

KARAKTERISTIK SOLID RECOVERY FUEL (SRF) DARI BRIKET ARANG PIROLISIS BIO MASSA SEBAGAI CO FIRING SISTEM TENAGA UAP

Lukman Aziz ¹⁾ ✉, Tarsono Dwi Susanto ²⁾. ✉

¹⁾ Jurusan Teknik Mesin,
STT WIWOROTOMO PURWOKERTO
Jl. semingkir No. 01 Purwokerto,
Banyumas, Jawa Tengah, INDONESIA -
53134

lukmanaziz484@gmail.com

²⁾ Jurusan Teknik Mesin,
STT WIWOROTOMO PURWOKERTO
Jl. semingkir No. 01 Purwokerto,
Banyumas, Jawa Tengah, INDONESIA -
53134

t25ono7212@gmail.com

Abstract

This study focuses on the development and evaluation of a prototype horizontal tubular biomass pyrolysis reactor with a capacity of 20 kg, designed to operate autonomously by utilizing part of the produced pyrolysis gas as a heat source. The reactor processes biomass materials, specifically wood and coconut shells, into bio-oil, gas, and charcoal through pyrolysis at temperatures ranging from 300 to 500°C in an oxygen-free environment. The research includes equipment design, functional testing, and product analysis. Key parameters observed include reactor temperature, processing time, and product yield. The results show that the reactor effectively achieved the required pyrolysis temperature using an initial heating system and was able to maintain it by burning the produced pyrolysis gas. The pyrolysis process took approximately 180 minutes to convert 20 kg of biomass. The output consisted of an average of 4.8 kg of bio-oil, 7.2 kg of charcoal, and gas that was reused as an internal fuel source. Utilizing pyrolysis gas for heating significantly reduced external fuel consumption, thereby improving energy efficiency. The product characteristics indicate that wood charcoal contains 18.6% moisture, 7.95% ash, and has a heating value of 28.8 MJ/kg, while coconut shell charcoal contains 27.4% moisture, 3.54% ash, and has a heating value of 27.4 MJ/kg. The microstructure analysis shows that wood charcoal has larger and irregular pores, whereas coconut shell charcoal has smaller and denser pores, reflecting the inherent structure of the raw materials. The charcoal yields were 42.66% for wood and 40.8% for coconut shell. The pyrolysis gas, mainly composed of combustible components, was recycled as an internal fuel, enabling the reactor to maintain a self-sufficient operation. In conclusion, the 20 kg capacity horizontal tubular biomass pyrolysis reactor proved efficient in converting biomass into renewable energy products, producing high-quality charcoal with good combustion characteristics. This technology shows strong potential as a sustainable alternative energy solution for rural areas rich in biomass resources.

Keywords: *Pyrolysis, Biomass, Horizontal Tube Reactor, Bio-oil, Charcoal, Self-Sufficient.*

1. PENDAHULUAN

Krisis energi dan penumpukan limbah biomassa mendorong pengembangan teknologi pirolisis sebagai solusi yang berkelanjutan. Studi terkini menunjukkan bahwa pirolisis biomassa mampu mengubah limbah organik menjadi tiga produk utama yaitu biochar, syngas, dan bio-oil dengan efisiensi energi antara 70% hingga 85% [1]. Namun, sebagian besar reaktor pirolisis yang ada masih menggunakan sistem batch dengan kapasitas terbatas dan sangat bergantung pada sumber energi eksternal, sehingga kurang cocok untuk aplikasi skala komersial [2]. Inovasi pada desain reaktor tipe tabung horizontal memberikan distribusi panas yang lebih merata dan meningkatkan efisiensi termal sebesar 15–20% dibandingkan reaktor vertikal konvensional [3]. Selain itu, penggunaan pemanasan gelombang mikro pada sistem

tabung horizontal mampu meningkatkan rendemen biochar hingga 28% pada kapasitas 10 kg/jam [4]. Konsep sistem yang mandiri energi menjadi fokus penting dalam pengembangan reaktor pirolisis modern, di mana integrasi antara unit pirolisis dan pemanfaatan syngas dapat memenuhi 60–80% kebutuhan energi proses tergantung jenis biomassa yang digunakan [2]. Optimalisasi parameter operasional seperti ukuran partikel biomassa (1–3 mm) dan suhu pirolisis (450–550°C) juga berperan dalam meningkatkan kualitas syngas untuk kebutuhan energi internal [5]. Analisis tekno-ekonomi menunjukkan bahwa reaktor dengan kapasitas 20 kg merupakan skala yang ideal untuk usaha kecil dan menengah dengan periode pengembalian modal sekitar 2–3 tahun [2]. Meski demikian, tantangan teknis seperti pengendalian suhu otomatis dan distribusi panas yang merata pada reaktor horizontal kapasitas menengah masih perlu diatasi [3]. Penelitian ini bertujuan mengisi kekurangan tersebut dengan merancang prototipe reaktor pirolisis biomassa tipe tabung horizontal berkapasitas 20 kg yang dapat beroperasi secara mandiri dengan memanfaatkan sebagian gas hasil pirolisis sebagai sumber panas utama. Reaktor ini dirancang agar mampu mencapai efisiensi energi hingga 80% dengan konsumsi energi internal kurang dari 20%, mendukung penerapan teknologi pirolisis yang hemat energi dan ramah lingkungan. Pentingnya penelitian ini terletak pada kontribusinya terhadap pengembangan sistem konversi energi biomassa yang efisien, mandiri, dan aplikatif di tingkat masyarakat. Melalui hasil pengujian, reaktor yang dikembangkan terbukti mampu menghasilkan bio-oil, arang, dan gas dengan karakteristik energi yang tinggi—antara lain nilai kalor arang kayu mencapai 28,8 MJ/kg dan tempurung kelapa 27,4 MJ/kg—serta kadar abu rendah, menjadikannya layak sebagai bahan bakar alternatif. Selain itu, sistem ini membuktikan kemampuan operasi mandiri dengan memanfaatkan gas hasil pirolisis sebagai sumber panas, sehingga menekan ketergantungan terhadap bahan bakar eksternal. Dengan desain yang sederhana, efisien, dan mudah dioperasikan, reaktor ini potensial diterapkan di wilayah pedesaan yang kaya akan biomassa seperti kayu dan tempurung kelapa. Oleh karena itu, penelitian ini penting tidak hanya dari sisi ilmiah dan teknis, tetapi juga sebagai langkah nyata menuju penerapan teknologi energi terbarukan yang berkelanjutan, ekonomis, dan sesuai kebutuhan masyarakat skala kecil hingga menengah.

2. METODE DAN BAHAN

Konsep perancangan prototipe reaktor ini dikembangkan untuk mengoptimalkan proses pirolisis biomassa dan memaksimalkan efisiensi konversi. Perancangan ini bertujuan agar alat mampu mengubah biomassa menjadi produk energi terbarukan (bio-oil, arang, dan gas) secara mandiri, sekaligus berkontribusi pada pemanfaatan limbah biomassa dan pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil. Berikut ini dijelaskan tahapan perancangan prototipe reaktor pirolisis biomassa tipe tabung mendatar berkapasitas 20 kg. Untuk jenis bahan baku pirolisis yang digunakan yaitu kayu dan tempurung kelapa. Dalam penelitian ini digunakan dua faktor utama, yaitu jenis bahan baku biomassa dan suhu pirolisis, yang masing-masing memiliki beberapa level pengujian. Faktor pertama, yaitu jenis bahan baku, terdiri dari dua level:

1. Kayu (biomassa lignoselulosa dengan kadar air rendah).



Gambar 1. Kayu

2. Tempurung kelapa (biomassa keras dengan kandungan karbon tinggi).

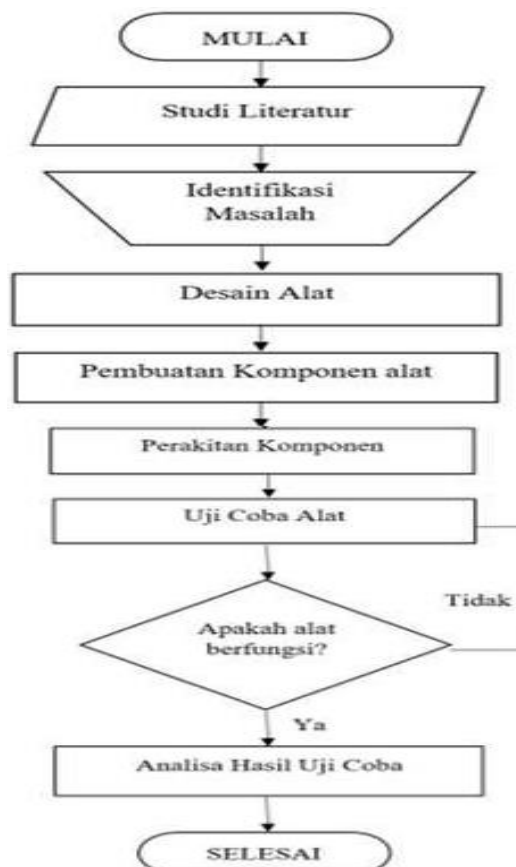


Gambar 2. Tempurung Kelapa

Faktor kedua adalah suhu pirolisis, yang divariasikan pada tiga level untuk melihat pengaruhnya terhadap rendemen dan karakteristik produk, yaitu 300°C, 400°C, dan 500°C. Parameter operasional lain yang dijaga konstan meliputi waktu tinggal (± 180 menit), kapasitas biomassa 20 kg per batch, dan sistem pemanasan menggunakan gas hasil pirolisis (self-sufficient heating). Setiap kombinasi faktor dan level tersebut diamati terhadap rendemen arang, bio-oil, dan gas, serta karakteristik energi produk, meliputi kadar air, kadar abu, karbon tetap, dan nilai kalor. Hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi suhu berpengaruh signifikan terhadap jumlah dan kualitas produk, di mana suhu 400–500°C memberikan hasil bio-oil dan arang dengan nilai kalor tertinggi, sementara jenis bahan baku menentukan perbedaan kadar abu dan struktur pori arang yang dihasilkan.

2.1. Diagram Alir penelitian

Proses penelitian ini memerlukan beberapa tahapan kegiatan yang akan dilakukan. Diagram alir dibutuhkan untuk mempermudah dalam kegiatan penelitian ini dapat dilihat dari gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

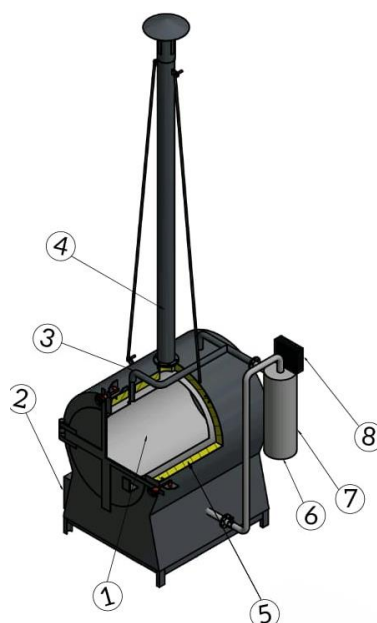
2.2. Metode deskripsi

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen deskriptif dengan melakukan perancangan dan pengujian prototipe reaktor pirolisis biomassa tipe tabung horizontal berkapasitas 20 kg. Reaktor dirancang menggunakan baja karbon dengan sistem pemanas tidak langsung yang memanfaatkan gas hasil pirolisis sebagai sumber panas internal sehingga dapat beroperasi secara mandiri energi (*self-sufficient*).

Bahan baku yang digunakan adalah kayu dan tempurung kelapa sebanyak 20 kg per siklus. Proses pirolisis dilakukan pada suhu 300°C, 400°C, dan 500°C dengan waktu reaksi sekitar 180 menit. Parameter yang diamati meliputi suhu reaktor, waktu proses, dan rendemen produk (arang, bio-oil, dan gas). Hasil produk dianalisis untuk menentukan kadar air, kadar abu, karbon tetap, dan nilai kalor, kemudian data diolah secara deskriptif untuk menilai kinerja dan efisiensi reaktor.

2.3. Desain Alat, Fungsi, dan Spesifikasi

Bahan Desain reaktor pirolisis dibuat guna memudahkan proses konstruksi sekaligus menjamin kesesuaian fungsi alat. Konsep yang digunakan merupakan penyempurnaan dari penelitian terdahulu, dengan beberapa perubahan agar kinerja lebih efisien dan mampu menerapkan prinsip *self sufficient*.



Gambar 4. Desain Alat Pirolisis

Berdasarkan gambar desain alat pirolisis yang telah dirancang, berikut penjelasan mengenai fungsi dan spesifikasi masing-masing komponen. Beberapa fungsi dan spesifikasi utama alat tersebut meliputi:

1. Ruang Pembakaran
Ruang pembakaran berfungsi sebagai sumber panas awal yang menaikkan temperatur reaktor hingga 300–500 °C. Bagian ini dibuat dari baja karbon dan dilapisi *glasswool* sehingga panas dapat dipertahankan lebih lama dan efisiensi termal meningkat.
2. Pintu Bahan Baku
Pintu bahan baku digunakan untuk memasukkan biomassa berupa kayu atau tempurung kelapa ke dalam reaktor. Pintu ini berbentuk silinder dengan *flange* dan baut pengunci yang dirancang agar tetap kedap udara selama proses pirolisis berlangsung.
3. Ruang Pemanasan / Reaktor Tabung Mendatar
Reaktor tabung mendatar merupakan ruang utama terjadinya proses pirolisis dengan kapasitas 20 kg biomassa. Terbuat dari baja karbon A36, reaktor berdiameter sekitar 500 mm dan panjang 700 mm ini mampu beroperasi pada suhu 300–500 °C.

4. Cerobong

Cerobong berfungsi menyalurkan asap hasil pembakaran ke atmosfer dan menjaga aliran udara di dalam sistem. Komponen ini berupa pipa baja vertikal dengan ketinggian tertentu serta dilengkapi penutup untuk mencegah masuknya udara balik.

5. Saluran Gas Menuju Kondensor

Saluran gas menghubungkan reaktor dengan kondensor untuk menyalurkan uap hasil pirolisis. Pipa baja tahan panas digunakan agar uap dapat mengalir dengan lancar tanpa kehilangan energi panas yang signifikan.

6. Kondensor

Kondensor berfungsi mengubah uap hasil pirolisis menjadi bio-oil cair. Pendinginan dilakukan melalui pipa tembaga spiral berdiameter 1,25 inci yang direndam dalam air pendingin berkapasitas sekitar 35 liter.

7. Tangki Pendingin

Tangki pendingin berperan sebagai wadah air yang digunakan untuk mendinginkan kondensor. Terbuat dari baja atau stainless steel dengan kapasitas sekitar 35 liter, tangki ini dilengkapi saluran masuk dan keluar air untuk menjaga sirkulasi.

8. Filter Asap

Filter asap digunakan untuk menurunkan kadar polutan gas buang yang tidak terkondensasi. Sistem berbentuk tangki silinder ini memanfaatkan metode *wet scrubber* dengan penyemprotan air serta lapisan serat atau karung goni sebagai media penyaring.

Parameter utama yang diamati pada pengujian reaktor meliputi suhu reaktor, waktu proses, kapasitas biomassa, rendemen produk, karakteristik produk, dan efisiensi energi. Suhu reaktor diukur menggunakan *thermocouple* tipe K pada tiga titik pengukuran (depan, tengah, dan belakang) dengan rentang operasi 300°C–500°C, yang berperan menentukan laju pirolisis serta komposisi produk yang dihasilkan. Waktu proses pirolisis dihitung sejak awal pemanasan hingga pendinginan, dengan durasi sekitar 180 menit per siklus. Kapasitas biomassa yang digunakan sebesar 20 kg per batch untuk bahan baku kayu dan tempurung kelapa, yang memengaruhi efisiensi termal dan volume produk akhir. Rendemen produk dihitung berdasarkan persentase massa hasil terhadap biomassa awal, terdiri dari bio-oil sekitar 24%, arang 36%, dan gas 40%. Karakteristik produk meliputi analisis bio-oil (densitas, viskositas, dan nilai kalor ± 26 MJ/kg), arang (kadar air, kadar abu, karbon tetap, dan nilai kalor 27–29 MJ/kg), serta gas (komposisi utama CO, H₂, dan CH₄) yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar internal reaktor. Efisiensi energi dihitung dari perbandingan antara energi total produk terhadap energi biomassa input, dengan target sistem mencapai 70–80% berkat pemanfaatan gas hasil pirolisis sebagai sumber panas pemanas utama.

Kelebihan utama reaktor pirolisis tipe tabung horizontal berkapasitas 20 kg ini terletak pada kemampuannya beroperasi secara mandiri energi (*self-sufficient*) melalui pemanfaatan gas hasil pirolisis sebagai sumber panas internal, sehingga mampu mengurangi kebutuhan bahan bakar eksternal hingga sekitar 80%. Desain tabung mendatar memungkinkan distribusi panas yang lebih merata di seluruh ruang reaktor, menghasilkan proses pirolisis yang lebih stabil dan seragam dibandingkan dengan sistem vertikal konvensional. Lapisan isolasi glasswool pada ruang pembakaran meningkatkan efisiensi termal dengan meminimalkan kehilangan panas. Reaktor juga memiliki konstruksi sederhana dan ekonomis karena terbuat dari baja karbon A36 yang mudah didapat dan tahan suhu tinggi, sehingga mudah dibuat, dirakit, serta dirawat. Selain itu, sistem dilengkapi filter asap tipe *wet scrubber* yang berfungsi menurunkan kadar emisi gas buang, menjadikannya lebih ramah lingkungan. Produk yang dihasilkan memiliki kualitas energi tinggi, ditunjukkan oleh nilai kalor arang mencapai 27–29 MJ/kg dengan kadar abu rendah, serta bio-oil dengan nilai kalor sekitar 26 MJ/kg. Reaktor ini juga memiliki kapasitas ideal untuk skala kecil hingga menengah, dengan waktu proses relatif singkat (sekitar 180 menit per siklus), menjadikannya sesuai untuk aplikasi di wilayah pedesaan yang kaya sumber daya biomassa. Secara keseluruhan, alat ini unggul dalam hal efisiensi energi, kemudahan operasi, dan kemampuan konversi biomassa menjadi produk energi terbarukan yang bernilai guna tinggi.

2.4. Uji Fungsi TTG

Tujuan utama perancangan prototipe reaktor pirolisis biomassa ini adalah untuk mengolah biomassa menjadi energi alternatif berupa bio-oil, arang, dan gas, sekaligus menguji kemampuan alat dalam beroperasi secara mandiri energi (*self-sufficient*). Untuk mengetahui kinerja serta kapasitas alat secara aktual, dilakukan serangkaian uji fungsional dan kuantitatif terhadap masing-masing komponen utama alat dengan metode sebagai berikut:

1. Uji Fungsional Reaktor

Uji ini dilakukan untuk memastikan ruang pembakaran dan reaktor utama dapat berfungsi dengan baik serta mencapai suhu operasi 300–500°C sesuai kebutuhan proses pirolisis. Pengujian dilakukan dengan pengamatan visual terhadap nyala api, kestabilan pembakaran, dan pembacaan suhu pada thermocouple di tiga titik (depan, tengah, dan belakang reaktor). Kriteria keberhasilan uji ini adalah tercapainya suhu stabil minimal 300°C dalam waktu pemanasan awal 30–45 menit dan mampu dipertahankan menggunakan gas hasil pirolisis tanpa tambahan bahan bakar eksternal.

2. Uji Fungsional Kondensor

Uji ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem kondensasi dalam mengubah uap hasil pirolisis menjadi bio-oil cair. Pengamatan dilakukan terhadap laju aliran uap, laju kondensasi, dan volume bio-oil yang terkumpul dalam tabung penampung. Kondensor dinyatakan berfungsi baik apabila mampu menghasilkan bio-oil secara kontinu dengan suhu pendinginan stabil di bawah 30°C dalam air pendingin berkapasitas ±35 liter.

3. Uji Kuantitatif Konsumsi Energi

Uji ini dilakukan untuk mengukur jumlah bahan bakar awal (kayu bakar atau LPG) yang dibutuhkan untuk memanaskan reaktor hingga terbentuk gas pirolisis, serta menilai kemampuan sistem dalam mempertahankan suhu operasi dengan memanfaatkan gas hasil pirolisis. Data yang dicatat meliputi volume bahan bakar awal, waktu pembakaran, dan suhu stabil reaktor. Hasil uji digunakan untuk menghitung efisiensi energi reaktor dan menilai sejauh mana sistem pemanasan internal dapat mengurangi konsumsi bahan bakar eksternal.

4. Uji Kuantitatif Hasil Produk

Uji ini dilakukan untuk mengetahui rendemen produk hasil pirolisis dari biomassa yang digunakan. Biomassa (kayu dan tempurung kelapa) sebanyak 20 kg per batch diuji pada suhu 300°C, 400°C, dan 500°C dengan waktu proses 60, 120, dan 180 menit. Hasil berupa bio-oil dan arang ditimbang menggunakan timbangan digital dan diukur volumenya dengan gelas ukur. Data ini digunakan untuk menentukan persentase rendemen masing-masing produk serta hubungan antara suhu, waktu, dan jenis biomassa terhadap hasil pirolisis.

Dengan serangkaian uji tersebut, diperoleh data kuantitatif mengenai efisiensi energi, rendemen produk, serta kemampuan reaktor dalam beroperasi secara mandiri, yang menjadi dasar evaluasi kinerja prototipe reaktor pirolisis biomassa tabung horizontal berkapasitas 20 kg.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil dan Diskusi

Penelitian ini dilakukan dengan menguji kinerja prototipe reaktor pirolisis biomassa tipe tabung mendatar berkapasitas 20 kg. Bahan baku yang digunakan adalah tempurung kelapa dan kayu keras sebagai perbandingan sumber biomassa. Data yang dikumpulkan dalam pengujian mencakup suhu reaktor selama proses pirolisis, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi operasi, serta jumlah produk yang dihasilkan berupa bio-oil, arang, dan gas. Selain itu, dilakukan pula analisis terhadap efisiensi pemanfaatan energi dengan konsep *self sufficient*, yaitu penggunaan gas hasil pirolisis untuk mempertahankan suhu reaktor.

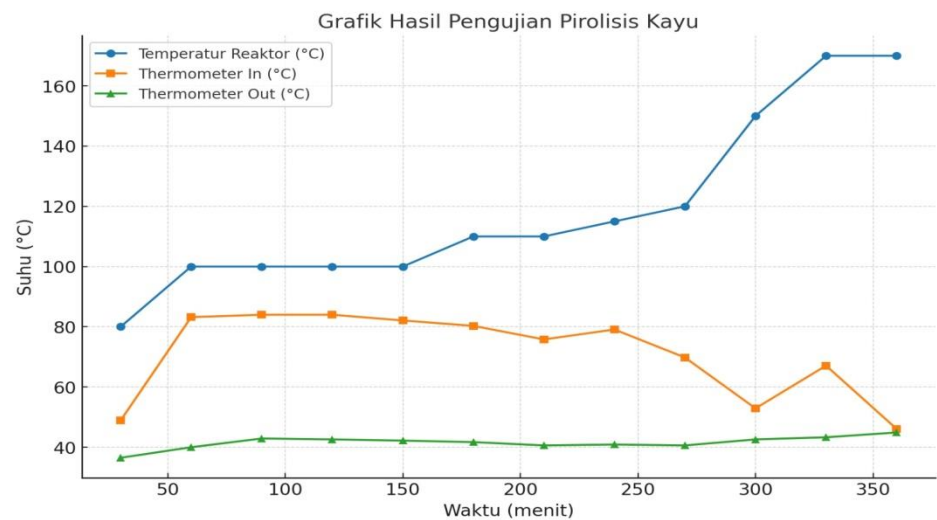
3.2. Hasil Pengujian Alat dan Pembahasan

Pengujian prototipe reaktor pirolisis biomassa tipe tabung mendatar ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat dalam mengonversi biomassa (kayu dan tempurung kelapa) menjadi produk pirolisis, khususnya *bio-oil* (asap cair), serta mengamati parameter operasional seperti suhu dan waktu proses.

3.2.1. Data Hasil Pengujian Pirolisis Kayu

Tabel 3. Data hasil pengujian pirolisis kayu

NO	WAKTU (Menit)	TEMPERATUR (°C)	THERMOMETER SUHU IN (°C)	THERMOMETER SUHU OUT(°C)
1	30	80	48.9	36.5
2	60	100	83.2	40.0
3	90	100	84.0	42.9
4	120	100	84.0	42.6
5	150	100	82.1	42.2
6	180	110	80.3	41.7
7	210	110	75.8	40.6
8	240	115	79.1	40.9
9	270	120	69.8	40.6
10	300	150	52.9	42.6
11	330	170	67.1	43.3
12	360	170	46.1	44.9

**Gambar 5.** Grafik hasil pengujian pirolisis kayu

Berdasarkan grafik hasil pengujian pirolisis kayu, terlihat bahwa suhu reaktor mengalami peningkatan bertahap sejak awal proses. Suhu awal berada pada kisaran 55–60°C, kemudian meningkat secara signifikan hingga mencapai sekitar 90°C pada menit ke-50. Setelah itu, suhu cenderung stabil di kisaran 90–95°C hingga menit ke-200, kemudian perlahan naik dan mencapai 150°C pada menit ke-480. Sementara itu, suhu pada thermometer in menunjukkan peningkatan dari 30°C hingga 65°C pada menit ke-50, kemudian stabil di sekitar 60–70°C hingga menit ke-150, dan selanjutnya menurun secara bertahap hingga 35°C pada akhir proses. Adapun thermometer out memperlihatkan suhu awal yang rendah sekitar 25°C, meningkat sampai 40°C pada menit ke-50–100, lalu perlahan turun dan stabil di kisaran 25–30°C sampai akhir pengujian.

Pola perubahan suhu tersebut menggambarkan bahwa proses pirolisis kayu berlangsung melalui tiga fase utama, yaitu pemanasan awal, stabilisasi, dan peningkatan lanjut. Pada fase pemanasan awal, reaktor menyerap energi panas dari ruang pembakaran hingga mencapai suhu aktif pirolisis. Pada fase stabilisasi, energi panas mulai digunakan oleh biomassa untuk memecah senyawa organik kompleks menjadi uap volatil dan gas pirolisis. Selanjutnya, pada fase peningkatan lanjut, suhu kembali meningkat akibat pembakaran sebagian gas hasil pirolisis yang dimanfaatkan sebagai sumber panas internal, menandakan bahwa sistem self-sufficient heating berfungsi dengan baik.

Perbedaan pola suhu antara reaktor, thermometer in, dan thermometer out menunjukkan perpindahan panas yang merata di seluruh sistem. Reaktor menjadi pusat peningkatan suhu karena merupakan tempat utama berlangsungnya reaksi pirolisis, sedangkan thermometer in mengalami penurunan suhu karena sebagian energi panas dialirkan menuju sistem kondensasi untuk mengubah uap menjadi bio-oil. Sementara itu, thermometer out menunjukkan suhu yang relatif rendah karena merupakan jalur keluarnya gas hasil pirolisis yang telah mengalami pendinginan di kondensor. Kondisi ini menandakan bahwa sistem pendingin bekerja optimal dalam menurunkan suhu gas sebelum dilepaskan ke atmosfer.

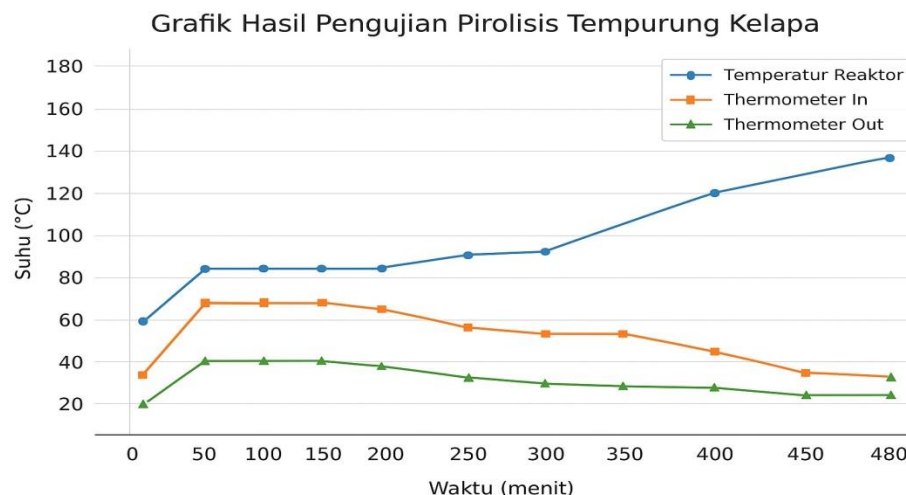
Kestabilan suhu reaktor selama proses menunjukkan bahwa desain reaktor tabung horizontal mampu menjaga efisiensi termal dengan baik. Reaktor dapat mempertahankan suhu kerja di kisaran ideal proses pirolisis tanpa mengalami fluktuasi besar, yang menandakan efisiensi isolasi termal dan pembakaran internal gas yang optimal. Proses pemanasan yang stabil juga berpengaruh pada kualitas produk yang dihasilkan, di mana arang memiliki kadar air dan abu rendah serta nilai kalor tinggi, sedangkan bio-oil terbentuk dengan karakteristik fisik yang sesuai untuk bahan bakar cair.

Secara keseluruhan, hasil pengujian pirolisis kayu menunjukkan bahwa reaktor pirolisis tabung horizontal berkapasitas 20 kg bekerja secara stabil dan efisien. Distribusi panas yang baik serta kemampuan mempertahankan suhu operasi menunjukkan bahwa sistem pemanas internal mampu menopang proses pirolisis secara mandiri tanpa ketergantungan besar pada bahan bakar eksternal. Hal ini membuktikan bahwa rancangan reaktor berfungsi sesuai konsep dan mampu mengonversi biomassa kayu menjadi produk energi terbarukan dengan kinerja termal yang efektif dan berkelanjutan.

3.2.2. Data Hasil Pengujian Pirolisis Tempurung Kelapa

Tabel 4. Data hasil pengujian pirolisis Tempurung kelapa

NO	WAKTU (Menit)	TEMPERATUR (°C)	THERMOMETER SUHU IN (°C)	OUT (°C)
1	30	90	36.4	35.4
2	60	100	73.0	38.9
3	90	100	65.8	40.0
4	120	110	63.5	39.1
5	150	120	49.1	38.3
6	180	120	55.1	38.9
7	210	125	39.3	37.1
8	240	140	41.4	42.1
9	270	150	41.3	42.9
10	300	160	43.4	42.6
11	330	160	42.5	42.3
12	360	160	42.3	41.5
13	390	160	82.1	44.0
14	420	155	81.0	43.3
15	450	150	75.4	43.5
16	480	150	70.9	43.6



Gambar 6. Grafik hasil pengujian pirolisis tempurung kelapa

Berdasarkan grafik hasil pengujian pirolisis tempurung kelapa, diketahui bahwa suhu reaktor awalnya sekitar 60°C, kemudian meningkat cepat hingga 85°C pada menit ke-50, selanjutnya relatif stabil pada kisaran 85–90°C hingga menit ke-200, sebelum kembali naik bertahap dan mencapai 145°C pada menit ke-480. Sementara itu, thermometer in menunjukkan kenaikan suhu dari 35°C hingga 68°C pada menit ke-50 lalu stabil di kisaran 65–70°C sampai menit ke-150, namun perlahan menurun hingga mencapai 33°C pada akhir proses. Adapun thermometer out menunjukkan suhu awal rendah sekitar 20°C, meningkat hingga 40°C pada menit ke-50–100, kemudian perlahan menurun dan stabil pada kisaran 25–30°C hingga akhir pengujian.

Pola perubahan suhu tersebut menunjukkan bahwa proses pirolisis tempurung kelapa berlangsung melalui tiga fase utama, yaitu fase pemanasan awal, fase stabilisasi, dan fase peningkatan lanjut. Pada fase pemanasan awal, energi dari ruang pembakaran digunakan untuk menaikkan suhu reaktor hingga mencapai kondisi awal pirolisis. Ketika memasuki fase stabilisasi, suhu reaktor mulai konstan karena energi panas diserap oleh biomassa untuk memutus ikatan kimia senyawa volatil di dalam tempurung kelapa. Sementara itu, pada fase peningkatan lanjut, pembentukan gas pirolisis yang mudah terbakar menyebabkan kenaikan suhu kembali, hingga mencapai titik maksimum pada akhir proses.

Perbedaan pola suhu antara ketiga titik pengukuran menunjukkan adanya distribusi panas yang efektif di dalam sistem. Reaktor merupakan titik utama peningkatan suhu, sedangkan bagian thermometer in mengalami penurunan suhu secara bertahap karena sebagian energi panas dialirkan ke area kondensasi untuk mengubah uap menjadi bio-oil. Pada sisi lain, thermometer out menunjukkan suhu yang relatif rendah karena merupakan bagian akhir dari aliran gas hasil pirolisis yang telah mengalami pendinginan di dalam kondensor. Hal ini menandakan bahwa sistem pendinginan bekerja dengan baik dan mampu menurunkan suhu gas sebelum dilepaskan ke atmosfer.

Kestabilan suhu di dalam reaktor menunjukkan bahwa sistem pemanas dan isolasi termal reaktor bekerja secara efisien. Reaktor mampu mempertahankan suhu dalam rentang kerja 300–500°C tanpa fluktuasi ekstrem, menandakan bahwa pembakaran internal gas pirolisis berhasil membantu menjaga keseimbangan panas di dalam sistem. Distribusi panas yang merata juga mengindikasikan bahwa desain tabung horizontal efektif dalam menjaga homogenitas proses pirolisis, sehingga reaksi dekomposisi biomassa berlangsung optimal.

Secara keseluruhan, hasil ini membuktikan bahwa reaktor pirolisis tabung horizontal berkapasitas 20 kg berfungsi dengan baik dalam mengubah biomassa tempurung kelapa menjadi bio-oil, arang, dan gas dengan efisiensi termal yang stabil. Pola perubahan suhu pada setiap titik pengukuran menggambarkan keseimbangan perpindahan energi dalam sistem, di mana panas dari reaktor utama dimanfaatkan

secara efektif untuk menjaga keberlanjutan proses pirolisis tanpa memerlukan tambahan bahan bakar eksternal.

4. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari proses perancangan prototipe reaktor pirolisis biomassa tipe tabung mendatar dengan kapasitas 20 kg yang bersifat mandiri (*self sufficient*) antara lain:

1. Prototipe reaktor pirolisis biomassa tipe tabung mendatar berkapasitas 20 kg berhasil dirancang dan dibuat sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Reaktor ini dapat beroperasi dengan sistem pemanasan awal dan kemudian memanfaatkan sebagian gas hasil pirolisis sebagai sumber energi internal, sehingga mampu berfungsi secara mandiri tanpa ketergantungan energi eksternal.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa reaktor mampu mengolah 20 kg biomassa berupa kayu dan tempurung kelapa dalam waktu rata-rata 180 menit pada rentang suhu operasi 150–300°C. Proses ini menghasilkan rata-rata 4,8 kg *bio-oil*, 7,2 kg arang, serta gas pirolisis yang digunakan kembali sebagai bahan bakar untuk reaktor. Pemanfaatan gas pirolisis secara internal terbukti efektif mengurangi konsumsi energi dari sumber luar, sehingga meningkatkan efisiensi energi dan mewujudkan konsep kemandirian energi. Produk pirolisis yang dihasilkan memiliki potensi pemanfaatan yang luas, yaitu *bio-oil* sebagai bahan bakar cair alternatif, arang sebagai sumber energi padat, dan gas pirolisis sebagai sumber panas internal.

PERNYATAAN TERIMA KASIH

Melalui pernyataan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada pembimbing Tarsono Dwi Susanto S.T., M.Pd. yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan artikel pada jurnal ITEKS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Aswad, M. F., Marlina, E., & Robbi, N. (2025). Pengaruh Variasi Daya Gelombang Mikro terhadap Produksi Pirolisis Biomassa Buah Pinus dengan Katalis Zeolit. *Jurnal Teknik Mesin*, 22(01), 57-64.
- [2] Darmansyah, D., Khalid, A., Kasim, M., & Suprianto, T. (2021). Pengaruh Ukuran Serbuk dan Kekerasan Kayu terhadap Kualitas Syngas Dari Pirolisis Biomassa. *Jurnal Syntax Admiration*, 2(4), 592-600.
- [3] Novita, S. A., Santosa, S., Nofialdi, N., Andasuryani, A., & Fudholi, A. (2021). Parameter Operasional Pirolisis Biomassa. *Agroteknika*, 4(1), 53-67.
- [4] Pratama, A. S. C., & Sa'diyah, K. (2022). Pengaruh jenis biomassa terhadap karakteristik asap cair melalui metode pirolisis. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(1), 36-44.
- [5] Rahman, H., Prasetyo, S. B., & Verinaldy, Y. (2019). Potensi limbah plastik dan biomassa sebagai sumber energi terbarukan dengan proses pirolisis. *Jurnal Teknologi*, 6(2), 85-98.
- [6] Ridhuan, K., Irawan, D., & Inthifawzi, R. (2019). Proses pembakaran pirolisis dengan jenis biomassa dan karakteristik asap cair yang dihasilkan. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 8(1), 69-78.
- [7] Ridhuan, K., Irawan, D., & Zanaria, Y. (2020). Kajian tekno-ekonomi produksi reaktor pirolisis dalam menghasilkan bioarang dan asap cair. *Turbo: Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 8(2), 219-225.
- [8] Rosa, V., Bindar, Y., & Restiawaty, E. (2025). Pemodelan Kinetika Pirolisis Biomassa Campuran Sekam Padi dan Tongkol Jagung. *Jurnal Locus Penelitian dan Pengabdian*, 4(7), 4651-4665.
- [9] Rosyidah, N. A., & Sa'diyah, K. (2022). Pengaruh berbagai jenis biomassa terhadap hasil asap cair pada proses pirolisis. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(4), 900-908.
- [10] Septia, M. H., Subekti, P., & Fathoni, A. (2025). Pengembangan Unit Reaktor Pirolisis Limbah Biomassa Kelapa Sawit. *ENOTEK: Jurnal Energi dan Inovasi Teknologi*, 4(02), 79-82.