

**PRODUKSI SYNGAS KAYA HIDROGEN YANG OPTIMAL
PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN MEMVARIASIKAN
RASIO UAP AIR TERHADAP *MUNICIPAL SOLID WASTE*
(MSW)**



TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Satu Syarat untuk Menyelesaikan Strata-1 (S1)

pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disusun Oleh:

ELANG DAFFA SETIADJI

3331190061

JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA

CILEGON - BANTEN

2023

**PRODUKSI SYNGAS KAYA HIDROGEN YANG OPTIMAL
PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN MEMVARIASIKAN
RASIO UAP AIR TERHADAP *MUNICIPAL SOLID WASTE*
(MSW)**



TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai Satu Syarat untuk Menyelesaikan Strata-1 (S1)

pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik

Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Disusun Oleh:

ELANG DAFFA SETIADJI

3331190061

JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA

CILEGON - BANTEN

2023

No : 027/UN.43.3.1/PK.03.08/2023

TUGAS AKHIR


PRODUKSI SYNGAS KAYA HIDROGEN YANG OPTIMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN MEMVARIASIKAN RASIO UAP AIR TERHADAP MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW)


Dipersiapkan dan disusun oleh:

Elang Daffa Setiadji
3331190061

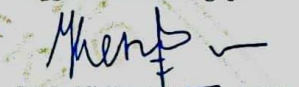
telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 26 Juli 2023

Pembimbing Utama

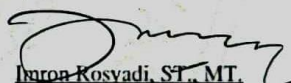

Imron Rosvadi, ST., MT.
NIP. 197605042006041001

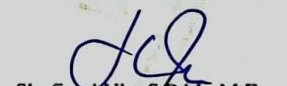

Shofiati Ula, S.Pd.I., M.Eng.
NIP. 198403132019032009

Anggota Dewan Penguji 10/08/2023


Dr. Ir. Ni Ketut Caturwati, MT.
NIP. 196706022001122001

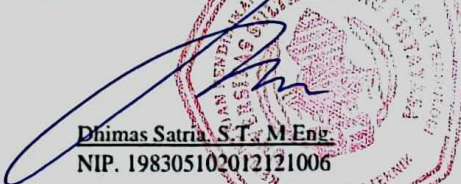

Dr. Dwinanto, ST., MT.
NIP. 198301122008121001


Imron Rosvadi, ST., MT.
NIP. 197605042006041001


Shofiati Ula, S.Pd.I., M.Eng.
NIP. 198403132019032009

Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal, 09 Agustus 2023
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA


Dhimas Satria, S.T., M.Eng.
NIP. 198305102012121006



PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertandatangan di bawah ini,

Nama : Elang Daffa Setiadji

NPM : 3331190061

Judul : Produksi Syngas Kaya Hidrogen yang Optimal pada Proses Gasifikasi dengan Memvariasikan Rasio Uap Air terhadap *Municipal Solid Waste* (MSW)

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikat dengan karya orang lain, kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.



Elang Daffa Setiadji

NPM. 3331190061

KATA PENGANTAR

Pertama-tama saya panjatkan puji dan syukur kehadapan Tuhan Yang Maha Esa karena berkat Rahmatnya penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “PRODUKSI SYNGAS KAYA HIDROGEN YANG OPTIMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN MEMVARIASIKAN RASIO UAP AIR TERHADAP *MUNICIPAL SOLID WASTE* (MSW)” untuk menyelesaikan tugas akhir sebagai syarat kelulusan pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Dalam Penulisan proposal ini tentu tidak dapat selesai tanpa bimbingan maupun dukungan dari berbagai pihak. Maka dari itu penulis ingin berterimakasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, Ibu Ida Safitri dan Ayah Muhamad Munfarid yang tiada hentinya memberikan bantuan, bimbingan, dorongan serta doa restu yang melimpah.
2. Bapak Dhimas Satria, S. T., M. T. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
3. Bapak Imron Rosyadi, ST., MT. selaku dosen pembimbing I tugas akhir yang telah membimbing penulisan serta memberikan dukungan sehingga penyusunan tugas akhir ini dapat berjalan dengan baik.
4. Ibu Shofiatul Ula, S.Pd.I., M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang juga turut serta membimbing penulisan tugas akhir dan senantiasa memberikan arahan selama penyusunan tugas akhir berlangsung.
5. Bapak Yusvardi Yusuf, ST., MT. selaku dosen pembimbing akademik yang terus memberikan pengarahan akan kegiatan perkuliahan dari semester awal hingga selesai ini.
6. Seluruh dosen dan staff di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, UNTIRTA yang telah memberikan ilmunya. Semoga ilmunya dapat menjadi amal jariyah yang bermanfaat.
7. Orang tua, ayah, ibu, dan keluarga yang selalu memberikan doa dan *supportnya* sampai penulisan ini selesai.

8. Teman spesial yang juga terus mendukung dan menyemangati, Khoirun Nisa Fadhilah.
9. Teman-teman yang terus menemani dan menyemangati sampai selesai tugas ini.

Saran serta kritik yang membangun untuk penulis diharapkan dapat diberikan untuk mencapai hasil tugas yang lebih baik. Semoga laporan tugas akhir ini bermanfaat bagi siapapun kedepannya.

Cilegon, Juli 2023

Penulis

ABSTRAK

PRODUKSI SYNGAS KAYA HIDROGEN YANG OPTIMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN MEMVARIASIKAN UAP AIR TERHADAP *MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW)*

ELANG DAFFA SETIADJI

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Gasifikasi adalah proses konversi energi yang mengubah bahan padatan biomassa menjadi syngas melalui proses termokimia menggunakan temperatur tinggi dan udara yang stoikiometri. Pada penelitian ini digunakan sampah kota (MSW) yang diambil di daerah Kota Serang – Cilegon sebagai bahan baku proses gasifikasi. Penelitian ini berfokus pada eksperimen akan potensi produksi hidrogen pada gasifikasi yang menggunakan *steam* (uap air) sebagai *gasifying agent*. Akan dilakukan variasi rasio *steam rate* terhadap *MSW feeding rate* (S/MSW) yang diperkirakan mampu meningkatkan produksi hidrogen dan meningkatkan kualitas dari syngas yang diperoleh. Pengaruh dari rasio S/MSW pada suhu 750°C ini didapatkan pada komposisi senyawa CO akan berkurang seiring pertambahan rasio S/MSW. Untuk senyawa CO₂ volumenya terus bertambah seiring pertambahan rasio S/MSW. Sedangkan CH₄ pada awalnya mengalami penurunan volume sampai rasio 1,3, kemudian naik kembali sampai rasio 2,09. Adapun untuk senyawa H₂ didapatkan terdapat penambahan volume sampai rasio 1,3, namun turun secara perlahan pada rasio 1,6 dan 2,09. Karena demikian, komposisi syngas terbaik dimiliki oleh rasio S/MSW 1,3 karena produksi hidrogennya yang tinggi, metana yang rendah, karbon monoksida yang cukup, dan karbon dioksida yang tidak begitu tinggi. Adapun jumlah *steam* tidak mempengaruhi nilai kalor bawah (LHV) dari syngas yang dihasilkan.

Kata Kunci: *Gasifikasi, Hidrogen, MSW, Uap Air*

ABSTRACT

THE OPTIMAL HYDROGEN-RICH SYNGAS PRODUCTION IN GASIFICATION PROCESS BY VARYING STEAM TO MUNICIPAL SOLID WASTE (MSW)

ELANG DAFFA SETIADJI

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Gasification is an energy conversion process that converts solid biomass into syngas through a thermochemical process using high temperatures and stoichiometric air. In this study used municipal solid waste (msw) collected around Serang – Cilegon City as raw material for the gasification process. This research focuses on experiments on the potential for hydrogen production in gasification using steam as a gasifying agent. Variation of the steam rate to MSW feeding rate (S/MSW) ratio will be carried out which is expected to increase hydrogen production and improve the quality of the syngas obtained. The effect of the S/MSW ratio at 750°C is found in the composition of the CO compound which will decrease as the S/MSW ratio increases. For CO₂ compounds, the volume continues to increase as the S/MSW ratio increases. While CH₄ initially decreased in volume to a ratio of 1.3, then rose again to a ratio of 2,09. As for the H₂ compound, it was found that there was an increase in volume up to a ratio of 1.3, but decreased slowly at a ratio of 1,6 and 2,09. Therefore, the best syngas composition is owned by the S/MSW ratio of 1,3 due to high hydrogen production, low methane, sufficient carbon monoxide, and not so high carbon dioxide. The amount of steam does not affect the lower heating value (LHV) of the syngas produced.

Keywords: *Gasification, Hydrogen, MSW, Steam*

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>State of Art</i>	5
2.2 Biomassa	7
2.3 <i>Municipal Solid Waste (MSW)</i>	8
2.4 Gasifikasi	10
2.4.1 Definisi Gasifikasi	10
2.4.2 Klasifikasi Reaktor Gasifikasi	11
2.4.3 Proses Gasifikasi	13
2.4.4 Variabel yang Mempengaruhi Gasifikasi	15
2.5 <i>Synthetic Gas</i>	16
2.6 Optimasi Hidrogen pada <i>Syngas</i>	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	

3.1	Diagram Alir Penelitian	20
3.2	Prosedur Penelitian	21
3.3	Skema Alat Penelitian	24
3.4	Alat dan Bahan	25
3.4.1	Alat yang Digunakan.....	25
3.4.2	Bahan yang Digunakan	30
3.5	Waktu dan Tempat Pelaksanaan	31
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Hasil Analisa <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> MSW	31
4.2	Hasil Pengujian Syngas Gasifikasi MSW	33
4.2.1	Data Produksi Hidrogen (H ₂)	35
4.2.2	Data Produksi Karbon Monoksida (CO).....	36
4.2.3	Data Produksi Karbon Dioksida (CO ₂).....	36
4.2.4	Data Produksi Metana (CH ₄)	36
4.3	Hasil Produksi Zat Lain Gasifikasi MSW.....	38
4.3.1	Data Produksi Arang (char)	38
4.3.2	Data Produksi Tar	38
4.4	Analisa Data	39
4.4.1	Analisa Data Syngas	39
4.4.2	Analisa Data Zat Produk Lain.....	42
4.5	Analisa <i>Lower Heating Value</i> Syngas	43
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		
5.1	Kesimpulan	46
5.2	Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA		xi
LAMPIRAN		

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Biomassa	7
Gambar 2.2 Komposisi MSW di Kota Serang	9
Gambar 2.3 Reaktor <i>Updraft</i>	12
Gambar 2.4 Reaktor <i>Downdraft</i>	12
Gambar 2.5 Reaktor <i>Crossdraft</i>	13
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	21
Gambar 3.2 <i>Timeline</i> Proses Gasifikasi	23
Gambar 3.3 Skema Alat Penelitian	25
Gambar 3.4 <i>Thermocouple</i> K.....	25
Gambar 3.5 <i>Steam Generator</i>	26
Gambar 3.6 <i>Gasifier</i> Proses Gasifikasi	26
Gambar 3.7 Kondensor	27
Gambar 3.8 Panel Kontrol dan Skema.....	27
Gambar 3.9 Tang Amphere.....	28
Gambar 3.10 Timbangan Digital	28
Gambar 3.11 Oven	29
Gambar 3.12 <i>Sampling Bag</i>	29
Gambar 3.13 GC-7890.....	30
Gambar 3.14 Limbah MSW.....	31
Gambar 4.1 Grafik Komposisi Syngas terhadap Rasio S/MSW.....	37
Gambar 4.2 Data Produksi Arang (char).....	40
Gambar 4.3 Grafik Data Produksi Tar	42
Gambar 4.4 Data <i>LHVGas</i>	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>State of Art</i>	5
Tabel 2.2 Komposisi Sampah TPAS Cilowong, Serang.....	9
Tabel 2.3 Komposisi <i>Syngas</i>	17
Tabel 3.1 Komposisi Sampah yang akan Digunakan.....	22
Tabel 4.1 <i>Proximate</i> dan <i>Ultimate</i> MSW.....	32
Tabel 4.2 Variasi Rasio S/MSW	36
Tabel 4.3 Data Komposisi <i>Syngas</i> terhadap Rasio S/MSW	36
Tabel 4.4 Data Produksi Massa Char	40
Tabel 4.5 Data Produksi Massa Tar	41
Tabel 4.6 Data <i>LHVGas</i>	44

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan teknologi di zaman yang modern ini membuat perkembangan teknologi semakin maju. Perkembangan teknologi ini berimbas terhadap perkembangan pembaharuan energi. Indonesia masih bergantung pada energi yang tidak terbarukan seperti gas bumi. Bila gas bumi tersebut digunakan secara terus-menerus maka gas bumi akan habis. Kelangkaan gas bumi dapat mengakibatkan melonjaknya harga minyak mentah dari waktu ke waktu. Indonesia yang merupakan salah satu negara yang seringkali mengimpor minyak menjadi makin terbebani. Sehingga perlu dikurangi ketergantungan terhadap bahan bakar gas bumi tersebut, salah satunya dengan cara mengembangkan bahan bakar alternatif ramah lingkungan seperti gasifikasi. Gasifikasi merupakan salah satu metode di antara metode alternatif lain yang digunakan untuk memperoleh bahan bakar. Gasifikasi merupakan proses termokimia yang mengubah biomassa padat menjadi *syngas* dengan memberikan sejumlah energi panas dan pemampatan udara.

Gas hidrogen sudah sangat umum diketahui sebagai alternatif akan energi terbarukan yang dapat menyelesaikan masalah keterbatasan energi yang ramah lingkungan. Pemanfaatan dari hidrogen ini dapat berfungsi sebagai sumber, penyimpanan, maupun pembawa energi. Cara memperoleh hidrogen yang saat ini sebagian besar diketahui berasal dari bahan bakar fosil (seperti gas alam). Hidrogen dapat dilepaskan dari molekul hidrokarbonnya melalui reformasi bahan bakar fosil yang mana prosesnya dinamakan *Steam Reforming*. Secara sederhana, proses dari *steam reforming* ini yaitu methane (CH_4) yang ada pada gas alam diekstrak dan direaksikan dengan uap agar menghasilkan hidrogen.

Metode lain yang dapat dilakukan untuk memperoleh gas hidrogen adalah melalui proses gasifikasi yang memanfaatkan biomassa sebagai sumbernya.

Pada proses gasifikasi, terdapat beberapa penelitian yang dilakukan untuk meningkatkan gas hidrogen, salah satunya seperti dengan memvariasikan suhu yang diberikan pada biomassa, yaitu semakin besar temperature proses gasifikasi, semakin besar volume gas dan unsur hidrogen yang terkandung (Sabitha et al., 2020). Variasi *Equivalence Ratio* (ER) juga dapat mempengaruhi kadar gas hidrogen dalam proses gasifikasi, yang mana juga bergantung pada temperature tertentu.

Biomassa sangat baik digunakan sebagai alternatif bahan bakar karena sifatnya yang dapat diperbaharui secara terus menerus, mudah didapatkan, dan ramah lingkungan. Salah satu di antaranya adalah sampah perkotaan atau *Municipal Solid Waste* (MSW) yang merupakan limbah yang umumnya terdiri atas sisa makanan, kertas, kayu, plastik, besi, kaca, tekstil, maupun karet. Komposisi MSW sendiri tergantung atas hasil produksi suatu daerah atau wilayah tertentu. Jumlah limbah kota (MSW) akan terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan industri suatu negara, sehingga diperlukan pengelolaan akan MSW guna mengurangi terjadinya efek rumah kaca dan konsekuensi lainnya yang akan berdampak pada perubahan iklim.

Terdapat banyak peneliti yang memberi pernyataan bahwa gasifikasi biomassa merupakan metode yang paling menjanjikan dalam pembuangan limbah (Ramos et al., 2018). Gasifikasi menjadi metode yang paling tepat dalam mengurangi MSW, khususnya beberapa bahan MSW yang dapat didaur ulang namun tidak mudah dibakar untuk menghasilkan gas dengan nilai kalor lebih tinggi yang mana sesuai untuk proses gasifikasi biomassa (Couto et al., 2015). *Syngas* yang dihasilkan pada proses gasifikasi antara lain seperti CO, H₂, dan CH₄ yang nantinya dapat dijadikan sebagai produk bahan bakar (Reed & Das, 1988).

Terdapat metode lainnya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan produksi hidrogen adalah dengan mengembangkan media gasifikasi seperti memberikan variasi rasio agen uap yang diberikan. Seperti penelitian yang telah dilakukan oleh Tavares et al (2019) bahwa ketika uap digunakan sebagai *gasifying agent*, peningkatan uap yang dibandingkan dengan MSW pada proses gasifikasi akan menghasilkan *syngas* dengan hidrogen (H₂) yang lebih

banyak pula. Untuk itu pada penelitian kali ini akan dilakukan variasi rasio uap dengan MSW yang akan menggunakan suhu terbaik berdasarkan penelitian yang sudah ada sebelumnya (Tavares et al., 2019). Dengan adanya penelitian ini, diharapkan akan mendapatkan variasi rasio uap terbaik yang dapat dijadikan landasan dalam peningkatan produksi hydrogen pada proses gasifikasi.

1.2 Rumusan Masalah

Adapula berdasarkan latar belakang penelitian yang diangkat di atas, didapatkan rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana cara mendapatkan nilai rasio uap air terhadap *Municipal Solid Waste* (MSW) atau *S/MSW ratio* pada alat pengujian gasifikasi yang digunakan?
2. Bagaimana karakteristik dari *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi biomassa *Municipal Solid Waste* (MSW) berdasarkan komposisi *syngas* yang dihasilkan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Untuk menentukan cara mendapatkan nilai rasio uap air terhadap *Municipal Solid Waste* (MSW) atau *S/MSW ratio* pada alat pengujian gasifikasi yang digunakan.
2. Untuk mengetahui karakteristik dari *syngas* yang dihasilkan dari proses gasifikasi biomassa *Municipal Solid Waste* (MSW) berdasarkan komposisi *syngas* yang dihasilkan.

1.4 Manfaat Penelitian

Selanjutnya, dalam penelitian ini tentu terdapat manfaat yang diharapkan dapat membantu penelitian kedepannya. Berikut merupakan manfaat dari penelitian ini.

1. Didapatkan *syngas* yang berasal dari proses gasifikasi yang dapat dianalisa karakteristiknya untuk bahan bakar alternatif.
2. Dapat dilakukan penelitian lanjutan serta dikembangkan lagi akan peningkatan produksi hidrogen dengan berbagai metode.
3. Membantu mengurangi penggunaan gas bumi agar beralih pada pemanfaatan *municipal solid waste* (MSW) sebagai sumber energi terbarukan.

1.5 Batasan Masalah

Selanjutnya adalah batasan masalah dari penelitian ini yang dibuat agar dapat mengarahkan penelitian sesuai dengan tujuannya. Berikut merupakan batasan masalah dari penelitian ini.

1. Biomassa yang digunakan dalam proses gasifikasi adalah *Municipal Solid Waste* (MSW) atau sample sampah kota yang diambil di sekitar daerah Cilegon – Serang. Persentase akan jenis komposisi sampah yang digunakan diambil berdasarkan UPTD Pengelolaan Sampah Kota Serang Tahun 2022.
2. Dilakukan variasi rasio uap air dengan biomassa, yaitu MSW (*steam to MSW*), guna didapatkan rasio terbaik untuk proses gasifikasi biomassa.
3. Akan dianalisa komposisi dari gas yang dihasilkan berdasarkan kandungan gas yang ada khususnya hidrogen pada gas tersebut.
4. Produk sampingan selain gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi seperti tar dan arang tidak dianalisa komposisinya, namun hanya dianalisa berdasarkan massa dari produk tersebut.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of Art*

Penelitian akan tugas akhir ini menggunakan beberapa jurnal sebagai referensi dari penulisan. Berikut ini merupakan beberapa judul yang digunakan sebagai acuan penelitian tersebut.

Tabel 2.1 *State of Art*

No.	Judul/Peneliti/ Tahun	Objek Penelitian	Hasil/temuan yang dijadikan tinjauan
1.	<i>Municipal solid waste composition in final disposal area of Serang City Banten Province</i> (Dwirani & Ariesmayana, 2020)	Sampah (MSW) Kota Serang yang diambil dari TPA Cilowong, Taktakan, Kota Serang.	Ditemukan bahwa persentase sampah terbanyak di daerah Kota Serang merupakan bersumber pada limbah organik dari makanan, yang kemudian disusul oleh plastik sebagai limbah terbanyak kedua.
2.	<i>Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents.</i> (Shayan et al., 2018)	Gasifikasi biomassa dengan variasi media gasifikasi (<i>gasifying agents</i>).	Digunakan 3 <i>gasifying agents</i> untuk menganalisa produksi hidrogen pada <i>syngas</i> . Ditemukan bahwa <i>syngas</i> akan memproduksi lebih banyak hidrogen apabila menggunakan uap air (<i>steam</i>) sebagai medianya dengan suhu optimal 1000 K.

3.	<i>A theoretical study on municipal solid waste plasma gasification</i> (Tavares et al., 2019)	Proses gasifikasi pada sampah kota (MSW)	Rasio dari <i>steam</i> dan MSW dapat mempengaruhi produksi <i>syngas</i> pada hidrogen. Semakin besar rasionya, semakin banyak hidrogen yang diproduksi <i>syngas</i> .
4.	<i>Syn-gas production from catalytic steam gasification of municipal solid wastes in a combined fixed bed reactor</i> (Li et al., 2010)	Proses gasifikasi pada sampah kota (MSW) daerah Wuhan, China.	Gasifikasi yang mencapai suhu 750 – 900 °C, didapatkan rasio <i>steam to msw</i> (uap air dan MSW) didapatkan dari 0 – 1,33 terus meningkat produksi hidrogennya. Namun, menurun setelah rasio menyentuh 1,33 ke atas.
5.	<i>Air-Steam Gasification of Biomass in a Fluidized Bed under Simulated Autothermal and Adiabatic Conditions</i>	Proses gasifikasi menggunakan <i>steam</i> pada biomassa.	Pada suhu 730 – 815 °C, didapatkan rasio <i>steam to msw</i> terbaik pada rasio tertinggi dari pengujian yaitu sebesar 0,5. Hal ini karena hanya diuji mencapai rasio tersebut, tidak lebih.

Berdasarkan referensi dari jurnal-jurnal nasional maupun internasional tersebut, akan dilakukan penelitian akan optimasi produksi hidrogen dalam *syngas* pada proses gasifikasi biomassa dengan bahan utamanya yaitu sampah kota atau *Municipal Solid Waste* (MSW) yang diperoleh di sekitar daerah Kota Serang – Cilegon. Gasifikasi sampah kota ini dilakukan dengan menggunakan uap air (*steam*) sebagai media gasifikasi (*gasifying agent*) yang akan divariasikan rasio antara uap air dan sampah kota (*steam to MSW ratio*).

Akan dicari rasio manakah yang terbaik dalam memproduksi hidrogen pada *syngas* yang memanfaatkan MSW daerah Kota Serang – Cilegon.

2.2 Biomassa



Gambar 2.1 Biomassa

(Sumber: Rosillo-Calle & Woods, 2012)

Sudah diangkat sebelumnya, biomassa merupakan bahan baku yang bersumber dari makhluk hidup, seperti hewan, mikroba, dan tanaman. Biomassa dapat dijadikan sebagai sumber dalam memenuhi kebutuhan manusia sebab biomassa adalah bahan yang dapat diperbaharui terus menerus, mudah didapatkan, dan ramah lingkungan. Selain dijadikan bahan pangan, minyak nabati, pakan ternak, dan sebagainya, biomassa dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif yang potensial. Pemanfaatan energi biomassa sudah banyak yang bersumber dari limbah biomassa itu sendiri, seperti sisa biomassa yang terpakai, bonggol jagung, cangkang kelapa sawit, dan lain sebagainya. Karena bersumber dari limbahnya sendiri, biomassa ini tentu nilai ekonomisnya sangat rendah dan lebih unggul dari gas bumi yang biasa digunakan.

Secara umum biomassa menurut Calle dkk (2007) diklasifikasikan menjadi biomassa kayu dan biomassa non-kayu, termasuk tanaman herba. Namun, biomassa juga dapat dibagi menjadi 8 klasifikasi (Johnson & Rosillo-calle, 2007). Berikut ini merupakan kedelapan klasifikasi dari biomassa tersebut.

1. Hutan Alam, termasuk biomassa pada dataran tinggi. Hutan memiliki beragam sisa hutan yang dapat dimanfaatkan sebagai biomassa.

2. Tanaman Kebun, pada tahun 1970-an dan 1990-an perkebunan digemborkan sebagai energy biomassa di masa depan. Namun dalam beberapa tahun terakhir potensinya mulai dianggap terbatas.
3. Perkebunan Agroindustri, dirancang khusus untuk menghasilkan bahan baku agro industri. Contohnya seperti the, kopi, pohon karet, kelapa sawit, perkebunan bambu, rerumputan, dan lain sebagainya.
4. Tanaman selain di hutan, terdiri dari pohon yang tumbuh di luar hutan, termasuk pohon-pohon di perkotaan, pinggir jalan, pertanian, dan sebagainya. Tanaman selain di hutan memiliki peran utama sebagai sumber yang tidak boleh diremehkan kepentingannya.
5. Tanaman Pertanian, ini adalah tanaman yang ditanam khusus untuk makanan, pakan ternak, serat, atau dimanfaatkan sebagai produksi energi.
6. Residu Tanaman, termasuk tanaman dan sisa tanamannya. Contohnya seperti jerami, dedaunan kering, batang, dan sebagainya.
7. Residu yang Diproses, dihasilkan dari konversi agroindustry atau pengolahan tanaman, seperti serbuk gergaji (yang dimanfaatkan dalam penelitian ini, ampas tebu, kulit kacang, sekam, dan sebagainya).
8. Kotoran hewan, seperti limbah dari peternakan. Sudah umum digunakan sebagai bahan bakar (seperti pada proses biogas) yang mana tentu perlu diperhatikan jumlah atau perbandingannya dengan benar. Kotoran dapat dimanfaatkan sebagai pupuk pula.

2.3 *Municipal Solid Waste (MSW)*

Municipal Solid Waste (MSW) atau sering disebut juga sebagai limbah padat kota sesuai namanya didefinisikan sebagai limbah-limbah yang berasal dari perindustrian maupun rumah tangga yang umumnya terdiri atas sisa makanan, kertas, kayu, plastic, besi, kaca, tekstil, maupun karet. Permasalahan sampah kota (MSW) di Indonesia sudah menjadi masalah yang besar khususnya di perkotaan besar. MSW dari setiap wilayah berbeda tergantung atas hasil produksi dari daerah atau wilayah tersebut. Pertambahan penduduk dan aktivitas yang kian meningkat juga mempengaruhi jumlah MSW yang dihasilkan pada suatu daerah. Diperkirakan dari seluruh sampah

yang dihasilkan paling banyak hanya sekitar 60-70% sampah yang dapat diangkut ke tempat pembuangan akhir oleh instansi yang bertanggungjawab menangani sampah dan kebersihan (Damanhuri et al., 2014).

Apabila diambil contoh dari salah satu kota di Indonesia, yaitu Kota Serang, pertumbuhan sampah kota meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, dengan Jumlah Timbulan Sampah (JTS) Kota Serang pada tahun 2014 tercatat sebesar 78.409.628 kg sampah dengan jumlah sampah per kapitanya sebesar 0,35 kg per jiwa dalam 1 hari (Febriyanto et al., 2017). Komposisi dari MSW yang ada pada Tempat Pembuangan Akhir (TPA) di kota Serang, Banten dapat tergambarkan pada grafik di bawah ini (Dwirani & Ariesmayana, 2020).



Gambar 2.2 Komposisi MSW di Kota Serang

(Sumber: Dwiriyani & Ariesmayana, 2020)

Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa pada TPA Kota Serang, Banten memiliki 8 dari 10 tipe komposisi sampah kota yang ada dengan sampah bahan organik terbanyak dan disusul oleh plastik setelahnya. Komposisi lainnya yaitu kertas, styrofoam, karet, tekstil, kayu, kaca, dan lainnya. Adapun berdasarkan Laporan UPTD Pengelolaan Sampah Kota Serang yang ditulis oleh Dinas Lingkungan Hidup Kota Serang, Pemerintah Kota Serang tahun 2022, komposisi sampah yang ada pada TPAS Cilowong, Taktakan, Kota Serang datanya sebagai berikut.

Tabel 2.2 Komposisi Sampah TPAS Cilowong, Serang

No.	Jenis Sampah	Persentase (%)
1.	Sisa Makanan	50,00
2.	Kertas, Karton, dan Nappies	8,00

3.	Kayu dan Sampah Taman	4,00
4.	Kain dan Produk Tekstil	0,75
5.	Karet dan Kulit	0,50
6.	Plastik	35,00
7.	Logam	0,50
8.	Gelas	0,25
9.	Lain-lain	1,00
Jumlah		100,00

(Sumber: Dinas Lingkungan Hidup Kota Serang, 2022)

Sehingga berdasarkan seluruh paparan tersebut, sampah kota (MSW) di Indonesia, khususnya kota Serang dan sekitarnya, sangat berpotensi untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan karena sampah kota (MSW) ini merupakan biomassa yang memiliki berbagai kandungan organik maupun non organik yang dapat diolah menjadi sumber energi. Diperlukan perhatian khusus akan manajemen pengolahan sampah kota menjadi energi terbarukan guna mengurangi jumlah sampah yang tidak terdaur ulang.

2.4 Gasifikasi

2.4.1 Definisi Gasifikasi

Gasifikasi merupakan salah satu metode yang dapat dilakukan untuk memperoleh energi terbarukan yang memanfaatkan biomassa sebagai sumber energinya. Gasifikasi ini adalah bentuk peningkatan energy yang terkandung dalam biomassa melalui suatu konversi dari bahan padatan menjadi gas (syn-gas) dengan menggunakan proses termokimia (degradasi termal) bahan-bahan organik menggunakan temperature tinggi dan udara yang dimampatkan (Nurulhuda, 2022).

Dalam gasifikasi terdapat konversi bahan bakar menjadi gas yang dapat terbakar, dengan proses termokimia menggunakan oksigen yang kurang dari stoikiometri, bukan tidak ada sama sekali. Apabila proses yang dilakukan menghilangkan oksigen sepenuhnya, maka proses tersebut sudah termasuk dalam proses pirolisis yang sama-sama terjadi

proses dekomposisi bahan bakar. Namun dalam gasifikasi, masih membutuhkan setidaknya oksigen dalam jumlah tertentu (Sansaniwal et al., 2017). Gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi pada dasarnya seperti karbon monoksida (CO), gas hidrogen (H₂), metana (CH₄), dan gas yang tidak dapat dibakar (seperti CO₂, dan N₂). Proses gasifikasi ini terjadi dalam sebuah ruangan atau alat yang mampu memampatkan udara atau seringkali disebut sebagai *gasifier* atau reaktor (ruangbakar).

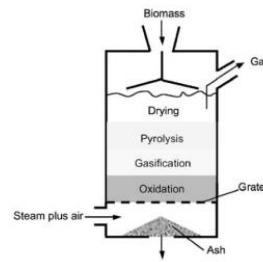
2.4.2 Klasifikasi Reaktor Gasifikasi

Telah dibahas sebelumnya bahwa proses gasifikasi terjadi dalam sebuah ruangan yang dapat mengatur jumlah udara yang ada pada ruangan atau seringkali disebut sebagai reaktor. Reaktor dari proses gasifikasi ini juga beragam tipe atau jenisnya tergantung penggunaan yang diinginkan. Reaktor gasifikasi (*gasifiers*) dikelompokkan umumnya dikelompokkan menjadi 2, yaitu *fixed bed gasifiers* dan *fluidized bed gasifiers*, yang mana masing-masing memiliki tipe reaktornya lagi. Berikut ini merupakan penjelasan dari klasifikasi reaktor gasifikasi tersebut.

a. *Fixed Bed Gasifier*

Kelompok *fixed bed gasifier* telah menjadi jenis reaktor gasifikasi tertua yang sudah banyak dikembangkan dalam skala kecil. Seringkali disebut juga sebagai *moving bed reactor* karena biomassa yang digunakan dalam reaktor dapat digerakkan naik-turun. Terbagi menjadi 3 tipe reaktor, yaitu *updraft gasifier*, *downdraft gasifier*, dan *cross gasifier*. Berikut merupakan penjelasannya (Basu, 2010).

1. Reaktor *updraft*



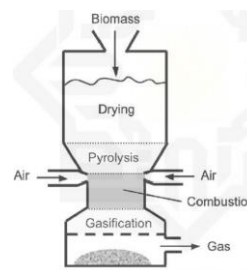
Gambar 2.3 Reaktor *Updraft*

(Sumber: Basu, 2010)

Reaktor tipe ini sudah banyak digunakan dalam skala laboratorium maupun industri besar. Pada reaktor ini aliran udara dari *blower* masuk melalui bagian bawah reaktor melalui *grate*, sedangkan aliran bahan bakar masuk dari bagian atas reaktor sehingga arah aliran udara dan bahan bakar memiliki prinsip yang berlawanan. Gas yang dihasilkan keluar melalui bagian atas dari reaktor sedangkan abu pembakaran (*tar*) jatuh ke bagian bawah *gasifier* karena pengaruh gaya gravitasi.

Keunggulan dari reaktor jenis ini mekanismenya yang sangat sederhana dibandingkan dengan tipe lainnya juga tingkat toleransi reaktor yang mampu mengolah bahan bakar kualitas rendah dengan temperatur gas yang relative rendah. Kelemahannya adalah kadar tar dalam *syn-gas* yang masih cukup tinggi yang mempengaruhi gas hasil produksinya.

2. Reaktor *downdraft*



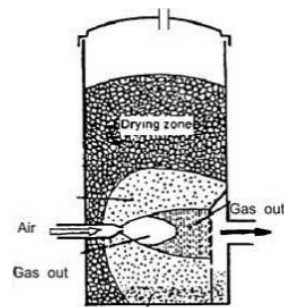
Gambar 2.4 Reaktor *Downdraft*

(Sumber: Basu, 2010)

Reaktor tipe *downdraft* menghasilkan kadar tar dalam *syn-gas* yang lebih rendah dibandingkan dengan reaktor *updraft*.

Penyebabnya adalah tar hasil pirolisis terbawa bersama gas dan kemudian masuk ke daerah gasifikasi dan pembakaran yang memiliki temperature tinggi. Dalam daerah gasifikasi dan pembakaran ini tar kemudian akan terurai. Gas hasil pembakaran dilewatkan pada bagian oksidasi dari pembakaran dengan cara ditarik mengalir ke bawah sehingga gas yang dihasilkan akan lebih bersih karena tar dan minyak akan terbakar sewaktu melewati bagian tadi.

3. Reaktor *crossdraft*



Gambar 2.5 Reaktor *Crossdraft*

(Sumber: Basu, 2010)

Pada reaktor ini beban mengikuti kemampuan reaktor *crossdraft* sedikit baik karena zona parsial terkonsentrasi yang beroperasi pada suhu sampai 2000°C. Waktu mulainya 5-10 menit lebih cepat dibandingkan jenis *gasifier* jenis *updraft* ataupun *downdraft*.

b. *Fluidized Bed Gasifiers*

Reaktor *fluidized bed* merupakan reaktor gasifikasi yang berpotensi untuk dikembangkan. Reaktor jenis ini adalah sebuah tungku pembakaran yang menggunakan material *bed* yang bertujuan agar terjadi pencampuran yang homogeny antara zat yang terlibat dalam reaktor. Jenis *fluidized bed gasifiers* unggul dalam 4 aspek, yaitu sebaga berikut.

1. Kemampuan untuk mengontrol temperature
2. Kemampuan beroperasi secara *continue*
3. Unggul dalam persoalan perpindahan panas, dan

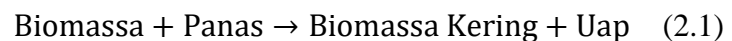
4. Unggul dalam proses katalis

2.4.3 Proses Gasifikasi

Setiap reaktor memiliki mekanisme proses gasifikasi yang berbeda. Namun yang pasti, biomassa akan mengalami atau melalui 4 proses gasifikasi. Empat proses tersebut adalah Pengeringan (*drying*), Pirolisis (*pyrolysis*), Pembakaran atau Oksidasi (*oxidation*), dan Reduksi (*reduction*). Berikut merupakan penjelasan akan proses-proses tersebut.

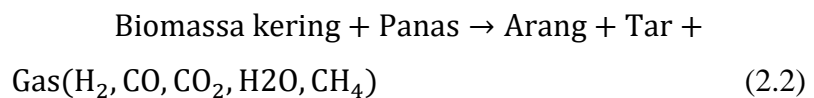
a. Pengeringan (*drying*)

Drying merupakan proses penguapan kandungan air didalam biomassa melalui pemberian panas pada interval suhu 100 -300°C. Berikut merupakan prosesnya.



b. Pirolisis

Setelah pengeringan dilakukan, bahan bakar akan turun dan menerima panas sebesar 250°C - 500°C dalam kondisi tanpa udara. Produk dari hasil pirolisis terbagi menjadi produk cair (tar), produk gas (H₂, CO, CO₂, H₂O, CH₄), tar dan arang. Reaksi kimianya adalah sebagai berikut.



c. Pembakaran (*oxidation*)

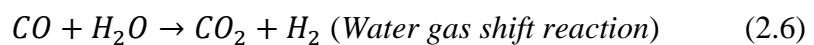
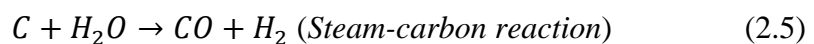
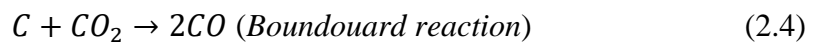
Tahap oksidasi merupakan bagian proses untuk mensuplai panas yang dibutuhkan dalam proses pengeringan, pirolisis dan reduksi. Proses oksidasi (pembakaran) ini dapat mencapai temperatur 1200°C. Temperatur yang dihasilkan akan mencapai maksimal dikarenakan distribusi oksigen yang merata pada zona oksidasi. Reaksi kimia yang terjadi pada zona pembakaran adalah sebagai berikut.



Reaksi pembakaran lain yang berlangsung adalah oksidasi hidrogen yang terkandung dalam bahan bakar membentuk kukus. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut.

d. Reduksi (*reduction*)

Pada zona reduksi panas yang berlangsung mencapai suhu 600°C - 900°C. Pada zona ini terjadi beberapa reaksi kimia yang merupakan proses penting terbentuknya beberapa senyawa yang berguna untuk menghasilkan produk gas seperti H₂, CO₂, dan CH₄. Adapun terjadi beberapa reaksi pada proses reduksi, yaitu sebagai berikut.



2.4.4 Variabel yang Mempengaruhi Gasifikasi

Dalam proses gasifikasi, terdapat faktor-faktor yang mempengaruhinya. Berikut ini merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi proses gasifikasi tersebut.

a. Karakteristik Biomassa

Tentunya tidak semua biomassa dapat dikonversi menjadi syn-gas. Terdapat karakteristik yang perlu dipertimbangkan sebelum dikonversi menjadi gas. Parameter karakteristik yang dapat dipertimbangkan. Berikut merupakan parameter tersebut.

1. Kadar air

Tiap biomassa memiliki kandungan air yang berbeda. Kandungan air biomassa sering dianalisa dalam *proximate analysis* yang kerap kali disebut juga sebagai *moisture content*. Semakin sedikit kandungan air dari biomassa yang dipakai, semakin baik digunakan sebagai biomassa pada proses gasifikasi.

2. Tar

Tar adalah kontaminan organik yang terbentuk selama proses gasifikasi berlangsung. Tar merupakan campuran yang kompleks dari hidrokarbon yang dapat berkondensasi. Jumlah dan komposisi dari tar dihasilkan sangat bergantung dari jenis bahan bakar (Hutabarat, 2012). Jika syn-gas banyak mengandung tar, dapat merusak ruang bakar karena sifatnya yang korosif.

3. Kandungan energi

Pada biomassa tentu terdapat energi yang berbeda satu sama lainnya. Energi dalam biomassa akan mempengaruhi energi produk *flammable syngas*. Semakin tinggi kandungan energi yang dimiliki biomassa akan semakin tinggi pula energi produk gas yang dihasilkan.

b. Waktu

Menurut Suhendi dkk (2016), semakin lama waktu gasifikasi, maka semakin banyak hasil gas yang dihasilkan, tetapi jumlah arang semakin berkurang. Sehingga perlu dipertimbangkan banyaknya hasil gas dan juga seberapa banyak arang yang ingin dihasilkan (Suhendi et al., 2017).

c. Kecepatan Aliran Udara

Kecepatan aliran udara yang masuk ke dalam reaktor dapat mempengaruhi laju pembakaran saat proses gasifikasi berlangsung. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hariyanto (2012), semakin besar nilai kecepatan aliran udaranya waktu yang ditempuh dalam proses gasifikasi makin cepat. Namun, makin besar aliran udaranya, semakin sedikit syn-gas yang dihasilkan (Hariyanto et al., 2012).

d. *Gasifying Agent* (Media)

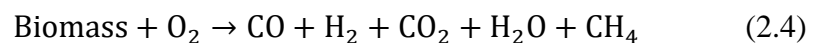
Jenis media gasifikasi atau disebut juga *gasifying agent* berpengaruh dalam proses gasifikasi. Biasanya *gasifying agent*

yang digunakan seperti oksigen (O_2), uap air (H_2O), dan udara. Pada proses gasifikasi menggunakan udara sebagai *gasifying agent*, syn-gas mengandung gas yang mudah terbakar (*flammable gas*) dan yang tidak mudah terbakar (*non-flammable gas*). Gas yang mudah terbakar ini seperti karbonmonoksida (CO), gas metana CH_4 , dan hydrogen (H_2). Kemudian untuk gas yang tidak mudah terbakar seperti gas nitrogen (N_2) dan karbondioksida (CO_2) (Basu, 2010).

2.5 Synthetic Gas (Syngas)

Synthetic Gas (Syngas) atau Gas Sintetis didefinisikan sebagai suatu gas yang memiliki komposisi utama bahan bakarnya yaitu gas hidrogen (H_2) dan karbon monoksida (CO). Komposisi lainnya yang dapat terkandung dalam *syngas* bergantung pada sumbernya, ukuran partikel, laju aliran gas, konfigurasi reaktor kimia, kondisi saat proses pembentukan, katalis, dan lain sebagainya (El-Nagar & Ghanem, 2019). Kandungan-kandungan seperti karbon dioksida (CO_2) dan komponen lain seperti air (H_2O) dapat terkandung dalam *syngas*.

Syngas dapat diproduksi dari proses gasifikasi biomassa atau proses *steam reforming* yang berasal dari gas alam. Pada proses gasifikasi biomassa terjadi beberapa proses reaksi kimia di dalam reaktor gasifikasi (*gasifier*) yang dapat disimpulkan menjadi persamaan reaksi berikut ini.



Adapula persentase volume dari masing-masing kandungan *syngas* tersebut berdasarkan jenis *gasifier* yang digunakan adalah sebagai berikut ini (Visconti et al., 2017).

Tabel 2.3 Komposisi *Syngas*

Komposisi	<i>Gasifier Tipe Updraft</i> (% volume)	<i>Gasifier Tipe Downdraft</i> (% volume)
Karbon Monoxide	24	21
Hidrogen	11	17
Metana	3	2

Hidrokarbon	0,2	0.3
Nitrogen	53	48
Uap Air	3	4

(Sumber: Visconti et al., 2017)

Syngas memiliki batas mudah bakarnya (*flammability limits*) yang mana menandakan kemampuan lama api membakar gas. Bahan bakar, arah penyebaran, ukuran, dan bentuk ruang bakar, suhu, serta tekanan sangat berpengaruh dalam batas mudah bakar pula (Jiang et al., 2017). Sudah jelas bahwa H₂ dan CO merupakan komponen utama dari *syngas* yang akan memberikan batas mudah bakar yang lebih baik (tahan lama) sehingga *syngas* yang baik adalah *syngas* yang mampu memproduksi H₂ dan CO yang melimpah. Sedangkan kehadiran komposisi lain seperti nitrogen dan karbon dioksida dalam campuran *syngas* justru akan mengurangi batas mudah bakarnya. Untuk itu nitrogen dan karbon dioksida sebaiknya diproduksi seminim mungkin (El-Nagar & Ghanem, 2019).

2.6 Optimasi Hidrogen pada *Syngas*

Seperti yang sudah dibahas pada subbab 2.3, terdapat beberapa variabel yang mempengaruhi hasil dari gasifikasi. Ada yang berpengaruh akan kecepatan proses gasifikasinya, ada yang berpengaruh terhadap jumlah *syngas* yang dihasilkan, ada pula yang berpengaruh terhadap kandungan *syngas* yang dihasilkan. *Syngas* yang baik merupakan *syngas* yang mampu memproduksi H₂ dan CO yang melimpah.

Karbon monoksida (CO) merupakan gas yang dihasilkan oleh pembakaran tidak sempurna. Dapat ditemukan dimanapun seperti asap industri, tembakau, knalpot kendaraan bermotor, maupun rumah tangga. Karbon monoksida merupakan salah satu polutan yang sangat melimpah dan berdampak buruk bagi kesehatan tubuh manusia (Goldsmith & Landaw, 1968). Dikarenakan karbon monoksida merupakan unsur yang juga ada pada komposisi *syngas*, maka perlu dikurangi dan harus diutamakan unsur gas lain yang menyusun gas tersebut, yaitu gas hidrogen (H₂). Untuk itu hidrogen pada *syngas* perlu dioptimasi dengan baik.

Terdapat berbagai metode yang mampu dilakukan untuk memperoleh *syngas* yang kaya akan hidrogen. Salah satu yang paling umum ditemukan adalah dengan menambahkan katalis pada pembakaran gasifikasi biomassa. Contohnya dengan menambahkan katalis alkali akan menambah rasio gas hidrogen pada *syngas* (Li et al., 2021). Adapula yang mempengaruhi komposisi *syngas* salah satunya yaitu adalah temperatur. Temperatur yang optimum digunakan pada proses gasifikasi biomassa yaitu berkisar pada suhu 1000 K atau 700 – 900°C untuk produksi hidrogen pada *syngas* (Shayan et al., 2018). Pengaruh lain yang dapat meningkatkan kandungan hidrogen dalam *syngas* adalah media gasifikasi (*gasifying agent*) yang digunakan. *Gasifying agent* yang umum digunakan adalah udara, uap air, dan oksigen. Dari ketiga media tersebut yang paling banyak memproduksi hidrogen pada *syngas* adalah uap air, kemudian disusul oleh oksigen dan udara (Shayan et al., 2018).

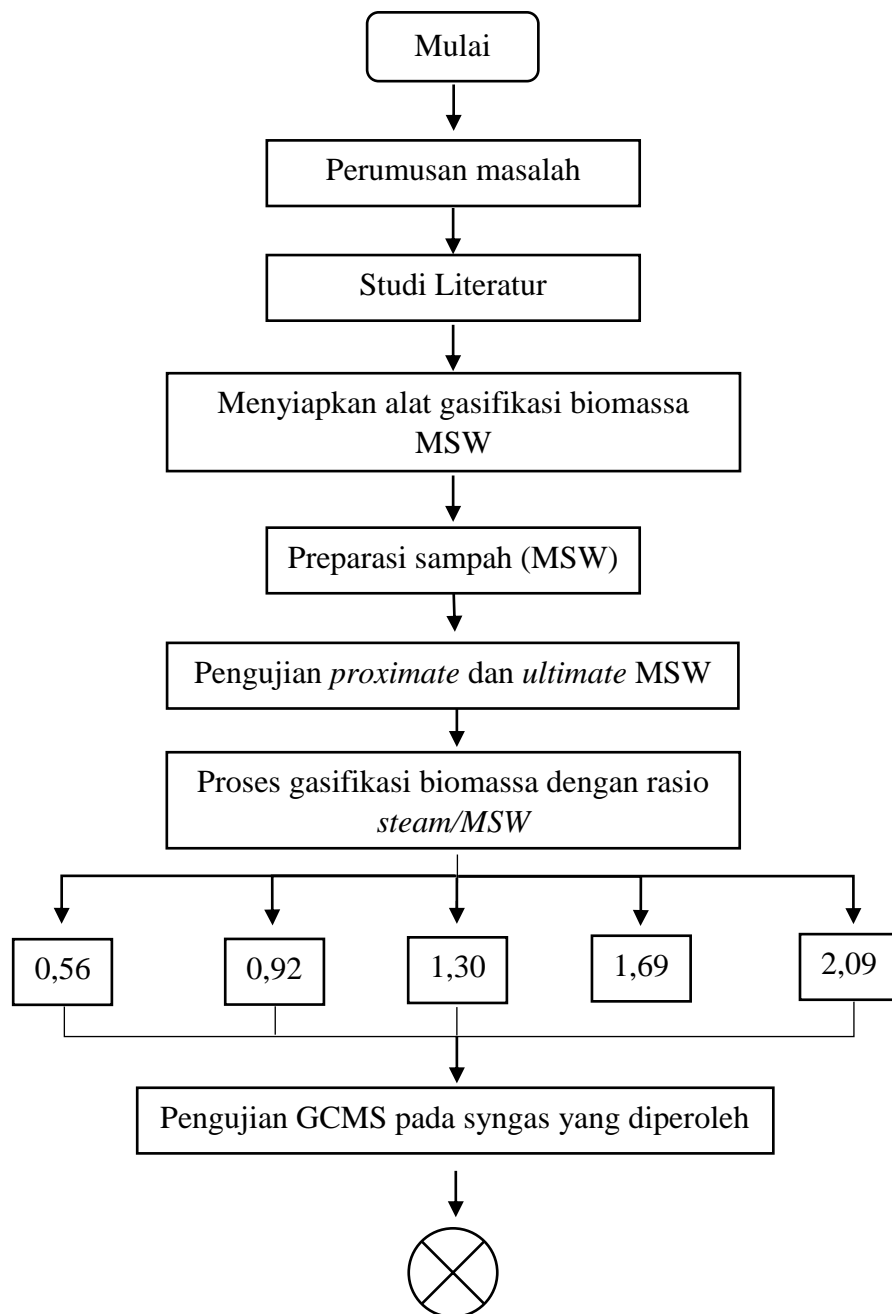
Berdasarkan *gasifying agent* tersebut, merasiokan media gasifikasi dengan biomassa yang digunakan juga dapat mempengaruhi produksi hidrogen dalam *syngas* dengan temperatur tertentu. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Li et al., (2010), digunakan uap air (*steam*) sebagai media gasifikasi yang dibandingkan dengan jumlah MSW (*steam/MSW*) yang digunakannya. Divariasikan rasio *steam/MSW* olehnya 0 – 2.67. Didapatkan rasio *steam/MSW* yang optimal digunakan adalah 1.33. Ketika rasio dari 0 – 1.33, produksi meningkat sejalan dengan bertambahnya rasio *steam/MSW*. Saat rasio *steam/MSW* 1.33 – 2.67 produksi hidrogen menurun. Hal tersebut dikarenakan jumlah uap yang berlebihan dapat menurunkan suhu reaksi sehingga menurunkan kualitas gas (Li et al., 2010). Untuk itu diperlukan analisa rasio uap air dan MSW yang terbaik agar dapat memproduksi hidrogen lebih.

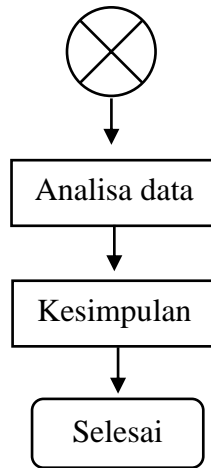
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat diagram alir yang menggambarkan jalannya penelitian berlangsung. Berikut ini merupakan diagram alir dari penelitian tersebut.





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

(Sumber: Dokumen Pribadi)

3.2 Prosedur Penelitian

Adapun berdasarkan diagram alir penelitian di atas penjelasannya adalah sebagai berikut ini.

1. Studi Literatur

Dilakukan studi literatur guna menjadi referensi dalam penelitian yang akan dilaksanakan. Dalam metode studi literatur ini diambil beberapa media seperti jurnal, buku, maupun laporan akan penelitian sebelumnya.

2. Menyiapkan alat gasifikasi biomassa

Digunakan alat gasifikasi biomassa dengan tipe *Updraft* karena diyakini bahwa *gasifier* tipe *updraft* ini lebih sederhana mekanismenya dibandingkan *downdraft*. Dengan keunggulan lainnya mampu memproses biomassa kualitas rendah dengan lebih baik.

3. Preparasi sampah (MSW)

Sebelum dilakukan pengujian, sampah kota yang telah diperoleh dari daerah Kota Serang – Cilegon dipilah berdasarkan UPTD Pengelolaan Sampah Kota Serang Tahun 2022. Terdapat beberapa pengelompokan jenis sampah yang digunakan yaitu, sisa makanan (tulang, nasi, dan sayur)

sebanyak 50%, kertas dan karton 8%, kayu dan sampah taman 4%, kain 0,75%, karet 0,50%, plastik 35%, logam 0,5%, gelas 0,25%, lain-lain 1,00% (Dinas Lingkungan Hidup Kota Serang, 2022). Masing-masing sample dicampur menjadi satu sehingga total massa sampah 50 gram. Sampah tidak dipres atau dipadatkan guna mempertahankan volume dan proses gasifikasi akan mendekomposisi (mengurai) sampai yang berbentuk *granule* (butiran) dengan ukuran ± 5 mm. Akan digunakan 50 gram total sampah, yang mana apabila dijabarkan berat dari masing-masing komposisi sampah menjadi sebagai berikut.

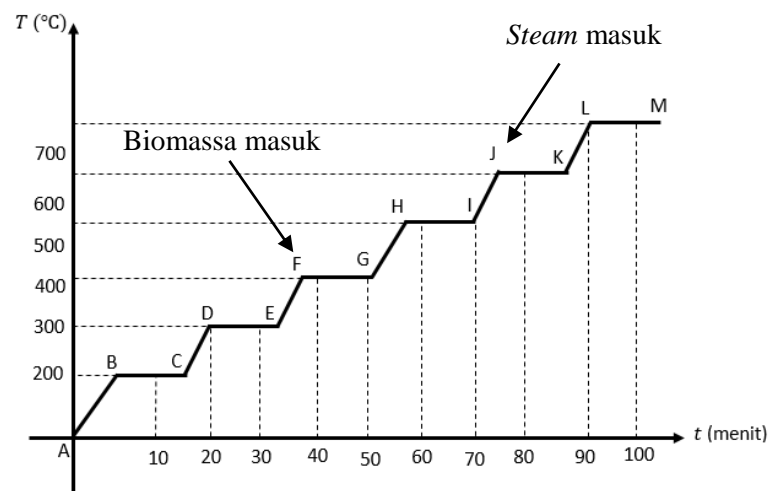
Tabel 3.1 Komposisi Sampah yang akan Digunakan

No.	Jenis Sampah	(%)	Komposisi	Massa Sampah (gr)
1.	Sisa Makanan	50,875	Tulang	5,087
			Sayur	10,175
			Nasi	10,175
2.	Plastik	35,613	Botol plastik	17,805
3.	Kertas dan Karton	8,14	Kertas dan kardus	4,07
4.	Kayu dan Sampah Taman	4,07	Serbuk kayu	2,035
5.	Kain	0,763	Kain perca	0,381
6.	Karet	0,509	Karet ban	0,254
Total Massa Sampah				50 gr

4. Analisa Uji *Proximate* dan *Ultimate* MSW

Dilakukan uji *proximate* dan *ultimate* terhadap MSW yang digunakan guna mengetahui kandungan unsur atau senyawa utama pada MSW. Dengan pengujian ini, akan didapatkan nilai kadar air (*moisture*), abu, karbon, hidrogen, nitrogen, sulfur, dan oksigen dari sample yaitu MSW.

5. Proses Gasifikasi Biomassa dengan Variasi Rasio *Steam*/MSW



Gambar 3.2 *Timeline* Proses Gasifikasi

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Grafik di atas merupakan *timeline* proses gasifikasi saat melaksanakan pengambilan syngas. Pada titik A-B suhu dinaikkan sampai 200 $^{\circ}\text{C}$ yang berlangsung selama 3 menit. Kemudian pada titik B-C didiamkan selama 15 menit. Lalu dari titik C-D suhu dinaikkan sampai 300 $^{\circ}\text{C}$ selama 2 menit. Selanjutnya dari titik D-E ditunggu sampai 15 menit. Kemudian suhu dinaikkan pada titik E-F menjadi 400 $^{\circ}\text{C}$ selama 2 menit. Pada suhu 400 $^{\circ}\text{C}$, MSW dimasukkan ke dalam alat dan ditunggu selama 15 menit pada titik F-G. Kemudian dari titik G-H dinaikkan suhunya menjadi 550 $^{\circ}\text{C}$ selama 3 menit. Lalu didiamkan lagi selama 15 menit pada titik H-I. Pada titik I-J selanjutnya suhu dinaikkan menjadi 650 $^{\circ}\text{C}$ selama 2 menit. Kemudian ditunggu menjadi 15 menit pada titik J-K. Pada K-L, suhu dinaikkan menjadi 750 $^{\circ}\text{C}$ dan didiamkan pada titik L-M sampai 15 menit. Suhu 750 $^{\circ}\text{C}$ digunakan sebagai suhu acuan utama dalam pengambilan syngas, karena pada suhu ini alat gasifikasi mendapatkan komposisi syngas paling optimal (Renata, 2023).

Dengan variasi rasio *steam* terhadap MSW (S/MSW) pada rentang 0,56 – 2,09. Nilai uap air (*steam*) didapat berdasarkan lama air habis menguap dengan satuan gram/jam. Begitupula nilai MSW didapat dari lama MSW habis setelah dipanaskan pada suhu tertentu dengan satuan gram/jam pula. Akan divariasikan lama air menguapnya dengan mengatur

kuat arus yang dialirkan. Kemudian nilai uap air yang divariasikan akan dibandingkan dengan nilai MSW. Sehingga akan didapatkan variasi rasio uap dan MSW.

6. Pengujian GCMS pada syngas yang diperoleh

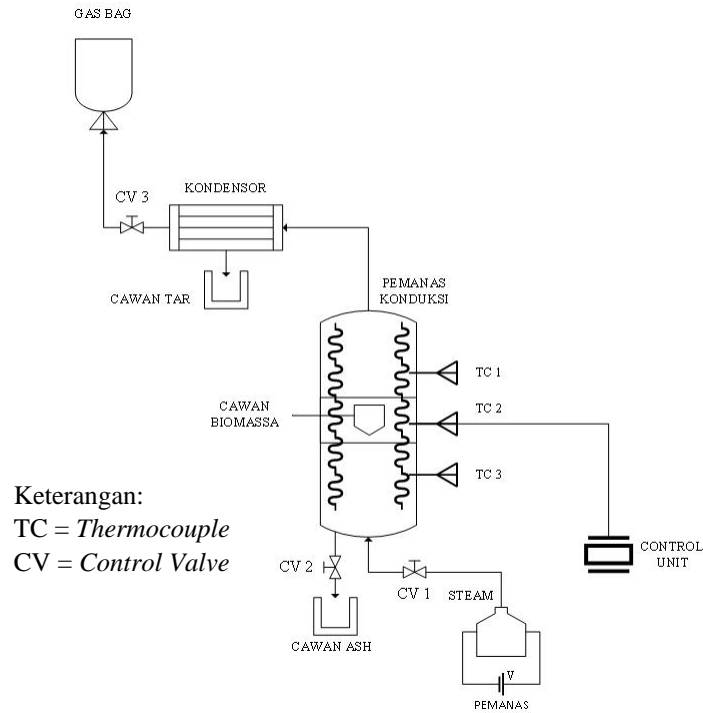
Syngas diuji guna mengetahui senyawa yang terkandung dalam *syngas* melalui proses *GCMS (Gas Chromatography and Mass Spectroscopy)* yang dilakukan di Laboratorium Balai Besar Penelitian Minyak dan Gas Bumi LEMIGAS. Standar pengujian GCMS yang digunakan adalah GPA 2261:2020. Dengan alat yang digunakan adalah GC 7890 produksi dari perusahaan *Agilent Technologies* dengan gas pembawa (*carrier*) yakni Helium menggunakan detektor TCD (*Thermal Conductivity Detector*). Setelah proses GCMS dilakukan, akan didapatkan komposisi senyawa-senyawa yang terkandung dalam syngas seperti karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metana (CH₄), dan karbon dioksida (CO₂).

7. Analisa Data

Akan dianalisa variasi rasio mana yang mampu menghasilkan komposisi syngas khususnya dari segi kandungan hidrogennya. Dianalisa pula volume atau massa tar yang dihasilkan pada masing-masing variasi rasio S/MSW.

3.3 Skema Alat Penelitian

Sudah dijabarkan sebelumnya, tipe reaktor yang digunakan adalah tipe *updraft*. Berikut merupakan skema dari alat yang digunakan untuk memproses biomassa, yaitu MSW, menjadi *syngas*.



Gambar 3.3 Skema Alat Penelitian

(Sumber: Dokumen Pribadi)

3.4 Alat dan Bahan

3.4.1 Alat yang Digunakan

Dalam penelitian ini terdapat alat yang menunjang keberlangsungan penelitian. Berikut merupakan alat yang digunakannya.

1. Thermocouple K

Berfungsi untuk mengukur suhu pada reaktor. Termokopel K ini mampu mengukur suhu mencapai 1260°C . Digunakan termokopel tipe K ini sebanyak 3 buah.

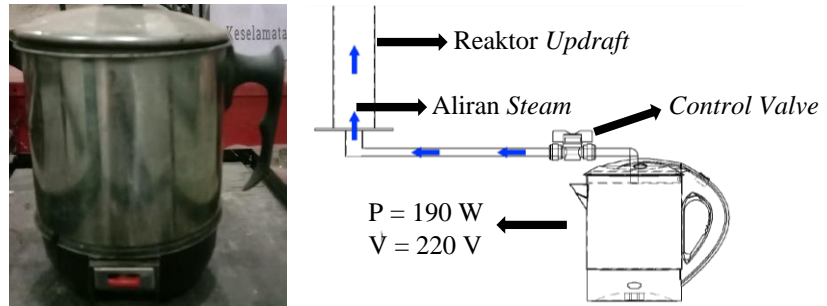


Gambar 3.4 Thermocouple K

(Sumber: Dokumen Pribadi)

2. *Steam Generator*

Digunakan *steam generator* berupa pemanas air elektrik yang nantinya akan mengalirkan uap air menuju reaktor. Arus listrik *steam generator* dapat diatur menggunakan potensiometer untuk mendapatkan variasi rasio *steam/MSW*. Uap air yang dihasilkan masuk melalui bagian bawah reaktor yang nantinya akan bercampur dengan syngas pada *gasifier*.

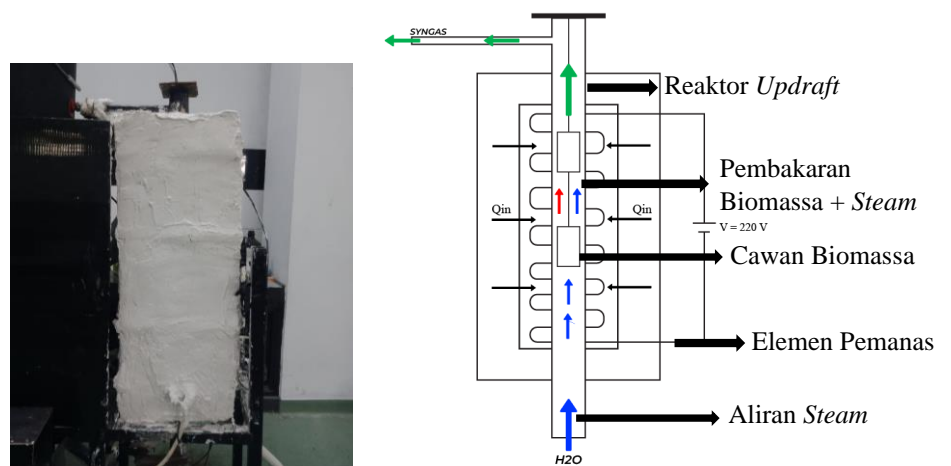


Gambar 3.5 *Steam Generator*

(Sumber: Dokumen Pribadi)

3. *Gasifier* (Pemanas Induksi) Proses Gasifikasi

Pada gambar di bawah kiri merupakan foto dari *gasifier* tipe *updraft* yang digunakan. Skema dari *gasifier* tergambar pada gambar bawah kanan. Pada *gasifier* uap air masuk dari bawah kemudian bercampur dengan syngas yang terbentuk dari proses gasifikasi MSW yang kemudian keluar pada bagian atas *gasifier* dan masuk melalui pipa menuju kondensator.

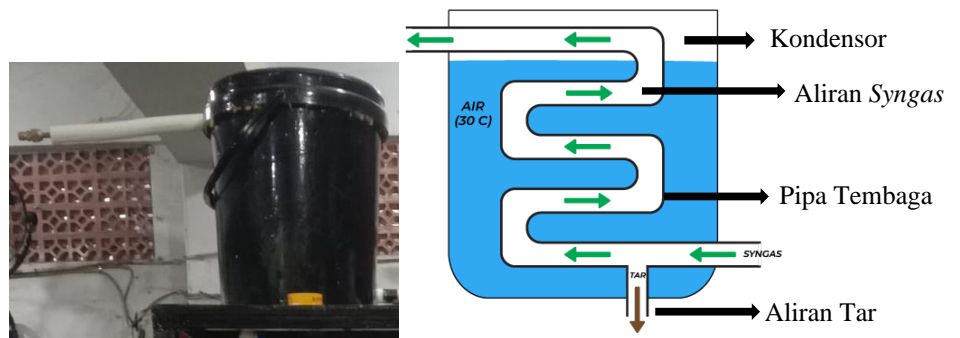


Gambar 3.6 *Gasifier* Proses Gasifikasi

(Sumber: Dokumen Pribadi)

4. Kondensor

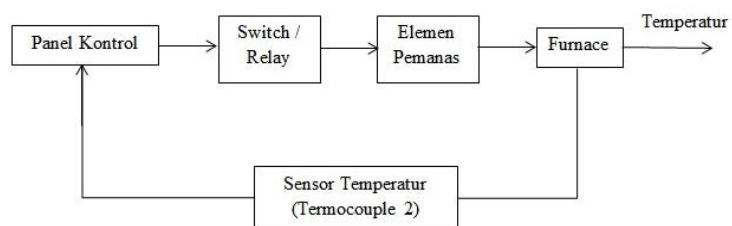
Kondensor berfungsi untuk menurunkan suhu dari gas yang dihasilkan oleh reaktor. Pada gambar kondensor di bawah ini, ember digunakan sebagai air yang digunakan untuk menyetabilkan suhu dari campuran syngas dan uap air yang keluar dari *gasifier*. Di dalamnya terdapat lilitan pipa untuk mengalirkan syngas yang kemudian keluar pada bagian atas kondensor kemudian gas akan ditampung pada *sample bag*. Adapun tar yang terbentuk berupa cairan karena proses kondensasi menghasilkan zat pengotor yang turun melalui bagian bawah kondensor.



Gambar 3.7 Kondensor

(Sumber: Dokumen Pribadi)

5. Panel Kontrol



Gambar 3.8 Panel Kontrol dan Skema

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Gambar di atas merupakan skema dari sistem kontrol yang digunakan pada *control panel* alat gasifikasi. Dengan panel kontrol yang dihubungkan melalui *switch* untuk menyalakan atau mematikan elemen pemanas yang terhubung dengan *furnace*, kemudian pada *furnace* terdapat termokopel 2 yang berada pada tengah *furnace* akan mendeteksi temperatur menggunakan sensornya yang akan memberikan informasi suhu kepada panel kontrol kembali.

6. Tang Amphere

Tang amphere digunakan untuk mengukur kuat arus, voltase, resistansi dan sebagainya yang dikeluarkan oleh reaktor. Pada pengujian alat, tang amphere ini dikhususkan untuk mengukur arus yang masuk pada *steam generator*.



Gambar 3.9 Tang Amphere

(Sumber: Dokumen Pribadi)

7. Timbangan Digital

Digunakan untuk mengukur massa dari MSW yang digunakan atau massa air.



Gambar 3.10 Timbangan Digital

(Sumber: Dokumen Pribadi)

8. Oven

Oven dipakai guna mengeringkan MSW yang digunakan sebagai biomassa pada proses gasifikasi.



Gambar 3.11 Oven

(Sumber: Dokumen Pribadi)

9. *Sampling Bag*

Sampling bag digunakan sebagai wadah untuk menyimpan syngas hasil pengujian yang kemudian akan dianalisa *GCMS* di laboratorium.



Gambar 3.12 *Sampling Bag*

(Sumber: Dokumen Pribadi)

10. *Gas Chromatography* (GC 7890)

Alat kromatografi gas yang diproduksi oleh *Agilent Technologies* ini digunakan untuk menganalisa komposisi gas H_2 , CH_4 , CO_2 , dan CO . Dengan menggunakan detektor TCD (*Thermal Conductivity Detector*) menggunakan gas pembawa *carrier* Helium detektor yang mampu merespon semua senyawa, tidak termasuk gas pembawanya.



Gambar 3.13 GC-7890

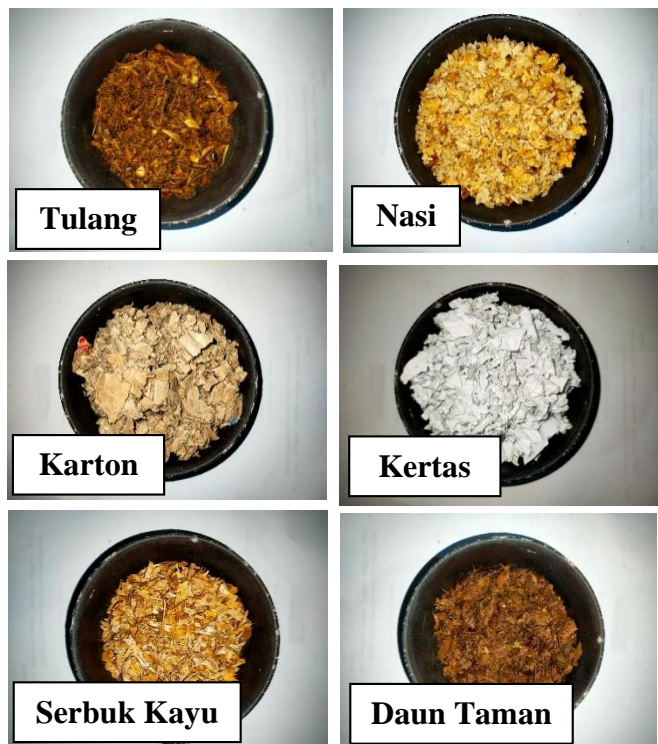
(Sumber: Dokumen Pribadi)

3.4.2 Bahan yang Digunakan

Adapun bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian pada kali ini adalah sebagai berikut.

1. Air
2. Limbah MSW

Limbah *Municipal Solid Waste* (MSW) yang diambil di sekitar Kota Serang – Cilegon ini sebelum dipakai harus dikeringkan terlebih dahulu guna mengurangi kadar air pada sampah. Adapun berikut merupakan komposisi dari sampahnya.





Gambar 3.14 Limbah MSW

(Sumber: Dokumen Pribadi)

3.5 Waktu dan Tempat Pelaksanaan

Pelaksanaan penelitian uji gasifikasi berlangsung selama 3 bulan yang terhitung setelah seminar proposal dilaksanakan. Pengambilan syngas berlokasi di Laboratorium Prestasi Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa. Adapun pengujian komposisi syngas dilakukan di Laboratorium Balai Besar Pengujian Minyak dan Gas Bumi LEMIGAS, Kebayoran Lama, Kota Jakarta Selatan, DKI Jakarta.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisa *Proximate* dan *Ultimate* MSW

Municipal Solid Waste (MSW) mulai banyak dimanfaatkan sebagai biomassa yang dapat dijadikan sebagai energi alternatif melalui proses gasifikasi karena jumlahnya yang melimpah. Pada penelitian gasifikasi ini, setelah dilakukan preparasi terhadap MSW, dilakukan pengujian terhadap 50 gr MSW yang digunakan. Berikut merupakan tabel akan hasil analisa *proximate* dan *ultimate* dari MSW sebagai biomassa pada proses gasifikasi yang telah dilakukan.

Tabel 4.1 *Proximate* dan *Ultimate* MSW

Parameter	Nilai Uji	Satuan
	<i>Municipal Solid Waste (MSW)</i>	
Analisa Proksimat		
Kadar Air	6,27	% m
<i>Volatile Matter</i>	77,33	% m
Kadar Abu	3,98	% m
<i>Fixed Carbon</i>	12,42	% m
Analisa Ultimat		
Karbon (C)	49,07	% m
Hidrogen (H)	6,05	% m
Oksigen (O)	39,79	% m
Nitrogen (N)	0,95	% m
Sulfur (S)	0,17	% m
Nilai Kalor GCV	4597	% m

(Rosyadi, 2023)

Kadar air MSW atau *moisture content* pada pengujian proksimat adalah salah satu sifat fisis dari MSW atau sampah kota. Kandungan air yang ada pada sampah ditunjukkan dalam *moisture content* ini. Nilai kadar air sampah dapat mempengaruhi nilai kalor dan karakteristik pembakaran (*ignition*) MSW. Kadar air dari MSW juga bergantung dari komposisi MSW yang digunakan karena setiap komponen MSW akan memiliki kemampuan mengikat air yang berbeda-beda. Semakin besar kadar air MSW akan semakin besar energi yang dibutuhkan untuk menguapkan air tersebut. Sehingga MSW yang baik yang memiliki kadar air rendah (Ariesmayana, A., Dwirani, 2018). Berdasarkan MSW yang digunakan, didapatkan kadar air MSW sebesar 6,27%. Sehingga berdasarkan kadar air MSW yang diambil di daerah Kota Serang – Cilegon baik dijadikan sebagai bahan baku gasifikasi.

Selanjutnya *Volatile matter* atau Zat Terbang merupakan zat aktif yang terdapat pada MSW dapat mempengaruhi proses pemanasan pada gasifikasi karena dapat menghasilkan panas akibat penguapan apabila MSW mengalami pembakaran. *Volatile Matter* yang tinggi pada MSW dapat mempercepat proses pemanasan karena *volatile matter* yang mudah menguap ini akan memanaskan bahan baku pada zona oksidasi atau zona pembakaran (Winter et al., 1997). Zat terbang yang terkandung seperti gas hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), dan metana (CH_4). Didapatkan *volatile matter* dari MSW berdasarkan pengujian proksimat sebesar 77,33%. Dibandingkan dengan biomassa yang lain seperti tempurung kelapa, bonggol jagung, sekam padi, maupun biomassa organik lainnya, nilai *volatile matter* dari MSW sudah terbilang lebih besar dari kebanyakan biomassa.

Adapun untuk kadar abu atau *ash content* yaitu produk sampingan yang dihasilkan dalam proses gasifikasi dapat menghambat proses pemanasan yang terjadi dan bereaksi dengan oksigen. Jumlah kadar abu berdasarkan MSW yang digunakan sebesar 3,98%. Nilai kadar abu yang kecil ini menandakan bahwa MSW baik digunakan sebagai bahan baku gasifikasi.

Adapun *Fixed Carbon* mempengaruhi kualitas MSW yang didefinisikan sebagai banyaknya karbon yang terkandung dalam material sisa setelah *volatile matter* dihilangkan. Semakin besar nilai *fixed carbon* pada MSW,

semakin baik kualitas MSW yang dihasilkan (Ruchjana et al., 2019). *Fixed carbon* yang diperoleh dari pengujian proksimat sebesar 12,42%. *Fixed carbon* pada MSW mungkin memang tidak sebesar pada biomassa lain, namun tetap berdasarkan nilai *fixed carbon* tersebut MSW tetap dapat digunakan sebagai bahan baku gasifikasi.

Selanjutnya pada pengujian ultimat berdasarkan sampah kota atau MSW daerah Kota Serang – Cilegon dilakukan guna mengetahui unsur penyusun senyawa dari MSW yang digunakan didapatkan nilai karbon (C) sebesar 49,07%, hidrogen 6,05%, oksigen (O) 39,79%, nitrogen (N) 0,95%, dan sulfur (S) sebesar 0,17%. Nilai pengujian ultimat ini dapat menunjang gambaran komposisi senyawa syngas yang dapat dihasilkan.

4.2 Rasio *Steam*/MSW (S/MSW)

Gasifier yang digunakan pada proses gasifikasi ini menggunakan reaktor *updraft* dengan *gasifying agent* (media gasifikasi) yang digunakan adalah *steam* atau uap air. Alasan penggunaan *steam* sebagai media gasifikasi ini dikarenakan memang jumlah syngas yang dihasilkan lebih baik dibandingkan dengan media lain seperti udara ataupun oksigen. Seperti penelitian yang dilakukan oleh Shayan et al (2018) digunakan 4 variasi media gasifikasi, yaitu udara, oksigen, uap air, dan campuran udara-oksigen menggunakan biomassa kayu dan kertas. Berdasarkan keempat media gasifikasi tersebut, dari segi produksi gas hidrogen tertinggi pada kedua biomassa yang digunakannya tertinggi pada media uap air (*steam*), yang kemudian dilanjutkan oleh oksigen, oksigen-udara, dan terakhir udara. Maka dari itu digunakan *steam* pada penelitian kali ini.

Memvariasikan rasio antara media yang digunakan dengan biomassa yang digunakan ternyata dapat mempengaruhi kandungan syngas yang dihasilkan. Pada penelitian ini digunakan *steam* sebagai media dan MSW sebagai bahan baku gasifikasi. Maka dari itu perlu didapatkan rasio S/MSW terbaik. Yang mana rasio didapatkan melalui persamaan berikut ini.

$$S/MSW = \frac{\text{steam flow rate}}{MSW \text{ rate}} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

- S/MSW = Rasio uap air terhadap MSW
- $Steam\ flow\ rate$ = Laju aliran uap air (gr/jam)
- $MSW\ rate$ = Laju pemakanan (*feeding*) MSW (gr/jam)

Berdasarkan pengujian, digunakan temperatur proses gasifikasi 750°C. Adapun *gasifier* tipe *updraft* yang digunakan mampu mengurai 50 gr MSW dalam setengah jam, itu artinya $MSW\ rate$ yang mampu dilakukan *gasifier* sebesar 100 gr/jam. Untuk mendapatkan nilai $steam\ flow\ rate$ perlu dilakukan pengukuran secara langsung pada alat gasifikasi. $Steam\ flow\ rate$ didapatkan dengan mengukur banyak air yang habis menguap ketika dipanaskan menggunakan *steam generator*. Maka, $steam\ flow\ rate$ dapat diperoleh dengan persamaan berikut.

$$steam\ flow\ rate = \frac{m_{air1} - m_{air2}}{waktu} \dots\dots\dots (4.2)$$

Dengan keterangan sebagai berikut.

- m_{air1} = massa air awal (gram)
- m_{air2} = massa air akhir (gram)
- $waktu$ = digunakan 1 jam (jam)

Contoh kuat arus yang diatur menggunakan dimmer pada *steam generator* dialiri 0,4 A. Sebelum air dipanaskan massanya sebesar 300 gram, lalu setelah dipanaskan selama 1 jam sisa massa air menjadi 244,16 gram. Itu artinya, $steam\ flow\ rate$ pada kuat arus 0,4 A didapatkan sebesar 55,84 gram. Begitu pula berlaku untuk data lainnya. Kemudian setelah dapat $steam\ flow\ rate$, dibandingkan dengan $MSW\ rate$ -nya sebesar 100 gr/jam. Sehingga pada data contoh didapatkan rasio S/MSW sebesar 0,56. Berikut merupakan data variasi $steam\ flow\ rate$ beserta variasi rasio perbandingannya terhadap MSW (S/MSW).

Tabel 4.2 Variasi Rasio S/MSW

Kuat Arus (A)	Steam Flow Rate (gram/hr)	MSW rate (gram/hr)	Rasio S/MSW
0,4	55,84	100	0,56
0,5	92,85		0,92
0,6	129,87		1,30
0,7	169,42		1,69
0,8	208,98		2,09

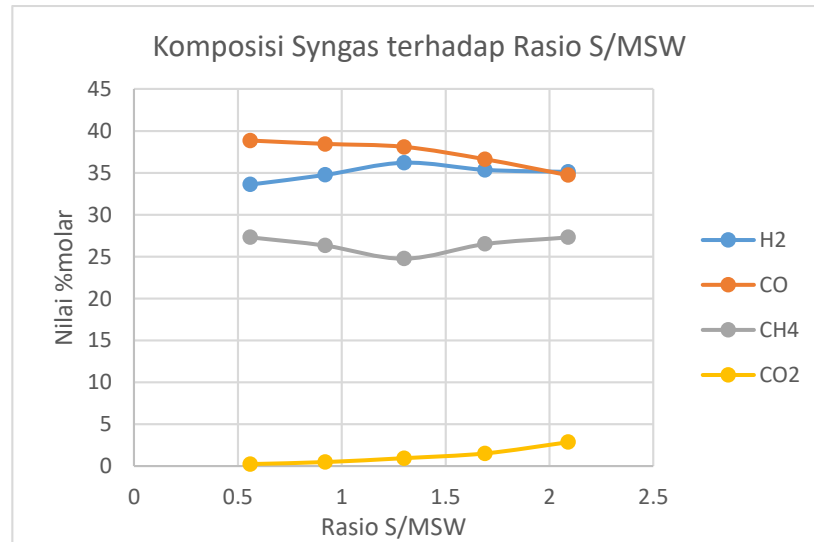
4.3 Hasil Pengujian Syngas Gasifikasi MSW

Setelah dilakukan pengujian gasifikasi dengan bahan bakar yaitu *municipal solid waste* (MSW), gas dianalisa dilaboratorium melalui proses GCMS (*Gas Chromatography and Mass Spectroscopy*) untuk mengukur senyawa H₂ (hidrogen), CO (karbon monoksida), CO₂ (karbon dioksida), dan CH₄ (metana). Rasio S/MSW yang telah didapat digunakan sebagai variasi dengan hipotesis rasio tersebut dapat mempengaruhi kandungan komposisi gas. Berikut merupakan data dari komposisi gas yang didapat.

Tabel 4.3 Data Komposisi Syngas terhadap Rasio S/MSW

No	Rasio S/MSW	Komposisi Syngas			
		Hidrogen (H ₂)	Karbon Monoksida (CO)	Metana	Karbon Dioksida (CO ₂)
1	0,56	33,611	38,841	27,315	0,232
2	0,92	34,755	38,441	26,329	0,474
3	1,3	36,203	38,09	24,764	0,943
4	1,69	35,353	36,616	26,515	1,515
5	2,09	35,110	34,720	27,308	2,861

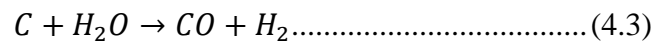
Sehingga apabila data tersebut disajikan dalam bentuk grafik menjadi sebagai berikut ini.



Gambar 4.1 Grafik Komposisi Syngas terhadap Rasio S/MSW

(Sumber: Dokumen Pribadi)

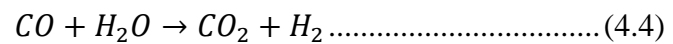
Hidrogen dan CO terbentuk atas reaksi *steam-carbon reaction* yang mana persamaannya adalah sebagai berikut.



Berdasarkan data syngas yang didapatkan, pada komposisi gas hidrogen (H₂) didapatkan dari rasio 0,56 sampai 1,3 mengalami kenaikan jumlah komposisi hidrogen. Namun pada rasio 1,69 sampai 2,09 komposisi hidrogen mengalami penurunan. Nilai hidrogen tertinggi didapatkan 36,203% pada rasio 1,30. Hal ini mengindikasikan bahwa dalam mengoptimasi syngas yang kaya akan hidrogen diperlukan rasio uap air yang tepat, tidak terlalu rendah, tidak juga terlalu besar. Data tersebut sejalan dengan data yang didapatkan pada penelitian Li et al (2010). Pada penelitian yang dilakukan olehnya hidrogen terus bertambah dari rasio 0 sampai 1,33. Namun, dari rasio 1,33 ke atas mulai mengalami penurunan jumlah hidrogen. Tren penurunan jumlah hidrogen ini dapat dijelaskan dengan jumlah uap yang berlebihan dapat menurunkan suhu reaksi. Suhu reaksi dalam gasifikasi dapat meningkatkan jumlah hidrogen dalam syngas, sehingga apabila suhunya menurun karena jumlah uap yang berlebihan pastinya dapat menurunkan jumlah hidrogen sebagai kualitas dari syngas (Cheng et al., 2019). Namun pada penelitian yang dilakukan oleh Acharya et al (2010), *steam ratio* ditingkatkan dari 0,58 sampai 1,08 dan terjadi peningkatan konsentrasi volume hidrogen sebesar 7% namun dari rasio

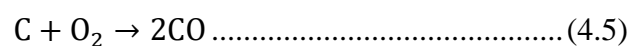
1,08 > kenaikan hidrogen mulai menipis menjadi 0,6%. Penurunan hasil gas dengan peningkatan *steam* ini menurutnya juga dapat merusak konversi biomassa menjadi gas. Acharya et al (2010) juga menyebutkan penongkatan uap dapat menyebabkan penurunan suhu karena panas menjadi terserap oleh uap air yang berlebihan. Maka dari itu, solusi agar hidrogen tetap meningkat walaupun uap air ditingkatkan adalah dengan meningkatkan pemanasan.

Adapun pada jumlah karbon monoksida berdasarkan data dan grafik yang terbentuk mengalami tren penurunan seiring dengan penambahan rasio uap air terhadap MSW (S/MSW). Penurunan karbon monoksida ini dapat dijelaskan dalam persamaan reaksi *water-gas shift* berikut.



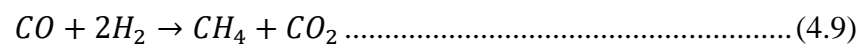
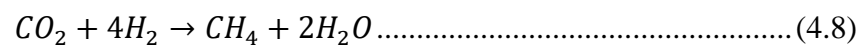
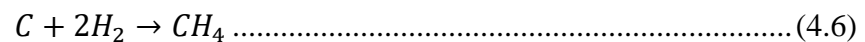
Berdasarkan persamaan reaksi (4.3) di atas, seiring pertambahannya uap air pada proses gasifikasi biomassa dapat menurunkan jumlah CO pada syngas. Tren penurunan ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Li et al (2010), Tavaréz et al (2019), dan Nguyen et al (2020) bahwa nilai karbon monoksida (CO) berbanding terbalik terhadap rasio S/MSW. Namun yang membedakan adalah pada penelitian yang dilakukan Li et al (2010), produksi karbon monoksida lebih kecil dibandingkan dengan produksi hidrogen. Sedangkan pada penelitian gasifikasi MSW yang telah dilaksanakan, nilai produksi CO lebih besar dibandingkan produksi H₂. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor seperti alat pengujian yang digunakan maupun karakteristik dari MSW yang digunakan. Pada karakteristik MSW yang digunakan sudah dijabarkan pada pengujian ultimat subbab 4.1 bahwa nilai karbon (C) yang terkandung dalam MSW persentasenya lebih besar dibandingkan dengan hidrogen (H), sehingga nilai CO pada syngas dapat lebih besar dibandingkan dengan nilai H₂-nya. Karena hal ini maka rasio yang baik berdasarkan nilai CO ada pada rasio terendah yaitu 0,56.

Selanjutnya adalah jumlah produksi karbon dioksida (CO₂). CO₂ ini terbentuk karena adanya proses oksidasi yang mana reaksinya adalah sebagai berikut.



Berdasarkan data dan grafik yang diperoleh, tren dari CO₂ ini berlawanan dengan tren dari CO. Yang mana pada CO, semakin besar *steam* maka akan semakin kecil komposisi CO, sedangkan pada CO₂ semakin besar *steam* maka akan semakin besar pula komposisi CO₂. Hal ini telah dijabarkan pada persamaan (4.3) sebelumnya yaitu *water-gas shift reaction* (WGRS) atau reaksi yang terjadi karena adanya pergeseran antara air yang terdapat pada uap dan gas yang dihasilkan dari proses gasifikasi. Sehingga apabila diberikan semakin banyak *steam* maka kenaikan CO₂ tidak dapat terelakkan.

Selanjutnya pada jumlah produksi gas metana (CH₄) yang terjadi karena reaksi berikut ini.



Reaksi di atas disebut juga reaksi *methanation* yang mana pada reaksi ini terjadi pengkonversian senyawa gas yang awalnya sudah terbentuk pada proses gasifikasi seperti H₂, CO, dan CO₂ menjadi metana (CH₄). Berdasarkan data dan grafik terbentuk tren yang berlawanan dengan hidrogen (H₂). Hidrogen mengalami kenaikan seiring bertambahnya rasio uap, namun metana menurun. Kemudian hidrogen yang melimpah tersebut terkonversi menjadi metana karena adanya CO dan CO₂, sehingga dari rasio 1,3 ke atas metana mulai bertambah namun hidrogen menurun. Bentuk tren ini serupa dengan penelitian yang telah dilakukan oleh Li et al (2010), dimana terjadi penurunan jumlah metana sampai titik rasio tertentu, kemudian naik kembali. Pernyataan ini serupa dengan penelitian yang dilakukan oleh Chuayboon et al (2018) bahwa *steam rate* atau S/MSW ini dapat mengurangi kandungan CH₄ pada syngas yang mana syngas lebih bagus apabila CH₄ lebih sedikit, namun apabila *steam* yang diberikan berlebihan dapat meningkatkan kembali jumlah CH₄ dalam syngas yang dihasilkan. Maka dari itu, berdasarkan pernyataan tersebut rasio S/MSW terbaik dari segi kandungan CH₄ ada pada rasio 1,30.

4.4 Hasil Produksi Zat Lain Gasifikasi MSW

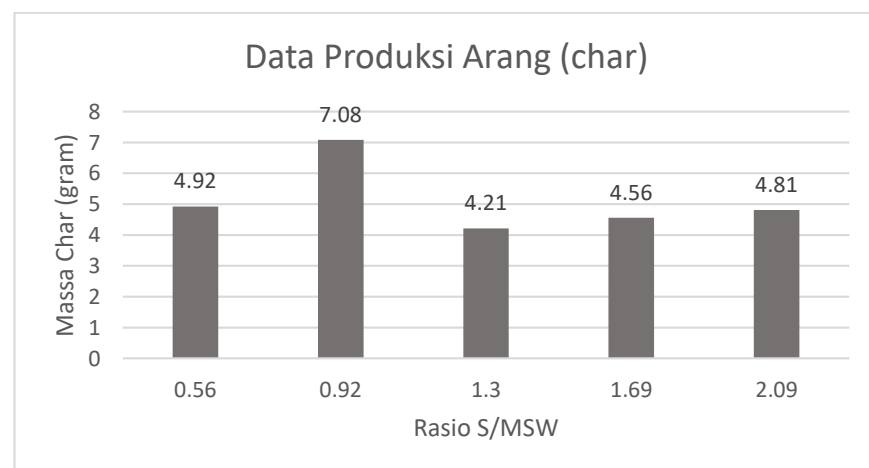
4.4.1 Data Produksi Massa Arang (*char*)

Arang atau char yang merupakan salah satu zat sisa (residu) yang terbentuk saat dari biomassa setelah proses gasifikasi selesai dilaksanakan. Berikut ini merupakan data char yang terbentuk setelah proses gasifikasi berlangsung yang dibandingkan terhadap rasio S/MSW.

Tabel 4.4 Data Produksi Massa Char

Rasio S/MSW	Massa Char yang Dihasilkan (gram)
0,56	4,92
0,92	7,08
1,30	4,21
1,69	4,56
2,09	4,81

Sehingga apabila data disajikan dalam bentuk grafik menjadi sebagai berikut ini.



Gambar 4.2 Data Produksi Arang (char)

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Adapun salah satu zat produk sampingan yang dihasilkan pada proses gasifikasi ini adalah char atau arang. Char atau arang yang juga menjadi zat sisa setelah pelaksanaan gasifikasi dilakukan berbeda dengan tar yang pengaruh besarnya disebabkan karena desain alat

gasifier. Char atau arang ini biasanya terbentuk karena adanya penambahan massa yang tercampur dengan abu pada zat sisa biomassa (dalam hal ini MSW) yang digunakan. Proses pembersihan *gasifier* sebelum dipakai kembali sangat mempengaruhi jumlah char, karena apabila tidak dibersihkan dengan benar, zat residu MSW yang sebelumnya digunakan akan terbawa pada penelitian selanjutnya. Dari kelima rasio S/MSW rata-rata char yang dihasilkan sejumlah 4 gram, namun pada rasio 0,92 char yang dihasilkan lebih banyak yaitu sekitar 7 gram. Kemungkinan hal ini terjadi karena proses pembersihan dari data sebelumnya tidak dibersihkan dengan benar sehingga menambahkan jumlah char atau arangnya.

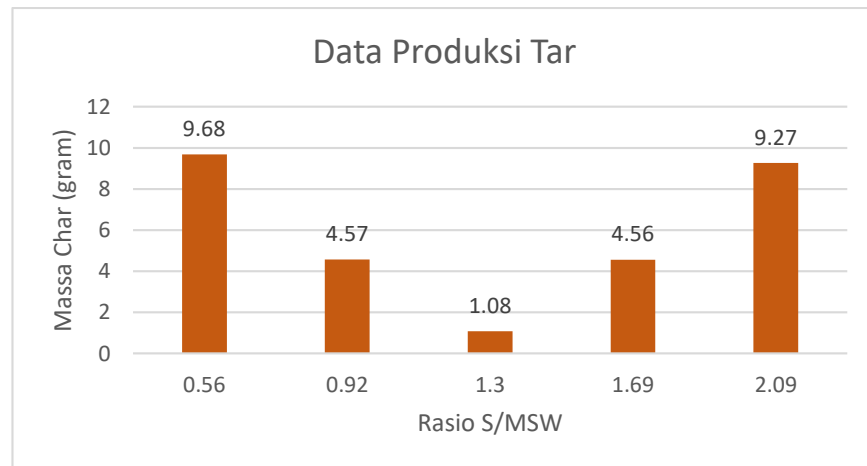
4.4.2 Data Produksi Massa Tar

Tar yang merupakan zat sisa (residu) yang dibentuk ketika proses gasifikasi berjalan. Dalam proses gasifikasi, pembentukan tar ini menjadi salah satu tantangan utama karena dapat mengkontaminasi kandungan dari syngas yang dihasilkan (Mazzoni et al., 2017). Tar dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti, bahan bakar atau biomassa yang dipakai, kondisi saat proses pirolisis, dan lain sebagainya. Dianalisa pula tar yang terbentuk saat proses gasifikasi berlangsung yang dibandingkan terhadap rasio S/MSW. Berikut merupakan datanya.

Tabel 4.5 Data Produksi Massa Tar

Rasio S/MSW	Massa Tar yang Dihasilkan (gram)
0,56	9,68
0,92	4,57
1,30	1,08
1,69	4,56
2,09	9,27

Sehingga apabila data disajikan dalam bentuk grafik menjadi sebagai berikut ini.



Gambar 4.3 Grafik Data Produksi Tar

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Berdasarkan data pada Gambar 4.3, didapatkan massa tar pada masing-masing rasio S/MSW proses gasifikasi. Berdasarkan penjabaran sebelumnya, tar yang merupakan zat residu ini menjadi tantangan besar pada proses gasifikasi karena dapat mengkontaminasi syngas yang dihasilkan (Mazzoni et al., 2017). Sehingga tar pada proses gasifikasi lebih sedikit dihasilkan lebih baik. Pada penelitian yang telah dilakukan, didapatkan tar tertinggi sebesar 9,68 gram pada rasio S/MSW 0,56. Data tar tersebut terbilang hampir mencapai 19% dari massa MSW yang digunakan. Desain alat pengujian gasifikasi (*gasifier*) sangat mempengaruhi jumlah tar yang dihasilkan. Pemilihan *gasifier downdraft* atau *updraft* dapat menentukan jumlah tar. Tar pada *gasifier updraft* lebih besar dibandingkan *downdraft*. Tar pada *gasifier* tipe *updraft* biasanya berkisar 5-20% dari massa biomassa yang dipakai (James et al., 2015). Maka dari itu tar yang dihasilkan hampir melewati batas wajar persentase tar. Adapun menurut Siahaan (2018) pada tulisannya, desain alat seperti tinggi reaktor dapat mempengaruhi jumlah tar karena tar akan semakin banyak akibat terdapat lamanya waktu distribusi panas yang terjadi pada *gasifier*.

4.5 Analisa Lower Heating Value Syngas

Lower heating value (LHV) didefinisikan sebagai jumlah panas yang dilepaskan oleh pembakaran total bahan bakar yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini.

$$LHV_{Gas} = 10,79\gamma_{H_2} + 12,63\gamma_{CO} + 35,83\gamma_{CH_4} \text{ (MJ/Nm}^3\text{)} \quad (4.10)$$

Dimana γ merepresentasikan jumlah fraksi mol dari setiap komponen syngas (Stendardo et al., 2016). Pada persamaan 4.10 tersebut, lower heating value hanya dikhususkan untuk mengukur gas yang bersifat *flammable* atau mudah dibakar seperti gas hidrogen, karbon monoksida, dan metana. Untuk karbon dioksida tidak diukur karena merupakan gas *non-flammable* atau tidak dapat dibakar. Dengan mengetahui LHV dari gas yang dihasilkan, karakteristik dari syngas dalam segi nilai kalornya pun dapat diketahui. Semakin besar nilai kalornya, semakin baik kualitas syngas tersebut.

Berdasarkan persamaan tersebut, dilakukan analisa nilai LHV Syngas yang dihasilkan yang nantinya akan dibandingkan nilainya terhadap rasio S/MSW. Berikut perhitungannya.

- Rasio 0,56

$$LHV_{Gas} = 10,79\gamma_{H_2} + 12,63\gamma_{CO} + 35,83\gamma_{CH_4}$$

$$LHV_{Gas} = 10,79 \cdot 0,33611 + 12,63 \cdot 0,38841 + 35,83 \cdot 0,27315$$

$$LHV_{Gas} = 18,319 \text{ MJ/Nm}^3$$

- Rasio 0,92

$$LHV_{Gas} = 10,79\gamma_{H_2} + 12,63\gamma_{CO} + 35,83\gamma_{CH_4}$$

$$LHV_{Gas} = 10,79 \cdot 0,34755 + 12,63 \cdot 0,38441 + 35,83 \cdot 0,26329$$

$$LHV_{Gas} = 18,039 \text{ MJ/Nm}^3$$

- Rasio 1,30

$$LHV_{Gas} = 10,79\gamma_{H_2} + 12,63\gamma_{CO} + 35,83\gamma_{CH_4}$$

$$LHV_{Gas} = 10,79 \cdot 0,36203 + 12,63 \cdot 0,3809 + 35,83 \cdot 0,24764$$

$$LHV_{Gas} = 17,59 \text{ MJ/Nm}^3$$

- Rasio 1,69

$$LHV_{Gas} = 10,79\gamma_{H_2} + 12,63\gamma_{CO} + 35,83\gamma_{CH_4}$$

$$LHV_{Gas} = 10,79 \cdot 0,35353 + 12,63 \cdot 0,36616 + 35,83 \cdot 0,26515$$

$$LHV_{Gas} = 17,939 \text{ MJ/Nm}^3$$

- Rasio 2,09

$$LHV_{Gas} = 10,79\gamma_{H_2} + 12,63\gamma_{CO} + 35,83\gamma_{CH_4}$$

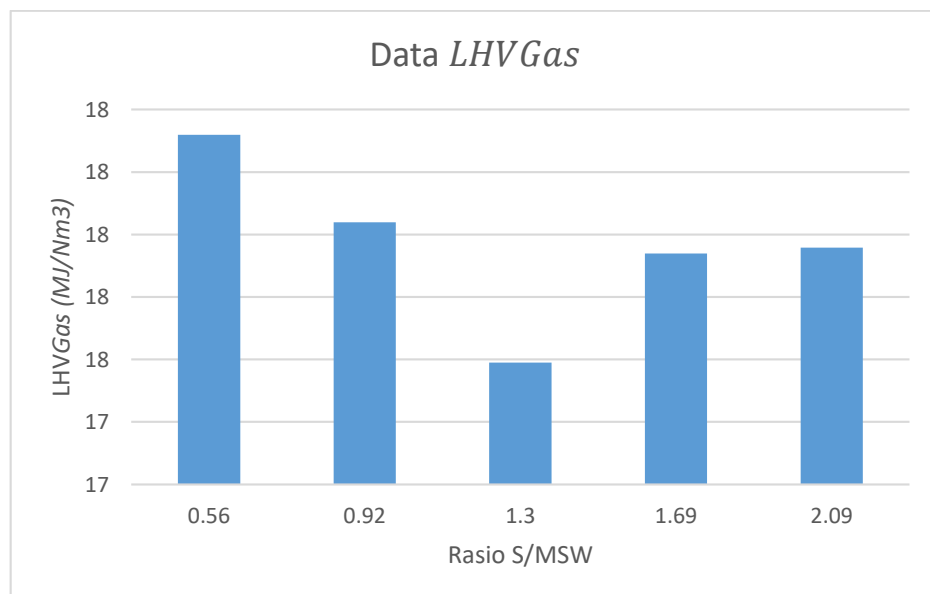
$$LHV_{Gas} = 10,79 \cdot 0,35110 + 12,63 \cdot 0,34720 + 35,83 \cdot 0,27308$$

$$LHV_{Gas} = 17,958 \text{ MJ/Nm}^3$$

Setelah dilakukan perhitungan akan *lower heating value* pada masing-masing syngas yang dihasilkan tiap rasio S/MSW, nilai LHV dibandingkan dengan rasio tersebut yang apabila ditabulasikan serta disajikan dalam bentuk grafik menjadi sebagai berikut ini.

Tabel 4.6 Data LHV_{Gas}

No.	Rasio S/MSW	LHV_{Gas} (MJ/Nm ³)
1	0,56	18,319
2	0,92	18,039
3	1,30	17,59
4	1,69	17,939
5	2,09	17,958



Gambar 4.4 Data LHV_{Gas}

(Sumber: Dokumen Pribadi)

Berdasarkan tabel dan grafik di atas, didapatkan nilai LHV tertinggi pada rasio S/MSW 0,56 sebesar 18,319 MJ/Nm³ yang kemudian mengalami penurunan dan titik LHV terendah pada rasio 1,3 sebesar 17,59 MJ/Nm³. Apabila data diamati, *steam* sebenarnya tidak berpengaruh signifikan terhadap nilai kalor dari syngas yang dihasilkan. Berdasarkan data tersebut mengindikasikan bahwa jumlah *steam* tidak mempengaruhi jumlah nilai kalor bawah (LHV) dari syngas yang dihasilkan.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan yang telah dijabarkan sebelumnya, guna menjawab tujuan dari penelitian, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut ini.

1. Rasio S/MSW didapatkan dengan membandingkan antara *steam flow rate* dengan *MSW rate*. *Steam flow rate* dihitung dengan mengukur banyak air yang habis menguap ketika dipanaskan menggunakan *steam generator*. Sedangkan *MSW rate* didapat berdasarkan kemampuan *gasifier* yang dipakai dalam melakukan pemakanan terhadap MSW yaitu sebesar 100 gr/jam.
2. Pada suhu 750°C, didapatkan karakteristik syngas terbaik berdasarkan komposisinya pada variasi rasio S/MSW 1,3. Dengan komposisi gasnya yaitu H₂ sebesar 36,203 %mol, CO sebesar 38,089 %mol, CH₄ sebesar 24,764 %mol, dan CO₂ sebesar 0,943 %mol. Dengan zat lain tar dan char berturut-turut sebesar 1,08 gram dan 4,21 gram. Berdasarkan nilai H₂ apabila diberikan kelebihan *steam* akan mengalami penurunan H₂. Berdasarkan CO, semakin besar *steam* yang diberikan, CO akan semakin sedikit. Berdasarkan CH₄, apabila diberikan kelebihan *steam* akan mengalami kenaikan CH₄. Sedangkan berdasarkan CO₂, semakin besar *steam* yang diberikan, CO₂ akan makin bertambah. Adapun jumlah *steam* tidak mempengaruhi nilai kalor dari syngas yang dihasilkan.

5.2 Saran

Adapun terakhir terdapat saran-saran yang dapat menunjang penelitian gasifikasi dengan bahan baku *Municipal Solid Waste* (MSW) variasi rasio uap air. Berikut merupakan saran-saran tersebut.

1. Perlu dilakukan penyeragaman waktu proses gasifikasi pada setiap data yang diambil. Waktu lama proses gasifikasi yang berbeda-beda tentu dapat mempengaruhi data syngas yang dihasilkan.
2. Sebaiknya alat gasifikasi yang digunakan mampu menampung lebih banyak biomassa (dalam hal ini digunakan MSW) agar volume *syngas* yang dihasilkan pun dapat lebih banyak sehingga komposisinya pun dapat terdeteksi lebih detail.
3. Sampel gas sebaiknya disimpan dalam gas bag yang lebih khusus untuk menampung gas agar volume gas tidak berkurang ketika akan dilakukan pengujian.
4. Perlu dilakukan pengujian akan komposisi senyawa penyusun produk sampingan yang dihasilkan dari gasifikasi yaitu tar dan arang, bukan hanya dianalisa berdasarkan massanya.

DAFTAR PUSTAKA

- Acharya, B., Dutta, A., & Basu, P. (2010). An investigation into steam gasification of biomass for hydrogen enriched gas production in presence of CaO. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(4), 1582–1589. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.109>
- Ariesmayana, A., Dwirani, F. (2018). POTENSI KADAR AIR SAMPAH SEBAGAI ENERGI ALTERNATIF BAHAN BAKAR FOSIL DI TPA CILOWONG. *Jurnal Kebijakan Pembangunan Daerah*, 2(2), 93–103. <https://pdfs.semanticscholar.org/ea94/cd4f0c6ce2f6a5bf2150279b6104d88c5f3f.pdf>
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.
- Cheng, Y. W., Lee, Z. S., Chong, C. C., Khan, M. R., Cheng, C. K., Ng, K. H., & Hossain, S. S. (2019). Hydrogen-rich syngas production via steam reforming of palm oil mill effluent (POME) – A thermodynamics analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 20711–20724. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.119>
- Couto, N., Silva, V., Monteiro, E., Teixeira, S., Chacartegui, R., Bouziane, K., Brito, P. S. D., & Rouboa, A. (2015). Numerical and experimental analysis of municipal solid wastes gasification process. *Applied Thermal Engineering*, 78, 185–195. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.12.036>
- Damanhuri, E., Handoko, W., & Padmi, T. (2014). Municipal solid waste management in Indonesia. *Municipal Solid Waste Management in Asia and the Pacific Islands: Challenges and Strategic Solutions*, 139–155.
- Dinas Lingkungan Hidup Kota Serang. (2022). *Profil UPTD Pengolahan Sampah Kota Serang TPSA Cilowong 2022.pdf*. Pemerintah Kota Serang.
- Dwirani, F., & Ariesmayana, A. (2020). Municipal solid waste composition in final disposal area of Serang City Banten Province. *Journal of Physics: Conference Series*, 1469(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1469/1/012131>
- El-Nagar, R. A., & Ghanem, A. A. (2019). *Syngas production, properties, and its*

- importance* (Vol. 2). IntechOpen London, UK.
- Febriyanto, R., Lingkungan, S. I., Indonesia, U., Gedung, S., & Lt, C. F. K. G. (2017). *ANALISIS SISTEM PENGELOLAAN SAMPAH KOTA (STUDI KASUS : KOTA SERANG)*.
- Goldsmith, J. R., & Landaw, S. A. (1968). Carbon monoxide and human health. *Science*, *162*(3860), 1352–1359. <https://doi.org/10.1126/science.162.3860.1352>
- Hariyanto, R., Aliran, K., Terhadap, U., Biomassa, P., & Kelapa, C. (2012). *Analisis Pengaruh Kecepatan Aliran Udara Terhadap Reaksi*. 2, 847–856.
- Hutabarat, L. D. (2012). Implementasi Pengukuran Tar Pada Biomass. In *Universitas Indonesia*.
- James, A. M., Yuan, W., Boyette, M. D., & Wang, D. (2015). The effect of air flow rate and biomass type on the performance of an updraft biomass gasifier. *BioResources*, *10*(2), 3615–3624. <https://doi.org/10.15376/biores.10.2.3615-3624>
- Jiang, F., Zhang, M., Liu, B., Xu, Y., & Liu, X. (2017). Insights into the influence of support and potassium or sulfur promoter on iron-based Fischer-Tropsch synthesis: Understanding the control of catalytic activity, selectivity to lower olefins, and catalyst deactivation. *Catalysis Science and Technology*, *7*(5), 1245–1265. <https://doi.org/10.1039/c7cy00048k>
- Johnson, F. X., & Rosillo-calle, F. (2007). *AND INTERNATIONAL Challenges and Opportunities for the EU and Southern Africa* (Issue April).
- Li, J., Liu, J., Liao, S., Zhou, X., & Rong, Y. (2010). Syn-gas production from catalytic steam gasification of municipal solid wastes in a combined fixed bed reactor. *Proceedings - 2010 International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application, ISDEA 2010*, *2*, 530–534. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2010.395>
- Li, J., Pan, L., Suvarna, M., & Wang, X. (2021). Machine learning aided supercritical water gasification for H₂-rich syngas production with process optimization and catalyst screening. *Chemical Engineering Journal*, *426*(March), 131285. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131285>
- Mazzoni, L., Ahmed, R., & Janajreh, I. (2017). Plasma Gasification of Two Waste

- Streams: Municipal Solid Waste and Hazardous Waste from the Oil and Gas Industry. *Energy Procedia*, 105, 4159–4166.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.882>
- Nurulhuda, N. (2022). *PENGARUH VARIASI LAJU ALIR UDARA TERHADAP EFISIENSI TERMAL PADA PROSES GASIFIKASI DENGAN SISTEM UPDRAFT= EFFECT OF AIR FLOW RATE VARIATIONS ON THERMAL EFFICIENCY IN GASIFICATION PROCESS WITH UPDRAFT SYSTEM*. Universitas Hasanuddin.
- Ramos, A., Monteiro, E., Silva, V., & Rouboa, A. (2018). Co-gasification and recent developments on waste-to-energy conversion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(July 2017), 380–398.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.025>
- Reed, T. B., & Das, A. (1988). *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Biomass Energy Foundation.
- Rosillo-Calle, F., & Woods, J. (2012). *The biomass assessment handbook* (Vol. 4). Taylor & Francis.
- Ruchjana, B. N., Falah, A. N., Rusyaman, E., Matematika, D., Padjadjaran, U., Geologi, D., Teknik, F., Sekolah, G., Teknologi, T., & Indonesia, M. (2019). Fixed Carbon Estimation As Variables in Coal Quality By Means Ordinary Point Kriging Method Using R Programming. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 14(2), 127–141.
<https://pdfs.semanticscholar.org/1aae/358e8890b703d1f26d83a32cd95659e997c1.pdf>
- Sabitah, A., Raliannoor, R., & Sulhan, M. (2020). Peningkatan Hasil Hidrogen Pada Proses Gasifikasi Tandan Sawit. *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*, 7(1), 54–60.
<http://je.politala.ac.id/index.php/JE/article/view/116>
- Sansaniwal, S. K., Rosen, M. A., & Tyagi, S. K. (2017). Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(May), 23–43.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.215>
- Shayan, E., Zare, V., & Mirzaee, I. (2018). Hydrogen production from biomass gasification; a theoretical comparison of using different gasification agents.

- Energy Conversion and Management*, 159(August 2017), 30–41.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.096>
- Stendardo, S., Foscolo, P. U., Nobili, M., & Scaccia, S. (2016). High quality syngas production via steam-oxygen blown bubbling fluidised bed gasifier. *Energy*, 103, 697–708. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.011>
- Suhendi, E., Paradise, G. U., & Priandana, I. (2017). Pengaruh Laju Alir Udara Dan Waktu Proses Gasifikasi Terhadap Gas Producer Limbah Tangkai Daun Tembakau Menggunakan Gasifier Tipe Downdraft. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 5(2), 45–53. <https://doi.org/10.15294/jbat.v5i2.6054>
- Tavares, R., Ramos, A., & Rouboa, A. (2019). A theoretical study on municipal solid waste plasma gasification. *Waste Management*, 90, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.03.051>
- Visconti, C. G., Martinelli, M., Falbo, L., Infantes-Molina, A., Lietti, L., Forzatti, P., Iaquaniello, G., Palo, E., Picutti, B., & Brignoli, F. (2017). CO₂ hydrogenation to lower olefins on a high surface area K-promoted bulk Fe-catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 200, 530–542. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.07.047>
- Winter, F., Prah, M. E., & Hofbauer, H. (1997). Temperatures in a fuel particle burning in a fluidized bed: The effect of drying, devolatilization, and char combustion. *Combustion and Flame*, 108(3), 302–314. [https://doi.org/10.1016/S0010-2180\(96\)00140-X](https://doi.org/10.1016/S0010-2180(96)00140-X)

LAMPIRAN

Lampiran A. Karakterisasi Thermocouple

$$\%Kesalahan = \left| \frac{Y - X}{Y} \right| \times 100\%$$

Tabel A.1 Hasil Pengukuran Thermocouple 1

No.	Set Point °C	Pengamatan Display Sistem (°C)			Rata - Rata
		Pertama	Kedua	Ketiga	
1.	50	50,1	50	50,2	50,1
2.	100	100,25	99,75	100,3	100,1

- Perhitungan Set Point 50°C

$$\%Kesalahan = \left| \frac{50 - 50,1}{50} \right| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = |-0,002| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = 0,2\%$$

- Perhitungan Set Point 100°C

$$\%Kesalahan = \left| \frac{100 - 100,1}{100} \right| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = |-0,001| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = 0,1\%$$

Tabel A.2 Hasil Pengukuran Thermocouple 2

No.	Set Point °C	Pengamatan Display Sistem (°C)			Rata - Rata
		Pertama	Kedua	Ketiga	
1.	50	50,5	50,4	50,4	50,46
2.	100	100,4	100,3	100,5	100,4

- Perhitungan Set Point 50°C

$$\%Kesalahan = \left| \frac{50 - 50,46}{50} \right| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = |-0,0092| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = 0,92\%$$

- Perhitungan Set Point 100°C

$$\%Kesalahan = \left| \frac{100 - 100,4}{100} \right| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = |-0,004| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = 0,4\%$$

Tabel A.3 Hasil Pengukuran Thermocouple 3

No.	Set Point °C	Pengamatan Display Sistem (°C)			Rata - Rata
		Pertama	Kedua	Ketiga	
1.	50	50,1	50	50,2	50,066
2.	100	99,8	100	100,3	100,033

- Perhitungan Set Point 50°C

$$\%Kesalahan = \left| \frac{50 - 50,066}{50} \right| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = |-0,00132| \times 100\%$$

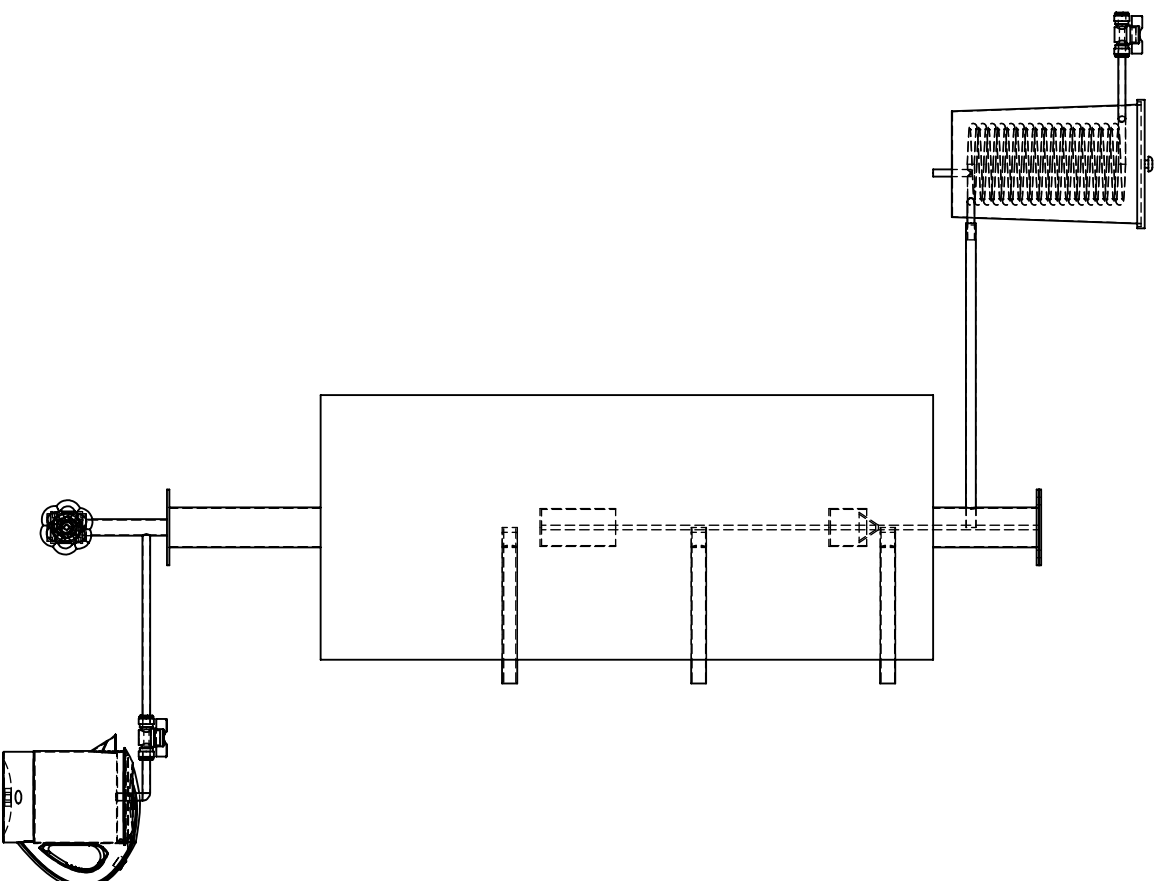
$$\%Kesalahan = 0,132\%$$

- Perhitungan Set Point 100°C

$$\%Kesalahan = \left| \frac{100 - 100,033}{100} \right| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = |-0,00033| \times 100\%$$

$$\%Kesalahan = 0,033\%$$



SKALA : 1 : 11

UKURAN : mm

TANGGAL : 4/10/2022

DIGAMBAR : GUNTUR & ELANG

NPM : 3331190049

DIPERIKSA : Imron Rosyidi

FT UNTIRTA

FURNACE GASIFIKASI

TA

A4

BADAN LAYANAN UMUM
BALAI BESAR PENGUJIAN MINYAK DAN GAS BUMI

LEMIGAS

Telepon : 62-21-7246167

JL. CILEDUG RAYA KAV. 109, CIPULIR, KEBAYORAN LAMA, JAKARTA SELATAN, 12230 INDONESIA
Faksimili:62-21-7246150

e-mail: pilt.lemigas@esdm.go.id



HASIL UJI
TEST RESULT

Nomor Percontoh/ : 2023006986
Sample Number

Nomor Laporan / : LHU/5.09.01.4.99/202301057-1
Report Number (LHU)

ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI

No	Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
1	Karbon dioksida (CO ₂)	% Mol	0,232	GPA 2261:2020
2	Metana (CH ₄)		27,315	
3	Hidrogen (H ₂)		33,611	
4	Karbon Monoksida (CO)		38,841	
Densitas Relatif			0,9731	GPA 2172:2019
Gross Heating Value (GHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	58,4	
Net Heating Value (NHV) , id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	53,9	
Faktor Kompresibilitas, Z			0,9996	

Keterangan:

Kode sampel : Sintetis Gas #01

Ketua Kelompok Pemurnian
dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diiklankan dan tidak boleh digandakan.
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form	:	F. 10. IKK. 05-A
No. Revisi	:	II.1
Halaman	:	2 dari 2

BADAN LAYANAN UMUM
BALAI BESAR PENGUJIAN MINYAK DAN GAS BUMI
LEMIGAS

Telepon : 62-21-7246167

JL. CILEDUG RAYA KAV. 109, CIPULIR, KEBAYORAN LAMA, JAKARTA SELATAN, 12230 INDONESIA
Faksimili:62-21-7246150

e-mail: pilt.lemigas@esdm.go.id



HASIL UJI
TEST RESULT

Nomor Percontoh/ : 2023006987
Sample Number

Nomor Laporan / : LHU/5.09.01.4.99/202301057-1
Report Number (LHU)

ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI

No	Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
1	Karbon dioksida (CO ₂)	% Mol	0,474	GPA 2261:2020
2	Metana (CH ₄)		26,329	
3	Hidrogen (H ₂)		34,755	
4	Karbon Monoksida (CO)		38,441	
Densitas Relatif			0,9731	GPA 2172:2019
Gross Heating Value (GHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	58,4	
Net Heating Value (NHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	53,9	
Faktor Kompresibilitas, Z			0,9996	

Keterangan:

Kode sampel : Sintetis Gas #02

Ketua Kelompok Pemurnian
dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diiklankan dan tidak boleh digandakan.
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form	:	F. 10. IKK. 05-A
No. Revisi	:	II.1
Halaman	:	2 dari 2

BADAN LAYANAN UMUM
BALAI BESAR PENGUJIAN MINYAK DAN GAS BUMI

LEMIGAS

Telepon : 62-21-7246167

JL. CILEDUG RAYA KAV. 109, CIPULIR, KEBAYORAN LAMA, JAKARTA SELATAN, 12230 INDONESIA
Faksimili:62-21-7246150

e-mail: pilt.lemigas@esdm.go.id



HASIL UJI
TEST RESULT

Nomor Percontoh/ : 2023006988
Sample Number

Nomor Laporan / : LHU/5.09.01.4.99/202301057-1
Report Number (LHU)

ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI

No	Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
1	Karbon dioksida (CO ₂)	% Mol	0,943	GPA 2261:2020
2	Metana (CH ₄)		24,764	
3	Hidrogen (H ₂)		36,203	
4	Karbon Monoksida (CO)		38,09	
Densitas Relatif			0,9731	GPA 2172:2019
Gross Heating Value (GHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	58,4	
Net Heating Value (NHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	53,9	
Faktor Kompresibilitas, Z			0,9996	

Keterangan:

Kode sampel : Sintetis Gas #03

Ketua Kelompok Pemurnian
dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diiklankan dan tidak boleh digandakan.
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form	:	F. 10. IKK. 05-A
No. Revisi	:	II.1
Halaman	:	2 dari 2

BADAN LAYANAN UMUM
BALAI BESAR PENGUJIAN MINYAK DAN GAS BUMI

LEMIGAS

Telepon : 62-21-7246167

JL. CILEDUG RAYA KAV. 109, CIPULIR, KEBAYORAN LAMA, JAKARTA SELATAN, 12230 INDONESIA
Faksimili:62-21-7246150

e-mail: pilt.lemigas@esdm.go.id



HASIL UJI
TEST RESULT

Nomor Percontoh/ : 2023006989
Sample Number

Nomor Laporan / : LHU/5.09.01.4.99/202301057-1
Report Number (LHU)

ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI

No	Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
1	Karbon dioksida (CO ₂)	% Mol	1,515	GPA 2261:2020
2	Metana (CH ₄)		26,515	
3	Hidrogen (H ₂)		35,353	
4	Karbon Monoksida (CO)		36,616	
Densitas Relatif			0,9731	GPA 2172:2019
Gross Heating Value (GHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	58,4	
Net Heating Value (NHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	53,9	
Faktor Kompresibilitas, Z			0,9996	

Keterangan:

Kode sampel : Sintetis Gas #04

Ketua Kelompok Pemurnian
dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diiklankan dan tidak boleh digandakan.
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form	:	F. 10. IKK. 05-A
No. Revisi	:	II.1
Halaman	:	2 dari 2

BADAN LAYANAN UMUM
BALAI BESAR PENGUJIAN MINYAK DAN GAS BUMI
LEMIGAS

Telepon : 62-21-7246167

JL. CILEDUG RAYA KAV. 109, CIPULIR, KEBAYORAN LAMA, JAKARTA SELATAN, 12230 INDONESIA
Faksimili:62-21-7246150

e-mail: pilt.lemigas@esdm.go.id



HASIL UJI
TEST RESULT

Nomor Percontoh/ : 2023006990
Sample Number

Nomor Laporan / : LHU/5.09.01.4.99/202301057-1
Report Number (LHU)

ANALISIS KOMPOSISI GAS BUMI

No	Komposisi	Satuan	Hasil	Metode
1	Karbon dioksida (CO ₂)	% Mol	2,861	GPA 2261:2020
2	Metana (CH ₄)		27,308	
3	Hidrogen (H ₂)		35,110	
4	Karbon Monoksida (CO)		34,720	
Densitas Relatif			0,9731	GPA 2172:2019
Gross Heating Value (GHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	58,4	
Net Heating Value (NHV), id, 14,696 psia		(BTU/FT ³)	53,9	
Faktor Kompresibilitas, Z			0,9996	

Keterangan:

Kode sampel : Sintetis Gas #05

Ketua Kelompok Pemurnian
dan Analisis Gas

Eko Handoyo, ST
NIP 19821209 200604 1 001

Laporan ini hanya berdasarkan percontoh yang diuji, tidak untuk diiklankan dan tidak boleh digandakan.
This report relates only to the sample tested, may not be used for advertising purpose and not to be copied.

No. Form	:	F. 10. IKK. 05-A
No. Revisi	:	II.1
Halaman	:	2 dari 2