

**PENGARUH SUHU DAN LAMA WAKTU TOREFAKSI
TERHADAP KARAKTERISTIK PELET DARI KULIT DURIAN**

(Skripsi)

Oleh

Mangihut Tua Harahap

2114071060



**JURUSAN TEKNIK PERTANIAN
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG**

2024

**PENGARUH SUHU DAN LAMA WAKTU TOREFAKSI TERHADAP
KARAKTERISTIK PELET DARI KULIT DURIAN**

OLEH

MANGIHUT TUA HARAHAHAP

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian
Universitas lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRACT

EFFECT OF TEMPERATURE AND TORREFACTION TIME ON THE CHARACTERISTICS OF DURIAN PEEL PELLET

By

MANGIHUT TUA HARAHAP

Durian peel is an abundant biomass in Indonesia and contains cellulose (50–60%), lignin (5%), and hemicellulose (15–30%), making it a potential raw material for bio-pellets. Torrefaction is the process of slowly heating biomass within a temperature range of 200–300 °C under limited or no oxygen conditions, which can convert biomass waste into solid fuel. The temperature and duration of torrefaction are factors that influence the quality of bio-pellets, where increases in both parameters enhance carbon content and calorific value while reducing hydrogen and oxygen in the product. This study aims to analyze the effect of torrefaction temperature and duration on the characteristics of durian peel pellets and to identify the optimal treatment combination to produce the highest quality pellets.

The research was arranged using a Completely Randomized Design (CRD) with two factors. The first factor was the variation in torrefaction temperature, consisting of 240 °C, 260 °C, 280 °C, and 300 °C. The second factor was the variation in torrefaction duration, consisting of 20 minutes, 30 minutes, 40 minutes, and 50 minutes. Each treatment combination was replicated three times, resulting in a total of 48 experimental units. The parameters analyzed included moisture content, ash content, bulk and unit density, fineness modulus (FM), geometric mean diameter (GMD), calorific value, durability, color (L^* , a^* , b^* , and ΔE^*), and hygroscopicity. Data analysis was conducted using quantitative descriptive methods in the form of tables, graphs, and bar charts. The obtained data were further analyzed using analysis of

variance (ANOVA), followed by a Least Significant Difference (LSD) test at a 5% significance level using Excel.

Based on the results, torrefaction temperature significantly affected moisture content, ash content, volatile matter, bulk density, calorific value, color, and pellet durability. The torrefaction duration also influenced the physical and thermal characteristics of the pellets, such as moisture content, volatile matter (which tended to decrease), calorific value, and density (which tended to increase). The interaction between temperature and torrefaction duration had a significant effect on ash content, bulk density, and calorific value. Treatment at 300 °C resulted in the lowest moisture content (4.11%) and the highest calorific value (20.06 MJ/kg). However, the average ash content of the treatments exceeded the SNI (Indonesian National Standard) threshold. The 50-minute treatment yielded optimal results, despite a tendency for increased ash content. The combination of 300 °C and 50 minutes was the most effective treatment for improving the quality of durian peel pellets, particularly in terms of moisture content and calorific value. It is recommended to conduct direct performance testing in a combustion system and to consider the utilization of the product as biochar.

Keywords: Calorific value, duration, durian peel, temperature, torrefaction.

ABSTRAK

PENGARUH SUHU DAN LAMA WAKTU TOREFAKSI TERHADAP KARAKTERISTIK PELET DARI KULIT DURIAN

Oleh

MANGIHUT TUA HARAHAHAP

Kulit durian merupakan biomassa yang melimpah di Indonesia serta memiliki kandungan selulosa (50-60%), lignin (5%), serta hemiselulosa (15-30%), yang berpotensi untuk dijadikan biopelet. Proses torefaksi adalah pemanasan biomassa secara perlahan dengan kisaran suhu 200 – 300 °C yang dilakukan dengan kondisi sedikit atau tanpa oksigen yang dapat mengubah limbah biomassa menjadi bahan bakar padat. Suhu dan lama waktu torefaksi merupakan faktor yang memengaruhi kualitas biopelet, di mana peningkatan keduanya meningkatkan kandungan karbon dan nilai kalor, serta menurunkan hidrogen dan oksigen dalam produk. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh suhu dan lama waktu torefaksi terhadap karakteristik pelet kulit durian, serta mengidentifikasi kombinasi perlakuan optimal untuk menghasilkan pelet berkualitas terbaik.

Penelitian disusun dalam satu Rancangan Acak Lengkap (RAL) dengan dua faktor. Faktor pertama adalah variasi suhu torefaksi yang terdiri dari 240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C. Faktor kedua adalah variasi lama waktu torefaksi yang terdiri dari 20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit. Setiap kombinasi perlakuan dilakukan dengan tiga kali ulangan sehingga terdapat 48 unit percobaan. Parameter yang dianalisis meliputi kadar air, kadar abu, massa jenis curah dan satuan, FM (fineness modulus), GMD (geometric mean diameter), nilai kalori, *durability*, warna (L^* , a^* , b^* dan E^*) dan higroskopisitas. Analisis data dilakukan menggunakan metode kuantitatif dalam bentuk deskriptif yang

meliputi tabel, grafik, dan diagram batang. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan sidik ragam (ANOVA) yang kemudian dilakukan uji lanjut Beda Nyata Terkecil (BNT) taraf 5% menggunakan excel.

Berdasarkan hasil penelitian, suhu torefaksi memberikan pengaruh signifikan terhadap kadar air, kadar abu, *volatile matter*, massa jenis curah, nilai kalori, warna, dan ketahanan (*durability*) pelet. Lama waktu torefaksi juga memengaruhi karakteristik fisik dan termal pelet, seperti kadar air, *volatile matter* (cenderung menurun), nilai kalori, dan massa jenis (cenderung meningkat). Interaksi suhu dan lama waktu torefaksi menunjukkan pengaruh signifikan terhadap kadar abu, massa jenis curah, dan nilai kalor. Perlakuan suhu 300°C menghasilkan kadar air terendah (4,11%) dan nilai kalor tertinggi (20,06 MJ/kg). Namun, kadar abu rata-rata perlakuan melebihi ambang batas SNI. Perlakuan 50 menit memberikan hasil yang optimal, meskipun disertai kecenderungan naiknya kadar abu. Kombinasi suhu 300 °C dan durasi 50 menit merupakan perlakuan paling efektif dalam meningkatkan kualitas pelet kulit durian, terutama dari aspek kadar air dan nilai kalor. Disarankan untuk melakukan uji performa langsung pada sistem pembakaran dan mempertimbangkan pemanfaatan produk sebagai *biochar*.

Kata Kunci : Kulit durian, lama waktu, nilai kalori, suhu, torefaksi

Judul Skripsi

**Pengaruh Suhu dan Lama Waktu Torefaksi
Terhadap Karakteristik Pelet dari Kulit Durian**

Nama Mahasiswa

Mangihut Tua Harahap

Nomor Pokok Mahasiswa

2114071060

Jurusan/PS

Teknik Pertanian

Fakultas

Pertanian



Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.
NIP. 196505271993031002

Dr. Siti Suharyatun, S. T.P., M.S.
NIP. 197007031998022001

Ketua Jurusan Teknik Pertanian

Prof. Dr. Ir. Warji, S. TP., M.Si., IPM.
NIP. 197801022003121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

: Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.

Sekretaris

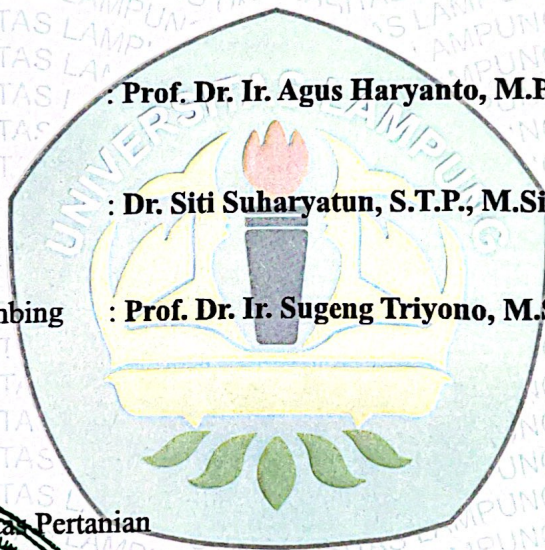
: Dr. Siti Suharyatun, S.T.P., M.Si.

Penguji

Bukan Pembimbing

: Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc.

[Handwritten signatures of Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P., Dr. Siti Suharyatun, S.T.P., M.Si., and Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc.]



2. Dekan Fakultas Pertanian



Dr. Ir. Kuswanto Futas Hidayat, M.P.

NIP. 196411181989021002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 08 Agustus 2025

PERNYATAAN KEASLIAN KARYA

Saya adalah Mangihut Tua Harahap NPM. 2114071060

Dengan ini menyatakan bahwa apa yang tertulis dalam karya ilmiah ini adalah hasil karya saya yang dibimbing oleh Komisi Pembimbing, 1) **Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P.** dan 2) **Dr. Siti Suharyatun, S.T.P., M.Si.** Berdasarkan pada pengetahuan dan informasi yang telah saya dapatkan, karya ilmiah ini berisi material yang dibuat sendiri dan hasil rujukan beberapa sumber lain (buku, jurnal, dll) yang telah dipublikasikan sebelumnya atau dengan kata lain bukanlah hasil dari plagiat karya orang lain.

Demikianlah pernyataan ini saya buat dan dapat dipertanggungjawabkan. Apabila dikemudian hari terdapat kecurangan dalam karya ini, maka saya siap mempertanggungjawabkannya.

Bandar Lampung, 03 Oktober 2025

Yang membuat pernyataan



Mangihut Tua Harahap
NPM. 2114071060

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir pada hari Kamis tanggal 01 Agustus 2002 di kota Medan, provinsi Sumatra Utara. Penulis merupakan anak pertama dari empat bersaudara, anak dari Bapak Berbahagia Partigor Harahap dan Ibu Elly Rosnauli Nainggolan. Penulis menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar (SD) Negeri 173201 Padang Parsadaan pada tahun 2008-2014 dan Sekolah Menengah Pertama (SMP) Negeri 2 Saipar Dolok Hole pada tahun 2014-2017 dan Sekolah Menengah Atas (SMA) Budi Murni 1 Medan pada tahun 2017-2020. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung pada tahun 2021 melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN). Selama menjadi mahasiswa, penulis pernah mengikuti organisasi kampus yaitu Persatuan Mahasiswa Teknik Pertanian (PERMATEP) sebagai anggota bidang PSDM pada periode kepengurusan 2024, mengikuti Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) yaitu program Pertukaran Mahasiswa Merdeka Batch 4 di Universitas Veteran Negeri Jawa Timur pada semester enam.

Pada tanggal 4 Januari 2024, penulis telah melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) periode 1 tahun 2024 selama 40 hari di desa Sumber Jaya, kecamatan Gedung Aji Baru, kabupaten Tulang Bawang. Pada tanggal 1 Juli 2024, penulis juga telah melaksanakan Praktik Umum (PU) di PT. Sharprindo Dinamika Prima, kota Tangerang, Banten, dengan judul Praktik Umum **“Penerapan Sistem After Seles Service Pada Produk Water Pump (Pompa Air) Dan Gasoline Engine (Mesin Kapal/Katinting) Di PT. Sharprindo Dinamika Prima”**.

HALAMAN PERSEMBAHAN

Puji dan syukur kepada Tuhan Yesus Kristus.

Firman-Mu itu pelita bagi kaki ku dan terang bagi jalan ku.
Mazmur 119:105

Mintalah, maka akan diberikan kepadamu; ketoklah, maka pintu akan dibukakan bagimu. Karena setiap orang yang meminta, menerima dan setiap orang yang mencari, mendapat dan setiap orang yang mengetok, baginya pintu dibukakan.
Matius 7 : 7

Orang tuaku tersayang (Berbahagia Partigor Harahap dan Elly Rosnauli Nainggolan)

Terima kasih banyak untuk bapak dan mamaku untuk setiap tetes jerih payah dan kasih sayang yang telah kalian berikan selama ini. Tidak pernah terucap kata lelah dari bapak dan mama untuk menyekolahkan ku, bahkan hingga diujung hayat bapak. Usaha dan kerja keras selalu kalian berikan untuk mencukupi kebutuhan hidup ku. Semoga dengan tergapainya gelar sarjana ini menjadi sukacita baru bagi kita semua, serta menjadi bekalku untuk menjadi orang yang berguna dan lebih baik lagi kedepannya. Titip rindu buat bapak, sehat selalu untuk kami yang telah kau tinggalkan terlebih dahulu. Sayang ku untuk bapak dan mama.

Serta

Adik-adiku (Yohana Roulina Harahap, Maudy Christen Harahap, Sertiviani Harahap)

Terima kasih untuk kalian yang selalu ada sebagai penyemangat ku, alasan ku untuk menjadi lebih baik kedepannya.
Abang sayang kalian bertiga

Motto

“Adalah baik menjadi orang penting tetapi lebih penting menjadi orang baik”.

SANWACANA

Puji dan syukur saya ucapkan kepada Tuhan Yesus Kristus, yang selalu meyertai dan memberkati perjalanan saya dengan kekuatan dan kesehatan sampai detik ini. Oleh karena kasih dan sayang-Nya segala ketidak mampuan dan kekurangan saya dalam menulis skripsi ini, Tuhan bantu untuk menghadapi dan menyelesaikannya dengan baik.

Skripsi yang berjudul ***“PENGARUH SUHU DAN LAMA WAKTU TOREFAKSI TERHADAP KARAKTERISTIK PELET DARI KULIT DURIAN”*** merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T) di Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam pelaksanaan penelitian serta penulisan masih terdapat banyak kekurangan yang masih jauh dari kata sempurna dan sudah banyak merepotkan dan meminta bantuan kepada berbagai pihak. Dikarenakan keterbatasan pengetahuan penulis, sehingga pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Dr. Ir. Kuswanta Futas Hidayat, M.P., selaku Dekan Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
3. Prof. Dr. Ir. Warji, S.TP., M.Si., IPM., selaku Ketua Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung.
4. Prof. Dr. Ir. Agus Haryanto, M.P., selaku pembimbing akademik dan pembimbing yang telah meluangkan waktu memberikan bimbingan, nasehat, kritik, dan saran

serta motivasi selama proses penyusunan skripsi.

5. Dr. Siti Suharyatun, S.T.P., M.Si., selaku dosen pembimbing kedua yang telah memberikan bimbingan, nasehat, kritik, dan saran serta motivasi selama proses penyusunan skripsi.
6. Prof. Dr. Ir. Sugeng Triyono, M.Sc. selaku dosen pembahas yang telah memberikan nasehat, kritik, dan saran sebagai perbaikan selama proses penyusunan skripsi.
7. Seluruh Dosen dan Karyawan Jurusan Teknik Pertanian Fakultas Pertanian Universitas Lampung atas segala ilmu, pengalaman serta bantuan yang telah diberikan baik dalam perkuliahan atau hal lainnya.
8. Orang tuaku tercinta Berbahagia Partigor Harahap dan Elly Rosnauli Nainggolan, terima kasih untuk pengorbanan kalian dihidupku yang sampai kapanpun tidak akan dapat ku balas. Mencapai gelar sarjana ini adalah hal yang sama-sama kita inginkan namun kita tak dapat merasakan merasakan hasil akhirnya bersama, tanpa dukungan Bapak dan Mama mungkin ini hanya akan jadi angan-angan. Sarjana yang sebenarnya adalah kalian berdua dimata anak mu ini, tak peduli dalam keadaan suka dan duka kalian selalu mengusahakan yang terbaik untuk ku. Semoga Bapak tenang di surga, salam rindu buat Bapak. Mama sehat-sehat ya, panjang umur, bahagia selalu, semoga segala pekerjaan Mama diberkati Tuhan Yesus.
9. Adik-adikku tercinta Yohana Roulina Harahap, Maudy Christen Harahap, Sertiviani Harahap, terima kasih banyak untuk kalian bertiga yang menjadi alasan bagi abang untuk terus dapat melangkahkan kaki sejauh ini. Kalian bertiga adalah adik abang yang cantik, kuat, hebat, dan sabar. Semoga Tuhan Yesus selalu memberkati setiap tumbuh kembang kalian didalam pendidikan dan kedewasaan. Abang sayang sama kalian bertiga.
10. Untuk teman seperjuangan skripsi, Triska Febiola Manik dan Bella Arsita, terima kasih banyak sudah kebersamaan dalam pengerjaan skripsi ini. Tanpa kalian berdua mungkin skripsi ini akan lebih lama terselesaikan, tak pernah henti dorongan dan bantuan yang kalian berikan untukku, mungkin ucapan terima kasih

tidak akan cukup tapi aku yakin Tuhan akan memberikan yang terbaik buat kalian. Semoga pertemanan kita ini tidak berakhir disaat masa perkuliahan kita selesai. Senang bisa mengenal kalian.

11. Keluarga Teknik Pertanian 2021 yang telah membantu saya didalam perkuliahan, dan diluar perkuliahan serta yang masih menyempatkan diri untuk ikut serta dalam proses pengerjaan skripsi ini, terima kasih banyak untuk bantuan dan partisipasinya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.
12. Tidak lupa juga untuk teman-teman PMM 4 saat di Surabaya, SONGOYUDAN, Alfamart, KELELAWAR. Terima kasih banyak untuk pertemanan baik yang kalian berikan sehingga saya dapat lebih semangat dalam pengerjaan skripsi ini.
13. Teman-teman Kuliah Kerja Nyata (KKN) Desa Sumber Jaya, Kecamatan Gedung Aji Baru, Kabupaten Tulang Bawang, yang telah kebersamaian dan memberikan pengalaman kepada penulis dimasa perkuliahan.
14. Untuk GKPA Bandar Lampung dan pemuda/pemudi semuanya, dengan sangat saya berterima kasih untuk semua dukungan yang diberikan kepada saya selama masa perkuliahan di kota Bandar Lampung ini sehingga saya berhasil menyelesaikan perkuliahan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Namun, penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan orang yang membacanya.

Bandar Lampung, 03 Oktober 2025
Penulis

Mangihut Tua Harahap

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR ISI	i
DAFTAR GAMBAR	iv
DAFTAR TABEL	viii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Hipotesis	5
1.6 Batasan Masalah	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Permasalahan Energi di Indonesia	6
2.2 Energi Alternatif.....	7
2.3 Kulit Durian	8
2.4 Torefaksi.....	9
2.4.1 Proses Torefaksi	11
2.4.2 Parameter Torefaksi	12
2.5 Biopelet	13
2.6 Karakteristik Pelet.....	14
2.7 Pembuatan Pelet.....	15

2.8 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Pelet	16
2.8.1 Kadar Air.....	17
2.8.2 Ukuran Partikel	17
2.8.3 Komposisi Kimia	18
2.8.4 Tekanan Pengepresan.....	18
III. METODE PENELITIAN	19
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	19
3.2 Alat dan Bahan	19
3.3 Rancangan Percobaan	19
3.4 Pelaksanaan Penelitian.....	20
3.4.1 Persiapan Bahan.....	21
3.4.2 Pengecilan Ukuran	22
3.4.3 Pengeringan.....	22
3.4.4 Proses Torefaksi	23
3.4.5 Penggilingan dan Pengayakan	23
3.4.7 Pencetakan Biopelet.....	24
3.4.8 Pengujian Biopelet.....	25
3.5 Analisis Data	31
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	32
4.1 Karakteristik Bahan Kulit Durian	32
4.1.1 Kadar Air Bahan Kulit Durian	34
4.1.2 Kadar Abu Bahan Kulit Durian.....	36
4.1.3 Massa Jenis Curah (g/m^3)	39
4.1.4 FM (<i>Fineness Modulus</i>) / Modulus kehalusan.....	42
4.1.5 GMD	45
4.1.6 Kalori Bahan	48
4.1.7 <i>Volatile Matter</i> Bahan Kulit Durian	49
4.2 Karakteristik Biopelet	52

4.2.1 Kadar Air Pelet.....	52
4.2.2 Massa Jenis Curah Pelet (Densitas Curah)	55
4.2.3 Massa Jenis Satuan Pelet	59
4.2.4 Uji Getar Pelet (<i>Vibration Durability Test</i>).....	62
4.2.5 Uji Warna Pelet	65
4.2.6 Higroskopis (Daya Serap Air).....	78
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	85
5.1 Kesimpulan	85
5.2 Saran	86
DAFTAR PUSTAKA.....	87

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Pasokan Energi Primer 2013-2022.....	7
2. Bauran Energi Primer 2022.....	7
3. Kulit Durian	9
4. Biopellet	16
5. Bagan Alir Pembuatan Biopellet Limbah Kulit Durian	21
6. Furnace.....	23
7. <i>Alat Press Hidrolik Bench Type</i>	24
8. Sketsa Besi Silinder Cetakan Pelet	25
9. Sampel Kulit Durian yang telah Melalui Proses Pengecilan Ukuran	32
10. Grafik Kadar Air Bahan Kulit Durian.....	34
11. Diagram Kadar Abu Bahan Kulit Durian, Hasil Menunjukkan Rata-Rata Perlakuan Melewati Ambang Batas Nilai Kadar Abu 5% (SNI 8675:2018)	37
12. Massa Jenis Curah Bahan Kulit Durian	40
13. Diagram Nilai FM (<i>Fineness Modulus</i>) / Modulus Kehalusan Bahan Kulit Durian	43
14. Diagram Nilai <i>Geometric Mean Diameter</i> (GMD) Bahan Kulit Durian.....	46
15. Nilai Kalori Bahan Kulit Durian	48
16. Volatil Matter Bahan Kulit Durian.....	50

17. Kadar Air Pelet.....	53
18. Massa Jenis Curah Pelet.....	57
19. Massa Jenis Satuan Pelet.....	60
20. Uji Getar (<i>Durability Test</i>) Pelet	63
21. Kecerahan (L^*) Pelet Kulit Durian	67
22. Kroma Merah Hijau (A^*)	70
23. Kroma Kuning Biru (B^*)	73
24. Total Warna (E^*)	75
25. Higroskopisitas (Daya Serap Air) pada Sampel Perlakuan Waktu 20 Menit dan Kombinasi Suhu (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C).....	79
26. Higroskopisitas (Daya Serap Air) pada Sampel Perlakuan Waktu 30 Menit dan Kombinasi Suhu (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C).....	80
27. Higroskopisitas (Daya Serap Air) pada Sampel Perlakuan Waktu 40 Menit dan Kombinasi Suhu (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C).....	81
28. Higroskopisitas (Daya Serap Air) pada Sampel Perlakuan Waktu 50 Menit dan Kombinasi Suhu (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C).....	82
29. Proses Pencacahan Kulit Durian	98
30. Proses Pengeringan Kulit Durian Menggunakan Alat Pengering Hybrid Tipe Rak.....	98
31. Pengukuran Kadar Air Kulit Durian Hasil Penjemuran.....	99
32. Proses Pengovenan Kulit Durian untuk Menjaga Kulit Durian Agar Dalam Kondisi Kadar Air Stabil	99
33. Proses Pembungkusan Kulit Durian Dengan Aluminium Foil yang akan Ditorefaksi	100
34. Proses Torefaksi Kulit Durian	100
35. Kulit Durian Hasil Torefaksi	101
36. Proses Penggilingan Manual Kulit Durian.....	101
37. Proses Pengayakan Bahan Kulit Durian yang Telah Menjadi Serbuk	102
38. Proses Pengukuran Curah Bahan	102
39. Proses Pengukuran Kadar Air Bahan	103

40. Proses Uji Kadar Abu Bahan Kulit Durian	103
41. Proses Uji Volatil Bahan Kulit Durian	104
42. Uji Kalori Bahan Kulit Durian	104
43. Proses Pencetakan Pelet Kulit Durian	105
44. Uji Kadar Air Pelet Kulit Durian	105
45. Proses Uji Massa Jenis Curah Pelet	106
46. Proses Uji Getar Pelet	106
47. Proses Uji Higroskopis (Daya Serap Air) Pelet	107
48. Proses Uji Warna Pelet	107
49. Pelet Hasil Torefaksi Perlakuan Waktu 20 Menit (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C)	108
50. Pelet Hasil Torefaksi Perlakuan Waktu 30 Menit (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C)	108
51. Pelet Hasil Torefaksi Perlakuan Waktu 40 Menit (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C)	109
52. Pelet Hasil Torefaksi Perlakuan Waktu 50 Menit (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C)	109
53. Hasil Torefaksi Bahan Kulit Durian Perlakuan Tanpa Torefaksi	110
54. Hasil Torefaksi Bahan Kulit Durian Perlakuan (240 °C, 50 Menit)	111
55. Hasil Torefaksi Bahan Kulit Durian Perlakuan (260 °C, 50 Menit)	112
56. Hasil Torefaksi Bahan Kulit Durian Perlakuan (280 °C, 50 Menit)	113
57. Hasil Torefaksi Bahan Kulit Durian Perlakuan (300 °C, 50 Menit)	114
58. Data Nilai FM Dan GMD Bahan Kulit Durian	115
59. Data Nilai Kadar Air Bahan Kulit Durian	115
60. Data Nilai Kadar Abu Bahan Kulit Durian	116
61. Data Nilai Volatil Bahan Kulit Durian	116
62. Data Massa Jenis Curah Bahan Kulit Durian	117
63. Data Nilai Kalori Kulit Durian Pada Perlakuan Torefaksi Suhu 240, 260, 280, 300 °C Dengan Waktu 50 Menit	117
64. Data Nilai Kadar Air Pelet Kulit Durian	118

65. Data Nilai Uji Higroskopis Pelet Kulit Durian	118
66. Data Nilai Massa Jenis Curah Pelet Kulit Durian	119
67. Data Nilai Massa Jenis Satuan Pelet Kulit Durian.....	119
68. Data Nilai Uji Getar (<i>Durability</i>) Pelet Kulit Durian.....	120

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Standar Biopellet Biomassa Dibeberapa Negara.....	14
2. Mutu Biopellet Biomassa Standar Nasional Indonesia (SNI) 8675:2018.....	15
3. Kombinasi Perlakuan	20
4. Karakteristik Bahan Kulit Durian Setelah Proses Torefaksi	33
5. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kadar Air Bahan Kulit Durian	35
6. Tabel Dua Arah Hasil Uji BNT Pengaruh Suhu Torefaksi dan Pengaruh Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kadar Air Bahan Kulit Durian.....	36
7. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Terhadap Nilai Kadar Abu Bahan Kulit Durian.....	38
8. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Terhadap Nilai Kadar Abu Bahan Kulit Durian.....	38
9. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Terhadap Nilai Massa Jenis Curah Bahan Kulit Durian.....	40
10. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Terhadap Nilai Massa Jenis Curah Bahan Kulit Durian.....	41
11. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai FM (<i>Fineness Modulus</i>) / Modulus Kehalusan Bahan Kulit Durian	43

12. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai FM (<i>Fineness Modulus</i>) / Modulus Kehalusan Bahan Kulit Durian	44
13. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai GMD (<i>Geometric Mean Diameter</i>) Bahan Kulit Durian.....	46
14. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai GMD (<i>Geometric Mean Diameter</i>) Bahan Kulit Durian.....	47
15. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Volatile Matter Bahan Kulit Durian.....	51
16. Tabel Dua Arah Uji BNT Pengaruh Suhu Torefaksi Terhadap Nilai <i>Volatile Matter</i> Bahan Kulit Durian	51
17. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kadar Air Pelet.....	54
18. Tabel Dua Arah Uji BNT Pengaruh Suhu Torefaksi dan Pengaruh Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kadar Air Pelet	55
19. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Massa Jenis Curah Pelet	57
20. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Massa Jenis Curah Pelet	58
21. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Massa Jenis Satuan Pelet	61
22. Tabel Dua Arah Hasil Uji BNT Pengaruh Suhu Torefaksi Terhadap Nilai Massa Jenis Satuan Pelet.....	62
23. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Uji Getar (<i>Durability Test</i>) Pelet.	64
24. Uji BNT Pengaruh Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Uji Getar (<i>Durability Test</i>) Pelet	65
25. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kecerahan (L^*) Pelet Kulit Durian.....	68
26. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kecerahan (L^*) Pelet.....	68

27. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kroma Merah Hijau (A^*) Pelet	70
28. Uji BNT Nilai Kroma Merah Hijau (A^*) pada Perlakuan Interaksi Suhu dan Waktu.....	71
29. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kroma Kuning Biru (B^*) Pelet.....	73
30. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Kroma Kuning Biru (B^*) Pelet.....	74
31. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Total Warna (E^*) Pelet	76
32. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Total Warna (E^*) Pelet	77
33. ANOVA Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Uji Higroskopis (Daya Serap Air) Pelet	83
34. Uji BNT Pengaruh Suhu dan Waktu Torefaksi Terhadap Nilai Higroskopis (Daya Serap Air) Pelet	84

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ketersediaan energi fosil yang terbatas pada peningkatan penggunaan energi untuk memenuhi kebutuhan energi di seluruh dunia contohnya dalam kehidupan sehari-hari hampir selalu berkaitan dengan produk-produk yang berasal dari minyak bumi, seperti *Liquified Petroleum Gases* (LPG), bensin, *aviation turbine fuel* (avtur), bahan bakar diesel, minyak pelumas, aspal, kerosin, dan sebagainya (Rahmayanti *et al.*, 2021). Pemerintah menyusun sebuah strategi dalam pencarian sumber energi terbarukan untuk menuju karbon netral di Indonesia (Yudiartono *et al.*, 2022). Dalam penelitiannya (Afriyanti *et al.*, 2020) menyatakan bahwa konsumsi energi adalah salah satu bagian integral dalam pembangunan ekonomi dengan meningkatkan gaya hidup, daya saing ekonomi, dan pertumbuhan.

Energi alternatif yang sedang diteliti dan terus dikembangkan di Indonesia yang dilihat dari sumber dan produk yang dihasilkan antara lain: energi panas bumi, energi air, energi angin, biodiesel, serta biomassa (Nugraha *et al.*, 2019). Biomassa memiliki potensi yang cukup besar untuk dijadikan biopellet dan biobriket. Salah satu biomassa yang keberadaannya masih banyak di lingkungan masyarakat Indonesia adalah kulit durian. Peminatan masyarakat terhadap durian semakin tinggi dan terus meningkat. Produksi buah durian pada tahun 2019 mencapai 1.169.802 ton dan mengalami peningkatan hingga tahun 2023 mencapai 1.852.045 ton. Pada buku *Angka Tetap Hortikultura Tahun 2023* (Direktorat Jenderal Hortikultura, Kementerian Pertanian, 2024) dijelaskan produksi tanaman buah tahun 2023 dibandingkan dengan tahun 2022 mengalami peningkatan sebesar 1,75% yaitu dari 28.175.535 ton pada tahun 2022 menjadi 28.667.649 ton pada tahun 2023 dengan persentase peningkatan produksi buah

durian sebesar 17,06% dari total produksi buah yang ada. Peningkatan produksi durian ini menyebabkan bertambahnya limbah kulit durian yang menjadi salah satu penyebab utama pencemaran lingkungan yang dapat menimbulkan berbagai penyakit, bau busuk, sifatnya yang sulit terurai, serta mengurangi nilai estetika kawasan perkotaan (Herlambang *et al.*, 2017). Pada penelitian (Nugraha *et al.*, 2019), menyatakan bahwa kulit durian perlu dimanfaatkan secara lebih baik untuk meningkatkan nilai ekonomis dan memiliki manfaat yang lebih. Agar kulit durian ini dapat memiliki nilai tinggi, salah satu caranya adalah dengan mengubah kulit durian menjadi bahan bakar padat. Menurut pernyataan (Widhiantari *et al.*, 2020) kurangnya keterampilan dan pengetahuan masyarakat terhadap pengelolaan limbah kulit durian yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal karena sifatnya yang sulit terurai. Namun, berdasarkan struktur dan karakteristiknya, limbah kulit durian memiliki potensi untuk diolah menjadi produk bioenergi, seperti pelet yang dapat memberikan manfaat bagi lingkungan dan ekonomi.

Kulit durian mengandung komponen organik yang kaya, seperti selulosa dengan kandungan yang cukup tinggi (50-60%), lignin dengan kandungan (5%), dan hemiselulosa (15-30%) (Khairiah & Haryadi, 2019) yang dapat dimanfaatkan melalui proses torefaksi. Menurut penelitian (Amrul *et al.*, 2019) torefaksi pada sampah ataupun limbah biomassa dapat menghasilkan bahan bakar padat dengan kualitas nilai kalor mencapai 6.000 kcal/kg hampir setara dengan batu bara Sub-bituminous. Proses torefaksi ini melibatkan pemanasan bahan organik dalam suasana tanpa oksigen. Hasilnya adalah produk yang lebih stabil dan bernilai energi tinggi, yang dapat diproses menjadi pelet. Menurut (Syamsiro, 2016) torefaksi adalah pemanasan biomassa secara perlahan dengan kisaran suhu 200 – 300 °C yang dilakukan dengan kondisi sedikit atau tanpa oksigen. Pelet kulit durian memiliki potensi untuk digunakan sebagai bahan bakar alternatif dalam industri dan rumah tangga.

Suhu dan lama waktu torefaksi adalah dua faktor kritis yang memengaruhi hasil akhir dari biopelet (Maryenti *et al.*, 2017). Kandungan karbon dalam produk biopelet meningkat pada suhu torefaksi dan waktu torefaksi yang lebih tinggi dan lebih lama,

sementara kandungan hidrogen dan oksigen menurun, meningkatkan nilai kalor dari biomassa (Ramadhan, 2017). Maryenti *et al.* (2017) menyatakan suhu yang lebih tinggi cenderung meningkatkan laju dekomposisi komponen organik, yang pada gilirannya dapat meningkatkan nilai kalori pelet. Namun, suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kerusakan struktural, yang berdampak negatif pada kualitas pelet. Oleh karena itu, pemilihan suhu yang tepat sangat penting untuk mencapai keseimbangan antara kualitas dan efisiensi produksi. Torefaksi merupakan suatu perlakuan termal atau panas menggunakan suhu antara 200 °C sampai 300 °C pada tekanan atmosfer tanpa oksigen, pada perlakuan temperatur secara optimal dapat menghasilkan produk torefaksi yang memiliki nilai kalor yang tinggi dibandingkan dengan produk biomassa mentah. Peningkatan nilai kalor disebabkan oleh bertambahnya fraksi karbon dalam produk, disertai dengan penurunan fraksi oksigen dan hidrogen yang terlepas bersama komponen selulosa serta beberapa senyawa organik, seperti air, asam asetat, dan fenol, selama berlangsungnya proses torefaksi (Uemura *et al.*, 2011).

Peningkatan kandungan karbon terjadi karena hemiselulosa serta sebagian selulosa dan lignin terdekomposisi. Dekomposisi termal terhadap hemiselulosa menjadikan zat volatil akan menyebabkan rasio O/C dan H/C mengalami penurunan sehingga meningkatkan kadar karbon pada produk torefaksi (Suastika, 2019). Selain suhu, lama waktu pada proses torefaksi sangat memainkan peran dalam hasil akhir biopelet seperti nilai kalor, kadar abu, dan kadar air (Anita, 2019). Waktu yang lebih lama memungkinkan proses dekomposisi berlangsung lebih lanjut, tetapi dapat menyebabkan hilangnya komponen yang berharga. Dalam penelitian ini, penting untuk menemukan durasi optimal yang dapat menghasilkan pelet berkualitas tinggi dengan sifat fisik dan kimia yang diinginkan.

Dengan meningkatnya perhatian terhadap keberlanjutan dan pengurangan limbah, penelitian mengenai pemanfaatan kulit durian sebagai bahan baku pelet menjadi relevan. Penelitian ini tidak hanya bertujuan untuk mengeksplorasi pengaruh suhu dan lama waktu torefaksi terhadap karakteristik pelet, tetapi juga untuk memberikan wawasan tentang potensi pemanfaatan limbah pertanian di Indonesia. Hasil penelitian

ini diharapkan dapat memberikan kontribusi bagi pengembangan teknologi energi terbarukan yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Secara keseluruhan, penelitian ini berusaha untuk menjawab pertanyaan penting mengenai bagaimana suhu dan lama waktu torefaksi memengaruhi kualitas pelet dari kulit durian. Dengan melakukan eksperimen yang sistematis dan analisis yang mendalam, diharapkan penelitian ini dapat menghasilkan rekomendasi yang berguna bagi industri pelet dan pengelolaan limbah pertanian di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Seperti yang sudah disampaikan dan dijelaskan pada latar belakang di atas maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh suhu torefaksi terhadap karakteristik pelet kulit durian?
2. Bagaimana pengaruh lama waktu torefaksi terhadap karakteristik pelet kulit durian?
3. Bagaimana pengaruh kombinasi suhu dan lama waktu torefaksi terhadap karakteristik pelet dari kulit durian?

1.3 Tujuan Penelitian

Dilakukannya penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengetahui pengaruh suhu torefaksi terhadap karakteristik pelet kulit durian.
2. Mengetahui pengaruh lama waktu torefaksi terhadap karakteristik pelet kulit durian.
3. Menentukan kombinasi perlakuan yang menghasilkan kualitas pelet terbaik.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Mendapatkan inovasi baru dengan memberikan alternatif pemanfaatan limbah kulit durian serta meningkatkan nilai ekonomi pelet dari limbah kulit durian dan membantu mencukupi kebutuhan energi di Indonesia.
2. Mendukung pengembangan praktik pengelolaan limbah yang berkelanjutan.

1.5 Hipotesis

Adapun hipotesis yang mendasari penelitian ini adalah

1. Suhu torefaksi berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia pelet kulit durian.
2. Lama waktu torefaksi berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia pelet kulit durian.
3. Interaksi suhu torefaksi dan lama waktu torefaksi berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan kimia pelet kulit durian.

1.6 Batasan Masalah

Penelitian menggunakan kombinasi suhu torefaksi (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C) dan lama waktu torefaksi (20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit). Limbah kulit durian diperoleh dari kota Bandar Lampung tanpa menentukan jenis durian secara spesifik.

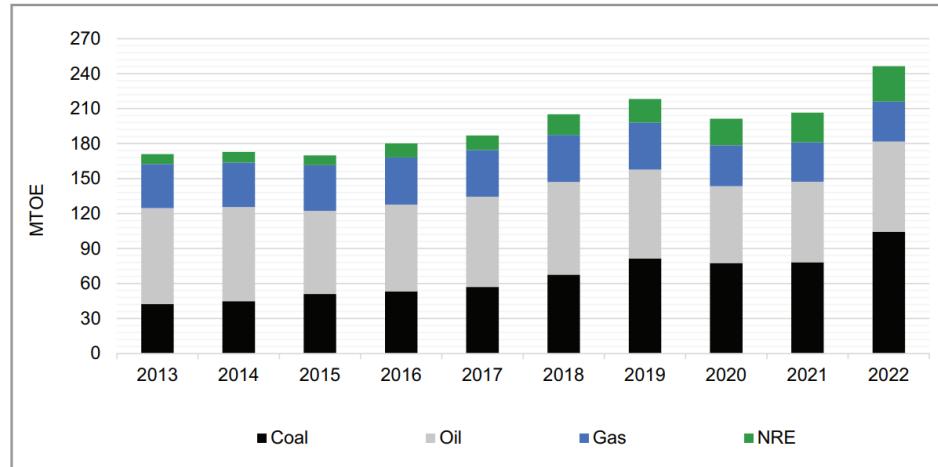
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Permasalahan Energi di Indonesia

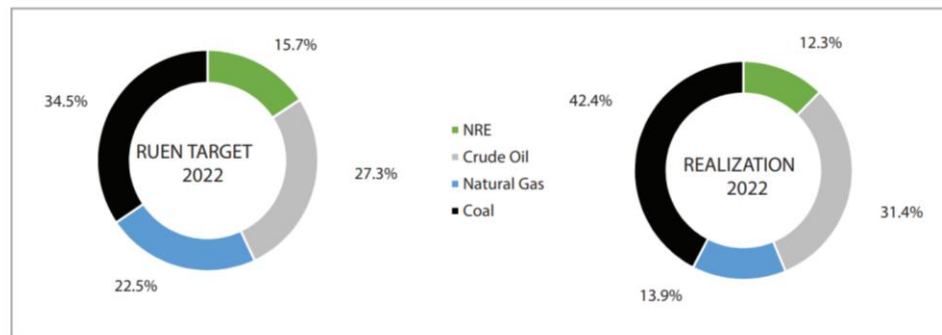
Indonesia sangat bergantung pada pemanfaatan energi fosil untuk melaksanakan aktivitas sehari-hari. Waktu ke waktu konsumsi energi fosil makin ramai digunakan oleh masyarakat sehingga mengakibatkan penggunaan energi fosil semakin meningkat yang menimbulkan tipisnya cadangan energi fosil di Indonesia. Hal ini berpengaruh pada stabilitas negara yang memerlukan transisi energi dari penggunaan energi fosil menuju Energi Baru Terbaharukan (EBT) (Kalpikajati & Hermawan, 2022). Hasil data dari penelitian (Septyani & Hartati, 2024) menunjukkan bahwa konsumsi energi fosil di Indonesia (gas bumi, batubara dan minyak bumi) telah mencapai 88%. Oleh sebab itu, sektor energi mempunyai peran penting dalam meningkatkan kegiatan ekonomi dan ketahanan nasional. Pengelolaan energi harus terus dimanfaatkan secara berkelanjutan, agar sektor energi dapat dimanfaatkan dalam jangka panjang yang terintegritas pada pengembangan sumber daya energi sehingga menjamin ketersediaan energi dalam jangka waktu yang panjang (Sugiyono, 2015).

Menurut riset (Suharyati *et al.*, 2024) pada buku *Outlook Energi Indonesia*, total pasokan energi primer pada tahun 2022 mencapai 87% atau 246 juta TOE (*Tonne of Oil Equivalent*), meningkat sekitar 19% dari tahun sebelumnya sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Berdasarkan jenis energinya, pemanfaatan Batubara masih mendominasi sekitar 42%, disusul dengan minyak 31% dan gas 14%. Pada tahun 2022, pasokan EBT mencapai 30 juta TOE, atau 12,3% dari total pasokan energi primer. Namun kondisi capaian EBT masih dibawah proyeksi RUEN (Rencana Umum Energi Nasional) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Meskipun demikian, masih ada

harapan untuk meningkatkan bauran energi EBT dalam waktu kurang dari 3 tahun kedepan, walaupun sulit untuk mencapai target 23% EBT pada tahun 2025.



Gambar 1. Pasokan Energi Primer 2013-2022 (Suharyati *et al.*, 2024)



Gambar 2. Bauran Energi Primer 2022 (Suharyati *et al.*, 2024)

2.2 Energi Alternatif

Energi primer dunia saat ini masih didominasi oleh minyak bumi, batubara, gas alam, nuklir, dan hidroelektrik. Tiga urutan terbesar dari energi primer tersebut berupa bahan bakar fosil yang suatu saat akan habis akan habis. Untuk menjamin keamanan pasokan energi nasional di masa depan, perlu kiranya segera mencari sumber energi baru sebagai energi alternatif yang bersifat terbarukan, sebagaimana juga tertuang dalam sasaran bauran energi (*energy mix*) nasional 2025 (Hardianto *et al.*, 2013).

Selama ini, sampah dikenal sebagai salah satu sumber masalah khususnya di kota-kota besar di Indonesia, banyak orang tidak tahu bahwasanya sampah memiliki potensi sebagai sumber bahan bakar alternatif untuk dikembangkan. Melihat keadaan tersebut diperlukan suatu metode yang tepat untuk dapat mengelola sampah dan memanfaatkan sampah menjadi salah satu sumber energi alternatif. Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengkonversi sampah menjadi bahan bakar padat adalah torefaksi. Torefaksi pada sampah dapat menghasilkan bahan bakar padat setara batu bara Sub-bituminous (Amrul *et al.*, 2019). Sampah dapat dibagi menjadi 4 (empat) kategori: sampah kota, limbah pertanian, limbah peternakan dan limbah kayu. Biomassa menjadi salah satu komponen utama penyusun dari sampah.

Biomassa merupakan limbah padat yang memiliki potensi untuk dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi. Jenis biomassa mencakup limbah kayu, limbah hasil pertanian, limbah dari kegiatan perkebunan, limbah hutan, serta bahan organik yang berasal dari sektor industri maupun rumah tangga. Dengan sifatnya yang menguntungkan yaitu sumber energi ini dapat dimanfaatkan secara lestari karena sifatnya yang dapat diperbaharui (*renewable resources*), sumber energi ini relatif tidak mengandung unsur sulfur sehingga tidak menyebabkan polusi udara dan juga dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan sumber daya hutan dan pertanian (Dharma, 2013). Oleh karena itu, biomassa menjadi salah satu sumber energi alternatif yang memiliki potensi besar untuk dikonversi menjadi energi terbarukan (Maulana *et al.*, 2020). Pemanfaatan biomassa secara optimal dapat mengurangi emisi karbon ke atmosfer sekaligus mengkonversinya menjadi produk yang bernilai guna, salah satu bentuk konversi biomassa adalah konversi serbuk kayu dan sekam padi menjadi biopellet (Istaniah *et al.*, 2024).

2.3 Kulit Durian

Durian (*Durio zibethinus* Murr.), sering dijuluki "The King of Fruit," merupakan buah dengan produksi yang melimpah dan digemari oleh berbagai lapisan masyarakat karena cita rasanya yang khas. Tumbuhan ini banyak ditemukan di hutan maupun kebun masyarakat, dengan ciri buah berbentuk besar, bulat atau oval, serta aroma dan rasa

yang unik. Namun, hanya sekitar 20,52% dari berat total buah berupa daging yang dapat dikonsumsi, sementara sisanya (79,08%) terdiri atas kulit dan biji yang tidak dimakan (Fitriana *et al.*, 2023). Kulit durian, yang mengandung 50–60% selulosa, menunjukkan potensi pemanfaatan sebagai bahan baku untuk produk bernilai tambah (Kurniawan W *et al.*, 2015). Di dalam penelitian (Aimi *et al.*, 2014) dijelaskan bahwa kulit durian memiliki kandungan selulosa yang tinggi (60,45%), lignin (15,45%) dan hemiselulosa (13,09%) sehingga berpotensi untuk dijadikan bahan campuran dalam pembuatan biobriket. Dari karakteristik sifat-sifat dan kandungan yang dimiliki kulit durian, sehingga dapat dimanfaatkan bukan hanya untuk campuran dalam pembuatan biobriket, tetapi dapat juga digunakan sebagai bahan campuran dalam berbagai produk seperti, seperti papan partikel, papan semen, bahan pengisi (*filler*), pelet biomassa, campuran bahan baku obat nyamuk, dan produk lainnya (Prabowo, 2009).



Gambar 3. Kulit Durian

2.4 Torefaksi

Torefaksi adalah proses pengolahan secara termokimia untuk bahan baku yang mengandung karbon seperti biomassa (limbah kulit durian) (Irawan *et al.*, 2015). dalam kondisi atmosfer dan dalam kisaran suhu 230 – 300 °C. Chuchita *et al.* (2022) menyatakan bahwa torefaksi dilakukan untuk meningkatkan nilai kalor dari biomassa dan menurunkan kelemahan-kelemahan dari biomassa seperti rendahnya nilai kalor

dan densitas energi, kelembapan tinggi, efisiensi pembakaran rendah dan energi penggilingan yang tinggi. Keuntungan dilakukannya proses torefaksi adalah mendapatkan sedikitnya kandungan air pada produk biopelet sehingga akan memiliki sifat yang sulit menyerap air dari udara (Li *et al.*, 2012). Proses torefaksi diaplikasikan untuk membuat pelet torefaksi, yang dapat digunakan sebagai bahan baku berkualitas tinggi untuk gasifikasi produksi syngas berkualitas tinggi dan sebagai pengganti batu bara dalam pembangkit listrik termal dan proses metalurgi (Chen *et al.*, 2015).

Kualitas produk biomassa hasil torefaksi dipengaruhi oleh karakteristik biomassa, suhu, dan durasi proses torefaksi. Durasi yang terlalu lama dalam proses torefaksi dapat menyebabkan hilangnya sejumlah komponen energi, yang pada akhirnya mengurangi kandungan energi total dalam biomassa. Pada penelitian Dethan* *et al.* (2023), Alfernando *et al.* (2023) dan Adriansyah. (2024) variasi suhu torefaksi yang digunakan adalah 200-300 °C dan waktu torefaksi 10-90 menit. Oleh karena itu, proses torefaksi sebaiknya tidak dilakukan dalam waktu yang terlalu lama (Irawan *et al.*, 2015). Proses torefaksi pada biomassa efektif dalam meningkatkan karakteristiknya sebagai bahan bakar. Hal ini ditunjukkan oleh peningkatan nilai kalor, tingginya densitas energi, rendahnya kandungan air, serta sifat hidrofobiknya (Chen & Kuo, 2011). Menurut (Syamsiro, 2016) , perlakuan panas pada suhu tinggi dapat menurunkan kandungan hemiselulosa dan melunakkan lignin, yang pada akhirnya menyebabkan penurunan massa. Proses torefaksi merupakan salah satu teknologi canggih yang digunakan dalam pengolahan biomassa. Biomassa hasil torefaksi memiliki kualitas yang mendekati batubara dan dalam beberapa aspek bahkan lebih unggul, di antaranya:

1. Memiliki kadar air dan abu yang lebih rendah;
2. Bebas dari kotoran berbahaya, terutama belerang;
3. Mengurangi dampak ekologis secara keseluruhan terhadap lingkungan.

Metode torefaksi pada biomassa menawarkan keuntungan berupa peningkatan kandungan energi. Pelet bahan bakar yang dihasilkan melalui proses torefaksi dapat mencapai kepadatan energi sebesar 14 MJ/kg, yang sebanding dengan kualitas batubara berjenis rendah (van der Stelt *et al.*, 2011). Selain itu, biomassa yang telah melalui

proses torefaksi menunjukkan sifat hidrofobik, yaitu ketahanan terhadap penyerapan air, tahan terhadap kelembapan, serta dapat disimpan di lingkungan terbuka (Acharjee *et al.*, 2011).

2.4.1 Proses Torefaksi

Pada penelitian (Nasution & Limbong, 2017) menyatakan bahwasanya proses torefaksi dibagi menjadi beberapa langkah, sebagai berikut:

a. Pemanasan Awal (*Predrying*)

Proses pemanasan awal, yang juga dikenal sebagai torefaksi ringan, merupakan tahap pemanasan biomassa dari suhu ruang hingga mencapai suhu pengeringan, yaitu sekitar 100 °C (Basu, 2013). Pada tahap ini, air yang terkandung dalam biomassa akan menguap. Ketika suhu mendekati 200 °C, kandungan air dalam biomassa sepenuhnya terlepas akibat perpindahan panas. Selain itu, selama pemanasan awal, sebagian massa biomassa juga mengalami penurunan.

b. Pengeringan (*Drying*)

Pada tahap ini, suhu dinaikkan dari 100 °C dengan tujuan menguapkan kandungan air yang terdapat dalam biomassa. Dengan mempertahankan suhu yang stabil, air pada permukaan biomassa secara bertahap akan menguap hingga menghilang sepenuhnya (Basu, 2010).

c. Pengeringan Lanjut (*Postdrying*)

Pada tahap ini, pemanasan dilanjutkan dengan peningkatan suhu hingga mencapai 200 °C, sebelum proses torefaksi berlangsung. Selama tahap ini, biomassa akan mengalami kehilangan senyawa organik dan unsur-unsur yang terkait dengan kandungan kelembaban (Bergman *et al.*, 2005).

d. Torefaksi

Tahap torefaksi merupakan tahap utama dalam seluruh proses, di mana biomassa mengalami depolimerisasi. Selama proses torefaksi, akan terjadi reaksi eksotermis yang terbentuk pada suhu antara 250-300 °C. Proses ini memerlukan waktu tertentu

agar suhu yang diberikan dapat tercapai secara optimal dan sesuai dengan kondisi yang diinginkan (Prins, 2005).

e. Pendinginan

Pada tahap ini biomassa yang sudah keluar dari proses torefaksi dengan suhu tinggi, mengalami oksidasi ketika terkena udara, maka dari itu perlu penanganan lebih lanjut dengan melakukan proses pendinginan.

2.4.2 Parameter Torefaksi

Selama proses torefaksi dilakukan ada beberapa parameter-parameter yang mempengaruhi selama proses berlangsung diantaranya:

a. Temperatur

Selama proses torefaksi, pengontrolan suhu sangat penting karena degradasi termal pada biomassa sangat bergantung pada suhu yang diterapkan. Jika suhu yang diberikan lebih tinggi, hal ini akan mempengaruhi massa produk yang dihasilkan. Peningkatan suhu dapat mengurangi jumlah massa padatan yang terbentuk, namun pada saat yang sama meningkatkan nilai kalor bahan bakar padat. Selain itu, peningkatan suhu akan menyebabkan penurunan kandungan hidrogen dan oksigen, serta meningkatkan kandungan karbon dalam biomassa (Bridgeman *et al.*, 2008).

b. Waktu Tinggal

Selama proses torefaksi, durasi waktu tinggal sangat berpengaruh terhadap degradasi termal biomassa. Peningkatan pemanasan yang dilakukan secara cepat dapat membedakan antara pirolisis dan torefaksi. Jika waktu tinggal diperpanjang, massa produk padatan akan menurun dan menghasilkan energi padatan yang lebih tinggi. Efek dari waktu tinggal yang lebih lama akan menyebabkan penurunan massa biomassa, dengan penurunan signifikan tercatat setelah sekitar satu jam (van der Stelt *et al.*, 2011).

c. Jenis Biomassa

Jenis biomassa memiliki pengaruh terhadap produk yang dihasilkan dari proses torefaksi. Selama reaksi torefaksi, kandungan hemiselulosa pada biomassa cenderung mengalami degradasi, karena peningkatan kadar hemiselulosa dalam biomassa dapat menyebabkan kerugian dalam proses tersebut (Anita, 2019).

d. Ukuran Partikel

Ukuran partikel biomassa berperan penting dalam proses torefaksi, meskipun perbedaan ukuran partikel yang tidak terlalu mencolok pada ukuran normal dapat terjadi akibat perpindahan panas dari reaktor ke biomassa. Peningkatan ukuran partikel akan berpengaruh pada peningkatan diameter dan volume produk, karena ukuran partikel memiliki dampak signifikan terhadap hasil akhir proses torefaksi (Basu, 2013).

2.5 Biopellet

Biopellet merupakan bahan bakar padat dihasilkan dengan cara mencetak biomassa dan berbentuk silinder panjang 6 sampai 25 mm dan diameter 12 mm yang dibuat dengan cara menekan biomassa (Rusdianto *et al.*, 2014). Salah satu jenis energi biomassa, yang dikenal sebagai biopellet, diciptakan di Swedia pada tahun 1980 menggunakan serbuk gergaji industri kayu. Biopellet memiliki beberapa keunggulan sebagai bahan bakar alternatif, di antaranya adalah densitas energi yang tinggi, kemudahan dalam proses penyimpanan, dan kemudahan dalam penanganan. Karakteristik ini menjadikannya pilihan yang efisien dan praktis untuk aplikasi energi berbasis biomassa. Beberapa faktor kunci yang mempengaruhi kekuatan struktural dan ketahanan biopellet mencakup jenis bahan baku yang digunakan, kadar air di dalamnya, ukuran partikel bahan, kondisi pengempaan selama proses produksi, penggunaan bahan perekat tambahan, jenis alat densifikasi yang digunakan, serta perlakuan pascaproduksi (Lehmann *et al.*, 2012). Setiap variabel ini memiliki peran yang signifikan dalam menentukan kualitas akhir biopellet. Misalnya, kadar air yang terlalu tinggi dapat mengurangi kepadatan energi dan daya bakar, sementara ukuran partikel dan tekanan pengempaan mempengaruhi kepadatan dan ketahanan fisik pellet. Kondisi peralatan densifikasi juga menentukan homogenitas dan stabilitas biopellet. Sedangkan

penambahan perekat dapat meningkatkan kekuatan ikatan antar partikel, sehingga meningkatkan daya tahan biopelet selama penyimpanan dan transportasi. Perlakuan pascaproduksi, seperti pengeringan atau pendinginan, berfungsi untuk menstabilkan biopelet, memperpanjang umur simpan, serta meningkatkan kualitas pembakaran. Melalui kontrol ketat terhadap faktor-faktor ini, kualitas dan performa biopelet sebagai bahan bakar alternatif yang andal dan ramah lingkungan dapat dioptimalkan. Standar biopelet biomassa pada berbagai negara dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Standar Biopelet Biomassa Dibeberapa Negara

Parameter	Unit	Austria	Jerman	Swedia	South Korea
Kadar air	%	<10	<12	<10	≤10
Kadar Abu	%	<0,50	<1,50	<0,7	≤0,7
Nilai Kalor	Mj/kg	>18	17,5-19,5	<19,08	≥18,0

Sumber : (Sutmoko *et al.*, 2013)

2.6 Karakteristik Pelet

Karakterisasi dapat digunakan sebagai parameter untuk menilai kualitas pelet yang dihasilkan. Menurut (Sutmoko *et al.*, 2013), karakterisasi pelet dapat ditentukan melalui pengujian nilai kalor dan kadar abu, di mana kadar abu terdiri atas komponen seperti lempung, silika, dan kalsium. Abu sendiri merupakan residu pembakaran yang tidak lagi mengandung unsur karbon. Selain itu, karakterisasi juga dapat ditentukan melalui berbagai perlakuan terhadap pelet, seperti pengujian kadar air, kadar zat terbang, kadar abu, karbon terikat, kerapatan, kuat tekan, dan nilai (Wibowo *et al.*, 2016). Mutu biopelet biomassa dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Mutu Biopellet Biomassa Standar Nasional Indonesia (SNI) 8675:2018

Parameter Uji	Satuan, Min/Maks	Rumah Tangga	Industri
Kadar air	(%) Maks	10	12
Kadar zat terbang	(%) Maks	75	80
Kadar abu	(%) Maks	5	5
Kadar karbon terikat	(%) Min	14	14
Kerapatan	(g/cm ³) Min	0,6	0,8
Nilai kalor	(Mj/kg) Min	16,5	16,5

Proses pembuatan biopellet terdiri atas dua tahapan utama. Tahap pertama adalah pengolahan pendahuluan, yang meliputi pencacahan, pengeringan, dan penggilingan bahan baku. Tahap kedua adalah proses pembuatan biopellet, yang mencakup pencetakan, pendinginan, dan pengeringan. Pembentukan bahan menjadi biopellet bertujuan untuk mereduksi volume material, sehingga mempermudah proses pemindahan dan menekan biaya transportasi (Zamirza, 2009).

2.7 Pembuatan Pellet

Pada penelitian ini, proses pembuatan biopellet dilakukan melalui serangkaian tahap yang dimulai dengan pengumpulan limbah kulit durian. Kulit durian kemudian diperkecil ukurannya melalui proses pencacahan, diikuti dengan proses pengeringan menggunakan alat pengering tipe rak hingga kadar air sekitar 10%. Setelah itu, kulit durian yang telah dikeringkan mengalami proses torefaksi pada berbagai variasi suhu (240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C) dan durasi (20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit). Kulit durian yang telah selesai ditorefaksi kemudian dihaluskan melalui proses penggilingan. Tahap berikutnya adalah pencetakan biopellet menggunakan alat *Press Hidrolik Bench Type* dengan kapasitas 20 ton dan tekanan sebesar 3 ton, diikuti oleh proses pendinginan. Dalam pembuatan biopellet, jumlah bahan baku yang digunakan ditetapkan sebesar 3 gram per pellet.



Gambar 4. Biopellet

Keberhasilan proses ini sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, baik dari aspek proses maupun bahan baku. Faktor proses meliputi suhu cetakan, durasi penekanan (waktu tinggal), tingkat tekanan, serta bentuk dan ukuran pelet yang dihasilkan. Sementara itu, faktor bahan baku melibatkan karakteristik kimia, seperti kandungan lignin, selulosa, dan hemiselulosa, kadar air, ukuran partikel, serta jenis bahan baku, yaitu limbah kulit durian. Semua faktor ini dipertimbangkan secara cermat untuk memastikan kualitas biopellet yang dihasilkan optimal.

2.8 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Pelet

Karakteristik pelet biomassa sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, antara lain kadar air, ukuran partikel, komposisi kimia bahan baku, dan tekanan pengepresan. Kadar air berperan penting dalam proses pembentukan ikatan antar partikel selama peletisasi. Kandungan air yang optimal memungkinkan terbentuknya ikatan melalui gaya adhesi dan kohesi, namun jika kelembapan terlalu tinggi, nilai kalor pembakaran akan menurun dan pelet menjadi sulit dinyalakan (Jiang *et al.*, 2019). Selain itu, ukuran partikel bahan baku turut menentukan kerapatan dan kekuatan mekanik pelet yang dihasilkan. Partikel berukuran lebih kecil cenderung menghasilkan pelet yang lebih padat dan kuat karena dapat mengisi celah antar partikel secara efisien, sehingga

meningkatkan densitas massa (Ahmed *et al.*, 2021). Komposisi kimia bahan baku juga memengaruhi kualitas pelet, khususnya kandungan lignin yang berfungsi sebagai perekat alami. Lignin akan melunak pada suhu tinggi dan membantu membentuk ikatan antar partikel, sementara kandungan abu yang tinggi dapat mengurangi kekuatan dan durabilitas pelet (Mittal *et al.*, 2024). Faktor lain yang tidak kalah penting adalah tekanan pengepresan selama proses peletisasi. Tekanan tinggi dapat meningkatkan kepadatan dan kekuatan pelet dengan memampatkan partikel biomassa ke dalam bentuk yang lebih kompak, serta mengurangi ruang kosong yang dapat ditempati oleh molekul air (Stelte *et al.*, 2011; Hu *et al.*, 2016). Interaksi antara keempat faktor tersebut menentukan kualitas akhir pelet, baik dari segi kekuatan mekanik, durabilitas, maupun efisiensi pembakaran.

2.8.1 Kadar Air

Kadar air merupakan salah satu karakteristik penting dari bahan baku dalam pembuatan biopelet karena berpengaruh terhadap nilai kalor saat pembakaran. Kadar air yang terlalu tinggi dapat menurunkan nilai kalor biopelet, sehingga menyebabkan proses penyalaan menjadi lebih sulit dan menghasilkan asap dalam jumlah yang lebih banyak. Selain itu, tekanan mesin saat proses pengepresan juga memengaruhi kadar air dalam pelet. Tekanan yang tinggi mampu memampatkan partikel biomassa sehingga dapat mengisi celah atau pori-pori yang kosong. Dengan demikian, ruang yang sebelumnya dapat ditempati oleh molekul air menjadi lebih sedikit, sehingga kadar air dalam pelet pun berkurang (Rahman *et al.*, 2013).

2.8.2 Ukuran Partikel

Ukuran partikel merupakan salah satu aspek penting dari bahan baku karena berpengaruh terhadap kerapatan (densitas) hasil peletisasi. Berdasarkan penelitian (Nuriana, 2022), semakin kecil ukuran partikel, maka semakin tinggi kerapatan massa yang dihasilkan. Hal ini terjadi karena partikel yang lebih halus memiliki kemampuan untuk saling mengikat lebih kuat dan mengisi ruang pori-pori secara lebih efektif, sehingga menghasilkan struktur yang lebih padat dan kompak. Selain itu, ukuran partikel juga memengaruhi laju pembakaran. Kerapatan yang tinggi akibat partikel

yang lebih kecil dapat memperlambat pelepasan panas, karena panas lebih mudah tertahan dalam struktur yang rapat, sehingga distribusi suhu selama pembakaran menjadi lebih stabil dan efisien.

2.8.3 Komposisi Kimia

Lignin merupakan sumber daya energi terbarukan yang memiliki potensi besar sebagai bahan baku alternatif pengganti bahan bakar fosil yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Mittal *et al.*, 2024). Berdasarkan penelitian lain, (Suhartati *et al.*, 2016) menjelaskan bahwa lignin adalah polimer alami yang berfungsi sebagai pengikat utama dalam struktur tumbuhan. Lignin memiliki gugus fungsi seperti hidroksi, metoksi, dan karbonil, serta bersifat kurang larut dalam air, sehingga menjadikannya berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan perekat. Selain itu, lignin merupakan biopolimer kedua terbanyak yang secara alami terdapat di dinding sel lignoselulosa, dengan kandungan sekitar 15–35%, setelah selulosa. Di dalam penelitian (Aimi *et al.*, 2014) dijelaskan bahwa kulit durian memiliki kandungan selulosa yang tinggi (60,45%), lignin (15,45%) dan hemiselulosa (13,09%) sehingga berpotensi untuk dijadikan bahan campuran dalam pembuatan biobriket dan biopelet.

2.8.4 Tekanan Pengepresan

Tekanan yang diberikan selama proses peletisasi berpengaruh langsung terhadap ketahanan mekanik pelet yang dihasilkan. Ismail *et al.* (2023) menyebutkan bahwa tekanan sebesar 1 hingga 5 ton, yang setara dengan 6,28 MPa hingga 31,4 MPa, digunakan dalam proses peletisasi. Sementara itu, Riva *et al.* (2019) melaporkan bahwa kondisi optimal untuk peletisasi dicapai pada tekanan sebesar 116,7 MPa. Penelitian lain oleh Bazargan *et al.* (2014) menunjukkan bahwa pelet dengan kekuatan lebih tinggi dapat dihasilkan melalui penerapan tekanan yang lebih besar, terutama jika menggunakan campuran bahan dengan ukuran partikel yang bervariasi. Selain itu, Hu *et al.* (2016) menemukan bahwa kondisi optimum untuk menghasilkan biopelet dengan tingkat pemadatan yang baik adalah pada tekanan 128 MPa dan kadar air sebesar 35%.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Desember 2024 sampai Februari 2025. Proses torefaksi, pembuatan pelet, dan analisis data dilakukan di Laboratorium Rekayasa Sumberdaya Air dan Lahan (Lab. RSDAL), Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *furnace*, oven, golok, aluminium foil, pengering *hybrid*, nampan ayakan (mesh 8, 16, 30, 50, 70, 100, pan), timbangan digital, jangka sorong, cawan porselin, penggiling, alat *press hidrolik*, timbangan badan, *calorimeter*, *colorimeter*, gelas *beaker*, desikator, plastik, alat tulis untuk menulis, laptop untuk mengolah data, kamera, kertas label, dan alat pendukung lainnya. Sedangkan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah limbah kulit durian yang didapat dari kota Bandar Lampung.

3.3 Rancangan Percobaan

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rancangan Acak Lengkap (RAL) Faktorial. Percobaan ini menggunakan dua faktor. Faktor pertama (S) adalah suhu yang digunakan pada saat dilakukannya proses torefaksi yang terdiri dari 4 taraf antara lain:

1. 240 °C (S1)
2. 260 °C (S2)
3. 280 °C (S3)
4. 300 °C (S4)

Faktor yang kedua (W) adalah waktu yang digunakan pada saat dilakukannya torefaksi yang terdiri dari 4 taraf yaitu:

1. 20 menit (W1)
2. 30 menit (W2)
3. 40 menit (W3)
4. 50 menit (W4)

Masing-masing kombinasi faktor dan perlakuan mengalami tiga kali ulangan sehingga terdapat 48 unit percobaan. Kombinasi faktor dan perlakuan yang telah mendapat pengulangan ditunjukkan pada Tabel 3.

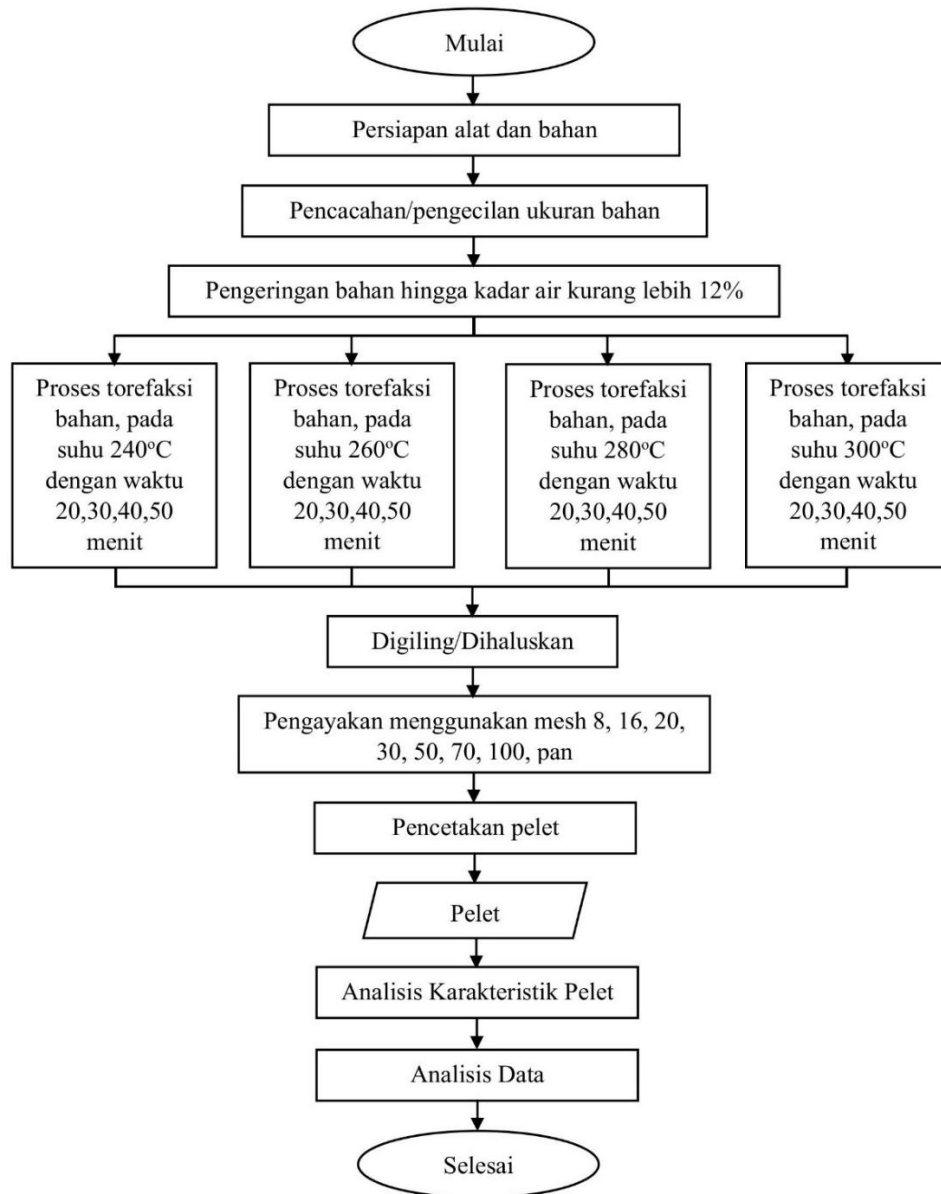
Tabel 3. Kombinasi Perlakuan

Suhu (S)	Ulangan(U)	Waktu (W)			
		W1 (20)	W2 (30)	W3 (40)	W4 (50)
S1 (240 °C)	1	S1W1U1	S1W2U1	S1W3U1	S1W4U1
	2	S1W1U2	S1W2U2	S1W3U2	S1W4U2
	3	S1W1U3	S1W2U3	S1W3U3	S1W4U3
S2 (260 °C)	1	S2W1U1	S2W2U1	S2W3U1	S2W4U1
	2	S2W1U2	S2W2U2	S2W3U2	S2W4U2
	3	S2W1U3	S2W2U3	S2W3U3	S2W4U3
S3 (280 °C)	1	S3W1U1	S3W2U1	S3W3U1	S3W4U1
	2	S3W1U2	S3W2U2	S3W3U2	S3W4U2
	3	S3W1U3	S3W2U3	S3W3U3	S3W4U3
S4 (300 °C)	1	S4W1U1	S4W2U1	S4W4U1	S4W4U1
	2	S4W1U2	S4W2U2	S4W4U2	S4W4U2
	3	S4W1U3	S4W2U3	S4W4U3	S4W4U3

3.4 Pelaksanaan Penelitian

Prosedur penelitian pengaruh suhu dan lama waktu torefaksi terhadap karakteristik biopellet dari limbah kulit durian dilaksanakan dalam beberapa tahap. Pelaksanaan

proses kegiatan penelitian ini sebagaimana ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar 5.



Gambar 5. Bagan Alir Pembuatan Biopelet Limbah Kulit Durian

3.4.1 Persiapan Bahan

Sebelum melakukan penelitian ini, alat dan bahan dipersiapkan terlebih dahulu. Alat yang perlu dipersiapkan adalah *furnace*, oven, golok, aluminium foil, pengering *hybrid*,

nampan ayakan (mesh 8, 16, 30, 50, 70, 100, pan), timbangan digital, jangka sorong, cawan porselin, penggiling, alat *press hidrolik*, timbangan digital, *calorimeter*, *colorimeter*, gelas beaker, desikator, plastik, alat tulis untuk menulis, laptop untuk mengolah data, kamera, kertas label, dan alat pendukung lainnya. Sebagian besar peralatan yang dibutuhkan dalam pelaksanaan penelitian ini sudah tersedia di Laboratorium Daya Alat dan Mesin Pertanian (DAMP), dan Laboratorium Rekayasa Sumberdaya Air dan Lahan (RSDAL), Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung. Selain alat, bahan juga perlu disiapkan dan dikumpulkan yaitu biomassa limbah kulit durian. Limbah kulit durian diperoleh dari penjual buah durian yang ada kota Bandar Lampung.

3.4.2 Pengecilan Ukuran

Proses pengecilan ukuran adalah serangkaian tahapan yang bertujuan untuk mengurangi dimensi suatu bahan. Dalam penelitian ini, bahan utama yang digunakan adalah limbah kulit durian. Sebelum dilakukan pencacahan atau pengecilan ukuran, limbah kulit durian terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran yang menempel. Proses pencacahan dilakukan menggunakan golok untuk mendapatkan potongan dengan ukuran 2 cm x 2 cm dengan ketebalan kulit sesuai apa adanya. Tujuan dari pengecilan ukuran ini adalah untuk mempercepat pengeringan kulit durian selama proses penjemuran serta meningkatkan efisiensi proses torefaksi, sehingga kulit durian yang dicacah dapat mengalami torefaksi secara lebih optimal.

3.4.3 Pengeringan

Pada proses pengolahan biopelet, pengeringan merupakan salah satu tahap yang sangat penting untuk menghasilkan kualitas bahan bakar biomassa yang baik (Wahyudi, 2021). Pengeringan tersebut bertujuan untuk mengurangi kandungan air yang terdapat di dalam biomassa dan meningkatkan nilai kalor dari biomassa tersebut (Zikri *et al.*, 2015). Menurut penelitian yang telah dilakukan Junaidi *et al.* (2017), proses pengeringan bahan baku dalam pembuatan biopelet dilakukan menggunakan pengering

tipe hybrid. Limbah kulit durian yang sudah dikecilkan akan dikeringkan hingga kadar air sekitar 10% (SNI 8675:2018).

3.4.4 Proses Torefaksi

Torefaksi merupakan proses perlakuan panas pada temperatur sekitar 200-320 tekanan atmosfer tanpa kehadiran oksigen. Pada penelitian ini menggunakan alat *furnace* untuk proses torefaksi, *furnace* yang digunakan bermerk Vulcan D-550 dengan tegangan sebesar 200-240V dan 2400W. Torefaksi dilakukan dengan membungkus limbah kulit durian kering menggunakan almunium foil lalu dimasukkan ke dalam alat *furnace*. Proses torefaksi dilakukan dengan variasi suhu 240 °C, 260 °C, 280 °C, 300 °C, dan variasi waktu 20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit. Sebelum torefaksi dimulai, alat *furnace* diatur waktu dan suhu nya yang telah ditentukan. Proses torefaksi ini dilakukan dengan tiga kali ulangan.



Gambar 6. Furnace

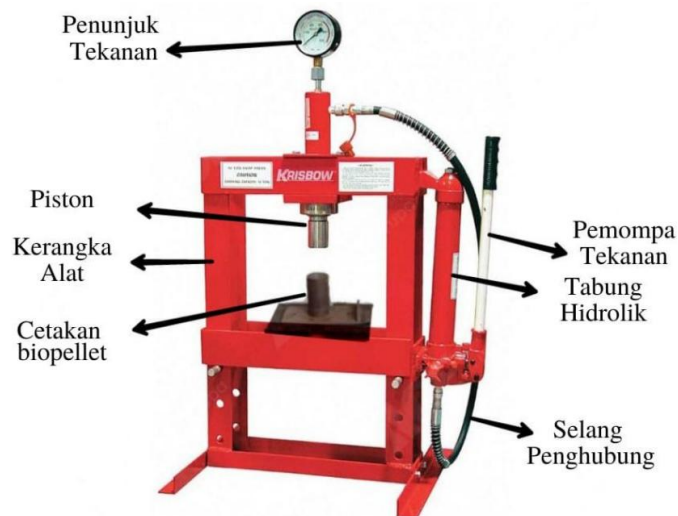
3.4.5 Penggilingan dan Pengayakan

Bahan yang sudah selesai ditorefaksi kemudian digiling secara mekanis. Serbuk kulit durian kemudian diayak menggunakan ayakan. Pengayakan adalah proses pemisahan

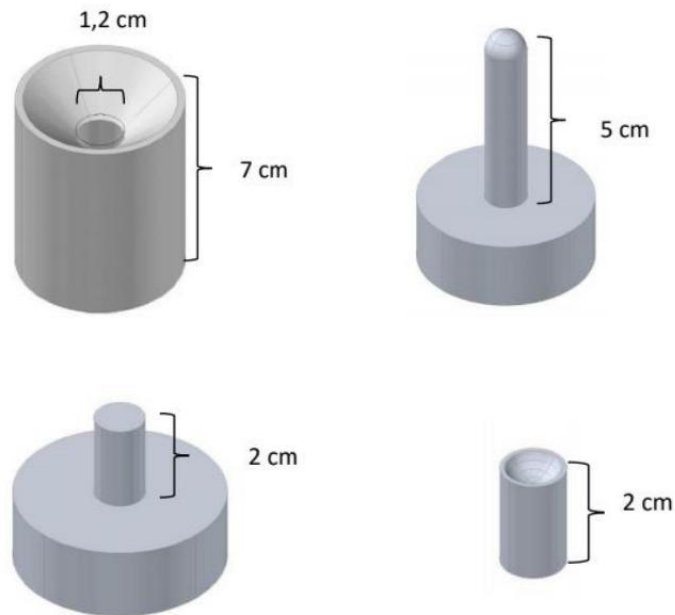
material berdasarkan ukuran partikel dengan menggunakan ayakan yang memiliki lubang kawat (mesh) tertentu. Partikel yang lebih kecil dari ukuran mesh akan lolos melalui lubang ayakan, sementara partikel yang lebih besar akan tertahan di permukaan (Wahyudi, 2021). Dalam penelitian ini, proses pengayakan dilakukan menggunakan ayakan dengan ukuran mesh 8, 16, 30, 50, 70, 100, dan pan. Hasil akhir dari proses pengayakan ini dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam pembuatan biopellet.

3.4.7 Pencetakan Biopellet

Bahan baku yang telah melalui proses pengayakan kemudian diolah menjadi biopellet dengan menggunakan alat press hidrolik bermerk Krisbow. Bahan baku yang telah selesai diayak kemudian dicetak menggunakan silinder cetak dengan diameter 1,2 cm. Proses pencetakan dilakukan dengan tekanan sebesar 3 ton (setara 260 MPa). Alat *Press Hidrolik Bench Type* ini berfungsi untuk memberikan tekanan pada material hingga mencapai bentuk yang diinginkan. Mesin ini bekerja menggunakan sistem hidrolik, yang memungkinkan menghasilkan tekanan besar dengan tenaga input yang relatif kecil. Alat ini memiliki kapasitas tekanan hingga 20 ton dan dimensi sebesar 60 x 50 x 110 cm.



Gambar 7. Alat *Press Hidrolik Bench Type*



Gambar 8. Sketsa Besi Silinder Cetakan Pelet

Cara kerja alat ini didasarkan pada prinsip Hukum Pascal, yaitu memanfaatkan tekanan yang diberikan pada cairan untuk menghasilkan gaya tekan yang besar. Komponen utama alat ini meliputi piston, tabung hidrolis, cetakan biopelet, pompa tekanan, penunjuk tekanan, dan selang penghubung. Sistem pompa hidrolis memungkinkan tekanan yang dihasilkan untuk mengecilkan volume bahan dan membentuk biopelet sesuai kebutuhan.

3.4.8 Pengujian Biopelet

Setelah proses pencetakan selesai, dilakukan pengujian terhadap sifat fisik biopelet. Pengujian ini meliputi beberapa parameter pada bahan, yaitu kadar air, kadar abu, kadar zat terbang (*volatile matter*), karbon tetap (*fixed carbon*), massa jenis curah bahan, nilai kalori, FM dan GMD. Serta pengujian terhadap pelet, yaitu kadar air pelet, massa jenis curah pelet, massa jenis satuan pelet, analisis warna pelet, uji getar, uji higroskopis, nilai kalori pelet. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas dan karakteristik fisik biopelet yang dihasilkan.

3.4.8.1 Kadar Air Bahan

Kadar air merupakan persentase kandungan air yang terdapat pada suatu bahan. Kadar air bahan dan pelet sangat berpengaruh terhadap jumlah asap yang dihasilkan, daya tahan penyimpanan dan penyalaan pelet saat dijadikan bahan bakar. Pengujian kadar air pada bahan dan pelet dilakukan dengan cara memasukkan cawan porselin ke dalam oven pada suhu 105 °C selama 30 menit. Kemudian, cawan porselin didinginkan di dalam desikator. Selanjutnya, dilakukan penimbangan bobot kosong pada cawan kosong lalu dicatat. Setelah itu, dilakukan penimbangan pada satu sampel pelet ke dalam cawan porselin yang sudah diketahui bobotnya dan dimasukkan ke dalam oven dengan suhu 105 °C selama 24 jam. Setelah selesai pengovenan cawan yang berisikan sampel pelet didinginkan di dalam desikator dan ditimbang bobotnya hingga menghasilkan selisih massa. Nilai kadar air bahan dan pelet dapat diketahui dan dihitung menggunakan rumus berikut:

$$Kadar\ Air = \frac{BB-BK}{BB-C} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

dimana C = Bobot kosong cawan porselin (g), BB = Bobot cawan + sampel pelet sebelum dimasukkan kedalam oven (g), BK = Bobot cawan + sampel pelet sesudah dikeluarkan dari oven (g).

3.4.8.2 Uji Nilai Kalori Bahan

Nilai kalor merupakan salah satu indikator dalam menentukan kualitas bahan bakar biopelet. Jika semakin tinggi nilai kalor, maka bahan yang digunakan memiliki kualitas yang bagus dan hasilnya pun biopelet yang berkualitas. Nilai kalor bahan diukur dengan menggunakan Bomb kalorimeter merk PARR Type 1341.

3.4.8.3 Uji Massa Jenis Bahan

Massa jenis, atau kerapatan, dalam konteks bahan pelet biomassa adalah ukuran seberapa padat suatu pelet biomassa. Secara matematis, massa jenis (ρ) didefinisikan sebagai rasio massa (m) suatu benda terhadap volumenya (V). Satuan yang umum digunakan untuk massa jenis pelet biomassa adalah gram per sentimeter kubik (g/cm³)

atau kilogram per meter kubik (kg/m³). Massa jenis dibedakan menjadi massa jenis curah (bulk density) dan massa jenis satuan atau massa jenis partikel. Massa jenis curah diukur dengan menggunakan bahan dengan volume antara 100 sampai 300 mL. Berat jenis satuan pelet diukur dari diameter (D), berat (W), panjang (L) per satu batang pelet. Hal ini dilakukan untuk melihat densitas yang merupakan perbandingan antara berat dan volume bahan bakar padat. Densitas sangat berpengaruh terhadap nilai kalor bahan bakar padat, karena nilai densitas yang semakin besar akan meningkatkan nilai kalor. Besar dan kecilnya nilai densitas dipengaruhi oleh tekanan saat pengepresan, ukuran dan kehomogenan penyusun bahan bakar itu sendiri. Nilai densitas dapat diketahui dan dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Massa Jenis } (\rho) = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} \dots\dots\dots (2)$$

3.4.8.4 Uji Warna Pelet

Uji warna pelet dilakukan dengan menentukan intensitas tiga warna utama yang membentuk warna pada pelet, pengukuran ini menggunakan bantuan alat Colorimeter Amtast-AMT506. Pengujian perubahan warna dilakukan dengan menggunakan CIELAB yaitu mengukur warna kecerahan (L^*), kroma merah-hijau (a^*) dimana nilai positif adalah merah dan nilai negatif adalah hijau, dan kroma kuning-biru (b^*) dimana nilai positif adalah kuning dan nilai negatif adalah biru. Setelah itu dilakukan perbandingan nilai L^* , a^* , dan b^* dari setiap perlakuannya. Untuk mengetahui dan menghitung nilai warna dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$E^* = \sqrt{L^{*2} + a^{*2} + b^{*2}} \dots\dots\dots (3)$$

dimana L^* = Kecerahan dengan nilai 0 untuk warna hitam hingga 100 untuk warna putih, a^* = Kroma merah hijau dengan nilai positif berarti merah maksimum +80 dan negatif berarti hijau minimum -80, dan b^* = Kroma kuning biru dengan nilai positif berarti kuning maksimum +80 dan negatif berarti biru minimum -80.

3.4.8.5 Uji Kadar Abu Bahan

Pada bahan bakar alternatif pelet, nilai kadar abu sangat perlu diperhatikan karena dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran dan jumlah abu yang dihasilkan. Jika bahan baku pelet yang dihasilkan memiliki jumlah abu yang sangat banyak, maka akan menyebabkan kesulitan untuk mendapatkan efisiensi pembakaran yang tinggi. Pengujian kadar abu pada biopelet dilakukan dengan cara memanaskan cawan porselin ke dalam oven pada suhu 105 °C selama waktu 30 menit, kemudian mendinginkannya di dalam desikator, lalu ditimbang bobot kosong cawan porselin (C). setelahnya menimbang satu sampel biopelet yang diletakkan ke dalam cawan porselin yang bobotnya telah diketahui (P). Lalu cawan porselin yang berisi sampel biopelet dipanaskan ke dalam tanur dengan suhu 550 °C selama waktu 2jam. Setelah itu cawan dipindahkan dari tanur ke dalam desikator untuk didinginkan selama 2 jam dan setelah itu ditimbang hingga terdapat selisih massa (Q). Untuk mengetahui dan menghitung nilai uji kadar abu dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Kadar\ Abu = \frac{Q-C}{P-C} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

dimana C = Bobot kosong cawan porselin (g), P = Bobot cawan + sampel pelet sebelum dimasukkan kedalam tanur (g), Q = Bobot cawan + abu (g).

3.4.8.6 Kadar Zat Terbang (Volatile Matter)

Zat terbang (volatile matter) merupakan komponen organik dalam bahan padat seperti biomassa yang akan terlepas dalam bentuk gas atau uap ketika dipanaskan pada suhu tinggi dalam lingkungan tanpa oksigen, yaitu selama proses pirolisis. Komponen ini mencakup senyawa-senyawa mudah menguap seperti uap air, karbon dioksida (CO₂), karbon monoksida (CO), metana (CH₄), serta berbagai senyawa hidrokarbon yang mudah terbakar (Basu, 2013). Kandungan zat terbang sangat menentukan karakteristik pembakaran bahan bakar padat. Semakin tinggi kadar volatile matter, maka bahan akan lebih mudah menyala dan mengalami pembakaran lebih cepat, karena fraksi ini cenderung menguap lebih awal dibandingkan karbon tetap (Saidur *et al.*, 2011). Oleh

karena itu, bahan dengan kadar zat terbang tinggi biasanya memiliki performa pembakaran yang lebih reaktif dan cepat.

$$VM (\%) = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

dimana VM (%) = kadar volatile, W1 = berat cawan kosong (g), W2 = berat cawan + sampel sebelum pemanasan (g), W3 = berat cawan + sampel setelah pemanasan (g).

Dalam metode analisis proksimat, penentuan kadar volatile matter dilakukan dengan cara memanaskan sampel pada suhu sekitar 950 °C selama 7 menit tanpa adanya udara. Hasil pengukuran ini dinyatakan sebagai persentase terhadap bobot kering sampel. Lebih lanjut, kadar zat terbang digunakan sebagai salah satu indikator dalam pengklasifikasian kualitas bahan bakar padat seperti batubara dan biomassa. Walaupun kandungan *volatile matter* yang tinggi dapat meningkatkan efisiensi penyalaan awal, tetapi juga berpotensi menghasilkan lebih banyak tar atau abu selama proses pembakaran (Basu, 2013).

3.4.8.7 Uji Ketahanan Getar

Pengujian ketahanan getar bertujuan untuk mengetahui persentase jumlah pelet yang masih utuh ketika telah dilakukan perlakuan fisik dengan bantuan alat mekanik Meinzer II Sieve Sheaker. Sebelum dilakukan pengujian, pelet terlebih dahulu ditimbang untuk mengetahui bobot awal. Setelah itu pelet dimasukkan ke dalam ayakan yang digetarkan selama 10 menit dengan kecepatan 3.600 kali gerakan per menit Apabila sudah 10 menit, mesin dimatikan dan diambil pelet yang berukuran paling besar dan ditimbang kembali. Untuk mengetahui dan menghitung nilai ketahanan getar dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$Ketahanan\ Getar = \left(\frac{mb}{ma} \right) \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

dimana ma = Massa pelet awal (g), dan mb = Massa pelet utuh setelah pengujian (g).

3.4.8.8 Uji Higroskopis (Hygroscopic)

Uji higroskopis merupakan pengujian yang dilakukan untuk mengetahui daya serap air pelet kulit durian apabila dibiarkan di ruang terbuka tanpa dikemas. Pengujian ini dilakukan pada masing-masing sampel percobaan yang telah dioven selama 24 jam dengan suhu 105 °C, lalu pengujian dilakukan sebanyak 3 (tiga) kali. Sampel yang telah dioven akan didinginkan ke dalam desikator. Apabila sampel telah dingin dapat langsung di timbang untuk diketahui bobot awal biopelet. Pelet dimasukkan ke dalam wadah/cawan untuk dibiarkan di ruang terbuka selama 1 minggu. Setiap hari dilakukan penimbangan pada pelet untuk mengetahui perubahan bobot pelet. Pengujian ini dilakukan hingga berat pelet menjadi konstan. Untuk mengetahui dan menghitung nilai uji higroskopis dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$DSA = \frac{(mt-mo)}{mo} \times 100\% \dots\dots\dots (6)$$

dimana DSA = Daya serap air/higroskopis, M0 = Bobot hari ke-0 (bobot awal setelah pengovenan), Mt = Bobot hari ke-n.

3.4.8.9 FM (Fineness Modulus) / Modulus kehalusan

Fineness Modulus (FM) adalah angka yang mencerminkan ukuran rata-rata partikel dalam agregat, seperti pasir atau kerikil. FM dihitung dari persentase kumulatif agregat yang tertahan pada serangkaian ayakan standar. FM dapat menggunakan rumus :

$$FM = \frac{\sum Ci}{100} \dots\dots\dots (7)$$

dimana FM = *Fineness Modulus* / Modulus Kehalusan, dan Ci = persentase kumulatif yang tertahan pada setiap ayakan.

3.4.8.10 GMD (Geometric Mean Diameter)

Geometric Mean Diameter (GMD) atau diameter rata-rata geometrik merupakan parameter yang digunakan untuk merepresentasikan ukuran rata-rata partikel berdasarkan tiga dimensi utama, yaitu panjang (L), lebar (W), dan tebal (T). Konsep ini sangat relevan dalam menggambarkan ukuran partikel yang tidak seragam

bentuknya atau tidak berbentuk bulat sempurna. Nilai GMD dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$GMD = \exp \left(\frac{\sum (w_i \cdot \ln D_i)}{\sum w_i} \right) \dots\dots\dots (8)$$

dimana W_i = fraksi massa dari partikel pada ukuran ke- i , D_i = GMD dari faraksi ke- i (seperti dihitung dari dua ukuran saringan), dan $\ln$ = logaritma natural.

Penggunaan GMD penting dalam studi rekayasa pascapanen dan pengolahan bahan pertanian, karena dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik fisik seperti perilaku aliran, densitas curah, kekompakan, serta efisiensi proses pencetakan, khususnya pada pembuatan pelet biomassa. Umumnya, partikel dengan nilai GMD yang lebih kecil akan membentuk pelet yang lebih padat dan stabil secara fisik. Sebaliknya, partikel yang memiliki ukuran terlalu besar berpotensi menyebabkan struktur yang tidak seragam serta meningkatkan hambatan dalam proses pembakaran (Kaliyan & Vance Morey, 2009).

3.5 Analisis Data

Pada penelitian ini metode analisis data yang digunakan adalah analisis ANOVA (*Analysis of Variance*), dimana analisis ini merupakan metode statistik yang digunakan untuk menguji perbedaan rata-rata diantara berbagai perlakuan. Setelah terdapat perbedaan signifikan antar perlakuan berdasarkan hipotesis, kemudian dilakukan uji lanjut beda nyata terkecil (BNT) taraf 5% menggunakan *Microsoft Exel*. Analisis ini penting untuk menentukan variasi dalam data dan mengidentifikasi perlakuan yang memberikan hasil berbeda.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5. 1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan mengenai pengaruh suhu dan lama waktu torefaksi terhadap karakteristik pelet berbahan kulit durian, maka diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Suhu Torefaksi memberikan pengaruh signifikan terhadap sebagian besar parameter yang diamati, meliputi kadar air, kadar abu, zat terbang (*volatile matter*), massa jenis curah, nilai kalori, warna, dan ketahanan mekanik (durabilitas).
2. Lama waktu torefaksi turut memengaruhi karakteristik pelet. Semakin lama waktu torefaksi, kadar air dan *volatile matter* cenderung menurun, sedangkan nilai kalori dan massa jenis meningkat.
3. Interaksi suhu dan lama waktu torefaksi menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap beberapa karakteristik penting, terutama pada kadar abu, massa jenis curah, dan nilai kalor. Secara umum, peningkatan suhu menyebabkan penurunan kadar air dan zat terbang, serta peningkatan nilai kalor. Perlakuan pada suhu 300 °C menghasilkan karakteristik terbaik dari segi kadar air (terendah 4,11%), nilai kalor (tertinggi 20,06 MJ/kg), densitas dan struktur fisik pelet walaupun disertai peningkatan kadar abu yang melewati ambang batas SNI.

5. 2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah diperoleh, perlu dilakukan uji performa langsung pada sistem pembakaran (tungku atau kompor skala rumah tangga/industri kecil) agar kualitas pelet tidak hanya berdasarkan parameter laboratorium, tetapi juga efisiensi nyata penggunaannya. Penelitian lanjutan juga dapat dilakukan pada hasil yang sudah diperoleh, yaitu mengarahkan penggunaannya sebagai biochar pembenah tanah, mengingat nilai kadar abu rata-rata perlakuan melebihi batas SNI untuk bahan bakar pelet.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharjee, T. C., Coronella, C. J., & Vasquez, V. R. (2011). *Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass*. *Bioresource Technology*, 102(7), 4849–4854.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.018>
- Adriansyah, M. H. (2024). *Pengaruh Waktu Dan Suhu Torefaksi Terhadap Kualitas Biopellet Dari Pelepah Kelapa (Cocos nucifera L.)* [Universitas Gadjah Mada].
https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/247048?utm_source=chatgpt.com
- Afriyanti, Y., Sasana, H., & Jalunggono, G. (2020). *Analisis faktor-faktor yang mempengaruhi konsumsi energi terbarukan di indonesia*. *DINAMIC : Directory Journal of Economic*, 2(3), Article 3.
<https://doi.org/10.31002/dinamic.v2i3.1428>
- Ahmed, I., Ali, A., Ali, B., Hassan, M., Hussain, S., Hashmi, H., Ali, Z., & Soomro, A. (2021). *Pelletization of Biomass Feedstocks: Effect of Moisture Content, Particle Size and a Binder on Characteristics of Biomass Pellets*. In Review.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-163994/v1>
- Aimi, N. N., Anuar, H., Manshor, M. R., Nazri, W. B. W., & Sapuan, S. M. (2014). *Optimizing the parameters in durian skin fiber reinforced polypropylene composites by response surface methodology*. *Industrial Crops and Products*, 54, 291–295. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.01.016>
- Alfernando, O., Lince Muis, Siti Junaida, Malem K. Ginting, & Muhammad Haviz. (2023). *Analisis Pengaruh Waktu Torefaksi Terhadap Kualitas Biobriket dari Cangkang Kelapa Sawit (Palm Oil Shell)*. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik*, 21(2), 181–190.
<https://doi.org/10.55893/jt.vol21no2.449>

- Alsmey, M. (2024). *Pengaruh Durasi Pemanasan Dengan Menggunakan Kolektor Termal Surya Terhadap Sifat Fisik Dan Termal Biomassa Rumput Raja*.
- Amrul, A., Triyadi, D., & Gandidi, I. M. (2019). *Simulasi Proses Torefaksi Sampah Sistem Kontinu Menggunakan Software Aspen Plus*. MECHANICAL, 10(1), 19. <https://doi.org/10.23960/mech.v10.i1.201904>
- Anita, R. (2019). *Pengaruh putaran dan lama waktu torefaksi terhadap kualitas pelet tandan kosong kelapa sawit* [Skripsi]. Jurusan Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: Practical design and theory*. Academic Press.
- Basu, P. (2013). *Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction: Practical design and theory* (2nd edition). Academic Press.
- Bazargan, A., Rough, S. L., & McKay, G. (2014). *Compaction of palm kernel shell biochars for application as solid fuel*. Biomass and Bioenergy, 70, 489–497. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.015>
- Bergman, P. C. A., Boersma, A., Zwart, R., & Kiel, J. H. A. (2005). *Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations*. Energy Research Centre of the Netherlands.
- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I., & Williams, P. T. (2008). *Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties*. Fuel, 87(6), 844–856. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.041>
- Çetinkaya, B., Erkent, S., Ekinci, K., Civan, M., Bilgili, M. E., & Yurdakul, S. (2024). *Effect of torrefaction on fuel properties of biopellets*. Heliyon, 10(2), e23989. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e23989>
- Chen, W.-H., & Kuo, P.-C. (2011). *Torrefaction and co-torrefaction characterization of hemicellulose, cellulose and lignin as well as torrefaction of some basic constituents in biomass*. Energy, 36(2), 803–811. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.036>
- 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>
- Chuchita, Sari, M. R., Sinaga, A. K. G., Suastika, K. G., Karelius, Dirgantara, M., & Rumbang, N. (2022). *Proses torefaksi dengan metode batch untuk*

meningkatkan nilai kalor tandan kosong kelapa sawit. Jurnal Cendekia Kimia, 01(01).

- Damanik, B. (2025). *Pengaruh Suhu Torefaksi Terhadap Kualitas Biobriket Tandan Kosong Kelapa Sawit Dengan Perekat Sludge Cair CPO* [Other, Universitas Jambi]. <https://repository.unja.ac.id/>
- Dethan*, J. J. S., Bunga, F. J. H., Makaborang, M., Lano, M. L., & Abineno, J. C. (2023). Optimalisasi Suhu Dan Waktu Tinggal Pada Proses Torefaksi Daun Kesambi (*Schleichera oleosa*). *Prosiding Seminar Nasional Hasil-Hasil Penelitian, 6(1)*, Article 1.
- Dharma, U. S. (2013). *Pemanfaatan Biomassa Limbah Jamur Tiram Sebagai Bahan Bakar Alternatif Untuk Proses Sterilisasi Jamur Tiram*. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin, 2(2)*, Article 2. <https://doi.org/10.24127/trb.v2i2.642>
- Direktorat Jenderal Hortikultura, Kementerian Pertanian. (2024). *Angka tetap hortikultura tahun 2023*. Direktorat Jenderal Hortikultura, Kementerian Pertanian.
- Fadlilah, A., Rosyidi, D., & Susilo, A. (2022). *Karakteristik Warna L* A* B* Dan Tekstur Dendeng Daging Kelinci Yang Difermentasi Dengan Lactobacillus Plantarum*. *Wahana Peternakan, 6(1)*, 30–37. <https://doi.org/10.37090/jwputb.v6i1.533>
- Fatmawati, D. (2014). *Pembuatan Biobriket Dari Campuran Enceng Gondok Dan Tempurung Kelapa Dengan Perekat Tetes Tebu*. *Jurnal Teknik Mesin, 3(02)*. <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/jtm-unesa/article/view/10285>
- Fitriana, N. H. I., Setiawan, R. F., Susanto, H., Hidayat, H. S., & Malia, R. P. (2023). *Pemanfaatan Kulit Durian Menjadi Bahan Baku Pembuatan Briket Ramah Lingkungan Sebagai Substitusi Penggunaan Kayu Bakar Di Kampung Durian Wonosalam, Jombang*. *Jurnal Pengembangan Masyarakat Lokal, 6(2)*, 151–157. <https://doi.org/10.58406/jpml.v6i2.1401>
- Hardianto, T., Suwono, A., Pasek, A. D., & Amrul. (2013). *Konversi Sampah Kota Menjadi Bahan Bakar Padat: Modifikasi Sistem Torefaksi Kontinu Unggun Terfluidisasi Untuk Mengakomodasi Karakteristik Sampah*. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*.
- Haryanto, A., Waluyo, S., Utami, A. P., & Triyono, S. (2023). *Pengaruh Gaya Tekan Dan Waktu Penekanan Terhadap Karakteristik Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit*. *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian Dan Biosistem, 11(1)*, 89–101. <https://doi.org/10.29303/jrpb.v11i1.447>

- Herlambang, S., N, S. R., Santosa, Az. P., Budi, & Sutiono, H. T. (2017). *Biomassa sebagai sumber energi masa depan*. Gerbang Media Aksara.
- Hu, Q., Yang, H., Yao, D., Zhu, D., Wang, X., Shao, J., & Chen, H. (2016). *The densification of bio-char: Effect of pyrolysis temperature on the qualities of pellets*. *Bioresource Technology*, 200, 521–527.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.10.077>
- Irawan, A., Riadz, T., & Nurmalisa, N. (2015). *Proses Torefaksi Tandan Kosong Kelapa Sawit Untuk Kandungan Hemiselulosa Dan Uji Kemampuan Penyerapan Air*. *Reaktor*, 15(3), 190–194.
<https://doi.org/10.14710/reaktor.15.3.190-194>
- Ismail, R. I., Khor, C. Y., & Mohamed, A. R. (2023). *Pelletization Temperature and Pressure Effects on the Mechanical Properties of Khaya senegalensis Biomass Energy Pellets*. *Sustainability*, 15(9), 7501.
<https://doi.org/10.3390/su15097501>
- Ismail, R. I., Leng, L. Y., Makhtar, N. L., Rahman, A. A. A., Dali, J. A. A., Shaari, A. R., Yee, K. C., Mohamed, A. R., Jamalludin, M. R., Razak, N. A., & Draman, W. N. A. W. (2020). *The Effect Of Torrefaction Reaction Temperature On The Elaeis Guineensis Empty Fruit Bunch (EFB) Pellet Durability And Calorific Value*. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 932(1), 012118. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/932/1/012118>
- Istaniah, Ma'ruf, A., Rachmat, R., & Wikan Widodo, T. (2024). *Karakteristik Biopellet Dari Serbuk Kayu Dan Sekam Padi*. *JURNAL AGROINDUSTRI HALAL*, 10(2), 262–272. <https://doi.org/10.30997/jah.v10i2.12041>
- Jiang, X., Cheng, W., Liu, J., Xu, H., Zhang, D., Zheng, Y., & Cai, H. (2019). *Effect Of Moisture Content During Preparation On The Physicochemical Properties Of Pellets Made From Different Biomass Materials*. *BioResources*, 15(1), 557–573. <https://doi.org/10.15376/biores.15.1.557-573>
- Junaidi, J., Ariefin, A., & Mawardi, I. (2017). *Pengaruh Persentase Perekat Terhadap Karakteristik Pellet Kayu Dari Kayu Sisa Gergajian*. *Jurnal Mesin Sains Terapan*, 1(1), Article 1. <https://doi.org/10.30811/jmst.v1i1.379>
- Kaliyan, N., & Vance Morey, R. (2009). *Factors Affecting Strength And Durability Of Densified Biomass Products*. *Biomass and Bioenergy*, 33(3), 337–359.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2008.08.005>

- Kalpikajati, S. Y., & Hermawan, S. (2022). *Hambatan Penerapan Kebijakan Energi Terbarukan Di Indonesia*. *Batulis Civil Law Review*, 3(2), 187.
<https://doi.org/10.47268/ballrev.v3i2.1012>
- Khairiah, K., & Haryadi, J. (2019). *Analysis Of Graphite Carbon Black Slurry Derived From Durian (Durio Zibethinus) Skin As A Candidate For Bio-Battery Anode Material*. *Fisitek : Jurnal Ilmu Fisika Dan Teknologi*, 3(1), 10.
<https://doi.org/10.30821/fisitek.v3i1.5465>
- Kurniawan W, D. K. W., Arifan, F., & Adim, M. D. K. (2015). *Pembuatan Pulp Dengan Memanfaatkan Limbah Kulit Durian (Durio Zibethinus Murr) Dengan Campuran (Resina Colophonium) Guna Mencegah Degradasi Lingkungan*. *Gema Teknologi*, 17(3). <https://doi.org/10.14710/gt.v17i3.8925>
- Larsson, S. H., & Rudolfsson, M. (2012). *Temperature Control In Energy Grass Pellet Production – Effects On Process Stability And Pellet Quality*. *Applied Energy*, 97, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.086>
- Lehmann, B., Schröder, H.-W., Wollenberg, R., & Repke, J.-U. (2012). *Effect Of Miscanthus Addition And Different Grinding Processes On The Quality Of Wood Pellets*. *Biomass and Bioenergy*, 44, 150–159.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.05.009>
- Lehtikangas, P. (2001). *Quality Properties Of Pelletised Sawdust, Logging Residues And Bark*. *Biomass and Bioenergy*, 20(5), 351–360.
[https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00092-1](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00092-1)
- Li, H., Liu, X., Legros, R., Bi, X. T., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2012). *Torrefaction Of Sawdust In A Fluidized Bed Reactor*. *Bioresource Technology*, 103(1), 453–458. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.009>
- Mangalla, L. K., Sisworo, R. R., & Pagiling, L. (2023). *Perbaikan Kualitas Energi Biomassa Kayu Jati Menggunakan Torefaksi Microwave Untuk Produksi Bioarang*. *TEKNIK*, 44(1), 15–22.
<https://doi.org/10.14710/teknik.v44i1.48278>
- Maryenti, R., Komalasari, K., & Helwani, Z. (2017). *Pembuatan Bahan Bakar Padat dari Pelepah Sawit Menggunakan Proses Torefaksi pada Variasi Suhu Waktu Torefaksi* (Issue 1) [Journal:eArticle, Universitas Riau].
<https://www.neliti.com/id/publications/203276/>
- Maulana, L. F., Imami Ghozali, H., Fikri, Moh. H., Agustina, E. I., & Ali, M. (2020). *Pemanfaatan Limbah Serbuk Kayu Didesa Ranjok Kecamatan Gunung Sari Kabupaten Lombok Barat Menjadi Biomass Pellet Sebagai Sumber Energi*

- Terbarukan*. Jurnal PEPADU, 1(1), 133–138.
<https://doi.org/10.29303/jurnalpepadu.v1i1.87>
- Mittal, T., Kant, R., Bhalla, Y., & Goel, M. K. (2024). *Recent Advancement and Emerging Applications of Lignin*. Indonesian Journal of Chemistry, 24(1), 303. <https://doi.org/10.22146/ijc.88535>
- Nasution, Z. A., & Limbong, H. P. (2017). *Pemanfaatan Arang Cangkang Kelapa Sawit sebagai Substitusi Carbon Black untuk Bahan Pengisi Kompon Karet*. Jurnal Riset Teknologi Industri, 11(1), 66.
<https://doi.org/10.26578/jrti.v11i1.2167>
- Nugraha, T. H., Pambudi, N. A., & Ranto, R. (2019). *Studi Pemanfaatan Limbah Kulit Durian (Durio Zibethinus Murr) Sebagai Bahan Bakar Padat Alternatif Dengan Teknologi Hydrothermal*. NOZEL Jurnal Pendidikan Teknik Mesin, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.20961/nozel.v1i3.50848>
- Nuriana, W. (2022). *Pengaruh Variasi Ukuran Partikel Bahan Biopellet Terhadap Laju Pembakaran Dan Kerapatan Massa Pada Limbah Kayu Mahoni*. JURNAL AGRI-TEK : Jurnal Penelitian Ilmu-Ilmu Eksakta, 23(1), 11–15.
<https://doi.org/10.33319/agtek.v23i1.106>
- Obernberger, I., & Thek, G. (2004). *Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour*. Biomass and Bioenergy, 27(6), 653–669.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>
- Pegoretti, H. J., Chaves, M. D., Vidaurre, G. B., Brocco, V. F., Souza, D. P. D., & Protásio, T. D. P. (2019). *Colorimetría De Pellets De Eucalipto Y Residuos De La Cafeicultura Y Sus Relaciones Con Los Parámetros De Calidad*. Scientia Forestalis, 47(121). <https://doi.org/10.18671/scifor.v47n121.11>
- Pertiwi, I. A. (2024). *Peningkatan Nilai Kalor Bahan Bakar Pelet Dari Limbah Serbuk Gergaji Melalui Penggunaan Asam Asetat Pada Proses Torrefaksi Basah* [S2, Universitas Malikussaleh]. <https://rama.unimal.ac.id/id/eprint/587/>
- Prabowo, R. (2009). *Pemanfaatan Limbah Kulit Durian Sebagai Produk Briket Di Wilayah Kecamatan Gunung Pati Kabupaten Semarang*. Mediagro, 5(1), 151711. <https://doi.org/10.31942/md.v5i1.889>
- Prins, M. (Mark). (2005). *Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction*. Technische Universiteit Eindhoven.
<https://doi.org/10.6100/IR583729>

- Qiu, J., Khalloufi, S., Martynenko, A., Van Dalen, G., Schutyser, M., & Almeida-Rivera, C. (2015). *Porosity, Bulk Density, and Volume Reduction During Drying: Review of Measurement Methods and Coefficient Determinations*. *Drying Technology*, 33(14), 1681–1699.
<https://doi.org/10.1080/07373937.2015.1036289>
- Rahman, M. M., Tsukamoto, J., Rahman, Md. M., Yoneyama, A., & Mostafa, K. M. (2013). *Lignin And Its Effects On Litter Decomposition In Forest Ecosystems*. *Chemistry and Ecology*, 29(6), 540–553.
<https://doi.org/10.1080/02757540.2013.790380>
- Rahmayanti, L., Rahmah, D. M., & Larashati. (2021). *Analisis Pemanfaatan Sumber Daya Energi Minyak Dan Gas Bumi Di Indonesia*. 3(2), 9–16.
- Ramadhan, D. (2017). *Pengaruh Suhu Dan Waktu Torefaksi Terhadap Kualitas Briket Dari Torefaksi Limbah Serbuk Gergajian Kayu Mindi (Melia azedarach L)* [Universitas Gadjah Mada].
<https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/116150>
- Riva, L., Nielsen, H. K., Skreiberg, Ø., Wang, L., Bartocci, P., Barbanera, M., Bidini, G., & Fantozzi, F. (2019). *Analysis Of Optimal Temperature, Pressure And Binder Quantity For The Production Of Biocarbon Pellet To Be Used As A Substitute For Coke*. *Applied Energy*, 256, 113933.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113933>
- Rusdianto, A. S., Choiron, M., & Novijanto, N. (2014). *Karakterisasi Limbah Industri Tape Sebagai Bahan Baku Pembuatan Biopellet*. *Industria: Jurnal Teknologi Dan Manajemen Agroindustri*, 3(1), 27–32.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). *A Review On Biomass As A Fuel For Boilers*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>
- Satmoko, M. E. A., Saputro, D. D., & Budiyo, A. (2013). *Karakterisasi Briket Dari Limbah Pengolahan Kayu Sengon Dengan Metode Cetak Panas*. *JMEL : Journal of Mechanical Engineering Learning*, 2(1), Article 1.
<https://journal.unnes.ac.id/sju/jmel/article/view/1942>
- Saukani, M., Setyono, R., & Trianiza, I. (2019). *Pengaruh Jumlah Perekat Karet Terhadap Kualitas Briket Cangkang Sawit*. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 1(1), 159–162.
<https://doi.org/10.20527/flux.v1i1.6159>

- Septyani, D., & Hartati, S. (2024). *Konsumsi Energi Fosil Terhadap Pertumbuhan Ekonomi*. Journal of Economic, Bussines and Accounting (COSTING), 7(5), 1491–1498. <https://doi.org/10.31539/costing.v7i5.11780>
- Stelte, W., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Ahrenfeldt, J., & Henriksen, U. B. (2011). *Fuel Pellets From Biomass: The Importance Of The Pelletizing Pressure And Its Dependency On The Processing Conditions*. Fuel, 90(11), 3285–3290. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.05.011>
- van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). *Biomass Upgrading By Torrefaction For The Production Of Biofuels: A Review*. Biomass and Bioenergy, S0961953411003473. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- Suastika, G. (2019). *Proses Torefaksi Untuk Meningkatkan Nilai Kalor Cangkang Sawit dengan Metode COMB*. Risalah Fisika, 3(2), 47–50. <https://doi.org/10.35895/rf.v3i2.159>
- Sugiyono, A. (2015, January 1). *Permasalahan Dan Kebijakan Energi Saat Ini*.
- Suhartati, S., Puspito, R., Rizali, F., & Anggraini, D. (2016). *Analisis Sifat Fisika dan Kimia Lignin Tandan Kosong Kelapa Sawit asal Desa Sape, Kabupaten Sanggau, Kalimantan Barat*. Jurnal Kimia VALENSI, 2(1), 24–29. <https://doi.org/10.15408/jkv.v2i1.3102>
- Suharyati, Pratiwi, N. I., Pambudi, S. H., Wibowo, J. L., Sauqi, A., Damanik, J. T., Arifin, F. D., & Kristanto, N. (2024). *Outlook energi Indonesia*. Sekretariat Jendral Dewan Energi Nasional.
- Sukarta, I. N., & Ayuni, P. S. (2016). *Analisis Proksimat Dan Nilai Kalor Pada Pellet Biosolid Yang Dikombinasikan Dengan Biomassa Limbah Bambu*. JST (Jurnal Sains Dan Teknologi), 5(1). <https://doi.org/10.23887/jst-undiksha.v5i1.8278>
- Syamsiro, M. (2016). *Peningkatan Kualitas Bahan Bakar Padat Biomassa Dengan Proses Densifikasi Dan Torrefaksi*. Jurnal Mekanika Dan Sistem Termal, 1(1), 7–13.
- Tscheuschner, H. -D. (1987). N. N. Mohsenin: *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. Structure, Physical Characteristics and Mechanical Properties. 2. Aufl. 891 Seiten, zahlr. Abb. und Tab. Gordon and Breach Science Publishers, New York u. a. 1986. Preis: 140.—£. *Food / Nahrung*, 31(7), 702–702. <https://doi.org/10.1002/food.19870310724>
- Tumuluru, J. S. (2015). *High Moisture Corn Stover Pelletizing In A Flat Die Pellet Mill Fitted With A 6 Mm Die: Physical Properties And Specific Energy*

- Consumption*. Energy Science & Engineering, 3(4), 327–341.
<https://doi.org/10.1002/ese3.74>
- 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, 728140.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.728140>
- Uemura, Y., Omar, W. N., Tsutsui, T., & Yusup, S. B. (2011). *Torrefaction Of Oil Palm Wastes*. Fuel, 90(8), 2585–2591.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.03.021>
- Unpinit, T., Poblarp, T., Sailoon, N., Wongwicha, P., & Thabuot, M. (2015). *Fuel Properties of Bio-Pellets Produced from Selected Materials under Various Compacting Pressure*. Energy Procedia, 79, 657–662.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.551>
- Wahyudi, A. (2021). *Pengaruh suhu terhadap sifat fisik biopellet torefaksi lima jenis biomassa limbah pertanian [Skripsi]*. Teknik Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung.
- Whittaker, C., & Shield, I. (2017). *Factors Affecting Wood, Energy Grass And Straw Pellet Durability – A Review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 71, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.119>
- Wibowo, T., Setyawati, D., Nurhaida, & Diba, F. (2016). *Kualitas Biopellet Dari Limbah Batang Kelapa Sawit Dan Limbah Kayu Penggergajian*.
<https://www.semanticscholar.org/paper/KUALITAS-BIOPELET-DARI-LIMBAH-BATANG-KELAPA-SAWIT-Wibowo-Setyawati/1dfac20f989c37b3c55d43f14efcb2337f345e05>
- Widhiantari, I. A., Muttalib, S. A., Hidayat, A. F., Baskara, Z. W., & Zulfikar, W. (2020). *Pemanfaatan Limbah Kulit Durian Menjadi Biobriket di Desa Peresak Kabupaten Lombok Barat*. Jurnal Abdi Insani Universitas Mataram, 7(1), 32–37. <https://doi.org/10.29303/abdiinsani.v7i1.303>
- Witdarko, Y., Bintoro, N., Suratmo, B., & Rahardjo, B. (2015). *Pemodelan Pada Proses Pengeringan Mekanis Tepung Kasava Dengan Menggunakan Pneumatic Dryer: Hubungan Fineness Modulus Dengan Variabel Proses Pengeringan*. Agritech, 35(04), 481. <https://doi.org/10.22146/agritech.9333>
- Yudiartono, Y., Windarta, J., & Adiarso, A. (2022). *Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Nasional Jangka Panjang Untuk Mendukung Program Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral*. Jurnal Energi Baru dan Terbarukan, 3(3), 201–217. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.14264>

- Yulianto, T. (2020). *Pengaruh Torefaksi Terhadap Sifat Fisis Black Pellet Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)*. Skripsi. Fakultas Pertanian Universitas Lampung Bandar Lampung 2020.
- Zamirza, F. (2009). *Pembuatan Biopellet Dari Bungkil Jarak Pagar (*Jathropa Curcas L.*) Dengan Penambahan Sludge Dan Perekat Tapioka*. Skripsi. Fakultas Teknologi Pertanian IPB. <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/11314>
- Zikri, A., Erlinawati, E., & Rusnadi, I. (2015). *Prototipe Alat Pengering Biomassa Tipe Rotari (Uji Kinerja Rotary Dryer Berdasarkan Efisiensi Termal Pengeringan Serbuk Kayu Untuk Pembuatan Biopellet)*. Jurnal Teknik Kimia, 21(2), Article 2.