

Pengaruh Variasi Jenis *Binder* LDPE dan SBR Terhadap Karakteristik Fisik dan Kimia Biopelet Tongkol Jagung

Alya widya Natasya^{1*}, Karnowo²

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang
Jl. Raya Banaran, Sekaran, Kec. Gn. Pati, Kota Semarang, Jawa Tengah 50229

*email : alyawidya918@gmail.com

(Received: 15-07-2026; Reviewed: 25-07-2026; Accepted: 05-07-2026)

Abstrak

Kebutuhan energi yang semakin meningkat perlu pengembangan bahan bakar alternatif yang berasal dari biomassa, salah satunya adalah biopelet yang dibuat dari limbah tongkol jagung. Namun, kualitas biopelet masih harus ditingkatkan dengan menambahkan bahan perekat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak perubahan jenis bahan perekat *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan *Styrene Butadiene Rubber* (SBR) terhadap sifat fisik dan kimia biopelet jagung tongkol, serta menemukan kondisi proses yang paling baik. Penelitian ini menggunakan metode Taguchi L16 dengan mengubah jenis bahan perekat, konsentrasi bahan perekat (1,2,4,6%), tekanan kompresi (50,100,150,200 MPa), dan suhu kompresi (50,75,125,150°C). Karakteristik yang dianalisis mencakup kadar air, kadar abu, zat terbang (*volatile matter*), karbon terikat (*fixed carbon*), penyerapan kelembapan. Penelitian menunjukkan bahwa suhu densifikasi merupakan faktor utama yang mempengaruhi tingkat densitas biopelet (P-value = 0,003). Sementara itu, perbedaan jenis bahan perekat, jumlah bahan perekat, dan tekanan tidak memberikan pengaruh secara statistik yang signifikan terhadap densitas maupun daya tahan biopelet. Menggunakan LDPE membuat bahan lebih tahan terhadap kerusakan mekanis dan lebih tahan terhadap kelembapan dibandingkan menggunakan SBR, tetapi SBR menghasilkan bahan yang lebih padat sedikit. Secara umum, biopelet jagung tongkol yang menggunakan *binder* LDPE memiliki sifat yang lebih baik untuk digunakan sebagai bahan bakar padat karena dapat meningkatkan kestabilan bentuk dan ketahanan terhadap kelembapan.

Kata kunci: Biopelet, Densifikasi, LDPE, SBR, Tongkol Jagung

1. PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan energi seiring dengan perkembangan sektor industri dan aktivitas ekonomi telah menyebabkan konsumsi energi terus meningkat dari tahun ke tahun. Berdasarkan *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia* (HEESI) 2024 yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), pasokan energi di Indonesia pada tahun 2023 meningkat sebesar 7,46% dibandingkan tahun sebelumnya. Sektor industri menjadi pengguna energi terbesar dengan porsi mencapai 45,49% dari total permintaan energi nasional. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan energi di Indonesia terus meningkat sehingga diperlukan pengembangan sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan dan berkelanjutan (Resources, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan energi nasional terus-menerus mengalami peningkatan sehingga diperlukan pengembangan sumber energi alternatif terbarukan, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Biomassa merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif karena ketersediaannya yang melimpah. Salah satu limbah biomassa yang bisa dimanfaatkan adalah tongkol jagung. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS), produksi jagung pipilan kering Indonesia mencapai 16,67 juta ton pada tahun 2025,

sehingga berpotensi menghasilkan limbah tongkol jagung yang melimpah (Statistik, 2026). Tongkol jagung merupakan biomassa lignoselulosa yang tersusun atas selulosa, hemiselulosa, dan lignin sehingga memiliki potensi sebagai bahan baku biopelet (Pohan, 2022). Melalui proses densifikasi, biomassa tersebut dapat diubah menjadi biopelet yang memiliki densitas energi lebih tinggi, mudah disimpan, dan didistribusikan dibandingkan biomassa dalam bentuk mentah (He, et al., 2024). Selain itu, tongkol jagung juga mempunyai kandungan lignin yang berperan sebagai perekat alami selama proses peletisasi (Pohan, 2022). Namun, kandungan lignin tersebut belum mampu menghasilkan biopelet dengan karakteristik fisik dan mekanis yang optimal sehingga masih membutuhkan bahan perekat (*binder*) untuk meningkatkan kualitas biopelet (He, et al., 2024). Penambahan *binder* berfungsi meningkatkan ikatan partikel biopelet selama proses densifikasi sehingga menghasilkan biopelet dengan densitas dan durabilitas yang tinggi serta mengurangi keretakan dan kehilangan massa selama penyimpanan (Kubesa, et al., 2024). Selain meningkatkan karakteristik fisik, penggunaan *binder* juga memengaruhi karakteristik kimia biopelet, seperti kadar air, kadar abu, zat terbang (*volatile matter*), dan karbon terikat (*fixed carbon*) yang merupakan parameter penting dalam menentukan mutu biopelet sebagai bahan bakar padat (Limo, et al., 2024).

Salah satu jenis *binder* yang bisa dimanfaatkan adalah *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan *Styrene Butadiene Rubber* (SBR). LDPE merupakan termoplastik yang fleksibilitasnya tinggi dan titik leleh relatif rendah sehingga mampu membentuk ikatan antartikel biomassa selama proses densifikasi. Karakteristik tersebut memungkinkan LDPE digunakan sebagai perekat yang dapat meningkatkan ketahanan struktur biopelet, mengurangi rongga antartikel, serta berpotensi meningkatkan densitas dan stabilitas fisik. Selain itu, sifat hidrofobik yang dimiliki LDPE juga berpotensi meningkatkan ketahanan biopelet terhadap paparan kelembapan. Sementara itu, SBR merupakan karet sintesis yang memiliki ketahanan abrasi, elastisitas, dan daya rekat yang baik. Sifat elastomer pada SBR memungkinkan memberikan fleksibilitas pada struktur biopelet sehingga berpotensi meningkatkan kekuatan mekanis dan durabilitas biopelet (He, et al., 2024) (Limo, et al., 2024).

Selain itu, permasalahan limbah plastik dan kebutuhan pengembangan energi ernaif menjadi salah satu alasan pentingnya pemanfaatan kembali material polimer dalam aplikasi biomassa. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, sampah plastik masih menjadi salah satu komponen sampah dengan jumlah timbulan yang tinggi di Indonesia. Pada tahun 2024, potensi timbulan sampah plastik yang dilaporkan oleh produsen mencapai 934.659,36 ton, dengan realisasi pengurangan sebesar 193.778,18 ton (Indonesia, 2024). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa masih diperlukan inovasi pemanfaatan limbah plastik menjadi produk bernilai tambah, salah satunya sebagai *binder* dalam proses densifikasi biomassa. Selain limbah plastik, pemanfaatan material berbasis karet sintetis seperti SBR juga memiliki peluang untuk dikembangkan. Berdasarkan data Statistik Karet Indonesia, SBR merupakan salah satu jenis karet sintetis yang masih memiliki aktivitas perdagangan di Indonesia dengan volume impor mencapai 6.831 ton pada tahun 2023 (Statistik, 2024). Sedangkan pemanfaatan limbah SBR masih begitu relatif terbatas, padahal material tersebut dapat diolah menjadi crumb rubber sebagai bahan baku berbagai produk bernilai (Faizah, 2021). Oleh karena itu, pemanfaatan limbah SBR sebagai *binder* dalam proses pembuatan biopelet menjadi salah satu alternatif yang dapat mengurangi akumulasi limbah sekaligus meningkatkan karakteristik fisik dan mekanis (Santoso, 2025).

Penelitian ini mengembangkan pendekatan pemanfaatan *binder* jenis polimer untuk meningkatkan kualitas biopelet dari biomassa tongkol jagung melalui campuran *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan *Styrene Butadiene Rubber* (SBR). Penelitian terdahulu umumnya masih berfokus pada penggunaan *binder* konvensional jenis pati atau hanya mengevaluasi pengaruh satu jenis perekat

terhadap karakteristik biopelet. Berbeda dengan penelitian sebelumnya, penelitian ini mengkaji penggunaan dua jenis *binder* dengan karakteristik yang berbeda, yaitu LDPE sebagai material termoplastik yang mampu membentuk ikatan melalui proses pelelehan dan SBR sebagai material elastomer yang memberikan sifat fleksibilitas serta ketahanan mekanis. Kebaruan penelitian ini terletak pada evaluasi pengaruh variasi jenis *binder*, tekanan, dan suhu terhadap karakteristik fisik dan kimia biopelet. Hubungan antara komposisi *binder* dengan parameter kualitas biopelet mampu menghasilkan biopelet yang lebih padat, kuat, dan stabil terhadap lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif pengembangan bahan bakar padat biomassa dengan memanfaatkan limbah pertanian dan limbah polimer/sampah perkotaan sebagai material bernilai tambah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi *binder* LDPE dan SBR terhadap karakteristik biopelet serta menentukan komposisi *binder* optimum yang menghasilkan kualitas biopelet terbaik.

2. METODOLOGI

2.1 Alat dan Bahan

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Fenomena dasar Mesin, E5 Universitas negeri Semarang. Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah tongkol jagung sebagai biomassa, *Low Density Polyethylene* (LDPE), dan *Styrene Butadiene Rubber* (SBR) sebagai perekat (*binder*). Peralatan utama yang digunakan meliputi pencetak pelet dengan ukuran diameter 15 mm, mesin kempa manual, neraca digital, *stopwatch*, oven, dan *furnance*, inkubator kelembapan, serta peralatan pendukung lainnya yang digunakan selama proses pembuatan dan pengujian biopelet.

Penelitian ini menggunakan 4 variabel bebas, yaitu jenis *binder* (LDPE dan SBR), persentase *binder* (1%, 2%, 4%, 6%), tekanan densifikasi (50, 100, 150, 200 MPa), serta suhu densifikasi (100, 125, 150, dan 175 °C). Hasil kombinasi ini disusun menggunakan metode Taguchi untuk memperoleh rancangan percobaan yang efisien. Faktor dan level penelitian ditunjukkan pada Tabel 1.

Table 1. Level Sample Penelitian

No	Parameter [Faktor] Densifikasi	Seting Level per Parameter			
1	Jenis Perekat	LDPE	HDPE	SBR	-
2	Perekat (%)	1	2	4	6
3	Tekanan densifikasi (MPa)	50	100	150	200
4	Suhu densifikasi (°C)	100	125	150	175
	Level Sample [Variasi]	1	2	3	4

2.2 Persiapan Material

Material yang digunakan dalam Penelitian ini adalah biomassa tongkol jagung, *Low Density Polyethylene* (LDPE) dan *Styrene Butadiene Rubber* (SBR) sebagai perekat. Tongkol jagung terlebih dahulu dibersihkan dari kotoran yang menempel, kemudian dicacah kecil dan di grinder sampai halus mencapai 60-80 mesh sehingga mempermudah proses peletisasi. selanjutnya LDPE dan SBR dihaluskan juga digiling dengan ukuran yang seragam 50 mesh. Kemudian biomassa yang sudah di mesh dikeringkan kedalam oven untuk mengurangi kadar air disuhu 105°C selama 12 jam sampai kadar air biomassa mencapai 8%.

2.3 Optimasi Proses Peletisasi

Proses optimalisasi peletisasi dilakukan untuk memperoleh biopelet dengan karakteristik yang optimal. Proses densifikasi dilakukan menggunakan alat mesin kempa 30T peletisasi hidrolik buatan TMAXCN, dicetak menggunakan single pelet yang dilengkapi pemanas. Parameter proses yang digunakan meliputi *binder* (1%, 2%, 4%, 6%), tekanan densifikasi (50, 100, 150, 200 MPa), serta suhu densifikasi (100, 125, 150 dan 175°C). kemudian biomassa dan *binder* dicampur sesuai

variasi yang sudah dibuat dan dimasukkan dalam cetakan diberikan tekanan, temperature, suhu sesuai rancangan yang sudah disusun menggunakan Metode Taguchi (L16) dan *holding time* selama 120 detik. Setelah pengepresan, tekanan dilepaskan dan pelet dikeluarkan dari cetakan. Kemudian pelet diberi penanda berdasarkan jenis variasi dan disimpan kedalam wadah yang kedap udara. Setiap variasi dibuat sebanyak tiga kali pengulangan untuk memperoleh keakuratan data yang lebih baik.

2.4 Desain Penelitian dengan Metode Taguchi

Metode Taguchi digunakan dalam Penelitian ini karena membantu mengoptimalkan hasil proses eksperimen dengan jumlah yang sedikit dibandingkan Metode konvensional. Perancangan eksperimen dilakukan menggunakan *Orthogonal Array Taguchi* L16 pada perangkat lunak Minitab. Rancangan Taguchi menghasilkan 16 variasi percobaan, dimana setiap variasi dilakukan pengulangan tiga kali. Parameter yang digunakan meliputi perekat (1%, 2%, 4%, 6%), tekanan densifikasi (50, 100, 150, 200 MPa), serta suhu densifikasi (100, 125, 150 dan 175 °C).

2.5 Densitas dan Stabilitas Pelet

Densitas pelet merupakan parameter yang menunjukkan tingkat kepadatan material setelah proses densifikasi. Pengukuran densitas dilakukan dengan menghitung perbandingan antara massa terhadap volume pelet. Yang dimana masa pelet diukur menggunakan neraca digital dan untuk tinggi dan diameter diukur menggunakan digital caliper ketelitian 0,5. Nilai densitas kemudian dihitung menggunakan persamaan 1.

$$\rho = \frac{4m}{\pi d^2 L} \quad (1)$$

ρ = densitas pelet (g/cm³)

m = massa pelet (g)

V = volume pelet (cm³)

d = diameter pelet (cm)

L = tinggi pelet (cm)

Untuk ketahanan pelet dievaluasi menggunakan *drop test* untuk mengetahui kemampuan pelet dalam mempertahankan fisiknya terhadap beban benturan. Pengujian ini dilakukan dengan menjatuhkan sampel pelet dari ketinggian 1,8m. kemudian terjadi perubahan masa sebelum dan setelah di *drop test*.

2.6 Ketahanan Terhadap Penyerapan Kelembapan

Pengujian ketahanan terhadap penyerapan kelembapan dilakukan untuk mengetahui kemampuan biopelet dalam mempertahankan karakteristik fisiknya ketika mengalami paparan di lingkungan dengan kelembapan tinggi. Pengujian dilakukan menggunakan inkubator kelembapan dengan kondisi kelembapan relatif (*Relative Humidity*/RH) sebesar 70% selama 36 jam. Sampel biopelet yang digunakan merupakan 3 variasi terbaik berdasarkan hasil optimasi parameter peletisasi menggunakan metode Taguchi. Sebelum pengujian sampel dikeringkan selama 12 jam pada suhu 105°C. Kemudian sampel ditimbang untuk memperoleh massa awal sebagai acuan perubahan massa selama proses penyerapan kelembapan berlangsung.

Selama proses pengujian, sampel ditempatkan di dalam inkubator dan dilakukan pengukuran massa secara berkala. Pengambilan data dilakukan setiap 30 menit pada 10 jam pertama untuk mengetahui laju awal penyerapan kelembapan. Setelah itu sampel dilakukan pengukuran lanjutan pada waktu 24 jam. Selanjutnya pengukuran massa dilakukan setiap 2 jam hingga mencapai 36 jam. Nilai penyerapan kelembapan diperoleh dari perbandingan peningkatan massa pelet setelah terpapar kelembapan terhadap massa sebelum terkena paparan kelembapan. Pelet dengan nilai moisture uptake yang lebih rendah memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap pengaruh kelembapan selama

penyimpanan (K. Singara Veloo, 2025). Berikut adalah komposisi pengujian kelembapan ditunjukkan pada tabel 2.

Table 2. Komposisi Pengujian Kelembapan

Parameter Pelet Formulation	Pelet (%)	A	B	C
	Jagung	100	94	94
	LDPE	0	6	0
	SBR	0	0	6
Jumlah Sampel		3x	3x	3x

2.7 Kadar Abu, *Volatile*, dan Kadar Karbon pada Biomassa

Pengujian karakteristik *proximate* biopellet meliputi kadar air (*moisture content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), kadar abu (*ash content*), dan kadar karbon terikat (*fixed carbon*). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kualitas biopellet yang dihasilkan berdasarkan standar pengujian biomassa. Analisis kadar air dilakukan mengacu pada ASTM E871-82 (2019), pengujian kadar *volatile matter* mengacu pada ASTM E872-82 (2019), sedangkan pengujian kadar abu menggunakan ASTM E1755-01 (2020). Nilai kadar karbon tetap tidak diuji secara langsung, melainkan dihitung berdasarkan hasil analisis *proximate*.

Pengujian kadar air dilakukan dengan menimbang sekitar 1 gram sampel biopellet menggunakan timbangan digital dengan ketelitian 0,0001 gram. Sampel kemudian dimasukkan ke dalam cawan yang telah diketahui beratnya dan dikeringkan di dalam oven pada suhu 105°C selama kurang lebih 24 jam atau hingga beratnya konstan sesuai prosedur ASTM E871-82 (2019). Setelah proses pengeringan selesai, cawan dipindahkan ke dalam desikator selama 15–30 menit agar mencapai suhu ruang tanpa menyerap uap air dari lingkungan. Sampel kemudian ditimbang kembali untuk memperoleh berat akhir. Kadar air dihitung menggunakan Persamaan 2.

$$MC(\%) = \frac{w_1 - w_2}{w_1} \times 100 \quad (2)$$

W1 = berat sampel sebelum dikeringkan (g)

W2 = berat sampel setelah dikeringkan (g)

Setelah pengujian kadar air selesai, sampel digunakan untuk analisis kadar zat mudah menguap (*volatile matter*) berdasarkan ASTM E872-82 (2019). Sampel kering sebanyak sekitar 1 gram dimasukkan ke dalam cawan tertutup yang telah diketahui beratnya, kemudian dipanaskan di dalam furnace yang telah mencapai suhu 950°C selama 7 menit dengan kondisi cawan tetap tertutup untuk mencegah terjadinya pembakaran akibat masuknya oksigen. Setelah pemanasan selesai, cawan dikeluarkan menggunakan penjepit tahan panas dan didinginkan di dalam desikator hingga mencapai suhu ruang sebelum ditimbang kembali. Selisih massa sebelum dan sesudah pemanasan digunakan untuk menentukan kadar *volatile matter* yang dihitung menggunakan Persamaan 3.

$$VM(\%) = \frac{B - C}{B - A} \times 100 \quad (3)$$

A = berat cawankosong (g)

B = berat cawan+ sampel kering sebelum dipanaskan (g)

C = berat cawan+ residu setelah dipanaskan (g)

Pengujian kadar abu dilakukan berdasarkan ASTM E1755-01 (2020) dengan menggunakan sampel biopellet yang telah dikeringkan. Sekitar 1 gram sampel dimasukkan ke dalam cawan porselen yang telah diketahui berat kosongnya, kemudian dipanaskan di dalam furnace dengan suhu 575°C selama 3 jam hingga seluruh bahan organik habis terbakar dan hanya tersisa residu abu yang

berwarna putih keabu-abuan dengan berat konstan. Setelah proses pembakaran selesai, cawandipindahkan ke dalam desikator hingga mencapai suhu ruang, kemudian ditimbang kembali. Kadar abu dihitung menggunakan Persamaan 4.

$$Ash(\%) = \frac{C - A}{B - A} \times 100 \quad (4)$$

A = berat cawankosong (g)

B = berat cawan+ sampel sebelum pembakaran (g)

C = berat cawan+ abu setelah pembakaran (g)

Kadar karbon tetap (*fixed carbon*) dihitung berdasarkan hasil analisis dengan mengurangi jumlah kadar air, kadar *volatile matter*, dan kadar abu dari 100%. Persamaan yang digunakan adalah

$$FC(\%) = 100 - (MC + VM + Ash) \quad (5)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Proximate Raw Material

Analisis *proximate* dilakukan untuk mengetahui karakteristik awal biomassa tongkol jagung yang digunakan sebagai bahan baku pellet. Parameter yang dianalisis kadar air (*moisture content*), kadar zat terbang (*volatile matter*), kadar abu (*ash content*), dan kadar karbon terikat (*fixed carbon*). Hasil pengujian *proximate* ditunjukkan pada tabel 3.

Table 3. Hasil Pengujian Proximate

Sample	mc (%)	VM%	AC%	FC%
1	8	78,519	2,356	19,125
2	8	78,521	2,678	18,801
Rata-rata	8	78,52	2,517	18,963

Berdasarkan hasil pengujian, tongkol jagung memiliki kadar air (*moisture content*) sebesar 8,00%, kadar zat terbang (*volatile matter*) sebesar 78,52%, kadar abu (*ash content*) sebesar 2,52%, dan kadar karbon terikat (*fixed carbon*) sebesar 18,96%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa tongkol jagung memiliki karakteristik yang baik sebagai bahan baku biopellet karena didominasi oleh komponen organik dengan kandungan mineral yang relatif rendah.

Kadar air rata-rata sebesar 8,00% menunjukkan bahwa biomassa telah memenuhi kondisi yang sesuai untuk proses densifikasi. Kandungan air yang rendah berperan dalam meningkatkan kontak antarpartikel selama proses kompaksi sehingga ikatan yang terbentuk menjadi lebih kuat. Selain itu, kadar air yang rendah dapat mengurangi kebutuhan energi selama proses pengeringan dan meningkatkan efisiensi pembakaran biopellet. kadar air merupakan salah satu parameter yang menentukan kualitas pelet karena memengaruhi kekuatan mekanis, densitas, dan stabilitas produk selama penyimpanan (Kang, et al., 2018)

Kadar abu rata-rata sebesar 2,52% menunjukkan bahwa tongkol jagung memiliki kandungan mineral anorganik yang relatif rendah. Kandungan abu yang rendah merupakan karakteristik yang diinginkan pada bahan bakar padat karena dapat mengurangi pembentukan kerak (*slagging*), endapan abu (*fouling*), serta residu pembakaran pada peralatan pembakaran. Biomassa dengan kadar abu rendah umumnya memiliki efisiensi pembakaran yang lebih baik dan menghasilkan residu yang lebih sedikit sehingga lebih sesuai dimanfaatkan sebagai bahan bakar biomassa (Nanda, et al., 2013).

Nilai *volatile matter* sebesar 78,52% menunjukkan bahwa sebagian besar komponen penyusun tongkol jagung merupakan senyawa organik yang mudah terdekomposisi selama proses pemanasan. Kandungan zat terbang yang tinggi akan mempermudah proses penyalaan (*ignition*) dan

mempercepat terbentuknya nyala api pada tahap awal pembakaran. Namun demikian, kandungan *volatile matter* yang tinggi juga dapat meningkatkan laju pembakaran sehingga perlu diimbangi dengan kandungan karbon terikat yang cukup agar proses pembakaran berlangsung lebih stabil. Kandungan *volatile matter* berpengaruh terhadap karakteristik penyalan dan perilaku pembakaran biopellet (Kang, et al., 2018).

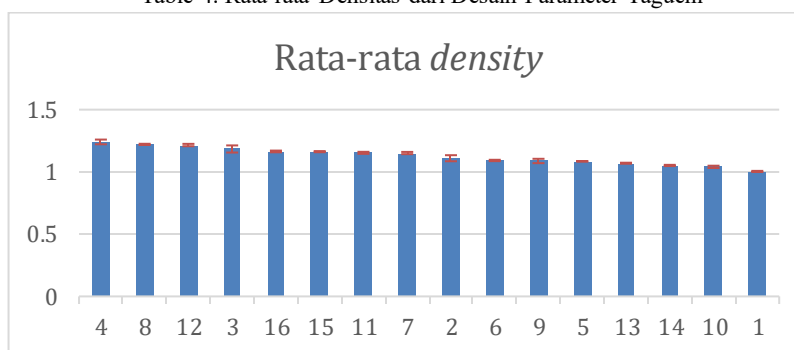
Kadar *fixed carbon* sebesar 18,96% menunjukkan jumlah karbon padat yang masih tersisa setelah kandungan air, zat terbang, dan abu dihilangkan. Karbon terikat merupakan komponen yang berperan dalam mempertahankan proses pembakaran setelah senyawa volatil habis terbakar serta berkontribusi terhadap nilai kalor dan lamanya pembakaran. Peningkatan kandungan *fixed carbon* berkaitan dengan meningkatnya densitas energi dan kualitas bahan bakar padat. Biomassa lignoselulosa dengan komposisi proksimat yang seimbang memiliki potensi yang baik untuk menghasilkan biopellet berkualitas melalui proses densifikasi (He, et al., 2024).

Secara keseluruhan, hasil analisis *proximate* menunjukkan bahwa tongkol jagung memiliki karakteristik yang mendukung penggunaannya sebagai bahan baku biopellet. Kombinasi kadar air sebesar 8,00%, kadar abu sebesar 2,52%, *volatile matter* sebesar 78,52%, dan *fixed carbon* sebesar 18,96% menunjukkan bahwa tongkol jagung memiliki potensi yang baik untuk menghasilkan biopellet dengan karakteristik pembakaran yang baik. Karakteristik ini menjadi dasar untuk mengevaluasi pengaruh penambahan *binder* LDPE dan SBR terhadap sifat fisik maupun kimia biopellet pada tahap selanjutnya.

3.2 Optimalisasi Proses Peletisasi

3.2.1 Hasil Statistic *Density* Pellet

Table 4. Rata-rata Densitas dari Desain Parameter Taguchi



Nilai densitas merupakan salah satu parameter utama yang menentukan kualitas biopellet karena berkaitan dengan kerapatan Partikel, kekuatan mekanis, serta densitas energi selama penyimpanan. Berdasarkan hasil pengujian, nilai densitas biopellet berada pada kisaran 1,004–1,241 g/cm³. Variasi nilai tersebut menunjukkan bahwa perubahan jenis *binder*, persentase *binder*, suhu, dan tekanan densifikasi memberikan pengaruh terhadap tingkat kerapatan biopellet yang dihasilkan. Nilai densitas tertinggi diperoleh pada Run 4 sebesar 1,241 g/cm³, sedangkan nilai terendah diperoleh pada Run 1 sebesar 1,004 g/cm³. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa kombinasi parameter peletisasi memengaruhi kemampuan partikel biomassa untuk membentuk ikatan yang lebih rapat selama proses densifikasi.

Peningkatan densitas dipengaruhi oleh proses densifikasi yang menyebabkan partikel biomassa menjadi lebih rapat dan mengurangi rongga di dalam biopellet. Selain itu, pemanasan membantu *binder* membentuk ikatan yang lebih kuat antarpartikel sehingga menghasilkan struktur biopellet yang lebih kompak. Kondisi densifikasi dan karakteristik *binder* berpengaruh terhadap densitas biopellet.

Table 5. Hasil Varian Dari Rata-rata Densitas

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Perekat (%)	3	0.001574	0.000525	0.52	0.689
Suhu (C)	3	0.061598	0.020533	20.22	0.003
Tekanan (MPa)	3	0.003651	0.001217	1.2	0.4
Jenis Perekat	1	0.001412	0.001412	1.39	0.291
Error	5	0.005077	0.001015		
Total	15	0.073311			

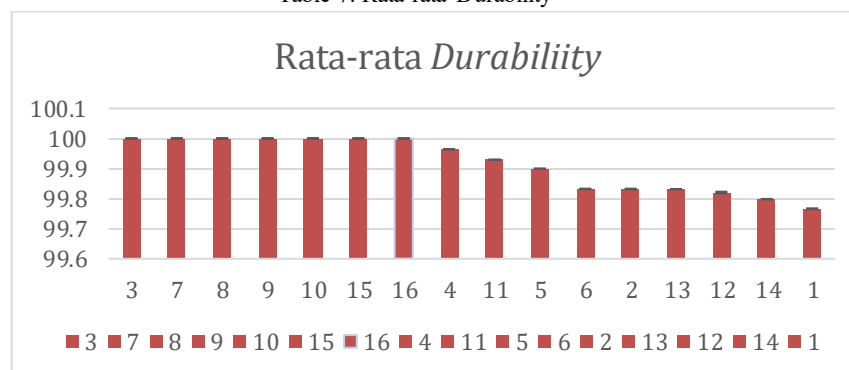
Table 6. Respon Tabel Rata-rata Densitas

Level	Perekat(%)	Tekanan(Mpa)	Suhu (C)	Jenis Perekat
1	1.135	1.103	1.061	1.118
2	1.137	1.143	1.073	1.136
3	1.124	1.136	1.163	
4	1.112	1.126	1.120	
Delta	0.025	0.040	0.149	0.019
Rank	3	1	2	4

Hasil ANOVA menunjukkan bahwa suhu merupakan factor yang mempengaruhi densitas biopelet dengan nilai F-value sebesar 20,22 dan P-value sebesar 0,003 ($<0,05$). Sebaliknya, persentase perekat, tekanan, dan jenis perekat memiliki nilai P-value lebih besar dari 0,05 sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap densitas biopelet. Hal ini menunjukkan bahwa suhu densifikasi merupakan parameter yang paling menentukan dalam meningkatkan densitas biopelet karena mampu melunakkan *binder* dan meningkatkan ikatan antarpartikel selama proses kompaksi, sehingga menghasilkan struktur biopelet yang lebih padat.

3.2.2 Hasil Statistic *Durability Pellet*

Table 7. Rata-rata *Durability*



Nilai *durability* Merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan kualitas biopelet karena menggambarkan kemampuan pellet dalam mempertahankan bentuk dan kekuatan mekaniknya selama proses penyimpanan. Nilai *durability* yang tinggi menunjukkan bahwa pellet memiliki ikatan

antarpartikel yang kuat sehingga lebih tahan terhadap kerusakan fisik akibat gaya eksternal. Hasil pengujian densitas bbiopelb ditunjukkan pada table 7

Berdasarkan hasil pengujian *durability* pada 16 variasi pellet dengan metode Taguchi L16, diperoleh nilai *durability* yang relatif tinggi dengan rentang 99,76–100%. Grafik menunjukkan bahwa sebagian besar variasi menghasilkan nilai *durability* mendekati 100%, yang menunjukkan bahwa proses densifikasi menggunakan kombinasi tongkol jagung dengan *binder* LDPE dan SBR mampu menghasilkan pellet dengan ketahanan mekanik yang sangat baik.

Variasi 3, 7, 8, 9, 10, 15, dan 16 menunjukkan nilai *durability* tertinggi yaitu mencapai 100%, yang menunjukkan tidak terjadi kehilangan massa yang signifikan setelah dilakukan pengujian. Hal ini mengindikasikan bahwa kombinasi parameter proses pada variasi tersebut mampu menghasilkan ikatan antarpartikel yang optimal.

Sementara itu, nilai *durability* terendah diperoleh pada variasi 1 dengan nilai sekitar 99,76%, namun nilai tersebut masih menunjukkan tingkat ketahanan yang sangat baik. Perbedaan nilai *durability* antarvariasi relatif kecil, sehingga dapat diketahui bahwa perubahan parameter proses berupa suhu, tekanan, dan konsentrasi *binder* memberikan pengaruh yang tidak terlalu besar terhadap *durability* pellet pada rentang parameter penelitian ini.

Table 8. Hasil Varian Dari Rata-rata Durabilitas

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Perekat (%)	3	0.005859	0.001953	0.24	0.866
Suhu (C)	3	0.038346	0.012782	1.56	0.309
Tekanan (MPa)	3	0.016577	0.005526	0.67	0.604
Jenis Perekat	1	0.017088	0.017088	2.08	0.208
Error	5	0.040984	0.008197		
Total	15	0.118854			

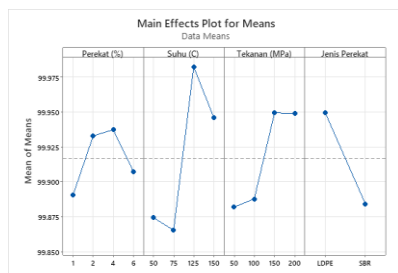
Table 9. Respon Rata -rata Durabilitas

Level	Perekat (%)	Tekanan (Mpa)	Suhu (C)	Jenis Perekat
1	99.89	99.88	99.87	99.95
2	99.93	99.89	99.87	99.88
3	99.94	99.95	99.98	
4	99.91	99.95	99.95	
Delta	0.05	0.07	0.12	0.07
Rank	4	1	2	3

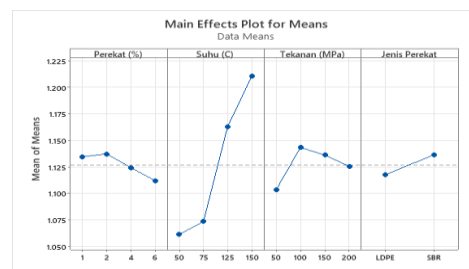
Hasil ANOVA menunjukkan bahwa Faktor persentase perekat memiliki nilai F-value sebesar 0,24 dengan P-value sebesar 0,866. Nilai tersebut menunjukkan bahwa variasi persentase perekat belum memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik biopellet. Faktor suhu peletisasi menghasilkan nilai F-value sebesar 1,56 dengan P-value sebesar 0,309, yang menunjukkan bahwa perubahan suhu pada rentang pengujian belum memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik. Selanjutnya, faktor tekanan peletisasi memiliki nilai F-value sebesar 0,67 dengan P-value sebesar 0,604, sehingga dapat dinyatakan bahwa variasi tekanan juga belum memberikan pengaruh signifikan terhadap hasil penelitian.

Sementara itu, faktor jenis perekat menunjukkan nilai F-value paling tinggi dibandingkan faktor lainnya yaitu sebesar 2,08 dengan P-value sebesar 0,208. Meskipun memiliki kontribusi pengaruh

yang relatif lebih besar dibandingkan faktor lain, nilai P-value yang masih berada di atas 0,05 menunjukkan bahwa perbedaan jenis perekat belum menghasilkan perubahan yang signifikan secara statistik terhadap karakteristik biopelet. Nilai Error sebesar 0,040984 dengan derajat bebas (DF) 5 menunjukkan bahwa terdapat variasi data yang tidak dapat dijelaskan oleh faktor-faktor penelitian. Jumlah variasi data yang dianalisis adalah 0,118854 dengan total derajat bebas sebanyak 15. Hasil ANOVA secara keseluruhan menunjukkan bahwa dalam kondisi percobaan yang dilakukan, faktor persentase perekat, suhu, tekanan, dan jenis perekat tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil biopelet. Akan tetapi, nilai F-value menunjukkan bahwa tipe perekat dan temperatur memberikan kontribusi pengaruh yang lebih signifikan dibandingkan faktor lainnya, sehingga dapat menjadi parameter penting dalam mengoptimalkan proses peletisasi berikutnya.



Gambar a. Main Effect Plot Durabilitas



Gambar b. Main Effect Plot Densitas

3.3 Pengaruh Konsentrasi Perekat

Berdasarkan *Main effects plot durability* maupun densitas presentase perekat memberikan pengaruh yang relative kecil dibandingkan factor suhu. Pada pengujian *durability*, nilai rata-rata tertinggi diperoleh pada penggunaan perekat 4%, sedangkan penggunaan perekat 2% menghasilkan nilai yang sedikit lebih rendah. Peningkatan kadar perekat menjadi 6% menyebabkan nilai *durability* menurun. Perbedaan nilai antar level persentase perekat relatif kecil, sehingga menunjukkan bahwa variasi kadar perekat tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap ketahanan biopelet.

Pada pengujian densitas, kecenderungan yang hampir sama juga terlihat. Nilai densitas meningkat dari penggunaan perekat 1% ke 2%, kemudian menurun pada penggunaan perekat 4% dan mencapai nilai terendah pada 6%. Kondisi ini menunjukkan bahwa penambahan perekat dalam jumlah yang terlalu besar tidak selalu menghasilkan biopelet yang lebih padat. Setelah rongga antarpartikel biomassa terisi secara optimal, kelebihan perekat dapat mengurangi efisiensi proses pemadatan karena membentuk lapisan perekat yang lebih tebal dan kurang merata. Dengan demikian, berdasarkan kedua respon, penggunaan perekat sekitar 2–4% memberikan hasil yang lebih baik dibandingkan penggunaan perekat yang lebih tinggi.

3.4 Pengaruh Tekanan

Berdasarkan *Main effects plot*, suhu merupakan faktor yang memberikan pengaruh paling dominan terhadap *durability* maupun densitas biopelet. Pada pengujian *durability*, nilai rata-rata meningkat dari 50°C hingga mencapai nilai maksimum pada 125°C, kemudian mengalami penurunan yang cukup tajam pada suhu 150°C. Hal ini menunjukkan bahwa suhu 125°C merupakan kondisi optimum untuk memperoleh ketahanan biopelet yang tinggi.

Berbeda dengan *durability*, pada pengujian densitas nilai rata-rata terus meningkat seiring kenaikan suhu. Nilai densitas terendah diperoleh pada suhu 50°C, kemudian meningkat pada 75°C dan 125°C, serta mencapai nilai tertinggi pada 150°C. Peningkatan densitas ini menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi mampu meningkatkan proses pemadatan sehingga rongga antarpartikel menjadi semakin kecil.

Peningkatan kualitas biopelet pada suhu yang lebih tinggi dipengaruhi oleh proses pelunakan komponen lignoselulosa, khususnya lignin, yang berfungsi sebagai perekat alami selama proses densifikasi. Selain itu, suhu yang lebih tinggi juga meningkatkan kemampuan perekat dalam menyelimuti permukaan partikel biomassa sehingga terbentuk ikatan yang lebih kuat dan struktur biopelet menjadi lebih kompak. Namun, apabila suhu terlalu tinggi, terutama pada pengujian *durability*, sebagian ikatan dapat mengalami degradasi sehingga ketahanan mekanik biopelet menurun.

3.5 Pengaruh Suhu

Hasil *Main effects plot* menunjukkan bahwa tekanan memberikan pengaruh terhadap kedua respon, meskipun tidak sebesar suhu. Pada pengujian *durability*, peningkatan tekanan dari 50 MPa menjadi 100 MPa meningkatkan nilai ketahanan biopelet. Namun, pada tekanan 150 MPa nilai *durability* mengalami penurunan yang cukup besar dan hanya sedikit meningkat kembali pada 200 MPa. Berdasarkan hasil tersebut, tekanan optimum terhadap *durability* diperoleh pada 100 MPa.

Pada pengujian densitas, peningkatan tekanan dari 50 MPa menjadi 100 MPa juga meningkatkan nilai densitas. Setelah itu, densitas sedikit menurun pada tekanan 150 MPa dan kembali menurun pada 200 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan yang terlalu tinggi tidak selalu menghasilkan biopelet yang lebih padat.

Peningkatan tekanan memperbesar luas kontak antarpartikel biomassa sehingga rongga di dalam biopelet berkurang dan ikatan antarpartikel menjadi lebih kuat. Akan tetapi, tekanan yang terlalu tinggi dapat menyebabkan terjadinya over-compression, yaitu kondisi ketika struktur biomassa mengalami deformasi berlebih atau perekat terdorong keluar dari daerah ikatan. Setelah tekanan dilepaskan, material mengalami spring-back sehingga struktur biopelet menjadi kurang stabil dan nilai *durability* maupun densitas tidak lagi meningkat secara optimal.

3.6 Pengaruh Jenis Perekat

Berdasarkan *Main effects plot*, jenis perekat memberikan pengaruh terhadap karakteristik biopelet, meskipun pengaruhnya lebih kecil dibandingkan suhu. Pada pengujian *durability*, penggunaan perekat LDPE menghasilkan nilai rata-rata yang lebih tinggi dibandingkan SBR. Hal ini menunjukkan bahwa LDPE lebih efektif dalam meningkatkan ketahanan biopelet terhadap benturan karena mampu membentuk ikatan termoplastik yang kuat setelah proses pemanasan dan pendinginan.

Sebaliknya, pada pengujian densitas, penggunaan perekat SBR menghasilkan nilai densitas yang sedikit lebih tinggi dibandingkan LDPE. Hal ini menunjukkan bahwa SBR memiliki kemampuan yang lebih baik dalam mengisi rongga antarpartikel sehingga menghasilkan struktur biopelet yang lebih rapat.

Perbedaan hasil antara kedua respon tersebut menunjukkan bahwa densitas yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan *durability* yang lebih baik. Meskipun SBR menghasilkan biopelet yang lebih padat, ikatan mekanik yang dibentuk oleh LDPE lebih efektif dalam mempertahankan integritas biopelet selama pengujian ketahanan jatuh. Oleh karena itu, pemilihan jenis perekat perlu disesuaikan dengan sifat biopelet yang ingin dioptimalkan, yaitu densitas atau ketahanan mekanik.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa variasi jenis *binder* LDPE dan SBR memengaruhi karakteristik biopelet tongkol jagung, meskipun tidak seluruh parameter memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik. Hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa suhu densifikasi merupakan faktor yang paling berpengaruh terhadap peningkatan densitas biopelet, sedangkan konsentrasi *binder*, tekanan, dan jenis *binder* tidak berpengaruh signifikan terhadap densitas maupun *durability* pada rentang

kondisi penelitian. Biopellet yang dihasilkan memiliki nilai densitas sebesar 1,004–1,241 g/cm³ dan *durability* sebesar 99,76–100%, yang menunjukkan kualitas mekanik yang sangat baik.

Penggunaan *binder* LDPE memberikan ketahanan mekanik dan *Moisture resistance* yang lebih baik dibandingkan SBR karena sifat hidrofobiknya mampu mengurangi penyerapan air dan meningkatkan stabilitas biopellet selama penyimpanan. Sebaliknya, SBR menghasilkan densitas yang sedikit lebih tinggi, namun tidak mampu memberikan ketahanan terhadap kelembapan sebaik LDPE. Dengan demikian, LDPE lebih direkomendasikan sebagai *binder* untuk menghasilkan biopellet tongkol jagung dengan karakteristik fisik yang lebih baik dan potensi aplikasi yang lebih tinggi sebagai bahan bakar biomassa alternatif.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM E871-82. (2019). Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM E872-82. (2019). Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- ASTM E1755-01. (2020). Standard Test Method for Ash in Biomass. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Attaya, T. and Rosalinda, S. (2025). Efek Pra-Perlakuan Menggunakan Microwave Terhadap Kandungan Lignoselulosa Kulit Ari Jagung. *Agrointek*, 19(3), pp. 576–583.
- Babu, S., Rathore, S. S., Singh, R., Kumar, S., Singh, V. K., Yadav, S. K., Yadav, V., Raj, R., Shekhawat, K. and Wani, O. A. (2022). Exploring Agricultural Waste Biomass For Energy, Food And Feed Production And Pollution Mitigation: A review', *Bioresource Technology*, 360, 127566.
- Callister, W. D. and Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th edn. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Danun, N. F. T., Pasak, G. P., Simak, B. M. and Lolo, J. A. (2021). Potensi Pengembangan Biomassa Sebagai Alternatif Energi Terbarukan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika Universitas Kristen Indonesia Toraja*.
- Febriani, A. V., Hanum, F. F. and Rahayu, A. (2024). Analisis Potensi dan Tantangan Biomassa Sebagai Bahan Bakar pada PLTU dan Pltbn'.
- He, H., Wang, Y., Sun, Y., Sun, W. and Wu, K. (2024). From raw material powder to solid fuel pellet: A state-of-the-art review of biomass densification. *Biomass and Bioenergy*, 186, 107271.
- Irmawati (2020) 'Analisis sifat fisik dan kimia briket arang dari bonggol jagung. *Journal of Agritech Science (JASc)*, 4(1), pp. 24–29.
- Kang, K., Zhu, M., Sun, G., Qiu, L., Guo, X., Meda, V., & Sun, R. (2018). Codensification of *Eucommia ulmoides* Oliver stem with pyrolysis oil and char for solid biofuel: An optimization and characterization study. *Applied Energy*, 223, 347–357
- Kamal, L. P., Nadya, N., Musyafa, A., Kusuma, A. C., Akram, S. and Miswari (2025). Analisis potensi limbah bonggol jagung sebagai bahan baku briket di Desa Bangunsari, Patebon, Kendal. *Jurnal Malikussaleh Mengabdi*, 4(2), pp. 323–332.
- Kubesa, P., Hrubý, J., Junga, P. and Čech, B. (2024). Biomass pellets with organic *binders* – Before and after torrefaction. *Renewable Energy*, 221, 119771.
- Limo, L. K., Madara, D. S. & Maube, O. (2024). Enhancing Herbaceous Biomass Pellets Quality By Blending With Woody Biomass and Plastic Additives, and Post-Pelletization Torrefaction And Optimization Processes: A review', *Journal of Energy Technologies and Policy*, 14(2).

- liyyansyah, M. F., Maharani, C. W., Febriani, R. & Kadarrohman, A. (2025). Biobriket Berbasis Limbah Lignoselulosa Berstandar Mutu SNI: Tinjauan. *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 7(1), pp. 103–112.
- Pohan, G. A., Rahmadianto, F., Febritasari, R., Kurniawan, A. and Kurniawan, H. (2022). Peningkatan Karakteristik Pembakaran pada Pelet Bonggol Jagung Dengan Menggunakan Perekat Tepung Tapioka. *Prosiding SENIATI*, 6(1), pp. 42–45.
- Rajabby, A. K. (2022). Analisis Pencampuran Bio-Briket Tongkol Jagung Dan Tanah Gambut Sebagai Pengganti Alternatif Bahan Bakar (Tesis Diploma). Universitas Nasional.
- Segers, B., Nimmegeers, P., Spiller, M. et al. (2024). Lignocellulosic Biomass Valorisation: A Review Of Feedstocks, Processes And Potential Value Chains And Their Implications For The Decision-Making Process. *RSC Sustainability*, 2(12), pp. 3730–3749.
- Singh, R., Liu, D., Dong, J., Huang, J., Singh, K. P., Singh, V. P. et al. (2022). Crop Residue Burning In South Asia: A Review Of The Scale, Effect, And Solutions With A Focus On Reducing Reactive Nitrogen Losses', *Journal of Environmental Management*, 314, 115104.
- Sucahyo, L., Agung, S. Z. P. and Wulandani, D. (2024). Formulasi Biopellet dengan Campuran Limbah Tongkol Jagung dan Kayu Sengon Sebagai Bahan Bakar Padat Terbarukan. *Jurnal Agroekoteknologi dan Agribisnis*, 8(1), pp. 33–49.
- Wei, Z., Cheng, Z., & Shen, Y. (2024). Recent development in production of pellet fuels from biomass and polyethylene (PE) wastes. *fuel*, 357, 130222.