

Review Literatur: Karakteristik Fisik, Termal, dan Emisi Briket Berbahan Limbah Cangkang Kelapa Sawit dan Plastik LDPE

Literature Review: on Physical, Thermal, and Emission Characteristics of Briquettes Made from Palm Oil Shell Waste and LDPE Plastic

Yusraida Khairani Dalimunthe^{(1,a)*}, Listiana Satiawati⁽¹⁾, Michelle Andini Rahman⁽¹⁾, Sherly Silvana Nursyam⁽¹⁾

¹Program Studi Teknik Perminyakan, Fakultas Teknologi Kebumian dan Energi, Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia, 11440
Email : ^(a*)yusraida@trisakti.ac.id

Diterima (17 Juni 2026), Direvisi (11 Agustus 2026)

Abstract. The increasing global energy demand and the depletion of fossil fuel reserves have driven the search for renewable alternative energy sources. Indonesia, as the world's largest palm oil producer, generates abundant palm oil shell waste, while plastic waste, particularly Low-Density Polyethylene (LDPE), poses a significant environmental challenge. Briquettes made from palm oil shell waste and LDPE plastic offer a dual solution: waste valorization and alternative fuel production. This literature review synthesizes findings from five experimental studies investigating the physical, mechanical, thermal, and emission characteristics of palm oil shell and LDPE plastic briquettes. The reviewed articles were selected systematically using predefined inclusion criteria: (1) experimental studies on briquettes made from palm oil shell and/or LDPE plastic, (2) published in scientific journals or proceedings during the 2023-2025 period, and (3) reporting at least one briquette property (physical, mechanical, thermal, proximate, or emission). Five studies met the criteria and were synthesized thematically. The reviewed studies examined the effects of starch adhesive composition (0.5-3.5 g), briquetting pressure (30-80 N/m²), LDPE content (0%-9%), and particle size (40-100 mesh) on briquette properties. Key findings indicate that optimal adhesive content of 2 g yields the best overall quality (calorific value 6,840 cal/g), optimal briquetting pressure of 40-70 N/m² enhances mechanical strength, addition of 9% LDPE increases calorific value up to 6,058 cal/g, and 80 mesh particle size combined with 70 N/m² pressure produces the highest ultimate strength (4.81 MPa). Briquettes with less than 10% LDPE addition and appropriate combustion chamber design meet Indonesian emission standards. All reviewed briquette formulations satisfied SNI 1683:2021 standards for moisture content, volatile matter, and fixed carbon, though ash content requires further optimization. This review identifies research gaps including the need for long-term combustion performance studies, economic feasibility analysis, and scaling up production.

Keywords: briquette, palm oil shell, LDPE plastic, alternative fuel, biomass.

Abstrak. Meningkatnya kebutuhan energi global dan menipisnya cadangan bahan bakar fosil mendorong pencarian sumber energi alternatif terbarukan. Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar dunia menghasilkan limbah cangkang kelapa sawit yang melimpah, sementara limbah plastik khususnya Low-Density Polyethylene (LDPE) menimbulkan tantangan lingkungan serius. Briket dari limbah cangkang kelapa sawit dan plastik LDPE menawarkan solusi ganda: valorisasi limbah dan produksi bahan bakar alternatif. Literatur review ini mensintesis temuan dari lima studi eksperimental yang meneliti karakteristik fisika, mekanik, termal, dan emisi briket cangkang kelapa sawit dan plastik LDPE. Artikel yang direview

dipilih secara sistematis melalui kriteria inklusi yang telah ditetapkan: (1) studi eksperimental briket berbahan cangkang kelapa sawit dan/atau plastik LDPE, (2) dipublikasikan pada jurnal atau prosiding ilmiah periode 2023-2025, dan (3) melaporkan minimal satu sifat briket (fisika, mekanik, termal, proksimat, atau emisi). Lima studi yang memenuhi kriteria tersebut disintesis secara tematik. Studi yang direview mengkaji pengaruh komposisi perekat kanji (0,5-3,5 g), tekanan pembriketan (30-80 N/m²), kadar LDPE (0%-9%), dan ukuran partikel (40-100 mesh) terhadap sifat briket. Temuan utama menunjukkan bahwa kadar perekat optimal 2 g menghasilkan kualitas keseluruhan terbaik (nilai kalor 6.840 cal/g), tekanan pembriketan optimal 40-70 N/m² meningkatkan kekuatan mekanik, penambahan 9% LDPE menaikkan nilai kalor hingga 6.058 cal/g, serta ukuran partikel 80 mesh dengan tekanan 70 N/m² menghasilkan ultimate strength tertinggi (4,81 MPa). Briket dengan penambahan LDPE di bawah 10% dan desain ruang bakar yang tepat memenuhi standar emisi Indonesia. Seluruh formulasi briket yang direview memenuhi standar SNI 1683:2021 untuk kadar air, zat volatil, dan karbon terikat, meskipun kadar abu memerlukan optimasi lebih lanjut. Review ini mengidentifikasi kesenjangan riset meliputi perlunya studi kinerja pembakaran jangka panjang, analisis kelayakan ekonomi, dan scale-up produksi.

Kata kunci: briket, cangkang kelapa sawit, plastik LDPE, bahan bakar alternatif, biomassa.

PENDAHULUAN

Konsumsi energi global terus meningkat seiring pertumbuhan populasi dan industrialisasi. Indonesia menghadapi tantangan serius berupa ketergantungan pada bahan bakar fosil yang cadangannya semakin menipis, sementara harga minyak dunia dan minyak tanah terus berfluktuasi memberatkan masyarakat [1]. Di sisi lain, Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan produksi mencapai lebih dari 45 juta ton CPO per tahun, yang menghasilkan limbah biomassa padat dalam jumlah sangat besar, termasuk cangkang kelapa sawit [3]. Limbah cangkang kelapa sawit mengandung nilai kalor tinggi sekitar 5.656 cal/gr, lebih tinggi dibandingkan bagian limbah sawit lainnya seperti serabut dan tandan kosong [5]. Secara paralel, limbah plastik khususnya *Low-Density Polyethylene* (LDPE) menjadi permasalahan lingkungan yang mendesak. Plastik LDPE banyak digunakan sebagai kemasan dan kantong plastik, namun sulit terurai secara alami dan berkontribusi signifikan terhadap pencemaran lingkungan. Konversi limbah plastik LDPE bersama limbah biomassa menjadi briket bahan bakar merupakan pendekatan yang menjanjikan karena secara simultan mengatasi dua permasalahan: pengelolaan limbah dan penyediaan energi alternatif [6], [7].

Pada tataran internasional, kajian mengenai *biomass briquette*, *plastic-derived fuel*, dan *waste-to-energy* telah berkembang pesat. Chen et al. [13] menegaskan bahwa peningkatan kualitas bahan bakar biomassa melalui densifikasi dan torrefaksi merupakan jalur utama pemanfaatan biomassa sebagai energi terbarukan. Dogu et al. [14] mengkaji daur ulang kimiawi limbah plastik padat melalui pirolisis dan gasifikasi, yang relevan dengan pemanfaatan plastik LDPE sebagai bahan bakar turunan plastik (*plastic-derived fuel*). Perea-Moreno et al. [15] memetakan tren riset biomassa sebagai energi terbarukan di tingkat dunia, sedangkan Uddin et al. [16] memberikan tinjauan perkembangan teknologi pirolisis biomassa termasuk produksi *bio-solid fuel*. Pemanfaatan residu biomassa pertanian untuk produksi energi telah diterapkan secara luas di berbagai negara, memperkuat posisi limbah cangkang kelapa sawit sebagai bahan baku briket bernilai

tambah. Temuan-temuan internasional tersebut memberikan perspektif perbandingan yang memperkaya hasil review ini [17].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi potensi briket dari berbagai jenis biomassa seperti tempurung kelapa, sekam padi, serbuk gergaji, dan tandan kosong kelapa sawit. Namun, penelitian yang secara spesifik mengkombinasikan cangkang kelapa sawit dengan plastik LDPE sebagai bahan baku briket masih relatif terbatas dan tersebar dalam studi-studi terpisah. Belum terdapat sintesis komprehensif yang mengintegrasikan temuan dari berbagai studi eksperimental terkait pengaruh parameter pembuatan briket (komposisi perekat, tekanan pembriketan, ukuran partikel, dan persentase LDPE) terhadap karakteristik briket secara holistik. *Literature review* ini bertujuan untuk mensintesis hasil dari lima studi eksperimental yang telah dilakukan penulis sebelumnya [8]-[12] mengenai karakteristik briket berbahan limbah cangkang kelapa sawit dan plastik LDPE. Kontribusi utama review ini adalah menyajikan analisis terpadu tentang pengaruh parameter-parameter kunci pembuatan briket terhadap sifat fisika, mekanik, termal, proksimat, dan emisi, serta mengidentifikasi kondisi optimal dan kesenjangan riset untuk pengembangan lebih lanjut. Ruang lingkup review mencakup lima studi yang dilakukan dalam periode 2023-2025 dengan variasi parameter: (1) komposisi perekat kanji, (2) tekanan pembriketan, (3) komposisi LDPE, (4) ukuran partikel arang, dan (5) analisis termal serta emisi pembakaran.

METODE PENELITIAN

Literature review ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* terhadap lima artikel penelitian yang telah dipublikasikan sebelumnya oleh penulis pada periode 2023-2025. Kelima studi tersebut merupakan rangkaian penelitian eksperimental yang dilakukan di laboratorium Biofisika dan Fisika Lanjut, Institut Teknologi Bandung, dengan fokus pada pengembangan briket dari limbah cangkang kelapa sawit (CKS) dan plastik LDPE sebagai bahan bakar alternatif. Kriteria inklusi yang digunakan mencakup: (1) studi eksperimental yang dilakukan oleh penulis sendiri; (2) menggunakan bahan baku cangkang kelapa sawit dan/atau plastik LDPE; (3) mengukur minimal satu parameter sifat briket (fisika, mekanik, termal, proksimat, atau emisi); (4) telah dipublikasikan di jurnal atau prosiding ilmiah pada periode 2023-2025. Kelima studi yang memenuhi kriteria tersebut disajikan pada Tabel 1.

Kerangka analisis yang digunakan adalah sintesis tematik dengan mengelompokkan temuan berdasarkan empat tema utama: (1) pengaruh komposisi perekat terhadap sifat briket; (2) pengaruh tekanan pembriketan dan ukuran partikel terhadap sifat fisika-mekanik; (3) pengaruh penambahan LDPE terhadap nilai kalor dan emisi; (4) analisis proksimat dan termal briket terhadap standar SNI 1683:2021 [2]. Prosedur pembuatan briket pada kelima studi memiliki kesamaan metodologis. Cangkang kelapa sawit dikarbonisasi selama 8 jam untuk menghasilkan arang, kemudian dihaluskan dan diayak sesuai ukuran partikel yang diinginkan. Plastik LDPE dicacah hingga berukuran sekitar 0,5

× 0,5 cm. Campuran serbuk arang, plastik LDPE, perekat kanji (tapioka), dan air dipanaskan hingga membentuk adonan, kemudian dicetak menggunakan press hidrolik pada tekanan yang bervariasi, dan dikeringkan sebelum pengujian. Standar pengujian yang digunakan meliputi SNI 1683:2021 untuk analisis proksimat dan nilai kalor [2], ASTM-D7582 untuk proksimat, serta Peraturan Menteri ESDM No. 047 Tahun 2006 untuk standar emisi [4].

Tabel 1. Ringkasan Lima Studi yang Direview

No	Studi	Parameter yang Divariasikan	Parameter yang Diukur
1	Studi A [8]	Komposisi perekat kanji (0,5–3,5 g)	Densitas, modulus elastisitas, ultimate strength
2	Studi B [9]	Tekanan pembriketan (30–80 N/m ²)	Stabilitas dimensi, densitas, modulus elastisitas, ultimate strength
3	Studi C [10]	Kadar LDPE (0%–9%)	Sifat mekanik, nilai kalor, proksimat, emisi gas
4	Studi D [11]	Ukuran partikel (40–100 mesh) dan tekanan (30–80 N/m ²)	Densitas, modulus elastisitas, ultimate strength
5	Studi E [12]	Komposisi perekat kanji (2–4 g)	Sifat mekanik, nilai kalor, proksimat, TGA/DTG/DTA

Penulis menyadari bahwa kelima studi yang direview berasal dari kelompok penulis yang sama, sehingga berpotensi menimbulkan bias objektivitas. Untuk memitigasi keterbatasan ini, hasil sintesis kelima studi dibandingkan secara kritis dengan temuan penelitian internasional pada bidang *biomass briquette*, *plastic-derived fuel*, dan *waste-to-energy* [13]–[17], serta diuji kesesuaiannya terhadap standar SNI 1683:2021 [2]. Perbandingan lintas institusi dan lintas negara ini dimaksudkan untuk menjaga objektivitas dan memperkaya perspektif review.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Komposisi Perekat terhadap Sifat Briket

Komposisi perekat kanji (tapioka) merupakan faktor penting yang mempengaruhi sifat fisika dan mekanik briket. Dua studi yang direview secara spesifik meneliti variasi komposisi perekat: Studi A [8] dengan rentang 0,5–3,5 g dan Studi E [12] dengan rentang 2–4 g perekat kanji.

Tabel 2. Perbandingan Hasil Pengaruh Komposisi Perekat Kanji

Parameter	Studi A (0,5–3,5 g) [8]	Studi A (0,5–3,5 g) [8]	Studi E (2–4 g) [12]	Studi E (2–4 g) [12]
	Optimal	Nilai	Optimal	Nilai
Densitas tertinggi	1,5 g	0,7618 g/cm ³	4 g	947,00 kg/m ³
Modulus Elastisitas (MoE)	2 g	40 MPa	4 g	20 MPa
Ultimate/Compressive Strength	3 g	4,49 MPa	4 g	7,09 MPa
Nilai Kalor tertinggi	-	-	2 g	6.840 cal/g

Hasil Studi A [8] menunjukkan bahwa densitas optimal dicapai pada komposisi perekat 1,5 g. Pada komposisi yang lebih rendah (0,5 g), daya rekat antarpartikel arang lemah sehingga densitas rendah. Sebaliknya, pada komposisi tinggi (3,5 g), perekat berlebih menyebabkan briket mengembang tidak seragam saat pengeringan. Modulus elastisitas dan ultimate strength cenderung meningkat seiring penambahan perekat hingga batas optimal masing-masing, menunjukkan bahwa perekat berperan sebagai matriks pengikat yang mendistribusikan beban secara merata. Studi E [12] yang menggunakan komposisi perekat lebih tinggi (2-4 g) mengkonfirmasi tren serupa: peningkatan perekat memperbaiki sifat mekanik. Briket dengan 4 g perekat menunjukkan *compressive strength* tertinggi (7,09 MPa), densitas tertinggi (947,00 kg/m³), dan stabilitas dimensi terbaik (111,36%). Namun, terdapat *trade-off* dengan nilai kalor: nilai kalor tertinggi (6.840 cal/g) justru dicapai pada komposisi perekat terendah (2 g), karena berkurangnya proporsi material karbon per satuan massa briket. Perbedaan nilai densitas antara Studi A dan Studi E disebabkan oleh perbedaan tekanan pembriketan yang digunakan: Studi A menggunakan tekanan 70 N/m², sedangkan Studi E belum menspesifikasikan tekanan yang sama, serta adanya perbedaan formulasi campuran plastik LDPE. Secara keseluruhan, komposisi perekat optimal untuk mencapai keseimbangan antara sifat mekanik dan termal adalah 2 g perekat kanji dengan nilai kalor 6.840 cal/g yang memenuhi standar SNI 1683:2021 (>6.000 cal/g) [2].

Pengaruh Tekanan Pembriketan dan Ukuran Partikel terhadap Sifat Fisika-Mekanik Briket

Tekanan pembriketan dan ukuran partikel arang merupakan dua parameter yang saling terkait dalam menentukan densitas dan kekuatan mekanik briket. Studi B [9] dan Studi D [11] mengkaji pengaruh kedua parameter ini.

Tabel 3. Pengaruh Tekanan Pembriketan dan Ukuran Partikel

Parameter	Studi B (Tekanan) [9]	Studi B (Tekanan) [9]	Studi D (Partikel & Tekanan) [11]	Studi D (Partikel & Tekanan) [11]
	Optimal	Nilai	Optimal	Nilai
Densitas tertinggi	50 N/m ²	808,71 kg/m ³	60 mesh, 50 N/m ²	808,71 kg/m ³
MoE tertinggi	70 & 40 N/m ²	40 MPa	80 mesh, 60 N/m ²	50 MPa
Ultimate Strength	40 N/m ²	3,40 MPa	80 mesh, 70 N/m ²	4,81 MPa

Studi B [9] menemukan bahwa tekanan pembriketan memiliki hubungan non-linier dengan densitas. Densitas meningkat seiring kenaikan tekanan dari 30 ke 50 N/m², namun menurun pada tekanan 80 N/m² (763,87 kg/m³). Fenomena ini disebabkan oleh tekanan berlebih yang dapat merusak struktur partikel arang dan menyebabkan retakan mikro. Stabilitas dimensi tertinggi (87,27%) dicapai pada tekanan 50 N/m². Briket dengan kualitas paling optimal berdasarkan keseimbangan modulus elastisitas dan *ultimate strength* diperoleh pada tekanan 40 N/m². Studi D [11] memperluas analisis dengan memvariasikan ukuran partikel (40, 60, 80, dan 100 mesh) bersama tekanan (30-80 N/m²). Hasil menunjukkan bahwa partikel yang lebih halus (80 dan 100 mesh) menghasilkan briket

dengan *ultimate strength* lebih tinggi dibandingkan partikel kasar (40 mesh). Optimalisasi tertinggi dicapai pada kombinasi 80 mesh dengan tekanan 70 N/m², menghasilkan *ultimate strength* 4,81 MPa, densitas 796,07 kg/m³, dan modulus elastisitas 40 MPa. Partikel halus menyediakan luas permukaan lebih besar untuk ikatan antar partikel, sehingga meningkatkan kohesi briket. Perbandingan kedua studi menunjukkan bahwa tekanan optimal untuk densitas berkisar pada 40-50 N/m², sedangkan untuk kekuatan mekanik tertinggi, diperlukan tekanan lebih tinggi (70 N/m²) dengan ukuran partikel halus (80 mesh). Tidak seragaman distribusi plastik LDPE di dalam briket menjadi faktor yang menyebabkan fluktuasi modulus elastisitas pada berbagai variasi tekanan [11].

Pengaruh Penambahan LDPE terhadap Nilai Kalor dan Emisi

Penambahan plastik LDPE ke dalam matriks briket memberikan kontribusi ganda: sebagai binder yang meningkatkan kekuatan mekanik dan sebagai sumber energi yang meningkatkan nilai kalor. Studi C [10] secara komprehensif mengkaji pengaruh variasi LDPE (0%-9%) terhadap karakteristik mekanik, nilai kalor, proksimat, dan emisi.

Tabel 4. Pengaruh Penambahan LDPE terhadap Sifat Briket [10]

Kadar LDPE	MoE (MPa)	Comp. Strength (MPa)	Nilai Kalor (cal/g)	Kadar Abu (%)	CO (mg/Nm ³)*
0%	-	-	-	Tertinggi	-
5%	-	2,56	-	-	-
7%	13,32	-	-	-	-
9%	-	-	6.058	Terendah	124,94 (D2)

*Desain ruang bakar D2: konfigurasi ruang bakar tanpa sekat (*unbaffled*) dengan posisi probe pengambilan sampel gas pada titik tertentu di aliran gas buang.

Nilai kalor meningkat secara konsisten seiring penambahan kadar LDPE. Briket dengan 9% LDPE menghasilkan nilai kalor tertinggi 6.058 cal/g, melampaui briket tanpa LDPE. Hal ini disebabkan oleh kandungan energi plastik LDPE yang tinggi dan sifatnya sebagai bahan bakar dengan nilai kalor superior. Secara mekanik, penambahan 5% LDPE menghasilkan compressive strength tertinggi (2,56 MPa), sementara 7% LDPE menghasilkan modulus elastisitas tertinggi (13,32 MPa). LDPE bertindak sebagai binder efektif yang mengisi rongga antarpartikel arang, menciptakan struktur yang lebih kohesif.

Aspek penting dari penambahan LDPE adalah dampaknya terhadap emisi pembakaran. Studi C [10] menguji empat desain ruang bakar (D1, D2, D3, D4) dengan konfigurasi posisi probe dan sekat yang berbeda. Desain ruang bakar D2 merupakan salah satu dari empat konfigurasi yang diuji pada Studi C [10], yaitu konfigurasi ruang bakar tanpa sekat (*unbaffled*) dengan posisi probe pengambilan sampel gas ditempatkan pada titik tertentu di aliran gas buang. Berbeda dengan desain D3 dan D4 yang menggunakan sekat sehingga menyebabkan akumulasi gas, desain D1 dan D2 tanpa sekat memungkinkan aliran gas buang mengalir lebih lancar, sehingga gas hasil pembakaran tidak terakumulasi dan emisi CO yang terukur rendah. Desain D1 dan D2 menghasilkan emisi CO dan NO_x yang sangat rendah dan memenuhi baku mutu Peraturan Menteri ESDM No. 047 Tahun 2006 [4]. Desain D1 bahkan mencapai emisi CO 0,00 mg/Nm³. Sebaliknya, desain D3 dan D4 dengan ruang bakar bersekat menunjukkan akumulasi gas yang menyebabkan emisi lebih tinggi. Penambahan LDPE di bawah 10% justru menurunkan emisi CO dibandingkan

briket tanpa LDPE, karena peningkatan karbon terikat mendorong pembakaran lebih sempurna.

Analisis Proksimat dan Termal terhadap Standar SNI

Analisis proksimat memberikan gambaran kualitas bahan bakar briket melalui empat parameter utama: kadar air, kadar abu, kadar zat volatil, dan karbon terikat. Studi C [10] dan Studi E [12] melakukan analisis proksimat lengkap yang dibandingkan dengan standar SNI 1683:2021 [2].

Tabel 5. Perbandingan Hasil Proksimat terhadap SNI 1683:2021

Parameter	SNI 1683:2021	Studi C (9% LDPE) [10]	Studi E (2 g perekat) [12]
Kadar Air	$\leq 10\%$	Memenuhi	8,00% ✓
Kadar Abu	$\leq 4\%$	Sedikit di atas	3,73% ✓ (2 g); 4,01% X (4 g)
Zat Volatil	10–17%	Memenuhi	13,66% ✓
Karbon Terikat	$\geq 79\%$	Memenuhi	82,60% ✓
Nilai Kalor	>6.000 cal/g	6.058 cal/g ✓	6.840 cal/g ✓

Kedua studi menunjukkan bahwa briket cangkang kelapa sawit dan LDPE secara konsisten memenuhi standar SNI untuk kadar air, zat volatil, karbon terikat, dan nilai kalor. Kadar air yang rendah ($\leq 8,04\%$) mengindikasikan proses pengeringan yang efektif, yang berkontribusi pada kestabilan pembakaran. Karbon terikat yang tinggi (81,15%-82,60%) menegaskan kualitas briket sebagai bahan bakar dengan emisi asap rendah. Tantangan utama terletak pada kadar abu. Pada Studi C [10], kadar abu sedikit melampaui batas SNI ($\leq 4\%$) namun menurun seiring penambahan LDPE karena plastik memiliki kadar abu sangat rendah. Pada Studi E [12], briket dengan 2 g dan 3 g perekat memenuhi standar (3,73% dan $\leq 4\%$), tetapi briket dengan 4 g perekat sedikit melampaui (4,01%) karena kontribusi abu dari perekat kanji. Hal ini menunjukkan *trade-off* antara sifat mekanik (optimal pada perekat tinggi) dan kadar abu (optimal pada perekat rendah).

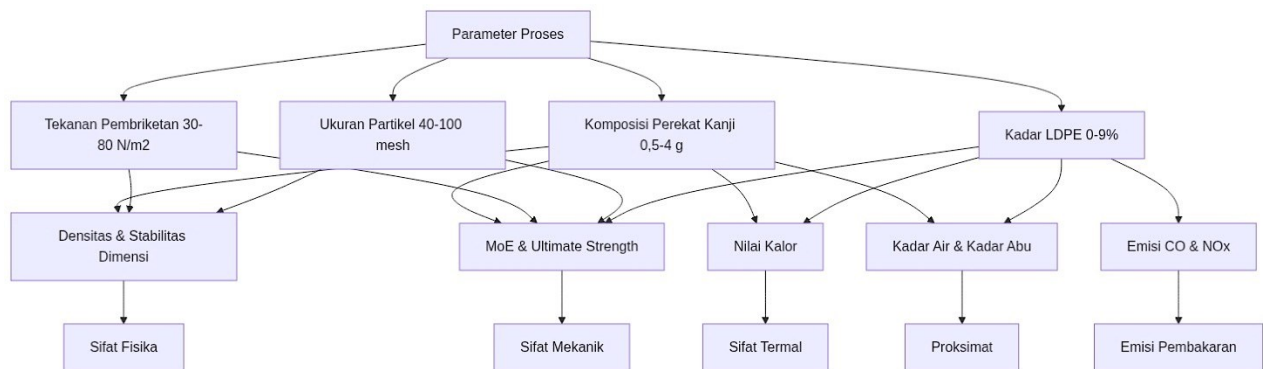
Jika kedua aspek dibandingkan, kepatuhan terhadap standar merupakan faktor yang lebih kritis karena kadar abu merupakan parameter wajib (mandatory) dalam SNI 1683:2021 yang menentukan kelayakan briket sebagai bahan bakar komersial. Dengan demikian, formulasi perekat rendah (2 g) lebih direkomendasikan karena seluruh parameter proksimatnya memenuhi SNI, meskipun kekuatan mekaniknya sedikit lebih rendah. Selisih kadar abu pada perekat 4 g (4,01%) hanya 0,01% di atas batas atas (4%), sehingga masih dapat dioptimalkan melalui penggunaan perekat dengan kemurnian lebih tinggi atau pengurangan dosis perekat secara bertahap hingga diperoleh keseimbangan antara sifat mekanik dan kepatuhan standar.

Studi E [12] juga menyediakan analisis termal menggunakan TGA, DTG, dan DTA yang mengidentifikasi empat zona dekomposisi termal berbeda selama pemanasan briket. Zona-zona tersebut berkaitan dengan devolatilisasi bahan baku, degradasi selulosa/hemiselulosa/lignin, dan degradasi arang lebih lanjut. Pola dekomposisi termal bervariasi tergantung komposisi perekat, memberikan informasi penting untuk optimasi

proses pembakaran pada aplikasi riil. Pola dekomposisi termal yang teridentifikasi memberikan landasan ilmiah untuk optimasi proses pembakaran: apabila profil devolatilisasi menunjukkan tahapan pelepasan zat volatil yang bertahap dan terkendali, maka suhu pembakaran dan pasokan udara dapat diatur sedemikian rupa sehingga pembakaran berlangsung lebih sempurna, emisi lebih rendah, dan efisiensi energi lebih tinggi. Dengan kata lain, penentuan proses pembakaran dapat dioptimalkan karena analisis termal menunjukkan pola dekomposisi yang diinginkan.

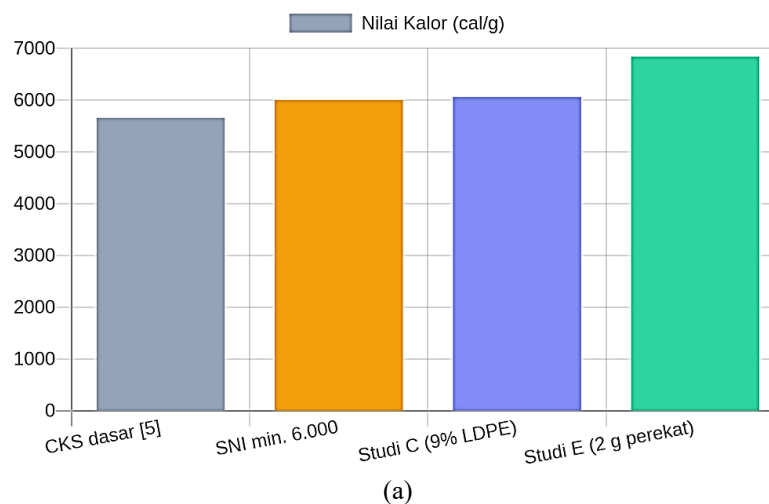
Sintesis Hubungan Parameter Proses dan Karakteristik Briket

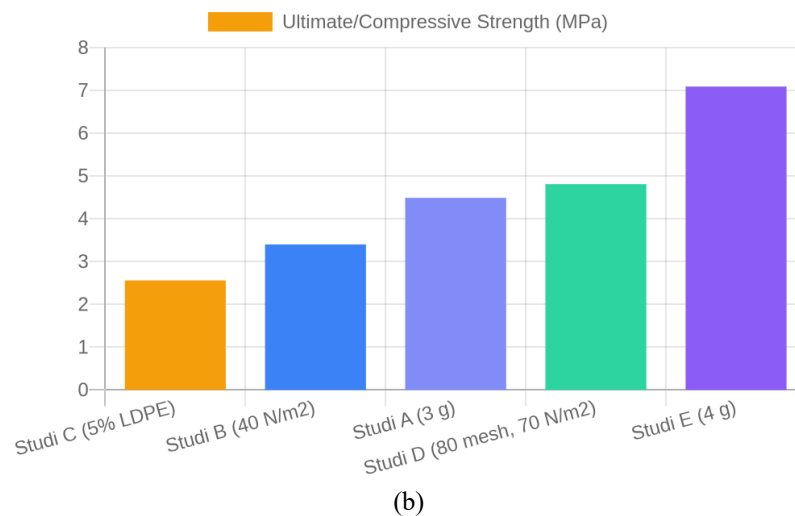
Untuk memvisualisasikan hubungan antara parameter proses pembuatan briket dan karakteristik yang dihasilkan, Gambar 1 menyajikan diagram sintesis berdasarkan kelima studi yang direview.



Gambar 1. Diagram sintesis hubungan parameter proses dan karakteristik briket

Diagram sintesis tersebut menunjukkan bahwa komposisi perekat kanji mempengaruhi seluruh karakteristik multidimensi (fisika, mekanik, termal, dan proksimat), tekanan pembriketan dan ukuran partikel terutama mempengaruhi sifat fisika-mekanik, sedangkan kadar LDPE mempengaruhi nilai kalor, kadar abu, dan emisi pembakaran. Gambar 2 (a) dan (b) membandingkan secara kuantitatif dua parameter kunci, yaitu nilai kalor dan kekuatan mekanik, antar studi yang direview.





Gambar 2. Perbandingan secara kuantitatif dua parameter kunci (a) dan (b), yaitu nilai kalor dan kekuatan mekanik, antar studi yang direview.

Analisis kritis terhadap perbedaan hasil antar studi mengungkapkan beberapa faktor penyebab. Pertama, perbedaan nilai kalor antara Studi E (6.840 cal/g pada perekat 2 g) dan Studi C (6.058 cal/g pada 9% LDPE) disebabkan oleh perbedaan mekanisme: penurunan proporsi perekat meningkatkan fraksi karbon, sedangkan penambahan LDPE meningkatkan kandungan hidrokarbon rantai panjang yang mudah terbakar. Kedua, variasi densitas antar studi dipengaruhi oleh kombinasi tekanan pembriketan, ukuran partikel, dan distribusi LDPE yang tidak seragam. Ketiga, perbedaan komposisi perekat dan kadar LDPE menyebabkan perbedaan proporsi karbon terikat dan zat volatil, yang pada akhirnya menentukan profil emisi. Hasil sintesis ini konsisten dengan temuan internasional: densifikasi biomassa meningkatkan kualitas bahan bakar padat [13], pemanfaatan plastik sebagai bahan bakar turunan merupakan strategi *waste-to-energy* yang relevan [14], dan residu biomassa dapat diolah menjadi energi dengan optimasi parameter proses [17]. Nilai kalor briket cangkang kelapa sawit dan LDPE pada review ini (6.058-6.840 cal/g) berada pada rentang yang sebanding dengan briket biomassa pada umumnya dan melampaui syarat minimum SNI (6.000 cal/g), sehingga menegaskan potensi briket berbahan limbah cangkang kelapa sawit dan plastik LDPE sebagai bahan bakar alternatif yang kompetitif.

KESIMPULAN

Literature review terhadap lima studi eksperimental briket cangkang kelapa sawit dan plastik LDPE menghasilkan sintesis sebagai berikut: Komposisi perekat kanji optimal untuk keseimbangan sifat mekanik dan termal adalah 2 g, menghasilkan nilai kalor tertinggi 6.840 cal/g dengan seluruh parameter proksimat memenuhi SNI 1683:2021. Perekat 4 g memberikan sifat mekanik terbaik (*compressive strength* 7,09 MPa) namun dengan *trade-off* kadar abu yang sedikit melampaui standar. Tekanan pembriketan optimal untuk densitas berada pada kisaran 40-50 N/m², sedangkan untuk kekuatan mekanik

tertinggi dicapai pada 70 N/m² dengan ukuran partikel halus 80 mesh. Kombinasi optimal adalah 80 mesh dengan tekanan 70 N/m² yang menghasilkan *ultimate strength* 4,81 MPa. Penambahan plastik LDPE hingga 9% secara signifikan meningkatkan nilai kalor (hingga 6.058 cal/g) dan kekuatan mekanik. Dengan penambahan di bawah 10% dan desain ruang bakar yang tepat (D1 dan D2), emisi CO dan NO_x memenuhi baku mutu lingkungan Indonesia. Seluruh formulasi briket yang direview memenuhi standar SNI 1683:2021 untuk kadar air, zat volatil, karbon terikat, dan nilai kalor. Kadar abu masih memerlukan optimasi lebih lanjut, terutama pada formulasi dengan perekat tinggi. Kontribusi utama review ini adalah pemetaan komprehensif pengaruh parameter pembuatan briket terhadap karakteristik multi dimensi (fisika, mekanik, termal, emisi) serta identifikasi titik optimal untuk masing-masing parameter. Implikasi praktis dari sintesis ini adalah panduan berbasis bukti bagi pengembangan briket skala pilot dan komersial. Kesenjangan riset yang teridentifikasi meliputi: (1) belum adanya studi kinerja pembakaran jangka panjang; (2) belum adanya analisis kelayakan ekonomi dan *life cycle assessment*; (3) perlunya optimasi kadar abu melalui eksplorasi binder alternatif; (4) studi toksisitas emisi pada penggunaan domestik; dan (5) *scale-up* produksi dari skala laboratorium ke *pilot plant*.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM Universitas Trisakti Jakarta atas fasilitas pendanaan penelitian yang digunakan dalam studi yang direview.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pusat Statistik, "Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2023," BPS RI, Jakarta, 2024.
- [2] Badan Standardisasi Nasional, "SNI 1683:2021 — Arang Kayu," BSN, Jakarta, 2021.
- [3] Direktorat Jenderal Perkebunan, "Produksi Kelapa Sawit Nasional 2020–2024," Kementerian Pertanian RI, Jakarta, 2024.
- [4] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Peraturan Menteri ESDM No. 047 Tahun 2006 tentang Pedoman Pemanfaatan Bahan Bakar Padat," Jakarta, 2006.
- [5] L. Fitria, R. Mulyawan, Ishak, "Pemanfaatan Limbah Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Pembuatan Briket Dengan Perekat Tepung Singkong," *Prosiding Seminar Nasional*, DOI: <https://doi.org/10.29103/sntk.v4.2024>
- [6] Nurhamida, Rusdianasari, M. Zamhari, "Pembuatan Briket Komposit Cangkang Sawit dan Tempurung Kelapa dengan Variasi Perekat Tepung Tapioka Sebagai Bahan Bakar Alternatif," *Jurnal Teknologi*, vol. 23, no.2, pp. 106-112, Oktober 2023.
- [7] W.R. Wicaksono, S. Nurhatika, "Variasi Komposisi Bahan pada Pembuatan Briket Cangkang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis*) dan Limbah Biji Kelor (*Moringa oleifera*)," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, vol. 7, no. 2, pp. 2337-3520, 2018.

- [8] Y. K. Dalimunthe, Widayani, I.D. Aditya, "The Effect of Varying Starch Adhesive Composition on the Physical Properties of Briquettes Based on Palm Oil Shell and LDPE Plastic," *AIP Conference Proceedings*, 2025.
- [9] Y. K. Dalimunthe, L. Satiawati, H. Widiyatni, A. Anugraha, "Pengaruh Tekanan Pembriketan Terhadap Sifat Fisika Briket Cangkang Kelapa Sawit dan Plastik LDPE," *Jurnal Migasian*, vol. 07, no. 02, 2025.
- [10] Y. K. Dalimunthe, Widayani, I.D. Aditya, "Characteristics and Emission Tests of Briquettes Made from Palm Oil Shell Waste with LDPE Plastic as Alternative Fuel," *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, vol. 38, no. 08, pp. 1968-1983, August 2025.
- [11] Y. K. Dalimunthe, Widayani, dan I.D. Aditya, "Briquettes Optimization of Palm Shell Waste and LDPE Plastic based on Particle Size and Compressive Strength as Alternative Fuels", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1239, p. 012017, 2023, doi:10.1088/1755-1315/1239/1/012017.
- [12] Y. K. Dalimunthe, Widayani, I.D. Aditya, "Mechanical Properties, Calorific Value, Proximate, and Thermal Analysis of Briquettes Made from Palm Oil Shell and LDPE with Varying Amounts of Adhesive," *Philippine Journal of Science*, vol. 153, no. 5, pp. 1739-1749, October 2024.
- [13] W. Chen, B. Lin, Y. Lin, Y. Chu, A. T. Ubando, P. L. Show, H. C. Ong, J. Chang, S. Ho, A. B. Culaba, A. Pétrissans, M. Pétrissans, "Progress in biomass torrefaction: Principles, applications and challenges," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 82, p. 100887, 2021, doi:10.1016/j.pecs.2020.100887.
- [14] O. Dogu, M. Pelucchi, R. V. d. Vijver, P. H.M. V. Steenberge, D. R. D'hooge, A. Cuoci, M. Mehl, A. Frassoldati, T. Faravelli, K. M. V. Geem, "The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 84, p. 100901, 2021, doi:10.1016/j.pecs.2020.100901.
- [15] M. Perea-Moreno, E. Samerón-Manzano, A. Perea-Moreno, "Biomass as renewable energy: Worldwide research trends," *Sustainability*, vol. 11, no. 3, p. 863, 2019, doi:10.3390/su11030863.
- [16] M. N. Uddin, K. Techato, J. Taweekun, Md. M. Rahman, M. G. Rasul, T. M. I. Mahlia, S. M. Ashrafur, "An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies," *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3115, 2018, doi:10.3390/en11113115.
- [17] B. A. Goodman, "Utilization of waste straw and husks from rice production: A review," *Journal of Bioresources and Bioproducts*, vol. 5, no. 3, pp. 143-162, 2020, doi:10.1016/j.jobab.2020.07.001.