EISSN: 2528 - 0112

JURNAL VIRTUAL OF MECHANICAL ENGINEERING ARTICLE (V-MAC)

https://ejournal.unibabwi.ac.id/index.php/vmac email: vmac.mesin@gmail.com

Syngas as An Alternative Fuel for Spark-Ignition Internal Combustion Engines: A Systematic Review

Ainun Huda Gimnastiar[1], Andi Sanata[2*], Danang Yudistiro[3], Nasrul Ilminnafik[4], Agus Triono[5], Imam Sholahuddin[6], Dani Hari Tunggal Prasetiyo[7]

[1]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember, Indonesia, ainun.h.gimnastiar@gmail.com
[2]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember, Indonesia, andisanata@unej.ac.id
[3]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember, Indonesia, danang.ft@unej.ac.id
[4]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember, Indonesia, nasrul.teknik@unej.ac.id
[5]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember, Indonesia, agus.triono@unej.ac.id
[6]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember, Indonesia, imam.teknik@unej.ac.id
[7]Jurusan Teknik Mesin, Universitas Jember, Indonesia, dani.hari@unej.ac.id

Corresponding Author: andisanata@unej.ac.id

Abstract**:** *The transition to low-carbon energy is driving the development of alternative fuels to replace fossil fuels in spark-ignition engines. One potential candidate is syngas from biomass gasification, given its lower carbon emissions. This study aims to compile a comprehensive synthesis of the use of syngas as an alternative fuel for spark-ignition engines, using the Systematic Literature Review method, following the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses. The results show that syngas quality is influenced by the type of gasifier, gasification agent, and operating parameters, with downdraft fixed-bed gasifiers being the most optimal technology. The use of syngas can improve combustion stability and thermal efficiency, but reduces power and torque by 15–35% in spark-ignition engines. With proper gas quality optimization and engine calibration, syngas can be an efficient, reliable, and environmentally friendly alternative fuel for spark-ignition engines.*

Keyword**:** *Syngas, Biomass Gasification, Spark-Ignition Engine, Alternative Fuel, Engine Performance*

Abstrak: Transisi menuju energi rendah karbon mendorong pengembangan bahan bakar alternatif untuk menggantikan bahan bakar fosil pada mesin *spark-ignition*. Salah satu kandidat potensial adalah *syngas* dari gasifikasi biomassa, mengingat emisi karbonnya yang lebih rendah. Studi ini bertujuan untuk menyusun sintesis komprehensif tentang pemanfaatan *syngas* sebagai bahan bakar alternatif mesin *spark-ignition* menggunakan metode *Systematic Literature Review* berbasis *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*. Hasil menunjukkan bahwa kualitas *syngas* dipengaruhi oleh jenis *gasifier*, agen gasifikasi, dan parameter operasi, dengan *downdraft fixed-bed gasifier* sebagai teknologi paling optimal. Penggunaan *syngas* dapat meningkatkan stabilitas pembakaran dan efisiensi termal, tetapi mengurangi daya dan torsi sebesar 15–35% pada mesin *spark-ignition*. Dengan optimasi kualitas gas dan kalibrasi mesin yang tepat, *syngas* berpotensi menjadi bahan bakar alternatif yang efisien, andal, dan ramah lingkungan untuk mesin *spark-ignition*.

Kata Kunci: *Syngas*, Gasifikasi Biomassa, Mesin *Spark-Ignition*, Bahan Bakar Alternatif, Performa Mesin

1. PENDAHULUAN

Meningkatnya kebutuhan energi dan dampak perubahan iklim mendorong transisi global menuju sistem energi rendah karbon seiring menurunnya ketersediaan bahan bakar fosil [1], [2]. Sektor transportasi dan pembangkit listrik masih didominasi mesin berbahan bakar fosil yang menyumbang emisi gas rumah kaca signifikan [3], [4]. Meski elektrifikasi kendaraan berkembang, penerapannya belum merata karena keterbatasan infrastruktur dan biaya, terutama di negara berkembang [5], [6]. Karena itu, pengembangan bahan bakar alternatif rendah karbon yang dapat digunakan pada mesin *spark-ignition* (SI) menjadi salah satu pendekatan yang potensial [7], [8].

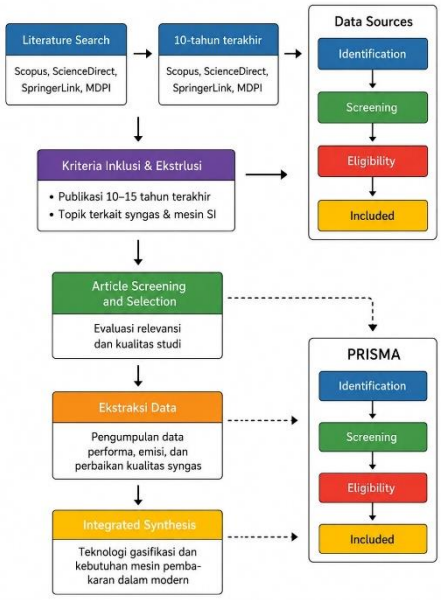
Syngas (*synthesis gas*) merupakan kandidat bahan bakar alternatif yang menjanjikan karena dapat diproduksi dari biomassa, batubara, dan limbah padat melalui proses gasifikasi [9], [10]. Pemanfaatan biomassa berpotensi menurunkan emisi karbon bersih sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah [11], [12]. Namun, penggunaan *syngas* pada mesin SI menghadapi tantangan akibat nilai kalor rendah dan variabilitas komposisi yang dipengaruhi jenis bahan baku serta kondisi operasi [13], [14]. Variasi komposisi *syngas* memengaruhi performa mesin, stabilitas pembakaran, dan emisi, sehingga menyulitkan integrasi antara sistem gasifikasi dan mesin.

Berbagai studi telah mengembangkan desain reaktor gasifikasi, optimasi parameter operasi, dan teknologi pemurnian untuk meningkatkan kualitas *syngas* [14], [15], [16]. Di sisi lain, studi eksperimental dan numerik pada mesin SI menunjukkan adanya *trade-off* antara penurunan daya, peningkatan efisiensi termal, serta perubahan karakteristik emisi [13], [16]. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek tertentu secara terpisah, seperti proses gasifikasi, kualitas *syngas*, atau performa mesin. Akibatnya, keterkaitan antara parameter gasifikasi, kualitas *syngas*, dan performa mesin belum dipahami secara menyeluruh, sehingga proses optimasi sistem masih sulit dilakukan.

Berangkat dari keterbatasan tersebut, penelitian ini bertujuan *melakukan Systematic Literature Review* (SLR) berbasis *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) untuk menyusun sintesis komprehensif mengenai pemanfaatan *syngas* pada mesin SI. Kajian ini mengintegrasikan pembahasan mengenai parameter gasifikasi, karakteristik *syngas*, serta performa dan emisi mesin SI dalam satu analisis. Kajian ini juga mengidentifikasi parameter dominan dan hubungan antarparameter yang memengaruhi implementasi *syngas* pada mesin SI. Pendekatan ini diperlukan agar pengembangan teknologi *syngas* tidak hanya berfokus pada satu aspek, tetapi juga mempertimbangkan keterkaitan antara proses gasifikasi dan kinerja mesin. Hasil kajian ini diharapkan dapat mendukung pengembangan sistem gasifikasi–*engine* yang lebih efisien dan sesuai untuk aplikasi mesin SI.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR). Hal ini bertujuan untuk meninjau penelitian terkait pemanfaatan *syngas* yang merupakan hasil gasifikasi biomassa sebagai bahan bakar alternatif pada mesin *spark-ignition*. Pendekatan ini digunakan agar proses penelusuran dan analisis literatur dilakukan secara sistematis dan konsisten. Proses seleksi literatur mengikuti pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) untuk mengurangi potensi bias dalam pemilihan artikel. Alur metodologis penelitian divisualisasikan dalam Gambar 1 berikut.



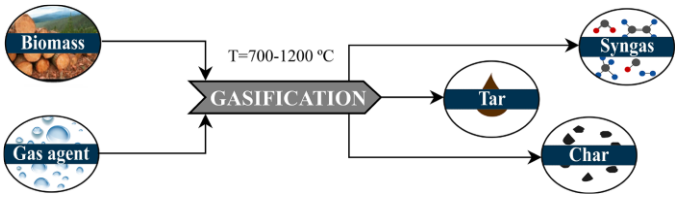
Gambar 1. Kerangka Metodologis yang Digunakan dalam Studi Ini

Literatur diperoleh dari basis data Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, dan MDPI dengan rentang publikasi 2015–2025. Pencarian artikel menggunakan kombinasi kata kunci terkait *syngas*, gasifikasi biomassa, dan mesin *spark-ignition* pada bagian judul, abstrak, dan kata kunci. Sebanyak 96 artikel teridentifikasi, kemudian 18 artikel duplikat dieliminasi sehingga diperoleh 78 artikel unik. Setelah proses *screening* judul dan abstrak, 28 artikel dinyatakan tidak relevan, sehingga 50 artikel dipilih untuk dianalisis lebih lanjut.

Kriteria inklusi mencakup studi produksi *syngas* melalui gasifikasi biomassa, batubara, atau limbah padat, pemanfaatannya pada mesin *spark-ignition*, serta analisis performa, pembakaran, dan emisi. Studi terkait turbin gas, fuel cell, dan aplikasi non-mesin pembakaran dalam tidak disertakan. Seleksi literatur mengikuti tahapan PRISMA dan artikel yang lolos dianalisis secara kualitatif-komparatif berdasarkan kualitas metodologi, data gasifikasi, dan performa mesin. Hasil kajian menunjukkan penelitian *syngas* terus berkembang, terutama pada optimasi gasifikasi, pemurnian gas, serta evaluasi performa dan emisi mesin SI, namun studi yang mengintegrasikan seluruh aspek tersebut masih terbatas.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

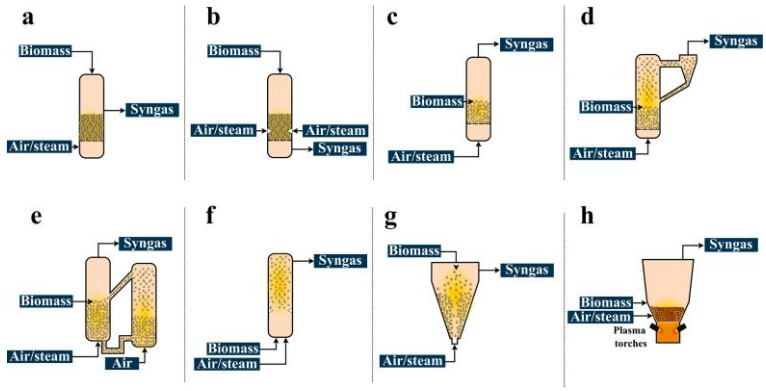
Gasifikasi biomassa dan produksi *syngas*



Gambar 2. Skematik Proses Gasifikasi Biomassa [17]
Sumber: [17]

Gasifikasi biomassa merupakan proses konversi termokimia parsial yang mengubah bahan baku padat menjadi gas mudah terbakar melalui oksidasi terbatas pada temperatur tinggi 700–1100 °C [17], [18]. Proses ini menghasilkan gas sintesis (*syngas*) yang terutama terdiri atas *combustible* gas berupa H_2, CO, CH_4, serta gas *innert* seperti CO_2, dan N_2, dengan komposisi yang dipengaruhi oleh jenis biomassa, agen gasifikasi, desain reaktor, dan kondisi

operasi [19], [20]. Pada mesin *spark-ignition* (SI), kualitas *syngas* ditentukan oleh kandungan gas mudah terbakar, kestabilan komposisi, nilai kalor, serta kontaminan seperti tar, partikulat, dan senyawa alkali yang dapat memengaruhi performa dan keandalan mesin [9].



Gambar 3. Konfigurasi Tipe Reaktor : (A). *Updraft Fixed Bed*; (B). *Downdraft Fixed Bed*; (C*). Bubbling Fluidized Bed*; (D). *Circulating Fluidized Bed*; (E). *Dual Fluidized Bed*; (F). *Entrained Flow*; (G). *Spouted Bed*; (H). *Plasma Reactors* [25]
Sumber: [25]

Berbagai konfigurasi *gasifier* telah dikembangkan untuk produksi *syngas*, seperti *fixed-bed gasifier* (*updraft, downdraft, dan crossdraft*), *fluidized bed, circulating fluidized bed*, dan *dual fluidized bed reactor* [21], [22]. Setiap konfigurasi *gasifier* menghasilkan komposisi dan kualitas *syngas* yang berbeda sehingga penggunaannya disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi [18], [22]. Hal ini terjadi akibat *in situ thermal cracking* pada zona oksidasi, sehingga tar melewati zona temperatur tinggi sebelum keluar dari reaktor. Kandungan tar yang lebih rendah membuat *downdraft gasifier* lebih sesuai untuk aplikasi mesin SI karena kebutuhan pembersihan gas menjadi lebih sederhana.

Sebaliknya, *updraft gasifier* memiliki efisiensi termal tinggi akibat aliran berlawanan arah antara biomassa dan gas panas, namun menghasilkan *syngas* dengan kandungan tar tinggi sehingga kurang ideal untuk aplikasi *engine* tanpa proses *cleaning* intensif. Sementara itu, *fluidized bed* dan *dual fluidized bed gasifier* menawarkan homogenitas temperatur lebih baik [26], fleksibilitas *feedstock*, dan kapasitas produksi lebih besar, tetapi menghasilkan kandungan partikulat dan tar lebih tinggi akibat fluidisasi dan *entrainment* partikel *bed* [18]. Karena itu, tipe *gasifier* ini lebih banyak digunakan pada sistem skala besar yang dilengkapi unit pembersihan gas. Tabel 1 merangkum karakteristik *syngas* dari berbagai tipe *gasifier* dan relevansinya terhadap aplikasi mesin SI.

Tabel 1. Ringkasan karakteristik *syngas* dari berbagai sistem gasifikasi untuk aplikasi mesin SI

Jenis *gasifier*	Komposisi dominan *syngas*	Karakteristik utama	Implikasi pada mesin SI	Referensi
Updraft fixed bed	CO (18–22%), H_2 (15–20%), CO_2 tinggi, tar tinggi	Efisiensi termal tinggi, temperatur gas keluar rendah	Perlu sistem pembersihan tar intensif; risiko *fouling* pada *intake* pembakaran	[20]
Downdraft fixed bed	CO (18–22%), H_2 (15–20%), CH_4 (1–5%), tar rendah	Zona oksidasi dan reduksi terintegrasi; cracking tar internal	Lebih sesuai untuk mesin SI skala kecil karena tar rendah dan LHV stabil	[21]
Crossdraft fixed bed	CO tinggi, H_2 rendah	Zona panas sempit, tar menengah–tinggi.	Nyala cepat namun fluktuatif; butuh filtrasi partikulat	[24]
Fluidized bed	H_2 (15–30%), CO (15–25%), tar sedang	Pencampuran homogen, temperatur seragam	Komposisi stabil; cocok untuk skala menengah; perlu kontrol AFR adaptif	[35]

Circulating fluidized bed	H_2 & CO moderat–tinggi	Efisiensi tinggi, residence time pendek	Cocok untuk daya menengah–besar; kontrol emisi lebih baik	[26]
Dual fluidized bed	H_2 tinggi (30–45%), N_2 rendah	Tar rendah, nilai kalor lebih tinggi	Sangat cocok untuk aplikasi *engine & upgrading*; AFR lebih rendah	[27], [28]

Sumber: [20], [21], [24], [26], [27], [28], [35]

Selain desain reaktor, parameter operasi gasifikasi sangat memengaruhi kualitas *syngas* [15]. Temperatur yang lebih tinggi umumnya meningkatkan fraksi H_2 dan CO melalui reaksi endothermik seperti *steam reforming*, *Boudouard reaction*, dan *water–gas shift*, serta menurunkan pembentukan tar melalui *thermal cracking* [29]. Namun, temperatur yang terlalu tinggi dapat menurunkan efisiensi energi dan meningkatkan beban termal reaktor [30].

Faktor yang Mempengaruhi Kualitas *Syngas*

Kualitas s*yngas* dipengaruhi oleh parameter operasi, karakteristik biomassa, dan agen gasifikasi yang menentukan komposisi gas, *heating value*, kandungan tar, dan kestabilan pembakaran [13], [15]. Temperatur gasifikasi menjadi salah satu parameter utama karena meningkatkan reaksi endotermik seperti *Boudouard*, *water–gas*, dan *steam reforming*. Peningkatan temperatur umumnya menaikkan fraksi H_2 dan CO serta menurunkan pembentukan tar melalui *thermal cracking* [13], [30], [31]. Namun, temperatur yang terlalu tinggi dapat meningkatkan kebutuhan energi dan beban termal reaktor [32]. [13], [30], [31], meskipun temperatur terlalu tinggi meningkatkan kebutuhan energi dan beban termal reaktor [32]. Pada gasifikasi udara, *equivalence ratio (ER)* optimum sekitar 0,20–0,35 diperlukan untuk menjaga keseimbangan antara kualitas *syngas* dan kestabilan operasi [33], [34]. Selain itu, *moisture, volatile matter, fixed carbon*, dan *ash content* biomassa turut memengaruhi kualitas *syngas*, di mana *moisture* tinggi cenderung menurunkan efisiensi termal [35], [36]. Penggunaan *steam* dan *oxygen enrichment* dapat meningkatkan rasio H_2/CO dan *heating value syngas*, tetapi meningkatkan kompleksitas serta kebutuhan energi sistem [37], [38], [39]. Oleh karena itu, optimasi gasifikasi untuk mesin *spark-ignition* harus mempertimbangkan keseimbangan antara kualitas *syngas*, kestabilan komposisi, dan efisiensi proses [40], [41].

Persyaratan Pemurnian dan Peningkatan Kualitas *Syngas*

Syngas hasil gasifikasi biomassa umumnya belum dapat langsung digunakan pada mesin *spark-ignition* karena masih mengandung kontaminan seperti tar, partikulat, alkali, sulfur, klorin, dan uap air yang dapat menurunkan performa serta mempercepat kerusakan pada mesin [38], [40]. Tar menjadi kontaminan paling kritis karena terbentuk dari dekomposisi termal biomassa yang tidak terkonversi secara sempurna selama proses gasifikasi, terutama akibat temperatur operasi yang rendah, waktu tinggal (*residence time*) yang tidak memadai, atau keterbatasan reaksi tar cracking dan reforming. Tar yang tersusun atas senyawa hidrokarbon berat cenderung mengalami kondensasi dan polimerisasi ketika temperatur gas menurun selama aliran menuju mesin. Akumulasi tar membentuk deposit pada *manifold, valve*, dan ruang bakar sehingga mengganggu karakteristik aliran, pencampuran udara–bahan bakar, serta stabilitas pembakaran, yang pada akhirnya menyebabkan *fouling, misfire*, penurunan performa mesin, dan peningkatan kebutuhan *maintenance* [40]. Untuk aplikasi *engine*, kandungan tar pada *grade syngas* direkomendasikan di bawah 50–100 mg/Nm³ agar operasi mesin tetap andal [41].

Tabel 2. Kadar tar yang diperbolehkan dalam gas produksi untuk berbagai penggunaan

Aplikasi	Batasan kadar tar (mg/Nm3)	Permasalahan
Direct combustion	Tidak ada batasan limit	-
Internal combustion engine	<100	-
Gas turbine	<5.0	Penyumbatan dan keausan pada struktur bilah turbin
Gas engines	<5.0	Sumbatan pada pipa
Synthesis of methanol	<0.1	Menyebabkan korosi dan endapan karbon, yang mengakibatkan kerusakan pada anoda
Compressors	50-500	
Fuel cells	<1.0	Mencemari peralatan yang ada di tahap selanjutnya dan memengaruhi proses sintesis
Fischer-Tropsch Synthesis	<1.0	

Sumber : [41], [42]

Selain tar, partikulat seperti *char fines* dan *ash* dapat menyebabkan abrasi pada *valve seat, piston ring*, dan *cylinder liner*, sedangkan alkali, sulfur, dan klorin berpotensi menimbulkan korosi temperatur tinggi serta degradasi sistem *after-treatment* [43]. Karena itu, *syngas* untuk aplikasi *engine* perlu memenuhi standar komposisi gas mudah terbakar dan tingkat kebersihan tertentu. Sistem *cleaning syngas* umumnya dilakukan secara *multistage*, dimulai dengan *cyclone separator* atau *hot gas filter* untuk menghilangkan partikulat kasar, dilanjutkan *gas cooler* untuk mengondensasikan tar berat, serta *wet scrubber* atau *venturi scrubber* untuk menghilangkan tar dan partikulat halus. Tahap akhir dapat menggunakan *ceramic/fabric filter* agar kualitas gas sesuai untuk *engine* [43,44]. Efektivitas sistem *cleaning* sangat menentukan keberhasilan integrasi *gasifier–engine* karena kualitas *syngas* dipengaruhi oleh *heating value* dan kandungan kontaminan [31]. [31].

Karakteristik Pembakaran *Syngas* pada Mesin SI

Karakteristik pembakaran *syngas* pada mesin *spark-ignition* dipengaruhi oleh komposisi gas, terutama fraksi H_2 dan CO, sehingga evaluasinya harus mempertimbangkan kinetika dan termodinamika campuran, bukan hanya nilai kalor [42], [43]. Kandungan H_2 yang tinggi meningkatkan *laminar flame speed*, menurunkan *ignition delay*, dan memperluas *lean flammability limit* sehingga pembakaran menjadi lebih cepat dan stabil [43]. Hal ini disebabkan H_2 memiliki difusivitas tinggi, energi penyalaan rendah, serta mempercepat pembentukan radikal aktif (H, O, dan OH) yang meningkatkan laju perambatan api [43]. Sebaliknya, CO_2 dan N_2 bertindak sebagai *diluent* yang menyerap panas pembakaran dan menurunkan temperatur nyala sehingga memperlambat penyebaran api [43]. CO berkontribusi terhadap pelepasan panas, namun oksidasinya berlangsung lebih lambat dan bergantung pada radikal OH, sehingga rasio H_2/CO menjadi parameter penting dalam menentukan reaktivitas pembakaran dan karakteristik ignition [45]. *Syngas* dalam fase gas menghasilkan pencampuran udara–bahan bakar lebih homogen sehingga meningkatkan *combustion stability* dan menurunkan *cycle-to-cycle variation*. Namun, *syngas* kaya hidrogen meningkatkan risiko *backfire* dan *misfire* [45]. Oleh sebab itu, pengaturan *spark timing* perlu disesuaikan dengan komposisi *syngas* yang digunakan [46].

Analisis Performa Mesin SI

Pemanfaatan *syngas* pada mesin *spark-ignition* (SI) menghasilkan karakteristik performa yang berbeda dibanding bensin atau LPG *(Liquefied Petroleum Gas)* akibat rendahnya *volumetric heating value*, tingginya *fraksi inert*, dan variabilitas komposisi bahan bakar yang memengaruhi proses pembakaran [45], [46]. Secara umum, penggunaan *syngas* menyebabkan penurunan brake power dan torsi sekitar 15–35% dibandingkan bensin. Penurunan ini disebabkan oleh rendahnya densitas energi volumetrik dan *displacement* udara

intake yang menurunkan *volumetric efficiency* [43], [45], [46], [47]. Penurunan daya cenderung lebih besar pada *syngas* dengan kandungan N_2 tinggi dan mesin tanpa modifikasi [43], [48]. Meskipun demikian, *brake thermal efficiency (BTE*) dapat setara atau lebih tinggi dari bensin apabila *combustion phasing* dan *spark timing* dioptimalkan, terutama pada *syngas* berkandungan H_2 tinggi yang meningkatkan *flame speed* dan memungkinkan operasi *lean-burn* [46], [48]. Di sisi lain, *brake specific fuel consumption* (BSFC) umumnya lebih tinggi akibat rendahnya *lower heating value syngas*, walaupun konsumsi energi aktual dapat tetap kompetitif berdasarkan brake specific *energy consumption* (BSEC) [44], [46], [48]. *Syngas* juga memiliki kestabilan pembakaran yang baik pada kandungan H_2 moderat karena *burning velocity* tinggi dan kemudahan *ignition*, tetapi *syngas* yang terlalu encer atau kaya hidrogen berisiko meningkatkan *cyclic variability*, *backfire*, dan *pre-ignition* [46], [49], [50]. Dengan demikian, performa mesin SI berbahan bakar syngas dipengaruhi oleh keseimbangan antara penurunan efisiensi pengisian silinder *(volumetric efficiency)* akibat berkurangnya massa udara masuk *(air displacement effect)* dan peningkatan karakteristik pembakaran yang dipengaruhi oleh laminar flame speed serta reaktivitas campuran bahan bakar, sehingga optimasi kualitas *syngas* serta penyesuaian parameter dan modifikasi mesin menjadi faktor penting untuk memperoleh kinerja yang optimal.[48], [50].

Karakteristik Emisi Gas Buang

Emisi gas buang mesin SI berbahan bakar *syngas* dipengaruhi oleh komposisi bahan bakar, kondisi pembakaran, dan strategi operasi mesin [50]. Secara umum, *syngas* menghasilkan emisi HC lebih rendah dibanding bensin karena berbentuk gas sehingga pencampuran udara–bahan bakar menjadi lebih homogen serta tidak menimbulkan penempelan bahan bakar cair pada dinding saluran masuk dan ruang bakar. Kondisi ini membuat proses pembakaran lebih sempurna dan mengurangi bahan bakar yang tidak terbakar di dalam silinder. [50]. Emisi CO dapat menurun jika pembakaran berlangsung lengkap, terutama pada *syngas* berkandungan hidrogen tinggi, tetapi dapat meningkat pada campuran kaya atau *syngas* dengan fraksi CO tinggi akibat oksidasi tidak sempurna. Emisi NOx cenderung meningkat pada *syngas* kaya hidrogen karena laju pembakaran cepat dan temperatur puncak tinggi, meskipun kandungan CO_2 dan N_2 dapat menurunkan *flame temperature* melalui efek dilusi. Karena itu, tren NOx bergantung pada keseimbangan antara fraksi hidrogen dan pengenceran *inert*. Secara umum, *syngas* berpotensi menurunkan emisi HC dan partikulat, tetapi kontrol NOx masih menjadi tantangan utama [49].

4. KESIMPULAN

Hasil kajian menunjukkan bahwa *syngas* memiliki potensi besar sebagai bahan bakar alternatif rendah karbon untuk mesin *spark-ignition* (SI). Pemanfaatan *syngas* dari biomassa berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil sekaligus menekan emisi karbon dan meningkatkan nilai tambah limbah biomassa. Penerapan *syngas* pada mesin SI memerlukan sistem pemurnian untuk mengurangi tar, partikulat, sulfur, alkali, dan uap air yang berpotensi merusak komponen mesin. Penggunaan *syngas* umumnya menurunkan daya dan torsi sebesar 15–35% akibat rendahnya *volumetric heating value*. Meskipun demikian, efisiensi termal masih dapat dipertahankan melalui optimasi *spark timing* dan strategi pembakaran yang sesuai.

REFERENSI

[1] M. Kamali Saraji and D. Streimikiene, “Challenges to the low carbon energy transition: A systematic literature review and research agenda,” Energy Strategy Reviews, vol. 49, 2023, https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101163

[2] S. L. Narnaware, N. L. Panwar, T. Gupta, and K. K. Meena, "Bubbling fluidized bed gasification of biomass: A review on the effect of selected operational parameters," Biointerface Research in Applied Chemistry, vol. 13, no. 5, 2023, https://doi.org/10.33263/BRIAC135.474
[3] F. Leach, G. Kalghatgi, R. Stone, and P. Miles, "The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines," Transportation Engineering, vol. 1, 2020, https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005
[4] G. Gentilucci, A. Accardo, and E. Spessa, "Life cycle greenhouse gas emissions of diesel oil and zero-emission trucks: Systematic review of status and perspectives," Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, vol. 32, 2025, https://doi.org/10.1016/j.trip.2025.101563
[5] F. Payri, J. M. Luján, C. Guardiola, and B. Pla, "Un challenge pour le futur du moteur à combustion interne: Nouvelles technologies et rôle du contrôle moteur," Oil and Gas Science and Technology, vol. 70, no. 1, pp. 15–30, 2015, https://doi.org/10.2516/ogst/2014002
[6] C. Santos et al., "A multidimensional assessment of electrification in automotive powertrains: Technical, operational, and strategic perspectives," Results in Engineering, vol. 28, 2025, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107377
[7] N. Uchida et al., "E-fuels in IC engines: A key solution for a future decarbonized transport," International Journal of Engine Research, vol. 26, no. 11, pp. 1675–1702, 2025, https://doi.org/10.1177/14680874251325296
[8] D. M. O. Girona, D. S. A. M. Alcaide, and D. J. G. Soriano, Evaluation of Hydrogen as a Carbon-Free Fuel for Internal Combustion Engines. Doctoral dissertation, 2025, https://riunet.upv.es/server/api/core/bitstreams/23f5b73a-4381-4dda-97f1-bf5e5d8fe465/content
[9] G. Maitlo et al., "Thermochemical conversion of biomass for syngas production: Current status and future trends," Sustainability, vol. 14, no. 5, 2022, https://doi.org/10.3390/su14052596
[10] A. Buelvas, D. Barreto, H. Ramírez-León, and J. Fajardo, "Energy and exergy analysis of SNG production from syngas derived from agricultural residues in Bolívar, Colombia," Gases, vol. 6, no. 1, p. 14, 2026, https://doi.org/10.3390/gases6010014
[11] P. Mensah and E. Yankson, "Biomass energy as a catalyst for achieving global sustainability goals: Technological advancements and policy implications," Academia Green Energy, vol. 2, no. 1, 2025, https://doi.org/10.20935/acadenergy7556
[12] C. Magazzino, M. Mele, N. Schneider, and M. Shahbaz, "Can biomass energy curtail environmental pollution? A quantum model approach to Germany," Journal of Environmental Management, vol. 287, 2021, https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112293
[13] Rey, J. R. C., Longo, A., Rijo, B., Mateos-Pedrero, C., Brito, P., & Nobre, C. (2025). Modelling syngas combustion from biomass gasification and engine applications: A comprehensive review. Energies, 18(19), 5112. https://doi.org/10.3390/en18195112
[14] S. Kumar, R. Palange, and C. de Blasio, "Advancements in gasification technologies: Insights into modeling studies, power-to-X applications and sustainability assessments," Sustainable Energy and Fuels, vol. 9, no. 18, pp. 4793–4831, 2025, https://doi.org/10.1039/d5se00504c
[15] J. R. C. Rey et al., "A review of cleaning technologies for biomass-derived syngas," Fuel, vol. 377, 2024, https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132776
[16] A. Jayanarasimhan, R. M. Pathak, A. M. Shivapuji, and L. Rao, "Tar formation in gasification systems: A holistic review of remediation approaches and removal

methods," ACS Omega, vol. 9, no. 2, pp. 2060–2079, 2024, https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04425
[17] M. R. Pelaez-Samaniego et al., "Biomass carbonization technologies," in Sustainable Biochar for Water and Wastewater Treatment, D. Mohan, C. U. Pittman, and T. E. Mlsna, Eds. Elsevier, 2022, pp. 39–92, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822225-6.00017-8
[18] Y. Gao et al., "Syngas production from biomass gasification: Influences of feedstock properties, reactor type, and reaction parameters," ACS Omega, vol. 8, no. 35, pp. 31620–31631, 2023, https://doi.org/10.1021/acsomega.3c03050
[19] R. Gabbrielli, F. Barontini, S. Frigo, G. Flori, N. Fratianni, and P. Sica, "Biomass oxy-CO2 gasification process for bio-methane production: An experimental and numerical activity," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2385, no. 1, 2022, https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012129
[20] P. Basu, "Design of biomass gasifiers," in Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction, 3rd ed., Academic Press, 2018, pp. 263–329, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812992-0.00008-X
[21] L. Wang, T. Zhou, B. Hou, H. Yang, N. Hu, and M. Zhang, "A comprehensive review of biomass gasification characteristics in fluidized bed reactors: Progress, challenges, and future directions," Fluids, vol. 10, no. 6, 2025, https://doi.org/10.3390/fluids10060147
[22] R. Gabbrielli, F. Barontini, S. Frigo, G. Flori, N. Fratianni, and P. Sica, "Biomass oxy-CO2 gasification process for bio-methane production: An experimental and numerical activity," Journal of Physics: Conference Series, vol. 2385, no. 1, 2022, https://doi.org/10.1088/1742-6596/2385/1/012129
[23] P. Suparmin et al., "Syngas for internal combustion engines: Current state and future prospects—A systematic review," International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, vol. 21, no. 4, pp. 11857–11876, 2024, https://journal.ump.edu.my/ijame/article/view/10360
[24] V. S. Sikarwar et al., "An overview of advances in biomass gasification," Energy & Environmental Science, vol. 9, pp. 2939–2977, 2016, https://doi.org/10.1039/C6EE00935B
[25] Ö. Tezer, N. Karabağ, A. Öngen, C. Ö. Çolpan, and A. Ayol, "Biomass gasification for sustainable energy production: A review," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 47, no. 34, pp. 15419–15433, 2022, https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.02.158
[26] A. A. P. Susastriawan and H. Saptoadi, "Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 76, pp. 989–1003, 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.112
[27] I. L. Motta, N. T. Miranda, R. Maciel Filho, and M. R. Wolf Maciel, "Biomass gasification in fluidized beds: A review of biomass moisture content and operating pressure effects," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 94, pp. 998–1023, 2018, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.042
[28] P. Nikolaidis and A. Poullikkas, "A comparative overview of hydrogen production processes," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, pp. 597–611, 2017, https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044
[29] S. A. Razzak et al., "Recent advancement of catalytic and non-catalytic thermochemical biomass conversion technologies toward sustainable hydrogen production," Biomass Futures, vol. 1, Art. no. 100021, 2026, https://doi.org/10.1016/j.bmf.2026.100021
[30] K. D. Huff, "Economics of advanced reactors and fuel cycles," in Storage and Hybridization of Nuclear Energy: Techno-economic Integration of Renewable and Nuclear Energy, Elsevier, 2019, pp. 1–20, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813975-2.00001-6

[31] A. Lyons Cerón, A. Konist, H. Lees, and O. Järvik, "Effect of woody biomass gasification process conditions on the composition of the producer gas," Sustainability, vol. 13, no. 21, p. 11763, 2021, https://doi.org/10.3390/su132111763
[32] B. Li, F. Zhong, R. Wang, Y. Jiang, and R. Han, "A comparative analysis of the performances of a syngas port injection plus gasoline direct injection combined-injection spark-ignition engine under lean-homogeneous charge and lean-stratified charge modes," Energy, 2024, https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.132883
[33] Park, S. J., Son, S. H., Kook, J. W., Ra, H. W., Yoon, S. J., Mun, T.-Y., Moon, J. H., Yoon, S. M., Kim, J. H., Kim, Y. K., Lee, J. G., Lee, D.-Y., & Seo, M. W. (2021). Gasification operational characteristics of 20-tons-per-day rice husk fluidized-bed reactor. Renewable Energy, 169, 788–798. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.045
[34] D. Gudeta, D. T. Wolde, T. A. Hailu, and S. T. Gedefaw, "Integrated experimental and modeling study of coffee husk gasification for clean syngas generation," SSRN, 2024, https://doi.org/10.2139/ssrn.5937758.
[35] T. N. Gesese, A. T. Admase, E. D. Asrade, and E. Getahun, "Biomass gasification for sustainable energy production: Effect of operational parameters on product gas," in Gasification - Current Technologies and Future Prospect. IntechOpen, 2025, https://doi.org/10.5772/intechopen.1008967.
[36] M. Kumar, B. Paul, and D. Singh Yadav, "Effect of moisture content and equivalence ratio on the gasification process for different biomass fuel," International Journal of Mechanical Engineering and Technology, vol. 7, no. 6, pp. 209–220, http://iaeme.com/Home/issue/IJMET?Volume=7&Issue=6
[37] J. Brito, F. Pinto, A. Ferreira, M. A. Soria, and L. M. Madeira, "Steam reforming of biomass gasification gas for hydrogen production: From thermodynamic analysis to experimental validation," Fuel Processing Technology, vol. 250, p. 107859, 2023, https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107859
[38] S. Heidenreich and P. U. Foscolo, "New concepts in biomass gasification," Progress in Energy and Combustion Science, vol. 46, pp. 72–95, 2015, https://doi.org/10.1016/j.pecs.2014.06.002
[39] K. M. Broer, P. J. Woolcock, P. A. Johnston, and R. C. Brown, "Southern Research Institute-North Carolina, 5201 International Drive, Durham, NC 27712."
[40] A. Molino, S. Chianese, and D. Musmarra, "Biomass gasification technology: The state of the art overview," Journal of Energy Chemistry, vol. 25, no. 1, pp. 10–25, 2016, https://doi.org/10.1016/j.jechem.2015.11.005.
[41] H. A. Umar et al., "An outlook on tar abatement, carbon capture and its utilization for a clean gasification process," Evergreen, vol. 8, no. 4, pp. 717–731, 2021, https://doi.org/10.5109/4742115.
[42] X. Sun, D. Zhang, R. Bie, and M. Zhang, "Advances in tar steam reforming catalysts: A review focusing on natural minerals and Ni-based catalysts," Catalysts, vol. 16, no. 5, p. 411, 2026, https://doi.org/10.3390/catal16050411.
[43] Peck, D., Zappi, M., Gang, D., Guillory, J., Hernandez, R., & Buchireddy, P. (2023). Review of porous ceramics for hot gas cleanup of biomass syngas using catalytic ceramic filters to produce green hydrogen/fuels/chemicals. Energies, 16(5), 2334. https://doi.org/10.3390/en16052334
[44] S. Martinez-Boggio, P. T. Lacava, F. S. de Carvalho, and P. Curto-Risso, "Combustion diagnosis in a spark-ignition engine fueled with syngas at different CO/H2 and diluent ratios," Gases, vol. 4, no. 2, pp. 97–116, 2024, https://doi.org/10.3390/gases4020006.
[45] C. Caligiuri et al., "Complementing syngas with natural gas in spark ignition engines for power production: Effects on emissions and combustion," Energies, vol. 14, no. 12, 2021, https://doi.org/10.3390/en14123688.

[46] E. V. Jithin et al., "A review on fundamental combustion characteristics of syngas mixtures and feasibility in combustion devices," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 146, 2021, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111178.
[47] F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz, and S. A. Sulaiman, "Effect of injection timing on combustion, performance and emissions of lean-burn syngas (H2/CO) in spark-ignition direct-injection engine," International Journal of Engine Research, vol. 17, no. 9, pp. 921–933, 2016, https://doi.org/10.1177/1468087415623910.
[48] Bates, R., & Dölle, K. (2017). Syngas use in internal combustion engines: A practical approach. International Journal for Innovative Research in Multidisciplinary Field, 3(7), 157–165.
[49] H. Park et al., "Comparative assessment of stoichiometric and lean combustion modes in boosted spark-ignition engine fueled with syngas," Energy Conversion and Management, vol. 239, 2021, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114224.
[50] F. Y. Hagos, A. R. A. Aziz, and S. A. Sulaiman, "Syngas (H2/CO) in a spark-ignition direct-injection engine. Part 1: Combustion, performance and emissions comparison with CNG," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 39, no. 31, pp. 17884–17895, 2014, https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.14.