

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TABUNG REAKTOR PADA
TOREFAKSI TONGKOL JAGUNG MENGGUNAKAN REAKTOR
TOREFAKSI TIPE TUBULAR SISTEM OIL JACKET**

Skripsi

**Oleh:
Prengki
1915021005**



**PROGRAM SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

**PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TABUNG REAKTOR PADA
TOREFAKSI TONGKOL JAGUNG MENGGUNAKAN REAKTOR
TOREFAKSI TIPE TUBULAR SISTEM OIL JACKET**

Oleh:

PRENGKI

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung



PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2024

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI TEMPERATUR TABUNG REAKTOR PADA TOREFAKSI TONGKOL JAGUNG MENGGUNAKAN REAKTOR TOREFAKSI TIPE TUBULAR SISTEM OIL JACKET

Oleh
Prengki

Potensi biomassa limbah tongkol jagung sangat melimpah, salah satunya sebagai bahan bakar padat. Pembuatan bahan bakar padat dari limbah tongkol jagung dilakukan dengan proses karbonisasi yang disebut dengan torefaksi. Torefaksi menggunakan reaktor kontinu tipe tubular dengan pemanas LPG. Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui karakteristik bahan bakar produk torefaksi dari sampel biomassa tongkol jagung yang berfokus pada nilai kalor, analisis proksimat, analisis ultimat, *mass yield* dan *energy yield*, serta mengetahui temperatur terbaik yang dapat menghasilkan nilai kalor tinggi pada torefaksi tongkol jagung. Penelitian ini menggunakan biomassa tongkol jagung berbentuk silinder dengan tinggi 2 cm yang dilakukan pada temperatur 250 °C, 275 °C dan 300 °C dengan waktu tinggal selama 30 menit. Analisis yang dilakukan meliputi produk mentah dan produk torefaksi tongkol jagung, meliputi analisis proksimat, ultimat dan nilai kalor. Torefaksi limbah tongkol jagung menghasilkan nilai kalor tongkol jagung tertinggi pada temperatur 300 °C, yaitu sebesar 7155 kal/g dengan peningkatan sebesar 39,5% dari nilai kalor tongkol jagung mentah. Sementara itu, *energy yield* menunjukkan hasil yang lebih besar dibandingkan dengan *mass yield*, hal ini mengartikan bahwa penambahan energi dalam produk torefaksi lebih besar dibandingkan pengurangan massa produk torefaksi. Temperatur operasi yang lebih tinggi mempengaruhi penurunan persentase kandungan air dan volatil, serta peningkatan persentase abu dan karbon tetap. Torefaksi dapat meningkatkan karakteristik limbah tongkol jagung sebagai bahan bakar mendekati batubara, terbukti dengan menurunnya perbandingan rasio atom O/C dan H/C.

Kata Kunci : Biomassa, Torefaksi, Tongkol Jagung, Nilai Kalor, Reaktor Kontinu Tipe Tubular.

ABSTRACT

EFFECT OF REACTOR TUBE TEMPERATURE VARIATIONS ON CORN COB TOREFACTION USING A TUBULAR TYPE TOREFACTION REACTOR WITH AN OIL JACKET SYSTEM

By

Prengki

The potential of corn cob biomass waste is abundant, one of which is as a solid fuel. The production of solid fuel from corn cob waste is carried out through a carbonization process called torrefaction. Torrefaction uses a continuous tubular reactor type with LPG heating. The aim of this research is to determine the characteristics of torrefaction product fuel from corn cob biomass samples focusing on calorific value, proximate analysis, ultimate analysis, mass yield and energy yield, as well as to determine the optimal temperature that can produce high calorific value in corn cob torrefaction. This study used cylindrical corn cob biomass with a height of 2 cm conducted at temperatures of 250 °C, 275 °C, and 300 °C with a residence time of 30 minutes. The analysis conducted includes raw products and corn cob torrefaction products, including proximate analysis, ultimate analysis, and calorific value. Torrefaction of corn cob waste produces the highest calorific value of corn cob at a temperature of 300 °C, which is 7155 cal/g with an increase of 39.5% from the raw corn cob calorific value. Meanwhile, the energy yield shows greater results compared to mass yield, indicating that the addition of energy in torrefaction products is greater than the reduction in mass of torrefaction products. Higher operating temperatures affect the decrease in the percentage of water and volatile content, as well as the increase in ash and fixed carbon percentage. Torrefaction can enhance the characteristics of corn cob waste as a fuel approaching coal, as evidenced by the decrease in the O/C and H/C atomic ratio.

Keywords: Biomass, Torrefaction, Corn Cob, Calorific Value, Continuous Tubular Reactor Type.

LEMBAR PERSETUJUAN

Judul Skripsi : PENGARUH VARIASI TEMPERATUR
TABUNG REAKTOR PADA TOREFAKSI
TONGKOL JAGUNG MENGGUNAKAN
REAKTOR TOREFAKSI TIPE TUBULAR
SISTEM OIL JACKET

Mahasiswa : Prengki

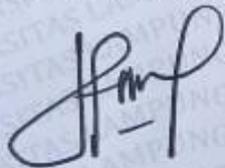
Nomor Pokok Mahasiswa : 1915021005

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik



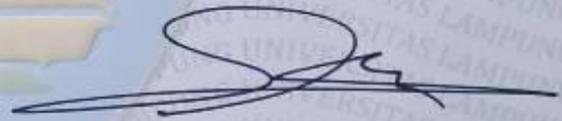
Komisi Pembimbing 1



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

NIP. 196906202000031001

Komisi Pembimbing 2

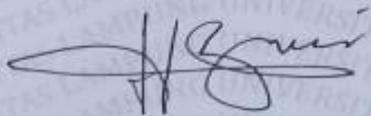


Dr. Amrul, S.T., M.T.

NIP. 197103311999031003

MENGETAHUI

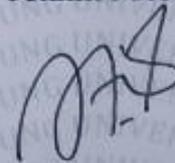
Ketua Jurusan
Teknik Mesin



Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D

NIP. 197108171998021003

Ketua Program Studi
SI Teknik Mesin



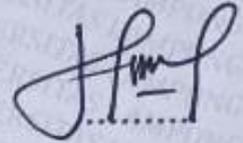
Novri Tanti, S.T., M.T.

NIP. 197011041997032001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

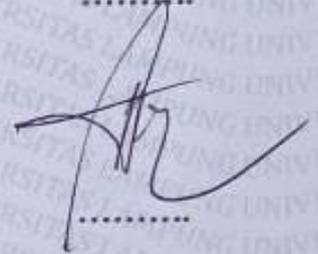
Ketua Penguji : **Dr. Harmen, S.T., M.T.**



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



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



2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.

NIP. 197509282001121002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 24 Januari 2024

LEMBAR PERNYATAAN

Skripsi dengan judul “**Pengaruh Variasi Temperatur Tabung Reaktor pada Torefaksi Tongkol Jagung menggunakan Reaktor Torefaksi Tipe Tubular Sistem Oil Jacket**” dibuat sendiri oleh penulis dan bukan merupakan hasil plagiat siapa pun sebagaimana diatur dalam Pasal 36 Peraturan Akademik Universitas Lampung dengan Surat Keputusan Rektor No. 13 Tahun 2019.

Bandar Lampung, 7 Februari 2024

Pembuat Pernyataan,



Prengki

NPM. 1915021005

MOTO

“Sabar itu gak ada batasnya, kalau ada batasnya berarti gak sabar.”

– KH. Abdurrahman Wahid (Gus Dur)

"Maka bersabarlah engkau (Muhammad), sungguh janji Allah itu benar dan sekali-kali jangan sampai orang-orang yang tidak meyakini (kebenaran ayat-ayat Allah) itu menggelisahkan engkau."

(QS. Ar-Rum [30]: 60)

“Menjadi kuat seperti Ayah dan sabar seperti Ibu”

- Prengki

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT. karena berkat anugerah dan rahmat- Nya penulis dapat melaksanakan dan menyelesaikan skripsi dengan lancar dan dalam keadaan sehat. Sholawat serta salam pula tak lupa penulis hatur agungkan kepada nabi akhir zaman Rasulullah Muhammad SAW. yang telah membimbing manusia dari zaman kegelapan menuju zaman yang penuh hidayah. Skripsi ini penulis buat sebagai tanda selesai pelaksanaan tugas akhir. Karya tulis ini diharapkan dapat menjadi pengembangan dalam ilmu di bidang energi khususnya energi terbarukan biomassa. Skripsi ini dibuat sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung. Skripsi ini dapat selesai karena adanya dukungan dari beberapa pihak, oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Ir. Gusri Akhyar Ibrahim, S.T., M.T., Ph.D., sebagai Ketua Jurusan Teknik Mesin sekaligus Dosen Pembimbing Akademik.
3. Ibu Novri Tanti, S.T., M.T., sebagai Ketua Program Studi Sarjana Teknik Mesin Universitas Lampung.
4. Dr. Harmen, S.T., M.T., beserta Dr. Amrul, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing Skripsi.
5. Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T. sebagai pengarah dalam penyusunan skripsi.
6. Bapak Amrizal, S.T., M.T., Ph.D. sebagai penguji utama.
7. Bapak Turimin dan Ibu Poniayah sebagai orang tua tercinta serta Mbak Ria yang selalu memberikan do'a dan dukungan tanpa batas.
8. Semua pihak dan rekan-rekan Teknik Mesin UNILA yang telah memberikan bantuan dan dukungan kepada penulis.
9. Evi Ardila, S.Pd. yang selalu memberikan motivasi dan membantu menyelesaikan tugas akhir ini.

10. Seluruh Keluarga Besar UKM Penelitian UNILA, IKAM OKUT dan KMNU UNILA yang senantiasa memberikan do'a dan dukungan untuk melaksanakan Tugas Akhir hingga selesai.

Penulis sangat bersyukur karena telah dihadirkan orang-orang yang membantu dalam menyelesaikan Tugas Akhir dan berdo'a semoga Allah SWT. membalas kebaikan serta selalu diberikan kebarokahan umur dan rezeki. Di dalam skripsi ini berisi tentang apa saja yang diperoleh penulis selama penelitian Tugas Akhir. Penulis menyadari bahwa skripsi ini terdapat kekurangan, maka diharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk semua pihak.

Bandar Lampung, 7 Februari 2024

Prengki

NPM. 1915021005

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di OKU Timur, Provinsi Sumatra Selatan pada tanggal 3 Maret 2001, penulis merupakan anak kedua dari dua bersaudara, dari pasangan Bapak Turimin dan Ibu Poniyah sebagai orang tua tercinta serta Mbak Ria yang selalu memberikan do'a dan dukungan tanpa batas.

Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri 1 Jaya Mulya tahun 2007 hingga 2013, kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 3 Belitang Madang Raya yang diselesaikan pada tahun 2016, lalu melanjutkan ke pendidikan tingkat atas di SMA Negeri 1 Belitang yang diselesaikan pada tahun 2019, hingga pada tahun 2019 penulis terdaftar sebagai mahasiswa Teknik Mesin Universitas Lampung melalui Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri.

Selama menjadi mahasiswa penulis aktif menjadi anggota di beberapa organisasi kampus antara lain, ketua umum UKM Penelitian UNILA 2021-2022, Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin 2020 (HIMATEM) dan Keluarga Mahasiswa Nahdlatul Ulama (KMNU). Selain itu penulis juga mengikuti beberapa kegiatan lainnya seperti, mengikuti Lomba Karya Tulis Ilmiah (LKTI), Program Pertukaran Pelajar dengan Kampus ITERA 2021, Program Kreativitas Mahasiswa (PKM), Program Mahasiswa Wirausaha UNILA, PPK Ormawa 2021-2022, serta Program Start-Up Mahasiswa UNILA 2023.

Penulis pernah melakukan Kerja Praktik (KP) di PT. PGN LNG Indonesia pada tahun 2022 dengan judul laporan “**Analisa Sistem Kerja Valve dan Pelaksanaan Preventive Maintenance Ball Valve K83 10 inch pada Letdown Area OTS Labuhan Maringgai Di PT PGN LNG Indonesia**”. Tahun 2023 penulis tergabung dalam tim penelitian torefaksi dengan judul penelitian “**Pengaruh Variasi Temperatur Tabung Reaktor pada Torefaksi Tongkol Jagung Menggunakan Reaktor Torefaksi Tipe Tubular Sistem Oil Jacket**”, di bawah bimbingan Bapak Dr. Amrul, S.T., M.T., Bapak Dr. Harmen, S.T., M.T., serta Bapak Hadi Prayitno, S.T., M.T.

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK

RIWAYAT HIDUP

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang	1
1.2. Identifikasi Masalah	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Rumusan Masalah	4
1.5. Tujuan Penelitian	4
1.6. Sistematika Penulisan	4

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa	6
2.1.1. Produk Biomassa	7
2.2. Limbah Tongkol Jagung	9
2.3. Karakteristik Bahan Bakar Padat	11
2.3.1. Nilai Kalor	11
2.3.2. Nilai Kandungan Proksimat	13
2.3.3. Nilai Kandungan Ultimat	14
2.4. Kondisi Penyajian Karakteristik Bahan Bakar Padat.....	14
2.5. Torefaksi	15
2.5.1. Pengertian Torefaksi	15
2.5.2. Mekanisme Torefaksi.....	16
2.5.3. Parameter Torefaksi	18
2.5.4. Kualitas Produk Torefaksi	19

2.5.5. Jenis-jenis Torefaksi	21
2.5.6. Reaktor Torefaksi Tipe Tubular	22
III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian	24
3.2. Alat dan Bahan	24
3.3. Rancangan Penelitian	27
3.4. Prosedur Pengujian Torefaksi	28
3.5. Parameter Penelitian	29
3.6. Tahapan Penelitian	29
3.7. Alur Tahapan Penelitian	31
3.8. Parameter dan Analisis Proksimat serta Ultimat	32
3.8.1. Analisis Proksimat	32
3.8.2. Nilai Kalor	33
3.8.3. Analisis Ultimat	34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1. Proses Torefaksi Tongkol Jagung	35
4.2. Tampak Visual Produk	37
4.3. Nilai Kalor	39
4.4. <i>Mass Yield</i> , <i>Energy Yield</i> dan <i>Energy Density</i>	42
4.5. Hasil Analisis Proksimat	45
4.6. Hasil Analisis Ultimat	47
4.7. Rasio O/C dan H/C	49
4.8. Pengaruh Variasi Temperatur Tabung Reaktor terhadap Hasil Torefaksi Tongkol Jagung	50
V. PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	53
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. <i>Psychochemical</i> biomassa saat torefaksi	17
Gambar 2.2. Reaktor Tipe Tubular Jenis <i>Screw Reactor</i>	22
Gambar 3.1. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem pemanas <i>Oil Jacket</i> dari LPG	24
Gambar 3.2. <i>12 Channel Temperature Recorder Data Logger</i>	26
Gambar 3.3. Sampel tongkol jagung	26
Gambar 3.4. Diagram alur pelaksanaan torefaksi tongkol jagung	31
Gambar 4.1. Bacaan pada <i>thermometer recorder</i> temperatur 250 °C, 275 °C, dan 300 °C	36
Gambar 4.2. Perubahan visual sampel mentah tongkol jagung dan setelah torefaksi	38
Gambar 4.3. Grafik nilai kalor sampel mentah dan hasil torefaksi tongkol jagung.....	39
Gambar 4.4. Grafik perhitungan teoritik nilai kalor torefaksi tongkol jagung	41
Gambar 4.5. <i>Mass yield</i> dan <i>energy yield</i> produk torefaksi tongkol jagung ...	43
Gambar 4.6. Hasil perhitungan <i>energy density</i>	44
Gambar 4.7. Hasil pengujian proksimat	45
Gambar 4.8. Hasil pengujian ultimat untuk nilai C dan O	47
Gambar 4.9. Hasil pengujian ultimat untuk nilai H dan N	48
Gambar 4.10. Diagram perbandingan rasio O/C dan H/C	49

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular	26
Tabel 3.2. Hasil penelitian senyawa tongkol jagung.....	28
Tabel 4.1. Rasio O/C dan H/C	52
Tabel 4.2. Hasil produk torefaksi tongkol jagung	53

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia dikenal sebagai negara agraris yang memiliki sumber daya alam melimpah. Mayoritas penduduk Indonesia bekerja di bidang agraris, salah satunya yaitu perkebunan jagung. Jagung merupakan salah satu komoditas pertanian yang penting di Indonesia, karena memiliki banyak manfaat dan digunakan di berbagai sektor, seperti pangan, pakan ternak, serta energi. Pada Januari-Desember 2021 seluas 4,15 juta hektar, produksi bersihnya sebesar 15,79 juta ton dengan kadar air 14% (BPS, 2021).

Menurut Rifdah (2018), selain sebagai sumber karbohidrat, jagung juga ditanam sebagai pakan ternak (hijauan maupun tongkolnya), diambil minyaknya, dibuat tepung (maizena), dan bahan baku industri. Hasil panen dari tanaman jagung hanya diambil bijinya dengan cara dipipil baik secara manual atau menggunakan mesin. Pengolahan tersebut menyisakan bagian tengah yang disebut tongkol jagung. Pengolahan sisa pasca panen tanaman jagung sebagian digunakan untuk pupuk dan bahan bakar untuk kebutuhan rumah tangga. Metode yang paling mudah untuk mengurangi jumlah limbah tersebut adalah dengan membakarnya. Proses pembakaran ini akan menjadi masalah baru, karena pembakaran itu akan menimbulkan polusi dan membahayakan lingkungan (Rifdah dkk., 2018).

Bahan bakar fosil dari tahun ke tahun mengalami penurunan sejalan dengan bertambahnya jumlah manusia dan konsumsi energi. Bahan bakar fosil paling umum yaitu batubara, dimana penggunaannya saat ini dibatasi untuk menjaga kelestarian alam Indonesia. Direktur Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), Ridwan Djamaluddin mengemukakan cadangan batubara Indonesia mencapai 38,84 miliar ton. Dengan rata-rata

produksi batubara sebesar 600 juta ton per tahun, maka umur cadangan batubara masih 65 tahun apabila diasumsikan tidak ada temuan cadangan baru. Batubara dapat diproses dan dijadikan sebagai DME (*Dimethyl Ether*). Penggunaan batubara pada pembangkit listrik dan industri dapat menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen dioksida (NO_x), serta partikel debu. Emisi ini dapat berakibat pada perubahan iklim dan polusi udara.

Biomassa menjadi bahan bakar alternatif pengganti batubara. Salah satu potensi biomassa yang dapat dikembangkan adalah pemanfaatan limbah tongkol jagung. Tongkol jagung merupakan salah satu limbah pertanian yang sangat potensial dimanfaatkan untuk dijadikan arang aktif. Dalam bahan ini juga mengandung kadar unsur karbon 43,42% dan hidrogen 6,32% dengan nilai kalornya berkisar antara 14,7-18,9 MJ/kg, serta tersusun oleh selulosa (36,48%), hemiselulosa (28,86%), lignin (3,16%), SiO₂ (21,5%) dan air (10%) (Ervina, 2013). Kandungan karbon dan nilai kalor yang tinggi berpotensi menjadikan tongkol jagung sebagai bahan bakar padat alternatif.

Teknologi yang digunakan dan mudah dilakukan untuk mengolah biomassa menjadi bahan bakar yang setara dengan batubara adalah torefaksi. Menurut Amrul dkk. (2018), torefaksi merupakan proses perlakuan panas pada temperatur 200-300 °C pada tekanan atmosfer serta tanpa adanya oksigen. Proses ini dapat meningkatkan nilai kalor dari biomassa dan mengurangi kadar air dan *volatile* dari material tersebut, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dalam penggunaan biomassa sebagai bahan bakar. Produk torefaksi biomassa juga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam produksi *biofuel*, bahan kimia, atau sebagai substitusi batubara.

Berdasarkan permasalahan yang ada terkait bahan bakar untuk keperluan energi, maka penulis melakukan penelitian mengenai **Pengaruh Variasi Temperatur Tabung Reaktor pada Torefaksi Tongkol Jagung Menggunakan Reaktor Torefaksi Tipe Tubular Sistem Oil Jacket.**

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, penulis mengidentifikasi masalah dalam penelitian adalah sebagai berikut:

1. Proses torefaksi dapat mempengaruhi kualitas produk akhir. Oleh karena itu perlu dilakukan karakterisasi produk hasil torefaksi untuk memastikan kualitasnya sesuai dengan standar yang diinginkan.
2. Proses torefaksi memerlukan suhu berkisar 200 °C-300 °C dan dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca. Oleh karena itu, perlu diperhatikan aspek keberlanjutan dan upaya untuk mengurangi dampak lingkungan dari proses torefaksi.
3. Perlu adanya identifikasi parameter yang dapat mempengaruhi efek dari variasi suhu pada proses torefaksi, meliputi laju pemanasan dan durasi pemanasan.
4. Variasi suhu yang digunakan dalam penelitian harus ditentukan dengan hati-hati untuk memastikan bahwa hasil yang diperoleh dapat digeneralisasi ke berbagai kondisi suhu yang berbeda.

1.3. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian uji torefaksi tongkol jagung adalah sebagai berikut:

1. Sampel-sampel biomassa berbentuk silinder dengan tinggi 2 cm.
2. Reaktor yang digunakan adalah reaktor torefaksi tipe *tubular oil jacket* dengan sumber pemanas dari LPG (*Liquefied Petroleum Gas*).
3. Variasi temperatur torefaksi dilakukan dengan 3 variasi temperatur, yaitu 250 °C, 275 °C, dan 300 °C.
4. Waktu tinggal (*residence time*) dalam tabung reaktor selama 30 menit.

1.4. Rumusan Masalah

Dari uraian latar belakang di atas, maka pokok permasalahan yang diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apakah torefaksi tongkol jagung dapat meningkatkan nilai kalor sehingga menjadi energi alternatif substitusi batubara?
2. Bagaimana karakteristik fisik dan kimia tongkol jagung setelah mengalami proses torefaksi dengan variasi temperatur?

1.5. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui karakteristik bahan bakar produk torefaksi dari sampel biomassa tongkol jagung yang berfokus pada nilai kalor, analisis proksimat, analisis ultimat, *mass yield*, serta *energy yield*.
2. Mengetahui temperatur terbaik reaktor torefaksi yang dapat menghasilkan nilai kalor tinggi pada tongkol jagung.

1.6. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan pada penelitian ini adalah sebagai berikut;

I. PENDAHULUAN

Pendahuluan menguraikan beberapa unsur yaitu latar belakang masalah yang jelas dan rinci, identifikasi masalah yang sedang diteliti, menentukan rumusan masalah sebagai jalan penyelesaian, batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini supaya hasil akhir penelitian terarah, tujuan yang menjurus dari diadakannya penelitian ini, serta sistematika penulisan berupa format yang dipakai pada penulisan laporan penelitian.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustaka berisikan landasan teori yang menunjang penelitian dan merupakan teori-teori dasar meliputi penjelasan biomassa, jenis-jenis sampel biomassa, pengertian torefaksi, reaktor torefaksi tipe tubular, serta karakteristik dari bahan bakar tongkol jagung.

III. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi penelitian berisikan alat dan bahan yang digunakan untuk menunjang penelitian, tempat dan waktu dilakukannya penelitian serta tahapan pelaksanaan penelitian.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan menyajikan data hasil penelitian dari proses torefaksi serta analisis data yang didapatkan ketika sedang atau setelah pengujian proses torefaksi.

V. PENUTUP

Penutup berisikan simpulan dan saran. Simpulan dan saran berisikan kesimpulan hasil akhir dari analisis proses torefaksi serta saran atas hasil penelitian sebagai bahan perbaikan kedepannya.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Biomassa

Biomassa adalah bahan organik yang dihasilkan melalui fotosintesis, baik berupa produk maupun buangan. Contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pohon, rumput, limbah pertanian, limbah hutan, tinja, dan kotoran ternak. Selain digunakan untuk tujuan primer serat, bahan pangan, pakan ternak, minyak nabati, bahan bangunan, dan sebagainya. Biomassa juga digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar), yang digunakan adalah bahan bakar biomassa yang bernilai ekonomis rendah atau merupakan limbah yang diambil produk primernya (Parinduri, 2020).

Menurut Basu (2018) biomassa berbeda dengan bahan bakar fosil, biomassa tidak membutuhkan waktu jutaan tahun untuk berkembang. Tanaman menggunakan sinar matahari melalui proses fotosintesis untuk memetabolisme karbon dioksida atmosfer serta menyerap air untuk terus bertumbuh. Sementara hewan hidup dan tumbuh dengan mengambil makanan dari biomassa. Tidak seperti bahan bakar fosil, biomassa dapat bereproduksi, dan oleh karena itu dianggap terbarukan. Ini adalah salah satu daya tarik utamanya sebagai sumber energi.

Setiap tahun, sejumlah besar biomassa tumbuh melalui fotosintesis dengan menyerap CO₂ dari atmosfer. Ketika terbakar, ia melepaskan karbon dioksida yang diserap tanaman dari atmosfer. Dengan demikian, pembakaran biomassa tidak menambah jumlah karbon dioksida bumi. Pelepasan tersebut juga terjadi pada bahan bakar fosil. Jadi, sebagai perbandingan, biomassa dapat dianggap “netral karbon”, yang berarti tidak ada penambahan persediaan CO₂ melalui pembakaran biomassa. Dari sekian banyak biomassa di bumi, hanya 5% (13,5

miliar metrik ton) yang dapat dimobilisasi secara potensial untuk menghasilkan energi. Jumlah tersebut cukup besar untuk menyediakan sekitar 26% konsumsi energi dunia, yang setara dengan 6 miliar ton bahan bakar minyak (IFP, 2007).

Biomassa mencakup spektrum yang luas, mulai dari rumput kecil hingga pohon besar, dari serangga kecil hingga kotoran hewan besar, dan produk yang dihasilkan darinya. Jenis utama biomassa yang dipanen adalah selulosa (non-sereal), pati, dan gula (sereal). Semua bagian dari tanaman yang dipanen seperti tanaman jagung dianggap sebagai biomassa, tetapi buahnya sebagian besar adalah pati sedangkan sisanya adalah selulosa. Jagung dapat menghasilkan etanol melalui fermentasi, tetapi bagian selulosa dari tanaman jagung membutuhkan proses yang melibatkan gasifikasi atau hidrolisis.

Biomassa terdiri atas beberapa komponen yaitu kandungan air (*moisture content*), zat volatil (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), dan abu (*ash*). Parameter penting lainnya dalam biomassa adalah nilai kalor. Nilai kalor sangat tergantung pada komposisi biomassa tersebut, semakin tinggi kandungan karbon terikat maka nilai kalornya semakin tinggi. Nilai kalor biomassa merupakan salah satu parameter pemilihan biomassa saat akan digunakan dalam pembangkit listrik sebagai bahan bakar utama maupun bahan bakar pendamping batubara (Sidabutar, 2018).

2.1.1. Produk Biomassa

Menurut Basu (2018), terdapat tiga jenis bahan bakar primer yang diproduksi dari biomassa, diantaranya yaitu:

- 1) Bahan bakar cair (ethanol, biodiesel, methanol, minyak sayur, dan minyak pirolisis).
- 2) Bahan bakar gas (biogas (CH_4 dan CO_2)), gas penghasil (CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , H_2), *syngas* (CO , H_2), gas alam substitusi (CH_4).
- 3) Bahan bakar padat (arang, *torrefied biomass*, *biocoke*, *biochar*).

Produk-produk biomassa banyak digunakan dalam empat jenis industri utama, yakni sebagai berikut:

- 1) Industri kimia, untuk produksi metanol, pupuk, serat sintetis, dan bahan kimia lainnya.

Secara teoritis, sebagian besar bahan kimia yang dihasilkan dari minyak bumi atau gas alam juga dapat diproduksi dari biomassa. Dua *platform* utama untuk produksi bahan kimia adalah berbasis gula dan berbasis syngas. Yang pertama melibatkan gula seperti glukosa, fruktosa, xilosa, arabinosa, laktosa, sukrosa, dan pati, sedangkan yang kedua melibatkan CO dan H₂.

Platform syngas mensintesis konstituen hidrogen dan karbon monoksida dari syngas menjadi blok bangunan kimia. Bahan penyusun perantara untuk berbagai bahan kimia banyak terdapat di jalur ini. Diantaranya berupa hidrogen, metanol, gliserol (C₃), asam fumarat (C₄), xylitol (C₅), asam glukarat (C₆), dan asam galat (Ar). Zat-zat tersebut disintesis menjadi sejumlah besar bahan kimia untuk industri yang melibatkan transportasi, tekstil, makanan, lingkungan, komunikasi, kesehatan, perumahan, dan rekreasi.

- 2) Industri energi, untuk menghasilkan panas dan listrik.

Biomassa merupakan sumber energi sesuai permintaan pertama yang dimanfaatkan manusia. Namun, saat ini kurang dari 22% permintaan energi primer dipenuhi oleh bahan bakar yang berasal dari biomassa. Kedudukan biomassa sebagai sumber energi utama sangat bervariasi tergantung kondisi geografis dan sosial ekonomi.

Panas dan listrik merupakan dua bentuk energi primer yang berasal dari biomassa. Penggunaan biomassa untuk produksi energi yang efisien saat ini sedang meningkat di negara-negara maju karena sifatnya yang netral karbon, sementara penggunaannya untuk memasak menurun karena kekurangan biomassa di negara-negara berkembang. Substitusi bahan bakar fosil dengan

biomassa pada tanaman yang ada menjadi lebih sederhana melalui proses torefaksi.

3) Industri transportasi, untuk produksi bensin dan solar.

Diesel dan bensin dari minyak petro mentah banyak digunakan dalam industri transportasi modern. Biomassa membantu menggantikan bahan bakar yang berasal dari petro tersebut memakai alternatif netral karbon. Salah satunya etanol, umumnya diproduksi dari tebu dan jagung, serta dapat digunakan dalam mesin bensin (*spark-ignition*). Sedangkan biodiesel diproduksi dari minyak nabati seperti rapeseed, yang biasanya digunakan dalam mesin diesel (pengapian kompresi). Pirolisis, fermentasi, dan ekstraksi mekanik adalah tiga metode / cara utama untuk memproduksi bahan bakar dari biomassa.

4) Industri lingkungan, untuk penangkapan CO₂ dan polutan lainnya.

Arang yang diproduksi dari biomassa memiliki aplikasi utama dalam industri pengendalian pencemaran. Salah satu kegunaannya yang luas adalah *filter*. Arang aktif yang diresapi dengan bahan kimia yang sesuai seperti seng klorida sangat efektif dalam menghilangkan merkuri dari gas buang dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara. *Biochar* yang diproduksi dari biomassa dapat berperan sebagai media penyerapan karbon dioksida. *Biochar* yang dihasilkan melalui proses pirolisis dapat menyediakan *sink* jangka panjang untuk penyimpanan karbon dioksida di atmosfer dalam ekosistem darat. Selain itu, dapat juga membantu dalam kesuburan tanah dan peningkatan produksi tanaman. Sistem kerja *biochar* dapat menahan karbon yang terkubur secara alami di dalam tanah, sehingga tidak melepaskannya sebagai CO₂ ke atmosfer.

2.2. Limbah Tongkol Jagung

Jagung merupakan tanaman semusim (annual). Jagung bisa ditanam di tanah datar maupun perbukitan yang subur. Satu siklus hidupnya diselesaikan dalam 80-150 hari. Paruh pertama dari siklus merupakan tahap pertumbuhan vegetatif dan paruh kedua untuk tahap pertumbuhan generatif. Tinggi tanaman jagung sangat

bervariasi. Meskipun tanaman jagung umumnya berketinggian antara 1 meter sampai 3 meter (Hastuti, 2011).

Jagung memiliki beberapa bagian, diantaranya akar, batang, daun dan tongkol. Tongkol berkembang di ruas-ruas pada batang. Tongkol utama umumnya terdapat pada ruas batang keenam sampai kedelapan. Ruas-ruas di bawah biasanya terdapat 5-7 tongkol yang berkembang secara tidak sempurna. Kandungan senyawa kimia pada tanaman jagung tergantung pada umur dan tingkat perkembangan, kondisi fisik dan kimia tanah, kelembaban iklim dan populasi tanaman. Kandungan senyawa kimia tongkol jagung secara umum mengandung banyak serat kasar yang berupa selulosa, hemiselulosa, lignin, dan silika (Erviana, 2013).

Tongkol jagung merupakan salah satu limbah lignoselulosik yang banyak tersedia di Indonesia. Limbah lignoselulosik adalah limbah pertanian yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Masing-masing merupakan senyawa-senyawa yang potensial dapat dikonversi menjadi senyawa lain secara biologi. Selulosa merupakan sumber karbon yang dapat digunakan mikroorganisme sebagai substrat dalam proses fermentasi untuk menghasilkan produk yang mempunyai nilai ekonomi tinggi. Karakteristik kimia dan fisika dari tongkol jagung sangat cocok untuk pembuatan tenaga alternatif, kadar senyawa kompleks lignin dalam tongkol jagung adalah 6,7%-13,9%, untuk hemiselulosa 39,8%, dan selulosa 32,3%-45,6%. Selulosa hampir tidak pernah ditemui dalam keadaan murni, melainkan selalu berikatan dengan bahan lain yaitu lignin dan hemiselulosa.

Limbah buah jagung yaitu tongkol jagung dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku industri dengan proses *biomass refining* berdasarkan sparasi fraksi-fraksi kimianya. Tongkol jagung adalah tempat pembentukan lembaga dan gudang penyimpanan makanan untuk pertumbuhan biji. Jagung mengandung kurang lebih 30% tongkol jagung sedangkan sisanya adalah kulit dan biji (Cerevisiae, 2013). Sehingga dalam 1 kg jagung utuh terdapat selitar 300 gram tongkol jagung kering, cukup besar dalam menyumbang limbah pertanian apabila tidak dimanfaatkan sebaik mungkin.

Pemanfaatan limbah tongkol jagung diantaranya dibuat briket, biasanya briket ini digunakan untuk kebutuhan memasak di rumah tangga atau rumah makan yang menyajikan menu bakaran seperti sate, ikan bakar dan lain sebagainya. Kemudian dapat pula dimanfaatkan sebagai *biodegredeable foam* atau kemasan pengganti plastik yang dapat dengan mudah terurai. Pembuatan *biodegredeable foam* ini menggunakan bahan gliserol, kitosan, *magnesium stearate* ($\text{Mg}(\text{C}_{18}\text{H}_{35}\text{O}_2)_2$), *polyvinyl alcohol* (PVOH), serta pati untuk meningkatkan sifat mekanik *biofoam* yang dibuat. Sementara itu terkait energi terbarukan, tongkol jagung dimanfaatkan untuk pembuatan *syngas* melalui tahap pengeringan, pirolisis, oksidasi dan terakhir reduksi. Pembuatan *syngas* ini membutuhkan temperatur tinggi hingga lebih dari 500 °C.

2.3. Karakteristik Bahan Bakar Padat

Parameter yang menjadi acuan dari karakteristik bahan bakar padat adalah parameter komponen berdasarkan penyusun batubara. Untuk mendapatkan komponen penyusun batubara digunakan tiga macam analisis yaitu besarnya nilai kalor, analisis proksimat dan analisis ultimat. Berikut adalah penjelasan ketiga parameter tersebut;

2.3.1. Nilai Kalor

Nilai kalor bahan bakar adalah besarnya panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar padat. Nilai kalor terdiri atas *High Heating Value* (HHV) dan *Lower Heating Value* (LHV). HHV didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan oleh satuan massa atau volume bahan bakar (awalnya pada 25 °C) setelah dibakar dan produk kembali ke suhu 25 °C. HHV juga biasa disebut dengan *Gross Calorific Value*. Sementara itu, *Lower Heating Value* (LHV) didefinisikan jumlah panas yang dilepaskan dengan pembakaran total dalam jumlah tertentu. LHV memiliki perberbedaan dengan HHV, yaitu pembakaran tidak melibatkan panas laten dari penguapan air. LHV disebut juga dengan nilai kalor bersih atau *Nett Calorific Value*. Nilai kalor bahan bakar padat produk torefaksi mengacu pada klasifikasi dari batubara berdasarkan standar ASTM D-388 (Basu, 2013).

Temperatur gas buang dari suatu boiler umumnya berkisar antara 120 °C sampai 180 °C. Produk pembakaran jarang didinginkan sampai temperatur awal bahan bakar, yang umumnya di bawah temperatur kondensasi *steam*. Jadi, uap air dalam gas buang tidak mengembun, dan oleh karena itu panas laten penguapan komponen ini tidak diperoleh kembali. Panas efektif yang tersedia untuk digunakan dalam boiler adalah jumlah yang lebih rendah, yang lebih kecil daripada energi kimia yang tersimpan dalam bahan bakar. Pembakaran dimulai saat suhu air tetap dengan pengukuran suhu optimum. Besarnya nilai kalor sesuai dengan persamaan berikut:

$$NK = \frac{\Delta T \times W}{Mbb} - B \dots\dots\dots(1)$$

Dimana:

NK = Nilai Kalor (kal/g)

ΔT = Perbedaan suhu rata-rata (°C)

W = Gaya Normal (N)

mbb = Massa bahan bakar (gram)

B = Koreksi panas kawat besi (kal/g)

Hubungan antara HHV dan LHV dirumuskan dengan persamaan berikut:

$$LHV = HHV - h_g \left(\frac{9H}{100} - \frac{M}{100} \right) \dots\dots\dots(2)$$

Dimana LHV, HHV, H, dan M masing-masing adalah nilai kalor lebih rendah, nilai kalor lebih tinggi, persentase hidrogen, dan persentase kelembapan, berdasarkan "ar". Di sini, h_g adalah panas laten uap dalam satuan yang sama seperti HHV. Kalor laten penguapan saat temperatur acuan 100 °C adalah 2260 kJ/kg.

2.3.2. Nilai Kandungan Proksimat

Kandungan proksimat merupakan analisis untuk mengetahui komponen penyusun bahan bakar padat seperti kandungan karbon tetap, *volatile matter*, kandungan air dan abu. Berikut adalah penjelasan mengenai nilai kandungan senyawa yang diperoleh dari analisis proksimat;

a. Karbon Tetap (*Fixed Carbon*)

Karbon tetap adalah karbon yang ditemukan setelah zat volatil dilepaskan. Karbon ini berbeda dari karbon lainnya, karena unsur karbon yang hilang selama penguapan membentuk ikatan hidrokarbon bersama zat volatil. Karbon tetap penyumbang terbesar nilai kalor pada bahan bakar padat.

b. Zat Volatil (*Volatile Matter*)

Zat volatile merupakan komponen dalam bahan bakar padat selain air yang dilepaskan ketika bahan bakar dipanaskan tanpa oksigen (pirolisis). Zat volatil ini merupakan hidrokarbon siklik, alifatik maupun aromatik. Zat volatil menghasilkan kalor dalam proses pembakaran namun tidak sebesar karbon tetap. Kadar volatil adalah perbandingan dikurang kadar abu.

$$\text{Kadar Volatil} = \frac{(b-c)}{(b-a)} \times 100\% \dots \dots \dots (3)$$

Dimana:

a = berat botol timbang + tutup (gram)

b = berat botol timbang + tutup + sampel (gram) sebelum pemanasan

c = berat botol timbang + tutup + sampel (gram) setelah pemanasan

c. Kandungan air (*Moisture Content*)

Kandungan air dalam bahan bakar terdapat dua jenis, yaitu *surface moisture* dan *inherent moisture*. *Surface moisture* adalah air yang terdapat pada bagian permukaan bahan bakar padat sedangkan *inherent moisture* adalah air yang terkandung dalam pori-pori maupun terikat secara kimia. *Surface moisture* lebih mudah dihilangkan dibandingkan dengan *inherent moisture*. Gabungan dari kedua jenis kandungan air disebut total *moisture*.

$$Kadar\ Air = \frac{BB - BKT}{BKT} \times 100\% \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

BB = berat bahan tanpa cawan sebelum dioven (gram)

BKT = berat bahan tanpa cawan setelah dioven (gram)

d. Abu (*Ash*)

Abu terdiri dari mineral yang terkandung dalam bahan bakar padat dalam bentuk unsur dan oksida. Mineral tersebut adalah silika, natrium, magnesium, dan oksida. Kadar Abu dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Kadar\ Abu = \frac{Berat\ Abu}{Berat\ Sampel} \times 100\% \dots\dots\dots(5)$$

2.3.3. Nilai Kandungan Ultimat

Kandungan ultimat merupakan analisis yang dilakukan untuk mengetahui komponen unsur-unsur kimia yang menyusun suatu bahan bakar padat seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), sulfur (S), nitrogen (N), dan unsur lainnya. Analisis proksimat dilakukan menurut standar ASTM D3172 sedangkan analisis ultimat dilakukan menurut standar ASTM D3176 (Wahyudi dkk., 2020). Kadar hidrogen dan oksigen digunakan untuk memperkirakan nilai kalor bersih (*net calorific value*) dari data nilai kalor kotor (*gross calorific value*). Karbon, hidrogen, dan oksigen adalah unsur utama yang membentuk batubara, sedangkan belerang dan nitrogen hanya sebagai bahan pembentuk lainnya. Analisis ultimat digunakan untuk menentukan kualitas dari batubara, sehingga batubara dapat dikelompokkan sesuai kelasnya (Darmawan dkk., 2020).

2.4. Kondisi Penyajian Karakteristik Bahan Bakar Padat

Metode penyajian karakteristik bahan bakar padat atau batubara memiliki penyajian yang berbeda-beda. Oleh karena itu, diperlukan referensi kondisi yang sama untuk membandingkannya. Metode-metode penentuan karakteristik bahan bakar padat adalah sebagai berikut:

- a. *Ash received* (ar)
Metode *ash received* mengacu pada pemanfaat langsung pada pembakaran. Kandungan batubara tersebut diasumsikan seluruh kandungan energi.
- b. *Air dried basis* (adb)
Metode *air dried basis* (adb) menunjukkan komposisi batubara tanpa kandungan *surface moisture*.
- c. *Dry basis* (db)
Metode *dry basis* (db) menunjukkan kandungan batubara tanpa kandungan air atau total *moisture*.
- d. *Dry ash-free* (daf)
Metode *dry ash-free* (daf) menunjukkan batubara tanpa air dan abu.
- e. *Dry mineral-matter free* (dmmf)
Metode *dry mineral-matter free* (dmmf) mengasumsikan kandungan batubara hanya komponen organik tanpa adanya air, abu, dan mineral.
- f. *Moist ash-free* (maf)
Metode *moist ash-free* (maf) menunjukkan batubara tanpa abu, tapi masih mengandung air sedikit.
- g. *Moist mineral-matter free* (mmmf)
Metode *moist mineral-matter free* menunjukkan karakteristik batubara tanpa abu dan mineral, tapi masih mengandung air.

2.5. Torefaksi

2.5.1. Pengertian Torefaksi

Torefaksi adalah proses perlakuan panas pada temperatur 200-300°C di bawah tekanan atmosfer tanpa adanya oksigen untuk menghasilkan produk akhir dengan nilai kalor setara dengan batubara sub-bituminus B menurut kualifikasi standar ASTM D 388 (Amrul dkk., 2018). Temperatur torefaksi yang meningkat akan mengakibatkan dekomposisi hemiselulosa, lignin, dan selulosa sehingga gas volatil akan meningkat. Penambahan zat volatil diawali dengan hemiselulosa terdekomposisi dilanjutkan lignin dan selulosa terdekomposisi. Pada proses torefaksi, kandungan karbon tetap akan meningkat dan kandungan zat-zat volatil akan menurun sehingga meningkatkan kualitas batubara. Keuntungan lain dari

proses torefaksi adalah kadar air produk semakin berkurang dan semakin sulit menyerap uap air dari udara (*hydrophobic*). Secara umum, kualitas, densitas energi dan *hydrophobic* produk torefaksi mengalami peningkatan.

Torefaksi memiliki manfaat tambahan untuk mengurangi atau menghilangkan zat volatil yang tidak diinginkan, seperti oksida nitrogen dan oksida sulfur. Kandungan oksigen produk torefaksi yang lebih rendah, mengakibatkan rasio oksigen terhadap karbon sehingga biomassa memiliki karakteristik yang mendekati batubara. Salah satu parameter penting dalam pemanfaatan biomassa sebagai bahan bakar adalah kemudahan untuk dikecilkan ukurannya (*grindability*). Torefaksi dapat dilakukan pada berbagai macam biomassa seperti jerami, kayu, bambu. Kualitas produk torefaksi sangat ditentukan oleh karakteristik biomassa, temperatur dan lama proses torefaksi. Makin lama proses torefaksi dapat menyebabkan komponen-komponen energi hilang sehingga kandungan energi akan menurun (Irawa, 2015).

Penelitian tentang torefaksi saat ini sudah mengalami perkembangan, dari biomassa berupa sampel kayu, sampah kota, hingga campuran-campuran biomassa. Penelitian Amrul (2014), menerapkan biomassa sampah kota yaitu ranting, kulit jeruk, kulit pisang dan daun. Torefaksi dengan menggunakan *batch reactor* dengan variasi temperatur dan diperoleh hasil nilai kalor 5.100-6.800 kal/g. Selain meningkatkan nilai kalor, torefaksi juga mengubah sifat visual produk dari warna yang menjadi kehitaman seperti arang dan sifat produk yang menjadi lebih lunak dan getas.

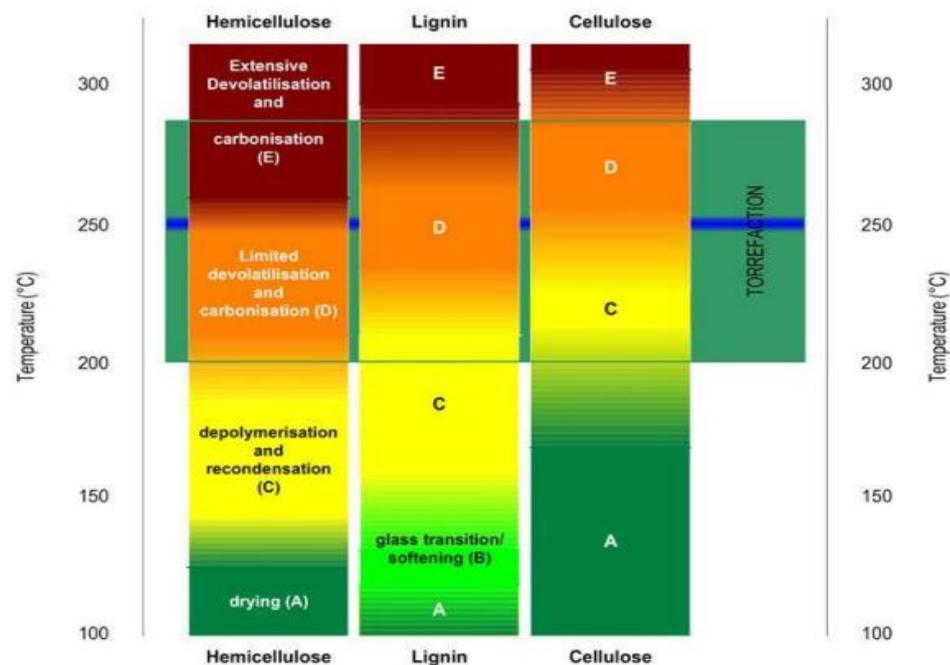
2.5.2. Mekanisme Torefaksi

Tahapan awal torefaksi adalah pemanasan yang bertujuan untuk menghilangkan kadar air pada permukaan biomassa (*surface moisture*). Air akan lepas dari ikatan dengan reaksi kimia (*inherent moisture*). Air tersebut dihasilkan dari proses termokondensasi pada temperatur 160°C. Reaksi eksotermik akan terjadi pada temperatur 180-270°C, dan hemiselulosa mulai terdekomposisi. Proses dekomposisi menghancurkan ikatan rantai pada polimer hemiselulosa, gugus

hidroksil (OH⁻) dan beberapa gugus lainnya. Proses dekomposisi ini akan menyebabkan perubahan warna pada biomassa dan lepasnya air, CO₂, asam asetat, fenol, dan *volatile matter* lainnya. Pada temperatur di atas 280°C produksi CO₂, asam asetat, fenol, dan hidrokarbon akan meningkat, keseluruhan proses akan menjadi eksotermik. Pada akhir proses torefaksi akan terbentuk padatan yang memiliki struktur polimer yang lebih pendek dan lebih sederhana dibandingkan sebelum ditorefaksi (Apriyanto, dkk. 2019).

Konsep dari torefaksi adalah menghilangkan volatil dan mengkarbonisasi polimer biomassa pada temperatur 200-300°C. Akan tetapi, dekomposisi polimer biomassa secara sempurna tidak selalu terjadi pada pada suhu torefaksi 200-300°C. Setiap polimer terdegradasi pada temperatur yang berbeda, Rasid (2019) menjabarkan rentang temperatur dari polimer biomassa mengalami dekomposisi yakni Hemiselulosa pada 225 °C -300°, Sellulosa pada 305 °C -375°, serta Lignin pada 250 °C -500°C.

Perubahan termokimia biomassa saat torefaksi terbagi menjadi lima tahapan yang dijelaskan pada (Gambar 2.1) oleh Bergman pada buku (Basu, 2018), berikut:



Gambar 2.1. *Psychochemical* biomassa saat torefaksi menurut penelitian Bergman

Adapun penjelasan dari gambar 2.1 di atas adalah sebagai berikut:

- 1) *Regime A* (50°C-120°C), tahap ini merupakan tahap pengeringan non-reaktif, dimana pada tahap ini biomassa kehilangan kadar air tetapi tidak ada perubahan dalam komposisi kimianya.
- 2) *Regime B* (120°C-150°C), tahap ini lignin pada biomassa mengalami pelunakan.
- 3) *Regime C* (150°C-200°C), tahap ini disebut dengan pengeringan reaktif yang menghasilkan perubahan struktur biomassa. Perubahan struktur tidak dapat diperoleh kembali setelah dilakukan pendinginan. Tahapan ini mulai melakukan pemutusan ikatan karbon hidrogen dengan karbon dan hemiselulosa mengalami depolimerisasi. Tahap ini menghasilkan ikatan polimer yang lebih pendek dengan struktur yang padat.
- 4) *Regime D* (200°C-250°C), tahap ini dan tahapan berikutnya merupakan rentang torefaksi untuk kandungan hemiselulosa. Devolatilisasi dan karbonisasi terbatas pada struktur padatan regime C terjadi pada tahapan ini. Regime D menghasilkan pemecahan sebagian besar ikatan antar hidrogen, CC, dan CO sehingga membentuk cairan yang terkondensasi dan gas yang tidak dapat terkondensasi.
- 5) *Regime E* (250°C-300°C), ini merupakan bagian tertinggi dari proses torefaksi. Dekomposisi menyeluruh dari hemiselulosa menjadi zat volatil dan produk padat terjadi pada tahap ini. Lignin dan Selulosa mengalami devolatilisasi dan karbonisasi dengan jumlah terbatas. Struktur pada sel biomassa mengalami kerapuhan dan tidak berserat.

2.5.3. Parameter Torefaksi

Adapun Parameter yang mempengaruhi proses torefaksi adalah sebagai berikut:

- a. Temperatur, temperatur torefaksi memiliki pengaruh terbesar pada torefaksi karena tingkat degradasi termal biomassa. Temperatur yang lebih tinggi memberikan massa dan energi yang lebih rendah tetapi produk memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi. Fraksi karbon tetap dalam sampel

mengalami peningkatan sedangkan hidrogen dan oksigen menurun seiring dengan meningkatnya temperatur torefaksi.

- b. Tingkat Pemanasan & *Residence time*, laju pemanasan yang lambat merupakan salah satu karakteristik torefaksi yang menjadikan pembeda dari pirolisis yang dipanaskan secara cepat. Laju pemanasan yang lambat mengartikan bahwa biomassa dipanaskan dengan waktu yang lebih lama. Durasi waktu torefaksi pada temperatur torefaksi disebut dengan “*Residence time*”. *Residence time* yang lebih lama memberikan hasil massa yang lebih rendah dan kepadatan energi yang lebih tinggi. Pengaruh *residence time* pada produk torefaksi, tidak terlalu dominan seperti temperatur torefaksi.
- c. Jenis Biomassa. Biomassa memiliki kandungan hemiselulosa yang berbeda-beda. Biomassa kayu memiliki kandungan hemiselulosa yang berbeda-beda berdasarkan jenis kayu, yaitu kayu lunak dan kayu keras. Kayu keras melepaskan sebagian besar asam asetat dan air, sedangkan kayu lunak melepaskan sebagian besar asam format selama torefaksi. Karena kayu keras mengalami kehilangan massa yang lebih tinggi pada torefaksi tanpa banyak berpengaruh pada kehilangan energi dibandingkan dengan kayu lunak.
- d. Ukuran Sampel, ukuran partikel atau potongan biomassa merupakan parameter lain yang dapat mempengaruhi hasil torefaksi. Efek ini mungkin tidak menonjol untuk ukuran partikel yang halus, tetapi dapat diukur untuk ukuran yang besar. Ukuran dan bentuk partikel atau ukuran sampel biomassa akan mempengaruhi laju perpindahan panas dari bagian luar biomassa hingga ke bagian dalamnya. Temperatur dan *residence time* yang sama dengan ukuran partikel yang besar dan partikel yang kecil, proses torefaksi lebih mudah terdekomposisi secara termal biomassa dengan ukuran yang sangat kecil dibandingkan dengan ukuran biomassa yang besar (Medic dkk., 2012).

2.5.4. Kualitas Produk Torefaksi

Produk torefaksi secara berurutan berupa padatan (*char*) dan sebagian gas. Beberapa kasus menunjukkan produk selain padatan dan gas, terdapat tar sebagai hasil produk torefaksi. Tar merupakan cairan yang muncul akibat kondensasi gas hasil pirolisis biomassa karena perbedaan temperatur yang tinggi (Suwandono, 2015). Kualitas

produk torefaksi tidak hanya dengan berkurang massa produk torefaksi, karena pengurangan massa belum tentu kepadatan energi mengalami peningkatan. Pengurangan massa yang terlalu ekstrim dapat juga menurunkan kepadatan energi dari produk torefaksi. Menurut Basu (2018), kualitas produk torefaksi diidentifikasi dengan beberapa parameter yaitu:

- a. *Mass Yield* (MY) merupakan fraksi massa asli biomassa yang akan tersisa dari hasil torefaksi. *Mass yield* ditentukan dengan dua perlakuan yaitu kehilangan massa karena pengeringan dan karena torefaksi. *Mass yield* akibat torefaksi didefinisikan dengan fraksi dari komponen organik asli biomassa yang diubah menjadi arang, dan harus ditentukan dengan kondisi “*dry ash free*” (daf). Sedangkan untuk produk torefaksi dari biomassa yang kandungan anorganiknya yang tinggi sehingga jumlah total padatan mencakup abu, maka pada kondisi “*dry base*” (db). Selain dua kondisi tersebut, terdapat kondisi ketiga yang menentukan kondisi material secara menyeluruh “*as-received*” (ar). Adapun persamaan untuk menentukan *mass yield* adalah sebagai berikut:

$$MY_{daf} = \frac{mf_{daf}}{m_0} \dots\dots\dots (6)$$

$$MY_{db} = \frac{mf_{db}}{m_0} \dots\dots\dots (7)$$

$$MY_{ar} = \frac{mf_{ar}}{m_0} \dots\dots\dots (8)$$

Dimana:

MY_{daf} = *Mass Yield dry ash free*

MY_{db} = *Mass Yield dry base*

MY_{ar} = *Mass Yield as-received*

mf_{daf} = Massa total biomassa tertorefaksi *dry ash free*

mf_{db} = Massa total biomassa tertorefaksi *dry base*

mf_{ar} = Massa total biomassa tertorefaksi *as-received*

m_0 = Massa total biomassa mentah

- b. *Energy Density* merupakan parameter lain dari produk torefaksi. Parameter ini memberikan jumlah energi yang dilepaskan ketika satuan massa produk dibakar. *Energy density* dikenal dengan istilah nilai kalor atau HHV (*Highest Heating Value*).
- c. *Energy Yield (EY)* merupakan fraksi energi dalam biomassa produk torefaksi. *Energy yield* menentukan komponen energi yang tetap berada dalam biomassa setelah komponen tanpa hilang selama torefaksi. *Energy yield* memberikan nilai kuantitatif dari energi pada biomassa setelah torefaksi, didefinisikan sebagai:

$$\text{Energy Yield (EY)} = \frac{E_{\text{torrefied product}}}{E_{\text{raw biomass}}} \dots\dots\dots (9)$$

Energy yield dapat dihitung dalam bentuk nilai kalor biomassa sebelum dan sesudah torefaksi;

$$EY = MY \times \frac{HHV_f}{HHV_o} \dots\dots\dots (10)$$

2.5.5. Jenis-jenis Torefaksi

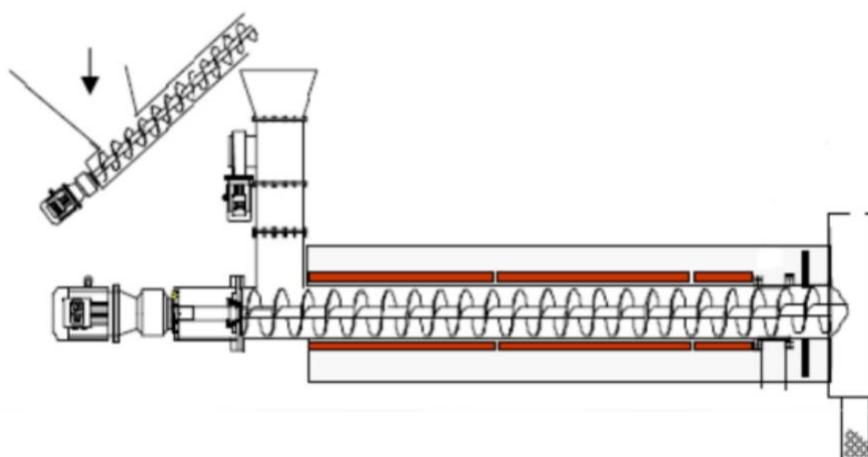
Perkembangan penelitian torefaksi saat ini semakin bervariasi, perkembangan ini menciptakan tipe reaktor torefaksi yang berbeda. Menurut Eriksson (2012), tipe-tipe reaktor torefaksi, antara lain:

- 1) Reaktor tipe *fixed bed*, karakteristik reaktor tipe ini adalah laju pemanasan yang rendah sehingga koefisien perpindahan panas yang terjadi rendah. Reaktor *fixed bed* sering digunakan untuk mengidentifikasi parameter yang mempengaruhi kandungan produk yang akan ditorefaksi.
- 2) Reaktor tipe *fluidized bed*, reaktor ini menggunakan tingkat pemanasan yang tinggi. Reaktor ini biasanya digunakan untuk menganalisis pengaruh temperatur dan waktu tinggal (*residence time*) biomassa di dalam reaktor pada saat torefaksi berlangsung.

- 3) Reaktor tipe *rotary kiln*, reaktor ini memiliki putaran yang lambat dari tempat pembakaran (*kiln*), sehingga memungkinkan pencampuran material sangat baik dalam reaktor. Reaktor ini mulai digunakan secara konvensional, karena *heating rate* tidak lebih tinggi 100°C/menit dan *residence time* hingga satu jam.
- 4) Reaktor *Counter-Flow Multi Baffle* (COMB), merupakan torefaksi dengan struktur pengering terdapat banyak elemen yakni *burner*, *combustion chamber*, *feeder*, *cyclone*, *multy stage dry condenser*, *ID fan (suction flow)*, dan *control panel*. Torefaksi ini mengklaim mampu melakukan torefaksi secara singkat yaitu 3-5 menit dengan kapasitas 20 kg/jam.

2.5.6. Reaktor Torefaksi Tipe Tubular

Reaktor jenis tubular merupakan jenis reaktor berbentuk tabung dengan dinding tetap dan yang bergerak adalah material di dalam reaktor tersebut. Reaktor tubular umumnya dipanaskan dengan sistem panas eksternal, dan dalam beberapa penelitian bahan baku di dalam material bergerak dengan sistem *screw conveyor*, reaktor bujur sangkar yang material digerakan dengan sistem *vibro-fluidiser*, atau tabung dengan *inner mixer*. Skema torefaksi tipe tubular jenis *screw reactor* ditunjukkan pada gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2. Reaktor Tipe Tubular Jenis *Screw Reactor* desain dari Cremers & Sebnem, 2015.

Ciri khas dari reaktor tubular pada gambar 2.2 adalah *screw conveyor* reaktor dengan operasional dan biaya konstruksi yang rendah. Untuk desain ini, kecepatan sekrup dapat bervariasi dari 0,5–25 rpm, dengan demikian *residence time* reaktor dapat diubah. Untuk skala kecil dan menengah, reaktor tubular bisa kompetitif. Suhu operasi tergantung pada pilihan produk. Keuntungan dari reaktor ini meliputi reaktor berjalan secara kontinyu, reaktor bebas dari kebocoran, permukaan perpindahan panas yang lebih besar, dan sintetik gas yang mudah bereformasi. Reaktor tipe ini mudah untuk dirancang jika koefisien perpindahan panas nya diketahui karena sederhana dan *safety*.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli 2023 sampai dengan bulan November 2023. Lokasi penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pengolahan Limbah Agroindustri Fakultas Pertanian dan Laboratorium Analisis dan Instrumentasi Teknik Kimia Universitas Lampung.

3.2. Alat dan Bahan

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini terdapat alat utama dan alat pendukung seperti pada tampilan gambar 3.1 berikut:

- 1) Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem Pemanas *Oil Jacket*



Gambar 3.1. Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular dengan Sistem pemanas *Oil Jacket* dari LPG.

Alat utama yang digunakan antara lain: reaktor torefaksi tipe tubular, pemantik api, tabung LPG 3 kg, regulator LPG, *thermocouple* tipe K, 12 *Channel Temperature Recorder Datalogger*. Sedangkan untuk alat pendukung yang digunakan adalah timbangan digital, kamera, laptop, plastik kedap udara, dan kabel listrik. Reaktor torefaksi kontinu tipe tubular dengan sistem pemanas *oil jacket* memiliki spesifikasi lengkap seperti pada tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1. Spesifikasi Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular

Spesifikasi	Komponen	Ukuran / Jenis
Reaktor	Diameter screw	: 195 mm
	Diameter tabung dalam	: 203,2 mm
	Diameter tabung luar	: 254 mm
	Panjang reaktor	: 1600 mm
	Tinggi reaktor	: 1700 mm
	Jarak pitch	: 100 mm
	Diameter poros	: 50 mm
	Kecepatan putar	: 0,5 rpm
	Kapasitas maksimum	: 5 kg/jam
Sistem Penggerak	Electromotor	: 2 unit (2 HP dan 0,5 HP)
	Ratio gear reducer	: 2 unit (1 : 60)
Medium Pemanas	Jenis medium pemanas	: Heat Transfer Oil Carflo™ AF
	Merk medium pemanas	: Petro Canada
	Temperatur maksimum	: 375 °C
	Tekanan kerja	: 1 atm
Sistem Pembakaran	Ruang bakar	: Horizontal Burner
	Bahan bakar	: Liquefied Petroleum Gas (LPG)
Sistem Kontrol Temperatur	Sensor Temperatur	: Thermocouple Tipe K
Sistem Pendingin Char	Sistem sirkulasi air	: Water Pump

2) *12 Channel Temperature Recorder Datalogger*

12 Channel Temperatur Recorder Datalogger memiliki tampilan pada (Gambar 3.2). Fungsi alat ini adalah sebagai alat ukur temperatur yang dapat merekam data *sampling* sebanyak 1 sampai 3600 detik dengan keluaran data *excell* secara otomatis. Alat instrumen dapat terhubung dengan *12 channel thermocouple probe tipe J/T/E/R/S* dengan resolusi $0,1^{\circ}\text{C}/1^{\circ}\text{C}$, $0,1^{\circ}\text{F}/1^{\circ}\text{F}$.



Gambar 3.2. *12 Channel Temperature Recorder Data Logger*

3) Sampel

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tongkol jagung, dapat dilihat pada gambar 3.3 berikut:



Gambar 3.3. Sampel tongkol jagung kering dengan kondisi utuh.

Adapun komposisi senyawa lainnya dalam tongkol jagung berdasarkan hasil penelitian Erviana (2013), yakni sebagai berikut:

Tabel 3.2. Hasil penelitian senyawa tongkol jagung (Ervina, 2013)

Parameter	Hasil Pengujian (%)
SiO ₂	21,5
Air	10
Selulosa	36,48
Hemiselulosa	28,86
Lignin	3,16

Lignin adalah polimer aromatik kompleks yang terbentuk melalui polimerisasi tiga dimensi dari sinamil alkohol (turunan fenil propan). Dengan kata lain, lignin adalah makromolekul dari polifenil. Polimer lignin dapat dikonversi ke monomernya tanpa mengalami perubahan pada bentuk dasarnya. Lignin yang melindungi selulose bersifat tahan terhadap hidrolisis karena adanya ikatan alkil dan ikatan eter. Serat selulosa alami terdapat di dalam dinding sel tanaman dan material vegetatif lainnya. Selulosa murni mengandung 44,4% C, 6,2% H dan 49,3% O. Pada proses hidrolisis yang sempurna akan menghasilkan glukosa, sedangkan proses hidrolisa sebagian akan menghasilkan disakarida selebiose.

3.3. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan sampel tongkol jagung. Sampel dilakukan perlakuan torefaksi variasi temperatur 250 °C, 275 °C dan 300 °C dengan *residence time* adalah 30 menit. Massa dari masing-masing sampel mentah adalah 500 gram. Produk torefaksi berupa arang (*char*) dibuat menjadi serbuk untuk kemudian dilakukan analisis proksimat, analisis ultimat dan analisis nilai kalor di laboratorium. Rancangan penelitian ini dengan mengamati hasil pengujian analisis beberapa parameter seperti nilai kalor, hasil analisis ultimat dan proksimat. Sehingga dapat diketahui apakah tongkol jagung memiliki kandungan karbon yang setara batubara untuk kedepannya bisa menjadi substitusi batubara.

3.4. Prosedur Pengujian Torefaksi

Adapun prosedur proses torefaksi pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Mempersiapkan kelengkapan seluruh alat dan bahan pendukung torefaksi, seperti menghubungkan tabung LPG 3 kg ke regulator serta meletakkan tabung LPG ke dalam ember berisi air sirkulasi *cooling char* dan menghubungkan pompa air sirkulasi ke *cooling char* melalui pipa atau selang.
- 2) Mempersiapkan sampel tongkol jagung kering.
- 3) Memasang seluruh *Thermocouple* yang ada pada Reaktor dan *Cooling char* ke *Thermocouple Reader 12 channel*.
- 4) Menghidupkan motor penggerak *screw conveyer*.
- 5) Menyalakan api *burner* dengan mengatur katup pada regulator LPG.
- 6) Menunggu temperatur T1, T2, T3 mencapai suhu yang diinginkan.
- 7) Menjaga temperatur T1, T2, T3 apabila sudah mencapai suhu yang diinginkan dengan mengatur katup regulator LPG dan tunggu 15 menit - 30 menit sampai temperatur T1, T2, T3 stabil.
- 8) Memasukkan sampel tongkol jagung melalui *hooper*, dan menunggu sampel keluar dengan waktu *residence time* selama 30 menit.
- 9) Mendorong pendorong pada *cooling char*, setelah melewati *residence time* dan membuka katup pembuka pada *cooling char*.
- 10) Ulangi langkah 8 dan 9 untuk sampel yang berikutnya dengan variasi temperatur yang sama.
- 11) Ulangi langkah 6 – 10 untuk variasi temperatur 250 °C, 275 °C, dan 300 °C.
Catatan: menjaga temperatur torefaksi dengan mengatur bukaan katup regulator.

3.5. Parameter Penelitian

Parameter penelitian menggunakan variabel tetap dan variabel berubah. Hal ini dilakukan untuk dapat mengetahui kondisi proses torefaksi terbaik dengan menggunakan reaktor kontinu tipe tubular. Penelitian ini menggunakan parameter utama torefaksi yaitu variasi temperatur, parameter utama digunakan untuk mendapatkan parameter temperatur optimal pada proses torefaksi sampel. Biomasa yang digunakan adalah tongkol jagung yang berukuran tinggi 2 cm. Analisis yang dilakukan pada penelitian ini untuk mengetahui karakteristik bahan bakar yang diperoleh dari torefaksi adalah pengujian analisis ultimat dan analisis proksimat. Selain itu, dilakukan pengujian nilai kalor pembakaran untuk menunjukkan besar nilai per satuan massa dari masing-masing temperatur. Penelitian ini juga mencakup seberapa jauh proses torefaksi dapat meningkatkan kualitas sifat-sifat pembakaran dari sampel-sampel pada kondisi *as-received* dengan perhitungan perolehan massa, MY (*mass yield*) dan perolehan energinya, EY (*energy yield*).

3.6. Tahapan Penelitian

Adapun tahapan-tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut;

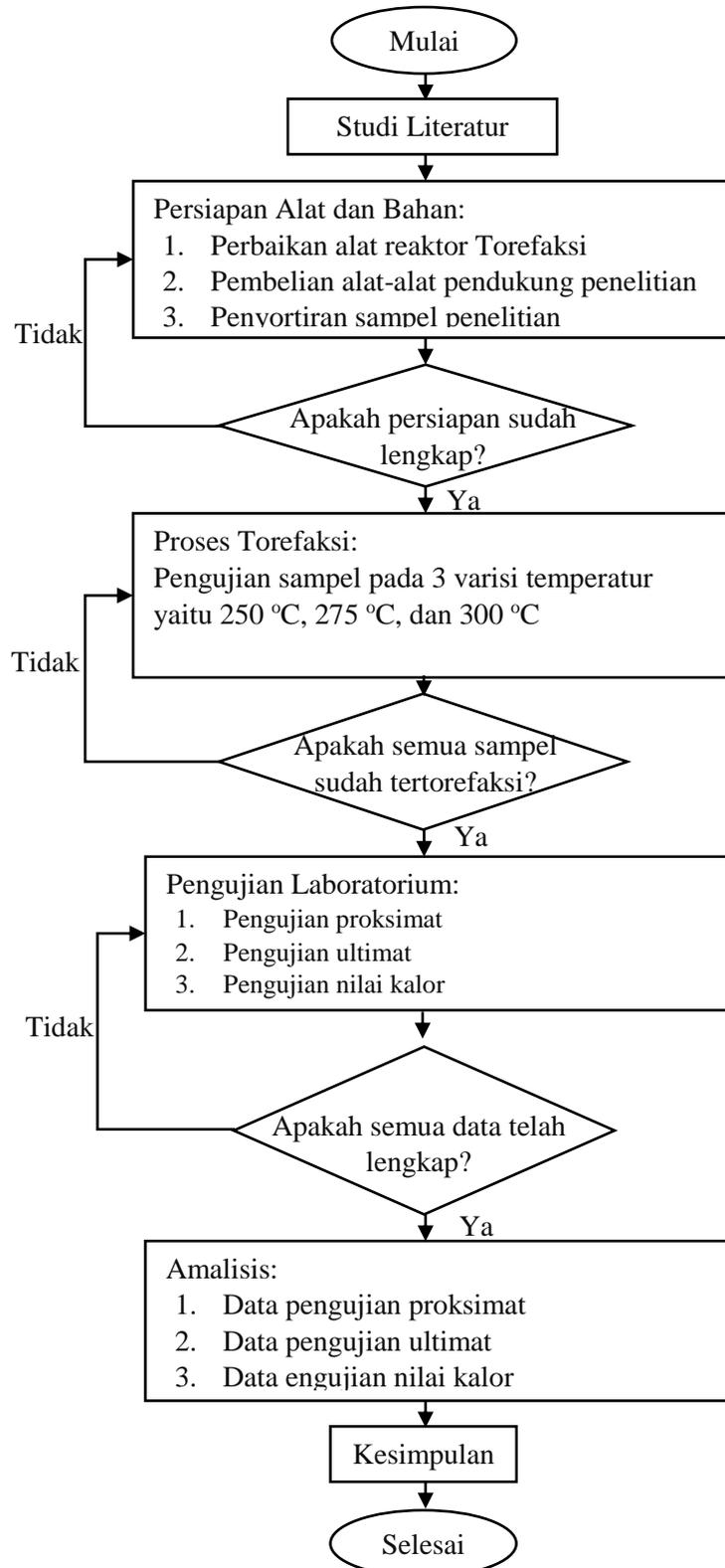
- 1) Studi Literatur: dimulai dengan mempelajari tentang torefaksi, biomassa, reaktor torefaksi, mekanisme torefaksi, dan karakteristik bahan bakar padat. Pada umumnya dilakukan dengan mencari penelitian sejenis untuk memudahkan dan mengarahkan pada tujuan akhir. Beberapa jurnal yang diambil meliputi penelitian tentang tongkol jagung, torefaksi dengan sitem *oil jacket*, serta produk akhir torefaksi.
- 2) Persiapan Alat Torefaksi: persiapan perlengkapan alat-alat utama reaktor serta alat pendukung reaktor torefaksi, seperti melakukan pengecatan ulang reaktor, penggantian komponen yang rusak seperti *thermocouple*, karburator dan selang gas, pembersihan *hooper* serta membeli peralatan pendukung seperti timbangan, wadah produk dan lain-lain. Pastikan alat berfungsi maksimal dengan melakukan kalibrasi terlebih dahulu sebelum proses

torefaksi dilakukan. Persiapan ini dilakukan semata-mata supaya proses karbonisasi menggunakan reaktor torefaksi berjalan dengan lancar sesuai dengan harapan.

- 3) Proses Torefaksi: Pada tahap ini dilakukan pengujian dengan menguji seluruh sampel yang ada dengan variasi temperatur torefaksi yakni 250°C, 275°C, dan 300°C. Pada setiap temperaturnya dimasukkan sampel sebanyak 50 gram setiap 2 menit sekali hingga 500 gram untuk satu variasi temperatur. Sampel yang dimasukkan berupa tongkol jagung yang sudah dipotong dengan tinggi 2 cm berbentuk silinder. Hal ini bertujuan agar supaya sampel yang dimasukkan tidak terlalu banyak yang bisa berakibat menggumpal di dalam reaktor dan proses torefaksi menjadi terhambat.
- 4) Pengujian Laboratorium: setelah seluruh sampel dilakukan torefaksi dan didapatkan produk hasil torefaksi, selanjutnya dilakukan pengujian laboratorium tahap dimana dengan mengirimkan sampel mentah dan sampel produk hasil torefaksi setiap temperatur untuk dilakukan pengujian proksimat, pengujian ultimat, dan nilai kalor. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Terpadu Teknik Kimia dan Laboratorium Pengolahan Limbah Agroindustri Teknologi Hasil Pertaian Fakultas Pertanian Universitas Lampung. Pengujian dilakukan sesuai prosedur laboratorium yang sudah ditetapkan supaya memperoleh hasil yang maksimal.
- 5) Analisis Hasil Seluruh Pengujian: setelah semua data telah terkumpul, tahapan selanjutnya adalah menganalisis hasil seluruh data pengujian dari hasil laboratorium. Analisis data meliputi analisis proksimat, analisis ultimat dan nilai kalor. Dari hasil laboratorium tersebut dapat dilihat untuk besarnya hasil dari nilai kalor yang menentukan kualitas produk torefaksi. Semakin besar nilai kalor maka semakin baik kualitasnya.
- 6) Kesimpulan: Langkah terakhir dari penelitian ini adalah membuat kesimpulan dari hasil penelitian dan dituangkan dalam bentuk laporan tugas akhir. Kesimpulan diambil dari seluruh intisari yang ada pada laporan penelitian. Sehingga dapat diperoleh hasil akhir yang sesuai dengan harapan.

3.7. Alur Tahapan Penelitian

Adapun tahapan atau *flowchart* penelitian ini sebagai berikut:



Gambar 3.4. Diagram alur pelaksanaan torefaksi tongkol jagung

3.8. Parameter dan Analisis Proksimat serta Ultimat

3.8.1. Analisis Proksimat

Analisis nilai proksimat sampel biopelet dilaksanakan dengan tujuan mendapatkan nilai berupa nilai kadar air, kadar abu, zat terbang (*volatile matter*), dan karbon tetap (*fixed carbon*). Pengujian ini dilakukan dengan cara pemanasan atau pembakaran biopelet ke dalam *furnace*. Adapun secara rinci dari setiap parameternya adalah sebagai berikut:

a. Kadar Air / *Moisture Content* (ASTM E1756-08)

Penetapan nilai kadar air dilakukan dengan sampel diletakkan dalam cawan yang bobotnya telah diketahui. Cawan dimasukkan ke dalam oven pada suhu $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam dan tidak lebih dari 72 jam (sampai didapatkan berat konstan) dan didinginkan dalam desikator selama 15 menit serta ditimbang. Data hasil pengujian dihitung berdasarkan persamaan (4).

b. Kadar Abu / *Ash Content* (ASTM E1755-01)

Penetapan kadar abu dilakukan dengan sampel diletakkan dalam cawan porselen yang bobotnya sudah diketahui. Cawan dimasukkan ke dalam tanur pada suhu $575\pm 25^{\circ}\text{C}$ selama 3 jam dan didinginkan dalam desikator selama 15 menit serta ditimbang. Data hasil pengujian dihitung berdasarkan persamaan (5).

c. Kadar Zat Terbang / *Volatile Matter* (ASTM E872-82)

Penetapan kadar zat terbang dilakukan dengan menguapkan bahan tanpa oksigen pada suhu 950°C . Sample biopelet diletakkan pada cawan porselen yang telah diketahui bobotnya. Cawan dimasukkan ke dalam tanur pada suhu 950°C selama 7 menit dan didinginkan dalam desikator selama 15 menit serta ditimbang.

d. Karbon Terikat / *Fixed Carbon*

Karbon terikat merupakan fraksi karbon dalam sampel, selain fraksi air, zat terbang, dan abu. Data hasil pengujian dihitung berdasarkan persamaan (1).

3.8.2. Nilai Kalor

Analisis nilai kalor menggunakan alat *Oxygen Bomb Calorimeter Parr*, sementara sampel yang akan diuji harus berbentuk serbuk halus. Adapun prosedur dari pengujian untuk mendapatkan nilai kalor adalah sebagai berikut:

- 1) Menghubungkan kabel daya ke sumber listrik.
- 2) Menimbang sampel (serbuk) sebesar 0,2 - 0,3 gram. Jangan menggunakan sampel terlalu banyak atau dengan sampel yang mungkin bereaksi dengan ledakan yang keras (lebih dari 8.000 kalori).
- 3) Memasukkan sampel ke dalam mangkuk pembakaran.
- 4) Memasang kawat sekering 10cm: meletakkan kepala bom pada tiang pembantu, naikkan tutupnya, masukkan kawat melalui lubangnya, lalu tarik tutup ke bawah untuk menyelesaikan perakitan. (Pastikan kawat menyentuh bahan).
- 5) Memasukkan kepala bom ke dalam silinder bom dengan hati-hati, periksa cincin penyegel untuk memastikan kondisinya baik dan basahi dengan sedikit air supaya masuk dengan mudah ke dalam silinder. Dorong ke bawah sejauh mungkin dengan menggunakan tangan, dan biarkan katup pelepas gas terbuka selama proses ini.
- 6) Memasang tutup sekrup pada silinder dengan menggunakan tangan hingga berhenti dan rapat. Dan memasang katup pelepas gas dengan rapat.
- 7) Mengisi silinder bom dengan oksigen sebesar 25 atm: Memasang konektor gas ke badan katup saluran masuk silinder, dorong ke bawah sejauh mungkin, kemudian membuka katup tangka oksigen dengan tidak lebih dari $\frac{1}{4}$ putaran, lalu membuka katuo kontrol sambungan pengisian secara perlahan dengan memerhatikan pengukur saat tekanan bom naik ke tekanan pengisian yang diinginkan (jangan lebih dari 40 atm), dan kemudian tutup kembali katup kontrol.
- 8) Memasukkan silinder bom ke dalam tangki berisi air 2 liter, kemudian masukkan tangki ke dalam wadah isolasi dan menutupnya.

- 9) Menghidupkan motor pengaduk.
- 10) Menghidupkan daya pembaca temperatur, dan mencatat suhu awal (0 detik).
- 11) Setelah 5 menit menekan tombol pembakaran pada unit pembakaran (ignition unit) selama 5 detik. Lampu indikator akan menyala saat tombol ditekan dan akan terus menyala saat arus mengalir melalui sekering.
- 12) Mencatat perubahan suhu per menit sampai didapatkan suhu konstan (20 menit)
- 13) Menghitung sisa kawat yang tidak terbakar, dikurangkan dengan kawat yang digunakan (1 cm).

3.8.3. Analisis Ultimat

Analisis ultimat dilakukan untuk mengetahui kandungan karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), dan oksigen (O) dalam suatu produk penelitian. Prosedur analisis akhir ini cukup sederhana, yaitu dengan memasukkan sampel karbon ke dalam alat dan hasil analisis kemudian akan muncul di layar komputer. Analisis ultimat untuk mengetahui kadar karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N) menggunakan Elentar Analyzer (LECO CHN 2000) dengan teknik infra merah dan metode yang digunakan berdasarkan ASTM (American Society for Testing and Materials).

V.PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Temperatur reaktor mempengaruhi peningkatan dan penurunan karakteristik bahan bakar padat produk torefaksi tongkol jagung. Temperatur reaktor 300 °C menghasilkan nilai kalor terbesar, yaitu 7155 kal/g dengan peningkatan 39,2% dari tongkol jagung mentah. Kemudian temperatur 250 °C menghasilkan nilai kalor terkecil, yaitu 5708 kal/g dengan peningkatan sebesar 23,8%. Analisis proksimat memperlihatkan peningkatan kandungan karbon tetap tertinggi pada temperatur 300 °C yakni sebesar 47,72% dan penurunan kandungan volatil sebesar 39,45% dari tongkol jagung mentah. Kandungan atom karbon meningkat sebesar 54,59% dan kandungan oksigen menurun sebesar 43,92% melalui analisis ultimat.
2. Temperatur reaktor mempengaruhi persentase *mass yield*, *energy yield*, dan fraksi nilai *energy density*. Temperatur reaktor 250 °C menyisakan persentase *mass yield* sebesar 69,4% dan *energy yield* sebesar 91,14%, serta menghasilkan fraksi nilai *energy density* sebesar 1,31. Kemudian temperatur reaktor 275 °C menghasilkan fraksi nilai *energy density* yaitu 1,39 dengan *mass yield* sebesar 47,6% dan *energy yield* sebesar 66,29%. Temperatur operasi 300 °C menghasilkan fraksi nilai *energy density* tertinggi yaitu 1,64 dengan *mass yield* sebesar 34,2% dan *energy yield* sebesar 56,3%. Hasil ini mengartikan bahwa semakin besar jumlah energi yang dapat dihasilkan saat bahan bakar tersebut digunakan seiring dengan penurunan massa yang terjadi pada temperatur reaktor 300 °C.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melaksanakan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait variasi *residence time* dengan variasi temperatur yang sama untuk mengetahui kandungan nilai kalor produk torefaksi yang akan dihasilkan.
2. Perlu dilakukannya penelitian lebih lanjut terkait keseragaman ukuran sampel tongkol jagung untuk mendapatkan produk torefaksi yang berkualitas.
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait stabilitas temperatur pada saat pembuatan produk torefaksi menggunakan reaktor tipe tubular dengan sistem *oil jacket*.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, A., Sitorus, S., & Yusuf, B. (2016). Pemanfaatan Limbah Tongkol Jagung (*Zea mays*) Sebagai Arang Aktif Dalam Menurunkan Kadar Amonia, Nitrit dan Nitrat Pada Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Teknik Celup. *Jurnal Kimia Mulawarman*, 13 (2), 78–84. <http://jurnal.kimia.fmipa.unmul.ac.id/index.php/JKM/article/view/203>
- Amrul, Apriyanto, A., Sanjaya, I., & Amrizal. (2018). Experimental Study on Waste Biomass Torrefaction Using a Continuous Tubular Reactor. *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin 2018 - SNTTM XVII*, 304–309.
- Anam, A. (2008). Dimethyl Ether (DME) dari Batubara sebagai Bahan Bakar Gas Alternatif selain LPG. *J.Ilm.Tek.Energi* , 1(7), 37–57.
- Apriyanto, A., Hamzah, A., & Nafis, A. (2019). Rancang Bangun dan Analisis Unjuk Kerja Reaktor Torefaksi Kontinu Tipe Tubular Dengan Sistem Pemanas Oil Jacket. *Mechanical*, 9(2), 54. <https://doi.org/10.23960/mech.v9.i2.201809>
- Arifin. Muhammad Nauval Farisi. (2019). Pembuatan Bahan Bakar Padat Setengah Arang Dari Tongkol Jagung Melalui Proses Torefaksi. Fakultas Pertanian. Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Basu, P. (2013). Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. In *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory*. <https://doi.org/10.1016/C2011-0-07564-6>
- Cerevisiae, S. (n.d.). *Asam Klorida Dan Waktu Fermentasi*. 19(1).
- Darmawan, A., Ramadhan, Y. A. P., Dewi, N. R., Ni'Mah, H., Roesyadi, A., & Kurniawansyah, F. (2020). Effect of oxygen delignification process on the lignin content and wastewater quality from kraft-pulped *Eucalyptus pellita*.

- AIP Conference Proceedings*, 2197(January). <https://doi.org/10.1063/1.5140955>
- Eriksson, A. M. (2012). *Torrefaction and gasification of biomass. The potential of torrefaction combined with entrained flow gasification. March 2012*, 73.
- Erviana, L. (2013). *Isolasi Silika dari Tongkol Jagung [Silica Isolation from Corn Cob]*.
- Hastuti, D. (2011). *Dewi Hastuti, dkk Pengaruh Perlakuan Teknologi*. 7(1), 55–65.
- Irawan, A., Riadz, T., & Nurmalisa. (2015). Kemampuan Penyerapan Air. *Reaktor*, 15(3), 190–195.
- Medic, D., Darr, M., Shah, A., Potter, B., & Zimmerman, J. (2012). Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. *Fuel*, 91(1), 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.07.019>
- Parinduri, L., & Parinduri, T. (2020). Konversi Biomassa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), 88–92. <https://www.dosenpendidikan>.
- Rasid, R. A., Chin, T. M., Ismail, M., & Rahman, R. N. U. A. (2019). Effect of torrefaction temperatur, residence time and particle size on the properties of torrefied food waste. *Indonesian Journal of Chemistry*, 19(3), 753–760. <https://doi.org/10.22146/ijc.39718>
- Rifdah, R., Herawati, N., & Dubron, F. (2018). Making Biobriquettes From Corn Cob Waste Boiled Corn Traders And Households As Renewable Energy Fuel With Carbonization Process. *Jurnal Distilasi*, 2(2), 39.
- Sidabutar, V. T. P. (2018). Kajian Peningkatan Potensi Ekspor Pelet Kayu Indonesia sebagai Sumber Energi Biomassa yang Terbarukan. *Jurnal Ilmu Kehutanan*, 12(1), 99. <https://doi.org/10.22146/jik.34125>
- Studi, P., Industri, T., Mangkurat, U. L., Selatan, K., Studi, P., Mesin, T., Mangkurat, U. L., Studi, P., Sipil, T., & Mangkurat, U. L. (2021). Kajian

Sinergitas Agroindustri Kelapa Sawit Dan Usaha Mikro Kecil Untuk Memproduksi Energi Terbarukan. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(3), 249–259. <https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2021.31.3.249>

Surono. Untoro Budi, Sri Gati Hutomo. (2021). Perbandingan Proksimat Analisis dan Homogenitas Nilai Kalor Biomassa Sebelum dan Sesudah Proses Torefaksi. Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Janabadra Yogyakarta. Yogyakarta.

Wahyudi. (2006). Penelitian Nilai Kalor Biomassa : Perbandingan Antara Hasil Pengujian Dengan Hasil Perhitungan. Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Yogyakarta. Jl. Lingkar Barat Tamantirto Kasihan Bantul Yogyakarta 55183

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 Inc Vokasional Dan Teknologi*, 20 (2), 1–8. <https://doi.org/10.24036>