



NANO VE MİKRO TOZ MALZEMELERLE ÜRETİLEN YÜKSEK ISI YALITIM PERFORMANSLI VAKUM YALITIM PANELİ ÇEKİRDEKLERİNİN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Ali Ekrem AKDAĞ^{1*}, Metin DAVRAZ², Kamil DELİKANLI³

¹ Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Isparta, Türkiye

² Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

³ Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

Anahtar Kelimeler

*Vakum Yalıtım Panelleri,
Fiziksel ve Mekanik Özellik,
Isı Yalıtımı,
Çekirdek.*

Öz

Vakum Yalıtım Panelleri (VYP), ısı kayıplarının azaltılmasında kullanılan ve geleneksel yalıtım malzemelerine kıyasla çok daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip yeni nesil yalıtım malzemeleridir. Isı iletkenlik katsayıları $\sim 3-7 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ aralığında ve kalınlıkları geleneksel yalıtım malzemelerine göre 5-10 kat daha ince olabilmektedir. VYP'lerin, çekirdek malzemesi geçirimsiz bir bariyer içerisinde vakumlanır. Vakum sonrası panel üzerine uygulanan atmosfer basıncı $\sim 10 \text{ ton/m}^2$ seviyesindedir. Dolayısıyla çekirdeğin fiziksel ve mekanik özellikleri, boyutsal kararlılık açısından çok önemlidir. Yeterli mekanik özelliklere sahip olmayan çekirdekler vakumlandıktan sonra çöker ve rijit bir panel elde edilemez. Bu çalışmada, fumed silika (FS) ve alternatif tozların karışımı ile üretilen çekirdeklerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, çekirdek üretiminde beş farklı özgül yüzey alanına (ÖYA) sahip nano ve mikro boyutta tozlar kullanılmıştır. Ayrıca karışıma %5, %10 ve %15 oranlarında cam elyafı (fiber) eklenmiştir. Karışım oranları belirlendikten sonra 20-50 kN aralığında sıkıştırma kuvvetleri uygulanarak farklı fiziksel ve mekanik özellikte 45 çekirdek panel üretilmiştir. Çekirdeklerin fiziksel ve mekanik özellikleri DIN EN 1602, DIN EN 826, DIN EN 1607 standartlarına göre test edilmiştir. Elde edilen bulgular değerlendirildiğinde, çekirdek tasarımında $\leq 10\%$ fiber ilavesi ve yüksek ÖYA'na sahip tozların çekirdek boyutsal kararlılığını ve elastisite modülünü arttırdığı tespit edilmiştir. Sonuç olarak DIN EN standartlarına göre en uygun mekanik özellikleri CP-1-4 çekirdeği sağlamıştır.

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF VACUUM INSULATION PANEL CORES WITH HIGH THERMAL INSULATION PERFORMANCE PRODUCED WITH NANO AND MICRO POWDER MATERIALS

Keywords

*Vacuum Insulation Panels,
Physical and Mechanical
Properties,
Thermal insulation,
Core.*

Abstract

Vacuum Insulation Panels (VIPs) are next-generation insulation materials used to reduce heat loss, characterized by significantly lower conductivity compared to traditional insulation materials. The thermal conductivity of Vacuum Insulation Panels (VIPs) typically ranges between $3-7 \text{ mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$, and their thickness can be 5-10 times thinner compared to traditional insulation materials. The core material of the VIPs is vacuumed inside an impermeable barrier. After vacuuming, the atmospheric pressure applied to the panel is approximately 10 tons/m². Therefore, the physical and mechanical properties of the core material are crucial in terms of dimensional stability. Core materials that lack sufficient mechanical properties collapse after vacuuming; thus, it is not possible to achieve a rigid panel. This study aimed to determine the mechanical and physical properties of cores produced by mixing fumed silica (FS) with alternative powders. Five specific surface areas (SSA) nano and micro-sized powders were utilized in core production to achieve this purpose. Additionally, glass fiber was added to the mixture at 5%, 10%,

* İlgili yazar / Corresponding author: aliakdag@isparta.edu.tr, +90- 246-214-6926

and 15% ratios. After determining the mixture ratios, 45 core panels with varying physical and mechanical properties were produced by applying compression forces in the 20-50 kN range. The physical and mechanical properties of the cores were tested according to DIN EN 1602, DIN EN 826, and DIN EN 1607 standards. Upon evaluating the obtained findings, it was determined that adding $\leq 10\%$ fiber in core design and using powders with high specific surface area (SSA) increased core dimensional stability and elastic modulus. Consequently, according to DIN EN standards, the CP-1-4 core exhibited the most suitable mechanical properties.

Alıntı / Cite

Akdağ, A.E., Davraz, M., Delikanlı, K., (2023). Nano ve Mikro Toz Malzemelerle Üretilen Yüksek Isı Yalıtım Performanslı Vakum Yalıtım Paneli Çekirdeklerinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 11(4), 1424-1438.

Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

A. E. Akdağ, 0000-0002-3699-9376

M. Davraz, 0000-0002-6069-7802

K. Delikanlı, 0000-0001-5074-7872

Makale Süreci / Article Process

Başvuru Tarihi / Submission Date 21.01.2023

Revizyon Tarihi / Revision Date 11.08.2023

Kabul Tarihi / Accepted Date 18.09.2023

Yayın Tarihi / Published Date 30.12.2023

PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF VACUUM INSULATION PANEL CORES WITH HIGH THERMAL INSULATION PERFORMANCE PRODUCED WITH NANO AND MICRO POWDER MATERIALS

Ali Emre Akdağ^{1†}, Metin Davraz², Kamil Delikanlı³

¹ Isparta University of Applied Sciences, Vocational School of Technical Sciences, Department of Medical Services and Techniques, Isparta, Türkiye

² Isparta University of Applied Sciences, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, Isparta, Türkiye

³ Süleyman Demirel University, Faculty of Engineering, Department of Mechanical Engineering, Isparta, Türkiye

Highlights

- A comprehensive investigation of the mechanical and physical properties of vacuum insulation panel cores produced with a mixture of fumed silica and alternative powders.
- Testing the physical and mechanical properties of VYP cores according to DIN EN 1602, DIN EN 826, and DIN EN 1607 standards.
- The usability of cryogenic perlite as an alternative core powder material in vacuum insulation panels.

Purpose and Scope

The physical and mechanical properties of vacuum insulation panel cores are very important for dimensional stability. Cores that lack sufficient mechanical properties tend to collapse after vacuum, resulting in the formation of a non-rigid panel. This study aims to determine the mechanical and physical properties of core panels produced with a mixture of fumed silica and alternative powders.

Design/methodology/approach

In the production of vacuum insulation panel cores, five different types of nano and micro structured powders with different specific surface areas and open-cell porous structures were used. A total of 45 core panels were manufactured. To ensure sufficient mechanical properties of VYP cores, fibers were added to the core material composition in specific proportions. The core powder mixtures were compressed under different compression forces depending on the type of mixture, and transformed into panel form. The physical and mechanical properties of the cores were tested according to the relevant standards.

Findings

The inclusion of fibers in the mix design of core panels is important in ensuring dimensional stability. The inclusion of fibers in excess of 10% in the core panel composition generally results in lower values for compressive strength and modulus of elasticity. In addition, the addition of more than 15% fiber causes swelling and deformation of the core material. The use of powders with a high specific surface area combined with less than 10% fiber content in the core panel composition increases the dimensional stability of the panels.

[†] Corresponding author: aliakdag@isparta.edu.tr, +90- 246-214-6926

Practical implications

The mechanical properties of core panels produced with a mixture of cryogenic perlite and fumed silica powders are relatively low; however, these panels maintain their dimensional stability without collapsing under vacuum conditions. This finding suggests that cryogenic perlite can be used as an alternative core powder material for vacuum insulation panels. Depending on the utilization rate, incorporating cryogenic perlite into VIPs can reduce the material cost by approximately 20-40%. Thus, VIPs can be produced more cost-effectively and find wider applications.

Originality

There is limited research available on the mechanical properties of vacuum insulation panels. In this study, the mechanical performance of core panels produced with different specific surface area powders was determined. Additionally, the utilization of cryogenic perlite as an alternative core material for VIPs was proposed, emphasizing its cost-effectiveness.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde enerji kaynaklarının giderek azalması ve enerji talebinin giderek artması nedeniyle kaynakları daha verimli kullanmak enerji tasarrufu için çok önemlidir. Binalardan sağlanacak enerji tasarrufu azımsanamayacak ölçüdedir. Binalardaki enerji kullanımını azaltmak için yalıtım malzemelerinin uygulanması kaçınılmazdır. Binaların enerji verimliliği büyük ölçüde yalıtım malzemelerinin performansına bağlıdır. Sürekli sıkılaştırılan yönetmeliklerde şartları yerine getirmek için binalarda daha kalın yalıtımlar kullanılmalıdır (Örneğin, Macaristan'da 20–25 cm'ye kadar, İskandinav ülkelerinde yaklaşık 40–50 cm). Son yıllarda, yalıtım malzemelerini geliştirme araştırmaları malzemelerin hem kalınlığını hem de ısı iletkenliğini azaltmaya odaklanmıştır (Lakatos ve Kovács, 2021). ISO ve CEN standartlarına göre bir malzemenin ısı iletkenlik katsayısı (λ) 0.065 W/m.K değerinden küçük olan malzemeler yalıtım malzemesi olarak değerlendirilmektedir. Yalıtım malzemesinin λ değeri ne kadar küçük ise ısı geçişine karşı gösterdiği direnç o oranda daha yüksektir (Bayraktar ve Bayraktar, 2016). Binalarda etkin ısı yalıtımı sağlamak için geleneksel ısı yalıtım malzemelerinin yanı sıra, ısı iletim katsayıları daha düşük yeni nesil ısı yalıtım malzemeleri geliştirilmeye başlanmıştır. Yeni nesil ısı yalıtım malzemesi olarak VYP'ler ön plana çıkmaktadır. VYP'ler, yalıtım sistemlerinin enerji verimliliğini artıran ve enerji tüketiminde tasarruf sağlayan mükemmel ısı direnç özellikleri olan yalıtım malzemeleridir (Mukhopadhyaya vd., 2008; Fricke vd., 2008). Örneğin bazı binalarda geleneksel yalıtım malzemelerine göre 5 kat daha yüksek yalıtım değerlerine ulaşılmıştır (Fantucci vd., 2019; Schwab vd., 2015; Annex 39, 2005). VYP'nin üstün ısı performansına rağmen, VYP'lerin maliyeti inşaat sektöründe geniş çapta uygulamayı engelleyen en büyük dezavantajdır (Mukhopadhyaya vd. 2005; Simmler vd. 2005). VYP'ler açık gözenekli çekirdek malzemelerin geçirimsiz bir gaz bariyeri içerisine alınarak, gaz basıncının azaltılmasıyla oluşturulan panellerdir. VYP'ler üç ana bileşene sahiptir. İlk olarak çekirdek malzeme, gaz/hava moleküllerinin serbest akışını önleyerek ve hava iletimi yoluyla ısı transferi kabiliyetini azaltarak, mekanik mukavemet ve ısı yalıtım kapasitesi kazandırır. İkinci olarak gaz bariyeri, çekirdek malzemeye hava ve buhar geçirmemesi için muhafaza sağlar. Son olarak alıcı/kurutucu, VYP içerisinde kalan veya nüfuz eden atmosferik gazları veya su buharını absorbe etmek için çekirdek malzemeye eklenir (Mukhopadhyaya vd., 2008; Kwon vd., 2010; Davraz vd., 2014; Resalati vd., 2021). VYP'lerin ısı yalıtım özelliği ve hizmet ömrü, çekirdek malzemesine, gaz bariyeri zarfına, adsorbana, vakum teknolojisine, geometrik boyuta, sıcaklığa ve bağli neme bağlıdır (Di vd., 2014). VYP'lerin yalıtım performansını iyileştirmek için farklı çekirdek malzeme üretimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Çekirdek malzemesi, FS bazlı bir VYP toplam maliyetinin ≥ 40 'ını oluşturur. Mevcut FS fiyatının yaklaşık onda biri olan genişletilmiş perlitler, potansiyel çekirdek malzeme olarak kullanılabilir. Cam elyafları ve silika tozları (fumed silika, silika aerojel vb.) gibi cam bazlı malzemeler ~ 99 Silisyum dioksit (SiO_2) içerirken, perlitin ~ 85 SiO_2 'dir (kalan Na_2O , Al_2O_3 vb. metalik oksitlerdir). Kafes yapılarından dolayı fumed silika, cam elyafları, silika arojelleri gibi amorf silika bazlı malzemeler VYP çekirdek malzemesi olarak tercih edilmektedir. Tozlar ve lifler gibi malzemelerdeki iletimle ısı transferi, komşu parçacıklar arasındaki temas noktası aracılığıyla gerçekleşir. Çekirdek üretimi sırasında, sıkıştırma kuvvetleri ya tanecikleri deforme ederek aralarındaki temas alanını artırır ya da taneciklerin yeniden paketlenip birbirine yaklaşmasına neden olur. Sonuç olarak bir tanecikten diğerine aktarılan ısı artar. Elastisite modülü (E) ve Poisson oranı (ν) gibi parçacıkların mekanik özellikleri katı iletimini etkiler (Verma ve Singh, 2022).

Zach vd. (2019), doğal veya atık polimerik liflere dayalı geleneksel olmayan çekirdek malzemeleri kullanarak vakum yalıtım malzemeleri geliştirmişlerdir. Düşük maliyetli VYP üretimi için çekirdek malzemesi olarak polyester elyafların uygun bir malzeme olduğunu tespit etmişlerdir. Alam vd. (2014) daha ucuz VYP çekirdeği için alternatif bir kompozit çekirdek malzeme geliştirmişlerdir. Kompozitte farklı oranlarda genişletilmiş perlit (EP), fumed silika, silisyum karbür ve polyester elyaftan oluşan 100 mm×100 mm ebadında VYP levha numuneleri hazırlamışlardır. Kütle oranı %60 EP içeren çekirdek levhanın panel merkezi ısı iletkenliği atmosfer basıncında 53 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve EP içeriği %30'a düşürüldüğünde 28 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüşlerdir. Silisyum karbür (SiC) ve polyester liflerle birlikte %30 EP ve %50 FS içeren çekirdek levhaların 0.5 Pa'da 7.6 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'lik bir panel

merkezi ısı iletkenliği elde etmişlerdir. VYP çekirdeğinde EP kullanılarak çekirdek maliyetini %20 düşürülebileceğini hesaplamışlardır. Mao vd. (2020), VYP'lerin performansını değerlendirmek için mikro fiber çekirdek malzemesinin ısı iletkenliği, gazların ısı iletkenliği ve termal radyasyon üzerine çalışma yapmışlardır. Mikro fiber çekirdek malzemenin düşük ortalama çapı ve düşük iç basınç ile ısı iletkenlik azaltmıştır. Mikro gözenekli ortamda, iç basıncın 0.01 Pa'dan 10 Pa'a artmasıyla ısı iletkenlik 2.61 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'den 24.26 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'e belirgin bir şekilde yükselmiştir. Bu nedenle, VYP'lerin ısı iletkenliği için daha düşük kritik basınç hayati önem taşımaktadır. Düşük ısı iletkenliği korumak için mikro fiber malzemenin basıncı 10 Pa'ın altına düşürülmelidir. Zhuang vd. (2017), çalışmalarında FS içeren VYP'lerin çekirdeği için alternatif, daha düşük maliyetli "genleştirilmiş mantar (EC)/(FS)" kompozit malzeme geliştirmişlerdir. Sonuç olarak oluşan gözenekli mikro yapı sayesinde hibrit malzemeler, VYP'lerin çekirdek malzemesi olarak iyi bir ısı yalıtım performansı göstermiştir. Genleştirilmiş mantar içeren çekirdek levhanın panel merkezi ısı iletkenliği atmosfer basıncında 45.5 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ve FS içeriği %50'ye çıkarıldığında 28.7 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. %50EC-%50FS ısı iletkenliği 1 mbar'da 6.3 $\text{mWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Dong vd. (2022), bambu elyafından (BF) ve takviye olarak cam elyafından (GF) yapılan verimli ve uygun maliyetli çok katlı kompozit çekirdek malzeme üretmişlerdir. Hem bambu hem de cam elyafı çekirdek malzemede eşit şekilde dağılarak üç boyutlu (3D) bir ağ yapısı elde etmişlerdir. Cam elyafın dâhil edilmesi, çekirdek malzemenin yapısını önemli ölçüde değiştirmiştir. Tamamen bambu elyafından yapılan VYP, 12.62 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ lik nispeten yüksek ısı iletkenliğe sahiptir. Kompozit çekirdek malzemesi ile üretilen VYP ısı iletkenliği 4.81 $\text{mWm}^{-2}\text{K}^{-1}$ 'e düşürülebileceğini söylemişlerdir. Liv vd. (2016) çalışmalarında, VYP çekirdeği olarak çeşitli elyaf/toz hibrit çekirdek malzemeleri (HCM'ler) üretmişlerdir. FS, içi boş mikro cam küre (HGM), kıyılmış polyester lifleri, titanyum dioksit ve karbon siyahı tozlarının karışımlarından yeni HCM'leri kuru toz karıştırma yöntemiyle üretmişlerdir. FS matrisine HGM'ler eklenerek VYP'lerin hem sıkıştırma hem de kabarma oranını büyük ölçüde azaltmışlardır. Sonuç olarak, VYP'lerin toplam ısı iletkenliğinin HGM eklenmesiyle arttığını ancak HGM içeriği kütlece %26'dan az olduğunda 7.2 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 'den düşük bir değerde belirlemişlerdir. Soğutmada VYP'ler için kütlece %6 HGM'li HCM'ler tavsiye edilirken, inşaat sektörlerindeki VYP'ler için kütlece %26 HGM'li HCM'leri önermişlerdir. Davraz vd. (2019) 2 adet opaklaştırıcısız çekirdek malzemeyi 4 farklı fiber oranında ve 3 farklı sıkıştırma kuvveti uygulayarak üretmişlerdir. Üretilen çekirdek numunelerinin elastisite modülü, çekme gerilmesi, basma dayanımı gibi mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Ayrıca çekirdek numunelerin porozite ve birim hacim kütle (BHK) gibi fiziksel özelliklerini de belirlemişlerdir. Çekirdek içerisinde fiber içeriğinin artırılması genel olarak %10 deformasyonda basma dayanımını azaltmış ve çekme gerilmeleri açısından en uygun fiber oranını %15 olarak tespit etmişlerdir. Kan vd. (2023), çalışmalarında geri dönüştürülmüş ve ekonomik pamuk lifi çekirdekli yeni bir VIP türü hazırlamışlardır. Ayrıca VIP'lerin bariyer ve ısı iletkenliğini deneysel ve matematiksel olarak incelemişlerdir. VIP'lerin adyabatik özelliklerini araştırmak için üç tip lamine film (AF, MF-I, MF-II) hazırlamışlardır. Sonuç olarak, VIP'ler için bariyer katmanlı AF'nin ısı iletkenliği MF-I, MF-II'den daha iyi performans göstermiştir. AF bariyer zarfları kullanılarak hazırlanan VIP'lerin etkin ısı iletkenliği yaklaşık 3.17 $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ olarak ölçülmüş ve pamuk lifi çekirdek malzemeli VIP'lerin iyi bir ısı özelliğe sahip olduğunu belirtmişlerdir. Zhao vd. (2022), odun hamuru lifi ve cam elyafının temel özelliklerini incelemiş ve cam elyafı kompozit çekirdek malzemelerin yapısal özelliklerini ve ısı yalıtım performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçta, cam elyaf içeriğinin artırılması ve çekirdek malzemelerdeki yapısal değişiklikler nedeniyle VIP'lerin ısı iletkenliğinin kademeli olarak azaldığını belirlemişlerdir. %100 odun hamuru lifi ve odun hamuru/cam lifi kompozitleri (ağırlıkça %50) içeren VIP'ler için sırasıyla 6.48 ve 4.69 $\text{mW/m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ısı iletkenliği değerlerini elde etmişlerdir. Ayrıca, 365 günlük depolamadan sonra, %50 cam elyaf içeren kompozit çekirdek malzeme, herhangi bir alıcı veya kurutucu olmadan 7.42 $\text{mW/m}^{-1}\text{K}^{-1}$ ısı iletkenliği değerini korumuştur. Aldykiewicz vd. (2022), çalışmalarında, farklı ortam koşullarına maruz kalan polimer (etilen vinil alkol) ve metalize (alüminize) bariyer filmlere sahip fumed silika çekirdeklerden oluşan VYP'lerin uzun vadeli davranışlarını araştırmışlardır. Isı iletkenlikteki artışın, polimer bariyer filmler kullanılarak yapılan VYP'i, metalize bir filmle korunan aynı VYP'e kıyasla daha belirgin olduğunu göstermektedir. Artış, %80 gibi yüksek bağıl neme maruz kaldığında daha belirgindir. Yaklaşık iki yıl maruz kaldıktan sonra, metalize bariyer filmlerle korunan VYP'leri için ısı iletkenliğindeki düşüş, maruz kalma koşuluna bağlı olarak yüzde 4 ila 11 arasındadır. En küçük düşüş ortam koşullarında, en büyük düşüş ise %80 bağıl neme maruz kalma durumunda gerçekleşmiştir. Benzer davranış polimer filmler kullanılarak korunan paneller için de gözlemlenmiştir, ancak ısı iletkenlikteki düşüş metalize filmlerle korunan panellerle aynı sırada, yaklaşık %20 ila %60 arasında, önemli ölçüde daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Verma vd. (2023), perlit çekirdekli VIP'ler ve fumed silika içeren VIP'ler üzerinde opaklaştırıcıların etkisini incelemişlerdir. Ayrıca, bu opaklaştırıcıların VIP'lerin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliği üzerindeki etkisini de araştırmışlardır. Perlitteki opaklaştırıcıların, ≥ 70 °C'ye maruz kalan yalıtım için genel ısı iletkenliğini azalttığını ancak ≤ 20 °C için bunun geçerli olmadığını göstermişlerdir. Düşük yoğunluklu genişletilmiş perlit ve 3 farklı oranda 4 opaklaştırıcı, (karbon siyahı, grafit, SiC I, SiC II) kullanarak çeşitli VIP'ler üretmişlerdir. Bu VIP'ler çeşitli sızdırmazlık basıncında ve 10 °C, 20 °C, 40 °C ve 70 °C olmak üzere dört farklı ortalama sıcaklıkta test edilmiştir. Opaklaştırıcı olarak farklı oranlarda karbon siyahı içeren fumed silika çekirdekli VIP'ler ile karşılaştırılmıştır. Bu araştırmada test edilen opaklaştırıcılar arasında, ortalama partikül boyutu 20 μm olan SiC I'in en iyi opaklaştırıcı olduğunu ve kompozitlerinden birinin perlit çekirdekli VIP'lere kıyasla 70 °C'de %50 daha düşük ısı iletkenliğine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Latsuzbaya vd. (2022), ticari uçaklardaki kabin içindeki

yolcuları termal ve akustik yüklerden korumak için geleneksel yalıtım yöntemlerine alternatif olarak, VIP'leri, geleneksel yalıtımlı iç panellere entegrasyonu üzerine çalışmışlardır. Daha sonra, yeni yapıların ısı özelliklerini belirlemişlerdir. Yapılan testlerde yeni panellerin ısı iletkenliğinin geleneksel çözümlere kıyasla 3-6 kat daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca, VIP içindeki vakumun korunması üzerine de deneyler yapılmıştır. Yapılan deneyler, yüksek bariyerli filmlerin yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına dayanabileceğini ve test numunelerinin ısı iletkenliğinin 1 yıl sonra bile kötüleşmediğini ortaya koymuşlardır. Katsura vd. (2023), VIP'lerin hizmet ömrünü artırmak için çift zarf uygulamasının etkisini araştırmışlardır. Gaz bariyeri zarflarının deneysel olarak gaz geçirgenlikleri tahmin edilmiştir. Ayrıca, çift zarflı VIP'lerdeki basınç yaşlanması hesaplanmıştır. 25 yıl sonra iç basınç değeri alüminyum kompozit film zarf için 1.6 Pa ve şeffaf gaz bariyeri film zarf için 59.3 Pa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, uzun vadeli yalıtım performansının geliştirilebileceğini göstermiştir. Yazarlar daha sonra çift zarflı VIP'lerin 80°C'de bir odaya yerleştirildiği ve ayda bir kez çıkarılarak ısı iletkenliklerinin ölçüldüğü hızlandırma testini gerçekleştirmişlerdir. 136 hafta sonra bile, bir örnek ısı dirençte yalnızca %9.1'lik bir düşüş gözlenmiştir. İçinde alıcı madde ve dışında kurutucu madde bulunan çift zarflı VIP'lerin uzun vadeli yalıtım performansını büyük ölçüde iyileştirebilmektedir.

Bu çalışmada, FS ile üretilen VYP çekirdeklerinin ve ekonomik açıdan alternatif olabilecek farklı tozların karışımı ile üretilen çekirdeklerin mekanik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen tüm panellerin BHK'si, basma dayanımı ve çekme gerilmesi testleri sırasıyla DIN EN 1602, DIN EN 826, DIN EN 1607 standartlarına göre belirlenmiştir. VYP'lerin yeterli mekanik özellikleri sağlaması için çekirdek malzeme tasarımına belirli oranlarda fiber eklenmiş ve optimum fiber oranı ile optimum SiC oranı belirlenmiştir.

2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

2.1. VYP Çekirdek Panelinde Kullanılan Malzemeler (Materials Used in VIP Core Panel)

Çalışmada VYP çekirdeği üretiminde açık hücreli ve gözenekli yapıdaki farklı ÖYA'na sahip beş farklı tipte nano ve mikro yapıda tozlar kullanılmıştır. Toplamda 5 grup (CP-1, CP-2, CP-3, CP-4, CP-5) içeren 45 çekirdek panel üretilmiştir. CP-1 çekirdek tasarımında FS (EH5), CP-2 tasarımında FS (H5) ve CP-3 tasarımında FS(M5) içeren tozlar kullanılmıştır. CP-4 ve CP-5 çekirdek panel tasarımında da sırasıyla çökeltmiş silika (PS) ve kriyojenik perlit (KPL) eşit oranda FS (M5) tozu ile karıştırılarak üretilmiştir. VYP çekirdeklerinin yeterli mekanik özellikleri sağlaması için çekirdek malzeme bileşimine belirli oranlarda fiber eklenmiştir. Ayrıca ışınlama ısı transferinin azaltılması için bazı çekirdeklerin bileşimine farklı oranlarda SiC de ilave edilmiştir. Çekirdek toz karışımları karışım türüne bağlı olarak farklı sıkıştırma kuvvetleri (F) ile sıkıştırılarak Şekil 1'de gösterildiği gibi panel haline getirilmiştir.



Şekil 1. VYP Çekirdek paneli (VIP Core panel)

Panel haline getirilen çekirdekler birim kütlesi $\sim 35 \text{ g/m}^2$ olan tela malzemesi ile kaplanmıştır. Tela ile kaplanan çekirdekler sızdırmaz metalize bir bariyer içerisinde yüksek vakum altında ($<1 \text{ Pa}$) vakumlanmıştır. Bariyer malzemesi, 7 katmanlı (PET-AL-PE) metalize film den oluşmaktadır ve $90 \mu\text{m}$ kalınlığındadır. Bariyer malzeme aynı zamanda geçirimsiz özelliktedir. Bariyer vakumu muhafaza eden ve çekirdek malzemenin atmosferik gazlara ve neme karşı korunmasını sağlayan en önemli kısımdır.

2.2. VYP Üretiminde Kullanılan Cihaz ve Ekipmanlar (Devices and Equipment Used in VIP Production)

Çekirdek toz karışımlarının homojen olabilmesi için özel olarak tasarlanmış 50 lt'lik hacme sahip 6000 dev/dk hızına ulaşabilen mikser kullanılmıştır. Homojen toz karışımları 18 dm^3 malzeme kapasitesine sahip pres makinesinde farklı sıkıştırma kuvvetleri uygulanarak panel haline getirilmiştir. Uygulanan kuvvetin hassasiyeti 10N'dur. Çekirdek panel kalınlığı hassasiyeti ise $\pm 1 \text{ mm}$ 'dir. Pres ünitesinde panel haline getirilen çekirdekler $250 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa kadar ulaşabilen 500 lt kapasiteli hava dolaşımli etüvde değişmez ağırlığa kadar kurutulmuştur. Kurutulan çekirdek paneller tela malzemesiyle kaplanmıştır. Tela ile kaplanan çekirdek paneller geçirimsiz bariyer içerisinde $<0,1 \text{ Pa}$ seviyesinde vakumlanarak ağız kısmı atmosfere kapatılmıştır. Vakumlama prosesinde iki adet vakum pompası kullanılmıştır. Birinci kademedede $6 \times 10^{-2} \text{ Pa}$ emiş gücünde $30 \text{ m}^3/\text{h}$ kapasitesinde rotary pompa, ikinci kademedede turbo moleküler pompa bulunmaktadır. Çekirdek panel üretiminde kullanılan cihazlar

Şekil 2’de gösterilmiştir. Vakumlama sürecinde vakum haznesinin sızdırmaz olması, yapıştırma sıcaklığı ve süresi gibi parametreler oldukça önemlidir.



Şekil 2. VYP çekirdek panel üretiminde kullanılan turbo mikser, pres, etüv ve vakum sistemi (Turbo mixer, press, oven and vacuum system used in VIP core panel production)

Toz dolgu maddelerinin ÖYA ölçümleri Micromeritics Gemini V2.01 cihazı ile BET yöntemine göre belirlenmiştir. Çekirdeklerin, gerçek özkütle değerleri Micromeritics Accu Pyc II 1340 piknometresi ile 3 kez ölçülerek ortalamaları hesaplanmıştır. Çekirdek panellerin kütleleri 1/1000g hassasiyetine sahip elektronik terazi ile belirlenmiştir.

2.3. VYP Üretiminde Geçerli Standart ve Normlar (Standards and Norms in VIP Production)

VYP üretimi için gereken fiziksel ve mekanik özellikler ile ilgili geçerli standart ve normlar Haziran 2010’ dan itibaren geçerli olmak üzere Alman Bina Teknolojisi Enstitüsü ve Avrupa Birliği Teknik Komitesi tarafından onaylanmıştır. Geçerli standart ve normlar Tablo 1’de gösterilmiştir.

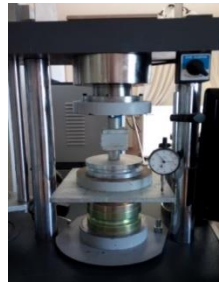
Tablo 1. VYP’ lerinin sağlaması gereken mekanik ve fiziksel özellikleri (Mechanical and physical properties desired in VIPs) (Bayrakçı vd., 2011; Davraz vd., 2013)

Değerlendirme Kriteri	Sınır Değer	Standart	Açıklama
Basma dayanımı ($\sigma_{%10}$) (kPa)	≥ 150	(DIN EN 826)	%10 Sıkışmada
Çekme gerilmesi, σ_t (kPa)	40	(DIN EN 1607)	Panelin boyu yönünde
Birim Hacim Kütle (kg/m^3)	≤ 210	(DIN EN 1602)	-
Deformasyon (kalınlık)	%2	(DIN EN 1605)	40 kPa ve 70 °C

VYP’lerinde basma dayanımı DIN EN 826 standardına göre belirlenir. Çekirdek paneller DIN EN 826’ya göre 23 ± 2 °C ve 50 ± 5 bağıl nem koşullarında bekletilmiştir. Çekirdek panellere test presinde 250 ± 10 Pa’lık ön yükleme uygulanmıştır. Sonrasında 0.1mm hassasiyetle çekirdek paneller sıkıştırılmıştır. %10 sıkıştırma değerinde test sonlandırılmıştır. Ortalama basma dayanımı ≥ 150 kPa değerini sağlayan çekirdek panel grupları standartta belirtilen basma dayanımı kriterini (BDK) sağlamıştır. Test bulgularına göre bir çekirdek panel için kuvvet (F) ve yer değiştirme (X) eğrileri çizilmiştir. Basma dayanımları Eşitlik 1 yardımıyla hesaplanmıştır. Standartta uygun olarak düzenlenmiş test cihazı Şekil 3’de gösterilmiştir.

$$\sigma_m = 10^3 \frac{F_m}{A_0} \quad (1)$$

F_m : Maksimum kuvvet (N),
 A_0 : Kesit alanı (mm^2).



Şekil 3. Basma dayanımı test presi (Compressive strength test press)

VYP’lerinin BHK kütlelerini belirlemek için DIN EN 1602 standardı kullanılmaktadır. Standartta göre, çekirdek paneller etüvde değişmez kütleye kadar kurutulmuş ve boyutları elektronik kumpas ile ölçülmüştür. Hassas olarak

ölçülen panellerin hacimleri hesaplanmıştır. Daha sonra çekirdek panellerin kütleleri elektronik terazide tartılarak BHK'leri Eşitlik 2'den hesaplanmıştır.

$$D = W_N / V_N \quad (2)$$

W_N : Panel kütlesi, g

V_N : Panel hacmi, cm^3

D: Panel birim hacim kütlesi, g/cm^3 , kg/m^3 'dür.

VYP'lerinde deformasyon oranı (ε_m) yüzde olarak Eşitlik 3 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_m = \frac{X_m}{h_0} 100 \quad (3)$$

X_m : Şekil değiştirme (mm),

h_0 : Başlangıçtaki panel kalınlığı (mm).

VYP'de çekme gerilmesi testleri DIN EN 1607 standardına göre belirlenir. Çekme gerilmesi için 45 çekirdek panelden $h*50*50\text{mm}$ boyutlarında 5'er numune hazırlanmıştır. Her bir çekirdek panelin çekme gerilmesi için bu 5 numunenin çekme gerilmesi sonucunun ortalaması alınmıştır. Burada h çekirdek panelin kalınlığıdır. Çekirdek panellere 10 N/s hızında çekme kuvveti uygulanmıştır. Maksimum çekme kuvveti yüzey alanına bölünerek çekme gerilmeleri hesaplanmıştır. Çekme test cihazı ve çekirdek numunelerinin cihazına bağlanması Şekil 4'de gösterilmiştir.

Standartta belirtilen çekme gerilmesi >40 kPa şartını sağlayan numuneler çekme gerilmesi kriterini (ÇGK) sağlamıştır. Çekme gerilmeleri kPa cinsinden Eşitlik 4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_m = 10^3 \frac{F_m}{A} = 10^3 \frac{F_m}{lxb} \quad (4)$$

F_m : Maksimum çekme kuvveti (N),

A: Panelin kesit alanı (mm^2),

l, b: Panelin uzunluğu ve genişliğidir (mm).



Şekil 4. Çekme test cihazı (Tensile test device)

Elastisite modülü (E), malzemeye ait karakteristik bir özelliktir. Malzemenin dayanımının (mukavemetinin) ölçüsüdür. Birim uzama ile normal gerilme (çekme gerilmesi ya da basma dayanımı) arasındaki doğrusal ilişkinin bir sonucu olup birim uzama başına gerilme olarak tanımlanır ve Eşitlik 5'den hesaplanmıştır.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_b} \quad (5)$$

σ : Normal gerilme,

ε_b : Birim şekil değişimi.

Birim şekil değiştirme (ε_b), malzemeye kuvvet uygulandığında oluşan boy değişiminin, ilk boya oranıdır ve Eşitlik 6'dan hesaplanmıştır.

$$\varepsilon_b = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (6)$$

ΔL : Uzama miktarı,

L_0 : Başlangıç uzunluğu.

Çalışmada VYP çekirdeği üretiminde açık hücreli ve gözenekli yapıdaki farklı ÖYA'na sahip beş farklı tipte nano ve mikro yapıda tozlar kullanılmıştır. Toplamda 45 çekirdek panel üretilmiştir. Çekirdek paneller ÖYA'na göre CP-

1'den CP-5'e kadar gruplandırılmış ve her grupta 9 farklı çekirdek panel üretilmiştir. Çekirdek panel üretimi için kullanılan tozlar, karışım oranları ve tozların ~ÖYA'ları Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çekirdek karışımı toz türleri, oranları ve ÖYA'ları (Powder types, ratios and SSA's used in the core mix)

No	TOZ	Oran	~ ÖYA
1	EH5	%100	~380
2	H5	%100	~320
3	M5	%100	~220
4	PS	-	~200
5	KPL	-	<10
6	PS+M5	%50+%50	<200
7	KPL+M5	%50+%50	<150

*EH5, H5, M5: Fumed silika tozları,
PS: Çökeltilmiş silica,
KPL: Kriyojenik perlit,
PS+M5: Çökeltilmiş silika ve fumed silika toz karışımı,
KPL+M5: Kriyojenik perlit ve fumed silika toz karışımı.*

Çekirdek panellerin karışıma giren bileşenlerinin oranları Tablo 3'de verilmiştir. Çekirdek panellerin sabit kalınlıkta (~ 25mm) ve belirli bir boyutsal kararlılıkta olması için karışım türüne bağlı olarak Tablo 3'de belirtilen sıkıştırma kuvvetleri uygulanmıştır.

Tablo 3. Farklı ÖYA'na sahip toz malzeme içeren çekirdek panellerin % bileşim oranları, sıkıştırma kuvvetleri ve panel kalınlıkları (% composition ratios, compression forces and thicknesses of core panels containing powder material with different SSAs)

CP-1 (ÖYA: 392)						CP-2 (ÖYA: 322)						CP-3 (ÖYA: 226)					
No	EH5	SiC	FBR	F	h	No	H5	SiC	FBR	F	h	No	M5	SiC	FBR	F	h
CP-1-1	95	0	5	50	28.12	CP-2-1	95	0	5	50	26.06	CP-3-1	95	0	5	50	26.01
CP-1-2	85	10	5	35	26.38	CP-2-2	85	10	5	35	27.05	CP-3-2	85	10	5	35	25.99
CP-1-3	75	20	5	28	25.00	CP-2-3	75	20	5	28	25.00	CP-3-3	75	20	5	28	25.67
CP-1-4	90	0	10	46	25.00	CP-2-4	90	0	10	46	25.00	CP-3-4	90	0	10	46	25.88
CP-1-5	80	10	10	35	25.00	CP-2-5	80	10	10	35	25.37	CP-3-5	80	10	10	35	25.01
CP-1-6	70	20	10	25	24.09	CP-2-6	70	20	10	20	27.20	CP-3-6	70	20	10	25	24.95
CP-1-7	85	0	15	40	25.72	CP-2-7	85	0	15	40	25.75	CP-3-7	85	0	15	40	25.50
CP-1-8	75	10	15	30	25.35	CP-2-8	75	10	15	30	25.40	CP-3-8	75	10	15	30	25.00
CP-1-9	65	20	15	20	25.25	CP-2-9	65	20	15	20	25.95	CP-3-9	65	20	15	20	24.87

CP-4 (ÖYA: 196)						CP-5 (ÖYA: 148)					
No	PS+M5	SiC	FBR	F	h	No	KPL+M5	SiC	FBR	F	h
CP-4-1	95	0	5	30	23.53	CP-5-1	95	0	5	30	24.67
CP-4-2	85	10	5	20	22.32	CP-5-2	85	10	5	20	22.15
CP-4-3	75	20	5	15	21.62	CP-5-3	75	20	5	15	20.92
CP-4-4	90	0	10	20	22.18	CP-5-4	90	0	10	20	20.03
CP-4-5	80	10	10	18	21.20	CP-5-5	80	10	10	18	21.22
CP-4-6	70	20	10	18	19.95	CP-5-6	70	20	10	18	18.30
CP-4-7	85	0	15	20	22.95	CP-5-7	85	0	15	20	20.87
CP-4-8	75	10	15	18	20.80	CP-5-8	75	10	15	18	20.87
CP-4-9	65	20	15	18	19.53	CP-5-9	65	20	15	18	20.87

*EH5, H5, M5: Fumed silika tozları, (%)
PS: Çökeltilmiş silika
KPL: Kriyojenik perlit, (%)
SiC: Opaklaştırıcı madde, (%)
FBR: Cam elyafı (fiber), (%)
F: Sıkıştırma kuvveti (kN)
h: Panel kalınlıkları (mm)*

3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

3.1. Çekirdek Panellerin BHK'si ve ÖYA Değerlerinin Belirlenmesi (Determination of BHK and SSA Values of Core Panels)

Çekirdek dolgu maddelerinin BHK'si Eşitlik 2'ye göre hesaplanmıştır. ÖYA değerleri Micromeritics Gemini V2.01 cihazı ile BET yöntemine göre belirlenerek Tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 4. Dolgu maddelerinin BHK'leri ve tozların ÖYA değerleri (Densities of fillers and SSA values of powders)

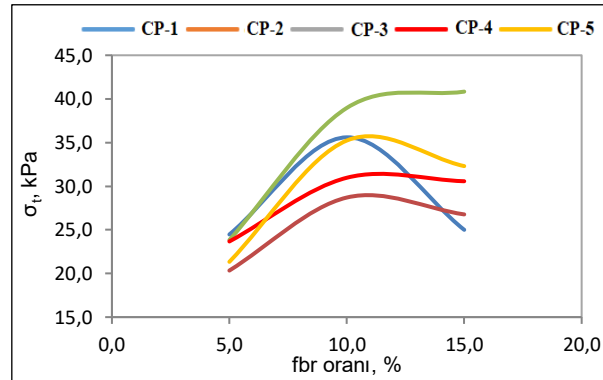
No	Toz türü	ÖYA (m ² /g) (Ölçülen)	Dolgu	D (g/cm ³) (g/cm ³)
1	EH5	391.85	EH5	2.308
2	H5	322.18	H5	2.314
3	M5	226.07	M5	2.320
4	PS	201.32	PS	2.230
5	KPL	8.01	KPL	2.520
6	PS+M5	195.85	CE	2.669
7	KPL+M5	147.89	SiC	3.263

Çekirdek toz maddeleri içerisinde EH5 FS tozunun ÖYA'nı 392 m²/g'dır. Bu değer diğer ölçülen tozların ÖYA'na göre en yüksek olanıdır. H5 FS tozunun ÖYA'sı 322 m²/g, M5 FS tozunun ÖYA değerleri ise 226 m²/g olarak belirlenmiştir. Alternatif çekirdek dolgu maddesi olarak öngörülen M5 + PS karışımının ÖYA değeri 196 m²/g'dır. Bu karışımın ÖYA'sı FS türü tozların ÖYA değerinden daha düşüktür. M5 + KPL karışımının ÖYA değeri ise 148 m²/g'dır. Bu karışımın ÖYA'sı çekirdek dolgu malzemesi olarak kullanılan tozlar içerisinde en küçük değerdedir.

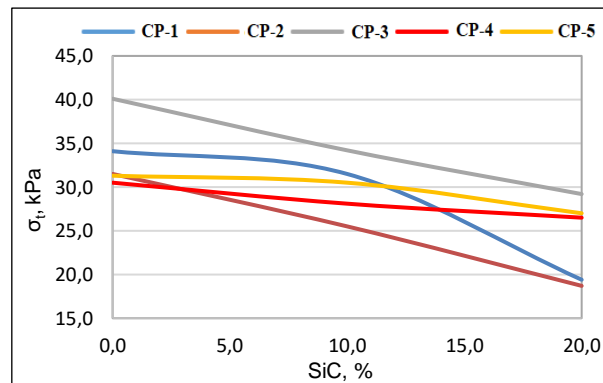
3.2. Çekirdek Panellerin Çekme Gerilmeleri (Tensile Stresses of Core Panels)

Tablo 3'de gösterilen ÖYA'na göre gruplanmış CP'ler (45 panel) farklı oranlarda fiberli ve fibersiz olarak üretilmiştir. Çekirdek panellerin içerisindeki fiber oranı değişiminin σ_t değerine etkisi Şekil 5'de gösterilmiştir. Çekirdek panellerin içeriğindeki fiber oranı %10 olduğunda panellerin σ_t değerleri artış gösterirken, fiber oranı %15 olduğunda σ_t değerleri genel olarak azalmıştır. M5 tozu ile üretilen CP-3 çekirdek panellerin σ_t değerleri %10 fiber oranına kadar artmıştır. Fiber oranı %15 olduğunda σ_t değerleri genellikle sabit kalmıştır.

Üretilen CP'lerin içerdiği % SiC oranının σ_t değerlerine etkisi Şekil 6'da gösterilmiştir. SiC içermeyen panellerin σ_t değeri SiC içerenlere göre daha yüksektir. Çekirdek panel içerisindeki SiC miktarının artırılması σ_t değerlerini azaltmıştır. DIN EN 1607'de belirtilen $\sigma_t \geq 40$ kPa şartlarını sağlayan paneller ÇGK'ni sağlamıştır.



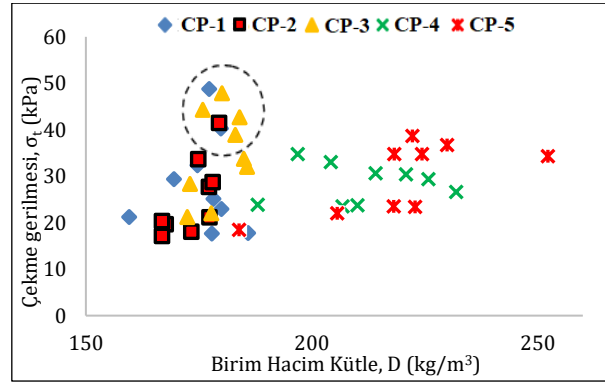
Şekil 5. % fiber oranı ile σ_t değerlerinin değişimi (Variation of σ_t values with % fiber ratio)



Şekil 6. % SiC oranı ile σ_t değerlerinin değişimi (Variation of σ_t values with % SiC ratio)

M5-PS ve M5-KPL karışımı ile üretilen çekirdek panellerin BHK'leri FS kullanılarak üretilen panellerin (EH5, H5, M5) BHK'sinden daha yüksektir. DIN EN 1602 ve DIN EN 1607'de belirtilen $D \leq 210$ ve σ_t değerini sağlayan

panellerin BHK'leri 170 kg/m³ ile 190 kg/m³ arasında belirlenmiştir. BHK ve çekme gerilmesi değerini sağlayan çekirdek paneller Şekil 7'de daire içerisinde belirtilmiştir. Çekirdek panellerin BHK'leri, sıkıştırma kuvveti, fiber ve SiC oranına bağlı olarak değişmiştir.



Şekil 7. Çekirdek panellerinin BHK değerlerine bağlı çekme gerilmesi değerleri
(Tensile strain values depending on the BHK values of core panels)

- CP-1 de EH5 tozuyla ve %10 fiber oranıyla üretilen CP-1-4 ve CP-1-5 panelleri ÇGK' ni (≥ 40 Pa) sağlamıştır. Bu panellere sırasıyla 46 kN ve 35 kN kuvvet uygulanmıştır. σ_t değerleri 48.8 ve 40.2 kPa, BHK'leri 177-180 kg/m³ olarak belirlenmiştir. CP-1'de tüm çekirdek paneller $D \leq 210$ kg/m³ koşulunu sağlamıştır.
- CP-2 de H5 tozuyla ve %10 fiber oranıyla üretilen CP-2-4 paneli ÇGK' ni (≥ 40 Pa) sağlamıştır. Bu panele 46 kN kuvvet uygulanmıştır. σ_t değeri 41.3 kPa, BHK'si 179 kg/m³ olarak belirlenmiştir. CP-2'de bulunan tüm çekirdek paneller $D \leq 210$ kg/m³ koşulunu sağlamıştır.
- CP-3 de M5 tozuyla ve %10 fiber oranıyla üretilen CP-3-4, CP-3-7 ve CP-3-8 panelleri ÇGK' ni (≥ 40 Pa) sağlamıştır. Bu panellere sırasıyla 46-40-30 kN kuvvet uygulanmıştır. σ_t değeri 44.3 kPa, 47.8 ve 42.7 kPa, BHK'leri 176-180-184 kg/m³ olarak belirlenmiştir. CP-3'de bulunan tüm çekirdek paneller $D \leq 210$ kg/m³ koşulunu sağlamıştır.
- CP-4 de PS-M5 tozuyla ve %15 fiber oranıyla üretilen CP-4-7 paneli en yüksek σ_t değerini sağlamasına rağmen CP-4'deki hiçbir panel ÇGK'ni sağlayamamıştır. Bu gruptaki CP-4-7 panelinin σ_t değeri 34.7 kPa, BHK'si 197 kg/m³ olarak belirlenmiştir.
- CP-5 de KPL-M5 tozuyla ve %15 fiber oranıyla üretilen, CP-5-7 paneli en yüksek σ_t değerini sağlamasına rağmen bu gruptaki hiçbir panel de ÇGK'ni sağlayamamıştır. CP-5-7 paneline 20 kN kuvvet uygulanmıştır. σ_t değeri 38.7 kPa olarak belirlenmiştir. Bu değer ÇGK'ne oldukça yakındır. Panelin BHK'si 261 kg/m³'dür. CP-5 de panellerin BHK'leri tüm gruplar içerisinde en yüksek değerdedir ve CP-5'de bulunan hiçbir panel $D \leq 210$ kg/m³ koşulunu sağlayamamıştır.

3.3. Çekirdek Panellerin Basma Dayanımları (Compressive Strength of Core Panels)

Basma dayanımı için çekirdek paneller DIN EN 826'ya göre 50x50 mm boyutlarında üretilmiştir. Üretilen çekirdek paneller 23±2 °C'de ve %50±5 bağıl nem ortamında bekletilmiştir. Sonrasında panellere test presinde 250±10 Pa'lık ön yükleme uygulanmıştır. Daha sonra test presinin yükleme hızı 0.04 mm/d ayarlanarak, çekirdekler dakikada 0.1mm yer değiştirme olacak şekilde sıkıştırılmıştır. Tüm çekirdek panellerin yükleme kuvvetine bağlı eksenel yer değiştirme miktarları ölçülerek, CP-1-1 paneli için 3 adet test sonucunun ortalaması hesaplanarak Tablo 5'de gösterilmiştir. Çekirdek panellere preste %10 sıkıştırma uygulandığında basma dayanımı testi sonlandırılmıştır. CP-1-1 çekirdek panel için kuvvet (F)-yer değiştirme (X) eğrisi çizilerek Şekil 8'de gösterilmiştir. Test bulgularından tüm numunelerin E değerleri hesaplanarak Şekil 9'da gösterilmiştir. DIN EN 826'da belirtilen $\sigma_{10} \geq 150$ kPa şartlarını sağlayan paneller BDK'ni sağlamıştır.

Tablo 5. CP-1-1 paneli için F, X değerlerinden hesaplanan parametreler
(Parameters calculated from F, X values for panel CP-1-1)

CP-1-1	CP-1-1-1	CP-1-1-2	CP-1-1-3	Ort.
A_o (mm ²)	2500	2500	2500	
F_m (N)	304	304	304	
σ_m (kPa)	122	122	122	121.6
X_m (mm)	2.90	3.27	2.81	2.99
d_o (mm)	28.12	28.12	28.12	
σ_m (%)	10.31	11.63	9.99	10.6
$d_o \cdot \%10$ (mm)	2.81	2.81	2.81	
F_{10} (kPa)	258	304	304	
σ_{10} (kPa)	103	122	122	115.5
X_e (mm)	0.61	0.38	0.51	
F_e (N)	56	78	56	
σ_e (kPa)	22	31	22	25.3
E (kPa)	1033	2309	1235	1525.5

F_m : Maksimum kuvvet,

σ_m : Maksimum gerilme,

X_m : Maksimum kuvvete karşılık gelen yer değiştirme miktarı,

ϵ_m : Maksimum strain,

F_{10} : %10 deformasyon miktarına karşılık gelen yük,

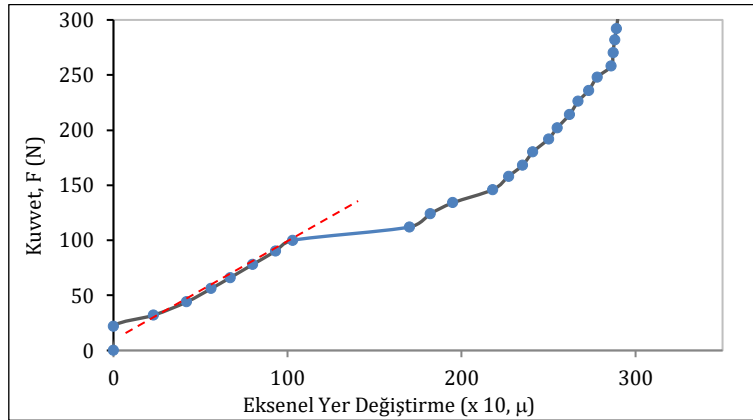
σ_{10} : %10 deformasyonda maksimum gerilme,

F_e : Elastik davranış eğrisinde başlangıçtan çizilen teğetin kestiği kuvvet,

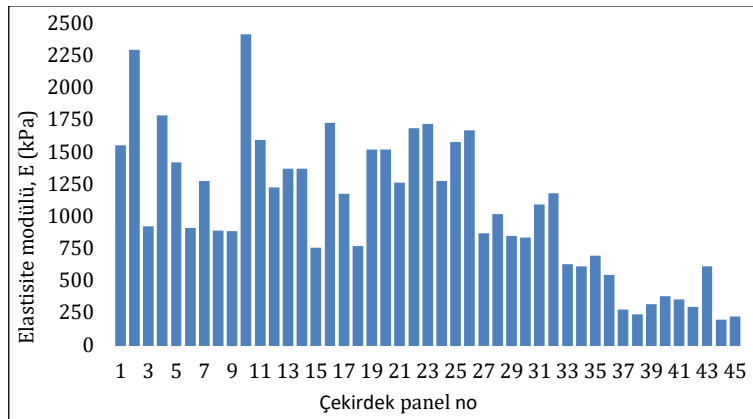
X_e : " F_e " kuvvetine karşılık gelen yer değiştirme,

σ_e : " F_e " kuvvetinden kaynaklanan gerilme,

E : Elastisite modülü.



Şekil 8. CP-1-1 numunesinin F-X grafiği (F-X plot of CP-1-1 sample)

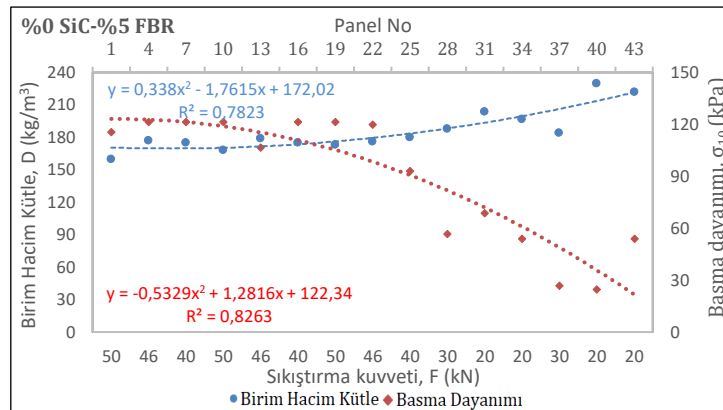


Şekil 9. Çekirdek panellerin elastisite modülleri (Elasticity modulus of core panels)

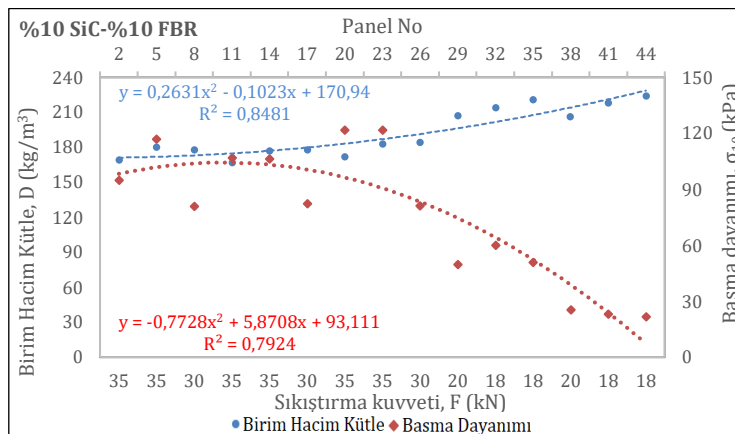
- Genel olarak, CP-1 de EH5 tozuyla üretilen çekirdek panellerin fiber oranı içeriği arttıkça σ_{10} değeri azalmıştır. Çekirdeklerin vakumlandıktan sonra atmosfer basıncında panel kararlılığı için σ_{10} değerlerinin yüksek olması gerekir. Fiber oranının artması panel kararlılığı etkilemektedir. CP-1-2 ve CP-1-4 çekirdeğinin σ_{10} değerleri sırasıyla 122 kPa ve 117 kPa'dır. Bu paneller BDK'i olan ≥ 150 kPa koşulunu sağlayamamıştır. Ancak vakum sonrası atmosfer basıncına karşı gösterdiği direnç yeterlidir. İki numunenin yer değiştirme miktarları sırasıyla

(X_m) 2.02 mm ve 3.29 mm olarak belirlenmiştir. En büyük kuvvete karşılık gelen bu yer değiştirme miktarları çekirdek panellerin atmosfer basıncında ne kadar şekil değiştirebileceğini göstermektedir. E değeri yüksek olan çekirdeklerin yer değiştirme değeri daha küçüktür. Yer değiştirme değeri küçük olan paneller atmosfer basıncına karşı daha fazla direnç gösterir. CP-1-2 ve CP-1-4 çekirdeğinin E değerleri sırasıyla 1759 kPa ve 1396 kPa olarak belirlenmiştir.

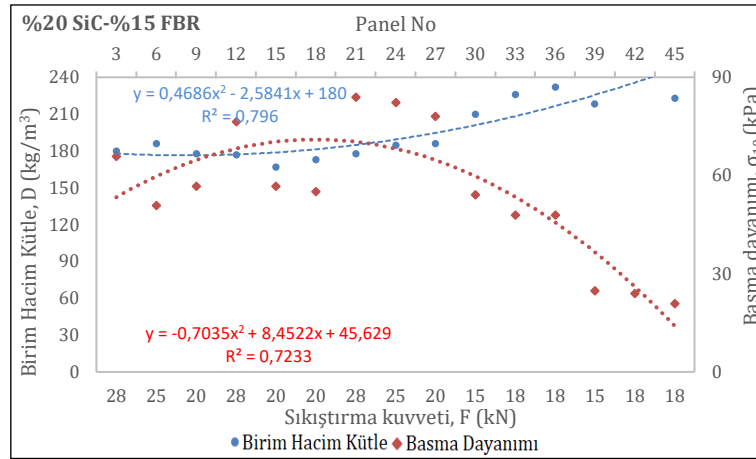
- CP-2 de H5 tozuyla üretilen çekirdek panelleri içerisinde en yüksek basma dayanımı CP-2-1 paneline aittir. Bu panelin σ_{10} değeri 122 kPa olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla bu gruptaki hiçbir panel BDK'ni olan ≥ 150 kPa koşulunu sağlayamamıştır. CP-2-1 panelinin yer değiştirme miktarı (X_m) 2.74 mm ve E değeri 1570 kPa'dır.
- CP-3 de M5 tozuyla üretilen çekirdek panelleri içerisinde en yüksek σ_{10} değerini CP-3-1, CP-3-2 ve CP-3-5 panelleri sağlamıştır. Bu panellerin σ_{10} değeri 122 kPa olarak belirlenmiştir. Bu gerilme düzeyindeki yer değiştirme miktarları (X_m) sırasıyla 2.34, 2.87 ve 2.27 mm'dir. Bu çekirdek paneller de BDK'ni sağlamasa da vakum sonrası atmosfer basıncına karşı gösterdikleri direnç yeterlidir.
- CP-4 de eşit miktarlarda PS-M5 tozu karışımıyla üretilen çekirdek panelleri içerisinde en yüksek σ_{10} değeri CP-4-5 panelidir. Bu panelin σ_{10} değeri 69 kPa'dır. Bu gerilme düzeyindeki yer değiştirme miktarı (X_m) 2.67 mm'dir. CP-4 de bulunan diğer panellerin yer değiştirme miktarları ~3mm' nin üzerinde ve E değerleri CP-1, CP-2 ve CP-3'e göre yaklaşık 3 kat azalmıştır. Bu durum, PS+M5 tozu karışımıyla üretilen çekirdek panellerin vakum sonrası önemli miktarda kalınlık değişimi olacağı anlamına gelir. CP-4'de bulunan çekirdek panellerin hiçbirisi BDK' ni sağlayamamıştır.
- CP-5 de eşit miktarlarda KPL-M5 tozu karışımıyla üretilen çekirdek panelleri içerisinde en yüksek σ_{10} değeri CP-5-7 panelidir. Bu panelin σ_{10} değeri 54 kPa'dır. Bu gerilme düzeyindeki yer değiştirme miktarı (X_m) 3,27 mm ve E değeri 585.9 kPa'dır. Bu durum CP-4 çekirdek panellerine benzerdir. KPL-M5 tozu karışımıyla üretilen çekirdek panellerin kalınlıklarında da vakum sonrası önemli bir değişim olur ve kararlı yapıda çekirdek panel üretimi zordur. Çekirdek panellerin %SiC-%Fiber oranına göre, sıkıştırma kuvvetine bağlı BHK ve basma dayanımları Şekil 10-11 ve 12'de gösterilmiştir.



Şekil 10. %0 SiC-%5 Fbr içeren çekirdek panellerin sıkıştırma kuvvetine bağlı BHK ve basma dayanımları (BHK and compressive strength of core panels containing 0% SiC-5% Fbr depending on compression force)



Şekil 11. %10 SiC-%10 Fbr içeren çekirdek panellerin sıkıştırma kuvvetine bağlı BHK ve basma dayanımları (BHK and compressive strength of core panels containing 10% SiC-10% Fbr depending on compression force)



Şekil 12. %20 SiC-%15 Fbr içeren çekirdek panellerin sıkıştırma kuvvetine bağlı BHK ve basma dayanımları (BHK and compressive strength of core panels containing 20% SiC-15% Fbr depending on compression force)

4. Sonuç ve Tartışma (Result and Discussion)

Bu çalışma, FS ile üretilen VYP çekirdeklerinin ve ekonomik açıdan alternatif olabilecek farklı tozların karışımı ile üretilen VYP çekirdeklerinin mekanik performanslarının belirlenmesi üzerinedir. Vakum sonrasında çekirdek panel üzerine atmosfer tarafından ~ 10 ton/m² basınç uygulanmaktadır. Bu yüzden çekirdek panel bu basıncı karşılayabilir dayanımda olması gerekir. Yeterli mekanik özelliklere sahip olmayan çekirdek paneller vakum sonrasında deformasyona uğramaktadır. Bu nedenle, çekirdek panellerin fiziksel ve mekanik özellikleri oldukça önemlidir. Çalışmada farklı sıkıştırma kuvvetleri uygulanarak üretilen 45 çekirdek panelin BHK'leri, basma dayanımı ve çekme gerilmeleri sırasıyla DIN EN 1602, DIN EN 826, DIN EN 1607 standartlarına göre belirlenmiştir. Üretilen tüm çekirdek panellerin atmosfer basıncında herhangi bir deformasyona uğramadığı gözlenmiştir. Vakum sonrasında panellerin BHK'lerinde önemli bir değişiklik olmadığı tespit edilmiştir. Çekirdek panellerin karışım tasarımlarında fiber kullanılması, panellerin boyutsal kararlılığı açısından önemlidir. Çekirdek panel içeriğine %10 üzerinde fiber eklenmesi, genellikle panellerin basma dayanımlarında ve elastisite modülü değerlerinde azalmaya yol açmıştır. Çekirdek panellere %15 üzerinde fiber eklenmesi, çekirdekte kabarmaya ve deformasyona neden olmaktadır. Yüksek ÖYA'na sahip tozlarla <%10 oranında fiber kullanımı, panellerin boyutsal kararlılıklarını artırmıştır.

FS tozlarından elde edilen çekirdek paneller (CP-1, CP-2, CP-3), DIN EN 1602 standardındaki $D \leq 210$ kg/m³ kriterini sağlamıştır. FS(M5)-PS ve FS(M5)-KPL tozlarının karışımıyla üretilen çekirdek panellerin (CP-4 ve CP-5) BHK'leri, FS ile üretilen çekirdek panellere göre daha yüksektir. Çekirdek panellerin çekme gerilmeleri incelendiğinde, CP-1-4, CP-1-5, CP-2-4, CP-3-4, CP-3-7 ve CP-3-8 haricindeki çekirdek paneller, DIN EN 1607 standardında belirtilen ≥ 40 Pa kriterini karşılayamamıştır. Ancak CP-1, CP-2 ve CP-3'de bulunan bazı çekirdek panellerin çekme gerilmeleri, ÇGK'ne yakın değerlerdedir. Çekirdek panellerin basma dayanımları ise FS tozlarıyla üretilen çekirdek panellerde BDK'ne yakın değerler göstermektedir. FS(M5)-PS ve FS(M5)-KPL tozlarının karışımıyla üretilen çekirdek panellerin basma dayanımları daha düşük değerdedir. Ancak hiçbir çekirdek panel DIN EN 826 standardında belirtilen ≥ 150 kPa kriterini sağlayamamıştır. CP-1-4 çekirdek paneli, %90 oranında EH5-FS tozuyla (392 m²/g) ve %10 fiber ilavesiyle 46 kN kuvvetle sıkıştırılarak üretilmiştir. Bu çekirdek panel, standartlarda belirtilen kriterlere en yakın değerleri sağlamıştır. Numunenin basma dayanımı 117 kPa, çekme gerilmesi 49 kPa, deformasyonu %2.8 ve BHK'si 177 kg/m³ olarak tespit edilmiştir. VYP çekirdek panellerinin mekanik özelliklerine dair yapılan çalışmalar, literatürde sınırlı sayıdadır. Davraz vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, VYP'lerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla 12 adet VYP çekirdek paneli üretilmiştir. Çalışmalarındaki 3 numaralı numune grubu, standartlardaki üç kriteri sağlamıştır. BHK'si 200 kg/m³ olan numunenin %10 deformasyonda basma dayanımı (σ_{10}) 47.3 kPa olarak elde edilmiştir. 5 numaralı numune grubu ise standartlardaki iki kriteri sağlamış ve %10 deformasyonda basma dayanımını 132.7 kPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, çalışmada üretilen VYP çekirdeklerin mekanik özelliklerinin literatürle uyumlu olduğunu göstermektedir.

VYP'ler yüksek ısı yalıtımı sağladıkları için enerji verimliliğini artırmakta ve ısı kaybını azaltarak enerji maliyetlerini düşürmektedir. Bu nedenle inşaat, endüstriyel tesisler ve enerji sektörü gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, FS tozu ile üretilen VYP'lerin maliyetlerinin yüksek olması inşaat sektöründe yaygın kullanımlarını sınırlamaktadır. Bu çalışmada, kriyojenik perlit ve fumed silika tozlarının karışımıyla üretilen çekirdek panellerin mekanik özelliklerinin düşük olduğu ancak vakum altında bu panellerin çökmediği ve boyutsal kararlılıklarını koruduğu tespit edilmiştir. Bu durum kriyojenik perlitin de VYP'lerde alternatif bir çekirdek toz

malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermektedir. Kriyojenik perlitin VYP çekirdeklerinde kullanım oranına bağlı, çekirdek maliyetini %20-40 arasında azaltabilir. Bu sonuç, ülkemizin dünya perlit rezervinin yaklaşık %70'ine sahip olması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu sayede daha ekonomik VYP'ler üretililecek ve daha geniş kullanım alanlarına sahip olabilecektir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 213M740 No'lu proje kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür eder.

Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

Kaynaklar (References)

- Alam, M., Singh, H., Brunner, S., & Naziris, C. (2014). Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite—Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VYP) core. *Energy and Buildings*, 69, 442-450.
- Aldykiewicz Jr, A., Desjarlais, A. O., & Biswas, K. (2022). The effect of barrier films and exposure on the aging of vacuum insulation panels with fumed silica cores. Oak Ridge National Lab.(ORNL), Oak Ridge, TN (United States).
- Bayrakçı, H., Davraz, M., & Başpınar, E. (2011). Yeni Nesil Isı Yalıtım Malzemesi: Vakum Yalıtım Paneli. *Teknik Bilimler Dergisi*, 1(2), 1-12.
- Bayraktar D., Bayraktar E.A., Mevcut Binalarda Isı Yalıtım Uygulamalarının Değerlendirilmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2016, 7(1), 59-66.
- Davraz, M., Bayrakçı, H. C., Koru, M., İpek, O., Yusufoglu, Y., 2014. Ekonomik VYP Üretimi İçin Çekirdek Dolgu Maddeleri Türlerinin ve Performanslarının Araştırılması, TÜBİTAK 1003- Proje No:213M740. Development of Transparent and Opaque Vacuum Insulation Panels for Energy Efficient Buildings.
- Davraz, M., Bayrakçı, H. C., Delikanlı, K., & Akdağ, A. (2019). Vakum Yalıtım Paneli Çekirdeğinin Fiziko-Mekanik Özellikleri. *Teknik Bilimler Dergisi*, 6(1), 27-37.
- Di, X., Gao, Y., Bao, C., & Ma, S. (2014). Thermal insulation property and service life of vacuum insulation panels with glass fiber chopped strand as core materials. *Energy and Buildings*, 73, 176-183.
- DINEN 826:199605, Thermal Insulating Products for Building Applications Determination of Compression Behavior, German version EN 826:1996.
- DINEN 1602:199701, Thermal Insulating Products for Building Applications Determination of The Apparent Density, German version EN 1602:1996.
- DINEN 1605:200706, Thermal Insulating Products for Building Applications Determination of Deformation under Specified Compressive Load and Temperature Conditions, German version EN 1605:1996 + A1:2006.
- DINEN 1607:199701, Thermal Insulating Products For Building Applications Determination of Tensile Strength Perpendicular to Faces, German version EN 1607:1996.
- Dong, X., Zhang, Q., Lan, Y., Zeng, Q., Fan, M., Chen, L., & Zhao, W. (2022). Preparation and characterization of vacuum insulation panels with hybrid composite core materials of bamboo and glass fiber. *Industrial Crops and Products*, 188, 115691
- Fantucci, S., Garbaccio, S., Lorenzati, A., & Perino, M. (2019). Thermo-economic analysis of building energy retrofits using VIP-Vacuum Insulation Panels. *Energy and Buildings*, 196, 269-279.
- Fricke, J., Heinemann, U., & Ebert, H. P. (2008). Vacuum insulation panels—From research to market. *Vacuum*, 82(7), 680-690.
- H. Schwab, U. Heinemann, A. Beck, H.P. Ebert, J. Fricke, Prediction of service life for vacuum insulation panels with fumed silica kernel and foil cover, *Journal of Thermal Envelope and Building Science* 28 (2005) 357–374.
- Kan, A., Zhang, X., Chen, Z., & Cao, D. (2023). Effective thermal conductivity of vacuum insulation panels prepared with recyclable fibrous cotton core. *International Journal of Thermal Sciences*, 187, 108176.
- Katsura, T., & Nagano, K. (2023). Investigation on Longer Service Life of Vacuum Insulation Panels by Applying Double Envelopes. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 396, p. 04009). EDP Sciences.
- Kwon, J. S., Jang, C. H., Jung, H., & Song, T. H. (2010). Vacuum maintenance in vacuum insulation panels exemplified with a staggered beam VIP. *Energy and Buildings*, 42(5), 590-597.
- Lakatos, Á., & Kovács, Z. (2021). Comparison of thermal insulation performance of vacuum insulation panels with EPS protection layers measured with different methods. *Energy and Buildings*, 236, 110771.
- Latsuzbaya, V., Middendorf, P., Völkle, D., & Weber, C. (2022). Improving the thermal properties of aircraft cabin interiors with the integration of vacuum insulation panels. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(3), 705-718.
- Li, C., Li, B., Pan, N., Chen, Z., Saeed, M. U., Xu, T., & Yang, Y. (2016). Thermo-physical properties of polyester fiber reinforced fumed silica/hollow glass microsphere composite core and resulted vacuum insulation panel. *Energy and buildings*, 125, 298-309.
- Mao, S., Kan, A., Huang, Z., & Zhu, W. (2020). Prediction of thermal performance of vacuum insulation panels (VYPs) with micro-fiber core materials. *Materials Today Communications*, 22, 100786.
- Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Lackey, J., Normandin, N., & Van Reenen, D. (2005). Long-term thermal resistance and use of vacuum insulation panel in buildings. In *10th Canadian Conference on Building Science and Technology* (pp. 169-181).

- Mukhopadhyaya, P., Kumaran, K., Normandin, N., van Reenen, D., & Lackey, J. (2008). High-performance vacuum insulation panel: development of alternative core materials. *Journal of Cold Regions Engineering*, 22(4), 103.
- Resalati, S., Okoroafor, T., Henshall, P., Simões, N., Gonçalves, M., & Alam, M. (2021). Comparative life cycle assessment of different vacuum insulation panel core materials using a cradle to gate approach. *Building and Environment*, 188, 107501.
- Simmler, H., Brunner, S., Heinemann, U., Schwab, H., Kumaran, K., Mukhopadhyaya, P., ... & Erb, M. (2005). Vacuum Insulation Panels-Study on VIP-components and panels for service life prediction of VIP in building applications (Subtask A). Vacuum Insulation Panels Subtask A, Report HiPTI-IEA/ECBCS Annex 39
- Verma, S., & Singh, H. (2022). Predicting the conductive heat transfer through evacuated perlite based vacuum insulation panels. *International Journal of Thermal Sciences*, 171, 107245.
- Verma, S., Sara, A., & Singh, H. (2023). Why and which opacifier for perlite based vacuum insulation panels (VIPs) in the average temperature range of 10–70° C. *International Journal of Thermal Sciences*, 186, 108136.
- Zach, J., Peterková, J., Dufek, Z., & Sekavčnik, T. (2019). Development of vacuum insulating panels (VYP) with non-traditional core materials. *Energy and Buildings*, 199, 12-19.
- Zhao, W., Yan, W., Zhang, Z., Gao, H., Zeng, Q., Du, G., & Fan, M. (2022). Development and performance evaluation of wood-pulp/glass fibre hybrid composites as core materials for vacuum insulation panels. *Journal of Cleaner Production*, 357, 131957.
- Zhuang, J., Ghaffar, S. H., Fan, M., & Corker, J. (2017). Restructure of expanded cork with fumed silica as novel core materials for vacuum insulation panels. *Composites Part B: Engineering*, 127, 215-221.