

**PENGEMBANGAN MODEL PREDIKTIF PROSES TOREFAKSI  
BIOMASSA BERBASIS KAJIAN LITERATUR  
MENGUNAKAN APLIKASI VISUAL BASIC**

**TESIS**



**Oleh  
YOGI PRABOWO  
2325021006**

**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

**PENGEMBANGAN MODEL PREDIKTIF PROSES TOREFAKSI  
BIOMASSA BERBASIS KAJIAN LITERATUR  
MENGUNAKAN APLIKASI VISUAL BASIC**

**Oleh  
Yogi Prabowo  
2325021006**

**Tesis  
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
MAGISTER TEKNIK**

**Pada  
Program Studi Magister Teknik Mesin  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNIK – UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

**ABSTRAK**  
**PENGEMBANGAN MODEL PREDIKTIF PROSES TOREFAKSI BIOMASSA**  
**BERBASIS KAJIAN LITERATUR MENGGUNAKAN**  
**APLIKASI VISUAL BASIC**

Oleh: Yogi Prabowo

Torefaksi merupakan proses termal yang bertujuan meningkatkan kualitas energi biomassa dengan cara mengurangi kandungan air dan senyawa volatil, sehingga menghasilkan padatan energi yang lebih stabil dan efisien. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model matematis untuk memprediksi Mass Yield (MY), Higher Heating Value (HHV), dan Energy Yield (EY) biomassa tertorefaksi berdasarkan parameter analisis ultimate (C, H, O, N, S), komposisi lignoselulosa (hemiselulosa, selulosa, lignin), serta suhu torefaksi.

Model dikembangkan dengan pendekatan fungsi logistik yang merepresentasikan degradasi termal komponen biomassa secara bertahap. Implementasi dilakukan melalui aplikasi desktop berbasis Visual Basic (VB.NET/Windows Forms) yang dirancang ringan, berjalan offline, dan mampu menampilkan hasil simulasi dalam bentuk angka dan grafik. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data eksperimen dari beberapa jenis biomassa yang diperoleh melalui publikasi ilmiah.

Hasil validasi menunjukkan bahwa model dapat memprediksi tren perubahan MY, HHV, dan EY dengan galat rata-rata sebagian besar berada pada rentang 0,1% hingga 10%, meskipun galat lebih tinggi muncul pada biomassa dan suhu tertentu. Dengan kinerja tersebut, model dan aplikasi yang dikembangkan dapat digunakan sebagai alat bantu analisis dan simulasi awal untuk mendukung studi dan optimasi proses torefaksi biomassa.

**Kata kunci:** torefaksi, biomassa, model matematis, Mass Yield, HHV, Energy Yield, simulasi VB.NET.

**ABSTRACT**  
**DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE MODEL FOR THE BIOMASS  
TORREFACTION PROCESS BASED ON A LITERATURE REVIEW USING  
VISUAL BASIC APPLICATION**

*By: Yogi Prabowo*

*Torrefaction is a thermal process aimed at improving the energy quality of biomass by reducing its moisture and volatile matter content, resulting in a more stable and efficient solid fuel. This study aims to develop a mathematical model to predict the Mass Yield (MY), Higher Heating Value (HHV), and Energy Yield (EY) of torrefied biomass based on ultimate analysis parameters (C, H, O, N, S), lignocellulosic composition (hemicellulose, cellulose, lignin), and torrefaction temperature.*

*The model was constructed using logistic functions to represent the stepwise thermal degradation of biomass components. It was then implemented into a lightweight, offline-capable desktop application built using Visual Basic (VB.NET/Windows Forms), which allows users to input process parameters and view simulation results both numerically and graphically. Model validation was performed by comparing simulation outputs to experimental data from various biomass types reported in scientific literature.*

*The validation results indicate that the model effectively captures the trends of MY, HHV, and EY, with most prediction errors ranging from 0.1% to 10%, though higher errors were observed for certain biomass types and extreme temperatures. Overall, the developed model and application can serve as a practical simulation and analysis tool to support studies and optimization of the biomass torrefaction process.*

**Keywords:** *torrefaction, biomass, mathematical model, Mass Yield, HHV, Energy Yield, VB.NET simulation.*

Judul Tesis

**: PENGEMBANGAN MODEL  
PREDIKTIF PROSES TOREFAKSI  
BIOMASSA BERBASIS KAJIAN  
LITERATUR MENGGUNAKAN  
APLIKASI VISUAL BASIC**

Nama Mahasiswa

**: Ygi Prabowo**

Nomor Pokok Mahasiswa

**: 2325021006**

Program Studi

**: Magister Teknik Mesin**

Fakultas

**: Teknik**

**MENYETUJUI**  
Komisi Pembimbing

Ketua



Dr. Amrul, S.T., M.T.

NIP. 197103311999031003

Anggota



Dr. Harmen, S.T., M.T.

NIP. 196906202000031001

**MENGETAHUI**

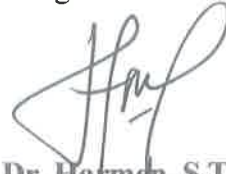
Ketua Jurusan  
Teknik Mesin



Ahmad Su'udi, S.T., M.T.

NIP. 197408162000121001

Ketua Program Studi  
Magister Teknik Mesin



Dr. Harmen, S.T., M.T.

NIP. 196906202000031001

## LEMBAR PENGESAHAN

### 1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Amrul, S.T., M.T.**

Anggota Penguji : **Dr. Harmen, S.T., M.T.**

Penguji Utama I : **Prof. Amrizal, S.T., M.T., Ph.D.**

Penguji Utama II : **Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T.**

### 2. Dekan Fakultas Teknik

  
ms **Dr. Ahmad Herison, S.T., M.T**  
NIP. 196910302000031001

### 3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

  
  
**Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.**  
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : **14 Januari 2026**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam Naskah Tesis ini tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Tesis ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur plagiat, saya bersedia Tesis (MAGISTER) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal70).

Bandar Lampung, 14 Januari 2026  
Penulis



Yogi Prabowo  
NPM 2325021006

## DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Nama : Yogi Prabowo  
Tempat Lahir : Adi Jaya  
Tanggal Lahir : 11 November 1991  
Jenis Kelamin : Laki – Laki  
Agama : Islam  
Alamat : Perum PT. GPM Blok E.022  
Bandar Mataram, Lampung  
Tengah  
No. Telepon/ HP : 085788730053  
Email : prabowojunior.18@gmail.com

Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDS 02 Yapindo dan melanjutkan ke SMPS Yapindo semuanya diselesaikan di Gedung Meneng, Tulang bawang. Serta SMA Sugar Group di Bandar Mataram, Lampung Tengah.

Pada tahun 2016, penulis diterima di Program Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bandar Lampung dan berhasil meraih gelar Sarjana Teknik pada tahun 2021. Setelah itu, penulis melanjutkan studi magister di Program Studi Magister Teknik Mesin, Universitas Lampung, yang dimulai pada tahun 2023.



## MOTTO

*“Ilmu tanpa Syukur akan melahirkan kesombongan,  
ilmu dengan Syukur melahirkan keberkahan”*

*“Proses torefaksi biomassa adalah bagian dari upaya ilmiah manusia dalam  
membaca hukum-hukum energi yang Allah tetapkan di alam.”*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul “PENGEMBANGAN MODEL PREDIKTIF PROSES TOREFAKSI BIOMASSA BERBASIS KAJIAN LITERATUR MENGGUNAKAN APLIKASI VISUAL BASIC” dengan baik. Tesis ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada Program Pascasarjana Universitas Lampung.

Penelitian ini membahas pengembangan model prediktif efisiensi energi proses torefaksi biomassa dengan memanfaatkan kajian literatur dan data eksperimen, serta implementasi visualisasi melalui bahasa pemrograman Visual Basic. Model yang dikembangkan mencakup perhitungan mass yield (MY), energy densification ratio (EDR), energy yield (EY), serta perubahan nilai kalor (HHV) pada berbagai kondisi operasi torefaksi. Diharapkan, model dan aplikasi yang dihasilkan dapat menjadi alat bantu analisis yang praktis bagi peneliti maupun praktisi di bidang energi biomassa.

Dalam proses penyusunan tesis ini, penulis mendapatkan dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Amrul, S.T., M.T., selaku pembimbing 1 yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, kesabaran, dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan tesis ini.
2. Dr. Harmen, S.T., M.T., selaku pembimbing 2 dan Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, kesabaran, dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan tesis ini.
3. Prof. Dr. Amrizal, S.T., M.T., selaku pembahas yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, kesabaran, dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan tesis ini.
4. Dr. Muhammad Irsyad, S.T., M.T., selaku pembahas 2 dan Wakil Dekan Bidang Akademik yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, kesabaran, dan motivasi selama proses penelitian dan penyusunan tesis ini.

5. Pimpinan, dosen, dan seluruh staf di Program Pascasarjana Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu, fasilitas, dan bantuan selama masa studi.
6. Orang tua dan keluarga tercinta, yang senantiasa mendoakan, memberikan dukungan moral maupun material, serta menjadi sumber semangat dalam setiap langkah penulis.
7. Rekan-rekan seperjuangan di Program Pascasarjana dan di laboratorium, yang telah banyak membantu dalam diskusi, pengolahan data, serta memberikan dorongan selama penyelesaian penelitian ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna, baik dari segi isi maupun penyajiannya. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi perbaikan di masa mendatang. Besar harapan penulis, karya ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan, serta menjadi referensi bagi penelitian terkait di masa yang akan datang.

Bandar Lampung, Januari 2026

Yogi Prabowo  
(2325021006)

## DAFTAR ISI

Halaman

|                                                  |      |
|--------------------------------------------------|------|
| ABSTRAK .....                                    | iii  |
| <i>ABSTRACT</i> .....                            | iv   |
| HALAMAN PENGESAHAN.....                          | vi   |
| DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....                        | vii  |
| MOTTO.....                                       | viii |
| KATA PENGANTAR .....                             | ix   |
| DAFTAR ISI.....                                  | xi   |
| DAFTAR GAMBAR .....                              | xiv  |
| DAFTAR TABEL.....                                | xvi  |
| BAB I PENDAHULUAN.....                           | 1    |
| 1.1. Latar Belakang .....                        | 1    |
| 1.2. Tujuan Penelitian .....                     | 3    |
| 1.3. Batasan Masalah.....                        | 4    |
| 1.4. Manfaat .....                               | 4    |
| 1.5. Sistematika Penulisan.....                  | 5    |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI ..... | 6    |
| 2.1. Biomassa .....                              | 6    |
| 2.2. Torefaksi .....                             | 8    |
| 2.3. Parameter Torefaksi .....                   | 9    |
| 2.3.1. Parameter Mutu Energi Bahan Bakar .....   | 10   |
| 2.3.2. Parameter Kinerja Produk Padat .....      | 10   |
| 2.4. Pengembangan Persamaan Model Prediktif..... | 12   |
| 2.4.1. Pemilihan Fungsi Logistik/ Sigmoid.....   | 13   |

|                                    |                                                           |    |
|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----|
| 2.4.2.                             | Fraksi Komponen Biomassa .....                            | 13 |
| 2.4.3.                             | Model Matematis .....                                     | 14 |
| 2.5.                               | Implementasi Visualisasi melalui Visual Basic .....       | 16 |
| BAB III METODOLOGI PENELITIAN..... |                                                           | 18 |
| 3.1.                               | Bahan dan Data Penelitian .....                           | 18 |
| 3.2.                               | Variabel Penelitian .....                                 | 20 |
| 3.2.1.                             | Variabel Bebas .....                                      | 20 |
| 3.2.2.                             | Variabel Terikat .....                                    | 20 |
| 3.3.                               | Tahapan Perhitungan dan Implementasi Program .....        | 21 |
| 3.3.1.                             | Input Data dan Parameter Model .....                      | 22 |
| 3.3.2.                             | Perhitungan Mass Yield .....                              | 22 |
| 3.3.3.                             | Perhitungan Nilai Kalor .....                             | 23 |
| 3.3.4.                             | Perhitungan Energi Yield.....                             | 24 |
| 3.4.                               | Pengembangan Model Matematis .....                        | 24 |
| 3.4.1.                             | Retensi Pada Komposisi Biomassa .....                     | 25 |
| 3.4.2.                             | Transisi Efektif.....                                     | 28 |
| 3.4.3.                             | Retensi Pada <i>Energy Densification Ratio</i> (EDR)..... | 30 |
| 3.5.                               | Implementasi Model Matematis di Microsoft Excel.....      | 31 |
| 3.6.                               | Perancangan Aplikasi Simulasi Torefaksi Biomassa.....     | 32 |
| 3.6.1.                             | Perancangan antarmuka (GUI).....                          | 32 |
| 3.6.2.                             | Implementasi logika perhitungan.....                      | 33 |
| 3.6.3.                             | Pengujian fungsional aplikasi .....                       | 33 |
| 3.7.                               | Prosedur Validasi Model.....                              | 33 |
| BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....  |                                                           | 35 |
| 4.1.                               | Persamaan yang Dikembangkan .....                         | 35 |
| 4.1.1.                             | Persamaan Retensi Massa Komponen Lignoselulosa .....      | 35 |

|                                 |                                                                                        |    |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.2.                          | Persaman Densifikasi Energi (EDR).....                                                 | 36 |
| 4.1.3.                          | Temperatur Transisi Efektif.....                                                       | 37 |
| 4.1.4.                          | Penggabungan Persamaan Retensi Komponen dan Temperatur<br>Transisi Efektif .....       | 38 |
| 4.2.                            | Visualisasi Aplikasi Simulasi Torefaksi Biomassa.....                                  | 39 |
| 4.3.                            | Perhitungan Numerik .....                                                              | 42 |
| 4.3.1.                          | Data masukan.....                                                                      | 43 |
| 4.3.2.                          | Hitung fraksi komponen biomassa (basis 0–1) .....                                      | 44 |
| 4.3.3.                          | Hitung Mass Yield .....                                                                | 44 |
| 4.3.4.                          | Hitung $HHV_0$ , $EDR(T)$ , $HHV(T)$ , dan Energy Yield.....                           | 47 |
| 4.3.5.                          | Ringkasan hasil ( $T = 200^{\circ}\text{C}$ ).....                                     | 48 |
| 4.4.                            | Hasil Simulasi dan Model .....                                                         | 48 |
| 4.4.1.                          | Perilaku Mass Yield terhadap suhu.....                                                 | 48 |
| 4.4.2.                          | Perilaku Nilai Kalor terhadap suhu .....                                               | 52 |
| 4.4.3.                          | Perilaku Energi Yield Terhadap Suhu.....                                               | 56 |
| 4.5.                            | Pembahasan.....                                                                        | 61 |
| 4.5.1.                          | Konsistensi model terhadap data eksperimen .....                                       | 61 |
| 4.5.2.                          | Evaluasi kinerja model terhadap data eksperimen dan peran<br>pendekatan terkopel ..... | 62 |
| 4.5.3.                          | Implikasi bagi visualisasi & aplikasi VB .....                                         | 63 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN..... |                                                                                        | 64 |
| 5.1.                            | Kesimpulan .....                                                                       | 64 |
| 5.2.                            | Saran.....                                                                             | 65 |
| DAFTAR PUSTAKA .....            |                                                                                        | 67 |

## DAFTAR GAMBAR

Halaman

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 Kandungan dan sifat selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam biomassa..... | 6  |
| Gambar 2. 2 Diagram Proses Torefaksi .....                                             | 8  |
| Gambar 2. 3 Microsoft Visual Studio 2010 .....                                         | 17 |
| Gambar 4. 1. Start Up Aplikasi.....                                                    | 39 |
| Gambar 4. 2. Tampilan Aplikasi Simulasi Torefaksi.....                                 | 40 |
| Gambar 4. 3. Tampilan Profil .....                                                     | 42 |
| Gambar 4. 4. Grafik Simulasi Mass Yield pada <i>Rice Husk</i> .....                    | 49 |
| Gambar 4. 5. Grafik Perbandingan Mass Yield <i>Rice Husk</i> .....                     | 49 |
| Gambar 4. 6. Grafik Simulasi Mass Yield pada <i>Pine Chips</i> .....                   | 50 |
| Gambar 4. 7. Grafik Perbandingan Mass Yield <i>Pine Chips</i> .....                    | 50 |
| Gambar 4. 8. Grafik Simulasi Mass Yield pada <i>Loging Residu Chips</i> .....          | 51 |
| Gambar 4. 9. Grafik Perbandingan Mass Yield <i>Loging Residue Chips</i> .....          | 51 |
| Gambar 4. 10. Grafik Simulasi Mass Yield pada <i>Cornstalk</i> .....                   | 52 |
| Gambar 4. 11. Grafik Perbandingan Mass Yield <i>Cornstalk</i> .....                    | 52 |
| Gambar 4. 12. Grafik Simulasi Nilai Kalor pada <i>Rice Husk</i> .....                  | 53 |
| Gambar 4. 13. Grafik Perbandingan Nilai Kalor <i>Rice Husk</i> .....                   | 53 |
| Gambar 4. 14. Grafik Simulasi Nilai Kalor pada <i>Pine Chips</i> .....                 | 54 |
| Gambar 4. 15. Grafik Perbandingan Nilai Kalor <i>Pine Chips</i> .....                  | 54 |
| Gambar 4. 16. Grafik Simulasi Nilai Kalor pada <i>Residu Chips</i> .....               | 55 |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 4. 17. Grafik Perbandingan Nilai Kalor <i>Residu Chips</i> .....          | 55 |
| Gambar 4. 18. Grafik Simulasi Nilai Kalor pada <i>Cornstalk</i> .....            | 56 |
| Gambar 4. 19. Grafik Perbandingan Nilai Kalor <i>Cornstalk</i> .....             | 56 |
| Gambar 4. 20. Grafik Simulasi Energi Yield pada <i>Rice Husk</i> .....           | 57 |
| Gambar 4. 21. Grafik Perbandingan Energi Yield <i>Rice Husk</i> .....            | 58 |
| Gambar 4. 22. Grafik Simulasi Energi Yield pada <i>Pine Chips</i> .....          | 58 |
| Gambar 4. 23. Grafik Perbandingan Energi Yield <i>Pine Chips</i> .....           | 59 |
| Gambar 4. 24. Grafik Simulasi Energi Yield pada <i>Residu Chips</i> .....        | 59 |
| Gambar 4. 25. Grafik Perbandingan Energi Yield <i>Logging Residu Chips</i> ..... | 60 |
| Gambar 4. 26. Grafik Simulasi Energi Yield pada <i>Cornstalk</i> .....           | 60 |
| Gambar 4. 27. Grafik Perbandingan Energi Yield <i>Cornstalk</i> .....            | 61 |



## DAFTAR TABEL

Halaman

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabel 3. 1. Data Jurnal Eksperimen Biomassa <i>Rice Husk</i> .....                                   | 19 |
| Tabel 3. 2. Data Jurnal Eksperimen Biomassa <i>Pine Chips</i> dan <i>Logging Residue Chips</i> ..... | 19 |
| Tabel 3. 3. Data Jurnal Eksperimen Biomassa <i>Cornstalk</i> .....                                   | 20 |
| Tabel 4. 1. Data Mass Yield <i>Rice Husk</i> .....                                                   | 48 |
| Tabel 4. 2. Data Mass Yield <i>Pine Chips</i> .....                                                  | 49 |
| Tabel 4. 3. Data Mass Yield <i>Logging Residue Chips</i> .....                                       | 50 |
| Tabel 4. 4. Data Mass Yield <i>Cornstalk</i> .....                                                   | 51 |
| Tabel 4. 5. Data Nilai Kalor <i>Rice Husk</i> .....                                                  | 53 |
| Tabel 4. 6. Data Nilai Kalor <i>Pine Chips</i> .....                                                 | 54 |
| Tabel 4. 7. Data Nilai Kalor <i>Logging Residu Chips</i> .....                                       | 55 |
| Tabel 4. 8. Data Nilai Kalor Jurnal <i>Cornstalk</i> dan Simulasi .....                              | 56 |
| Tabel 4. 9. Data Nilai Energi Yield <i>Rice Husk</i> .....                                           | 57 |
| Tabel 4. 10. Data Nilai Energi Yield <i>Pine Chips</i> .....                                         | 58 |
| Tabel 4. 11. Data Nilai Energi Yield <i>Logging Residu Chips</i> .....                               | 59 |
| Tabel 4. 12. Data Nilai Energi Yield <i>Cornstalk</i> .....                                          | 60 |

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Kebutuhan akan sumber energi terbarukan semakin meningkat seiring dengan menipisnya cadangan bahan bakar fosil dan meningkatnya kesadaran terhadap dampak lingkungan akibat emisi gas rumah kaca (IESR, 2024). Krisis energi fosil dan meningkatnya kesadaran terhadap perubahan iklim mendorong pengembangan sumber energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan. Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar adalah biomassa, khususnya biomassa kayu yang melimpah dan mudah diperoleh di berbagai daerah tropis seperti Indonesia. Namun demikian, biomassa dalam bentuk mentah memiliki beberapa kelemahan seperti kadar air yang tinggi, nilai kalor rendah, serta sifat penyimpanan dan transportasi yang kurang efisien (Amrul dkk., 2025).

Pemanfaatan biomassa kayu sebagai sumber energi terbarukan membutuhkan prapengolahan agar sifat fisik–kimianya mendekati batubara muda: meningkatkan karakteristik energi biomassa, kadar air menurun, hidrofobisitas membaik, dan kemudahan penggilingan bertambah. Torefaksi adalah salah satu teknologi termokimia yang dilakukan pada suhu 200–300°C dalam kondisi atmosfer inert atau terbatas oksigen. Proses ini meningkatkan sifat energi dan kestabilan biomassa dengan cara mengurangi kadar air dan zat volatil serta meningkatkan nilai kalor dan sifat hidrofobisitasnya (Wahyudi dkk., 2020). Torefaksi telah diakui sebagai prapengolahan yang efektif untuk mencapai tujuan tersebut. Pemetaan menyeluruh mengenai prinsip, parameter proses, dan dampak terhadap kualitas bahan bakar padat telah ditunjukkan dalam tinjauan mutakhir dan laporan lembaga energi internasional (Chen dkk., 2021).

Di sisi lain, pengujian eksperimen torefaksi untuk setiap variasi biomassa dan kondisi operasi memerlukan waktu, biaya, serta fasilitas pengujian yang tidak selalu tersedia, sedangkan data dan temuan eksperimen sering tersebar di berbagai publikasi. Kondisi ini mendorong kebutuhan akan model prediktif yang dapat mengestimasi  $MY-HHV-EY$  dari parameter yang relatif mudah diperoleh, sehingga dapat berfungsi sebagai alat bantu analisis awal maupun pendamping

validasi data eksperimen. Sesuai batasan penelitian, model yang dirumuskan dibangun berdasarkan kajian literatur dan data eksperimen sekunder dari jurnal ilmiah, dengan rentang suhu kajian berada pada 200–300 °C.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penting ditegaskan bahwa membutuhkan satu persamaan retensi massa yang ringkas namun representatif—sebagai karakteristik awal bahan baku menuju prediksi hasil torefaksi—sebab mass yield (MY) telah diusulkan sebagai parameter sintetik yang mampu merangkum tingkat keparahan torefaksi dan bahkan menunjukkan korelasi kuat dengan energy yield (EY) (Grigianti & Antolini, 2015). Pendekatan pemodelan berbasis fungsi empirik yang halus seperti logistik juga telah dipakai untuk memprediksi sifat produk hasil torefaksi dari variabel temperatur, sehingga memperkuat argumentasi bahwa persamaan tunggal MY(T) layak dijadikan fondasi model prediktif (selanjutnya dikaitkan ke HHV dan EY) (Iglesias Canabal dkk., 2023).

Dalam konteks kajian eksperimental dan studi parametrik pada residu pertanian/limbah biomassa menunjukkan rentang solid mass yield dan energy yield yang lebar serta menegaskan temperatur sebagai faktor paling dominan, bahkan perbedaan hasil antar-biomassa dapat muncul akibat perbedaan struktur lignoselulosa/hemiselulosa, sehingga kebutuhan satu persamaan retensi massa menjadi semakin relevan agar keluaran torefaksi dapat diprediksi sejak awal secara konsisten untuk berbagai biomassa (Andini dkk., 2022).

Agar model matematis yang dikembangkan tidak berhenti pada tataran konseptual, penelitian ini mengimplementasikan seluruh persamaan ke dalam aplikasi dengan antarmuka yang sederhana dan interaktif, sehingga pengguna dapat memasukkan parameter-parameter tertentu dan langsung memperoleh hasil perhitungan berupa HHV, mass yield, maupun energy yield, lengkap dengan menampilkan grafik hubungan antar variabel. Dalam hal ini, Visual Basic (VB) dipilih sebagai platform pengembangan karena kemampuannya dalam menyediakan tampilan grafik yang mudah ditampilkan sesuai data, kemudahan integrasi dengan basis data maupun Microsoft Excel, serta fleksibilitas dalam menyajikan data hasil perhitungan dalam bentuk grafik. VB juga relatif mudah diakses dan dipelajari sehingga sesuai untuk digunakan dalam pengembangan aplikasi akademik maupun praktis di bidang teknik energi.

Dengan demikian, penelitian mengenai pengembangan model prediktif efisiensi energi proses torefaksi kayu yang didasarkan pada sintesis literatur dan data eksperimen, serta implementasi model tersebut melalui aplikasi berbasis Visual Basic, memiliki urgensi yang tinggi. Agar temuan kuantitatif ini mudah dipakai insinyur lapangan, antarmuka Visual Basic (VB/VB.NET) relevan sebagai kerangka GUI ringan untuk perhitungan, simulasi “what-if”, dan visualisasi hasil. Praktik baik dari jurnal Indonesia menunjukkan pengembangan aplikasi VB untuk pengukuran/monitoring fotovoltai on-grid, perhitungan indeks keandalan pembangkit (LOLP/EENS), hingga pemodelan prediksi energi listrik berbasis VB.NET—mendemonstrasikan kelayakan VB sebagai platform implementasi alat bantu rekayasa energi (Satria dkk., 2022).

Dengan integrasi model prediktif dan visualisasi berbasis perangkat lunak, penelitian ini berpotensi menjadi alat validasi eksperimen biomassa dengan implementasi nyata dalam mendukung pemanfaatan biomassa sebagai energi terbarukan yang efisien dan berkelanjutan. Selain itu, dapat mengetahui hasil efisiensi lebih cepat ketika membutuhkan hasil matematis dan tidak perlu lagi menggunakan perhitungan menggunakan kertas untuk validasi eksperimen. Dengan pendekatan ini, keluaran yang diharapkan merupakan model yang mampu memprediksi metrik efisiensi energi (MY, EY, HHV) dengan akurasi dan keandalan terukur pada rentang kondisi operasi yang relevan dan menjadi alat visual interaktif yang memfasilitasi optimasi parameter proses serta komunikasi hasil kepada pemangku kepentingan.

## **1.2. Tujuan Penelitian**

- 1.2.1. Mengembangkan model matematis untuk memprediksi Mass Yield (MY), Higher Heating Value (HHV), dan Energy Yield (EY) biomassa tertorefaksi berdasarkan analisis ultimate, komposisi lignoselulosa, dan suhu torefaksi.
- 1.2.2. Mengimplementasikan model tersebut ke dalam aplikasi simulasi “Simulasi Torefaksi Biomassa” berbasis Visual Basic yang mampu menampilkan hasil perhitungan dalam bentuk angka dan grafik.

- 1.2.3. Melakukan validasi model menggunakan data eksperimen torefaksi yang diperoleh dari beberapa jurnal, serta menganalisis tingkat kesesuaian (galat) antara hasil simulasi dan eksperimen.

### **1.3. Batasan Masalah**

- 1.3.1. Rentang suhu torefaksi yang dikaji berada pada kisaran 200–300 °C, mengikuti rentang suhu yang dilaporkan dalam jurnal-jurnal referensi.
- 1.3.2. Parameter efisiensi energi yang digunakan sebagai acuan model meliputi Mass Yield (MY), Energy Yield (EY), dan Higher Heating Value (HHV), sementara faktor lain seperti emisi gas buang atau kandungan abu tidak menjadi fokus utama.
- 1.3.3. Model prediktif yang dirumuskan hanya dibangun berdasarkan kajian literatur dan data eksperimen sekunder yang telah dipublikasikan dalam jurnal ilmiah, bukan dari eksperimen laboratorium baru.
- 1.3.4. Aplikasi dikembangkan menggunakan Visual Basic 2010 untuk platform desktop, tanpa integrasi dengan basis data daring atau simulasi CFD.

### **1.4. Manfaat**

- 1.4.1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan dengan menyediakan model prediktif dan aplikasi simulasi yang dapat dimanfaatkan sebagai referensi dan media pembelajaran di bidang konversi energi biomassa, khususnya terkait proses torefaksi..
- 1.4.2. Menjadi referensi ilmiah bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan model prediktif berbasis komputasi dan aplikasi perangkat lunak untuk energi terbarukan.
- 1.4.3. Menyediakan alat bantu analisis awal untuk memperkirakan MY, HHV, dan EY berbagai jenis biomassa pada kondisi operasi tertentu tanpa harus selalu melakukan eksperimen langsung, sehingga dapat menghemat waktu dan biaya.
- 1.4.4. Menjadi dasar pengembangan sistem komputasi lanjut atau integrasi dengan platform digital lain (misalnya Python, MATLAB, atau aplikasi berbasis IoT) untuk monitoring dan optimasi proses torefaksi di masa depan.

- 1.4.5. Aplikasi yang dikembangkan dapat dimanfaatkan sebagai media praktikum dan simulasi dalam mata kuliah terkait energi biomassa dan sistem konversi energi.

## **1.5. Sistematika Penulisan**

**BAB I PENDAHULUAN:** Latar Belakang, Tujuan Penelitian, Batasan Masalah, Manfaat dan Sistematika Penulisan.

**BAB II LANDASAN TEORI:** Biomassa, Torefaksi, Parameter Torefaksi, Pengembangan Persamaan Model Prediktif, dan Implementasi Visualisasi melalui Visual Basic.

**BAB III METODOLOGI PENELITIAN:** Bahan dan Data Penelitian, variable penelitian, Tahapan Perhitungan dan Implementasi Program, Pengembangan Model Matematis, Implementasi Model Matematis di Microsoft Excel, Perancangan Aplikasi Simulasi Torefaksi Biomassa, dan Prosedur Validasi Model.

**BAB IV HASIL dan PEMBAHASAN:** Persamaan yang Dikembangkan, Visualisasi Aplikasi Simulasi Torefaksi Biomassa, Perhitungan Numerik, Hasil Simulasi dan Model, dan Pembahasan

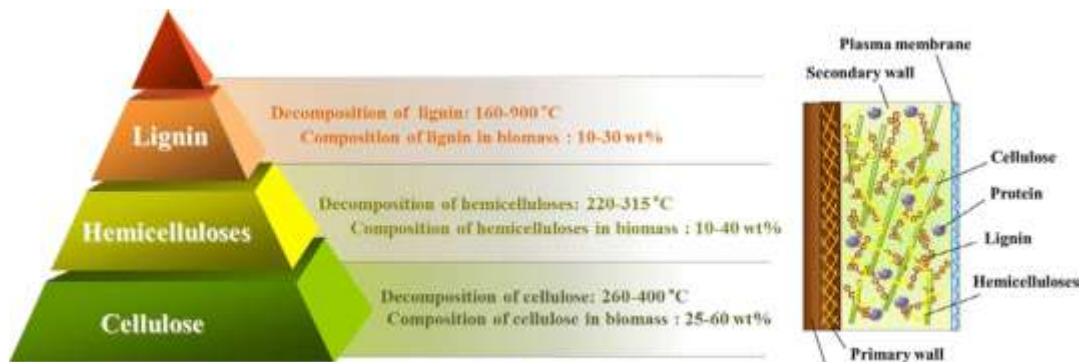
**BAB V KESIMPULAN dan SARAN:** Menjelaskan kesimpulan dari bab sebelumnya dan memberikan saran untuk penelitian yang akan dilaksanakan kemudian hari.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

#### 2.1. Biomassa

Biomassa merupakan salah satu bentuk sumber energi terbarukan yang berasal dari bahan organik seperti limbah pertanian, limbah kehutanan, dan tanaman energi. Salah satu jenis biomassa yang paling banyak digunakan adalah biomassa kayu, yang kaya akan kandungan karbon dan dapat diolah menjadi energi melalui berbagai proses termokimia, seperti pirolisis, gasifikasi, dan torefaksi (Bridgwater, 2012). Kayu keras ialah biomassa lignoselulosa dengan dinding sel tersusun atas selulosa–hemiselulosa–lignin plus ekstraktif & mineral jejak. Dibanding kayu lunak, hemiselulosa kayu keras didominasi xylan (glukuronoksilan) dan ligninnya kaya unit syringyl (S) (lebih tinggi rasio S/G), yang memengaruhi perilaku termal dan produk degradasi. Ringkasan struktur–kimia ini ditegaskan dalam Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites (USDA FPL) (Rowell dkk., 2012).



Gambar 2. 1 Kandungan dan sifat selulosa, hemiselulosa, dan lignin dalam biomassa

Berdasarkan gambar 2.1 bahwa piramida kiri memperlihatkan tiga komponen utama biomassa lignoselulosa—selulosa, hemiselulosa, dan lignin—beserta kisaran suhu dekomposisinya.

1. Selulosa: ~25–60 wt%, mulai terurai sekitar 260–400 °C (struktur kristalin membuatnya lebih resisten).
2. Hemiselulosa: ~10–40 wt%, paling reaktif, terurai pada 220–315 °C (melepas CO/CO<sub>2</sub> dan asam asetat).
3. Lignin: ~10–30 wt%, paling stabil/menyeluruh (terurai bertahap 160–900 °C) dan kaya karbon—membentuk padatan ber-C tinggi.

Skema kanan menunjukkan arsitektur dinding sel tumbuhan: middle lamella (bagian “lem” kaya lignin), dinding primer dan sekunder, dengan mikrofibril selulosa yang ditanam dalam matriks hemiselulosa–lignin serta protein di atas membran plasma. Selulosa memberi kekuatan tarik, hemiselulosa mengikat serat, dan lignin memberi kekakuan serta hidrofobisitas.

Kaitannya dengan torefaksi ( $\pm 200\text{--}300$  °C): karena hemiselulosa terdekomposisi lebih dulu, pada rentang ini terjadi penurunan mass yield, pelepasan volatil, dan peningkatan hidrofobisitas/HHV pada padatan. Lignin yang relatif bertahan membuat residu lebih kaya karbon dan lebih mudah digiling—itulah sebabnya kualitas bakar biomassa meningkat setelah torefaksi (Chen dkk., 2021).

Biomassa kayu merupakan pilar bioenergi modern. Dalam lingkup transisi energi, laporan tahunan IEA Bioenergy menegaskan bioenergi modern masih menjadi kontributor terpenting di antara sumber terbarukan untuk panas, listrik, industri, dan transportasi. Untuk aplikasi energi, mutu kayu ditentukan terutama oleh kadar air, diikuti kadar abu serta nilai kalor, tiga parameter ini paling konsisten diukur pada studi-studi internasional tentang bahan bakar kayu (Zero, 2025). Sebagai bahan bakar, biomassa memiliki sejumlah kelebihan seperti ketersediaan yang melimpah, dapat diperbarui, serta relatif netral karbon karena CO<sub>2</sub> yang dilepaskan saat pembakaran akan diserap kembali oleh tanaman dalam proses fotosintesis. Namun, biomassa dalam bentuk mentah memiliki kelemahan seperti kadar air tinggi, densitas energi rendah, dan kestabilan penyimpanan yang buruk (Wahyudi dkk., 2020).

Untuk meningkatkan kualitas energi dari biomassa, diperlukan proses pra-pengolahan seperti torefaksi, yang dapat memperbaiki sifat fisik dan kimia biomassa sehingga lebih efisien sebagai bahan bakar padat. Proses ini melibatkan pemanasan biomassa pada suhu tertentu dalam kondisi minim oksigen, sehingga

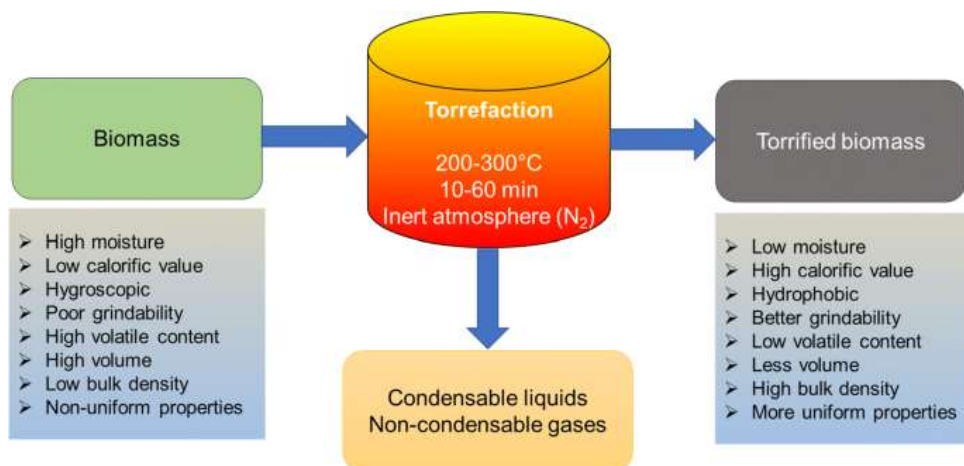


menghasilkan bahan bakar dengan densitas energi yang lebih tinggi dan sifat pembakaran yang lebih baik. Teknologi ini sangat relevan untuk memanfaatkan biomassa kayu sebagai sumber energi terbarukan yang lebih efisien. Dengan torefaksi, biomassa akan kehilangan sebagian besar kandungan air dan senyawa volatil, menghasilkan produk dengan nilai kalor lebih tinggi, lebih hidrofobik, dan lebih mudah digiling (Wahyudi dkk., 2020).

Kualitas kayu bakar modern ditetapkan melalui ukuran partikel, kadar air awal (*moisture content*, MC), abu, dan kandungan kimia. ISO 17225-4:2021 (*graded wood chips*) menspesifikkan kelas mutu; ringkasan teknis terkemutakhiran menautkan Grade A pada MC <50% dan abu  $\leq 3\%$  (ambang mutu inti), bermanfaat sebagai koridor spesifikasi untuk rekayasa dan perdagangan (Preview, 2021). Secara elementer, kayu keras umumnya  $\approx 50\%$  C, 6% H, 44% O dengan N, S, dan mineral pada kadar jejak; kadar abu inti kayu murni rendah. Data kompilasi FPL dan ringkasan literatur biomassa menempatkan angka-angka ini sebagai rujukan baku untuk analisis ultimate (Rowell dkk., 2012).

## 2.2. Torefaksi

Torrefaksi merupakan salah satu metode pra-pemrosesan termal biomassa yang dilakukan pada rentang suhu antara 200°C hingga 300°C dalam kondisi atmosfer inert atau minim oksigen. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas biomassa sebagai bahan bakar padat, melalui peningkatan nilai kalor, pengurangan kadar air, peningkatan stabilitas penyimpanan, serta perbaikan sifat fisik seperti mudah digiling dan tidak mudah menyerap air (Chen dkk., 2015).



Gambar 2. 2 Diagram Proses Torefaksi

diagram yang ditunjukkan pada Gambar 2.2 ; biomassa mentah punya banyak kekurangan untuk bahan bakar, torefaksi pada 200–300 °C di atmosfer inert melepaskan air/volatil (muncul kondensat & gas), dan produk padat menjadi lebih kering, lebih “berenergi”, lebih mudah ditangani, sehingga cocok untuk cofiring/konversi termokimia berikutnya (Chen dkk., 2021).

Secara kimia, transformasi utama selama torefaksi dipandu oleh reaktivitas hemiselulosa (paling reaktif) yang terdegradasi lebih dahulu pada rentang suhu 200–260 °C, diikuti awal degradasi selulosa pada suhu yang lebih tinggi, sementara lignin relatif paling resisten dan terurai pada rentang yang lebih lebar; penurunan gugus –OH dan zat terbang serta kenaikan fraksi karbon tetap menjelaskan kenaikan HHV dan sifat hidrofobik produk (Irawan dkk., 2015).

Indikator kinerja energi torefaksi lazim dinyatakan melalui MY dan Energy Yield (EY), dengan EY didefinisikan sebagai MY dikalikan rasio HHV produk terhadap HHV awal; pada praktiknya, kenaikan HHV diimbangi penurunan MY sehingga titik operasi “efisien” bergantung tujuan proses (misalnya peningkatan densitas energi vs. retensi massa). Pada kasus TKKS di Indonesia, contoh hasil menunjukkan HHV naik 13% atau 17,9 MJ/kg setelah torefaksi COMB (280°C, beberapa menit), bersamaan dengan penurunan higroskopisitas; pelet jabon/karet memperlihatkan tren serupa, sehingga definisi MY–EY praktis untuk menilai kompromi proses di bahan baku berbeda (Rubiyanti dkk., 2019).

### 2.3. Parameter Torefaksi

Pada proses torefaksi kayu keras (hardwood), evaluasi dilakukan menggunakan sejumlah parameter yang merepresentasikan kualitas bahan bakar padat serta kinerja proses torefaksi. Parameter utama yang digunakan meliputi nilai kalor tinggi dan rendah (HHV/LHV), *mass yield* (MY), *energy yield* (EY), *energy densification ratio* (EDR/EF), serta indeks severitas torefaksi (torrefaction severity index, TSI/TSF). Kombinasi parameter-parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan kompromi (trade-off) antara peningkatan densitas energi bahan bakar dan penurunan massa akibat proses devolatilisasi pada rentang suhu 200–300 °C. Selain itu, penurunan rasio atomik H/C dan O/C yang ditunjukkan pada diagram Van Krevelen mengindikasikan peningkatan mutu bahan bakar padat hasil

torefaksi, yang ditandai dengan karakteristik kimia yang semakin mendekati bahan bakar fosil (Wang dkk., 2020).

### 2.3.1. Parameter Mutu Energi Bahan Bakar

Pada praktik laboratorium, mutu energi paling baku dinilai dari HHV (*Higher Heating Value*) hasil kalorimeter bom sesuai ISO 18125/EN 14918; dari nilai HHV ini, LHV (*Lower Heating Value*) dihitung dengan mengoreksi panas penguapan air yang berasal dari hidrogen bahan bakar dan kadar air sampel. Karena itu, laporan mutu energi selalu menyebut basis data (db/daf/ar). Jika pengukuran belum tersedia, HHV dapat diperkirakan dari analisis ultimate menggunakan korelasi empiris seperti persamaan dulong yang memakai %C, %H, %O, %N, %S, dan abu—metode ini luas dipakai untuk biomassa dan memberikan ketelitian baik sebagai pendamping data kalorimeter (ISO 18125, 2017).

Torefaksi menurunkan O/C dan H/C (deoksigenasi dan dehidrogenasi relatif), sehingga HHV padatan meningkat dan posisinya pada diagram Van Krevelen bergeser ke arah lignit/batubara muda. Higher Heating Value (HHV) menyatakan energi panas maksimum yang dilepaskan dari pembakaran sempurna bahan bakar dengan memperhitungkan panas kondensasi uap air. HHV dapat diperkirakan dari analisis ultimate (C, H, O, N, S, Ash) menggunakan korelasi empiris. (membunyikan pers 2.1) Pada penelitian ini digunakan persamaan Channiwala–Parikh (Phanphanich & Mani, 2011).

$$\begin{aligned} HHV_0 = & 0.3491C_0 + 1.1783H_0 + 0.1005S_0 - 0.1034O_0 \\ & - 0.0151N_0 - 0.0211Ash_0 \end{aligned} \quad (2.1)$$

dengan  $C_0, H_0, O_0, N_0, S_0, Ash_0$  adalah komposisi unsur biomassa awal dalam persen berat (wt%) pada basis kering. Korelasi ini banyak digunakan karena praktis dan dapat memberikan estimasi HHV tanpa pengujian bom kalorimeter.

### 2.3.2. Parameter Kinerja Produk Padat

Mass yield menyatakan berapa persen massa padatan hasil torefaksi yang masih tersisa dibanding massa biomassa awal pada basis kering. Secara operasional, MY dihitung dari perbandingan massa kering padatan pascaproses terhadap massa kering umpan, lalu dikali 100%. MY menurun ketika suhu/waktu

torefaksi meningkat karena devolatilisasi—utamanya dari hemiselulosa—yang melepaskan  $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2/\text{CO}$  (Tumuluru dkk., 2021). Mass yield menyatakan persentase massa padatan hasil torefaksi terhadap massa awal biomassa pada basis kering (Pers. 2.2):

$$MY(\%) = \frac{m_T}{m_0} \times 100 \quad (2.2)$$

dengan  $m_0$  adalah massa awal biomassa kering, dan  $m_T$  adalah massa padatan kering setelah torefaksi pada temperatur  $T$ . Nilai MY akan menurun ketika temperatur meningkat karena semakin banyak komponen biomassa terdekomposisi dan volatil terlepas.

EDR menggambarkan peningkatan densitas energi per satuan massa pada padatan tertorefaksi dibanding bahan awal, dan didefinisikan sederhana sebagai rasio HHV produk terhadap HHV umpan. Karena torefaksi menurunkan O/C dan (sedikit) H/C, HHV padatan umumnya naik sehingga  $EDR > 1$ . EDR cenderung meningkat dengan bertambahnya suhu/waktu, tetapi kenaikan ini harus ditimbang terhadap turunnya MY agar tidak menekan energi total yang dipertahankan (Chen dkk., 2021). Energy densification ratio menyatakan perbandingan nilai kalor biomassa tertorefaksi terhadap nilai kalor biomassa awal yang ditunjukkan pada (Pers. 2.3):

$$EDR = \frac{HHV_T}{HHV_0} \quad (2.3)$$

Nilai EDR umumnya lebih besar dari 1 pada torefaksi karena terjadi peningkatan konsentrasi karbon dan penurunan oksigen, sehingga energi per satuan massa meningkat.

Energy yield menyatakan berapa persen energi pada padatan yang masih dipertahankan pascatorefaksi dibanding energi pada umpan. Secara praktis, EY dihitung sebagai hasil kali antara MY dan EDR; jika tersedia data LHV, sebagian peneliti memformulasikan EY berbasis LHV agar konsisten dengan aplikasi pembakaran nyata. Secara tren, EY menurun ketika severitas meningkat: HHV

memang naik (meningkatkan EDR), namun penurunan MY biasanya lebih dominan pada suhu tinggi sehingga energi total yang tersisa pada padatan berkurang. Energy yield menyatakan persentase energi yang masih tersimpan di produk padatan dibanding energi pada biomassa awal. Dengan menggunakan MY dan EDR, energy yield dirumuskan dalam bentuk (Pers. 2.4) sebagai:

$$EY(\%) = MY(\%) \times EDR \quad (2.4)$$

Formulasi tersebut menunjukkan bahwa meskipun nilai kalor meningkat (EDR naik), energi total yang tersimpan tetap dipengaruhi oleh besarnya massa padatan yang tersisa (MY). Implikasi praktis dan kaitan antar-parameter ini saling terkait dalam menentukan kualitas dan kuantitas energi padatan: MY mengukur retensi massa; EDR mengukur peningkatan mutu energi per massa; EY menyatukan keduanya sebagai indikator berapa banyak energi awal yang masih “tinggal” di padatan (Akanni dkk., 2019).

#### **2.4. Pengembangan Persamaan Model Prediktif**

Pengembangan persamaan prediktif pada penelitian torrefaksi umumnya berangkat dari fakta bahwa temperatur proses adalah penggerak utama perubahan sifat biomassa pada kisaran torrefaksi ( $\pm 200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Pada rentang ini, biomassa mengalami pemanasan “ringan” (mild thermal treatment) yang memicu pelepasan air terikat dan sebagian senyawa volatil serta transformasi kimia (deoksigenasi parsial) sehingga massa padatan cenderung menurun, sementara densitas energi/nilai kalor cenderung meningkat. Prinsip dan rentang operasi tersebut dibahas luas dalam literatur torrefaksi, termasuk ulasan komprehensif yang menekankan bahwa perubahan properti bahan bakar (MY, HHV, hydrophobicity, grindability) sangat dipengaruhi oleh temperatur (Chen dkk., 2015).

Dalam praktik pemodelan, variabel proses torrefaksi dapat mencakup temperatur dan waktu tinggal (residence time). Namun beberapa studi melaporkan bahwa temperatur sering lebih sensitif/lebih dominan dibanding waktu pada rentang operasi tertentu, sehingga pemodelan berbasis temperatur saja dapat menjadi

pendekatan yang rasional ketika fokus penelitian adalah pengaruh temperatur atau ketika data waktu tinggal tidak seragam (Bampenrat dkk., 2023).

#### 2.4.1. Pemilihan Fungsi Logistik/ Sigmoid

Pemilihan fungsi sigmoid/logistik dalam pengembangan persamaan prediktif berbasis temperatur didasarkan pada karakter dasar proses torrefaksi dan perilaku degradasi termal biomassa yang bertahap. Literatur tinjauan torrefaksi menunjukkan bahwa kehilangan massa (*weight loss*) biomassa dan komponennya telah banyak dipelajari menggunakan TGA untuk menjelaskan perubahan massa sebagai fungsi temperatur, ukuran partikel, dan waktu, serta bahwa HHV dan water uptake berkorelasi kuat terhadap derajat kehilangan massa (*degree of torrefaction*). Temuan ini menegaskan bahwa keluaran penting torrefaksi bersifat “berbasis transisi” dan cenderung memiliki batas awal–akhir yang jelas (Chen dkk., 2015).

Secara termal, biomassa lignoselulosa tersusun oleh hemiselulosa, selulosa, dan lignin yang memiliki rentang degradasi berbeda; akibatnya kurva massa tersisa terhadap temperatur tidak turun secara linear, melainkan menunjukkan zona awal yang relatif stabil, diikuti zona transisi (penurunan cepat), lalu zona akhir yang melandai ketika mendekati residu/char. Studi klasik tentang karakteristik pirolisis komponen lignoselulosa menggunakan TGA menunjukkan hemiselulosa dominan terurai pada ~220–315 °C, selulosa pada ~315–400 °C, sedangkan lignin terurai pada rentang sangat lebar (~150–900 °C) dan menyisakan residu padat tinggi. Pola multi-tahap inilah yang secara alami menghasilkan bentuk kurva transisi menyerupai S-curve (Yang, 2007).

#### 2.4.2. Fraksi Komponen Biomassa

Agar kontribusi tiap komponen dapat dijumlahkan secara konsisten, komposisi lignoselulosa awal (basis kering) ( $H_0$ ,  $C_0$ ,  $L_0$ ) dinyatakan sebagai fraksi ternormalisasi: Komposisi lignoselulosa dari biomassa kering dinyatakan pada (Pers. 2.5) sebagai:

$$f_{hem} = \frac{Hem(\%)}{100}, f_{cel} = \frac{Cel(\%)}{100}, f_{lig} = \frac{Lig(\%)}{100} \quad (2.5)$$

Karena pada beberapa data jurnal komposisi hemiselulosa + selulosa + lignin tidak selalu tepat 100% (misalnya karena adanya ekstraktif dan komponen lain), maka didefinisikan fraksi lain (other) sebagai:

$$f_{oth} = \max \left( 0, 1 - \frac{Hem + Cel + Lig}{100} \right) \quad (2.6)$$

Fraksi  $f_{oth}$  pada (Pers. 2.6) ini penting agar neraca massa tetap konsisten dan model dapat digunakan pada berbagai jenis biomassa. Pendekatan yang mengaitkan perilaku torrefaksi dengan konsentrasi selulosa–hemiselulosa–lignin juga didukung oleh penelitian yang berupaya menggeneralisasi perilaku torrefaksi lintas biomassa berdasarkan kontribusi komponen utama tersebut (Tanoue dkk., 2020).

#### 2.4.3. Model Matematis

Model matematis pada penelitian ini dirancang sebagai model prediktif terintegrasi untuk memperkirakan kinerja proses torefaksi biomassa berupa Mass Yield (MY), Higher Heating Value setelah torefaksi (HHV(T)), dan Energy Yield (EY) berdasarkan parameter yang relatif mudah diperoleh, yaitu komposisi lignoselulosa (hemiselulosa, selulosa, lignin), analisis ultimate (C, H, O, N, S, abu), serta temperatur torefaksi. Kerangka ini relevan karena torefaksi pada rentang 200–300 °C memicu devolatilisasi dan deoksigenasi parsial yang menurunkan massa padatan, namun meningkatkan densitas energi, sehingga diperlukan model yang mampu menangkap trade-off tersebut secara kuantitatif dan konsisten (Chen dkk., 2015).

##### 1. Retensi Massa Logistik Sebagai Fungsi Temperatur

Perubahan fraksi tersisa (retensi) yang memiliki dua plateau (awal dan akhir) secara alamiah membentuk kurva transisi berbentuk sigmoid (S-curve). Dalam literatur *curve fitting*, fungsi Boltzmann/logistik 4-parameter sering dipakai untuk memodelkan kurva sigmoid karena parameternya langsung

merepresentasikan batas bawah–atas, titik infleksi (midrange), dan pengendali kemiringan (slope/scale) (Heusser dkk., 2021). Retensi massa komponen didefinisikan sebagai fraksi massa komponen yang masih tersisa pada temperatur  $T$ , karena kurva massa-tersisa terhadap temperatur bersifat bertahap dan mendekati batas awal–akhir,  $rj(T)$  dapat dimodelkan dengan fungsi transisi (sehingga mampu memotret:

- a) retensi mendekati 1 pada temperatur rendah,
- b) penurunan cepat pada zona transisi,
- c) mendekati nilai residu pada temperatur lebih tinggi.

Praktik *curve fitting* (pencocokan kurva) massa TGA menggunakan fungsi Sigmoid/logistik (termasuk bentuk campuran/overlapping) telah digunakan untuk merepresentasikan degradasi bertahap komponen lignoselulosa (Yang, 2007). Persamaan dasar yang diadopsi untuk membentuk persamaan logistik torefaksi berasal dari bentuk Boltzmann Sigmoid yang dinyatakan umum sebagai fungsi dua dimensi  $y = f(x)$  dalam bentuk persamaan 2.7 (Heusser dkk., 2021):

$$y = f(x) = T + \frac{B - T}{1 + \exp\left(\frac{M - x}{S}\right)} \quad (2.7)$$

dan bentuk ekuivalennya dengan parameter “range”:

$$y = f(x) = T + \frac{-R}{1 + \exp\left(\frac{M - x}{S}\right)} \quad (2.8)$$

Pada persamaan ini, simbol  $T$  adalah Top (asimtot atas) dan  $B$  adalah Bottom (asimtot bawah), sedangkan  $M$  menyatakan midrange (absis titik infleksi) dan  $S$  adalah parameter skala yang berkaitan dengan kemiringan transisi (Heusser dkk., 2021).



## 2. Transisi Efektif

Pada kurva retensi massa berbentuk sigmoid, temperatur transisi merepresentasikan titik tengah perubahan (midpoint/inflection point), yaitu kondisi ketika perubahan retensi berlangsung paling intens. Dalam kerangka *sigmoidal mixed model* berbasis keluarga logistik, Capuano dkk. menyatakan bahwa parameter “titik tengah” ( $\theta_2$ ) dapat didefinisikan sebagai kondisi ketika respons berada pada probabilitas 0,5 (titik tengah transisi), dan parameter ini dapat dibuat bergantung pada kovariat melalui bentuk linier. Secara umum, Capuano dkk. menegaskan bahwa model sigmoid dapat memuat parameter yang mewakili *midpoint of decline* (titik tengah penurunan) sebagai salah satu parameter utama kurva (Capuano dkk., 2018).

Untuk memasukkan pengaruh faktor penjelas (kovariat) terhadap pergeseran titik transisi, Capuano menuliskan bentuk linier untuk parameter titik tengah sebagai:

$$\theta_2 = \alpha_2 + \beta_2 x \quad (2.9)$$

dengan  $\theta_2$  adalah parameter titik tengah (pada konteks Capuano: waktu saat  $p(t) = 0,5$ ),  $\alpha_2$  adalah intersep (nilai titik tengah pada kondisi referensi),  $\beta_2$  adalah koefisien pengaruh kovariat, dan  $x$  adalah kovariat yang dipilih (misalnya karakteristik material atau indikator perubahan kondisi) (Capuano dkk., 2018).

### 2.5. Implementasi Visualisasi melalui Visual Basic

Implementasi visualisasi dilakukan pada aplikasi desktop VB.NET/Windows Forms agar ringan, berjalan offline, dan mudah dipaketkan untuk laboratorium. Untuk kebutuhan interaksi lebih kaya dapat disertakan sebagai alternatif; keduanya memiliki panduan WinForms/VB yang jelas sehingga integrasinya ke proyek VB.NET relatif mudah. Alur data dirancang sederhana:

pengguna dapat memasukkan analisis ultimate (C, H, O, N, S) dan kondisi torefaksi (suhu) secara manual melalui kontrol numerik.



Gambar 2. 3 Microsoft Visual Studio 2010

Perhitungan inti ditempatkan pada modul backend terpisah agar logika ilmiah terjaga dari layer tampilan. HHV dihitung dari unsur (C, H, O, N, S) menggunakan korelasi Channiwala–Parikh ketika nilai kalorimeter belum tersedia. Jika tersedia, nilai HHV dari kalorimeter bom (basis kering, 25 °C) menjadi acuan utama, mengacu pada ISO 18125; aplikasi memungkinkan pengguna membandingkan HHV hasil kalorimeter dengan HHV hasil korelasi sebagai validasi silang. Parameter kinerja produk padat dihitung otomatis dari input tersebut.

Mass yield (MY) diturunkan dari rasio massa kering produk terhadap massa kering umpan, energy densification ratio (EDR/EF) dihitung sebagai  $\text{HHV}_{\text{tor}} / \text{HHV}_{\text{raw}}$ , sedangkan energy yield (EY) sebagai hasil kali  $\text{MY} \times \text{EDR}$ . Pola ini konsisten dengan tinjauan torrefaksi modern (definisi MY/EY, tren mutu energi pascaproses) dan ulasan klasik yang membahas neraca energi dan performa proses lintas konfigurasi reactor (Tumuluru dkk., 2021). Dengan susunan ini, visualisasi berbasis VB.NET tidak hanya memudahkan analisis MY–EDR–EY–HHV/LHV–H/C–O/C secara terintegrasi, tetapi juga menjaga keterlacakan ilmiah terhadap standar pengujian kalor dan rujukan akademik yang relevan.

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Penelitian ini termasuk dalam kategori penelitian pengembangan model (model development) dengan pendekatan studi literatur, pemodelan matematis, dan pemrograman komputer. Seluruh data yang digunakan merupakan data sekunder yang diambil dari jurnal-jurnal eksperimen torefaksi biomassa. Pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif, karena melibatkan perumusan persamaan matematis, pengolahan data numerik, perhitungan parameter kinerja energi, serta analisis galat antara hasil simulasi dan data eksperimen.

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan guna mengembangkan model prediktif efisiensi energi proses torefaksi. Langkah-langkah penelitian mulai dari pengumpulan data hingga pembuatan aplikasi, metode perhitungan parameter kinerja (mass yield, energy yield, HHV), pengembangan model matematis (kinetika dan korelasi empiris), serta implementasi model ke dalam aplikasi Visual Basic beserta uji coba dan validasinya. Seluruh metodologi disusun mengikuti kaidah akademik dan mengacu pada literatur yang relevan.

#### **3.1. Bahan dan Data Penelitian**

Bahan utama pada penelitian ini adalah biomassa *pine* (Kayu Pinus), *eucalyptus* (Kayu Putih), *cornstalk* (Batang Jagung), dan *rice husk* (Sekam Padi). Data karakteristik awal biomassa meliputi komposisi unsur (ultimate analysis) yang mencakup kadar karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), dan abu. Analisis ultimate untuk masing-masing jenis biomassa dikumpulkan dari jurnal dan artikel ilmiah. Data sekunder ini mencakup parameter proses (suhu torefaksi, waktu tinggal/residence time) beserta hasilnya seperti mass yield dan perubahan nilai kalor. Semua data yang terkumpul selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam pengolahan, perhitungan parameter, pengembangan model, dan validasi model prediktif yang dibangun.

Data yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari beberapa jurnal eksperimen yang memuat informasi:

1. Jenis biomassa (pine, eucalyptus, cornstalk, rice husk),
2. Analisis ultimate (C, H, O, N, S),
3. Komposisi lignoselulosa (hemiselulosa, selulosa, lignin),
4. Kondisi operasi torefaksi (suhu),
5. Mass yield (MY) hasil pengujian,
6. Nilai kalor (HHV) biomassa sebelum dan sesudah torefaksi,
7. Energy yield (EY) atau data yang memungkinkan perhitungannya.

Data-data tersebut kemudian dirangkum ke dalam tabel kerja Tabel 3.1–3.3 untuk data eksperimen yang dari jurnal

Tabel 3. 1. Data Jurnal Eksperimen Biomassa *Rice Husk*

| Penulis              | Biomassa  | Suhu (°C) | MY (%) | HHV (MJ/kg) | EY (%) |
|----------------------|-----------|-----------|--------|-------------|--------|
| (D. Chen dkk., 2014) | Rice Husk | 200       | 97.0   | 16.63       | 98.0   |
|                      |           | 230       | 92.0   | 16.92       | 94.0   |
|                      |           | 260       | 82.0   | 17.53       | 86.0   |
|                      |           | 290       | 66.0   | 17.95       | 72.0   |

Tabel 3. 2. Data Jurnal Eksperimen Biomassa *Pine Chips* dan *Logging Residue Chips*

| Penulis                    | Biomassa              | Suhu (°C) | MY (%) | HHV (MJ/kg) | EY (%) |
|----------------------------|-----------------------|-----------|--------|-------------|--------|
| (Phanphanich & Mani, 2011) | Pine Chips            | 225       | 89     | 19.48       | 94     |
|                            |                       | 250       | 82     | 20.08       | 90     |
|                            |                       | 275       | 73     | 21.82       | 87     |
|                            | Logging residue chips | 225       | 88     | 19.79       | 92     |
|                            |                       | 250       | 81     | 21.21       | 92     |
|                            |                       | 275       | 70     | 22.03       | 82     |

Tabel 3. 3. Data Jurnal Eksperimen Biomassa *Cornstalk*

| Penulis         | Biomassa  | Suhu (°C) | MY (%) | HHV (MJ/kg) | EY (%) |
|-----------------|-----------|-----------|--------|-------------|--------|
| (Lu dkk., 2022) | Cornstalk | 210       | 80     | 16          | 92     |
|                 |           | 240       | 72     | 16.94       | 87     |
|                 |           | 270       | 60     | 18.53       | 79     |

### 3.2. Variabel Penelitian

Penelitian ini melibatkan beberapa variabel yang saling berkaitan dalam rangka membangun dan mengevaluasi model prediktif efisiensi energi proses torefaksi biomassa. Secara umum, variabel dalam penelitian dibedakan menjadi variabel bebas (independen), variabel terikat (dependen), dan variabel antara (intermediate) yang muncul sebagai parameter internal dalam model. Pembagian ini diperlukan agar hubungan sebab–akibat yang dipelajari dalam proses torefaksi dapat dijelaskan secara sistematis dan terukur.

#### 3.2.1. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah faktor-faktor yang dianggap memengaruhi hasil torefaksi dan dapat diatur atau dipilih nilainya oleh peneliti. Variabel bebas tersebut meliputi:

1. jenis biomassa
2. Suhu torefaksi (200–300 °C),
3. Komposisi lignoselulosa (hemiselulosa, selulosa, lignin),
4. Analisis ultimate (C, H, O, N, S).

Tahapan-tahapan di atas disusun berurutan namun saling berulang secara iteratif jika diperlukan. Sebagai contoh, setelah validasi, mungkin dilakukan revisi model atau penambahan data literatur baru, kemudian aplikasi diperbarui dan diuji kembali. Dengan demikian, pendekatan penelitian bersifat *adaptive refinement* hingga model prediktif efisiensi energi torefaksi yang andal tercapai.

#### 3.2.2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang nilainya dipengaruhi oleh variabel bebas dan menjadi fokus utama hasil prediksi model. Dalam penelitian ini, variabel terikat terdiri dari:

1. Mass Yield (MY), yaitu persentase massa padatan hasil torefaksi terhadap massa biomassa awal
2. Higher Heating Value (HHV), yaitu nilai kalor atas biomassa sebelum dan sesudah torefaksi;
3. Energy Yield (EY) yang menggambarkan persentase energi awal yang masih tersisa dalam padatan setelah proses torefaksi
4. Selain itu, dihitung pula energy densification ratio (EDR), yaitu rasio peningkatan densitas energi yang diperoleh dari perbandingan HHV setelah torefaksi terhadap HHV awal

Nilai-nilai inilah yang digunakan untuk menilai seberapa efektif proses torefaksi dalam meningkatkan kualitas energi biomassa. Di antara variabel bebas dan variabel terikat terdapat variabel antara (intermediate) berupa parameter-parameter model yang tidak diukur secara langsung, tetapi ditentukan melalui proses kalibrasi terhadap data eksperimen. Contohnya adalah konstanta kinetika orde satu yang digunakan untuk memodelkan penurunan mass yield sebagai fungsi suhu, serta koefisien dalam korelasi HHV berbasis analisis ultimate.

Parameter-parameter ini berperan sebagai penghubung matematis antara input (jenis biomassa, komposisi, suhu) dan output (MY, HHV, EY) sehingga model mampu merepresentasikan perilaku torefaksi biomassa sesuai dengan data eksperimen yang digunakan sebagai acuan. Dengan perumusan variabel penelitian yang jelas, hubungan antara karakteristik biomassa, kondisi operasi torefaksi, dan kinerja energi hasil proses dapat dianalisis secara kuantitatif. Hal ini menjadi dasar dalam pengembangan aplikasi “Simulasi Torefaksi Biomassa” yang memanfaatkan variabel-variabel tersebut sebagai input dan output utama dalam proses perhitungan dan visualisasi.

### **3.3. Tahapan Perhitungan dan Implementasi Program**

Pengembangan perhitungan numerik proses torefaksi biomassa pada penelitian ini yang diimplementasikan pada program Visual Basic untuk menghitung mass yield (MY), nilai kalor (HHV), dan energi yield (EY) proses torefaksi biomassa. Model matematis yang digunakan merujuk pada hasil persamaan Boltzmann Sigmoid dan Capuano dkk. Yang sudah di modifikasi untuk

menghitung nilai retensi massa dan direalisasikan dalam bentuk algoritma komputasi. Secara umum, alur perhitungan dimulai dari input data komposisi biomassa dan analisis ultimate, dilanjutkan dengan perhitungan mass yield berbasis komponen lignoselulosa, perhitungan nilai kalor awal dan nilai kalor setelah torefaksi, dan diakhiri dengan perhitungan energi yield.

#### 3.3.1. Input Data dan Parameter Model

Langkah pertama dalam alur perhitungan adalah pemasukan data (input) oleh pengguna. Data yang diperlukan terdiri atas tiga kelompok utama:

1. Komposisi lignoselulosa biomassa

Pengguna memasukkan kadar komposisi biomassa seperti hemiselulosa ( $H_0$ ), selulosa ( $C_0$ ), dan lignin ( $L_0$ ) dalam persen massa basis kering.

2. Data analisis ultimate

Pengguna memasukkan data analisis ultimate biomassa berupa kadar karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), sulfur (S), dan abu (A) dalam persen massa basis kering.

3. Kondisi proses torefaksi

Kondisi proses yang digunakan dalam perhitungan adalah suhu torefaksi  $T(^{\circ}\text{C})$ . Pada tahap pengembangan program ini, waktu tinggal tidak dimodelkan secara eksplisit sehingga pengaruh proses dirangkum dalam fungsi suhu  $T$ .

#### 3.3.2. Perhitungan Mass Yield

Setelah semua data input dimasukkan, langkah berikutnya adalah menghitung mass yield. Tahapan perhitungan MY dalam program adalah sebagai berikut:

1. Normalisasi komposisi lignoselulosa

Program pertama-tama menghitung fraksi massa hemiselulosa, selulosa, dan lignin ( $x_H$ ,  $x_C$ ,  $x_L$ ) dengan menormalkan  $H_0$ ,  $C_0$ ,  $L_0$  terhadap jumlah total (Persamaan (2.1)). Langkah ini memastikan bahwa kontribusi masing-masing komponen terhadap massa total dinyatakan dalam bentuk fraksi (jumlah = 1).

## 2. Perhitungan fraksi sisa tiap komponen pada suhu $T$

Untuk setiap komponen  $j \in \{H, C, L\}$  program menghitung fraksi sisa  $r_j(T)$  menggunakan fungsi logistik sesuai Persamaan (2.2). Fungsi ini merepresentasikan bahwa hemiselulosa lebih cepat terdegradasi pada suhu lebih rendah, sedangkan selulosa dan lignin mengalami penurunan massa pada rentang suhu yang lebih tinggi. Perhitungan ini dilakukan dalam sebuah fungsi terpisah, sehingga kode menjadi modular dan mudah dimodifikasi.

## 3. Perhitungan mass yield total

Mass yield total pada suhu  $T$  kemudian dihitung sebagai penjumlahan kontribusi sisa masing-masing komponen. Dengan demikian, pada tahap ini program telah menghasilkan besaran  $MY(T)$  yang bergantung pada komposisi hemiselulosa–selulosa–lignin dan suhu torefaksi.

### 3.3.3. Perhitungan Nilai Kalor

Tahap berikutnya adalah perhitungan nilai kalor biomassa sebelum dan sesudah torefaksi.

#### 1. Nilai kalor awal $HHV_0$

Program menggunakan data analisis ultimate (C, H, O, N, S, A) untuk menghitung nilai kalor awal  $HHV_0$  berdasarkan korelasi Channiwala–Parikh (Pers. 2.1). Perhitungan ini diimplementasikan dalam fungsi `HitungHHV0`, dan hasilnya dinyatakan dalam satuan MJ/kg (basis kering). Nilai  $HHV_0$  kemudian ditampilkan sebagai nilai kalor awal biomassa.

#### 2. Energy Densification Ratio $EDR(T)$

Peningkatan nilai kalor akibat torefaksi direpresentasikan oleh besaran Energy Densification Ratio  $EDR(T)$ , yang dihitung sebagai fungsi logistik dari suhu torefaksi. Perhitungan ini dilakukan dalam fungsi `HitungEDR(T)` dengan menggunakan parameter  $EDR_{max}$ ,  $T_{50}$ ,  $EDR$ , dan  $b_{EDR}$

#### 3. Nilai kalor setelah torefaksi $HHV_T(T)$

Nilai kalor padatan hasil torefaksi pada suhu  $T$  dihitung dengan mengalikan nilai kalor awal dengan EDR. Fungsi `HitungHHV_T` di dalam program menggabungkan kedua langkah ini sehingga pengguna cukup



memasukkan analisis ultimate dan suhu torefaksi untuk memperoleh nilai  $HHVT(T)$ , dengan langkah ini, program mampu memberikan informasi perubahan nilai kalor biomassa sebagai akibat proses torefaksi pada suhu tertentu.

#### 3.3.4. Perhitungan Energi Yield

Setelah mass yield dan nilai kalor tersisa dihitung, langkah terakhir adalah menghitung energi yield (EY) yang menggambarkan fraksi energi kimia yang tetap tertahan pada padatan hasil torefaksi.

##### 1. Definisi energi yield

Secara definisi, energi yield adalah perbandingan antara energi yang terkandung dalam padatan hasil torefaksi dan energi biomassa awal. Dengan menggunakan definisi mass yield dan EDR, hubungan ini dapat disederhanakan menjadi  $EY(T) = MY(T) \times EDR(T)$

##### 2. Implementasi dalam program

Dalam program Visual Basic, setelah diperoleh nilai  $MY(T)$  dari dan  $EDR(T)$  dari energi yield dihitung secara langsung melalui hasil kali keduanya. Program kemudian mengonversi  $EY(T)$  ke bentuk persen dan menampilkannya sebagai Energi Yield. Dengan demikian, seluruh alur perhitungan dari input komposisi biomassa dan analisis ultimate, perhitungan MY dan HHV, hingga perhitungan EY telah terintegrasi secara sistematis dalam program Visual Basic.

#### 3.4. Pengembangan Model Matematis

Pada pengembangan model matematis ini menjelaskan tahapan pengembangan model prediktif efisiensi energi proses torefaksi biomassa yang berfokus pada pemodelan retensi massa komponen lignoselulosa (hemiselulosa, selulosa, dan lignin) sebagai fungsi temperatur. Secara umum, perubahan fraksi tersisa suatu komponen selama pemanasan cenderung membentuk kurva transisi berbentuk sigmoid (*S-curve*). Oleh karena itu, fungsi logistik dipilih sebagai fungsi transisi utama karena telah luas digunakan untuk memodelkan keluarga kurva sigmoid dengan parameter yang mudah diinterpretasikan (respon maksimum–minimum, titik tengah/ 50%, dan kemiringan) (Heusser dkk., 2021).

Persamaan logistik secara historis berakar dari pemodelan pertumbuhan yang dibatasi (self-limiting) yang diperkenalkan oleh Verhulst pada abad ke-19, yang menghasilkan bentuk solusi sigmoid (Bacaër, 2011). Dalam praktik rekayasa dan sains terapan, fungsi logistik kemudian berkembang menjadi bentuk parametrik yang digunakan luas untuk pemodelan kurva sigmoid/ dose-response, termasuk parameter “titik tengah” dan “kemiringan” kurva. Salah satu rujukan klasik penggunaan dan interpretasi parameter kurva sigmoid adalah DeLean dkk. (1978) (De Lean dkk., 1978).

Karakteristik torefaksi juga mendukung penggunaan fungsi transisi: hemiselulosa, selulosa, dan lignin memiliki perilaku degradasi termal yang berbeda dan sering dianalisis melalui TGA/ kinetika torefaksi, sehingga bentuk transisi terhadap temperatur menjadi relevan secara fisik (Chen & Kuo, 2011). Dalam penelitian ini, pendekatan pemodelan yang digunakan didasarkan pada persamaan Boltzmann Sigmoid (Pers. 2.7) yang selanjutnya dimodifikasi ke dalam bentuk persamaan logistik untuk merepresentasikan perilaku degradasi biomassa pada proses torefaksi. Persamaan Boltzmann dipilih karena mampu menggambarkan perubahan sifat material secara bertahap (sigmoidal) sebagai respons terhadap kenaikan temperatur, yang sejalan dengan karakteristik pelepasan komponen utama biomassa seperti hemiselulosa, selulosa, dan lignin selama proses torefaksi.

#### 3.4.1. Retensi Pada Komposisi Biomassa

Modifikasi persamaan Boltzmann dilakukan melalui proses curve fitting menggunakan fungsi logistik, sehingga diperoleh model matematis yang lebih fleksibel dan mudah diimplementasikan dalam analisis numerik maupun simulasi. Persamaan logistik ini digunakan untuk memodelkan hubungan antara temperatur torefaksi dan fraksi massa komponen biomassa, dengan mempertimbangkan parameter-parameter kunci seperti suhu transisi, laju degradasi, dan batas atas serta bawah dari perubahan fraksi massa.

Pendekatan ini memungkinkan pemodelan degradasi termal biomassa secara kontinu dan nonlinier, sehingga mampu menangkap fenomena utama pada proses torefaksi, khususnya pada rentang suhu 200–300 °C. Dengan menggunakan metode *curve fitting*, parameter-parameter dalam persamaan logistik ditentukan berdasarkan data eksperimen atau data literatur yang relevan, sehingga model yang

dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan representativitas yang tinggi terhadap kondisi nyata proses torefaksi. Adapun Langkah memodifikasi persamaan Boltzmann (Pers. 2.8) yang membahas tentang *curve fitting* untuk digunakan pada proses torefaksi, sebagai berikut:

1. Mengubah selisih Bottom–Top menjadi parameter rentang (range)  
Didefinisikan rentang perubahan sigmoid sebagai:

$$R \equiv T - B \Rightarrow B - T = -R$$

Substitusi ini menghasilkan (Pers. 3.1):

$$y = T - \frac{R}{1 + \exp\left(\frac{M - x}{S}\right)} \quad (3.1)$$

Langkah ini adalah identitas aljabar yang juga ditunjukkan pada kolom “explicit range parameter” di Table 1 (Heusser dkk., 2021).

2. Landasan penggantian variabel  $x$  dan  $y$  untuk torefaksi

Karena bentuknya  $y = f(x)$  bersifat umum untuk *sigmoidal curve fitting* (yakni  $x$  variabel bebas dan  $y$  variabel respon), maka variabel dapat diganti sesuai konteks fisik selama makna grafiknya konsisten (Heusser dkk., 2021). Dalam torefaksi, variabel bebas yang mengendalikan perubahan adalah temperatur proses, sedangkan responnya adalah fraksi tersisa (retensi massa). Secara konseptual ini sejalan dengan pemodelan TGA/TG, di mana massa/berat sampel dipetakan sebagai fungsi temperatur dan dapat direpresentasikan dengan fungsi logistic (Barbadillo dkk., 2007).

Dengan demikian ditetapkan:

$$x \rightarrow T(\text{temperatur torefaksi}), y \rightarrow R_j(T)(\text{retensi komponen } j)$$

sehingga:

$$R_j(T) = T - \frac{R}{1 + \exp\left(\frac{M-T}{S}\right)} \quad (3.2)$$

### 3. Normalisasi Retensi

Dalam pemodelan yield/retensi biomassa, kuantitas sering dinyatakan sebagai rasio terhadap kondisi awal sehingga tidak berdimensi (0–1 atau 0–100%). Secara praktis, retensi maksimum pada temperatur rendah dinyatakan sebagai 1 (100%). Dengan menetapkan:

$$T(\text{Top}) = 1$$

maka:

$$R_j(T) = 1 - \frac{R}{1 + \exp\left(\frac{M-T}{S}\right)} \quad (3.3)$$

Penetapan Top=1 pada Pers. (2.11) juga konsisten dengan interpretasi parameter sigmoid sebagai batas atas kurva (Heusser dkk., 2021).

### 4. Mengganti “range” menjadi kehilangan maksimum komponen $\alpha_j$

Pada model retensi torefaksi, amplitudo perubahan dinyatakan sebagai fraksi maksimum komponen  $j$  yang berpotensi hilang, yaitu  $\alpha_j$ . Karena Top telah dinormalisasi menjadi 1, maka:

$$\alpha_j \equiv R = T - B = 1 - \text{Bottom}$$

Substitusi  $R \rightarrow \alpha_j$  menghasilkan Persamaan (2.12):

$$R_j(T) = 1 - \frac{\alpha_j}{1 + \exp\left(\frac{M-T}{S}\right)} \quad (3.4)$$

Interpretasi ini konsisten dengan konsep “range” pada sigmoid (selisih batas atas dan bawah) (Heusser dkk., 2021).

5. Mengganti midrange  $M$  menjadi temperatur transisi  $T_{50,j}$

Parameter  $M$  adalah absis titik infleksi (midrange) pada kurva sigmoid. Dalam konteks torefaksi, midrange ditafsirkan sebagai temperatur saat perubahan retensi paling intens (titik tengah transisi), dan dinotasikan:

$$M \rightarrow T_{50,j}$$

Sehingga:

$$R_j(T) = 1 - \frac{\alpha_j}{1 + \exp\left(\frac{T_{50,j} - T}{S}\right)} \quad (3.5)$$

6. Menyamakan bentuk eksponen menjadi  $(T - T_{50,j})/b_j$

Agar sama dengan bentuk persamaan logistik torefaksi yang digunakan, eksponen ditulis ulang:

$$\frac{T_{50,j} - T}{S} = \frac{T - T_{50,j}}{-S}$$

Kemudian didefinisikan:

$$b_j \equiv -S$$

### 3.4.2. Transisi Efektif

Pada fungsi sigmoid/logistik, *midpoint* (titik tengah transisi) adalah parameter yang menentukan posisi kurva pada sumbu variabel bebas; secara fisik, midpoint merepresentasikan kondisi saat respons telah mencapai sekitar 50% dari rentang perubahannya dan umumnya berasosiasi dengan titik infleksi (perubahan paling intens). Dalam kerangka *sigmoidal mixed models*, Capuano dkk.

menegaskan bahwa parameter-parameter sigmoid bukan harus konstanta, melainkan dapat dimodelkan sebagai fungsi kovariat (*covariate-dependent parameters*) untuk menangkap variasi antar subjek/kondisi serta faktor-faktor yang memengaruhi dinamika transisi. Secara khusus, parameter midpoint (yang mereka sebut sebagai half decline/midpoint of decline) dapat dimodelkan dengan bentuk linear sederhana terhadap kovariat pada (Pers. 2.9).

Persamaan ini menyatakan bahwa lokasi titik tengah transisi akan bergeser sebesar  $\beta_2 x$  ketika kovariat  $x$  berubah, sedangkan  $\alpha_2$  merepresentasikan nilai midpoint dasar (baseline) ketika kovariat bernilai nol. Konsep tersebut kemudian dipetakan ke pemodelan torefaksi dengan menganggap bahwa parameter midpoint untuk retensi komponen lignoselulosa, tahap pengembangan persamaan Capuano dkk. dapat dituliskan sebagai berikut:

Dalam model sigmoid Capuano, parameter  $\theta_2$  (atau “2”) adalah midpoint: titik saat setengah penurunan (half decline) terjadi. Capuano menyatakan midpoint ini bisa dipengaruhi kovariat dengan bentuk linear pada (Pers. 2.9) Artinya,  $\alpha_2$  adalah midpoint “rata-rata/baseline”, sedangkan  $\beta_2 x$  adalah koreksi/pergeseran midpoint karena kovariat  $x$ .

Konsep “midpoint” dipindahkan dari domain waktu/longitudinal ke domain temperatur torefaksi, sehingga midpoint penurunan retensi komponen menjadi temperatur transisi  $T_{50,j}$  (temperatur saat perubahan retensi paling intens/sekitar titik tengah). Untuk membuat transisi ini bisa “bergerak” ketika kondisi biomassa berubah, Anda mengadopsi ide Capuano: midpoint dibuat bergantung pada kovariat. Agar notasi lebih “engineering-friendly”, bagian  $\beta_2 x$  tidak lagi ditulis eksplisit, tetapi didefinisikan sebagai pergeseran temperatur transisi:

- $\theta_2 \Rightarrow T_{50,j}^{\text{eff}}$  (midpoint efektif komponen  $j$ )
- $\alpha_2 \Rightarrow T_{50,j}$  (midpoint dasar/baseline)
- $\beta_2 x \Rightarrow \Delta T_{50,j}$  (koreksi/shift akibat kovariat)

Keunggulan menulis  $\Delta T_{50,j}$  adalah Anda bisa memperluasnya dari kasus sederhana ( $\beta_2 x$ ) menjadi multi-kovariat dan kovariat yang berubah terhadap temperatur. Di tesis Anda, kovariat dipilih relevan secara fisik:

derajat degradasi komponen

$$1 - r_k(T)$$

sehingga  $\Delta T_{50,j}$  dapat ditulis sebagai fungsi kopling antar komponen

$$\sum k_{jk}(1 - r_k(T)).$$

### 3.4.3. Retensi Pada *Energy Densification Ratio* (EDR)

Dengan menggunakan metode *curve fitting* seperti mencari nilai logistic pada komposisi biomassa, pada retensi EDR ini pula parameter-parameter dalam persamaan logistik ditentukan berdasarkan data eksperimen atau data literatur yang relevan, sehingga model yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi dan representativitas yang tinggi terhadap kondisi nyata proses torefaksi. Adapun Langkah memodifikasi persamaan Boltzmann (Pers. 2.8) yang membahas tentang *curve fitting* untuk digunakan proses torefaksi pada persamaan EDR. Secara definisi yang umum dipakai pada studi torrefaksi/pirolisis, *energy densification ratio* dihitung sebagai rasio nilai kalor produk terhadap bahan baku seperti pada (Pers. 2.3). Dari definisi tersebut, untuk pemodelan EDR terhadap temperatur biasanya Anda menginginkan batas-batas:

- Pada temperatur rendah (perubahan kecil):  $EDR \approx 1 \rightarrow$  ini menjadi Bottom.
- Pada temperatur tinggi (mendekati plateau pada domain yang Anda modelkan):  $EDR \rightarrow EDR_{\max} \rightarrow$  ini menjadi Top.

Maka pemetaan batasnya:

$$B \leftarrow 1 \text{ dan } Top \leftarrow EDR_{\max}$$

Pemetaan variabel Boltzmann  $\rightarrow$  variabel model EDR(T) Sekarang lakukan pemetaan berikut:

- Variabel bebas Boltzmann:  $x \leftarrow Temp$ (temperatur proses)
- Respon:  $y \leftarrow EDR(Temp)$
- Midrange (posisi infleksi):  $M \leftarrow M_{EDR}$
- Scale/slope:  $S \leftarrow b_{EDR}$

Substitusi semuanya ke Equation 4 pada persamaan Boltzmann Sigmoid

$$EDR(Temp) = 1 + \frac{EDR_{\max} - 1}{1 + \exp\left(\frac{M_{EDR} - Temp}{b_{EDR}}\right)} \quad (3.6)$$

Ini sudah bentuk sigmoid “baseline + amplitudo  $\times$  fungsi logistik”, dengan Bottom = 1 dan Top =  $EDR_{\max}$ —sejalan dengan interpretasi parameter Boltzmann (Bottom–Top–Midrange–Slope). Langkah re-parameterisasi Definisikan:

$$M_{EDR} = T_{50,EDR} + m$$

Maka:

$$\frac{M_{EDR} - T}{b_{EDR}} = \frac{(T_{50,EDR} + m) - T}{b_{EDR}} = \frac{m - (T - T_{50,EDR})}{b_{EDR}}$$

### 3.5. Implementasi Model Matematis di Microsoft Excel

Implementasi model prediktif dalam perangkat lunak Microsoft Excel merupakan tahap penting untuk memastikan seluruh formulasi matematis yang dikembangkan dapat dijalankan secara konsisten, terukur, dan mudah direproduksi. Pada tahap ini, setiap parameter masukan, persamaan model, serta variabel keluaran diuji secara sistematis melalui lembar kerja Excel guna mengevaluasi keakuratan model terhadap data eksperimen. Selain itu, Excel digunakan sebagai platform awal untuk melakukan kalibrasi parameter, validasi model, serta penyusunan visualisasi awal yang diperlukan sebelum diintegrasikan ke dalam aplikasi berbasis Visual



Basic. Sebelum diimplementasikan ke dalam aplikasi Visual Basic, model terlebih dahulu diuji di Microsoft Excel dengan langkah-langkah:

1. Menyusun tabel input yang berisi komposisi lignoselulosa, analisis ultimate, dan suhu torefaksi untuk setiap jenis biomassa.
2. Menerapkan persamaan MY, HHV, EY, dan EDR dalam bentuk rumus Excel.
3. Menghitung hasil simulasi untuk setiap titik data dan membandingkannya dengan nilai eksperimen.
4. Menghitung selisih dan galat relatif sebagai dasar untuk menilai kualitas model.
5. Melakukan penyesuaian parameter model hingga diperoleh hasil yang konsisten dengan data eksperimen.

Excel berfungsi sebagai platform verifikasi awal sebelum model dibawa ke lingkungan pemrograman Visual Basic.

### **3.6. Perancangan Aplikasi Simulasi Torefaksi Biomassa**

Perancangan aplikasi “Simulasi Torefaksi Biomassa” dilakukan sebagai langkah lanjutan untuk mentransformasikan model prediktif yang telah dikembangkan dalam Microsoft Excel menjadi sebuah perangkat lunak yang lebih interaktif, terstruktur, dan mudah digunakan. Aplikasi ini dirancang menggunakan platform Visual Basic dengan tujuan menyediakan alat bantu yang mampu menghitung kinerja torefaksi secara cepat berdasarkan parameter masukan yang diberikan pengguna, sekaligus menampilkan hasil dalam bentuk numerik maupun grafik sehingga analisis dapat dilakukan secara komprehensif.

Setelah model tervalidasi secara internal di Excel, dilakukan pengembangan aplikasi “Simulasi Torefaksi Biomassa” menggunakan Visual Basic 2010, dengan tahapan:

#### **3.6.1. Perancangan antarmuka (GUI)**

1. Form utama dibagi menjadi panel INPUT DATA dan panel OUTPUT DATA.
2. Panel INPUT DATA berisi:
  - a. Textbox analisis ultimate (C, H, O, N, S),

- b. Textbox komposisi biomassa (hemiselulosa, selulosa, lignin),
  - c. Textbox suhu torefaksi,
  - d. Tombol Hitung, Hapus, serta *combo box* pemilihan jenis grafik.
3. Panel OUTPUT DATA menampilkan:
- a. Textbox hasil MY, HHV, dan EY,
  - b. Grafik batang (bar chart) yang membandingkan MY, HHV, dan EY untuk kondisi simulasi.
4. Disediakan tampilan start-up dan form profil yang memuat identitas penelitian dan pengembang.

#### 3.6.2. Implementasi logika perhitungan

- 1. Mengkonversi rumus Excel menjadi kode Visual Basic pada event tombol Hitung.
- 2. Menghubungkan input dari textbox dan combobox dengan fungsi perhitungan MY, HHV, dan EY.
- 3. Mengatur tampilan grafik secara dinamis sesuai hasil simulasi.

#### 3.6.3. Pengujian fungsional aplikasi

- 1. Menguji aplikasi dengan memasukkan data yang sama seperti pada lembar kerja Excel.
- 2. Memastikan hasil yang ditampilkan aplikasi konsisten dengan perhitungan Excel dan mendekati data eksperimen.

Secara keseluruhan, tahap perancangan aplikasi ini bertujuan menghasilkan sebuah alat bantu yang tidak hanya akurat secara komputasional, tetapi juga mudah dioperasikan oleh pengguna dari berbagai latar belakang. Aplikasi ini diharapkan dapat menjadi sarana yang efektif dalam melakukan analisis cepat terhadap pengaruh suhu dan komposisi biomassa terhadap performa energi hasil torefaksi.

### 3.7. Prosedur Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk memastikan bahwa persamaan dan algoritma prediktif yang dikembangkan mampu merepresentasikan perilaku torefaksi biomassa secara akurat dan konsisten. Proses validasi ini bertujuan mengevaluasi sejauh mana keluaran model—seperti Mass Yield (MY), Higher Heating Value (HHV), dan Energy Yield (EY)—mendekati nilai hasil eksperimen

yang dijadikan acuan. Dengan demikian, validasi menjadi tahap penting untuk menilai keandalan model sebelum diterapkan dalam aplikasi simulasi.

Validasi model dilakukan untuk menilai akurasi dan keandalan model terhadap data eksperimen, dengan langkah:

1. Memilih beberapa titik data dari jurnal sebagai data validasi.
2. Memasukkan karakteristik biomassa (analisis ultimate, komposisi lignoselulosa) dan suhu torefaksi ke dalam aplikasi “Simulasi Torefaksi Biomassa”.
3. Mencatat hasil simulasi MY, HHV, dan EY yang muncul pada panel OUTPUT DATA.
4. Menyandingkan hasil simulasi dengan nilai eksperimen dalam tabel validasi

Melalui rangkaian proses validasi ini, diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai performa model dan batasan-batasannya. Hasil evaluasi menjadi landasan untuk memperbaiki parameter atau struktur model sebelum diintegrasikan ke dalam aplikasi “Simulasi Torefaksi Biomassa”. Dengan demikian, validasi memastikan bahwa model yang digunakan dalam aplikasi tidak hanya mampu menghitung secara matematis, tetapi juga representatif terhadap fenomena torefaksi yang terjadi secara nyata.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1. Kesimpulan**

Berdasarkan tujuan penelitian—yaitu mengembangkan model prediksi MY, HHV, dan EY berbasis data ultimate analysis, komposisi lignoselulosa, serta suhu; mengimplementasikannya ke aplikasi Visual Basic; dan memvalidasi menggunakan data eksperimen beberapa biomassa—maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Model matematis prediktif berhasil dikembangkan untuk memperkirakan Mass Yield (MY), Higher Heating Value (HHV), dan Energy Yield (EY) biomassa torefaksi dengan memanfaatkan komposisi lignoselulosa pada persamaan (4.1) menjadi persamaan (4.7) untuk menghasilkan perubahan komponen yang saling mempengaruhi. Model mampu merepresentasikan pengaruh suhu dan karakteristik biomassa terhadap perubahan massa dan mutu energi secara konsisten dengan tren literatur.
2. Model yang dikembangkan telah berhasil diimplementasikan ke dalam aplikasi simulasi “Simulasi Torefaksi Biomassa” berbasis Visual Basic, yang dapat menampilkan hasil perhitungan numerik dan visualisasi grafik secara interaktif. Aplikasi berjalan ringan, offline, dan memudahkan pengguna dalam melakukan simulasi parameter proses torefaksi.
3. Validasi model menggunakan data eksperimen dari beberapa jurnal (rice husk, pine chips, logging residue chips, dan cornstalk) menunjukkan tingkat kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan data eksperimen. Hasil menunjukkan bahwa model prediktif memberikan akurasi yang baik terhadap data eksperimen, dengan galat rata-rata sebagian besar berada dalam rentang 0,1% hingga 10%. Galat prediksi berada dalam batas yang dapat diterima, sehingga model dinilai andal sebagai alat bantu analisis dan estimasi awal efisiensi energi proses torefaksi biomassa.

## 5.2. Saran

Untuk meningkatkan akurasi, cakupan, dan kebermanfaatan model maupun aplikasi, beberapa saran berikut dapat dipertimbangkan pada penelitian lanjutan.

1. Menambahkan variabel waktu tinggal (*residence time*) dan/atau parameter severity proses. Penelitian ini berfokus pada pengaruh suhu dalam rentang 200–300 °C, sehingga pengembangan model yang memasukkan waktu tinggal akan memperkaya kemampuan prediksi pada kondisi operasi nyata dan memperluas relevansi model.
2. Memperluas basis data validasi dan melakukan kalibrasi parameter yang lebih sistematis. Data yang digunakan merupakan data sekunder dari jurnal dan dianalisis secara kuantitatif dengan membandingkan simulasi terhadap eksperimen. Ke depan, jumlah biomassa, variasi kondisi operasi, serta kelengkapan parameter (misalnya kandungan abu dan/atau data kalorimeter) perlu ditingkatkan agar parameter model lebih robust dan general.
3. Mengadopsi metrik evaluasi model yang lebih lengkap. Selain selisih/ galat relatif per titik, disarankan menggunakan metrik agregat (misalnya MAPE/RMSE) dan evaluasi per-biomassa/ per-rentang suhu untuk mengidentifikasi area prediksi yang paling perlu perbaikan.
4. Pengembangan fitur aplikasi VB untuk mendukung analisis rekayasa. Aplikasi dapat ditingkatkan dengan fitur: ekspor otomatis hasil ke Excel/ PDF, penyimpanan skenario simulasi, *batch simulation* untuk rentang suhu tertentu, serta menu ringkasan yang menonjolkan titik operasi yang “paling menguntungkan” sesuai kriteria (misalnya EY maksimum atau kompromi MY–HHV). Hal ini akan memperkuat fungsi aplikasi sebagai alat simulasi dan pengambilan keputusan teknis.
5. Melakukan validasi melalui eksperimen primer (laboratorium) untuk biomassa lokal. Jika memungkinkan, penelitian selanjutnya disarankan melakukan uji torefaksi biomassa lokal (misalnya limbah pertanian setempat) untuk menghasilkan dataset primer sehingga model dapat diuji secara lebih ketat dan disesuaikan dengan karakteristik biomassa yang relevan di Indonesia.

Dengan terlaksananya pengembangan model dan aplikasi ini, diharapkan penelitian selanjutnya dapat mengoptimalkan dan memperluas penerapan model prediktif efisiensi energi torefaksi biomassa, sehingga berkontribusi nyata bagi pengembangan pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi terbarukan yang andal dan berkelanjutan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Akanni, A. A., Kolawole, O. J., Dayanand, P., Ajani, L. O., & Madhurai, M. (2019). Influence of torrefaction on lignocellulosic woody biomass of Nigerian origin. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 54(2), 274–285.
- Amrul;, Ariyanto, A., Prayitno, H., & Azmar, S. (2025). Effect of residence time on the torrefaction characteristics of Calliandra wood as solid biofuel. *Jurnal Polimesin*, 23(6), 600–604.
- Andini, A., Arfiana, A., Restu Finalis, E., Fausiah, F., Wahyu Tjahjono, E., Muksin, S., Alif Firmandoko, B., Bayu Islam Nuswantoro, D., Ferdy Destian, E., Bangun, H., Ilmiah Pengkajian Industri, M., Saleh, M., Sutriyanto, H., & Rousset, P. (2022). A parametric study of torrefaction technology of agricultural residues in Indonesia A parametric study of torrefaction technology of agricultural residues in Indonesia-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>) A Parametric Study o. *Journal of Industrial Research and Innovation-Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 2022(2), 47–54.
- Bacaër, N. (2011). A short history of mathematical population dynamics. *A Short History of Mathematical Population Dynamics*, 1838, 1–160. <https://doi.org/10.1007/978-0-85729-115-8>
- Bampenrat, A., Sukkathanyawat, H., & Jarunglumlert, T. (2023). Agro-Industrial Waste Upgrading via Torrefaction Process – A Case Study on Sugarcane Bagasse and Palm Kernel Shell in Thailand. *Journal of Ecological Engineering*, 24(3), 64–75. <https://doi.org/10.12911/22998993/157423>
- Barbadillo, F., Fuentes, A., Naya, S., Cao, R., Mier, J. L., & Artiaga, R. (2007). Evaluating the logistic mixture model on real and simulated TG curves. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 87(1), 223–227. <https://doi.org/10.1007/s10973-006-8283-x>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- Capuano, A. W., Wilson, R. S., Leurgans, S. E., Dawson, J. D., Bennett, D. A., & Hedeker, D. (2018). Sigmoidal mixed models for longitudinal data. *Statistical Methods in Medical Research*, 27(3), 863–875. <https://doi.org/10.1177/0962280216645632>
- Chen, D., Zhou, J., Zhang, Q., Zhu, X., & Lu, Q. (2014). *com Upgrading of Rice Husk by Torrefaction and its Influence on the Fuel Properties*. 9(4), 5893–5905.
- Chen, W. H., & Kuo, P. C. (2011). Isothermal torrefaction kinetics of hemicellulose, cellulose, lignin and xylan using thermogravimetric analysis. *Energy*, 36(11), 6451–6460. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.09.022>

- Chen, W. H., Lin, B. J., Lin, Y. Y., Chu, Y. S., Ubando, A. T., Show, P. L., Ong, H. C., Chang, J. S., Ho, S. H., Culaba, A. B., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2021a). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- Chen, W. H., Lin, B. J., Lin, Y. Y., Chu, Y. S., Ubando, A. T., Show, P. L., Ong, H. C., Chang, J. S., Ho, S. H., Culaba, A. B., Pétrissans, A., & Pétrissans, M. (2021b). Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges. *Progress in Energy and Combustion Science*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100887>
- Chen, W. H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44, 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- De Lean, A., Munson, P. J., & Rodbard, D. (1978). Simultaneous analysis of families of sigmoidal curves: application to bioassay, radioligand assay, and physiological dose-response curves. *American Journal of Physiology Endocrinology Metabolism and Gastrointestinal Physiology*, 4(2). <https://doi.org/10.1152/ajpendo.1978.235.2.e97>
- Grigianti, M., & Antolini, D. (2015). Mass yield as guide parameter of the torrefaction process. An experimental study of the solid fuel properties referred to two types of biomass. *Fuel*, 153, 499–509. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.03.025>
- Heusser, K., Heusser, R., Jordan, J., Urech, V., Diedrich, A., & Tank, J. (2021). Baroreflex Curve Fitting Using a WYSIWYG Boltzmann Sigmoidal Equation. *Frontiers in Neuroscience*, 15(September), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.697582>
- IESR. (2024). Indonesia Energy Transition Outlook 2025: Navigating Indonesia's Energy Transition at the Crossroads: A Pivotal Moment for Redefining the Future. *Institute for Essential Services Reform (IESR)*, 5, 2025. [www.iesr.or.id/%7Ciesr@iesr.or.id](http://www.iesr.or.id/%7Ciesr@iesr.or.id)
- Iglesias Canabal, A., Proupin Castiñeiras, J., Rodríguez Añón, J. A., Eimil Fraga, C., & Rodríguez Soalleiro, R. (2023). Predicting the energy properties of torrefied debarked pine pellets from torrefaction temperature and residence time. *Renewable Energy*, 218(March). <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.119346>
- Irawan, A., Riadz, T., & Nurmalisa, N. (2015). Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Kandungan Hemiselulosa Dan Uji Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor*, 15(3), 190. <https://doi.org/10.14710/reaktor.15.3.190-194>
- ISO 18125. (2017). *Solid biofuels-Determination of calorific value Biocombustibles solides-Détermination du pouvoir calorifique*. 2017.



- Lu, X., Xu, R., Sun, K., Jiang, J., Sun, Y., & Zhang, Y. (2022). *Study on the Effect of Torrefaction on Pyrolysis Kinetics and Thermal Behavior of Cornstalk Based On a Combined Approach of Chemical and Structural Analyses*. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c00047>
- Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246–1253. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- Preview, T. S. (2021). *INTERNATIONAL STANDARD Solid biofuels — Fuel specifications and classes — General requirements iTeh STANDARD iTeh STANDARD PREVIEW. 2021*.
- Rowell, R., Pettersen, R., & Tshabalala, M. (2012). Chapter 3. Cell Wall Chemistry. *Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites, Second Edition*, 10217, 33–72.
- Rubiyanti, T., Hidayat, W., Febryano, I. G., & Bakri, S. (2019). Karakterisasi Pelet Kayu Karet (*Hevea brasiliensis*) Hasil Torefaksi dengan Menggunakan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB) (Characterization of Rubberwood (*Hevea brasiliensis*) Pellets Torrefied with Counter-Flow Multi Baffle (COMB) Reactor). *Jurnal Sylva Lestari*, 7(3), 321–331. <https://doi.org/10.23960/jsl37321-331>
- Satria, H., Syafii, Salam, R., Mungkin, M., & Yandi, W. (2022). Design visual studio based GUI applications on-grid connected rooftop photovoltaic measurement. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 20(4), 914–921. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.v20i4.23302>
- Tanoue, K. I., Hikasa, K., Hamaoka, Y., Yoshinaga, A., Nishimura, T., Uemura, Y., & Hiden, A. (2020). Heat and mass transfer during lignocellulosic biomass torrefaction: Contributions from the major components-cellulose, hemicellulose, and lignin. *Processes*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/PR8080959>
- Tumuluru, J. S., Ghiasi, B., Soelberg, N. R., & Sokhansanj, S. (2021). Biomass Torrefaction Process, Product Properties, Reactor Types, and Moving Bed Reactor Design Concepts. *Frontiers in Energy Research*, 9(September), 1–20. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>
- Wahyudi, R., Amrul, A., & Irsyad, M. (2020). Karakteristik Bahan Bakar Padat Produk Torefaksi Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular. *INVOTEK: Jurnal Inovasi Vokasional Dan Teknologi*, 20(2), 1–8. <https://doi.org/10.24036/invotek.v20i2.706>

- Wang, L., Riva, L., Skreiberg, Ø., Khalil, R., Bartocci, P., Yang, Q., Yang, H., Wang, X., Chen, D., Rudolfsson, M., & Nielsen, H. K. (2020). Effect of torrefaction on properties of pellets produced from woody biomass. *Energy and Fuels*, 34(12), 15343–15354.  
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c02671>
- Yang, H. (2007). *Characteristics of hemicellulose , cellulose and lignin pyrolysis*. 86, 1781–1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
- Zero, N. (2025). Annual Report 2024. *AIMS Materials Science*, 12(1), 48–54.  
<https://doi.org/10.3934/materci.2025004>