

PENGEMBANGAN MODEL STOIKIOMETRI UNTUK PREDIKSI GAS PRODUSER HASIL GASIFIKASI BIOMASSA MENGUNAKAN ANALISIS KESETIMBANGAN TERMODINAMIKA

PRAYUDI



**ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**

@Hak cipta milik IPB University

IPBUniver

- 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 IPBUniversity.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPBUniversity.

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi berjudul “Pengembangan Model Stoikiometri untuk Prediksi Gas Produser Hasil Gasifikasi Biomassa Menggunakan Analisis Keseimbangan Termodinamika” 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, 1 Agustus 2024

Prayudi
NIM F1603211003

- 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 IPBUniversity.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPBUniversity.

RINGKASAN

PRAYUDI. Pengembangan Model Stoikiometri untuk Prediksi Gas Produser Hasil Gasifikasi Biomassa Menggunakan Analisis Keseimbangan Termodinamika. Dibimbing oleh NANIK PURWANTI, LEOPOLD OSCAR NELWAN, dan SUTRISNO S MARDJAN

Disertasi ini menyajikan hasil penelitian simulasi numerik “Pengembangan Model Stoikiometri untuk Prediksi Gas Produser Hasil Gasifikasi Biomassa Menggunakan Analisis Keseimbangan Termodinamika”. Fokus penelitian adalah mengembangkan model keseimbangan termodinamika stoikiometri dengan faktor koreksi untuk konstanta keseimbangan reaksi. Terdapat empat tahapan yang dilakukan untuk mengembangkan model prediksi gas produser hasil gasifikasi biomassa.

Tahap pertama. META Analysis Produksi *Syngas* Gasifikasi Biomassa. Metode PRISMA dan meta analysis digunakan untuk mengetahui pengaruh komposisi biomassa, jenis reaktor (*downdraft*, *fluidized bed reaktor* (FDR), *updraft*), agen gasifikasi (udara dan uap), dan temperatur terhadap produksi *syngas*. Terdapat sembilan jenis biomassa yang terdiri atas yaitu *corn*, *rice husk*, *coconut shell*, *palm kernel oil*, limbah kayu (termasuk *woodchips*, *wood pellet*, *sawdust* dan *woodchar*) dan MSW. Metode analisis menggunakan pendekatan analisis statistik *maximum-minimum*, *polynomial regresi* dan *surface response*, *t-test*, dan *one-way ANOVA*. Dengan metode maksimum-minimum diperoleh produksi *syngas* yang optimal menggunakan gasifikasi udara dapat dikontrol oleh sifat biomassa (O/C, VM, FC, HC, dan kadar abu). Biomassa yang dapat digunakan untuk mendapatkan hasil maksimum adalah *woodchips*, *sawdust*, dan MSW pada gasifikasi udara, serta *palm kernel oil* dan *sawdust* pada gasifikasi uap. Pada gasifikasi udara atau uap, jika temperatur naik maka produksi *syngas* naik. Menggunakan udara sebagai agen gasifikasinya, temperatur konstan, jika ER naik maka produksi *syngas* turun. Pada gasifikasi uap pada temperatur konstan, jika S/B naik maka produksi *syngas* naik. Oleh karena itu, produksi *syngas* optimal menggunakan gasifikasi uap dapat didorong secara efektif oleh nilai S/B. Model regresi polinomial yang dikembangkan dari data eksperimen belum dapat memprediksi hasil *syngas* yang optimal dari seluruh biomassa yang ditinjau dalam penelitian ini. Visualisasi model menggunakan RSM menunjukkan tiga bentuk optimasi yaitu optimasi maksimum, minimum dan *saddle-point* tergantung pada agen gasifikasi dan jenis reaktor. Hasil *t-test* dan *one-way ANOVA*, gasifikasi udara dari MSW dan *wood pellet*, serta gasifikasi uap dari *wood pellet* dan *sawdust*, dapat dilakukan dengan menggunakan reaktor *downdraft*, FBR atau reaktor *updraft*.

Tahap kedua. Kajian perkembangan model-model gasifikasi. Model-model gasifikasi yang dikaji terdiri atas 4 (empat) model yakni termodinamika, kinetik, *computational fluid dynamics* (CFD), *Artificial Neural Network* (ANN). Model keseimbangan termodinamika terdapat dua model yakni model stoikiometri dan non-stoikiometri. Keunggulan model keseimbangan termodinamika adalah modelnya sederhana dan hasil prediksinya maksimum. Keunggulan model kinetik dapat memprediksi komposisi gas secara akurat, profil temperatur pada berbagai zona gasifikasi, dan model distribusi partikel. Akurasi model kinetik tergantung pada dinamika fluida dan bentuk reaktor gasifikasi, parameter kinetik dan transportasi.

Model CFD merupakan salah satu model yang dapat memprediksi komposisi gas produser secara akurat dan valid. Keunggulan model 3D antara lain dapat memvisualisasikan model distribusi temperatur, distribusi partikel, letak posisi umpan, tekanan dalam reaktor, aliran massa, pola aliran padat, prediksi komposisi *syngas* dalam reaktor. *Artificial Neural Network* (ANN) adalah model metode komputasi yang terinspirasi dari cara kerja syaraf manusia. Struktur model ANN terdiri atas *input layer*, *hidden layer*, *output layer*, bobot dan bias, fungsi aktivitas. Keunggulan model ANN adalah prediksinya akurat, walaupun data yang digunakan terbatas. Prospek kedepan diperlukan *Big Data* gasifikasi biomassa agar prediksinya lebih akurat sesuai kondisi nyata eksperimen.

Tahap ketiga. META Analisis Validasi Model Kesetimbangan Stoikiometri dan Non-stoikiometri. Pada kajian ini masing-masing model dikelompokkan menjadi empat klasifikasi, (1) model tanpa pengembangan (SM1 dan NSM1); (2) pengembangan model dimana tar, *char* dan atau methana dihitung dengan korelasi empiris (SM2 dan NSM2); (3) pengembangan model dengan faktor koreksi (SM3 dan NSM3); (4) model gasifikasi uap (NSM4 dan NSM4). Validasi model menggunakan pendekatan MSE, RMSE dan diagram pencar hasil eksperimen dan prediksi. Pada META analisis ini dikenalkan metode *t-test*. Prediksi model SM3 dan NSM3 memiliki kesalahan kesalahan RMSE terendah. Nilai RMSE rendah pada model kesetimbangan termodinamika belum tentu prediksinya akurat bilamana diuji dengan metode diagram pencar. Metode uji statistik *t-test*, dapat digunakan untuk menguji validitas dan akurasi model.

Tahap keempat, Pengembangan model stoikiometri dengan faktor koreksi untuk konstanta kesetimbangan reaksi. Pada penelitian ini terdapat 6 enam jenis model dengan 4 variasi koreksi konstanta kesetimbangan reaksi, sehingga terdapat 24 variasi untuk pengembangan model. Pendekatan pengembangan model menggunakan pola pikir model ANN. Tahap pertama menggunakan 47 set data eksperimen dari literatur untuk membentuk model koreksi untuk konstanta kesetimbangan reaksi. Tahap kedua menggunakan 24 set data eksperimen yang berbeda dengan data pada tahap pertama untuk validasi dan akurasi model. Metode RMSE dan uji statistik *t-test* membuktikan bahwa model stoikiometri dengan faktor koreksi untuk konstanta kesetimbangan reaksi yang dikembangkan valid dan akurat memprediksi komposisi gas CO, CO₂, H₂ dan N₂. Korelasi empiris yang ditawarkan pada penelitian ini, memiliki koefisien determinasi yang tinggi ($R^2 > 0,8423$) untuk memprediksi komposisi gas produser, tar, yield syngas, LHV dan CGE.

Kebaharuan yang ditemukan pada penelitian ini (1) *Generalized model* stoikiometri dengan faktor koreksi menggunakan reaksi *steam reforming of tar* dapat memprediksi kandungan tar dalam gas produser; (2) Korelasi empiris konstanta kesetimbangan reaksi dengan faktor koreksi untuk reaksi pembentukan metana, *water gas shift*, *methane decomposition*, dan *steam reforming of tar*; (3) Korelasi empiris dengan variabel input O/C, H/C, N/C, ER dan T yang dapat memprediksi komposisi gas produser, tar, yield syngas, nilai kalor, dan efisiensi gasifikasi dengan koefisien determinasi yang tinggi diatas 0.8423; (4) *Generalized model* prediksi gas produser berdasarkan kesetimbangan termodinamika stoikiometri yang lebih sesuai untuk dimanfaatkan pada kondisi nyata proses gasifikasi biomassa

SUMMARY

PRAYUDI. Development of a Stoichiometric Model for Predicting Producer Gas from Biomass Gasification Using Thermodynamic Equilibrium Analysis. Supervised by NANIK PURWANTI, LEOPOLD OSCAR NELWAN, and SUTRISNO S MARDJAN

"Development of a Stoichiometric Model for Predicting Producer Gas Results from Biomass Gasification Using Thermodynamic Equilibrium Analysis" is the title of the research that was done using numerical simulations. The research's goal is to develop a stoichiometric thermodynamic equilibrium model with a correction factor for the reaction equilibrium constant. To develop a prediction model for producer gas resulting from biomass gasification, four stages are carried out.

First stage. Meta-analysis of biomass syngas gasification. The PRISMA approach and meta-analysis explored how biomass composition, reactor type (*downdraft*, FDR, *updraft*), gasification agents (air and steam), and temperature affect syngas output. Nine biomass categories include *corn*, *rice husk*, coconut shell, palm kernel oil, woodchips, pellets, sawdust, woodchar, and municipal solid waste. Maximum-minimum statistical analysis, polynomial regression, response surface, t-test, and one-way ANOVA are used. Biomass properties like O/C ratio, volatile matter (VM), fixed carbon (FC), higher heating value (HHV), and ash content define the best maximum-minimum air gasification method for syngas production. Woodchips, sawdust, and MSW perform well for air gasification, whereas palm kernel oil and sawdust work for steam. These biomass sources may work best. Air or steam gasification temperature boosts syngas generation. Air gasification syngas yield decreases with increased ER at stable temperature. Steam gasification at a particular temperature produces more syngas by increasing the stoichiometric ratio. Thus, the S/B ratio optimizes steam gasification syngas. The empirical polynomial regression model cannot predict the best syngas yields for all biomass species investigated in this work. RSM visualises maximum, minimum, and saddle-point optimization. Type of optimization depends on gasifier and reactor. The t-test and one-way ANOVA reveal that *downdraft*, FBR, and *updraft* reactors gasify MSW, wood pellets, and sawdust into air and steam.

Second stage. Gasification models are developed in the study. The gasification models explored include thermodynamic, kinetic, CFD, and ANN models. Two thermodynamic equilibrium models exist: stoichiometric and non-stoichiometric. Its simplicity and maximal prediction accuracy make the thermodynamic equilibrium model attractive. Operating parameter conditions, reactor design, and reactor hydrodynamics can be simulated using kinetic models. Kinetic models predict gas composition, gasification zone temperature profiles, and particle distribution accurately. Accuracy of the kinetic model depends on gasification reactor fluid dynamics, form, and kinetic and transport factors. The CFD model predicts producer gas composition accurately and properly. The 3D model allows visualization of temperature distribution models, particle distribution, feed location, reactor pressure, mass flow, solid flow patterns, and syngas composition. AI neural networks (ANN) are modeled after human nerves. ANN models have input, hidden, output, weights, biases, and activity functions. Despite minimal data, the ANN model makes accurate predictions. Future usage of the

ANN model requires huge volumes of biomass gasification data for accurate predictions under real experimental conditions.

Third stage. META Validation of Stochastic and Non-Stoichiometric Equilibrium Models. This study classifies each model into four categories: (1) Models without development (SM1 and NSM1). Second, we create models (SM2 and NSM2) to determine tar, char, and/or methane using empirical correlation. (3) Creation of models incorporating correction factors (SM3 and NSM3). The fourth step involves creating steam gasification models, notably NSM4 and NSM4. Model validation employs MSE, RMSE, and scatter plots of experimental and prediction data. The META analysis includes the t-test approach. The SM3 and NSM3 models produce the lowest RMSE errors. A low RMSE number does not always imply that the prediction findings are correct when checked with the scatter diagram approach. The t-test hypothesis testing approach can be used to ensure the model's validity and accuracy.

Fourth stage. Develop a stoichiometric model with correction factors for reaction equilibrium constants. This study includes six types of models and four variations of reaction equilibrium constant corrections, for a total of 24 model development variations. The model development approach employs the ANN model mindset. The first stage employs 47 sets of experimental data from the literature to construct a correction model for the reaction equilibrium constant. For model validation and correctness, the second stage employs 24 sets of experimental data that are distinct from those used in the first stage. The RMSE method and the t-test statistical test demonstrate that the stoichiometric model constructed with a correction factor for the reaction equilibrium constant is valid and accurate in predicting the gas compositions of CO, CO₂, H₂, and N₂. The empirical correlation developed in this research has a high coefficient of determination ($R^2 > 0.8423$) and can predict the composition of producer gas, tar, syngas yield, LHV, and CGE.

The novelties found in this research are: (1) The application of a generalized stoichiometric model for the steam reforming of tar reactions that include a correction factor, so enabling precise prediction of the tar concentration in the producer gas. (2) This study examines the empirical relationship between the reaction equilibrium constant and the correction factor for four reactions: methane creation, water gas shift, methane decomposition, and steam reforming of tar. (3) There exists a robust correlation among the variables O/C, H/C, N/C, ER, and T, which may be utilized to estimate the composition of producer gas, tar, syngas yield, calorific value, and gasification efficiency. The correlation has a determination coefficient greater than 0.8423. (4) This is a producer gas prediction model that is based on stoichiometric thermodynamic equilibrium. It is designed to be more appropriate for usage in the actual conditions of the biomass gasification process.



© 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.

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 IPBUniversity.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPBUniversity.



**PENGEMBANGAN MODEL STOIKIOMETRI UNTUK PREDIKSI
GAS PRODUSER HASIL GASIFIKASI BIOMASSA
MENGUNAKAN ANALISIS KESETIMBANGAN
TERMODINAMIKA**

PRAYUDI

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

**ILMU KETEKNIKAN PERTANIAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2024**

@Hak cipta milik IPB University

IPBUniver

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 IPBUniversity.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPBUniversity.



@Hak cipta milik IPB University

IPBUniver

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi

1. Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc. Agr.
2. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K., MT, IPU.

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi

1. Dr. Eng. Obie Farobie, S.Si., M.Si.
2. Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K., MT., IPU

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 IPBUniversity.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPBUniversity.



Judul Disertasi : Pengembangan Model Stoikiometri untuk Prediksi Gas
Produser Hasil Gasifikasi Biomassa Menggunakan Analisis
Kesetimbangan Termodinamika

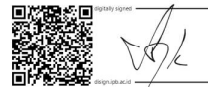
Nama : Prayudi
NIM : F1603211003

Disetujui oleh:

Pembimbing 1:
Dr. Nanik Purwanti, STP., MSc.



Pembimbing 2:
Dr. Leopold Oscar Nelwan, STP., MSi.



Pembimbing 3:
Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M.Agr



Diketahui oleh

Ketua Program Studi
Prof. Dr. Ir. Sutrisno, M.Agr
NIP. 195907201986011002



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



Tanggal ujian: 4 Juli 2024

Tanggal lulus: 02 Agustus 2024

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah disertasi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Januari 2022 sampai bulan Juni 2024 ini adalah Model Numerik Gasifikasi Biomassa, dengan judul “Pengembangan Model Stoikiometri untuk Prediksi Gas Produser Hasil Gasifikasi Biomassa Menggunakan Analisis Keseimbangan Termodinamika”. Topik disertasi ini disusun atas dasar masukan dari Prof. Dr. Ir. Armansyah Halomoan Tambunan, M.Agr (alm), oleh karena itu penulis mendoakan semoga Tuhan Yang Maha Esa menempatkan almarhum di tempat yang terbaik disisiNya.

Terima kasih penulis ucapkan kepada Bapak/Ibu komisi pembimbing, Ibu Dr. Nanik Purwanti, STP, MSc selaku Ketua Komisi Pembimbing, Bapak Dr. Leopold Oscar Nelwan selaku Anggota Komisi Pembimbing, dan Bapak Prof. Dr. Ir. Sutrisno S Mardjan, M.Agr selaku Ketua Program Studi S3-Ilmu Keteknikan Pertanian sekaligus Anggota Komisi Pembimbing yang telah membimbing dan banyak memberikan arahan dan saran. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa Mulyana K., MT., IPU. atas masukannya yang sangat berharga pada ujian sidang tertutup dan terbuka, bapak Dr. Ir. Edy Hartulistiyoso, M.Sc. Agr atas masukannya pada sidang tertutup, bapak Dr. Eng. Obie Farobie, S.Si., M.Si. atas masukannya pada ujian sidang terbuka, dan masukan dari bapak Dr. Muhammad Yulianto, ST, MT perwakilan dari program studi S3 pada sidang terbuka promosi doktor.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pengembangan model gasifikasi biomassa khususnya pemanfaatan syngas sebagai bahan bakar mesin pembangkit listrik. Dengan teknologi termokimia biomassa dapat dikonversi sebagai syngas bahan bakar dual fuel pembangkit listrik, sehingga dapat mengatasi permasalahan sumber energi pada daerah 3T yang terhubung dengan jaringan listrik. Model yang dikembangkan dapat digunakan untuk memilih jenis biomassa dan parameter operasi gasifikasi agar nilai kalor yang dihasilkan optimal. Manfaat disertasi ini bagi pengembangan keilmuan keteknikan pertanian adalah memberikan usulan pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi baru terbarukan, dan peningkatan kolaborasi penelitian, serta mendukung terwujudnya visi dan misi Prodi S-3 Ilmu Keteknikan Pertanian IPB University.

Tidak lupa ungkapan terimakasih juga disampaikan kepada istri tercinta Dr. Lidya Suryani Widayati, SH., MH, ananda dr. Abimanyu Putera Yudha, Alya Zahra Puteri Yudha, Najwa Ulfah Puteri Yudha, atas segala doa dan kasih sayangnya yang memberikan semangat untuk menyelesaikan disertasi ini.

Untuk bantuan yang diberikan kepada penulis dari banyak pihak dan perorangan yang tidak bisa disebutkan satu persatu, diucapkan terimakasih. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, 1 Agustus 2024

Prayudi

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 IPBUniversity.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPBUniversity.

DAFTAR ISI

PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xv
NOMENKLATUR	xx
DAFTAR ISTILAH DAN SINGKATAN	xxi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.1.1 Biomassa sumber energi	1
1.1.2 Gas produser dan tar	2
1.1.3 Proses gasifikasi biomassa	3
1.1.4 Pemodelan gasifikasi biomassa	7
1.2 Perumusan Masalah	8
1.3 Tujuan Penelitian	9
1.4 Manfaat Penelitian	9
1.5 Keterkaitan Antar Bab, Gap Analysis dan Tahapan Pengembangan Model	9
1.5.1 Tahapan penelitian Bab II.	11
1.5.2 Tahapan penelitian Bab III	11
1.5.3 Tahapan penelitian Bab IV	12
1.5.4 <i>Gap Analysis</i>	14
1.5.5 Tahapan penelitian Bab V	14
1.5.6 Komputasi tahapan pengembangan model	15
1.6 Kebaharuan	17
II PRODUKSI SYNGAS GASIFIKASI BIOMASSA: META ANALISIS	18
2.1 Pendahuluan	18
2.2 Metode Seleksi Paper dan Analisis	19
2.3 Biomassa dan Nilai Kalor	28
2.4 Meta Analisis	29
2.4.1 Pengaruh ER, S/B, T dan sifat biomassa terhadap komposisi syngas	29
2.4.2 Efek ER atau S/B dan T terhadap total syngas	42
2.4.3 Pengaruh jenis reaktor terhadap total hasil syngas	48
2.4.4 Pengaruh agen gasifikasi pada produksi syngas	51
2.4.5 Pedoman gasifikasi berdasarkan hasil meta-analisis	52
2.5 Simpulan	54
III PERKEMBANGAN MODEL-MODEL GASIFIKASI BIOMASSA: REVIEW	56
3.1 Pendahuluan	56
3.2 Metode Seleksi Paper dan Analisis	57
3.3 Pemodelan Gasifikasi Biomassa	57
3.3.1 Model kesetimbangan termodinamika	57

3.3.2 Model kinetik	62
3.3.3 <i>Computational fluid dynamics</i> (CFD) models	65
3.3.4 <i>Artificial neural network</i> (ANN) models	71
3.4 Keunggulan dan Kelemahan Model	74
3.5 Simpulan	75
IV VALIDASI MODEL KESETIMBANGAN STOIKIOMETRI DAN NON-STOIKIOMETRI: META ANALISIS	77
4.1 Pendahuluan	77
4.2 Metode Seleksi Paper dan Analisis	79
4.3 Model Kesetimbangan Termodinamika	80
4.3.1 Model stoikiometri dan faktor koreksi	81
4.3.2 Model non-stoikiometri dan faktor koreksi	88
4.3.3 Perbedaan model stoikiometri dan non-stoikiometri	92
4.4 Validasi Model	94
4.4.1 Validasi model, RMSE	94
4.4.2 Validasi model, plot diagram pencar hasil eksperimen dan prediksi	96
4.4.3 Analisis uji hipotesis rata-rata data berpasangan, t-test	98
4.5 Analisis Kesalahan Relatif pada Model Termodinamika	102
4.5.1 Analisis kesalahan relatif model stoikiometri	103
4.5.2 Analisis kesalahan relatif model non-Stoikiometri	106
4.6 Simpulan	108
V PENGEMBANGAN MODEL KESETIMBANGAN TERMODINAMIKA STOIKIOMETRI DENGAN FAKTOR KOREKSI UNTUK KONSTANTA KESETIMBANGAN REAKSI	110
5.1 Pendahuluan	110
5.2 Model Kesetimbangan Termodinamika Stoikiometri	112
5.2.1 Basis model	112
5.2.2 Neraca energi	117
5.2.3 <i>Cold gasification efficiency</i> (CGE)	119
5.2.4 Model simulasi yang dikembangkan	119
5.2.5 Pengembangan model dengan faktor koreksi	120
5.2.6 Pengembangan model, faktor koreksi untuk konstanta kesetimbangan reaksi	121
5.3 Metode dan Material	121
5.3.1 Biomassa dan data operasi	121
5.3.2 Metode eksperimen	127
5.3.3 Validasi dan akurasi model	128
5.3.4 Metode Newton Raphson	128
5.3.5 Algoritma prosedur penghitungan	130
5.4 Hasil dan Pembahasan	131
5.4.1 Hasil prediksi awal model original	131
5.4.2 Faktor koreksi dan korelasi empiris baru untuk konstanta kesetimbangan	135
5.4.3 Simulasi, validasi, dan keakuratan komposisi gas produser menggunakan model stoikiometri yang dikembangkan	137

5.4.4	Validasi dengan hasil eksperimen langsung	142
5.4.5	Generalized model stoikiometri dan korelasi empiris	144
5.4.6	Pengaruh H/C, O/C, ER, dan T terhadap komposisi gas produser	148
5.4.7	Pengaruh H/C, O/C, ER dan T terhadap Ygas	152
5.4.8	Pengaruh H/C, O/C, ER dan T terhadap kandungan tar	154
5.4.9	Pengaruh H/C, O/C, ER, dan T terhadap LHV-gas	155
5.4.10	Pengaruh H/C, O/C, ER, dan T terhadap CGE	156
5.5.	Simpulan	158
VI	PEMBAHASAN UMUM	159
6.1	Implikasi Praktis dan Prospek ke Depan	159
6.2	Manfaat Riset Untuk Pengembangan Ilmu Keteknikan Pertanian	162
VII	SIMPULAN UMUM DAN SARAN	165
7.1	Simpulan Umum	165
7.2	Saran	165
	DAFTAR PUSTAKA	166



DAFTAR GAMBAR

1.1	Pangsa Kebutuhan Energi Indonesia Tahun 2019 dan 2050, Sumber (BPPT 2021)	1
1.2	Skematik diagram proses gasifikasi biomassa pada reaktor (a) <i>downdraft</i> (b) <i>updraft</i>	6
1.3	Skematik diagram fluidized bed reactor (Molino et al. 2018)	6
1.4	Diagram alir yang menunjukkan keterkaitan antara Bab II, III, IV dan Bab V untuk mengembangkan generalized model prediksi gas produser gasifikasi biomassa dengan faktor koreksi untuk konstanta kesetimbangan reaksi.	10
1.5	Diagram alir pengembangan model stoikiometri yang dikembangkan. (a) tahap pertama mengembangkan korelasi faktor koreksi dan korelasi empiris baru untuk konstanta kesetimbangan reaksi, (b) tahap kedua memvalidasi model yang dikembangkan dan menguji keakuratannya.	16
2.1	Diagram alir metode PRISMA untuk seleksi artikel dalam meta-analisis produksi syngas gasifikasi biomassa.	20
2.2	Plot sebaran yang menunjukkan posisi berbagai jenis biomassa dalam diagram van Krevelen.	28
2.3	Plot sebaran biomassa yang mengilustrasikan pengaruh (a) rasio O/C terhadap HHV (b) Rasio H/C terhadap LHV.	29
2.4	Plot permukaan respons yang menunjukkan pengaruh ER dan temperatur terhadap total hasil produksi syngas (%vol) dari (a) <i>corn</i> dan (b) <i>wood pellet</i> di reaktor <i>downdraft</i> , (c) <i>rice husk</i> di FBR, dan (d) MSW pada reaktor <i>updraft</i> .	42
2.5	Plot permukaan respons yang menunjukkan pengaruh ER dan temperatur terhadap hasil total produksi syngas (%vol) dengan (a) MSW dalam reaktor <i>downdraft</i> dan (b) <i>wood pellet</i> dalam reaktor <i>updraft</i> .	44
2.6	Plot permukaan respons yang menunjukkan pengaruh ER dan temperatur terhadap total hasil syngas (%vol) dalam reaktor <i>downdraft</i> dengan (a) <i>palm kernel oil</i> , (b) <i>woodchips</i> , (c) <i>woodchar</i> , dan (d) dalam reaktor reaktor <i>updraft</i> dengan <i>woodchar</i> .	45
2.7	Plot permukaan respons yang menunjukkan pengaruh S/B dan temperatur terhadap hasil syngas total (%vol) dengan gasifikasi uap dalam reaktor <i>downdraft</i> menggunakan (a) <i>corn</i> dan (b) <i>palm kernel oil</i> sebagai bahan baku.	48
3.1	Visualisasi kandungan tar jenis Naphthalena dan Benzene, sumber (Salem et al. 2023)	69
3.2	Stuktur model ANN, sumber Ascher et al. (2022)	71
4.1	Plot data hasil eksperimen dengan simulasi untuk gas (a) CO, (b) CO ₂ , (c) CH ₄ , dan (d) H ₂ pengembangan model stoikiometri SM3	96
4.2	Plot data hasil eksperimen dengan simulasi untuk gas (a) CO, (b) CO ₂ , (c) CH ₄ , dan (d) H ₂ pengembangan model non-stoikiometri NSM3	97
4.3	Histogram prosentase kesalahan relatif pengembangan model gas (a) CO-SM3, (b) CO ₂ -SM1, (c) CH ₄ -SM3, dan (d) H ₂ -SM4 model stoikiometri	105