

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YALITIM UYGULAMALARI İÇİN TOZ ESASLI MALZEMELERİN
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ozan KOVANCI

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı

Ocak, 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YALITIM UYGULAMALARI İÇİN TOZ ESASLI MALZEMELERİN
GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Ozan KOVANCI
(503101308)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

Ocak, 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **503101308** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ozan KOVANCI**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**YALITIM UYGULAMALARI İÇİN TOZ ESASLI MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Doç. Dr. Levent TRABZON**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Halit Süleyman TÜRKMEN

İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **17 Aralık 2012**

Savunma Tarihi : **25 Ocak 2013**

Aileme,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans çalışmalarım süresince desteğini hiç esirgemeyen, yaptığı olumlu elıştırileriyle çalışmamı yönlendirerek çok değerli katkılar yapan değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Şafak YILMAZ'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca her türlü imkanı bana sunan Arçelik A.Ş.'ye Sayın Dr. Faruk BAYRAKTAR şahsında teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bana her türlü kolaylığı sağlayarak çalışmama çok değerli katkıları olan Dr. Yusuf YUSUFOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım boyunca bana her türlü desteği veren Arçelik Malzeme Teknoloji Ailesine Sayın Dr. Mustafa SEZER şahsında teşekkür ederim.

Çalışmalarımı VIP üretim tesislerinde yapmamı sağlayan ve her konuda destek aldığım Termodinamik Teknoloji Ailesine Sayın Dr. Emre OĞUZ şahsında teşekkürlerimi sunarım.

Her konuda ufkumu açan ve daha iyisini yapmamı sağlayan, tüm tecrübelerini bana aktaran ve tüm çalışma boyunca destekleyen Dr. Osman Gökhan ERSOY'a, Dr. Feyzi Alper SOYSAL'a ve Sayın Deniz TAŞKIN'a en derin teşekkürlerimi sunarım.

Termal analiz çalışmalarımda bana destek veren ve değerli yorumlarıyla tezime katkı yapan Dr. Aslı KAYIHAN'a, mikroskopik analiz ve fotoğraflandırma çalışmalarında desteklerini veren Dr. Alper YEŞİLÇUBUK'a, mekanik test çalışmalarında gerek kurulum evresinde gerekse yorumlama aşamasında tezime çok değerli katkıları bulunan Sayın Mehmet Ali ORAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda her konuda destek olan ve beni hiç yalnız bırakmayan değerli dostum Sayın Sel Didem AKKOYUNLU'ya teşekkürlerimi sunarım. Yardımlarını hiç esirgemeyen Sayın Ali ÜNLÜTÜRK'e ve Sayın Merve ZAKUT'a teşekkürlerimi sunarım. Değerli arkadaşlarım, Arçelik Malzeme Teknoloji Ailesi yüksek lisans öğrencilerine teşekkür ederim.

Katkılarını asla unutmayacağım, desteklerini ve yardımlarını çalışmalarımın başından sonuna eksik etmeyen Sayın İlhan BALIKÇI, Sayın Tayfun ATSIZ, Sayın Faruk KOCABIYIK, Sayın Sinan KARASU, Sayın Burak YURT ve Sayın Kadir DOĞAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca bana her türlü sabrı ve anlayışı gösteren AİLEME teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2013

Ozan KOVANCI
(İmalat Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	ix
SEMBOL LİSTESİ	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. TOZ BAZLI YALITIM TEKNOLOJİSİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Isı Geçişi Mekanizmaları	3
2.1.1 İletim (Kondüksiyon) ile ısı geçişi	3
2.2. Geleneksel Yalıtım Teknolojisi	9
2.3. Vakumlu Yalıtım Teknolojisi	10
2.4. Düşük Basıncılı Gazların Fiziği	13
2.4.1. Moleküler Yoğunluk	13
2.4.2. Moleküler Kinetik Enerji	15
2.4.3 Moleküler Hız	16
2.4.4. Ortalama Serbest Yol Uzunluğu	17
2.5. Bir Gazın Viskozitesi ve Isıl İletkenliği	19
2.6. Vakumlanmış Toz Bazlı Yalıtım Uygulamalarında Isı Geçişi	21
2.7.1. İç dolgu malzemesi	33
2.7.2. Alternatif iç dolgu malzemeleri	42
2.7.2.1. Aerojeller (Hava jelleri)	42
2.7.2.2. Çökeltilmiş silika	43
2.7.2.3. Perlit (Eksperlit)	44
2.7.2.4. Diyatomit	45
2.7.2.5. Zeolit	47
2.7.3. Dış Zarf	47
2.7.4. Gaz gidericiler ve kurutucular (Getter / Dessikant)	49
3. TOZ BAZLI YALITIM MALZEMELERİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
3.1. Vakumlu İzolasyon Paneli İç Dolgusunda Kullanılan Malzemeler	51
3.2. Deneysel Çalışmalar Sırasında Kullanılan Ekipmanlar	52
3.2.1. Üretim ekipmanları	52
3.2.1.1. Toz karıştırma mikseri	52
3.2.1.2. Elektromekanik pres	53
3.2.1.3. Kurutma fırını	53
3.2.1.4. Metalize film kaynak presi	54
3.2.1.5. Vakum cihazı	54

3.2.2. Test ve analiz cihazları	55
3.2.2.1. Isı iletim katsayısı cihazı	55
3.2.2.2. Basma test cihazı	55
3.2.2.3. Taramalı elektron mikroskopu (SEM)	56
3.2.2.4. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC).....	58
3.2.2.5. Termal gravimetrik analiz (TGA)	58
3.2.2.6. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)	59
3.3. Vakumlu izolasyon paneli numunelerinin üretilmesi.....	60
3.4. İç dolgu malzemesinin yoğunluğunun etkin ısı iletim katsayısı üzerine etkisinin araştırılması.....	61
3.5. Panel içi vakum seviyesinin ısı iletim katsayısı üzerine etkisinin araştırılması ve S-eğrisinin çıkarılması	68
3.6. İç dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi	72
3.6.1. Basma mukavemet testlerinin yapılması.....	72
3.6.2. İç dolgu malzemesinin taramalı elektron mikroskop analizinin yapılması	76
3.7. Diğer Karakterizasyon Çalışmaları	78
3.7.1. Termo gravimetrik analiz (TGA)	78
3.7.2. Fourier Dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)	78
3.7.3. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC).....	79
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	89

SEMBOL LİSTESİ

A	: Yüzey alanı
c	: Sutherland sabiti
c_p	: Bir gazın sabit basınçtaki özgül ısısı
c_v	: Bir gazın sabit hacimdeki özgül ısısı
D	: Bir akış olayını tanımlayan karakteristik uzunluk
d_p	: Toz malzemenin por çapı
D_{Toplam}	: Çok katlı plastiğin toplam hava geçirgenliği
\bar{E}	: Bir molekülün ortalama kinetik enerjisi
E₀	: Bir gazın sıcak bir yüzeyden soğuk bir yüzeye aktardığı enerji
E_a	: Bir gazın plastik içerisinden geçmesi için gereken aktivasyon enerjisi
E_m	: Bir gaz molekülü tarafından aktarılan ortalama kinetik enerji
f	: Gaz moleküllerinin bir yüzeye yapışma oranı
f_v	: v ve v+dv hızları arasında hareket eden moleküllerin sayısının hız aralığına oranı
f_{vx}	: x yönünde hareket eden moleküllerin hız dağılım fonksiyonu
g	: Ekstrapolasyon uzunluğu
H	: Adsorbentin gaz fazındaki atom veya molekülleri yakalama olasılığı
k	: Boltzmann sabiti
Kn	: Knudsen sayısı
l	: Gaz molekülleri arasındaki mesafe
L	: Aralarında gaz bulunan iki paralel levha arasındaki uzaklık
L'	: Akışkan katmanının alt levhadan olan uzaklığı
L_{ort}	: Ortalama serbest yol uzunluğu
M	: Moleküler ağırlık
m	: Tek bir gaz molekülünün kütlesi
\bar{n}	: Birim hacimdeki gaz moleküllerinin sayısı
\bar{n}	: Gaz moleküllerinin belirli bir andaki ortalama yoğunluğu
P	: Bir gazın basıncı
P_{atm}	: Atmosfer basıncı
R₀	: Üniversal gaz sabiti
Re	: Reynolds sayısı
T	: Gazın sıcaklığı
T₁	: Paralel iki levhadan birincisinin sıcaklığı
T₂	: Paralel iki levhadan ikincisinin sıcaklığı
T_{dış}	: Buzdolabının bulunduğu ortamın sıcaklığı
T_i	: Bir gaz molekülünün sıcaklığı
T_{iç}	: Buzdolabı kabin iç sıcaklığı
T_r	: Gaz molekülünün çarptığı yüzeyden sektiğinde sahip olduğu sıcaklık
T_s	: Bir gaz molekülünün çarptığı yüzeyin sıcaklığı
u	: Düşey düzlemde paralel olan iki levhadan üstte yer alanın hızı
u'	: Düşey düzlemde paralel olan iki levha arasındaki gazın bir

	molekülünün sürüklenme hızı
V	: Gazın içinde bulunduğu hacim
v	: Bir gaz molekülünün hızı
v_1	: Çarpışan iki gaz molekülünden birincisinin hızı
v_2	: Çarpışan iki gaz molekülünden ikincisinin hızı
v_{av}	: Aritmetik ortalama hız
v_p	: En olası hız
v_r	: Bir molekülün ortalama karekök hızı
v_x	: x ekseninde hareket eden tek bir gaz molekülünün hızı
v_y	: y ekseninde hareket eden tek bir gaz molekülünün hızı
v_z	: z ekseninde hareket eden tek bir gaz molekülünün hızı
W	: Gazın ağırlığı
ϕ	: Bir elemanter yüzeye çarpan moleküllerin sayısı
μ	: Bir gazın dinamik viskozitesi
ρ	: Bir gazın yoğunluğu
ξ	: Bir molekülün çapı
ε	: Isı iletim katsayısı – viskozite bağıntısında düzeltme katsayısı
τ	: İki molekülün çarpışması arasında geçen ortalama süre
γ	: Politropik üs
α	: Yerleşim katsayısı
λ	: Isı iletim katsayısı
λ_0	: 0°C sıcaklıkta serbest rejimdeki bir gazın ısı iletim katsayısı
$\lambda_{gaz/hava}$: Gaz/havadan kaynaklanan ısı iletim katsayısı
$\lambda_{ışınım}$: Işınmıdan kaynaklanan ısı iletim katsayısı
$\lambda_{katı}$: Katı matristen kaynaklanan ısı iletim katsayısı
Δt	: A yüzeyine yapılan iki ardıl çarpışma arasında geçen süre
δt	: Diferansiyel zaman aralığı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Bazı geleneksel yalıtım malzemeler ve ısı iletim katsayıları.....	10
Çizelge 2.2 : Eğride belirtilen mazlemelerin s - eğrisi karakteristikleri	13
Çizelge 2.3 : Argon, kripton ve ksenon gazlarının hava ile karşılaştırılması.	25
Çizelge 2.4 : Toz bazlı yalıtım sistemlerinde ısı geçiş mekanizmaları ve en önemli değişkenleri: vakum seviyesi (p), yoğunluk (ρ) ve sıcaklık (T).	32
Çizelge 2.5 : Cam elyafa ait elementlerin kütlece % oranları	39
Çizelge 2.6 : Silisyum karbür malzemesinin kütlece % oranları	41
Çizelge 2.7 : İç dolgu malzemelerinin fiziksel özellikleri.	46
Çizelge 2.8 : Alternatif İç dolgu malzemeleri kimyasal bileşimleri.	46
Çizelge 2.9 : Vakum izolasyon panellerinde bariyer filmin etkisi.....	48
Çizelge 2.10 : VİP’lerde kullanılan örnek bariyer teknik özellikleri.....	48
Çizelge 2.11 : Vakum izolasyon panelinin kısımları ve fonksiyonları	50
Çizelge 3.1: Yoğunluğa bağlı ısı iletim katsayısı değerleri.	63
Çizelge 3.2: Daha düşük BET yüzeyine sahip deney setlerinin sonuçları.....	66
Çizelge 3.3: Farklı vakum seviyelerindeki ısı iletim katsayıları.....	70
Çizelge 3.4: Vakum seviyesine bağlı olarak değişen vakumlama süreleri	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Plakalar arasındaki ısı iletimi (a), eş merkezli silindirler arasındaki ısı iletimi (b), eş merkezli küreler arasındaki ısı iletimi (c).	5
Şekil 2.2 : Bir duvar üzerinde taşınım ve iletim mekanizması	6
Şekil 2.3 : Sıcak bir yüzeyin taşınım ile soğuması.....	7
Şekil 2.4 : Isı geçişi mekanizmaları.	9
Şekil 2.5 : Vakum izolasyon paneli iç yapısı.	10
Şekil 2.6 : Vakum izolasyon paneli dış görüntüsü.	11
Şekil 2.7 : Çeşitli iç dolgu malzemelerinin S – eğrileri.	12
Şekil 2.8 : Viskoziteye bağlı sürüklenme hızı dağılımı.	19
Şekil 2.9 : Gazların kinetik teorisine göre ısı iletimi.	22
Şekil 2.10 : Farklı boyutlarda havanın ısı iletim katsayısının basınçla değişimi.	24
Şekil 2.11: Hava ve kripton gaz karışımının ısı iletim katsayılarının değişimi.	26
Şekil 2.12 : Etkin ısı iletim katsayısı mekanizması.....	27
Şekil 2.13 : Birliktelik etkisinin şematik olarak gösterimi.....	29
Şekil 2.14 : Nemin etkisi ile meydana gelen gözenek difüzyonu.	30
Şekil 2.15 : Krischer modeline göre nemin ısı iletim mekanizmasına etkisi	32
Şekil 2.16 : Vakumlu izolasyon panellerini oluşturan bileşenler.....	33
Şekil 2.17 : Farklı panel basınçlarında malzemelerin ısı iletim katsayıları.	34
Şekil 2.18 : Gözenek çapının havanın ısı iletkenliğine etkisi.	36
Şekil 2.19 : Fumed silika üretim şeması.	36
Şekil 2.20 : Vakumlu yalıtım panellerinde gerçekleşen kenar etkisi	38
Şekil 2.21: İki VİP arasında gerçekleşen termal köprü.....	38
Şekil 2.22 : Cam elyafından üretilmiş VİP’lerin s-eğrisi	39
Şekil 2.23 : Cam elyaf SEM görüntüleri.	40
Şekil 2.24 : Silisyum karbür SEM görüntüsü.	42
Şekil 2.25 : Aerojel malzemesinin gösterimi.	42
Şekil 2.26 : Genişletilmiş perlit SEM görüntüsü.	44
Şekil 2.27 : Diatomitin SEM görüntüsü.....	45
Şekil 2.28 : Doğal zeolit SEM görüntüsü.	47
Şekil 2.29 : Çok katmanlı bir bariyer filmin mikroskop görüntüsü.	49
Şekil 3.1 : Toz Karıştırma Mikseri.....	52
Şekil 3.2 : Elektromekanik vip presi	53
Şekil 3.3 : Kurutma Fırını.	53
Şekil 3.4 : Metalize film kaynatma presi	54
Şekil 3.5 : Vakum Makinası.....	54
Şekil 3.6 : Isı iletim katsayısı ölçüm cihazı.....	55
Şekil 3.7 : Deney düzeneğinin yapısı.	55
Şekil 3.8 : Basma test cihazı.	56
Şekil 3.9 : Taramalı elektron mikroskobu.....	58
Şekil 3.10 : Diferansiyel taramalı kalorimetre.	58

Şekil 3.11 : Termal gravimetrik analiz cihazı.	59
Şekil 3.12 : FTIR Cihazı.	60
Şekil 3.13 : Vakumlu izolasyon panellerinin üretilmesi.	61
Şekil 3.14 : 4 farklı veri seti için yoğunluk - ısı iletim katsayısı değerleri.	64
Şekil 3.15 : Yoğunluk - ısı iletim katsayısı etkisi.	65
Şekil 3.16 : BET yüzey alanının s-eğrisine olan etkisi.	67
Şekil 3.17 : Yoğunlukla yüzey kalitesinin değişimi.	68
Şekil 3.18 : S-eğrisi numuneleri.	69
Şekil 3.19 : İç dolgu malzemesine ait S-eğrisi.	71
Şekil 3.20 : En düşük elyaf katkılı numunenin basma fotoğrafları.	73
Şekil 3.21 : %5 elyaf katkılı numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.	74
Şekil 3.22 : %10 elyaf katkılı numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.	74
Şekil 3.23 : %15 elyaf katkılı numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.	75
Şekil 3.24 : %20 elyaf katkılı numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.	75
Şekil 3.25 : Numunelerin %60 deformasyon sonucu fotoğrafları.	76
Şekil 3.26 : VIP numunesi SEM görüntüsü.	76
Şekil 3.27 : Numunelerin 250 büyütmedeki SEM fotoğrafları.	77
Şekil 3.28 : Numunelerin 1000 büyütmedeki yüzey topoğrafyaları.	77
Şekil 3.29 : VIP TGA analiz sonucu.	78
Şekil 3.30 : Amorf silika FTIR analiz sonucu.	85
Şekil 3.31 : Cam yünü FTIR analiz sonucu.	79
Şekil 3.32 : SiC FTIR analiz sonucu.	79
Şekil 3.33 : Polipropilen Elyaf.	80
Şekil 3.34 : PET Elyaf.	80
Şekil 3.35 : PA Elyaf.	81

YALITIM UYGULAMALARI İÇİN TOZ ESASLI MALZEMELERİN GELİŞTİRİLMESİ VE KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Çevresel sorunların artması nedeniyle uygulamaya konulan yönetmelikler sonucunda enerji tüketimini azaltmaya yönelik teknolojik çözümlerin arayışına girilmiştir. Bu amaç doğrultusunda izolasyon sistemlerinin geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Yalıtım uygulamalarında toz esaslı malzemeler en etkin ısıl yalıtım performansına sahip olmasının yanısıra diğer yalıtım malzeme gruplarına göre daha çevrecidir.

Vakum izolasyon panelleri (VİP), kesit kalınlığı az olmakla birlikte düşük ısı iletim kat sayısına sahip iyi bir yalıtım malzemesidir ve enerji tüketiminde oldukça iyi tasarruf sağlamaktadır. Geleneksel yalıtım tekniklerine güçlü bir alternatif olan vakumlu izolasyon panelleri, mikroporoz silika tozu esaslı bir iç dolgu malzemesine mukavemet artırıcı ve opaklaştırıcı katkıları ilave ederek preslenmesi ve preslenip panel haline getirilmiş bu iç dolgu malzemesinin bir bariyer içerisine konularak vakumlanması ve sızdırmaz bir şekilde atmosfere kapatılması ile elde edilmektedir.

Bu çalışma kapsamında, vakumlu izolasyon panelleri üretilecek bir altyapı kurularak, ısı iletim katsayısı oldukça düşük bir iç dolgu malzemesi geliştirilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır. Etkin ısı iletim katsayısının temel parametreleri olan panel iç basıncı, iç dolgu yoğunluğu ve yüzey alanı etkileri incelenmiştir. Elyaf takviyesinin iç dolgu malzemesinin mekanik özelliklerini nasıl etkilediği karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır.

Vakum İzolasyon Malzemelerinde kullanılan alternatif elyafların karakterizasyon çalışmaları yapılmıştır. DSC analizi kullanılmış, camsı geçiş sıcaklığı ve erime noktasından yararlanılarak elyafların çeşidi belirlenmiştir. Vakumlu izolasyon panellerinde kullanılan iç dolgu malzemelerinin FTIR analizleri yapılmış, analiz sonuçlarına göre iç dolgu malzemelerinin kimyasal yapıları ve bileşenleri belirlenmiştir. İç dolgu malzemelerine TGA analizi yapılarak nem yüzdesi ve sıcaklık uygulandıktan sonra geriye kalan inorganik malzeme miktarı tespit edilmiştir. Karakterizasyon yöntemlerinden SEM analiz yöntemi kullanılarak elyaf ile tozlar arasındaki etkileşim gözlenmiştir. Aynı zamanda SEM analizi ile elyafların boy ve çapları belirlenmiştir.

Çalışma sonucunda, 0,5 mbar'da en düşük ısı iletim katsayısı 170 g/L yoğunlukta saptanmıştır. Bu değerden daha düşük yoğunluklarda ısı transferinde ışıma, daha yüksek yoğunluklu değerler için ise katı iletim baskındır. Panel iç basıncının ısı iletimine olan etkisinin araştırıldığı S-eğrisi çıkarma çalışmalarında kritik basıncın 7 mbar olduğu görülmüştür. Kritik basınç altında ısı iletim katsayısı 4,3 mW/m.²K mertebelerinde iken atmosferik basınçta 22 mW/m.²K'dir. Vakumsuz ortamda dahi geleneksel yalıtım malzemelerinden daha iyi sonuçlar alınmıştır. Öte yandan vakumlama süresinin kritik basınç altında dramatik olarak arttığı gözlenmiştir.

Geliştirilen iç dolgu malzemesinin basma mukavemeti testleri yapılarak, mekanik özellikleri araştırılmıştır. Farklı elyaf miktarları kullanılarak ilgili standarda göre yapılan testler sonucunda elyaf içeriğinin %10, %20, %40 ve %60 deformasyona uğradığında elde edilen mukavemet değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, iç dolgu malzemesi %20 deformasyona kadar birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Ancak %20 deformasyondan sonra kesitte artma sonucu okunan kuvvet değerlerinde yüksek artışlar görülmüştür. Sonuç olarak, artan elyaf takviyesi artan tokluğa sebep olduğu gözlenmiştir.

Son olarak, tez çalışması konusunda ileriye dönük çalışma önerileri sunulmuştur. Gözenekli malzemelerde, özellikle ışınma ile ısı iletim mekanizmasının açıklanabilmesi için malzeme sönümlenme katsayısının tayini gerekmektedir. Öte yandan katısal iletimi mekanizması için liflerin çapı ve boylarının etkisi analiz edilmelidir. İç dolgu malzemesi bilgisayar ortamında sonlu elemanlar yoluyla modellenmesi, ileride yapılacak çalışmalar için son derece yararlı olacaktır.

DEVELOPMENT AND CHARACTERIZATION OF POWDER BASED MATERIALS FOR INSULATION APPLICATIONS

SUMMARY

As a consequence of increasing ecological concerns and regulations, in search of technological solutions that promise to decrease the energy consumption deals big importance in the industry. For this purpose, the development of new insulation systems and materials were needed. In insulation applications, the powder-based materials has the most effective thermal insulation performance as well as being more environmental friendly compared to other conventional insulation materials.

Vacuum insulation panels (VIP) are great thermal insulation materials which have very low thermal conductivity coefficient with a lower cross-sectional thickness and provide very good savings in energy consumption. As a strong alternative to the conventional insulating techniques, vacuum insulation technology is based on wrapping microporous open celled core material that reinforced with fibers and opacifiers in a barrier material and then evacuating it before sealing to the atmosphere.

VIPs are commonly used in construction sector especially, between the facades of the buildings. Vacuum insulation panels are also used in refrigerators in order to reduce the energy consumption. Lately, there are numerous of applications in the frigorific trucks and vassels.

Generally, conventional thermal insulation materials' thermal conductivity are between 20 and 30 mW/m.K. The effective thermal conductivity of these materials are affected from conduction, convection and radiation. The cell structure of the conventional thermal insulation materials are closed type. Therefore, evacuation of the air could not be applied. Thermal conductivity of the air is approximately 24 mW/m.K, thus in heat transfer mechanism, convection is dominant. Nevertheless, the closed-cell sizes are larger than the core material of the VIPs. The conduction has also big effect to the thermal conductivity. As a result of this, the conventional materials such as PU, XPS, glass wool or etc. have their own advantages in terms of manufacturability, strength, cost but the thermal performance incomparable with VIPs.

VIPs have porous media and open cell structures core in order to evacuate the gasses in the core material. When the vacuum level decreases, the convection heat transfer also reduces. There is a crucial pressure where the effective thermal conductivity of the VIPs are reduce dramatically and it can be nagliable. Below that vacuum level, the heat transfer and the thermal conductivity of the material is about 5 mW/m.K.

VIPs have two main components: The core material that mixed of nanoporous powders and glass fibers, the metallized film that protects the internal vacuum of the core.

In the core, silicon based nanoporous powders, which has a average particle size of 20 nm, are used to obtain very low thermal conductivity coefficient and SiC is used as opacifier in order to reduce the radiation. As a reinforcement glass fiber is used so as to increase the strength and provides great manufacturability of the specimen. Glass fiber also has a low thermal conductivity below the crucial pressure of the core. Thus, it also helps insulation properties of the VIPs.

For manufacturing a vacuum insulation panel specimen, initially powders and glass fibers are weighing with precision scales. All of the measured materials are placed to mixer afterwards. Mixing process is approximately 3 minutes. The mixture is formed to a panel by pressing. Moisture have great influence to thermal conductivity, to get rid of the moisture effect, the insulation panels must be dried. Lastly, dried panels are evacuated in a metallized film by vacuum chamber.

The core materials which was used in this study are fumed silica products with minor differences, specially in the nature of the fibres used as a reinforcement. The core material is a porous material. Therefore, the porosity of core material should be at least 90%, and the specific surface area should be at least 200 m²/g. Moreover, it was observed that high sorption capability results from the huge specific surface area; at 75% relative humidity, 0.05 kg of water per kg material is generally adsorbed. Because of this, fumed silica can act as a desiccant.

In this study, a manufacturing infrastructure was established in order to obtain vacuum insulation panel specimens. A core material was developed and characterized with a very low thermal conductivity coefficient. The basic parameters of the effective heat transfer coefficient in terms of panel interior pressure, the density of inner core and the surface area of the particles were investigated. Besides, the effects of the fiber supplementation to mechanical properties were explained.

Resulting this study, lowest thermal conductivity coefficient measured at a density of 170 g/L with a vacuum pressure of 0.5 mbar. Below this density, heat transfer of the core material has radiation tendency, and above, conduction heat transfer is dominant. Another research topic was the influence of the vacuum level over thermal conductivity. This research shows us the crucial pressure of the core material is about 7 mbar. Below the crucial pressure, the thermal conductivity of the vacuum insulation panel is 4,3 mW/m.^oK. At the atmospheric pressure (1 bar) the thermal conductivity of the core is about 22 mW/m.K. This shows the developed core has better performance even at the atmospheric pressure in comparison to conventional insulating materials.

As mentioned above, Vacuum Insulation Panels are available to the refrigerator industry. They are composite material with a core and an enclosure. However, barrier material has to prevent gas permeation from the core material. In addition, it should have a minimized thermal bridge effect around the edge of a panel.

Compression tests are also performed for developed internal filling material in order to investigate the mechanical properties. Test specimens were prepared and the compression test was set according to standart EN 826. Compression strength values are compared in 10%, 20%, 40% and 60% deformations. As a result, the inner core materials have similar mechanical properties to 20% deformation. After 20% deformation, different increase in the area with the fiber content has observed.

Consequently, the core material has better toughness with the increase in the fiber content.

Scanning electron microscopy is used for determination of the particle size of the alternative materials, the diameter and length of the glass fibers and the elemental analysis of the powders. The characterization is completed with the FTIR, TGA and DSC analysis.

Differential scanning calorimetry (DSC) has been used to characterize fiber thermal stability, overall conformation, and which fiber was used in other VIP's. Understanding the method precision can help determine what differences between samples are significant and also establish the acceptance criteria for comparability and other characterization studies. In this study, we identify the parameters for the qualification of DSC for determining the type of fiber. The experiments and data analyses were performed by different analysts using different instruments at different sites. The results show that the (apparent) melting point (T_m) values and glass transition (T_g) obtained for the fibers. In addition, T_g and T_m values were found to look at literature. Therefore, types of the fibers which are used in VIP's were Polypropylene (PP), polyethyleneterephthalate (PET) and polyamid (PA) fibers.

Thermal properties were determined according to Thermogravimetric analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). TGA was used to obtain percentage of water and percentage of inorganic material in the VIP. It was obtained that first weight loss occurred near 100 °C. This is associated to loss of structural water. It was found that the remaining percentage of inorganic material. DSC was used to determine type of fiber. Therefore, It was performed to obtain glass transition temperature (T_g) and melting temperature (T_m). Type of fiber was determined according to this T_g and T_m values.

Fourier Transmission Infrared (FTIR) analysis was performed to obtain structure and chemical composition of VIP. The resulting spectrum represented the the molecular absorption, creating a molecular fingerprint of the sample which corresponds to the frequencies of vibrations of molecular bonds and chemical environments in which these bonds present. The most intense near about 1000 cm^{-1} band and in this spectrum is attributed to Si-O-Si vibrations. The presence of peaks in the range of 3200-3700 cm^{-1} also indicates the existing of stretching vibration of Si-OH groups. The Si-OH band seen in the FTIR spectrum indicates that the surface hydroxyls still exist, even though the material shows a hydrophobic behavior.

Scanning electron microscopy (SEM) was used to provide the particle morphology of the VIP, its diameter and also the particle size distribution. Images obtained by SEM provided information on the physical properties of VIP core materials and particulates including particle size, shape, surface morphology, and adherence to surfaces. SEM was performed to obtain the diameter and length of fibers and their attraction with other core materials such as fumed silica, SiC. Because mixture of powder agglomerates round of fiber. Therefore, fiber and powder interaction was obtained by using SEM technique.

And finally, prospective studies and future suggestions are proposed about the thesis study field. Determination of the specific extinction coefficient has a vital importance for radiative heat transfer mechanism in porous materials. On the other hand, fibers length and diameter effect over the effective thermal conductivity so as to clarify the solid conduction. By means of finite element computer modeling of the internal filling material will be extremely useful for future studies.

1. GİRİŞ

Ekonomik ve sosyal politikaların en önemli belirleyicisi olan enerji sektörü, ekonomik kalkınmanın temel taşlarından biridir [1]. Giderek tükenen enerji kaynakları, enerji tüketimi ile ilgili olarak birçok ülkede yasal yönetmeliklerin zorunlu hale gelmesine neden olmuştur. Dolayısıyla az enerji tüketen yapılara olan yaklaşım daha çok benimsenmiş, ısı yalıtımı ve izolasyon sistemleri önem kazanmıştır. Düşük ısı iletim katsayısına sahip yeni yalıtım malzemeleri araştırılmaya başlanmıştır [2].

Bu çalışmada, ısı iletim katsayısı geleneksel yalıtım malzemelerine göre oldukça düşük olan vakumlu izolasyon paneli üretimi sağlanarak, termal özelliklere olan etkisi incelemek amaçlanmıştır.

Bu amaçla çalışmanın ilk bölümünde, ısı transferi mekanizmaları ve yalıtım amaçlı kullanılan toz bazlı malzemeler ile ilgili literatür araştırması sunulmuştur.

Çalışmanın ikinci bölümünde, vip üretim adımları belirlenerek, üretim optimizasyon çalışmalarına yer verilmiştir. Üretim, test ve analiz ekipmanları tanıtılmıştır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde, yoğunluk ve vakum seviyesinin ısı iletim katsayısına olan etkisi araştırılmıştır. Takviye miktarının mukavemete olan etkisi araştırılmıştır. Mikroskopik görüntüleme ve SEM çalışması yapılarak iç yapının mukavemete olan etkisi araştırılmıştır. FTIR, TGA, DSC çalışmaları ile malzeme karakterizasyonu tamamlanmıştır.

Çalışmanın son bölümünde ise, elde edilen sonuçlar ve çalışmanın devamı için getirilen öneriler sunulmuştur.

2. TOZ BAZLI YALITIM TEKNOLOJİSİ İLE İLGİLİ LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde, yalıtım uygulamaları ile ilgili olarak yapılan literatür araştırılması sunulmuştur. Yalıtım uygulama tekniğini daha iyi kavrayabilmek için öncelikle ısı transfer mekanizmalarını anlamak gerekmektedir. İlk olarak, ısı transferi mekanizmaları detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Yalıtım amaçlı kullanılan geleneksel malzemeler sunulmuştur. İleri yalıtım uygulamalarında kullanılan, çok düşük ısı iletim katsayılı vakumlu izolasyon panelleri baz alınarak ısı yalıtımına hangi parametrelerin etkilediği belirtilmiştir.

2.1 Isı Geçişi Mekanizmaları

Isı, bir enerji çeşididir ve maddenin kendisini meydana getiren moleküllerin hareket etmelerinden dolayı açığa çıkmaktadır. Isı, enerjinin sıcaklık farkı nedeniyle, maddeden maddeye aktarılabilen şeklidir. Isı geçişine neden olan etken sıcaklık farkıdır ve ısının bir cisimden diğerine veya ortama geçişine “ısı geçişi” adı verilir. Isı geçişi iletim(kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışıyım (radyasyon) olmak üzere üç farklı yolla gerçekleşmektedir [3].

2.1.1 İletim (Kondüksiyon) ile ısı geçişi

İletim ile ısı transferi; partiküller (atomlar, moleküller, elektronlar, protonlar) arasındaki direct etkileşime dayanır. İletim; bir maddenin daha yüksek enerjili parçacıklardan daha düşük enerjili parçacıklarına, bu parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucu enerjinin aktarılması olarak tanımlanabilir. Örneğin, bir duvarın bir yüzünden diğer yüzüne ısı geçişi ya da bir tarafından alevle ısıtılan bir telin, diğer ucunun belirli bir süre sonra ısınması gibi.

Gaz ve sıvılarda, atom ya da moleküller hareketlidir ve rastgele dizilişleri boyunca partiküllerin çarpışmasından dolayı iletim ile ısı transferi oluşmaktadır. Bunun aksine, katılarda, atomlar kafes örgüsünde bulduklarından iletim ile ısı transferi, titreşim hareketi sonucunda oluşur ve bu fiziksel olarak protonlar tarafından

tanımlanır. Ek olarak, serbest elektronların da buna katkısı bulunmaktadır [4]. Isı dağılımı $T(x)$ ile birlikte bir izotropik malzemenin homojen ve üç boyutlu olduğu varsayılırsa, durgun koşullarda, ısı iletimi Fourier Yasası ile matematiksel olarak hesaplanabilir.

$$\dot{q} = -\lambda \vec{\nabla} T \quad (2.1)$$

Burada \dot{q} , birim alandaki ısı akı miktarı, $\vec{\nabla} T$ sıcaklık gradyanı ve λ malzemenin ısı iletim katsayısıdır. Bu denklem, ısı akısının sıcaklık gradyanı sebebiyle olduğunu ve o yöndeki ısı akısının sıcaklık gradyanı ile orantılı olduğunu tanımlamıştır. Baştaki eksi işaret ise bu ısı akısı her zaman azalan sıcaklıklara yönelik olduğunu ifade etmektedir. Basit geometriler için, Fourier Kanunu tek boyutlu forma aşağıdaki şekilde indirgenebilir:

$$\dot{Q} = -A\lambda \frac{dT}{dr} \quad (2.2)$$

Buradaki denklemde, sıcaklık gradyanı, tek boyutlu türevi ile değiştirilerek ısı akısı yönüne dik alan A , eklenmiştir. Sıcaklık farkı T_1-T_2 olan düzlemsel bir sandviç yalıtım geometrisi için, denklem kolaylıkla aşağıdaki hali alır:

$$\dot{Q}_P = \lambda \frac{A}{d} (T_1 - T_2) \quad (2.3)$$

Alanı $2\pi rH$ olan silindirik durumda ise, değişkenleri ayırma yöntemi ve integrasyon uygulandıktan sonra aşağıdaki denklem elde edilir:

$$\dot{Q}_C = \lambda \frac{2\pi H}{\ln(r_2 / r_1)} (T_1 - T_2) \quad (2.4)$$

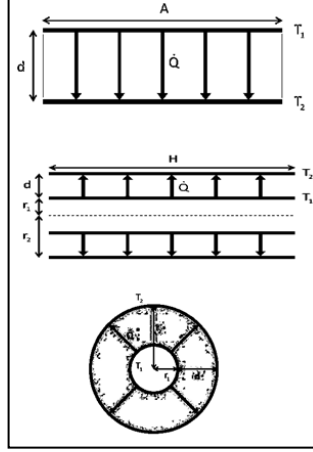
Eş merkezli küre geometrisi silindirik duruma benzemektedir. Alanı $4\pi r^2$ olarak denklem (2.2)'de yerine konulursa ifade (2.5) elde edilir:

$$\dot{Q}_S = \lambda \frac{2\pi}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} (T_1 - T_2) \quad (2.5)$$

Üç boyutlu genel geometride ısı akısı (2.6)'da gösterilen denklikle hesaplanmaktadır:

$$S = \frac{1}{T_1 - T_2} \iint_A \nabla T \, dA \quad (2.6)$$

Burada S, şekil faktörü olup, silindirik ve küresel geometriler için denklem 2.3, denklem 2.4 ve denklem 2.5, denklem 2.6 ile karşılaştırılarak okunabilir.



Şekil 2.1: Plakalar arasındaki ısı iletimi, eş merkezli silindirler arasındaki ısı iletimi, eş merkezli küreler arasındaki ısı iletimi (c) [51].

2.1.2 Taşınım (Konveksiyon) ile ısı geçişi

Isı transferi, katı bir yüzey ile temas eden akışkan bir ortam arasında sağlanıyorsa bu enerji aktarımı taşınım (konveksiyon) yolu ile gerçekleşir. Taşınım ile ısı transferi, yayılım, rastgele moleküler hareket ve akışkanın kitle ile enerji aktarımı olmak üzere iki farklı mekanizmadan oluşur [5]. Öte yandan taşınım ile ısı geçişi akışkan türüne göre sınıflandırılabilir. Akış, bir fan bir pompa veya atmosferik rüzgarlar gibi bir dış etki ile oluşuyorsa, zorlanmış taşınım söz konusudur. Eğer, akışkan içerisindeki sıcaklık değişimlerinin neden olduğu yoğunluk farkından dolayı taşınım kendiliğinden oluyorsa, bu doğal taşınım ya da serbest konveksiyon olarak adlandırılır. Örneğin, ısınan havanın yoğunluğunun düşerek yükselmesi, taşınım ile gerçekleşmektedir. Taşınım ile ısı transferi Newton'un soğuma yasası ile açıklanmaktadır:

$$\dot{Q} = H_c A (T_s - T_\infty) \quad (2.7)$$

Burada, T_s katının sıcaklığıdır. Herhangi bir süreksizlik durumu oluşmaması için, T_s sınır tabakasının sıcaklığına eşit kabul edilir. T_{sonsuz} ise yüzeyden çok uzak bir noktadaki akışkanın sıcaklığıdır. Her ne kadar taşınım ile ısı transferi çok karmaşık bir mekanizma da olsa, ısı transfer miktarı bu iki sıcaklık farkı, $\Delta T = T_s - T_{\text{sonsuz}}$ ile

orantılı olarak gerçekleşir. Bu orantı, taşınım ile ısı transferi katsayısı olan H_c ile ifade edilir. H_c bir malzeme sabiti değildir ve dinamik viskozite (μ), ısı iletim katsayısı (λ), yoğunluk (ρ), hız (v) gibi akışkanlar dinamiği parametrelerine bağlıdır. Akışkanlar dinamiğinde çok yaygın kullanılan boyutsuz matematik sabitler vardır, bunlardan taşınım ile ısı transferi H_c 'yi türetebileceğimiz Nusselt sayısı, Nu , aşağıda belirtilmiştir:

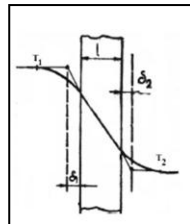
$$Nu = \frac{H_c \delta}{\lambda} \quad (2.8)$$

Bu denklemde, δ ilgili geometri için karakteristik uzunluktur. Bu karakteristik uzunluk akışkan yönünde bir plakauzunluğu veya bir borunun ya da kürenin çapı olarak düşünülebilir [8]. Daha karmaşık üç boyutlu geometriler için akışkanın hacmi (V) yüzey alanına bölünür. Şekil 2.2'deki sınır yüzey alanı A , yüzey sıcaklıkları T_1 ve T_2 olan bir akışkan tabakasında, iletim ve taşınım ile ısı geçişi miktarları oranlanarak Nusselt sayısı ulaşılması aşağıdaki gibi mümkündür:

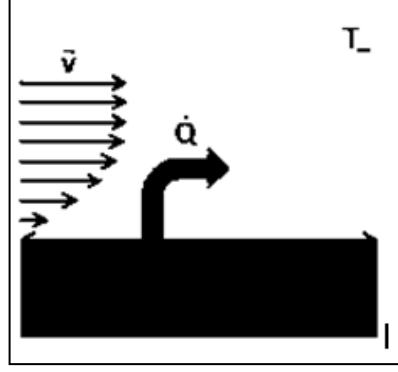
Daha önce denklem 2.3 ve denklem 2.7 belirtilen ifadeleri oranlarsak:

$$\begin{aligned} Q_{iletim} &= \lambda \frac{A}{d} (T_1 - T_2) \\ Q_{taşınım} &= H_c A (T_1 - T_2) \\ Nu &= \frac{Q_{taşınım}}{Q_{iletim}} = \frac{H_c \delta}{\lambda} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Bu yüzden Nusselt sayısı taşınım ve iletim ile ısı transferi miktarlarının oranını yani akış hareketinin neden olduğu iletim ısı transferinin genişletilmiş bir ifadesidir. Nusselt sayısı 1 iken, ısı transferi doğal iletim adımı almaktadır. Nusselt sayısı 10 ile 10.000 arasındaki değerleri almaktadır. Buradan da görüldüğü gibi, taşınım ile ısı transferini doğal iletime göre çok daha etkili bir ısı iletim mekanizması olduğu açıktır.



Şekil 2.2 : Bir duvar üzerinde taşınım ve iletim mekanizması



Şekil 2.3 : Sıcak bir yüzeyin taşınım ile soğuması.

Doğal taşınım için, Nusselt sayısı Rayleigh sayısı, Ra , ile ifade edilebilir. Bu iki sayı arasındaki tam ilişki geometriye bağlıdır. İki paralel düzlem arasında yatayla bir β açısı kadar eğimi olan bir sistem için Rayleigh sayısı 2.10'daki ifade ile hesaplanabilmektedir:

$$Ra = \frac{gp^2 c_p d^3 M^2 \Delta T}{\mu \lambda R^2 T^3} \cos \beta \quad (2.10)$$

Tanımlayıcı bir şekilde belirtmek gerekirse, Ra , serbest taşınımın oluşumunda rol oynayan üç farklı kuvvetin, ağırlık, kaldırma kuvveti, sürtünme kuvvetinin oranıdır. Öte yandan, zorlanmış taşınım için viskoz kuvvetlerin atalet kuvvetlerine oranı ile tanımlanan Reynolds sayısı ile ifade edilmektedir [8].

2.1.3 Işınım (Radyasyon) ile ısı geçişi

Işınım, maddenin atom veya moleküllerinin elektron düzeninde olan değişimler sonucunda yayılan elektromanyetik dalgalar veya fotonlar aracılığıyla gerçekleşen enerji aktarımıdır. Işınım ile ısı transferinde, iletim ve taşınımından farklı olarak, ısı geçişi cisimler arasında boşluk (vakum) olması durumunda da vardır. Işınım ile ısı transferi ışık hızında gerçekleşir. Güneş'ten dünyaya gelen ısı ışınım ile ısı transferi ile açıklanmaktadır. Genel olarak, elektromanyetik dalgaların emisyonu bir çok farklı nedene bağlanmaktadır. Örneğin, radyoaktif parçalanma sonucunda gama ışınımının görülmesi veya elektriksel dipol salınımların düşük frekanslı dalgaları oluşturması gibi. Isı transferi için önemli olan nokta ise, bir kütlenin sıcaklığına bağlı olarak etrafa yaydığı termal ışınımıdır. Isıl ışınım, x -ışınları, γ -ışınları, mikro dalgalar ve radyo dalgaları gibi diğer elektromanyetik ışınımından farklıdır. Mutlak sıfırsıcaklığının ($-273,15$ °C) üzerinde sıcaklığa sahip tüm cisimler ısıl ışınım

yayarlar. Bir cismin yüzeyinin yayabileceği en fazla ışınım miktarı Stefan-Boltzmann Yasası ile belirlenmiştir:

$$Q_{ışınım,maksimum} = \sigma AT_s^4 \quad (2.11)$$

Burada, T_s yüzeyin mutlak sıcaklığı (K), A , yüzey alanı (m^2), σ ise Stefan-Boltzmann sabitidir ve değeri $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m.K}^4$ 'dir. Belirli bir sıcaklıkta en çok ışınımı yayan yüzey, siyah cisim olarak adlandırılır. Siyah cisim gerçek bir yüzey değildir, gerçek bir yüzey tarafından yayılan ışınım, aynı sıcaklıkta bir siyah cisim tarafından yayılan ışınımdan azdır ve 2.12'deki bağıntı ile ifade edilir:

$$Q_{yayılan} = \epsilon \sigma AT_s^4 \quad (2.12)$$

Burada, ϵ , yüzeyin yayma oranıdır ve bu değer 0 ile 1 arasında bir değerdir. Bir yüzeyin yayma oranı, siyah cisme ($\epsilon = 1$) yakınlığının ölçüsüdür. Üzerine gelen ışınımın tamamını yansıtan cisimler ise beyaz cisim ($\epsilon = 0$) olarak adlandırılır. Bir cismin uzaya yaydığı toplam ışınım enerjisi (G), başka bir cisme rastladığında üç olay meydana gelir. Enerjinin bir kısmı (R) cismin yüzeyinden yansyarak uzaya dağılır, bir kısmı (τ) cismin içerisinde geçerek diğer yerlere akar, bir kısmı da (A) cismin içerisinde yutulur.

Bu durumda,

$$G = R + \tau + A \quad (2.13)$$

yazılabilir. Bu denklemde bütün terimler G ile bölünürse,

$\rho = \frac{R}{G}$	Işınım yansıtma oranı, yansıtılan ışınımın gelen ışınım oranı
$\alpha = \frac{A}{G}$	Işınım yutma oranı, yutulan ışınımın gelen ışınım oranı
$\tau = \frac{\tau}{G}$	Işınım geçirme oranı, geçirilen ışınımın gelen ışınım oranı

olmak üzere,

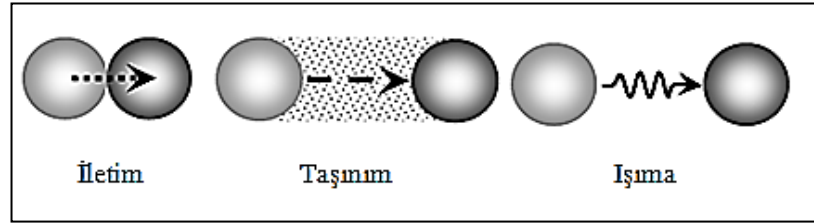
$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2.14)$$

bağıntısı elde edilir. Burada ρ , malzemenin cinsine ve yüzeyin pürüzlülüğüne bağlıdır. α ve τ ise cismin fiziksel özelliklerine bağlıdır [8].

Sonuç olarak yayma oranı ε , yüzey alanı A ve mutlak sıcaklığı T_s olan bir yüzeyin, $T_{\text{çevre}}$ sıcaklığındaki çok daha büyük bir yüzey tarafından çevrelediği düşünüldüğünde ve iki yüzey arasındaki ortamın ışınlamayı yaymadığı, yutmadığı veya yansıtmadığı kabul edildiğinde, birim zamanda ışınlaması geçişi:

$$Q_{\text{yayılan}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_{\text{çevre}}^4) \quad (2.15)$$

eşitliği ile hesaplanır. Kısaca ısı transfer mekanizmalarını özetleyecek olursak, üç farklı mekanizma ile işleyen ısı transferi, moleküllerin birbirlerine temasından dolayı gerçekleşen iletim ile ısı transferi, akışkan ortam içerisindeki ısı transferi olan taşınım ve elektromanyetik dalga yayılımı şeklindeki ısı transferi olan ışımadan oluşmaktadır. Şekil 2.4'te basitçe gösterilmiş olan bu üç mekanizma ısı yalıtımında çok önemli rol oynamaktadır [15].



Şekil 2.4: Isı geçişi mekanizmaları.

2.2. Geleneksel Yalıtım Teknolojisi

Isı yalıtımı günlük hayatta bir çok farklı uygulama alanında karşımıza çıkmaktadır. Bir sistemin sıcaklığını belirli bir seviyede tutmak ya da belirli bir sıcaklığa getirmek için gerekli ısıtma ve soğutma işlemlerindeki gücü azaltmak ve sıcaklık değişim hızını azaltmak için ısı akısında azalma meydana gelmesi gerekmektedir. Geleneksel yalıtım malzemelerinin temel mantığı; gözenekli, granüler, lifli veya köpüklü bir yapının ısı iletim katsayısı oldukça düşük olan havayı sarmasıyla meydana gelmiş bir yapıdan oluşmasıdır. Bu malzemelerdeki ısı transferi iletim ve gaz taşınımını ilesağlanır. Taşınımın çok küçük gözenekler içerisinde gerçekleşmesi sağlanır. Işıma ile ısı transferi ise opaklaştırıcı bir malzeme kullanılarak minimize edilir [24].

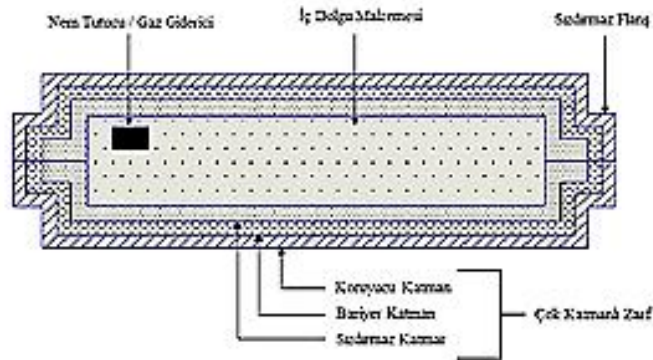
Çizelge 2.1’de bazı geleneksel yalıtım malzemeleri ve ısı iletim katsayıları görülmektedir.

Çizelge 2.1: Bazı geleneksel yalıtım malzemeler ve ısı iletim katsayıları

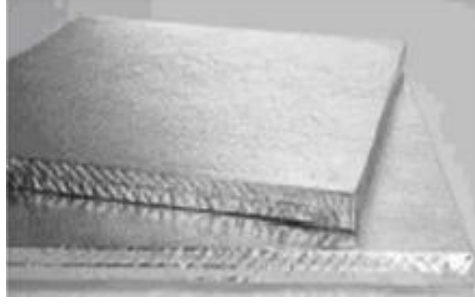
Yalıtım Malzemesi	Isı iletim katsayısı (mW/m.K)
Taş Yünü	35 – 45
Cam Yünü	40 – 50
Ekstrüde polistiren	32 – 35
Poliüretan (CO ₂)	23 – 25
Poliüretan (n-iso-pentan)	21 – 22
Poliüretan (c-iso-pentan)	19,5 – 20,5
Hidrofobik aerojel	19,5 – 20

2.3. Vakumlu Yalıtım Teknolojisi

Vakumlanabilir bir yalıtım malzemesinin, gaz tutucu bir malzeme ile birlikte vakumlanarak gaz ve su buharı geçirgenliği çok düşük olan bir bariyer malzemesi içerisinde sızdırmaz olarak kapatılması ve bu şekilde oluşturulan panellerin yalıtılacak hacim içerisine yerleştirilmesi, vakumlu izolasyon paneli (VIP) kavramını oluşturmaktadır. İç dolgu malzemesi gaz moleküllerinin serbest akışını koruyarak, iletim yolu ile gerçekleşen ısı transferini azaltan, dayanıklı ve açık gözenekli yapıda bir malzeme olmak zorundadır. Koruyucu bariyer, vakumlanmış iç malzemenin dışını tamamen saracak şekilde tasarlanmış malzemedir. Kullanılan gaz bariyer, örneğin, metalize film, iç dolgu malzemesi için gaz ve nem geçirmezlik sağlamalıdır. Gaz giderici malzemeler; olası gaz ve nem sızmaları durumunda, VIP’i içerisindeki basınç seviyesini yükselmesine önlem olması amacıyla izolasyon performansının düşmemesi için iç dolgu malzemesine eklenirler. Şekil 2.5’te vakum izolasyon panelinin şematik gösterimi ve Şekil 2.6’da dış görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.5 : Vakum izolasyon paneli iç yapısı.

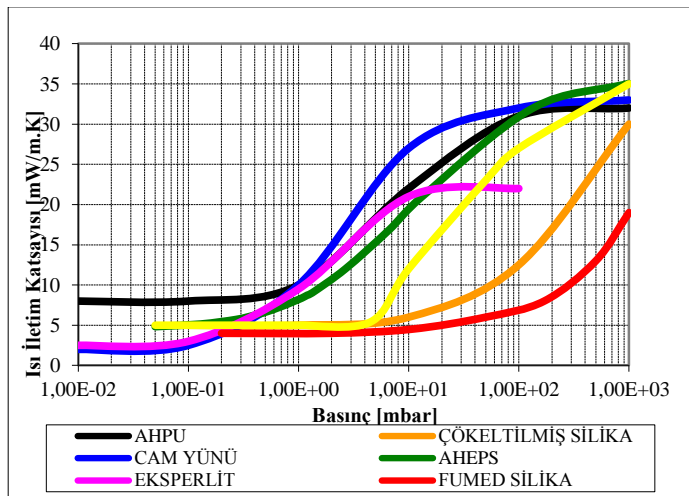


Şekil 2.6: Vakum izolasyon paneli dış görüntüsü.

Vakum izolasyon paneli bileşenleri ve bu bileşenlerin yalıtıma olan etkisi ileriki bölümlerde detaylı olarak incelenecektir. Vakumla yalıtım yapılırken, yalıtılan hacmin iç basıncı kritik bir öneme sahiptir. Isı iletim katsayısı, panel iç basıncı ve kullanılan dolgu malzemesine bağlı olarak doğru orantılıdır. Birçok iç dolgu malzemesi için ısı iletim katsayısı ile basınç ilişkisini gösteren S-eğrileri olarak tabir edilen eğriler literatürde bulunmaktadır. Bu eğriler yardımı ile ısı iletim katsayısı bilinen vakumlu bir sistemin ısı iletim katsayısı bulunabilmektedir. Bu eğriler deneysel olarak belirlenmektedir. Şekil 2.7’de literatürden alınan birçok yalıtım malzemesinin S-eğrileri görülmektedir. Bu yalıtım malzemelerinden açık hücreli poliüretan (siyah) ve açık hücreli ekstrüde polistiren (yeşil), köpük olarak imal edilmektedir. Mikroporoz yapıdaki toz malzemeler ise çökeltilmiş silika (turuncu), eksperlit (pembe), kizelgur (sarı) ve fumed silikadan (kırmızı) oluşmaktadır. Cam yünü lifli yapıda bir izolasyon malzemesidir. Bu iç dolgu malzemelerin en önemli özellikleri vakumlanabilir oluşları yani sahip olduğu açık yapıdaki porları dolduran havanın tamamen vakumlanması ile etkin ısı iletim katsayısının azalması, dolayısıyla yalıtım malzemesi olarak kullanılabilmesidir. Şekil 2.7’de verilen S-eğrilerinde yatay eksen panel iç basıncını, düşey eksen ise malzemenin o basınçta sahip olduğu etkin ısı iletim katsayısı değerini göstermektedir. Örneğin, 10^{-2} mbar’a vakumlanmış cam yünü numunesinin etkin ısı iletim katsayısı 3 mW/m.K iken; vakum seviyesi 100 mbar’a çıktığında etkin ısı iletim katsayısı değeri de 32 mW/m.K değerine çıkmaktadır. S-eğrileri detaylı olarak incelendiğinde, iç dolgu malzemesinin türünden bağımsız olmakla beraber her eğride basıncın bir sınır değeri olduğu ve bu değer altındaki basınçlarda ısı iletim katsayısının sabit kaldığı görülmektedir. Aynı eğrilerde, bu değerden sonra ısı iletim katsayısının dramatik artış gösterdiği ve basınçtan bağımsız hale gelerek sabitlendiği görülebilir. İşte bu noktada, ısı iletim katsayısının aniden artmaya başladığı, yani vakumun, yalıtımı iyileştirme işlevinin

kaybolmaya başladığı basınç değerine, o iç dolgu malzemesinin kritik basıncı denir. Kritik basınç kavramı vakum teknoloji ile üretilen iç dolgu malzemelerin karakterizasyonu açısından çok büyük önem taşımaktadır. Fiziksel olarak kritik basınç, izolasyon malzemesinin gözenekleri içerisindeki gaz moleküllerinin ardışık iki çarpışma arasında katettiği mesafe olan ortalama serbest yol uzunluğunun, yalıtım malzemesinin gözeneklerin ortalama çapına eşitlendiği gaz basıncı olarak tanımlanmaktadır. Kritik basınç altında, gaz moleküllerinin çarpışması seyrekleşeceği için gaz molekülleri vasıtası ile taşınan ısı iletimi (taşınım) ortadan kalkar ve ısı transferi katısal iletim ve ışıma ile gerçekleşir. Işıma ile ilgili olarak ise opaklaştırıcı malzemeler iç dolguya ilave edildiği için, teorik olarak kritik basınç altında kalan vakum seviyelerinde ısı transferi sadece katısal iletim ile gerçekleştiği kabul edilmektedir [19]. Kritik basıncın üzerine çıkıldığında iç dolguda bulunan gözenekler içerisindeki gaz moleküllerinin miktarı arttıkça ısı iletimine sebep olan moleküler çarpışmalar artar ve eğri S şeklini alır.

Vakumlanabilir yalıtım malzemelerinin kendilerine ait farklı kritik basınç değerleri, farklı kritik basınç altı etkin ısı iletim katsayıları ve farklı atmosferik basınç ısı iletim katsayıları vardır. Çizelge 2.2’de egrideki malzemelere ait bu üç farklı değerler özetlenmiştir. Çökeltilmiş silika ve fumed silikadan vakumlanmış panellerin S – eğrisi eğiliminde olmadığı, toz malzemelerin atmosferik basınçta dahi etkin ısı iletim katsayısı değerleri lifli ve köpük malzemelere nazaran daha düşüktür. Bu da uygulamalarda vakumun zarar görmesine rağmen toz malzemelerin daha efektif olduğunu göstermektedir.



Şekil 2.7 : Çeşitli iç dolgu malzemelerinin S – eğrileri [55].

Çizelge 1.2 : Eğride belirtilen mazlemelerin S - eğrisi karakteristikleri

Yalıtım Malzemesi	Kritik basınç değeri (mbar)	Kritik basınç değeri altı ısı iletim katsayısı (mW/m.K)	Atmosferik basınçta ısı iletim katsayısı (mW/m.K)
AHPU	1	8	32
AHEPS	0,5	5	35
Cam Yünü	0,1	3	33
Çökeltilmiş Silika	10	5	30
Fumed Silica	20	4,5	18
Eksperlit	0,1	4	22
Kizelgur	7	5	35

2.4. Düşük Basıncılı Gazların Fiziği

Kinetik gaz teorisi gazların aralarında hiçbir kuvvet olmayan farklı partiküllerden oluştuğu esasına dayanır. Bu teorinin en önemli sonucu gaz basıncını, gaz yoğunluğunun ve gaz moleküllerinin ortalama hızlarının karesinin fonksiyonu olarak vermesidir. Moleküller belirli hızlarda doğrusal olarak hareket ederek içinde buldukları kabın duvarlarına çarparlarken birbirleriyle de çarpışırlar. Gazlar içerisindeki ısı iletimi, yüksek kinetik enerjideki moleküllerin daha düşük enerji seviyelerindeki moleküllere çarpması ve momentum aktarımı sonucunda gerçekleşir [34]. Aralarında gaz bulunan farklı sıcaklıklardaki paralel iki yüzey arasındaki gaz kaynaklı ısı iletimi de bu mekanizmayla gerçekleşir. Partiküller arasında birim zamanda gerçekleşen ortalama çarpışma sayısına çarpışma oranı denir. Her bir gaz molekülünün diğer moleküllerle yaptığı iki çarpışma arasında katettiği mesafeye ise ortalama serbest yol denir. Bu kavramların daha açık biçimde anlatılması, düşük gazlarda meydana gelen ısı iletiminin anlaşılması bakımından önemlidir [16].

2.4.1. Moleküler Yoğunluk

Aynı sıcaklık ve basınç koşullarında eşit hacme sahip olan tüm gazlar aynı sayıda moleküle sahiptir. Bir mol madde içerisindeki molekül sayısı, Avagadro sayısı olarak tanımlanmaktadır ve değeri 6.023×10^{23} molekül/mol'dür. M moleküler ağırlığındaki bir gazdan oluşan, P basıncı, T sıcaklığı ve V hacmindeki W kütleli bir gaz numunesi için genel gaz yasası aşağıdaki gibi yazılmaktadır:

$$P \cdot v = \left(\frac{W}{M}\right) R_0 T \quad (2.16)$$

Buradan R_0 üniversal gaz sabitidir ve değeri $8,314 \text{ Joule/}^\circ\text{K.mol}$ 'dür. $\left(\frac{W}{M}\right)$ değeri mol sayısını ifade eder, sonuç olarak birim hacimdeki molekül sayısı:

$$\left(\frac{W}{M}\right) \frac{N_A}{V} = n \quad (2.17)$$

ile ifade edilmektedir. Denklem 2.18'e ulaşılır.

$$P = n \left(\frac{R_0}{w_A}\right) T = nkT \quad (2.18)$$

Burada $k = R_0 / N_A$ değerini almakta ve Boltzmann sabiti olara adlandırılmaktadır. Boltzman sabitinin sayısal değeri $k = 8.314 \times 10^7 \text{ erg / }^\circ\text{K}$ olarak hesaplanır. Çok düşük basınçlarda ($P < 10^{-10} \text{ Pa}$), gazı içermekte olan hacmin yüksek yapışma oranı (f) söz konusudur [19]. Yani duvarlara çarpmakta olan gaz moleküllerinin sadece bir kısmı geri yansımaktadır. Bu durum D_a ve D_r tarafından geliştirilmiş olan aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$P = \frac{\bar{n}(2 - f)kT}{2} \quad (2.18a)$$

Burada \bar{n} , bir hacim içerisinde bulunan gaz moleküllerinin belirli bir andaki ortalama yoğunluğudur. Moleküller arasındaki mesafeler, tüm moleküllerin sabit ve birbirlerinden eşit uzaklıkta kabul edildiği bir model kullanılarak hesaplanabilir. Bu durumda moleküller arasındaki uzaklık aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$l = n^{-1/3} \approx 4.6 \times 10^{-7} \left[\frac{T}{P} \right]^{1/3} \text{ (cm)} \quad (2.19)$$

Bu modele göre $T = 273 \text{ }^\circ\text{K}$ sıcaklığındaki gazlar için farklı basınçlardaki l değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır, bu mesafelerin hesaplamaların amacı ortalama serbest yol uzunluklarından çok küçük ve molekül öaplarından çok büyük olmasını göstermektir [28].

$$l \approx 3.3 \times 10^{-7} \text{ cm (P = 1 bar)}$$

$$l \approx 3.0 \times 10^{-6} \text{ cm (P = } 10^{-3} \text{ bar)}$$

$$l \approx 3.0 \times 10^{-3} \text{ cm (P = } 10^{-8} \text{ mbar)}$$

2.4.2. Moleküler Kinetik Enerji

Gazların kinetik teorisi, maddenin moleküllerden oluştuğu ve gazları oluşturan moleküllerin gazın sıcaklığı ve basıncını belirleyen sürekli bir hareket içerisinde olduğu esasına dayanmaktadır. Gaz molekülleri hareketleri sırasında birbirleriyle ve gazı içeren kabın duvarlarıyla çarpışırlar. Bu çarpışmalar sonucunda kabın duvarlarına aktarılmakta olan momentum miktarı, kap içerisindeki basıncın büyüklüğünü belirler. Yani basınç, moleküllerin kinetik enerjisi ile ilişkilidir [28].

x eksenine dik ve birbirinden L kadar uzakta bulunmakta olan duvarlarının yüzey alanı A olan kapalı bir kap içerisindeki gaz ele alınsın. x eksen yönünde v_x hızıyla hareket etmekte olan m kütleli tek bir gaz molekülünün A yüzeyli duvarlara yaptığı ardıl iki çarpışmanın arasında geçen süre,

$$\Delta t = 2L/v_x \quad (2.20)$$

Ve her çarpışma sonunda parçacığın momentumundaki değişim ise,

$$\Delta(mv) = mv_x - m(-v_x) = 2mv_x \quad (2.21)$$

olacaktır. Newton'un ikinci yasasına göre kuvvet, zamana göre momentumundakideğişim olarak ifade edilmektedir. Böylece molekülün çarpışma sırasında duvara uyguladığı kuvvet:

$$F = \Delta(mv) / \Delta t = 2mv_x / (2L/v_x) = m v_x^2 / L \quad (2.22)$$

ve tek bir gaz molekülünden kaynaklanan basıncın büyüklüğü:

$$P_x = F/A = m v_x^2 / (AL) = m v_x^2 / V \quad (2.23)$$

olarak bulunur. Burada V, gazın içinde bulunduğu hacimdir. N adet molekülden kaynaklanan toplam basınç:

$$\Sigma P_x = N(m\bar{v}_x^2 / V) = nm\bar{v}_x^2 \quad (2.24)$$

Burada \bar{v}_x^2 değeri, birim hacimdeki n adet molekül için v_x^2 değerlerinin ortalamasıdır. Benzer şekilde $\Sigma P_y = n m \bar{v}_y^2$ ve $\Sigma P_z = n m \bar{v}_z^2$ 'dir. Moleküllerin hareketleri rastgele olduğu için farklı doğrultulardaki ortalama hızlarda da fark

olmadığı varsayılabilir. Böylece herhangi bir yöndeki basınç aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\Sigma P = \Sigma P_x = \Sigma P_y = \Sigma P_z = \frac{1}{3} n m \bar{v}^2 \quad (2.25)$$

Bir molekülün ortalama kinetik enerjisinin $\bar{E} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$ olduğu da hesaba katılırsa aşağıdaki sonuca varılır:

$$\bar{E} = \frac{3}{2} k T \quad (2.26)$$

Bu eşitlikten çıkan sonuç, tüm gazlar için moleküllerin ortalama kinetik enerjisinin aynı olduğu ve mutlak sıcaklıkla orantılı olduğudur. Dolayısıyla sıcaklık gazların kinetik enerjileri için kritik bir büyüklüktür [33].

2.4.3 Moleküler Hız

Moleküler çarpışmaların sürekli oluşmasının sonucu olarak geniş bir moleküler hız dağılımı ortaya çıkmaktadır. Hızları v_1 ve v_2 olan iki molekülün çarpışmasından sonraki hızları v_1 ve v_2 olarak kalmasa da toplam kinetik enerji miktarı olan $m(v_1^2 + v_2^2)/2$ sabit kalacaktır [28]. Maxwell ve Boltzman, hızlardaki dağılımı denklem 2.27’de belirtilen dağılım yasası ile açıklamışlardır:

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dv} = f_v = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{\left(\frac{-mv^2}{2kT} \right)} \quad (2.27)$$

Burada f_v , v ve $v+dv$ hızları arasındaki hızlarda hareket eden moleküllerin birim hız aralığına oranını ifade etmektedir. $v = 0$ ve $v = \infty$ ’da $f_v = 0$ ’dır. F_v ’nin maksimum olduğu hız değeri olan v_p ise f_v ’nin v ’ye göre türevinin sıfır olduğu hız değeridir:

$$\frac{df_v}{dv} = \frac{4}{\pi^{1/2}} \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} \left(2v - \frac{mv^3}{kT} \right) \exp \left(\frac{-mv^2}{2kT} \right) = 0 \quad (2.28)$$

$$v_p = (2kT/m)^{1/2} = (2R_0 T/M)^{1/2} \quad (2.29)$$

v_p değeri, “en olası hız” olarak tanımlanır, yani bu hıza sahip moleküllerin sayısı, diğer moleküllerden daha fazladır. Hızların ortalama karekök değeri ise ifade (2.30)’daki gibi hesaplanır:

$$v_r = [\bar{v}^2]^{1/2} = (3kT/m)^{1/2} = 1.225 v_p \quad (2.30)$$

Bir gazın davranışını temsil eden moleküler hız değerlerinden hangisinin göz önüne alınacağı, gaz davranışının incelendiği olayın karakterine bağlıdır. Örneğin akış olaylarında olduğu gibi, moleküllerin olayı doğrudan hızlarıyla etkilediği durumlarda aritmetik ortalama hız kullanılırken, moleküler kinetik enerjinin etkin olduğu durumlarda ortalama karekök hız değeri kullanılmalıdır.

2.4.4. Ortalama Serbest Yol Uzunluğu

Moleküller, hareketleri esnasında birbirleri ile çarpışırlar. Bir molekülün ardışık iki çarpışma arasında katettiği yola serbest yol denir. Bu mesafe, molekül hızlarının bir fonksiyonu olduğu için ortalama serbest yol (L_{ort}) kavramı kullanılmaktadır. Ortalama serbest yol kavramı ise her molekül tarafından, ardışık iki çarpışma arasında katedilen ortalama mesafe veya tek bir molekülün belirli bir zaman içerisinde gerçekleştirdiği ardışık çarpışmalar sırasında katettiği ortalama mesafe olarak tanımlanmaktadır [48].

ξ çapında ve v hızıyla hareket etmekte olan bir molekül, δt süresinde $v\delta t$ mesafesini kateder. Bir hacim içerisinde hareket etmekte olan iki molekülün merkezleri arasındaki uzaklık ξ 'den daha küçük olmazsa bu moleküller çarpışmaz. Dolayısıyla 2ξ çapındaki bir silindir içerisinde hareket eden bir molekül, herhangi bir çarpışmaya maruz kalmadan bu silindiri boydan boya katedebilir. Söz konusu silindirin hacmi (2.31) eşitliğinde verilmektedir:

$$\delta V = \left(\frac{\pi}{4}\right) (2\xi)^2 v \delta t \quad (2.31)$$

Birim hacimdeki moleküllerin sayısı n molekül/cm³ olacağı için, bir moleküle düşen ortalama hacim $1/n$ cm³ olacaktır. δV hacmi $1/n$ değerine eşit olduğunda, bir çarpışma olabilmesi için hacim içerisinde başka moleküller de bulunmalıdır. Çarpışmalar arasında geçen ortalama süre $\tau = \delta t$ ise,

$$\frac{1}{n} = \pi \xi^2 v \tau \quad (2.32)$$

$$L_{ort} = v \tau = 1/(\pi n \xi^2) \quad (2.33)$$

olarak bulunur. Referans alınan molekül dışında diğer moleküllerin de hareket halinde bulunduğu daha gerçekçi bir durum ele alındığında ise (2.33) denklemi aşağıdaki hali alacaktır:

$$L_{ort} = (v/v_t) 1/(\pi n \xi^2) \quad (2.34)$$

Burada v mutlak hız değerini, v_r ise moleküllerin bağıl hızlarını vermektedir. Clausius'a göre $v/v_r = \frac{3}{4}$ 'tür [2]. Böylelikle,

$$L_{ort} = 3/4 (\pi n \xi^2) \quad (2.35)$$

olarak bulunur.

Maxwell – Boltzmann hız dağılımı ve (2.4)denklemi göz önüne alındığında,

$$L_{ort} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n \xi^2} = \frac{k T}{\sqrt{2}\pi n \xi^2 P} \quad (2.36)$$

$$L_{ort} = \frac{2.33 \times 10^{-20} T}{\xi^2 P} (cm) \quad (2.37)$$

eşitlikleri yazılabilmektedir. Burada T , °K cinsinden sıcaklığı, P , Torr cinsinden gaz basıncını ve ξ , cm cinsinden molekül çapını vermektedir. 25°C (298°K) sıcaklıkta hava için (2.37) denklemi,

$$L_{ort} = \frac{5 \times 10^{-3}}{P} (cm) \quad (2.38)$$

halini alır.

Denklem (2.27), sıcaklığın ortalama serbest yol uzunluğuna hiç bir etkisi olmadığını göstermektedir. Böyle bir sonucun sebebi, bu denklemin moleküller arasında tamamen elastik çarpışmalar olduğunun kabul edilmesi, dolayısıyla sıcaklıktan kaynaklanan moleküller arası bir kinetik enerji transferinin göz önüne alınmamasıdır.

$$L_{ort} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi n \xi^2 (1 + \frac{c}{T})} \quad (2.39)$$

Sabit bir n değerinde, ortalama serbest yol uzunluğunun sıcaklığa bağlı olarak nasıl değiştiği, Sutherland tarafından deneysel olarak gösterilmiştir. Burada c , Sutherland sabitidir ve moleküller arasındaki çekim gücüne göre değer almaktadır [2].

momentumu ile girerken, u' katmanındaki bir molekülden Lort mesafesine kadar aşağıda bulunmakta olan bir molekül u' katmanına

$$(\mu') = m(L' - L_0)u / L \quad (2.43)$$

momentumu ile girer. Hareketsiz durumdaki bir gaz içerisinde herhangi bir yönde birim zamanda birim alandan geçen molekül sayısı $\frac{1}{6}n v_{av}$ 'ye eşittir. Bu durumda A alanından iletilen net momentum miktarı (2.44)'teki ifade gibi olacaktır:

$$\frac{1}{6} A n v_{av} ((\mu')_+ - (\mu')_-) = \frac{1}{3} A n v_{av} m L_{ort} u / L \quad (2.44)$$

$$\mu = \frac{1}{3} n m v_{av} L_{ort} = \frac{1}{3} \rho v_{av} L_{ort} \quad (2.45)$$

Denklem (2.41) ve (2.44)'ten aşağıdaki sonuç elde edilir:

Burada $\rho = nm$ değeri gazın yoğunluğunu vermektedir. Dushman, değişken moleküler hız dağılımı ve serbest yol dağılımlarının göz önüne alındığı durumda ve moleküllerin rijit ve elastik olduğu kabulünü yaptığında viskozite için şu eşitliği elde etmiştir:

$$\mu = 0.499 n m v_{av} L_{ort} \quad (2.46)$$

Denklem (2.36) ve (2.46) kullanılarak bir gazın viskozitesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\mu = \frac{0.499 n m v_{av}}{\sqrt{2\pi\xi^2}} = \frac{0.998}{\pi\xi^2} \left(\frac{mkT}{\pi}\right)^{1/2} \quad (2.47)$$

μ , L_{ort} ile orantılı olduğu için Sutherland'in elde ettiği (2.33) denklemi, viskozite için de geçerli olmaktadır:

$$\mu = \frac{\frac{0.998}{\pi\xi^2} \left(\frac{mkT}{\pi}\right)^{1/2}}{1 + \frac{c}{T}} \quad (2.48)$$

Burada c , Sutherland sabitidir [17].

(2.48) denklemine göre bir gazın viskozitesi sıcaklık ile artmaktadır. Sıvılarda ise viskozitenin sıcaklık ile azaldığı bilinmektedir. Yukarıdaki eşitliklerde ifade edilen gazın viskozitesi, sadece belirli basınç aralıklarında geçerlidir. Çok yüksek veya çok düşük basınçlardaki gazların viskoziteleri farklı bir şekilde hesaplanır. Çok yüksek

basınçlarda gaz molekülleri arasındaki ortalama mesafe o kadar düşüktür ki moleküller arasındaki kuvvetler önem kazanmaya başlar ve momentum geçişi anlatılan durumdan çok farklı biçimde oluşur. Çok düşük basınçlarda ise ortalama serbest yol uzunluğu, molekülleri içeren haznenin duvarları arasındaki mesafeyi aştığı zaman moleküller neredeyse birbirleriyle çarpışmazlar. Bu durumda momentum transferi sadece gaz molekülleri ile duvarlar arasında gerçekleşir. Ortalama serbest yol uzunluğu, gazın davranışını ve o gazın viskoz ya da moleküler akış durumunda oluşunu belirler.

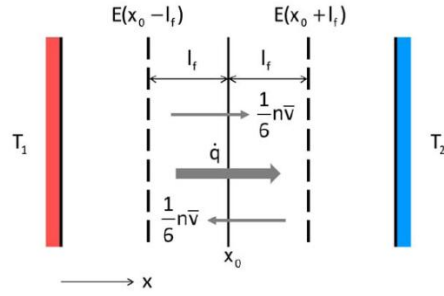
2.6. Vakumlanmış Toz Bazlı Yalıtım Uygulamalarında Isı Geçişi

Önceki bölümlerde ısı transferine genel bakış ve gazların düşük basınçtaki davranışları detaylı olarak incelenmiştir. Bu bölümde ise, tezin ana konusu olan toz bazlı malzemelerin vakum seviyelerini düşürülmesi ve sızdırmaz bir metalize film içine alınması sonucu ortaya çıkan vakumlu panel içerisindeki ısı transferi incelenmiştir. İç basıncı çok düşük seviyelere getirilmiş toz bazlı sistemlerde ısı transferine dört farklı mekanizmanın katkısı vardır: Gaz iletimi, katı iletimi, ışımaya ve birleşim (coupling) etkisi. Bu bölümde tüm ısı transfer mekanizmaları incelenmiştir. Buna ek olarak nemin ısı transferine ve ısı iletim katsayısına olan etkisi araştırılmıştır.

2.6.1. Gaz ile ısı iletimi ve Smoluchowski etkisi

X_0 konumunda bir plaka ve farklı sıcaklıklarda iki duvar arasındaki gaz düşünüldüğünde (Şekil 4.1) birim alana birim zamanda düşen gaz moleküllerinin sayısı, tek bir yön düşünüldüğünde $nv/6$ olarak hesaplanır. Burada n , partikül yoğunluğu ve v Maxwell-Boltzmann ilişkisine bağlı, partiküllerin ortalama hızıdır. Partikül hareketi negatif ve pozitif yön ile birlikte üç boyutlu her boşlukta da geçerli olduğundan, faktör $1/6$ olarak alınır. Moleküllerin, çarpışan diğer partiküller ile arasındaki ortalama uzaklığa, l_f ortalama serbest yolu denir. Duvarlar ile gaz yoğunluğu arasındaki mesafe çok geniştir. Duvarlardaki çarpışmalar, gaz-gaz çarpışmaları ile karşılaştırılır. Partiküllerin ısı enerjisi $E=k_B T/2$, sıcaklıklarının bir fonksiyonudur ve x doğrultusunda değişir. Aynı zamanda termal enerji E , x 'e de bağlı bir değerdir [34]. Tabakadan sol tarafa geçen moleküllerin ortalama enerjisi, $E_{lr} = E (X_0 - l_f)$ eşitliği ile bulunmaktadır. Bunun nedeni, son çarpışmanın tabakadan ortalama uzaklıkta l_f gerçekleşmesidir. Benzer ilişki, tabakadan sağ tarafa taşınan

partiküller için de geçerlidir. Bu durumda ortalama ısı enerjisi, $E_{tr} = E(x_0 + l_f)$ denkleğinden bulunur.



Şekil 2.9 : Gazların kinetik teorisine göre ısı iletimi [51].

$$q_{net} = -\frac{1}{3} \rho c_v v l_f \frac{dT}{dx} \quad (2.49)$$

Tabakanın karşısına geçen ısı iletimi ifade (2.49) gibi ifade edilir. Burada ρ kütle yoğunluğu, C_v gazların özgül ısı kapasitesidir. Isı iletimin Fourier yasası ile karşılaştırıldığında, gazların ısı iletim kat sayıları aşağıdaki gibi bulunur;

$$\lambda_g = \frac{1}{3} \rho c_v v l_f \quad (2.50)$$

İdeal durumda, d duvarlar arası mesafe, l_f gaz moleküllerinin çarpışma sıklığını ifade eden ortalama serbest yoldur. Ancak, gerçek durumda, duvarların etkisi fark edilir hale gelebilir. Bu da karakteristik uzunluk d_c ile ifade edilir. d_c , sistem sınırları arasındaki mesafedir. Örneğin, gözenekli malzemenin içindeki gazın karakteristik uzunluğu, ortalama gözenek çapına bağlıdır. İki paralel tabakanın yukarıdaki geometrisi için, d_c , tabakalar arasındaki uzaklık olarak belirtilir. Ortalama serbest yol ve karakteristik uzunlu arasında bir oran olan boyutsuz Knudsen sayısı Kn ifade (2.51)'deki gibi bulunur:

$$Kn = \frac{l_f}{d_c} \quad (2.51)$$

Knudsen sayısını ifade etmek için üç farklı gaz ısı iletimi sisteminden bahsedilebilir;

- A) Süreklilik:** ($Kn \ll 1$) $Kn \ll 1$ olduğunda $d_c \gg l_f$ ise sınır duvarlar ile birlikte çarpışmalar ihmal edilebilir. Denklem 4.2. de belirtilen ısı iletim denklemi kullanılır. Gazların kinetik teorisinden yararlanılarak ortalama serbest yolun partikül (ve kütle) yoğunluğu ile ters orantılı olduğu çıkarılabilir. $l_f \approx n^{-1} \approx \rho^{-1}$.

durumunda gaz basıncından bağımsızdır. $Kn \ll 1$ için ısı transferi, ısı λ_g ifadesi , ρl_f ve c_v , v miktarlarını da içerir ancak ideal bir gazın basıncına bağlı değildir. Bu ifadeden de anlaşılacağı gibi ısı iletkenliği süreklilik yayılımı olarak da ifade edilebilir. Çünkü sadece gaz moleküllerinin çarpışmalarına bağlıdır.

B) Serbest Moleküler Akış/Knudsen Akışı ($Kn \gg 1$) $d_c \ll l_f$ olması durumunda geçerlidir. Düşük gaz basınçlarında ya da küçük gözenek çaplarında meydana gelir. Moleküller arası çarpışmalar ihmal edilebilir. Böylece termal enerji sınır duvarları arası taşınır. Bu duruma da balistik taşınım adı verilir.

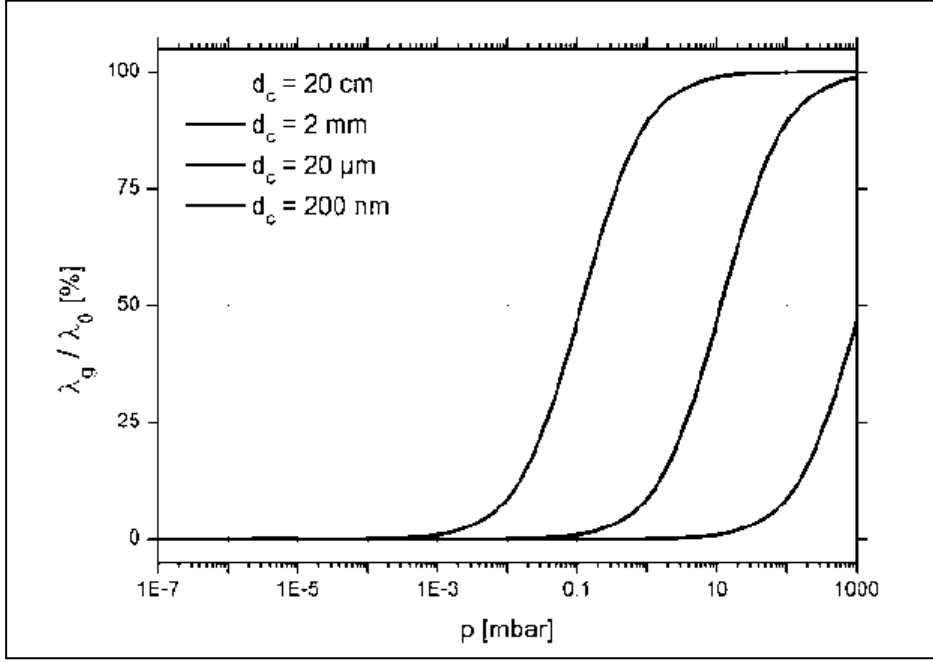
C) Geçiş Durumu ($Kn \approx 1$) Sürekli hal ile serbest moleküler akış arasında yer alan durumdur. En genel yöntem Boltzman taşınım denkliğinin çözülmesidir. Analitik çözümler, basit geometriler ve dar basınç sıcaklık eğrileri için geçerlidir. Geçiş durumu için ısı iletim katsayısı aşağıdaki denklem ile verilmiştir.

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{1 + \frac{p^{1/2}}{p}} \quad (2.52)$$

Burada λ_0 , sürekli durumdaki ısı iletim katsayısı, $p^{1/2}$ sürekli haldeki değerin yarısına ulaşıldığındaki λ_g için karakteristik basınçtır. β_s deneysel olarak bulunur. Hava için $p^{1/2} = 230 \text{ mbar} / d_c [\mu\text{m}]$ ve $\beta_s = 1,6$ dir. Bu denklik Sherman İnterpolasyonu olarak bilinir.

Havanın gaz iletim kat sayısı basıncın bir fonksiyonu olarak Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Yüksek basınçlarda sürekli durumda belirtildiği gibi λ_g sabit olur. Knudsen akışının tersi durumunda ısı iletim katsayısı basınç iler orantılıdır. Knudsen sayısına göre belirlenen geçiş durumunda karakteristik uzunluk da ortalama serbest yol da gaz basıncına bağlıdır. Bu yüzden d_c 'nin farklıdeğerlerinde farklı grafikler elde edilir. d_c 'nin seçimi verilen basınçta, gaz iletim katsayısını belirler. Genelde gazların iletim katsayılarını sınır duvarlarının etkisi halinde azaltmak, Smoluchowski etkisi olarak adlandırılır ve talınım şle ilgili teorik ve deneysel olarak ilk çalışmaları yapan Marian Smoluchowski tarafından bulunmuştur. Sürekli durumda ısı iletim katsayısı sıcaklığa bağlıdır ve λ_0 'dır. ρ ve l_f , ters orantıdan dolayı iptal edilir ve c_v 'de ideal gazlar için serbesttir. v Maxwell Boltzman eşitliğine indirgenirse aşağıdaki denklik oluşur;

$$v = \int_0^{\infty} F(v)v dv = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (2.53)$$



Şekil 2.10: Farklı boyutlarda havanın ısı iletim katsayısının basınçla değişimi [51].

Şimdiye kadar, gazların iletim katsayıları ile ilgili genel özellikler ve basınç ve sıcaklığa bağlılıkları incelenmiştir. Devam edecek olan bölümde bazı şartlar altında özel etkileri incelenecektir. İlk olarak, gazların iletim katsayıları bulunurken denklem 2.54'ten de yararlanılarak farklı büyüklüklerle önemli ilişkiler kurulur.

$$\lambda_g = \frac{1}{3} \rho c_v v l_f \sim \frac{f}{\zeta \sqrt{M}} \quad (2.54)$$

Bu sonuçlara göre çarpışmaların yüksek enine kesitleri ile birlikte ζ gazlar, yüksek molar ağırlıkları M ve bağımsız değişkenlerin dereceleri f düşük ısı iletim katsayısı değerlerine sahiptir. Tüm bu üç gereklilik inert gazlar olan argon, kripton ve ksenon için geçerlidir. Bu inert gazlar yalnızca tek atom içerirler. Bu nedenle, bağımsızlık derecesi rotasyon ve osilasyonun olmaması halinde ve yalnızca üçüncü dereceden olması durumunda dönüştürülebilir hareketin uygunluğuna bağlıdır. Ayrıca, atomlar, özellikle kripton ve ksenon için oldukça ağır ve geniş efektif çapa sahiptirler. Düşük sürekli ısı iletim katsayısı sonuçları ve gazların diğer özellikleri çizelgede sıralanmıştır. Karşılaştırma için hava referans alınmıştır.

Çizelge 2.3: Argon, Kripton ve Ksenon gazlarının hava ile karşılaştırılması.

	Hava	Argon	Kripton	Ksenon
M(g/mol)	14,007	39,948	83,798	131,293
r_w [pm]	155	188	202	216
f [1]	6	3	3	3
λ₀ [10⁻³ W/mK] T= 25 °C	26,1	17,7	9,5	5,6
α HGS	0,83	1	0,5	0,55
α Al	0,95	0,34	0,5	0,4

Burada; M, molar kütle, r_w Vander Waals yarı çapı, f bağımsızların derecelerinin sayısı, λ₀ sürekli ısı iletim katsayısıdır. α katsayısı, yüksek ağırlıktaki çelik ve alüminyum için alınmıştır. Hava için M, r_w f değerleri saf nitrojen temel alınmıştır.

Gaz basıncı ve sıcaklığa bağlı olması durumu düşünüldüğünde f, ζ ve M parametrelerini içeren denklem aşağıdaki gibidir.

$$\lambda_g(p, T) = \frac{\left(\frac{RT}{8\pi M}\right)^{1/2}}{\frac{16\sqrt{2}\zeta}{5\pi k_B(2f+9)} + \frac{T}{pd_c\alpha_{kir}(f+1)}} \quad (2.55)$$

Gaz sabiti R= 2,31 J/Kmol ve α_{red} azalan katsayıdır. p → ∞ a giderken süreklilik durumu göz önüne alarak limit uygulandığında ;

$$\lambda_g \sim \frac{(2f + 9)\sqrt{T}}{\zeta \sqrt{M}} \quad (2.56)$$

elde edilir. Tam tersi durumda yani p → 0 a giderken limit alındığında denklem;

$$\lambda_g \sim \frac{p\alpha_{red}(f + 1)}{\sqrt{MT}} \quad (2.57)$$

durumuna indirgenir. Bu durumda balistik ısı transferinde olduğu gibi moleküller arasındaki etkileşim, çarpışma ihmal edilir. Enine kesit olan ζ çarpışan moleküller için alınmazlar. Bu durumda konum katsayısı α oluşur ve duvarlar arasındaki etkileşim olarak tanımlanır. Bu etkileşim sıcaklık farkı ile tanımlanan bir büyüklüktür.

$$\alpha = \frac{T_{dış} - T_{iç}}{T_{duvar} - T_{iç}} \quad (2.58)$$

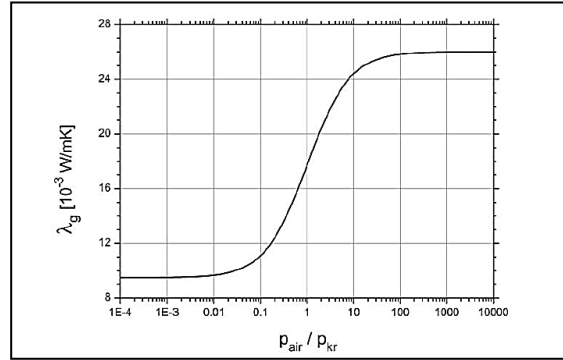
Eğer gelen partiküllerin sıcaklıkları T_{in} olarak alınırsa, çarpışmadan sonraki $T_{dış} = T_{duvar}$ olur ve bu durumda konum kat sayısı olan $\alpha=1$ olur. Sıcaklık değişikliğinin olmadığı durumda ($T_{dış} = T_{iç}$), $\alpha=0$ olur. Bu durumda sıcaklık değişimi ne kadar fazla olursa olsun $0 < \alpha < 1$ olacaktır. Spesifik gaz için kat sayılar farklı malzemelerde çeşitlilik göstermektedir [14]. Bununla ilgili örnek azot, argon ve kripton gazlarının değerleri alınarak çizelgede verilmişti. Eğer gaz iki paralel plaka arasında ve bu plakaların konum katsayıları α_1 ve α_2 olarak alınırsa, iki duvar arasındaki etkileşim incelendiğinde azalan konum katsayısı aşağıdaki denklem ile bulunur.

$$\alpha_{kır} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_1 \alpha_2} \quad (2.59)$$

Zarflanmış toz yalıtım malzemeleri uygulamalarında soy gaz ile birlikte hava yer değiştirebilir. Bu durumda soy gazların yalıtım özelliklerinin iyi olması istenir. Gaz karışımlarının ısı iletim katsayıları, sürekli durumda basınçları ile bağıntı kurularak aşağıdaki denklemde belirtilmiştir.

$$\lambda_t = \frac{\lambda_1 \frac{p_1}{p_2} + \lambda_2}{\frac{p_1}{p_2} + 1} \quad (2.60)$$

λ_i ve p_i sürekli ısı iletim katsayısı ve tek bileşenin kısmi basıncıdır [51]. Toplam ısı iletim katsayısı λ_{tot} kısmi basınçların oranına bağlıdır. Şekil 2.11’de hava ve kripton karışımlarının, S- şekil faktörleri ile ilgili grafik bulunmaktadır.

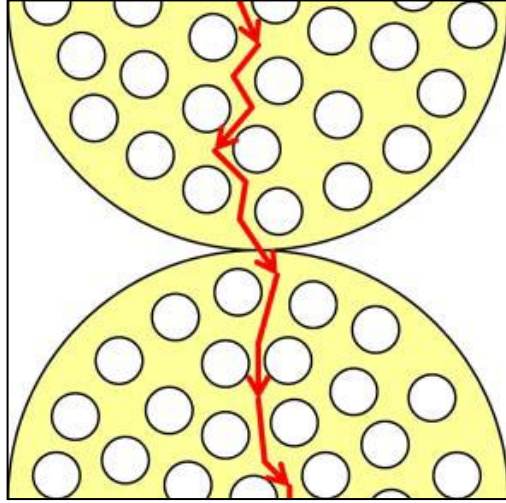


Şekil 2.11: Hava ve kripton gaz karışımının ısı iletim katsayıları değişimi [51].

2.6.2. Katsal ısı iletimi

Bölüm 2.1’de, iletim ile ısı geçişi mekanizması detaylı olarak açıklandı. Ancak, gözenekli malzemelerde katsal ısı iletimi daha karmaşık bir mekanizmadır. İletim genel olarak fononlar ve elektronlar ile kısacası elektriksel iletkenlik ile sağlanmaktadır. Yalıtım malzemeleri genel olarak yalıtkan özellik göstermektedir. Gözenekli malzemeler için, katsal ısı iletim mekanizması iki farklı ısıl iletkenliğe ayırt edilebilir. İlki, malzemenin iç yapısının ısıl iletimi üzerinde etkisinin en az olduğu durum olan, malzeme ısıl iletkenliği olarak tanımlanan λ_s değeri, ikinci ise tamam malzeme morfolojisi ile ısıl iletkenliğin etkilenmesi ile tanımlanan etkin ısı iletim katsayısı λ_s değeri ile gösterilen ısıl iletim katsayısı değeridir.

Yüksek sıcaklıklarda malzeme iç yapısında kaynaklanan saçılma kusurları sebebiyle katsal ısı iletim katsayısı λ_s sıcaklığa bağlı hale gelmektedir. Sıcaklığın sebep olduğu bu kusurlar, ısı iletim katsayısı ile ters orantılı olarak değişmektedir. $\lambda_s = 1/T$ olarak formülize edilmektedir. Malzeme iç yapısına bağlı etkin ısı iletim katsayısı λ_s değeri artan malzeme yoğunluğu ile artmaktadır çünkü gözenek harici katsal bölgenin gözenekli bölgenin hacmine oranı artar. λ_s ile malzeme yoğunluğu arasındaki ilişki $\lambda_s = \rho^\gamma$ bağıntısı ile orantılıdır. Malzemenin iç yapısından kaynaklanan etki γ , $1 \leq \gamma \leq 2$ aralığında malzemeye bağlı bir sabittir.



Şekil 2.12 : Etkin ısı iletim katsayısı mekanizması.

2.6.3. Işıma ile ısı iletimi

Işıma ile ısı geçişi daha önce Bölüm 2.3’te detaylı olarak anlatılmıştı. Gözenekli malzemelerde, emilime bağlı ışıma zayıflaması Lambert-Beer kanunu ile

açıklanmaktadır. İfadede, κ malzemenin ışığa kaynaklı ısı iletiminin absorbe edebilme yeteneğini ifade etmektedir.

$$I_x = I_0 e^{(-\kappa x)} \quad (2.61)$$

Işımanın toz taneler tarafından emilmesinin yanında malzeme sıcaklığının da ışığa ile ısı transferi üzerine etkisi büyüktür. Planck kanununa göre enerji yoğunluğu u olan bir sistemde meydana gelen ışığa ile ısı geçişi: Burada; σ , Stefan-Boltzmann sabitidir. Malzemenin kırılma indisi n ile gösterilmiştir. c ise ortalama serbest yol uzunluğudur. Isı iletiminden etkin ısı iletim katsayısına geçmek için malzeme yoğunluğu ışığa ile ısı iletimine etkisi ters orantılı olarak ifadedeki yerini alır. Gözenekli ve vakumlanmış toz malzemelerin etkin ısı iletim katsayısı denklem 2.62'deki gibidir:

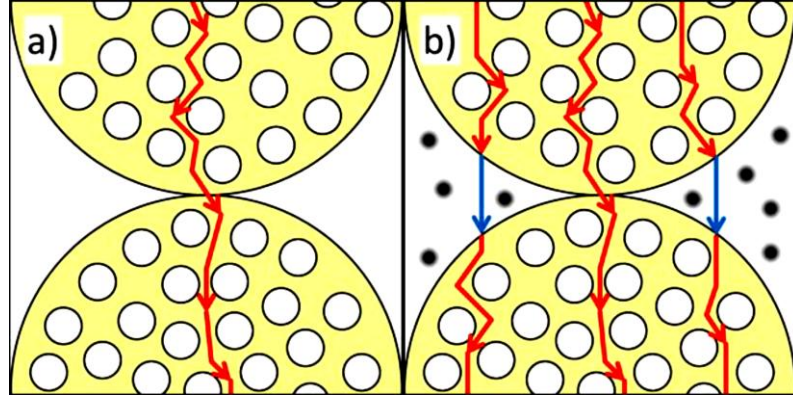
$$\lambda_r = \frac{16}{3} \cdot \frac{\sigma \cdot n^2 \cdot T^3}{\rho \cdot e(T_r)} \quad (2.62)$$

2.6.4. Birliktelik (Coupling) etkisi

Kısım 2.6.2'de belirtildiği gibi, toz taneleri arasında noktsal temas sonucunda oluşan termal direnç sebebiyle küçük etkili katısal ısı iletimi oluşmaktadır. Bununla birlikte, tanecikler arasındaki alan gaz ile doldurulduğunda, gaz iletim yoluyla gerçekleşen kısa devreler termal dirence sebep olmaktadır. Bu nedenlerle ısı iletimi ek bir modda gerçekleşir ve bu coupling etkisi olarak adlandırılır. Gaz taşınımı ile ısı iletimi bu olaydan etkilenmez. Coupling etkisi 10 mbar ve üstü basınçlarda önemli olmaktadır ve bazı toz iç dolgu malzemelerinde 0,02 W/m.K mertebelerinde etki etmektedir. Birliktelik etkisi vakumlu panellerin ömürlerini belirlemede dikkat edilmesi gereken en önemli unsurlardan biridir. Bu etkiyi bastırmak için, 1 mbar'ın altına vakumlanmalıdır. Kısaca özetlemek gerekirse, S-curve'de kritik basınç üzerinde ısı iletim katsayısının hızlıca artmasında coupling etkisinin de katkısı vardır. Bu etki ifade (2.63)'deki gibi ifade edilir:

$$\lambda_c = \frac{1 - \Pi}{\Gamma} \frac{\lambda_0}{1 + \frac{p_{1/2}^c}{p}} = \Phi \left(\frac{\lambda_0}{1 + \frac{p_{1/2}^c}{p}} \right) \quad (2.63)$$

Bu ifadeye, Γ ağırlık faktörüdür. İfadeyi basitleştirmek için gibi bir toplam ağırlık faktörü belirtilmiştir. Şekil 2.13'te coupling etkisi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Birliktelik etkisinin şematik olarak gösterimi.

2.6.5. Etkin ısı iletim katsayısı

Önceki bölümlerde, vakumlanmış toz yalıtım sistemlerinde dört farklı mekanizma işlev gördüğünden bahsedilmiştir. Bu dört mekanizmanın etkin ısı iletim katsayısına olan etkisi ısıl dirençlerin paralel bağlanması ile elde edilmektedir. Sonuç olarak toz bazlı bir yalıtım sisteminin etkin ısı iletim katsayısı değeri denklem 2.64'teki gibi gösterilmektedir. Bu dört farklı mekanizmanın vakum seviyesi, sıcaklık ve yoğunluğa bağlı büyüklüklerinin değişimleri Çizelge 2.4'te verilmiştir.

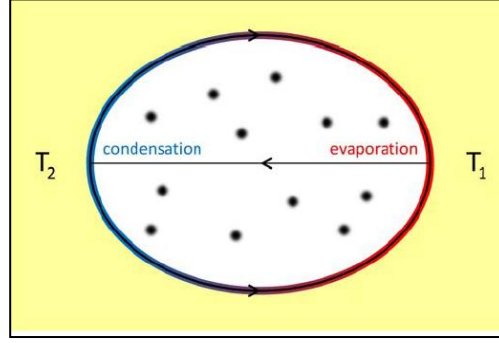
$$\lambda_{eff} = \lambda_g + \lambda_s + \lambda_r + \lambda_c \quad (2.64)$$

2.6.6. Nemin ısı iletimine etkisi

Önceki bölümlerde, ısı iletim mekanizması nem kapmaya duyarlı olmayan malzemeler ele alınmıştır. Nem, su buharı olarak bir gaz fazında veya su gibi bir sıvı fazı içerisinde mevcut olabilir. Su buharı gaz iletimini ve bağlayıcı etkisini artırmaktadır. Sürekli rejimde ısıl iletkenlik, $T=100\text{ }^\circ\text{C}$ 'de $\lambda_{wv}=0.025\text{ W/mK}$ 'dir ve neredeyse hava ile aynı değerdedir. Ayrıca, denklem 4.4'e göre gaz iletimi için karakteristik basınç su buharı ile belirtilebilir: $P_{1/2}^g=120\text{ mbar}/(dc [\mu\text{m}])$

Nemin bir diğer etkisi, sıvı su nedeniyle gözenekli yapının içerisinde iletim ile ısı geçişini artırmasıdır. Bu yalıtım uygulamaları için istenmeyen bir durumdur ancak yüksek nem seviyelerinde meydana gelmektedir. Nemli gözeneklerde meydana gelen ısı transferinin bir diğer türü ise gözenek difüzyonu olarak adlandırılmaktadır. Bu terim, su moleküllerinin yoğunlaşması ve buharlaşması ile meydana gelen gizli ısı

iletimi ile ilişkilidir. Sıcaklık gradyanı ile nemlendirilmiş gözenek düşünüldüğünde (Şekil 2.14), denge durumunda, buharlaşma ve yoğunlaşma tüm yüzeye eşit oranda olur. Ancak su molekülleri sıcak bölgeden buharlaşmayı tercih edecek ve difüzyon sürecinden sonra soğuk bölgede yoğunlaşacaktır. Bunun nedeni, moleküller gözenek yüzeyindeki su tabakaları sayesinde moleküllerin sıcak bölgeden geri gelmesi olabilir. Bu etkinin miktarı gözenekiçi difüzyon ısı iletkenliği λ_{diff} olarak tanımlanır.



Şekil 2.14 : Nemin etkisi ile meydana gelen gözenek difüzyonu.

Genelde λ_{diff} ; buhar difüzyon katsayısına D_v , buhar özgül ısısına Δh_v ve buhar basıncına p_{sat} bağlıdır. Bu miktarlar ile ilgili literatürde birbirinden farklı formüller mevcuttur. Yığın malzemeler için λ_{diff} , açık ve kapalı gözenek oranına da bağlıdır çünkü yalnız açık gözenekler nem için geçiş sağlayabilmektedir. Diğer önemli bir nokta ise; yüksek sıcaklıklarda buharlaşma için gerekli olan enerjiyi sağlamak daha kolay olduğundan λ_{diff} sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Eğer T atmosferik basınçta buharlaşma sıcaklığına yaklaşırsa, nemli malzemenin gözenek difüzyonu ısı iletkenliği, kuru malzemenin toplam efektif ısı iletimine göre 10 kata kadar artar [43]. Bu da gizli ısı ile ısı transferinin çok etkin bir rol oynadığını göstermektedir. Vakum altında, düşük sıcaklıklar sağlandığında gözenek difüzyon etkisi meydana gelmektedir. Bunun nedeni buharlaşma sıcaklığının düşük basınçla birlikte azalmasıdır. Nemli malzemelerde ısı transferi ile ilgili kullanılacak genel bir model ilk olarak Krischer tarafından geliştirilmiştir [44]. Bu model açık ve kapalı hücreleri içermektedir ve aşağıdaki basamakları temel almıştır:

- Nemli malzemedeki ısı transferi katı destek, yoğunlaşmış sıvı su, su buharı, diğer gazlar (hava) ve gözenek difüzyonu yoluyla oluşabilir.
- Katı iletimi λ_s ile gösterilir. Ağırlıklı olarak $1-\psi$ in bir değişkenidir. Burada $\psi = 1 - \rho/\rho_s$ olup, malzemenin porozitesi olarak tanımlanır. Bu tanımda yığın

yoğunluğu, ρ katı yoğunluğu ise ρ_s olarak gösterilmiştir. Gözenekler hem açık hem kapalı olabilir, böylece $\Psi = \Psi_{op} + \Psi_{cl}$.

- Kapalı gözenekler için ısı iletimi λ_{cl} ile gösterilir. λ_{cl} , kapalı gözenek suyu geçirmez, yalnızca gazlar yoluyla iletim ve radyasyon ile ısı transferini gerçekleştirir: $\lambda_{cl} = \lambda_g + \lambda_r$. Burada ağırlık faktörü λ_{cl} dir.
- Açık gözeneklerin fraksiyonu Ψ_w ile gösterilir ve tamamen su ile doludur. Gözeneklerin içerisindeki ısı iletimi $\lambda_w = 0.6 \text{ W/mK}$ dir. Kalan kısım gözenek difüzyonu olmayan $\Psi_{op} - \Psi_w$, kuru olarak yüzde 1-b dir. Bu yüzden ısı iletimi $\lambda_{op} = \lambda_{g+vv} + \lambda_r$ ye eşit olur.
- Açık gözeneklerin son fraksiyonu nemlenme ile ilgilidir ve bu yüzden gözenek difüzyonu oluşur. Gözeneklerdeki ısı iletimi $\lambda_{op} + \lambda_{diff}$ olarak verilir. Ağırlık faktörü ise $b(\Psi_{op} - \Psi_w)$ ' dir.
- Toplam ısı iletimini gözlemlemek için, bu beş model malzemenin geometri ve yapısına bağlı olarak seri ya da paralel olarak sıralanabilir. Paralel bağlama için, maksimum toplam ısı iletimine uygun olan beş ısı iletimi birbirine eklenir:

$$\lambda_{paralel} = (1 - \Psi)\lambda_s + \Psi_w\lambda_w + b(\Psi_{op} - \Psi_w)(\lambda_{op} - \lambda_{diff}) + (1 - b)(\Psi_{op} - \Psi_w)\lambda_{op} + \Psi_{cl} \cdot \lambda_{cl} \quad (2.65)$$

- Seri bağlama için, mümkün olan en düşük toplam ısı iletimine eşit ısı iletimi değerleri toplanır.

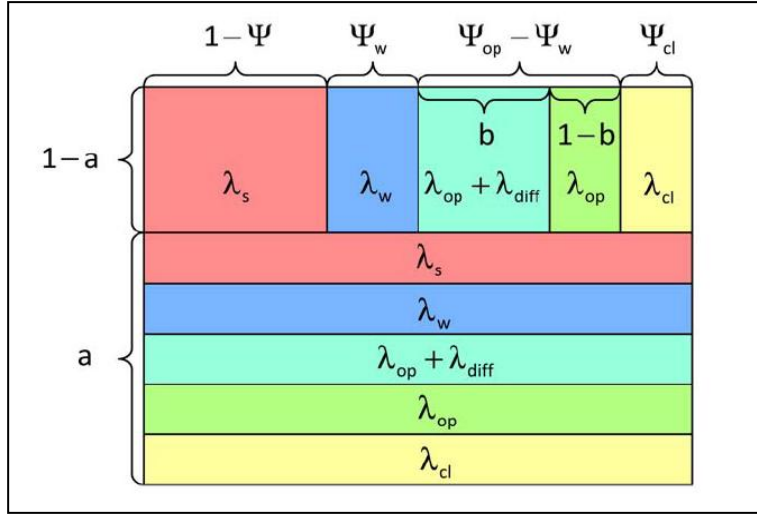
$$\lambda_{seri} = \left(\frac{1 - \Psi}{\lambda_s} + \frac{\Psi_w}{\lambda_w} + \frac{b(\Psi_{op} - \Psi_w)}{\lambda_{op} + \lambda_{diff}} + \frac{(1 - b)(\Psi_{op} - \Psi_w)}{\lambda_{op}} + \frac{\Psi_{cl}}{\lambda_{cl}} \right)^{-1} \quad (2.66)$$

- Genel durumda, seri ve paralel bağlamalar birlikte gerçekleşir ve a olan başka bir ağırlık faktörü tanımlanırsa, toplam efektif ısı iletimi aşağıdaki gibi olur:

$$\lambda_{eff} = \left(\frac{a}{\lambda_{paralel}} + \frac{1 - a}{\lambda_{seri}} \right)^{-1} \quad (2.67)$$

$\lambda_{eff} (a = 0) = \lambda_{seri}$ and $\lambda_{eff} (a = 1) = \lambda_{paralel}$ olduğu denklemlerden açıkça belli olmaktadır. Ağırlık faktörü a deneysel olarak bulunabilir.

Farklı ağırlık faktörlerini içeren seri ve paralel bağlamaların yer aldığı Şekil (2.15)'te gösterilmiştir:



Şekil 2.15 : Krischer modeline göre nemin ısı iletim metanizmasına etkisi [51].

Çizelge 2.4 : Toz bazlı yalıtım sistemlerinde ısı geçiş mekanizmaları ve en önemli değişkenleri: vakum seviyesi (p), yoğunluk (ρ) ve sıcaklık (T).

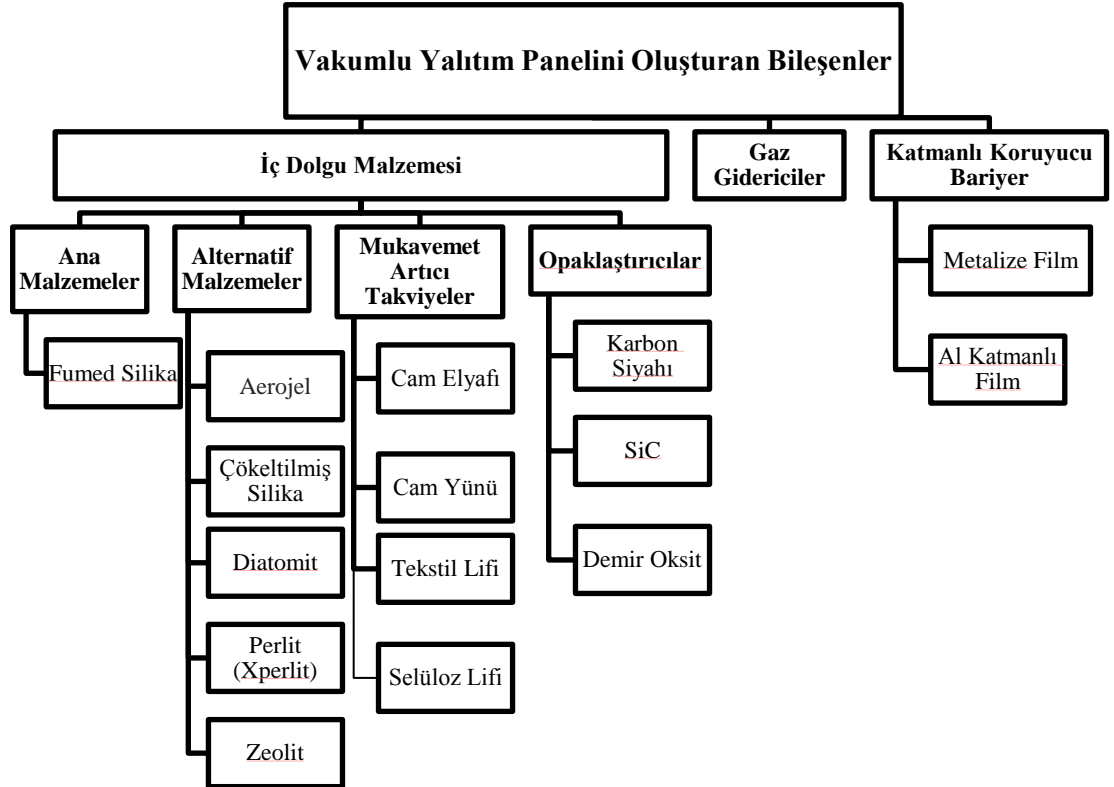
Isı geçiş mekanizması	İlgili parametreler	İlgili bağıntılar
Gözenek içerisindeki gaz ile ısı iletimi	p, T	$\lambda_g = \lambda_0 \left(1 + \frac{p_{1/2}^g}{p} \right)^{-1}$ $\lambda_g = \sqrt{T}$
Katı ile ısı iletimi	ρ, T	$\lambda_s \sim \rho^{\gamma}$ $\lambda_s \sim T^{-1}$
Işıma ile ısı iletimi	ρ, T	$\lambda_r = \frac{T_r^3}{e * (T_r)}$ $\lambda_r \sim \rho^{-1}$
Coupling etkisi	p, T	$\lambda_c = \phi \lambda_o \left(1 + \frac{P_{1/2}^c}{p} \right)^{-1}$ $\lambda_c = \sqrt{T}$

2.7. Vakumlu İzolasyon Panellerini Oluşturan Bileşenler ve Özellikleri

Alışlagelmiş yalıtım malzemelerinde genel olarak, yalıtımı sağlayan havadır. Buna bağlı olarak yalıtım malzemesinin performansı, havanın ısı iletim katsayısı olan 25 mW/mK değeri ile sınırlıdır [29].

Vakumlu izolasyon panelleri; gözenekli yapısı olan iç dolgu malzemesinin ve bu dolgu malzemesine bağlı gaz giderici malzemenin kullanarak ya da kullanmadan bir koruyucu bariyer film içerisine konularak vakumlanması (sızdırmazlık) ile meydana gelir.

Vakum izolasyon panellerinin ısı yalıtım kapasitesi, klasik yalıtım malzemelerine göre yaklaşık on kat daha yüksektir. Bu paneller, özellikle enerji ihtiyacı fazla olan yerlerde daha kullanışlıdır.

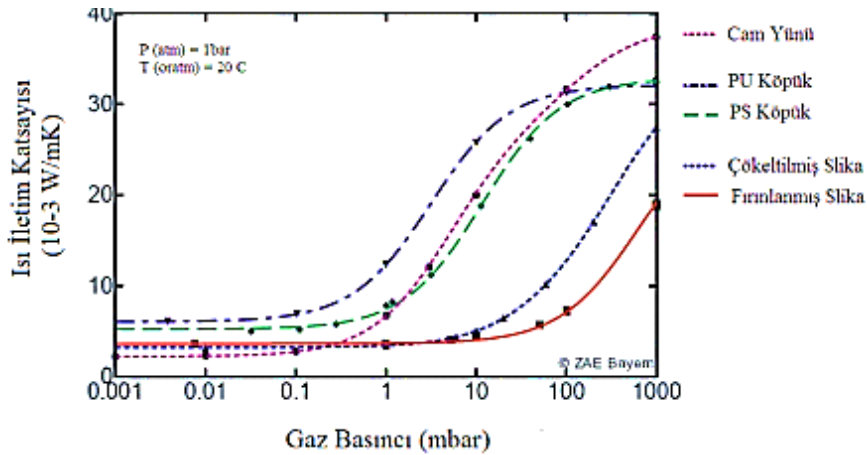


Şekil 2.16 : Vakumlu izolasyon panellerini oluşturan bileşenler.

2.7.1. İç dolgu malzemesi

Vakum izolasyon panelleri dolgu malzemesi türüne bağlı olarak birkaç ana bölüme ayrılmaktadır. Bu bölümler gözenekli yapıya sahip “iç dolgu malzemesi”, dolgu maddesi olarak kullanılan preslenmiş toz malzeme için geçirimsiz “iç zarf” ve vakum sonrası iç dolgu malzemesini atmosfere kapatmak suretiyle gaz geçirimsizliği

sağlayan sızdırmaz “dış zarf (bariyer)” ve iç dolgu malzemesi içerisindeki gazları-nemi etkisini azaltacak “gaz giderici/kurutucular”dır [11]. Toz malzeme kullanılarak elde edilen dolgu malzemeler,, kağıt yada elyaf kullanılarak hazırlanan iç zarf malzemesi içerisine yerleştirildikten sonra vakumlanabilmektedir. Vakum izolasyon Panellerinin ısı yalıtım performansları iç dolgu malzemesi ile ilgilidir. İç dolgu malzemesi genel olarak açık hücreli malzemelerdir. Yapıya destek ve dayanıklılık sağlamanın yanı sıra iletim yolu ile gerçekleşen ısı iletimini en az seviyeye indirme görevi vardır. Literatürde; vakum izolasyon panellerinde iç dolgu malzemesi olarak aerojel, açık hücreli poliüretan, cam elyafı ve toz malzemelerin kullanıldığı görülmektedir. İç dolgu malzemeleri silika esaslı malzemelerdir. Literatürde bu toz malzemelerin ısı iletim katsayıları araştırılmıştır [36]. Şekil 2.17’de farklı iç dolgu malzemeleri ile yapılan vakum izolasyon panelinin değişik vakum seviyelerindeki toplan ısı iletim katsayıları karşılaştırılmıştır. Bu değerler Vakum İzolasyon Paneli’nin orta kısmında yer alan bölge için geçerlidir. Termal köprü etkisi dikkate alınmamış olduğu bilinmelidir.



Şekil 2.17 : Farklı panel basınçlarında malzemelerin ısı iletim katsayıları [21].

Şekil 2.17 incelendiğinde dolgu malzemesinin ısı iletkenliğinin logaritmik olarak arttığı bir eşik noktası bulunmaktadır. Bazı dolgu malzemeleri için bu eşik noktası düşük bir değer olurken bazıları için ise yüksek bir değerdedir. Bu durum; açık hücreli dolgu malzemesinin yüksek gözenek basıncında düşük ısı iletim katsayısına sahip olmasının malzemenin gözenek yapısı ile ilgili olduğunu işaret etmektedir. 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 çökeltilmiş silika, fumed silika ve nanojel malzemeleri;

cam yünü, açık hücreli poliüretan köpüğü, açık hücreli polistren köpüğünden farklı olarak, düşük vakum seviyelerinde düşük ısı iletkenlik karakteristiği göstermektedir [45].

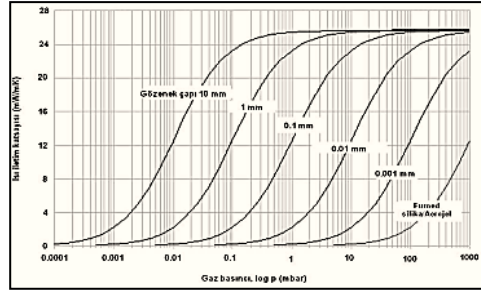
Vakumlanmış bir panelin üzerine yaklaşık 15 psi (1.055 kg/cm^2) değerinde atmosferik basınç etki etmektedir. Bu basıncı karşılamak için uygun bir iç dolgumalzesesi gerekmektedir. Bu malzeme bu basıncı karşılayacak yeterli sağlamlıkta, vakumlanabilir mikro gözenekler içeren, ısıyı iletmeyecek bir yapıda olmalıdır.

Bugüne kadar yapılan araştırmalar, bu materyaller içerisinde en yüksek yalıtım performansının aerojel kullanılarak üretilen dolgu malzemeleri ile sağlandığını göstermiştir. Ancak aerojel günümüz koşullarında yüksek teknoloji ile üretilen ve oldukça pahalı bir malzemedir. Dolayısıyla dolgu malzemesi Vakum İzolasyon Paneli maliyetlerini etkileyen en önemli unsurdur [23].

Gözenekli bir malzeme içindeki gaz basıncının azalmasıyla ısı yalıtım potansiyeli artar. Buna göre, bir vakum izolasyon paneli açık (birbiriyle bağlantılı) gözenekli iç dolgu malzemelerinden yapılmalıdır. Dolgu maddesi gaz/hava moleküllerinin serbest akışını engelleyerek Vakum izolasyon panellerine mekanik dayanıklılık ve yüksek ısı yalıtım kapasitesi kazandırır. Böylece vakum izolasyon paneli içerisinde gaz moleküllerinin konveksiyon yoluyla ısı transferi azalır. Kısaca özetleyecek olursak, ideal bir iç dolgu malzemesi;

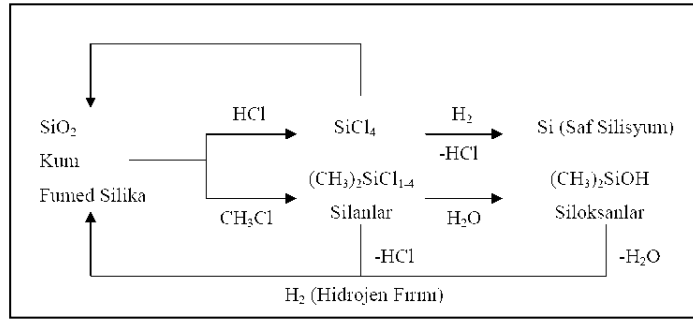
- Yüksek poroziteye,
- Açık hücreli bir iç yapıya,
- Mümkün olduğunca küçük gözenek çapına,
- Yeterli sıkıştırma direncine

sahip olmalıdır. Dolgu maddesinin açık hücreli gözenek yapısına sahip olması vakumlama başarısı açısından büyük önem taşır. Kapalı gözeneklerin içerdiği gaz/su buharı vakumlanamaz. Dolayısıyla Vakum İzolasyon Panelinin ısı iletim katsayısı yükselir. Dolgu malzemesinin ortalama gözenek çapı, Vakum İzolasyon Panelinin ısı iletim katsayısı açısından çok önemli diğer bir etkidir. Gözenek çapı küçüldükçe, vakum sonrası gözenek basıncı azalır. Bu durum beraberinde konveksiyonel ısı transferini de azaltır. Vakum İzolasyon Panelilerinin ısı iletim katsayıları ile gözenek basıncı ve gözenek çapı arasındaki ilişki Şekil 2.18'de gösterilmiştir (Simmler vd., 2005).



Şekil 2.18: Gözenek çapının havanın ısı iletkenliğine etkisi [25].

İç dolgu malzemesi olarak kullanılan fumed silika %90' ı aşan geniş gözenek hacmi vardır. Fumed silika, silan ve siloksan üretiminden sonra esasen bir yan ürün olarak, silan ve siloksanın yakılmasıyla elde edilmektedir. Yanma ürünü olarak elde edilen fumed silika bu hali ile endüstride kullanılabildiği gibi, hammaddeyi oluşturan kumla birlikte saf silisyum, silan veya siloksan eldesinde de kullanılabilmektedir. Fumed silikanın üretimine yönelik akış şeması Şekil 2.19'daki gibidir.



Şekil 2.19 : Fumed silika üretim şeması [13].

Fumed silikanın ısı iletim katsayısı düşük olduğu için vakum izolasyon paneli uygulamalarında iç dolgu malzemesi olarak en yaygın kullanılan malzemelerden biridir. Silikanın açık gözenekli yapısından dolayı vakumlandığında çok düşük ısı iletim katsayılarına ulaşmak mümkündür. Bunun yanında atmosfer basıncına karşı, silikanın destek fonksiyonu sayesinde, VIP şeklini korur. Fumed silika yapısı nano gözenekli kompozittir. Nano gözenekli kompozitlerin özellikleri;

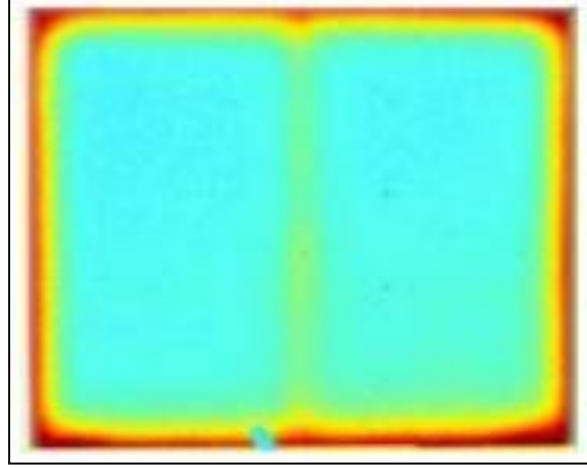
- Yoğunlukları düşüktür.
- Yüzey alanları yüksektir.
- Gözenek boyutları küçüktür.
- Isı iletim katsayısı (atmosfer basıncında ve sıcaklıkta) 12-20 mW/m.⁰K ve vakum altında 3-5 mW/m.K civarındadır.
- Yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır. (>800⁰C)

Fumed silika yüksek ısı yalıtımı sağlamasına rağmen, çok kırılğan özellik göstermektedir. Bu nedenle mekanik özellikleri iyileştirmek ve panellere esneklik kazandırmak için, cam elyaf kullanılabilir. Lifler, toz malzemelerin kullanıldığı dolgu malzemelerinin hem mekanik özelliklerini iyileştirmek hem de kondüksiyonel ısı geçişini azaltmak için kullanılır. Toz malzemelerle belirli oranlarda karıştırılarak kullanılan liflerin denyesi, çekme mukavemeti, özgül kütlesi, ısı iletkenliği gibi fiziksel özellikleri kompozitin (dolgu malzemesinin) fiziko-mekanik özelliklerini etkiler. Ancak burada en önemli unsur mineral toz - lif karışımının homojenliğidir. Çekirdek üretiminde organik lif, cam elyafı ve selülozik lif olmak üzere üç farklı lif kullanılabilir.

Lifler, tozlar ve köpükler hakkında yapılan çeşitli çalışmalar sonucunda yüke dayalı vakumlu fiberler, bütün yalıtım malzemeleri arasında en büyük ısıl dirence sahip olduğu görülmüştür. Bu malzemelerin mekanik mukavemeti oldukça dayanıklıdır. Cam elyafı sistemlerde; kondüksiyondan gelen ısı transferi, yanal alanların azaltılması ile minimize edilmeye çalışılmıştır. Bu ancak çok ince elyaflar ile mümkün olur. Konveksiyondan gelen ısı transferi etkisi, panel içerisinde kalan gaz moleküllerinin vakumlanması ile azalır. Cam elyafın yapısal özelliğinden dolayı, 0.3 mbar da bile konveksiyondan gelen etki bastırılabilir. Vakumlu yalıtım sistemlerinde ısı iletim katsayısı iç panel basıncına bağlı olarak değişir. Her iç dolgu malzemesinin kritik basıncı vardır. Bu o malzemenin yapısına göre değişir. Cam elyafı kullanılarak yapılan vakum panellerinin ısı iletim katsayıları oldukça düşüktür.

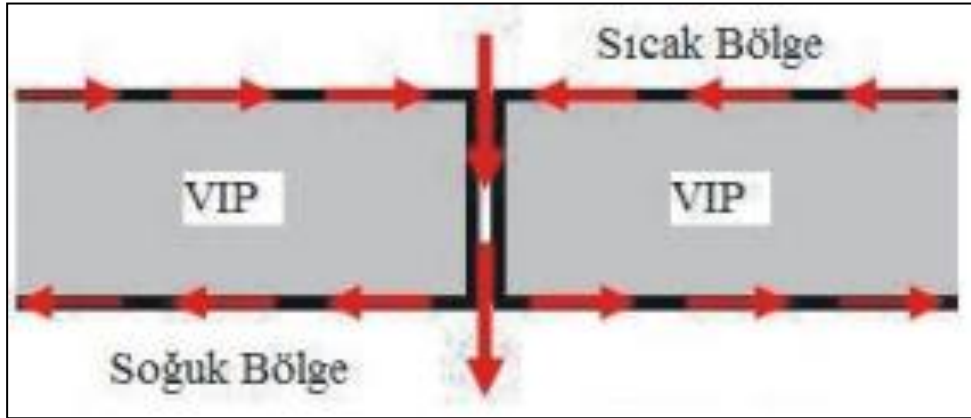
Ancak; silika bazlı tozlarda kullandığımız metalize filmler sızdırmazlığın minimum düzeyde olması gereken cam elyaflarda kullanılamamaktadır. Cam elyaf panellerde Al katmanlı filmler kullanılmaktadır. Al ısıl iletim katsayısı çok yüksek bir malzemedir. Bu sebeple panel merkezine kritik basınç altı ölçülen yaklaşık 3 mW/m.K olarak ölçülen değer, kenarlarda ve panellerin birleştiği noktalarda 6-7 mW/m.K değerlerine kadar çıkmakta ve ısıl izolasyon performansını oldukça kötüleştirir. Bu literatürde kenar etkisi olarak açıklanmaktadır. Vakum izolasyon panellerin en önemli problemlerinden biri kenar etkisidir. Özellikle silika bazlı iç dolgu malzemelerin kullanıldığı vakum izolasyon panellerin iç kısmında ulaşılan ısıl değerler, katı ortamdaki ısı iletimi için 0.002-0.003 W/mK ve termal radyasyon için de 0.001 mW/mK olmak üzere, toplamda yaklaşık olarak 0.004 W/mK olarak bilinse de, gerçekte bu çalışmalar sonucunda bu değerlerin 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. (20 – 250W/mK) Özellikle, vakum izolasyon panelin yan duvarlarında ve bariyer filmin katlanma detaylarında bu etki, ısı iletimi üzerinde kendini net bir şekilde göstermektedir.



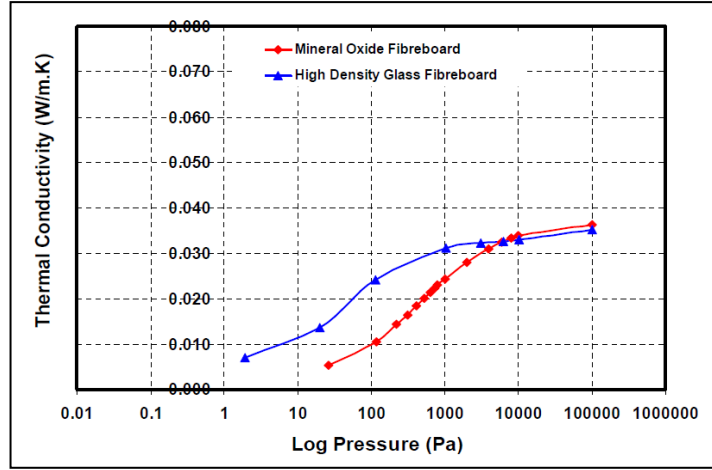
Şekil 2.20 : Vakumlu yalıtım panellerinde gerçekleşen kenar etkisi [9].

Şekil 2.20’de, bir vakumlu izolasyon panelinin metalize film sebebiyle gösterdiği ısı iletim mekanizmasının kenarlarda çok yüksek değerlerde olduğu görülmektedir. Yapı içerisindeki vakum izolasyon panellerinin birbirine temas etmesi durumunda ise etki daha da artmaktadır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21: İki VIP arasında gerçekleşen termal köprü [9].

Vakumlu fiberlerde gaz basıncı 1 mbar’ın üzerinde çıktığında ısı iletkenlikleri de iki katına çıkmaktadır. Şekil 2.22’de iç dolgu malzemesi olarak yalnızca fiber kullanıldığı durumda, gaz basıncına göre vakum izolasyon panellerinin ısı iletim katsayıları verilmiştir.



Şekil 2.22 : Cam elyafından üretilmiş VİP'lerin s-eğrisi [26].

VİP' in ömrü vakumlama yapıldıktan kritik basınç seviyesine kadar geçen zaman olarak tanımlanabilir. Cam elyafı, kritik basıncı oldukça düşük bir malzemedir. Kritik basıncın üzerinde iletim katsayısı aniden yükselir ve izolasyon performansı düşer. Dolayısıyla kritik basınç VİP ömrünün en önemli parametresidir ve düşük kritik basınca sahip olan cam elyafında ciddi ömür sıkıntılarına sebep olmaktadır.

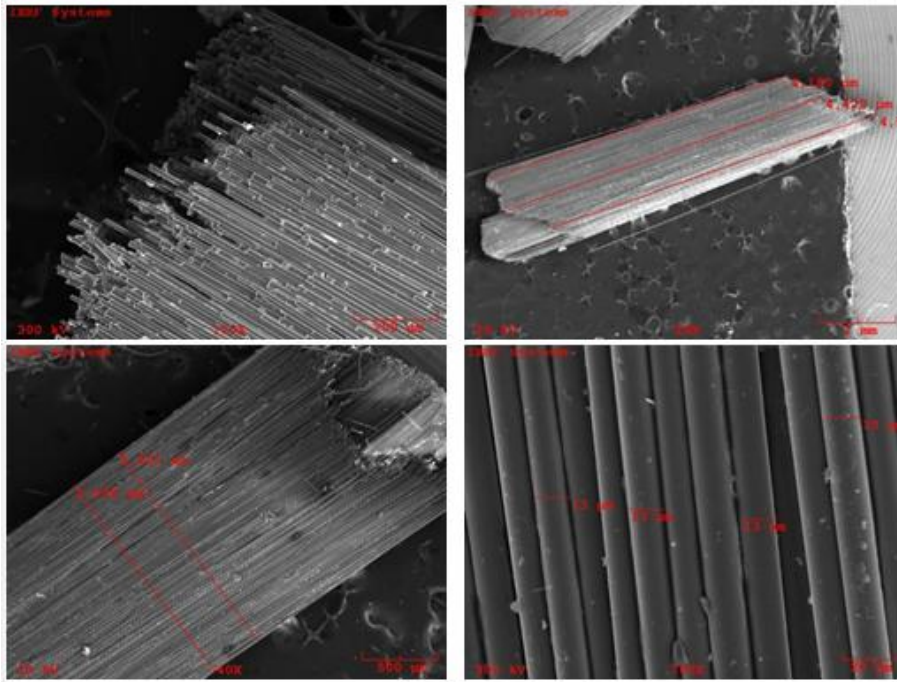
Lifler, toz malzemelerin kullanıldığı çekirdeklerin hem mekanik özelliklerini iyileştirmek hem de konduksiyonel ısı iletimini azaltmak için kullanılır. En önemli unsur mineral toz - elyaf karışımının homojenliğidir. Cam elyaflarına yapılan elementel analiz sonuçları Çizelge 2.5'teki gibidir.

Çizelge 2.2 : Cam elyafa ait elementlerin kütlece % oranları

<i>Elt.</i>	<i>Line</i>	<i>Intensity(c/s)</i>	<i>Error2-sig</i>	<i>Conc</i>	<i>Units</i>
C	Ka	55.42	4.708	53.309	wt.%
O	Ka	14.21	2.384	20.532	wt.%
Al	Ka	80.53	5.675	3.517	wt.%
Si	Ka	328.82	11.467	13.578	wt.%
Ca	Ka	167.42	8.182	9.063	wt.%
				100.000	wt.% Total

Diğer bir elyaf türü olan selülozik esaslı lifler (viskoz, modal ve tencel gibi) genel olarak bitki dokularının odunsu kısımlarından, sap ve gövdelerinden elde edilen selülozun değişik kimyasal işlemler sonucunda türetilmesiyle elde edilir. Doğal selüloz kaynakları, linter ve ağaç selülozudur. En kaliteli rejenere selüloz lifi,

linterden elde edilir. Selülozik liflerin mekanik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler, moleküler ağırlık, makromoleküllerin sıralanması ve kristalinite veya yanal düzenlenme derecesidir. Liflerin uzama oranı ters orantılı olduğundan, liflerin uzama oranları arttıkça modül ve dayanımları azalmaktadır. Selüloz liflerinin su tutabilme özelliği lifin, amorf ve kristalin yapısına bağlıdır. Su molekülleri, oryantasyonu güçlü olan bölgelere giremediğinden ve zayıf olan hidrojen bağlarını koparttığından, su ve alkali tutma özelliği (liflerin su veya alkali alarak şişmesi) fazladır. Selülozik liflerin boyutsal stabilitesi, görünüş ve parlaklığını geliştirmek için yapılan su ve sulu alkali uygulaması (selülozun amorf ve kristalin bölgelerine giren alkali solüsyonu fibriller arası ve fibriller içi şişmeye neden olur); elementer fibril gruplarını ve elementer fibrilleri ayırdığı için gözeneklerin enine kesiti azalırken, boşluktaki kırılmalar artırmış olur. Yani; alkali uygulaması liflerin gözenek yapısını, kristalinitesini, birim hücre yapısını, oryantasyonunu, mekanik ve termal özelliklerini değiştirmektedir.



Şekil 2.23 : Cam elyaf SEM görüntüleri.

Selülozik lifler kimyasallardan, mikroorganizmalardan, ışıktan, yüksek sıcaklıktan ve mekanik etkilerden kolayca zarar görürler. Mukavemet artıcı liflerden sonuncusu, bu çalışmada kullanılan cam yünüdür. Borosilikat camının çeşitli tekniklerle elyaf haline getirilmesiyle elde edilen cam yünü' ilk defa I. Dünya savaşı sırasında Almanya'da üretilmiştir. Daha sonra 1920-1945 yılları arasında da izolasyon özelliği daha yüksek cam elyafı ve cam yünü elde etmek amacıyla yapılan çalışmalar

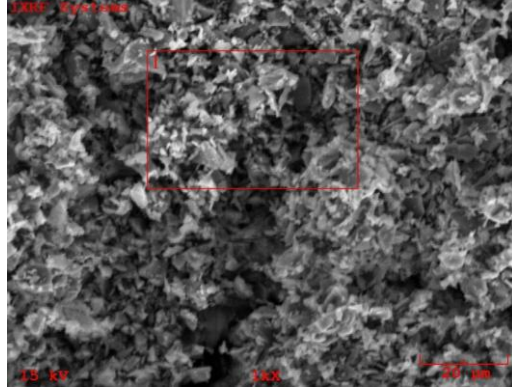
sonucunda çeşitli metotlar geliştirilmiştir. Mekanik çekme prensibine dayanan ilk metodu, akışkanlar ile çekme prensipli metot, alevle çekme metodu ve en son olarak da iki metodun birleştiği mekanik ve alev ile çekme metodu takip etmiştir. İnorganik hammadde olan silis kumunun 1200°C – 1250 °C’de ergitilerek elyaf haline getirilmesi sonucu oluşmaktadır. Ham maddesinin yerli kaynaklardan temin edilebilme olanağı vardır. Enerji tasarrufunu sağlamak ve yalıtım olanaklarından faydalanabilmek için kullanılır. Isı yalıtım, ses yalıtım ve yangın risklerine en aza indirmek gibi fonksiyonel özelliklere sahiptir. Sıcaklık ve rutubetten etkilenmemesi diğer bir avantajıdır. Aynı zamanda zamanla bozulmaz, korozyon ve pasa neden olmaz. Isı iletkenlik değeri, $\lambda=0,040$ W/mK den daha düşük olduğundan dolgu malzemesine hem destek, mukavemet sağlaması hem de ısı iletkenlik değerini kötüleştirmemesi için eklenir. DIN 4102 ve TS EN 13501-1 standartlarına göre “yanmaz malzemeler” olan A sınıfındadır.

İç dolgu malzemesinin toplam ısı iletimi açısından, ışınım ile ısı iletiminin en aza indirilmesi de büyük önem taşır. Bu amaçla dolgu maddesi olarak toz malzemeler kullanıldığında karışıma karbon siyahı, silisyum karbür, titanyum dioksit vd. gibi opaklaştırıcı katkı maddeleri ilave edilir. Böylece dolgu malzemesine kadar ulaşan ultraviyole ışınlar opaklaştırıcı maddeler tarafından absorbe edilerek ya da yansıtılarak radyasyonla ısı iletimi en aza indirilir.

Genelde iç dolgu malzemesi olarak fumed silika, mukavemet artırıcı olarak cam elyaf ve opaklaştırıcı olarak SiC kullanılmaktadır. Silisyum karbür, silisyum dioksitin (SiO₂) kok kömürü (grafit) ile elektrikli fırında indirgenmesi sonucunda gerçekleşen, saf olarak silisyum eldesi sırasında gerekenden daha fazla karbon kullanılması durumunda oluşan bileşiktir. Ultraviyole ışınları absorbe ederek radyasyonla gerçekleşen ısı transferini en aza indirir. SiC ‘e ait elementel analiz sonuçları Çizelge 2.6’te EDS sonuçları, SEM görüntüsü Şekil 2.24 belirtilmiştir:

Çizelge 2.3 : Silisyum karbür malzemesinin kütlece % oranları

<i>Elt.</i>	<i>Line</i>	<i>Intensity(c/s)</i>	<i>Error2-sig</i>	<i>Conc</i>	<i>Units</i>
C	Ka	23.02	3.034	58.785	wt.%
Si	Ka	503.00	14.183	41.215	wt.%
				100.000	wt.% Total



Şekil 2.24 : Silisyum karbür SEM görüntüsü.

2.7.2. Alternatif iç dolgu malzemeleri

2.7.2.1. Aerojeller (Hava jelleri)

İlk olarak 1931 yılında Steven Kistler tarafından geliştirilen arojel yalıtım malzemesi ışığı geçirgen narin yapısı ile “donmuş duman” adı ile anılmakta ve uzay teknolojisinde de kullanılan silika esaslı katı malzeme olarak tanımlanmaktadır. Aerojel silika esaslı sıvı bir jelin yüksek ısı ve basınç altında içindeki sıvı bileşenlerinin gaz ile yer değiştirmesi ve belirli kritik bir noktaya kadar kurutulması ile elde edilir. Katı silika maddelerinin ısı iletimleri oldukça düşüktür ve hacimce çok düşük bir orana sahiptirler (%0,2 ile %3 arasında). Böylece katı madde boyunca iletim çok az olmaktadır. Geri kalan büyük hacmin (%97-99,8) tamamı nano boyutundaki gözeneklerden oluşan havadır.

Malzemenin % 97,0 ile %99,8'i arasında bir oranı havadan oluşmaktadır. Aerojel yalıtım malzemesi Şekil 2.25'te sunulmuştur:



Şekil 2.25 : Aerojel malzemesinin gösterimi [28].

Aerojel yalıtım malzemesi ilk defa 1940 yılında ticari bir ürün olarak piyasaya sürülmüş, 1980'lerde bilimsel çalışmalar için kullanılmış ve 1990'lı yılların sonundan itibaren uzay araçlarında kullanılmaya başlanmıştır. 1997 yılında NASA tarafından Mars'a yollanan bir uzay aracının içerisinde, dış sıcaklık değerinin -67°C olduğu durumda, 21°C 'lık bir sıcaklık sağlanmasına katkı sağlamıştır. NASA aerojeli bataryaların, elektronik cihazların ve bilgisayarların yalıtımında da kullanmakta ve farklı teknolojiler için de aerogelin kullanımına yönelik araştırmalar yapmaktadır [6].

Aerogellerin kinetik enerjiyi emen yapısı, bu maddenin önümüzdeki yıllarda güvenlik ve yalıtım alanlarında kullanılacağına dair güçlü sinyaller vermektedir. Geleceğin arabalarında, kazaların etkilerini önleyici aerogel uygulamaları görmek mümkün olabilecektir. Aerogelin tüketici uygulamalarında kullanılması da mümkün gözükmektedir. Teorik olarak 2,5 cm kalınlığında aerogelden üretilmiş tek bir camın sağladığı yalıtım etkisi 20 tabaka sıradan camın sağladığı etki ile aynı olarak hesaplanmaktadır.

Aerogeller süperkritik kurutma işleminin takip ettiği ıslak kimyasal sol-gel prosesi gibi bir üretim akışından geçmelerinin sonucu olarak nanometrik ve yüksek poroziteli bir katı yapıda oluşurlar. Bu sayede, ortam basıncı ve sıcaklığındaki durgun havanın ısı iletim katsayısından oldukça aşağıda olan 12 mW/m.K 'lik toplam ısı geçiş katsayısı mümkün olabilmektedir (hava = 25 mW/m.K). Işınım ile ısı geçişi ise aerogelin infrared (ir) – optik özelliklerine, dolayısıyla da kimyasal bileşimine büyük ölçüde bağlı kalmaktadır. Aerojelin dezavantajı ise maliyetinin çok yüksek olmasıdır [12].

2.7.2.2. Çökeltilmiş silika

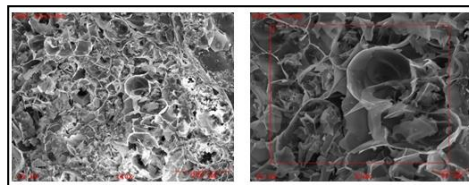
Çökeltilmiş silika, cam suyu olarak bilinen alkalin yapıdaki sıvı sodyum silikatın, bir mineral asidi (genellikle sülfirik asit) ile reaksiyonu sonucu elde edilir. Reaksiyon sonucu oluşan beyaz çökelti, filtreleme, yıkama ve kurutma işlemlerinden sonra öğütülür ve bu sayede son ürün elde edilir. Bu ürün içerisinde %86 – 88 oranında SiO_2 bulunmaktadır. Geri kalan kısmı sudur ve bu suyun içerisinde reaksiyon sırasında oluşan tuzların kalıntıları ve bazı metal oksitler bulunur. Filtrasyon ve kurutma işlemlerinde uygulanan değişik yöntemler ve öğütme işlemleri sonucunda değişik malzeme özellikleri elde edilmektedir [19].

Düşük ısı iletim katsayısına sahip olması sayesinde yalıtım malzemesi olarak kullanılır. Çökeltilmiş silika, kurutulur, sıkıştırılır, vakumlanabilecek bir zarf içerisine yerleştirilir ve vakumlanır. Silikanın mekanik bir prosesten geçirilmesinin sebebi, istenen seviyede yüzey alanına ve tanecik boyutuna ulaşabilmektir.

2.7.2.3. Perlit (Eksperlit)

Perlit, volkanik olarak oluşan silis esaslı bir kayadır. Diğer volkanik camları yapılarından ayrılan özelliği, ani olarak 870°C sıcaklığa ısıtıldığında, yapısında absorbladığı suyun buharlaşmasından ötürü oluşan kabarcıklar sayesinde şişerek yüksek poroziteye sahip bir yapı haline gelmesidir. Bu şekilde oluşturulan perlit yapısı, ekspande perlit anlamına gelen eksperlit adını alır. Ani ısıtma ve su ayrıştırma işlemi sonucunda gri veya siyah olan perlit kayacının rengi, açık gri ve beyaz hale gelir. Elde edilen yapı daha sonra öğütülerek toz haline gelir. Bu halde iken vakumlu yalıtım amaçlı kullanıma uygundur. Perlit; amorf yapılı, açık gri renkli, küçük, yuvarlak, camlı taneciklerden oluşmuş volkanik bir kayadır. Perlit, doğal olarak oluşan silis esaslı volkanik kayalara verilen bir isimdir. Magmanın asit fazında oluşan lavların soğuyup gözle ve mikroskoplar görülebilecek bir yapıda kırılmasının meydana gelen ve bünyesinde su damlacıkları bulunan camlı, volkanik bir malzemedir. Gözeneklilik, perlite emicilik ve yüzeyde soğuma özellikleri kazandırmakta ve bu nedenle bu özelliğin gerekli olduğu uygulama alanlarında önem taşımaktadır. Isı yalıtımı aranan durumlarda, su emicilik istenmemektedir. Bunun nedeni gözeneklere dolan suyun ısı iletkenliğini artırmasıdır. Bu durumda silikon veya bir maddeyle gözenekler pasifleştirilerek, perlit hidrofobize edilmektedir [38].

Perlit, özel dokulu, iç yapısında belli oranda su içeren, asit bileşimli esas itibarıyla volkanik bir camdır. Nitrat sülfat, fosfor, ağır metal, radyoaktif element ve organik madde içermez. Dolayısıyla kimyasal olarak oldukça saftır. Genleştirilmiş perlit doğal bir yalıtım malzemesidir. Şekil 2.27’de genişletilmiş perlite ait SEM fotoları gösterilmiştir:



Şekil 2.25 : Genişletilmiş perlit SEM görüntüsü.

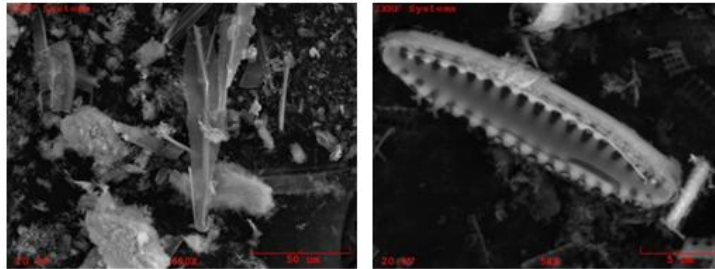
Perlit örneklerine ait SEM görüntüleri incelendiğinde, gözeneklerin bulunduğu, ancak boşlukların yeraldığı gözlenmektedir. Gözenek yapısının düzensizliği nedeniyle ortalama gözenek boyutunu belirlemek çok zordur. Gözeneklerin belirli bir geometrisi yoktur. Boşluklarla birlikte gözenekli yapının varlığı sayesinde iletim ile oluşan ısı transferinin daha düşük olması beklenmektedir. SEM görüntülerinde boşlukların yer aldığı bölgelerde açık gözenek yapısına rastlanmaktadır ancak, matrisin bulunduğu bölgelerde kapalı gözeneklerde mevcuttur [35].

2.7.2.4. Diyatomit

Diyatomit su yosunları sınıfından diyatome adı verilen tek hücreli canlıların fosilleşmiş kabuklarının birikmesiyle oluşmuştur. $SiO_2.nH_2O$ bileşimli, hafif kolay ufalanabilen bir kayadır. Diyatomitin en önemli özelliği, yüksek gözeneklilik ile düşük özgül ağırlık ve beyazlıktır. Isı iletkenliği düşüktür.

Hidroflorik asit hariç asitlerde çözünmez. Yüksek sıcaklıkta kuvvetli bazlardan etkilenir. Tanelerin sertliği 4-6,5 arasında, kayacın sertliği ise 1,5 Rockwell C civarındadır. Özgül ağırlığı $1,9-2,4 \text{ gr/cm}^3$ arasında olmasına rağmen, kuru diyatomitin özgül ağırlığı $0,4 \text{ gr/cm}^3$ e kadar düşebilir. Porozitesi %90'a çıkabilir ve buna bağlı olarak ağırlığının 3 katı kadar su emebilir. Diyatomitin en önemli özelliği, yüksek gözeneklilik ile düşük özgül ağırlık ve beyazlıktır. Isıl iletkenliği düşüktür. Döner fırınlarda hammaddenin özelliğine ve üretim şekline göre $870-1090 \text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda kavrulması ile kalsine diyatomit elde edilir.

Diyatomit dolgu malzemesi olarak kullanıldığında elde edilen ürünün özelliklerini geliştirmekte ve performansını arttırmaktadır. Türkiye'de Kayseri, Erzurum, Nevşehir, Niğde, Ankara, Afyon, Kütahya, Uşak, Aydın, Denizli, Balıkesir ve Bursa yörelerinde önemli diyatomit oluşumlarının varlığı bilinmektedir. Şekil 2.28'de diyatomitin SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.26 : Diyatomitin SEM görüntüsü.

Ana iç dolgu malzemesi ve alternatif iç dolgu malzemelerine ait özelliklerden yukarıda bahsedilmiştir. Bahsedilen bu özellikler Çizelge 2.7’de belirtilmektedir. Aynı zamanda alternatif iç dolgu malzemelerinin kimyasal bileşimleri Çizelge 2.8’de gösterilmiştir [28].

Çizelge 2.7 : İç dolgu malzemelerinin fiziksel özellikleri [28].

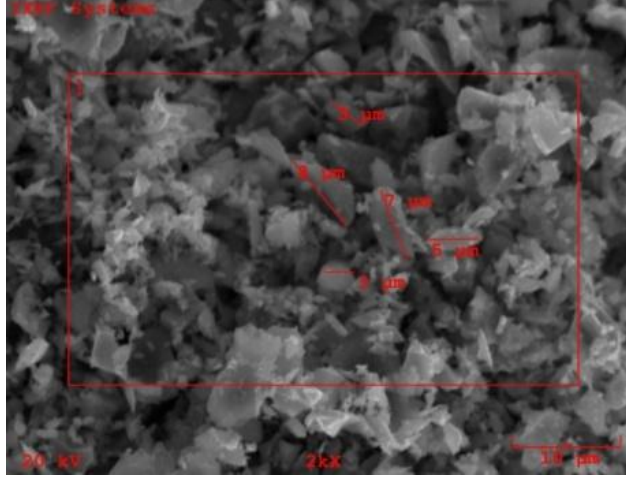
	Fumed Silika	Diyatomit	Aerojel	Çökeltilmiş Silika	Perlit
SiO ₂ Miktarı %	99,8	80	95	86-88	70-75
Porozite %	85-90	85-90	>90	>85	90
Yoğunluk (kg/m ³)	200	400-500	50-250	160-320	40-170
Tanecik Büyüklüğü (µm)	10-100	1-100	5-5000	1-200	60
Yüzey Alanı (m ² /gr)	184	8	250-800	60-250	75
Por Çapı (µm)	107x10 ⁻⁴	16x10 ⁻⁴	20nm	2x10 ⁻⁴	0.0025
Kritik Basınç (mbar)	10	5	10	5	0,1
Kritik Basınçta k değeri (mW/mK)	5,25	5	5	5	3,5

Çizelge 2.4 : Alternatif İç dolgu malzemeleri kimyasal bileşimleri.

Element	Perlit (%)	Diyatomit (%)	Zeolit (%)	Uçucu Kül (%)
SiO ₂	71.0-75.0	75-83.9	65-72	61.05
Al ₂ O ₃	12.5-18.0	6.25	0	19.37
CaO	0.5-0.2	2.74	2.5-3.7	2.13
K ₂ O	4.0-5.0	0.821	2.5-3.5	0
Fe ₂ O ₃	0.1-1.5	3.71	0.8-1.9	7.68
MgO	0.03-0.5	0.745	0.9-1.2	0
Na ₂ O	2.9-4.0	0.619	0.3-0.65	2.22
TiO ₂	0	0.438	0-0.1	0
MnO	0	0	0-0.08	0
P ₂ O ₅	0	0.53	0	0
S	0	0.063	0	0
C	0	0.31	0	0

2.7.2.5. Zeolit

Türkiye zengin zeolit kaynaklarına sahiptir. Manisa-Gördes ve Balıkesir-Bigadiç zeolit yataklarının bulunduğu bölgelerdir. Türkiye'de 50 milyar tonun üzerinde zeolit rezervi olduğu tahmin edilmektedir. Doğada yaklaşık 40 çeşit doğal zeolit bulunmuştur. Zeolitler termal açıdan stabildir, yüzeyindeki hidrofobiklik/hidrofiliklik değişiklik gösterir, iyon değiştirme kapasitesine sahiptir, düşük yoğunluklu ve gözenekli yapıdadır. Şekil 2.29'da doğal zeolitin SEM görüntüsü verilmiştir:



Şekil 2.27 : Doğal zeolit SEM görüntüsü.

2.7.3. Dış Zarf

Koruyucu bariyerler, vakumlanmış içmalzemenin dışını tamamen saracak şekilde yapıyı dış ortamdan ayıran tabakalı yapıya sahip filmlerdir. Bu filmlerin özelliği, gaz venem geçirgenliklerinin çok düşük olmasıdır. Bu sayede, iç dolgu malzemesine uygulanan vakum işlemi sonucunda ulaşılan düşük basınç değerleri uzun süre korunabilmektedir. Genel olarak, AL (alüminyum), PET (poliester), PS (polistiren), PP (polipropilen) vb. tabakalardan meydana gelen tabakalı yapıya sahiptirler. Ayrıca alüminyum folyo ya da metalize katman içeren filmlerin yüzeyleri parlaktır. Bariyerlerin yüzey yansıtma kabiliyeti, Vakum İzolasyon Panelinin ışınlama (radyasyon) ısı iletiminin azaltılması açısından büyük önem taşır. Bazı filmler her bir yüzeyi katmanlı plastik filmle (polietilen-PE yada polietilen tereftalat –PET) güçlendirilmiş çok ince metal filmlerden (özellikle alüminyum) oluşmaktadır. Düşük erime sıcaklığına sahip bazı özel tabakalar, kaynak yerine ısıl yapıştırma yapılarak sızdırmazlığı sağlayacak şekilde film katmanına ilave edilmiştir. Bu filmler mükemmel bir geçirimsizlik özelliğine sahipken kenarlarda ısı iletimi

(kenar etkisi) yine de mevcuttur. Bu kenar etkisini azaltmaya yönelik olarak, metal filmleri daha da ince hale getirmek için püskürtmeyle kaplamanın (ince film biriktirme tekniği) kullanıldığı bazı filmler geliştirilmiştir. Metalize filmler, filmin üzerine metal biriktirilerek oluşturulur. Burada filmin üstünde yoğunlaşan çok ince alüminyum katmanı, filme, ışık, su buharı, oksijen ve diğer gazlara karşı geçirimsizlik özelliği kazandırır. Bu filmlerin kalınlığı ve katman sayısı, her biri gaza karşı iyi bir bariyer özelliğine sahip dokuz kata varan plastik/polimer/metal katmanlardan oluşabilir [35]. Literatürde yapılan çalışmalarda, Vakum İzolasyon Panellerinde kullanılan bariyer filmlerin ısı iletim katsayısına etkisi incelenmiştir. Çizelge 2.9'da 0.004 W/mK ısı iletim katsayısı için dizayn edilen bir vakum izolasyon panelin ısı iletim katsayısının kullanılan bariyer filme bağlı olarak 0.006-0.008 W/mK arasında değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla, kenar etkisi adı verilen bu özelliğin vakumlu izolasyon panelleri üretimi sırasında etkin ısı iletim katsayısını kötüleştirdiği, bununla beraber servis ömrünün de dikkate alınarak, uygun iç dolgu malzemesine göre uygun film seçilerek en uzun ömür elde edilmesi amaçlanmalıdır [38]. Çizelge 2.10'da ise deneysel çalışmada kullanılan metalize film özellikleri verilmiştir.

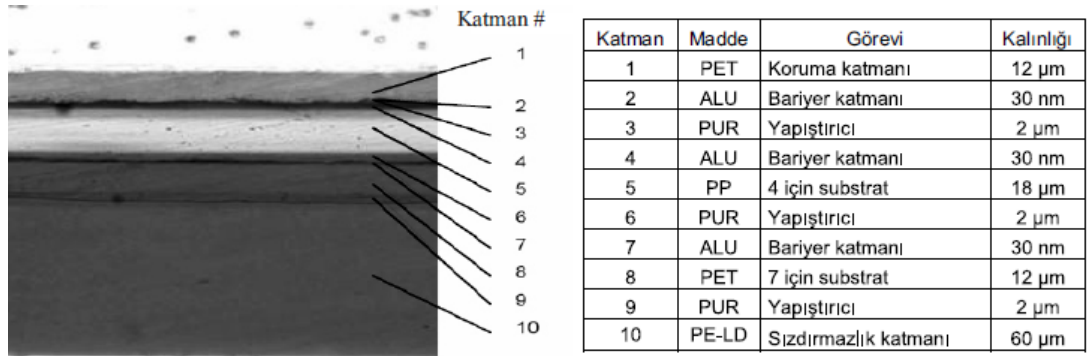
Çizelge 2.5 : Vakum izolasyon panellerinde bariyer filmin etkisi

Vakum İzolasyon Panelinde Kullanılan Bariyer Film	λ (W/mK)
Al folyo film	0,012
Metalize polimer film (50x50x2 cm ³)	0,008
Metalize polimer film (100x100x2 cm ³)	0,007

Çizelge 2.6 : VIP'lerde kullanılan örnek bariyer teknik özellikleri

Bariyer Teknik Özellikleri	Değer	İlgili Standart
Kalınlık (μm)	97	-
Birim Ağırlık (m^2/kg)	9,25	-
Çekme Dayanımı (MPa)	82	ASTM D- 882
Isıl yapıştırma dayanımı (N/mm)	>4,4	165, 4 kg/cm^2 4s
Süneklik (%)	53	ASTM D- 882
Tabakalanma dayanımı	>0,39	ASTM D- 882
Delinme direnci (N)	86	FTMS 101C 2065
O ₂ geçirimsizliği (cc/m^2 gün)	<32x10 ⁻⁶	ASTM D- 3985
Rutubet Geçirimsizliği ($\text{gr}/\text{m}^2/\text{gün}$)	0,01	ASTM F1249-90

Vakum İzolasyon Panelleri üretiminde plastik-metalize katmanlardan oluşan filmler bariyer olarak etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Buna karşılık yeterli sayıda vetürde katmanlardan oluşan bu filmlerin katman sayısı, katmanlarda kullanılan malzeme türleri ve üretim teknolojisine bağlı olarak %100 geçirimsizlik sağladığını söylemek mümkün değildir. Zamanla VIP içerisine gaz-rutubet girişine; Filmlerin üretimi esnasında katmanları oluşturan tabakalarda kalan hava kabarcıkları ve delikler (üretim hataları), vakum izolasyon panellerinin hazırlanması esnasındaki oluşabilecek çatlaklar ve ısıl yapıştırma kaynaklı hatalar neden olur. Gaz-rutubet girişi Vakum İzolasyon Paneli içerisindeki iç basıncı zamanla artırır. İç basınçtaki artış taşınım ile ısı iletimini artırır. Günümüzde vakum sonrası maksimum 2 mbar/yıl düzeyinde iç basınç artışına izin veren filmler, Vakum İzolasyon Panel üretimi için uygun bariyerler olarak kabul edilmekte olup, bu özellikteki Vakum İzolasyon Panellerinin servis ömrünün de 50 yıla kadar ulaşabildiği belirtilmektedir. Kenar etkisi Vakum İzolasyon Panellerinin ömürleri konusunda oldukça belirleyicidir. Günümüzde de Vakum İzolasyon Panellerle ilgili olarak yapılan araştırmalar kenar etkisini, termal köprüleri incelemektedir. Burada da bariyer filmin önemi ve etkisi açıkça görülmektedir. Tabakalı ve polimer yapıları bariyer filmlere ait bazı özellikler Şekil 2.30'da belirtilmiştir [26].



Şekil 2.28 : Çok katmanlı bir bariyer filmin mikroskop görüntüsü [17].

2.7.4. Gaz gidericiler ve kurutucular (Getter / Dessikant)

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 ve nem sızmaları durumunda VIP'in performansının düşmemesi ve bu kaçakları direkt kendi üzerine almaları amacıyla eklenir.

Gaz salınımı denilen, çok düşük basınçlarda katının içinde kalan sıkışık gazlar nedeni ile meydana gelen problem kontrol altına alınmazsa zamanla panelin

vakumunun bozulmasına neden olur. Literatürden edinilen bilgilerin ışığında getter eklenmeyen bir panelin gaz salınımı hızının daha fazla olduğu ancak zaman içerisinde azaldığı görülmüştür. İlk senede %25'lik bir basınç artışı meydana gelmiştir. 220 mbar'lık bir basınç artışı, R- değerinin (1/ ısı iletim katsayısı) %40-50 azalması demektir.

Bunun aksi durumda yani getter eklenmesi durumunda ise bir sene boyunca vakumda herhangi bir bozulma görülmemiştir.

Dolayısıyla outgassingi kontrol etmek amacı ile getter malzemeler kullanılmalıdır. Gaz giderici malzemeler H₂ ve H₂O gazlarını tutar. Paneller vakumlanma prosesinden önce kurutma işlemine tabi tutulduklarından cam elyaf tarafından absorbe edilmiş suyun uzaklaşması sağlanır. Bu sayede gaz gidericinin tutma kapasitesi de kullanılmamış olur.

Sonuç olarak; hem iç dolgu malzemesinin içerisine zamanla işleyen gaz ve nemin hem de açığa çıkan kalıntı gazların (Outgassing), Vakum İzolasyon Panellerinin ısı iletkenlik katsayısını yükseltmemesi ve buna bağlı olarak da servis ömrünü azaltmaması için vakumlama öncesinde gaz giderici/kurutucu çekirdek içerisine yerleştirilir.

Vakum İzolasyon Paneli hazırlanırken dolgu malzemesinin yanı sıra her bir bileşenin kendine özgü bir fonksiyonu vardır. Vakum İzolasyon Panelinin dolgu malzemesi kısmının dışında kalan diğer kısımlarının kısaca görevleri Çizelge 2.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.7 : Vakum izolasyon panelinin kısımları ve fonksiyonları

Bölge	Fonksiyonu
Cam Elyafı	Isı iletimine engel olur. Mekanik mukavemet sağlar
İç zarf	Toz malzemeyi tutar
Bariyer Film	Vakumlanan kısmı kaplar, sızdırmazlığı sağlar
Gaz Giderici	Cam elyafından gelen veya bariyerden içeri geçen gazları tutar.

3. TOZ BAZLI YALITIM MALZEMELERİ İLE İLGİLİ DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde tez çalışması sırasında yapılan deneysel çalışmalar sunulmuştur. Öncelikle, kullanılan malzemeler ve üretim ekipmanları anlatılmıştır. İlgili standartlar açıklanmıştır ve ölçümlerin nasıl yapıldığı anlatılmıştır.

Vakumlu izolasyon panellerinde, açık hücreli iç yapı sebebiyle, malzemenin iç yapısını tamamen düşük iç basınç oluşturduğu için taşınma bağlı ısı iletiminin sıfıra yakın olduğu önceki bölümlerde belirtilmiştir.

Vakumlu izolasyon panellerinin katalitik iletiminin en önemli parametresi olan yoğunlukla ilgili çalışma sunulmuştur. Yoğunluğun ısı iletimine olan etkisi araştırılmıştır, farklı yüzey alanları için tekrarlanmıştır.

Öte yandan ortalama serbest yol uzunluğunun belirleyici olduğu kritik basınç değerini saptamak ve vakum seviyesi – ısı iletim katsayısı ilişkisini çıkartmak amacıyla vakumlu yalıtım panelin S-eğrisi çıkarılmıştır.

İç dolgu malzemesinin içeriğinde bulunan mukavemet artırıcı malzemelerin etkisini araştırmak amacıyla basma mukavemeti testleri ilgili standartlara göre yapılmıştır.

İç yapıyı daha iyi algılamak ve malzeme iç yapısının ısı iletimine ve mukavemete olan etkisini gözlemlemek için elektron mikroskobu(SEM) çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasında mukavemet artırıcı takviyelerin topoğrafyası çıkarılmıştır.

Son olarak, iç dolgu malzemesine TGA, FTIR ve DSC analizleri yapılarak malzeme karakterizasyonu tamamlanmıştır.

3.1. Vakumlu İzolasyon Paneli İç Dolgusunda Kullanılan Malzemeler

Çalışmalarda daha önce tanıtımı yapılan iç dolgu malzemelerinden, ana iç dolgu malzemesi olarak amorf silika, takviye artırıcı malzeme olarak cam yünü ve opaklaştırıcı olarak silisyum karbür malzemesi kullanılmıştır. Karışım hazırlandıktan

sonra uygun kuvvetlerde preslenerek panel haline getirilmiştir. Kurutma fırınında kurutularak nemi alınmıştır. Son olarak üretilen paneller çok katmanlı Al-PET tabakalarından oluşan metalize film içerisine konulmuştur ve 0.5 mbar'a vakumlanarak termal analizleri yapılmıştır.

3.2. Deneysel Çalışmalar Sırasında Kullanılan Ekipmanlar

Deneysel çalışmalar iki ana bölümden oluşmaktadır: Numunelerin üretilmesi ve numune analizleri. Numunelerin üretilmesi aşamasında karıştırıcı, pres, fırın ve vakum cihazları kullanılmıştır. Numune analizleri ise ısı iletim katsayısı cihazı, basma test cihazı, taramalı elektron mikroskobu, tga cihazı, ftir cihazı ve dsc cihazları ile yapılmıştır.

3.2.1. Üretim ekipmanları

3.2.1.1. Toz karıştırma mikseri

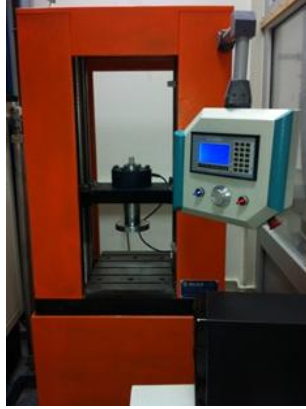
İç dolgu içeriğindeki amorf silikayı, cam yünü ve SiC'ü homojen bir şekilde dağıtma amacıyla kullanılmaktadır. 90 rpm'lik standart karıştırıcısı ve 2600 rpm'lik tek turbo karıştırıcıya sahip 25 lt hacme sahip mikserde, ortalama 5 dakika süreyle karıştırma işlemi yapılmıştır. Karışım homojenizasyonu için, karıştırılan toz hacminin toplam mikser hacminin %35'inden fazla, %70'inden az olmasına özen gösterilmiştir.



Şekil 29 : Toz Karıştırma Mikseri.

3.2.1.2. Elektromekanik pres

Homojen bir şekilde karışmış tozları sıkıştırarak panel haline getirmeyi sağlayan cihazdır. Elektromekanik bir sisteme sahip olup hem yük kontrollü hem de deplasman kontrollü olarak çalışabilmektedir. Yüksek hassasiyetle çalışan preste numerik olarak olarak basılan numunelere 5 mm/dakikalık deplasmanlar ile istenilen form verilmiştir. Geri yaylanma etkisi de düşünülmüş ve numuneler ortalama %5 daha fazla sıkıştırılarak etki minimize edilmiştir. Preslenen paneller baskı altında 10 dakika tutulmuştur.



Şekil 3.2 : Elektromekanik vip presi

3.2.1.3. Kurutma fırını

Daha önceki bölümlerde anlatılan, nemin göznekl malzemelerde ısı iletkenliğini artırmasının etkilerini enazlamak için panel haline getirilmiş toz karışımı 120 - 140° C sıcaklıklarda kurutulmuştur. Şekil 3.3'te kurutma fırını görülmektedir. Numuneler yarım saat arayla tartılmış ve tartım sonuçları sabitlenene kadar kurutma işlemi devam etmiştir. Kurutma işlemi yaklaşık olarak 2 saat sürmektedir.



Şekil 3.3 : Kurutma Fırını.

3.2.1.4. Metalize film kaynak presi

Vakumlama işlemi öncesinde preslenmiş panelin içine koyularak vakumlanacağı metalize filmlerin birleştirildiği cihazdır. Cihaz bir ön ısıtma işlemi sonrasında metalize filmin katı hal kaynağı sıcaklığı olan 140°C’de 10 saniye bekletilir. Daha sonra 70°C’de 5 saniye soğutulur ve baskı ortadan kaldırılır.



Şekil 30.4 : Metalize film kaynatma presi

3.2.1.5. Vakum cihazı

Preslenmiş, kurutulmuş panellerin üç tarafı kaynatılmış metalize film içerisine konulduktan sonra panel iç basıncını 0.5 mbar’a indirmek için kullanılan cihazdır. Vakum seviyesi, atmosferik basınç olan 1 bar ile 0.1 mbar arasında ayarlanabilmektedir. Vakum seviyesi vakumlama süresini oldukça etkilemektedir.



Şekil 3.5 : Vakum Makinası

3.2.2. Test ve analiz cihazları

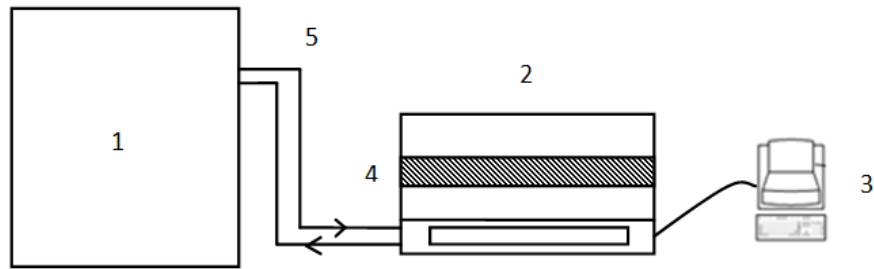
3.2.2.1. Isı iletim katsayısı cihazı

Belirli kalınlık ve ebatta malzemelerin ısı iletim katsayılarını belirlemek amacıyla kullanılan bir cihazdır. Sıcaklık farkı olan iki plaka arasına konulan numunenin ısı geçiş miktarları ölçülerek kalınlık doğrultusunda, eşmerkezden 100 x 100 mm bir alanın analizi yapılmaktadır. Ölçümler, ISO8301 standardına göre yapılmaktadır. Soğuk plaka 10°C, sıcak plaka 38°C derece olmak üzere iki plaka arasındaki sıcaklık farkı 24°C olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.6 : Isı iletim katsayısı ölçüm cihazı

Şekil 3.7’de ısı iletim katsayısı cihazı deney düzeneği gösterilmiştir. su banyosu (1), ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı (2), deney takip bilgisayarı (3), ölçüm yapılacak numune (4) , soğutma suyu geçiş hattıdır (5).



Şekil 3.7 : Deney düzeneğinin yapısı.

3.2.2.2. Basma test cihazı

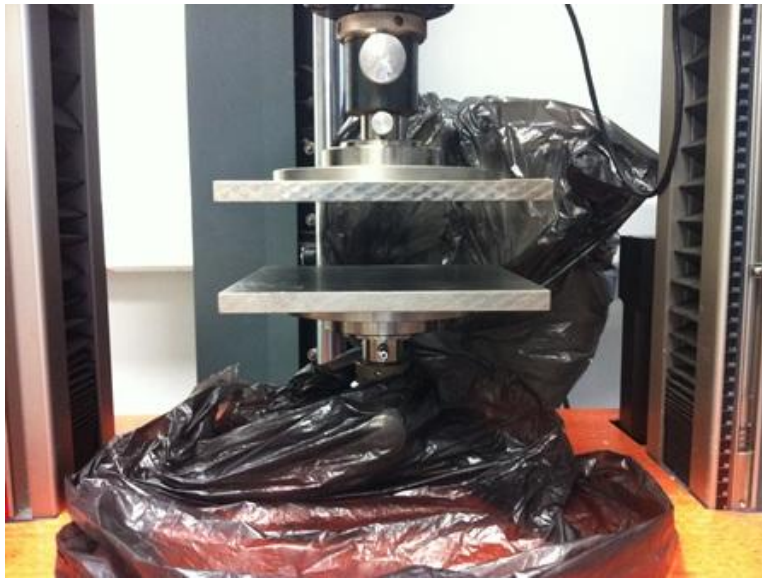
Malzemelerin yüzeyinden içeriye doğru etkiyen dış kuvvetlere basma kuvvetleri denir ve basınç gerilmeleri oluşturur. Basma deneyi, malzemelerin basma mukavemeti ve basma hasarları hakkında veri edinmek amacıyla yapılır. Basma deneyinin sünek malzemeler için önemli bir avantajı boyun verme olayının

olmamasıdır. Bununla birlikte numune boyunun kesit boyutlarına kıyasla çok uzun olması durumunda numunede burkulma ya da numune boyunun kesit boyutlarına yakın olması durumunda numuneyi destekleyen ve yük uygulayan plakalar ile numune arasında meydana gelen sürtünmeden dolayı numunede fiçilaşma görülebilir. Ayrıca basma sırasında malzeme sertliğinin ve kesit alanının artması ile artan kuvvet ihtiyacı bazı deney cihazlarının kapasitesini zorlayabilir. Bu artış aynı zamanda sürtünmenin olumsuz etkilerini de artırabilir. Yüksek mukavemetli gevrek malzemelerin basma deneylerinde, kopan malzemelerin yüksek hızda etrafa sıçrama olasılığı vardır.

Diğer mekanik test deneyleri (çekme, eğme) gibi basma deneyinin de standartı vardır (EN 826). Basma deneyinde silindirik veya küp şeklindeki numuneler iki paralel tabla arasına yerleştirilir ve uygulanan kuvvetle oluşan şekil değiştirmeler ekstansometre yardımı ile ölçülür.

Basma diyagramında da akma sınırından hemen sonra plastik deformasyon oluşmaktadır. Basma diyagramında gerilmede artış meydana gelir. Bu durum, kesit alanının devamlı artmasından kaynaklanmaktadır.

Kullanılan basma test cihazı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 31 : Basma test cihazı.

3.2.2.3. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobunda, katı numune yüzeyi yüksek enerjili bir elektron demetiyle taranır. Bu teknikte yüzeyden çeşitli tür sinyaller oluşturulur. Bunlar geri

saçılmış elektronlar, ikincil elektronlar, Auger elektronları, X-ışını flüoresans fotonları ve değişik enerjili diğer fotonlardır.

SEM ile tarama, objektif merceklerin arasına yerleştirilmiş iki çift elektromanyetik sarım ile sağlanır. Sarım çiftlerinden biri, demeti numune boyunca (x) yönünde kaydırırken, diğer çift (y) yönünde saptırır. Taramanın yapılabilmesi için tarama sarımlarından birine elektrik sinyali uygulanır ve elektron demeti merceğin merkez ekseninin bir yönünden numuneye çarpar. Bu sarım çiftine (yani x sarımlarına) uygulanan elektrik sinyalinin zamanının bir fonksiyonu olarak değiştirmek suretiyle elektron demetinin numune boyunca düz bir doğru üzerinde hareket ettirilmesi ve daha sonra tekrar başlangıç (orijinal) pozisyonuna dönmesi sağlanır. Çizgi taraması tamamlandıktan sonra diğer sarım grubu (y sarımları) kullanılarak demet (y) yönünde biraz kaydırılır ve sonra (x) sarımlarını kullanarak (x) yönünde demet kaydırması tekrarlanır. Demetin bu şekilde hızla hareket ettirilmesiyle tüm numune yüzeyi elektron demetiyle ışınlanabilir. Tarama sarımlarına uygulanan sinyaller ya analog ya dijitaldir. Dijital taramanın üstünlüğü, elektron demetinin hareketinin ve incelenecek bölgeyi bulmasının çok iyi bir şekilde tekrarlanabilir olmasıdır. Numuneden alınan sinyal kodlanır ve demetin (x) ve (y) pozisyonlarını dijital olarak temsil eden formda hafızaya alınır. Numune ve numune tutucu, numune odaları numunelerin hızlı bir şekilde değiştirilebilmesine uygun olarak tasarlanmıştır. Normal basınçtan 10^{-4} torr veya daha düşük bir basınca hızla ulaşabilmek için yüksek kapasiteli vakum pompaları kullanılır. Numune tutucular veya raflar, çoğu cihazda bir kenarı birkaç cm'den fazla numuneleri tutabilecek özelliktedir. Ayrıca numune tutucular x, y ve z yönlerinde hareket ettirilebilir ve her bir eksen etrafından döndürülebilir. Sonuç olarak çoğu numunelerin yüzeyleri hemen hemen bir yönden gözlenebilir. Çalışması en kolay olan numuneler elektriği iletkenlerdir. Çünkü engellenmemiş veya yavaşlatılmamış bir şekilde toprağa akan elektronlar, yük birikimi nedeniyle oluşan gerçek olmayan yapay verileri en aza indirir. Ayrıca, elektrikçe iyi iletken numuneler genellikle ısıyı iyi ilettilerinden ısısal bozunma olasılığı da en azdır. İletken olmayan numunelerin SEM görüntülerini elde etmek için çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Katkılanmış bir cam veya plastik hedef üzerine bir elektron çarptığında görünür bölgede aşırı miktarda foton yayınlanır. Fotonlar, cihazın yüksek vakum bölgesi dışında yer alan bir foto çoğaltıcı tüpe bir ışık borusu vasıtasıyla iletilir.

Çalışmalarda kullanılan taramalı elektron mikroskobu (Jeol JSM 6400) Şekil 3.9’da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 : Taramalı elektron mikroskobu.

3.2.2.4. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC)

DSC yönteminde örnek ve referans maddesine aynı sıcaklık uygulanırken, örnekte meydana gelecek bir değişiklik anında örneğe veya referansa elektrik devre yardımı ile dışarıdan ısı eklenerek her ikisinde aynı sıcaklıkta kalması sağlanır. Böylece kalorimetreye bağlanmış güçler arasındaki fark, örnekteki enerji değişim hızını ölçer ve zamanın bir fonksiyonu olarak kaydeder. Çalışmalarda Q100 DSC cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.10 : Diferansiyel taramalı kalorimetre.

3.2.2.5. Termal gravimetrik analiz (TGA)

TGA (Termal Gravimetrik Analiz), bir malzemenin sıcaklık artışı ile bünyesinde meydana gelen ısısal (termal) ve kütleli (gravimetrik) değişimleri belirlemek için

yapılan bir ölçümdür.

Bir Termal gravimetrideneyinde ölçülen değişkenler; ağırlık, zaman ve sıcaklıktır. Polimerlerin termal kararlılığının ölçülmesinde genellikle termal gravimetrik analiz (TGA) tekniği kullanılır. TGA, bir polimer örneğinin ağırlık kaybını, zamanın ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak izleme tekniğidir.

Eğer sabit bir ısıtma hızında sıcaklıkla ağırlık kaybı incelenecekse buna dinamik TGA; sabit bir sıcaklıkta zamanın bir fonksiyonu olarak ağırlık kaydediliyorsa buna izotermal TGA denir. TGA sonucunda bir polimerin bozunmaya başladığı sıcaklık ve %50 ağırlık kaybının meydana geldiği sıcaklık (yarı ömür sıcaklığı) kolaylıkla belirlenebilir. Numunenin kütlesi numunenin sıcaklığına ya da zamana göre ölçülür. Bu ölçüm için, numune belirli bir sıcaklık değerine kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta tutulur. Malzemede meydana gelen kütle kaybı TGA eğrilerinde bir basamak şeklinde meydana gelir. Çalışmada kullanılan malzemelerin termal gravimetrik analizleri (TGA), Q500 TGA cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 3.11 : Termal gravimetrik analiz cihazı.

3.2.2.6. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

Fourier Dönüşüm Kızılötesi (FTIR) spektroskopisi; matematiksel Fourier dönüşümü yöntemi ile ışığın kızıl ötesi yoğunluğuna karşı dalga sayısını ölçen bir kimyasal analitik yöntemdir.

İncelenmek istenen örnek makromolekülleri fonksiyonel gruplarının titreşimlerinden kaynaklanan yapısal, kompozisyonel ve fonksiyonel bilgilerin elde edilmesini sağlayan bir tekniktir. Bu spektroskopik teknik, boyama, işaretleme gibi ek maddelerin kullanımını içeren uzun örnek hazırlama prosedürlerine gerek duyulmadan, örneğe zarar vermeden hızlı, hassas ve etkin sonuçların göreceli olarak daha ucuz bir biçimde elde edilmesi sağlaması bakımından diğer tekniklerle karşılaştırıldığında daha avantajlıdır. FTIR spektroskopisi, elde edilen parmakizi benzeri bilgiler ışığında moleküllerin fonksiyonel gruplarının tespit edilmesini sağlar. FTIR spektrumlarından kimyasal konsantrasyon, kompozisyon, konformasyon ve içerilen fonksiyonel gruplar gibi pek çok kalitatif ve kantitatif bilgi elde etmek mümkündür. Örneğin, değişik makromoleküllere ait fonksiyonel grupların konsantrasyonları aynı spektrumdan sinyal şiddeti ya da daha hassas olarak bant alanı hesaplanarak Beer-Lambert yasasına uygun olarak elde edilebilir.

Çalışmalarda FTIR, numunedeki organik bileşenleri tayin etmek amacıyla kullanılmıştır. Kullanılan FTIR (The Excalibur FTS 3000 MX spectrometer) Şekil 3.12’de gösterilmiştir. Dalga boyu $400-4000\text{ cm}^{-1}$ arasında olup, oda koşullarında analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12 : FTIR Cihazı.

3.3. Vakumlu izolasyon paneli numunelerinin üretilmesi

Vakumlu izolasyon panellerinin ana üretim prosesleri: iç dolgu malzemesini oluşturan bileşenlerin tartımı, tartımı yapılan bu malzemelerin mikserde konulması, mikserde homojen bir şekilde karıştırma, homojen olarak dağılmış karışımın

preslenecek kalıba alınması, ileride açıklanacak olan parametrelere göre preste istenilen forma dönüştürülmesi, panel hale getirilen toz karışımının kurutulması ve son olarak, kurutulmuş olan panellerin metalize film içerisine konularak vakumlanması oluşturmaktadır. Termal analiz ile ısı iletim katsayısı ölçümleri yapılacağı için numuneler ısı iletim katsayısı cihazının ölçüm yapabileceği boyutlar dikkate alınmıştır. Bu nedenle numuneler 300 x 300 mm boy ve genişliğe sahip dikdörtgenler prizması şeklinde üretilmiştir. Numune kalınlıklar yapılacak olan çalışmaların standartlarına göre 15 - 50 mm arasında seçilmiştir. Şekil 3.13'de vakumlu izolasyon numunelerinin nasıl üretildiği şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : Vakumlu izolasyon panellerinin üretilmesi.

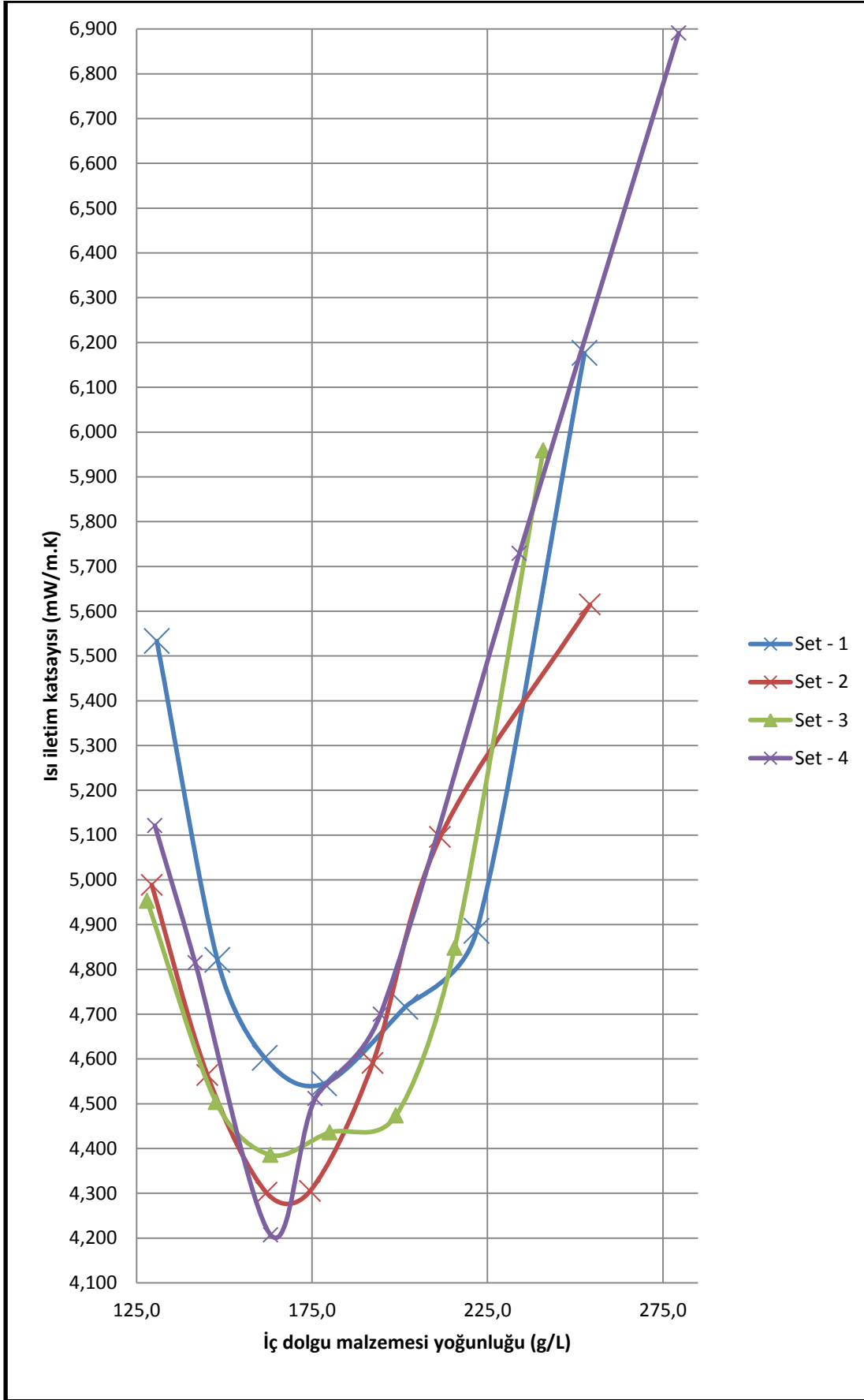
3.4. İç dolgu malzemesinin yoğunluğunun etkin ısı iletim katsayısı üzerine etkisinin araştırılması

Daha önceki bölümlerde, toz bazlı mazlemelerin etkin ısı iletim katsayısına dört farklı mekanizmanın etkilediği görülmektedir. Sıcaklık parametresinin bu dört farklı mekanizmayı da etkilediği belirtilmiştir. Çok düşük vakum ortamında çalışıldığı için coupling etkisi ve gözenekler arası gaz ile ısı geçiş miktarları yok sayılabilmektedir. Dolayısıyla, katı tanecikler üzerinden katisal ısı iletimi ve ışımaya ile ısı geçişi en yüksek öneme sahiptir. Bu iki ısı transfer mekanizmasının ortak parametresi olan yoğunluğun ısı transferi üzerine etkisi araştırılması gereken ilk konudur. Bu amaç doğrultusunda 300x300x15 mm ebatlarında, yoğunluğu piknometre ile belirlenmiş 4 set deney numunesi hazırlanmıştır. Tüm numunelerden 3'er ısı iletim katsayısı ölçümü alınmıştır. Numuneler kütlesi sabit kalana kadar fırında kurutulmuştur ve nemin yaratabileceği etkiler ihmal edilebilir duruma getirilmiştir. Yoğunluklar 125 g/L ile 300 g/L arasında değiştirilerek ısı iletim katsayıları ölçülmüştür. Bir diğer önemli parametre olan vakum iç basıncı 0,5 mbar'a sabitlenerek, iç basıncın ısı iletimine etkisi sabit tutulmuştur. Tüm numunelerin üretim proses parametreleri aynıdır. Çizelge 3.1'de çalışma sonuçları özetlenmiş, Şekil 3.11'de yoğunluk – ısı iletim katsayısı eğrisi çizilmiştir. Karakterizasyonu yapılan iç dolgu malzemesinin tüm verileri Şekil 3.14'teki grafiğe yerleştirilmiştir. Eğride de görüldüğü gibi dolgu malzemesi düşük yoğunlukta 5,2 mW/m.K ısı iletim katsayısına sahiptir, artan yoğunlukla ısı iletim katsayısının düşmüş ve bir minimum noktası yaratmıştır. Bu noktadan sonra artan yoğunlukla birlikte ısı iletim katsayısı da yükselmiştir.

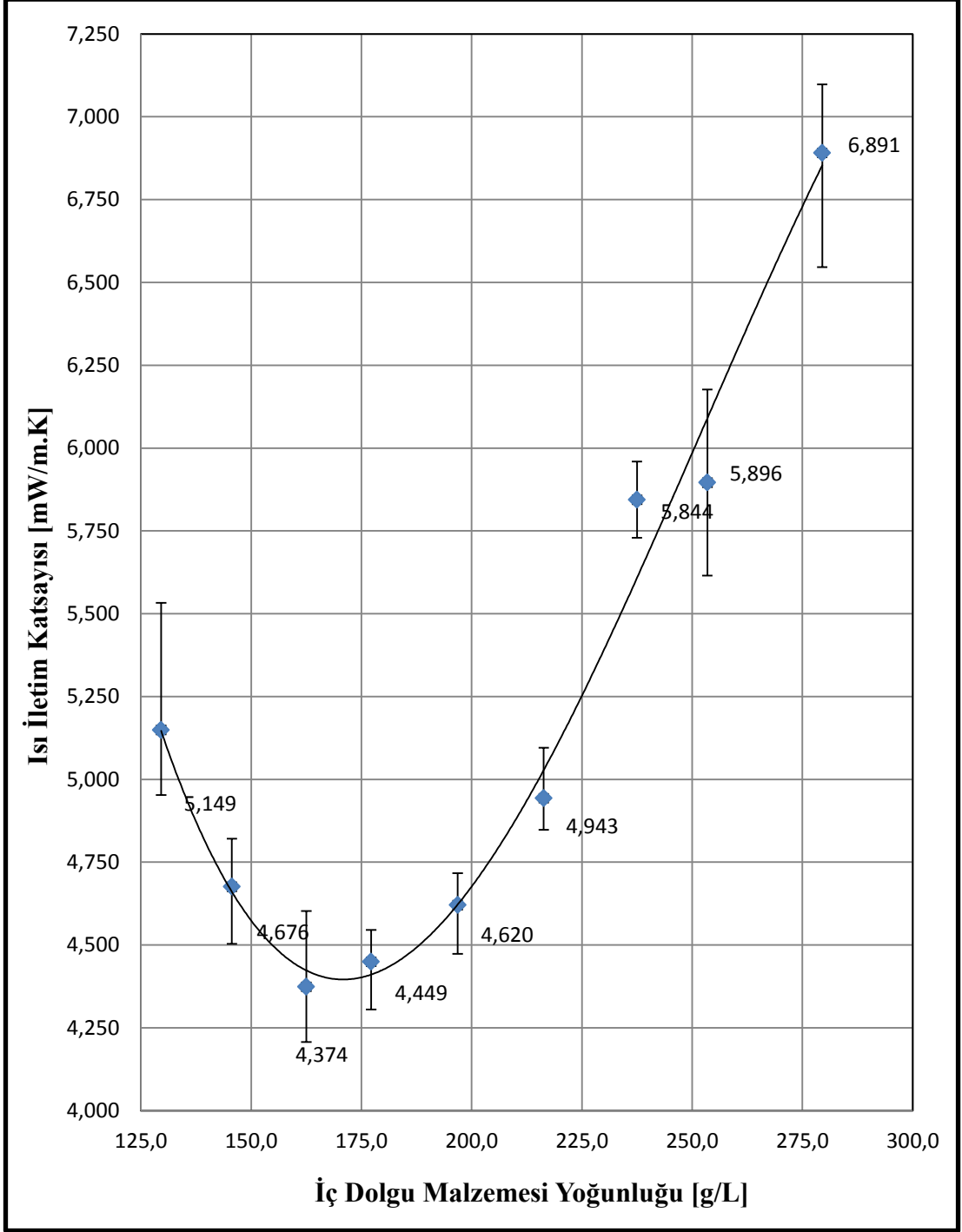
Dört deney seti tek bir grafikte toplandığında Şekil 3.12'de ki yoğunluk – ısı iletim katsayısı eğrisine ulaşılmıştır. Bu eğri sonucunda en düşük ısı iletim katsayısı 170 g/L yoğunlukta 4,301 mW/m.K olarak belirlenmiştir. Çalışmada üretilebilirlik alt sınır, ısı iletim katsayısı değerleri üst sınır olarak belirlenmiştir. 125 g/L yoğunluğun altında vakum çemberinde karşılaşılabilecek olan 1 bara kadar olan basınca dayanabilecek numune üretilememiştir. 300 g/L ise yaklaşık 7mW/m.K'lik kritik yoğunlukta eğrinin verdiği taban değerinden sonra 3. Değer olduğu için yeterli kesinlikte ve doğrulukta bir eğriye ulaşıldığı düşünüldüğü için üst limit olarak belirlenmiştir.

Çizelge 3.1 : Yoğunluğa bağlı ısı iletim katsayısı değerleri.

	Panel Yoğunluğu [g/L]	Isı İletim Katsayısı [mW/m.K]			
		Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ortalama
SET 1	130,8	5,535	5,533	5,531	5,533
	148,0	4,821	4,821	4,821	4,821
	161,5	4,602	4,605	4,600	4,602
	178,5	4,542	4,547	4,546	4,545
	201,6	4,715	4,725	4,709	4,716
	221,9	4,890	4,887	4,880	4,886
	252,7	6,180	6,176	6,173	6,176
SET 2	129,3	4,987	4,989	4,990	4,989
	145,2	4,561	4,562	4,569	4,564
	162,0	4,301	4,303	4,299	4,301
	174,4	4,304	4,305	4,306	4,305
	192,3	4,593	4,588	4,592	4,591
	211,5	5,093	5,097	5,096	5,095
	254,2	5,656	5,633	5,555	5,615
SET 3	128,0	4,956	4,953	4,95	4,953
	147,6	4,505	4,504	4,501	4,503
	163,1	4,382	4,384	4,391	4,386
	180,1	4,433	4,439	4,436	4,436
	198,9	4,477	4,47	4,473	4,473
	215,6	4,848	4,848	4,844	4,847
	240,9	5,959	5,955	5,962	5,959
SET 4	141,7	4,121	4,122	4,121	4,121
	141,7	4,809	4,817	4,818	4,815
	163,2	4,204	4,207	4,209	4,207
	175,8	4,512	4,511	4,511	4,511
	194,5	4,700	4,702	4,702	4,701
	234,1	5,729	5,725	5,73	5,728
	279,5	6,891	6,899	6,892	6,894



Şekil 32 : 4 farklı veri seti için yoğunluk - ısı iletim katsayısı değerleri.



Şekil 33 : Yoğunluk - ısı iletim katsayısı etkisi.

Bu eğriden çıkarılması gereken sonuç, parabolik eğrinin minimum noktasında ısı iletim katsayısı yalıtım uygulamaları için en iyi değerini almaktadır. Bu minimum noktanın solunda kalan yani daha düşük yoğunluklu bölgede ısıl transfer ışıma yolu ile, eğrinin sağında kalan yani daha yüksek yoğunluklu bölgede ısıl geçişi katısal yönelimlidir.

Çalışmada, katısal iletim yani tanecikler üzerinden ısı aktarımının BET yüzey alan ile ilişkisi de incelenmiştir. Daha düşük BET yüzeye sahip bir iç dolgu malzemesi kullanılması ile vakumlu paneller üretilmiştir. İlk çalışmadaki gibi üretilen numunelerden ikişer set numunesi hazırlanmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.2’de özetlenmiştir.

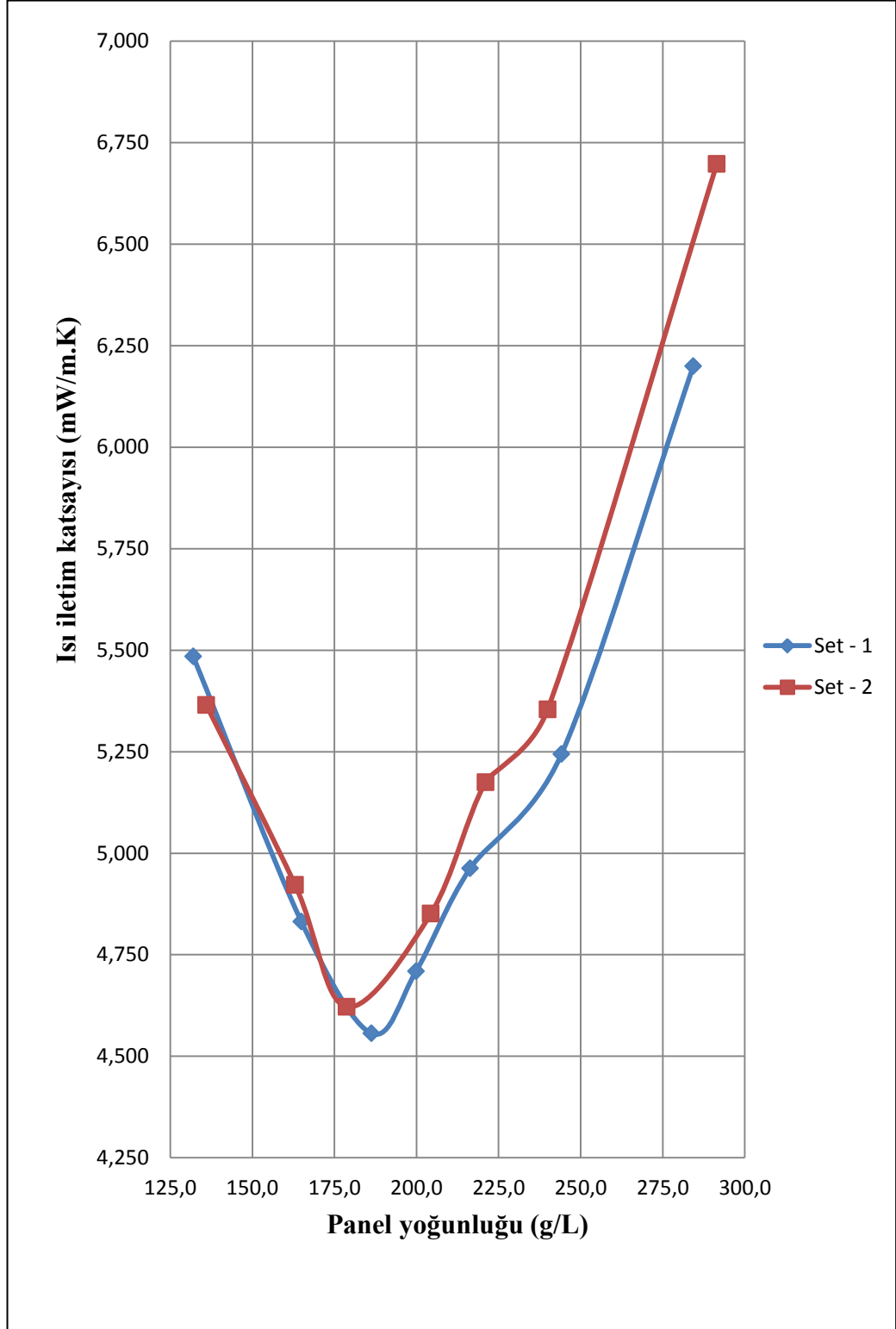
Çizelge 3.2 : Daha düşük BET yüzeyine sahip deney setlerinin sonuçları

		Isı İletim Katsayısı [mW/m.K]			
Panel Yoğunluğu [g/L]		Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ortalama
SET 1	132,0	5,551	5,452	5,450	5,484
	165,0	4,832	4,831	4,831	4,831
	186,3	4,556	4,557	4,556	4,556
	199,9	4,712	4,707	4,709	4,709
	216,3	4,965	4,960	4,963	4,963
	244,1	5,243	5,243	5,246	5,244
	284,3	6,196	6,203	6,198	6,199
SET 2	136,0	5,396	5,397	5,301	5,365
	163,0	4,924	4,921	4,920	4,922
	178,7	4,621	4,622	4,622	4,622
	204,4	4,852	4,847	4,854	4,851
	221,0	5,109	5,108	5,306	5,174
	239,9	5,359	5,354	5,348	5,354
	291,5	6,703	6,692	6,696	6,697

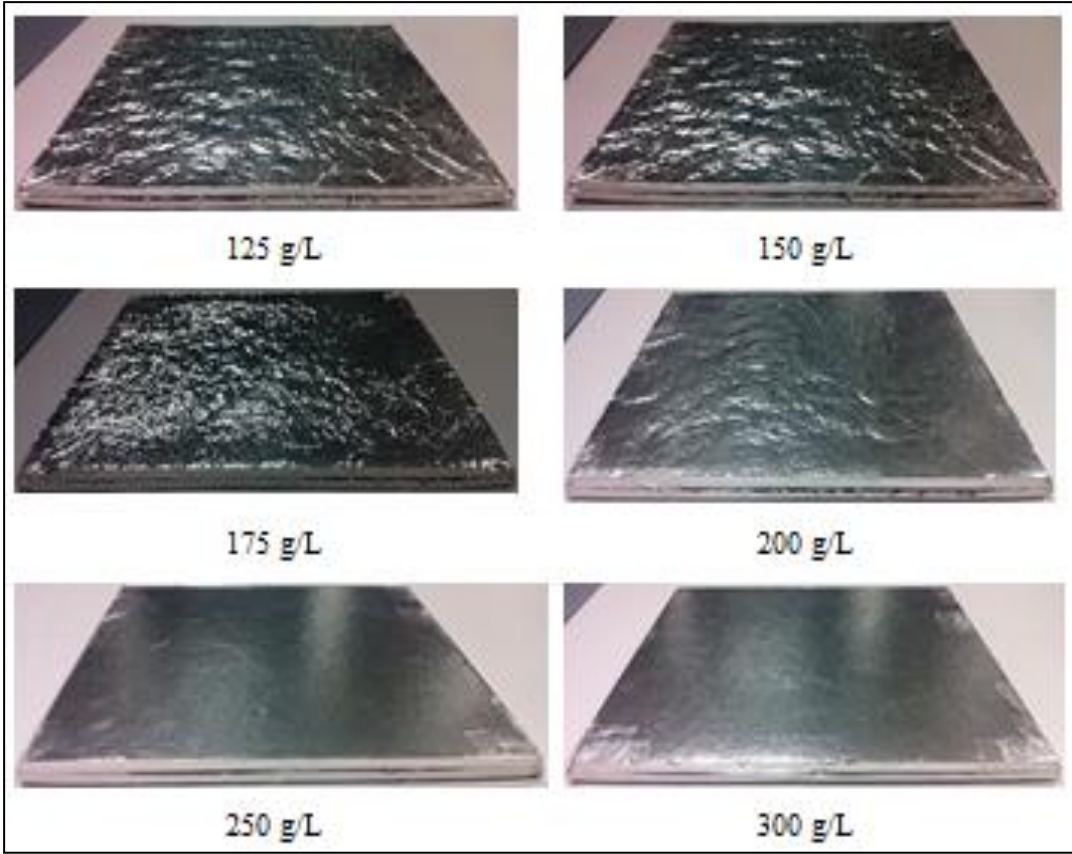
Çizelge 3.2’deki veriler grafiğe yerleştirildiğinde yoğunluğun ısı iletim katsayısına olan etkisine ek olarak yüzey alanın etkisini de gözlemek mümkündür. Sonuç olarak, daha düşük BET yüzeyine sahip olan taneciklerin partikül boyutları daha büyük olduğu için katısal ısı iletimi artmıştır. Dolayısıyla ısı iletim katsayıları yükselmiştir. Öte yandan en düşük ısı iletim katsayısına ulaşılan yoğunluğun biraz daha arttığı gözlemlenmiştir. Yaklaşık olarak 185 g/L yoğunlukta ulaşılan en düşük ısı iletim katsayısı değeri 4,556 mW/m.K’dir.

Yoğunluğun vakumlu paneller üzerine bir diğer önemli etkisi ise yüzey kalitesidir. Yüzey kalitesi gerek ölçüm sonuçlarının doğruluğunu gerekse izolasyon paneli uygulanacak olan bölgeye yapıştırılırken, yapıştırma alanı açısından kritiktir. Şekil

3.17’de çalışmada kullanılan farklı yoğunluklardaki numuneleri ve yüzey kalitelerini göstermek amacıyla çekilen fotoğraflar bulunmaktadır.



Şekil 34 : BET yüzey alanının s-eğrisine olan etkisi.



Şekil 35 : Yoğunlukla yüzey kalitesinin değişimi.

3.5. Panel içi vakum seviyesinin ısı iletim katsayısı üzerine etkisinin araştırılması ve S-eğrisinin çıkarılması

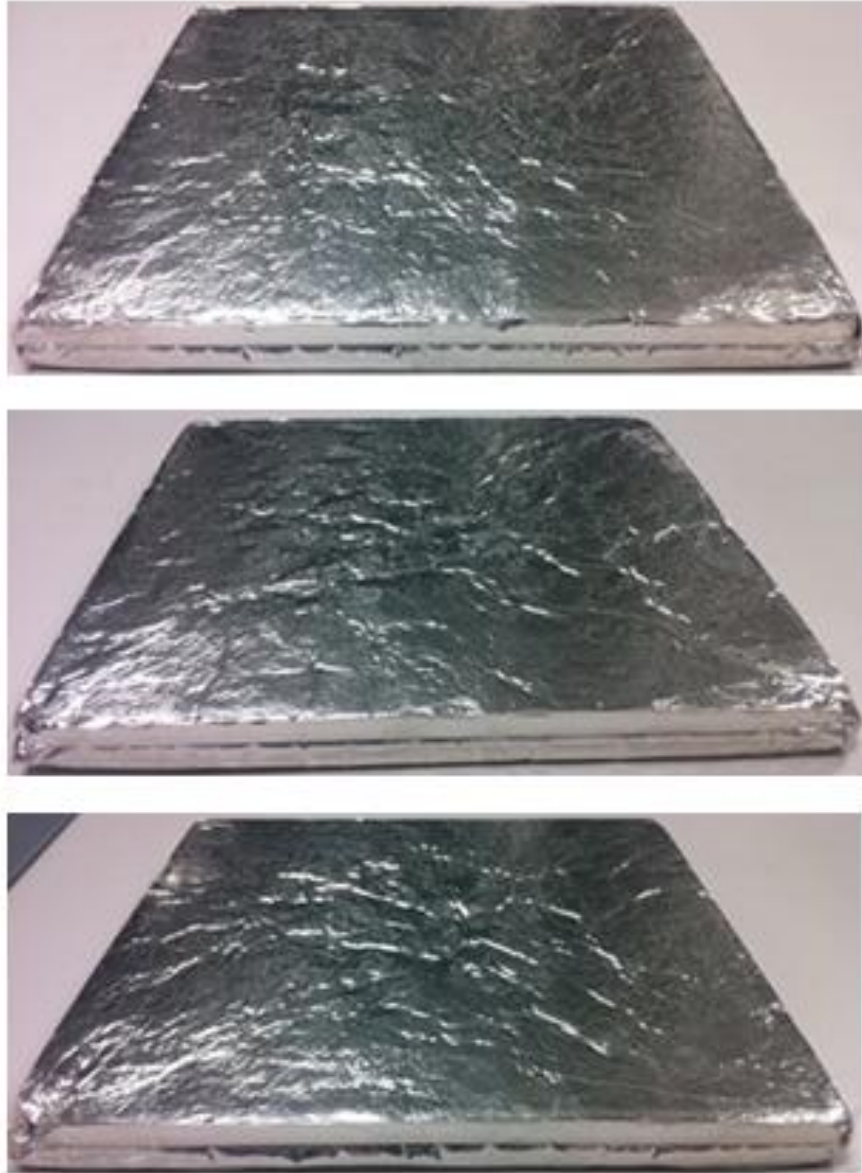
Bir iç dolgu malzemesinin S- eğrisinin belirlenmesi için vakum altında ısı iletim katsayısı ölçümleri yapılmalıdır. Bu yöntem, belirli bir basınç altında tutulan malzemenin o basınçta ısı iletim katsayısının ölçülmesine dayanır. Yoğunluk çalışmalarında da görüldüğü üzere malzeme içeriği ölçümlerde sapmalara sebep olmuştur. Bu sapmaların ölçüm sonuçlara olan etkisini enazlamak için 3 farklı deney numunesi hava ortamından 0,1 mbar'a kadar vakumlanarak ısı iletim katsayısı ölçümleri yapılmıştır.

Etkin ısı iletim katsayısı ölçümleri ASTM C 518 ve ISO 8301 standartlarına uygun olacak şekilde yapılmıştır.

Hazırlanan 3 farklı numune 300x300x25 mm boyutlarında olup, 1000 mbar ile 0,1 mbar basınca vakumlanmıştır. Yapılan ölçümlerde alt plaka sıcaklığı 38°C, üst plaka sıcaklığı 10°C olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu sayede 24°C ortalama sıcaklık (yaklaşık ortam sıcaklığı) elde edilmiştir. Üst plaka, bağımsız çalışan dört adet motor

vasıtası ile aŐađı ve yukarı hareket edebilmektedir. Bu hareketin miktarı otomatik olarak veya el ile kumanda edilerek ölçüm numunesi kalınlığına göre ayarlanabilmektedir. Yoğuşma probleminin önlenmesi için deney odası dış ortamdandır yalıtılmıŐtır. Oda içinde sürekli mevcut bulunan havadaki nemin alınması için, odaya elastik bir hortum ile bağlanmış nem alma cihazı kullanılmaktadır. Bu sayede deney ortamındaki bağlı nem %21 mertebesinde tutulmaktadır.

Şekil 3.18'de S-eğrisi için üretilen panellerin sürekli deformasyon sonucunda 0.2 mbar vakum seviyesindeki fotoğrafları görölmektedir.



Şekil 36 : S-eğrisi numuneleri.

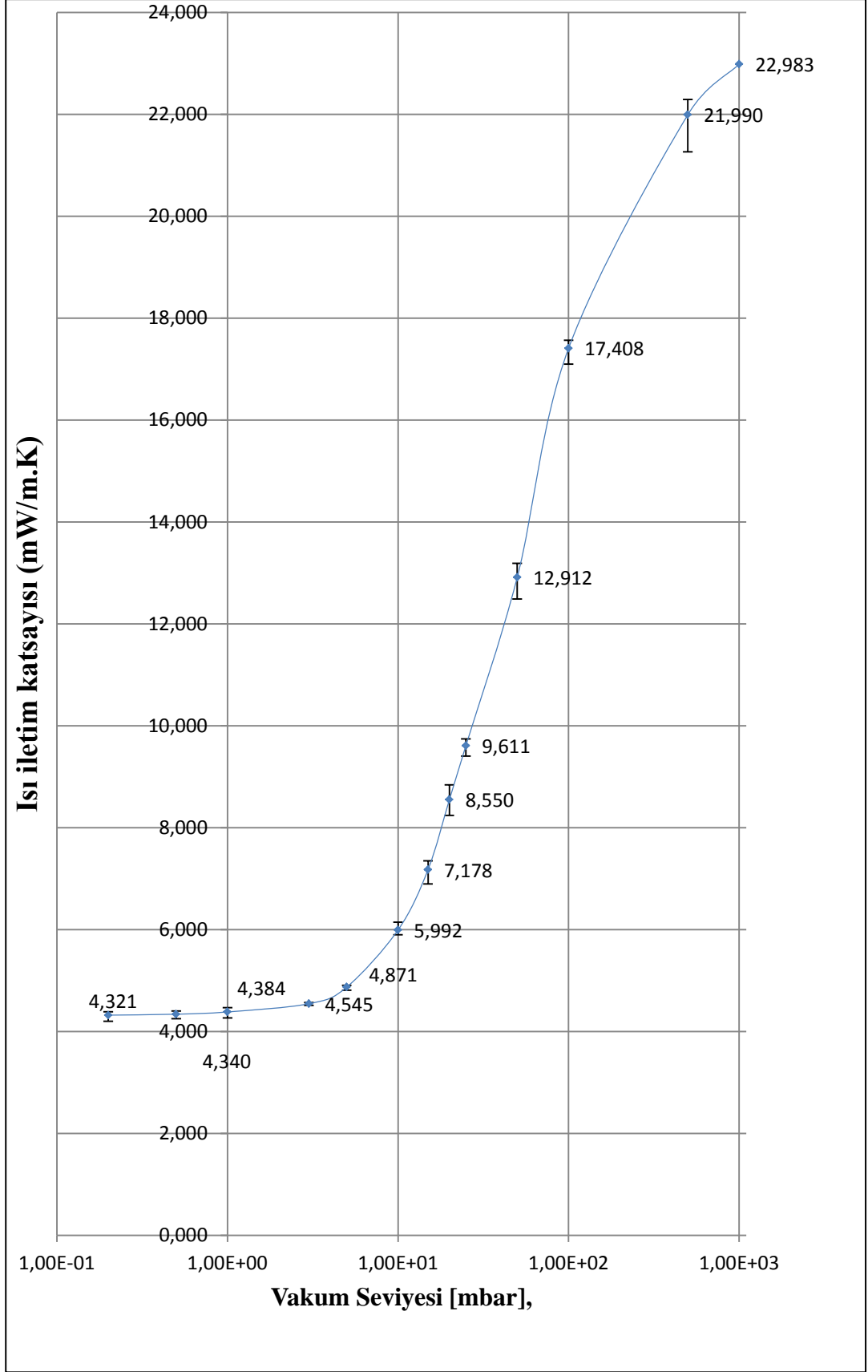
Çizelge 3.3'te S-eğrisi çalışmalarında elde edilen sonuçlar verilmiştir. Bu verileri yarı logaritmik bir grafiğe aktarıldığında iç dolgu malzemesine ait S-eğrisini elde edilir. Şekil 3.19'da karakterizasyonu yapılan iç dolgu malzemesinin S-eğrisi görülmektedir. S-eğrisinden bu iç dolgu malzemesine ait olan kritik basınç değerinin 7 mbar olduğu görülmektedir. 7 mbar'dan sonra hızla yükselen ısı iletim katsayısının atmosferik basınçta 22,7 mW/m.K'e kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Kritik basınç altı ısı iletim katsayısı 4,3 mW/m.K mertebelerindedir. S-eğrisi çıkarılmış bir malzemenin vakum seviyesinden ısı iletim katsayısına ulaşılabilceği gibi, ısı iletim katsayısı ölçüldükten sonra panel içi vakum seviyesine de ulaşmak mümkündür.

Amorf silikaya ait S-eğrilerinde, eğri karakteri S-eğrisi tandanslı değildir Şekil 2.7'de bu açıkça görülmektedir. Amorf silika esaslı iç dolgu malzemesinin ısı iletim katsayısının vakum seviyesi ile değişimi Şekil 3.19'daki gibi S-eğrisi olmasının sebebi mukavemet artırıcı olarak kullanılan cam yünü malzemesidir.

Pratik uygulamalarda da yararlanılan S-eğrilerinde, istenilen vakum seviyesine ulaşmak için geçen vakumlama süresi de kritik bir öneme sahiptir. Çizelge 3.4'te çalışmada ulaşmak istenen vakum seviyesine denk gelen süreler verilmiştir. Özellikle 0,5 mbar'dan daha düşük vakum seviyelerinde vakumlama süresinin dramatik arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 3.3 Farklı vakum değerlerindeki ısı iletim katsayıları

	Numune 1			Numune 2			Numune 3		
	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3	Ölçüm 1	Ölçüm 2	Ölçüm 3
0,2 mbar	4,313	4,324	4,316	4,324	4,321	4,317	4,322	4,324	4,324
0,5 mbar	4,314	4,306	4,296	4,458	4,431	4,429	4,271	4,276	4,276
1 mbar	4,368	4,333	4,320	4,470	4,461	4,445	4,351	4,353	4,352
3 mbar	4,662	4,665	4,461	4,513	4,516	4,58	4,501	4,503	4,503
5 mbar	4,866	4,865	4,863	4,863	4,847	4,852	4,888	4,902	4,89
10 mbar	6,050	6,053	6,047	5,960	5,959	5,961	5,966	5,966	5,967
15 mbar	7,030	7,027	7,023	7,273	7,266	7,246	7,242	7,246	7,246
20 mbar	8,830	8,827	8,827	8,391	8,382	8,378	8,447	8,437	8,431
25 mbar	10,120	10,100	10,100	9,528	9,522	9,528	9,816	9,799	9,805
50 mbar	13,120	13,110	13,110	12,780	12,790	12,780	12,850	12,840	12,830
0,1 bar	17,130	17,130	17,130	17,830	17,790	17,790	17,300	17,280	17,290
0,5 bar	22,300	22,280	22,270	21,870	21,840	21,830	21,830	21,850	21,840
1 bar	22,900	22,850	22,840	22,760	23,710	23,710	22,690	22,710	22,680



Şekil 3.19 : İç dolgu malzemesine ait S-eğrisi.

Çizelge 3.4 : Vakum seviyesine bağlı olarak değişen vakumlama süreleri

Vakum Seviyesi [mbar]	Vakuma Gelme Süresi [sn]
2,00E-01	605
5,00E-01	152
1,00E+00	130
3,00E+00	115
5,00E+00	100
1,00E+01	90
1,50E+01	80
2,00E+01	72
2,50E+01	62
5,00E+01	52
1,00E+02	42
5,00E+02	32
1,00E+03	0

3.6. İç dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinin incelenmesi

3.6.1. Basma mukavemet testlerinin yapılması

Vakumlu izolasyon panellerinin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, vakumlama sırasında oluşan kalınlık belirsizlikleri için de önem arz etmektedir.

Basma mukavemet testlerindeki ana amaç; takviye amaçlı kullanılan cam yününün iç dolgu içerisindeki miktarının, EN 826 standartlarında belirtilen deney parametreleriyle iç dolgu malzemesinin mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini araştırmaktır. İç dolgu malzemesine artan miktarlarda 4 farklı cam yünü katkı yapılmıştır. Bu 4 farklı deney setinde 5'er adet numune üretilmiştir.

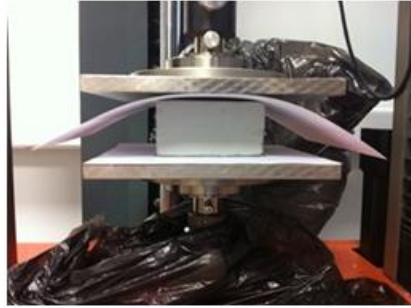
EN 826 standartlarına göre [50],

- Basma çeneleri arasındaki mesafe (numune kalınlığına ek olarak) numune kalınlığının %2,5'u kadar çenelerin altından ve üstünden tolerans sağlanmalıdır.
- Test numuneleri 40 ile 75 mm arasında olmalıdır .
- Basma hızı, dakikada deney numunesinin kalınlığının onda biri kadar olmalıdır.

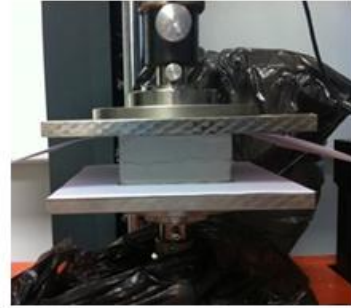
- Numune yüzey alanı 50 x 50mm ile 200 x 200 mm arasında olmalı ve numunelerin ağırlık merkezleri basma çenelerinin ağırlık merkezleri ile eşmerkezli olmalıdır.

Standartlardaki bu özellikler aşağıdaki gibi seçilerek basma testleri gerçekleştirilmiştir.

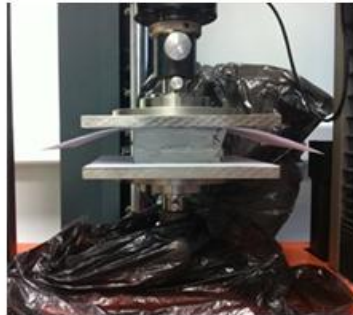
- Basma çeneleri arasındaki mesafe 53 mm olarak tanımlanmıştır.
- Test numuneleri 50 mm olarak belirlenmiştir.
- 5 N'luk bir ön yükleme uygulanmıştır. Ön yükleme 2 mm/dak olarak belirlenmiştir.
- Kalınlığa bağlı basma deney hızı 5 mm/dak olarak ayarlanmıştır.
- Numune ve çeneler eş merkezli olması için kılavuz kullanılmıştır.
- Numuneler toplam %60'lık deformasyona tabi tutularak hasar incelemesi yapılmıştır. %10, %20, %40 ve %60 deformasyon miktarlarındaki hasar durumları incelenmiştir.



Deney başlangıcı



%10 deformasyona uğramış numune



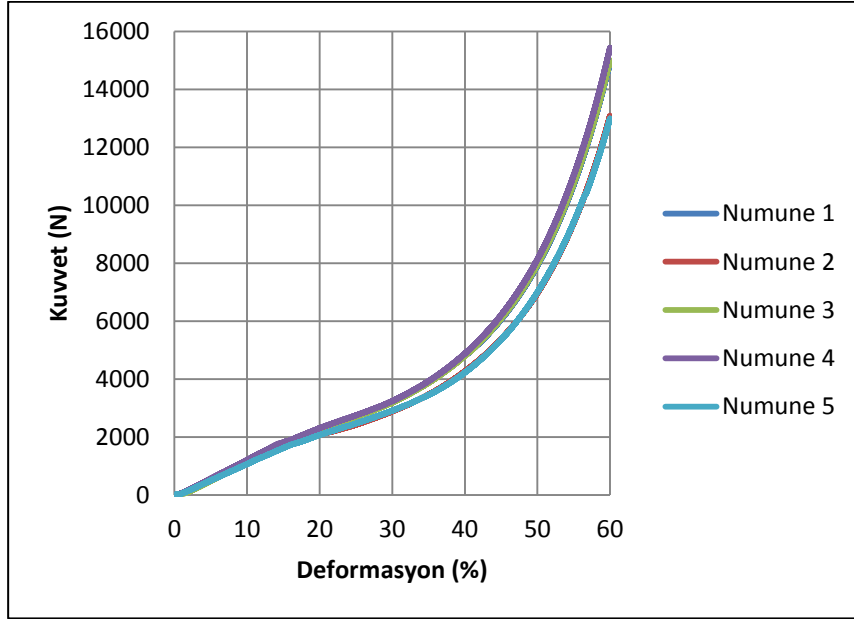
%20 deformasyona uğramış numune



%40 deformasyona uğramış numune

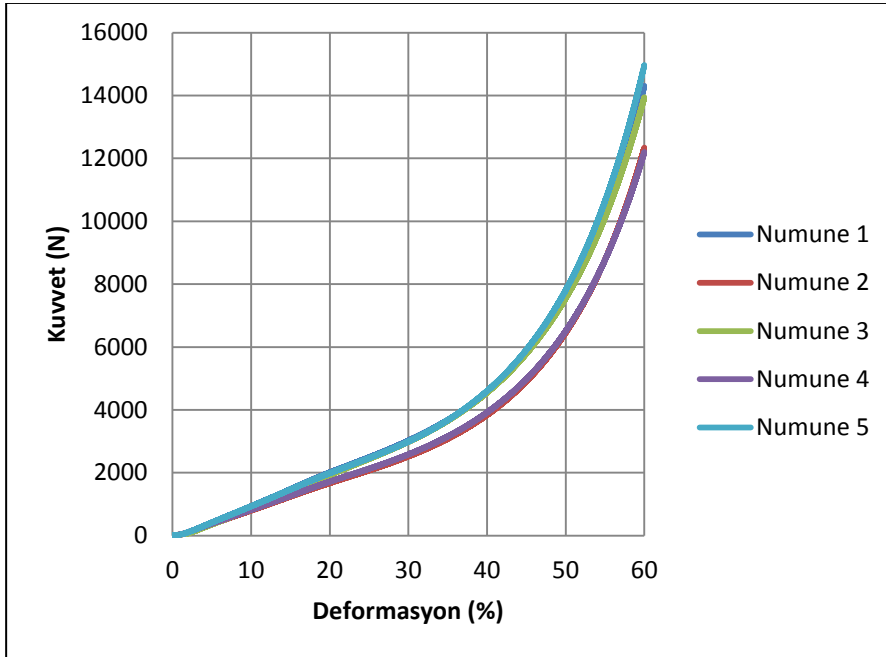
Şekil 3.20 : En düşük elyaf katkılı numunenin basma fotoğrafları.

İçeriğinde en az takviye katkısı olan iç dolgu malzemesinin basma testlerinde alınan sonuçları Şekil 3.21’de gösterilmiştir. %5’lik elyaf katkılı basma testinde çekilen fotoğraflar deformasyon miktarlarına göre aşağıdaki gibidir.



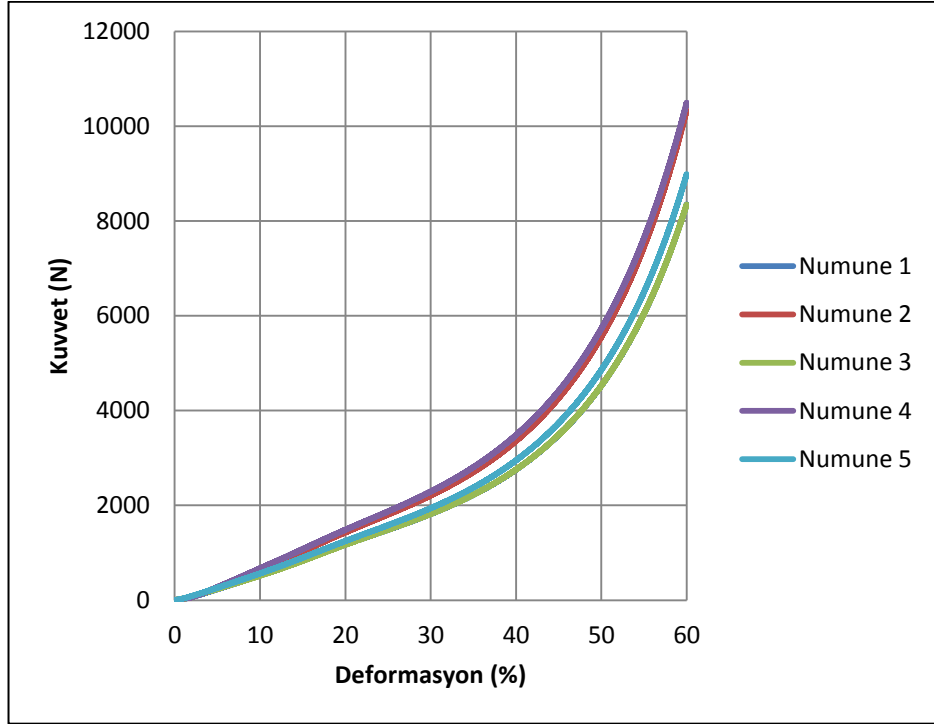
Şekil 3.21 : %5 elyaf katkılı numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.

Daha sonra, iç dolgu içeriğindeki elyaf takviyesi %10’a artırılarak deney setleri hazırlanmıştır. İlgili standartlar aynen uygulanmıştır. Basma deney sonuçları ile aşağıdaki eğriler çizilmiştir.

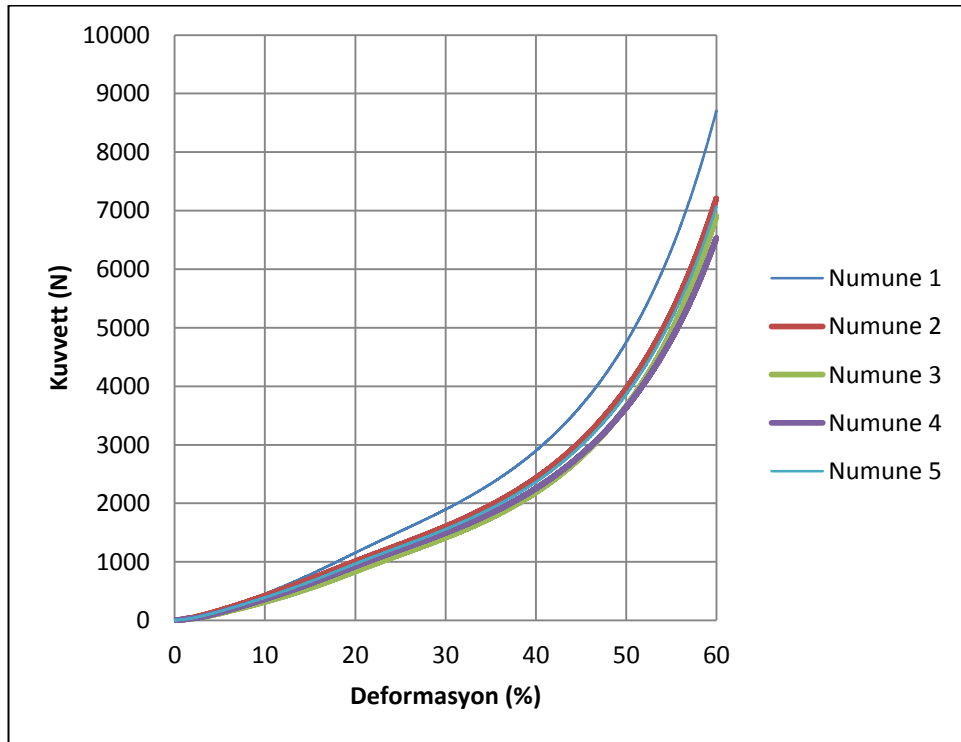


Şekil 37 : %10 elyaf katkılı numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.

Cam yünü miktarları artırılarak, %15 ve %20 katkıli deney setleri hazırlanarak basma testleri uygulanmıştır. %15 ve %20 katkıli deney setleri için oluşturulan kuvvet/deformasyon eğrileri çizilmiştir.

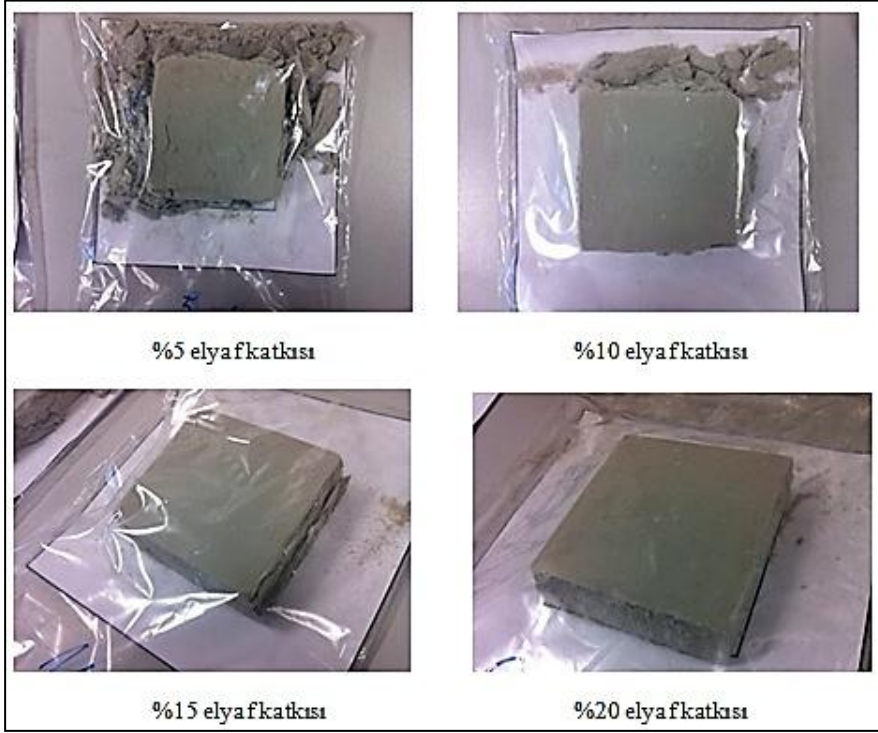


Şekil 38 : %15 elyaf katkıli numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.



Şekil 3.24 : %20 elyaf katkıli numunelerin kuvvet/deformasyon eğrisi.

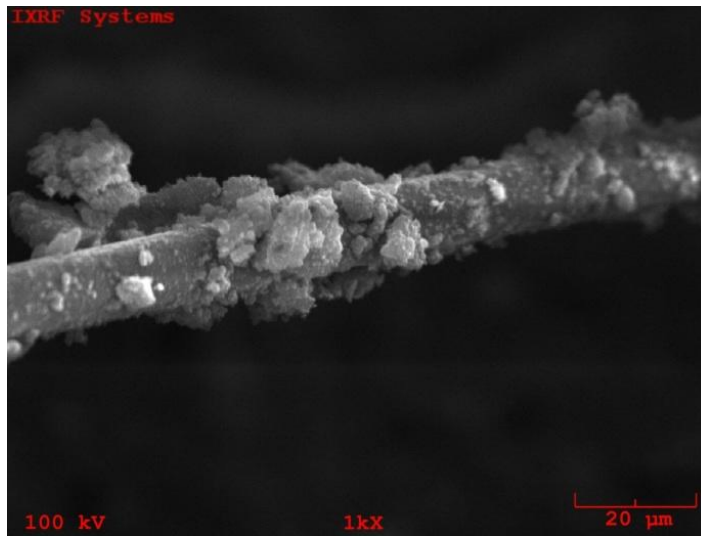
Tüm malzemeler mekanik testlerden sonra fotoğraflandırılmıştır. Şekil 3.26’da numunelerin testten sonraki deformasyona uğramış görüntüleri verilmektedir.



Şekil 3.25 : Numunelerin %60 deformasyon sonucu fotoğrafları.

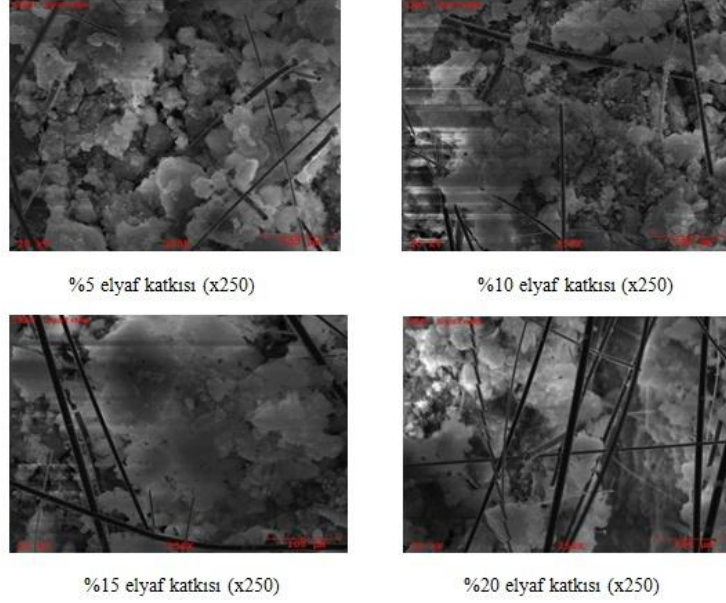
3.6.2. İç dolgu malzemesinin taramalı elektron mikroskop analizinin yapılması

Geliştirilen vakumlu izolasyon malzemesinin 1000 büyütmedeki SEM görüntüsü aşağıdaki gibidir. Şekilde, amorf silika ve silisyum karbür’ün cam yünü etrafında oluşturduğu yapı görülmektedir.

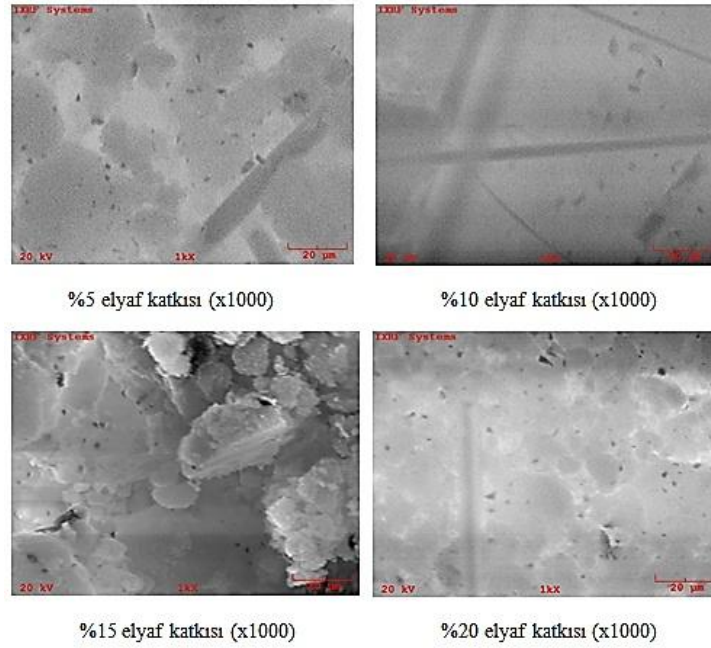


Şekil 39 : VIP numunesi SEM görüntüsü.

Basma testi yapılan numuneler, test öncesi ve test sonrası olmak üzere iki farklı grupta incelenmiştir. Farklı miktarlardaki cam yünü katkılarının 250 ve 1000 büyütmedeki görüntüleri sunulmuştur. Bunlara ek olarak topoğrafya çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalar neticesinde elyafların preslenme öncesi ve sonrasında rasgele dağıldığı gözlenmiştir. Silika taneciklerinin ise topaklaştığı ve bunun da ısı iletim katsayısını artırabileceği belirlenmiştir.



Şekil 3.2740 : Numunelerin 250 büyütmedeki SEM fotoğrafları.

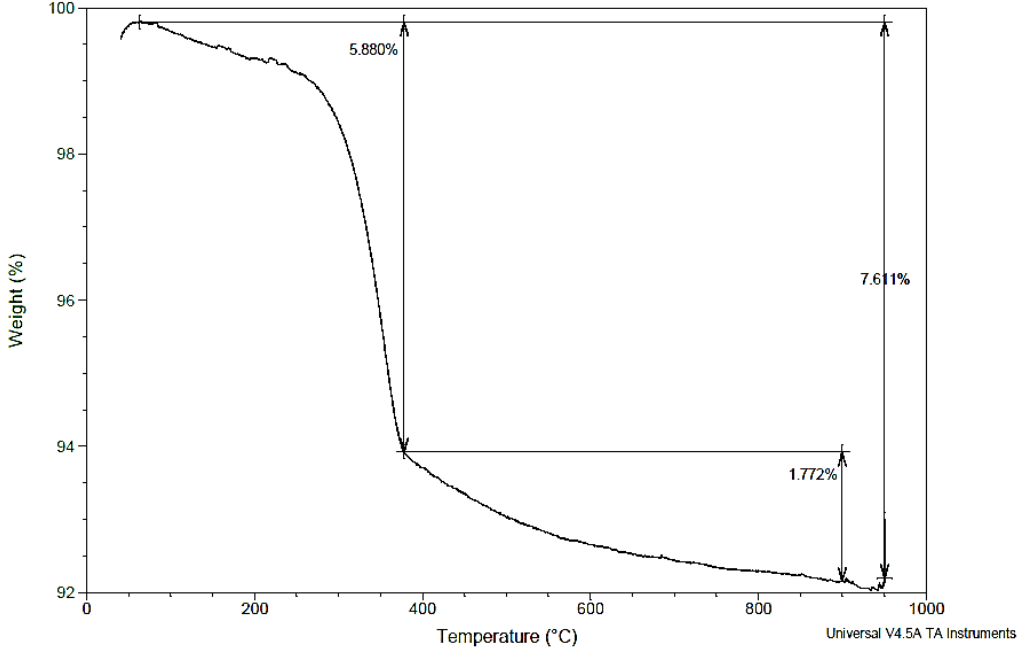


Şekil 3.28 : Numunelerin 1000 büyütmedeki yüzey topoğrafyaları.

3.7. Diğer Karakterizasyon Çalışmaları

3.7.1. Termo gravimetrik analiz (TGA)

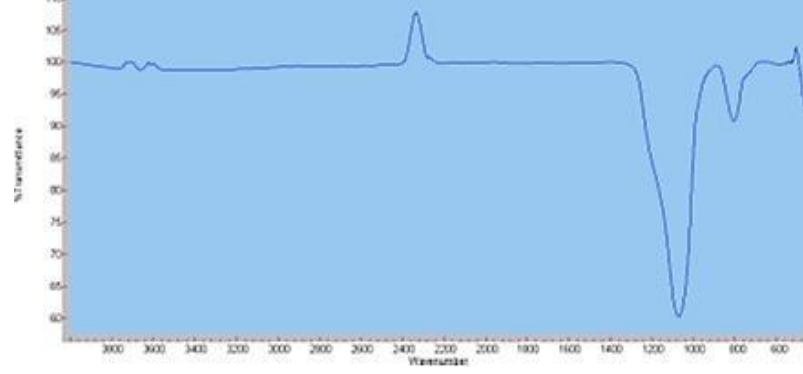
Şekilde yapılan VIP'lerden bir tanesine uygulanan TGA analiz sonucu bulunmaktadır. İlk olarak 100 °C olan fiziksel olarak birleşmiş olan suyun buharlaşmasını göstermektedir. %7'lik azalma ise safsızlıklardan ve cam yününden gelen azalmayı göstermektedir.



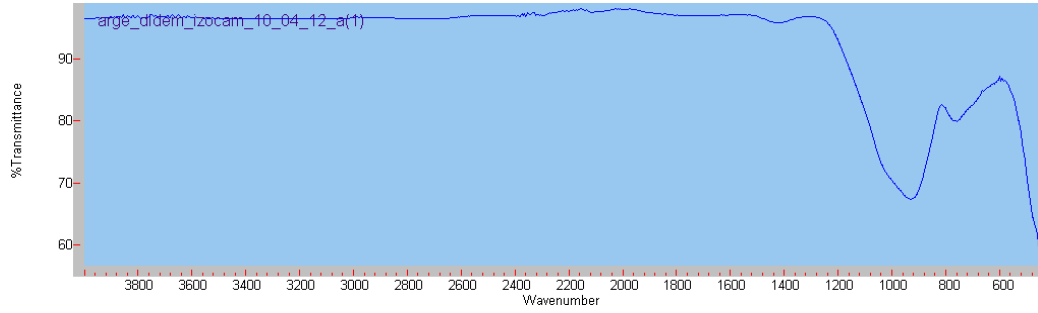
Şekil 41 : VIP TGA analiz sonucu.

3.7.2. Fourier Dönüştümlü kızılötesi spektroskopisi (FTIR)

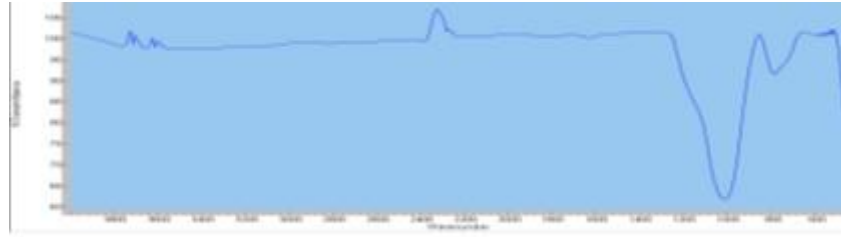
FTIR analizi malzemenin yapısını ve kimyasal bileşimini öğrenmek için kullanılmıştır. Bu çalışmada, iç dolgu malzemeleri olan, fumed silika, perlit, cam elyaf, cam yünü ve SiC malzemeleri FTIR spektrumları gözlenerek karakterize edilmiştir. Malzemenin yapısal ve karakteristik grupları belirlenmiş, FTIR spektrumları absorbands türünde kaydedilmiştir. Güçlü absorbands piki siloksan Si-O-Si gruplarından gelmektedir. Diğer geniş pikler OH grubuna ait piklerdir. 3400-3600 cm^{-1} geniş pikler H molekülleri arasındaki etkileşim ile oluşan piklerdir. C=O molekülünden kaynaklı konjuge bağları ifade eden 1600-1800 cm^{-1} pik göstermiştir. Cam yününe meydana gelen 650-750 cm^{-1} arasında oluşan pik CH=CH-(cis) moleküllerinin oluşturduğu piktir.



Şekil 3.30: Amorf Silika FTIR analiz sonucu



Şekil 42 : Cam Yünü FTIR analiz sonucu.



Şekil 3.32 : SiC FTIR analiz sonucu.

3.7.3. Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı (DSC)

DSC sisteminde numune ve referans numunesinin tutulduğu iki ayrı bölme mevcuttur. Her bölme, ısının kontrol edildiği kendi ısıtma elemanına sahiptir. Cihaz ($T=0$) olacak şekilde sistemi kontrol eder. Numunede ısıl bir olay gerçekleştiğinde, numunenin bulunduğu bölmenin ısıtıcı elemanı referansla numunenin aynı sıcaklığa sahip olması için gereken işlemi yerine getirir.

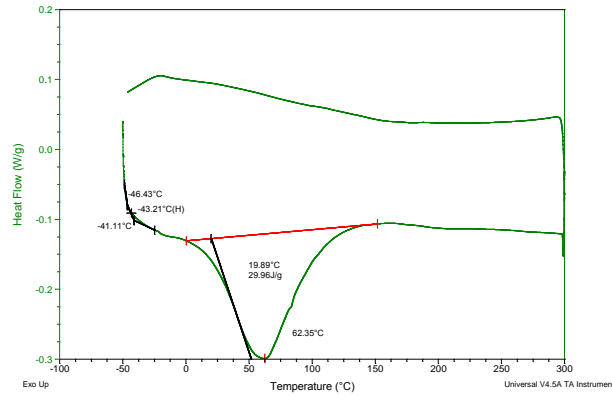
- Eğer endotermik bir reaksiyon meydana geliyorsa, referansla numunenin aynı sıcaklıkta olması için ısıtıcıların gücü artırılır.
- Ekzotermik bir reaksiyon oluşuyorsa, referansla numunenin aynı sıcaklıkta kalması için ısıtıcıların gücü azaltılarak numunede soğuma meydana getirilir.

Güç ayarı, reaksiyon ısısının oluşturduğu ısıyı dengeleyecek ısının taşınımını sağlayacak şekilde yapılır.

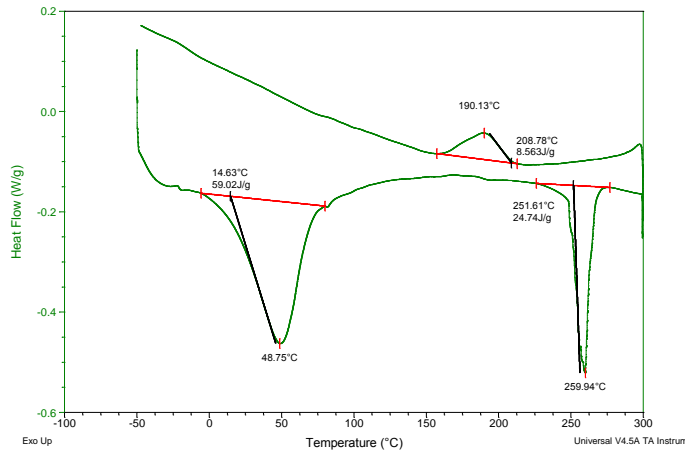
Şekil 3.33, Şekil 3.34 ve Şekil 3.35'te yapılan çalışmalarda VIP'lerde kullanılan elyaf türlerinin DSC grafikleri yer almaktadır. Bu çalışmalarda Şekil 3.33'te kullanılan elyafın polipropilen olduğu Tg ve Tm değerlerine bakılarak anlaşılmıştır. Tg değeri; -43,11, Tm değeri ise; 62,35 'tir. Dolayısıyla bu değerler polipropilen malzemesinin değerleri ile örtüşmektedir.

Şekil 3.34'deki elyafın Tg ve Tm değerleri, 48,75 ve 259,94 'tür. Bu değerlerde PET malzemesi ile uyuşmaktadır. Dolayısıyla kullanılan cam yünü malzemesinin PET olduğu açıkça görülmektedir.

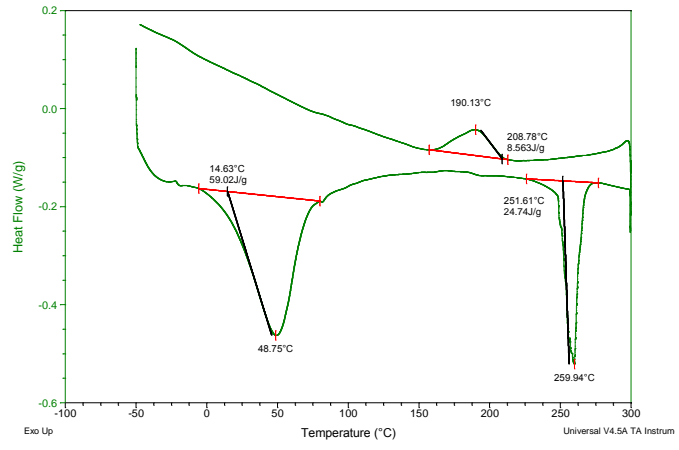
Şekil 3.35'teki elyafın Tg ve Tm değerleri, 46,65 ve 250,47'dir. Bu değerler için olası malzemeler Poliamid malzemeleridir. Bu durumda elyafın kullanılan olası malzemesi PA 6,6 (Tg: 50, Tm: 260), PA 6 (Tg: 40, Tm: 230) ya da PA 6,10 (Tg: 46, Tm: 226) 'dur.



Şekil 3.33 : Polipropilen Elyaf.



Şekil 43 : PET Elyaf.



Şekil 44 : PA Elyaf

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yüksek yalıtım performansında sahip bir iç dolgu malzemesi geliştirilerek, ısı transferinde en önemli parametreler olan iç dolgu malzemesi yoğunluğu ve panel içi basıncının ısı iletim katsayısıyla olan ilişkisi araştırılmıştır. Buna ek olarak, iç dolgu malzemesinin dayanımı amacıyla basma mukavemet testleri yapılmış ve kırık yüzeyler mikroskobik olarak incelenmiştir.

Gözenekli iç dolgu malzemelerinde ısı geçiş mekanizması yoğun ve sürekli malzemelere göre farklıdır. Düşük yoğunluklu gözenekli malzemelerde ısı geçişinin ana parametreleri yoğunluk, panel içi vakum seviyesi, sıcaklık ve iç dolgu malzemesinde kullanılan ana bileşen silika esaslı tozların tanecik boyutlarıdır.

Kritik basınç altında gözenek içinde taşınım ile ısı geçişi sifira yakın bir değer almaktadır. Ancak, panel iç basıncı kritik basınç üzerine çıktığı durumda, taşınım ve birleşim (coupling) etkisi baskın rol oynamakta ve ısı iletim katsayısı hızlıca artmaktadır. S-eğrisi çalışmalarında, geliştirilen iç dolgu malzemesinin kritik basıncı 7 mbar olarak saptanmıştır.

Yoğunluk, iletim ve ışımaya ile ısı geçişinde önemli rol oynamaktadır. Yoğunluk arttıkça iletim artmakta ancak ışımaya ile ısı geçişi azalmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen iç dolgu malzemesinin en düşük ısı iletim katsayısı 170 g/L'de elde edilmiştir ve bu değer 4,3 mW/m.K mertebelerindedir.

Çalışmalarda BET yüzey alanının etkisi de incelenmiş olup, düşük ısı iletim katsayısı eldesi için yüksek BET yüzey alanlı tozlar kullanılması gerekmektedir. Düşük BET yüzey alanlı panellerle ulaşılan en iyi değer 4,5 mW/m.K mertebelerindedir.

Yapılan araştırmaları sonucunda uygun en uygun iç dolgu malzemesi bileşenleri amorf silika, cam yünü ve SiC olarak belirlenmiş ve çalışmalarda bu malzemeler kullanılmıştır. Toz dolgu malzemeleri içinde en düşük gevşek birim hacim ağırlığa (55 g/L), en yüksek BETI yüzey alanına (220 m²/g) ve kompakt matrisin ısı iletim

katsayısı açısından en uygun kimyasal bileşime (SiO₂: 99.9, Al₂O₃: 0.05, Fe₂O₃: 0.03) amorf silika sahiptir.

Basma mukavemet testleri, cam yününün mukavemet artırıcı olarak kullanılabilceğini göstermiştir. Farklı cam yünü oranlarında yapılan testler sonucunda cam yünü takviyesinin basma mukavemetini artırmasının yanında malzemenin tokluğunu da artırdığı gözlemlenmiştir.

Yalnızca cam elyafının vakumlanması ile üretilen panellerde Al film kaynaklı kenar etkisi ve elyaftan kaynaklanan gaz salınımı (outgassing) sebebiyle etkin ısı performans düşüklüğüne ek olarak ömür problemlerine yol açması toz bazlı iç dolgu malzemelerinin tercih edilmesindeki en önemli sebeplerdir.

Bağlayıcısı bir polimer olan cam yününün camsı geçiş sıcaklığı belirlenerek, kurutma sıcaklığı en uygun şekilde seçilmiştir.

FTIR ile geliştirilen iç dolgu malzemesinin karakterizasyonu tamamlanmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında elde edilen bilgi ve bulgular ışığında, vakumlu izolasyon panelleri iç dolgu malzemeleri araştırma ve geliştirme çalışmalarında aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Lif türü, boyu, çapı ve iç dolgu içeriğindeki oranının vakumlu izolasyon performansına olan etkisi araştırılmalıdır.
- Mukavemet artırıcı malzemeler ısı iletim performansını kötü etkilemektedir.
- Sıkıştırma kuvvetlerinin mekanik özelliklere etkisi araştırılmalıdır.
- Etkin ısı iletim katsayısına en doğru şekilde ulaşmak için kenar etkisi çalışmaları yapılmalıdır.
- Işıma ile ısı geçiş mekanizmasını daha iyi anlayabilmek için farklı opaklaştırıcılar kullanılarak elde edilecek iç dolgu malzemelerinin emisivite değerlerinin ölçülmesi ışıma ile ısı geçişi mekanizmasını anlamaya yardımcı olacaktır.
- Isı iletimi parametreleri belirlenerek sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi ileride yapılacak çalışmalar için yol gösterici olacaktır.
- Metalize film çalışmaları yapılarak VIP ömrü üzerine etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] **Lafferty, J.N.**, 1998. Foundations of Vacuum Science and Technology, John Wiley & Sons, Inc., Canada.
- [2] **Roth, A.**, 1990. Vacuum Technology, Elsevier, Amsterdam.
- [3] **Holman, J.P.**, 1989. Heat Transfer, SI Metric Edition, 615 – 617, Mc Graw Hill, Inc., Singapur.
- [4] **Verschoor, J.D., Greebler, P. and Manville, N.J.**, 1952. Heat transfer by gas conduction and radiation in fibrous insulation, Journal of Heat Transfer, 74, 961 – 968.
- [5] **Wakao, N. and Vortmeyer, D.**, 1971. Pressure dependency of effective thermal conductivity of packed beds, Chemical Engineering Science.
- [6] **Fricke, J., Arduini Schuster, M.C., Büttner, D., Ebert, H.P., Heinemann,** 1989. Opaque silica aerogel insulations as substitutes for polyurethane foams, 21st International Thermal Conductivity Conference, Lexington, Kentucky, USA, October 15 – 18.
- [7] **Bock, V., Nilsson, O., Blumm, J. and Fricke, J.**, 1992. Journal of Non-Crystalline Solids, 185, 233 – 239.
- [8] **Bayrakçı H.C.**, Isı ve Sıcaklık, Teknolojinin Bilimsel İlkeleri, ed:DAVRAZ M., Hondu Akademi Yayınları.Isparta , 2009, s. 209-216.
- [9] **Clauser C., Huenges E.**, Thermal conductivity of rocks and minerals in: T.J. Ahrens (Ed.). Rock Physics and Phase Relations, AGU Reference Shelf 3. AGU. Washington DC., 1995, pp. 105–126.
- [10] **Deniz E., Binark A.**, Vakumlu Yalıtım Panelleri, VII. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu UTES“2008, İstanbul, 17-19 Aralık 2008.
- [11] **Heinemann U. R., Caps and Fricke J.**, Characterization and Optimization of Filler Materials for Vacuum Super Insulations, Vuotoscienza e tecnologia, 1999, 28(1-2): 43-46, ISSN 0391-3155.
- [12] **Kistler S.S.**, The Relationship between Heat Conductivity and Structure in Silica Aerogel, Journal of Physical Chemistry 39: 79. 1935.
- [13] **Simmler H., Bruner S.**, Aging and Service Life of VIP in Buildings, 7th International Vacuum Insulation Symposium, (2005).
- [14] **Soysal A.**, Vakumlanmış İzolasyon Panellerinin Isı iletim Katsayılarının Deneysel Olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul / Türkiye, 2000, s. 3-16.

- [15] **Verschoor J.D., P., Greebler H.J., Manville**, Heat Transfer by Gas Conduction and Radiation in Fibrous Insulation, Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, 1952, 74: pp.961-968.
- [16] **Brodth K.**, 1995, Thermal insulations: cfc-alternatives and vacuum insulation, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft, 1995.
- [17] **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
- [18] **Baetens R., Jelle B.P., Thue J.V, Tenpierik M.J., Grynning S., Uvsløkk S.**, 2010, Vacuum Insulation Panels for Building Applications: A Review and Beyond, Energy and Buildings, vol. 42, p. 147-172, 2010
- [19] **Zhang, Z.M.** 2007. Nano/microscale heat transfer. McGraw-Hill
- [20] **Kwon JS, Jang CH, Jung H, Song TH.** Effective thermal conductivity of various filling materials for vacuum insulation panels. Int J Heat Mass Transfer 2009;52:5525–32.
- [21] **Al Homoud MS.** Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation material. Build Environ 2005;40:353–66
- [22] **Swimm K, Reichenauer G, Vidi S, Ebert HP.** Gas pressure dependence of the heat transport in porous solids with pores smaller than 10 μm . Int J Thermophys 2009;30:1329–42.
- [23] **Araki K, Kamoto D, Matsuoka S.** Optimization about multilayer laminated film and getter device materials of vacuum insulation panel for using at high temperature. J Mater Process Technol 2009;209:271–82.
- [24] **Mukhopadhyaya P, Kumaran K, Normadin N and Reen DV.** Fibre–powder composite as core material for vacuum insulation panel. In: 9th international vacuum insulation symposium, London, UK; 2009.
- [25] **Schwab H, Heinemann U, Beck A, Ebert HP, Fricke J.** Prediction of useful life time for vacuum insulation panels with fumed silica kernel and foil cover. J Build Phys 2005;28:357–74
- [26] **Teniers C.**, How laminates with EVALTM EVOH film improve the performance of VIPs. In: 9th international vacuum insulation symposium, London, UK; 2009.
- [27] **Thorsell T, Kallebrink I.** Edge loss minimization in vacuum insulation panels. In: Proceedings of 7th symposium on building physics in the Nordic countries, Reykjavik, Iceland; 2005
- [28] **Taşkın D.**, 2002, Toz Malzeme Bazlı Vakumlu Yalıtım Teknolojisinin Buzdolaplarının Yalıtım Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi
- [29] **Krishna R, Wesselingh JA.** The Maxwell–Stefan approach to mass transfer. Chem Eng Sci 1997;52:861–911.
- [30] **Tenpierik MJ.** Vacuum insulation panels applied in building constructions (VIP ABC). Ph.D. Thesis, Delft University of Technology (Delft, The Netherlands); 2009.

- [31] **Wegger E, Jelle BP, Sveipe A, Graynnig S, Gustavsen A, Baetens R**, et al. Aging effects on thermal properties and service life of vacuum insulation panels. *J Build Phys* 2011.
- [32] **Quenard D and Sallee H**. From VIP's to building facades: three levels of thermal bridges. In: Zimmermann M, editor. Proceedings of the 7th international vacuum insulation symposium, Duebendorf, Switzerland; 2005. p. 113–20.
- [33] **Wakili KG, Bundi R, Binder B**. Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels. *Build Res Inform* 2004;32:293–9.
- [34] **Schwab H, Stark C, Wachtel J, Ebert HP, Fricke J**. Thermal bridges in vacuum insulated building facades. *J Therm Envelope Build Sci* 2005;28:345–55.
- [35] **Tenpierik M, van Der Spoel W, Cauberg H**. Analytical model for predicting thermal bridge effects due to vacuum insulation panel barrier envelope. *Bauphysik* 2008;30:38–45.
- [36] **Tenpierik M, Cauberg H**. Analytical models for calculating thermal bridge effects caused by thin high barrier envelopes around vacuum insulation panels. *J Build Phys* 2007;30:185–215.
- [37] **Nussbaumer T, Wakili KG, Tanner Ch**. Experimental and numerical investigation of the thermal performance of a protected vacuum-insulation system applied to a concrete wall. *Appl Energy* 2006;83:841–55.
- [38] **Tenpierik M, van Der Spoel W, Cauberg H**. An Analytical model for calculating thermal bridge effects in high performance building enclosure. *J Build Phys* 2008;31:361–87.
- [39] **Tenpierik MJ, Cauberg JJM**. Encapsulated vacuum insulation panel: theoretical thermal optimization. *Build Res Inform* 2010;38:660–9
- [40] **Fricke J**. Materials research for the optimization of thermal insulations. *High Temp–High Press* 1993;25:379–90.
- [41] **Kaganer MG**. Thermal insulation in cryogenic engineering, translated by A. Moscona, Israel programme for scientific translation Ltd.; 1969.
- [42] **Porta PD**. Gas problem and gettering in sealed-off vacuum devices. *Vacuum* 1996;47:771–6.
- [43] **Caps R, Beyrichen H, Kraus D**, Quality control of vacuum insulation panels: methods of measuring gas pressure. *Vacuum* 2008;82: 691–9.
- [44] **Caps R, Beyrichen H**. **Monitoring** gas pressure in vacuum insulation panels. In: Zimmermann M, editor. Proceedings of the 7th international vacuum insulation symposium. Switzerland: Duebendorf; 2005. p. 57–66.
- [45] **Altan Dombayci Ö, Gölcü M**, Optimization of insulation thickness for external walls using different energy-sources. *Appl Energy* 2006;83:921–8
- [46] **Malsen JV, Tenpierik MJ, Looman RHJ, Cauberg JJM**. Heat seal strength of barrier film used in vacuum insulation panels at room temperature and at -130°C . *J Plastic Film Sheet* 2008;24:35–52.

- [47] **Éhen, Zs.; Novák, Cs.; Sztatisz, J.; Bene, O.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2004, 78, 427
- [48] **Simmler H., Heinemann U., Kumaran K.,** 2005, Vacuum Insulation Panels - Study on VIP-components and Panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A)
- [49] **Silverstein, Robert M.; Bassler, G. Clayton; Morrill, Terence C.,** Spectrometric Identification of Organic Compounds
- [50] **EN 826,** European standards for thermal insulating products for building applications
- [51] **Demharter M.,** 2011, Heat Transport in Evacuated Perlite Powder Insulations and Its Application in Long-Term Hot Water Storages

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Ozan KOVANCI

Doğum Yeri ve Tarihi: Zonguldak – 09.05.1985

Adres: Siyavuşpaşa Mah. Çamlık Cad. Çam Sok. NO:27 D:3
Bahçelievler/İSTANBUL

E-Posta: kovanci@itu.edu.tr/ozankovanci@gmail.com

Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi