

## KARAKTERISASI PROSES GASIFIKASI SAMPAH ORGANIK DENGAN VARIASI JENIS BAHAN

<sup>(1)</sup>Ucik Ika Fenti Styana, <sup>(2)</sup>Rosiana Indrawati, <sup>(3)</sup>Muhammad Sigit Cahyono

<sup>(1,2)</sup>Prodi Teknik Energi Institut Teknologi Yogyakarta

<sup>(3)</sup>Prodi Teknik Perminyakan Universitas Proklamasi 45 Yogyakarta

<sup>(1)</sup>Email: ucik\_energi@ity.ac.id

Jl. Janti Yogyakarta

### ABSTRACT

*One of the abundant energy source in Indonesia is organic waste in the form of leafs and branches which is widely available in homeyard. It can be utilized as alternative energy source by gasification process. The objective of the study was to know the influence of raw material and AFR to the characteristic of organic waste gasification process. The raw material used were leafs and branches of melinjo (gnetum gnemon) which obtained from homeyard of inhabitant in Sidomoyo village, Godean sub-district, Sleman Regency, Indonesia. Before being gasified, it was prepared for proximate analysis in laboratorium. The gasification begins by feeding the raw material to the reactor with variation of 100% leaf, 100% branch, and 50%-50% leaf and branch. The gasification process was occurred in reactor for one hour, and syn gas which produced has been analyzed to know the composition of it. Result shows that raw material have influenced the characteristic of gasification process. The highest heating rate was occurred for gasification process of 100% leaf and AFR 0.5, which it gas has burned after 25 minuted process in oxidation temperature of 650<sup>0</sup>C, reduction temperature of 350<sup>0</sup>C, and pyrolysis temperature of 240<sup>0</sup>C.*

*Keywords: air-fuel ratio, organic waste, syn gas, updraft gasifier.*

### I. PENDAHULUAN

Energi memiliki peran penting dalam pembangunan nasional. Energi dapat mewujudkan keseimbangan tujuan pembangunan berkelanjutan yang mencakup aspek-aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan. Selain itu, energi juga berperan sebagai pendorong utama berkembangnya sektor-sektor lain, khususnya sektor industri (Anonim, 2019).

Tingkat konsumsi energi juga dapat menjadi salah satu indikator untuk menunjukkan kemajuan pembangunan suatu negara (Jacob & Klaus, 2010). Hal

ini karena peningkatan pertumbuhan ekonomi, kesejahteraan masyarakat, dan penambahan penduduk akan berhubungan dengan pesatnya konsumsi energi (Anonim, 2018). Namun, pesatnya konsumsi energi juga akan melahirkan tantangan baru terutama dalam upaya efisiensi terhadap konsumsi energi.

Saat ini, Indonesia mengalami defisit energi dimana tingginya permintaan energi dan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil terus meningkat. Sepanjang belum ditemukan cadangan energi (fosil) yang baru dan teknologi nonkonvensional dalam

eksplorasi dan eksploitasi. Situasi ketimpangan yang tinggi antara *supply* dan *demand* energi secara nasional akan terus terjadi (Anonim, 2017). Oleh karena itu, diperlukan suatu pemikiran kreatif dengan menciptakan energi alternatif yang *renewable*, ramah lingkungan dan memiliki ketersediaan melimpah (Sandra, 2013).

Salah satu potensi energi alternatif yang sangat besar adalah sampah organik dari pemukiman. Data dari Kementerian Lingkungan Hidup menyebutkan bahwa produksi sampah permukiman di Indonesia mencapai 167 ribu ton per hari (Radar Sulteng, 2009). Di Kabupaten Sleman sendiri, jumlah sampah yang ditangani oleh Dinas Kimpraswilhub mencapai 6.776,91 m<sup>3</sup>/bulan, dimana sebagian besar merupakan sampah organik. Dari total sampah organik yang ada, kebanyakan berasal dari pasar, sapuan jalan dan taman terutama tanaman perindang. (Dinas Kimpraswilhub Sleman, 2008).

Selama ini, penanganan sampah organik di Kabupaten Sleman masih belum optimal. Hanya sebagian kecil saja yang bisa diolah menjadi pupuk organik (kompos), terutama dari daun-daunan. Hal ini disebabkan terbatasnya lahan untuk pengolahan sampah organik menjadi kompos tersebut. Sementara sebagian besar sampah organik yang lain, selain dibakar langsung oleh warga, juga dibuang

ke Tempat Pembuangan Akhir (TPA) Piyungan tanpa penanganan awal sama sekali. Oleh karena itu, diperlukan upaya pemanfaatan sampah organik menjadi bahan yang lebih bernilai.

Salah satu teknologi potensial untuk pemanfaatan sampah organik adalah teknologi gasifikasi (Hidayat, 2013). Gasifikasi bertujuan untuk mengkonversi bahan bakar cair maupun padat menjadi *flammable gas* menggunakan suatu reaktor yang disebut *gasifier*. Dari semua jenis gasifier yang ada, reaktor tipe *Updraft* merupakan reaktor yang paling sederhana dan mudah diaplikasikan di masyarakat sebagai pengganti gas LPG untuk kebutuhan memasak sehari-hari.

Unit gasifikasi biomassa tipe *Updraft* diharapkan dapat membantu masyarakat dalam pemenuhan kebutuhan energi alternatif. Akan tetapi, setiap unit gasifikasi memiliki karakteristik tertentu bergantung pada umpan biomassa yang berpengaruh terhadap kinerja unit tersebut sehingga diperlukan pengujian alat agar dapat diketahui kondisi operasi terbaiknya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jenis bahan terhadap karakteristik proses gasifikasi daun dan ranting tanaman yang banyak tersedia di sekitar tempat tinggal warga masyarakat di Kabupaten Sleman.

## II. LANDASAN TEORI

Gasifikasi adalah proses konversi bahan bakar padat menjadi gas mampu bakar ( $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ) melalui proses pembakaran dengan suplai udara terbatas yaitu antara 20% hingga 40% udara stoikiometri. Selama proses gasifikasi, terbentuk daerah proses yang dinamakan menurut distribusi suhu dalam reaktor gasifikasi. Daerah-daerah tersebut adalah *drying*, *pyrolysis*, *reduktion* dan *combustion*. Masing-masing daerah terjadi pada rentang suhu antara  $100^{\circ}\text{C}$  hingga  $300^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$  hingga  $900^{\circ}\text{C}$ ,  $400^{\circ}\text{C}$  hingga  $900^{\circ}\text{C}$ , dan  $900^{\circ}\text{C}$  keatas. (Bambang, dkk, 2009)

McKendry (2002a) menyimpulkan bahwa gasifikasi biomassa merupakan proses pengkonversian biomassa menjadi bahan bakar berbentuk gas karena adanya proses oksidasi parsial (sedikit oksigen) dari biomassa tersebut pada suhu tinggi antara  $800\text{-}900^{\circ}\text{C}$ . Gas yang dihasilkan antara lain terdiri dari unsur-unsur hidrogen, karbon monoksida, metana, karbon dioksida, uap air, senyawa hidrokarbon lain dalam jumlah yang kecil, serta bahan-bahan non-organik (Lim dan Sims, 2003). Gas yang dihasilkan ini mempunyai nilai kalori yang rendah ( $1000\text{-}1200\text{ kCal/Nm}^3$ ) tetapi dapat dibakar dengan efisiensi yang tinggi dengan kontrol yang mudah dan tidak menghasilkan emisi. Setiap kilogram biomassa kering-udara (kadar air  $\pm 10\%$ )

mengandung sekitar  $2,5\text{ m}^3$  bahan bakar gas. Dalam terminologi energi, efisiensi konversi pada proses gasifikasi biomassa berkisar antara  $60\text{ - }70\%$  (McKendry, 2002b).

Reaktor tempat terjadinya proses gasifikasi disebut *gasifier*. Beberapa jenis gasifier yang berkembang antara lain gasifier unggun tetap (*fixed bed*) dengan sistem aliran ke atas (*updraft*) dan aliran ke bawah (*downdraft*), gasifier dengan pelumasan (*fluidized bed*) dengan sistem gelembung (*bubbling*) dan sirkulasi (*circulating*), dan gasifier aliran berjalan (*entrained flow*). *Fluidized bed* dan *entrained flow gasifier* lebih sesuai dan dipakai untuk pembangkit energi atau industri skala besar, sehingga dalam penelitian ini hanya dikaji jenis *fixed bed gasifier* atau gasifier dengan unggun tetap.

Gasifier dengan unggun tetap merupakan jenis gasifier yang banyak digunakan karena konstruksi yang lebih sederhana. Pada gasifier unggun tetap jenis aliran ke atas (*updraft gasifier*), bahan masuk melalui hopper yang dapat dikunci dan mengalir ke bawah berlawanan dengan aliran pembakaran dan gas yang dihasilkan. Karena sistem aliran yang berlawanan tersebut tipe gasifier ini dapat beroperasi untuk bahan yang mempunyai kadar lengas yang tinggi. Namun demikian gas yang dihasilkan tidak bersih sehingga

kurang sesuai untuk pemakaian pada pemanasan bahan olahan atau makanan.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan gasifier aliran ke atas. Studi tentang kesetimbangan massa pada updraft gasifier untuk serbuk gergaji telah dilakukan oleh Payne dan Chandra (1985). Dunlap dan Payne (1988) melakukan studi penerapan kontrol dengan mikro-komputer pada gasifier. Studi terhadap gasifikasi biomassa juga dilakukan oleh Hoki dkk, dimana mereka meneliti aspek kestimbangan panas dan efisiensi gasifikasi (Hoki dkk, 1994), serta stabilitas laju produksi gas (Hoki dkk, 1995). Studi tentang kontrol suhu pada gasifier juga telah dilakukan dengan perlakuan kontrol aliran bahan baku (Hoki dkk, 2002).

### III. METODE PENELITIAN

#### 3.1. Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan adalah sebuah *updraft gasifier* berbentuk silinder yang terbuat dari bahan *stainless steel* dengan diameter 22 cm, tinggi 55 cm dan ketebalan 4 mm, yang berfungsi sebagai tempat terjadinya proses gasifikasi. Pada bagian sisi *gasifier* dibuat 3 buah saluran termokopel type K (*chromel-Alumnel*) berbaris vertikal dengan jarak 5 cm (T1), 20 cm (T2), dan 35 cm (T3) dari *grate* yang berfungsi untuk menentukan daerah

gasifikasi. Selain itu, digunakan blower dan anemometer untuk mengukur kecepatan udara yang masuk ke dalam gasifier.



Gambar 1. Peralatan Updraft Gasifier

#### 3.2. Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sampah organik berupa daun dan ranting tanaman melinjo yang didapatkan dari lahan pekarangan rumah warga di Desa Sidomoyo, Kabupaten Sleman.

#### 3.3. Prosedur Penelitian

- a. Penyiapan alat
  - Rangkaian peralatan yang telah tersedia diujicoba terlebih dahulu tanpa menggunakan beban untuk mengetahui apakah peralatan berfungsi dengan baik atau tidak.
  - Apabila ada bagian peralatan yang tidak berfungsi dengan baik, akan diperbaiki. Apabila semua bagian berfungsi normal, maka penelitian dilanjutkan.
- b. Penyiapan bahan

- Bahan baku berupa sampah organik sebelum digunakan, dikeringkan terlebih dahulu dengan cara dijemur di terik matahari selama satu hari.
  - Setelah kering, sebagian bahan diambil untuk dianalisa kandungan *proximate*, sedangkan sisanya diproses gasifikasi.
  - Analisa *proximate* dilakukan dengan mengacu pada *British Standar 1016* di Laboratorium Chem-mix Pratama, Kabupaten Bantul.
  - Pengujian tersebut meliputi pengujian kandungan air (*moisture*) dimana sampel 80 gram sampah organik ditempatkan pada Krus dan dipanaskan pada minimum *Free Space Oven* hampa udara dengan mengalirkan nitrogen pada suhu 105<sup>0</sup>C selama 2 jam. Selanjutnya ditimbang untuk mengetahui berat sebelum dan setelah pemanasan.
  - Pengujian zat mudah terbang (*volatile mater*) dilakukan pada sampel 1 gram sampah organik dengan ukuran 50 mesh. Sampel ditempatkan di dalam Krus, dan dipanaskan pada *Volatile Matter Furnace* hampa udara dengan suhu 900<sup>0</sup>C selama 7 menit. Selanjutnya sampel ditimbang untuk mengetahui berat sebelum dan setelah pemanasan.
  - Pengujian kadar abu (*ash*) dengan sampel seperti pada pengujian zat mudah terbang, kemudian dipanaskan di dalam *MuffleFurnace Ash* dengan suhu 500<sup>0</sup>C selama 30 menit. Kemudian suhu dinaikan hingga 815<sup>0</sup>C dan dipanaskan selama 1 jam. Selanjutnya sampel ditimbang untuk mengetahui perbedaan berat sebelum dan setelah pemanasan.
  - Persentase karbon tetap (*fixed carbón*) dihitung dengan rumusan sebagai berikut : 100% - (% kandungan air + %Abu + % zat terbang).
- c. Percobaan utama (Pengambilan data)
- Tahapan pengambilan data dimulai dengan membuka penutup reaktor dan memasukkan 3 kg bahan sampah organik berupa daun seluruhnya (100%), sementara di bagian bawah dimasukkan sedikit ranting dan daun yang mudah terbakar sebagai pemantik api awal.
  - Pemantik awal dinyalakan kemudian *blower* dihidupkan untuk memasukkan udara dengan kapasitas maksimal 100 liter per menit (lpm). Setiap variabel, dilakukan gasifikasi selama 1 jam.
  - Api yang berasal dari di bagian bawah reaktor akan memanaskan bahan yang ada di dalam reaktor sehingga terjadi proses oksidasi, reduksi, pirolisis, dan pengeringan. Sementara suhu reaktor mulai dicatat sejak *blower* dinyalakan setiap 5 menit sampai satu jam.
  - Proses gasifikasi dilakukan sampai muncul gas yang keluar melalui pipa

keluaran gas, lalu dipantik hingga menyalakan api yang stabil, kemudian sampel gas diambil menggunakan *syringe* untuk dianalisa di laboratorium.

- Setelah percobaan selesai, *char* dan *ash* dikeluarkan lalu ditimbang. *Blower* dimatikan dan semua peralatan percobaan dirapikan kembali.

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Karakteristik Bahan Baku

Berdasarkan pengujian proximate bahan baku sampah organik yang dilakukan di Laboratorium Chem-mix Pratama, didapatkan karakteristik bahan baku ranting dan daun melinjo dibandingkan dengan beberapa referensi seperti ditunjukkan dalam tabel 1. berikut.

Tabel 1. Karakteristik bahan

No	Parameter	Data Primer		Ref 1		Ref 2		Ref 3
		Daun Melinjo	Ranting Melinjo	Kayu Karet	Daun Pinus	Ranting Pinus	Limbah aren	
1	Kadarair (%) (Chart Area)	10,01	9,95	10,24	9,97	20	42,58	
2	Kadar Abu (%)	13,11	8,41	2,71	3,82	0,8	3,87	
3	Kadar karbon (%)	48,41	38,86	15,25	19,29	11,31	46,97	
4	Kadar bahan mudah menguap (volatile matter) (%)	53,52	67,28	71,81	66,92	67,89	6,26	

Data Primer : Hasil pengujian di Laboratorium Chem-mix Pratama, Bantul

Referensi 1 : Rinovianto, 2012

Referensi 2 : Diputra, 2010

Referensi 3 : Styana, 2016

Berdasarkan tabel 1 dapat dilihat bahwa kadar air daun sebesar 10,01 %, lebih tinggi daripada ranting. Begitu juga kadar abu daun sebesar 13,11 % dan juga kadar karbon daun sebesar 48,41 %, lebih besar

daripada kadar abu dan kadar karbon ranting. Di sisi lain, kadar bahan mudah menguap (*volatile matter*) daun sebesar 53,52% lebih kecil dibandingkan kadar bahan mudah menguap ranting. Nilai ini hampir sebanding dengan referensi 2, dimana daun akan memiliki kadar abu dan kadar karbon yang lebih besar daripada ranting serta kadar bahan mudah menguap yang lebih kecil dibandingkan ranting. Akan tetapi, kadar abu daun dan ranting melinjo jauh lebih tinggi daripada kayu karet dan limbah padat industri, sedangkan bahan mudah menguapnya tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

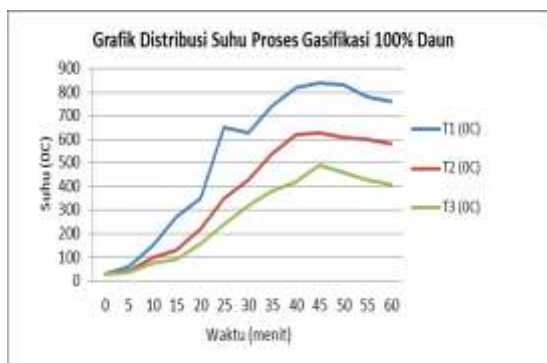
Tingginya kadar karbon dan bahan mudah menguap akan membuat proses gasifikasi menjadi lebih bagus, karena semakin banyak bahan yang akan tereduksi menjadi producer gas yang mudah terbakar. Akan tetapi tingginya kadar abu akan menyulitkan proses gasifikasi daun dan ranting melinjo karena akan banyak menyerap energi yang seharusnya untuk proses reduksi dan pirolisis.

##### 4.2. Karakteristik Proses Gasifikasi

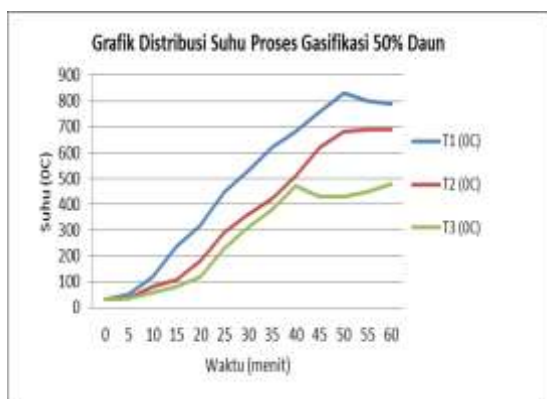
Pada percobaan gasifikasi dengan berbagai macam bahan baku ini, didapatkan hasil bahwa waktu pengeringan masing-masing bahan berbeda, dimana bahan bakar daun lebih cepat menghasilkan gas yang mudah terbakar, hanya dalam waktu 10 menit. Sedangkan untuk bahan bakar campuran daun dan ranting 50%, maupun 100%

ranting, waktu pengeringan yang dibutuhkan sekitar 15 menit, yang ditunjukkan dengan terbakarnya gas hasil gasifikasi.

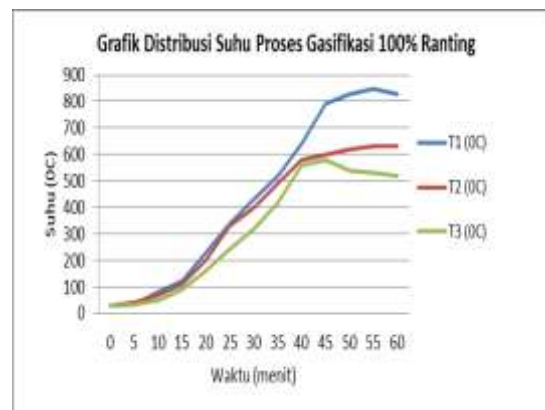
Distribusi suhu hasil pengujian gasifikasi untuk masing-masing jenis bahan bakar ditunjukkan pada gambar 2-4 Berikut.



Gambar 2. Distribusi Suhu Selama Proses Gasifikasi 100% daun



Gambar 3. Distribusi Suhu Selama Proses Gasifikasi 50% daun 50% ranting



Gambar 4. Distribusi Suhu Selama Proses Gasifikasi 100% ranting

Grafik distribusi suhu di atas memberikan gambaran proses yang terjadi di dalam reaktor gasifikasi. Berdasarkan Gambar 2-4 dapat terlihat bahwa distribusi suhu selama percobaan gasifikasi dengan berbagai macam bahan bakar menunjukkan tren yang hampir sama. Pada titik 1 pengukuran suhu (T1), menunjukkan bahwa laju kenaikan suhu sangatlah cepat dibandingkan pada titik 2 (T2) maupun titik 3 (T3). Suhu T1 menunjukkan nilai tertinggi dan stabil sebesar 840<sup>0</sup>C, yang menunjukkan bahwa di tempat ini terjadi proses pembakaran (oksidasi). Sedangkan suhu di T2 menunjukkan nilai tertinggi dan stabil dalam kisaran angka tertinggi 630<sup>0</sup>C, yang menunjukkan terjadinya proses reduksi. Sedangkan suhu di T3 menunjukkan angka tertinggi dan stabil pada nilai 490<sup>0</sup>C sebagai tanda terjadinya proses pirolisis. Hal ini sesuai dengan referensi (Rinovianto, 2012) yang menyatakan bahwa pembakaran terjadi pada suhu

antara 800<sup>0</sup>C sampai 1400<sup>0</sup>C, daerah reduksi pada 600<sup>0</sup>C – 900<sup>0</sup>C, dan daerah pirolisis antara 150<sup>0</sup>C-800<sup>0</sup>C.

#### 4.3. Pengaruh Jenis Bahan terhadap Suhu Proses Gasifikasi

Untuk mengetahui pengaruh jenis bahan bakar terhadap suhu proses gasifikasi, dilakukan pengambilan data selama proses pengujian, dengan mengambil sampel pada titik T1 sebagai tempat terjadinya proses pembakaran, seperti ditunjukkan dalam Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Pengaruh Jenis Bahan Bakar Terhadap Suhu Proses Gasifikasi

Berdasarkan grafik di atas, dapat terlihat bahwa proses gasifikasi dengan bahan bakar 100% daun, memiliki laju kenaikan suhu yang lebih cepat dibandingkan dengan proses gasifikasi dengan bahan bakar 50% daun maupun 100% ranting. Akan tetapi, kondisi ini bertahan hanya sampai menit ke-55, dimana suhu yang dicapai oleh proses gasifikasi 100% daun

mengalami penurunan yang sangat signifikan dibanding yang lain. Hal ini kemungkinan disebabkan karena bahan bakar daun sangat mudah terbakar sehingga laju kenaikan suhu akan sangat cepat yang tentunya berakibat pada cepat habisnya bahan bakar. Setelah habisnya bahan yang mudah terbakar tersebut, suhu di titik T1 akan menurun drastis, dibandingkan percobaan dengan bahan bakar yang lain.

#### V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Sampah organik berupa daun melinjo memiliki karakteristik kadar air 10,01 %, kadar abu 13,11%, kadar karbon 48,41%, dan kadar bahan mudah menguap 53,52%. Sedangkan ranting melinjo memiliki karakteristik kadar air 9,95 %, kadar abu 8,41%, kadar karbon 38,86%, dan kadar bahan mudah menguap 67,28%.
- 2) Jenis bahan mempengaruhi proses gasifikasi sampah organik. Gasifikasi dengan bahan bakar 100% daun dan AFR 0,5 akan menghasilkan laju kenaikan suhu yang lebih cepat dibandingkan dengan proses gasifikasi dengan bahan 50% daun maupun 100% ranting.



- 3) Gas mulai terbakar setelah proses gasifikasi berjalan 25 menit pada suhu oksidasi 650<sup>0</sup>C, suhu reduksi 350<sup>0</sup>C, dan suhu pirolisis 240<sup>0</sup>C.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2009, “*Laporan Rekapitulasi Pengangkutan Sampah di Kabupaten Sleman*”, Dinas Kimpraswilhub Kabupaten Sleman, Sleman, Yogyakarta.
- Anonim, 2019, “*Naskah Akademik Rancangan Undang-undang tentang Energi Baru Terbarukan*”, Sekretariat Komisi VII DPR RI, Jakarta.
- Anonim, 2018, “*OECD Green Growth Studies: Energy*”, OECD Publishing, Hal.1
- Anonim, 2017, “*Roadmap Pengembangan Energi Baru Terbarukan (EBT) dan Nuklir pada Pembangkit Listrik Indonesia*”, Kementerian ESDM, Jakarta.
- Bambang. S., Daniar. B. M., Dita. F. W., 2009, “*Karakterisasi Gasifikasi Biomassa Sekam Padi Menggunakan Reaktor Downdraft dengan Dua Tingkat Laluan Udara*”, Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-8, Agustus.
- Diputra, Irvandi Permana. 2010. Studi Karakteristik Pembakaran Cangkang Kelapa Sawit Menggunakan Fluidized Bed Combuster. Skripsi Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Jakarta.
- Dunlap, J.L., Payne, F.A. (1988). *Microcomputer Control of Two Stage Combustor*. Transaction of the ASAE 31(3):974-980.
- Hidayat, A., (2013). Karakterisasi Proses Gasifikasi Biomassa pada Reaktor Downdraft Sistem Batch dengan Variasi Air-Fuel Ratio (AFR) dan Ukuran Biomasa. Proposal Penelitian Laboratorium Minyak Bumi, Gas Dan Batubara, Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Hoki, M., Sato, K., Yamada Y., Umezawa, Y. (1994).The Development Study of Biomass Gasification System. Proceeding of the International Agricultural Engineering Conference .
- Hoki, M., Sato, K., Sakai, K., Tanibuchi, Y. (1995).Biomass Gasifier for Small Scale Energy Development. Proceeding of International Symposium on Automation and Robotics in Bioproduction and Processing, Kobe, Japan:317-324.
- Hoki, M., Sato, K., Miao, Y., Nishidate, J. (2002).The Study of Biomass Gasification System–Temperature Control of Rice Husk Gasifier. Proceeding of the International Agric. Engineering Conference, Wuxi, China, November 28-30, 2002:578-582.
- Jacobs, G., dan Slaus, I., 2010, “Indicator of Economics Progress: The Power of Measurement and Human Welfare”, *Cadmus Journal*, Vol.1, No.1, Hal. 53.
- Lim, K., Sims, R. (2003). *Liquid and Gaseous Biomass Fuels, Bioenergy Option for a Cleaner Environment*, Elsevier, The United Kingdom.
- McKendry, P. (2002a). *Energy Production from Biomass (Part 2): Conversion*

- Technologies. Bioresource Technology. Vol. 83:47-54.
- McKendry, P. (2002b). Energy Production from Biomass (Part 3): Gasification Technologies. Bioresource Technology. Vol. 83:55-63.
- Payne, F.A., Chandra, P.K. (1985). Mass Balance for Biomass Gasifier Combustor. Transaction of the ASAE 28(6):2037-2041
- Radar Sulteng Online, 2009, "*Sampah Indonesia 167 Ribu Ton Per Hari*". Diakses melalui <http://www.radarsulteng.com/berita/index.asp?Berita=Utama&id=489> 59, 23 Februari 2009.
- Rinovianto, 2012. Karakteristik Gasifikasi pada Updraft Double Gas Outlet Gasifier Menggunakan Bahan Bakar Kayu Karet. Skripsi Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Jakarta.
- Sandra, dkk., 2013, Konversi Cangkang Sawit menjadi Bio-oil menggunakan Katalis Ni.Mo/Lempung Cengar, Tugas Akhir Program Studi Teknik Kimia S1, Fakultas Teknik, Universitas Riau.
- Styana, Ucik Ika. 2016. Pengaruh Kecepatan Udara terhadap Suhu Reaktor dan Efisiensi Proses Gasifikasi Limbah Padat Aren. Jurnal Rekayasa Lingkungan, November 2016.