



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Prof. Dr. Herri Susanto, IPM

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI GASIFIKASI
UNTUK Mendukung
KEMANDIRIAN ENERGI DAN INDUSTRI KIMIA**

24 November 2018
Aula Barat Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada Penulis

**Orasi ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**

24 November 2018

Prof. Dr. Herri Susanto, IPM

**PENGEMBANGAN TEKNOLOGI GASIFIKASI
UNTUK Mendukung
KEMANDIRIAN ENERGI DAN INDUSTRI KIMIA**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada Penulis

Judul: PENGEMBANGAN TEKNOLOGI GASIFIKASI UNTUK Mendukung
Kemandirian Energi dan Industri Kimia
Disampaikan pada siding terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 24 November 2018

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksudkan pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Data katalog dalam terbitan

Herri Susanto

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI GASIFIKASI UNTUK Mendukung
Kemandirian Energi dan Industri Kimia
Disunting oleh Herri Susanto

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2018

vii + 96 halaman, 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-23-9

1. Teknik Kimia 2. Konversi Termal Biomassa 3. Herri Susanto

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kami panjatkan kehadiran Allah swt, atas rahmat-Nya sehingga kami dapat menyajikan buku Orasi Ilmiah ini. Perhargaan, rasa hormat dan serta terima kasih sebesar-besarnya kepada *Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung* atas perkenannya kami menyampaikan pengalaman dan kepakaran kami pada *Sidang Terbuka Forum Guru Besar*.

Buku ini disusun dari pengalaman kami dalam penelitian di laboratorium Teknik Kimia ITB, sejak 1978 dalam Proyek JTA-9a. Penelitian di laboratorium sampai saat ini telah menghasilkan delapan Doktor, serta beberapa Magister dan banyak Sarjana Teknik dalam bidang gasifikasi biomassa. Kami sampaikan pula pengalaman penerapan teknologi gasifikasi biomassa untuk listrik di beberapa daerah di Indonesia. Pada separuh bagian akhir buku ini, kami menyampaikan beberapa usulan program pemanfaatan biomassa dan batubara, bukan hanya sebagai sumber energi terbarukan, tetapi juga sebagai sumber bahan baku industri kimia.

Atas dasar pertimbangan bahwa penelitian dan pengembangan teknologi gasifikasi biomassa telah dirintis sejak lama, informasi di dalam buku ini disalin sesuai dengan yang tertulis dalam karya tulis ilmiah, laporan teknis implementasi dan kajian-kajian pemanfaatan teknologi gasifikasi pada waktu yang bersangkutan. Mohon dimaklumi jika beberapa data dan informasi yang kurang akurat atau kurang relevan pada saat ini.

Semoga buku ini dapat mendorong para peneliti di ITB untuk terus mengembangkan teknologi gasifikasi, mengingat sumber daya alam biomassa dan batubara belum dimanfaatkan dengan baik. Walaupun dengan uraian singkat, substansi buku ini diharapkan juga dapat dimanfaatkan oleh para pemangku kepentingan di Indonesia dalam upaya menuju kedaulatan energi dan bahan baku industri kimia.

Kami menyampaikan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu penelitian di laboratorium. Terima kasih juga kami sampaikan kepada berbagai pihak yang telah memberi kesempatan untuk implementasi teknologi gasifikasi biomassa sehingga kami mendapatkan pengalaman teknis dan non-teknis. Penghargaan kami sampaikan kepada institusi-institusi yang telah memberi kepercayaan dalam penyusunan berbagai kajian terkait dengan teknologi gasifikasi.

Bandung, 24 November 2018

Prof. Dr. Herri Susanto, IPM

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
2. BIOMASSA	5
2.1 Karakteristik Biomassa	5
2.2 Biomassa sebagai Sumber Energi Terbarukan	8
2.3 Fraksionasi Biomassa	11
3. PROSES GASIFIKASI BIOMASSA	14
3.1 Tahapan Proses Gasifikasi	14
3.2 Gasifier	18
3.3 Gas Hasil Gasifikasi	20
3.4 Gas Produser untuk Motor Bakar	22
3.5 Gas Produser untuk <i>Burner</i>	23
4. GASIFIKASI BIOMASSA UNTUK LISTRIK DESA	25
4.1 Implementasi Gasifikasi Limbah Kayu	25
4.2 Gasifikasi Sekam Padi	28
4.3 Program Nasional Implementasi Gasifikasi Biomassa di Indonesia	31
5. GASIFIKASI BIOMASSA UNTUK MANDIRI ENERGI	34
5.1 PLTD-Gasifikasi Janggal Jagung (2005)	34
5.2 Pengolahan Biji Jagung Mandiri Energi	36

5.3	PLTD-Gasifikasi Pelepah Sawit	38
5.4	Potensi Implementasi Teknologi Gasifikasi di Karimunjawa	39
6.	BIOMASSA UNTUK LISTRIK 500 kW	41
6.1	Ketersediaan Biomassa	41
6.2	Rangkaian Sistem Pemroses	42
6.3	Kajian Kelayakan Ekonomi	44
6.4	Pola Bisnis Biomassa menjadi Listrik	45
7.	PRODUKSI DME DARI BIOMASSA SAWIT	51
7.1	Penentuan Skala Produksi	52
7.2	Rangkaian Sistem Pemroses Sintesis DME	52
7.3	Kajian Ekonomi	55
7.4	Kajian Sensitivitas Ekonomi	57
7.5	Peluang Pengembangan	68
8.	PEMILIHAN TEKNIK GASIFIKASI BATUBARA	60
8.1	Multi Kriteria Pemilihan Teknik Gasifikasi	60
8.2	Kriteria Sifat Batubara	64
8.3	Kriteria Kinerja Proses Gasifikasi	66
8.4	Pembobotan Antar Kriteria	67
8.5	Kriteria Pengalaman Operasional dan Komersialisasi	68
8.6	Simulasi Termodinamika	72
8.7	Peluang Pengembangan	73

9. INDUSTRI DME BERBASIS BATUBARA	74
9.1 Neraca Massa dan Energi	76
9.2 Dasar Kajian Ekonomi	77
9.3 Kajian Ekonomi Metanol ke DME	78
9.4 Kajian Ekonomi Batubara ke Metanol	80
9.5 Peluang Gasifikasi Batubara dalam Produksi Metanol/DME	82
PENUTUP	83
UCAPAN TERIMAKASIH	85
BIODATA	87

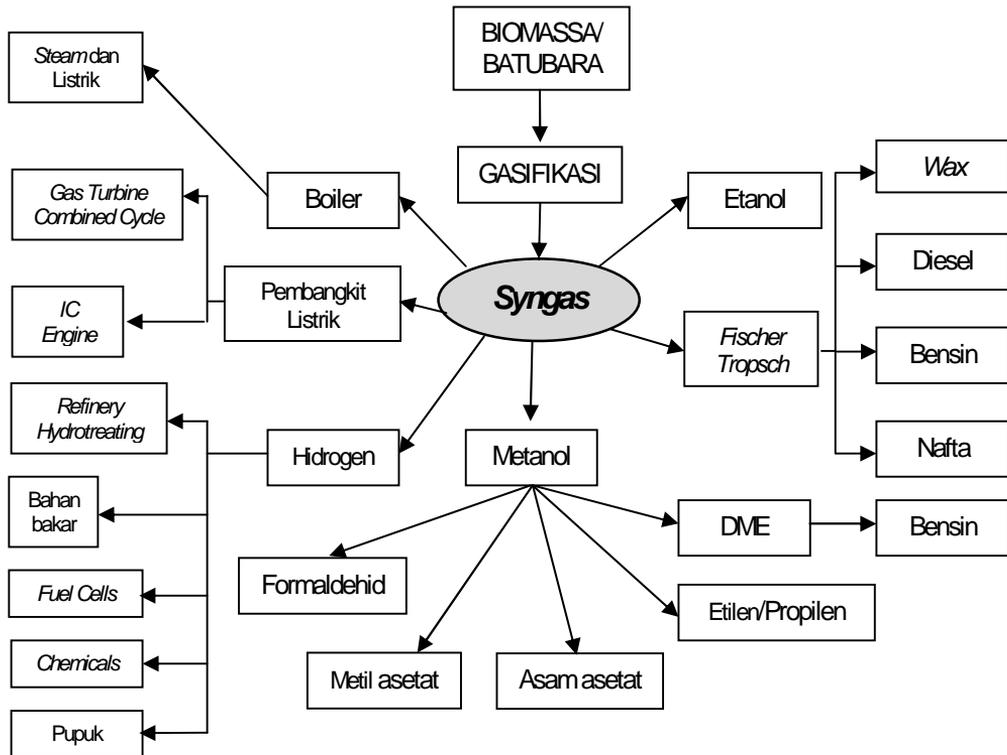
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI GASIFIKASI UNTUK MENDUKUNG KEMANDIRIAN ENERGI DAN INDUSTRI KIMIA

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan makin menipisnya cadangan sumber energi fosil dan kesadaran akan kelestarian lingkungan, penelitian dan pengembangan teknologi-teknologi konversi energi biomassa dan batubara mendapat perhatian kembali. Pasang-surut teknologi konversi biomassa, khususnya proses gasifikasi dipengaruhi oleh kekawatiran pada kelangkaan dan kenaikan harga minyak dan gas bumi (terkait juga dengan *Perang Dunia-I* dan *Perang Teluk*).

Gasifikasi adalah salah satu proses konversi termal biomassa dan batubara menjadi gas mempan bakar (*combustable gases*). *Carbonaceous solid fuels* tersebut direaksikan dengan oksigen, udara, *steam*, atau campurannya menjadi terutama: karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metan (CH₄), karbondioksida (CO₂), sedikit hidrokarbon (etena, etana). Campuran gas-gas ini lebih fleksibel atau lebih praktis daripada bahan padat asalnya untuk digunakan sebagai sumber energi panas maupun sumber bahan baku industri kimia seperti sebagai bahan baku pembuatan metanol, dimetil eter, etilen dan propilen, amonia/urea, *Fischer Tropsch fuel*, SNG (*synthetic natural gas*), dan bahan bakar hidrogen (Gambar 1.1). Gas hasil gasifikasi dapat dimanfaatkan langsung sebagai bahan bakar *internal combustion engines*: motor diesel, *gas engine* dan bahkan turbin gas. Proses konversi termal biomassa atau

batubara melalui proses gasifikasi memiliki kelebihan dibandingkan terhadap proses pembakaran yang hanya menghasilkan panas.



Gambar 1.1 Produk turunan gas hasil gasifikasi

Penelitian gasifikasi di Teknik Kimia ITB dimulai pada tahun 1978, tercakup dalam kerja sama antara Teknik Kimia ITB dengan TH- Delft dan TH-Twente, Belanda. Penelitian dan pengembangan gasifikasi biomassa di dunia pada waktu tersebut didorong oleh kelangkaan minyak bumi akibat Perang Teluk, dan penelitian gasifikasi di TK-ITB mungkin yang pertama di Indonesia. Teknologi gasifikasi biomassa untuk listrik desa berhasil dilaksanakan dengan sukses pada tahun 1984 sampai dengan sekitar 1995. Proyek bantuan presiden (*BANPRES*)

dicanangkan untuk mengimplementasikan teknologi ini di beberapa daerah terpencil. Keberhasilan implementasi ini juga membawa nama ITB dikenal di seluruh dunia dalam pengembangan teknologi gasifikasi biomassa. *Producer Gas Conference* dilaksanakan di Bandung pada tahun 1985, dan dilanjutkan dengan program *World Bank Monitoring on Biomass Gasification* untuk mengevaluasi unit-unit gasifikasi biomassa untuk listrik daerah terpencil di Indonesia. Pada masa tersebut banyak institusi pemerintah maupun *non-government organizations* masuk ke dalam kegiatan gasifikasi biomassa ini. Pengembangan teknologi gasifikasi biomassa di Indonesia surut sebagai dampak melimpahnya minyak bumi dan gas alam mulai dasawarsa 1990.

Perhatian kembali pada teknologi gasifikasi muncul kembali pada mulai dasawarsa 2010, walaupun masih penuh keragu-raguan pada kehandalan proses dan daya tarik ekonomi. Penelitian dan pengembangan gasifikasi biomassa dan batubara kembali mendapat perhatian oleh berbagai pihak, dan juga di ITB. Teknologi gasifikasi bukan hanya untuk bahan bakar motor-torak, tetapi juga untuk menghasilkan gas sintesis yang selanjutnya dapat dikonversi menjadi berbagai senyawa kimia yang akan dijadikan komoditi andalan oleh pemerintah, yaitu DME.

Sepuluh awal buku ini merupakan kilas-balik perjalanan panjang upaya implementasi teknologi gasifikasi biomassa untuk listrik desa pada masa proyek JTA-9a ITB sampai dengan tahun 1995an. Pada masa ini, TK-ITB bekerja sama dengan: Kementrian Kehutanan; PTPN XVIII-

Semarang; PT Boma Bisma Indra, Surabaya; CV Darmawan, Bandung, serta beberapa pemerintah daerah. Bagian berikutnya adalah pengalaman lapangan implementasi sejak kira-kira 2005, setelah teknologi gasifikasi biomass mendapat perhatian kembali dimulai yang diprakarsai oleh PTP-Nusantara XIII, Kebun Pelaihari, Pontianak; Direktorat LPE/EBTKE, dan didukung oleh *Pasadena Engineering* dan lain-lainnya.

Bagian akhir buku orasi ilmiah ini merupakan cuplikan laporan kerja sama ITB melalui LAPI dengan *PT Pupuk Sriwijaya*, *Perusahaan Gas Negara*, dan *PT Bukit Asam*. Substansi bagian akhir buku ini adalah pemanfaatan teknologi gasifikasi batubara dan juga biomassa untuk menghasilkan komoditi yang diperlukan di Indonesia.

2. BIOMASSA

2.1 Karakteristik Biomassa

Biomassa merupakan sebuah istilah untuk semua bahan organik yang berasal dari tumbuh-tumbuhan, termasuk limbah tanaman budidaya, *algae* dan juga sampah organik. Biomassa dapat dibedakan dalam tiga kelompok besar, yaitu biomassa kayu, biomassa bukan kayu, dan biomassa sekunder. *Energy Europe Insitute* membagi biomassa ke dalam empat kategori yaitu: (i) limbah pertanian, (ii) limbah kehutanan, (iii) tanaman kebun energi, dan (iv) limbah organik.

Biomassa sangat beragam dan berbeda dalam hal sifat kimia, sifat fisis, kadar air, kekuatan mekanis dan sebagainya. Biomassa merupakan sumber energi terbarukan, tetapi kualitasnya rendah. Sehingga teknologi konversi termal biomassa beragam tergantung pemanfaatannya dan relatif rumit.

Karakteristik utama biomassa terkait dengan proses gasifikasi terdiri dari analisis proksimat (kadar air, abu, *volatile matter*, *fixed carbon*), analisis ultimat (kadar C, H, O, N, dan S), *ash fusion temperature*, sifat mempan gerus/ *Hardgrove Grindability Index* (HGI), dan *caking/ swelling index*. Nilai-nilai parameter ini disajikan secara spesifik pada topik-topik terkait.

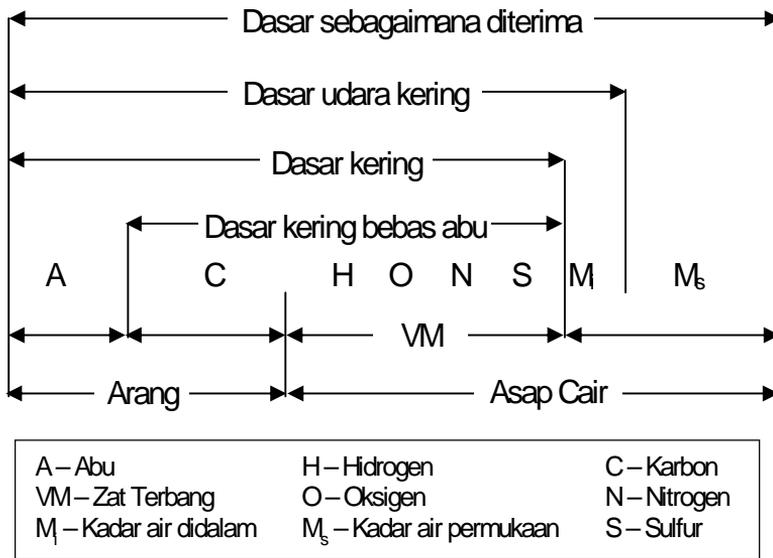
Kadar air dalam biomassa terdiri dari kadar air bebas (*surface moisture containt*) dan kadar air terikat (*inherent moisture containt*). Kadar air bebas akan hilang pada pengeringan dan berubah dengan

kelembaban udara. Sedangkan kadar air terikat berada di dalam pori-pori biomassa dan dapat dihilangkan dengan teknik pengeringan.

Abu adalah bahan-bahan anorganik yang masih tersisa setelah biomassa dibakar. Abu terdiri dari terutama: silika, aluminium, besi, kalsium, magnesium, titanium, natrium, dan kalium. Kadar abu akan mempengaruhi biaya penanganan abu pada akhir proses gasifikasi. Bahkan pada beberapa teknologi konversi biomassa kandungan abu ini sangat perlu diperhatikan karena dapat mengganggu proses.

Zat terbang (*volatile matter*) adalah senyawa-senyawa yang dilepas biomassa saat mengalami pemanggangan atau pemanasan. Zat terbang terdiri dari H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , hidrokarbon ringan, tar, ammonia, senyawa sulfur, dan senyawa oksigen. Karbon terikat (*fixed carbon*) adalah padatan yang masih tersisa bersama dengan abu setelah biomassa melewati proses pirolisis. Kandungan utama karbon terikat adalah elemen C.

Nilai kalor (*Heating Value*, juga sering disebut *panas pembakaran*) adalah energi yang dilepaskan saat pembakaran biomassa secara sempurna dan stoikiometrik. Nilai kalor dapat dinyatakan dalam terminologi *higher heating value* atau *gross calorific value* (HHV atau GHV) dan *lower heating value* atau *net calorific value* (LHV atau NHV). Perbedaan nilai HHV dan LHV adalah panas pengembunan air hasil pembakaran. Nilai-nilai HHV atau LHV biomassa dicatat pada temperatur referensi 25°C.



Gambar 2.1 Hubungan analisa ultimat dan analisa proksimat pada berbagai basis pernyataan (Basu, 2013)

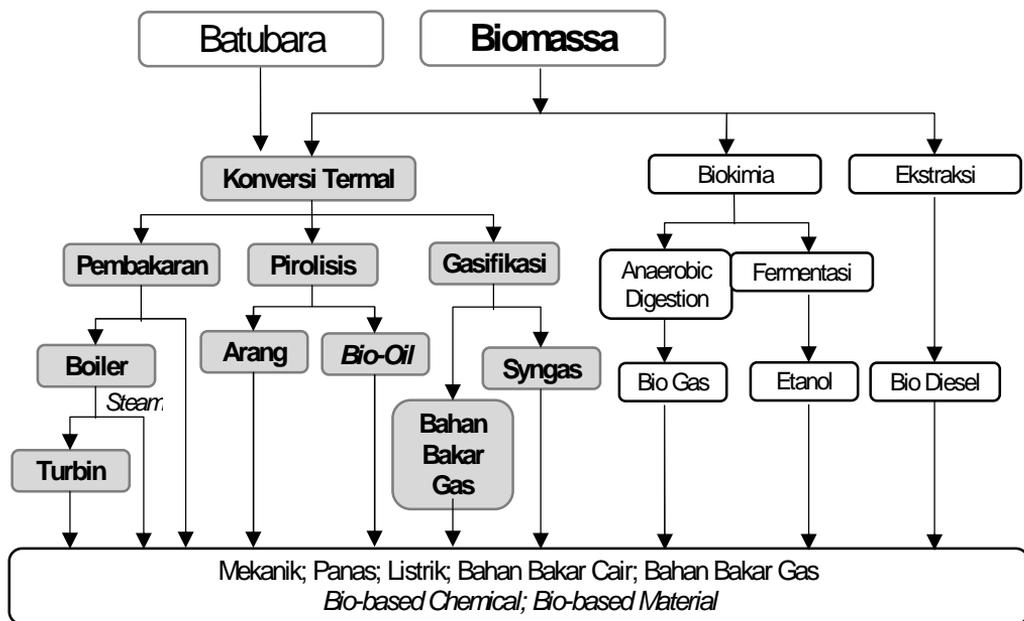
Karakteristik abu pada temperatur tinggi merupakan salah satu faktor kritis dalam pemilihan teknik gasifikasi. Pada jenis gasifier dengan pengeluaran abu *slagging*, temperatur operasi gasifier harus berada diatas *Ash Fusion Temperature (AFT)*. Sedangkan pada jenis gasifier dengan pengeluaran abu kering, temperatur operasi gasifier harus berada dibawah *AFT*. Pada pengalaman pengembangan gasifikasi sekam padi, karakteristik abu pada temperatur proses gasifikasi (600 – 800°C) dapat mengganggu kehandalan operasional.

Biomassa dan batubara memiliki sifat ketahanan gerus yang dinyatakan dengan *Hardgrove Grindability Index (HGI)*. Semakin tinggi HGI berarti bahan tersebut semakin mudah untuk digerus. Nilai HGI ini terkait dengan kebutuhan energi untuk pengolahan awal (*pre-*

treatment) biomassa dan batubara sebelum proses gasifikasi. *Caking* atau *Swelling Index* adalah kemungkinan pengembangan partikel ketika dipanaskan. Pada kebanyakan biomassa, tidak menunjukkan sifat ini.

2.2 Biomassa sebagai Sumber Energi Terbarukan

Biomassa dapat dikonversi menjadi energi melalui tiga alur proses yaitu (Gambar 2.2): termokimia, biokimia dan ekstraksi biji yang mengandung minyak. Alur termokimia atau *konversi termal* meliputi: pembakaran, *gasifikasi*, pirolisis, torefaksi dan hidrotermal.



Gambar 2.2 Konversi biomassa

Pembakaran mengubah energi dalam (panas pembakaran) bahan bakar padat menjadi panas. Selain energi panas, pembakaran juga menghasilkan gas cerobong (*flue gas*): CO₂ dan H₂O (uap air). Panas

pembakaran selanjutnya dimanfaatkan untuk produksi kukus (*steam*) untuk pemanas proses atau fluida kerja turbin-kukus. Panas hasil pembakaran banyak dimanfaatkan untuk reaksi kimia, misalnya di dalam tungku pemanggangan keramik, kiln semen dan sebagainya.

Proses pirolisis ditujukan semula untuk mendapatkan bahan bakar padat, arang dengan kualitas lebih tinggi dari biomassa asalnya. Hasil degradasi biomassa dalam proses pirolisis juga berupa cairan senyawa organik (tar, hidrokarbon berat dan asam-asam organik), dan gas-gas (CO, CO₂, H₂O, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, dll). Fraksi masing-masing produk pirolisis tergantung pada: temperatur akhir pirolisis, dan laju pemanasan (Tabel 2.1). Akhir-akhir ini teknik pirolisis dikembangkan untuk mendapatkan lebih banyak fraksi cair atau fraksi gas.

Dengan elemen utama karbon, hidrogen dan oksigen, hampir semua jenis biomassa secara teoritik dapat dimanfaatkan sebagai umpan gasifikasi. Salah satu tipe gasifier untuk biomassa adalah *down draft gasifer*. Sifat-sifat biomassa yang perlu diperhatikan untuk gasifier ini antara lain adalah sebagai berikut.

- a. Kadar air biomassa tidak lebih dari 30%. Kadar air biomassa dapat diturunkan dengan pengeringan. Biomassa *kering udara* memiliki kadar air berkisar antara 10 – 15%.
- b. Bentuk partikel mendekati bulat atau kubus. Bentuk partikel pipih atau serbuk mengakibatkan hambatan aliran gas di dalam reaktor.
- c. Ukuran partikel biomassa umpan gasifikasi antara 0,5 – 5,0 cm.
- d. *Bulk density* umpan gasifikasi sebaiknya minimum 250 kg/m².

Biomassa dengan *bulk density* terlalu rendah mengakibatkan temperatur gasifikasi kurang tinggi.

- e. Biomassa umumnya memiliki kadar abu tidak lebih dari 1%, kecuali sekam padi yang sampai sekitar 20%.

Tabel 2.1 Karakteristik Proses Dekomposisi Termal

No	Parameter	Karbonisasi	Torefaksi	Pirolisis cepat
1.	Waktu tinggal	beberapa hari	10-60 menit	beberapa detik
2.	Laju pemanasan	>50°C/menit	<50°C/menit	1000-10000°C/detik
3.	Temperatur akhir	>400°C	280°C	±500°C
4.	Produk	<i>Charcoal</i>	<i>Torrefied biomass</i>	<i>Bio-oil</i>

Pengelompokan biomassa untuk kesesuaiannya dalam *down draft gasifier* adalah sebagai berikut (disajikan pula pada Tabel 2.2).

- a. Jenis-1: partikel besar, *particle density* tinggi, kadar air < 30%, kadar abu rendah. Misalnya: limbah kayu, bongkol jagung, batok kelapa.
- b. Jenis-2: partikel kecil, kadar air atau abu tinggi, *particle density* rendah. Misalnya sekam padi, batok, tandan kosong sawit, kulit biji jarak, kulit kacang, serbuk gergaji.
- c. Jenis-3: bentuk serampangan, basah sekali. Misalnya: sampah kota (*solid municipal waste*).
- d. Jenis-4: kebun energi (*fast growing tree*) atau tumpang sari. Misalnya: lamtoro-gung, turi dan lain-lain.

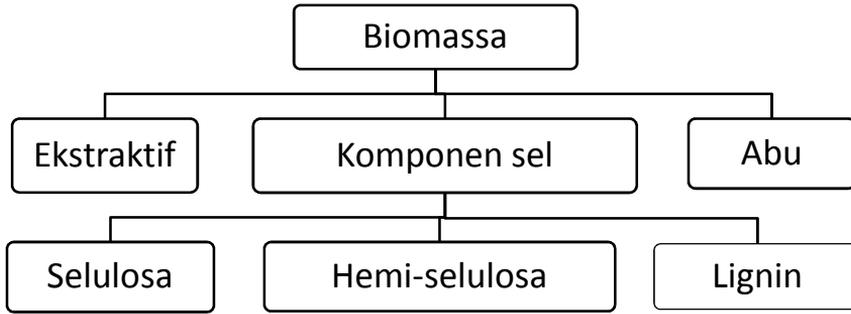
Tabel 2.2 Karakteristik Limbah Pertanian dan Perkebunan untuk Gasifikasi (*nilai kalor atas dasar biomassa kering udara*)

No	jenis biomassa	jumlah	nilai kalor kJ/kg	sifat proses dalam <i>fixed bed gasifier</i>
1.	sekam padi	0,25x gabah	12.800	sulit digasifikasi
2.	bonggol jagung	6-8x jagung	14.800	mudah digasifikasi
3.	batang singkong	6 x singkong	16.350	agak sulit digasifikasi
4.	batok kelapa	0,1 x buah kelapa		mudah digasifikasi
5.	sabut kelapa	0,35x buah kelapa		dapat digasifikasi
6.	tandan sawit	1x produk CPO	15.500	sulit digasifikasi
7.	cangkang sawit	0,5x CPO	15.200	dapat digasifikasi
8.	limbah kebunkaret	penjarangan, peremajaan	22.500	mudah digasifikasi
9.	serbuk gergaji	sisa penebangan	22.500	mudah digasifikasi
10.	kayu pinus	penebangan	16.980	mudah digasifikasi
11.	lamtoro-gung	penebangan		pohon energi

Persyaratan umpan gasifikasi tersebut di atas, sering kali didekati dengan pengolahan awal biomassa seperti: pengeringan, pemotongan *pelletization* atau *granulation*. Biomassa umpan gasifikasi harus tersedia dalam jumlah yang cukup untuk secara kontinyu.

2.2 Fraksionasi Biomassa

Biomassa merupakan campuran kompleks material organik seperti karbohidrat, lemak, dan protein, serta dengan mineral dalam jumlah yang sedikit seperti natrium, fosfor, kalsium, dan besi. Senyawa utama biomassa adalah: selulosa, hemi-selulosa, dan lignin (Gambar 2.3).



Gambar 2.3 Komponen biomassa

2.2.1 Selulosa

Selulosa merupakan senyawa organik yang paling umum dijumpai di alam. Kandungan selulosa di dalam biomassa sampai 90%, misalnya dalam kapas, dan sampai sekitar 33% dalam sebagian besar tanaman lain. Rumus umum selulosa adalah $C_6H_{10}O_5)_n$ dengan panjang polimer, n , sampai 10.000, dengan unit utama molekul glukosa.

Selulosa di dalam kayu merupakan komponen utama dengan kadar sekitar 40-44% kering berat. Selulosa adalah penghasil tar selama pirolisis biomassa.

2.2.2 Hemi-selulosa

Hemi-selulosa adalah polimer dari senyawa gula dengan lima atom C. Hemi-selulosa menempati fraksi biomassa pada rentang 15-35%. Di dalam proses pirolisis, hemi-selulosa mengalami degradasi paling awal dibandingkan terhadap selulosa dan lignin. Hidrolisis hemi-selulosa (perebusan sampai temperatur 200°C) dapat menghasilkan: gula C5 (arabinosa dll), dan furfural (pelarut dan bahan baku industri).

2.2.3 Lignin

Lignin merupakan makromolekul senyawa dasar fenolik yang merupakan senyawa pengikat dalam struktur biomassa. Salah satu kegunaan lignin adalah ligno-sulfonat, sebuah jenis *surface active agent* yang mungkin dapat dimanfaatkan dalam kestabilan lumpur pengeboran. Penelitian terhadap molekul dasar lignin sedang marak akhir-akhir ini.

Lignin tahan pengaruh termal, jadi degrasi lignin terjadi pada akhir proses pirolisis (350-500°C). Degradasi lignin dapat menghasilkan senyawa fenolik yang berbahaya bagi kesehatan, dan komponen tar yang terbawa gas hasil gasifikasi. Tar dan senyawa fenolik dapat mengalami depolimerisasi ketika kontak dengan udara, yang membentuk deposit dalam saluran gas. Penelitian gasifikasi tidak terlepas dari upaya penyisihan tar dari gas hasil; atau pengurangan seminimum mungkin terbentuk di dalam proses gasifikasi agar tidak terbawa gas hasil.

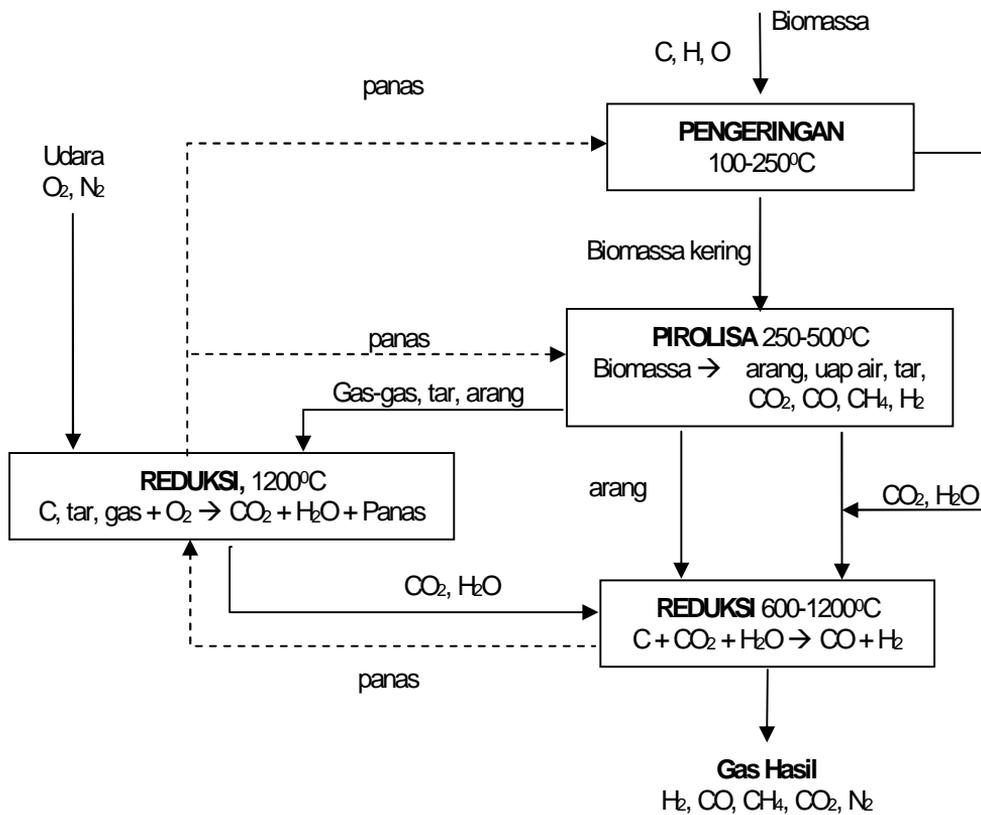
3. PROSES GASIFIKASI BIOMASSA

Secara sederhana proses gasifikasi biomassa dapat dikatakan sebagai reaksi kimia pada temperatur tinggi antara biomassa dengan agen gasifikasi (*gasifying agent*) untuk menghasilkan gas bahan bakar yang disebut *gas producer*. *Gasifying agent* dapat berupa udara atau O₂ atau juga dicampur dengan uap air. Pada gasifikasi biomassa skala tepat-guna, agen gasifikasi adalah udara yang murah.

3.1 Tahapan Proses Gasifikasi

Walaupun mekanisme dari proses gasifikasi berbeda untuk setiap teknologi proses, partikel biomassa akan mengalami empat tahap utama, yaitu (a) pengeringan; (b) pirolisis; (c) pembakaran dan (d) reduksi. Skema tahapan proses disajikan pada Gambar 3.1.

- 1) Pengeringan terjadi pada temperatur sekitar 100-120°C. Pengeringan ini bertujuan menghilangkan air yang terdapat pada padatan yang direaksikan. Proses ini akan menguapkan sebagian kandungan air dalam bahan baku.
- 2) Bila temperatur mencapai 250°C, biomassa mulai mengalami proses pirolisis menghasilkan gas-gas, uap senyawa organik, tar dan arang. Proses pirolisis ini berlangsung sampai temperatur 500°C. Pada laju pemanasan lambat, pirolisa biomassa akan menghasilkan fraksi arang yang tinggi, serta banyak tar dan gas CH₄. Sedangkan laju pemanasan tinggi, selulosa sebagian terkonversi menjadi hidrokarbon rantai panjang atau olefin dan sedikit arang.



Gambar 3. 1 Tahapan Proses Gasifikasi

3) Tahap reduksi merupakan proses utama pembentukan gas-gas mempan bakar (*combustible gasses*). Pada tempertur di atas 600°C, arang bereaksi dengan uap air (H₂O) dan karbon dioksida (CO₂) untuk menghasilkan hidrogen (H₂) dan karbon monoksida (CO), serta senyawa lain. Pada tahap reduksi berlangsung reaksi-reaksi kesetimbangan yang secara keseluruhan endoterm.





4) Tahap oksidasi merupakan bagian proses untuk mensuplai panas yang dibutuhkan dalam ketiga proses diatas. Proses oksidasi (pembakaran) ini dapat mencapai temperatur 1200°C dan dimanfaatkan untuk proses perekahan tar. Reaksi oksidasi yang berlangsung adalah :



Proses gasifikasi biasanya dilaksanakan secara *autothermal*, yaitu panas untuk reaksi-reaksi endotermal diatas dapat disuplai sepenuhnya dengan panas reaksi eksotermal pembakaran sebagian bahan baku. Perhitungan termodinamika sering kali digunakan untuk memprediksi komposisi gas hasil gasifikasi. Banyak model-model termodinamika, tetapi secara sederhana simulasi cukup menggunakan salah satu dari model yang sudah dikenal sejak lama yaitu *Schlapfer* atau *Gumz model*.

Komposisi gas hasil gasifikasi tentu saja sangat tergantung pada komposisi elemen biomassa. Komposisi gas hasil gasifikasi bisa jauh berbeda antara biomassa, arang atau batubara. Gasifikasi arang atau batubara akan menghasilkan gas dengan kandungan CO lebih banyak daripada biomassa. Jika diinginkan gas hasil mengandung banyak H₂, gasifikasi dilakukan dengan agen gasifikasi H₂O (*steam gasification*).

Jadi, jenis dan komposisi agen gasifikasi sangat menentukan komposisi gas hasil gasifikasi. Gasifikasi dengan udara (21% O₂ dan 79%

N₂) akan menghasilkan gas dengan kandungan N₂ tinggi, dan panas pembakarannya antara 3000-5000 kJ/Nm³. Gas ini disebut gas produser (*producer gas*, atau *low heating value gas*). Gas produser tidak ekonomis untuk ditransportasikan, karena itu pemakaiannya setempat (*in situ*), misalnya gas langsung dimasukkan ke motor bakar untuk mengganti bahan bakar cair.

Jika gas O₂ digunakan sebagai agen gasifikasi, prosesnya menghasilkan gas dengan sedikit kandungan N₂. Tetapi gasifikasi dengan O₂ memiliki resiko terjadinya temperatur tinggi yang dapat merusak bagian dalam gasifier. Gasifikasi dengan kukus menghasilkan gas dengan kandungan H₂ tinggi, dengan HHV mencapai 10.000 kJ/Nm³, Gas semacam ini sering disebut *medium heating value gas* (sebagai pembanding, HHV gas alam sekitar 30000 kJ/Nm³).

Sebagaimana sifat reaksinya, agen gasifikasi sering berupa campuran kukus (*steam*) dan O₂. Kedua agen gasifikasi ini menjadikan reaksi gasifikasi menjadi *autothermal* (tidak endotermik dan tidak eksotermik), dan temperatur gasifikasi dapat diatur dengan baik. Karena gas hasil gasifikasi mengandung banyak H₂ dan CO, gas hasil ini sering disebut gas sintesis (*synthesis gas*) yang dapat digunakan sebagai bahan baku berbagai senyawa kimia turunannya.

3.2 Gasifier

Proses gasifikasi berlangsung dalam reaktor yang disebut gasifier. Berdasarkan kondisi kelakuan biomassa atau batubara di dalam gasifier, gasifier dikelompokkan dalam tiga kelompok berikut ini.

- a. *Fixed bed*
- b. *Fluidized bed*
- c. *Entrained flow*

Fixed bed gasifier banyak digunakan pada skala kecil, karena pengoperasian dan pembuatannya relatif mudah. Gasifier jenis ini cocok untuk mengolah biomassa



atau batubara dengan bentuk partikel seragam dan bagus, seperti: serpih kayu, blok kayu atau pelet. *Fixed bed gasifier* biasanya berupa tungku vertikal dan tahapan proses dapat diidentifikasi. Gasifier *fixed bed* dapat dikelompokkan lagi menjadi tiga tipe berdasarkan aliran bahan baku yang diumpankan antara lain: *updraft*, *down draft*, dan *cross draft gasifier*.

Pada gasifier *updraft fixed bed*, gas reaktan mengalir ke atas melalui unggun biomassa atau arang. Panas yang dihasilkan pada bagian ini akan mengalir ke bagian atas reaktor. Panas ini selanjutnya akan dimanfaatkan untuk proses reduksi, pirolisa dan pengeringan umpan. Kandungan tar gas produser pada gasifier tipe ini biasanya tinggi.

Pada gasifier tipe *down draft*, udara dihembuskan melalui satu atau lebih nosel di bagian tengah gasifier, daerah oksidasi. Gas hasil pirolisis dan tar melewati daerah pembakaran ini, sehingga dapat diharapkan mengalami perengkahan termal. Karena itu, gas produser dari gasifier tipe ini diharapkan untuk memiliki kandungan tar yang relatif lebih rendah daripada tipe *up draft*.

Pada gasifier tipe *crossdraft*, udara dihembuskan melalui nosel horisontal ke dalam gasifier. Umpan gasifier diumpankan melalui bagian atas atau samping reaktor. Tar dari zona pirolisa tidak seluruhnya akan melalui zona oksidasi. Kontak tar dengan oksigen berlangsung sangat singkat. Hal ini menyebabkan gas produser masih memiliki kandungan tar yang cukup tinggi. Gas hasil gasifikasi harus segera dibakar pada keluaran gasifier.

Kapasitas sebuah unit gasifikasi biomassa sebaiknya tidak terlalu besar (sampai dengan 200 kg/jam), karena biomassa di Indonesia umumnya terkumpul dalam jumlah relatif kecil. Jenis gasifier yang sesuai untuk memproses biomassa adalah *down-draft fixed bed gasifier*, dimana biomassa turun pelahan-lahan mengikuti laju reaksi gasifikasi di bagian bawah gasifier.

Di bagian tengah gasifier, terdapat penyempitan penampang yang disebut *tenggorokan*. Udara dimasukkan pada lokasi sedikit di atas tenggorokan. Udara atau gas hasil pembakaran mengalir ke bawah searah dengan gerakan turun bahan padat (arang atau biomassa setengah terpirolisis). Ruang di sekitar titik pemasukan udara dan

tenggorokan dinamai ruang oksidasi dengan temperatur yang diharapkan cukup tinggi untuk konversi tar.

Kapasitas sebuah *downdraft fixed bed gasifier* sering dinyatakan dalam besaran berikut:

- a. atas dasar luas penampang tenggorokan = $\pm 2000 \text{ kg}/(\text{jam.m}^2)$
- b. atas dasar luas penampang ruang reduksi = $\pm 300 \text{ kg}/(\text{jam.m}^2)$

Gasifier untuk sekam padi dibuat tanpa tenggorokan untuk menghindari penggumpalan abu (*ash sintering*), akibat rendahnya titik leleh abu sekam. Jika kapasitasnya relatif besar, gasifikasi sekam padi, serbuk gergaji atau biomassa dengan ukuran partikel kecil sebaiknya dilakukan di dalam *fluidized bed gasifier*.

Gas produser (hasil dari gasifikasi) masih mengandung kotoran dan temperaturnya tinggi, karena itu perlu pengolahan lebih lanjut:

- a. siklon untuk memisahkan arang dan abu
- b. filter untuk menyaring partikel halus
- c. pendingin gas yang sekaligus berfungsi sebagai pengembunan uap air dan tar
- d. pengendap air dan tar.

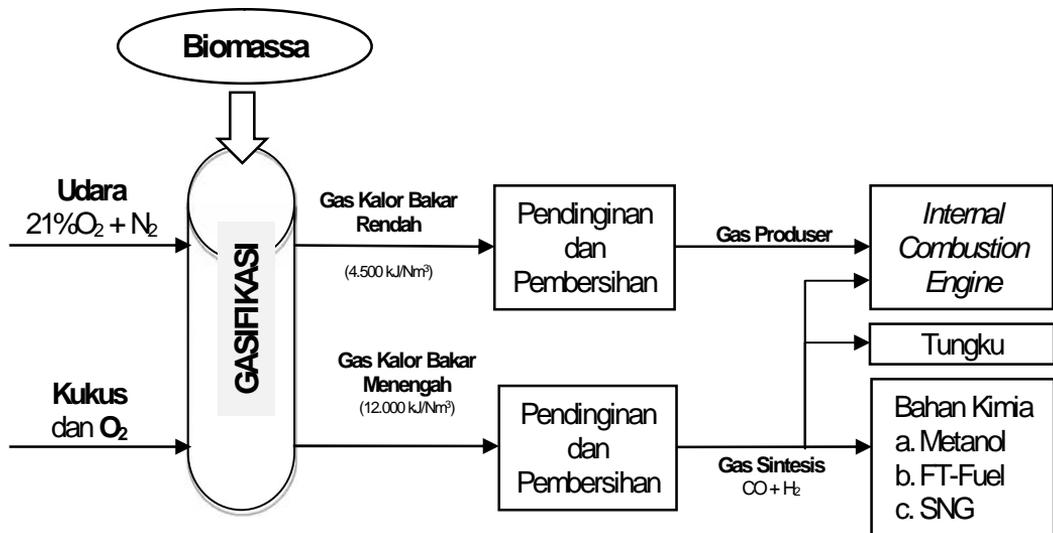
Hal penting yang perlu ditekankan adalah kedisiplinan operator untuk menjalankan unit gasifikasi sesuai prosedur.

3.3 Gas Hasil Gasifikasi

Gas produser terdiri dari gas-gas mempan bakar yaitu CO , H_2 , dan CH_4 , serta gas-gas tidak mempan bakar CO_2 , N_2 dan uap air.

Contoh komposisi produser hasil gasifikasi beberapa biomassa disajikan dalam Tabel 3.1 (data pengalaman di Teknik Kimia ITB). Komposisi gas ini sangat tergantung pada beberapa faktor berikut ini.

- Jenis biomassa terutama komposisi elemen: C, H, O, dan juga kadar air.
- Kondisi-kondisi proses gasifikasi, misalnya temperatur proses yang rendah (isolasi panas jelek) mengakibatkan kualitas gas produser rendah.
- Bentuk dan ukuran partikel biomassa lebih banyak menentukan teknik reaksi gasifikasi.



Gambar 3.2 Alur terkait dengan agen gasifikasi

Karena gasifikasi biomassa skala kecil umumnya dilaksanakan dengan udara sebagai *gasifying agent*, gas produser mengandung banyak N₂ dan panas pembakarannya relatif rendah (Tabel 3.1).

Walaupun demikian, gas produser ini dapat digunakan sebagai bahan bakar *burner* maupun motor bakar busi atau diesel.

3.4 Gas Produser untuk Motor Bakar

Gas produser dapat digunakan sebagai bahan bakar motor busi maupun motor diesel. Tetapi program gasifikasi di Teknik Kimia FTI-ITB diarahkan pada pemanfaatan gas produser dalam motor diesel, mengingat motor bakar jenis ini telah populer sebagai *stationary prime mover* di Indonesia. Tidak seperti motor busi, motor diesel dengan bahan bakar gas produser selalu memerlukan sedikit solar sebagai penyulut. Operasi semacam ini dinamai *dual fuel*, dan penghematan solar dapat mencapai 70% atau lebih.

Tabel 3.1 Contoh komposisi gas produser (TK-ITB, 1983-1995)

No	Biomassa	Batok kelapa	Kayu-karet	Batok sawit	Sekam padi
1	bentuk	pipih	balok	pipih	Jarum
2	Ukuran, cm	2 x 2	2 x 2 x 5	2 x 1	1
3	Gas produser	komposisi (dasar kering), fraksi mol			
	CO	25,0%	18,0%	20,4%	20,1%
	H ₂	12,0%	16,0%	11,1%	11,3%
	CH ₄	1,5%	1,8%	0,8%	1,8%
	CO ₂	10,0%	10,3%	9,8%	11,4%
	N ₂	51,5%	54,0%	57,9%	55,4%
4	HHV, kJ/Nm ³	4900	4600	4100	4350

Dengan ketersediaan motor bakar gas (*gas engine*) dengan kapasitas kecil saat ini, gabungan unit gasifikasi dengan motor bakar

gas dapat dikembangkan untuk mendapatkan substitusi bahan bakar minyak sepenuhnya.

Di samping panas pembakarannya minimum 3500 kJ/Nm^3 , gas produser masuk motor bakar harus memenuhi persyaratan berikut ini:

- a. kandungan tar tidak lebih dari 100 mg/m^3
- b. kandungan debu maksimum 50 mg/m^3
- c. ukuran partikel debu maksimum $10 \mu\text{m}$.

Daya maksimum motor bakar dengan bahan bakar utama gas produser turun (*gas derating*) sampai menjadi kira-kira 70% dari daya maksimum-aslinya. Motor bakar dengan bahan bakar gas hasil gasifikasi sebaiknya dipilih yang mempunyai kecepatan nominal 1500 rpm. Satu liter solar dapat digantikan dengan $7,5 \text{ m}^3$ gas produser yang diperoleh dari proses gasifikasi 4 kg kayu atau 6 kg sekam.

Gas produser masuk motor bakar harus pada temperatur tidak lebih dari 40°C agar densitas energinya tidak terlalu rendah. Untuk memenuhi persyaratan ini, sistem pembersih dan sekaligus pendingin gas sangat penting. Penelitian dengan topik *tar removal* masih sangat terbuka sampai saat ini, diantaranya penelitian *catalytic tar cracking*.

3.5 Gas Produser untuk *Burner*

Gas produser dengan panas pembakaran minimum 3500 kJ/Nm^3 dapat dengan mudah dibakar dalam *burner* yang selanjutnya digunakan sebagai sumber panas dalam berbagai kegiatan produksi misalnya: pembakaran keramik dan pengeringan produk-produk pertanian. Gas

produser tentu saja juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar rumah tangga. Tetapi karena nilai kalornya rendah, sistem distribusi gas produser dari pembangkit gas produser ke rumah-rumah sebaiknya tidak terlalu jauh. Saluran gas dengan pipa paltik dapat digunakan untuk distribusi gas satu kampung.

Secara teoritik, pembakaran 1 m³ gas produser memerlukan 1,2 m³ udara. Dari eksperimen di TK-ITB, burner pembakaran gas produser memiliki *heating rate* 200 – 700 kJ/(cm².s) dan *flame speed* antara 2 – 5 m/s tergantung pada *air/fuel ratio*. Nilai-nilai ini penting dalam perancangan burner gas produser. Api hasil pembakaran adiabatik yang dapat mencapai 1300°C. Tetapi pada prakteknya, temperatur pembakaran gas produser hanya berkisar antara 700-1000°C.

Gas hasil gasifikasi digunakan untuk bahan bakar boiler, menggantikan bahan bakar konvensional minyak atau gas LPG. Gas untuk penggunaan ini tidak menuntut persyaratan terlalu ketat dalam kaitannya dengan kadar tar. Karena uap tar dapat langsung ikut terbakar, dan bahkan menimbulkan api berpedar yang menambah laju perpindahan panas. Gasifikasi sebaiknya letakkan dekat dengan boiler.

4. GASIFIKASI BIOMASSA UNTUK LISTRIK DESA

(perjalanan panjang masa lalu)

Pengembangan teknologi gasifikasi biomassa di Teknik Kimia ITB pernah sampai pada tahap uji-lapangan, *mobile demonstrasion unit*, dan penyebar-luasan ke berbagai pelosok tanah air. Pada dasar warsa 1980 tersebut, juga banyak institusi pemerintah dan lembaga swadaya masyarakat menaruh perhatian pada teknologi gasifikasi, dan beberapa di antaranya memperoleh dana dari luar negeri.

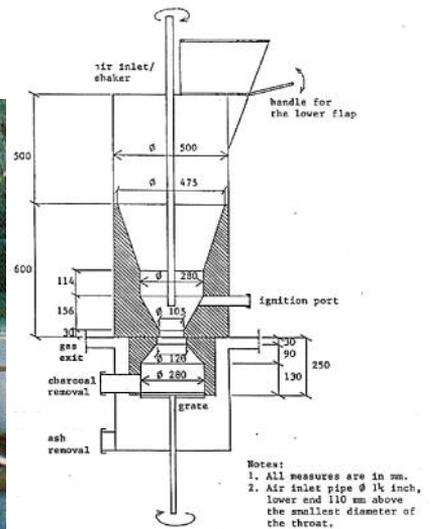
4.1. Implementasi Gasifikasi Limbah Kayu

Uji-lapangan unit gasifikasi kayu karet di desa Balong, Jepara (Tabel 4.1) merupakan salah satu bagian awal program pengembangan unit gasifikasi di Teknik Kimia ITB masa itu. Hasil-hasil pengamatan pada unit gasifikasi Balong ini layak untuk dijadikan acuan dalam kajian pemanfaatan teknologi gasifikasi biomassa untuk listrik pedesaan. Pada pengembangan saat itu, Teknik Kimia ITB bekerja sama dengan: CV Darmawan, Bandung; PT Boma Bisma Indra (Persero), Surabaya; PT Perkebunan XVIII (kebun karet Balong); PT Perhutani; PT Inhutani II; Kementrian Kehutanan, dan lain-lainnya.

Pengalaman pengoperasian unit gasifikasi di Balong dan beberapa unit berikutnya (data disajikan pada Tabel 4.1) Beberapa pedoman teknis dan ekonomi diperoleh dari pengoperasian unit ini, misalnya:

- a. umur unit gasifikasi kayu kira-kira 7 tahun (dengan reparasi kecil setiap waktu)

- b. setelah reparasi gasifier dan beberapa bagian alat akibat korosi, umur unit gasifikasi dapat diperpanjang sampai 10 tahun



Gambar 4.1 Unit gasifier limbah kayu karet 20 kg/jam dan genset (unit Balong, 1984)

- c. penghematan solar pada operasi *dual fuel* dapat mencapai 90%, tetapi operasi sehari-hari sebaiknya dengan penghematan sekitar 70%
- d. konsumsi minyak pelumas motor diesel *dual fuel* tiga kali motor diesel dengan solar murni
- e. beberapa jenis suku cadang perlu lebih sering diganti (misalnya filter saringan udara) dan bahkan rawan rusak (misalnya klep dan tuas penggeraknya)
- f. keberhasilan proses berkat ketrampilan dan disiplin operator dalam operasi dan perawatan
- g. pengoperasian, distribusi listrik dan keuangan dapat dikelola oleh suatu Koperasi Unit Desa.

Tabel 4.1 Contoh data teknis unit gasifikasi TK-ITB (1983 – 1990)

	Unit-1	Unit-2	Unit-3
Gasifier	<i>down draft</i>		<i>open core</i>
Lokasi :	Balong	Randu-Blatung	Mojokerto
a. kapasitas nominal, kW	15	60	40
b. bahan baku	kayu	kayu	sekam
c. ukuran bahan baku, cm ³	3 x 3 x 6	6 x 6 x 10	-
d. kapasitas bunker, kg	± 30	± 150	± 20
e. diameter tenggorokan, m	0,11	0,18	tanpa
f. diameter ruang reduksi, m	0,28	0,42	0,40
g. tinggi ruang reduksi, m	0,25	0,30	0,30
h. pemasukan udara ke gasifier	<i>satu pipa</i>	<i>empat nosel</i>	dari atas terbuka
Motor Diesel			
a. banyaknya silender	3	6	6
b. total volum silender, L	2,8	12,8	5,6
c. kecepatan, rpm	1500	1500	1500
d. <i>compression ratio</i>	17	17	17
e. <i>max. power output-original, kW</i>	24	120	50
f. <i>max. output in dual fuel, kW</i>	15	80	40
g. rata-rata penghematan solar	80%	20%	60%
Generator listrik (3 fasa; 50 Hz): kapasitas, kVA	25 (127/220V)	125 (220/380V)	penggilingan gabah

Beberapa masalah teknis-operasional dan sosial juga dapat dipelajari dari pengalaman uji-lapangan oleh Teknik Kimia ITB sendiri, maupun dari hasil pengamatan *World Bank Monitoring* (1986-1988). Kendala penerapan teknologi gasifikasi yang teramati selama uji-lapangan antara lain sebagai berikut.

- a. Masyarakat belum memahami atau belum merasa perlu diversifikasi sumber energi, mengingat bbm masih terjangkau baik dari segi harga dan ketersediaan.
- b. Pengoperasian unit gasifikasi lebih repot dan kotor dibandingkan terhadap pengoperasian motor diesel-genset berbahan bakar solar murni.
- c. Operator/teknisi unit gasifikasi harus disiplin pada prosedur penyiapan bahan baku, operasi dan perawatan unit gasifikasi.

Saat ini, peluang pemanfaatan gasifikasi biomassa mungkin makin terbuka, terutama untuk pembangkit-pembangkit listrik tenaga diesel dengan kapasitas kecil di daerah-daerah luar Jawa. Sebagai contoh, kapasitas beberapa buah PLTD di ibukota kecamatan atau desa-desa di daerah perbatasan. Kapasitas produksi listriknya mungkin antara 50 sampai 200 kW (sesuai dengan *down draft gasifier*). Sedangkan biomassa setempat yang dapat diharapkan terkumpul antara lain: batok kelapa, sabut kelapa, tongkol jagung, sekam padi dan tentu saja biomassa sawit di daerah perkebunan maupun pabrik minyak sawit mentah.

4.2 Gasifikasi Sekam Padi

Sekam padi merupakan limbah pertanian yang melimpah di banyak daerah Jawa. Pabrik penggilingan gabah standar biasanya memiliki kapasitas 1 ton/jam dan digerakkan dengan motor diesel 40 kW (Tabel 4.1). Di samping menghasilkan beras, penggilingan gabah kapasitas ini juga menghasilkan kira-kira 250 - 400 kg/jam sekam padi.

Dengan proses gasifikasi, cukup sebagian produk sekam tersebut dikonversi menjadi gas produser untuk bahan bakar motor penggerak penggilingan. Jadi perusahaan penggilingan gabah dapat memenuhi hampir seluruh kebutuhan energi penggilingan.

Sebuah unit gasifikasi sekam terpasang dan siap dioperasikan di sebuah pabrik penggilingan gabah milik PT Pertani, di kota Haurgeulis, Kabupaten Indramayu. Gas produser hasil gasifikasi sekam dimanfaatkan sebagai bahan bakar diesel genset 100 kW (karena itu dinamai PLTD-Sekam). Unit gasifikasi ini milik *PT. Indonesia Power*, sayangnya *idle* sejak terpasang.

Kinerja PLTD-G sekam ini diuji-ulang pada akhir tahun 2005, dengan dana dari *Dirjen Listrik dan Pemanfaatan Energi, Dept. ESDM*. Komposisi sekam (bebas air) adalah sebagai berikut (fraksi-massa): 34,92% C, 5,59% H, 39,55% O, 0,34% N, 0,08% S dan 19,52% abu, panas pembakarannya adalah 3537 kcal/kg.

Uji-coba dilakukan beberapa kali dan masing-masing uji coba kira-kira 6 jam/hari. Hasilnya secara teknis sangat memuaskan. Penghematan solar tertinggi mencapai 75%, tetapi sebaiknya operasi *dual fuel* dilakukan sampai penghematan solar 60% saja.

PLTD-Sekam Haurgeulis dilengkapi dengan sistem pendinginan dan pembersihan *wet scrubber*. Gas produser sangat bersih ketika masuk motor diesel. Tetapi air pendingin yang kontak langsung dengan gas produser menjadi kotor. Air buangan sistem pendingin dan pembersih gas memiliki pH 7,9, kandungan BOD 120 mg/L dan COD 120 mg/L.

Kandungan fenol dalam air limbah terukur mencapai 333 mg/L dan kenyataannya hal ini mengakibatkan kematian ikan lele dalam waktu tidak lebih dari 30 menit. Masalah *air buangan* inilah yang menjadi salah satu kendala penyebar-luasan teknologi gasifikasi sekam saat itu.

Kajian ekonomi sederhana telah dilakukan dengan beberapa asumsi dasar berikut ini:

- a. penghematan solar dengan operasi *dual fuel* 60%; atau 85 L/hari

Tabel 4.2 Evaluasi ekonomi PLTD-Sekam (2005)

No	Parameter	<i>Single fuel</i>	<i>Dual fuel</i>	Satuan
parameter dari hasil pengujian PLTD-G				
1	kapasitas produksi listrik	75	75	kW
2	konsumsi solar operasi <i>single fuel</i>	0,2		L/kWh
3	konsumsi solar operasi <i>dual fuel</i>		0,08	L/kWh
4	konsumsi sekam		1,2	kg/kWh
5	konsumsi sekam		88	kg/jam
Kajian ekonomi untuk 1 bulan (240 jam)				
6	konsumsi solar	3600	1440	L
7	biaya solar	14.760	5.904	ribuRp
8	konsumsi sekam	-	2.100	kg
9	biaya sekam		no1	ribuRp
10	jumlah operator	1	3	orang
11	upah operator (termasuk pengumpulan sekam)	600	1.800	ribuRp
12	konsumsi minyak pelumas mesin	120	240	L
13	penggantian minyak pelumas	800	1.600	ribuRp
14	lain-lain	500	1.000	ribuRp
15	total biaya operasi (tanpa investasi)	16.660	10.304	ribuRp
16	total produksi listrik	18000		kWh
17	biaya produksi listrik	925	572	Rp/kWh
18	penghematan biaya solar, pada <i>dual fuel mode</i>	6.354.000		Rp/bln

- b. upah operator Rp 600.000/bulan (mulai dari pengumpulan sekam sampai perawatan PLTD-Sekam)
- c. pengganti minyak pelumas (10 L) pada *single fuel mode* setiap 2 minggu (120 jam)
- d. pengganti minyak pelumas untuk dual *fuel* setiap 1 minggu (60 jam)
- e. biaya investasi belum diperhatikan, artinya status unit gasifikasi adalah hibah.

Pengoperasian PLTDG-Sekam tersebut dapat memberi penghematan biaya solar sebesar Rp 6.354.000/bulan. Hasil kajian ekonomi kegiatan ini disajikan di Tabel 4.2.

Mengingat potensi gasifikasi sebagai teknologi konversi biomassa menjadi sumber bahan energi alternatif saat ini, PLTD-Sekam Haurgeulis sebaiknya uji-operasi lebih lanjut ke arah kondisi komersial, misalnya: (a) pengoperasian selama minimal 12 jam/hari dan 6 hari/minggu, (b) kajian kinerja motor diesel lebih lengkap, dan (c) kajian ekonomi lebih teliti.

4.3 Program Nasional Implementasi Gasifikasi Biomassa di Indonesia

Program ini dicanangkan setelah Presiden Soeharto mengunjungi *stand* TK-ITB pada *Pameran Produksi Indonesia* di MONAS, Agustus 1985. Tidak hanya implementasi unit-unit gasifikasi biomassa untuk listrik desa, program tersebut juga melibatkan pembentukan *science and technology agency* di daerah yang diharapkan untuk mewakili dan meneruskan kepakaran gasifikasi di TK-ITB.

- a) Unit Irian Jaya
- lokasi: Desa Arso III, daerah transmigrasi dekat Jayapura
 - bahan baku: limbah kayu dari pembukaan hutan di sekitar desa
 - pemantau dan *agen pengembangan*: Kementerian Transmigrasi, Universitas Pattimura, Ambon
 - penggunaan: listrik pedesaan, pada 6 - 12 p.m.
- b) Unit Maluku
- lokasi: Desa Kaibobo, Pulau Seram
 - bahan baku: limbah kayu dari industri kayu lapis
 - pemantau dan *agen pengembangan*: Kementerian Kehutanan, Universitas Pattimura, Ambon
 - penggunaan: listrik pedesaan, pada malam hari, 100 rumah dengan 100 W dan 90 rumah @ 60 W dengan biaya Rp 2500-3000/rumah-bulan (dari biaya semula Rp 7000 untuk lampu minyak tanah).
- c) Unit Kupang
- lokasi: Desa Nonbes dan Oekabiti, Kecamatan Amaras: Kupang, Pulau Timor
 - bahan baku: kayu lamtoro-gung (ipil-ipil) dari hasil penjarahan
 - pemantau dan *agen pengembangan*: Kementerian Kehutanan
 - penggunaan: listrik pedesaan, pada malam hari, 100 rumah dan direncanakan hingga 300 rumah.
- d) Unit Sumbawa
- lokasi: Desa Berora, Kecamatan Lape, Pulau Sumbawa
 - bahan baku: sekam padi
 - pemantau dan *agen pengembangan*: Pusat Studi Lingkungan Hidup dari Universitas Mataram, Mataram
 - penggunaan: listrik pedesaan, pada malam hari 325 rumah.
- e) Unit Samarinda
- lokasi: Desa Segihan, Kecamatan Sebulu, Tenggarong,

Kalimantan Timur

- bahan baku: limbah kayu dari industri kayu
- pemantau dan *agen pengembangan*: PT Pupuk Kaltim, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya.

f) Unit Palembang

- lokasi: Desa Sungai Buaya, kota Palembang, Sumatera Selatan
- bahan baku: limbah kayu dari industri perabot rumah tangga
- pemantau dan *agen pengembangan*: Teknik Kimia Universitas Sriwijaya, dan PT Pupuk Sriwijaya
- penggunaan: energi listrik dari limbah kayu.

Dengan dukungan teknis dari perusahaan-perusahaan besar, seharusnya proyek *BANPRES* ini dapat berkembang. Tetapi harga bahan bakar minyak yang terjangkau dan tersedia, menjadikan kesadaran masyarakat dan tokoh-tokoh masyarakat kurang mendukung program ini. Banyak hal-hal teknis dan non-teknis selama implementasi program ini tercatat dalam proyek ini.

5. GASIFIKASI BIOMASSA UNTUK MANDIRI ENERGI

(dasa warsa terkini)

Setelah dilupakan kira-kira 20 tahun sejak 1995, teknologi gasifikasi biomassa kembali mendapat perhatian sejalan dengan maraknya program-program *energi baru dan terbarukan* atau program *bioenergi*.

5.1 PLTD-Gasifikasi Janggal Jagung (2005)

Jagung merupakan komoditi pertanian yang sedang digalakkan pemerintah masa tersebut, untuk memenuhi terutama kebutuhan pakan ternak. Beberapa daerah penghasil jagung terkenal antara lain: Kab. Ciamis, Kab. Kediri, Propinsi Gorontalo dan Propinsi Kalimantan Selatan.

Di Pelaihari, Kabupaten Tanah Laut, Kalimantan Selatan sebuah *pilot project* gasifikasi biomassa untuk listrik desa telah dilaksanakan dalam rangka kerja sama antara TK-ITB (melalui LPPM dengan PT Perkebunan Nusantara XIII, Persero). Kerja sama ini juga mendapat dukungan pendanaan dari Kementerian Negara Riset dan Teknologi Republik Indonesia (KNRT) melalui *Program Insentif Peningkatan Kapasitas IPTEK Sistem Produksi* dan dukungan Pemerintah Daerah Kabupaten Tanah Laut untuk ketersediaan janggal jagung.

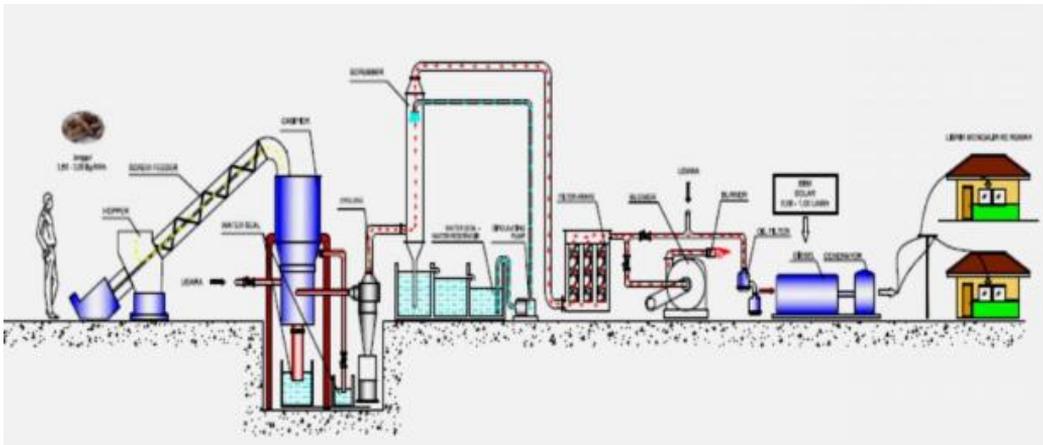
Janggal jagung yang merupakan salah satu jenis biomassa dijadikan sumber energi alternatif melalui proses gasifikasi menjadi gas bahan bakar. Gas produser ini digunakan sebagai bahan bakar substitusi solar pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel dengan moda

operasi *dual fuel*. Sistem ini dinamakan oleh masyarakat setempat PLTDG-Janggal.

Gasifikasi janggal dapat menghasilkan gas produser dengan LHV 3000 – 5000 kJ/Nm³ (panas pembakaran ini 1/6 panas pembakaran gas alam). Sebagai pedoman pemanfaatan janggal jagung sebagai sumber energi melalui proses gasifikasi:

- a. 4 – 8 kg janggal jagung setara dengan 1 liter bahan bakar minyak
- b. 1,2 – 2,0 kg/jam janggal jagung setara dengan 1 kW listrik.

Kabupaten Tanah Laut menghasilkan 70.000 ton jagung sekali panen atau setara dengan produksi 35.000 ton janggal jagung. Jika dua kali panen setiap tahun, maka potensi ketersediaan energi listrik paling tidak sebesar sebesar 17.500 MW.



Gambar 5.1 Alur proses PLTD Janggal di Pelaihari (60 kVA)

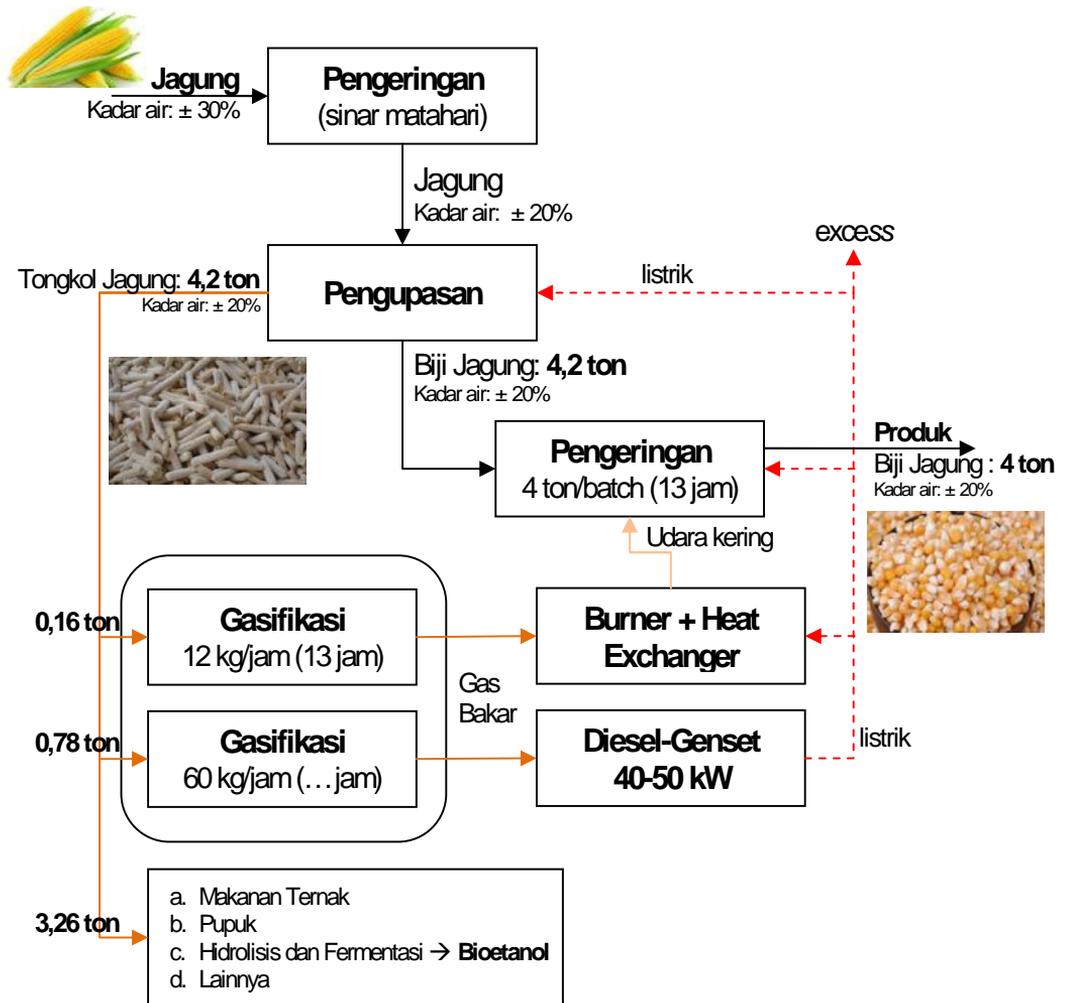
Proyek PLTD-Janggal *skala pilot* terletak di kebun kelapa sawit PTPN XIII, Pelaihari, Kabupaten Tanah Laut. Produk listrik didistribusikan ke sekitar 60 rumah @ 200 W pekerja pemetik kelapa

sawit. Unit gasifikasi dalam *pilot project* ini dirancang dengan daya 60 kVA (dengan kira-kira 50 kW). Diagram alir peralatan proses disajikan pada Gambar 5.1. Pengoperasian PTLDG-janggal ini dihentikan ketika pabrik CPO di kebun tersebut mulai berproduksi, dan dapat membagi listriknya ke perumahan pekerja.

5.2 Pengolahan Biji Jagung Mandiri Energi

Kegiatan Ekonomi Mandiri Energi telah dicoba untuk dikembangkan unit pengolahan biji jagung yang kegiatannya meliputi pengeringan jagung, pemipilan dan penggilingan menjadi *beras jagung pakan ternak*. Rangkaian sistem pengolahan janggal jagung sebagai sumber energi di pabrik tersebut disajikan pada Gambar 5.2.

Alat pengering biji jagung di pabrik pakan ternak ini memiliki kapasitas 1 ton/hari dan waktu pengeringan 10 jam/hari. Bahan bakar untuk pengeringan asalnya adalah minyak tanah, tetapi tidak dijalankan karena mahalnya harga bbm tersebut. Jika energi dari minyak tanah diganti dengan janggal jagung melalui proses gasifikasi, kebutuhan janggal jagung kira-kira 20 kg/jam (kapasitas ini sesuai dengan sebuah *down draft fixed bed gasifier*), atau konsumsi janggal jagung 200 kg/hari. Dengan demikian masih terdapat kelebihan janggal sebesar kira-kira 300-400 kg/hari. Selanjutnya, kelebihan ini dapat dimanfaatkan pada pembangkit listrik untuk keperluan lainnya.



Gambar 5.2 Pabrik jagung mandiri energi

Seorang tengkulak jagung di daerah Garut umumnya mampu menampung 40 ton jagung pipil setiap panen (masa panen 2 bulan dan 2 kali panen/tahun). Jika produksi janggél jagung 0,5-0,6 kg/kg *jagung pipil*, timbulan janggél jagung dapat mencapai 24 ton setiap panen. Pemanfaatan potensi energi terbarukan berasal dari janggél jagung ini perlu dikembangkan.

5.3 PLTD-Gasifikasi Pelepah Sawit

Pada panen TBS (tandan buah segar), satu pelepah sawit harus dipotong sebelum mengunduh TBS, karena TBS disangga oleh pelepah. Gasifikasi pelepah sawit tergabung



dengan motor diesel penggerak generator listrik telah dipasang di beberapa desa karyawan pemetik sawit Propinsi Riau, yakni:

- a. Dsn. Sidomulyo, Buluhrampae, Kab. Indragirihulu
- b. Ds. Sidomukti, Kec. Pangkalan Kuras, Kab. Pelelawan
- c. Ds. Sencalang, Kec. Kerintang, Kab. Indragiri Hilir
- d. Ds. Harapan Tani, Kec. Kempas, Kab. Indragiri Hilir
- e. Ds. Suka Mulya, Kec. Dayun Kab. Siak



Proyek implementasi gasifikasi biomassa untuk listrik desa ini merupakan upaya pemerintah untuk kembali mempromisikan pentingnya pemanfaatan energi terbarukan. Proyek ini didanai oleh Dirjen EBTKE, antara tahun 2011-2014.

Pemantauan sampai dengan tahun 2015, kondisi PLTD-Gasifikasi relatif dalam terawat dan beroperasi dengan baik. Kecuali unit di Ds. Harapan Tani, kec. Kempas, Kab. Indragiri Hilir yang tidak dapat dioperasikan sejak awal karena ketiadaan air pendingin. Air setempat diperoleh dari tanah gambut yang terlalu kotor.

Kendala utama yang dihadapi dalam pengimplimentasian PLTD Gasifikasi Biomassa di Riau adalah kemauan operator untuk terampil dalam pengoperasian dan perawatan peralatan. Selain itu, biaya bahan baku yaitu pelepah sawit ternyata mahal dibandingkan dengan harga solar setempat. Penyebab mahalnya harga pelepah antara lain: pelepah masih digunakan oleh masyarakat setempat sebagai pengganti pupuk dan upah penyiapan pelepah menjadi bahan baku gasifikasi juga tinggi.

5.4 Potensi Implementasi Teknologi Gasifikasi di Karimunjawa

Kepulauan Karimunjawa terdiri dari sekitar 27 pulau dan hanya 5 pulau yang dihuni. Jaraknya sekitar 45 mil laut dari kota Jepara dan 60 mil laut dari kota Semarang. Saat survei 2010, jumlah penduduk pengguna listrik di desa Karimunjawa (di pulau utama) sekitar 725 rumah tangga dengan daya 500 W. Total konsumsi solar untuk enam PLTD kira-kira 350 kL/tahun dengan harga setempat 11.200 Rp/L.

Manajemen PLTD saat itu menerima dukungan dana sekitar Rp 900.000.000 (sembilan ratus juta) per tahun dari pemerintah kabupaten Jepara. Jumlah subsidi itu akan dikurangi pada tahun-tahun berikutnya.

Kepulauan Karimunjawa merupakan asal suplai kelapa, jadi memiliki potensial biomassa: sabut kelapa, batok dan batang tua. Produktivitas kelapa pulau-pulau ini mencapai 400.000 kelapa/bulan, dan satu buah kelapa biasanya mengandung 1,2 kg batok.

Sistem PLTD-gasifikasi biomassa kelapa dapat dikembangkan di pulau-pulau dalam Kepulauan Karimunjawa. Kapasitas produksi listriknya sekitar 40 kW, dengan konsumsi batok sekitar 60 kg/jam. Dengan tersedianya *gas engine* skala kecil, penggerak mula saat tidak lagi hanya motor diesel.

Proposal implementasi gasifikasi batok untuk listrik desa telah diajukan oleh tim yang terdiri dari: (i) Jurusan Teknik Kimia Universitas Sebelas Maret (sebagai pengusul); (ii) pemerintah daerah kecamatan Kepulauan Karimunjawa; (iii) Badan Penelitian dan Pengembangan (Balitbang) Provinsi Jawa Tengah dan (iv) TK-ITB sebagai nara sumber. Sayang sekali proposal ini gagal mendapatkan dana pelaksanaan.

6. BIOMASSA UNTUK LISTRIK 500 kW¹

Menanggapi isu hangat tentang energi terbarukan dari biomassa, kajian kelayakan ekonomi pembangkit listrik berbasis gasifikasi biomassa telah dilakukan dengan skala produksi listrik 500 kW. Sejalan dengan kajian ini, pembangkit listrik dari biomassa melalui *steam power plant* juga dikembangkan. PLTU-biomassa ini cocok untuk skala produksi listrik 2 MW ke atas, karena unit pendukungnya banyak, misalnya: penyediaan air boiler dan air pendingin untuk kondensor di bawah turbin kukus.

6.1 Ketersediaan Biomassa

Pemikiran untuk melakukan kajian kelayakan ekonomi PLTGasifikasi-biomassa ini sejalan program penanaman kaliandra sebagai bahan baku pelet kayu, di Bangkalan². Pada kebun energi, kaliandra dapat dipanen dalam 2 kali/tahun. Setelah pemanenan, tunas/trubusan akan tumbuh besar dan siap panen berikutnya. Produktivitas kebun kaliandra kira-kira 9,45 ton/ha/tahun. Program kebun energi yang disinergikan dengan gasifikasi biomassa juga terdapat di kabupaten Sumba Barat Daya, dengan PLT-*gas engine* berkapasitas 1 MW.

Untuk perhitungan neraca massa dan energi, analisis kayu kaliandra dilakukan di Laboratorium tekMIRA (2014). Analisis proksimat (*dry basis*): Kabon terikat (*fixed carbon*) 19,53%; zat terbang

¹ Laporan, Kajian Potensi Biomassa untuk Kelistrikan, PGN-LAPI, 2015

² Laporan ICCTF, Kementerian Kehutanan, 2014

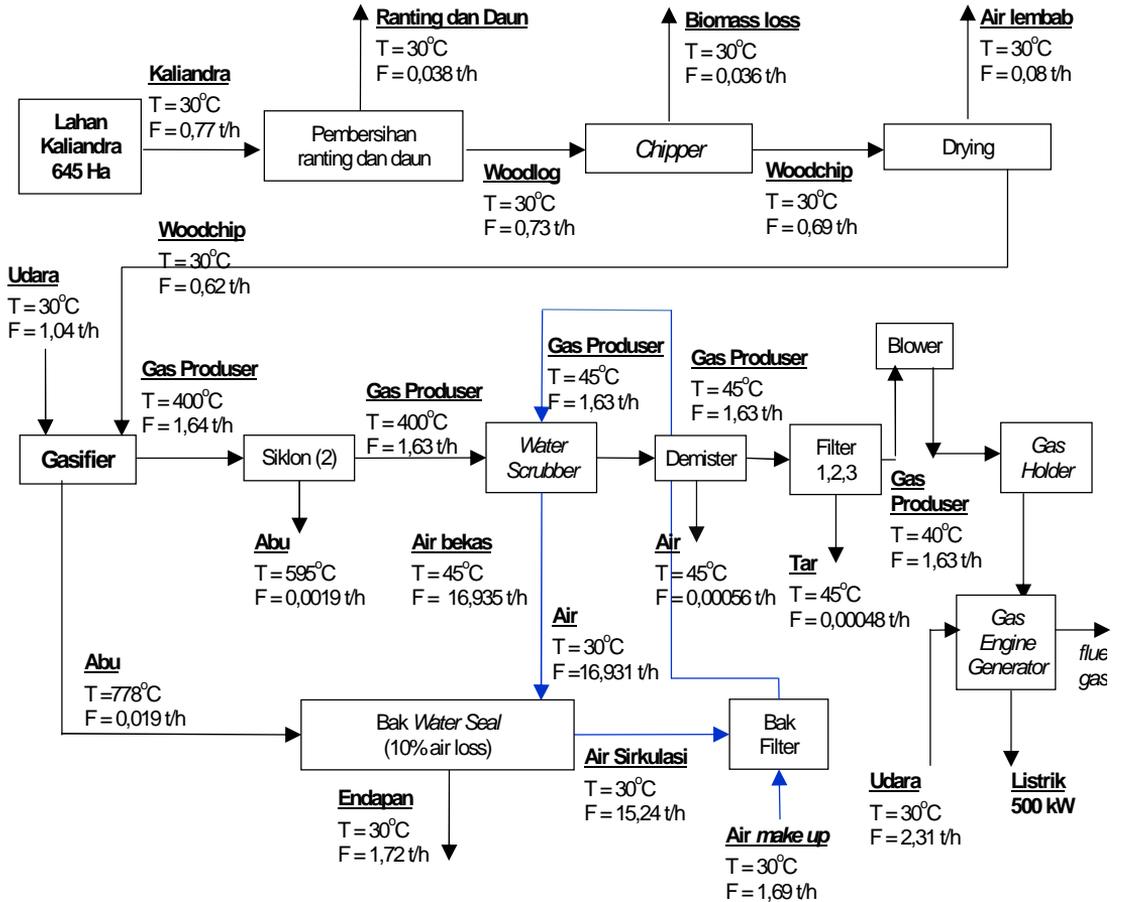
(*volatile matter*) 69,79%; abu 3,61%; kadar air kering udara 7,07%. Analisis Ultimat (*dry basis*): C 44,59%; H 6,20%; O 44,27%; N 1,15%; S 0,18%. Panas pembakaran kayu ini, HHV 17.946 kJ/kg.

6.2 Rangkaian Sistem Pemroses

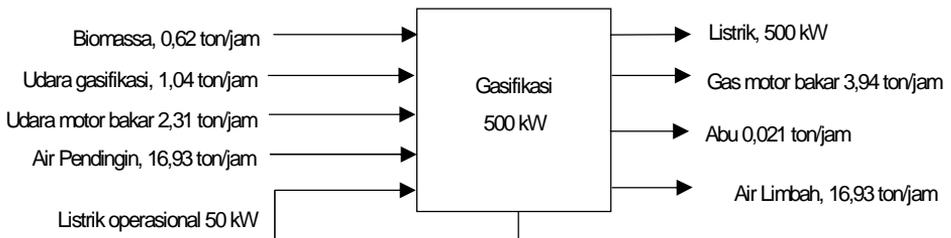
Untuk pembangkit listrik 500 kW, penyediaan kayu kaliandra dibutuhkan lahan seluas 645 Ha. Proses gasifikasi dalam gasifier *downdraft fixed bed* dilangsungkan pada temperatur 778°C dan tekanan 1 bar. Nilai kalor gas produser 4,7 MJ/Nm³. Rangkaian pembangkit listrik berbasis biomassa tersusun atas gasifier, unit pendinginan dan pembersihan gas, dan *gas engine-generator*, serta penyediaan air pendingin dan pengolahan air limbah dan abu.

Proses gasifikasi kapasitas 500 kW membutuhkan kayu kaliandra (asumsi kadar air 10%) sebanyak 0,62 ton/jam atau konsumsi biomassa spesifik 1,20 kg/kWh. Kebutuhan udara sebagai agen gasifikasi 817 Nm³/jam atau 1,89 kg/kWh. Sistem pembersihan dan pendinginan gas membutuhkan air 16,9 ton/jam atau 30 kg/kWh. Proses gasifikasi kayu kaliandra menghasilkan gas produser sebanyak 2,57 Nm³/kg. Listrik yang dihasilkan sebagian digunakan sendiri untuk keperluan, seperti *wood chipper*, pompa, motor penggerak dan blower udara, kira-kira sebanyak 15% listrik terproduksi.

Blok diagram untuk beberapa unit pendukung yang penting disajikan pada Gambar 6.1. Neraca massa dan energi keseluruhan sistem konversi biomassa menjadi listrik disajikan pada Gambar 6.2.



Gambar 6.1 Diagram proses pembangkit listrik gasifikasi biomassa 500 kW



Gambar 6.2 Neraca massa keseluruhan PLT-Gasifikasi kaliandra

6.3 Kajian Kelayakan Ekonomi

Investasi unit gasifikasi 500 kW ini diperkirakan dari pengalaman investasi pada tahun 2008 dengan kapasitas 45 kW yang dibangun di Pelaihari (perkiraan investasi disajikan pada Tabel 6.1). Dengan faktor eksponensial skala sebesar 0,71, investasi unit gasifikasi biomassa menjadi listrik 500 kW diperkirakan sebesar Rp 1,1 milyar pada tahun 2019 (rencana pembangunan). Investasi ini ditambah unit-unit: pengolahan limbah, bengkel perawatan dan perawatan ringan, serta *power house* dan lahan, total biaya kapital tetap mencapai kira-kira Rp 4 miliar (2019).

Pada perhitungan investasi unit 500 kW ini, komponen pembangkit listrik menggunakan *gas engine* merk terkenal. Dengan perkiraan pada tahun 2019, harga *gas engine generator* ini menempati porsi mencapai sekitar 52% dari investasi total. Pemilihan merk *engine generator* dapat dioptimasi untuk menurunkan investasi total.

Investasi spesifik untuk unit gasifikasi *downdraft* dengan kapasitas sekitar 100 kW adalah 400-550 USD/kW (pengalaman sendiri). Nilai investasi spesifik ini tergolong murah, sesuai yang dilaporkan oleh Wu dkk, 2011. Sebagai perbandingan nilai-nilai investasi spesifik unit gasifikasi dari berbagai sumber disajikan pada Gambar 6.3. Investasi spesifik sangat beragam bergantung pada lokasi, jenis teknologi gasifikasi dan kapasitas.

Tabel 6.1 Investasi unit gasifikasi biomassa

No.	Uraian	Investasi		
		1x45 kW (Rp ₂₀₀₈)	1x500 kW (Rp ₂₀₁₉)	
		Pelaihari, 2008	Investasi	Fraksi thd investasi tetap
1	Unit gasifier. PLTD-Janggal			
	<i>Screw-feeder</i>	15.000.000	119.962.000	3,0%
	Gasifier. siklon. blower. burner	72.088.500	576.524.000	14,4%
	Scrubber	15.000.000	119.962.000	3,0%
	Filter arang	15.000.000	119.962.000	3,0%
	Subtotal unit gasifikasi	117.088.500	936.410.000	23,4%
2	Diesel generator	77.250.000		0,0%
	<i>Gas engine</i> ^{*)}		2.075.625.000	51,9%
	Panel listrik	7.500.000	59.981.000	1,5%
	Kabel kelistrikan	861.000	6.886.000	0,2%
	Lain-lain (<i>finishing</i>)	5.857.500	46.845.000	1,2%
	Subtotal	91.468.500	2.189.337.000	54,7%
3	Transportasi unit gasifikasi	14.300.000	114.364.000	2,9%
4	Pengolahan limbah ^{*)}		484.313.000	12,1%
	Workshop, dll ^{*)}		276.750.000	6,9%
	Subtotal biaya lain		875.427.000	21,9%
	Total / Biaya Kapital Tetap	222.857.000	4.001.174.000	100,0%
5	Tanah ^{**)}		80.000.000	2,0%

*) Data diolah dari (Wu dkk, 2001)

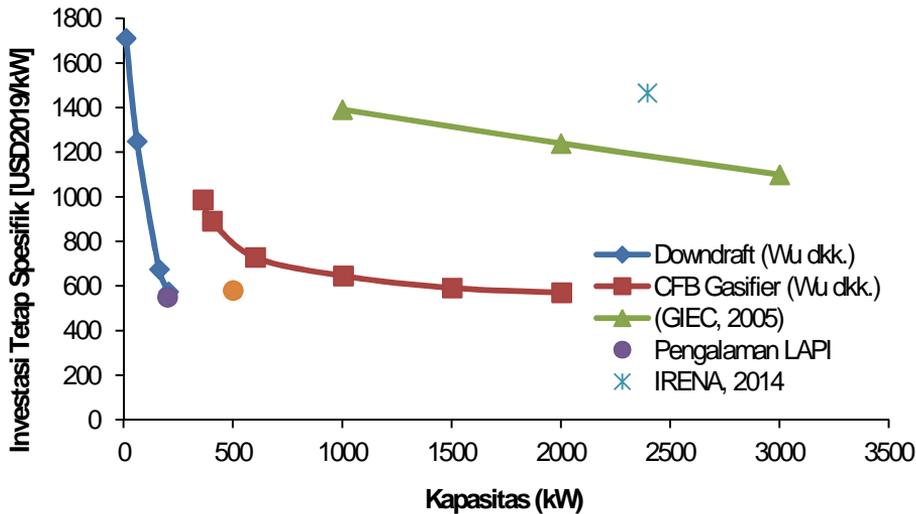
***) Asumsi 2% dari biaya investasi kapital tetap

****) Biaya modal kerja = biaya operasi dan perawatan selama 3 bulan.

6.4 Pola Bisnis Biomassa menjadi Listrik

Simulasi kajian ekonomi biomassa menjadi listrik pada kapasitas 500 kW dilakukan dengan dasar tiga nilai investasi spesifik unit PLTG-biomassa (USD/kW): *plant* mahal 870, menengah 580 dan murah 406.

Investasi ini kemudian ditambahi dengan biaya penyediaan tanah dan modal kerja.



Gambar 6.3 Investasi kapital tetap gasifikasi biomassa menjadi listrik

Mengingat porsi nilai investasi unit gasifikasi dan *engine generator* sangat tinggi: unit gasifikasi 25% dari biaya investasi tetap, unit *gas engine* dan unit *power house* 50%, dan investasi lain (*workshop*, pengolahan limbah, unit transportasi alat) bernilai sekitar 25%, pola bisnis diusulkan dalam bentuk berikut ini.

- a. Skema bisnis pertama (*SB1*):
 - i. PLTBGBm merupakan hibah dari pemerintah atau CSR perusahaan besar.
 - ii. masyarakat pengguna hanya membayar biaya operasi dan perawatan, tanpa membayar pengembalian modal.

Skema pendanaan ini seperti yang dilakukan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Harga titik impas keekonomian skema ini dinamai *BEP kas*; pendapatan cukup untuk biaya operasi dan perawatan unit pembangkit listrik.

b. Skema bisnis kedua (*SB2*):

- i. PLTGBm disediakan oleh sebuah badan pengembang (pemerintah atau perusahaan besar).
- ii. masyarakat membayar seluruh biaya operasi dan perawatan
- iii. masyarakat juga membayar pengembalian investasi tetap PTLGBm, tanah dan modal kerja.

Dengan skema bisnis ini, pengembang akan mendapatkan kembali dana investasi awal, tetapi tanpa keuntungan.

c. Skema bisnis ketiga (*SB3*):

- i. pengembang bisnis menyediakan dana investasi pendirian PLTGBm
- ii. masyarakat pengguna membayar seluruh biaya operasi dan perawatan dan sebagian pengembalian modal investasi awal kepada pengembang, tanpa keuntungan.

d. Skema bisnis yang terakhir (*SB4*):

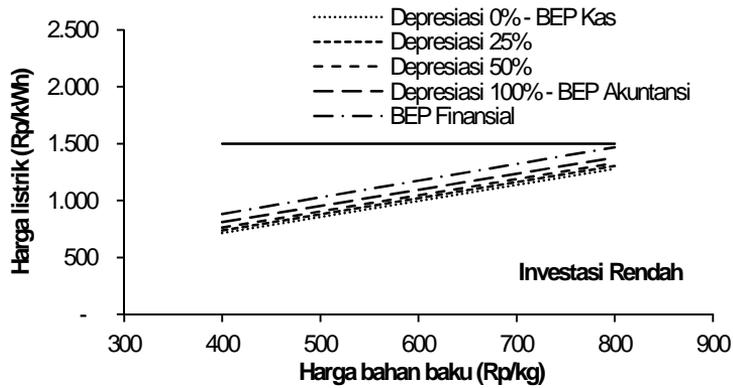
- i. pengembang mendanai seluruh investasi pendirian PLTGBm
- ii. masyarakat pengguna membayar seluruh biaya operasi dan perawatan, depresiasi, pembayaran atas keuntungan dan pajak kepada pengembang.

Titik impas dimana seluruh biaya sama dengan pendapatan dalam skema bisnis ini dinamai *BEP finansial*.

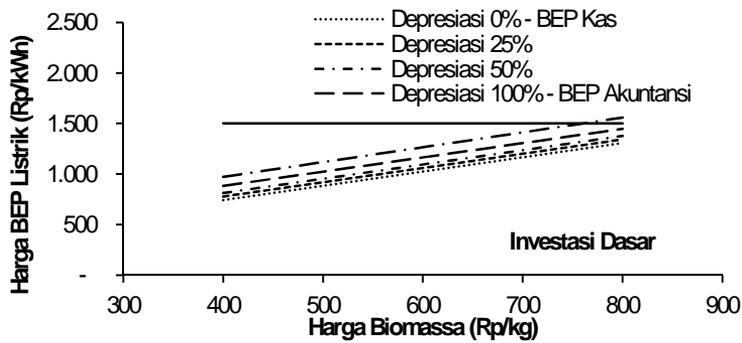
PLTGbm diharapkan untuk dapat dioperasikan sekama 24 jam/hari, sedangkan perawatan rutin dilakukan sehari dalam satu minggu. Dengan pola operasi penuh hari ini, listrik harus dimanfaatkan untuk berbagai kegiatan pada siang hari: Puskesmas, sekolah, kantor pemerintahan setempat, dan berbagai macam kegiatan ekonomi. Hari kerja tahunan kira-kira 250 hari. Produksi 8 jam per hari, 6 hari per minggu.

Jika kegiatan siang hari sangat minim, misalnya karena masyarakat berkarya di kebun, pengoperasian PLTGbm sebaiknya hanya pada malam hari, 8 jam/hari. Perawatan rutin dapat dilakukan pada siang hari sesuai kebutuhan (seperti pola di unit gasifikasi limbah kayu karet di Balong, 1984-1995).

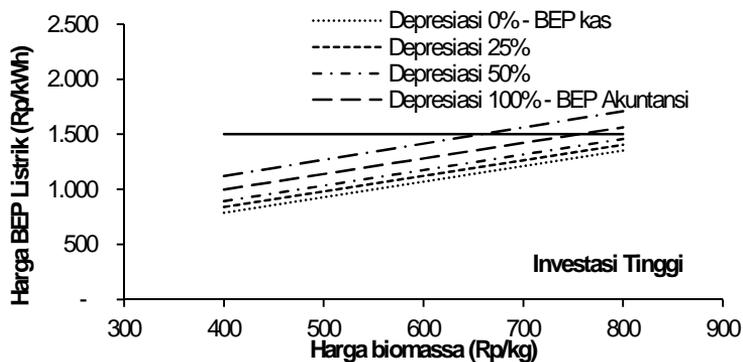
Perhitungan kelayakan ekonomi dihitung dengan variasi harga biomassa, yang harga dasarnya adalah 400 Rp/kg. Harga jual yang diperlukan untuk menutup biaya operasi tanpa pembayaran depresiasi (*BEP kas, SB1*) adalah 714 Rp/kWh (Gambar 6.3, (b), (c) dan (a)). Nilai-nilai ini di bawah harga listrik biomassa yang ditetapkan oleh pemerintah sebesar kira-kira 1500 Rp/kWh.



(a)



(b)



(c)

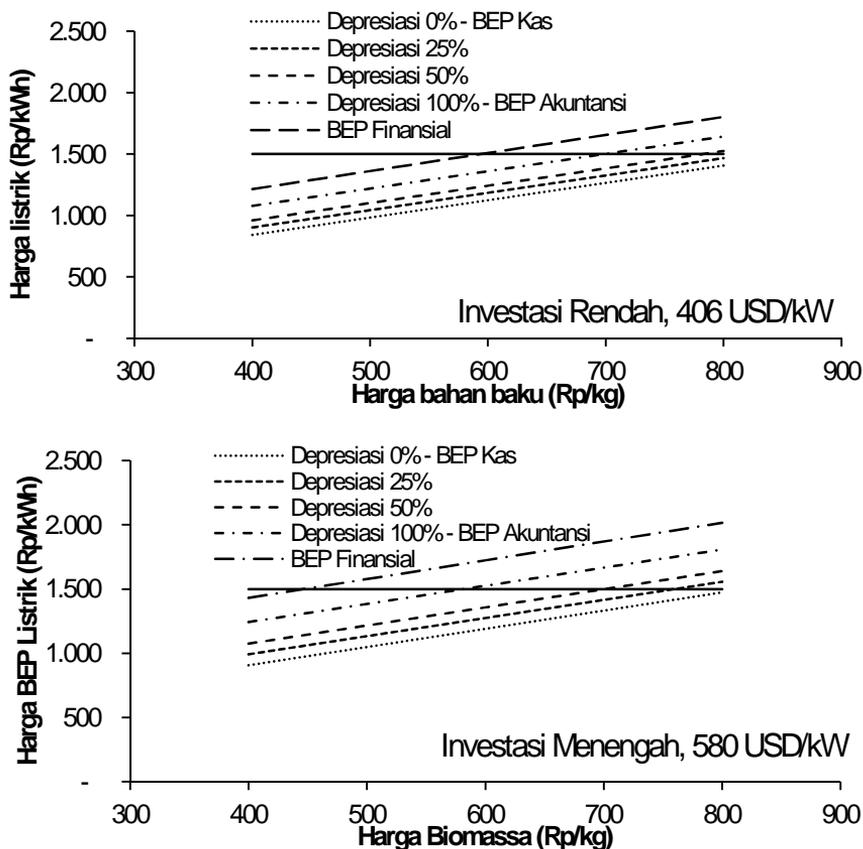
Gambar 6.3 Harga *Break Even Point* (BEP) listrik, operasi 24 jam/hari

(a) investasi spesifik rendah 406; (b) investasi 580; (c) investasi 870 USD/kW

Periode depresiasi = 10 tahun, umur proyek = 20 tahun, *cost of capital* = 11%

Sedangkan *BEP akuntansi (SB4)* untuk menutup biaya operasi dan mengembalikan modal awal (*RoI 0%*) adalah 812 Rp/kWh pada investasi PLTGBm menengah, 580 USD/kWh (Gambar 6.3 (b)). Nilai *BEP akuntansi* ini tergantung pada investasi spesifik: mahal, 870 USD/kW (disajikan pada Gambar 6.3(c)); dan murah 406 USD/kW (Gambar 6.3(a)).

Kelayakan ekonomi untuk pola operasi 8 jam/hari tentu saja kurang menarik. Hasil perhitungan untuk kasus investasi murah dan investasi menengah disajikan pada Gambar 6.4.



Gambar 6.1 Harga *Break Even Point* (BEP) listrik pola operasi B

7. PRODUKSI DME DARI BIOMASSA SAWIT³

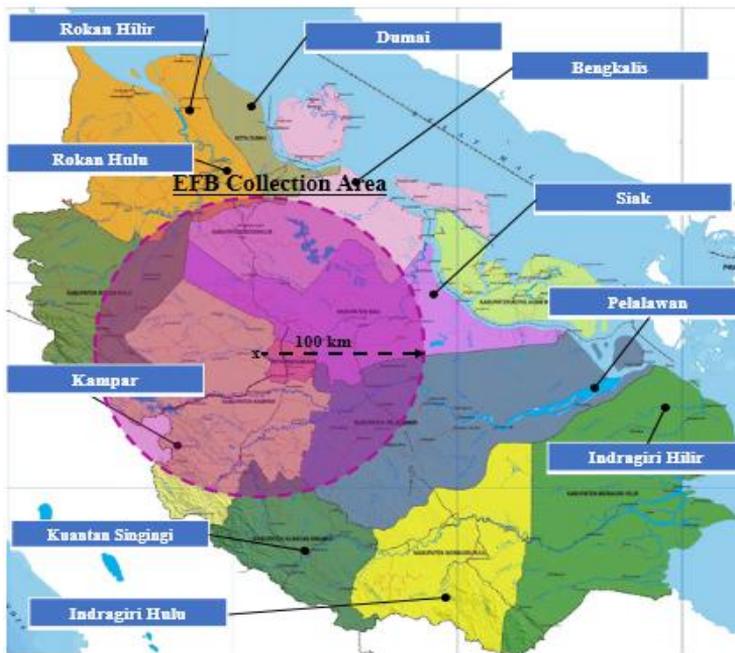
DME rencananya akan dijadikan bahan pencampur LPG karena kemiripan karakteristik yang dimilikinya. Kemiripan utama antara keduanya yaitu: (i) komponen ini diidentifikasi sebagai bahan non-toksik, (ii) memiliki warna api, dan (iii) DME memiliki tekanan uap yang berada pada rentang tekanan uap LPG. Para peneliti di Indonesia telah membuktikan bahwa campuran DME 20% pada LPG dapat digunakan pada kompor LPG rumah tangga umumnya. Namun beberapa penelitian masih perlu dilakukan terkait dengan material katup dan slang, serta sistem pencampuran.

DME dapat diproduksi dari bahan baku gas alam, batu bara, atau biomassa. Sebagai negara tropis, Indonesia memiliki potensi energi biomassa yang besar sekitar 30.000 MWe, dan hanya 800 MWe yang telah dimanfaatkan. Pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku DME mungkin dapat diterapkan di Indonesia, mengingat Indonesia memiliki kelimpahan biomassa dengan komposisi terbesar adalah biomassa kelapa sawit: tandan kosong sawit (TKS), cangkang, sabut dan pelapah. Di antara berbagai biomassa sawit tersebut, TKS dipilih sebagai bahan baku dalam kasus kajian kelayakan ekonomi produksi DME ini. Ketersediaannya melimpah dan telah terkumpul di PKS (pabrik minyak sawit mentah, *CPO mill*). Banyak penelitian tentang pemanfaatan TKS, tetapi pemanfaatannya masih sangat sedikit.

³ Tesis Magister TK FTI-ITB, 2018

7.1 Penentuan Skala Produksi

Studi kasus telah dilakukan untuk daerah Riau, dan ketersediaan TKS diperkirakan dari pabrik-pabrik minyak sawit mentah (PKS) dengan radius 100 km dari lokasi pabrik DME (Gambar 7.1). Potensi TKS dari daerah ini diperkirakan sebesar 1,7 juta ton/tahun (*air dried basis*). Skala pabrik DME yang dapat didirikan dengan bahan baku TKS ini kira-kira 1000 ton/hari. Jumlah ini setara dengan 6,5% keperluan LPG di Indonesia pada saat ini.

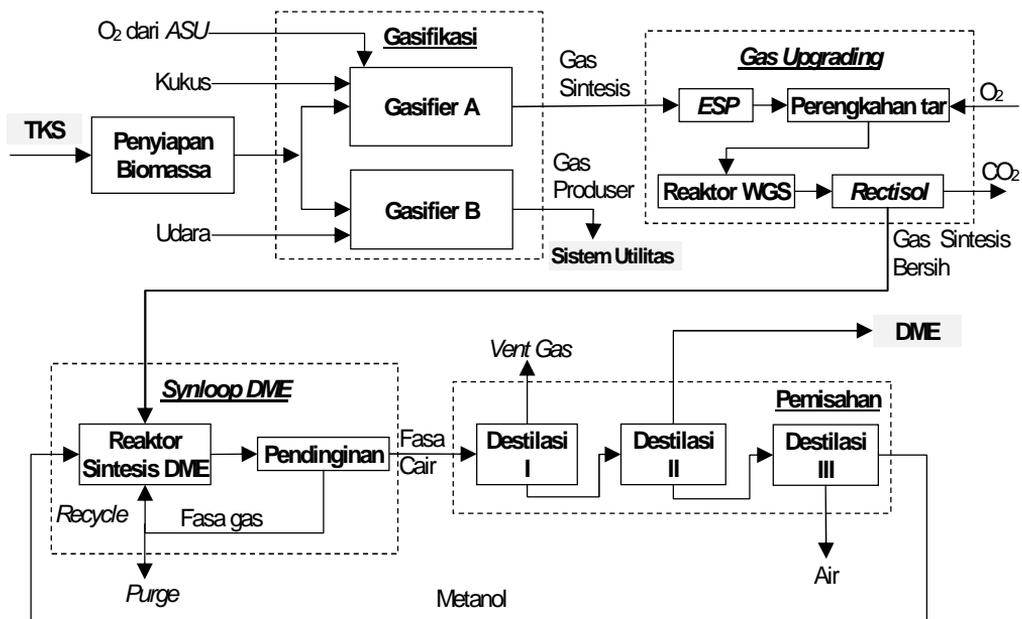
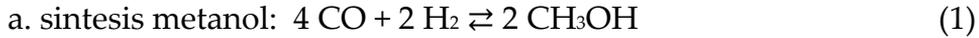


Gambar 7.1 Area pengumpulan TKS

7.2 Rangkaian Sistem Pemroses Sintesis DME

Pada dasarnya, sebuah pabrik DME dengan bahan baku biomassa atau batubara tersusun dari empat unit proses utama (Gambar 7.2): (a) unit gasifikasi (*gasification island*); (b) unit penyempurnaan gas sintesis

(*Syngas Upgrading*); (c) unit sintesis DME (*DME synthesis loop*); dan (d) unit pemurnian DME. Proses sintesis DME dapat dinyatakan dengan reaksi-reaksi berikut ini,



Gambar 7.2 Blok diagram rangkaian pemroses konversi biomassa menjadi DME

Pada studi ini, sintesis DME dilakukan dengan alur sintesis DME langsung. Kedua reaksi di atas dilaksanakan dalam satu reaktor yang diisi dengan dua katalis untuk: (a) sintesis metanol dari gas sintesis; dan (b) dehidrasi metanol menjadi DME. Penelitian pengembangan

konfigurasi reaktor sintesis langsung DME sedang dilakukan di Teknik Kimia FTI-ITB. Penelitian penyediaan katalis bi-fungsional juga sedang dilakukan saat ini di Teknik Kimia FTI-ITB. Katalis bi-fungsional ini mengandung dua inti aktif yang masing-masing difungsikan untuk sintesis dan dehidrasi metanol.

Perhitungan neraca massa dan energi pabrik DME dilakukan dengan berbagai pendekatan teknis yang disajikan pada Tabel 7.1, dan hasilnya dirangkum pada Tabel 7.2.

Tabel 7.1 Parameter proses pada kajian ini

No	Parameter	Nilai		
1	Bahan baku TKS			
	a. Komposisi (%-massa, dasar kering)			
	C	49,07%	N	0,70%
	H	6,48%	S	0,10%
	O	38,29%	Abu	5,36%
	b. HHV (MJ/kg, dasar kering)	17,08		
	c. Kadar air (%-massa, dasar basah)	9,00		
2	Proses Gasifikasi			
	a. Jenis gasifier	<i>Fluidized Bed</i>		
	b. Tekanan (bar)	4		
	c. Temperatur (°C)	900		
	d. Rugi-rugi panas (dari energi masuk)	5%		
3	<i>Air Separation Unit</i>			
	Konsumsi listrik (MJ/kg-O ₂)	1		
4	Reaktor Sintesis DME			
	a. Tekanan (bar)	50		
	b. Temperatur (°C)	250		
	c. <i>Approach to equilibrium</i>			
	Reaksi sintesis metanol (°C)	15		
	Reaksi dehidrasi metanol (°C)	15		
	Reaksi <i>water gas shift</i> (°C)	10		

Tabel 7.2 Rangkuman hasil simulasi proses

No	Parameter	Nilai
1	Kapasitas produksi DME (ton/hari)	1000,0
2	Efisiensi termal keseluruhan proses (% dasar LHV)	45,5
3	Konsumsi energi (dasar LHV, MMBTU/ton DME)	59,8
4	Bahan baku dan Utilitas	
	a. TKS (kadar air 9%), ton/ton DME	4,1
	b. Air, ton/ton DME	7,6
	c. Udara, ton/ton DME	17,4
5	Produk Samping	
	a. Nitrogen, ton/ton DME	4,7
	b. Argon, ton/ton DME	0,1
6	Limbah	
	a. Abu, ton/ton DME	0,1
	b. Air Limbah, ton/ton DME	0,3

7.3 Kajian Ekonomi

Biaya modal dihitung dengan bantuan APEA (*Aspen Process Economic Analyzer*). Hasil yang didapatkan dari APEA kemudian dikoreksi menggunakan CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*) untuk memprediksi CAPEX pada tahun 2018. Asumsi-asumsi untuk kajian ekonomi menggunakan angka-angka praktis yang telah umum digunakan (Tabel 7.3).

Biaya modal peralatan dan pembangunan pabrik dengan kapasitas 1000 ton-DME/hari disajikan pada Tabel 7.4. Biaya produksi yang diperlukan pada sintesis DME disajikan pada Tabel 7.5.

Tabel 7.3 Asumsi nilai parameter dalam kajian ekonomi

No	Parameter	Nilai
1	Umur Pabrik (tahun)	20
2	Waktu Pendirian (tahun)	3
3	Kurs (Rp/USD)	13.500
4	Biaya TKS (sampai pabrik, Rp/kg)	300
5	Harga jual DME (Rp/12 kg-setara LPG)	145.000
6	Struktur modal (sendiri/pinjaman)	40/60
7	Bunga Pinjaman (pertahun)	5%
8	Model Depresiasi	linier
9	Pajak (dari pendapatan)	15%
10	Kriteria kelayakan (IRR)	8%

Tabel 7.4 Perkiraan biaya modal

No.	Parameter	Biaya (juta USD ₂₀₁₈)	Fraksi thd. total
1.	<i>Gasification island</i>	169,5	17,1%
2.	<i>ASU</i>	116,5	11,8%
3.	<i>Syngas Upgrading</i>	128,9	13,0%
4.	<i>Synloop DME</i>	121,2	12,2%
5.	<i>Power Plant</i>	159,0	16,1%
6.	<i>Separation and Purification</i>	35,1	3,5%
7.	<i>Miscellaneous Utility</i>	25,1	2,5%
A. Total biaya terpasang (TIC)		755,3	
8.	Pengembangan lahan (4% TIC)	30,2	3,0%
B. Total Biaya Langsung (TDC)		785,5	
9.	Biaya tak Langsung (20% TDC)	157,1	15,9%
C. Fixed Capital Investment (FCI)		942,6	
D. Total Biaya Modal, termasuk laan dan honor tetap		990,4	100%
E. Investasi Spesifik, jutaUSD/(tonDME/hari)			0,93
F. Investasi Spesifik, jutaUSD/(MW_{th}DME)			
a.	studi ini, dari data di atas		2,74
b.	Claussen, 2011, bahan <i>wood chip</i> , 2302 MW _{th-input}		1,17
c.	Larson dkk., 2009, <i>switch grass</i> , 893 MW _{th-input}		2,91
d.	Kreutz dkk., 2008, <i>switch grass</i> , 601 MW _{th-input}		2,97
e.	NREL, 2015, kayu, 430 MW _{th-input}		2,68

Tabel 7.5 Biaya Produksi DME dari TKS
(biaya produksi dengan penyetaraan energi DME - LPG)

No.	Komponen Biaya	Biaya (Rp/kg)	fraksi thd total
1	Biaya modal	2.814	23,3%
2	TKS	2.026	16,8%
3	Biaya produksi tetap	1.876	15,5%
4	Katalis dan bahan pendukung	206	1,7%
5	Pajak	221	1,8%
Biaya produksi		7.143	
6	Distribusi dan penjualan	540	4,5%
7	<i>Internal return minimum*</i>	3.688	30,5%
Minimum harga jual		11.371	
8	<i>Additional internal return**</i>	712	5,9%
Harga jual		12.083	100%

*) untuk mendapatkan IRR minimum, 8%

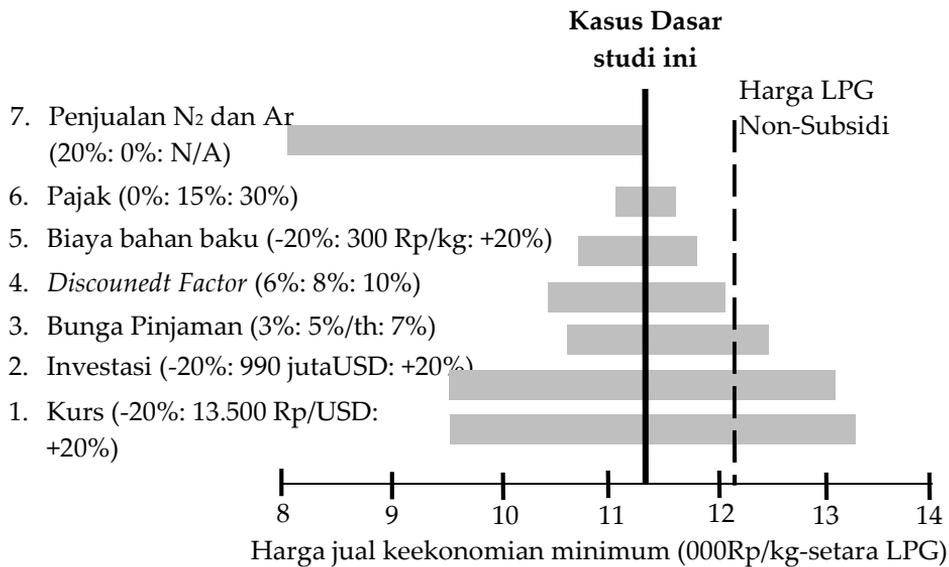
***) untuk harga energi DME yang sama dengan LPG non-subsidi

Dengan IRR 8%, biaya produksi DME diperkirakan Rp. 11.371,- per kg-DME. Jika panas pembakaran DME perlu diperhatikan (hanya 70%-LPG) dan harga jual DME disetarakan dengan LPG (Rp. 12.083,-), maka produksi DME hanya memberikan IRR 5,9%.

7.4 Kajian Sensitivitas Ekonomi

Dengan nilai IRR 8%, pabrik DME ini akan layak jika harga jual DME sama dengan LPG saat ini (**12.083 Rp/kg-setara-LPG**). Selain itu juga dilakukan analisis sensitivitas terhadap berbagai faktor terhadap harga jual DME (Gambar 7.4). Analisis ini menunjukkan bahwa biaya modal dan kurs dolar berpengaruh sangat sensitif terhadap harga jual

DME. Biaya pengadaan bahan baku juga memungkinkan untuk dapat menurunkan biaya produksi.



Gambar 7.5 Analisa sensitivitas

7.5 Peluang Pengembangan

Pengembangan bisnis produksi DME berbasis TKS (atau biomassa lainnya) dipengaruhi salah satunya oleh biaya transportasi TKS. Mungkin biaya ini masih dapat ditekan dengan integrasi pengangkutan TKS dengan pengangkutan TBS (tandan buah segar) dari kebun sawit ke PKS (pabrik minyak sawit mentah, *CPO mill*).

Hasil kajian ini menunjukkan bahwa proses konversi TKS menjadi DME sebaiknya dikembangkan lebih lanjut menjadi sebuah prototip dengan memanfaatkan TKS limbah satu pabrik CPO. Kapasitas produksi DME kira-kira 2,5 ton/jam, dari bahan baku TKS 10 ton/jam. Dalam hal ini, biaya bahan baku jelas dapat dikurangi.

Jika produksi DME berbasis biomassa semacam ini dapat dilaksanakan dalam skala kecil di lokasi timbunan biomassa, produknya dapat langsung dipasarkan setempat, dimana harga LPG sudah berada di atas harga yang ditetapkan pemerintah akibat biaya transportasi. Pengembangan pola produksi: metanol dapat dikeluarkan sebagai produk antara dari pabrik DME, jika di sekitarnya terdapat pabrik biodiesel yang memerlukan pasokan metanol.

Penelitian dan pengembangan untuk merealisasikan pabrik DME berbasis biomassa merupakan tantangan atau peluang bagi para peneliti bidang gasifikasi untuk merancang unit gasifikasi dengan operasi yang handal, dan menghasilkan gas sintesis yang bersih. Guna menghindari kebutuhan O_2 , konfigurasi *twin bed gasifier* harus dikembangkan di mana udara dapat digunakan sebagai agen gasifikasi tanpa pengenceran gas sintesis dengan N_2 .

Pengembangan teknologi sistem pemroses gas sintesis menjadi metanol/DME untuk dijadikan *teknologi tepat guna*; dengan *scale down* teknologi yang ada atau dengan *reverse engineering* unit yang telah ada di Indonesia. Perancangan sistem pemroses harus mencakup evaluasi peralatan pendukung yang dapat dibuat di dalam negeri dengan sebanyak mungkin komponen yang tersedia di pasar domestik.

8. PEMILIHAN TEKNIK GASIFIKASI BATUBARA⁴

Walaupun teknologi gasifikasi batubara maupun gasifikasi biomassa sudah banyak diterapkan di berbagai tempat di dunia dan pada berbagai kapasitas, belum satupun teknologi ini dimanfaatkan secara komersial berkelanjutan di Indonesia. Karena itu, para investor atau pengambil keputusan di Indonesia masih ragu-ragu dalam menetapkan teknologi.

Banyak teknologi gasifikasi batubara ditawarkan oleh pemegang lisensi proses gasifikasi kepada pemangku kepentingan di Indonesia. Masing-masing pemegang lisensi mengajukan keunggulan teknologinya. Demikian pula dalam setiap diskusi pemilihan teknologi gasifikasi, masing-masing pembicara mengajukan pendapatnya.

Dalam kajian ini, teknologi gasifikasi dikelompokkan menjadi tiga, atas dasar teknik pengontakan agen gasifikasi dengan batubara atau biomassa, tanpa menyebutkan nama pemegang lisensi. Kajian ini dilakukan dengan contoh batubara Tanjung Enim (karakterisiknya disajikan pada Tabel 8.1). Kemungkinan besar pemilihan teknik gasifikasi dalam kajian ini tidak sesuai untuk batubara jenis atau hasil penambangan lain.

8.1 Multi Kriteria Pemilihan Teknik Gasifikasi

Metoda AHP (*analytic hierarchy process*) digunakan untuk menetapkan pilihan teknologi. Alternatif teknik gasifikasi yang dipilih

⁴ Tesis Magister Teknik Kimia FTI-ITB, 2013

adalah: (i) *fixed bed gasifier*; (ii) *fluidized bed gasifier* dan (iii) *entrained flow gasifier*.

Tabel 8.1. Sifat batubara Tanjung Enim

No.	Parameter	Nilai
1.	Total Moisture (<i>as recieved</i>)	43,62%
2.	Analisis Proksimat (dasar kering udara)	
	a. kadar air terikat (<i>inherent moisture content</i>)	16,10%
	b. karbon terikat (<i>fixed carbon</i>)	37,90%
	c. zat terbang (<i>volatile matter</i>)	38,93%
	d. kadar abu	7,70%
3.	Analisis Ultimat (dasar kering oven)	
	a. C, karbon	56,79%
	b. H, hidrogen	4,83%
	c. N, nitrogen	0,58%
	d. O, oksigen	29,83%
4.	Sulfur total	0,27%
5.	HHV, <i>Gross Calorific Value</i> , kcal/kg	5071
6.	HGI (<i>hardgrove grindability index</i>)	60
7.	<i>Thermal Stability</i>	32,7%
8.	Titik leleh abu, °C	
	a. <i>Initial temperature</i>	1210
	b. <i>Spherical temperature</i>	1339
	c. <i>Hemispherical temperature</i>	1347
	d. <i>Fluid temperature</i>	1390

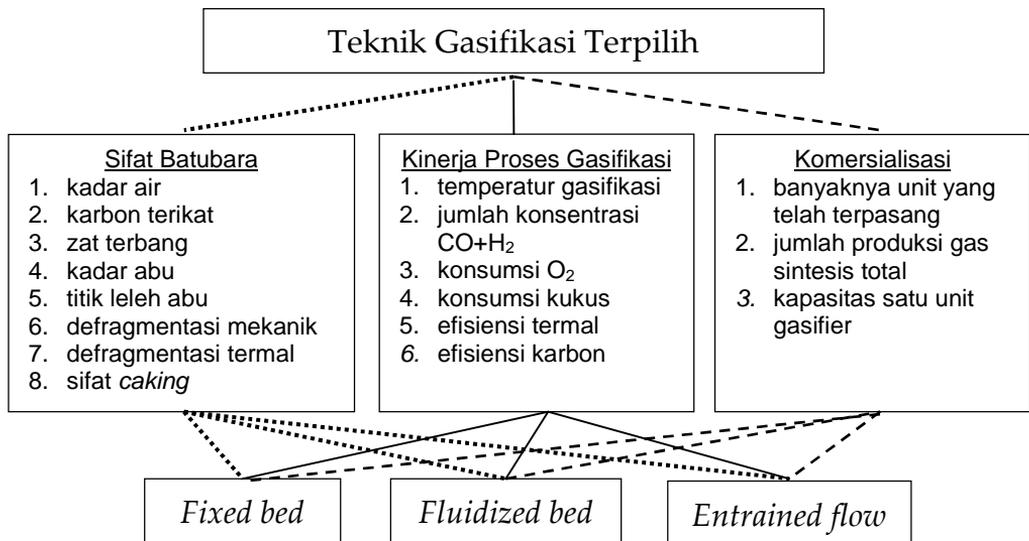
Pemilihan teknik gasifikasi tersebut didasarkan pada tiga kriteria utama dan sub-kriteria berikut ini (Gambar 8.1).

a. Kriteria-1, sifat batubara dengan sifat batubara dengan

delapan sub-kriteria:

- 1) kadar air (*total moisture*)
- 2) karbon terikat (*fixed carbon*)

- 3) zat terbang (*volatile matter*)
- 4) kadar abu (*ash content*)
- 5) titik leleh abu (*ash fusion temperature*)
- 6) defragmentasi mekanik (*mechanical fragmentation*)
- 7) defragmentasi termal (*thermal fragmentation*)
- 8) sifat *caking*.



Gambar 8.1 Multi kriteria pemilihan teknik gasifikasi

b. Kriteria-2, kinerja proses gasifikasi, dengan enam sub-kriteria

- 1) suhu gasifikasi
- 2) jumlah H₂ + CO dalam gas sintesis
- 3) kebutuhan steam
- 4) kebutuhan oksigen
- 5) efisiensi termal
- 6) efisiensi karbon

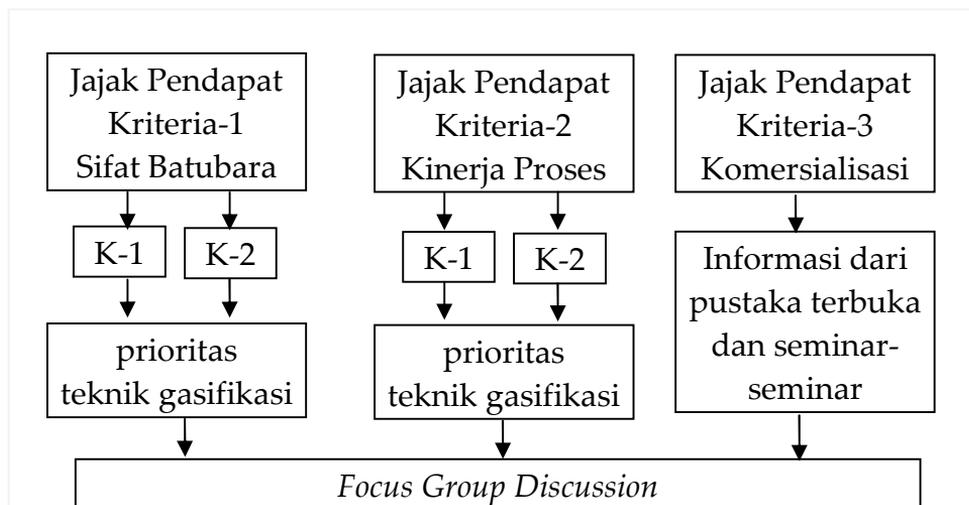
c. Kriteria-3, pengalaman operasional dan komersialisasi di dunia, dengan tiga sub-kriteria.

- 1) penggunaan pada pabrik ammonia (sesuai ruang lingkup studi)
- 2) total kapasitas *syngas* di dunia
- 3) kapasitas *single train gasifier*

Penilaian dalam AHP dilakukan melalui jajak-pendapat tertulis dengan cara pengisian kuisioner. Responden memberi masukan terhadap kriteria-1 dan kriteria-2. Sedangkan kriteria-3 ditetapkan dalam *focus group discussion* secara bersama-sama (metodologi pengolahan data disajikan pada Gambar 8.2).

Responden dibagi menjadi dua kelompok berikut ini.

- a. Kelompok 1 (**K-1**) terdiri dari responden yang tidak berkecimpung dalam bidang gasifikasi, tetapi memiliki pengetahuan cukup untuk teknik gasifikasi. Kelompok ini adalah lima orang mahasiswa di *Laboratorium Termofluida dan Sistem Utilitas*, Teknik Kimia, FTI- ITB.
- b. Kelompok 2 (**K-2**) terdiri dari sepuluh orang pemangku kepentingan gasifikasi batubara, tetapi mungkin ada yang kurang mendalami dasar-dasar proses gasifikasi. Kelompok ini terdiri dari: (i) anggota Tim Gasifikasi PT PUSRI Palembang; (ii) peneliti batubara dan gasifikasi di *tekMira* Bandung; dan (iii) para pemerhati teknologi gasifikasi batubara teknologi, khususnya untuk mereka yang mendukung industri pupuk.



Gambar 8.1 Metodologi pengolahan data hasil jajak pendapat

Para responden diminta untuk memberi bandingan pentingnya: satu sub-kriteria terhadap lainnya, dan satu kriteria terhadap lainnya. Masukan responden yang memenuhi uji-kompetensi digunakan untuk menetapkan prioritas teknologi gasifikasi untuk dipilih.

8.2 Kriteria Sifat Batubara

Semua responden K-1 memiliki konsistensi yang baik. Tiga orang dari sepuluh anggota K-2 tidak menunjukkan konsistensinya.

Karbon terikat ternyata dinilai oleh para responden merupakan salah satu kriteria penting dalam pemilihan teknologi gasifikasi. Saran ini wajar, mengingat hampir semua orang yang terlibat dengan pemroses batubara memahami pentingnya nilai kandungan karbon di dalam batubara dalam perhitungan kinerja proses gasifikasi.

Responden K-2 memberi kesimpulan bahwa titik leleh abu sangat penting dalam pemilihan teknik gasifikasi. Memang temperatur leleh abu merupakan salah satu batasan operasional proses gasifikasi. Salah satu besaran perancangan sebuah gasifier adalah cara pengeluaran abu.

- (i) Untuk *slagging ash gasifier*, temperatur proses gasifikasi minimal 100°C di atas *ash fluid temperature*.
- (ii) Untuk *dry ash removal gasifier*, temperatur proses gasifikasi maksimal 100°C di bawah *initial ash deformation temperature*.

Teknik gasifikasi *entrained flow* dinilai paling sesuai untuk mengolah batubara Tanjung Enim. Gasifier *fixed bed* disarankan hanya digunakan untuk batubara dengan *fuel ratio (ratio of fixed carbon to volatile matter)* lebih dari 2, sedangkan batubara Tanjung Enim memiliki *fuel ratio* hanya sekitar 0,9. Batubara Tanjung Enim apabila diolah dengan gasifier *fixed bed* akan menghasilkan gas pirolisis dalam jumlah besar yang akan mengotori gas sintesis hasil gasifikasi. Pada gasifier *fluidized bed* dan *entrained flow*, *fuel ratio* tidak terlalu berpengaruh pada tahapan pirolisis sebelum gasifikasi.

Dengan bobot prioritas 41,93% dari K-2 (data di Tabel 8.2), gasifier *entrained flow* secara tegas diberi prioritas untuk dipilih sebagai pemroses batubara Tanjung Enim. Bobot prioritas *fluidized bed gasifier* jelas di bawah *entrained flow* menurut K-2, tetapi tidak demikian pendapat responden K-1.

Tabel 8.2 Bobot sub-kriteria dalam *Karakteristik Batubara*

		rata2 K-1	rata2 K-2
	sub-kriteria	bobot	
1.	Kadar air total	5,1%	10,6%
2.	Karbon terikat	20,8%	20,1%
3.	Zat terbang	18,6%	8,5%
4.	Kadar abu	8,3%	10,0%
5.	Temperatur leleh abu	17,4%	21,1%
6.	Defragmentasi mekanik	5,0%	8,0%
7.	Defragmentasi termal	7,2%	9,5%
8.	Sifat <i>caking</i>	17,7%	12,1%
	teknik gasifikasi	nilai prioritas	
1.	<i>Fixed Bed</i>	24,4%	23,6%
2.	<i>Fluidized Bed</i>	36,1%	34,5%
3	<i>Entrained Flow</i>	39,5%	41,9%

8.3 Kriteria Kinerja Proses Gasifikasi

Pada pemilihan teknik gasifikasi atas dasar kinerja proses ini, satu orang dari K-1 memberi respon yang tidak memenuhi uji-konsistensi. Sedangkan dari K-2, dua orang tidak konsisten. Hasil pengolahan pendapat para responden yang memenuhi uji konsistensi disajikan pada Tabel 8.3.

Jumlah efektif gas sintesis (*effective syngas*) tentu saja mendapat perhatian terpenting, karena gas hasil gasifikasi akan digunakan untuk sintesis ammonia atau produk kimia lain. Teknik gasifikasi *entrained flow* dinilai oleh responden K-1 dan K-2 memiliki keunggulan teknis dibandingkan teknik-teknik gasifikasi lain, yakni menghasilkan efektif gas sintesis yang tinggi. Temperatur operasi yang tinggi dan ukuran

batubara umpan yang sangat halus menghasilkan kontak gas-padat sangat efisien, sehingga efisiensi termal dan efisiensi karbon pada gasifier *entrained flow* sangat tinggi. Tetapi teknologi *entrained flow gasifier* memerlukan material konstruksi yang tahan panas dan erosi, serta sistem pengendalian proses yang cermat.

Tabel 8.3 Bobot sub-kriteria dalam *Kinerja Proses Gasifikasi*

		rata2 K-1	rata2 K-2
	sub-kriteria	bobot	
1.	temperatur proses gasifikasi	10,1%	12,1%
2.	efektif gas sintesis	47,1%	30,1%
3.	konsumsi O ₂ /batubara	8,3%	7,4%
4.	konsumsi <i>steam</i> /batubara	13,1%	11,7%
5.	efisiensi termal	11,5%	21,5%
6.	efisiensi karbon	9,8%	17,1%
	teknik gasifikasi	nilai prioritas	
1.	<i>Fixed Bed Gasifier</i>	18,5%	16,5%
2.	<i>Fluidized Bed Gasifier</i>	35,5%	37,8%
3.	<i>Entrained Flow Gasifier</i>	46,2%	45,7%

8.4 Pembobotan Antar Kriteria

Terhadap tingkat pentingnya ketiga kriteria utama, semua responden dalam K-1 dan sembilan responden K-2 memasukkan pendapat secara konsistensi. Bagaimana pentingnya satu kriteria satu terhadap kriteria lainnya disajikan dalam Tabel 8.4.

Responden K-1 berpendapat kinerja gasifier merupakan kriteria terpenting dalam pemilihan teknik gasifikasi. Mungkin dasar pemikiran mereka, kinerja proses gasifikasi sangat mempengaruhi kehandalan

operasional gasifier dan berdampak pada keekonomian. Sedangkan responden K-2 (berisi peneliti batubara) menilai bahwa kriteria terpenting adalah sifat batubara yang akan digunakan untuk menentukan kesesuaian teknik gasifikasi.

Tabel 8.4 Perbandingan pentingnya satu kriteria terhadap lainnya

no	kriteria	rata2 K-1	rata2 K-2
		bobot	
1.	sifat batubara	37,4%	44,8%
2.	kinerja proses gasifikasi	49,5%	31,8%
3.	pengalaman komersial	13,1%	23,4%

8.5 Kriteria Pengalaman Operasional dan Komersialisasi

Pembobotan sub-kriteria dari kriteria pengalaman operasional dan komersialisasi dilakukan dengan *focus group discussion*, bersama beberapa pemerhati teknologi gasifikasi batubara. Data dan informasi teknologi gasifikasi diperoleh dari pustaka terbuka atau seminar, atau acara presentasi para pemegang lisensi proses: (a) *World Clean Coal Week* 2012, di Denpasar; (b) presentasi pemegang lisensi di PT Pertamina; (c) di PT PUSRI; dan (d) di PT Bukit Asam. Teknologi gasifikasi komersial yang sering ditawarkan pada saat tersebut disajikan pada Tabel 8.5.

Sesuai dengan ruang lingkup saat tersebut (kerja sama ITB-PUSRI, 2013), sub-kriteria *banyaknya unit gasifikasi yang telah digunakan di pabrik amonia* dinyatakan sebagai parameter utama dalam pemilihan teknologi (bobot relatif 72,35%, seperti tersaji pada Tabel 8.6). Selanjutnya,

teknologi *entrained flow gasifier* mendapat prioritas besar untuk dijadikan pilihan. Salah satu pemegang lisensi *entrained flow gasifier* saat ini mengklaim telah digunakan di tiga belas pabrik ammonia dengan kapasitas pemrosesan batubara 4000 ton/hari setiap gasifier.

Tabel 8.5 Teknologi gasifikasi yang telah terpasang di dunia
(data diambil tahun 2013, dan beberapa teknologi telah berubah)

	Parameters	Sasol Lurgi <i>dry-ash</i>	KBR TRIG	Siemens	Shell	GE
1.	Banyaknya unit di dunia	7	2	8	54	69
2.	Banyaknya unit yang telah dipakai di pabrik Amonia	2	-	2	17	16
3.	Produksi gas sintesis total, MW _{th}	624	-	1638	7392	5293
4.	Banyaknya unit gasifikasi untuk satu pabrik amonia 2000 ton/hari	4	1	2	1	3

Tabel 8.6. Bobot sub-kriteria *Pengalamam Komersialisasi*

No.	Sub-kriteria	Bobot
1.	Penggunaan pada pabrik amonia	72,35%
2.	Total kapasitas <i>syngas</i> di dunia	19,32%
3.	Kapasitas <i>single train</i> gasifier	8,33%
	<i>Consistency Ratio (CR)</i>	5,67%
No.	Alternatif	Prioritas
1.	<i>Fixed bed</i>	22,97%
2.	<i>Fluidized bed</i>	8,88%
3.	<i>Entrained flow</i>	68,14%

Teknologi gasifikasi lain menawarkan dua tipe *entrained flow gasifier* yang masing-masing adalah *dry ash* dan *slagging ash removal systems*. Gasifier dengan *dry ash removal* digunakan untuk gasifikasi batubara dengan kadar air kurang dari 3% dan yang *slagging ash removal* untuk batubara dengan kadar abu 3%-25%. Kapasitas *single train* gasifier dari teknologi ini mencapai 2000 ton batubara/hari. Gasifier jenis ini di-klaim telah digunakan di pabrik ammonia/urea, SNG (*synthetic natural gas*), dan tiga buah pabrik metanol.

Satu gasifier *entrained flow* dari teknologi lain menggunakan cara pengumpanan batubara dalam bentuk bubuk. Gasifier dengan *slurry feeding* cocok untuk batubara dengan *inherent moisture* yang rendah. Kapasitas *single train* gasifier jenis ini sebesar 1650 ton batubara/hari. Tipe gasifier ini telah digunakan pada 18 pabrik metanol dan tiga pabrik amonia dalam kurun waktu 2005-2010.

Gasifier dengan tipe *fixed bed* dahulu telah digunakan untuk produksi CH₄ buatan (SNG, *Synthetic Natural Gas*) di Afrika Selatan. Beberapa buah pabrik ammonia juga ada yang menggunakan gasifier *fixed bed*, yang memiliki kapasitas *single train* 1800 ton/hari. Sedangkan gasifier *fluidized bed* sejauh ini digunakan pada *Integrated Gasification Combine Cycle* (IGCC) untuk menghasilkan listrik. Kapasitas *single train* gasifier pada waktu tersebut adalah 4000 ton/hari batubara.

Hasil-hasil jajak pendapat di atas dirangkum menjadi satu penilaian terhadap relatif-pentingnya satu kriteria terhadap kriteria lainnya, dan bobot prioritas masing-masing teknik gasifikasi. Kedua

kelompok responden memiliki pendapat yang sama terhadap pentingnya *kesesuaian teknik dengan sifat batubara*, dan *kinerja proses gasifikasi* (Tabel 8.7).

Tabel 8.7 Penilaian pemilihan teknik gasifikasi batubara

No.	Kriteria Pemilihan	Bobot	Bobot Prioritas Alternatif		
			<i>Fixed Bed</i>	<i>Fluidized Bed</i>	<i>Entrained Flow</i>
1.	Sifat batubara	41,68%	25,6%	36,6%	37,8%
2.	Kinerja proses gasifikasi	40,41%	17,7%	35,4%	46,9%
3.	Pengalaman komersialisasi	17,91%	23,0%	8,9%	68,1%
Prioritas Alternatif			21,9%	31,2%	46,9%

Dari segi kesesuaiannya dengan sifat batubara, *fluidized bed gasifier* dan *entrained flow gasifier* mendapat bobot prioritas saling mirip, dan lebih tinggi daripada *fixed bed gasifier*. Dalam kriteria kinerja proses gasifikasi, *fixed bed gasifier* makin tertinggal dari *fluidized bed gasifier* dan jauh di bawah *entrained flow gasifier*. Pada saat itu, beberapa gasifier tipe *down draft fixed bed* telah terpasang dan di antaranya telah dioperasikan. Sayangnya, kinerja operasionalnya kurang memuaskan. Mungkin informasi inilah yang mempengaruhi pendapat responden.

Dari segi *pengalaman operasional dan komersialisasi penggunaannya* di pabrik-pabrik kimia, *entrained flow gasifier* mendapatkan prioritas jauh di atas dua teknik lainnya. Memang dalam presentasi dan pustaka terbuka, banyak pemegang lisensi menonjolkan keberhasilan teknologi gasifikasi tipe *entrained flow* dalam penyediaan gas sintesis untuk pabrik ammonia dan pabrik metanol.

Hasil evaluasi akhir AHP menunjukkan teknologi *entrained flow* merupakan teknik yang paling cocok untuk digunakan pada pabrik pupuk dengan bahan baku batubara Tanjung Enim. Kriteria penting dalam pemilihan teknik gasifikasi adalah sifat batubara dan kinerja proses gasifier. Sub kriteria *fixed carbon* dan *ash fusion temperature* pada sifat batubara dan sub kriteria jumlah *effective syngas* pada kriteria kinerja gasifier menjadi perhatian utama dalam pemilihan teknik gasifikasi batubara.

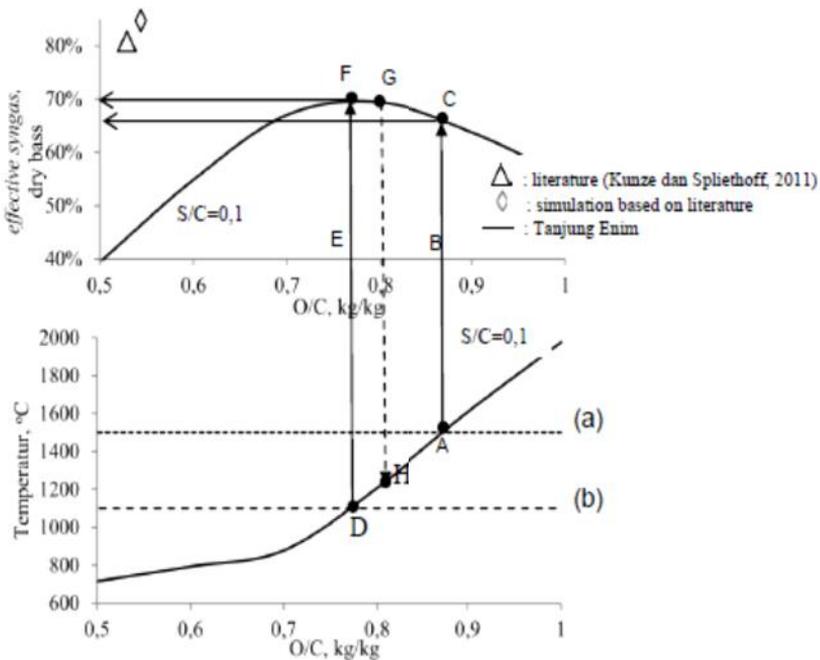
8.6 Simulasi Termodinamika

Selanjutnya untuk aspek pola pengeluaran cara abu pada *entrained flow gasifier, dry* atau *slagging ash removal*, simulasi termodinamika telah dilakukan. Simulasi dilakukan untuk memperkirakan temperatur kesetimbangan reaksi gasifikasi sebagai fungsi perbandingan laju O_2 terhadap laju batubara (contoh hasil simulasi disajikan di Gambar 8.3).

Dengan *ash fusion temperature* $1390^{\circ}C$, jika batubara Tanjung Enim diproses dalam gasifier dengan *slagging ash removal*, temperatur gasifikasi harus dijaga minimal $1500^{\circ}C$. Proses gasifikasi ini dapat dicapai jika perbandingan laju oksigen/batubara, O/C kira-kira 0,9 kg/kg (titik A di Gambar 8.3). Simulasi ini dilakukan untuk proses gasifikasi dengan perbandingan kukus/batubara 0,1 kg/kg. Gas hasilnya memiliki *effective syngas* sekitar 66% (titik C).

Batubara ini juga dapat diolah dalam gasifier dengan *dry ash removal*. Proses gasifikasinya harus dilaksanakan pada temperatur di

bawah 1390°C. Misalnya dengan O/C 7,7 kg/kg (titik D), temperatur gasifikasi diperkirakan sekitar 1150°C dan dengan *effective syngas* 70%.



Gambar 8.3 Efek O₂/Coal terhadap *effective syngas* dan temperatur

8.7. Peluang Pengembangan

Fixed bed gasifier (*down draft* dan *updraft*) untuk memproses batubara sudah banyak dipasang di Indonesia, tetapi kinerjanya belum teruji. *Updraft gasifier* dan *fluidized gasifier* sudah dioperasikan dan diuji di *tekMIRA*, Palimanan. *Twin fluidized bed gasifier* skala pilot di Kawasan Pupuk Kujang telah diuji dan berhasil baik dengan berbagai jenis batubara. Belum satupun *entrained flow gasifier* walaupun dalam skala laboratorium dilaporkan dari penelitian di Indonesia.

9. INDUSTRI DME BERBASIS BATUBARA

Melalui proses gasifikasi, batubara dapat dibuat menjadi gas sintesis, kemudian menjadi metanol dan akhirnya menjadi DME. Di samping dikonversi menjadi DME, metanol dapat digunakan sebagai bahan baku berbagai produk, misalnya:

- a. etilen dan propilen yang selanjutnya menjadi bahan baku plastik
- b. etanol melalui berbagai reaksi kimia
- c. biodiesel.

Dengan ketersediaan batubara peringkat rendah yang belum dimanfaatkan dan biomassa limbah perkebunan, teknologi produksi DME dari sumber daya alam *baru dan terbarukan* patut dikembangkan untuk mendukung program pengurangan impor LPG.

Hingga tahun 2017, produksi DME di Indonesia sebatas untuk memenuhi kebutuhan *propellant* pada industri kosmetik, penyegar ruangan, cat semprot kemasan, obat nyamuk semprot dan sejenisnya. Kebutuhan dalam negeri dipenuhi oleh sebuah pabrik di Tangerang dengan kapasitas produksi DME 12.000 ton/tahun, dan berbahan baku metanol.

Berdasarkan rencana induk pengembangan industri nasional (RIPIN) 2015 s.d 2035, metanol dijadikan salah satu industri hulu yang mendapat prioritas pengembangan industri kimia dasar berbasis migas dan batubara di Indonesia. Dengan demikian, peta jalan pengembangan industri DME di Indonesia, dapat dikatakan, mengikuti peta jalan industri metanol tersebut.

Walaupun ada satu pabrik metanol, PT Kaltim Metanol Industri, dengan kapasitas terpasang 660.000 ton/tahun, sebagian kebutuhan metanol dalam negeri masih dipenuhi dengan impor. Dari data BPS, impor metanol Indonesia tahun 2016 adalah sebesar 480.000 ton.

Pabrik metanol/DME mungkin lebih menarik daripada membuat LNG dari gas alam yang diperoleh dari sumber gas alam dengan kapasitas relatif kecil (100-400 MMSCFD) yang diketemukan di daerah terpencil. Serupa dengan kasus gas alam ini, pembangunan pabrik metanol/DME di mulut tambang batubara mungkin menarik untuk dikembangkan agar batubara peringkat rendah dapat dimanfaatkan sepenuhnya. Metanol hasil produksi di dekat mulut tambang batubara dapat ditransportasi dengan mudah dan kemudian dikonversi menjadi DME di lokasi pengguna DME.

Beberapa rencana pembangunan pabrik metanol/DME dari batubara di Indonesia diberitakan beberapa tahun berselang. Misalnya pada tahun 2010, ada berita rencana pembangunan pabrik metanol dari batubara di Parang, Riau dengan kapasitas produksi 900.000 ton/tahun. Produk metanol dari Riau ini direncanakan untuk dikirim ke Indramayu dan diolah menjadi DME dengan kapasitas produksi 840.000 ton/tahun. Investasi pembangunan pabrik tersebut dilaporkan sebesar USD 330 juta. Baru-baru ini (2017) dikabarkan sebuah rencana pembangunan pabrik pengolahan batubara di Sumatra Selatan menjadi metanol dengan kapasitas 600.000 ton/tahun. Produk metanol ini dikonversi menjadi olefin dengan kapasitas 300.000 ton/tahun.

Proses produksi DME dari gas sintesis dapat digolongkan ke dalam dua teknologi proses yang dapat digunakan yaitu: yang tak-langsung dan yang langsung

- a. Pada proses sintesis tak langsung, DME diproduksi dari methanol, dan selanjutnya metanol dikonversi ke DME. Teknologi ini sudah mapan, dan banyak diterapkan secara komersial di dunia. Dengan proses ini, pola produksi dapat fleksibel: produksi metanol atau produksi DME, atau produksi metanol dan DME.
- b. Pada sintesis langsung, gas sintesis langsung dikonversi DME di dalam satu reaktor DME. Sebenarnya di dalam reaktor ini terdapat dua katalis (i) untuk sintesis metanol dari gas sintesis; atau (ii) satu katalis yang mengandung dua inti fungsional. Teknologi sintesis langsung DME dimaksudkan untuk mengurangi biaya investasi peralatan. Teknologi ini relatif masih baru dibandingkan terhadap teknologi sintesis tak langsung. Jumlah pabrik DME komersial yang menggunakan teknologi ini masih sangat sedikit.

Bagian hulu proses produksi metanol adalah proses penyediaan gas sintesis dengan perbandingan mol H_2/CO sekitar 2. Proses hulu tersebut dapat berupa: *steam reforming* gas alam, gasifikasi batubara atau gasifikasi biomassa.

9.1. Neraca Massa dan Energi

Hasil perhitungan neraca massa dan energi suatu kasus sistem produksi metanol dan DME disajikan pada Tabel 9.1.

Tabel 9.1. Rangkuman neraca massa dan energi produksi DME
(proses tak-langsung, 2000 TPD DME)

A.	Unit Produksi Metanol dari bahan baku	Batubara	Gas Alam
3	Kebutuhan bahan baku	382 TPD	83,7 MMSCFD
4	Kebutuhan oksigen, TPD	2774	-
5	Kebutuhan make-up BFW, TPD	2971	1128
8	Kebutuhan bahan bakar	5,3 TPH	16,3 MMSCFD
9	Kebutuhan <i>steam</i> bahan baku, TPD	27,62	224
10	Kebutuhan Listrik, MW	83,8	40,6
11	Sirkulasi air pendingin TPD	24.170	19.865
12	Kebutuhan energi spesifik, MMBTU/ton metanol	35,6	33,0
	Unit Produksi DME dari Metanol		
15	Kebutuhan bahan bakar untuk sistem utilitas dan <i>steam</i>	dari <i>heat recovery</i> unit produksi metanol	
17	Kebutuhan listrik, MW	2,5	2,5
18	Sirkulasi air pendingin, TPD	4327	4168

9.2 Dasar Kajian Ekonomi

Dalam kajian ekonomi kasus ini dilakukan dalam dua bagian: (i) kajian ekonomi produksi DME dari metanol dan (ii) kajian ekonomi produksi metanol dari gas alam atau batubara. Kajian pertama dilandasi pemikiran bahwa teknologi produksi DME dari metanol sudah mapan, dan satu pabrik komersial sudah ada di Indonesia. Kajian bagian kedua dilandasi pemikiran untuk menilai sejauh mana produksi metanol dari batubara dapat lebih menarik secara ekonomi daripada produksi metanol dari gas alam.

Karena DME belum dipasarkan di Indonesia sebagai bahan bakar, harga jual DME disetarakan harga energi LPG (laporan ini disusun pada

2017). Jika harga LPG sekitar 617 USD/MT dan kandungan energi DME sekitar 60% LPG, maka harga DME sebagai bahan bakar kira-kira 390 USD/MT.

Kajian ekonomi disusun atas dasar perkiraan investasi pabrik, perkiraan biaya produksi dengan memperhatikan keuntungan ekonomi atas dasar *weighted average cost of capital (WACC)* pabrik kimia sebesar 6,8%. Daya tarik ekonomi didasarkan pada perbandingan harga jual produk DME keluar pabrik.

Kapasitas pabrik DME dalam kajian ini 1400-3500 TPD, atau kira-kira setara dengan kapasitas pabrik metanol komersial saat ini 2000-5000 TPD. Investasi pabrik DME dari metanol diperkirakan 183 dan 284 jutaUSD untuk kapasitas produksi DME berturut-turut: 1400 dan 3500 TPD (setara dengan kapasitas pengolahan metanol 2000 dan 5000 TPD).

9.3. Kajian Ekonomi Metanol ke DME

Kajian keekonomian produksi DME pada kasus ini dilakukan dengan skenario atas dasar harga metanol:

- (i) harga impor Indonesia impor Indonesia pada tahun 2016-2017, rata-rata adalah 359 USD/MT
- (ii) harga pasar dunia yang berflutuasi sangat besar, dan terendah adalah 268 USD/MT.

Walaupun perhitungan ekonomi pabrik DME dengan harga metanol di pasar dunia yang terendah, biaya produksi DME masih lebih tinggi dibandingkan dengan harga jual maksimumnya sebagai bahan

bakar setara LPG di Indonesia. Dari hasil analisis sensitivitas ekonomi ini terungkap bahwa biaya produksi DME tidak banyak dipengaruhi oleh kapasitas produksi, serta perubahan beberapa parameter ekonomi lainnya, tetapi sangat dipengaruhi harga metanol. Dengan demikian, upaya penurunan biaya produksi DME dari metanol haruslah penurunan harga metanol sebagai bahan bakunya. Jika harga bahan baku, metanol diasumsikan dapat turun sampai 250 USD/MT, margin keuntungan kotor (*gross profit margin*) masih rendah, hanya sekitar 7 USD/MT DME. Artinya pembangunan pabrik DME dari metanol akan menarik secara ekonomi, jika harga metanol di bawah 250 USD/MT. Harga metanol tersebut mungkin dapat dicapai dengan produksi metanol dari batubara *peringkat rendah* atau biomassa yang berlimpah.

Tabel 9.2 Perkiraan harga jual DME berbahan baku metanol

	kapasitas produksi DME, TPD	1400	3500
	kapasitas pengolahan metanol, TPD	2100	5000
	harga bahan baku, metanol (2016-2017):	total biaya produksi DME, USD/MT	
1.	data impor Indonesia, 359 USD/MT	602	590
2.	terendah di pasar dunia, 268 USD/MT	474	462
3.	harga maksimum setara LPG, USD/MT	390	
<ol style="list-style-type: none"> 1. harga DME di Tiongkok (2015): sekitar 500 USD/MT 2. di USA (proyeksi 2024): 4.01 USD/galon atau 14.300 Rp/L setara solar 3. di USA (2013): 0,95 USD/L atau 12.900 Rp/L setara solar 4. komunikasi pribadi, harga DME sebagai propelan: 21.000 Rp/kg 			

9.3. Kajian Ekonomi Batubara ke Metanol

Kajian berikut ini berisi perkiraan biaya produksi metanol dengan bahan baku batubara peringkat rendah dan dibandingkan terhadap yang berbahan baku gas alam. Di samping berbagai parameter ekonomi, pendekatan utama dalam kajian ini adalah harga batubara senilai 20 USD/MT dan harga gas alam 6 USD/MMBTU. Dengan asumsi bahwa kadar air batubara peringkat rendah tersebut mencapai 50%, kebutuhan batubara mencapai 3,5 ton untuk setiap 1 ton produk metanol.

Tabel 9.3. Ringkasan kajian ekonomi pabrik metanol

		gas alam		batubara	
A.	Produksi Metanol, ton/hari (TPH)	2.000	5.000	2.000	5.000
B.	<i>Fixed capital investment</i>	534	960	1.107	2.121
	<i>Working capital and start up cost</i>	104	227	149	304
	Total investasi	638	1.187	1.256	2.425
C.	Biaya produksi				
1.	Bahan baku, USD/MT	198	198	70	70
2.	Utilitas ,USD/MT	10	10	20	20
3.	Tenaga kerja USD/ton	1	1	3	1
4.	Jasa teknis dan perawatan, USD/MT	17	12	69	52
5.	Administrasi dan asuransi, USD/MT	9	7	21	15
6.	Depresiasi, USD/MT	81	58	168	129
7.	Distribusi dan penjualan, USD/MT	18	18	18	18
8.	Total Biaya Produksi, USD/MT	316	285	350	286
9.	IRR, untuk harga jual 359 USD/MT	7,9%	12,1%	4,9%	8,6%
D.	Harga jual min. agar IRR 6,8% (WACC), USD/MT	347	313	398	325
E.	Harga metanol impor rata ² (2016-2017)	359 USD/MT			
	Harga metanol dunia terendah	268 USD/MT			
	Harga metanol tertinggi, USD/MT	575 USD/MT			

Biaya investasi pabrik metanol dengan bahan baku batubara ternyata dua kali lebih tinggi daripada yang gas alam (Tabel 9.3). Perbedaan investasi ini mencerminkan tingginya investasi unit gasifikasi, dan juga unit pembersih dan pengaturan komposisi gas sintesis hasil gasifikasi batubara, serta *coal preparation*. Akibatnya nilai depresiasi sangat besar.

Dengan kriteria *IRR* 6,8%, biaya produksi metanol dari batubara menarik secara ekonomi ketika harga metanol sedang pada puncak fluktuasinya, 575 USD/MT (Tabel 9.3). Tetapi pada saat harga metanol di pasar dunia berada di titik terendah, pembangunan pabrik metanol di dalam negeri dengan bahan baku gas alam-pun kurang menarik. Dengan kondisi keekonomian seperti ini, pembangunan pabrik metanol sebaiknya diarahkan untuk konversi metanol lebih-lanjut misalnya menjadi DME dan etilen/propilen yang memiliki harga jual tinggi.

Biaya produksi metanol berbahan bakar batubara pada kapasitas 5000 TPD sedikit dibawah harga metanol rata-rata di Indonesia, dan memiliki *IRR* 8,6% (Tabel 9,3). Menurut perhitungan, produksi metanol dari batubara sudah memiliki *IRR* 6,8% atau biaya produksi sekitar 359 USD/MT, jika kapasitas produksinya sekitar 3000 TPD.

Investasi pabrik metanol dari batubara sangat mempengaruhi biaya produksi, karena besarnya porsi investasi peralatan proses gasifikasi di dalam investasi total. Penurunan investasi sebesar 25% pada sistem pemroses batubara menjadi DME dengan kapasitas 2000

TPD dapat memberi kenaikan *IRR* dari 4,9% menjadi 6,8% (*IRR* minimum).

9.4 Peluang Gasifikasi Batubara dalam Produksi Metanol/DME

Walaupun dengan bahan baku yang berbeda, gas sintesis dari batubara atau yang dari gas alam dikonversi dahulu menjadi metanol dan kemudian dehidrasi metanol menjadi DME. Bedanya, yang berbahan baku batubara memerlukan unit gasifikasi beserta banyak unit pendukung dan unit pendamping.

Sebagaimana dibahas pada bab pemilihan teknik gasifikasi, banyak pertimbangan untuk menetapkan teknologi gasifikasi. Produksi gas sintesis dengan kapasitas besar biasanya dapat dipenuhi dengan satu unit *entrained flow gasifier*. Jika menggunakan *fluidized bed gasifier* – apalagi *fixed bed gasifier*, satu rangkaian produksi metanol/DME memerlukan beberapa gasifier. Banyaknya unit gasifier ini jelas mempengaruhi nilai investasi, dan mungkin juga mempengaruhi kehandalan keseluruhan proses. Jika dikaitkan dengan kajian ekonomi sederhana di atas, investasi rangkaian gasifikasi (*gasification island*) dapat menempati 25% porsi investasi total, yang pada akhirnya mempengaruhi biaya produksi dan daya tarik keekonomian.

10. PENUTUP

Peranan teknologi gasifikasi telah diungkapkan secara ringkas dalam buku orasi ilmiah ini. Gasifikasi sangat relevan untuk dikembangkan menjadi salah satu teknik konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan untuk daerah terpencil, khususnya daerah perbatasan dan kepulauan.

Gasifikasi juga perlu dikembangkan untuk konversi biomassa/batubara menjadi sumber bahan kimia melalui pembentukan gas sintesis kaya H_2 dan CO , terutama untuk memanfaatkan limbah sawit dan limbah perkebunan lain yang telah terkumpul.

Pemanfaatan batubara kualitas rendah dapat ditingkatkan dengan bantuan proses gasifikasi. Salah satu komoditi penting turunan batubara adalah metanol/DME. Arah pengembangan bisnis batubara menjadi DME adalah: (i) produksi metanol di dekat pertambangan batubara; (ii) transportasi metanol ke lokasi pengguna produk akhir; (iii) konversi metanol menjadi DME, atau etilen dan propilen di lokasi pengguna. Pemanfaatan batubara peringkat rendah diharapkan dapat meningkatkan pendapatan pemerintah melalui *royalty* pertambangan batubara peringkat rendah tersebut yang dikelola saat ini.

Walaupun kajian-kajian yang telah dilakukan belum menampilkan daya tarik ekonomi, teknologi gasifikasi dan implementasinya harus dikembangkan terus dengan lebih intensif. Batubara peringkat rendah dan biomassa telah tersedia, maka peluang harus ditangkap.

Seiring dengan pengembangan teknologi ini, peningkatan kompetensi Sumber Daya Manusia di bidang ini juga perlu dikembangkan. Peningkatan kompetensi pada masa kini sangat mudah untuk dilaksanakan, misalnya dengan *group discussion* melalui *media sosial*, disamping pelatihan terstruktur oleh organisasi keprofesionalan.

Terkait dengan pengembangan SDM ini, *Program Studi Bioenergi dan Teknik Kemurgi FTI-ITB* sebaiknya menambah porsi untuk *teknik konversi termal biomassa* ke dalam kegiatan akademik. Kegiatan akademik tersebut dapat berupa tugas akhir perancangan pabrik, penelitian dan pembahasan kasus-kasus *konversi termal biomassa* dalam perkuliahan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian dan pengembangan teknologi gasifikasi biomassa di Teknik Kimia FTI-ITB dimulai sejak tahun 1978, dalam proyek JTA-9a, yang dipimpin oleh Prof. Soehadi Reksowardojo (alm) dan Prof. Sudarno Harjosaputro (alm). Arahannya berdua telah ikut membentuk kepakaran penulis di bidang gasifikasi biomassa dan implementasinya di berbagai daerah terpencil.

Terima kasih, penulis sampaikan kepada Prof. A.A.C.M Beenacker (alm), dan Dr. A.W. Gerritsen yang telah melatih ketrampilan teknik dan olah-pikir untuk mendalami ilmu-ilmu dasar yang diperlukan dalam penelitian gasifikasi.

Dorongan untuk terus menjaga dan mengembangkan kepakaran bidang gasifikasi, penulis peroleh secara langsung maupun tidak langsung dari Prof. Dr. Saswinadi Sasmojo, Dr. Tatang Hernas Soerawidjaya, dan Prof. Dr. Yazid Bindar.

Penulis banyak memperoleh wawasan teknik dan sosial-kemasyarakatan, ketika implementasi unit gasifikasi biomassa untuk listrik desa. Untuk itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada PTPN XVIII, PT BBI, CV Darmawan, DJELB/ LPE/ EBTKE, PTPN XIII, *Pasadena Engineering*, dan berbagai institusi terkait. Terima kasih khusus penulis sampaikan kepada Dr. Sunu Herwi Pranolo, Bapak Suwito dan Bapak Slamet atas kerja samanya dalam implementasi gasifikasi biomassa untuk listrik desa.

Kepada PT PUSRI, Perusahaan Gas Negara dan PT Bukit Asam, penulis menyampaikan terima kasih atas kepercayaannya dalam berbagai kajian tekno-ekonomi yang memperluas wawasan teknologi.

Terima kasih kepada alumni dan anggota LabTSU yang telah memberi dukungan dalam peningkatan suasana akademik, dan pengembangan ilmu konversi termal biomassa dan ilmu-ilmu dasar: sistem utilitas, neraca massa dan energi, dan termodinamika.

Penghargaan kepada Forum Guru Besar yang telah memberi kesempatan penulis untuk menyampaikan orasi ilmiah dengan topik yang sangat relevan dengan permasalahan bangsa.

Terima kasih atas doa dan restu orang tua (alm) dan mertua (alm). Kepada istri dan anak-anakku tercinta, penulis menyampaikan terima kasih atas keikhlasan mereka untuk melepaskan waktu penulis dalam pengembangan kepakaran bidang gasifikasi biomassa dan konversi termal biomassa.

BIODATA



Nama	Prof. Dr. Herri Susanto, IPM
Tempat dan Tanggal Lahir	Madiun, 27 April 1953
Kel. Keahlian	Energi dan Sistem Pemroses Teknik Kimia
Fak/ Sekolah	Fakultas Teknologi Industri
Nama Istri	Wieke Pratiwi
Nama Anak	1. Deviana Pramitasari 2. Dwita Rismayasari

- | | |
|--|-----------------------------------|
| 3. Andika Pradana Pramudia Sigit (menantu) | 5. Adrian Pramudito (menantu) |
| 4. Viggo Pradipta Sigit (cucu) | 6. Inaaya Alyona Pramudita (cucu) |

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. 1984 : S3 Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, ITB.
2. 1976 : S1 Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung, ITB.

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Staf Pengajar Fakultas Teknologi Industri-TK April 1976-sekarang.
2. Ketua Jurusan TK-ITB 1995-1998.
3. Wakil Ketua Jurusan TK-ITB 1992-1995.
4. Kepala Laboratorium Proses Hilir Pusat Antar Universitas Bioteknologi ITB 1988-1995.
5. Kepala Laboratorium Termofluida dan Sistem Utilitas, 1992-sekarang.
6. Ketua Komisi Program Pasca Sarjana FTI-ITB, 2012-2015.
7. Anggota Komisi Sekolah Pasca Sarjana-ITB, 2013-2015.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. CPNS, III/A, Oktober 1977.
2. Penata Muda, III/A, Oktober 1977.
3. Penata Muda TK 1, III/B, April 1982.

4. Penata, III/C, April 1985.
5. Penata TK I, III/D, September 1987.
6. Pembina, IV/A, November 1990.
7. Pembina TK. I, IV/B, 31 Agustus 1994.
8. Pembina Utama Muda, IV/C, April 1999.
9. Pembina Utama Madya, IV/D, Juni 2006.

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli Madya, November 1978.
2. Asisten Ahli, Oktober 1981.
3. Lektor Muda, Oktober 1984.
4. Lektor Madya, April 1987.
5. Lektor (*inpassing*), April 1990.
6. Lektor Kepala Madya, April 1994.
7. Lektor Kepala (*Inpassing*), Oktober 1998.
8. Professor/Guru Besar, Agustus 2005.

V. KEGIATAN PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

1. *Research and Demonstration of Waste to Clean Energy Technology in Typical Southeast Asian Country*, Zhejiang University of Technology (ZJUT), Hangzhou, China, 2018-2020.
2. Konversi Limbah Padat Sawit menjadi Metanol dan Dimetil Eter melalui Proses Gasifikasi, Grand Riset Sawit 2016-2018.
3. *Hydrothermal Treatment* Terintegrasi untuk Konversi Tandan Kosong Sawit menjadi Bahan Bakar dan Bahan Baku Pupuk Kalium, Hibah Pasca-Dikti, 2017, 2018.
4. *Kajian Opportunity Study* Pengembangan Dimetil Ether (DME) PGN 2017.
5. Konversi Tar secara Katalitik untuk Menghasilkan Gas Sintesis Bersih (Hasil Gasifikasi), Hibah Kompetensi-Dikti, 2015, 2016.
6. *Efficient Use of Oil Palm Wastes as Renewable Resource for Energy & Chemicals*, *International Joint Research Grants*, NEDO 1998-2001.
7. Program Gasifikasi Biomassa untuk Listrik Pedesaan, Direktorat Energi Baru dan Terbarukan ESDM, 2015.

8. Kajian Potensi Biomassa untuk Kelistrikan, Perusahaan Gas Negara, 2015.
9. *Technology Assesment Methanol to Olefin from Natural Gas*, Perusahaan Gas Negara, 2015.
10. *Technology Assessment Natural Gas to Petrochemicals*, Perusahaan Gas Negara 2014.
11. Pengembangan Teknik Pengolahan *Sludge Cake* menjadi Bahan Baku Proses Gasifikasi untuk Produksi Syngas, Riset dan Inovasi KK 2011.
12. Pengembangan Konfigurasi *Air-Gasification Reactor* untuk Konversi Biomassa menjadi Gas Sintesis, Riset KK 2010.
13. Penyempurnaan Teknologi Gasifikasi Biomassa sebagai Sumber Energi Alternatif yang Ramah Lingkungan, *Tanoto Professorship*, 2007-2010.
14. Studi Hidrodinamika Campuran Partikel Batubara, Sekam Padi dan *Raw Meal* pada Proses Kalsinasi di Pabrik Semen, Riset Unggulan ITB, 2006.
15. Pemanfaatan Sekam Padi sebagai Bahan Bakar Alternatif di Pabrik Semen, Riset Unggulan ITB, 2005.
16. Studi Pemanfaatan Batubara Kualitas Rendah melalui Gasifikasi sebagai Sumber Bahan Baku dan Energi Alternatif di PT PUSRI, Kerjasama LPPM-ITB dengan PT PUSRI, 2005.
17. Pengujian PLTD-Gasifikasi Sekam 100 kW di Penggilingan Gabah PT Pertani, Kec. Haur Geulis, Kab. Indramayu, Kerjasama LPPM-ITB dengan Direktorat Jenderal Listrik dan Pemanfaatan Energi, Departemen ESDM-RI, 2005.
18. Pembuatan dan Uji-Coba Unit Gasifikasi 100 kg/jam untuk Bahan Bakar di Pabrik Teh, Kerjasama LPPM-ITB dengan PT. Sariwangi, Divisi Engineering 2005.
19. Pengembangan Proses Produksi Furfural, Riset Unggulan ITB, tahun Anggaran 2004.

VI. PUBLIKASI

1. Dwi Hantoko, Hongcai Su, Mi Yan, Ekkachai Kanchanatip, **Herri Susanto**, Guobin Wang, Sicheng Zhang, Zhang Xua,

- Thermodynamic Study on the Integrated Supercritical Water Gasification with Reforming Process for Hydrogen Production: Effects of Operating Parameters*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 37, 2018.
2. Dwi Hantoko, Mi Yan, Bayu Prabowo, **Herri Susanto**, *Hydrothermal Treatment of Empty Fruit Bunch and Its Pyrolysis Characteristic*, Energy Procedia 152, 1003-1008, 2018.
 3. Joko Waluyo, I. G. B. N. Makertiharta, and **Herri Susanto**, *Pyrolysis with Intermediate Heating Rate of Palm Kernel Shells: Effect Temperature and Catalyst on Product Distribution*, AIP Conference Proceedings, Vol. 1977, No. 1, 2018.
 4. **Herri Susanto**, Taniadi Suria, Sunu Herwi Pranolo, *Economic Analysis of Biomass Gasification for Generating Electricity in Rural Areas in Indonesia*, IOP Conference Series, Vol. 334, No. 1, 2018.
 5. Petric Marc Ruya, **Herri Susanto**, dan Mubiar Purwasasmita, *Experimental Study on Pressure Drop and Flow Dispersion in Packed Bed of Natural Zeolite*, MATEC Web of Conference, Vol. 156, 02006, 2018.
 6. Joko Waluyo, Tobias Richards, IGBN Markertiharta, **Herri Susanto**, *Modification of Natural Zeolite as a Catalyst for Steam Reforming of Toluene*, ARPN Journal of Engineering and Applied Science (ARPN-JEAS), Vol 17, No.1, 37-45, 2017.
 7. Muflih Arisa Adnan, **Herri Susanto**, Housam Binous, Oki Muraza, Mohammad M. Hossain, *Enhancement of Hydrogen Production in a Modified Moving Bed Downdraft Gasifier – A Thermodynamic Study by Including Tar*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 42, No 16, hal 10971 – 10985, 2017.
 8. Muflih A. Adnan, **Herri Susanto**, Housam Binous, Oki Muraza, Mohammad M. Hossain, *Feed Compositions and Gasification Potential of Several Biomasses Including a Microalgae: A Thermodynamic Modeling Approach*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol 42, 27, 17009-17019, 06 Juli 2017.
 9. David Bahrin, Subagjo, dan **Herri Susanto**, *Reduction of SO₂ Emmision using CuO/ γ Al₂O₃ Adsorbent: Case Study on*

- Combustion of Algae Biomass Having High Sulfur Content*, Journal of Japan Institute of Energy, Vol. 96, No. 8, 2017.
10. **Herri Susanto** dan Aisyah Ardy, *Perbandingan Aktivitas Katalis Dolomit dan Batu Kapur Lokal dengan Katalis Nikel Komersial untuk Dekomposisi Toluena Sebagai Model Tar*, Jurnal Teknologi Bahan dan Barang Teknik, Vol. 6, No. 1, Juni 2016.
 11. Hendriyana, **Herri Susanto**, dan Subagjo, *Process Assesment of Small Scale Low Temperature Methanol Synthesis*, AIP Conference Proceedings, AIP Conf, Proc. 1699,050010, 2015.
 12. Hendriyana, **Herri Susanto**, and Subagjo, *Thermodynamics and Kinetic Study of CH₃OK Preparation from KOH and CH₃OH*, ARPN Journal of Engineering and Applied Science (ARPN-JEAS), Vol. 11, No.16, Agustus 2016.
 13. Yuono, David Bahrin and **Herri Susanto**, *Preparation and Characterization of CuO/ γ -Al₂O₃ for Adsorption of SO₂ in Flue Gas*, Modern Applied Science, Publish by Canadian Center of Science and Education, Vol. 9, No.7, 107- 113, 30 Juni 2015.
 14. David Bahrin, Subagjo, **Herri Susanto**, *Effect of Regeneration Temperature on Particle Characteristics and Extent of Regeneration of Saturated SO₂-Adsorption of CuO/ γ -Al₂O₃ Adsorbent*, Procedia Chemistry, Science Direct, Vol. 16, hal 723- 727, Desember 2015.
 15. Hendriyana, Subagjo, **Herri Susanto**, *Carbonylation of Methanol with CO in Presence Potassium Methoxide Catalyst*, Procedia Chemistry, Science Direct, Vol. 16, hal 716-722, 29 Desember 2015.
 16. Bayu Prabowo, Muhammad Aziz, Kentaro Umeki, **Herri Susanto**, Mi Yan, Kunio Yoshikawa, *CO₂-Recycling Biomass Gasification System For Highly Efficient And Carbon-Negative Power Generation*, Applied Energy, Elsevier, 158, Vol. 158, hal 97- 106, 2015.
 17. Bayu Prabowo, Muhammad Aziz, Kentaro Umeki, Mi Yan, **Herri Susanto**, and Kunio Yoshikawa, *Utilization Of Rice Husk In The CO₂-Recycling Gasification System for the Effective Implementation of Bioenergy with Carbon Capture and Storage*

- (BECCS) *Technology*, ACS SYMPOSIUM SERIES eBook – Advances in CO₂ Capture, Sequestration, and Conversion, Chapter 13, hal 323- 340, 2015.
18. Bayu Prabowo, **Herri Susanto**, Kentaro Umeki, Mi Yan, Kunio Yoshikawa, *Pilot Scale Autothermal Gasification of Coconut Shell With CO₂-O₂ Mixture*, *Frontier In Energy*, DOI 10.1007/s11708-015-0375-5, Springer, Vol. 9, No. 3, hal 362-370, 2015.
 19. Hendriyana, Subagjo, dan **Herri Susanto**, *Carbonylation of Methanol with CO in Presence Potassium Methoxide Catalyst*, *International Symposium on Applied Chemistry 2015 (ISAC 2015)*, *Procedia Chemistry*, Science Direct, Vol.16, hal 716 – 722, 2015.
 20. David Bahrin, S. Subagjo, dan **Herri Susanto**, *Kinetic Study on the SO₂ Adsorption using Adsorbent CuO/ -Al₂O₃*, *Bulletin of Chemical Reaction Engineering & Catalysis*, hal 93-99, ISSN: 1978-2993, 2015.
 21. Sunu Herwi Pranolo, Jaya Lingga Prasetyo, **Herri Susanto**, *A Review of Dual Power Plant Based On Palm Midrib Gasification in Riau Province*, *International Seminar on Biorenewable Resources Utilization For Energy and Chemicals*, In Conjunction with Chemical Engineering Seminar of Soehadi Reksowardojo, 10-11 Oktober 2013.
 22. David Bahrin dan **Herri Susanto**, *Thermodynamic Study on Adsorption of SO₂ from Flue Gas on CuO/Y-AL₂O₃ and Subsequent Desorption of SO₃*. *International Seminar on Biorenewable Resources Utilization For Energy and Chemicals 2013*, In Conjunction with Chemical Engineering Seminar of Soehadi Reksowardojo, 10-11 Oktober 2013.
 23. Yuono and **Herri Susanto**, *Preparation and Characterization of CuO/Y-AL₂O₃ as Absorbent for SO₂ in flue Gas*, *International Seminar on Biorenewable Resources Utilization for Energy and Chemicals*, In Conjunction with Chemical Engineering Seminar of Soehadi Reksowardojo, 10-11 Oktober 2013.
 24. Andri Wibawa Syarip, Nurhadi dan **Herri Susanto**, *Penggunaan Analytic Hierarchy Proses (AHP) dalam Pemilihan*

- Teknologi Gasifikasi Atas Dasar Sifat Batubara*, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 20-22 September 2012.
25. Joko Waluyo, **Herri Susanto**, *Penggunaan Model UNIFAC untuk Prediksi Kelarutan CO dan H₂ pada Berbagai Pelarut dalam Kaitannya dengan Sintesis Metanol*, Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, 20-22 September 2012.
 26. Joko Waluyo dan **Herri Susanto**, *Prediction of Solubilities of CO, H₂ and its Mixture in Various Solvents*, Prosiding Regional Symposium on Chemical Engineering, 7-8 November 2012.
 27. Hendriyana dan **Herri Susanto**, *Study on Chemical Reaction Equilibrium of Methanol Synthesis in Liquid Phase*, Prosiding Regional Symposium on Chemical Engineering, 7-8 November 2012.
 28. Suhartono, **Herri Susanto** dan Takao Kokugan, *Determination of Absorption Capacity and Mass Transfer Coefficient of Several Oils as Solvents for Biomass Gasification Cleaning System*, Journal of Chemistry and Chemical Engineering, Vol. 6 No. 4, April 2012.
 29. Yusman Arullah dan **Herri Susanto**, *Development Updraft Gasifier with Side Stream for Conversion of South Sumatra Coal into Synthesis Gas*, The 14th Asia Pacific Confederation of Chemical Engineering Congres, 2012.
 30. Syamsudin dan **Herri Susanto**, *Characterization of Drying Techniques for Up-Grading Sludge Cake*, 14th Asia Pasific Confederation of Chemical Enginnering Congress, 2012.
 31. Hendriyana, Suhartono dan **Herri Susanto**, *Thermodynamic Study on Vapour-Liquid Equilibrium of Toluene and Several Types of Oil As Absorbent*, Jurnal Teknik Kimia Indonesia, Vol. 10, No.1, April 2011.
 32. Frita Yuliati dan **Herri Susanto**, *Kajian Pemanfaatan Arang Sekam Padi Aktif sebagai Pengolah Air Limbah Gasifikasi*, Jurnal Teknik Kimia Indonesia Vol. 10 No.1, April 2011.
 33. Suhartono, **Herri Susanto**, Dwiwahju Sasongko, dan Azis Trianto, *Pengukuran Konstanta Henry Toluen dan Benzen dalam Minyak dan Air dengan Kolom Gelembung*, Jurnal Teknik Kimia Indonesia Vol. 9 No. 2, Agustus 2010.

34. Nurhadi, Diniyati, D. dan **Herri Susanto**, *Pengaruh Derajat Pengeringan Batubara Lignit terhadap Unjuk Kerja Gasifikasi Allothermal*, Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Agustus 2010.
35. Diyah Fadjarwati dan **Herri Susanto**, *Pengukuran Kelarutan Toluena dan Benzen dalam Minyak Nabati dengan Kolom Gelembung*, Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Agustus 2010.
36. Fitria Yulistiani, **Herri Susanto** dan Tri Partono Adi, *Kajian Tekno Ekonomi Pabrik Fischer Tropsch Diesel Berbasis Gasifikasi Janggal Jagung di Madura dan Sulawesi Selatan*, Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Agustus 2010.
37. Syamsudin dan **Herri Susanto**, *Simulasi Termodinamika Gasifikasi Sludge Pabrik Pulp Kraft untuk Penghematan Gas Alam Sebagai Bahan Bakar Lime Kiln*, Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses, Agustus 2010.
38. Sunu Herwi Pranolo dan **Herri Susanto**, *Kajian Termodinamika Konfigurasi Reaktor Gasifikasi untuk menghasilkan Gas Sintesis*, Seminar Nasional Soebardjo Brothohardjono VII, Surabaya, Juni 2010.
39. Hendriyana dan **Herri Susanto**, *Thermodynamic Study on Vapour-Liquid Equilibrium of Toluene and Several Types of Oil as Absorbent*, Regional Symposium on Chemical Engineering, Desember 2009.
40. Sunu Herwi Pranolo, Yazid Bindar, Dwiwahju Sasongko dan **Herri Susanto**, *Modeling and Simulation of a Separate Line Calciner Fueled with a Mixture of Coal and Rice Husk*, Regional Symposium on Chemical Engineering, Desember 2009.
41. Frita Yuliaty, Dwiwahju Sasongko, dan **Herri Susanto**, *Utilization of Activated Rice Husk Char for Gasification Wastewater Treatment*, Regional Symposium on Chemical Engineering, Desember 2009.
42. **Herri Susanto**, *Potential Reduction of CO₂-Emission in a Rural Electricity Fueled with Corn-Cobs via Gasification Process*, Invited

- Paper in the Third International Symposium on Novel Carbon Resource Sciences, Fukuoka, November 2009.
43. Sunu Herwi Pranolo dan **Herri Susanto**, *Technical Evaluation on the Use of Rice Husk as Partial Substitution of Coal for Fuel in a Calciner*, paper presented in the Third International Symposium on Novel Carbon Resource Sciences, Fukuoka, November 2009.
 44. Firdaus, Roshad; Andri Wibawa S, Agus Junaedi, **Herri Susanto** dan G.H. Argasetya, *Prospek Penggunaan Batubara Sumatera Selatan Sebagai Bahan Baku Industri Pupuk Urea*, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, Juli 2006.
 45. Junaedi, **Herri Susanto** dan Benny Haryoso, *Studi Awal Pemanfaatan Batubara Sebagai Pengganti Gas Alam untuk Bahan Bakar di Primary Reformer Pabrik Amoniak*, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, Juli 2006.
 46. Suhartono, Suwito, G. D. Sasongko dan **Herri Susanto**, *Uji Pengoperasian Fixed Bed Gasifier Batubara Kapasitas 100 kg/jam*, Seminar Nasional Teknik Kimia Indonesia, Juli 2006.
 47. Ari Susandy Sanjaya, Suhartono dan **Herri Susanto**, *Experimental Study on the Combustion Characteristic of Producer Gas*, Regional Symposium on Chemical Engineering, Desember 2000
 48. Sunu Herwi Pranolo, Dwiwahju Sasongko dan **Herri Susanto**, *The Effects of Rice Husk as an Alternative Energy for Calcination at a Cement Plant*, Regional Symposium on Chemical Engineering, Desember 2000.
 49. **Herri Susanto**, *Increasing Production of Furfural Using a Steam Stripping and Salting Out Effect Combined Technique*, Asia-Pacific Confederation of Chemical Engineers Conference, Kuala Lumpur, Agustus 2006.

VII. HAK CIPTA INTELEKTUAL

1. Herri Susanto, 2015, **Neraca Massa dan Energi dalam Rangkaian Sistem Pemroses Kimia**, Bukuteks, Penerbit ITB, Bandung, ISBN 978-602-9056-61-7.
2. Herri Susanto, 2016, **Sistem Utilitas di Pabrik Kimia**, Bukuteks, Penerbit ITB, Bandung, ISBN 978-602-7861-53-4.

VIII. PENGHARGAAN

1. Dosen Teladan II, ITB, 1989.
2. Penghargaan Pengabdian 10 Tahun, ITB, 1991.
3. Satyalencana Karya Satya 20 tahun, RI, Juli 2000 .
4. Penghargaan Pengabdian 25 Tahun, ITB, 2003.
5. Satyalencana Karya Satya 30 tahun, RI, Juli 2009.
6. Penghargaan Pengabdian 35 Tahun, ITB, Agustus 2015.
7. Piagam Penghargaan Pengabdian 40 Tahun, Institut Teknologi Bandung, Agustus 2018.

IX. SERTIFIKASI, PELATIHAN DAN KURSUS

1. Pengembangan Pendidikan Teknik Kimia, Proyek JTA-9A, Teknik Kimia, ITB, 1983.
2. *International Training on Energy Auditing in Industry*, Melbourne, April 1985.
3. *International Training Program in Industrial Biotechnology*, Braunschweig, FR Germany, Maret 1988.
4. *International Training Program Fermentation Technology*, Shanghai, Tiongkok, 1992.
5. Sertifikat *Insinyur Profesional Madya*, Persatuan Insinyur Indonesia, 2016.
6. *International Workshop on Waste to Energy*, Hangzhou, Tiongkok, Oktober 2016.

X. KEANGGOTAAN ASOSIASI

Anggota Badan Pengurus, Badan Kejuruan Kimia, Persatuan Insinyur Indonesia (BKK-PII), 1996-2015.