

Pembuatan Material Pereduksi Panas Eco-Friendly Berbasis Komposit dengan Memanfaatkan Ampas Sagu

Luthfi*¹, Azhar², Jagodang Harahap³, Teuku Riyadhshyah⁴, Sumardi⁵

^{1,3,5}Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe

²Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Lhokseumawe

⁴Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Lhokseumawe

Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

e-mail: *luthfi@pnl.ac.id

Abstrak

Sebagai negara produsen sagu terbesar di dunia, Indonesia memiliki potensi ampas sagu yang sangat besar yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal dan hanya dibuang begitu saja tanpa ada nilai manfaat yang diperoleh. Studi yang dilakukan dalam artikel ini memaparkan pemanfaatan ampas sagu dalam pembuatan komposit pereduksi panas dengan menggunakan bahan perekat resin unsaturated polyester yang murah dan banyak tersedia di pasaran. Ada tiga papan komposit yang berhasil dibuat dengan fraksi volume ampas sagu 20%, 30% dan 40%. Pengujian kemampuan dalam mereduksi panas dilakukan dengan mengukur konduktivitas termal dari komposit ampas sagu dengan menggunakan kotak pengujian dengan sensor termokopel DS18B20 yang dikontrol menggunakan mikrokontroler Arduino UNO. Kotak pengujian dibuat sedemikian rupa hingga dapat menguji empat buah spesimen komposit pada saat yang bersamaan dan dilengkapi dengan lampu 100W sebagai pemanas yang dipasang di bagian tengah atas dari kotak. Dari hasil pengujian diperoleh konduktivitas termal yang cukup rendah, $k \sim 0.2 - 0.15 \text{ W/(m.K)}$ dimana hal ini menunjukkan kemampuan mereduksi panas yang cukup baik. Persamaan korelasi yang menghubungkan persentase ampas sagu terhadap konduktivitas termal komposit juga telah berhasil dikembangkan dengan menggunakan pencocokan kurva regresi linear sederhana baik untuk keseluruhan data ataupun untuk rentang nilai dimana konduktivitas termal telah mencapai kondisi steady.

Kata kunci— komposit, ampas sagu, resin unsaturated polyester, konduktivitas termal, Arduino UNO, sensor termokopel DS18B20

Abstract

As the largest sago starch producer in the world, Indonesia has huge sago waste potential that has not been exploited. So far, it has been disposed of without any benefit being obtained. The study in this paper explained the utilization of sago waste in manufacturing heat-reduction composites using unsaturated polyester resin, which is cheap and widely available in the market. Three composites of different sago waste volume fractions, 20%, 30%, and 40%, were created. Heat-reduction capabilities of the composites were tested by a box equipped with DS18B20 thermocouple sensors controlled by an Arduino UNO microcontroller. The box was made in a special shape that can measure up to four composite specimens simultaneously and was equipped with a 100 W incandescent light bulb as a heat source placed at the box's center top. From tests performed, the thermal conductivities of the composites obtained were relatively small, $k \sim 0.2 - 0.15 \text{ W/(m.K)}$, which indicated the composite's good heat reduction capabilities. The correlation equations that created relationships between the sago waste volume fraction with the thermal conductivity of the composites have been developed successfully either for the whole range of data obtained or for the limited range where the values of the thermal conductivity were almost steady.

Keywords— composites, sago waste, unsaturated polyester resin, thermal conductivity, Arduino UNO, DS18B20 thermocouple sensors

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara tropis dimana kondisi dalam ruangan pada siang hari sangat tidak nyaman karena ruangan yang panas. Serat alami telah lama digunakan sebagai material rumah tradisional contoh daun rumbia / sagu telah lama digunakan sebagai bahan atap karena murah dan baik dalam menyerap panas. Walaupun demikian, saat ini penggunaan bahan alami dalam kegiatan konstruksi perlahan ditinggalkan karena cepat rusak. Pemanfaatan bahan alami dalam pembuatan komposit merupakan salah satu cara untuk meningkatkan daya tahannya.

Tepung sagu berasal dari batang sagu (metroxilon sagu). Pohon sagu tumbuh di rawa-rawa dataran rendah di daerah tropis dengan temperatur lingkungan 29 – 32 °C [1]. Batang sagu yang cukup tua, sekitar 8 – 12 tahun [1], kemudian dipotong-potong dan kemudian dibelah untuk diambil isinya. Isi batang sagu kemudian diperas untuk memisahkan pati sagu dengan ampasnya.

Indonesia merupakan negara dengan lahan sagu terluas di dunia, 206,150 hektar [2] dan produksi sagu terbesar dunia dengan total produksi 367,132 ton pada tahun 2021 [2]. Oleh karena itu bahan sisa yang dihasilkan sangat banyak. Tidak seperti Malaysia dimana ampas sagu berhasil diolah menjadi berbagai produk berguna [3], pengelolaan ampas sagu di Indonesia masih banyak kendala dan tantangan sehingga belum dapat dimanfaatkan secara optimal [4]. Hal inilah yang memotivasi tim pengusul untuk memberikan kontribusi pada pengembangan pemanfaatan dari ampas sagu ini untuk diolah lebih lanjut menjadi papan komposit mengingat potensinya sangat banyak dan melimpah.

Pengujian sifat-sifat termal dari komposit agak jarang ditemui dalam literatur dan jumlah artikel di bidang ini juga agak terbatas. Penelitian-penelitian awal termal komposit yang ditemukan pada literatur lebih banyak menggunakan persamaan analitik atau pemodelan numerik yang rumit [5]–[9]. Hal ini disebabkan karena komposit terdiri dari dua atau lebih material yang tersusun dengan pola tertentu sehingga penentuan besarnya konduktivitas termal memerlukan suatu metode yang kompleks. Progelhof et al. [5] mereview berbagai model teoritis yang digunakan untuk prediksi besarnya konduktivitas termal dari berbagai jenis material komposit. Mereka membandingkan akurasi dari model-model tersebut dengan menggunakan data eksperimental. Mereka menemukan bahwa model Lewis-Nielsen memberikan akurasi terbaik dari semua model yang mereka uji. James et al. [6] menggunakan kombinasi metode numerik dengan eksperimental dalam analisis termal komposit. Mereka memakai metode beda hingga (finite different) dalam koordinat kartesius dengan menggunakan persamaan Laplace dua dimensi. Walaupun model numerik mereka memberikan hasil dengan akurasi yang cukup baik, mereka tetap menganggap hasil eksperimental tetaplah yang terbaik.

Purwaningsih dan Sardjito [7] menggunakan pendekatan analitik yang hampir serupa Progelhof et al. [5]. Mereka mengembangkan model analitik mereka sendiri dengan menggunakan persamaan Laplace and persamaan Poisson. Dari beberapa model analitik yang mereka uji, model koordinat bola mereka memberikan akurasi yang paling tinggi ketika dibandingkan dengan hasil eksperimental. Pendekatan analitik yang paling mendalam dan komprehensif dilakukan Pietrak dan Wiśniewski [8]. Seperti halnya Progelhof et al. [5], mereka juga mereview dan membandingkan berbagai model teoritis yang digunakan untuk memprediksi konduktivitas termal komposit, namun mereka juga membuat visualisasi susunan filler pada matriks baik filler yang berbentuk partikel/serbuk maupun filler yang berbentuk serat silinder. Visualisasi susunan filler dalam matriks komposit yang paling detail diberikan oleh Burger et al. [9]. Mereka mereview metode-metode yang digunakan dalam menghitung konduktivitas termal komposit seperti halnya peneliti-peneliti lain. Namun visualisasi susunan filler dalam komposit yang mereka tampilkan dalam artikel mereka sangat lengkap dan dalam koordinat tiga dimensi baik filler yang tersusun secara teratur maupun secara acak.

Seiring berkembangnya teknologi peralatan laboratorium dan sistem pengukuran, analisis termal komposit mulai bergeser trendnya ke arah eksperimental [10]–[15]. Sweeting dan Liu [10] mengembangkan cara untuk mengukur konduktivitas termal komposit yang menggunakan

matriks polimer. Mereka menggunakan celah vakum dan memilih material isolasi secara hati-hati untuk meminimalkan konveksi dan radiasi. Validasi dari metode mereka dilakukan dengan menggunakan aluminium yang telah diketahui nilai konduktivitas termalnya. Hasil validasi menunjukkan korelasi yang sangat tinggi dari nilai konduktivitas termal yang diukur. Wibowo et al. [11] menguji pengaruh kepadatan dan ketebalan papan partikel sekam padi dengan matriks resin terhadap sifat termalnya. Mereka membuat kotak pengujian yang diberi pemanas di dalamnya. Proses pengujian mereka lakukan secara tertutup dengan menggunakan modifikasi metode ASTM C177 dengan sumber panas tidak melebihi 100 oC. Perpindahan kalor diasumsikan terjadi dalam arah satu dimensi saja tanpa memperhitungkan perpindahan kalor konveksi,

$$Q = \frac{kA}{\Delta x} (T_i - T_o) \quad (1)$$

Dimana Q adalah laju perpindahan kalor (W), k adalah konduktivitas termal (W/(mK)), Δx adalah ketebalan benda uji (m), T_i adalah temperatur benda uji bagian dalam (°C), dan T_o adalah temperatur benda uji bagian luar (°C). Mereka menemukan bahwa papan komposit dengan ketebalan 1 cm dan rasio pemadatan 6:1 memiliki konduktivitas termal paling rendah dan baik digunakan sebagai material isolator panas.

Penelitian serupa juga dilakukan oleh Wibowo et al. [12] dimana mereka mengukur konduktivitas termal dan menguji unjuk kerja isolator panas dari komposit sekam padi dengan menggunakan peralatan yang serupa. Namun dalam penelitian ini konveksi diperhitungkan dalam penentuan besar laju perpindahan kalor,

$$Q = \frac{(T_{\infty,i} - T_{\infty,o})}{\left(\frac{1}{h_i A}\right) + \left(\frac{\Delta x}{kA}\right) + \left(\frac{1}{h_o A}\right)} \quad (2)$$

Dimana h_i adalah koefisien perpindahan kalor konveksi dalam ruang pemanas (W/(m²K)), h_o koefisien perpindahan kalor konveksi di luar ruang pemanas (W/(m²K)), $T_{\infty,i}$ adalah temperatur dalam ruang pemanas (°C), dan $T_{\infty,o}$ adalah temperatur luar ruang pemanas (°C). Mereka menemukan bahwa sifat isolator panas komposit sekam padi lebih baik daripada gabus.

Marcos-Gómez et al. [13] meneliti konduktivitas termal komposit dengan permukaan yang tidak sempurna dengan menggunakan metode inklusi ekuivalen dan metode elemen hingga. Mereka menemukan konduktivitas termal efektif terbatas oleh sifat anisotropi dari komposit dan mereka menyarankan untuk berhati-hati dalam mengukur konduktivitas termal dalam kondisi seperti ini untuk menghindari kesalahan akibat dari sifat anisotropi tersebut. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Bustumi dan Ghofur [14] dimana mereka mengukur konduktivitas termal komposit serbuk kayu ulin dengan matriks resin polyester, konveksi juga diperhitungkan sebagaimana halnya dengan konduksi, namun hanya pada ruang luar pemanas. Pada bagian dalam ruang pemanas, temperatur ruang pemanas tidak diperhitungkan dan pengukuran temperatur langsung dilakukan pada dinding dalam benda uji. Laju perpindahan kalor konveksi persatuan luas atau fluks konveksi dari dinding luar benda uji ruang luar pemanas adalah,

$$q_{konveksi} = h_o (T_o - T_{\infty,o}) \quad (3)$$

Dimana q adalah fluks perpindahan kalor (W/m²), h_o adalah koefisien perpindahan kalor konveksi luar ruang pemanas (W/m²K), T_o adalah temperatur dinding luar benda uji (°C), dan $T_{\infty,o}$ adalah temperatur ruang luar pemanas (°C). Sementara fluks kalor konduksi dari dinding dalam benda uji ke dinding luar benda uji dihitung dengan menggunakan persamaan berikut,

$$q_{konduksi} = \frac{k}{\Delta x} (T_i - T_o) \quad (4)$$

Dimana k adalah konduktivitas termal yang akan dihitung (W/(mK)), Δx adalah ketebalan benda uji (m), dan T_i adalah temperatur dinding dalam benda uji (°C). Dari hasil pengujian, mereka menyimpulkan bahwa semakin tinggi fraksi volume kayu ulin maka konduktivitas termal akan menurun. Mereka juga mengamati fenomena void atau gelembung atau ruang kosong pada komposit yang tidak dapat dihindari karena adanya udara yang terperangkap dalam proses pembuatan komposit. Void ini tidak dapat dihindari karena resin yang mereka pakai sangat kental.

Adanya void ini walaupun akan meningkatkan kemampuan isolasi karena konduktivitas termal menurun, namun akan menurunkan kekuatan mekanik dari komposit tersebut [14].

Haisyah et al. [15] mempelajari karakter termal dari komposit yang terbuat dari sekam padi dan ampas tebu. Mereka menggunakan matriks perekat campuran yang terdiri dari urea formaldehyde, parafin dan katalis. Ada 7 buah sampel uji yang dibuat dengan komposisi sekam padi, ampas tebu dan campuran matriks yang berbeda. Mereka menemukan sampel dengan 100% sekam padi memiliki konduktivitas termal paling tinggi dan semakin tinggi persentase ampas tebu dalam komposit semakin rendah konduktivitas termal.

Penelitian yang dilakukan akhir-akhir juga didominasi oleh metode eksperimental, hanya saja pengujian termal dari komposit tidak hanya sebatas mengukur konduktivitas termal dan parameter pengujian juga lebih bervariasi [16]–[21]. Sebenarnya ada sangat banyak studi di bidang pengujian termal dari komposit yang ditemukan dalam literatur, namun yang disitasi di proposal ini hanya yang berkaitan dengan material yang digunakan dalam usulan penelitian ini yaitu ampas sago saja atau walaupun bukan ampas sago tapi metode pengujian yang dipakai serupa dengan yang diusulkan dalam artikel ini.

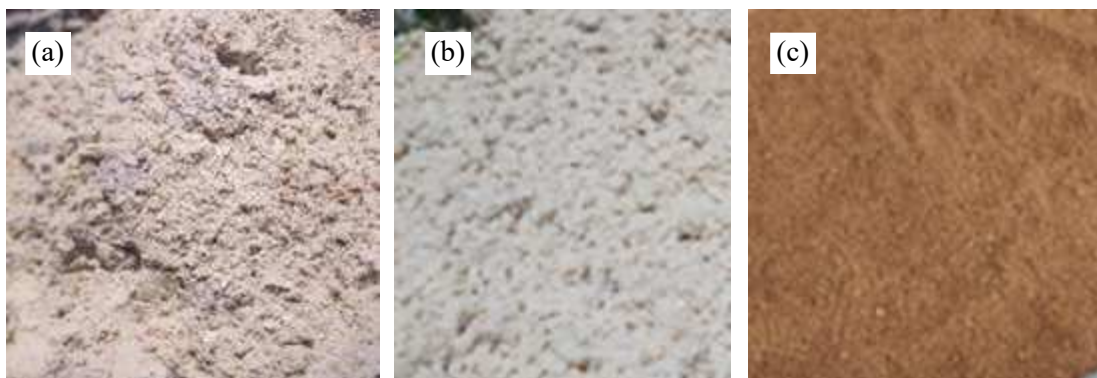
Papan komposit yang dihasilkan dari pemanfaatan ampas sago ditargetkan untuk dapat digunakan sebagai plafon, partisi ruangan dan bahan konstruksi bangunan yang selain ramah lingkungan, murah karena menggunakan bahan alami, juga memiliki daya reduksi panas yang baik. Bahan perekat yang akan digunakan adalah resin unsaturated polyester dengan pertimbangan murah, dan mudah didapat di kota Lhokseumawe. Sesuai dengan penggunaannya, tujuan dari studi yang dilakukan dalam artikel ini tentu adalah mendapatkan metode pembuatan yang optimal dan mendapatkan komposisi papan komposit ampas sago yang tepat agar dapat menghambat aliran panas. Oleh karena itu papan komposit dibuat dalam beberapa komposisi matriks dan ampas sago lalu diukur konduktivitas termalnya.

2. METODE PENELITIAN

Langkah pengerjaan penelitian yang diusulkan dalam proposal ini pada dasarnya terdiri dari beberapa tahapan yaitu: pembuatan komposit ampas sago; kotak pengujian konduktivitas termal; pembuatan spesimen; dan pengujian spesimen. Detail dari metode dan teknik yang digunakan untuk setiap tahapan akan dijelaskan secara rinci dalam sub bab berikut.

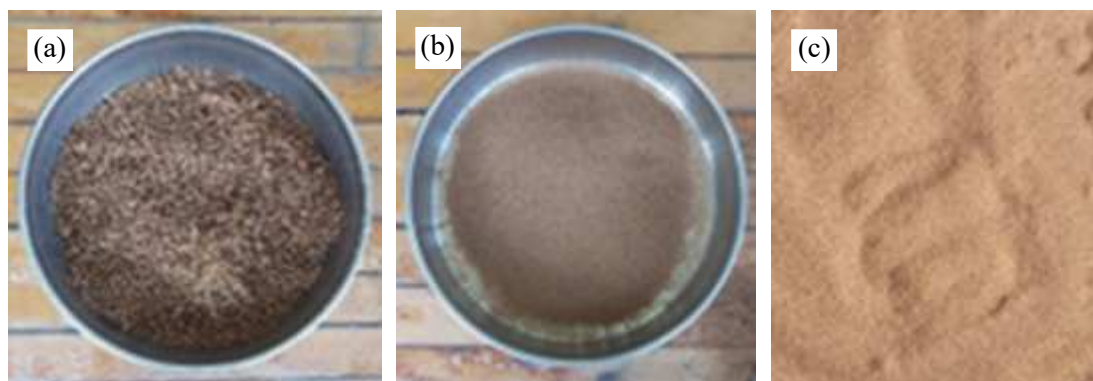
2.1 Pengumpulan ampas sago dan proses pengolahannya

Bahan baku ampas sago yang akan digunakan dalam penelitian direncanakan untuk diambil dari pabrik pengolahan sago di Alue Raya di belakang kampus Politeknik Negeri Lhokseumawe. Dalam proses uji coba, ampas sago mentah yang diambil dari pabrik dalam kondisi kotor dan bercampur dengan tanah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1(a). Ampas sago kemudian direndam di air dan dicuci hingga bersih (Gambar 1(b)) dan setelah itu kemudian dijemur. Proses penjemuran memerlukan waktu paling cepat sekitar 5 hari ketika cuaca panas terik. Warna ampas sago perlahan berubah menjadi coklat ketika kering (Gambar 1(c)).



Gambar 1. Proses pengolahan ampas sago

Untuk meningkat konsistensi dan keseragaman karakteristik dari komposit, ampas sagu yang telah kering diayak dengan menggunakan ayakan mesh 20 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2(a). Hasil ayakan ampas sagu kering setelah diayak terlihat seperti pada Gambar 2(a). Ampas sagu yang telah diayak dijemur selama beberapa saat untuk memastikan ampas sagu benar-benar kering. Ampas sagu yang telah kering dan siap untuk diproses lebih lanjut untuk menjadi komposit seperti pada Gambar 2(c) memiliki ukuran partikel maksimum 0.841 mm.



Gambar 2. Pengayakan ampas sagu

2.2 Alat dan bahan yang digunakan untuk membuat komposit

Resin unsaturated polyester dipilih untuk digunakan dalam pembuatan komposit ampas sagu dalam penelitian ini dengan pertimbangan selain harganya yang murah juga karena mudah didapat di lokasi penelitian yaitu di kota Lhokseumawe. Sifat-sifat dari resin unsaturated polyester dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat-sifat dari resin unsaturated polyester

Sifat-sifat	Satuan	Nilai
Densitas	g/cm ³	1.3 – 2
Kekuatan Tarik	MPa	33.5 – 70
Regangan Saat Putus	%	0.5 – 5
Modulus Tarik	GPa	3.102 – 10.6

Resin unsaturated polyester ini umumnya tersedia dan dijual dalam bentuk cairan kental yang dilengkapi dengan katalis dalam kemasan terpisah yang akan dicampur ketika resin digunakan. Fungsi dari katalis ini adalah sebagai hardener atau penguat resin. Perbandingan penggunaan katalis dalam penelitian ini sekitar 10-20 ml untuk 1 kg resin yang digunakan. Cetakan yang digunakan dalam proses pembuatan komposit berukuran 300 mm × 300 mm × 10 mm. Cetakan dilapisi dengan aluminium foil ketika digunakan. Resin dan katalis dicampurkan dengan ampas sagu yang telah diayak di dalam suatu wadah penampung dan diaduk dengan menggunakan mixer. Timbangan digital digunakan untuk memastikan perbandingan yang tepat antara resin dan ampas sagu. Komposit hasil cetakan diratakan dengan menggunakan gerinda tangan. Alat dan bahan yang digunakan dalam proses pembuatan komposit dirangkum dalam Tabel 2.

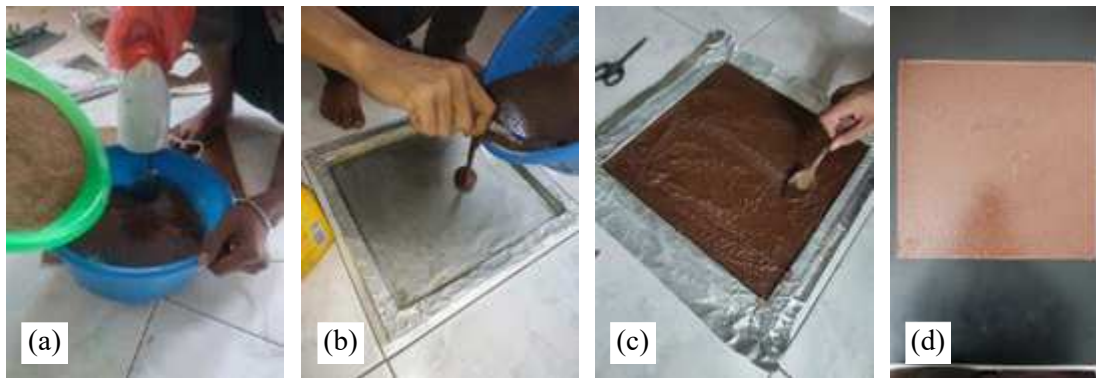
Tabel 2. Alat dan bahan yang diperlukan

No	Alat dan Bahan	Jumlah	Satuan
1	Ampas Sagu	Secukupnya	-
2	Resin Unsaturated Polyester	4	l
3	Katalis	4	botol
4	Cetakan	3	unit
5	Aluminium Foil	1	kotak

7	Wadah Penampung Komposit	1	unit
8	Mixer	1	unit
9	Gerinda Tangan	1	unit
10	Timbangan	1	unit

2.3 Proses pembuatan komposit

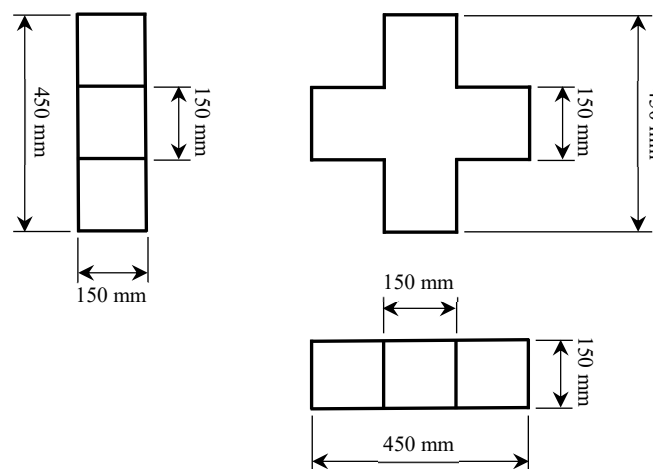
Proses pembuatan komposit dimulai dengan mengukur banyaknya resin dan ampas sagu yang akan dicampur sesuai dengan perbandingan fraksi volume yang ingin diuji. Setelah itu resin, katalis dan ampas sagu dicampur di dalam suatu wadah penampung dan diaduk dengan menggunakan mixer hingga tercampur rata seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3(a). Campuran ampas sagu resin dan katalis yang sudah teraduk rata kemudian dituangkan ke dalam cetakan (Gambar 3(b)) lalu kemudian diratakan (Gambar 3(c)). Cetakan akan mengering dan keras setelah didiamkan kurang lebih 24 jam. Hasil akhir dari cetakan dapat dilihat pada Gambar 3(d). Dalam penelitian ini ada tiga fraksi volume komposit ampas yaitu 20%, 30% dan 40 % ampas sagu yang digunakan dalam pembuatan komposit.



Gambar 3. Tahapan pembuatan komposit ampas sagu

2.4 Pengujian konduktivitas termal

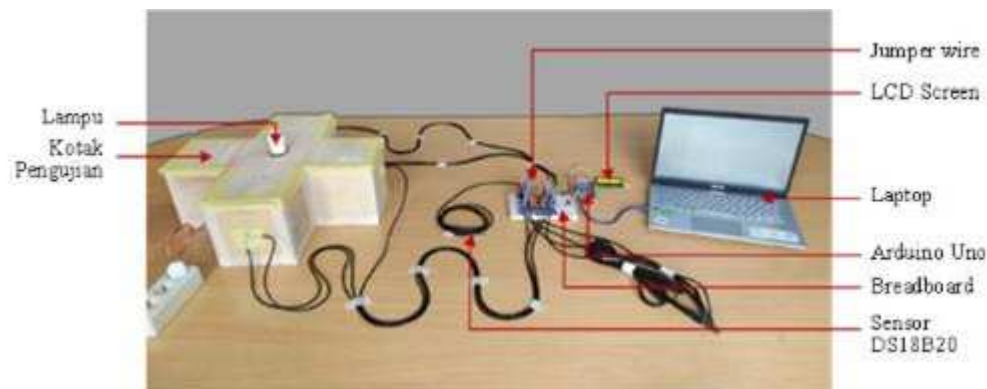
Pengujian dan pengukuran konduktivitas termal dari komposit direncanakan memodifikasi dan membangun ulang kotak pengujian yang dikerjakan oleh Daniel Iskandar [22]. Bentuk dan ukuran dari kotak pengujian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, dibuat sedemikian rupa sehingga dapat menguji dan mengukur konduktivitas termal hingga 4 buah spesimen pada saat yang bersamaan. Untuk dapat dipasang pada kotak pengujian ini, papan komposit harus dipotong terlebih dahulu dengan ukuran 150 mm × 150 mm.



Gambar 4. Ilustrasi kotak pengujian konduktivitas termal

Kotak pengujian seperti pada Gambar 5, dipasang lampu pijar 100 W pada bagian tengah atasnya yang berfungsi sebagai sumber kalor. Temperatur diukur dengan menggunakan sensor termokopel DS18B20 yang dikendalikan dengan menggunakan mikrokontroler Arduino UNO. Untuk setiap spesimen yang dipasang pada kotak pengujian, ada tiga buah sensor temperatur yang digunakan, dua buah sensor untuk masing-masing sisi dalam dan sisi luar spesimen dan satu buah sensor untuk mengukur temperatur ruang luar. Satu buah sensor temperatur juga dipasang pada ruang dalam untuk mengukur temperatur lampu pijar yang digunakan sebagai sumber panas.

Kabel sensor termokopel DS18B20 dirangkai terlebih dahulu pada breadboard sebelum dihubungkan ke mikrokontroler Arduino UNO. Ada tiga tipe kabel pada setiap sensor DS18B20 yaitu vcc (kabel warna merah), data (kabel warna kuning), dan ground (kabel warna hitam). Setiap kabel sensor dihubungkan ke breadboard dengan menggunakan terminal 3-pin dan dirangkai lebih lanjut pada breadboard dengan menggunakan kabel jumper male to male 10 cm. Sebuah resistor 4.7 k Ω digunakan untuk menghubungkan kabel data dengan kabel vcc. Rangkaian pada breadboard kemudian dihubungkan ke mikrokontroler Arduino UNO dengan menggunakan kabel jumper 20 cm. Sebuah panel I2C LCD 2 \times 16 digunakan menampilkan hasil bacaan temperatur. Mikrokontroler Arduino UNO kemudian dihubungkan ke PC atau laptop dengan menggunakan kabel mini USB – USB A. Software IDE digunakan untuk mengontrol Arduino dengan menggunakan bahasa pemrograman Arduino yang struktur dan perintahnya mirip bahasa C. Semua peralatan dan komponen yang digunakan dalam proses pengujian konduktivitas termal dirangkum dalam Tabel 3.



Gambar 5. Susunan peralatan pengujian termal komposit

Tabel 3. Komponen yang diperlukan untuk pengujian termal

Komponen	Jumlah
Arduino UNO DIP	1
Bola lampu pijar, 100 W	1
Breadboard, 830-pin	1
I2C LCD, 2 \times 16	1
Kabel jumper, 10 cm	Secukupnya
Kabel jumper, 20 cm	Secukupnya
Kabel USB	1
Kotak pengujian	1
Resistor 4.7 k Ω	1
Sensor DS18B20, 1 m	5
Terminal blok, 3-pin	5

2.5 Perhitungan konduktivitas termal dari data temperatur

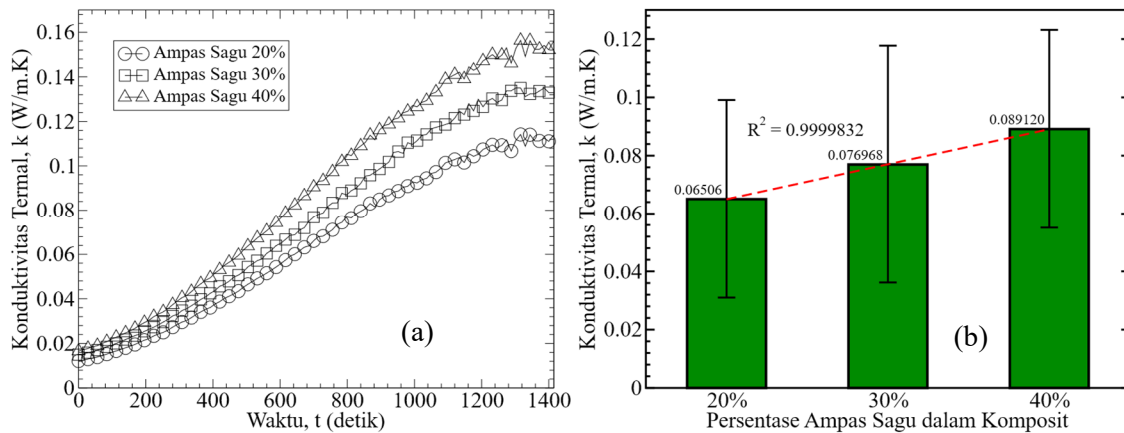
Dalam proses pengujian diperoleh empat buah data temperatur yaitu temperatur sumber pemanas atau temperatur lampu, T_{lampu} , temperatur dinding dalam spesimen, T_i , temperatur dinding luar spesimen, T_o , dan temperatur ruang luar ruang pemanas, $T_{\infty,o}$. Fluks perpindahan

kalor konveksi dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan (3), dimana koefisien perpindahan kalor konveksi adalah nilai tipikal konveksi alamiah permukaan vertikal, $h_o = 8.1 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ [14]. Dengan asumsi fluks perpindahan kalor tidak berubah, $q_{\text{konduksi}} = q_{\text{konveksi}}$, maka konduktivitas termal dapat dihitung dengan menggabungkan persamaan (3) dan (4),

$$k = \Delta x \cdot h_o \frac{(T_o - T_\infty)}{(T_i - T_o)} \quad (5)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian konduktivitas termal komposit ampas sagu dilakukan secara serempak untuk semua spesimen. Proses pengukuran temperatur dari spesimen komposit untuk semua variasi fraksi volume dilakukan setiap 14 detik dan dilakukan selama kurang lebih 1400 detik atau sekitar 23 menit. Konduktivitas termal dari hasil pengujian seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, langsung dihitung secara otomatis di dalam kode program Arduino IDE ketika proses pengujian berlangsung. Nilai konduktivitas termal berkisar $k \sim 0.02 \text{ W}/(\text{m}.\text{K})$ pada $t = 0$ hingga maksimum $k \sim 0.015$ pada $t = 1400$ detik. Hal ini menunjukkan dengan konduktivitas termal yang relatif sangat kecil, komposit ampas sagu dengan fraksi volume apa saja dapat digunakan sebagai material pereduksi panas.



Gambar 6. Hasil pengujian konduktivitas termal, (a) raw data, dan (b) Nilai rata-rata konduktivitas termal untuk seluruh rentang data pengujian

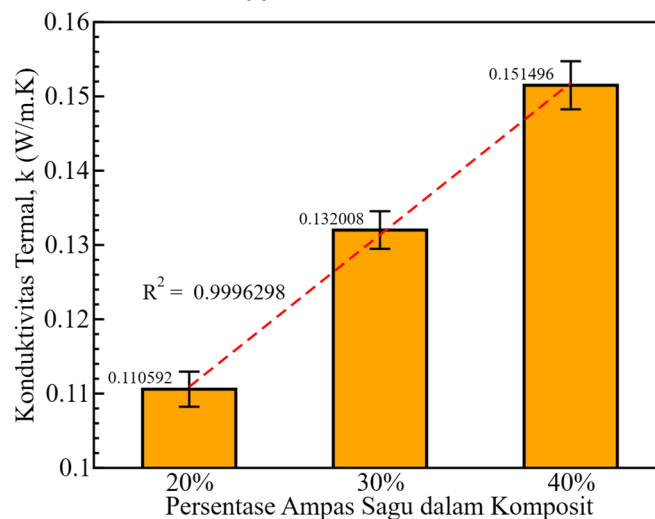
Seperti yang terlihat pada Gambar 6(a), seiring dengan bertambahnya waktu dan meningkatnya temperatur, maka konduktivitas termal akan meningkat. Hal ini wajar dan dapat dipahami dengan baik karena pada saat sumber panas belum dinyalakan, tidak ada perbedaan temperatur baik sisi dalam atau sisi luar spesimen sehingga perhitungan konduktivitas termal dengan menggunakan persamaan 5 menjadi sangat rendah dan tidak akurat. Perbedaan konduktivitas termal antar spesimen juga tidak begitu kentara di awal perekaman dan perhitungan konduktivitas termal. Namun perbedaan nilai dari konduktivitas terlihat semakin jelas dengan bertambahnya waktu. Pengaruh persentase dari ampas sagu terhadap besarnya nilai konduktivitas termal jelas terlihat dari sejak dimulainya perekaman data dimulai dimana semakin besar fraksi volume dalam komposit semakin besar konduktivitas termalnya.

Untuk melihat lebih jelas pengaruh dari persentase ampas sagu, nilai rata-rata konduktivitas termal dari sejak dimulai pencatatan data sampai dengan selesai dihitung dan diplot pada Gambar 6(b). Seperti yang terlihat pada Gambar 6(b), kenaikan konduktivitas termal akibat dari peningkatan fraksi volume ampas sagu dalam komposit dapat dicocokkan dengan menggunakan kurva regresi linear dengan akurasi yang cukup baik yaitu $R^2 = 0.9999832$. Persamaan regresi linear yang diperoleh dari proses pencocokan kurva adalah sebagai berikut,

$$k = 0.040955 + 0.0012031 \cdot VF_{\text{sagu}} \quad (6)$$

dimana VF_{sagu} adalah persentase ampas sagu dalam komposit dalam persen.

Penggunaan nilai konduktivitas termal seperti yang ditampilkan dalam Gambar 6(b) dan persamaan (6) mungkin akan banyak menimbulkan keraguan karena nilai ketidakpastian dari garis errornya terlalu besar. Dari sudut pandang keterwakilan data, nilainya mungkin representatif karena menggunakan seluruh data hasil pengujian dalam pembuatan plot dan pencocokan kurva. Namun akan timbul perdebatan apakah data yang digunakan dalam pembuatan kurva sudah benar dan akurat. Jika plot konduktivitas termal terhadap waktu seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6(a) dilihat secara lebih seksama, nilai konduktivitas sampai dengan $t = 1200$ s sebenarnya sedang berkembang dan masih dalam proses perubahan. Setelah $t > 1200$ s barulah nilai konduktivitas termal menunjukkan konsistensi walaupun nilainya masih fluktuatif. Nilai pada $t > 1220$ s yang merupakan nilai sebenarnya dari konduktivitas termal dari ampas sagu. Oleh karena itu, nilai rata-rata konduktivitas termal seharusnya tidak dihitung dengan menggunakan semua data tapi cukup dengan menggunakan data setelah $t > 1200$ s.



Gambar 7. Nilai rata-rata konduktivitas termal untuk rentang data terbatas

Plot nilai konduktivitas termal rata-rata yang dihitung dari $1200 \text{ s} < t < 1400 \text{ s}$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 memiliki error bar yang relatif pendek. Ini berarti tingkat kesalahan dari nilai konduktivitas termal relatif lebih rendah dan nilai konduktivitas termal dapat digunakan dengan keyakinan dan tingkat kepercayaan yang lebih tinggi. Pencocokan kurva dengan menggunakan regresi linear juga menghasilkan akurasi yang cukup tinggi dengan $R^2 = 0.9996298$. Persamaan yang diperoleh dari proses pencocokan kurva dengan menggunakan pendekatan regresi linear adalah sebagai berikut,

$$k = 0.070009 + 0.0020452 \cdot VF_{sagu} \quad (7)$$

Persamaan (7) mungkin akan lebih akurat dalam menentukan konduktivitas termal dari komposit ampas sagu dibandingkan dengan persamaan (6). Namun perlu diperhatikan bahwa, data yang digunakan untuk membuat persamaan (7) hanya pada $1200 \text{ s} < t < 1400 \text{ s}$. Jika tingkat representatif dari data merupakan hal yang penting, maka sebaiknya tetap menggunakan persamaan (6).

4. KESIMPULAN

Pembuatan komposit untuk memanfaatkan ampas sagu dengan menggunakan resin unsaturated polyester telah dilakukan dengan baik. Ada tiga buah yang berhasil dibuat yaitu komposit dengan fraksi volume ampas sagu 20%, 30% dan 40%. Peralatan pengukur konduktivitas termal dengan menggunakan kotak yang diberi pemanas di dalamnya dan dilengkapi dengan sensor DS18B20 yang dikendalikan oleh mikrokontroler Arduino UNO telah berhasil dimodifikasi untuk dapat menguji konduktivitas termal dari komposit ampas sagu yang dibuat pada penelitian ini. Dari hasil pengukuran dan perhitungan konduktivitas termal diperoleh nilai konduktivitas yang cukup

rendah, $k \sim 0.2 - 0.15$ untuk semua papan komposit dengan fraksi volume ampas sagu manapun. Hal ini menunjukkan komposit ampas sagu yang dibuat dalam penelitian ini dapat digunakan untuk mereduksi panas dengan baik. Persamaan korelasi antara persentase ampas sagu dengan nilai konduktivitas termal dari komposit telah dikembangkan baik untuk keseluruhan data hasil pengujian ataupun untuk rentang data dimana nilai konduktivitas relatif telah relatif konstan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini dilaksanakan dengan dukungan finansial dari dana Penelitian Terapan DIPA Politeknik Negeri Lhokseumawe tahun 2024, oleh karena itu penulis mengungkapkan apresiasi dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya pada Politeknik Negeri Lhokseumawe yang telah memberikan kepercayaan kepada penulis untuk mengelola dana penelitian yang diperlukan untuk menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Ehara and Y. Toyoda, Eds., *Sago Palm*. Springer Singapore, 2018.
- [2] M. Hamid, "Strategi Pengembangan Sagu di Kabupaten Kepulauan Meranti," *JIP (J. Ind. dan Perkota.)*, vol. 18, no. 2, p. 54, 2022, doi: 10.31258/jip.18.2.54-62.
- [3] N. Amin, N. Sabli, S. Izhar, and H. Yoshida, "Sago wastes and its applications," *Pertanika J. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 4, pp. 1841–1862, 2019.
- [4] T. H. Rasyid, Y. Kusumawaty, and S. Hadi, "The utilization of sago waste: Prospect and challenges," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 415, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/415/1/012023.
- [5] R. C. Progelhof, J. L. Throne, and R. R. Ruetsch, "Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review," *Polym. Eng. Sci.*, vol. 16, no. 9, pp. 615–625, 1976, doi: 10.1002/pen.760160905.
- [6] B. W. James, G. H. Wostenholm, G. S. Keen, and S. D. McIvor, "Prediction and measurement of the thermal conductivity of composite materials," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 20, no. 3, pp. 261–268, 1987, doi: 10.1088/0022-3727/20/3/004.
- [7] S. S. Purwaningsih and S. Sardjito, "Penentuan Konduktivitas Termal Efektif Bahan Komposit secara Analitik," *Sigma-Mu*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2007.
- [8] K. Pietrak and T. S. Wiśniewski, "A review of models for effective thermal conductivity of composite materials," *J. Power Technol.*, vol. 95, no. 1, pp. 14–24, 2015.
- [9] N. Burger, A. Laachachi, M. Ferriol, M. Lutz, V. Toniazzo, and D. Ruch, "Review of thermal conductivity in composites: Mechanisms, parameters and theory," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 61, pp. 1–28, 2016, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2016.05.001.
- [10] R. D. Sweeting and X. L. Liu, "Measurement of thermal conductivity for fibre-reinforced composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 35, no. 7–8, pp. 933–938, 2004, doi: 10.1016/j.compositesa.2004.01.008.
- [11] H. Wibowo, T. Rusianto, and M. Ikhsan, "Pengaruh Kepadatan dan Ketebalan Terhadap Sifat Isolator Panas Papan Partikel Sekam Padi," *J. Teknol.*, vol. 1, no. 2, pp. 107–111, 2008.
- [12] H. Wibowo, T. Rusianto, and A. Sujatmiko, "Unjuk Kerja Papan Partikel Sekam Padi Sebagai Isolator Panas," no. *Snttm Xii*, pp. 23–24, 2013.
- [13] D. Marcos-Gómez, J. Ching-Lloyd, M. R. Elizalde, W. J. Clegg, and J. M. Molina-Aldareguia, "Predicting the thermal conductivity of composite materials with imperfect interfaces," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 70, no. 16, pp. 2276–2283, 2010, doi: 10.1016/j.compscitech.2010.05.027.

-
- [14] F. Bustomi and A. Ghofur, "Uji Konduktivitas Termal Komposit Poliester Filler Serbuk Kayu Ulin (Eusideroxylon Zwageri)," *Jtam Rotary*, vol. 3, no. 2, pp. 233–244, 2021, doi: 10.20527/jtam_rotary.v3i2.4367.
- [15] H. Haisyah, Y. Arman, and A. Azwar, "Konduktivitas Termal Papan Komposit dari Sekam Padi dan Ampas Tebu," *Prism. Fis.*, vol. 9, no. 3, pp. 208–212, 2021.
- [16] J. C. Lai, W. A. W. A. Rahman, and W. Y. Toh, "Characterisation of sago pith waste and its composites," *Ind. Crops Prod.*, vol. 45, pp. 319–326, 2013, doi: 10.1016/j.indcrop.2012.12.046.
- [17] T. C. Chiang, S. Hamdan, and M. S. Osman, "Urea Formaldehyde Composites Reinforced with Sago Fibres Analysis by FTIR, TGA, and DSC," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2016, 2016, doi: 10.1155/2016/5954636.
- [18] A. N. Ahmad, S. A. Lim, N. Navaranjan, Y. I. Hsu, and H. Uyama, "Green sago starch nanoparticles as reinforcing material for green composites," *Polymer (Guildf.)*, vol. 202, no. February, p. 122646, 2020, doi: 10.1016/j.polymer.2020.122646.
- [19] W. Sutrisno, M. Rahayu, and D. R. Adhika, "Thermal properties of sago fiber-epoxy composite," *Fibers*, vol. 8, no. 1, pp. 1–13, 2020, doi: 10.3390/fib8010004.
- [20] E. T. Maryanto, A. Setyawan, T. S. B. Maria, and W. Astuti, "Analysis of the Performance of Natural Composite Materials Reinforced with Sago Sheath Fibers as an Alternative Material in Overcoming the Effect of Urban Heat Islands on Buildings," *Buildings*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.3390/buildings13010018.
- [21] Nusyirwan, H. Abral, M. Hakim, and R. Vadia, "The potential of rising husk fiber/native sago starch reinforced biocomposite to automotive component," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 602, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/602/1/012085.
- [22] D. Iskandar, "Manufaktur dan kinerja reduksi panas papan komposit berbasis partikel cocopeat," Politeknik Negeri Lhokseumawe, 2023.
-