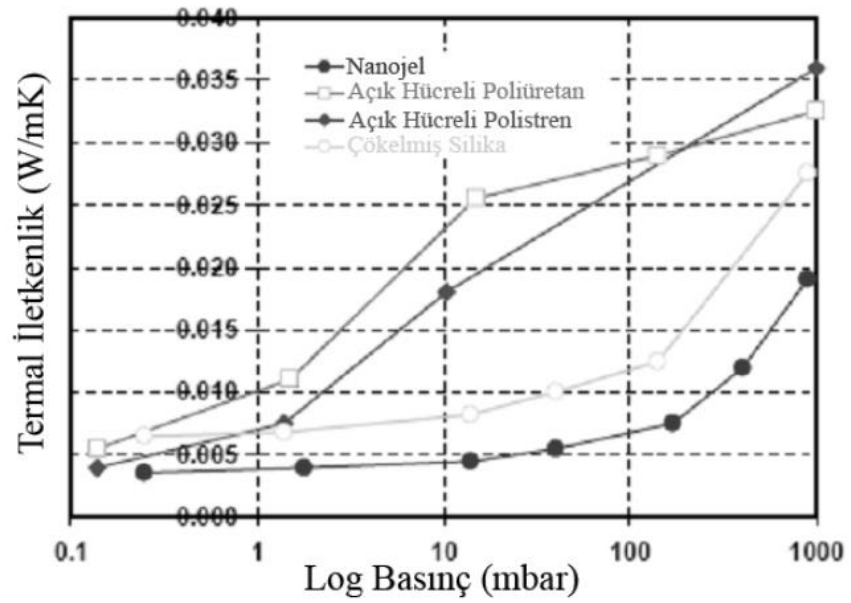
Şekil 4.3 300 K'de çeşitli silika dolguların gaz basıncına bağlı olarak ısı iletkenlikleri (Fricke, 2005)

Daha küçük gözenekli dolgu malzemeleri, daha 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 ısı iletkenlik karakteristiği göstermektedir. Bu arada, nano gözenekli dolgu malzemeleri, mikro veya makro gözenekli dolgu malzemelerine kıyasla çok daha pahalıdırlar. Bu durum, sadece nano gözenekli dolgu malzemelerinin yapımı için gereken malzemenin pahalı olmasından değil, aynı zamanda nano gözenekli dolgu malzemesinin üretiminin de pahalı olmasının bir sonucudur.





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 iletim katsayısının değişimi (Fricke, 2005)

VIP konusunda literatürde bulunan çalışmaların tamamına yakını silis tozu, polimer esaslı, hidrojel ve aerojellerden ( $\text{SiO}_2$ ) meydana gelen iç malzemeleri ve bunların farklı zarf malzemeleriyle birleşimleri üzerine yapılmış olup, bu bileşimlerin ısı iletim katsayıları araştırılmıştır.

#### 4.1.2 Koruyucu Bariyer

Koruyucu bariyerler, vakumlanmış iç malzemenin dışını tamamen saracak şekilde yapıyı dış ortamdan ayıran lamineli yapıya sahip metalize filmlerdir. Genel olarak, AL (alüminyum), PET (polyester), PS (polystren), PP (polypropylene) tabakalardan meydana gelen laminelli yapıya sahiptirler. Bu filmlerin özelliği, gaz ve nem geçirgenliklerinin çok düşük olmasıdır. Bu sayede, iç dolgu malzemesine uygulanan vakum işlemi sonucunda ulaşılan düşük basınç değerleri uzun süre korunabilmektedir (Simmler ve Bruner, 2005).

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

| Katman | Madde                              | Görevi               | Kalınlık         |
|--------|------------------------------------|----------------------|------------------|
| 1      | Polyester (PET)                    | Koruma katmanı       | 12 $\mu\text{m}$ |
| 2      | Alüminyum Film (ALU)               | Bariyer katmanı      | 30 nm            |
| 3      | Üretan Bazlı Yapıştırıcı (PUR)     | Yapıştırıcı          | 2 $\mu\text{m}$  |
| 4      | Alüminyum Film (ALU)               | Bariyer katmanı      | 30 nm            |
| 5      | Polipropilen (PP)                  | 4 için substrat      | 18 $\mu\text{m}$ |
| 6      | Üretan Bazlı Yapıştırıcı (PUR)     | Yapıştırıcı          | 2 $\mu\text{m}$  |
| 7      | Alüminyum Film (ALU)               | Bariyer katmanı      | 30 nm            |
| 8      | Polyester (PET)                    | 7 için substrat      | 12 $\mu\text{m}$ |
| 9      | Üretan Bazlı Yapıştırıcı (PUR)     | Yapıştırıcı          | 2 $\mu\text{m}$  |
| 10     | Düşük Yoğunluklu Polietilen (PELD) | Sızdırmazlık katmanı | 60 $\mu\text{m}$ |

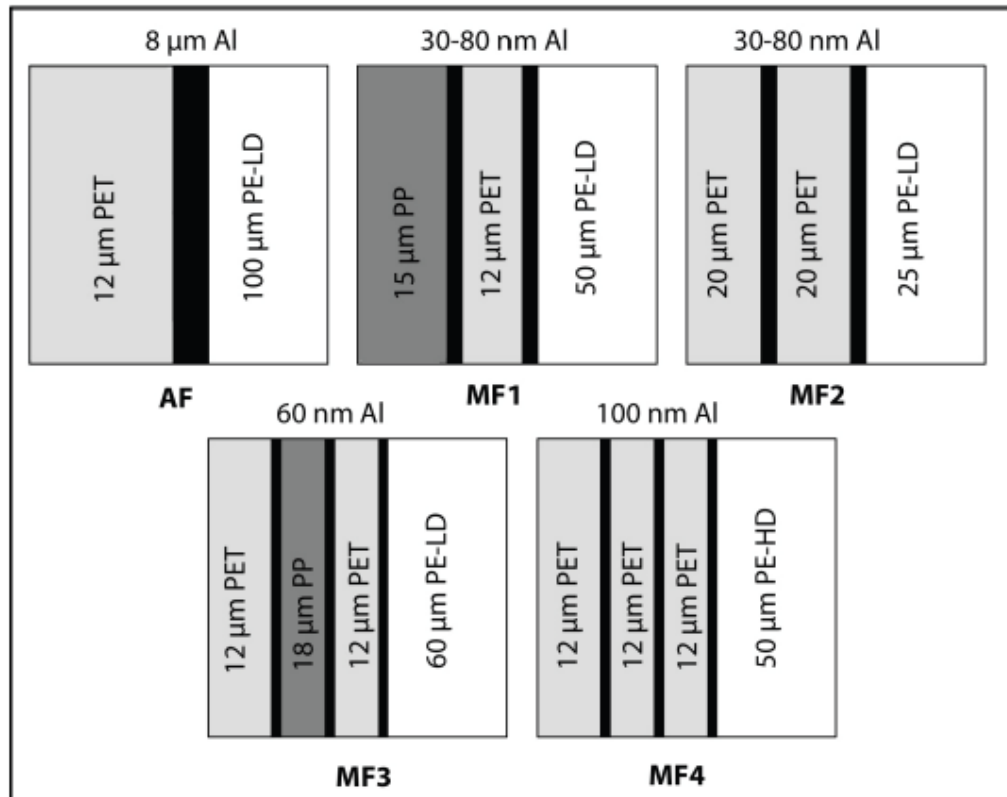
Gaz ve nem geçirgenliğinin düşük olması yanında koruyucu bariyer VIP kenarlarında oluşacak termal köprüleri minimuma indirecek seviyede düşük ısı iletimine sahip olmalıdır. Birçok durum için yapılan deneyler, VIP kenarlarındaki ısı köprülerinin ihmal edilemez düzeyde olduğunu göstermektedir. (Ghazi Wakili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

En yaygın koruyucu bariyer tipi birkaç tabakalı metalize polimer filmi veya alternatif olarak inceltirilmiş metal tabakadan meydana gelir. Metal bariyerler genel olarak hava ve buhar penetrasyonuna karşı en yüksek korumayı sağlar fakat yüksek ısı iletimi katsayıları VIP’lerde kullanımını verimsiz hale getirebilir. En yaygın film türleri aşağıdaki gibi sıralanabilir

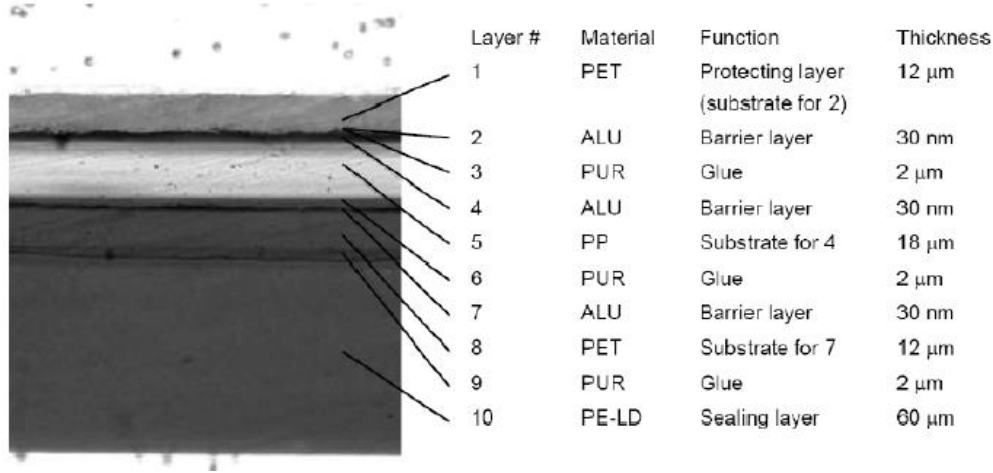
(Willems vd., 2005).

**Metal Film (AF) :** Kalınlığı 10  $\mu\text{m}$ 'ye ulaşan merkezi bir alüminyum katman kullanılır. Bu katman Polietilen teraptalat (PET) ile lamine edilerek mekanik dayanım sağlanır.

**Metalize Filmler (MF) :** Bu laminasyonlar sayısı üçü bulabilen Alüminyum-Metalize polietilen terepalat (PET) veya polipropilen (PP) tabakası bulundurur. Şekil 4.6'de dört farklı MF laminasyon türüne ait kesit görüntüleri verilmektedir. Tüm laminasyonlarda sızdırmazlık amacıyla bir polietilen (PE) tabaka bulunur. Şekil 4.7'de ise MF3 laminasyonunun mikroskobik 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 VIP bariyeri için kullanılan çok katmanlı laminasyonun görselleştirimi (Simmler ve Brunner 2005a).

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

#### 4.1.3 Gaz Giderici

Vakum seviye artışının önlenmesi ve kullanım ömrünün arttırılması için, VIP'lerine gaz giderici yerleştirilmektedir. Yerleştirilecek gaz giderici miktarı tamamen planlanan VIP ömrü ile ilişkilidir. Gaz gidericiler kimyasal elemanlardır ve panel içindeki atık gazları ve su buharını tutmaktadırlar. VIP'lerinin 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 (Deniz vd., 2008). Su buharı için nem çekiciler kullanılırken diğer gazlar için farklı gaz gidericiler kullanılır. Silika yapılı VIP'lerde çekirdek kendiliğinden nem giderici olarak görev yaparken diğer yapı türlerinde az miktarda silika jel nem giderici gereklidir.

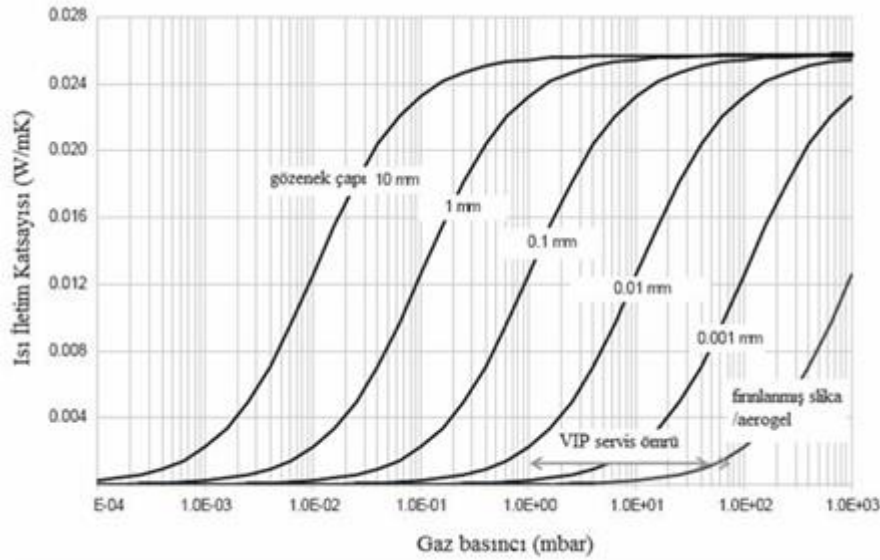
Düşük vakum seviyelerinde iç dolgu malzemesindeki hücrelerin arasına, dış ortamdan gaz ve nem girişi çok daha kolay gerçekleşmektedir. Desicant ve getter olarak bilinen malzemeler olası gaz ve nem sızmaları durumunda VIP'nin performansının düşmemesi ve bu kaçakları direkt kendi

üzerlerine almaları amacıyla yapıya eklenmektedir (Simmler ve diğer., 2005).

#### **4.2 Vakum İzolasyon Panellerinde Isı Transferi**

VİP'lerin ısı iletkenlik performansları birçok iç ve dış nedene bağlılık gösterir. Bu bağımlılık ta teorik ilişkiler esastır ve yaşlanmanın tahmin ve tespit edilebilmesinde gerekli altyapıyı oluşturur. Yüksek basınçta gaz moleküllerinin ortalama hareket yörüngeleri içerisinde hareket ettikleri gözeneklerin boyutlarından daha küçük hale geldiğinden, gaz molekülleri arasındaki çarpışmalar ısı transfer mekanizmasının çok daha etkin çalışmasını sağlar. Birim hacimdeki gaz taneciklerinin 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 azaltmaktır. Bu sayede gazın ortalama hareket yörüngesinde bir artış olmaktadır. Birim hacimde serbest olarak hareket eden gazların çarpışma mekanizması etkinliğini yitirmektedir. Gazın hareket ettiği boşluğun 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 (SiO<sub>2</sub>) ve Basınlarda Havanın Isıl İletkenliği

Homojen ve kaynaşmış bir yapıda ısı iletkenliği (  $\lambda_{tot}$  ) bu şekilde belirtilir (Brodt 1995) :

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

Şöyle ki;

$\lambda_{cd}$  = Malzeme iskeletindeki katı iletimi  $W/mK$

$\lambda_g$  = Malzeme gözeneklerindeki gaz taşınımı  $W/mK$

$\lambda_r$  = Gözenek yüzeylerindeki radyatif ısı transferi  $W/mK$

$\lambda_{cv}$  = 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. VIP ısıl performansını ele alan birçok termodinamik hesap yönteminde bağlaşım(coupling) ihmal edilmiştir.

Bu tip malzemelerde gözenek veya hücre boyutları 1  $\mu m$  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 edilir. Fricke ve Heinemann yaptıkları çalışmalarda yine taşınım ile ısı transferini, vakum ortamı ve küçük gözenek boyutları için ihmal edilebilir kabul etmişlerdir.

VİP'nin yüksek yalıtım performansının nedeni çoğunlukla gaz basıncının azaltılmasıyla beraber azalan gaz taşınımıdır. Performansın en yüksek olduğu yere mutlak vakum seviyesinde yani  $\lambda_g$  sıfır iken ulaşılır. Bu Knudsen etkisi sonucu oluşur. Knudsen etkisi, malzemenin gözenek boyutu ve gaz molekülü sayısına bağlı ısı taşınımı ilişkisidir. Düşük basınçlar daha uzun ortalama serbest yol verirler bu da 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):

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

Kn Knudsen sayısını ifade eder. Knudsen sayısı, ortalama serbest hareket yolunun ( $L_{mean}$ ), gazın içerisinde hareket ettiği gözeneklerin karakteristik boyutuna ( $\delta$ ) oranı olarak tanımlanır.

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

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

$\beta$  = 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)

$\delta$  = Gözenek karakteristik boyutu, gözenek çapı (m)

$k_B$  = Boltzmann sabiti (J/K)

T = Sıcaklık (K)

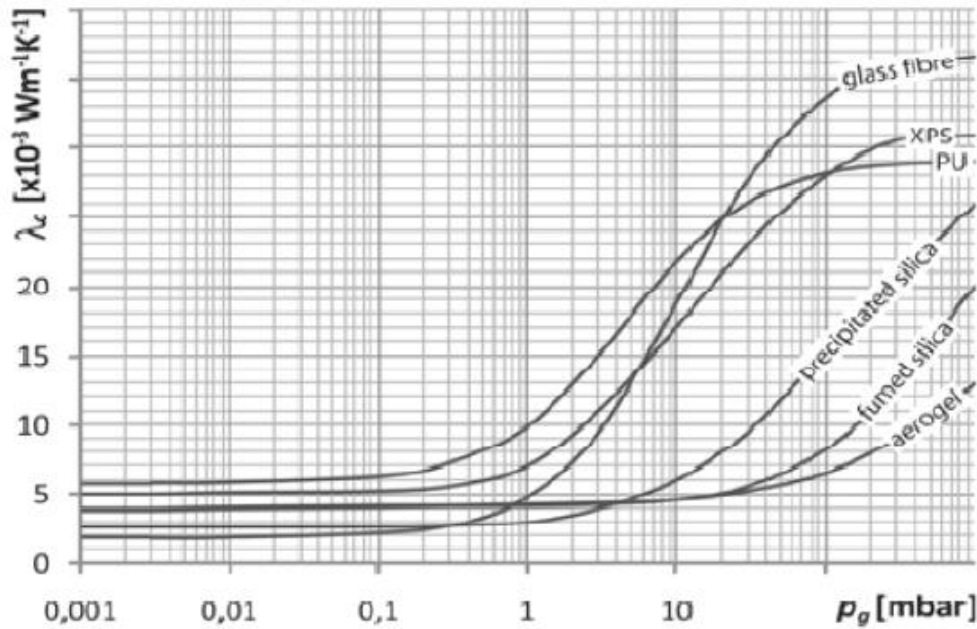
$d_g$  = Gaz molekülü çapı (m)

$P_g$  = 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 arzulanan termal performansın elde edilmesinde en önemli unsurdur. Isı iletimi ve gaz basıncı ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmektedir.



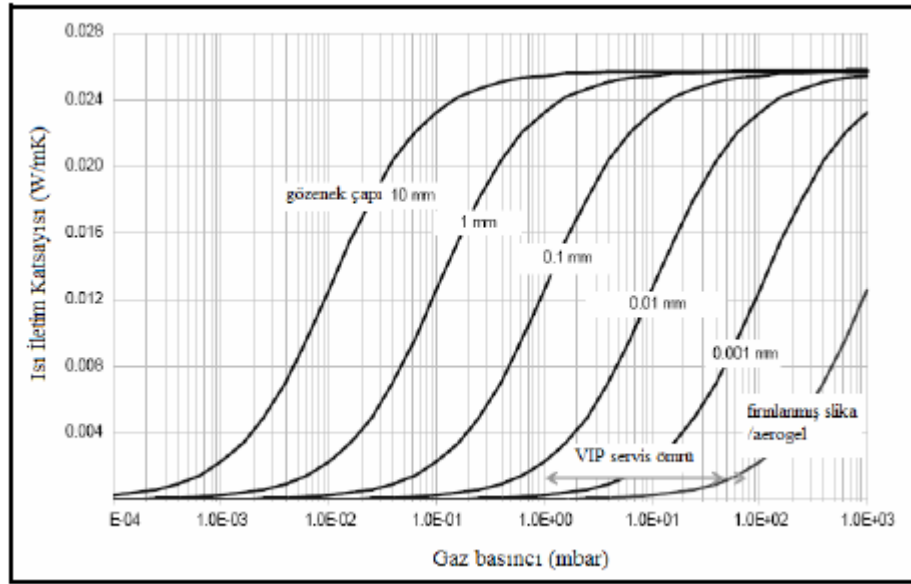
Şekil 4.9 Çeşitli malzemelere ait ısı iletimi, gaz basıncı ilişkisi (Tenpierik 2009)

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



vakum seviyesi literatüre göre orta derece bir vakum seviyesidir. Bu değerler arasında; viskoz ve moleküler akış arasındaki geçiş bölgesi kabul edilen Knudsen akış söz konusudur.

Gözenekli ve hücreli bir malzemenin boşluklarında yer alan hava yoluyla gerçekleşen ısı iletimi uygun vakum seviyelerinde etkisiz hale getirilebilir. Bu durumda denklem 4.5 haline gelir.

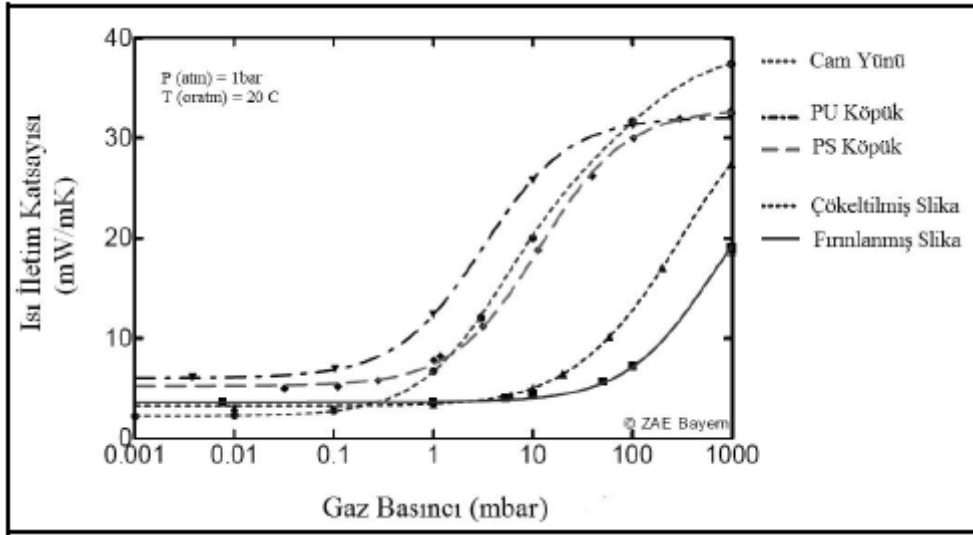


$$\lambda = \lambda_s + \lambda_r \quad (4.5)$$

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

Denklem 4.5 de görüleceği üzere gözenekli ve hücreli yapıya sahip yalıtım malzemelerinde uygun vakum şartları sağlandığında yalnızca katı yoluyla ısı iletimi ve ışınlı ısı transferi oluşur (Fricke, 2005).

Sonuç olarak gözenekli veya hücreli yapıya sahip ısı yalıtım malzemelerinin vakum etkisi altındaki ısı iletimi, katı iletimine ve ışınlı 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.

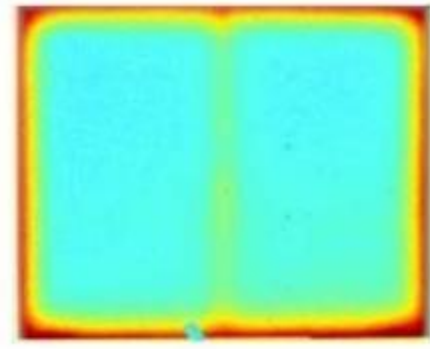


Şekil 4.11 Farklı iç dolgu malzemesine sahip vakum izolasyon panellerin ısı iletim katsayıları (Simmler ve diğer, 2005)

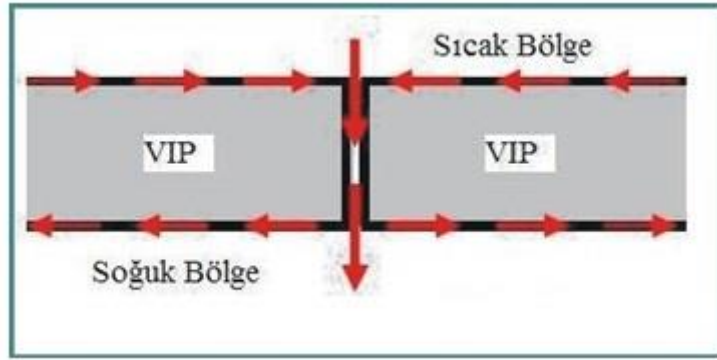
### 4.3 Termal Köprü Etkisi

Yapı elemanları içerisinde vakum izolasyon panelin konumlandırılma şekli çok önemlidir. Bunun nedeni ise, vakum izolasyon panellerin en önemli problemlerinden biri olan termal köprü etkisidir. Özellikle slika bazlı iç dolgu malzemelerin kullanıldığı vakum izolasyon panellerin iç kısmında ulaşılan ısı değerleri, katı ortamdaki ısı iletimi için  $0.002-0.003 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  ve termal radyasyon için de  $0.001 \text{ mW/(m}\cdot\text{K)}$  olmak üzere, toplamda yaklaşık olarak  $0.004 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  olarak bilinse de, gerçekte bu değerin vakum izolasyon panelin her noktasında sağlanması mümkün değildir. Çünkü bu iç dolgu malzemesinin dışını saran alüminize ya da metalize koruyucu bariyer filmlerin ısı iletim katsayıları çok yüksektir. ( $10-250 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) 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 çalışmalar 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 hesaplamalara göre; metalize bariyer filmin köşelerinden geçen ısı, iç dolgu malzemesinin tamamından geçen ısıdan daha fazla olabilmektedir (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 dizayn edilen bir vakum izolasyon panelin ısı iletim katsayısının, kullanılan bariyer filme bağlı olarak  $0.006\text{-}0.008 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  arasında değiştiği 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 geçirgenliği ile hesaplanabilir,  $\Psi$  ( $\text{mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ). Bu değer nümerik (Binz, 2005; Schwab, 2005; Sprengard ve Spitzner, 2011), analitik olarak hesaplanabilir (Tenpierik ve Cauberg, 2007) veya sıcak plaka yöntemiyle ölçülebilir (Brunner, 2012b; Ghazi Wakili, 2004; Ghazi Wakili, 2011).

Wakilli ve arkadaşlarının yaptığı çalışmalar sonucunda: termal köprü

olayının 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  $\lambda_{cop}$  (mW/(m·K)) panel merkezindeki ısı iletimini, d (m) VIP kalınlığını, P (m) çevre uzunluğunu ve A (m<sup>2</sup>) VIP alanını gösterir. Lineer ısı geçirgenliği; panel merkezi ısı iletimine, katmanların ısı iletkenliğine, panelin kalınlığına ve bariyer malzemesine ait ısı transferine bağlılık gösterir (Binz, 2005).

Ayrıca literatürde yapılan çalışmalarda, vakum izolasyon panellerinde kullanılan bariyer filmlerin ısı iletim katsayısına etkisi incelenmiştir. Tablo 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 değiştiği görülmektedir.

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  | $\lambda$ (W/mK) |
|----------------------------------------------------|------------------|
| Al folyo film                                      | 0,006            |
| Metalize polimer film (50x50x2 cm <sup>3</sup> )   | 0,008            |
| Metalize polimer film (100x100x2 cm <sup>3</sup> ) | 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 şartlara 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 azalmasına katkıda bulunur. Olağandışı mekanik stres 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 sürekli bir gaz ve nem girişi vardır. Bu durum, panelin ömrünü ve de ısı yalıtım özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Bu konuda Simmler ve arkadaşlarını yaptığı çalışmalara göre; vakum izolasyon panelinin içinde gerçekleşen 3mbar/yıl düzeyindeki basınç artışı, vakum izolasyon panelinin ısı iletim katsayısında yaklaşık olarak  $0.001 \text{ (W/m} \cdot \text{K)} / 10$  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).

Vakum seviye artışının ve yaşlanmanın önlenmesi için, VİP'lere gaz giderici yerleştirilmektedir. Yerleştirilecek gaz giderici miktarı tamamen planlanan VİP ömrü ile ilişkilidir. Gaz gidericiler kimyasal elemanlardır ve panel içindeki atık gazları ve su buharını 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

Atmosfer ile vakum izolasyon panelin iç ortamı arasındaki basınç farkı nedeniyle, vakum izolasyon panel içerisinde dış ortamdan sürekli bir gaz girişi söz konusudur. Bu durum hem panelin ömrünü hem de ısı yalıtım özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Bu durum ile ilgili Simmler'in yaptığı çalışmaya göre; vakum izolasyon panelin 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 moleküler taşınım 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 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 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 4.6'daki gibi ifade edilir.

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

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

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

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

$L = \text{VYP çevre uzunluğu } (m)$

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

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

Gaz geçirgenliği prosesi 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;

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

Servis ömrü hesaplanması için genel olarak  $\Delta p_{gaz}$  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.

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

$p_{app} = \text{uygulanan dış basınç (Pa)}$

$p_{init} = \text{VYP'nin iç basıncı (Pa)}$

#### 4.4.2 Nem Geçirgenliği ve Performans Üzerinde Etkileri

Atmosfer ile vakum izolasyon panelin iç ortamı arasındaki basınç farkı nedeniyle, vakum izolasyon panel içerisinde dış ortamdan sürekli bir nem alışverişi söz konusudur. Bu durum hem panelin ömrünü hem de ısı yalıtım özelliklerini olumsuz şekilde etkiler. Bu durum ile ilgili Simmler'in yaptığı çalışmaya göre; 50% baıl nem koşulundaki hava ile denge halinde 4% oranında gerçekleşecek kütleli 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 olarak değişime 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).

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

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

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

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

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).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$k$  bu denklemde emme izoterminin eğimini gösteren sabittir.

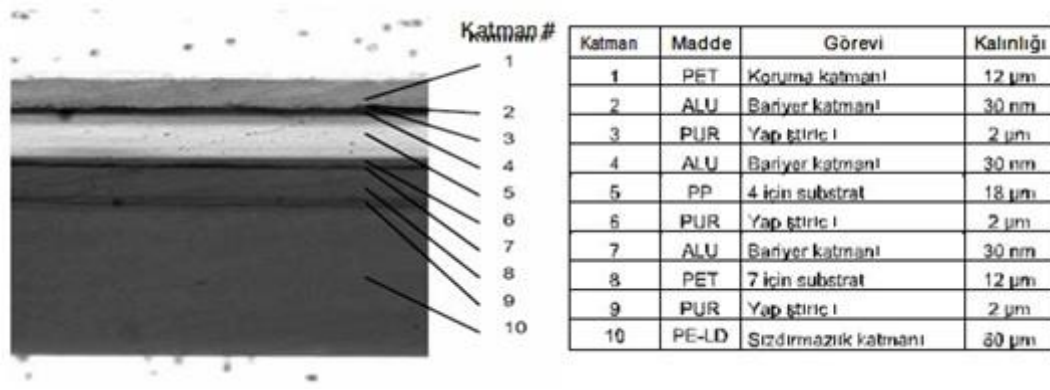


Denklem 4.15'te görüleceği üzere, sıcaklık ve bağıl nem faktörlerinin her ikisi de VIP üzerine etki eden nem taşınımına etki eder. Sıcaklığın artmasıyla birlikte doyma basıncı eksponansiyel olarak artış gösterir. Bu değerlerin artışı, bağıl nemde dikkate alındığında, su buharı basınç farkının daha da artmasına neden olacaktır. Bu nedenler nem transferinin önemli biçimde artmasına yol açacaktır. Denklemde sabit  $k$  faktörü, 60%'a kadar olan bağıl nemde, silika emme izotermine yaklaşık olarak 0.08% kütle orantılı olarak ele alınabilir.

#### 4.4.3 Vakum İzolasyon 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 yüksek bir bariyer tabakasına kapatılır ve içerisindeki basınç 1 mbar'ın altına inecek şekilde boşaltılır. Bariyer tabakalar ihtiyaç duyulan uzun bir servis süresi için ve nem ile havanın çok düşük oranlardaki sızıntılarına karşı en uygun hale getirilir. Gaz bariyeri havaya ve neme karşı yalıtım sağlanmasına yardımcı olurken dolgu malzemesi de yalıtım kapasitesini artırır. İçi boşaltılmış dolgular oda sıcaklığında hemen hemen 0.004 W/(m·K) ısı iletkenliğe sahip olur.

ISO 6707-1'ye göre servis ömrü, ilk kurulum yapıldıktan sonra malzemenin performans şartlarını karşılaması için geçen süreye denir. VİP'lerin servis ömrü esas olarak vakum seviyesine 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 görüldüğü gibidir.



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

Benzer yapıdaki bir bariyer fim 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.

Artık günümüzde üretilen farklı vakum izolasyon panellerde 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<br>( $\text{cm}^3/\text{m}^2\text{d}$ ) | WVTR<br>( $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ ) |
|--------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 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                                    |

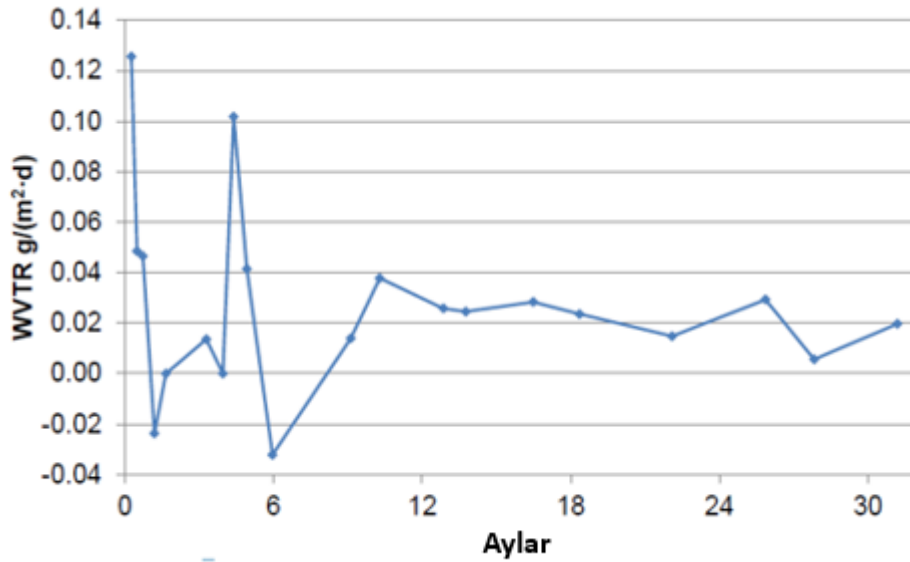
Avrupa’da yalıtım malzemelerinin ısı iletimi değeri EN 13162 normuna uygun olarak 25 yıllık performans değerinin ortalaması olarak belirlenir. Literatürdeki bilinen tüm malzemeler sıcaklık, nem, radyasyon gibi çevre koşulların değişimine bağlı olarak değişim gösterirler. Garnier ve arkadaşları 2011’de VİP zarfına etkide bulunarak dayanıklılığını etkileyen tüm faktörleri tanımlamıştır. Zararlı koşulların tanımlanması için laminasyon içinde farklı yapıştırıcılar test edilmiştir. Alüminyum-oksit asidik ( $\text{pH} < 4$ ) ve alkalik ortamlarda ( $\text{pH} > 9$ ) stabil bir performans göstermemiştir. İçme suyunun içerisinde bulunan florid iyonları metale zarfa bozunma oluşturan 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 VİP,  $65^{\circ}\text{C}$  ve 75% bağıl nem koşullarında 1 yıl boyunca depolanıp incelenmiştir. 100 gün sonunda lamine zarf mekanik olarak deforme olmuş fakat fonksiyonelliğini sürdürmeye devam etmiştir. Bir yıl içerisinde, lamine zarf ciddi anlamda zarar görerek içerisi hava ile dolmuştur. Başka bir deneyde ise, VİP’ler 8 saat boyunca  $80^{\circ}\text{C}$  ve 80%, 4 saat boyunca da  $25^{\circ}\text{C}$  ve 50% bağıl nemde periyodik olarak depo edilmiştir. 26. Günün sonunda alüminyum okside olmuş zarfın üzerindeki bazı noktalar şeffaflaştı (Brunner et al., 2008). Fakat yine de bu kimyasal değişim tüm paneller hava ile dolmadığı için servis ömrünün sonu anlamına gelmeyebilir (Simmler et al., 2005).

30-50 yıllık bir VİP 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 VİP içerisinde basınç artışı olacağı için, oksijen ve su buharı transferi düşüş gösterecektir. 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 metale 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 metale polimer her biri 100 nm olacak şekilde laminasyondan kesilerek çıkarılır. Numuneler  $23^\circ\text{C}$  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 and Brunner (2005) VİP'lerin sabit ve dinamik iklim şartlarındaki durumunu incelemişlerdir. Bu çalışmalar neticesinde VİP içerisindeki basınç ve nem artışının Arrhenius denkleminde 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  $\lambda_0$  (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 denkleminde 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  $6.6 - 7.0 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  değerlerine artmışken beklenen değer ise sadece  $5.6 \text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  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 artırıyor bu da ısı iletiminin artmasına sebebiyet veriyordu. Morel *et al.* (2009) 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). VIP’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 yapılabilecektir.

## 5 SAYISAL ÇALIŞMA

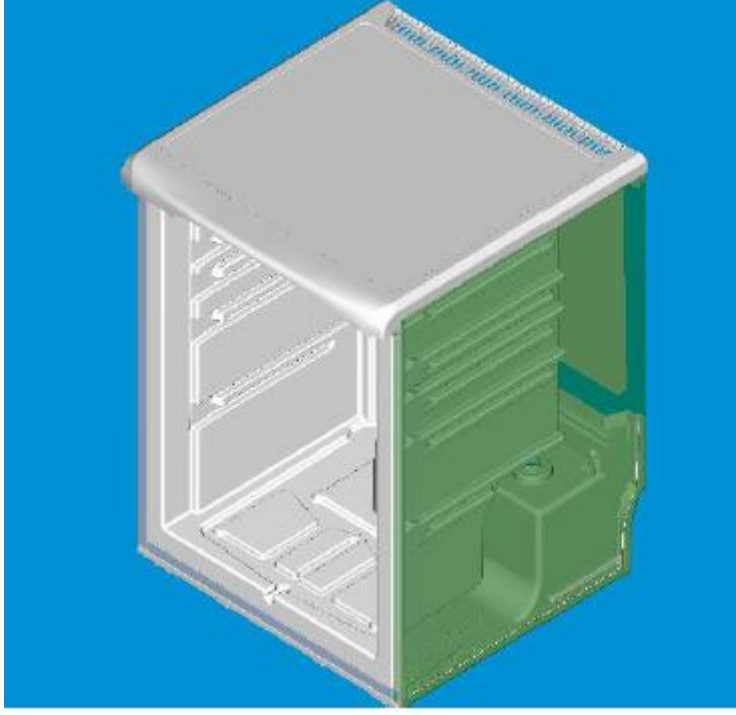
Tez konusunda belirlenen yöntem kapsamında, ev tipi bir dondurucuda vakum izolasyon panel kullanımının enerji tüketimine etkisi ve üzerindeki yaşlanmanın incelenmesi amacıyla, ilk olarak bilgisayar ortamında sayısal çalışma yapılacaktır. Bu analizlerde, enerji tüketimi testi koşullarında kararlı çalışma yapan ürünün, dondurucu duvarlarında gerçekleşen ısı transferi değerleri iki farklı durum için incelenecek ve iki durum arasında ısıl kazanç değerlerinde ortaya çıkacak farklılıklar değerlendirilecektir.

### 5.1 Modelleme

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

Biri yalıtım malzemesi olarak poliüretanın tek başına kullanıldığı dondurucu diğeri yalıtım malzemesi olarak monte edilmiş vakum izolasyon panelleri poliüretan ile birlikte kullanıldığı dondurucu olmak üzere iki farklı katı model oluşturulmuştur. İki model arasındaki yapısal tek 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

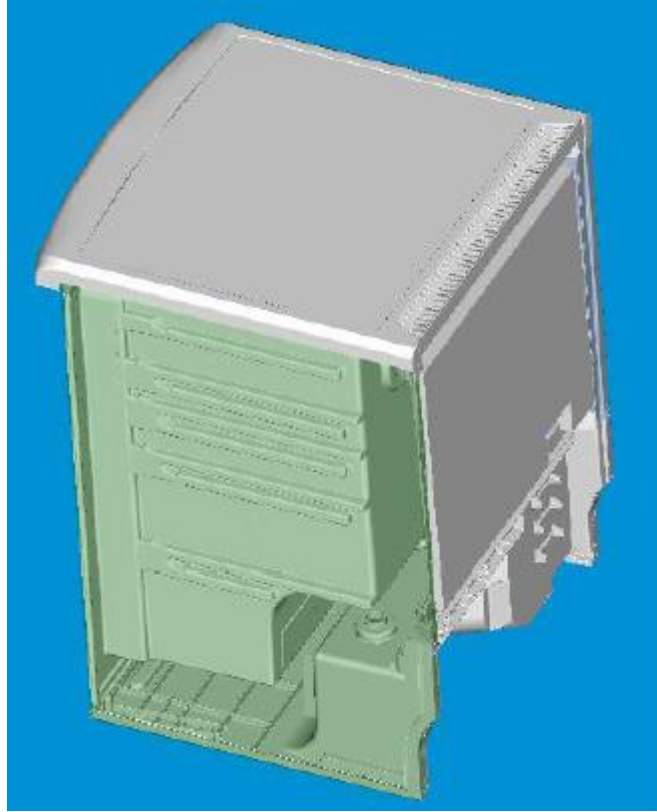
5.1 ve 5.2’de dondurucuya ait katı model mondaajından bazı görseller



verilmiştir.

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 farkın bilgisayar ortamında analizi için “star-ccm+ ” paket programı 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 soğutucu ve dondurucuların en dış katmanında paslanmaz çelikten imal edilmiş saclar kullanılır. İç gövde malzemesi olarak ise genellikle plastik tercih edilir. İç gövde plastiği ile dış sac arasında yer alan boşluk ise poliüretan köpük ile doldurulur. Soğutucu kapısı için kullanılan malzemeler, gövde grubunda kullanılan malzemelerle aynıdır. Kapı ile gövde arasında bulunan conta ve tutucular ise yine plastik esaslı malzemelerdir.

Tablo 5.1 de ev tipi soğutucu ve dondurucularda kullanılan malzemelerin genel özellikleri bulunmaktadır (ASHRAE, 2002).

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

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

Dış sac olarak kalınlığı 0,4-1 mm arasında soğuk şekillendirilmiş karbonlu paslanmaz çelik kullanılır. İç gövde plastiği malzemesi olarak ise HIPS (high impact polystyrene) veya ABS (acrylonitrile butadiene styrene) kullanılır. Yine ürünün bazı bölgelerinde PP (polipropilen) ve PET (polietilen) kullanımı da söz konusudur. Contalar ise vinil adı verilen malzemelerden yapılır. İç kısmında hava boşlukları kalacak şekilde katmanlı bir yapıya sahiptirler (ASHRAE, 2002).

Dondurucu dış kabuğunda kullanılan paslanmaz sacın kalınlığı 0,5 mm olup ısı iletim katsayısı 14,9 W/mK'dir (Incropera, 2003). İç gövde de kullanılan plastik malzeme olan HIPS için ortalama 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 ısı analiz 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, ısıt çiftlerinden yararlanılmış ve bu değerler TS EN 62552 standardında belirtilen methodlara uygun olarak yapılmıştır.

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

| Panel Pozisyonu | Kalınlık<br>mm | Boy<br>mm | Genişlik<br>mm | Adet | Hammadde    | Yoğunluk<br>kg / m <sup>3</sup> | Isı İletimi<br>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                 |



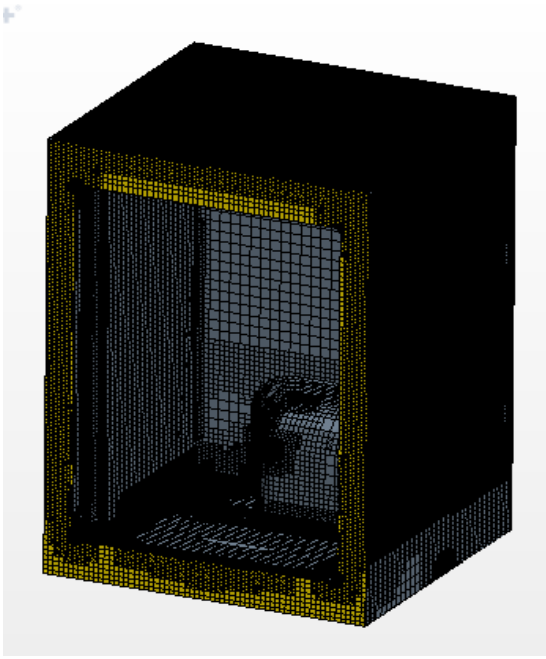
Şekil 5.3 Analizi yapılan ürüne ait bir kesit görünüş ve sınır koşullarının verilmesi (Müminoğlu,2016)

Vakum izolasyon panellerinin ısı iletim katsayısı üretici tarafından 0,0020 W/m.K olarak beyan edilse de yapılan tüm analizler 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 geçişi dik yönde 16-20 mm kalınlıkta seçilmişlerdir (Bölüm 6.2).

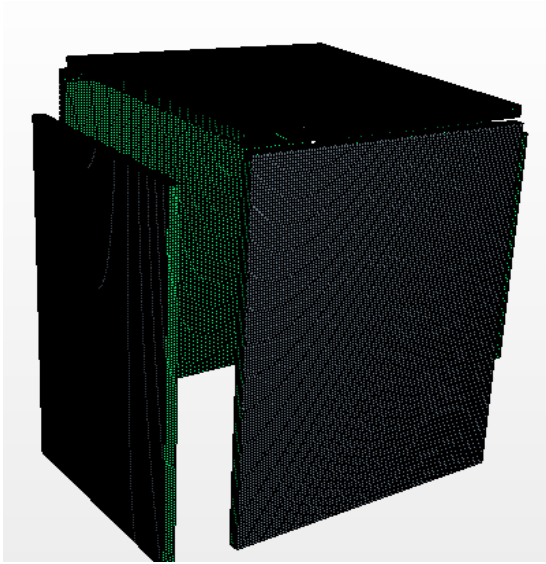
Kullanılan PU’nın ısı iletim katsayısı ilk örneklemede 0,01946 W/mK olarak ölçülmüştür. Bu değer, dondurucudan belli bir düzende alınan numunelerle gerçekleştirilen ısı iletim katsayısı ölçüm deneylerinden elde edilen değerdir. PU kalınlıkları bölgelere göre değişkendir. Bölüm 6.3’te yapılan ölçümler 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 ilk olarak genel ağ boyutu olarak belirlenmiştir. Katı modeller montaj halinde olduğu için, montajda yer alan her bir parça arasındaki temas yüzeylerinde kontak ağ boyutu ayrıca tanımlanmıştır. Ağ yapısı ile ilgili olarak daha farkı veya detaylı yapılar kullanmanın, sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür.



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



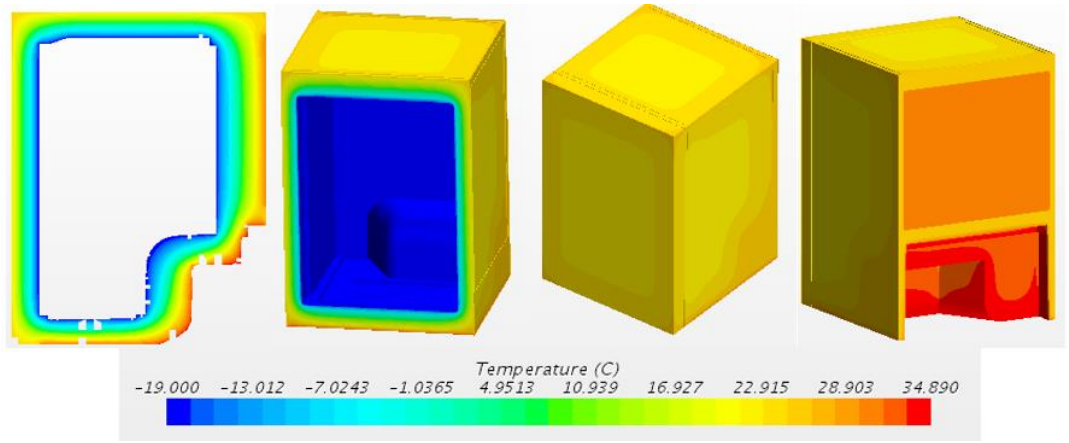
Şekil 5.5 VIP'lerden alınan bir ağ yapısı görüntüsü (Müminoğlu, 2016)

## 5.4 Analizler

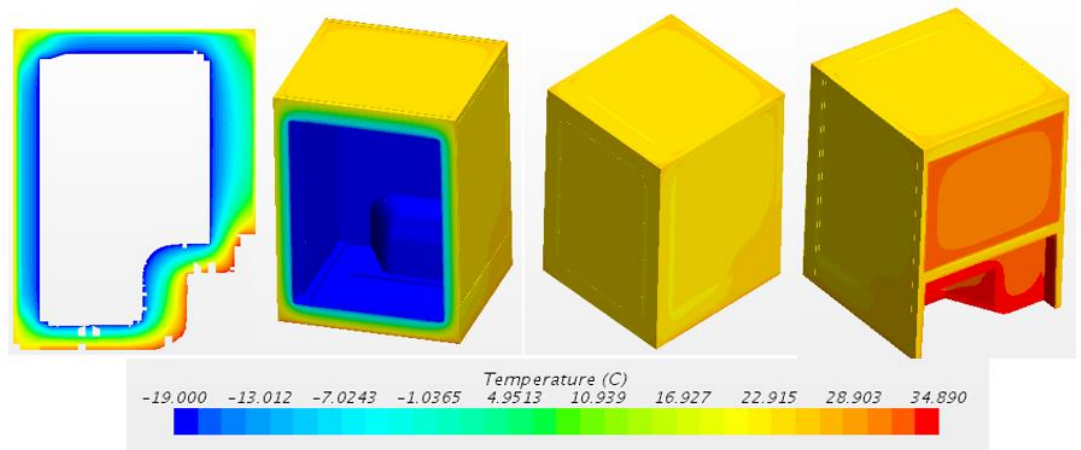
STAR - CCM+ paket programında yapılan bilgisayar analizlerinde standart ve VIP'li dondurucunun farklı yaşlanma koşullarındaki ısı analizleri yapılmıştır. Toplam olarak 8 farklı analiz yapılmış olup her bir analiz için toplam ısı kazancı değeri ayrı ayrı elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda elde edilen bu değerler, gerçek ürün üzerinde yapılan enerji tüketimleriyle

karşılaştırılmıştır.

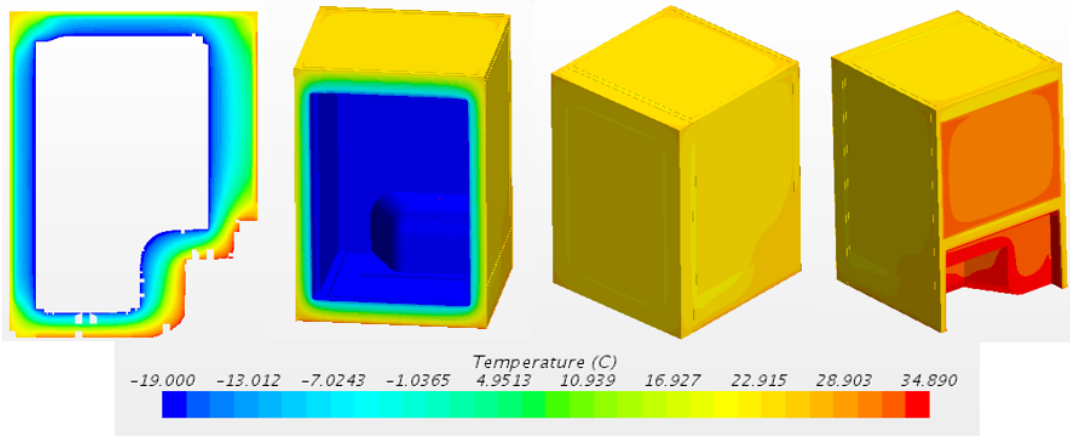
Bu bölümde çalışılan yaşlanma analizlerinde VİP için Bölüm 6.2’de, Poliüretan için Bölüm 6.3’de yapılan ısı transferi katsayısı ölçümleri referans alınmıştır. Analizlerde kullanılan sağ ve sol duvarlar özdeş olarak kabul edilip, dış duvar sıcaklığı  $25.0^{\circ}\text{C}$ , iç duvar sıcaklığı  $-18.0^{\circ}\text{C}$  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.



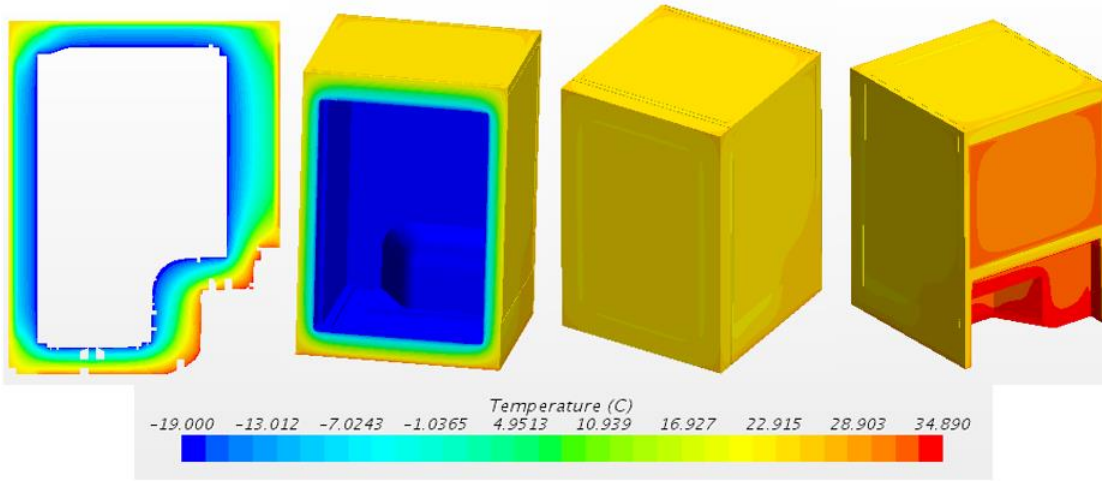
Şekil 5.6 VİP’siz ürüne ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



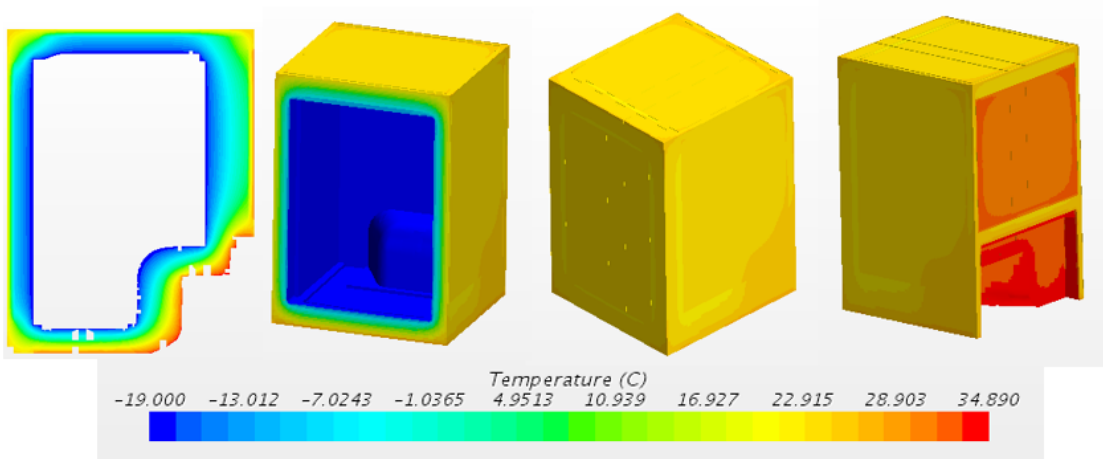
Şekil 5.7 VİP’li ürüne ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



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

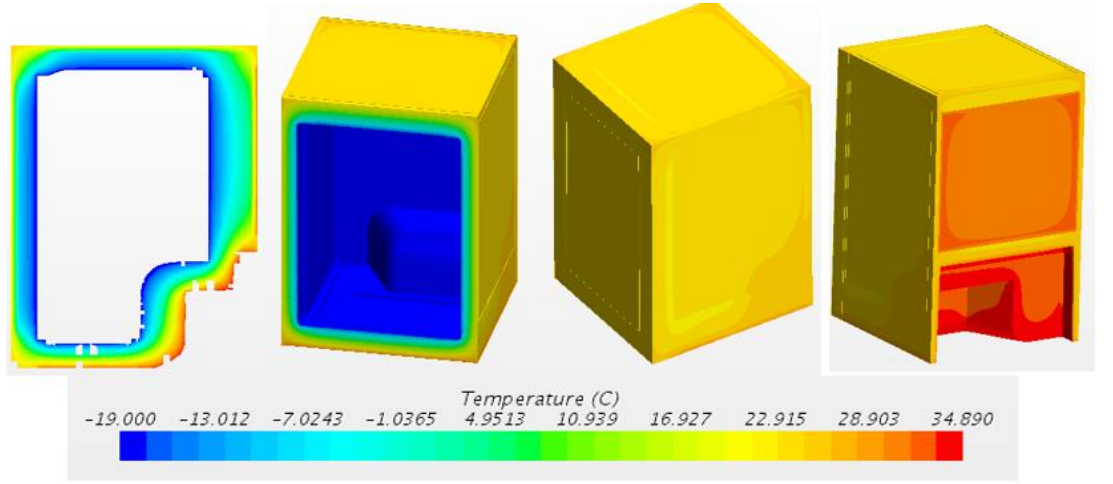


Şekil 5.9 VIP'li ürünün 32. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili  
(Müminoğlu, 2016)

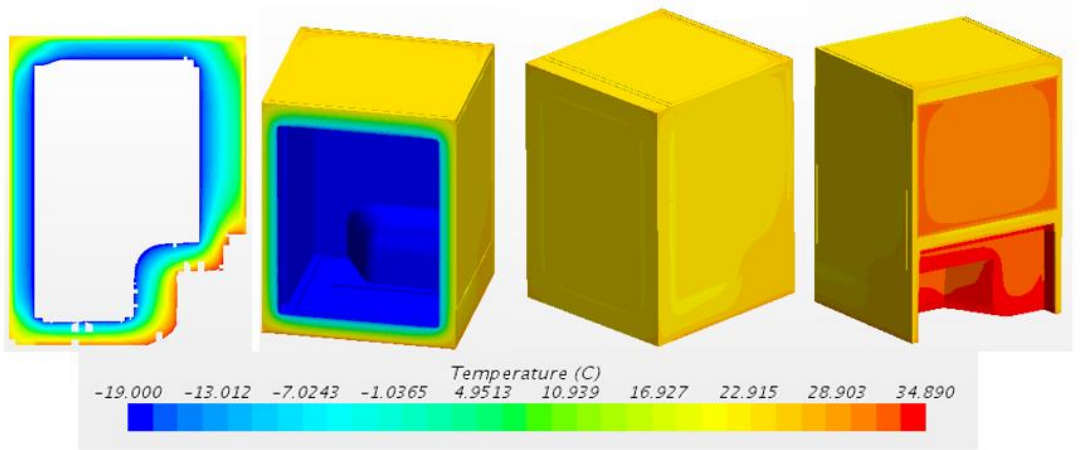


Şekil 5.10 VIP'li ürünün 55. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili  
(Müminoğlu, 2016)

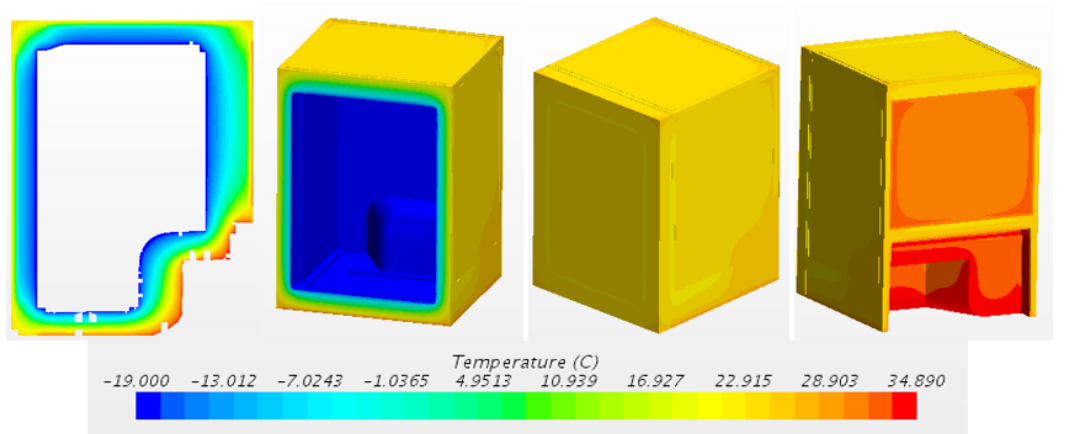




Şekil 5.11 VIP’li ürünün 61. gününe ait enerji tüketim koşullarındaki sıcaklık profili (Müminoğlu, 2016)



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



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

## 6 DENEYSEL ÇALIŞMA

Deneysel çalışmalar kapsamında, Bölüm 6.5’de açıklanan yöntemle uygun olarak bir adet standart dondurucu ve bir adet VIP’li dondurucunun üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar kapsamında ürünün üretim standartlarına uygun olarak üretilebilmesi için ön deneme üretimleri düzenlenmiştir. Üretim aşamasının ardından ürünler ulusal ve uluslararası standartlara uygun olarak testlere alınmıştır. Çalışma kapsamında, ev tipi soğutucu ve dondurucuların farklı bölgelerindeki vakum izolasyon panellerinin kullanılması durumunda, enerji tüketiminde meydana gelecek değişimlerin ve yaşlanmanın ölçülmesi amacıyla, ev tipi tezgah seviyesi dondurucular üzerinde denemeler 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)

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

Dondurucu ürün üzerinde yapılan enerji ölçümlerinin paralelinde, Bölüm 6.2’de VİP ve Bölüm 6.3’de PU köpüğe 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 Soğutucular ve Genel Performans Kriterleri

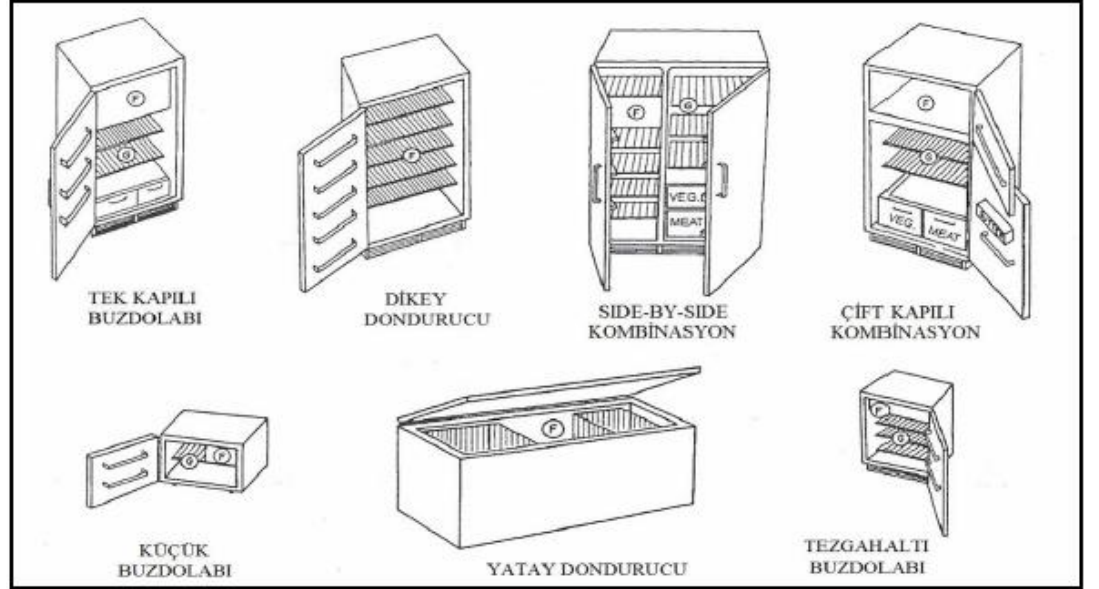
Standartlara göre soğutma cihazı; Soğutmanın bir veya birden fazla enerji tüketim düzeneği ile sağlandığı doğal dolaşım veya buzlanma yapmayan bir sistem vasıtasıyla soğutulan, evlerde kullanım için bir veya birden fazla bölmelere ve uygun hacme ve donanımına sahip fabrikada monte edilen yalıtılmış dolap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

Farklı coğrafi bölgelerde, değişik ihtiyaçlar için, çeşitli tiplerde soğutucuların kullanımı söz konusudur. ASHRAE 2002’de ev tipi soğutucu ve dondurucu tipleri yedi ana grupta verilmiştir. Bu tipler ticari olarak pazarda en çok paya sahip 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 bir veya daha fazla bölmesinin, gıda maddelerini ortam sıcaklığından  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'a düşürerek dondurmak ve ayrıca dondurulmuş gıdaları üç yıldızlı 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 soğutucu ve dondurucuların soğutma sistemleri tasarımındaki en temel parametrelerden biri cihazın çalıştığı dış ortam sıcaklığıdır. Bu sıcaklık değeri, soğutucunun hem mekanik tasarımı hem de soğutma sistemi tasarımında önemli dereceden 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 standart olarak belirlenmiştir. Soğutucuların tasarımı öncelikli olarak bu iklim sınıflarına göre yapılmaktadır. Bu iklim sınıfları Çizelge 6.1de 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 °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 soğutucuların tasarımı sırasında çok büyük önemi olan diğer bir karakteristik özellik de soğutucu iç hacminin sıcaklık değeri ya da diğer bir deyişle depolama sıcaklığıdır. Depolama sıcaklıklarının depolonacak 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<br>bölmesi | Gıda<br>dondurucu<br>ve üç yıldızlı | İki<br>yıldızlı<br>bölme/ | Bir<br>yıldızlı<br>bölme/ | Kiler bölümü | Soğutma<br>bölmesi |
|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
|                               |                                     |                           |                           |              |                    |

| $t_{1m}, t_{2m}, t_{3m}$               | $t_{ma}$  | bölme/dolap<br>$t^{***}$ | dolap<br>$t^{**}$ | dolap<br>$t^*$ | $t_{cm}$                  | $t_{cc}$                 |
|----------------------------------------|-----------|--------------------------|-------------------|----------------|---------------------------|--------------------------|
| $0 \leq t_{1m}, t_{2m}, t_{3m} \leq 8$ | $\leq +4$ | $\leq -18^a$             | $\leq -12^a$      | $\leq -6$      | $+8 \leq t_{cm} \leq +14$ | $-2 \leq t_{cc} \leq +3$ |

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 VIP'ye Ait Termal Özelliklerin Değerlendirilmesi

Bu uygulamada, 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

Kullanılan vakum izolasyon panellerle ilgili beyan edilen bu değerlere ek olarak yaşlanma etkilerinin doğru değerlendirilmesi ve modellenmesi için 300 x 300 x 12 mm boyutlarında VIP 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 sonuncusu 227. Günde alınmak üzere 7 farklı güne yayılarak malzeme özelliklerindeki değişim ve yaşlanma etkileri takip edilmiştir.

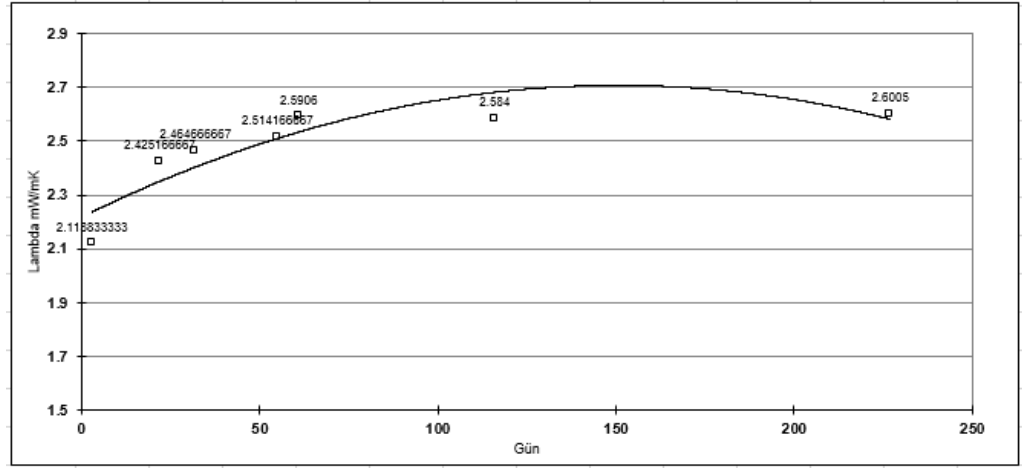
Çizelge 6.4 Birbirinden farklı 6 VIP numunesinden alınan ısı iletim katsayısı değerleri. Referans panel boyutu 250 x 250 mm, ısı iletimi W/mK birimindedir (Müminoğlu, 2016)

| 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 ısı özellikleri farklı metodlar kullanılarak tespit edilebilir. Kararlı haldeki sıcak plaka yöntemi en çok kullanılan ısı iletim katsayısı tespit yöntemlerinden birisidir,  $\lambda$  (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)

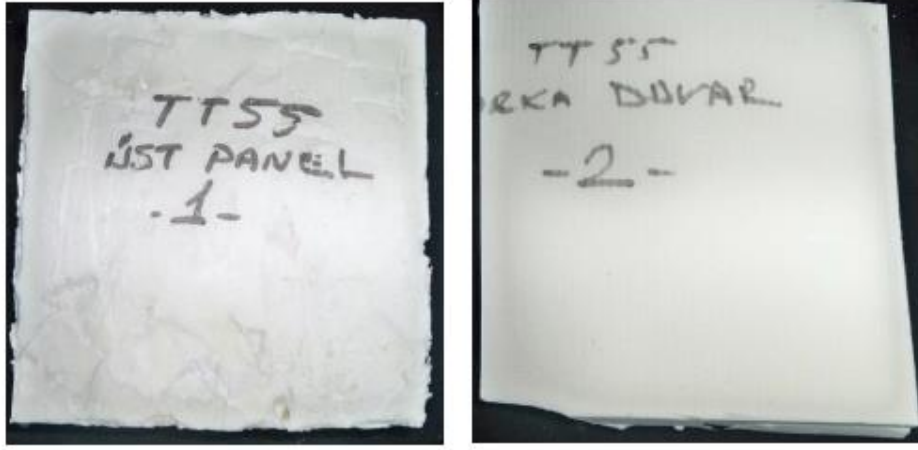




Şekil 6.4 VIP'den elde edilen ısı iletim katsayılarının 2. derece bir polinomsal eğriyle temsili  
(Müminoğlu, 2016)

### 6.3 Poliüretana Ait Termal ve Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

Poliüretan üzerindeki ısı iletim tespiti için VIP'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.

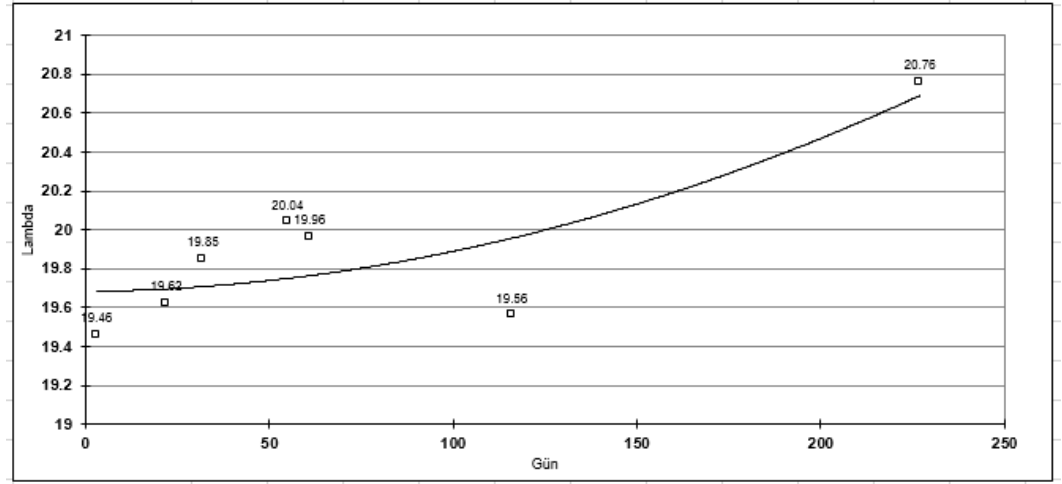


Şekil 6.5 Isı iletim katsayısı örneklenen PU numuneleri (Müminoğlu, 2015)

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.

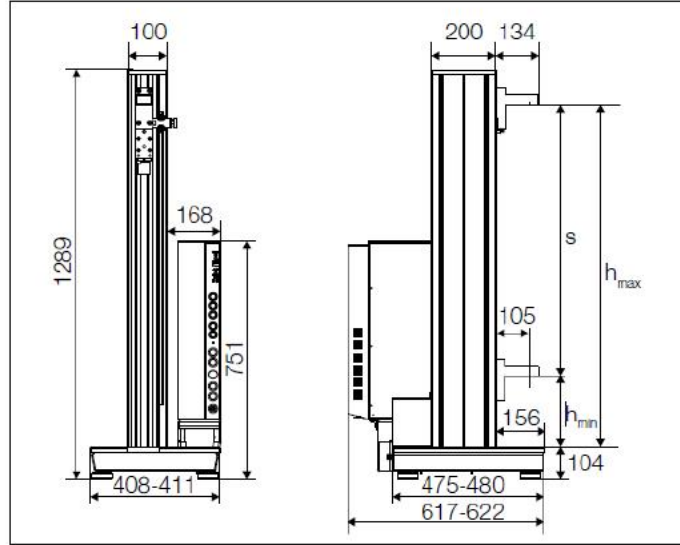
Çizelge 6.6 Poliüretan Test Raporu, Yoğunluk Testi (Indesit Laboratuvarları, 2015)

|                                                              |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |
|--------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|----------------------------------------------------|-------|-------|-------|---|---|-------------|----|----------------------------------|-------|------|------|-------|------|
| Indesit Company<br>Business Unit Cooling<br>Manisa Fabrikası |       | Form<br>Poliüretan Test Raporu /<br>Polyurethane Test Reports                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |       | Rapor No/Report Nr: G:22<br>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.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |
| <b>1- YOĞUNLUK DAĞILIM TESTİ / CORE DENSITY TEST :</b>       |       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |
| <p>Gövde(Cabinet)</p>                                        |       | 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 2     | 3                                                  | 4     | 5     | 6     | 7 | 8 | 9(Ara böl.) | 10 | Ortalama /<br>Average<br>(kg/m³) |       |      |      |       |      |
|                                                              |       | 31.01                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 31.98 | 32.66                                              | 31.62 | 31.50 | 30.44 |   |   |             |    |                                  | 31.54 |      |      |       |      |
| <p>Alt kapı/Lower door</p>                                   |       | <p>Kabul kriteri : Ortalama min.30 - 34 kg/m³ olmalıdır.</p> <p>Resimlerle belirtilen Gövde/Alt-üst kapılarda rakamlarla işaretlenen bölgelerden pü.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> |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |
|                                                              |       | <p>Yoğunluk(kg/m³)= <math>\frac{\text{Ağırlık(gram)}}{\text{Hacim(m³)}} \times 1000</math> Olarak hesaplanır.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |
|                                                              |       | <table border="1"> <tr> <td>Max.</td> <td>32.66</td> <td>Fark</td> </tr> <tr> <td>Min.</td> <td>30.44</td> <td>2.22</td> </tr> </table>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    | Max.                             | 32.66 | Fark | Min. | 30.44 | 2.22 |
| Max.                                                         | 32.66 | Fark                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |
| Min.                                                         | 30.44 | 2.22                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |
|                                                              |       | <p>Açıklamalar /Conclusion :<br/>OK</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |       |                                                    |       |       |       |   |   |             |    |                                  |       |      |      |       |      |

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

|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>2- BASMA MUKAVEMETİ TESTİ / COMPRESSIVE STRENGTH TEST :</b><br>Alınan numunelerde;<br>Minimum bulunan değer / Minimum value : 0.128 N/mm <sup>2</sup><br>Maximum bulunan değer / Maximum value : 0.172 N/mm <sup>2</sup><br>Ortalama değer / Average : 0.149 N/mm <sup>2</sup> | Ref : J2-26-MA<br><b>SONUÇ / RESULT :</b><br>OK |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|

Basma mukavemeti testleri için Zwick Z.2.5 model 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 tüketiminin, sıcaklık artış süresi ve gıda dondurma kapasitesinin kontrolü için;

- SN, N ve ST sınıfı cihazlar +25°C’de,

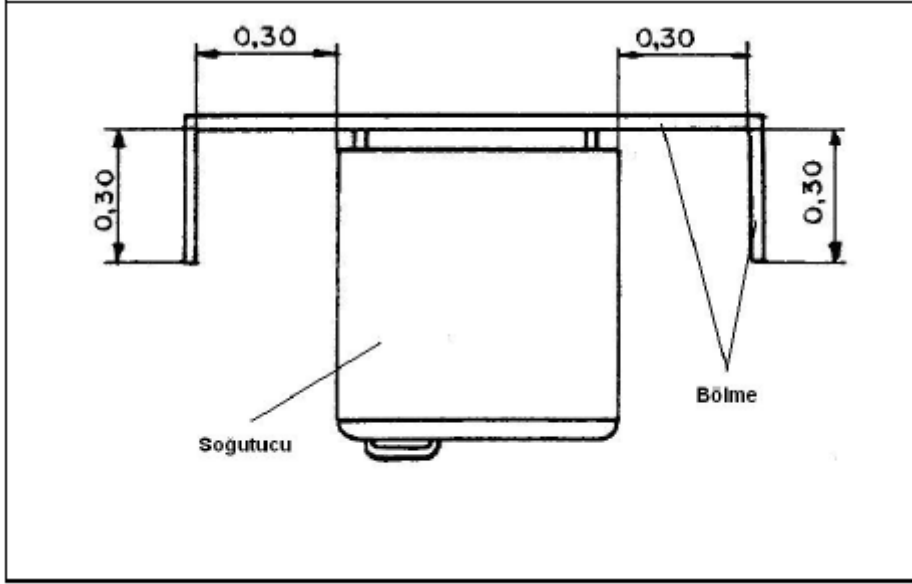
- T sınıfı cihazlar +32°C’de teste alınırlar.

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 ışıma 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 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 m yukarıda olmalı ve cihazın arka tarafı hariç bütün diğer kenarlarından itibaren düşey bölmeye kadar en az 0,3 m taşmalı, bu taşma 0,6 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 ara bir safhasında gerçekleştirilir. Gövde iç hacmi içerisine soğutma ve elektriksel sistem malzemeleri 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 çizgisel bağlantılarla sağlanır. İç gövde plastiği ve dış sac arasında kalan ve kalınlığı değişken boşluklar yüzünden yapı tek başına ayakta duramaz durumdadır.



Şekil 6.8 PU kürlenme aşamaları (BASF)

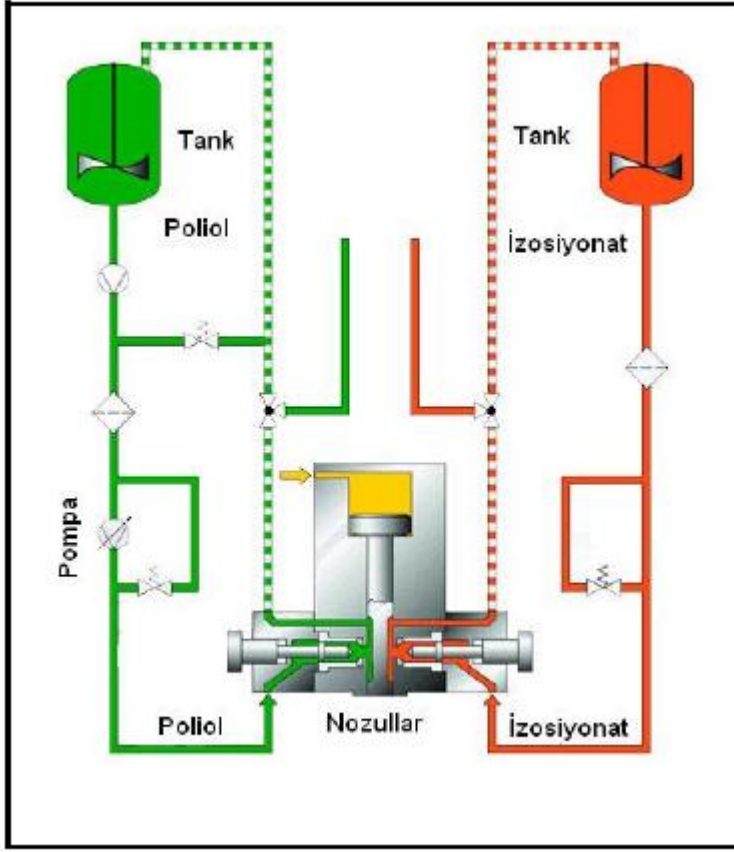
Bu aşamada dondurucu gövdesinin alt kısmında yer alan kompresör boşluğundaki bir delikten özel bir nozul ile gövdeye PU basılır. Bu işlem sırasında özel makineler kullanılmaktadır. PU malzemesini oluşturan Poliöl,

İzosiyonat ve C-Pentan, nozulun dondurucu gövdesine giren son kısmında sıvı halde karışır. Şekil 6.9’da seri üretim esnasında gövdeye PU basan makineler



ve Şekil 6.10’da bu makinelerin prensip şeması görülmektedir (Özçam, 2007).

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



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

Böylece PU'nin 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 PU dış gövde sacı ile iç gövde plastiği arasındaki tüm detaylara yayılır. Bu sayede PU katı bir hale gelir ve kendi başına ayakta durma özelliğine kavuşur. PU'nın kürlenme süreci, karışımın gövdeye basılmasından sonraki ilk birkaç dakikanın sonunda çok yavaşlar (Özçam, 2007). Şekil 6.11'de dondurucu kapı üzerine uygulanan PU



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



enjeksiyon prosesi gösterilmektedir.

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

| Panel Pozisyonu | Kalınlık<br>mm | Boy<br>mm | Genişlik<br>mm | Adet | Toplam<br>Hacim (m3) |
|-----------------|----------------|-----------|----------------|------|----------------------|
| 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             |

Çizelge 6.8 Dondurucu üründe kullanılan VIP'lerin boyut ve hacimleri

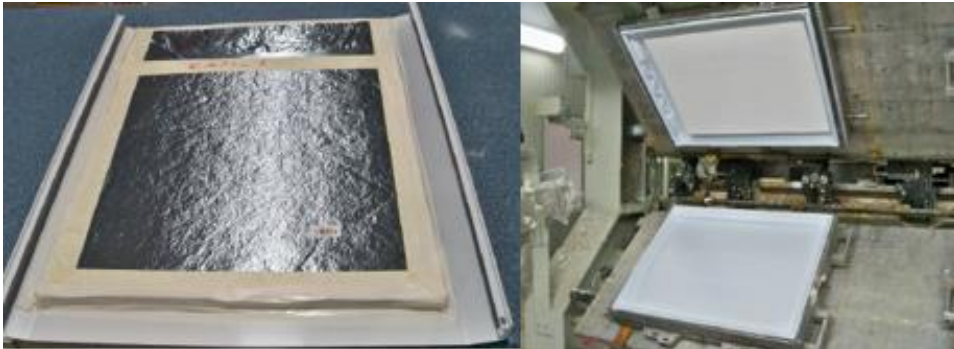
Birim malzeme yoğunluğu için VIP ile yerdeğiştirecek PU malzeme kütlesi hesaplanarak ürüne 3260 gr. PU enjekte edilmesine karar verilmiştir. Belirlenen değerin üretim açısından kabul edilebilmesi için, üretilen ürünlerde taşma vb. gibi herhangi bir estetik hatanın oluşmaması, mekanik ve termodinamik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



Şekil 6.13 VİP deneme üretim hazırlıkları(Müminoğlu, 2015)



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



Şekil 6.14 VİP'li kapı montaj ve PU enjeksiyon görüntüsü (Müminoğlu, 2015)

## 6.6 Performans ve Enerji Deneyleri

Bölüm 6.4’de anlatıldığı üzere hazırlanan VIP’li soğutucu 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 geçerli sayılacağı 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 tpi ısıl çift
- Ölçüm sistemi programı



Şekil 6.15 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 6.16 T tipi ısı çifti

Deneylerde kullanılan deney paketleri, dikdörtgen paralel yüzölçümü biçiminde 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 delikler veya çatlaklar olmamalıdır.

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

| Boyutlar<br>mm | Tolerans<br>mm       | Kütle<br>g | Tolerans<br>% |
|----------------|----------------------|------------|---------------|
| 25 x 50 x 100  | 25 ve 50             | 125        | ± 2           |
| 50 x 50 x 100  | boyutları için       | 250        |               |
| 50 x 100 x 100 | ± 2,0                | 500        |               |
| 25 x 100 x 200 | 100 ve 200           | 500        |               |
| 50 x 100 x 200 | boyutları için ± 3,0 | 1000       |               |

Soğutma cihazının imalatçının talimatına uygun olarak asgari süre ile ve bu süre içinde sıcaklık kontrol ayarında/ayarlarında 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 kalması konusunda anlaşmaya varıldığında, 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 dondurucularda ve soğutucu/dondurucularda ise deney 72 saat sonra sonlandırılmalıdır (TS ISO EN 62552).

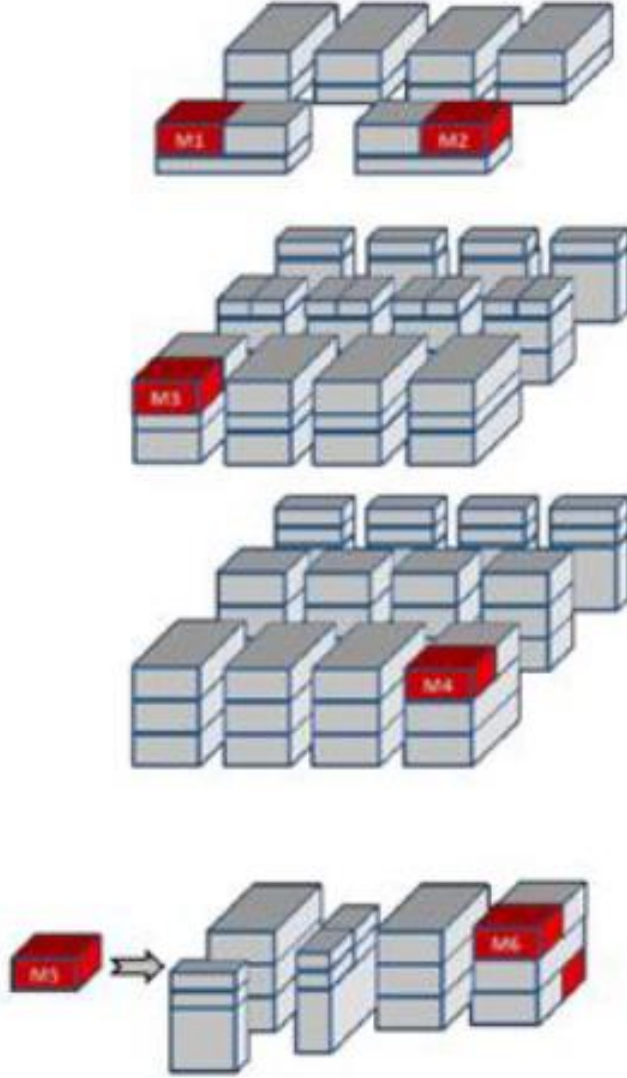
Çizelge 6.10 Enerji tüketiminin tayin edilmesi için enerji depolama sıcaklığı şartları (TS ISO EN 62552)

| Enerji deneyi için depolama sıcaklığı | °C                                         |                   |                  |                   |                                                                                     |                   |                   |                   |                                                           |        |
|---------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------|--------|
|                                       | Soğutucular ve Tip I soğutucu-dondurucular |                   |                  |                   | Gıda dondurma bölmesi sıcaklık kontrol elemanına sahip Tip II soğutucu-dondurucular |                   |                   |                   | Dondurulmuş gıda depolama dolapları ve gıda dondurucuları |        |
|                                       | a                                          | b                 | c                | d                 | e                                                                                   | f                 | g                 | h                 |                                                           |        |
| $t^{***a g}$                          | - 18 <sub>b</sub>                          | ≤ - 18            | ≤ - 18           | ≤ - 18            | - 18 <sub>c</sub>                                                                   | ≤ - 18            | - 18 <sub>c</sub> | ≤ - 18            | - 18                                                      | ≤ - 18 |
| $t^{**d g}$                           | ≤ - 12                                     | - 12 <sub>b</sub> | ≤ - 12           | ≤ - 12            | ≤ - 12                                                                              | - 12 <sub>c</sub> | ≤ - 12            | - 12 <sub>c</sub> | ≤ - 12                                                    | - 12   |
| $t_{ma}^{ef}$                         | ≤ + 5                                      | ≤ + 5             | + 5 <sub>b</sub> | ≤ + 5             | + 5 <sub>c</sub>                                                                    |                   | ≤ + 5             |                   | -                                                         | -      |
| $t_{cma}^f$                           | ≤ + 12                                     | ≤ + 12            | ≤ + 12           | + 12 <sub>b</sub> | ≤ + 12                                                                              |                   | + 12 <sub>c</sub> |                   | -                                                         | -      |

|          |           |           |           |           |           |           |   |   |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|---|
| $t_{cc}$ | $\leq +3$ | $\leq +3$ | $\leq +3$ | $\leq +3$ | $\leq +3$ | $\leq +3$ | - | - |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---|---|

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

Enerji deneyinin amacı, belirtilen şartlar altında, soğutma cihazlarının enerji tüketimini ölçmektir. Enerji testi denemeleri için test odası koşulları,  $25^{\circ}\text{C}$  sıcaklık ve % 50 bağıl nem olarak ayarlanmıştır. Dondurucunun termostat ayarı  $-18^{\circ}\text{C}$ '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 6.17 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 VIP uygulamasının üretim şartlarına adapte edilmesiyle beraber bir adet prototip hazırlanmıştır. Tez kapsamında belirtilen standartlardaki koşullara uygun olarak bilgisayar destekli analizler yapılmış ve deneysel çalışmalarla karşılaştırılmıştır.

Hazırlanan soğutucular 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.

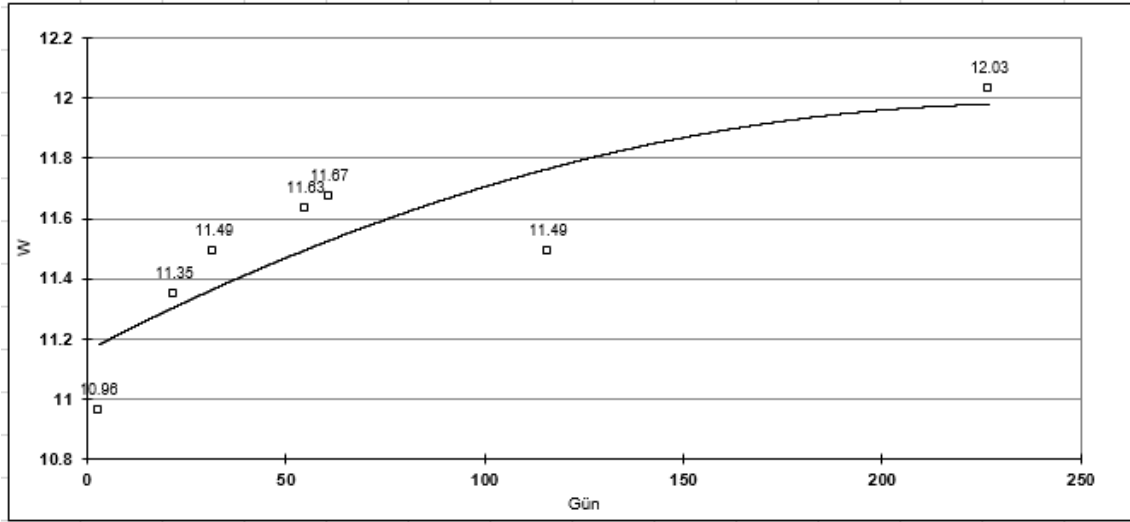
## 7.1 Sayısal Çalışmaya Ait Sonuçlar

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

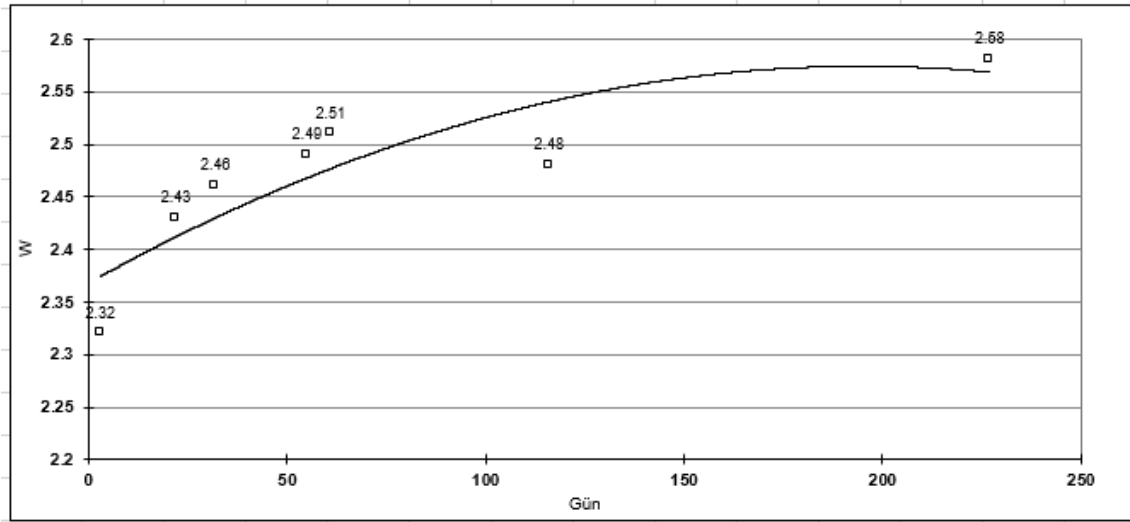
Çizelge 7.1 VIP'siz ve VIP'li ürüne ait ısı kazancı analizleri

| 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                   | [Evet,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)

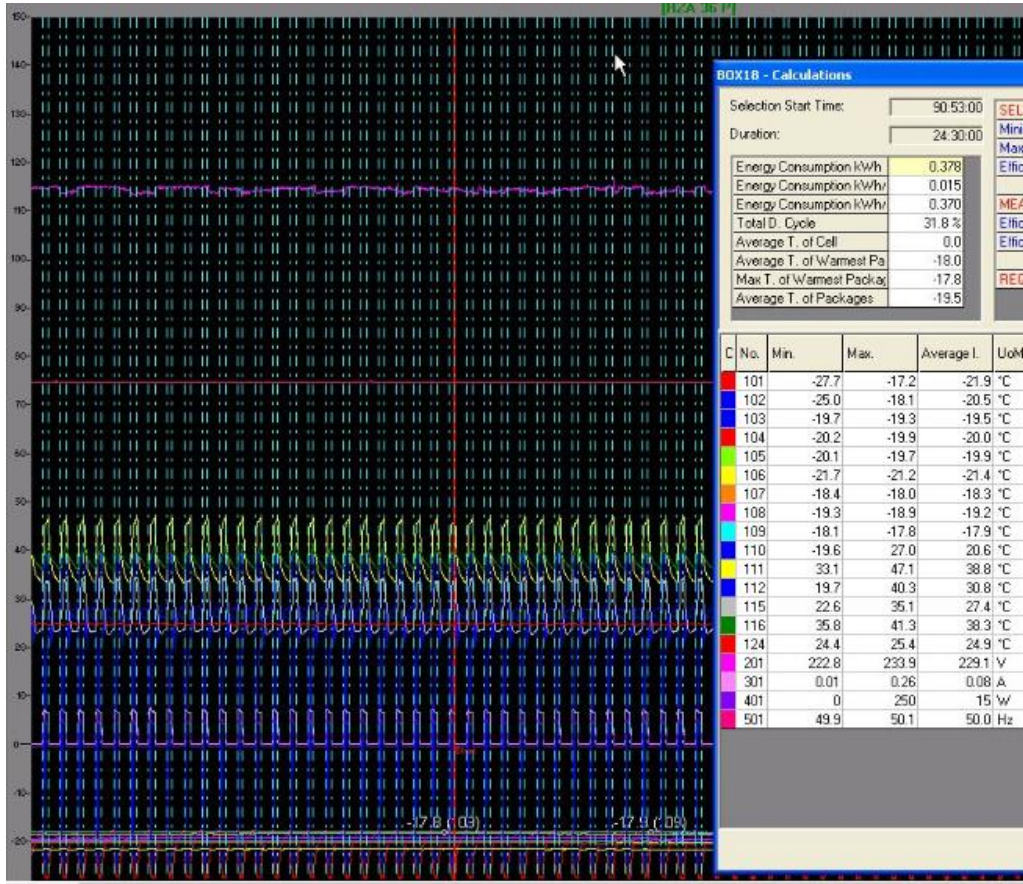
| MODEL : HOTPOINT UP 120 AA                                                                                     |             |        |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| VAKUM 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.

Çizelge 7.4 Örnek bir enerji tüketim testi raporu (Müminoğlu, 2015)

[illegible]

Şekil 7.4’de ise enerji sonuçlarının değerlendirildiği yazılıma air bir arayüz görüntüsü verilmektedir. Bu yazılım sayesinde sonuçları istenen periyotlar aralığında güncellenerek takip etmek ve kayıt altına almak mümkündür.

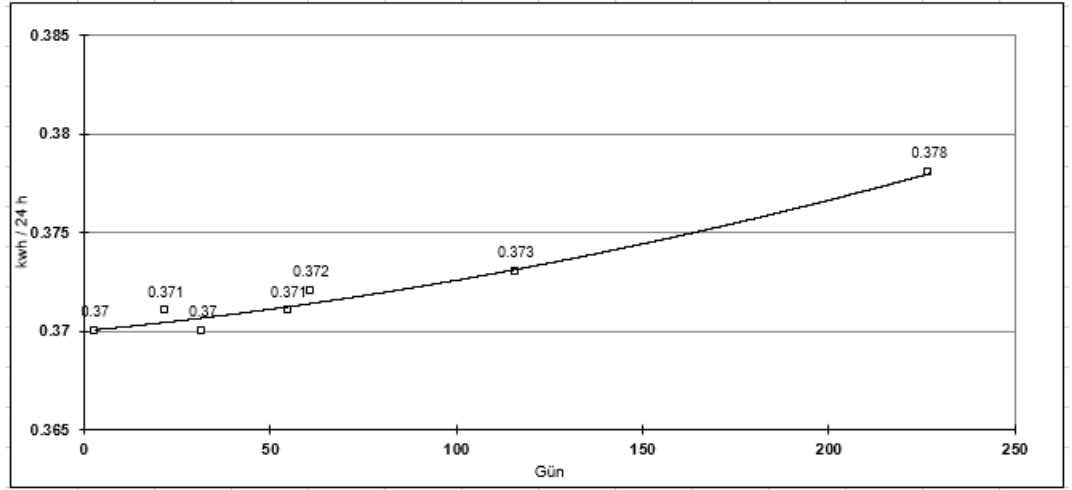


Şekil 7.4 VIP'li Prototipe Ait Örnek Bir Enerji Grafiği (Müminoglu, 2015)

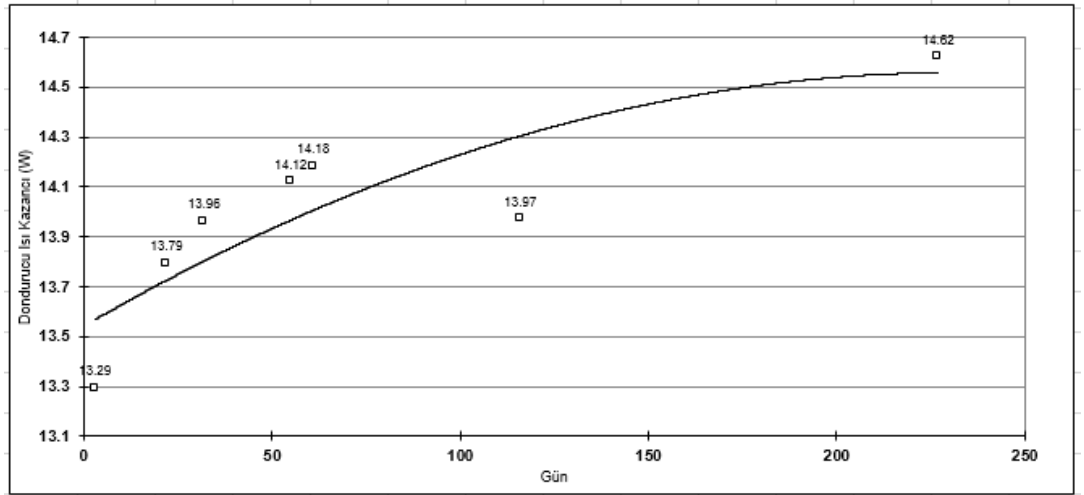
### 7.3 Sayısal ve Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

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'da 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 ürün ve test standartlarına göre farklılıklar gösterebilmektedir.

## 7.4 Sonuç, Değerlendirme ve Öneriler

Tez içeriğinde bir dondurucu üzerine uygulanan VIP'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 VIP boyut ve lokasyonları optimize edilerek daha da düşük seviyelere çekilebilir.

Yapılan testler göstermektedir ki VIP 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.

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

- VIP'siz dondurucu =  $0,505 \text{ kWh} / 24\text{h} \times 365 \text{ gün} = 184,325 \text{ kWh}$
- VIP'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 VIP'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 kullanımının küçük ölçekte tüketiciler ve büyük ölçekte ülke ekonomileri açısından ciddi bir tasarruf meydana getireceği aşikârdır.

Çalışmadan elde edilen VİP’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 2333333333.33 kWh’lik bir tasarruf potansiyelinden söz edilebilir. Bu potansiyel değerin ekonomik büyüklüğü, önümüzdeki yıllarda VİP üretim ve uygulamalarının gitgide artacağının göstergelerinden biridir.

Enerji alanındaki potansiyeline kıyasla ülkemizde ve dünyada VİP konusunda yapılmış bilimsel araştırma sayısı bir hayli azdır. Bu konuda yürütölen Ar-Ge çalışmaları da yeni yeni artış göstermeye başlamıştır. Oysa birçok sektöre ait ürün trendleri ve standartlar göz önüne alındığında VİP kullanımı giderek bir zorunluluk haline gelmektedir. Günümüzde VİP’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 VİP’lere ait ısı iletim katsayısı birçok faktöre bağımlı olarak artış göstermektedir. Sıcaklık, nem, zarf malzemesi ve çekirdek malzeme gibi birçok etmen VİP’deki yaşlanmanın fonksiyonuna etki ederken, ürün üzerindeki enerji tüketimi değişiminin yalnızca VİP 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

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

Aerogel (2013) [https://eetd.lbl.gov/newsletter/cbs\\_nl/nl08/cbs-nl8-aerogel.html](https://eetd.lbl.gov/newsletter/cbs_nl/nl08/cbs-nl8-aerogel.html). (Erişim Tarihi 25/01/2017)

Altınış, K. (2006). Isı Yalıtımı. İstanbul: Nobel Yayın Dağıtım

An introduction to VIP technology, Vacuum Insulation Panel Symposium, Baltimore, USA, May 3-4 (1999)

Shirtliffe, C.J., 1972, Thermal Resistance of Building Insulation., CBD-149. Institute for Research in Construction, National Research Council, Ottawa, Canada. (Shirtliffe, 1972)

Aga. 1985, *Gas Handbook*, Uppsala: Almquist & Wiksell, ISBN: 91-970061-1-4. (AGA, 1985)

American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers [ASHRAE]. (2002). Refrigeration Handbook (SI)

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* , 88 (11) 3592–3602 Alam *et al.* (2011)

A. Beck, F. Oswald, M. Binder “Influence of water content on the thermal conductivity of vacuum panels with fumed silica kernels” in: A. Beck et al. (Eds.), proceedings of the 8th International Vacuum Insulation Symposium, Würzburg, September 18-19 (2007) pp.1-9. 2007. Beck et al. (2007)

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

202, p.6054-6063, 2008. Brunner and Simmler (2008) (bölüm 4.3.5) Brunner *et al.* (2008)

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*, 100(0), 4-6. (Brunner and Ghazi Wakili, 2014)

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*, 378(1–3), 38-43. (Balard *et al.*, 2011)

Brunner, S. (2013). Discussions on the long-term durability prediction of VIP. (E-mail correspondence, June 2013 and November 2013). Dübendorf, Switzerland: Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology (Brunner, 2013).

Baetens, R., Jelle, B. P. and Gustavsen, A., 2011, Aerogel Insulation for Building Applications: A State-of-the-Art Review, *Energy and Buildings*, 43, 761-769. (Baetens *et al.*, 2011)

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*, vol. 42, p. 147-172, 2010 (Baetens *et al.*, 2010)

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*, vol. 202, p.6054-6063. (Brunner and Simmler, 2008)

Brunner, S., Stahl, T., and Ghazi Wakili, K., 2012b, Single and double layered vacuum insulation panels of same thickness in comparison, Proceedings of the Building Enclosure Science & Technology Conference, BEST 3: High Performance Buildings - Combining Field Experience with Innovation, April 2-4, 2012, Atlanta, GA, USA (Brunner, 2012b;)

Beck, A., Binder, M. ve Frank, O., 2009, VIP’lerde nem ve ısı iletkenliğinin dinamik simülasyonu, 9. Uluslararası Vakum izolasyon Sempozyum Bildirisi, Londra, UK

B. Hannenbauer, F. Menzel “The Combustion of SiCl<sub>4</sub> in Hot O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> Flames” Zeitschrift für anorganische und allgemeine Chemie, **629**, 1485-1490, 2003. (Hannebauer and Menzel 2003)

B. Morel, L. Autissier, D. Autissier, D. Lemordant, B. Yrieix, D. Quenard “Pyrogenic silica ageing under humid atmosphere” Powder Technology, **190**, 225-229, 2009. (Morel et al. 2009)

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

B. Morel, D. Autissier, L. Autissier, “Modifications of pyrogenic silica exposed to moist air” in: A. Beck, et al. (Eds.), Proceedings of the 8th International Vacuum Insulation Symposium, ZAE Bayern/UniWue, Würzburg, September 18–19, 2007, pp. 1–8, 2007 (Morel et al. 2007)

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. 2001. London BSI

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*. US Patent 7400999 B2. Caps (2004)

Caps, R., Beyrichien., Kraus, D. & Weismann, S. 2008. Quality Control of Vacuum Insulation Panels: Methods of Measuring Gas Pressure. Vacuum, 82, 691-699. (Caps et al., 2008)

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, 33, 151-156. (Caps et al. 2001)

Çoban, M. Turhan, *Soğutma Sistemlerinin Modellenmesi*.  
<http://www.turhancoban.com/kitap/sogutma.pdf> [09.02.2017 tarihinde erişime  
 açık]

Çoban, M. Turhan, *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“2008, İstanbul, 17-19 Aralık. (Deniz ve Binark,  
 2008).(bölüm 2.3.1) (Deniz vd., 2008)

Engel, T., and Reid, P., 2006, Physical Chemistry, San Fransisco: Benjamin  
 Cummings, ISBN: 0-8053-3842-X. (Engel and Reid, 2006)

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*,  
 September 18-19, 2009, London, UK Erbenich (2009)

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*,  
 September 18-19, 2009, London, UK Erbenich (2009)

Forsberg, J. and Sørensen, R. (2012). *VIP-paneler och högeffektiva  
 isoleringsmaterial - Analys och mätningar av Vakuumisoleringspaneler (VIP-  
 panels and high-efficient insulation materials - Analysis and measurements on  
 vacuum insulation panels)*. [In Swedish]. (Bachelor's thesis 2012:122).  
 Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, Department of  
 Civil and Environmental Engineering (Forsberg and Sørensen, 2012)

Fricke, J., Heinemann, U., and Ebert, H. P., 2008, Vacuum insulation panels –  
 From research to market, *Vacuum*, 82(7), 680-690. (Fricke et al., 2008)

Krishna, R. ve Wesselingh, JA. , 1997, Kütle transferinde Maxwell-Stefan  
 yaklaşımı, *Chem.Eng. Science*; 52: 861-911

Binz, A., Moosmann, A., Steinke, G., Schonhardt, U., Fregnan, F., Simmler,  
 H., Brunner, S., Ghazi, K., Bundi, R., Heinemann, U., Schwab, H., Cauberg,

H., Tenpierik, 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. (Binz, 2005) (Bölüm 3) (Binz, 2005)

Ghazı Wakılı, K., Stahl, T. and Brunner, S., 2011, Effective Thermal Conductivity of a Staggered Double Layer of Vacuum Insulation Panels, Energy and Buildings, 43, 1241-1246. (Ghazı Wakılı, 2011)

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*, 22(6), 847-856  
Garnier *et al.* (2011)

IEA (International Energy Agency) Energy Efficiency Market Report, 2016  
[https://www.iea.org/eemr16/files/medium-term-energy-efficiency-2016\\_WEB.PDF](https://www.iea.org/eemr16/files/medium-term-energy-efficiency-2016_WEB.PDF) (available 24/12/2016)

IEA/EBC Annex 65 Long-Term Performance of Super-Insulation in Building Components & Systems (2013)

K. Ghazı Wakılı, R. Bundi., B. Binder., 2004, Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels, Building Research and Information, 32, 293-299.  
(Ghazı Wakılı et al. 2004) (bölüm 4.1.2) Ghazı Wakılı, 2004 (bölüm 4.2.1)  
(Ghazı-Wakılı et al. 2004)

Manini, P., Rizzi E., Pastore, G and Gregorio, P. 2003. Advances in VIP design for süper insulation of domestic appliances, 54th Annivarsy International Aplliance Technical Conferences, West Lafayette, IN, U.S., March 10-12

M.K. Willems., K. Schild. and G. Hellinger., 2005, Numerical investigation on thermal bridge effects in vacuum insulating elements, In: M. Zimmerman (Ed.), Proceedings of the 7th International Vacuum Insulation Symposium, EMPA, Duebendorf, Switzerland, 28–29 September 2005, pp. 145–152.  
(Willems et al.2005)

Mukhopadhyaya, P. , 2006, High performance vacuum insulation panel-research update from Canada, Global Insulation Magazine: 9-15. (Mukhopadhyaya, 2006)

Lu, X., Arduini-Schuster, M. C., Kuhn, J., Nilsson, O., Fricke, J., and Pekala, R. W. , 1992 , Thermal Conductivity of Monolithic Organic Aerogels, *Science*, 255(5047), 971-972. (Lu et al., 1992)

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*, 28(4), pp.357-374. (Schwab et al. 2005a)

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*, 28(4), pp.293-317. Schwab et al. (2005a,b)

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*, 28(4), pp.319-326. Schwab et al. (2005 a,b,c)

Simmler, H. and Brunner, S., 2005, Aging and service life of VIP in buildings, In 7th international vacuum insulation symposium proceedings (pp. 15-22). Simmler & Brunner (2005a,b)

Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K. ve Mukhopadhyaya, P, Vakum izolasyon Panelleri – VIP üzerinde çalışma – Bina Uygulamalarında komponent ve Panellerin kullanım Ömrü (Subtask A). IEA/ECBCS Annex 39 Raporu, Binalar ve İnşaat Sistemleri için Yüksek Performanslı Isı Yalıtımı 2005: [http://www.ecbcs.org/docs/Annex\\_39\\_Report\\_Subtask-A.pdf](http://www.ecbcs.org/docs/Annex_39_Report_Subtask-A.pdf) [26.04.2010 tarihinde erişime açık]

Simmler, H. ve Brunner, S., 2005 , Bina uygulamaları için Vakum izolasyon panelleri: Başlıca özellikler, yaşlanma mekanizmaları ve servis ömrü , *Enerji ve Yapılar*; 37: 1122-1131

Schwab, H., Heinemann, U., Beck. A., Ebert, HP. ve Fricke, J., Silika çekirdekli Vakum izolasyon panellerinin kullanım ömrünün tahmin edilmesi. *Journal of Building Physics* 2005; 28: 357-374

Sun J. And Lin, J. 1999. The development od energy efficient refrigerators by Industrial Technology and Research Instute, 50th Anniversy International Aplliance Technical Conferences, Taiwan, May 10-12

Sprengard Ch., and Spitzner, M.H.,2011, Untersuchungen zu Alterung und Wärmebrücken bei Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) für Bauanwendungen, *Bauphysik*, 33 (4) 234-242 Sprengard ve Spitzner, 2011 (bölüm 3), (Sprengard ve Spitzner, 2011)

H. Simmler, S. Brunner, “Vacuum insulation panels for building application. Basic properties, ageing mechanisms and service life”, *Energy and Buildings* **37**, 1122-1131, 2005b Simmler & Brunner (2005b) (bölüm 4.3.2) (Simmler and Brunner 2005b). (bölüm 4.1.2) (Simmler *et al.*, 2005)

L.T. Zhuravlev “The surface chemistry of amorphous silica. Zhuravlev model” *Colloids and Surfaces A:Physiochemical and Engineering Aspects*, **173**, 1-38, 2000. (Zhuravlev 2000)

U. Heinemann “Influence of water on the total heat transfer in ‘evacuated’ insulations” *International Journal of Thermophysics*, **29**, 735-749, 2008.( Heinemann 2008 ) (bölüm 4.3.4) Heinemann (2008)

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

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

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

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

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

TS EN 13167.(2010). Isı Yalıtım Ürünleri – Binalarda Kullanılan – Fabrika Yapımı Cam Yünü Ürünleri - Özellikler

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

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

TS EN 62552 (2013). Ev Tipi Soğutma Cihazları – Karakteristikler ve Deney Yöntemleri

Tenpierik. M, van Der Spoel W, Cauberg. H, 2007, Vakum izolasyon Paneli kullanım ömrü için basitleştirilmiş bir analitik model, 8. Uluslararası Vakum izolasyon Sempozyum Bildirisi, Würzburg, Germany.

Tenpierik, M. J., Cauberg, J. J. M. and THORSELL, T. I., 2007, Integrating Vacuum Insulation Panels in Building Constructions: an Integral Perspective, Construction Innovation, 7,38-52. (Tenpierik ve Cauberg, 2007)

## ÖZGEÇMİŞ

1984 yılında Bursa'nın Osmangazi ilçesinde dünyaya gelen Fatih Müminoğlu, ilköğretimini Bursa Uludağ İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra lise öğretimini Bursa Cumhuriyet Lisesi'nde gerçekleştirmiştir. Lisans eğitimini Ege Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde tamamlayıp halen aynı bölümde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Akademik kariyerinin yanı sıra; Vestel Beyaz Eşya ve Indesit Company Beyaz Eşya San. ve Tic. A.Ş. şirketlerinde, buzdolabı fabrikası Ar-Ge bölümlerinde çeşitli görevlerde bulunmuştur. 2011 yılından bu yana çalışmakta olduğu Indesit Company şirketinde, Fonksiyonel Takım Liderliği sonrasında Senior Mühendislik görevini sürdürmektedir.

## 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);
```

```
  }//şart1
```

```
    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+=ck*((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  $f(x)$  = 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
polinomials");

Plot pp=new Plot(x,y);

pp.setPlabel("Curve fitting with cubic spline interpolation polinomials");

pp.setPlotType(0,20);

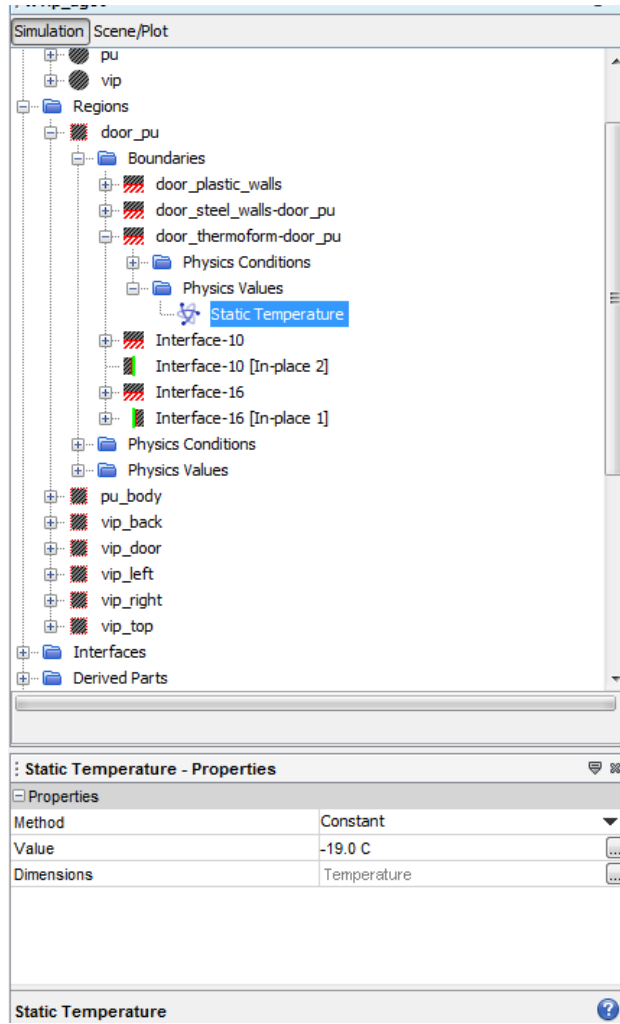
pp.addData(z3[0],z3[1]);

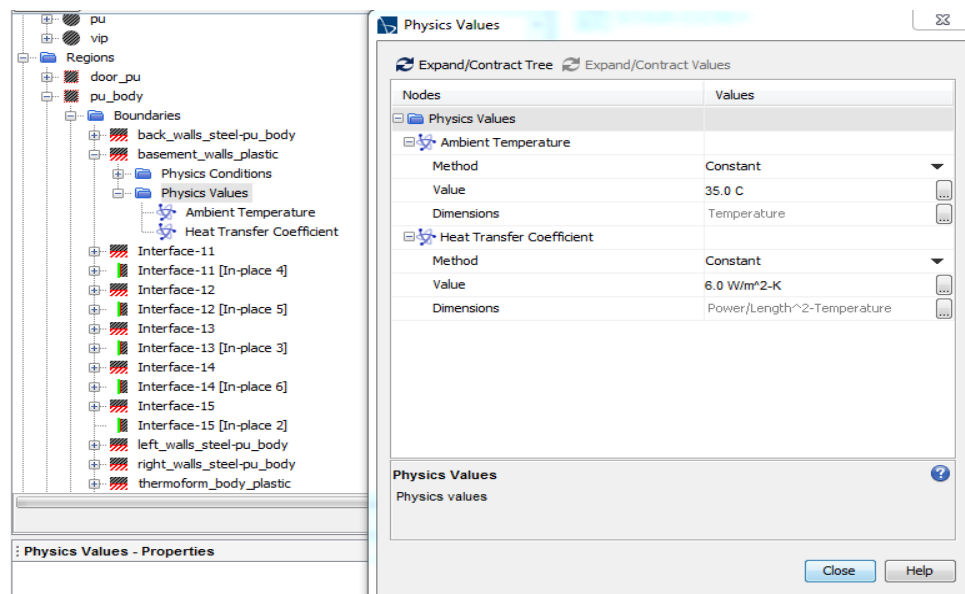
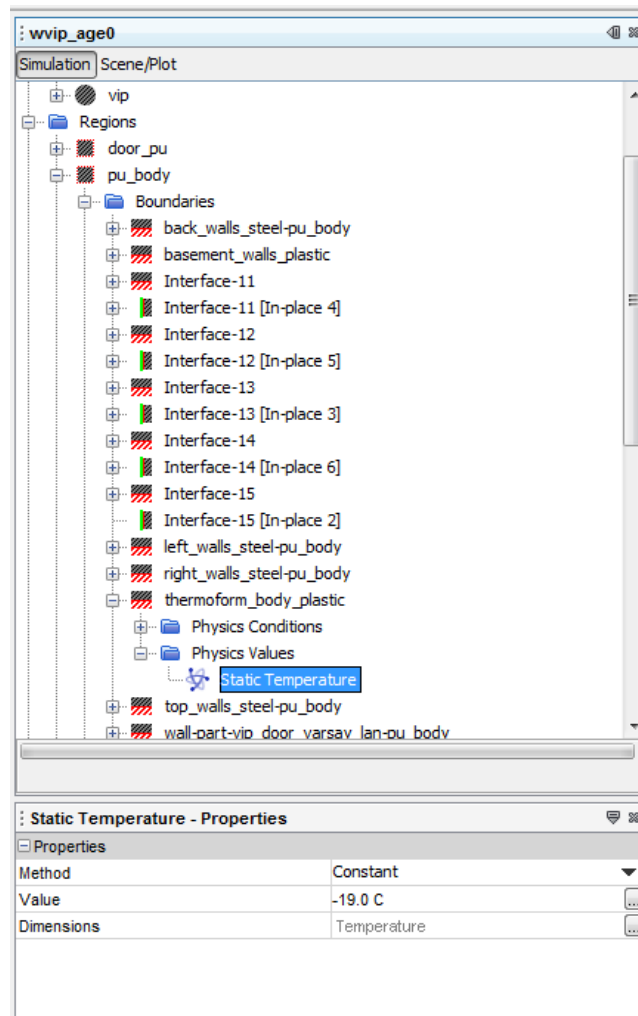
pp.plot();

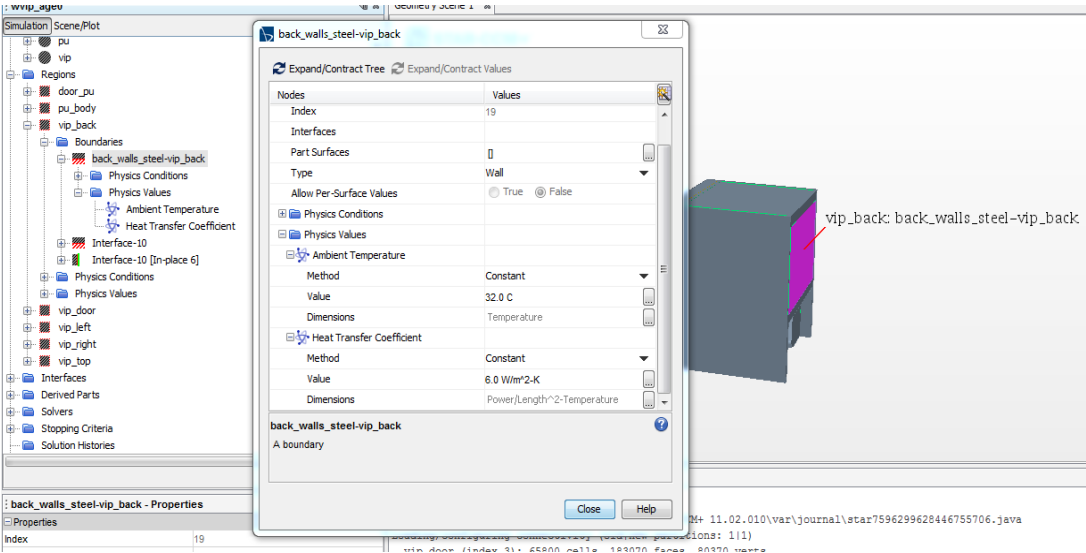
}

}
```

## EK-2 FLUENT ANALİZLERİ







### EK-3 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  |         |        |
| Compresseur                    | 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    |         |        |         |        |