KARAKTERISASI TERMAL ENERGI BIOMASSA SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA TUNGKU SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE*

HARIS MAWARDI

TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

@Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
   a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
   b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI LAPORAN TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa laporan penelitian tesis dengan judul "Karakterisasi Termal Energi Biomassa sebagai Bahan Bakar Pada Tungku Sistem *Organic Rankine Cycle*" adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, November 2024

Haris Mawardi
NIM F1501222008

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

RINGKASAN

HARIS MAWARDI. Karakterisasi Termal Energi Biomassa sebagai Bahan Bakar Pada Tungku Sistem *Organic Rankine Cycle*. Dibimbing oleh EDY HARTULISTIYOSO dan MUHAMAD YULIANTO.

Peningkatan kebutuhan energi listrik seiring perkembangan teknologi telah mendorong tingginya konsumsi bahan bakar pada pembangkit listrik, yang masih didominasi batubara. Penggunaan batubara yang berlebihan telah berdampak negatif pada lingkungan, sehingga pemerintah menerapkan cofiring; namun, substitusi biomassa tetap terbatas pada 1-5%. *Organic Rankine Cycle* (ORC) muncul sebagai solusi potensial dengan memanfaatkan fluida kerja organik yang memerlukan energi lebih rendah untuk mengubahnya menjadi uap, sehingga mengurangi penggunaan bahan bakar. ORC juga mendukung pemanfaatan energi terbarukan seperti biomassa, yang merupakan sumber energi yang dapat diperbaharui. Indonesia memiliki potensi biomassa yang besar, di antara potensi biomassa di Indonesia, pemanfaatan tanaman energi sebagai sumber energi biomassa telah digalakkan. Tiga tanaman energi yang diprioritaskan saat ini adalah kaliandra, gamal, dan sengon. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi karakteristik termal dari pembakaran energi biomassa (kaliandra, gamal, dan sengon) yang dapat dimanfaatkan untuk penyedia panas pada sistem ORC, menentukan AFR optimal untuk energi biomassa di sistem ORC dan membuat model pembakaran dari energi biomassa pada tungku sistem ORC.

Penelitian ini dilaksanakan dari Agustus 2023 hingga September 2024 di Laboratorium Refrigerasi, IPB University. Kayu kaliandra diperoleh dari Hutan Pendidikan Gunung Walat, Sukabumi, sedangkan kayu gamal dan sengon diperoleh dari petani lokal di Desa Cikarawang, Bogor. Dua metode digunakan dalam penelitian ini: eksperimental dengan pengujian langsung pada tungku sistem ORC dan simulasi melalui perhitungan numerik. Validasi dilakukan menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) dengan batas toleransi kesalahan 20%.

Penggunaan kayu Kaliandra, Gamal, dan Sengon sebagai bahan bakar pada tungku sistem ORC menghasilkan karakteristik termal yang beragam. Secara umum, karakteristik termal kayu Kaliandra lebih unggul dibandingkan Gamal dan Sengon, sementara Gamal sedikit lebih unggul dibandingkan Sengon. Namun Ketiga jenis kayu ini memiliki efisiensi termal yang tidak berbeda signifikan satu sama lain sehingga ketiganya dapat digunakan sebagai pensuplai termal pada tungku sistem ORC karena mampu memenuhi kebutuhan termal sistem tersebut. Penggunaan bahan bakar dalam bentuk pelet terbukti mampu memperbaiki karakteristik termal pembakaran dibandingkan bentuk serbuk gergaji (sawdust).

Nilai AFR (Air-Fuel Ratio) optimum pada tungku sistem ORC diperoleh dari simulasi numerik dengan penambahan excess air dari kondisi AFR stoikiometrik. Nilai AFR optimum untuk Kaliandra, Gamal, dan Sengon masing-masing sebesar 8,11 kg/kg, 7,68 kg/kg, dan 8,04 kg/kg. Hasil prediksi menunjukkan bahwa untuk menghasilkan 1 kWe listrik pada pembangkit listrik sistem ORC dengan efisiensi termal 20% dan pengaturan AFR optimum, penggunaan Kaliandra dalam bentuk pelet memberikan keuntungan dalam penghematan bahan bakar, yaitu hanya membutuhkan 2,90 kg/jam dibandingkan dengan sawdust Sengon yang membutuhkan 4,40 kg/jam. Meskipun demikian, pengoptimalan penggunaan

IPB University — Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

Gamal dan Sengon tetap memungkinkan tergantung pada ketersediaan sumber daya yang ada.

Model pembakaran telah mampu menunjukkan karakteristik termal secara teoritis dari pembakaran kaliandra, gamal dan sengon pada berbagai kondisi udara dan berhasil divalidasi dengan data eksperimen dengan Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 9,22% dan error tertinggi 18,93%. Nilai MAPE ini masuk dalam kategori sangat baik, sehingga simulasi dapat digunakan untuk memprediksi parameter-parameter termal lainnya.

Kata Kunci: AFR optimum, energi biomassa, karakteristik termal, *organic rankine cycle*, pemodelan pembakaran

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

SUMMARY

HARIS MAWARDI. Thermal Characterization of Biomass Energy as Fuel in *Organic Rankine Cycle* System Furnace. Supervised by EDY HARTULISTIYOSO and MUHAMAD YULIANTO

The increasing demand for electrical energy, driven by technological advancements, had led to a high consumption of fuel in power plants, which were still predominantly by coal-fired. The excessive use of coal had negative environmental impacts, prompting the government to implement co-firing; however, biomass substitution remained limited to 1-5%. The *Organic Rankine Cycle* (ORC) emerged as a potential solution by utilizing organic working fluids that required lower energy to convert into steam, thereby reducing fuel consumption. ORC also supported the utilization of renewable energy sources, such as biomass, which was a renewable energy resource. Indonesia possessed significant biomass potential. Among the biomass resources in Indonesia, the use of energy crops as biomass energy sources was promoted. Three energy crops that were prioritized included Kaliandra, Gamal, and Sengon. This study aimed to evaluate the thermal characteristics of biomass energy combustion (Kaliandra, Gamal, and Sengon) as a heat source for ORC systems, determine the optimal AFR for biomass energy in ORC systems, and develop a combustion model for biomass energy in ORC system furnace.

This research was conducted from August 2023 to September 2024 at the Refrigeration Laboratory, IPB University. Kaliandra wood was sourced from the Gunung Walat Education Forest, Sukabumi, while Gamal and Sengon wood were obtained from local farmers in Cikarawang Village, Bogor. Two methods were used in this study ie: experimental testing in the ORC system furnace and simulations through numerical calculations. The methods were validated using the Mean Absolute Percentage Error (MAPE) with an error tolerance of 20%.

The use of Kaliandra, Gamal, and Sengon wood as fuel in ORC system stoves produces diverse thermal characteristics. Overall, the thermal characteristics of Kaliandra wood are superior to those of Gamal and Sengon, with Gamal slightly outperforming Sengon. However, the thermal efficiency of these three types of wood does not differ significantly, making all of them suitable as thermal suppliers for ORC system stoves, as they meet the system's thermal requirements. The use of pelletized fuel has been shown to improve thermal combustion characteristics compared to sawdust.

The optimum AFR (Air-Fuel Ratio) for ORC system stoves is obtained through numerical simulations with the addition of excess air beyond the stoichiometric AFR conditions. The optimum AFR values for Kaliandra, Gamal, and Sengon are 8,11 kg/kg, 7,68 kg/kg, and 8,04 kg/kg, respectively. Prediction results indicate that to generate 1 kWe of electricity in an ORC system power plant with 20% thermal efficiency and optimum AFR settings, using Kaliandra in pellet form is more fuel-efficient, requiring only 2,90 kg/hour compared to Sengon sawdust, which requires 4,40 kg/hour. Nevertheless, optimizing the use of Gamal and Sengon remains feasible depending on resource availability.

The combustion model has successfully demonstrated the theoretical thermal characteristics of Kaliandra, Gamal, and Sengon combustion under various air conditions and has been validated with experimental data, achieving a Mean

IPB University
Bogor Indonesia
@Hakcipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Absolute Percentage Error (MAPE) of 9,22% and a maximum error of 18,93%. This MAPE value falls into the "excellent" category, indicating that the simulation can reliably predict other thermal parameters.

Keyword: Biomass energy, combustion modelling, energy crops, optimum AFR, *organic rankine cycle*, thermal characteristics

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta Milik IPB, Tahun 2024
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah; dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

IPB University

Perpustakaan IPB University

KARAKTERISASI TERMAL ENERGI BIOMASSA SEBAGAI BAHAN BAKAR PADA TUNGKU SISTEM *ORGANIC RANKINE CYCLE*

HARIS MAWARDI

Tesis

sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Magister Teknik pada

Program Studi Teknik Pertanian dan Biosistem

TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM

SEKOLAH PASCASARJANA

INSTITUT PERTANIAN BOGOR

BOGOR

2024

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

Tim Penguji pada Ujian Tesis

1 Dr. Leopold Oscar Nelwan, S.T.P., M.Si.

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Judul Tesis : Karakterisasi Termal Energi Biomassa sebagai Bahan Bakar pada Tungku Sistem *Organic Rankine Cycle*
Nama : Haris Mawardi
NIM : F1501222008

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Dr. Ir. Edy Hartulistiyso, M.Sc. Agr.

Pembimbing 2:

Dr. Muhamad Yulianto, S.T., M.T.

Diketahui Oleh

Ketua Program Studi:

Dr. Ir. I Dewa Made Subrata, M.Agr.

NIP 19620803 198703 1 002

Dekan Fakultas Teknologi Pertanian:

Prof. Dr. Ir. Slamet Budjianto, M.Agr.

NIP 19610502 198603 1 002

Tanggal Ujian: 10 Oktober 2024 Tanggal Lulus: 28 November 2024

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga tesis ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Agustus 2023 sampai Oktober 2024 ini adalah Teknik Energi Terbarukan, dengan judul "Karakterisasi Termal Energi Biomassa sebagai Bahan Bakar pada Tungku Sistem *Organic Rankine Cycle*".

Pada kesempatan ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian tesis:

1. Bapak Dr. Ir. Edy Hartulistiyso, M.Sc. Agr. selaku ketua Departemen Teknik Mesin dan Biosistem IPB sekaligus sebagai Dosen Pembimbing I atas ilmu, arahan dan bimbingan yang diberikan.
2. Bapak Dr. Muhamad Yulianto, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing II atas ilmu, arahan dan bimbingan yang diberikan.
3. Bapak Dr. Leopold Oscar Nelwan, S.T.P., M.Si., sebagai Dosen Penguji Ujian Tesis dan Ibu Dr. Ir. Dyah Wulandani, M.Si., sebagau Dosen Penguji Kolokium atas ilmu, arahan dan bimbingan yang diberikan.
4. Ibu Dr. Ir. Emmy Darmawati, M.Si., Ibu Prof. Dr. Endang Warsiki, S.T.P., M.Si. dan Ibu Dr. Lenny Saulia, S.TP., M.Si., selaku moderator pada kolokium, seminar dan ujian tesis atas ilmu, arahan dan bimbingan yang diberikan.
5. Beasiswa LPDP Kementerian Keuangan Republik Indonesia atas bantuan materiil dan motivasinya.
6. Pihak-pihak yang telah membantu menyelesaikan tesis ini: Osaka Foundation, Hutan Penelitian Gunung Walat, Laboratorium Refrigerasi dan Laboratorium Teknik Energi Terbarukan, Staff Departemen Teknik Mesin dan Biosistem
7. Kepada keluarga penulis, Ayah (alm), Ibu, kakak dan adik yang selalu mendukung penulis baik secara moral maupun materiil.
8. Kepada teman-teman TPB 2022, BRAVO IPB, Kelas PB 6A, Kelurahan LPDP IPB 10.0, yang sudah turut memotivasi dan menemani penulis selama menyelesaikan tesis.
9. Kepada Majelis Az-Zahir, Ahbabul Musthofa dan Sabilu Taubah sebagai guru spiritual penulis selama penulisan tesis.
10. Semua pihak yang telah banyak membantu dalam penelitian dan penyelesaian tesis.

Semoga tesis ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, November 2024

Haris Mawardi

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
© Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

DAFTAR ISI

RINGKASAN ii
DAFTAR ISI xi
DAFTAR TABEL xiii
DAFTAR GAMBAR xiii
DAFTAR LAMPIRAN xiv
I PENDAHULUAN 1
1.1. Latar Belakang 1
1.2. Perumusan Masalah 2
1.3. Tujuan Penelitian 3
1.4. Manfaat Penelitian 3
II TINJAUAN PUSTAKA 4
2.1. Energi Biomassa 4
2.2. Teori Pembakaran 5
2.3. Tungku Pembakaran 6
2.4. Udara Pembakaran 7
2.5. Tanaman Energi 8
2.6. Pembangkit Listrik ORC 10
III METODE 11
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian 11
3.2. Alat dan Bahan 11
3.3. Experimental Setup 11
3.4. Diagram Alir dan Metode Perhitungan 12
3.5. Matriks Penelitian 15
3.6. Prosedur Penelitian 16
3.6.1. Studi Literatur 16
3.6.2. Persiapan Bahan Bakar 16
3.6.3. Properti Bahan Bakar 17
3.6.4. Uji Pembakaran 18
3.6.5. Simulasi Pembakaran 23
3.7. Analisis Data dan Evaluasi 29
3.8. Perhitungan AFR Optimum 30
IV HASIL DAN PEMBAHASAN 31

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

4.1. Analisis Profil Suhu 31
4.1.1. Profil Suhu Pembakaran 31
4.1.2. Profil Suhu *Flue Gas* 33
4.1.3. Profil Zona Pembakaran 35
4.2. Analisis Karakteristik Termal Pembakaran 37
4.2.1. Laju Aliran Massa *Flue Gas* 37
4.2.2. Laju Energi Panas Total 38
4.2.3. Laju Energi Panas yang Hilang melalui Dinding Tungku 40
4.2.4. Laju Energi Panas Berguna 42
4.2.5. Efisiensi Sistem 43
4.3. Simulasi dan Validasi Suhu *Flue Gas* pada Pembakaran Biomassa 46
4.3.1. Prediksi *Excess Air* Optimum Pembakaran Energi Biomassa 47
4.3.2. Hasil Simulasi Pembakaran Energi Biomassa 48
4.3.3. Validasi Simulasi Suhu *Flue Gas* Pembakaran Energi Biomassa 50
4.4. Evaluasi Karakteristik Termal Energi Biomassa pada Tungku Sistem ORC 51
4.5. AFR Optimum Pembakaran Energi Biomassa pada Tungku Sistem ORC 52
V SIMPULAN DAN SARAN 54
5.1. Simpulan 54
5.2. Saran 54
DAFTAR PUSTAKA 55
LAMPIRAN 61
RIWAYAT HIDUP 111

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

DAFTAR TABEL

1. *Excess air* pada beberapa bahan bakar 8
2. Potensi Tanaman Kaliandra, Gamal dan Sengon di Indonesia 9
3. Variabel Penelitian 15
4. Parameter Input Eksperimen 15
5. Matriks Penelitian 16
6. Properti Bahan Bakar 17
7. Standar MAPE 29
8. Rerata suhu pembakaran pada 3 titik pengukuran (dalam ^{o}C) 33
9. Rerata suhu *flue gas* (dalam ^{o}C) 35
10. Kebutuhan *Excess air* pada berbagai energi biomassa lignoselulosik 47
11. Entalpi pembentukan standar masing-masing bahan bakar 48
12. Hasil simulasi dan eksperiman suhu *flue gas* 50
13. Karakteristik Termal Energi Biomassa 52
14. Prediksi AFR Optimum pembakaran energi biomassa pada tungku sistem *Organic Rankine Cycle* (ORC) 53

DAFTAR GAMBAR

1. Konsumsi Listrik Perkapita dan Bauran Energi Primer 1
2. *Sawdust* dan Pelet 4
3. Proses pembakaran 5
4. Skema Tungku Pembakaran 6
5. Hubungan *Excess Air* dengan Efisiensi Pembakaran 8
6. Tanaman Kaliandra 9
7. Tanaman Gamal 9
8. Tanaman Sengon 9
9. Skema ORC Berbasis Biomassa 10
10. Setup penelitian Tungku Pembakaran Sistem ORC 11
11. Diagram Alir Penelitian 12
12. Diagram Alir Eksperimen 13
13. Diagram Alir Simulasi 14
14. Bahan bakar *sawdust* dan pelet 17
15. Penempatan Tabung Pitot 18
16. Skema perpindahan panas pada tungku 20
17. Skema Simulasi Pembakaran 23
18. Diagram Alir Perhitungan *excess air* optimum 28
19. Profil suhu pembakaran pada (a) *sawdust* kaliandra 5 kg/jam, (b) *sawdust* kaliandra 2,5 kg/jam, (c) pelet kaliandra 5 kg/jam, dan (d) pelet kaliandra 2,5 kg/jam 31
20. Proses propagasi api pada pembakaran sawdust gamal 2,5 kg/jam 32

IPB University Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

21. Profil suhu *flue gas* pada pembakaran 5kg/jam sengon dalam (a) *sawdust* (b) pelet 34
22. Ilustrasi zona pembakaran 35
23. Profil Zona Pembakaran pada semua perlakuan (a) *sawdust* dan (b) pelet 36
24. Nyala api pada pembakaran (a) *sawdust* (b) pelet 37
25. Laju aliran massa *flue gas* yang dihasilkan 38
26. Energi panas yang dibangkitkan pada: (a) kaliandra, (b) gamal dan (c) sengon 39
27. Laju Energi Panas yang hilang melalui dinding tungku 41
28. Contoh profil suhu dinding tungku pada pembakaran pelet gamal 5 kg/jam 41
29. Laju energi panas berguna pada: (a) kaliandra, (b) gamal dan (c) sengon 43
30. Neraca Energi pada Tungku Sistem ORC 44
31. Efisiensi sistem pada tungku sistem ORC pada (a) kaliandra, (b) gamal dan (c) sengon 45
32. Hubungan antara massa CO_2 maksimum dan *Excess Air* Optimum 48
33. Laju energi panas dan efisiensi pembakaran untuk setiap kg bahan bakar perjam pada suhu *flue gas* 150 ^oC 49
34. Validasi Simulasi dan Eksperimen 51

DAFTAR LAMPIRAN

1. Lampiran 1 Sistem ORC 62
2. Lampiran 2 Bagian-bagian tungku sistem ORC 63
3. Lampiran 3 Profil Suhu Pembakaran 67
4. Lampiran 4 Neraca Massa dan Energi 76
5. Lampiran 5 Perhitungan Karakteristik Termal Pembakaran 79
6. Lampiran 6 Contoh perhitungan suhu *flue gas* simulasi untuk Pelet Kaliandra 5 kg/jam dengan kadar air 5% 84
7. Lampiran 7 Simulasi Pembakaran 90
8. Lampiran 8 Perhitungan AFR Optimum 107

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University