

**Rancang Bangun Alat Uji Resistansi Termal dan Aplikasinya untuk Analisis
Sifat Termal Bata Ringan Berbasis Serat Tandan Sawit Campuran Aspal
Penetrasi**

(Skripsi)

Oleh :

Muhammad Revi Tirtajaya

2115021016



**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2026

ABSTRAK

RANCANG BANGUN ALAT UJI RESISTANSI TERMAL DAN APLIKASINYA UNTUK ANALISIS SIFAT TERMAL BATA RINGAN BERBASIS SERAT TANDAN SAWIT CAMPURAN ASPAL PENETRASI

Oleh

Muhammad Revi Tirtajaya

Penelitian ini bertujuan untuk merancang bangun instrumen pengujian resistansi termal menggunakan metode *steady-state* berbasis mikrokontroler serta menganalisis karakteristik termal bata ringan inovasi berbahan serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan campuran aspal penetrasi. Perangkat uji dikembangkan menggunakan sensor suhu DS18B20 dan sensor daya PZEM-004T yang diintegrasikan dengan Arduino sebagai unit pemroses data. Proses validasi alat dilakukan dengan menguji bata ringan *Autoclaved Aerated Concrete* (AAC) komersial sebagai material kontrol, menghasilkan faktor koreksi (*correction factor*) sebesar 0.253 untuk kompensasi rugi panas (*heat loss*). Hasil pengujian menunjukkan bahwa spesimen inovasi terbaik, yaitu Sampel 4, memiliki nilai konduktivitas termal (k) sebesar 0.159 W/m.K. Nilai ini menunjukkan performa yang kompetitif karena mendekati kemampuan isolasi bata AAC standar (0,140 W/m.K). Melalui simulasi termodinamika pada hunian Tipe 60, pengaplikasian material Sampel 4 terbukti mampu mereduksi beban termal bangunan hingga 59.2% dibandingkan bata CLC konvensional. Inovasi ini memberikan potensi penghematan biaya listrik operasional AC sebesar Rp 770343,00 per bulan, sekaligus membuktikan potensi limbah serat sawit sebagai material bangunan hijau yang efisien secara termal dan ekonomis.

Kata kunci: Alat uji resistansi termal, Bata ringan, Serat tandan sawit, Aspal penetrasi, Konduktivitas termal.

ABSTRACT

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A THERMAL RESISTANCE TESTING DEVICE AND ITS APPLICATION FOR ANALYZING THE THERMAL PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CLAY BASED ON PALM FIBER MIXTURE WITH PENETRATING ASPHALT

By

Muhammad Revi Tirtajaya

This research aims to design and construct a thermal resistance testing instrument using a microcontroller-based steady-state method and to analyze the thermal characteristics of innovative lightweight bricks made from oil palm empty fruit bunch (EFB) fiber mixed with penetration asphalt. The testing device was developed using DS18B20 temperature sensors and a PZEM-004T power sensor integrated with Arduino as the data processing unit. The tool validation process was conducted by testing commercial Autoclaved Aerated Concrete (AAC) bricks as control material, resulting in a correction factor of 0.253 for heat loss compensation. The experimental results showed that the best innovative specimen, Sample 4, possessed a thermal conductivity (k) value of 0.159 W/m.K. This value demonstrates competitive performance as it closely approaches the insulation capability of standard AAC bricks (0.140 W/m.K). Through thermodynamic simulation on a Type 60 dwelling, the application of Sample 4 material was proven to reduce the building's thermal load by up to 59.2% compared to conventional CLC bricks. This innovation provides a potential saving in AC operational electricity costs of Rp770343.00 per month, while also demonstrating the potential of palm fiber waste as a thermally efficient and economical green building material.

Keywords: *Thermal resistance testing tool, Lightweight brick, Palm empty fruit bunch fiber, Penetration asphalt, Thermal conductivity.*

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Jakarta pada 21 Agustus 2003, anak tunggal dari pasangan Bapak Prasetyo Indriawan dan Ibu Rininta OKtavia. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di MI Plus Annur (2015), SMP Negeri 5 Bekasi (2018), dan SMA Negeri 4 Bekasi (2021). Pada tahun yang sama, penulis diterima sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Lampung melalui SNMPTN.

Selama kuliah, penulis aktif di organisasi, menjadi anggota divisi akademik HIMATEM Universitas Lampung (2022/2023) dan anggota divisi humas HIMATEM Universitas Lampung (2023/2024). Penulis juga mengikuti program magang di PT. PAL Indonesia, serta Magang Program Kompetisi Kampus Merdeka (PKKM) Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung di PT. SKF Indonesia.

Penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di PT. PAL Indonesia pada tahun 2024 dengan judul “*Radiography Test Pada Sambungan Pengelasan Tube Sheet Dengan Side Skirt High Pressure Heater*” 3 PLTU Labuan Unit 2 Di PT. PAL Indonesia. Pada tahun 2025, penulis melakukan penelitian skripsi dengan judul “Rancang Bangun Alat Uji Resistansi Termal dan Aplikasinya untuk Analisis Sifat Termal Bata Ringan Berbasis Serat Tandan Sawit Campuran Aspal Penetrasi” di bawah bimbingan bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc. dan bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. serta pembahas bapak Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

Skripsi : RANCANG BANGUN ALAT UJI RESISTANSI
TERMAL DAN APLIKASINYA UNTUK
ANALISIS SIFAT TERMAL BATA RINGAN
BERBASIS SERAT TANDAN SAWIT
CAMPURAN ASPAL PENETRASI

Nama Mahasiswa : Muhammad Revi Tirtajaya

Nomor Pokok Mahasiswa : 2115021016

Program Studi : Teknik Mesin

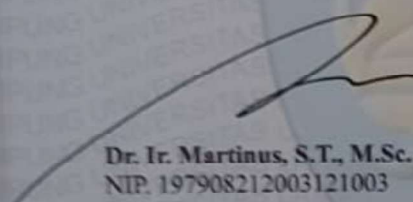
Fakultas : Teknik

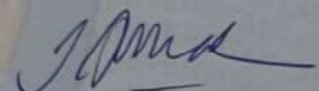
MENYETUJUI

Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

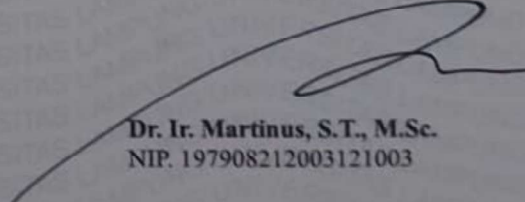

Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.
NIP. 196908011999031002

MENGETAHUI

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ketua Program Studi S1


Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP. 197408162000121001


Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.
NIP. 197908212003121003

MENGESAHKAN


1. Tim Penguji

Ketua Penguji : Dr. Ir. Martinus, S.T., M.Sc.

Anggota Penguji : Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T.

Penguji Utama : Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung


Dr. Akhmad Herison, S.T., M.T.
NIP. 196910302000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 28 April 2026

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul "Rancang Bangun Alat Uji Resistansi Termal dan Aplikasinya untuk Analisis Sifat Termal Bata Ringan Berbasis Serat Tandan Sawit Campuran Aspal Penetrasi" ini dibuat sendiri oleh penulis dan bukan hasil plagiat sebagaimana diatur dalam pasal 36 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan peraturan Rektor no 13. Tahun 2019.

Bandar Lampung, 24 April 2026

Pembuat Pernyataan,

A handwritten signature in black ink is written over a yellow rectangular stamp. The stamp features the Garuda Pancasila emblem and the text "10.000" on the left, "KUTRAJ TAMPIL" in the center, and "10.000 RUPIAH" at the bottom.

Muhammad Revi Tirtajaya
NPM. 2115021016

MOTTO

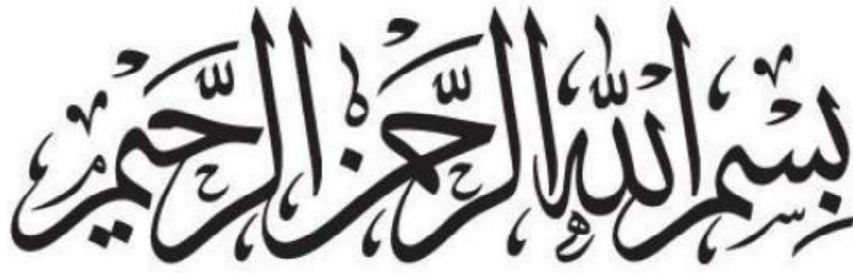
“It don't matter if you win by an inch or a mile. Winning's winning.”

Dominic Toretto

“Kita bisa membuat rencana untuk sekian tahun ke depan, tapi percuma jika selesai di tengah jalan”

The Adams

HALAMAN PERSEMBAHAN



Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala rahmat, karunia, dan kemudahan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Sholawat dan salam semoga senantiasa tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW, suri teladan sepanjang zaman.

KARYA TULIS INI PENULIS PERSEMBAHKAN KEPADA

Mama dan Papa

Penulis menyampaikan rasa hormat dan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada keluarga, yang senantiasa menjadi sumber kekuatan dan inspirasi.

Dukungan moral, do'a, perhatian, serta pengorbanan yang diberikan tanpa henti telah menjadi fondasi penting dalam setiap langkah yang penulis tempuh. Segala pencapaian dalam karya ini tidak terlepas dari peran dan kontribusi mereka yang tidak ternilai.

Teknik Mesin Angkatan 2021

Ucapan terimakasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan seperjuangan yang telah memberikan dukungan, semangat, dan kerja sama selama masa perkuliahan.

Kebersamaan dalam menghadapi berbagai tantangan akademik, berbagi pengetahuan, serta paling memotivasi menjadi bagian penting dalam proses pencapaian ini.

Serta

Almamater, Universitas Lampung dan Jurusan Teknik Mesin

SANWACANA

Puji Syukur saya ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala nikmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Alat Uji Resistansi Termal dan Aplikasinya untuk Analisis Sifat Termal Bata Ringan Berbasis Serat Tandan Sawit Campuran Aspal Penetrasi” dapat diselesaikan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Universitas Lampung.

Penulis sejatinya menyadari akan kekurangan atau keterbatasan, pengetahuan, pengalaman dan kemampuan yang Penulis miliki. namun terlepas dari itu, Penulis memiliki harapan agar tulisan ini dapat bermanfaat bagi berbagai macam pihak dan dapat memberi sumbangan pemikiran bagi bidang akademis dan bidang lainnya, melalui kesempatan ini pula Penulis ingin menyampaikan banyak terima kasih atas kritikan, saran, bimbingan, serta petunjuk-petunjuk dari semua pihak yang sangat Penulis harapkan guna kelengkapan dan penyempurnaan Skripsi ini. Penulis tidak akan berhasil dengan baik tanpa ada bantuan dan dukungan dari berbagai pihak yang telah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu pada kesempatan ini Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada:

1. Bapak Dr. Hi. Ahmad Herison, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ahmad Su'udi, S.T., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung serta Dosen Pembahas Skripsi saya yang senantiasa memberikan masukan selama proses skripsi saya.
3. Bapak Dr. Ir. Martinus, S.T., M.T., M.Sc. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Lampung serta Dosen Pembimbing Utama Skripsi saya yang selalu memberikan saran, arahan, masukan serta pelajaran yang sangat bermanfaat untuk saya.
4. Bapak Dr. Jamiatul Akmal, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua yang telah membimbing dan memberikan ilmu selama pelaksanaan tugas akhir dan selama perkuliahan.

5. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah membimbing penulis selama melaksanakan perkuliahan serta membantu segala permasalahan akademik yang dialami penulis.
6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung yang tidak bisa disebutkan satu persatu namanya, terima kasih atas ilmu yang telah diberikan. Semoga kelak ilmu yang telah saya dapatkan bermanfaat.
7. Kepada kedua orang tua penulis yang selalu mendukung, mendoakan, memberi motivasi, merestui, menyemangati, dan memberikan segalanya dengan tulus dan ikhlas dari mula perkuliahan sampai pada tugas akhir ini selesai ditulis untuk menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Mesin.
8. Terkhusus saya ucapkan untuk diri saya sendiri sebagai penulis tugas akhir ini yang mampu bertahan menyelesaikan kewajiban sebagai mahasiswa sampai tugas akhir ini ditulis khususnya selama satu tahun ke belakang. Harapan kedepannya agar semua kesalahan yang ada bisa dijadikan pembelajaran dan apa yang didapat bisa bermanfaat.
9. Teman diskusi sekaligus keluarga diperantauan, Nabiil, Fitra, Sajid, Santri, Roni, Ardika, dan Abel, yang banyak membantu, mendukung, dan menyemangati penulis sehingga tugas akhir ini bisa terselesaikan sampai akhir.
10. Keluarga besar Investor CDID, Reza Ramadhan, Saktina Saputra, Jordan Rizki dan Fatih Izzuddin yang selalu membersamai seluruh proses penelitian ini dari awal sampai akhir. Bersedia menemani, menghibur dan memberikan semangat serta dukungan kepada penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
11. Teman-teman laboratorium mekanika struktur yang tidak bisa saya sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa isi skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan dan masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis sangat mengharapkan saran dan kritik dari semua pihak yang bersifat membangun dalam rangka penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca. Aamiin.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Bandar Lampung, 23 April 2026

Penulis,

Muhammad Revi Tirtajaya

NPM. 2115021034

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xvi
.....	xvii
DAFTAR TABEL.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	2
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Bata Ringan Dengan Inti Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Dan Aspal Penetrasi	6
2.2. Pemanfaatan Limbah Serat Kelapa Sawit Dalam Bata Ringan	7
2.3. Binder Material dalam Bata Ringan.....	9
2.4. Konduktivitas Termal pada Material Bangunan	10
2.5. Penentuan Laju Aliran Panas (Q) Pada Metode <i>Steady-State</i>	11
2.6. Teknik Pengujian Konduktivitas Termal pada Bata Ringan.....	12
2.6.1. Metode <i>Steady-State</i>	12
2.6.2. Metode <i>Transient Hot Wire</i>	13
2.6.3. Metode <i>Heat Flow Meter</i>	13
2.7. Sensor dan Komponen Elektronika.....	14
2.8.1. Sensor Panas DS18B20.....	14
2.8.2. Arduino Uno	15

2.8.3. Kabel <i>Jumper (Dupont Wire)</i>	16
2.8. Hukum Kekekalan Energi.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	18
3.1. Tempat & Waktu Pelaksanaan.....	18
3.2. Alat dan Bahan.....	18
3.3. Kriteria Desain	21
3.4. Diagram Alir	22
3.4.1. Diagram alir rancang bangun alat uji resistansi termal.....	22
3.4.2. Diagram alir validasi alat uji resistansi termal.....	23
3.4.3. Diagram alir pengujian resistansi termal bata ringan berbasis serat tandan sawit campuran aspal penetrasi	24
3.5. Desain Struktur Spesimen Bata Ringan Dengan Inti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Campuran Aspal Penetrasi.....	25
3.6. Skema Pengujian.....	28
3.7. Metode Pengambilan Data	32
3.8. Metode Analisis Data.....	33
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1. Hasil Rancang Bangun Alat Uji Resistansi Termal	35
4.2. Hasil Fabrikasi dan Perakitan Komponen (<i>Assembly</i>)	37
4.3. Validasi Alat Uji Dengan Material Standar (Bata Ringan AAC)	39
4.4. Hasil Pengujian Termal Spesimen Bata Ringan Dengan Inti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dan Aspal Penetrasi.....	42
4.5. Pembahasan	47
4.5.1. Studi Kasus Implementasi: Analisis Efisiensi Energi pada Hunian Tipe 60	50
BAB V PENUTUP.....	55
5.1. Kesimpulan.....	55

5.2. Saran.....	56
DAFTAR PUSTAKA	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Kaki sensor DS18B20	14
Gambar 2. 2 Kabel <i>jumper</i>	17
Gambar 3. 1 Diagram alir rancang bangun alat uji resistansi termal	22
Gambar 3. 2 Diagram alir validasi alat uji resistansi termal	24
Gambar 3. 3 Diagram alir pengujian resistansi termal bata ringan berbasis serat tandan sawit campuran aspal penetrasi	25
Gambar 3. 4 Bagian inti bata ringan	26
Gambar 3. 5 Lapisan 1 bata ringan	27
Gambar 3. 6 Dimensi bata ringan	27
Gambar 3. 7 Spesimen uji resistansi termal bata ringan	28
Gambar 3. 8 Skema pengujian tampak depan	29
Gambar 3. 9 Skema pengujian tampak belakang	29
Gambar 3. 10 Gambar teknik alat uji resistansi termal	30
Gambar 3. 11 Skema pengujian resistansi termal	31
Gambar 4. 1 Tampilan fisik alat uji resistansi termal	35
Gambar 4. 2 Rangkaian SCR voltage regulator, heater, PZEM 004T dan Arduino UNO	37
Gambar 4. 3 Grafik Perbandingan Rata-rata Resistansi Termal (R) Seluruh Spesimen	48
Gambar 4. 4 Gambar teknik rumah tipe 60	51

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Variasi Komposisi Spesimen.....	20
Tabel 3. 2 Parameter Pengambilan Data	33
Tabel 3. 3 Parameter Hasil Analisis Data.....	34
Tabel 4. 1 spesifikasi alat uji resistansi termal.....	36
Tabel 4. 2 hasil pengukuran resistansi termal bata ringan AAC	41
Tabel 4. 3 hasil pengukuran resistansi termal bata ringan dengan inti tandan kongsong kelapa sawit (TTKS) dan aspal penetrasi	44

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sektor konstruksi nasional saat ini menghadapi tuntutan ganda akibat pesatnya pertumbuhan infrastruktur perumahan. Industri tidak hanya membutuhkan material yang kokoh, tetapi juga harus ekonomis dan berkelanjutan. Batu bata ringan atau *lightweight brick* telah menjadi solusi dominan karena keunggulan bobotnya yang rendah serta efisiensi pemasangan yang tinggi. Namun, ketergantungan pada bahan baku konvensional seperti semen dan pasir silika memunculkan isu biaya produksi yang tinggi serta dampak lingkungan akibat eksploitasi tambang material alam secara terus-menerus.

Di sisi lain, posisi Indonesia sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia menciptakan fenomena paradoks terkait limbah biomassa. Limbah serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) tersedia dalam volume masif namun belum dimanfaatkan secara optimal (*gap fenomena*). Padahal, serat TKKS memiliki struktur alami yang ringan dan berongga. Karakteristik ini sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengisi atau *filler* pada material konstruksi. Pemanfaatan limbah ini menawarkan solusi ganda, yakni mereduksi timbunan limbah pertanian sekaligus menciptakan alternatif material bangunan yang lebih ramah lingkungan.

Dalam konteks bangunan di wilayah tropis, kualitas material dinding tidak hanya ditentukan oleh kekuatan mekanisnya. Parameter yang tidak kalah krusial adalah resistansi termal, yaitu kemampuan material dalam menghambat laju perpindahan panas dari luar ke dalam ruangan. Penggunaan material dengan konduktivitas termal rendah dapat meminimalkan beban kerja mesin pendingin udara (AC) dan meningkatkan

efisiensi energi bangunan secara signifikan. Beberapa studi terdahulu telah mengindikasikan bahwa inkorporasi serat organik ke dalam campuran beton dapat menurunkan kemampuan hantar panas material tersebut sehingga berfungsi sebagai isolator pasif.

Meskipun potensi material inovatif tersebut sangat besar, proses validasi performanya seringkali terhambat oleh masalah instrumentasi (*Gap Riset*). Peralatan uji termal standar internasional seperti *Guarded Hot Plate* (GHP) yang mengacu pada standar ASTM C177 memiliki biaya investasi yang sangat tinggi dan operasional yang kompleks. Kondisi ini menyebabkan terbatasnya akses peralatan uji terkalibrasi di laboratorium tingkat universitas, yang pada akhirnya memperlambat laju inovasi material baru (Subir dkk., 2022). Oleh karena itu, pengembangan alat uji yang terjangkau atau *low-cost* menjadi kebutuhan mendesak untuk memfasilitasi riset di bidang perpindahan panas.

Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini difokuskan pada perancangan dan validasi prototipe alat uji resistansi termal menggunakan metode *steady-state*, yaitu suatu kondisi pengukuran di mana distribusi suhu sistem telah stabil dan tidak berubah terhadap waktu. Alat ini dirancang dengan prinsip modular dan ekonomis agar dapat dioperasikan menggunakan sumber daya laboratorium standar tanpa mengurangi akurasi prinsip termodinamika. Sebagai studi kasus untuk membuktikan kinerja alat, prototipe ini akan diaplikasikan untuk menganalisis sifat termal bata ringan dengan inti serat TKKS dan aspal penetrasi. Pendekatan ini diharapkan menghasilkan data empiris yang valid sekaligus menyediakan aset infrastruktur riset yang mendukung karakterisasi material bangunan berkelanjutan di masa depan (Kumar dkk., 2024).

1.2. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian yang dilakukan penulis antara lain:

1. Merancang dan membangun sebuah prototipe alat uji resistansi termal untuk material bangunan dengan metode *steady-state* berbasis mikrokontroler.

2. Melakukan validasi kinerja prototipe alat uji dengan analisis sifat termal bata ringan AAC (*Autoclaved Aerated Concrete*).
3. Menganalisis nilai konduktivitas serta resistansi termal bata ringan dengan inti serat tandan kosong kelapa sawit campuran aspal penetrasi sebagai pengikat (*binder*).
4. Melakukan analisis studi kasus implementasi bata ringan berbasis serat tandan sawit campuran aspal penetrasi.

1.3. Batasan Masalah

Agar penelitian ini memiliki ruang lingkup yang terarah dan konsisten, ditetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Fokus utama penelitian adalah pada proses rancang bangun (*design and build*) serta pengujian fungsionalitas alat uji resistansi termal.
2. Validasi akurasi alat dibatasi melalui metode perbandingan (*comparative method*) menggunakan material standar Bata Ringan AAC (*Autoclaved Aerated Concrete*) yang memiliki referensi konduktivitas termal stabil di pasaran.
3. Objek material yang dianalisis lebih lanjut meliputi bata ringan AAC sebagai kontrol dan bata ringan berbasis serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dengan pengikat aspal penetrasi sebagai material inovasi.
4. Kajian karakteristik material dibatasi secara spesifik pada aspek perpindahan panas, yaitu nilai konduktivitas termal (k) dan resistansi termal (R). Penelitian ini tidak mencakup pengujian sifat mekanik (seperti kuat tekan atau uji tarik) maupun sifat kimia material.
5. Spesimen uji yang digunakan dikondisikan memiliki dimensi kubus 10 cm x 10 cm x 10 cm.
6. Desain alat dan analisis perhitungan didasarkan pada asumsi idealisasi aliran panas konduksi satu dimensi (1D) yang melintasi ketebalan spesimen. Kehilangan panas ke arah radial diminimalkan secara teknis menggunakan isolator termal pada kotak uji (*guarded box*).
7. Sistem akuisisi data suhu (*data logging*) menggunakan mikrokontroler Arduino Uno dengan tiga buah sensor digital DS18B20 untuk T1 (sisi panas), T2 (sisi dingin) dan T3 ($T_{ambience}$ untuk *heat loss* keluar alat

uji). Pengendalian daya pemanas dilakukan menggunakan regulator tegangan analog (*Dimmer AC*), pengukuran daya panas (*heat input*) yang disuplai oleh elemen pemanas (*heater*) diukur secara digital menggunakan modul sensor PZEM-004T yang mencatat parameter Tegangan (V), Arus (A), Daya Aktif (W), *Power Factor* (PF), serta akumulasi Energi (Wh dan Joule).

8. Faktor lingkungan eksternal seperti fluktuasi suhu ruang, kelembaban udara, dan kecepatan angin selama proses pengambilan data dianggap konstan (*boundary condition*) dan tidak menjadi variabel bebas dalam analisis.

1.4. Sistematika Penulisan

Untuk dapat memberi gambaran mengenai apa saja yang di buat dalam menyusun laporan ini akan dijelaskan secara singkat mengenai isi dari setiap bab yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini memberikan penjelasan tentang latar belakang, tujuan penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memberikan referensi dan dasar teori yang berkaitan dengan penelitian antara lain batu bata ringan (*lightweight concrete bricks*), limbah tandan kelapa sawit, aspal penetrasi, pengujian dan lain sebagainya.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini menjelaskan tentang waktu melaksanakan penelitian, bahan penelitian, peralatan penelitian dan prosedur pelaksanaan penelitian.

BAB IV HASIL & PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil yang diperoleh dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB V PENUTUP

Pada bab ini berisi Kesimpulan dan saran-saran yang disampaikan dari penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan tentang referensi yang digunakan oleh penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

LAMPIRAN

Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Bata Ringan Dengan Inti Serat Tandan Kosong Kelapa Sawit Dan Aspal Penetrasi

Bata ringan dengan inti serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan aspal penetrasi merupakan inovasi material komposit konstruksi yang mengadopsi struktur berlapis atau *sandwich* untuk mengoptimalkan performa termal. Berbeda dengan bata ringan konvensional yang homogen, material ini terdiri dari bagian inti (*core*) yang berfungsi sebagai isolator utama dan bagian selimut (*skin*) yang memberikan kekuatan mekanis serta perlindungan fisik. Pendekatan komposit hibrida semacam ini, yang menggabungkan matriks polimer atau bitumen dengan penguat serat alami, telah terbukti secara ilmiah mampu meningkatkan sifat fungsional material, termasuk kemampuan isolasi panas, tanpa mengorbankan integritas struktural secara berlebihan (Mahardika dkk., 2024).

Bagian inti dari bata ringan ini memanfaatkan serat TKKS sebagai agregat pengisi utama karena karakteristik alaminya yang unggul sebagai material isolasi. Serat TKKS memiliki struktur morfologi yang berongga (seluler), densitas rendah, dan konduktivitas termal yang secara inheren rendah dibandingkan agregat mineral konvensional. Penelitian menunjukkan bahwa penambahan serat TKKS ke dalam matriks beton atau komposit dapat menurunkan densitas material secara signifikan sekaligus meningkatkan porositas, yang keduanya berkontribusi langsung pada penurunan laju perpindahan panas atau konduktivitas termal material tersebut.

Untuk mengikat serat-serat tersebut menjadi satu kesatuan inti yang solid, digunakan aspal penetrasi 60/70 sebagai bahan pengikat (*binder*). Aspal, yang merupakan material termoplastik berbasis bitumen, memiliki nilai konduktivitas termal yang jauh lebih rendah (kisaran 0.15–0.35 W/m·K) dibandingkan dengan semen Portland (kisaran 1.4–3.6 W/m·K) yang umum digunakan pada bata ringan standar. Penggunaan binder berbasis aspal tidak hanya berfungsi sebagai perekat yang kuat dan tahan air, tetapi juga menciptakan konduktivitas termal yang buruk antar partikel, sehingga secara efektif menghambat aliran panas yang mencoba menembus bagian inti bata (Górszczyk & Malicki, 2025).

Sinergi antara serat TKKS yang berongga dan matriks aspal yang isolatif menghasilkan komposit inti dengan performa termal yang superior dibandingkan material tunggalnya. Studi eksperimental pada material komposit berbasis serat alam menunjukkan bahwa kombinasi serat selulosa dengan matriks polimer (dalam hal ini aspal berfungsi mirip polimer termoplastik) dapat menurunkan konduktivitas termal secara signifikan seiring dengan penambahan volume serat. Hal ini menegaskan bahwa inti komposit serat-aspal ini dirancang secara spesifik untuk meminimalkan konduktivitas termal melalui pemanfaatan rongga udara mikro dalam serat dan sifat isolatif dari binder aspal.

2.2. Pemanfaatan Limbah Serat Kelapa Sawit Dalam Bata Ringan

Indonesia merupakan salah satu negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia. Di balik produktivitas tersebut, terdapat potensi besar limbah biomassa yang masih belum dimanfaatkan secara optimal, salah satunya adalah serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS). Limbah ini dihasilkan dalam jumlah besar setiap tahun dan umumnya dibuang atau dibakar, padahal secara struktur fisik, TKKS memiliki karakteristik ringan, berongga, serta berserat, yang memungkinkan penggunaannya sebagai bahan tambahan dalam material konstruksi ringan, termasuk bata ringan.

Penelitian oleh Futami dkk., (2021) menyebutkan bahwa serat TKKS mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang menjadikannya kuat dan tahan tarik. Sifat alami ini memungkinkan TKKS bertindak sebagai penguat dalam komposit berbasis semen, sekaligus memperbaiki sifat retak dan daya tahan beban tarik dari beton atau bata ringan. Selain itu, pemanfaatan limbah ini juga menjadi bagian dari upaya menciptakan material ramah lingkungan yang mendukung prinsip pembangunan berkelanjutan.

Lebih lanjut, Maynet dkk., (2021) menunjukkan bahwa sifat fisik dan mekanik dari komposit berbasis serat TKKS dapat meningkat signifikan apabila serat terlebih dahulu diberikan perlakuan awal seperti perendaman dalam air panas atau larutan alkali (NaOH). Perlakuan ini terbukti dapat menurunkan penyerapan air dan pembengkakan, serta meningkatkan modulus elastisitas dan kekuatan lentur papan semen yang diperkuat dengan TKKS. Hal ini menunjukkan bahwa stabilitas dimensi dan kinerja mekanik bata ringan dapat diperbaiki melalui pengolahan awal serat yang tepat. Studi oleh Zakaria & Soh, (2023) juga mengonfirmasi bahwa rasio campuran serat dan semen dapat mengurangi densitas material secara signifikan sambil mempertahankan sifat mekanik yang memadai untuk aplikasi non-struktural.

Penelitian yang dilakukan oleh (Li dkk., 2023) menunjukkan bahwa penambahan serat TKKS (OPEFB) menurunkan konduktivitas termal secara signifikan. Sebagai contoh, pada densitas 1000 kg/m^3 , beton busa tanpa serat memiliki konduktivitas termal 0.312 W/m.K , sedangkan dengan penambahan serat sepanjang 60mm, nilainya turun menjadi 0.255 W/m.K (penurunan sekitar 18%). Berdasarkan studi-studi tersebut, dapat disimpulkan bahwa limbah TKKS berpotensi tinggi sebagai material pengisi fungsional dalam pembuatan bata ringan. Sifatnya yang ringan, berserat, dan berongga tidak hanya mampu mengurangi densitas akhir produk, tetapi yang terpenting adalah secara signifikan meningkatkan performa isolasi termalnya. Berbagai penelitian telah menunjukkan penurunan nilai konduktivitas termal yang substansial dengan penambahan serat ini. Oleh karena itu, pemilihan TKKS

sebagai material studi kasus dalam penelitian yang bertujuan merancang alat uji resistansi termal ini sangatlah tepat dan relevan.

2.3. Binder Material dalam Bata Ringan

Dalam fabrikasi material bata ringan berbasis serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS), peran bahan pengikat (binder) bersifat fundamental. Binder berfungsi untuk menyatukan matriks serat dan agregat lainnya menjadi satu kesatuan komposit yang solid, stabil, serta memiliki karakteristik fisik dan termal yang diinginkan. Penelitian ini secara khusus menginvestigasi pengaruh dari jenis binder yang berbeda, yaitu pengikat hidrolis (semen) dan pengikat bitumen (aspal).

Semen Portland adalah pengikat hidrolis yang paling umum digunakan dalam industri konstruksi. Kekuatannya terbentuk melalui reaksi kimia dengan air (hidrasi) yang menghasilkan matriks Kalsium-Silikat-Hidrat (C-S-H) yang kaku dan memiliki kekuatan tekan tinggi. Namun, di balik kekuatannya, matriks semen memiliki konduktivitas termal yang relatif tinggi, yang menjadi salah satu faktor pembatas dalam aplikasi material isolasi. Berbagai studi menunjukkan bahwa konduktivitas termal material berbasis semen sangat dipengaruhi oleh densitas dan kadar airnya, namun secara inheren bersifat lebih konduktif dibandingkan banyak material polimer (Oyebisi & Alomayri, 2023).

Sebagai alternatif, aspal (bitumen) menawarkan karakteristik yang sangat berbeda. Sebagai material termoplastik dengan sifat viskoelastis, aspal berfungsi sebagai agen perekat dan *waterproofing* yang sangat baik. Aspal Penetrasi (*Penetration Grade Asphalt*) merupakan produk residu distilasi minyak bumi yang bersifat semi-padat pada suhu ruang. Untuk dapat berfungsi sebagai pengikat, aspal ini harus dipanaskan hingga temperatur tinggi (umumnya di atas 100°C) agar menjadi cair dan mampu menyelimuti agregat. Proses "campuran panas" (*hot mix*) ini, meskipun menghasilkan ikatan yang kuat setelah dingin, memerlukan input energi yang besar dan memiliki risiko keselamatan kerja yang lebih tinggi.

Pemilihan antara semen dan jenis aspal yang berbeda ini diperkirakan akan memberikan dampak signifikan tidak hanya pada metode fabrikasi, tetapi juga pada performa akhir produk, khususnya sifat termalnya. Material berbasis aspal secara konsisten menunjukkan konduktivitas termal yang lebih rendah dibandingkan material berbasis semen.

2.4. Konduktivitas Termal pada Material Bangunan

Konduktivitas termal (k) merupakan kemampuan inheren suatu material untuk menghantarkan panas. Dalam konteks material bangunan, nilai konduktivitas termal yang rendah sangat diinginkan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kenyamanan termal dalam ruangan. Material seperti bata ringan dirancang untuk memiliki keunggulan ini, yang utamanya dicapai melalui penciptaan struktur internal berpori yang dapat menghambat laju perpindahan panas.

Secara fundamental, perpindahan panas melalui material berpori seperti bata ringan terjadi melalui tiga mekanisme simultan: konduksi melalui matriks padat (binder dan serat), konveksi gas (udara) di dalam pori-pori, dan radiasi termal antar permukaan dinding pori. Untuk material dengan pori-pori yang sangat kecil, efek konveksi seringkali dapat diabaikan, sehingga konduksi dan radiasi menjadi dominan. Efektivitas sebuah material isolasi bergantung pada kemampuannya untuk meminimalkan ketiga mekanisme ini.

Dua faktor utama yang secara langsung mempengaruhi konduktivitas termal efektif pada beton ringan adalah densitas dan porositas. Terdapat hubungan yang berbanding terbalik antara kedua faktor ini dengan kemampuan isolasi; semakin rendah densitas material dan semakin tinggi volume porositasnya, maka semakin rendah nilai konduktivitas termalnya. Hal ini karena udara yang terperangkap di dalam pori memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah (sekitar $0.025 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), sehingga ia bertindak sebagai isolator yang efektif dan menghambat jalur konduksi panas melalui matriks padat.

Dalam konteks penelitian ini, jenis bahan pengikat (binder) memegang peranan krusial. Binder tidak hanya membentuk matriks padat tempat panas merambat, tetapi juga mempengaruhi struktur porositas akhir dari komposit.

Matriks yang dibentuk oleh semen Portland memiliki konduktivitas termal yang relatif tinggi (umumnya $>1.0 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), sedangkan matriks yang dibentuk oleh aspal secara signifikan lebih rendah. Sebuah ulasan komprehensif oleh (Demirtürk dkk., 2025) mengonfirmasi bahwa konduktivitas termal beton aspal berada pada rentang $0.7\text{--}1.5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, sementara beton semen berada pada rentang yang lebih tinggi, yaitu $1.4\text{--}3.6 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Hal ini mengimplikasikan bahwa substitusi atau penggunaan binder aspal berpotensi besar untuk menurunkan konduktivitas termal keseluruhan dari bata ringan.

Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa performa termal sebuah bata ringan inovatif adalah hasil dari interaksi kompleks antara konduktivitas termal bahan penyusunnya (serat dan binder) dan arsitektur mikrostruktur yang dihasilkannya (densitas dan porositas). Untuk mengevaluasi keberhasilan dari suatu formulasi material baru, pengukuran nilai konduktivitas termal secara akurat menjadi sebuah langkah yang mutlak diperlukan.

2.5. Penentuan Laju Aliran Panas (Q) Pada Metode *Steady-State*

Dalam pengujian konduktivitas termal menggunakan metode *steady-state*, penentuan laju aliran panas (Q) yang akurat menjadi sebuah langkah krusial yang setara pentingnya dengan pengukuran temperatur itu sendiri. Laju aliran panas, yang didefinisikan sebagai jumlah energi panas yang ditransfer melalui suatu material per satuan waktu (Watt), merupakan variabel fundamental dalam Hukum Konduksi Panas Fourier untuk menghitung nilai konduktivitas termal (k). Untuk memastikan validitas data, sistem pengujian harus dirancang sedemikian rupa hingga mencapai kondisi *steady-state*, di mana laju energi panas yang masuk ke dalam spesimen (Q_{in}) dari sumber pemanas seimbang dengan laju energi panas yang meninggalkannya (Q_{out}), sehingga gradien temperatur di seluruh bagian spesimen menjadi konstan dan tidak berubah terhadap waktu.

Pada penelitian ini yang memanfaatkan elemen pemanas listrik berupa hot plate, laju aliran panas (Q) dapat ditentukan secara presisi dengan mengukur

daya listrik yang dikonsumsi oleh elemen tersebut, berdasarkan prinsip bahwa hampir seluruh energi listrik akan dikonversi menjadi energi panas. Pengukuran daya listrik (P) dilakukan dengan mencatat nilai tegangan (V) dan arus (I) yang masuk ke pemanas, sehingga laju aliran panas dapat dihitung menggunakan rumus fundamental $Q = V \times I$. Namun, agar nilai Q ini dapat diasumsikan sebagai panas yang mengalir secara satu dimensi menembus spesimen, maka kebocoran panas (*heat loss*) ke arah radial harus diminimalkan secara signifikan melalui konstruksi kotak terisolasi (*guarded box*), sebuah pendekatan yang sangat penting dalam pengembangan alat uji *low-cost* untuk memastikan akurasi hasil pengukuran.

2.6. Teknik Pengujian Konduktivitas Termal pada Bata Ringan

Konduktivitas termal merupakan parameter penting dalam menentukan kemampuan material bangunan, seperti bata ringan, dalam menghantarkan panas. Pengujian konduktivitas termal bertujuan untuk mengetahui seberapa efisien material dalam mengisolasi atau menghantarkan panas, yang berdampak langsung pada kenyamanan termal dan efisiensi energi bangunan. Beberapa metode pengujian telah dikembangkan, masing-masing dengan kelebihan dan keterbatasannya. Berikut beberapa metode pengujian yang umum dilakukan:

2.6.1. Metode *Steady-State*

Metode *steady state* merupakan salah satu metode paling umum untuk mengukur konduktivitas termal pada material bangunan. Prinsip dasar metode ini adalah menjaga aliran panas yang stabil melalui material hingga perbedaan suhu antara dua sisi material menjadi konstan. Keadaan ini memastikan bahwa semua panas yang diterima satu sisi sama dengan panas yang keluar dari sisi lainnya.

Dalam penelitian ini, metode *steady state* dilakukan dengan memberikan laju aliran panas (daya) yang konstan pada satu sisi bata ringan menggunakan elemen pemanas, kemudian membiarkan sistem mencapai keseimbangan termal di mana temperatur T1 dan

T2 menjadi stabil. sementara dua buah sensor DS18B20 dipasang untuk mengukur perbedaan temperatur yang terjadi. Data suhu kemudian direkam menggunakan arduino UNO. Nilai konduktivitas termal dapat dicari dengan menggunakan rumus

$$k = \frac{Q \times L}{A \times \Delta T} \dots \dots \dots (2.1)$$

di mana:

- k = konduktivitas termal (W/m·K)
- Q = laju aliran panas (W)
- L = ketebalan sampel (m)
- A = luas permukaan sampel (m²)
- ΔT = perbedaan suhu antar permukaan (K)

Berdasarkan studi Gomes dkk., (2023), metode *steady state* memberikan hasil pengukuran yang akurat, khususnya pada material dengan struktur homogen dan kepadatan rendah seperti *lightweight aggregate concrete* (LWAC)

2.6.2. Metode *Transient Hot Wire*

Metode transient hot wire menggunakan kawat tipis yang dipanaskan dengan arus listrik, di mana peningkatan suhu kawat digunakan untuk menghitung konduktivitas termal material di sekitarnya. Kelebihan metode ini adalah pengukuran cepat dan cocok untuk material heterogen. Menurut Silva, (2021) metode transient mampu mendeteksi perubahan kecil dalam struktur termal material, meskipun membutuhkan alat yang lebih presisi dan kalibrasi yang baik.

2.6.3. Metode *Heat Flow Meter*

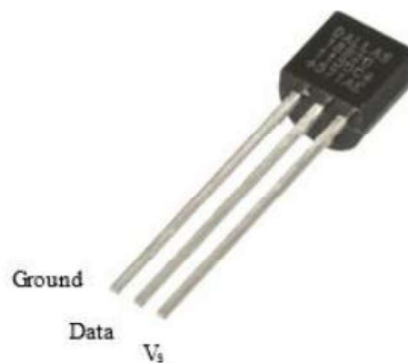
Metode *heat flow meter* menggunakan sensor panas untuk mengukur aliran panas melewati spesimen. Sampel diletakkan di antara dua

pelat dengan suhu berbeda dan sensor menghitung fluks panas. Metode ini banyak digunakan untuk material insulasi dan dinilai lebih mudah dilakukan untuk skala laboratorium. Zhu dkk., (2024) menunjukkan bahwa penggunaan heat flow meter efektif untuk memverifikasi performa termal panel berbahan bata ringan berintegrasi material fasa perubahan (PCM).

2.7. Sensor dan Komponen Elektronika

Sensor adalah sebuah komponen elektronika yang mengubah suatu besaran fisika ke dalam besaran listrik. Dengan adanya sensor, perubahan fisika yang terjadi, seperti perubahan temperatur, bentuk, tekanan udara, kelembaban, dan sebagainya dapat diukur atau diubah menjadi suatu nilai. Nilai ini selanjutnya akan dikumpulkan berdasarkan tujuan pengguna untuk diimplementasikan ke dalam sebuah sistem (Gunadi & Rachmawati, 2022).

2.8.1. Sensor Panas DS18B20



Gambar 2. 1 Kaki sensor DS18B20

Sumber : (Priambudi & Kurniawan, 2021)

Sensor DS18B20 adalah komponen elektronika yang bisa mengubah besaran temperatur atau temperatur menjadi besaran listrik. Sensor ini menggunakan satu kabel dan mengukur objek melalui kontak langsung. Ketelitian dari sensor ini dapat membaca 9-12 bit. Sensor DS18B20 mempunyai 3 pin kaki, yaitu Vs sebagai tegangan sumber, ground, dan data input/output. Tegangan yang diperlukan untuk sensor ini adalah 3 V – 5.5 V dan mengirim tegangan sebesar 5 V

untuk mikrokontroler. Kaki – kaki pin sensor DS18B20 seperti pada gambar 2.1 akan dihubungkan ke rangkaian untuk dikombinasikan dengan komponen elektronik lainnya (Huda & Kurniawan, 2022).

Sensor DS18B20 mempunyai dua buah tegangan dimana salah satu tegangannya dapat berubah – ubah sesuai temperatur. Tegangan yang lain akan dibuat tetap dengan temperatur yang rendah dan tidak berubah – ubah sebagai titik referensi. Perbedaan kedua temperatur ini akan dibaca oleh analog to digital converter (ADC) sebagai nilai digital dan direpresentasikan sebagai temperatur. Dalam sebuah penelitian yang mengukur temperatur dengan rentang 0 – 100°C didapatkan hasil bahwa sensor DS18B20 mempunyai akurasi yang lebih baik dibanding sensor panas RTD PT100 dan termokopel tipe K. Di mana sensor DS18B20 mempunyai akurasi pengukuran sebesar 98.91 %, RTD PT 100 mempunyai akurasi pengukuran sebesar 96.56 %, dan termokopel tipe k mempunyai akurasi pengukuran sebesar 97.35 %. Hal ini disebabkan karena sensor RTD PT100 dan termokopel tipe K desainnya dirancang khusus untuk mengukur temperatur ekstrem sehingga untuk pengukuran biasa dengan temperatur kecil, sensor DS18B20 lebih cocok untuk digunakan (Priambudi & Kurniawan, 2021).

2.8.2. Arduino Uno

Arduino Uno adalah papan mikrokontroler berbasis ATmega328P yang populer digunakan dalam berbagai aplikasi elektronika dan instrumentasi karena kemudahan penggunaan, biaya rendah, dan fleksibilitas dalam pengembangan. Dalam penelitian pengukuran konduktivitas termal, Arduino Uno sering digunakan sebagai pusat kendali dan akuisisi data karena kemampuannya dalam membaca sinyal analog dari sensor suhu dan mengendalikan perangkat lain seperti tampilan LCD atau penyimpanan data.

Sebagai contoh, penelitian oleh (Elfiana dkk., 2023) mengembangkan sistem pengukuran konduktivitas termal

menggunakan sensor termokopel berbasis Arduino Uno. Dalam sistem ini, Arduino Uno berfungsi untuk membaca sinyal dari sensor termokopel, mengolah data, dan menampilkan hasil pengukuran pada layar LCD. Penelitian ini menunjukkan bahwa Arduino Uno dapat diandalkan untuk aplikasi pengukuran konduktivitas termal pada material padat dengan akurasi yang memadai. Selain itu, sistem ini juga memungkinkan analisis hubungan antara konduktivitas termal dan variasi komposisi material secara *real-time*, yang sangat berguna dalam penelitian material baru atau modifikasi material untuk aplikasi konstruksi. Dengan demikian, penggunaan Arduino Uno dalam sistem pengukuran konduktivitas termal menawarkan solusi yang ekonomis dan efisien, serta dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik dalam penelitian material.

2.8.3. Kabel Jumper (*Dupont Wire*)

Kabel *jumper* seperti pada gambar 2.3 yang diaplikasikan pada rancang bangun alat uji ini merupakan konduktor elektrik jenis Dupont (*Dupont wire*). Secara spesifik, kabel ini menggunakan kawat inti berstandar AWG (*American Wire Gauge*) 24 hingga 26 dengan terminal konektor berjarak (*pitch*) 2.54 mm yang dirancang khusus untuk mentransmisikan sinyal komunikasi data pada tegangan logika rendah (3.3 V hingga 5 V DC) dengan toleransi arus maksimum di bawah 1 Ampere. Dalam pengoperasian instrumen, kabel Dupont difungsikan sebagai jalur interkoneksi utama yang menghubungkan pin mikrokontroler Arduino dengan modul PZEM-004T dan sensor DS18B20. Karakteristik konektornya yang bersifat *plug-and-play* memungkinkan proses perakitan komponen elektronika dilakukan secara fleksibel tanpa memerlukan proses penyolderan permanen.



Gambar 2. 2 Kabel *jumper*

Sumber : (Nugroho & Effendi, 2022)

2.8. Hukum Kekekalan Energi

Kebocoran panas (*heat loss*) dalam bangunan merupakan salah satu faktor utama yang mempengaruhi efisiensi energi dan kenyamanan termal. Material konstruksi yang memiliki konduktivitas termal rendah dapat mengurangi laju perpindahan panas, sehingga meningkatkan isolasi termal bangunan. Salah satu pendekatan untuk meningkatkan sifat isolasi termal adalah dengan memodifikasi komposisi material, seperti penggunaan serat alami dalam campuran beton ringan.

Penelitian oleh (Astutiningsih dkk., 2024) menunjukkan bahwa penggunaan serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai pengganti sebagian agregat halus dalam mortir semen dapat meningkatkan sifat mekanik dan fisik material. Penambahan TKKS menghasilkan material dengan densitas yang lebih rendah dan konduktivitas termal yang lebih baik, menjadikannya sebagai alternatif ramah lingkungan untuk aplikasi konstruksi. Meskipun penelitian ini tidak secara langsung mengukur kebocoran panas, peningkatan konduktivitas termal yang lebih rendah menunjukkan potensi material ini dalam mengurangi kebocoran panas dalam aplikasi bangunan. Dengan demikian, modifikasi material konstruksi menggunakan TKKS dapat menjadi strategi efektif dalam mengurangi kebocoran panas, berkontribusi pada peningkatan efisiensi energi dan keberlanjutan dalam sektor konstruksi.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai riset eksperimental murni. Fokus utama kajian adalah analisis karakteristik perpindahan panas, khususnya parameter resistansi dan konduktivitas termal, pada bata ringan komposit berbasis serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan aspal penetrasi. Prosedur penelitian mencakup tahapan rancang bangun alat uji, persiapan spesimen, validasi alat, hingga pengambilan data termal secara kuantitatif.

3.1. Tempat & Waktu Pelaksanaan

Berikut ini tempat serta waktu penelitian:

1. Tempat

Seluruh rangkaian kegiatan perakitan alat dan pengujian spesimen dilaksanakan di Laboratorium Fenomena Dasar Mesin (FDM) Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung.

2. Waktu

Lama waktu penelitian kurang lebih selama empat bulan (Oktober 2025 – Januari 2026).

3.2. Alat dan Bahan

Perancangan prototipe alat uji resistansi termal dalam penelitian ini mengintegrasikan sistem kontrol elektronik presisi dan konstruksi mekanik terisolasi. Unit kendali utama memanfaatkan mikrokontroler Arduino Uno yang diprogram khusus sebagai *data logger* untuk mengakuisisi data temperatur secara *real-time*. Data suhu tersebut diperoleh melalui tiga buah sensor digital DS18B20 yang ditempatkan pada sisi panas (T1), sisi dingin

(T2) spesimen dan sisi luar box alat uji (T3), dengan tingkat akurasi pembacaan $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Untuk membangkitkan fluks kalor konstan (*constant heat flux*), sistem pemanas menggunakan *strip heater* berdaya maksimal 100 Watt yang dikendalikan oleh modul *SCR Voltage Regulator* (Dimmer AC 4000 W). Penggunaan regulator ini memungkinkan pengaturan tegangan input secara manual untuk menjaga kestabilan daya listrik (Q) yang masuk, yang dipantau terus-menerus menggunakan PZEM 004T selama proses pengujian berlangsung.

Konstruksi fisik alat uji dirancang dengan konsep *guarded hot box* untuk memastikan aliran panas terjadi secara satu dimensi (1D) melintasi ketebalan spesimen. Rangka utama alat dibangun menggunakan material akrilik setebal 5 mm yang berfungsi sebagai pelindung struktural. Guna meminimalkan kehilangan panas ke arah radial (*radial heat loss*), bagian dalam kotak uji dilapisi penuh dengan isolator *Polyurethane* (PU) *Foam* setebal 50 mm. Material isolator ini dipilih karena memiliki konduktivitas termal yang sangat rendah sehingga energi panas dapat terfokus menembus spesimen uji. Sementara itu, pada sisi dingin diterapkan sistem pendinginan aktif menggunakan *heatsink* aluminium berukuran 10 cm x 10 cm yang dibantu oleh kipas DC 12V. Mekanisme ini bertujuan untuk membuang kalor yang menembus spesimen ke lingkungan, sehingga temperatur pada sisi dingin (T2) dapat dijaga konstan sepanjang durasi pengujian.

Populasi dalam penelitian ini adalah bata ringan modifikasi yang terdiri dari tiga lapisan yaitu lapisan inti, lapisan selimut 1, dan lapisan selimut 2. Untuk menganalisis pengaruh komposisi terhadap sifat termal, ditetapkan tiga faktor kontrol dengan masing-masing tiga level variasi. Jika menggunakan metode faktorial penuh (*Full Factorial*), total populasi kombinasi adalah $3 \times 3 \times 3 = 27$ variasi. Namun, untuk efisiensi penelitian tanpa mengurangi validitas statistik, penentuan sampel dilakukan menggunakan metode *Taguchi L9 Orthogonal Array*. Metode ini mereduksi jumlah spesimen menjadi 9 variasi campuran yang dianggap representatif untuk menganalisis pengaruh masing-masing faktor.

Selain 9 spesimen inovasi tersebut, penelitian ini juga menggunakan 1 spesimen *Bata Ringan AAC* sebagai kontrol validasi alat uji. Detail komposisi spesimen inovasi disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Variasi komposisi spesimen

Kode Variasi	Campuran Inti Serat : Aspal	Campuran Layer 1 Semen : Pasir	Campiran Layer 2 Adonan : Foam
V4	1.000	0	2
V5	1.000	1	3
V6	1.000	2	1
V8	1.222	1	1

Pada rancangan awal, penelitian ini menggunakan metode Taguchi L9 *Orthogonal Array* yang terdiri dari 9 variasi campuran material penyusun bata ringan. Akan tetapi, pada proses pembuatannya, terdapat kendala saat melakukan pemotongan spesimen menggunakan gergaji manual. Beberapa variasi campuran tidak memiliki ikatan struktural yang cukup kuat, sehingga rentan retak dan hancur saat dipotong. Oleh karena itu, pengujian hanya difokuskan pada spesimen yang berhasil dicetak dan dipotong dengan bentuk yang presisi. Berdasarkan hasil seleksi tersebut, terdapat empat spesimen yang layak untuk diuji, yaitu Sampel 4, Sampel 5, Sampel 6, dan Sampel 8 dengan rincian campuran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1. Keempat sampel ini dinilai sudah cukup mewakili variasi penelitian, mulai dari spesimen yang memiliki rongga udara paling banyak hingga spesimen yang paling padat.

Untuk menjaga tingkat keakuratan dan keandalan data akibat berkurangnya jumlah sampel tersebut, metode pengujian dilakukan secara berulang (*repetition*). Setiap variasi spesimen diuji sebanyak tiga kali pengulangan, sehingga total pengujian untuk bata ringan modifikasi ini berjumlah 12 kali pengujian. Di samping itu, penelitian ini juga menggunakan bata ringan komersial berjenis *Autoclaved Aerated Concrete (AAC)* sebagai material pembanding (kontrol). Pengujian pada bata AAC ini juga dilakukan

sebanyak tiga kali pengulangan guna memastikan bahwa alat uji yang dirancang dapat membaca nilai konduktivitas termal dengan stabil dan presisi.

3.3. Kriteria Desain

Perancangan prototipe alat uji difokuskan pada pemenuhan fungsionalitas utama sebagai instrumen pengukur konduktivitas dan resistansi termal yang mengacu pada Hukum Fourier. Secara prinsip kerja, alat wajib mampu memberikan beban kalor konstan (*heat flux controlled*) pada spesimen uji hingga tercapai kondisi kesetimbangan termal (*steady-state*). Guna menjamin validitas hasil perhitungan, sistem akuisisi data disyaratkan memiliki akurasi tinggi dalam mengukur variabel kunci, yaitu suhu sisi panas (T1), suhu sisi dingin (T2), dan daya listrik input (P). Oleh karena itu, penggunaan sensor suhu digital DS18B20 dengan toleransi akurasi $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ menjadi standar minimum yang ditetapkan dalam perancangan sistem elektronik alat ini.

Ditinjau dari aspek konstruksi, desain ruang uji (*test chamber*) dirancang secara spesifik untuk mengakomodasi spesimen berbentuk kubus dengan dimensi 10 cm x 10 cm x 10 cm. Kriteria terpenting pada struktur mekanik adalah penerapan konsep *guarded hot box* untuk memvalidasi asumsi aliran panas satu dimensi (1D). Hal ini dicapai dengan menggunakan material isolator *Polyurethane (PU) Foam* setebal 50 mm yang melapisi seluruh dinding dalam alat. Isolator ini berfungsi ganda, yakni meminimalkan kerugian panas (*heat loss*) ke lingkungan serta memastikan bahwa struktur alat tidak mengalami deformasi akibat paparan panas operasional pemanas.

Selain aspek teknis, perancangan alat juga mempertimbangkan faktor keamanan, kemudahan operasional, dan efisiensi biaya (*low-cost*). Seluruh komponen tegangan tinggi dan elemen pemanas ditempatkan dalam selungkup (*casing*) terisolasi untuk melindungi operator dari risiko kontak langsung. Sistem pemantauan didesain agar *user-friendly*, di mana data temperatur dapat diobservasi secara *real-time* melalui antarmuka komputer untuk memverifikasi pencapaian kondisi *steady-state*. Pemilihan komponen

elektronik dan material konstruksi dimaksimalkan menggunakan bahan yang tersedia di pasaran lokal guna menekan biaya fabrikasi tanpa mengurangi keandalan fungsi alat.

3.4. Diagram Alir

Adapun diagram alir pengujian terbagi menjadi dua, yaitu diagram alir rancang bangun alat uji resistansi termal dan diagram alir validasi serta pengujian resistansi termal.

3.4.1. Diagram alir rancang bangun alat uji resistansi termal

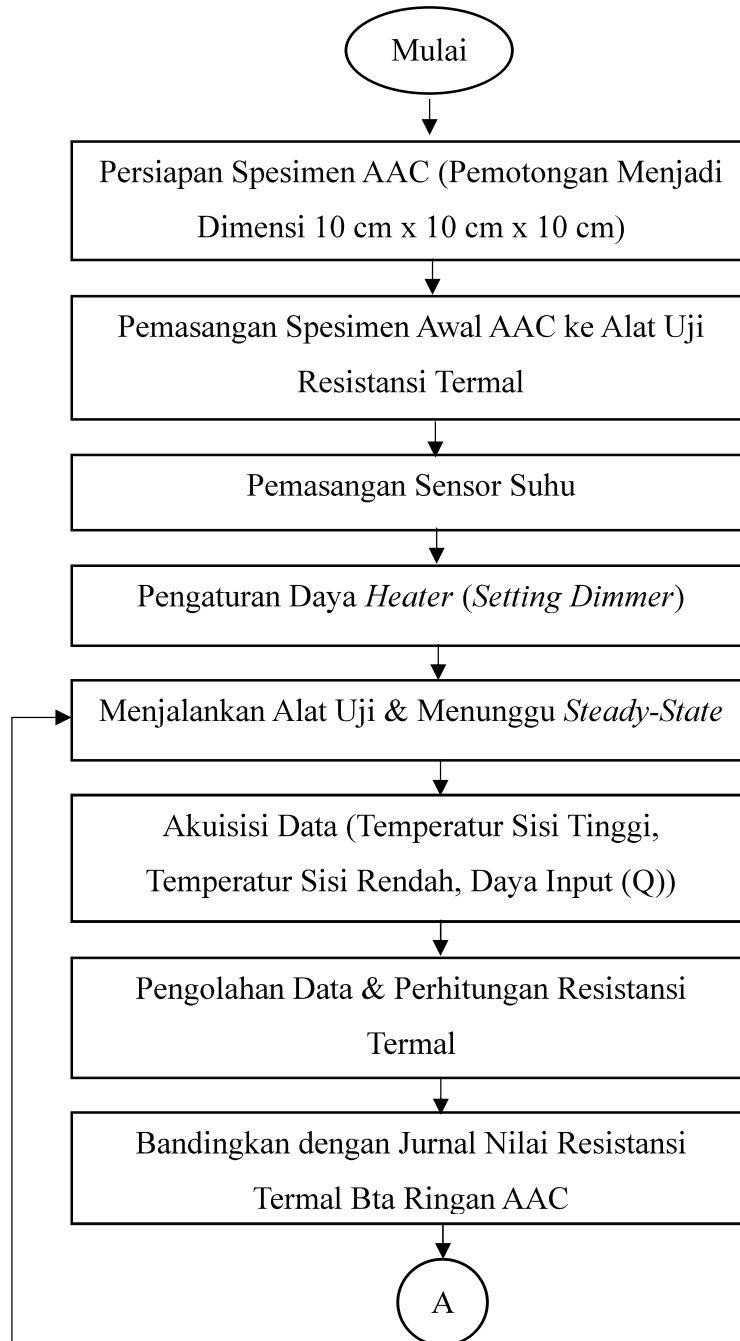
Berikut merupakan diagram alir rancang bangun alat uji resistansi termal yang dimulai dari persiapan, sampai proses perakitan.

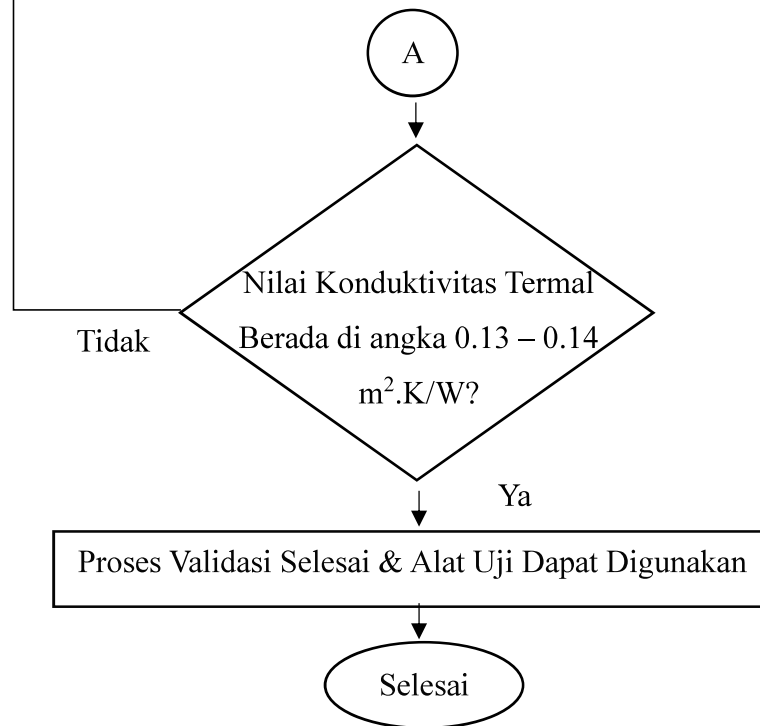


Gambar 3. 1 Diagram alir rancang bangun alat uji resistansi termal

3.4.2. Diagram alir validasi alat uji resistansi termal

Berikut merupakan diagram alir validasi alat uji dengan menggunakan AAC sebagai spesimen awal.

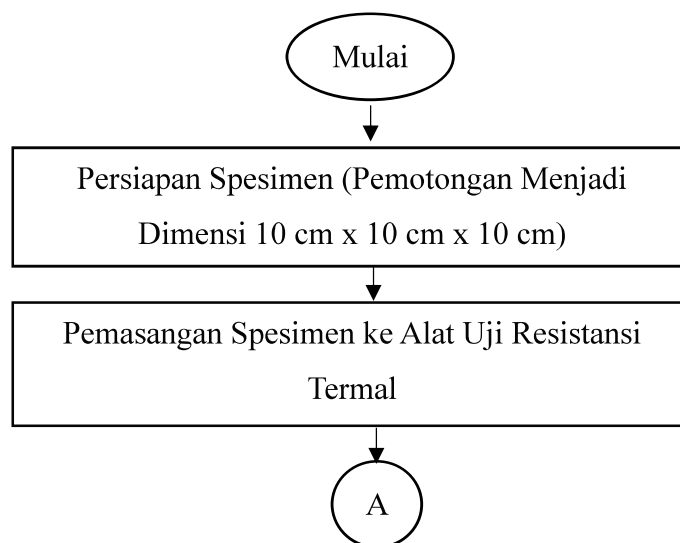


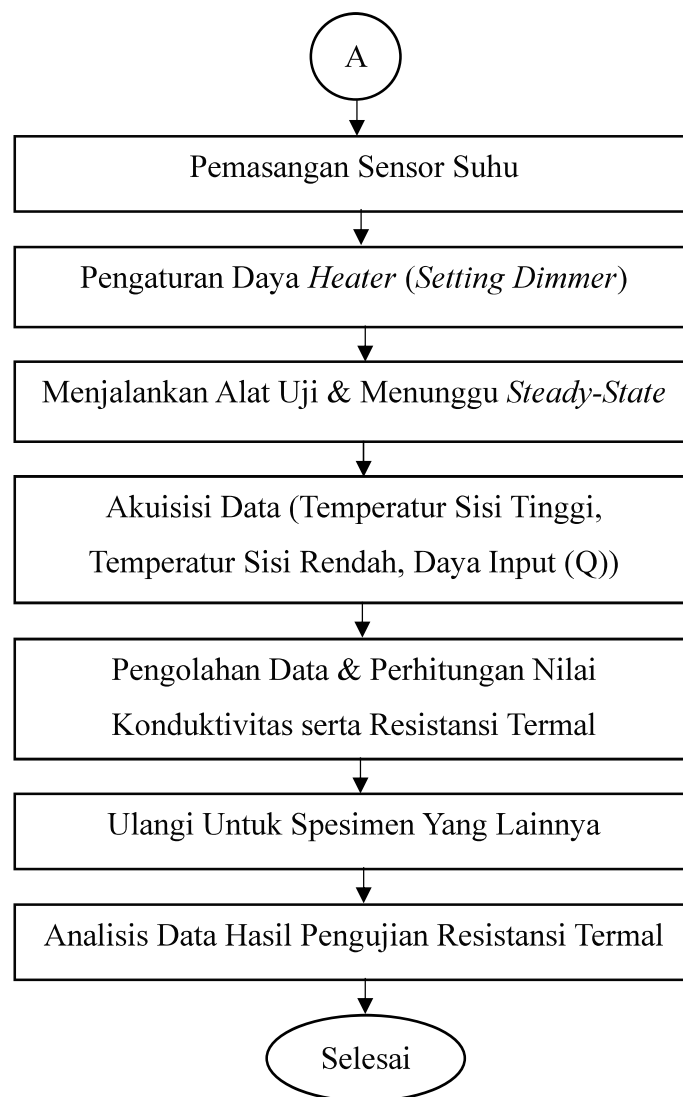


Gambar 3. 2 Diagram alir validasi alat uji resistansi termal

3.4.3. Diagram alir pengujian resistansi termal bata ringan berbasis serat tandan sawit campuran aspal penetrasi

Berikut merupakan diagram alir pengujian nilai resistansi termal bata ringan berbasis serat tandan sawit campuran aspal penetrasi dengan menggunakan alat uji resistansi termal yang sudah dirancang bangun serta divalidasi kinerjanya sebelumnya.



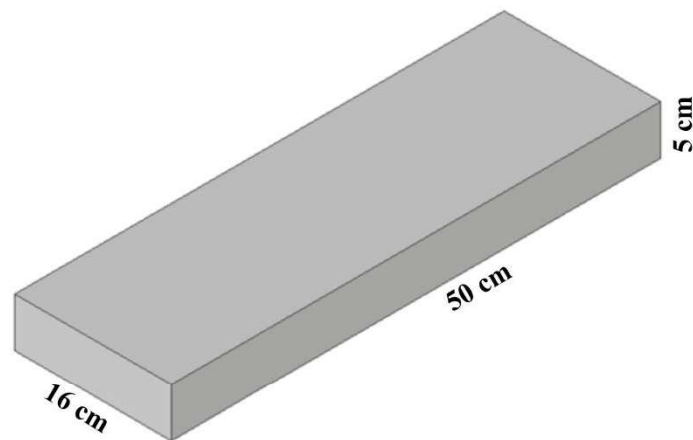


Gambar 3. 3 Diagram alir pengujian resistansi termal bata ringan berbasis serat tandan sawit campuran aspal penetrasi

3.5. Desain Struktur Spesimen Bata Ringan Dengan Inti Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Campuran Aspal Penetrasi

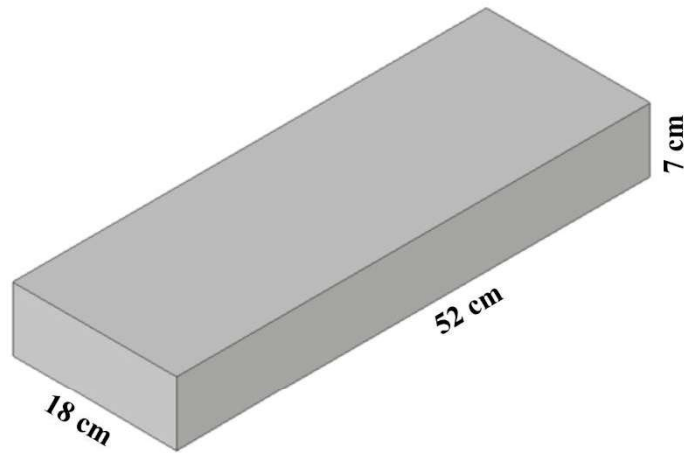
Spesimen uji utama dalam penelitian ini dirancang sebagai material komposit berlapis (*multi-layered structure*) yang menggabungkan limbah organik dan material pengikat sintetis. Struktur bata ringan modifikasi terdiri dari tiga bagian utama, yaitu lapisan inti (*core*), lapisan pengikat (*interlayer*), dan lapisan selimut (*outer layer*). Bagian inti bata dirancang menggunakan campuran serat tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan aspal penetrasi 60/70 sebagai *binder*. Campuran ini dicetak membentuk balok padat

berdimensi 50 cm x 16 cm x 5 cm. Fungsi utama lapisan inti ini adalah sebagai barier termal utama yang memanfaatkan sifat isolatif dari rongga udara pada serat sawit. Selain fungsi pengikat, aspal penetrasi 60/70 berperan aktif sebagai penyerap kalor laten melalui mekanisme perubahan fasa (*phase change*) saat temperatur melampaui titik lembek (*softening point*) di kisaran 48°C–52°C. Fenomena penyerapan energi termal pada fase transisi ini berkontribusi meningkatkan inersia termal material, sehingga laju perambatan panas ke sisi dingin dapat diredam secara lebih efektif.

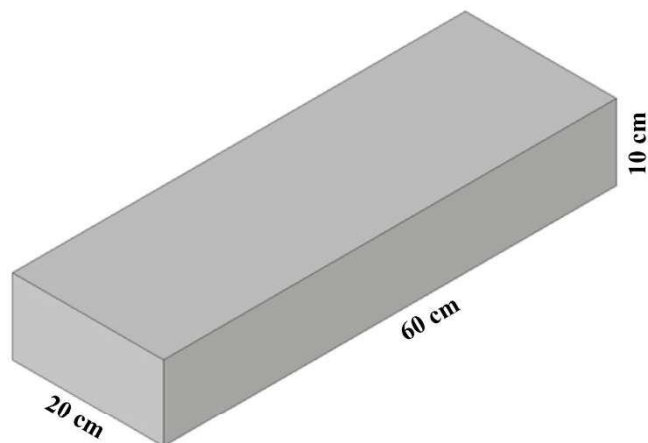


Gambar 3. 4 Bagian inti bata ringan

Guna memberikan kekuatan mekanis dan daya rekat, bagian inti tersebut diselubungi oleh lapisan pertama yang terdiri dari mortar semen-pasir. Proses pelapisan ini meningkatkan dimensi balok menjadi 52 cm x 18 cm x 7 cm. Selanjutnya, lapisan terluar dibentuk menggunakan campuran semen, pasir, dan foam agent yang diproses melalui foam generator untuk menghasilkan beton ringan seluler (*cellular concrete*). Lapisan akhir ini membungkus seluruh permukaan hingga mencapai dimensi total balok utuh sebesar 60 cm x 20 cm x 10 cm.

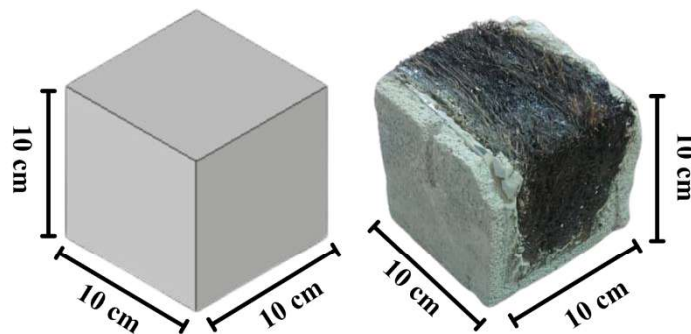


Gambar 3. 5 Lapisan 1 bata ringan



Gambar 3. 6 Dimensi bata ringan

Untuk keperluan validasi pada alat uji resistansi termal yang telah dirancang, blok bata utuh tersebut tidak diuji secara keseluruhan. Blok bata besar dipotong secara presisi pada bagian tengahnya untuk mendapatkan spesimen uji berbentuk kubus dengan dimensi 10 cm x 10 cm x 10 cm (Gambar 3.7). Pemotongan ini bertujuan untuk mengambil sampel yang paling representatif, di mana terdapat lapisan inti sawit-aspal tepat di tengah-tengah kubus yang terbungkus rapi oleh lapisan beton ringan, sehingga fenomena perpindahan panas konduksi dapat teramati secara optimal melewati struktur komposit tersebut.

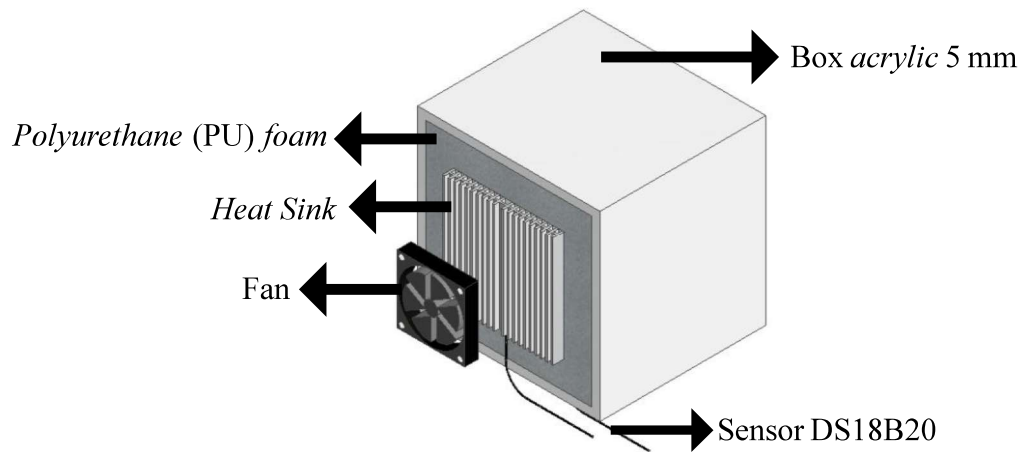


Gambar 3. 7 Spesimen uji resistansi termal bata ringan

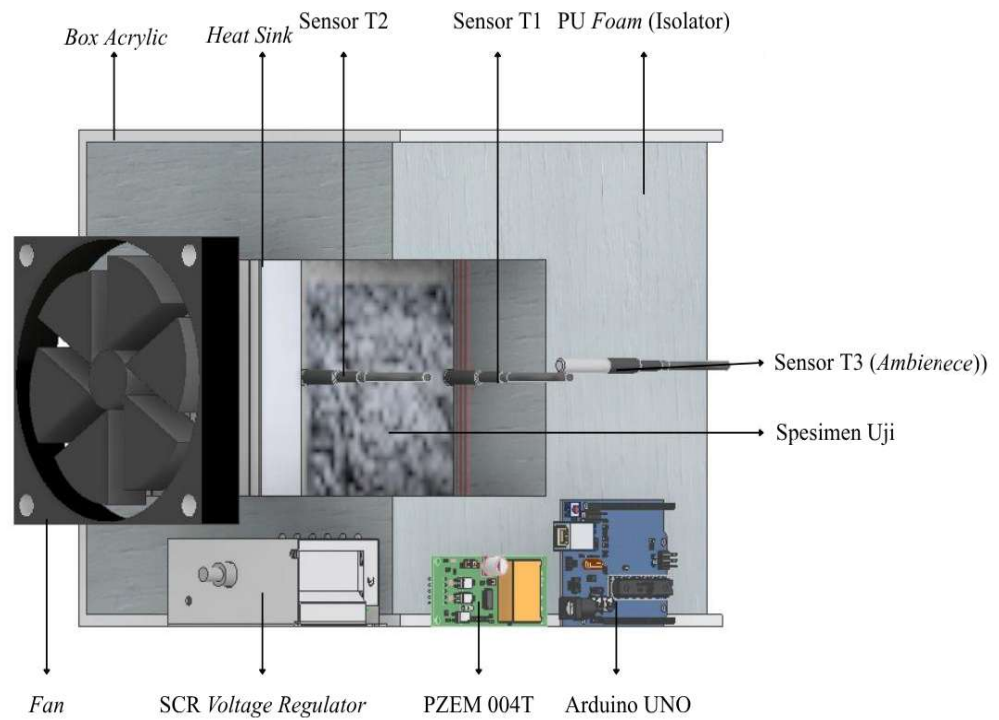
3.6. Skema Pengujian

Konstruksi utama alat uji ini dirancang menggunakan material akrilik setebal 5 mm yang memberikan kekakuan struktural sekaligus visibilitas visual. Secara prinsip kerja, alat ini dibagi menjadi dua sisi utama, yaitu suhu tinggi (sisi panas) dan suhu rendah (sisi dingin). Bagian interior dinding kotak dilapisi material isolator *Polyurethane* (PU) Foam setebal 50 mm. Guna memaksimalkan efisiensi termal, permukaan isolator tersebut dilapisi dengan material reflektif aluminium foil tape secara menyeluruh. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan penyerapan panas oleh dinding isolator serta aliran panas dipaksa bergerak satu dimensi melewati spesimen uji.

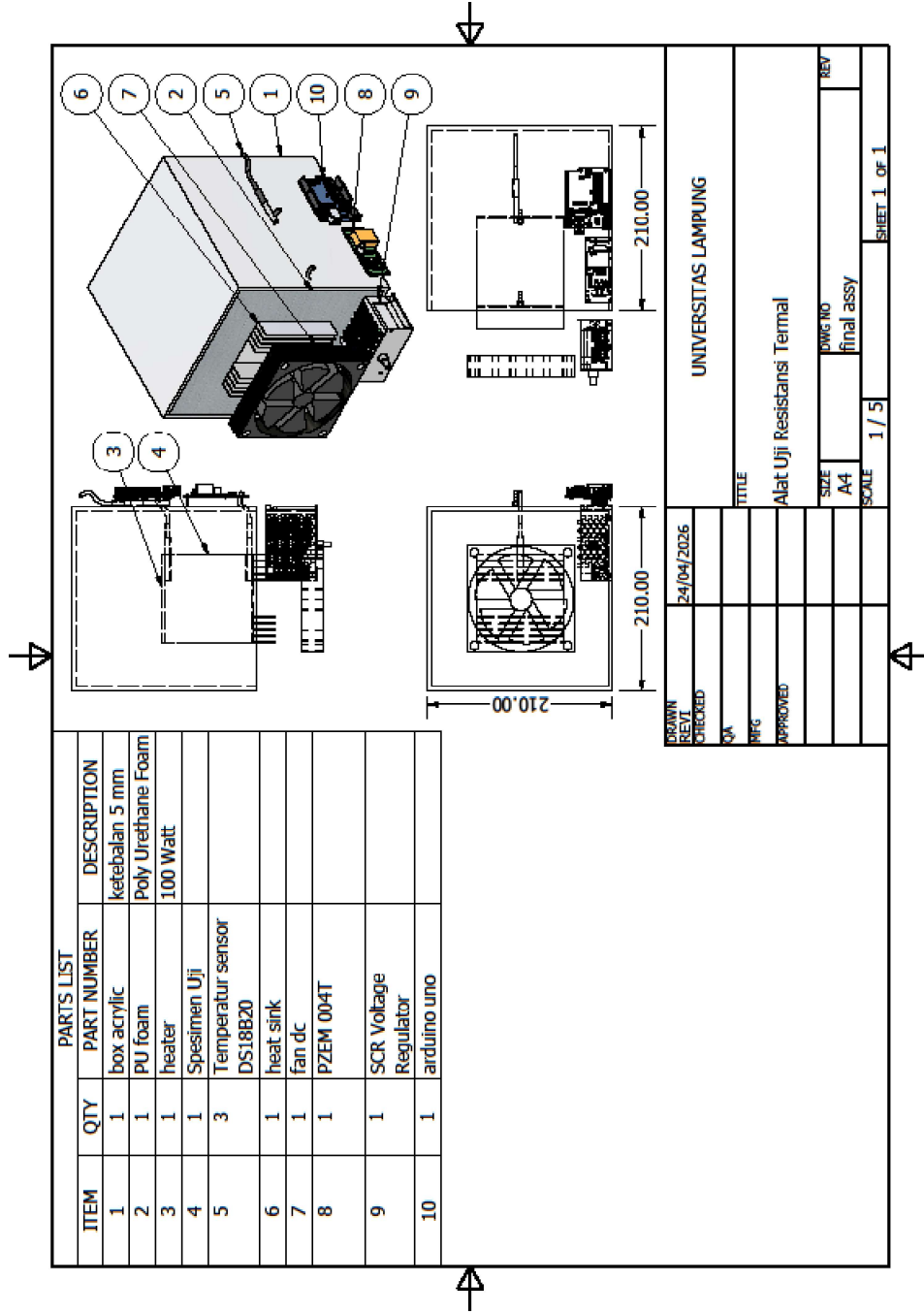
Inti dari skema pengujian ini adalah konfigurasi "*sandwich*" yang menempatkan spesimen bata ringan tepat di antara elemen pemanas (*strip heater*) dan sistem pendingin. Elemen pemanas berdimensi 10 x 10 cm ditempatkan menempel pada sisi muka spesimen untuk memberikan fluks kalor konstan. Sumber daya pemanas disuplai dari jala-jala listrik AC yang diatur tegangannya menggunakan modul *SCR Voltage Regulator* (*Dimmer*). Regulator ini berfungsi vital untuk mengunci daya input pada nilai rendah yang konstan agar tidak terjadi *overshoot* suhu. Sementara itu, pada sisi belakang spesimen, dipasangkan *heatsink* aluminium yang dibantu oleh kipas DC (*fan*) yang beroperasi terus-menerus. Mekanisme pendinginan aktif ini bertugas membuang kalor yang telah menembus spesimen ke lingkungan, menjaga temperatur sisi dingin (T_2) tetap stabil rendah.



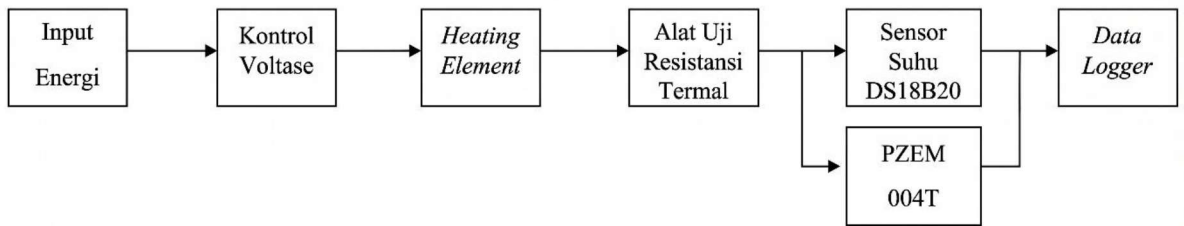
Gambar 3. 8 Skema pengujian tampak depan



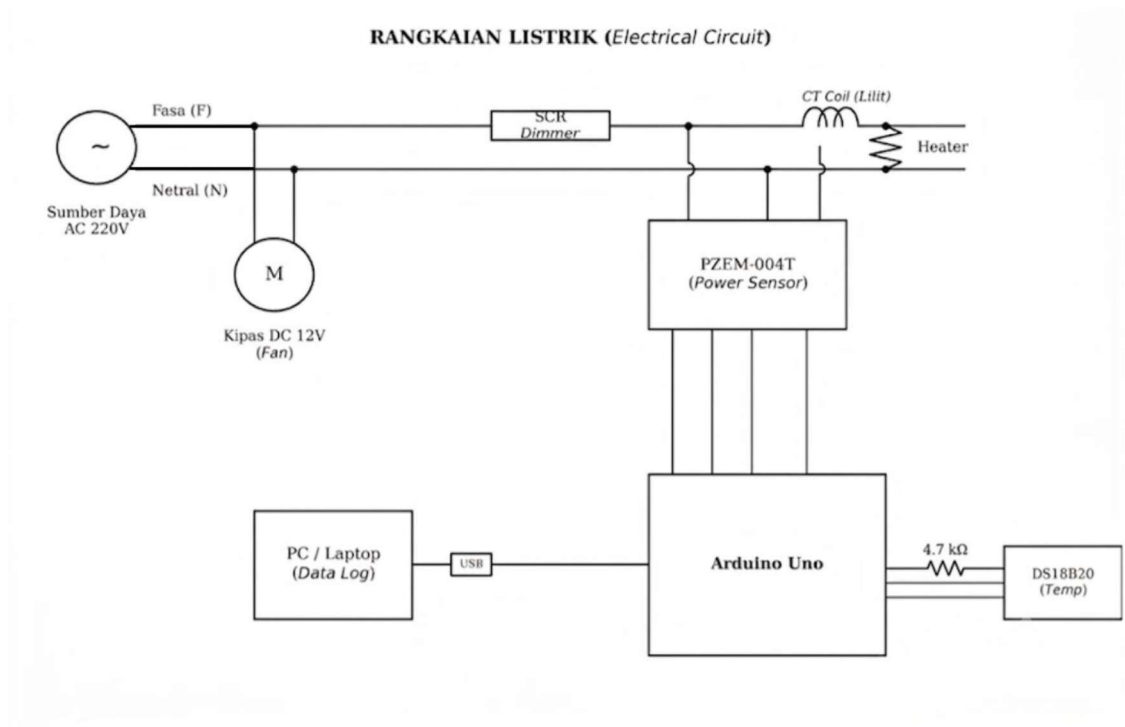
Gambar 3. 9 Sketsa *hardware*



Gambar 3. 10 Gambar teknik alat uji resistansi termal



Gambar 3. 11 Diagram kontrol



Gambar 3. 12 Rangkaian listrik

Sistem akuisisi data dirancang terintegrasi menggunakan mikrokontroler Arduino Uno seperti yang dapat terlihat di gambar 3.10. Pengukuran temperatur dilakukan tepat pada antarmuka (*interface*) spesimen menggunakan dua buah sensor DS18B20. Sensor pertama (T1) dijepit di antara *heater* dan spesimen, sedangkan sensor kedua (T2) dijepit di antara spesimen dan *heatsink*. Sinyal digital dari kedua sensor dikirim ke mikrokontroler untuk direkam dan dipantau melalui komputer secara *real-time*.

3.7. Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data pengujian yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. **Persiapan Sistem:** Memastikan seluruh komponen alat uji (Arduino Uno, sensor DS18B20, elemen pemanas) terhubung dengan benar dan berfungsi. Mengunggah program pembacaan suhu (*temperature logging*) ke Arduino IDE dan membuka *Serial Monitor* pada laptop untuk pemantauan data.
2. **Pemasangan Spesimen:** Memasang spesimen uji (bata berdimensi 10 cm x 10 cm x 10 cm) ke dalam ruang uji pada alat. Memastikan kedua sensor DS18B20 menempel dengan baik pada permukaan sisi panas dan sisi dingin spesimen untuk menjamin kontak termal yang optimal.
3. **Pengaturan Daya Awal:** Menyalakan *heater* dan memutar knob *dimmer* secara perlahan sambil memantau *serial monitor Arduino UNO*. Atur hingga daya terbaca stabil pada nilai target (2 sampai 3 Watt).
4. **Pemanasan dan Stabilisasi (*Steady-State*):** Membiarkan sistem berjalan dengan daya konstan tersebut. Panas akan mengalir terus menerus ke spesimen. Memantau kenaikan suhu T1 dan T2 pada *Serial Monitor*.
5. **Akuisisi Data *Steady-State*:** Setelah kondisi *steady-state* tercapai, di mana pembacaan temperatur T1 dan T2 relatif konstan dengan fluktuasi kurang dari $\pm 1^\circ\text{C}$ lakukan perekaman data utama selama periode waktu tertentu untuk dirata-ratakan. Data yang dicatat adalah:
 - Temperatur rata-rata sisi panas (T1).
 - Temperatur rata-rata sisi dingin (T2).
6. **Pengukuran Daya Input Pemanas (Q):** Secara bersamaan dengan langkah 5, ukur daya input listrik (Q) yang masuk ke elemen pemanas menggunakan AC Watt meter digital. Nilai Q ini adalah laju aliran panas yang menembus spesimen.

Tabel 3. 2 Parameter Pengambilan Data

Kode Spesimen	Pengulangan ke-	T1 (°C)	T2 (°C)	ΔT (°C)	Q (W)
A1 (bata ringan AAC)	1				
	2				
	3				
V4	1				
	2				
	3				
V5	1				
	2				
	3				
V6	1				
	2				
	3				
V8	1				
	2				
	3				

3.8. Metode Analisis Data

Data mentah yang diperoleh dari hasil pengujian (T1, T2, Q) selanjutnya diolah untuk mendapatkan nilai konduktivitas termal (k) dan resistansi termal (R termal).

1. Perhitungan konduktivitas termal (k): Nilai k dihitung menggunakan Hukum Konduksi Panas Fourier seperti pada persamaan 2.1
2. Perhitungan resistansi termal (R): Nilai R termal dihitung dengan rumus:

$$R \text{ termal} = \frac{L}{k} \dots \dots \dots (3.2)$$

Dimana:

k = Konduktivitas Termal (W/m·K)

L = Ketebalan spesimen (0.1 m)

Tabel 3. 3 Parameter Hasil Analisis Data

Kode Spesimen	Pengulangan ke-	k (W/m.K)	R (K.m ² /W)
A1 (bata ringan AAC)	1		
	2		
	3		
V4	1		
	2		
	3		
V5	1		
	2		
	3		
V6	1		
	2		
	3		
V8	1		
	2		
	3		

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tersebut, kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Telah berhasil dirancang dan dibangun sebuah prototipe alat uji resistansi termal menggunakan metode *steady-state* dengan prinsip *Guarded Hot Box* yang mampu mengakomodasi spesimen uji berdimensi 10 x 10 x 10 cm.
2. Proses validasi menggunakan material standar *Autoclaved Aerated Concrete* (AAC) menghasilkan nilai rata-rata konduktivitas termal (k) sebesar 0.139 W/m.K, yang sangat mirip dengan acuan literatur. Instrumen uji ini terbukti memiliki tingkat keterulangan (*repeatability*) yang sangat tinggi dan layak pakai, dibuktikan melalui persentase galat (*relative standard deviation*) pada seluruh sesi pengulangan eksperimen yang konsisten berada di bawah ambang batas toleransi rekayasa teknis, yakni kurang dari 10%.
3. Nilai resistansi termal bata ringan dengan inti serat tandan kosong kelapa sawit campuran aspal penetrasi nilainya berkisar antara 0.266 K.m²/W sebagai yang paling buruk sampai 0.627 K.m²/W sebagai yang paling baik dalam menahan panas terutama sampel 4 dengan nilai rata-rata 0.627 K.m²/W terbukti dapat mendekati nilai resistansi termal bata ringan AAC di angka 0.714 K.m²/W.
4. Bata ringan inovasi berbasis serat sawit terbukti sangat potensial untuk diklasifikasikan sebagai *green building material*. Berdasarkan simulasi

termodinamika perpindahan panas makro pada rancang bangun rumah standar Tipe 60, penggantian total dinding *Cellular Lightweight Concrete* (CLC) konvensional dengan spesimen sampel 4 mampu memotong beban transmisi panas (*thermal load*) hingga 59.2% (penurunan daya masuk dari 3751 Watt menjadi 1529 Watt). Penurunan fluks panas yang masif ini berimplikasi langsung terhadap efisiensi kinerja perangkat pendingin ruangan (AC), penghematan konsumsi listrik harian, serta pengurangan jejak emisi karbon pada sektor hunian.

5.2. Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan yang secara khusus mengkaji pengaruh penggunaan jenis material isolator pada dinding *chamber* alat uji terhadap akurasi hasil pengujian konduktivitas termal spesimen. Penelitian komparatif dengan memvariasikan material isolator (seperti menggunakan *rockwool*, *glasswool*, atau *ceramic fiber*) sangat perlu dilakukan guna menganalisis sejauh mana perbedaan persentase rugi panas (*heat loss*) ke lingkungan sekitar dapat memengaruhi kepresisian hasil perhitungan akhir alat ukur.
2. Pengembangan sistem akuisisi data dapat ditingkatkan dengan mengintegrasikan modul *datalogger* berbasis penyimpanan eksternal (*SD Card*) atau modul *IoT* (seperti ESP32) agar data pengujian dapat direkam secara nirkabel dan otomatis tanpa ketergantungan koneksi kabel ke komputer demi kenyamanan pengguna dalam proses pengujian.

DAFTAR PUSTAKA

- Astutiningsih, S., Ashma', R. Z., Syihabuddin, H. H., Ellisa, E., & Saukani, M. (2024). Mechanical and Physical Characteristics of Oil Palm Empty Fruit Bunch as Fine Aggregate Replacement in Ordinary Portland Cement Mortar Composites. *Journal of Composites Science*, 8, 1. <https://doi.org/10.3390/jcs8090341>
- Demirtürk, D., Ozturk, H. I., & Güler, M. (2025). *Current methods for determining the thermal properties of asphalt concrete: a comprehensive review*. 2451–2460. https://doi.org/10.31462/icearc2025_ce_tra_133
- Elfiana, Tansa, S., & Setiawan, D. G. E. (2023). Design of a Thermal Conductivity Measurement Technique for Clay Furnace Materials Using an Arduino-Based Thermocouple Sensor. *Jurnal Fisika Unand*, 12(4), 615–620. <https://doi.org/10.25077/jfu.12.4.615-620.2023>
- Futami, E., Shafigh, P., Katman, H. Y. B., & Ibrahim, Z. (2021). Recent progress in the application of coconut and palm oil fibres in cement-based materials. *Sustainability*, 13, 1–37. <https://doi.org/10.3390/su132212865>
- Ghazy, M. F., Elaty, M. A. A. A., Sakr, M. A. E., & Arafa, E. M. (2025). Thermo-Mechanical Performance of Sustainable Lightweight Sandwich Panels Utilizing Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. *Buildings*, 15(4), 1–29. <https://doi.org/10.3390/buildings15040593>
- Gomes, M. D. G., Bogas, J. A., Real, S., Rodrigues, A. M., & Machete, R. (2023). Thermal Performance Assessment of Lightweight Aggregate Concrete by Different Test Methods. *Sustainability*, 15, 1–18. <https://doi.org/10.3390/su151411105>
- Górszczyk, J., & Malicki, K. (2025). Comparative Laboratory Tests of Thermal Conductivity of Road Materials Using Two Measurement Methods. *Materials*, 18. <https://doi.org/10.3390/ma18091970>
- Gunadi, I. G. A., & Rachmawati, D. O. (2022). REVIEW PENGGUNAAN SENSOR PADA APLIKASI IOT. *Wahana Matematika dan Sain: Jurnal Matematika, Sains, dan Pembelajarannya*, 16(3), 1858–0629.

- Huda, M. B. R., & Kurniawan, W. D. (2022). *ANALISA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR MENGGUNAKAN SENSOR DS18B20 BERBASIS MIKROKONTROLER ARDUINO*. 07(02), 18–23.
- Javalkar, S. D., Parekar, A. V., Suryawanhsi, A. B., Waghmare, A. R., & Patil, H. M. S. (2022). A Comparative Study between AAC and CLC Block as an Possible Alternative to Conventional Brick. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET) | An ISO*, 11(5), 6137. <https://doi.org/10.15680/IJIRSET.2022.1105262>
- Jiang, G., Chen, W., Chen, J., & Yang, W. (2026). Experimental Investigation of Thermal Contact Resistance at Flat/Curved Surface Interfaces Under Various Temperature, Pressure, and Surface Roughness Levels. *Technologies*, 14(14), 41. <https://doi.org/10.3390/technologies14010041>
- Kumar, S. S., Shyamala, P., Pati, P. R., Giri, J., Makki, E., & Sathish, T. (2024). Mechanical (static and dynamic) characterization and thermal stability of hybrid green composites for engineering applications. *Journal of Materials Research and Technology*, 30, 7214–7227. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.05.132>
- Li, Y., Im, P., Lee, S., Bae, Y., Yoon, Y., & Lee, S. (2023). Sensor Incipient Fault Impacts on Building Energy Performance: A Case Study on a Multi-Zone Commercial Building. *Buildings*, 13(2), 1–27. <https://doi.org/10.3390/buildings13020520>
- Mahardika, M., Zakiyah, A., Ulfa, S. M., Ilyas, R. A., Hassan, M. Z., Amelia, D., Knight, V. F., & Norrrahim, M. N. F. (2024). Recent Developments in Oil Palm Empty Fruit Bunch (OPEFB) Fiber Composite. *Journal of Natural Fibers*, 21(1). <https://doi.org/10.1080/15440478.2024.2309915>
- Maynet, W., Samsudin, E. M., & Soh, N. M. Z. N. (2021). Physical and mechanical properties of cement board made from oil palm empty fruit bunch fibre: A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 012008. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1144/1/012008>
- Mydin, M. A. O. (2022). Influence of Density, Porosity and Void Size on Thermal Conductivity of Green Lightweight Foamed Concrete. *Journal of Advanced*

Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 92(2), 25–35.
<https://doi.org/10.37934/arfmts.92.2.2535>

Nugroho, G. W., & Effendi, R. (2022). Rancang Bangun Sistem Pengukuran Luas Permukaan Kulit Menggunakan Konveyor dan Sensor Optik Berbasis Arduino. *JURNAL TEKNIK ITS*, 11(1), 1–7.

Oyebisi, S., & Alomayri, T. (2023). Artificial intelligence-based prediction of strengths of slag-ash-based geopolymer concrete using deep neural networks. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132606>

Pratama, A. R., Suryania, R., & Ismediyanto. (2019). Simulasi Sifat Termal Bata Ringan Celullar Lightweight Concrete Menggunakan LUSAS V.17. *JURNAL SAINSTEK STT Pekanbaru*, 7(2), 56–61.

Priambudi, R. W., & Kurniawan, W. D. (2021). ANALISA SISTEM PENGENDALIAN TEMPERATUR BERBASIS ARDUINO UNO PADA PROTOTIPE TABUNG REAKTOR. *JPTM*, 10(03), 67–74.

Riadi, A., Maizir, H., & Suryanita, R. (2021). Perilaku Mekanik dan Fisik Bata Ringan Akibat Terpapar Suhu Tinggi. *Jurnal Rekayasa Sipil (JRS-Unand)*, 17(1), 72–84.
<https://doi.org/10.25077/jrs.17.1.72-84.2021>

Shakir, M. A., Ahmad, M. I., Yusup, Y., Wabaidur, S. M., Siddiqui, M. R., Alam, M., & Rafatullah, M. (2023). Sandwich Composite Panel from Spent Mushroom Substrate Fiber and Empty Fruit Bunch Fiber for Potential Green Thermal Insulation. *Buildings*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/buildings13010224>

Silva, A. D. A. A. D. (2021). *THERMAL INSULATION CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL LIGHTWEIGHT AND NORMAL WEIGHT CONCRETES PRODUCED WITH DIFFERENT TYPES OF AGGREGATES*.

Subir, R., Goswami, R., Singh, V., Kumar, D., & Singh, P. (2022). Construction and Validation of a Low Cost Thermal Conductivity Measurement Device. *Proceedings of 6th International Conference on Advanced Production and Industrial Engineering (ICAPIE) - 2021*, 419–427. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9613-8_38

Zakaria, M. A., & Soh, N. M. Z. N. (2023). The Physical and Mechanical Properties of Oil Palm Empty Fruit Bunch Fibre (OPEFB) Based on Various Fibre-Cement Ratios. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*, 4(3), 428–438. <https://doi.org/10.30880/rtcebe.2023.04.03.046>

Zhu, L., Wang, Q., Sang, G., Cao, Z., & Xue, Y. (2024). Experimental and Numerical Study on the Thermal Response of the Lightweight Aggregate Concrete Panels Integrated with MPCM. *Buildings*, 14, 1–17. <https://doi.org/10.3390/buildings14010234>