

SKRIPSI

ANALISIS EKSERGI PADA GASIFIKASI BIOMASSA



**AHMAD FAUZI ILAHI
03051181722001**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2022**

SKRIPSI

ANALISIS EKSERGI PADA GASIFIKASI BIOMASSA

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana
Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya**



Oleh :

**AHMAD FAUZI ILAHI
03051181722001**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2022**

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS EKSERGI PADA GASIFIKASI BIOMASSA

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mendapatkan Gelar Sarjana Teknik
Mesin Pada Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya

Oleh:

AHMAD FAUZI ILAHI

03051181722001

Inderalaya, 5 Juli 2022

Diperiksa dan Disetujui Oleh

Pembimbing



Irsyadi Yani, S.T., M.Eng, Ph.D.

NIP. 197112251997021001

Dr. Fajri Vidian, S.T., M.T.

NIP. 197207162006041002

JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Agenda No. :
Diterima Tanggal :
Paraf :

SKRIPSI

Nama : AHMAD FAUZI ILAHI
NIM : 03051181722001
Jurusan : TEKNIK MESIN
Judul Skripsi : ANALISIS EKSERGI PADA GASIFIKASI BIOMASSA
Dibuat tanggal : 25 NOVEMBER 2021
Selesai Tanggal : 12 MEI 2022



Indralaya, 5 Juli 2022
Diperiksa dan Disetujui Oleh
Pembimbing

Dr. Fajri Vidian, S.T., M.T.
NIP. 197207162006041002

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Skripsi ini dengan judul “Analisis Ekserseri pada Gasifikasi Biomassa” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Fakultas Teknik Program Studi Teknik Mesin Universitas Sriwijaya pada tanggal 18 Mei 2022

Palembang, 1 Juni 2022

Tim Penguji Karya tulis ilmiah berupa Skripsi

Ketua:

1. (Ir. Dyos Santoso, M.T.)
NIP. 196012231991021001

Sekretaris:

2. (Aneka Firdaus, S.T., M.T.)
NIP. 197502261999031001

Anggota:

3. (Dr. Ir. Irwin Bizzy, M.T.)
NIP. 196005281989031002

Indralaya, 5 Juli 2022

Diperiksa dan Disetujui Oleh

Pembimbing

Dr. Fajri Vidian, S.T., M.T.

NIP. 197207162006041002



Irsyadi Yani, S.T, M.Eng, Ph.D.

NIP. 197112251997021001

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh

Puji dan syukur atas kehadiran Allah *subhanahuwata'ala* karena dengan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Analisis Eksperi pada Gasifikasi Biomassa”. Skripsi ini disusun untuk melengkapi salah satu syarat mendapatkan Gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Selama proses pembuatan skripsi tidak terlepas dari bantuan, kritik dan saran yang sudah diberikan demi memaksimalkan hasil akhir pada skripsi ini, dengan demikian, penulis ucapan terima kasih kepada :

1. Drs. Juhar dan Sari Kadarwati selaku orang tua penulis yang telah membantu memberi dukungan penuh baik secara moril maupun materiil.
2. Bapak Dr. Fajri Vidian, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak membantu penulis dan memberikan saran dari awal skripsi ini dibuat.
3. Irsyadi Yani, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
4. Amir Arifin, S.T., M.Eng., Ph.D. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dipl-Ing. Ir. Amrifan Saladin Mohruni, Ph.D. selaku dosen pembimbing akademik penulis.
6. Seluruh Dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Sriwijaya yang telah membekali penulis dengan ilmu yang bermanfaat sebelum menyusun proposal ini.
7. Staf karyawan Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.
8. Inka Novia Tunggadewi S.Tr.Pt. yang selalu mendukung penulis dalam pembuatan karya ilmiah ini

9. Seluruh kerabat karib penulis baik dari internal kampus maupun eksternal kampus yang telah memberi dukungan kepada penulis.

Semoga skripsi ini dapat bermanfaat dalam dunia pendidikan dan industri dimassa sekarang dan yang akan datang.

Palembang, 13 Mei 2022



Ahmad Fauzi

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ahmad Fauzi Ilahi
NIM : 03051181722001
Judul : Analisis Eksersi pada Gasifikasi Biomassa

Memberikan izin kepada Pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 (satu) tahun tidak mempublikasikan karya penelitian saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan Pembimbing sebagai penulis korespondensi (*Corresponding author*)

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Indralaya, Juli 2022



Ahmad Fauzi Ilahi
NIM. 03051181722001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Ahmad Fauzi Ilahi
NIM : 03051181722001
Judul : Analisis Eksersi pada Gasifikasi Biomassa

Menyatakan bahwa Skripsi saya merupakan hasil karya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan/plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam Skripsi ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.



Inderalaya, Juli 2022



Ahmad Fauzi Ilahi
NIM. 03051181722001

RINGKASAN

ANALISIS EKSERGI PADA GASIFIKASI BIOMASSA
Karya tulis ilmiah berupa skripsi, Mei 2022

Ahmad Fauzi Ilahi;
Dibimbing oleh Dr. Fajri Vidian, S.T., M.T.

Exergy Analysis of Biomass Gasification

XXV + 59 Halaman, 7 Tabel, 14 Gambar

Kebutuhan energi listrik di indonesia terus meningkat hingga massa yang akan datang. Untuk memenuhi kebutuhan energi listrik tersebut, Indonesia masih bergantung pada bahan bakar fosil berupa minyak bumi dan batu bara. Ketersediaan bahan bakar tersebut akan terus menipis seiring berjalananya waktu. sehingga diperlukan sumber energi baru terbarukan guna mendukung transisi energi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Gasifikasi biomassa dapat menjadi salah satu cara dalam menciptakan sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Gasifikasi biomassa merupakan proses meningkatkan energi yang terkandung pada biomassa dengan mengonversikan biomassa menjadi gas mampu bakar melalui metode pembakaran dengan suplai udara terbatas di dalam gasifier. Proses gasifikasi menghasilkan gas mampu bakar berupa hidrogen (H), carbon monoksida (CO) dan metana (CH₄) yang kemudian dapat digunakan sebagai pembangkit energi listrik. Penelitian ini dilakukan dengan menerapkan metode analisis eksergi yang mengacu kepada hukum pertama dan kedua termodinamika. Metode analisis eksergi dianggap akurat dalam menghitung nilai efisiensi dan destruksi eksergi yang dihasilkan pada sistem. Penulis menggunakan data sekunder pada pengujian gasifikasi tipe downdraft gasifier berbahan bakar hazelnut shells dengan tiga variasi perbandingan udara dan bahan bakar (AFR). AFR 1,63 dengan massa alir bahan bakar 1,73 kg/h, AFR 1,52 dengan massa alir bahan bakar 2,64 kg/h dan AFR 1,51 dengan massa alir bahan bakar 3,69 kg/h. Pada tiga variasi AFR akan menghasilkan jumlah persentase yang berbeda pada gas produk, arang,

abu dan tar. Hasil perhitungan eksperi pada gasifikasi dengan menggunakan AFR 1,51 dengan massa alir bahan bakar 3,69 menunjukkan pengoperasian gasifikasi yang paling optimal dari ketiga variasi AFR dengan hasil eksperi pada produk gas sebesar 8,635 kW , efisiensi eksperi sebesar 43,5% dan destruksi eksperi sebesar 10,036 kW. Pada penelitian ini juga membuktikan bahwa nilai eksperi dari gas produk yang dihasilkan pada proses gasifikasi didominasi oleh eksperi kimia, dibuktikan dengan besar nilai eksperi kimia pada gas produk berkisar 3,2 kW hingga 8,62 kW sedangkan eksperi fisik yang dihasilkan pada proses gasifikasi hanya berkisar 0,113 kW hingga 0,226 kW. Hal ini juga berlaku pada setiap komponen produk yang dihasilkan pada proses gasifikasi seperti eksperi pada arang, tar dan abu.

Kata kunci: Biomassa, Eksperi, Gasifikasi

Kepustakaan: 25 (1972-2021)

SUMMARY

EXERGY ANALYSIS OF BIOMASS GASIFICATION Scientific writing in the form of thesis, May 2022

Ahmad Fauzi ilahi
Supervised by Dr. Fajri Vidian, S.T., M.T.

Analisis Eksersi pada Gasifikasi Biomassa

XXV + 59 Pages, 7 Table, 14 Images

The need for electrical energy in Indonesia increases in the future. Currently, Indonesia relies on fossil-based energy resources, such as crude oil and coal. These energy resources decrease from time to time. Thus, new and renewable energy resources are important to support the energy transition toward cleaner and sustainable energy. Biomass gasification refers to a method of creating sustainable-alternative energy resources. Biomass gasification is a process to improve the contained energy on biomass by converting the biomass into gas to burn. The implementation of this process applies incomplete combustion inside of a gasifier. This process produces flammable gases, hydrogen (H₂), carbon monoxide (CO), and methane (CH₄). These gases are useful for power plant fuels. This research applied the exergy analysis method of the first and second laws of thermodynamics. The applied analysis was accurate to measure the efficiency values and exergy destruction of the system. The researcher used a secondary data source to examine the gasification process with the downdraft-type gasifier and hazelnut shell fuels. The researcher applied three comparative ratios of air to fuel, AFR. The first AFR was 1.63 with a fuel mass flow of 1.73kg/h. The second AFR was 1.52 with a fuel mass flow rate of 2.64 kg/h. Then, the third AFR was 1.51 with a fuel mass flow rate of 3.69 kg/h. These three AFRs led to different percentages total of product gas, charcoal, ash, and tar. The exergy calculations of the gasification process with AFR 1.51 and fuel mass flow rate of 3.69 showed the most optimum gasification operation of the other AFRs. The exergy result of the product gas was 8.635 kW with an exergy

efficiency of 43.5% and exergy destruction of 10,036 kW. The results also prove the exergy values of the produced product gas of the gasification process were dominated by chemical exergy. The evidence was the value of the chemical exergy of product gas, from 3.2 kW until 8.62 kW, with physical exergy values between 0.113kW and 0.226kW produced by the gasification process. The result was also applied for each product component produced by the gasification process, such as exergy on char, tar, and ash.

Keywords: Biomass, Exergy, Gasification

Literatures: 25 (1972 – 2021)

DAFTAR ISI

HALAMAN PERSETUJUAN	ix
DAFTAR ISI	xxi
DAFTAR GAMBAR	xxiii
DAFTAR TABEL.....	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Gasifikasi	5
2.1.1 Tipe <i>Gasifier</i>	6
2.1.2 Tahapan Gasifikasi	11
2.2 Biomassa.....	14
2.2.1 Klasifikasi Biomassa	15
2.3 Hukum I Termodinamika	16
2.4 Hukum II Termodinamika	17
2.5 Perhitungan Dasar Gasifikasi.....	18
2.5.1 Perandingan Udara dan Bahan Bakar (<i>Air Fuel Ratio</i>)	18
2.5.2 Nilai Kalor (<i>Heating Value</i>).....	19
2.6 Eksergi	19
2.6.1 Eksergi Kimia (<i>Chemical Exergy</i>)	21
2.6.2 Karakteristik Eksergi.....	21
2.6.3 Kesetimbangan Eksergi pada Volume Atur	21
2.7 Analisis Eksergi Proses Gasifikasi	22
2.7.1 Kesetimbangan Eksergi Pada <i>Gasifier</i>	23
2.7.2 Eksergi Biomassa	27
2.7.3 Eksergi Udara.....	28
2.7.4 Eksergi Syngas atau Gas Produk	28
2.7.5 Eksergi Tar.....	28

2.7.6	Eksergi pada Arang (<i>char</i>)	29
2.7.7	Eksergi Abu (<i>ash</i>)	29
2.7.8	Efisiensi Eksergi Gasifikasi.....	29
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	31	
3.1	Diagram Alir Penelitian	31
3.2	Data Hasil Gasifikasi	33
3.3	Analisis dan Pengolahan Data	35
3.3.1	Perhitungan Massa Alir Gas	35
3.3.2	Analisis Eksergi pada biomassa.....	36
3.3.3	Analisis Eksergi pada Udara	36
3.3.4	Analisis Eksergi pada Produk Gas.....	37
3.3.5	Analisis Eksergi pada abu	43
3.3.6	Analisis Eksergi pada arang (<i>char</i>).....	44
3.3.7	Analisis Eksergi pada tar(C_6H_6)	44
3.3.8	Analisis Destruksi Eksergi	45
3.3.9	Analisis Efisiensi Eksergi.....	45
BAB 4 HASIL DAN DISKUSI.....	47	
4.1	Hasil Penelitian	47
4.2	Pembahasan	47
4.2.1	Hubungan antara <i>air fuel ratio</i> terhadap pindah eksergi masuk dan keluar.....	48
4.2.2	Hubungan antara <i>air fuel ratio</i> terhadap destruksi eksergi	51
4.2.3	Hubungan antara <i>air fuel ratio</i> terhadap efisiensi hukum kedua.....	52
BAB 5 KESIMPULAN	55	
5.1	Kesimpulan.....	55
DAFTAR RUJUKAN.....	57	
LAMPIRAN	59	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 <i>Updraft Gasifier</i> (Basu, 2013).....	7
Gambar 2.2 <i>Downdraft Gasifier</i> (Basu, 2013)	8
Gambar 2.3 <i>Crossdraft Gasifier</i> (Basu, 2010).....	9
Gambar 2.4 <i>Bubbling Fluidized-Bed Gasifier</i> (Basu, 2010)	10
Gambar 2.5 <i>Circulating Fluidized Bed Gasifier</i> (Basu, 2010)	11
Gambar 2.6 Kesetimbangan energi pada <i>control volume</i>	17
Gambar 2.7 Kesetimbangan entropi pada <i>control volume</i>	18
Gambar 2.8 Kesetimbangan eksersi pada <i>control volume</i>	22
Gambar 2.9 Skematik Proses Gasifikasi	23
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	32
Gambar 3.2 Skematik Alat Uji (<i>Gasifier</i>)	33
Gambar 4.1 Hubungan antara AFR terhadap komponen tiap eksersi.....	48
Gambar 4.2 Hubungan antara AFR terhadap eksersi pada Abu	49
Gambar 4.3 Hubungan antara AFR terhadap eksersi pada Tar	50
Gambar 4.4 Hubungan antara AFR terhadap eksersi pada Arang.....	50
Gambar 4.5 Hubungan antara AFR terhadap destruksi eksersi.....	51
Gambar 4.6 Hubungan antara AFR terhadap efisiensi eksersi.....	53

DAFTAR TABEL

<u>Tabel 2.1 Kapasitas panas spesifik tekanan konstan (Cp) yang terdapat pada setiap komponen (Yueshi <i>et al</i>, 2014) (Cengel, Y. A. and Boles, M. A, 2015)(Barin, Ihsan and Gregor Platzki, 1995).....</u>	<u>25</u>
<u>Tabel 2.2 Nilai spesifik standar eksersi kimia pada komponen gas (Moran, Michael J <i>et al</i>, 2014)(Abuadala, A., Dincer, I. and Naterer, G. F.,2010).....</u>	<u>26</u>
<u>Tabel 3.1 Hasil Analisis Ultimat dan Analisis Proksimat (M Dogru <i>et al</i>, 2002).....</u>	<u>34</u>
<u>Tabel 3.2 Hasil Gasifikasi Biomassa (M. Dogru <i>et al</i>, 2002).....</u>	<u>34</u>
<u>Tabel 3.3 Parameter operasi gasifier dan produk sampingan (M. Dogru <i>et al</i>, 2002).....</u>	<u>34</u>
<u>Tabel 3.4 Massa Jenis pada Komponen Gas Hasil Gasifikasi.....</u>	<u>35</u>
<u>Tabel 4.1 Hasil Eksersi biomassa, udara, gas, abu, arang, tar dan destruksi eksersi pada tiga variasi aliran bahan bakar.</u>	<u>47</u>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Energi listrik berperan penting bagi keberlangsungan hidup manusia mulai dari kebutuhan rumah tangga hingga sektor industri dalam suatu negara. Salah satu negara dengan penggunaan energi listrik yang tinggi adalah Indonesia. Menurut data yang dihimpun dari lembaga rujukan terkait analisis energi global International Energy Agency (IEA), sebagai negara kepulauan dengan populasi 273,5 juta penduduk, total kebutuhan energi listrik Indonesia mencapai 275,18 Terra Watt hour (TWh) dengan 1 Mega Watt hour (MWh) per kapita pada tahun 2019. Tentunya, penggunaan energi listrik di Indonesia akan terus meningkat setiap tahunnya seiring dengan perkembangan pembangunan dan pertumbuhan ekonomi. Pembangkit listrik di Indonesia masih didominasi oleh energi fosil berupa minyak bumi dan batu bara.

Data yang dihimpun oleh IEA dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan bahwa impor minyak bumi dan produksi batu bara Indonesia terus mengalami peningkatan, bertolak belakang dengan ketersediaan energi fosil yang semakin berkurang. Penggunaan energi fosil secara terus-menerus akan berdampak buruk terhadap lingkungan serta mengancam keberlangsungan hidup generasi selanjutnya. Oleh karena itu, sumber energi terbarukan dengan emisi rendah dibutuhkan untuk mengatasi masalah yang substansial ini. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada konfrensi IEA Nomor : 176.Pers/04/SJI/2020 tahun 2020 menyatakan bahwa Indonesia berkomitmen untuk mengembangkan Energi Baru Terbarukan (EBT) guna mendukung transisi energi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Sebagai salah satu negara agraris yang memiliki hasil pertanian berlimpah, Indonesia berpotensi untuk mengembangkan energi berkelanjutan

dari biomassa, seperti sampah hasil pertanian berupa sekam padi, bonggol jagung, dan limbah organik lainnya. Mengonversikan biomassa menjadi energi dapat dilakukan melalui proses termokimia berupa pirolisis, liquification, biokimia, gasifikasi, dsb. Metode gasifikasi merupakan salah satu cara yang efektif dan efisien dalam memaksimalkan potensi biomassa sebagai sumber bahan bakar alternatif. Gasifikasi biomassa merupakan proses konversi biomassa menjadi gas mampu bakar (*combustable gas*) dengan suplai udara terbatas dalam suatu reaktor gasifikasi (*gasifier*). Secara garis besar, gas hasil gasifikasi berupa karbon monoksida (CO), hidrogen (H), dan metana (CH₄) dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar *internal combustion engines : motor diesel, gas engine* serta turbin gas untuk pembangkit listrik. Pemrosesan gasifikasi biomassa relatif ramah lingkungan karena emisi udara yang dihasilkan masih dibawah ambang batas yang ditetapkan. Dengan penerapan teknologi ini secara masif dan berkelanjutan, ketergantungan terhadap energi fosil akan dapat dikurangi dan berangsur mengurangi beban subsidi akibat tingginya harga minyak dunia.

Dalam penerapan sistem gasifikasi biomassa, umumnya perhitungan hanya dilakukan dengan menggunakan hukum pertama termodinamika untuk menentukan besaran energi yang dihasilkan. Perhitungan yang hanya menggunakan hukum pertama tidaklah efektif, sehingga memerlukan perhitungan yang melibatkan hukum kedua termodinamika berupa analisis eksersi untuk mengetahui besar kerja berguna yang dihasilkan pada proses gasifikasi. Analisis eksersi merupakan analisis yang sering digunakan untuk mengkaji performansi suatu sistem dan dianggap lebih akurat, mengacu pada hukum pertama dan kedua termodinamika. Penulis menerapkan analisis eksersi untuk mengetahui efisiensi eksersi dan eksersi yang hilang (*exergy destroyed*) yang ditimbulkan pada sistem sehingga dapat menghasilkan sistem yang berkerja secara optimal agar dapat dikembangkan dan dimanfaatkan untuk pemanfaatan energi yang lebih lanjut.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas. Analisis eksersi pada proses gasifikasi diperlukan untuk menganalisis secara detail potensi eksersi berupa eksersi kimia dan eksersi fisik yang dihasilkan dan untuk mengetahui seberapa besar destruksi eksersi selama proses gasifikasi.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian ini dilakukan pembatasan masalah yang meliputi :

1. Data-data proses gasifikasi diambil dari literatur
2. Analisa hanya dilakukan pada eksersi yang dimusnahkan dan efisiensi eksersi
3. Variasi *air/fuel ratio* dilakukan tiga variasi.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini untuk mendapatkan:

1. Perbandingan grafik pada tiga variasi *air/fuel ratio* terhadap destruksi eksersi (*exergy destroyed*) selama proses gasifikasi.
2. Perbandingan grafik pada tiga variasi *air/fuel ratio* terhadap efisiensi eksersi selama proses gasifikasi.

1.5 Manfaat Penelitian

Diharapkan penelitian ini dapat menjadi referensi ilmiah dan pembelajaran untuk memaksimalkan pemanfaatan biomassa metode gasifikasi, menjadi acuan terhadap riset dan penelitian yang dilakukan generasi selanjutnya.

DAFTAR RUJUKAN

- Abbott, M.; Van, N. Thermodynamics; McGraw-Hill Book Company: Singapore, 1972.
- Abuadala, A., Dincer, I. and Naterer, G. F. (2010) ‘Exergy analysis of hydrogen production from biomass gasification’, *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(10), pp. 4981–4990. doi: 10.1016/j.ijhydene.2009.08.025.
- Balmer, R.T. Thermodynamics; West Publishing Company: St. Paul, MN, USA, 1990.
- Barin, Ihsan. and Gregor, P. Thermochemical Data of Pure Substances; Weinheim, New York, VHC, (1995).
- Basu, P. (2010) *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory - Prabir Basu - Google Books*.
- Cengel, Y. A. and Boles, M. A. (2015) *Termodynamics: An Engineering Approach, Eight Edition*. New York: McGraw-Hill Education.
- Dogru. M., Howart. C. R., Akay. G., Keskinler. B., Malik. A. A. (2002) 'Gasification od Hazelnut Shells in a Downdraft Gasifier', *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, pp. 415-427. doi: 10.1016/S0360-5442(01)00094-9.
- Dincer, I and Rosmen, M. (2021) *EXERGY : Energy, Environment and Sustainable Development*. Elsevier Inc. 10.1016/b978-0-12-824372-5.00003-8. 37-60.
- Gonzalez, Aldemar Martinez, Rene Lesme J and Electro Eduardo S L. (2020) *Thermodynamic Assesment of the Integrated Gasification-Power Plant Operating in the Sawmill Industry : An Exergy and Energy*. Renewable Energy, 147, pp.1151-1163. doi: 10.1016/j.renene.2019.09.045.
- International Energy Association (IEA)*. 2018.”(online)https://www.iea.org/dataand_statistics/databrowser?country=WORLD&fuel=Energyconsumption&indicator=ElecConsPerCapita (Diakses pada tanggal 27 Agustus 2021)
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). 2020. **Kementerian ESDM Gandeng IEA Perkuat Energi Terbarukan**. Siaran Pers Nomor : 176.Pers/04/SJI/2020. Humas EBTKE. Jakarta.
- Kotas, T., J. 1995. *The Exergy Method of Thermal Plant Analysis*, ISBN: 0894649418, ISBN: 0894649469. Florida: Krieger Publishing Company.
- Lebo, Stuart E. Jr., Gargulak., Jerry D., and McNally, Timothy J. (2001). “lignin”.Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John

Wiley & Sons, Inc. [doi:10.1002/0471238961.12090714120914.a01.pub2](https://doi.org/10.1002/0471238961.12090714120914.a01.pub2). ISBN 978-0471-238968-6.

Moran, M.J.; Shapiro, H.N.; Boettner, D.D.; Bailey, M.B. (2014) Fundamentals of Engineering Thermodynamics, *Eight Edition*. John Wiley & Sons, Inc.: New York, NY, USA.

Song, G.; Shen, L.; Xiao, J.; Chen, L. *Estimation of specific enthalpy and exergy of biomass and coal ash*. Journal of energy source, Part A; Recovery, Utilization and Environmental Effects. 2013, 35, 9, 809 -816
Doi:10.1080/15567036.2011.586983.

Stepanov, V.S. *Chemical energies and exergies of fuels*. Energy 1995, 20, 235–242.

Susanto, Herri. 2018. Pengembangan Teknologi Gasifikasi untuk Mendukung Kemandirian Energi dan Industri Kimia. *Orasi Ilmiah Guru Besar*. Sidang Terbuka Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, 20 November. Bandung.

Szargut, J.; Styrilska, T. Approximate evaluation of the exergy of fuels. Brennst. Wärme Kraft 1964, 16, 589–596. (in German)

Tang, Y., Dong, J., Chi, Y., Zhou, Z. And Ni, M. (2016) *Energy and Exergy Analyses of Fluidized-Bed Municipal Solid Waste Air Gasification*. Elsevier Inc. 10.1021/acs.energyfuels.6b01418i.

Trifiananto, M. (2015) Karakterisasi Gasifikasi Batubara Tipe Updraft dengan Variasi *Equivalence Ratio*. Institut Teknologi Sepuluh November, 20 November. Surabaya.

Vidian, F. (2008) *Gasifikasi Tempurung Kelapa Menggunakan Updraft Gasifier pada Beberapa Variasi Laju Alir Udara Pembakara*. Jurnal Teknik Mesin. Vol. 10, Issue. 2. Pp 88-93.

Vidian, F., Basri, H., and Alfentri Lingga Safutra. (2015) “Studi Awal Gasifikasi Serbuk Kayu pada Open Top Stratified Downdraft Gasifier”. Jurnal Teknik Mesin. 07(10), pp. 25-29.

Vidian, F., Basri, H., and Sihotang, D. (2017) “Design, Construction and Experiment on Imbert Downdraft Gasifier Using South Sumatera Biomass and Low Rank Coal as Fuel”, *International Journal of Engineering Research and Applications*,” 07(03), pp. 39–44. doi: 10.9790/9622-0703063944.

Wu, Yueshi., Yang, Weihong., and Włodzimierz Blasiak. (2014) “Energy and Exergy Analysis of High Temperature Agent Gasification of Biomass”. Energies ISSN 1996-1073, 7, pp. 2107-2122; doi:10.3390/en7042107

Zhang, Yaning; Li, Bingxi; Li, Hongtao; Lui, Hui. 2011 *Thermodynamic evaluation of biomass gasification with air in autothermal gasifiers*. Volume, 519, Page 65-71, doi: 10.1016/j.tca.2011.03.00.