



Analisis Efektivitas Thermal Insulation pada Sekat Ruang (*Bulkhead*) Bus untuk Mengurangi Panas Mesin

Muhamad Fikri Hidayat¹, Muchlisinalahuddin², Devia Aprilman³, Adriansyah^{4*}, Ahmad Hasnul Fajri Arsyah⁵
Muhammad Aslam Kamil⁶

^{1,4*,5} D3 Teknik Mesin, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Padang

² Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat

⁶ D4 Rekayasa Perancangan Mekanik, Teknik Mesin, Politeknik Negeri Padang

³ Politeknik Raflesia

⁴adriansyah1964@gmail.com ⁵ahmad.arsyah94@gmail.com

Abstract

This study aims to evaluate the effectiveness of two types of thermal insulation materials, namely polyurethane (PU) foam and basaltwool, in reducing heat transfer from the engine compartment to the passenger cabin through the bus bulkhead structure. Optimal thermal insulation is essential to maintain cabin thermal comfort and enhance safety within the vehicle interior. The testing methods included measurements of thermal conductivity and evaluations of each material's resistance to extreme temperatures. The results indicate that PU foam exhibits lower thermal conductivity (± 0.020 – 0.028 W/m·K) and achieves heat retention efficiency of 95–98% at temperatures around 100°C. On the other hand, basaltwool shows slightly higher thermal conductivity (± 0.035 – 0.040 W/m·K) with efficiency ranging from 90–95%, but significantly outperforms in terms of heat resistance, withstanding temperatures as high as 600–1000°C. Based on these findings, PU foam is considered more suitable for applications that require thermal efficiency at moderate temperatures, while basaltwool is better suited for environments exposed to continuous high temperatures. Therefore, the appropriate selection of insulation material should be based on specific operational conditions to optimize both thermal comfort and cabin safety.

Keywords: thermal insulation, bus bulkhead, PU foam, basaltwool, thermal conductivity

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas dua jenis material insulasi termal, yaitu polyurethane (PU) foam dan basaltwool, dalam mengurangi perpindahan panas dari ruang mesin ke kabin penumpang pada struktur bulkhead bus. Isolasi termal yang optimal sangat penting untuk menjaga kenyamanan termal serta meningkatkan keselamatan dalam kabin kendaraan. Metode pengujian meliputi pengukuran konduktivitas termal dan uji ketahanan terhadap suhu ekstrem pada masing-masing material. Hasil pengujian menunjukkan bahwa PU foam memiliki konduktivitas termal lebih rendah ($\pm 0,020$ – $0,028$ W/m·K) dan efisiensi penahanan panas sebesar 95–98% pada suhu sekitar 100°C. Di sisi lain, basaltwool memiliki konduktivitas termal yang sedikit lebih tinggi ($\pm 0,035$ – $0,040$ W/m·K) dengan efisiensi 90–95%, namun menunjukkan ketahanan suhu yang jauh lebih tinggi, yakni hingga 600–1000°C. Berdasarkan temuan ini, disimpulkan bahwa PU foam lebih sesuai untuk aplikasi dengan kebutuhan efisiensi isolasi pada suhu sedang, sedangkan basaltwool lebih cocok digunakan pada lingkungan dengan paparan suhu tinggi secara terus-menerus. Pemilihan material isolasi yang tepat harus mempertimbangkan kondisi operasional spesifik demi optimalisasi kenyamanan dan keselamatan kabin.

Kata kunci: isolasi termal, bulkhead bus, PU foam, basaltwool, konduktivitas termal

1. Pendahuluan

Dalam industri transportasi darat modern, khususnya pada moda angkutan penumpang seperti bus, aspek kenyamanan termal telah menjadi salah satu indikator utama dalam penilaian mutu layanan. Kenyamanan termal merujuk pada kondisi suhu udara dalam kabin kendaraan yang mendukung kenyamanan fisiologis

dan psikologis penumpang selama perjalanan. Kualitas kenyamanan ini sangat menentukan pengalaman pengguna, memengaruhi tingkat kepuasan, loyalitas, dan persepsi terhadap layanan yang diberikan oleh operator transportasi [1].

Salah satu tantangan utama dalam mewujudkan kenyamanan termal yang optimal adalah bagaimana mengelola distribusi dan akumulasi panas di dalam kabin bus, terutama dalam kondisi iklim tropis yang panas atau ketika kendaraan beroperasi dalam waktu lama. Faktor-faktor seperti paparan sinar matahari langsung, panas yang ditransfer dari permukaan bodi luar, serta radiasi dan konduksi panas dari ruang mesin, dapat secara signifikan meningkatkan suhu di dalam kabin. Dalam konteks ini, efisiensi sistem pendingin udara (HVAC) menjadi penting, namun performa sistem tersebut sangat bergantung pada kinerja termal struktur bodi kendaraan itu sendiri.

Salah satu elemen struktural yang memainkan peran sentral dalam pengendalian panas adalah bulkhead, yaitu sekat atau panel struktural yang dipasang secara strategis di berbagai bagian kendaraan. Bulkhead berfungsi sebagai pemisah fisik antara kompartemen yang memiliki perbedaan fungsi dan suhu, seperti antara ruang mesin dengan ruang kabin penumpang. Dalam desain bodi bus, bulkhead tidak hanya berfungsi sebagai elemen penambah kekakuan dan keselamatan struktural, tetapi juga sebagai penghalang panas dan peredam suara yang bersumber dari ruang mesin maupun lingkungan eksternal [2].

Keberadaan bulkhead sangat krusial dalam kendaraan yang menggunakan konfigurasi mesin depan atau belakang, di mana sumber panas utama terletak berdekatan dengan kabin. Jika tidak ditangani dengan tepat, panas dari mesin dapat menyebar melalui dinding sekat ke dalam ruang penumpang, menyebabkan peningkatan suhu yang signifikan, dan berdampak buruk terhadap kenyamanan termal. Oleh karena itu, bulkhead perlu dirancang tidak hanya kuat secara mekanis, tetapi juga efektif secara termal, dengan memanfaatkan bahan-bahan thermal insulation (isolasi panas) yang memiliki konduktivitas panas rendah, daya tahan terhadap suhu tinggi, dan ketebalan optimal untuk menghambat transfer panas secara konduksi, konveksi, maupun radiasi.

Dengan demikian, peran bulkhead dalam konteks kenyamanan termal tidak dapat dipandang sekadar sebagai elemen struktural, melainkan sebagai bagian integral dari sistem manajemen termal kendaraan yang berkontribusi langsung terhadap efisiensi energi, performa pendinginan, serta keseluruhan pengalaman berkendara. Penelitian mengenai desain dan performa termal bulkhead yang dioptimalkan dengan material isolasi panas menjadi sangat relevan untuk mendukung pengembangan teknologi transportasi darat yang lebih nyaman, efisien, dan ramah lingkungan

Bulkhead tidak hanya memberikan kontribusi terhadap kekakuan struktural bodi bus dan keselamatan penumpang, tetapi juga sering difungsikan sebagai penghalang suara dan panas. Namun demikian, tanpa penggunaan material thermal

insulation (isolasi panas) yang tepat, bulkhead tidak akan mampu secara efektif menahan transfer panas melalui mekanisme konduksi, konveksi, dan radiasi [3]. Panas yang berasal dari ruang mesin, terutama pada bus dengan mesin belakang, dapat menyebabkan peningkatan suhu kabin secara signifikan, yang tidak hanya menurunkan kenyamanan penumpang tetapi juga meningkatkan beban kerja sistem pendingin udara (HVAC) dan konsumsi energi [4].

Secara teknis, thermal insulation merupakan upaya pengendalian aliran panas dari satu ruang ke ruang lain melalui pemilihan material dengan konduktivitas termal rendah, struktur mikro yang menyulitkan pergerakan panas, serta pemilihan ketebalan dan sifat termal yang sesuai dengan lingkungan aplikasinya [5]. Dalam konteks otomotif, material seperti rockwool, polyurethane (PU) foam, dan aluminium foil insulation telah banyak digunakan karena kemampuannya dalam mereduksi aliran panas, serta ringan dan relatif mudah dipasang dalam struktur panel kendaraan [6].

Berbagai studi terdahulu telah mengkaji performa termal dari berbagai material insulasi dalam kendaraan [7]. menunjukkan bahwa material komposit berlapis memiliki efisiensi isolasi termal yang lebih tinggi dibandingkan material tunggal.[8] menyoroti pentingnya desain multi-lapis (multilayer system) dalam meningkatkan efisiensi termal tanpa menambah beban struktural kendaraan. Sementara itu [9] meneliti dampak insulasi pada kualitas akustik dan suhu kabin kendaraan, dan menemukan bahwa terdapat korelasi langsung antara ketebalan insulasi dan penurunan suhu dalam kabin sebesar 5–10°C.

Namun demikian, terdapat kesenjangan dalam literatur terkait pengujian langsung performa thermal insulation dalam aplikasi bulkhead bus dengan mempertimbangkan variasi posisi sekat, sumber panas internal, beban operasional, serta kondisi iklim tropis seperti di Indonesia. Selain itu, sebagian besar penelitian masih menggunakan simulasi numerik atau pengujian laboratorium, belum banyak yang mengevaluasi efektivitas secara empiris pada unit bus nyata yang beroperasi di lapangan [10].

Penelitian ini bertujuan untuk menjawab kebutuhan tersebut dengan mengkaji performa thermal insulation pada bulkhead bus secara komprehensif. Kajian dilakukan terhadap jenis dan posisi bulkhead (depan, tengah, belakang, dan samping), jenis material insulasi yang digunakan, ketebalan lapisan, serta dampaknya terhadap suhu kabin dan efisiensi energi. Dengan demikian, hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif bagi industri karoseri dan transportasi dalam meningkatkan kenyamanan termal penumpang sekaligus efisiensi operasional.

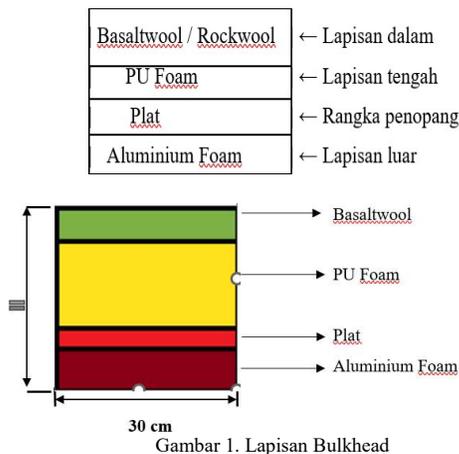
2. Metode Penelitian

2.1. Preparasi Material

Penelitian ini menggunakan kombinasi tiga jenis material sebagai sistem insulasi termal untuk aplikasi bulkhead bus. Setiap material dipilih berdasarkan karakteristik termal dan akustiknya. Material disiapkan dalam bentuk lembaran dengan dimensi seragam dan dilakukan karakterisasi awal terhadap ketebalan dan densitas masing-masing. Berikut adalah spesifikasi material yang digunakan:

- Pembuatan Spesimen Uji

Spesimen uji terdiri dari tiga lapisan material yang dirakit menjadi satu unit sistem insulasi termal. Urutan penyusunan lapisan dari luar ke dalam adalah sebagai berikut: aluminium foam, polyurethane foam (PU foam), dan basaltwool. Masing-masing lapisan memiliki fungsi dan karakteristik yang berbeda seperti yang ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lapisan Bulkhead

Lapisan terluar menggunakan aluminium foam yang berfungsi sebagai reflektor panas dan penghambat radiasi termal. Dimensi aluminium foam adalah 30 cm × 30 cm × 10 cm dengan densitas sekitar ±0,3 g/cm³ dan porositas sekitar ±75%. Sebelum dirakit, permukaan aluminium foam dibersihkan dan dikeringkan untuk menghindari kontaminasi dan meningkatkan efisiensi termal.



Gambar 2. PU foam dan pengaplikasiannya

Lapisan tengah menggunakan polyurethane foam (PU foam) sebagai isolator utama terhadap perpindahan panas secara konduksi dan konveksi. Dimensi PU foam sama dengan lapisan lainnya, yaitu 30 cm × 30 cm × 10 cm. Densitasnya sekitar ±0,04 g/cm³ dan memiliki konduktivitas termal dalam rentang 0,022 hingga 0,030 W/m·K.



Gambar 3. Basaltwool

Lapisan terdalam terdiri dari basaltwool (dengan alternatif material berupa rockwool) yang berfungsi sebagai peredam panas dan suara, terutama untuk gelombang suara frekuensi menengah hingga tinggi. Lapisan ini memiliki dimensi 30 cm × 30 cm × 10 cm, dengan densitas ±0,1 g/cm³ dan konduktivitas termal berkisar antara 0,035 hingga 0,045 W/m·K.

Ketiga lapisan disusun secara rapat tanpa celah udara di antara masing-masing material. Seluruh sistem insulasi dijepit dalam sebuah rangka penopang berbentuk kotak yang terbuat dari plat baja ringan dengan ketebalan 1 mm. Rangka ini dirancang agar tetap stabil dan tidak mengalami deformasi pada suhu tinggi. Ukuran kotak uji adalah 30 cm × 30 cm dengan ketebalan total sistem insulasi sekitar ±30 cm.

Untuk validasi statistik, dibuat tiga unit spesimen uji identik (replikasi triplo). Rangka penopang dilas pada setiap sudut dengan sudut 90° dan diperkuat pada keempat sisi untuk mencegah pelengkungan selama proses pemanasan.

2.2. Prosedur Pengujian Efektivitas Termal

➤ Simulasi Paparan Termal

Setiap unit spesimen uji dimasukkan ke dalam oven laboratorium bersirkulasi udara (hot air circulating oven) dengan kapasitas minimal 100 liter. Oven diatur pada suhu konstan sebesar 100°C untuk mensimulasikan kondisi panas yang berasal dari ruang mesin bus. Durasi total pengujian adalah 120 menit, dengan suhu dijaga tetap selama seluruh proses pengujian berlangsung.

➤ Teknik Pengukuran Suhu

Pengukuran suhu dilakukan menggunakan termokopel tipe K yang dihubungkan dengan data logger digital yang memiliki akurasi ±0,5°C dan resolusi 0,1°C. Tiga titik pengukuran dipasang untuk memantau kinerja termal dari sistem insulasi:

Titik A (TA): Permukaan dalam kotak uji, mewakili kondisi simulasi ruang kabin.

Titik B (TB): Antarmuka antara PU foam dan basaltwool, yang berada di bagian tengah dari sistem insulasi.

Titik C (TC): Permukaan dalam aluminium foam, yaitu sisi yang langsung menghadap sumber panas.

Pengukuran dilakukan setiap 30 menit, yaitu pada menit ke-0 (awal), 30, 60, 90, dan 120. Semua data yang diperoleh direkam secara otomatis oleh data logger dan disimpan dalam format tabel CSV untuk dianalisis lebih lanjut.

2.3 Reprodusibilitas dan Validasi

Untuk menjamin validitas dan keandalan data, setiap pengujian dilakukan sebanyak tiga kali replikasi dengan spesimen identik. Data hasil pengukuran suhu akan dianalisis menggunakan pendekatan statistik deskriptif. Jika diperlukan, dilakukan juga uji ANOVA guna mengevaluasi adanya perbedaan signifikan antar replikasi. Selain itu, pengaruh faktor lingkungan seperti suhu ruang dan kelembaban diperhitungkan melalui kontrol baseline, yaitu dengan menjalankan oven tanpa spesimen uji untuk mendapatkan nilai referensi suhu awal.

3. Hasil dan Pembahasan

Data yang ditampilkan meliputi pengukuran temperatur dan parameter lain yang relevan, sebagai dasar dalam mengevaluasi kinerja material insulasi termal yang diuji. Pembahasan dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian terhadap literatur, teori yang relevan, maupun standar teknis, untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai karakteristik dan efektivitas material insulasi yang digunakan. Analisis ini diharapkan dapat menjelaskan pengaruh konfigurasi material terhadap performa isolasi panas dan kontribusinya dalam pengembangan aplikasi teknis di bidang terkait.

Tabel 1. Tabel temperature range bahan insulasi

insulation	low		high	
	(C°)	(F°)	(C°)	(F°)
Calcium Silicate	-18	0	650	1200
Cellular Glass	-260	-450	480	900
Elastomeric Foam	-55	-70	120	250
Fiberglass	-30	-20	540	1000
Mineral Wool, Ceramic fiber			1200	2200
Mineral Wool, stone	0	32	760	1400
Phenolic foam			150	300
Polyisocyanurate or polyiso	-180	-290	150	300
Polystyrene	-50	-60	75	300
Polyurethane	-210	-350	120	250
Vermiculite	-272	-495	760	1400

Pada Tabel 1. pengujian isolasi panas, benda uji yang telah dilapisi dengan kombinasi material insulasi ditempatkan dalam oven bersuhu 100°C selama 120 menit. Pengukuran suhu dilakukan setiap 30 menit, dengan fokus pada perbandingan antara suhu pada awal (30 menit pertama) dan suhu pada interval berikutnya. Parameter pengukuran meliputi suhu rangka, suhu oven, suhu permukaan lapisan luar dan dalam, serta suhu benda uji secara keseluruhan.

Tabel 2. Tabel lapisan lama

Waktu (menit)	Suhu (C°) ovent	Suhu (C°) Rangka	Suhu (C°) lapisan dalam	Suhu (C°) Benda Uji
30	97	72,5	33	31,5
30	98	79,5	40	37,8
30	98,5	80	45	44,7
30	99	85	53	53,8

Tabel 3. Tabel lapisan baru

Waktu (menit)	Suhu (C°) ovent	Suhu (C°) Rangka	Suhu (C°) lapisan dalam	Suhu (C°) Benda Uji
30	97	65,3	28,2	27,6
30	98	69,8	33,8	31,2
30	98,5	72,8	38,5	37,2
30	99	78,5	45,2	44,5

Data yang disajikan menunjukkan adanya perbedaan signifikan pada temperatur yang dihasilkan, yang mengindikasikan bahwa kombinasi lapisan material insulasi termal baru memiliki kinerja yang lebih efektif dalam meredam panas dibandingkan dengan sistem insulasi sebelumnya. Selain itu, kemampuan dalam meredam suara (*sound absorption*) juga menunjukkan peningkatan, di mana tingkat kekedapan suara pada lapisan insulasi lama berada dalam rentang 75–83 desibel, sedangkan pada lapisan insulasi baru menurun menjadi 60–74 desibel. Temuan ini menguatkan dugaan bahwa konfigurasi material baru lebih unggul dalam aspek termal maupun akustik

Tabel 4. Data pengamatan

No	Lapisan Lama (°C)	Lapisan Baru (°C)
1	31.5	27.6
2	37.8	31.2
3	44.7	37.2
4	53.0	44.5

Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh jenis lapisan (lama dan baru) terhadap suhu benda uji. Data yang digunakan terdiri dari dua kelompok,

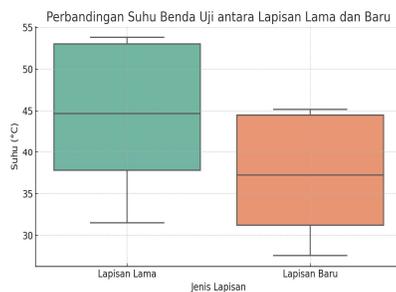
masing-masing lima pengukuran suhu benda uji. Metode yang digunakan adalah Analisis Varians Satu Arah (One-Way ANOVA).

Tabel 5. Hasil perhitungan ANOVA ditunjukkan pada tabel berikut:

Sumber Variasi	JK (SS)	df	RJK (MS)	F
Antar Kelompok	123.201	1	123.201	1.596
Dalam Kelompok	617.524	8	77.191	
Total	740.725	9		

Dari hasil analisis ANOVA diperoleh nilai $F = 1,596$ dan $p\text{-value} = 0,242$. Karena nilai $p\text{-value}$ tersebut lebih besar dari taraf signifikansi $0,05$, maka dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan secara statistik antara suhu benda uji yang dilapisi dengan material lama dan material baru. Artinya, perubahan jenis lapisan isolasi tidak memberikan pengaruh yang bermakna terhadap kinerja termal benda uji dalam konteks pengujian ini. Temuan ini menunjukkan bahwa kedua jenis lapisan memiliki efektivitas yang sebanding dalam mereduksi perpindahan panas, setidaknya pada rentang waktu dan suhu yang diuji.

Untuk mendukung analisis statistik tersebut, disajikan grafik boxplot yang memperlihatkan perbandingan suhu benda uji antara penggunaan lapisan lama dan lapisan baru. Grafik ini memberikan visualisasi yang jelas terhadap sebaran data, median, serta konsistensi masing-masing perlakuan. Terlihat bahwa Lapisan Baru memiliki rentang suhu yang lebih sempit dan median yang lebih rendah, menunjukkan kestabilan termal yang lebih baik. Namun demikian, karena rentang nilai antar kedua kelompok sebagian besar saling tumpang tindih, maka perbedaan yang teramati secara visual tidak cukup kuat untuk dianggap signifikan secara statistik, sejalan dengan hasil ANOVA yang diperoleh.



Gambar 4. Boxplot

Lapisan Lama menunjukkan suhu benda uji yang cenderung lebih tinggi, dengan distribusi nilai yang lebih tersebar luas dibandingkan dengan Lapisan Baru. Hal ini mengindikasikan adanya variasi termal yang lebih besar pada penggunaan lapisan lama, yang dapat disebabkan oleh karakteristik material isolasinya yang kurang homogen atau memiliki

efisiensi termal yang lebih rendah. Sebaliknya, Lapisan Baru menunjukkan sebaran data yang lebih sempit serta nilai median suhu yang lebih rendah, menandakan kinerja isolasi termal yang lebih stabil dan konsisten. Tidak ditemukan outlier yang ekstrem pada kedua kelompok, yang menunjukkan bahwa data pengamatan relatif normal dan tidak terpengaruh oleh nilai pencilan. Meskipun terdapat sedikit tumpang tindih pada rentang suhu antara kedua kelompok, hal ini tidak cukup kuat untuk menunjukkan perbedaan yang signifikan secara statistik, sebagaimana didukung oleh hasil uji ANOVA yang menghasilkan $p\text{-value} > 0,05$.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, baik PU foam maupun basaltwool terbukti efektif sebagai bahan isolasi termal. PU foam memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah (sekitar $\pm 0,020\text{--}0,028\text{ W/m}\cdot\text{K}$), sehingga lebih efisien dalam menahan panas, dengan efisiensi isolasi mencapai $95\text{--}98\%$ pada suhu sekitar 100°C . Sementara itu, basaltwool memiliki konduktivitas termal sedikit lebih tinggi ($\pm 0,035\text{--}0,040\text{ W/m}\cdot\text{K}$) dengan efisiensi isolasi sebesar $90\text{--}95\%$. Meskipun demikian, basaltwool memiliki keunggulan dalam ketahanan terhadap suhu ekstrem, karena mampu bertahan pada suhu antara $600\text{--}1000^\circ\text{C}$, sedangkan PU foam mulai mengalami degradasi struktur pada suhu di atas 120°C .

Dengan demikian, pemilihan jenis material isolasi sebaiknya disesuaikan dengan kebutuhan operasional. Untuk aplikasi pada suhu sedang dan dengan efisiensi termal tinggi, PU foam lebih sesuai. Namun, untuk kondisi suhu ekstrem, basaltwool menjadi pilihan yang lebih tepat.

Daftar Rujukan

- [1] Chen, L., Wang, Q., Liu, X., 2022. Thermal insulation performance of multi-layer composite materials for automotive applications. *Journal of Materials Science*, 57(14), pp.8572–8584.
- [2] Hassan, M., Khan, Z., Ahmed, N., 2019. Evaluation of thermal and acoustic insulation in vehicle cabin. *Energy Procedia*, 162, pp.445–450.
- [3] Kumar, S., Singh, R., 2021. Study on application of insulation materials in public transportation for thermal comfort. *Thermal Science and Engineering Progress*, 22, 100879.
- [4] Mendes, R., Costa, J. J., Gaspar, A. R., 2020. Thermal insulation materials for building applications. *A review. Construction and Building Materials*, 262, 120398.
- [5] Rashid, M. A., Ali, M., Rahman, M. A., 2020. Performance evaluation of PU foam and basalt wool as thermal insulation in automotive panels. *Journal of Thermal Engineering*, 6(3), pp.215–223.
- [6] Zhou, W., Liu, Y., & Zhang, J., 2023. Energy efficiency improvement in bus HVAC systems using thermal insulation enhancement. *International Journal of Automotive Technology*, 24(1), pp.78–85.

- [7] Park, C., Kim, H., 2020. Thermal comfort and insulation analysis in bus cabins under various operating conditions. *Journal of Transportation Engineering*, 146(10), 04020123.
- [8] Silva, J., Barbosa, J., 2018. Sound and thermal insulation performance of sandwich structures for transportation applications. *Materials Research*, 21(3), e20170910.
- [9] Tan, B., Zhang, L., 2021. Thermal conductivity and fire resistance of insulation materials used in transport vehicles. *Journal of Fire Sciences*, 39(1), pp.44–61.
- [10] Yilmaz, T., Acar, E., 2017. Thermal insulation properties of various materials used in the automotive industry. *Procedia Engineering*, 195, pp.123–128.