

Analisis Pengaruh *Air Flow Ratio* (AFR) dan Ukuran Partikel Limbah Tangkai Daun Tembakau terhadap Produksi *Syngas* pada *Downdraft Gasifier*

Ilya Arina Rusyda¹, Fraulein Intan Suri², Niken Empina Putri³

¹Teknik Kimia, Universitas Islam Syekh Yusuf, Tangerang, Indonesia

²Kimia, UIN Raden Intan Lampung, Lampung, Indonesia,

³Teknik Industri, Universitas Islam Syekh Yusuf, Tangerang, Indonesia

¹ilyaar@unis.ac.id, ²frauleinintan@radenintan.ac.id, ³niken.empinap@unis.ac.id

Article History:

Received 24 June 2026

Revised 29 June 2026

Accepted 21 July 2026

Available online 27 July 2026

Abstrak

Limbah tangkai daun tembakau merupakan salah satu biomassa yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif, namun pemanfaatannya masih terbatas sebagai bahan kompos dan pestisida. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh *Air Flow Ratio* (AFR) dan ukuran partikel limbah tangkai daun tembakau terhadap produksi *syngas* menggunakan reaktor *downdraft gasifier*. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan ukuran partikel biomassa sebesar 1-2 mm, 2-3 mm, dan 3-5 mm serta AFR sebesar 1,50; 1,55, dan 1,60. Proses penelitian ini meliputi pengeringan, penghancuran, pengayakan, gasifikasi, dan analisis komposisi gas hasil menggunakan metode yang sesuai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan AFR berpengaruh terhadap peningkatan konsentrasi *syngas* karena mampu meningkatkan temperatur reaktor dan memperbaiki proses gasifikasi. Selain itu, ukuran partikel biomassa turut memengaruhi kualitas *syngas* yang dihasilkan, di mana ukuran partikel 2–3 mm memberikan kondisi yang paling optimum. Kombinasi AFR 1,60 dan ukuran partikel 2–3 mm menghasilkan komposisi *syngas* tertinggi, yaitu H₂ sebesar 3,98%vol, CO sebesar 15,46%vol, dan CH₄ sebesar 1,32%vol. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian AFR dan ukuran partikel merupakan faktor penting dalam mengoptimalkan pemanfaatan limbah tangkai daun tembakau sebagai sumber energi alternatif berbasis biomassa.

Kata Kunci : *Gasifier*, Gasifikasi, Limbah Tangkai Daun Tembakau, *Syngas*

Abstract

Tobacco leaf stalk waste is a biomass resource with considerable potential for renewable energy production; however, its utilization has been limited mainly to compost and pesticide applications. This study aimed to analyze the effects of *Air Flow Ratio* (AFR) and particle size of tobacco leaf stalk waste on *syngas* production using a *downdraft gasifier*. The experiments were conducted using biomass particle sizes of 1–2 mm, 2–3 mm, and 3–5 mm, with AFR values of 1.50, 1.55, and 1.60. The experimental procedure consisted of drying, crushing, sieving, gasification, and gas composition analysis. The results showed that increasing the AFR improved *syngas* production by increasing the reactor temperature and enhancing the gasification process. Particle size also significantly affected *syngas* quality, with the 2–3 mm particle size providing the best operating condition. The highest *syngas* composition was obtained at an AFR of 1.60 and a particle size of 2–3 mm, producing 3.98 vol.% H₂, 15.46 vol.% CO, and 1.32 vol.% CH₄. These findings indicate that controlling AFR and biomass particle size is essential for improving the utilization of tobacco leaf stalk waste as a renewable biomass-based energy source.

Keywords : *Gasifier*, Gasification, *Syngas*, Tobacco leaf stalk's waste

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi nasional dari tahun ke tahun menimbulkan tantangan serius terhadap ketahanan energi Indonesia. Ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar fosil menyebabkan ketersediaan energi semakin terbatas seiring menurunnya cadangan minyak bumi, gas alam, dan batu bara. Berdasarkan data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), kebutuhan energi Indonesia pada tahun 2022 mencapai 1.739 juta *Barrel Oil Equivalent* (BOE), meningkat sekitar 19% dibandingkan tahun sebelumnya (Zuhdi, 2025). Kondisi ini menunjukkan bahwa konsumsi energi terus mengalami peningkatan sehingga diperlukan upaya pengembangan sumber energi alternatif yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi besar di Indonesia adalah biomassa yang berasal dari limbah pertanian dan agroindustri (Yana et al., 2022). Indonesia merupakan salah satu negara penghasil tembakau yang cukup besar di kawasan Asia Tenggara. Aktivitas budidaya dan pengolahan tembakau menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah yang signifikan, salah satunya berupa tangkai daun tembakau (Amalia, 2025). Selama ini limbah tangkai daun tembakau umumnya hanya dimanfaatkan sebagai kompos, pakan ternak terbatas, maupun bahan pestisida nabati (Abdurrahman et al., 2024). Pemanfaatan tersebut masih memiliki nilai ekonomi yang relatif rendah dibandingkan potensi energi yang tersimpan di dalam biomassa tersebut. Potensi tersebut juga didukung oleh karakteristik energinya yang relatif tinggi. Penelitian terbaru melaporkan bahwa biomassa tangkai tembakau (*tobacco stalks*) memiliki *higher heating value* (HHV) sebesar 18,1 MJ/kg dan *lower heating value* (LHV) sebesar 16,9 MJ/kg, sehingga menunjukkan kelayakan limbah tersebut sebagai bahan baku konversi energi termokimia, termasuk melalui proses gasifikasi (Pochwatka et al., 2025). Maka dari itu, limbah tangkai daun tembakau masih memiliki kandungan karbon dan senyawa organik yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi melalui berbagai teknologi konversi biomassa (Yang et al., 2024).

Gasifikasi merupakan salah satu teknologi konversi biomassa yang banyak dikembangkan untuk menghasilkan energi alternatif. Proses gasifikasi mengubah bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar (*producer gas* atau *syngas*) melalui reaksi termokimia pada temperatur tinggi ($>700^{\circ}\text{C}$) dengan suplai oksigen yang terbatas (Adhynata, 2026). *Syngas* yang dihasilkan umumnya terdiri atas karbon monoksida (CO), hidrogen (H_2), dan metana (CH_4), yang selanjutnya dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik, proses termal industri, maupun bahan baku sintesis kimia (Erian et al., 2022). Kinerja proses gasifikasi dipengaruhi oleh berbagai parameter operasi, di antaranya jenis biomassa, kadar air, temperatur reaktor, ukuran partikel bahan baku, dan jumlah udara yang diberikan selama proses berlangsung. *Air Flow Ratio* (AFR) merupakan salah satu parameter penting karena menentukan jumlah oksigen yang masuk ke dalam reaktor. AFR yang terlalu rendah menyebabkan reaksi oksidasi tidak berlangsung optimal, sedangkan AFR yang terlalu tinggi dapat meningkatkan reaksi pembakaran sehingga menurunkan kualitas *syngas* yang dihasilkan (Nurulhuda, 2022). Selain AFR, ukuran partikel biomassa juga berpengaruh terhadap distribusi panas, laju reaksi, perpindahan massa, dan karakteristik aliran udara di dalam reaktor (Andreas Novendra Dwiyanto, 2023).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pengaruh parameter operasi terhadap kualitas *syngas* pada proses gasifikasi biomassa. Edelweis (2024) melaporkan bahwa variasi *Air Flow Ratio* (AFR) berpengaruh terhadap komposisi *syngas* pada gasifikasi biomassa tempurung kelapa, sedangkan Wiyono et al. (2025) menunjukkan bahwa karakteristik biomassa, termasuk ukuran partikel, memengaruhi efisiensi proses gasifikasi dan komposisi gas yang dihasilkan pada biomassa tongkol jagung dan sekam padi. Disamping itu, Rozie et al. (Firmansyah & Siregar, 2021) melaporkan bahwa variasi *Air Flow Ratio* (AFR) berpengaruh terhadap komposisi gas mampu bakar pada gasifikasi biomassa tempurung kelapa tipe *downdraft*, di mana peningkatan AFR cenderung menurunkan kandungan H_2 , CO, dan CH_4 akibat meningkatnya pembentukan gas O_2 , N_2 , dan CO_2 . Hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa AFR dan ukuran partikel merupakan parameter penting dalam optimasi proses gasifikasi. Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut masih didominasi oleh penggunaan biomassa seperti tempurung kelapa, tongkol jagung, dan sekam padi, serta umumnya hanya mengevaluasi satu parameter operasi secara terpisah. Hingga saat ini, penelitian yang mengombinasikan variasi *Air Flow Ratio* (AFR) dan ukuran partikel pada limbah tangkai daun tembakau menggunakan reaktor *downdraft gasifier* masih sangat terbatas. Padahal, interaksi kedua parameter tersebut berpotensi memengaruhi karakteristik proses gasifikasi dan komposisi *syngas* yang dihasilkan. Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) mengenai kondisi operasi optimum gasifikasi limbah tangkai daun tembakau berdasarkan kombinasi AFR dan ukuran partikel. Berdasarkan kondisi

tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi *Air Flow Ratio* (AFR) dan ukuran partikel limbah tangkai daun tembakau terhadap produksi syngas menggunakan reaktor *downdraft gasifier*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kondisi operasi optimum sekaligus memperkaya kajian pemanfaatan limbah tangkai daun tembakau sebagai sumber energi alternatif berbasis biomassa.

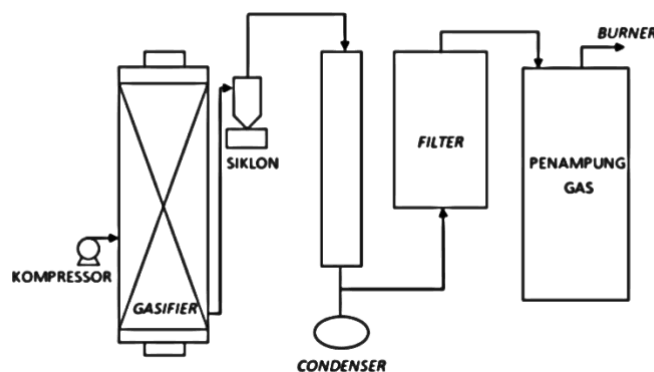
2. Bahan dan Metode

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya limbah tangkai daun tembakau yang berasal dari PD. Taru Martini-Yogyakarta, kerosin dan arang yang digunakan sebagai bahan penyulut api pada proses penelitian.

2.2. Alat

Adapun Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari peralatan utama dan peralatan pendukung. Peralatan utama yang digunakan adalah terdiri dari reaktor gasifikasi *downdraft*, *blower*, *cyclon*, *condensor*, *filter*, *burner orifice*, *manometer U*, dan penampung gas terdapat dilaboratorium Konversi Energi Jurusan Teknik Kimia Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1 berikut ini:



Gambar 1. Serangkaian Alat Gasifikasi Limbah Tangkai Daun Tembakau dengan *Gasifier Downdraft*

Gambar 1 diatas menunjukkan rangkaian peralatan yang digunakan dalam penelitian ini. Adapun setiap alat memiliki fungsi masing-masing diantaranya: 1). *Blower* (kompresor) berfungsi untuk menyuplai udara ke dalam *gasifier*, 2). *Flow meter* untuk mengatur dan mengukur debit udara sehingga AFR sesuai variasi penelitian, 3). *Downdraft gasifier* berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses gasifikasi biomassa, 4). *Cyclone* untuk memisahkan partikel padat (char dan abu) dari aliran syngas, 5). *Filter* untuk menyaring tar dan partikel halus sebelum analisis gas, 6). *Gas analyzer* untuk mengukur komposisi CO, H₂, dan CH₄. Peralatan lainnya yang bersifat pendukung pada penelitian ini berupa botol sampel, pematik api, timbangan analitis, *stopwatch*, dan botol penampung tar.

2.3. Metode

Pada penelitian ini metode yang digunakan adalah *batch feed system* yaitu metode dengan memasukkan sejumlah biomass ke dalam reaktor kemudian disulut api. Prosedur penelitian yang dilakukan dibagi dalam dua tahapan sebagai berikut :

2.3.1. Preparasi bahan baku

Proses pertama yaitu persiapan bahan baku limbah tangkai daun tembakau direndam dalam air selama kurang lebih 1-2 hari guna menghilangkan kadar nikotin yang terkandung dalam bahan, kemudian limbah tangkai daun tembakau dikeringkan dengan menggunakan sinar matahari selama ± 3 jam untuk menurunkan kadar air pada biomassa sebelum proses gasifikasi. Tangkai daun tembakau yang telah kering kemudian dihancurkan menggunakan *crusher* dan disaring menggunakan *screening* untuk mendapatkan ukuran bahan yang diinginkan menjadi 3 tingkatan ukuran yaitu 1-2 mm, 2-3 mm dan 3-5. Tahapan selanjutnya yaitu tahapan gasifikasi.

2.3.2. Metode Gasifikasi

Proses gasifikasi dilakukan menggunakan reaktor *downdraft gasifier* dengan sistem operasi batch. Pada proses gasifikasi limbah tangkai daun tembakau yang telah dipreparasi sebanyak 2 kg sesuai dengan kapasitas dari reaktor dimasukkan kedalam reaktor, kemudian media gasifikasi yang digunakan berupa udara (*air-blow-gasification*), dan kondisi operasi pada tekanan atmosfer (1 atm). Variabel penelitian ini terdiri atas variasi ukuran partikel biomassa terdiri dari ukuran 1–2 mm, 2–3 mm, dan 3–5 mm, serta variasi *Air Flow Ratio* (AFR) sebesar 1,50; 1,55; dan 1,60. Variasi AFR tersebut dipilih berdasarkan rentang kondisi operasi yang direkomendasikan pada penelitian terdahulu untuk memperoleh proses gasifikasi yang stabil dan menghasilkan kualitas syngas yang optimum (Nurlatifah et al., 2022). Selama proses gasifikasi berlangsung, temperatur reaktor dipantau secara kontinu menggunakan termokopel, sedangkan komposisi syngas dianalisis setiap 10 menit selama 120 menit menggunakan *gas analyzer* (GC-MS) untuk mengukur konsentrasi CO, H₂, dan CH₄. Syngas yang dihasilkan dialirkan melalui *cyclone* dan *filter* sebelum dianalisis menggunakan *gas analyzer* untuk menentukan komposisi karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄). Data hasil pengukuran kemudian dibandingkan pada setiap variasi AFR dan ukuran partikel untuk mengidentifikasi pengaruh kedua parameter tersebut terhadap kualitas syngas serta menentukan kondisi operasi yang menghasilkan komposisi syngas optimum. Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan menyajikan hasil pengujian dalam bentuk tabel dan grafik sehingga hubungan antara variasi AFR, ukuran partikel, dan komposisi syngas dapat dianalisis secara komprehensif.

3. Hasil dan Pembahasan

Proses gasifikasi limbah tangkai daun tembakau menjadi *syngas* berlangsung dalam reaktor *batch* dengan menggunakan variasi waktu pengambilan gas, ukuran limbah tangkai daun tembakau, dan *air flow ratio*. Proses ini berlangsung selama 2 jam dengan menggunakan limbah tangkai daun tembakau sebanyak 2 kg ke dalam reaktor gasifikasi dengan aliran *downdraft* (bawah) kemudian di sulutkan api dengan arang, produk yang dihasilkan di tampung untuk dianalisa. Reaktor yang digunakan diisolasi oleh batu bata tahan api dan kawul serta memiliki 4 zona yang akan dihubungkan dengan *termocouple*. Fungsi dari pemasangan *termocouple* ialah untuk melihat kondisi temperatur yang ada di setiap zona gasifikasi yaitu pembakaran, pirolisis, oksidasi dan reduksi.

3.1 Analisa *Ultimate* dan *Proximate*

Limbah tangkai daun tembakau yang akan digunakan terlebih dahulu dilakukan analisa *ultimate* dan *proximate*. Analisa *ultimate* adalah analisa seluruh elemen komponen yang terdapat dalam bahan (biomasa) seperti karbon, oksigen, nitrogen, hidrogen dan belerang, sedangkan analisa *proximate* menunjukkan persen berat dari *fixed carbon*, *moisture content*, *ash content*, *volatile matter*, dan total sulfur. Analisa *ultimate* dan *proximate* dilakukan di PT. Indonesia Power dengan data sebagai berikut:

Tabel 1. Karakteristik Biomassa Limbah Tangkai Daun Tembakau

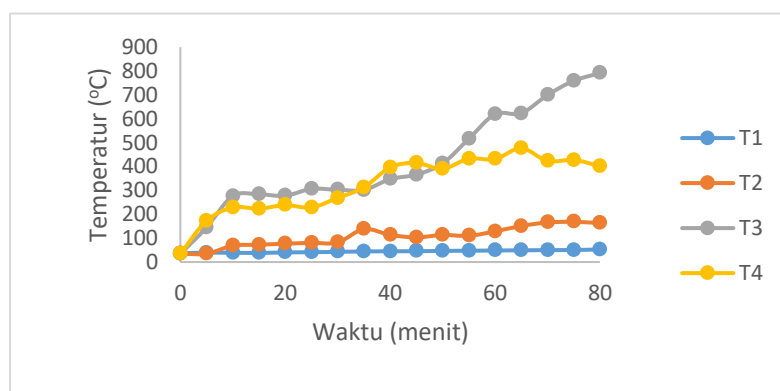
Analisa	Parameter	Nilai (wt.%)
Ultimate	Carbon	36,85
	Hydrogen	3,85
	Oxygen	28,31
	Nitrogen	0,54
	Sulfur	0,12
Proksimate	Moisture	18,4
	Ash	15,9
	Volatile Matter	64,23
	Fixed Carbon	1,26

Pada tabel 1 diatas dapat diketahui bagaimana karakteristik dari biomassa limbah tangkai daun tembakau . Adapun karakteristik tersebut digunakan sebagai data dasar untuk mengevaluasi kelayakan

limbah tangkai daun tembakau sebagai bahan baku gasifikasi serta acuan dalam menginterpretasikan pengaruh karakteristik biomassa terhadap komposisi syngas yang dihasilkan.

3.2 Pengaruh Waktu Terhadap Temperatur Gasifier

Reaktor gasifikasi memiliki empat zona yaitu zona pengeringan, pirolisis, oksidasi dan reduksi (Shadle et al., 2025). Tiap tahapan atau zona ini memiliki range temperatur yang berbeda beda sebagai indikatornya. Pencapaian temperatur pada proses gasifikasi berpengaruh terhadap hasil *syngas* yang dihasilkan. Hasil dari proses pencapaian temperatur tersebut dapat menunjukkan zona-zona yang terdapat di gasifikasi.



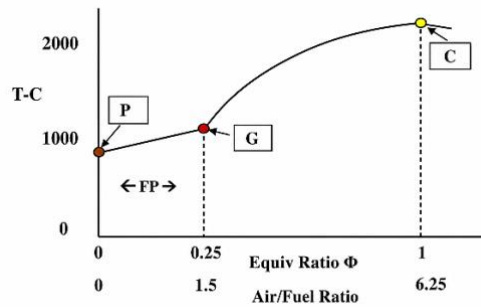
Gambar 2. Pengaruh waktu terhadap temperatur gasifikasi (T1 Zona Pengeringan, T2 Zona Pirolisis, T3 Zona Oksidasi, T4 Zona Reduksi)

Gambar 2 menunjukkan pengaruh waktu terhadap profil temperatur yang terdapat dalam reaktor gasifikasi. Pada gambar 2, termokopel 1 (T1) memiliki rentang temperatur 36,3-57,5 °C. Termokopel 1 mengindikasikan bahwa proses berada pada zona pengeringan, dimana kandungan H₂O yang dimiliki limbah tangkai daun tembakau dihilangkan melalui proses penguapan. Pada proses penguapan ini temperatur cenderung konstan sampai akhir proses gasifikasi tidak ada kenaikan. Pada termokopel 2 (T2) menunjukkan temperatur kisaran 34,9-168°C, mengindikasikan bahwa T2 ini masuk dalam zona pirolisis. Pirolisis atau devolatilisasi disebut juga sebagai gasifikasi parsial, dimana komponen yang tidak stabil secara termal yang dimaksud dalam hal ini adalah lignin yang terdapat pada limbah tangkai daun tembakau akan pecah dan menguap dengan komponen lainnya. Produk pirolisis umumnya terdiri dari tiga jenis, yaitu gas ringan (H₂, CO, CO₂, H₂O, dan CH₄), tar dan arang. Sedangkan pada termokopel 3 (T3), temperatur yang dicapai pada zona ini yaitu 791,4 °C. Zona pada termokopel 3 menunjukkan zona oksidasi, dimana pada zona ini terjadi reaksi eksoterm. Proses oksidasi merupakan proses yang paling penting sebab proses ini menghasilkan panas yang dibutuhkan oleh keseluruhan reaksi yang terjadi pada reaktor gasifikasi. Pada termokopel 4 (T4) memiliki temperatur kisaran 34,5°C-467°C yang mengindikasikan bahwa T4 berada pada zona reduksi. Temperatur pada zona ini lebih rendah dibandingkan zona oksidasi karena sebagian energi panas digunakan untuk berlangsungnya reaksi reduksi yang bersifat endotermik, seperti pembentukan karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂). Penurunan temperatur dari zona oksidasi menuju zona reduksi merupakan karakteristik umum proses gasifikasi pada reaktor *downdraft*, di mana panas yang dihasilkan pada zona oksidasi dimanfaatkan untuk mendukung reaksi reduksi pada bagian bawah reaktor. Hasil ini sejalan dengan penelitian Putra dkk (Putra et al., 2025) yang melaporkan bahwa temperatur maksimum terjadi pada zona oksidasi, sedangkan temperatur pada zona reduksi mengalami penurunan akibat dominasi reaksi reduksi yang bersifat endotermik.

3.3 Pengaruh Air Flow Ratio Terhadap Konsentrasi Gas yang Dihasilkan

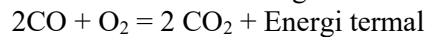
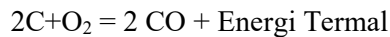
Gasifikasi merupakan suatu proses konversi energi menjadi *syngas* dengan bantuan udara, suplai udara yang dibutuhkan suatu proses gasifikasi bergantung dengan massa yang digunakan, karena jika debit udara yang digunakan terlalu besar maka kemungkinan besar hasil yang terbentuk banyak oksigen

dan nitrogen yang didapat dari suplai udara (Lourinho et al., 2023). Secara teoritis hubungan AFR dan ER pada proses pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran dapat dijelaskan melalui Gambar 3 berikut ini:

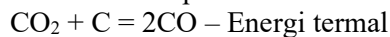


Gambar 3. Kurva nilai AFR dan ER pada Pirolisis, Gasifikasi, dan Pembakaran (Sudarmanta, 2015)

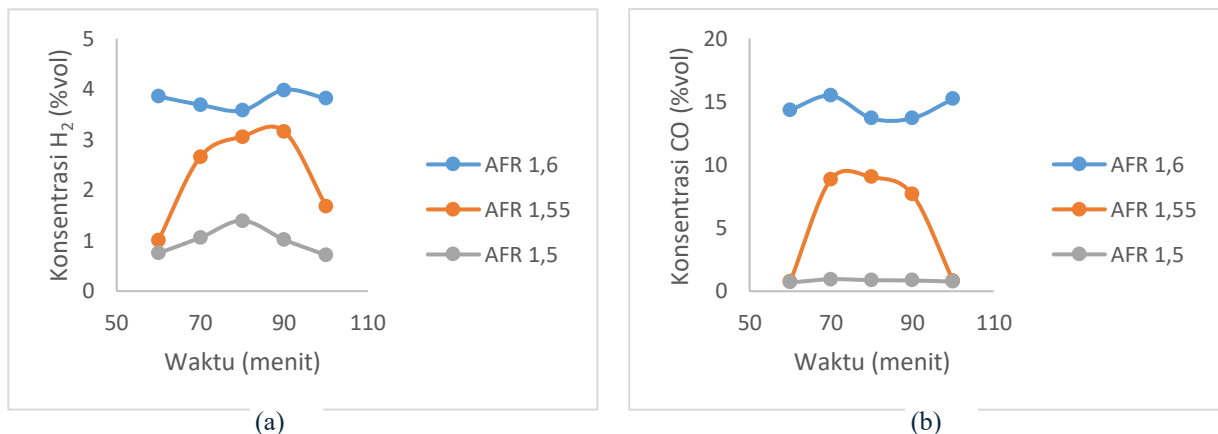
Gambar 3 menunjukkan bentuk kurva nilai AFR dan ER pada pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran. Berdasarkan gambar 3 tersebut dapat dilihat bahwa apabila suatu reaksi tidak dibantu oleh udara masukan maka reaksi tersebut merupakan reaksi pirolisis, namun apabila udara yang digunakan terlalu besar maka reaksi tersebut adalah reaksi pembakaran. sehingga konsentrasi *syngas* yang dihasilkan pada *Air Flow Ratio* (AFR) 1,6 lebih besar daripada *Air Flow Ratio* (AFR) lainnya. Seperti yang dinyatakan dalam penelitian sebelumnya menggunakan bahan baku tempurung kelapa memiliki hasil *syngas* sebesar : CO = 22,6 %v; CH₄ = 0,9 %v; H₂ = 11 %v pada AFR 1,04; CO = 23,1 %v; CH₄ = 1,1 %v; H₂ = 10,9 %v pada AFR 1,29; dan CO = 24,1 %v; CH₄ = 1,3 %v; H₂ = 11,4 %v dengan AFR sebesar 1,5. Hal ini menunjukkan bahwa variabel gasifikasi yaitu berupa *Air Flow Ratio* (AFR), dimana semakin tinggi *Air Flow Ratio* (AFR) berpengaruh dalam jumlah kandungan *syngas* (H₂, CO dan CH₄) yang akan juga terbentuk semakin tinggi (Rahmadani et al., 2020). Kondisi tersebut sesuai dengan persamaan dan teori dari reaksi gasifikasi dimana dengan penambahan O₂ melalui udara yang disalurkan melalui kompresor membuat kandungan *syngas* yang terbentuk pada zona reduksi dan oksidasi semakin besar :

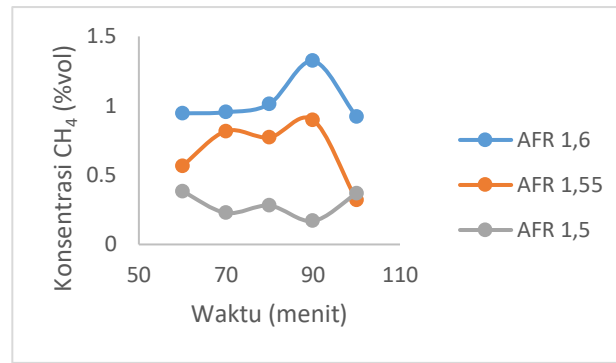


Dan pada zona reduksi pada *bourdour reaction* :



Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi *Air Flow Ratio* (AFR) berpengaruh terhadap komposisi *syngas* yang dihasilkan selama proses gasifikasi limbah tangkai daun tembakau. Peningkatan AFR cenderung meningkatkan konsentrasi gas mampu bakar, terutama karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), dan metana (CH₄). Hal ini menunjukkan bahwa jumlah udara yang masuk ke dalam reaktor memegang peranan penting dalam menentukan efektivitas proses gasifikasi sebagaimana yang telah digambarkan pada gambar 4.





(c)

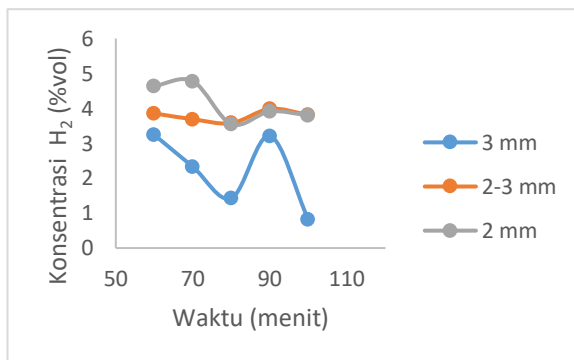
Gambar 4. Pengaruh *Air Flow Ratio* (AFR) terhadap konsentrasi *syngas* (a) H₂; (b) CO; (c) CH₄

Gambar 4 merupakan wujud dari pengaruh *Air Flow Ratio* (AFR) terhadap konsentrasi *syngas* H₂, CO, dan CH₄. Berdasarkan gambar 4, terlihat bahwa grafik yang terbentuk menunjukkan dimana peningkatan AFR dari 1,50 menjadi 1,60 menghasilkan peningkatan konsentrasi seluruh komponen utama *syngas*. Kondisi terbaik diperoleh pada AFR 1,60 dengan konsentrasi CO sebesar 15,46%vol, H₂ sebesar 3,98%vol, dan CH₄ sebesar 1,32%vol. Hasil ini menunjukkan bahwa suplai udara pada AFR 1,60 masih berada pada rentang optimum untuk mendukung proses gasifikasi.

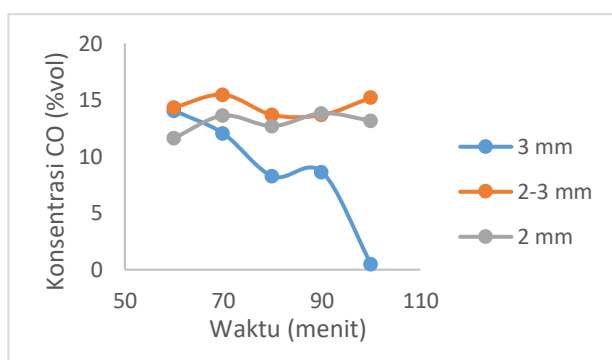
Kenaikan temperatur pada AFR yang lebih tinggi juga berdampak pada peningkatan kualitas *syngas* yang dihasilkan. Pada kondisi AFR 1,60 diperoleh konsentrasi CO, H₂, dan CH₄ yang lebih tinggi dibandingkan AFR 1,50 dan 1,55. Hal ini menunjukkan bahwa suplai udara pada AFR 1,60 masih berada pada rentang optimum proses gasifikasi sehingga mampu meningkatkan pembentukan gas bakar tanpa menyebabkan proses berubah menjadi pembakaran sempurna. Pada proses gasifikasi, udara berfungsi sebagai pemasok oksigen untuk mendukung reaksi oksidasi parsial yang menghasilkan energi panas. Energi panas tersebut selanjutnya digunakan untuk menggerakkan reaksi endotermik pada zona reduksi, seperti reaksi *Boudouard* dan *water-gas reaction* yang berperan dalam pembentukan CO dan H₂. Oleh karena itu, peningkatan jumlah udara hingga batas tertentu dapat meningkatkan kualitas *syngas* yang dihasilkan (Bobadilla et al., 2024).

Namun demikian, peningkatan AFR tidak dapat dilakukan secara terus-menerus. AFR yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan pembentukan CO₂ dan N₂ akibat dominasi reaksi pembakaran. Kondisi tersebut dapat menurunkan nilai kalor *syngas* karena sebagian karbon dan hidrogen telah teroksidasi sempurna menjadi gas yang tidak dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar (Elfiano et al., 2025). Oleh sebab itu diperlukan kondisi AFR optimum untuk memperoleh keseimbangan antara pembentukan energi panas dan produksi *syngas*.

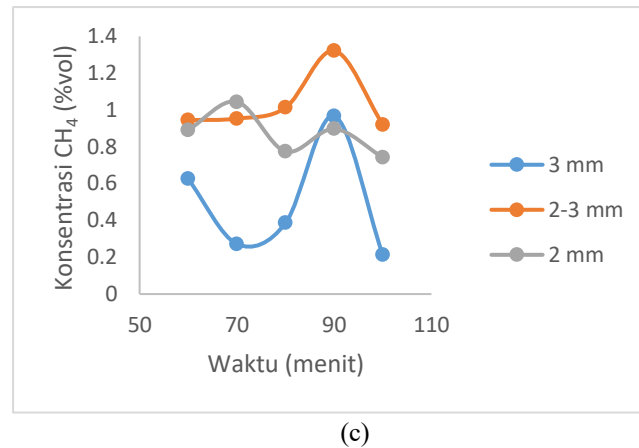
3.4 Pengaruh Ukuran Partikel Limbah Batang Daun Tembakau Terhadap *Syngas* yang dihasilkan



(a)



(b)



Gambar 5. Pengaruh Ukuran Limbah Tangkai Daun terhadap konsentrasi *syngas* (a) H₂; (b) CO; (c) CH₄

Gambar 5 menunjukkan bahwa ukuran partikel biomassa memberikan pengaruh terhadap komposisi *syngas* yang dihasilkan. Konsentrasi H₂ tertinggi diperoleh pada ukuran partikel 1–2 mm sebesar 4,778 %vol, sedangkan konsentrasi CO dan CH₄ tertinggi diperoleh pada ukuran partikel 2–3 mm masing-masing sebesar 15,463 %vol dan 1,322 %vol (Sayidahanjar, 2015). Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa ukuran partikel memengaruhi efektivitas perpindahan panas, perpindahan massa, serta laju reaksi antara biomassa dan agen gasifikasi di dalam reaktor sebagaimana menurut teori *Gas–solid reaction* yang dijelaskan oleh Fogler (2020). Ia menjelaskan dalam bukunya yang berjudul “Elements of Chemical Reaction Engineering” bahwa karakteristik perubahan ukuran partikel selama reaksi dapat dijelaskan melalui model *unchanging diameter particle* dan *changing diameter (shrinking particle)*. Pada biomassa dengan kandungan abu yang relatif tinggi, lapisan abu yang terbentuk selama proses gasifikasi dapat tetap mempertahankan dimensi luar partikel sehingga laju reaksi tidak hanya dikendalikan oleh reaksi kimia, tetapi juga oleh hambatan difusi gas melalui lapisan abu (*ash layer diffusion*). Sebaliknya, pada partikel yang mengalami penyusutan diameter (*changing diameter*), luas permukaan reaksi terus berubah sehingga perpindahan massa dan reaksi berlangsung lebih cepat. Pada penelitian ini, limbah tangkai daun tembakau memiliki kadar abu sebesar 15,9 wt.% sehingga selama proses gasifikasi diduga terjadi pembentukan lapisan abu yang masih memengaruhi difusi gas menuju inti partikel. Kondisi tersebut menyebabkan ukuran partikel tidak hanya menentukan luas permukaan reaksi, tetapi juga memengaruhi distribusi panas dan penetrasi gas reaktan ke dalam biomassa. Oleh karena itu, ukuran partikel 2–3 mm diduga memberikan kondisi yang paling seimbang antara luas permukaan kontak, difusi panas, dan difusi gas sehingga menghasilkan konsentrasi CO dan CH₄ yang lebih tinggi dibandingkan ukuran partikel lainnya. Sementara itu, ukuran partikel 1–2 mm memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga mempercepat pembentukan H₂, namun ukuran yang terlalu kecil berpotensi meningkatkan hambatan aliran gas di dalam reaktor sehingga tidak menghasilkan komposisi CO dan CH₄ yang optimum.

Berdasarkan konsentrasi *syngas* yang dihasilkan dapat diketahui bahwa ukuran 2-3 mm memiliki nilai kandungan *syngas* yang cenderung lebih baik dengan konsentrasi CO dan CH₄ yang lebih besar dibandingkan dengan ukuran 1-3 mm dan 3-5 mm, hal ini menunjukkan semakin besar ukuran limbah tangkai daun tembakau maka semakin rendah konsentrasi *syngas* (CO, H₂ dan CH₄) yang terbentuk namun ukuran yang terlalu kecil juga tidak cukup baik untuk hasil *syngas* (CO, H₂ dan CH₄) yang didapat. Ukuran yang terlalu besar akan mengurangi reaktifitas limbah batang daun tembakau, dan ukuran yang terlalu kecil juga dapat membuat *interlock* yang dapat menyebabkan limbah tangkai daun tembakau tidak terbakar semua (S.Ritonga, 2024). Hal ini sesuai dengan apa yang dilakukan pada penelitian sebelumnya mengenai pengaruh ukuran partikel terhadap karakterisasi gasifikasi biomassa tongkol jagung pada reaktor *downdraft*, dimana ukuran partikel biomassa yang lebih besar memiliki tahanan perpindahan panas yang lebih besar sehingga menyebabkan suhu aktual di dalam partikel biomassa menjadi lebih rendah (Primandanu & Putra, 2022). Pada proses pirolisis dengan ukuran biomassa yang lebih kecil proses utamanya dikendalikan oleh kinetika reaksi, sedangkan pada ukuran partikel yang lebih besar pada proses pirolisis dikendalikan oleh difusi gas sehingga produksi gas di dalam partikel biomassa menjadi sulit untuk didorong keluar. Kondisi optimum pada ukuran partikel 2-

3 mm dan AFR 1,6 dengan konsentrasi $\text{CO} = 15,463 \text{ \%v}$, $\text{H}_2 = 3,985 \text{ \%v}$, $\text{CH}_4 = 1,322 \text{ \%v}$ mengindikasikan bahwa proses gasifikasi berlangsung cukup baik, sehingga pengolahan limbah tangkai daun tembakau dapat ditingkatkan kembali untuk menghasilkan *syngas* yang lebih berkualitas.

Peningkatan AFR menyebabkan kenaikan temperatur maksimum pada zona oksidasi. Temperatur maksimum yang dicapai pada AFR 1,50 adalah $684,1^\circ\text{C}$, AFR 1,55 sebesar $648,4^\circ\text{C}$, sedangkan AFR 1,60 mencapai $791,4^\circ\text{C}$. Kenaikan temperatur ini menunjukkan bahwa suplai oksigen yang lebih besar meningkatkan intensitas reaksi oksidasi sehingga energi termal yang dihasilkan semakin tinggi. Temperatur yang tinggi akan mendukung berlangsungnya reaksi reduksi yang menghasilkan karbon monoksida dan hidrogen sebagai komponen utama *syngas* (Hidayat et al., 2025). Ukuran partikel biomassa mempengaruhi luas permukaan kontak antara bahan baku dan agen gasifikasi. Partikel yang berukuran lebih kecil memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga perpindahan panas berlangsung lebih cepat dan proses devolatilisasi dapat terjadi secara lebih efektif. Kondisi ini mendukung pembentukan gas hasil pirolisis yang selanjutnya akan dikonversi menjadi *syngas* pada zona reduksi (Rahmadani et al., 2020).

Meskipun demikian, ukuran partikel yang terlalu kecil tidak selalu menghasilkan kualitas *syngas* terbaik. Partikel berukuran sangat kecil dapat menyebabkan terjadinya pemadatan (*packing*) di dalam reaktor sehingga menghambat distribusi udara dan meningkatkan *pressure drop*. Akibatnya aliran udara menjadi tidak merata dan sebagian biomassa tidak mengalami proses gasifikasi secara optimal (Wana Putri Anastasya, 2026). Sebaliknya, ukuran partikel yang terlalu besar menyebabkan laju perpindahan panas ke bagian inti partikel menjadi lebih lambat. Hambatan perpindahan panas ini menyebabkan proses pirolisis berlangsung tidak sempurna sehingga pembentukan gas volatil berkurang (Moh. Rosifaul, 2025). Kondisi tersebut mengakibatkan penurunan konsentrasi *syngas* yang dihasilkan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa ukuran partikel 2-3 mm menghasilkan komposisi *syngas* yang paling baik dibandingkan ukuran lainnya. Hal ini mengindikasikan bahwa ukuran tersebut mampu memberikan keseimbangan antara luas permukaan reaksi, distribusi udara, dan perpindahan panas selama proses gasifikasi berlangsung.

3.5. Kondisi Operasi Optimum Gasifikasi

Kondisi operasi optimum pada penelitian ini ditentukan berdasarkan analisis komparatif terhadap seluruh kombinasi variasi *Air Flow Ratio* (AFR) dan ukuran partikel biomassa yang diuji. Penentuan kondisi optimum dilakukan dengan membandingkan komposisi *syngas* yang dihasilkan pada setiap kombinasi perlakuan, kemudian memilih kondisi yang menghasilkan konsentrasi CO , H_2 , dan CH_4 paling tinggi sebagai indikator kinerja gasifikasi terbaik. Berdasarkan hasil tersebut, kondisi operasi optimum diperoleh pada AFR 1,60 dan ukuran partikel 2–3 mm. Pada kondisi tersebut dihasilkan konsentrasi CO sebesar 15,46 %vol, H_2 sebesar 3,98 %vol, dan CH_4 sebesar 1,32 %vol. Berdasarkan hasil penelitian, kondisi operasi optimum diperoleh pada AFR 1,60 dan ukuran partikel 1,86–3,12 mm. Pada kondisi tersebut dihasilkan konsentrasi CO sebesar 15,46%vol, H_2 sebesar 3,98%vol, dan CH_4 sebesar 1,32%vol. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi kedua parameter tersebut mampu menciptakan kondisi reaksi yang paling efektif dalam menghasilkan *syngas*.

Tabel 2. Kondisi Operasi Optimum Gasifikasi

Parameter	Nilai
AFR optimum	1,60
Ukuran partikel optimum	1,86–3,12 mm
CO	15,46 %vol
H ₂	3,98 %vol
CH ₄	1,32 %vol

Tabel 2 diatas menunjukkan bahwa kombinasi AFR 1,60 dan ukuran partikel 2–3 mm memberikan komposisi *syngas* tertinggi dibandingkan kombinasi perlakuan lainnya. Kondisi tersebut diduga terjadi karena pada AFR 1,60 tersedia suplai oksigen yang cukup untuk menghasilkan energi panas melalui reaksi oksidasi, sedangkan ukuran partikel 2–3 mm memungkinkan distribusi panas dan aliran udara berlangsung lebih merata di dalam reaktor. Kombinasi kedua parameter tersebut menghasilkan proses pirolisis, oksidasi, dan reduksi yang berlangsung lebih efektif sehingga

meningkatkan pembentukan CO, H₂, dan CH₄. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan AFR dan ukuran partikel biomassa merupakan faktor penting dalam meningkatkan kinerja proses gasifikasi limbah tangkai daun tembakau (Amrullah & Oktaviananda, 2022).

4. Kesimpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa limbah tangkai daun tembakau memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan baku gasifikasi dalam menghasilkan syngas yang terdiri atas H₂, CO, dan CH₄. Variasi *Air Flow Ratio* (AFR) dan ukuran partikel biomassa terbukti berpengaruh terhadap temperatur reaktor serta komposisi syngas yang dihasilkan. Peningkatan AFR hingga 1,60 mampu meningkatkan temperatur zona reaksi sehingga menghasilkan komposisi syngas yang lebih tinggi dibandingkan AFR 1,50 dan 1,55. Sementara itu, ukuran partikel 2–3 mm memberikan kondisi yang paling efektif karena mampu menghasilkan distribusi panas dan aliran udara yang lebih merata selama proses gasifikasi. Berdasarkan hasil eksperimen, kondisi operasi terbaik diperoleh pada AFR 1,60 dan ukuran partikel 2–3 mm dengan komposisi syngas sebesar CO 15,46 %vol, H₂ 3,98 %vol, dan CH₄ 1,32 %vol. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa limbah tangkai daun tembakau berpotensi dikembangkan sebagai bahan baku gasifikasi untuk menghasilkan syngas sebagai sumber energi alternatif berbasis biomassa. Kondisi operasi terbaik yang diperoleh pada penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dalam perancangan dan pengoperasian reaktor *downdraft gasifier* skala yang lebih besar. Dengan demikian, pemanfaatan limbah tangkai daun tembakau tidak hanya mampu meningkatkan nilai tambah limbah pertanian, tetapi juga berpotensi mendukung penyediaan energi yang lebih berkelanjutan bagi sektor pertanian maupun agroindustri.

Daftar Pustaka

- Abdurrahman, S. G., Ikawati, S., Choliq, F. A., & Mustofa, O. (2024). Bioaktivitas Ekstrak Limbah Tembakau sebagai Pestisida Nabati terhadap Hama *Plutella Xylostella* pada Tanaman Kubis. *Jurnal HPT (Hama Penyakit Tumbuhan)*, 12(2). <https://doi.org/https://doi.org/10.21776/ub.jurnalhpt.2024.012.2.3>
- Adhynata, A. D. (2026). *Analisis Efisiensi Eksergi dengan Variasi Temperatur Oksidasi pada Proses Gasifikasi Kaliandra dengan Gasifier Tipe Downdraft*. Institut Teknologi PLN.
- Amalia, L. (2025). *Tembakau (Nicotiana tabacum L.)*. Eureka Media Aksara.
- Amrullah, S., & Oktaviananda, C. (2022). Effect of Air Fuel Ratio to Quality of Municipal Solid Waste Using Downdraft Gasification. *REM Jurnal: Rekayasa Energi Manufaktur*, 7(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.21070/r.e.m.v7i1.1640>
- Andreas Novendra Dwiyanto, M. (2023). *Karakteristik Emisi Pembakaran Tandan Kosong Kelapa Sawit dengan Batu Bara Variasi Air Fuel Ratio (AFR)*. Universitas Lampung.
- Bobadilla, L. F., Azancot, L., González-Castaño, M., Ruíz-López, E., Pastor-Pérez, L., Durán-Olivencia, F. J., Ye, R., Chong, K., Blanco-Sánchez, P. H., Wu, Z., Reina, T. R., & Odriozola, J. A. (2024). Biomass Gasification, Catalytic Technologies and Energy Integration for Production of Circular Methanol: New Horizons for Industry Decarbonisation. *Journal of Environmental Sciences*, 140, 306–318. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074223004187>
- Edelweis, C. B. H. (2024). *Analisis Syngas Hasil Gasifikasi Pelet Kayu Karet (Hevea Brasiliensis) Dan Cangkang Kelapa Sawit (Elaeis Guineensis) Menggunakan Dua Tipe Downdraft Gasifiers* [Universitas Lampung]. <https://digilib.unila.ac.id/86767/>
- Elfiano, E., Suropto, H., Hastuti, K., Arizona, R., & Lihantoro, B. (2025). Karakteristik Sistem Gasifikasi Tipe Downdraft Gasifier Berbahan Bakar Biomassa Berdasarkan Variasi Volume Ruang Bakar. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 16(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.21776/jrm.v16i1.1742>
- Erian, F. O., Muarif, A., ZA, N., Ginting, Z., & Zulnazri. (2022). Pemanfaatan Ekstrak Nikotin dari Limbah Puntung Rokok menjadi Insektisida. *Jurnal Teknologi Kimia Unimal*, 11(2), 258–266. <https://pdfs.semanticscholar.org/e8e6/5c46967504a9505e05a03c29077c950eb34f.pdf>
- Firmansyah, M. F. R., & Siregar, I. H. (2021). Pengaruh AFR Terhadap Kualitas Syngas dan Nyala Api Gasifikasi Biomassa Tempurung Kelapa Tipe Downdraft. *Jurnal Teknik Mesin*, 4(1), 11–18.
- Fogler, H. S. (2020). *Elements of Chemical Reaction Engineering* (sixth edit). Pearson Education.

- Hidayat, R., Suwandono, P., Pambudi, W. S. C., & Saputra, H. D. (2025). Peningkatan Peforma Design Gasifier Tipe Downdraft Dengan Variasi Jumlah Aliran Udara. *Al Jazari*., 10(1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.31602/al-jazari.v10i1.16257>
- Lourinho, G., Alves, O., Garcia, B., Rijo, B., Brito, P., & Nobre, C. (2023). Costs of Gasification Technologies for Energy and Fuel Production: Overview, Analysis, and Numerical Estimation. *Recycling*, 8(3). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/recycling8030049>
- Moh. Rosifaul, A. (2025). *Karakteristik Aliran Fluida Pada Pembakaran Batubara-Woodchips dalam Furnace Circulating Fluidized Bed secara Numerik (Studi Kasus Up Sebalang)* [Universiitas Lampung]. <https://digilib.unila.ac.id/88429/>
- Nurlatifah, I., Amyranti, M., & Maftukhah, S. (2022). Konversi Batubara Menjadi Syngas Menggunakan Metode Gasifikasi Dengan Variasi Air Fuel Ratio. *Unistek*, 9(2), 141–148. <https://doi.org/10.33592/unistek.v9i2.2698>
- Nurulhuda, N. (2022). *Pengaruh Variasi Laju Alir Udara terhadap Efisiensi Termal pada Proses Gasifikasi dengan Sistem Updraft* [Universitas Hasanuddin Gowa]. <https://repository.unhas.ac.id/id/eprint/14589/>
- Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, A., Piłula, M., Mazur, A., Vaskina, I., & Dach, J. (2025). Energetic Potential of Tobacco Waste Within Combustion or Anaerobic Digestion †. *Energies*, 18(4). <https://doi.org/10.3390/en18040762>
- Primandanu, G. S., & Putra, A. B. K. (2022). Studi Simulasi dan Eksperimental Pengaruh Equivalence Ratio dan Temperatur Udara Inlet pada Proses Gasifikasi Tongkol Jagung terhadap Gasifier Tipe Downdraft Berdasarkan Prinsip Energi dan Eksergi. *Jurnal Teknik ITS*, 11(1). <https://scholar.archive.org/work/6ddl5pkm6zcvpavg4euophziri/access/wayback/https://ejurnal.it-s.ac.id/index.php/teknik/article/download/82095/7009>
- Putra, A. S., Hajar, I., Salamah, L., Effendy, S., & Bow, Y. (2025). Karakteristik Syngas dari Tempurung Kelapa dan Pelet Kayu Jati dengan Metode Gasifier Downdraft ditinjau dari Kecepatan Alir Udara. *JPS: Jurnal Penelitian Sains*, 27(1), 37–44.
- Rahmadani, F., Suwandi, & Rosdiana, E. (2020). Pengaruh Variasi AFR terhadap Kinerja Kompor Gasifikasi Biomassa Tipe Downdraft. *E-Proceeding of Engineering*, 4391. https://dl1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/88556196/12293-23862-1-SM-libre.pdf?1657742722=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DPengaruh_Variasi_Afr_air_Fuel_Ratio_Terh.pdf&Expires=1782025831&Signature=BnK5e7UfDxIhPfNZZZAY2-qnQ4AM3TrYZiJBmPzVXXcGo
- S.Ritonga, A. S. (2024). *Rancang Bangun Prototype Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (Pltbm) Bersumber Pembuangan Limbah Pertanian Berbasis IoT* [Universitas Medan Area]. <https://repositori.uma.ac.id/jspui/handle/123456789/25736>
- Sayidahanjar. (2015). *Pengaruh Laju Alir Udara dan Ukuran Limbah Batang Daun Tembakau terhadap Syngas menggunakan Reaktor Gasifikasi Updraft*.
- Shadle, L. J., Indrawan, N., Breault, R. W., & Bennett, J. (2025). *Gasification Technology* (M. Lackner, B. Sajjadi, & W. Chen (eds.); Handbook o). Springer, Cham. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-031-84483-6_40
- Sudarmanta, B. (2015). Dual Fuel Engine Performance Using Biodiesel Andsyn-Gas From Rice Husk Downdraft Gasification For Power Generation. *International Seminar on Sustainable Biomass Production and Utilization: Challenges and Opportunities*.
- Wana Putri Anastasya, H. (2026). *Gasifikasi Pelet Kayu Karet (Hevea Brasiliensis) Sebagai Sumber Energi Terbarukan Menggunakan Downdraft Gasifier* [Unniversitas Lampung]. <https://digilib.unila.ac.id/96086/>
- Wiyono, P. A. I., Stujanjono, H., Sidartawan, R., Listiyadi, D., Rozy, M. F., Sanata, A., Sholahuddin, I., & M. Dimiyati Nashrullah. (2025). Pengaruh Laju Alir Udara Terhadap Produktifitas Syngas Gasifikasi Biomassa Kulit Kopi. *Jurnal Permadi: Perancangan, Manufaktur, Material, Dan Energi*, 7(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.52005/permadi.v7i01.147>
- Yana, S., Nelly, Radhiana, Ibrahim, N., Zubair, A. A., Zulfikar, T. M., & Yulisma, A. (2022). Dampak Ekspansi Biomassa sebagai Energi Terbarukan: Kasus Energi Terbarukan Indonesia. *Jurnal Serambi Engineering*, VII(4), 4036–4050. <https://pdfs.semanticscholar.org/41fc/1a402514a1ccd9daa896341942a8f13336bb.pdf>
- Yang, X., Zhang, Y., Sun, P., & Peng, C. (2024). A Review on Renewable Energy: Conversion and

- Utilization of Biomass. *Smart Molecules Wiley*, 2(1).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/smo.2024001>
- Zuhdi, N. (2025). *Produksi Tembakau Nasional masih Defisit*. Media Indonesia.
<https://mediaindonesia.com/ekonomi/783015/produksi-tembakau-nasional-masih-defisit>