



**PRODUKSI SYNGAS GASIFIKASI CAMPURAN PELET
KAYU KALIANDRA DAN PELET *MUNICIPAL SOLID WASTE*
(MSW) DENGAN MENGGUNAKAN GASIFIER TIPE
*DOWNDRAFT***

Oleh:
HENDRI
F1603211004



**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa proposal disertasi berjudul “**Produksi Syngas Gasifikasi Campuran Pelet Kayu Kaliandra dan Pelet *Municipal Solid Waste* (MSW) dengan menggunakan gasifier tipe *Downdraft***” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi 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 disertasi ini.

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

Bogor, 20 Juli 2026



Hendri

F1603211004

RINGKASAN

HENDRI. “Produksi Syngas Gasifikasi Campuran Pelet Kayu Kaliandra dan Pelet *Municipal Solid Waste* (MSW) dengan menggunakan gasifier tipe *Downdraft*”. Dibimbing oleh SUTRISNO S MARDJAN, EDY HARTULISTIYOSO dan LEOPOLD OSCAR NELWAN

Peningkatan kebutuhan energi, keterbatasan sumber energi fosil, dan bertambahnya timbunan *Municipal Solid Waste* (MSW) mendorong pengembangan teknologi yang mengintegrasikan pemanfaatan energi terbarukan dan pengelolaan limbah. Co-gasifikasi biomassa–MSW menawarkan pendekatan untuk memanfaatkan karakteristik komplementer kedua bahan baku dan mengonversinya menjadi *syngas*. Dalam penelitian ini, pelet kayu *Calliandra calothyrsus* (CC) dipadukan dengan pelet MSW hasil *biodrying* sebagai *co-feedstock* pada gasifier tipe *downdraft*. Kualitas *syngas* merupakan hasil interaksi karakteristik *feedstock*, komposisi campuran, temperatur reaktor, *Equivalence Ratio* (ER), distribusi udara, dan mekanisme reaksi pada zona pengeringan, pirolisis, oksidasi, serta reduksi.

Kajian *state of the art* menunjukkan adanya kesenjangan dalam menghubungkan secara sistematis desain dan konfigurasi gasifier, karakteristik bahan baku, kondisi operasi, kualitas *syngas*, kinerja energi–eksergi, irreversibilitas, dan indikator keberlanjutan. Analisis energi menjelaskan kuantitas energi yang dikonversikan, tetapi belum menggambarkan kualitas energi dan degradasi potensi kerja akibat irreversibilitas. Analisis eksergi melengkapinya melalui identifikasi *exergy destruction*, sedangkan *Depletion Number* (DN), *Sustainability Index* (SI), dan *Improvement Potential* (IP) digunakan secara komparatif untuk menilai irreversibilitas, pemanfaatan sumber daya, dan peluang peningkatan kinerja. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi konfigurasi *downdraft* gasifier untuk co-gasifikasi pelet CC–MSW serta menerapkan *Integrated Thermodynamic–Sustainability Evaluation Framework* untuk menjelaskan hubungan *feedstock*, konfigurasi gasifier, kondisi operasi, respons termokimia, kualitas *syngas*, energi–eksergi, irreversibilitas, dan indikator keberlanjutan, sekaligus mengidentifikasi kondisi berkinerja terbaik dalam domain pengujian.

Penelitian mencakup kajian literatur sistematis, karakterisasi bahan baku, evaluasi konfigurasi gasifier, eksperimen co-gasifikasi, karakterisasi *syngas*, serta analisis energi dan eksergi. Enam komposisi diuji, yaitu 100CC, 70CC–30MSW, 60CC–40MSW, 40CC–60MSW, 30CC–70MSW, dan 100MSW. Parameter yang diamati meliputi distribusi temperatur zona reaktor, ER, komposisi *syngas*, tar, dan *lower heating value* (LHV). Data eksperimen digunakan untuk menentukan distribusi dan efisiensi energi–eksergi, kehilangan panas, *exergy destruction*, dan irreversibilitas. Diagram *Sankey* memvisualisasikan distribusi energi dan eksergi, sedangkan DN, SI, IP absolut, dan IP ternormalisasi digunakan sebagai indikator komparatif keberlanjutan termodinamika. Gasifier yang dikembangkan memiliki tinggi reaktor 900 mm, diameter ruang reaksi 416 mm, throat 223 mm, $H/D = 2,16$, dan $Dt/D = 0,536$, serta dilengkapi *refractory*, suplai udara zona oksidasi,

pemantauan temperatur multi-zona, dan sistem pembersihan serta pengukuran *syngas* terintegrasi. Kontribusi desain diposisikan sebagai pengembangan dan evaluasi konfigurasi eksperimental yang spesifik untuk co-gasifikasi pelet CC–MSW, bukan sebagai penemuan prinsip baru gasifikasi *downdraft*.

Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kualitas *syngas* ditentukan oleh interaksi karakteristik bahan bakar, temperatur zona oksidasi, ER, dan perkembangan kondisi termokimia di dalam reaktor. CC menyediakan *fixed carbon* dan *char* yang relatif reaktif, sedangkan MSW hasil biodrying memberikan fraksi volatil sekaligus membawa kadar air, abu, dan komponen inert yang lebih tinggi. Peningkatan fraksi MSW karena itu tidak menghasilkan respons CO, H₂, CO₂, C_nH_m, dan LHV yang monoton. Temperatur zona oksidasi menyediakan panas bagi reaksi endotermik zona reduksi, tetapi temperatur tertinggi tidak selalu menghasilkan CO, H₂, atau LHV tertinggi. Kondisi reduksi harus mendukung reaksi *Boudouard*, *uap-char*, *water-gas shift*, dan reformasi senyawa volatil. ER mengendalikan keseimbangan antara suplai oksidan, pembentukan panas melalui oksidasi parsial, dan pemeliharaan komponen gas mampu bakar; suplai udara berlebihan dapat meningkatkan oksidasi dan pengenceran *syngas*. Oleh sebab itu, tidak terdapat satu temperatur atau ER yang dapat dinyatakan sebagai kondisi optimum universal.

Analisis lintas komposisi menunjukkan bahwa 70CC–30MSW memberikan kombinasi kestabilan proses dan kualitas *syngas* paling konsisten di antara enam komposisi. Penetapan ini didasarkan pada sintesis multiindikator, meliputi kemampuan mempertahankan H₂ dan LHV relatif tinggi, kontribusi CO yang berarti, respons yang relatif konsisten terhadap perubahan temperatur dan ER, serta dinamika proses yang lebih terkendali dibandingkan beberapa campuran dengan kandungan MSW lebih tinggi. Kondisi tersebut mengindikasikan interaksi komplementer antara karakter biomassa CC dan kontribusi zat terbang MSW. Namun, karena synergy index terhadap weighted additive baseline tidak dihitung, hasil ini tidak dinyatakan sebagai bukti sinergi termokimia secara kuantitatif. Dengan demikian, 70CC–30MSW merupakan komposisi berkinerja terbaik dalam domain pengujian, bukan komposisi optimum universal.

Analisis energi–eksergi menunjukkan bahwa peningkatan kuantitas energi produk tidak selalu identik dengan peningkatan kualitas pemanfaatan energi. Neraca energi menggambarkan distribusi energi masukan menjadi energi *syngas* dan kehilangan, sedangkan analisis eksergi menunjukkan degradasi kemampuan melakukan kerja akibat irreversibilitas. Diagram *Sankey* dan *exergy destruction* memperjelas distribusi aliran termodinamika dan kehilangan potensi kerja. Pada basis perbandingan ER = 0,20, 70CC–30MSW menunjukkan kinerja termodinamika terbaik dengan efisiensi energi 59,72%, efisiensi eksergi berguna 56,56%, DN 0,3072, SI 3,255, IP absolut 33,59 MJ per batch, dan IP ternormalisasi 0,1335. DN, SI, dan IP tidak diposisikan sebagai indikator baru atau berdasarkan kategori universal, melainkan sebagai indikator komparatif dengan batas sistem dan basis perhitungan yang konsisten.

Sintesis penelitian menghasilkan *Integrated Thermodynamic–Sustainability Evaluation Framework* yang menghubungkan karakteristik *feedstock* →

konfigurasi gasifier dan kondisi operasi → respons termokimia → kualitas *syngas* → energi → eksergi → *exergy destruction*/irreversibilitas → DN–SI–IP → keputusan teknik. Kerangka ini memungkinkan kondisi berkinerja terbaik ditentukan melalui evaluasi multiindikator dan keterlacakan hubungan sebab–akibat, bukan berdasarkan satu parameter tunggal. Kontribusi ilmiah penelitian mencakup: pengembangan dan evaluasi konfigurasi *downdraft* gasifier untuk pelet CC–MSW dengan pemantauan multi-zona dan pembersihan *syngas* terintegrasi; bukti eksperimental hubungan karakteristik *feedstock* dengan respons termokimia, kualitas *syngas*, dan kinerja termodinamika; serta integrasi eksperimen, analisis energi–eksergi, *exergy destruction*, *Sankey*, dan DN–SI–IP dalam kerangka evaluasi termodinamika–keberlanjutan. Kontribusi ini bukan penciptaan hukum termodinamika atau indikator baru, tetapi struktur evaluasi terintegrasi dari karakteristik bahan baku hingga keputusan teknik.

Dalam konteks Ilmu Keteknikan Pertanian, penelitian memperluas pendekatan rekayasa biosistem untuk pemanfaatan biomassa dan residu perkotaan sebagai pembawa energi gas melalui integrasi karakterisasi bahan, rekayasa reaktor termokimia, pengukuran proses, evaluasi kualitas produk, dan analisis hukum pertama serta kedua termodinamika. Hasilnya memberikan dasar bagi pengembangan waste-to-energy skala kecil dan sistem energi terdesentralisasi berbasis biomassa–MSW. *Syngas* berpotensi digunakan untuk pembakaran langsung, mesin gas, atau *diesel dual-fuel* setelah memenuhi persyaratan kualitas aplikasi hilir. Pengembangan lebih lanjut memerlukan pengujian kontinu dan skala pilot, peningkatan gas cleaning, pengukuran kehilangan panas langsung, penguatan analisis ketidakpastian, serta evaluasi energi bantu, ekonomi, dan lingkungan. Kerangka yang dihasilkan merupakan kerangka evaluasi, bukan model prediktif; karena itu, penerapannya pada *feedstock*, skala, dan konfigurasi gasifier lain memerlukan karakterisasi ulang dan validasi eksternal.

Kata kunci: *Calliandra calothyrsus*, *Municipal Solid Waste*, *co-gasifikasi*, *downdraft gasifier*, *syngas*, *energi*, *eksergi*, *irreversibilitas*, *keberlanjutan*.



SUMMARY

HENDRI. “*Syngas Production from Co-Gasification of Calliandra Wood Pellets and Municipal Solid Waste (MSW) Pellets Using a Downdraft Gasifier*”. Supervised by SUTRISNO S MARDJAN, EDY HARTULISTIYOSO and LEOPOLD OSCAR NELWAN

Increasing energy demand, limited fossil energy resources, and growing Municipal Solid Waste (MSW) generation have encouraged the development of technologies that integrate renewable energy utilization with waste management. Biomass–MSW co-gasification offers an approach to utilize the complementary characteristics of both feedstocks and convert them into syngas. In this study, *Calliandra calothyrsus* (CC) wood pellets were blended with biodried MSW pellets as co-feedstocks in a downdraft gasifier. Syngas quality results from interactions among feedstock characteristics, blending composition, reactor temperature, Equivalence Ratio (ER), air distribution, and reaction mechanisms within the drying, pyrolysis, oxidation, and reduction zones.

The state-of-the-art review identified a gap in systematically linking gasifier design and configuration, feedstock characteristics, operating conditions, syngas quality, energy–exergy performance, irreversibility, and sustainability indicators. Energy analysis quantifies converted energy but does not fully represent energy quality and the degradation of work potential due to irreversibility. Exergy analysis complements this through the identification of exergy destruction, while Depletion Number (DN), Sustainability Index (SI), and Improvement Potential (IP) are comparatively used to assess irreversibility, resource utilization, and opportunities for performance improvement. This study aimed to develop and evaluate a downdraft gasifier configuration for CC–MSW pellet co-gasification and to apply an Integrated Thermodynamic–Sustainability Evaluation Framework to explain the relationships among feedstock, gasifier configuration, operating conditions, thermochemical responses, syngas quality, energy–exergy performance, irreversibility, and sustainability indicators, while identifying the best-performing condition within the investigated domain.

The research comprised a systematic literature review, feedstock characterization, gasifier configuration evaluation, co-gasification experiments, syngas characterization, and energy and exergy analyses. Six compositions were investigated: 100CC, 70CC–30MSW, 60CC–40MSW, 40CC–60MSW, 30CC–70MSW, and 100MSW. Observed parameters included reactor-zone temperature distributions, ER, syngas composition, tar, and lower heating value (LHV). Experimental data were used to determine energy–exergy distributions and efficiencies, heat losses, exergy destruction, and irreversibility. Sankey diagrams visualized energy and exergy distributions, while DN, SI, absolute IP, and normalized IP were applied as comparative thermodynamic sustainability

indicators. The developed gasifier had a reactor height of 900 mm, a reaction chamber diameter of 416 mm, a throat diameter of 223 mm, $H/D = 2.16$, and $D_t/D = 0.536$, and was equipped with refractory lining, oxidation-zone air supply, multi-zone temperature monitoring, and integrated syngas cleaning and measurement systems. The design contribution is positioned as the development and evaluation of an experimental configuration specifically for CC–MSW pellet co-gasification, rather than the discovery of a new downdraft gasification principle.

Experimental results showed that syngas quality was governed by interactions among fuel characteristics, oxidation-zone temperature, ER, and thermochemical conditions inside the reactor. CC provided relatively reactive fixed carbon and char, whereas biodried MSW contributed volatile matter while also introducing higher moisture, ash, and inert components. Increasing the MSW fraction therefore did not produce monotonic responses in CO, H₂, CO₂, C_nH_m, and LHV. The oxidation-zone temperature supplied heat for endothermic reduction reactions, but the highest temperature did not necessarily produce the highest CO, H₂, or LHV. Reduction conditions must support Boudouard, steam–char, water–gas shift, and volatile reforming reactions. ER governs the balance among oxidant supply, heat generation through partial oxidation, and preservation of combustible gas components; excessive air supply can enhance oxidation and syngas dilution. Consequently, no single temperature or ER can be regarded as a universally optimal condition.

Cross-compositional analysis showed that 70CC–30MSW provided the most consistent combination of process stability and syngas quality among the six compositions. This determination was based on a multi-indicator synthesis, including the ability to maintain relatively high H₂ and LHV, a meaningful CO contribution, comparatively consistent responses to changes in temperature and ER, and more controlled process dynamics than several mixtures containing higher MSW fractions. The condition indicates a complementary interaction between the biomass characteristics of CC and the volatile contribution of MSW. However, because a synergy index against a weighted additive baseline was not calculated, the findings are not claimed as quantitative evidence of thermochemical synergy. Thus, 70CC–30MSW is identified as the best-performing composition within the investigated domain, rather than a universally optimal composition.

Energy–exergy analysis demonstrated that increasing product energy quantity does not necessarily correspond to improved energy utilization quality. The energy balance describes the distribution of input energy into syngas energy and losses, whereas exergy analysis reveals degradation of work potential due to irreversibility. Sankey diagrams and exergy destruction clarify thermodynamic flow distributions and losses of work potential. At a common comparison basis of ER = 0.20, 70CC–30MSW exhibited the best thermodynamic performance, with an energy efficiency of 59.72%, useful exergy efficiency of 56.56%, DN of 0.3072, SI of 3.255, absolute IP of 33.59 MJ per batch, and normalized IP of 0.1335. DN, SI, and IP are not proposed as new indicators or interpreted using universal categories, but are



employed as comparative indicators under a consistent system boundary and calculation basis.

The synthesis of the study resulted in an Integrated Thermodynamic–Sustainability Evaluation Framework linking feedstock characteristics → gasifier configuration and operating conditions → thermochemical responses → syngas quality → energy → exergy → exergy destruction/irreversibility → DN–SI–IP → engineering decisions. The framework enables the best-performing condition to be identified through multi-indicator assessment and traceable cause-and-effect relationships rather than a single parameter. The scientific contributions comprise: development and evaluation of a downdraft gasifier configuration for CC–MSW pellets with multi-zone monitoring and integrated syngas cleaning; experimental evidence linking feedstock characteristics to thermochemical responses, syngas quality, and thermodynamic performance; and integration of experiments, energy–exergy analysis, exergy destruction, Sankey diagrams, and DN–SI–IP within a thermodynamic–sustainability evaluation framework. The contribution is not the creation of new thermodynamic laws or indicators, but an integrated evaluation structure from feedstock characteristics to engineering decisions.

Within Agricultural Engineering Science, this study extends the biosystems engineering approach to utilizing biomass and urban residues as gaseous energy carriers by integrating material characterization, thermochemical reactor engineering, process measurement, product-quality evaluation, and first- and second-law thermodynamic analyses. The findings provide a basis for small-scale waste-to-energy and decentralized biomass–MSW energy systems. The syngas may be used for direct combustion, gas engines, or dual-fuel diesel systems after meeting downstream quality requirements. Further development requires continuous and pilot-scale testing, improved gas cleaning, direct heat-loss measurements, strengthened uncertainty analysis, and evaluation of auxiliary energy, economic, and environmental aspects. The resulting framework is an evaluation framework rather than a predictive model; therefore, application to other feedstocks, scales, and gasifier configurations requires re-characterization and external validation.

Keywords: Calliandra calothyrsus, Municipal Solid Waste, co-gasification, downdraft gasifier, syngas, energy, exergy, irreversibility, sustainability.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

© Hak Cipta Milik IPB, Tahun 2026
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 tunjauan 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.

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.

**PRODUKSI SYNGAS GASIFIKASI CAMPURAN PELET
KAYU KALIANDRA DAN PELET *MUNICIPAL SOLID WASTE*
(MSW) DENGAN MENGGUNAKAN GASIFIER TIPE
*DOWNDRAFT***

HENDRI

Disertasi
Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Keteknikan Pertanian

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
FAKULTAS TEKNIK DAN TEKNOLOGI
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@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.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi

1. Dr. Muhamad Yulianto, ST, MT.
2. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K., M.T., IPU, ASEAN Eng., APEC Eng.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi

1. Dr. Muhamad Yulianto, ST, MT.
2. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K., M.T., IPU, ASEAN Eng., APEC Eng.

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Disertasi : Produksi *Syngas* Gasifikasi Campuran Pelet Kayu Kaliandra dan Pelet *Municipal Solid Waste* (MSW) dengan menggunakan gasifier tipe *Downdraft*

Nama : Hendri
NIM : F1603211004

@Hak Cipta milik IPB University

Disetujui oleh:

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M.Agr.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc. Agr.



Pembimbing 3:
Dr. Leopold Oscar Nelwan, STP, MSi.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi
Prof. Dr. Ir. I Wayan Budiastra, M.Agr
NIP.196110191986011002



Dekan Fakultas Teknik dan Teknologi
Prof. Dr. Ir. Slamet Budijanto, M.Agr.
NIP.19610502 1986031002



Tanggal ujian: 3 Agustus 2026

Tanggal lulus:

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2022 sampai bulan Desember 2025 ini ialah Studi Eksperimental Gasifikasi Campuran CC dan MSW, dengan judul **“Produksi Syngas Gasifikasi Campuran Pelet Kayu Kaliandra dan Pelet *Municipal Solid Waste* (MSW) dengan menggunakan gasifier tipe *Downdraft*”**.

Terima kasih penulis ucapkan kepada Bapak komisi pembimbing, Bapak Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M.Agr. selaku Ketua Komisi Pembimbing, Bapak Prof. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc. Agr. dan Bapak Dr. Leopold Oscar Nelwan selaku Anggota Komisi Pembimbing yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Dr. Ir. Muhamad Yulianto, S.T., M.T. dan Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K, M.T., IPU, ASEAN Eng., APEC Eng. atas masukannya yang sangat berharga. Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan Ucapan Terimakasih kepada:

1. Rektor IPB University, Pimpinan dan staf Sekolah Pasca Sarjana IPB University, Pimpinan dan Staff Fakultas Teknik dan Teknologi IPB University, Pimpinan dan staf Prodi S3 Ilmu Keteknikan Pertanian dan semua dosen di Prodi S3 Ilmu Keteknikan Pertanian IPB University, yang telah banyak membantu studi S3 sampai disertasi ini diselesaikan dengan baik.
2. Rektor Institut Teknologi PLN, Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K, M.T., IPU, ASEAN Eng., APEC Eng., para Wakil Rektor dan seluruh jajaran pimpinan IT-PLN, Dekan Fakultas Teknologi dan Bisnis Energi, Bapak Dr. Eri Prabowo, S.T., M.M., IPU beserta seluruh staf dosen serta tim laboratorium dan seluruh jajarannya.
3. Istri tercinta Kartika Purnama Dewi, S.Farm., Ananda Galea Izzanada Endrika dan Ananda Gibran Arafif Endrika atas segala doa dan kasih sayangnya dalam memberikan semangat menyelesaikan disertasi ini.
4. Orang tua tersayang, Ayahanda Suardi S (Alm) dan Ibunda Itin Darmawati yang selalu mendoakan, serta enam saudara kandung; Kakak Ida Juliana dan Keluarga, Kakak Dina Meriana dan Keluarga, Adik Syafyan Sari dan Keluarga, Adik Heldi Tindra dan Keluarga, Adik Dian Agustina dan Keluarga, Adik bungsu Assyfa Izzatunnisa yang selalu memberikan dukungan dalam pelaksanaan studi ini.
5. Dr. Drs. Prayudi, MM, MT yang sudah sangat membantu sebagai mentor, kolega, teman diskusi, dan sudah seperti orang tua bagi penulis. Terimakasih atas bimbingan dan bantuannya.
6. Pihak-pihak yang mendukung dalam penelitian dan pengambilan data riset, Bapak. Dr. Muhamad Yulianto, ST, MT, Angga Permana (Teknisi Lab. Teknik Energi Terbarukan IPB University), Reno Ansyori Pangestu, ST (Laboran Lab. Mesin Energi Terbarukan&Konversi Energi ITPLN)., Tim Mahasiswa ITPLN (Mas Mukhlis, Mas Ivan Althaf, Mas Rizqi Sumantri, Mas M. Aminullah, Mas Hilmi, Mas Akmal Dzaky dan Mas C Hendro) dan Tim dari *Waste to energy* Center ITPLN (Mang Supriyadi, Mas Fadjri dan Mas Fahri).
7. Rekan-rekan seluruh mahasiswa Program Studi Doktor Ilmu Keteknikan Pertanian Angkatan tahun 2021.
8. Tim Peer-Group Riset ITPLN; Arief Suardi NC, ST, MT, PhD., Ir. Roswari Nurhasanah, ST, MT., Muhammad Ridwan, ST, MT, Dr. Suhengki, Api, MT dan Dr. Ade Caswito, SE, MM.
9. Keluarga Serang yang selalu support penulis dan selalu memberikan semangat untuk menyelesaikan kuliah dan disertasi; Sepdian Adi Putra,SPd., Agung Gitrio, ST.,Maya Sari Novita, SH, MH.,dan dr, Ria Agustina.
10. Pihak-pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu dalam mendukung dan membantu dalam proses menyelesaikan studi S3 dan pelaksanaan penelitian ini.

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

Bogor, Agustus 2026

Hendri

DAFTAR ISI

Halaman

SUMMARY.....	v
PRAKATA	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xv
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Manfaat Penelitian	6
1.5 Kerangka Pemikiran	6
1.6 Kerangka Evaluasi Penelitian.....	7
1.7 Rencana Kebaruan.....	8
II POTENSI CO-GASIFIKASI BIOMASSA DAN MSW MENGGUNAKAN REAKTOR <i>DOWNDRAFT</i> DI INDONESIA	10
2.1 Latar Belakang.....	10
2.2 Metode dan Analisis	12
2.3 Hasil dan Pembahasan	16
2.3.1 Potensi Biomassa dan MSW untuk Energi.....	16
2.3.2 Teknologi Konversi Energi	21
2.3.3 Metode Pencampuran Biomassa–MSW	24
2.3.4 Performa dan Kualitas <i>Syngas</i> pada Co-Gasifikasi	26
2.3.5 Tantangan Pengembangan dan Rekomendasi	33
2.4 Kesenjangan Penelitian dan Posisi Disertasi	36
2.4.1 Kesenjangan Penelitian.....	36
2.4.2 Posisi dan Alur Logis Penelitian	37
III KUALITAS <i>SYNGAS</i> CO-GASIFIKASI KALIANDRA DAN MSW HASIL BIODRYING: KAJIAN EKSPERIMENTAL PADA REAKTOR <i>DOWNDRAFT</i>	38
3.1 Latar Belakang.....	38
3.2 Material dan Metode.....	39

3.2.1 Karakteristik Biomassa	39
3.2.2 Konfigurasi Sistem Gasifikasi Biomassa	41
3.2.3 Metode Eksperimen	42
3.2.4 Proses Gasifikasi	43
3.2.5 Metode Pengolahan Data	44
3.2.6 Metode Analisis Data	45
3.2.7 Keandalan Data dan Ketidakpastian Pengukuran	46
3.3 Hasil dan Pembahasan.....	47
3.3.1 Karakteristik Temperatur Reaktor Gasifikasi	47
3.3.2 Pengaruh Temperatur Operasi terhadap Komposisi <i>Syngas</i> dan Kualitas Energi	50
3.3.3 Pengaruh ER terhadap <i>Syngas</i> dan Nilai Kalor.....	54
3.3.4 Pengaruh Komposisi Campuran terhadap Karakteristik <i>Syngas</i> dan LHV	57
3.3.5 Prospek Pengembangan Co-Gasifikasi CC–MSW	61
3.4 Kesimpulan	61
IV ANALISIS ENERGI DAN EKSERGI: KARAKTERISTIK KUALITAS SYNGAS PADA CO-GASIFIKASI CALLIANDRA CALOTHYRSUS DAN MSW MENGGUNAKAN REAKTOR <i>DOWNDRAFT</i>	63
4.1 Latar Belakang	63
4.2 Material dan Metode Analisis	65
4.2.1 Material	65
4.2.2 Batas Sistem, Basis, dan Kondisi Referensi.....	65
4.2.3 Deskripsi Eksperimen	66
4.2.4 Analisis Energi	67
4.2.5 Analisis Eksergi	69
4.2.6 <i>Depletion Number</i> (DN), <i>Sustainability Index</i> (SI), dan <i>Improvement Potential</i> (IP)	71
4.2.7 Verifikasi Perhitungan dan Keterlacakan	72
4.3 Hasil dan Pembahasan.....	73
4.3.1 Pengaruh ER dan Temperatur terhadap Efisiensi Energi.....	73
4.3.2 Pengaruh ER dan Temperatur terhadap Efisiensi Eksergi	75
4.3.3 Pengaruh Co-Gasifikasi Biomassa terhadap Efisiensi Energi dan Eksergi	78

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.

4.3.4 Analisis Efisiensi Energi Co-Gasifikasi Menggunakan Diagram <i>Sankey</i>	81
4.3.5 Analisis Efisiensi Eksergi Co-Gasifikasi Menggunakan Diagram <i>Sankey</i>	83
4.3.6 Analisis <i>Depletion Number</i> (DN), <i>Sustainability Index</i> (SI), dan <i>Improvement Potential</i> Ternormalisasi (IP_norm).....	85
4.3.7 Verifikasi dan Posisi Kontribusi <i>Framework</i>	86
V PEMBAHASAN UMUM.....	88
5.1 Sintesis Hasil Penelitian dan <i>Framework</i> Evaluasi	88
5.1.1 Hubungan Bahan Baku, Kondisi Operasi, dan Mekanisme	89
5.1.2 Sintesis Kinerja Energi, Eksergi, dan Keberlanjutan	89
5.1.3 Integrated Thermodynamic–Sustainability Evaluation <i>Framework</i>	90
5.2 Implikasi Praktis dan Prospek Pengembangan.....	91
5.2.1 Peluang Peningkatan Efisiensi dan Pengembangan Optimasi Berbasis Model.....	91
5.2.2 Pemanfaatan Campuran Biomassa dan MSW sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan	91
5.2.3 Pemanfaatan <i>Syngas</i> Co-Gasifikasi pada Mesin Pembakaran Dalam ..	92
5.3 Kontribusi terhadap Ilmu Keteknikan Pertanian	92
5.4 Kesimpulan.....	92
VI KESIMPULAN UMUM DAN SARAN	94
6.1 Kesimpulan Umum.....	94
6.2 Saran	95
DAFTAR PUSTAKA.....	97

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.