

KECENDERUNGAN PERKEMBANGAN TEKNOLOGI GASIFIKASI BIOMASSA: STUDI PERBANDINGAN DI BEBERAPA NEGARA

THE TREND OF TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF BIOMASS GASIFICATION: A COMPARATIVE STUDY IN SEVERAL COUNTRIES

Prakoso Bhairawa Putera, Wati Hermawati, Ishelina Rosaira Poerbosisworo
Pusat Penelitian Perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi –
Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia
Jln. Jend. Gatot Subroto, No. 10, Gedung A (PDII-LIPI) Lantai 4 – Jakarta 12720
Email: prak001@lipi.go.id, & pb.putera@gmail.com

Diterima (received) : 11-09-2015, Direvisi (reviewed) : 21-09-2015
Disetujui (accepted) : 04-11-2015

Abstrak

Gasifikasi biomassa merupakan salah satu teknologi modern yang dikembangkan melalui konversi termo kimia. Teknologi ini telah banyak dikembangkan di berbagai negara. Makalah ini memberikan penekanan pada perkembangan dan kecenderungan penggunaan teknologi gasifikasi di beberapa negara (Finlandia, Denmark, Thailand, Sri Lanka, Kamboja), dan pembelajaran bagi Indonesia. Setidaknya ada lima hal yang dapat menjadi kunci keberhasilan implementasi, yaitu riset dan pengembangan berkelanjutan dan berkesinambungan, pelibatan semua aktor dalam aktivitas riset dan pengembangan, implementasi pada skala kecil dahulu, perencanaan peta jalan hingga aksi dengan dukungan pendanaan yang kuat, dan dukungan sumber daya manusia di tingkat nasional dan lokal.

Kata Kunci : gasifikasi biomassa, tren teknologi, studi perbandingan.

Abstract

Biomass gasification in one of the modern technology that was developed by thermo-chemical conversion. This technology has been developed in many countries. This paper gives an emphasis on developments and trends in the use of gasification technology in some countries (Finland, Denmark, Thailand, Sri Lanka, Cambodia), and learning for Indonesia as well. At least there are five things that could be the key to the success of implementation, namely the ongoing and continuous research and development, the involvement of all actors in research and development activities, the implementation focuses on a small scale first, the roadmap plans into the action with a strong financial support, and the human resources support at national and local levels.

Key words : biomass gasification, technology trends, comparative study.

1. PENDAHULUAN

Saat ini dunia dihadapkan pada permasalahan yang mendesak untuk segera diselesaikan. Hasjim dan Toha (2013) menyebutkan setidaknya ada dua permasalahan yang mendesak yaitu terkait dengan krisis energi dan pemanasan global. Kebutuhan energi terus meningkat seiring dengan pertambahan penduduk, peningkatan perekonomian serta keberhasilan pembangunan ditengarai menjadi pemicu krisis energi saat ini. Perubahan tersebut menjadikan suplai energi dalam jumlah yang cukup untuk memenuhi kebutuhan energi terus meningkat. Namun, ironisnya pemenuhan energi selama ini

masih bertumpu pada bahan bakar fosil, khususnya yang berkaitan dengan minyak bumi dan batu bara. Menipisnya cadangan minyak bumi mengakibatkan munculnya ancaman terhadap kemampuan manusia untuk menyediakan energi. Ancaman tersebut menjelma dalam bentuk krisis energi yang telah menjadi isu nasional dan isu global dewasa ini.

Upaya untuk mengatasi krisis energi telah dicetuskan banyak negara dan komunitas di dunia. Kotarumalos (2010) mencontohkan negara Jerman. Negara tersebut dikenal miskin sumber daya alamnya, tetapi Jerman mengkonsentrasikan pada pengembangan teknologi energi terbarukan sebagai upaya untuk mengamankan pasokan energinya dan

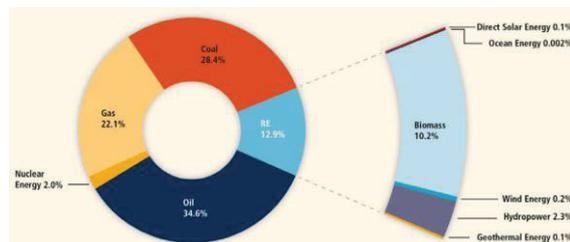
berkontribusi dalam pembangunan yang berkelanjutan. Jerman banyak belajar dari krisis minyak pada tahun 1973, dimana pemerintah Jerman mulai merubah strategi kebijakan energi mereka yaitu dengan menginvestasikan anggaran nasional mereka untuk penelitian dan pengembangan teknologi energi terbarukan terutama: tenaga surya dan turbin. Usaha itu tidak sia-sia karena pada akhir tahun 1980-an program tenaga surya dan turbin menjadi yang terbesar di Eropa. Memasuki tahun 2000 pemerintah Jerman mulai mengembangkan biofuel sebagai langkah untuk mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dengan melakukan intervensi kebijakan dari tingkat petani hingga pemasarannya dan juga melakukan sinergi antara industri dan ilmuwan. Usaha untuk pengembangan dan penggunaan energi terbaru tidak lepas dari dukungan organisasi non pemerintah dan partai-partai politik.

Contoh lain datang dari India, melalui *Ministry of New and Renewable Energy* pemerintah India telah mengoptimalkan pasokan energi dari potensi energi baru dan terbarukan yang dilakukan melalui peningkatan produksi dalam negeri. India menjalankan kebijakan diversifikasi energi, dengan perencanaan 5-6 persen energi *mix* terutama untuk mengkonversi pemakaian batubara dan minyak bumi di tahun 2032 (ESDM, 2010). Kebijakan pengembangan energi baru dan terbarukan di India dilakukan terhadap sumber energi yang berasal dari bahan bakar nabati, energi surya, energi bayu, dan energi mikrohidro. Adapun program utama yang dilakukan terhadap pengembangan energi tersebut adalah untuk program pengembangan energi terpadu di perdesaan, pengembangan kelistrikan di perdesaan tertinggal, biogas, dan energi terbarukan untuk daerah perkotaan, industri, dan perkotaan. Pemenuhan kebutuhan dan pasokan listrik menjadi kebijakan utama di India, menurut Vete (2003) hal ini tidak lepas dari terbitnya *Electricity Act* pada tahun 2003 dan energi baru dan terbarukan menjadi jawaban atas permasalahan energi di negeri tersebut.

Isu energi baru dan terbarukan juga menjadi perhatian pemerintah Cina, bahkan pada bulan September 2009 Pemerintah Cina menyatakan komitmennya bahwa pada tahun 2020, Cina memasok 15 persen kebutuhan energi primernya dari bahan bakar non fosil. Hal ini dilakukan untuk menjamin keamanan energi dan mengurangi emisi karbon dioksida. Fokus pengembangan energi terbarukan diarahkan pada energi angin, air, surya, dan biomassa (UNESCAP, 2012).

Komitmen untuk menghadirkan energi baru dan terbarukan di dunia semakin nyata dengan kesepakatan 75 negara menandatangani Statuta International Renewable Energy Agency (IRENA) pada bulan Januari 2008 di Bonn, Jerman. IRENA menjadi organisasi multilateral baru di bidang energi

terbarukan. Ini merefleksikan kuatnya komitmen negara-negara bagi pengembangan dan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan sebagai salah satu solusi dalam mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional.



Sumber: IPCC Special Report Renewable Energy Sources (SRREN) (2011)

Gambar 1. Distribusi Penggunaan Energi di Dunia Berdasarkan Sumber Energi.

Penggunaan energi baru dan terbarukan di dunia saat ini telah mengambil peran yang cukup signifikan. Berdasarkan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report Renewable Energy Sources (SRREN) di tahun 2011 Renewable Energy (RE) menempati urutan keempat sumber energi yang digunakan di dunia (lihat Gambar 1). Jika dilihat kelompok RE tersebut didominasi penggunaan energi dari biomassa sebesar 10,2%. Biomassa menurut Ladanai & Johan (2009) merupakan pilihan energi terbarukan terbesar dan paling penting saat ini, serta dapat digunakan untuk menghasilkan bentuk energi yang berbeda. Selain itu, dibandingkan dengan energi terbarukan lainnya, sumber daya biomassa pada umumnya tersebar luas di seluruh dunia.

Surmen (2002) menambahkan bahwa energi biomassa merupakan salah satu sumber awal energi. Biomassa digunakan untuk memenuhi berbagai kebutuhan energi, termasuk pembangkit listrik, pemanas rumah, bahan bakar kendaraan, dan digunakan untuk fasilitas industri. Sumber energi ini mampu menjadi kebijakan energi nasional dan strateginya berfokus pada lebih banyak sumber-sumber terbarukan dan konservasi. Produksi biomassa di dunia diperkirakan 146 miliar metrik ton per tahun. Pada masa mendatang biomassa diyakini mampu menyediakan pasokan energi dengan biaya efektif dan berkelanjutan, sementara pada saat yang sama dapat membantu negara-negara dalam memenuhi target pengurangan gas rumah kaca (Balat & Ayar, 2005). Seiring perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, biomassa telah bertransformasi menjadi bentuk yang lebih modern (Hambali, dkk., 2007).

Salah satu teknologi modern yang dikembangkan adalah konversi termokimiawi dengan cara gasifikasi. Energi listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai tujuan seperti

penerangan, pemanasan/pendinginan atau penggunaan lainnya. Metode ini telah banyak dikembangkan diberbagai belahan dunia. Terkait dengan itu maka penting untuk diketahui bagaimana perkembangan dan kecenderungan penggunaan teknologi gasifikasi di beberapa negara.

Makalah ini memiliki nilai strategis, terutama dalam mengungkapkan perkembangan dan kecenderungan penggunaan teknologi gasifikasi biomassa di beberapa negara, karena dengan mengetahui gambaran di beberapa negara maka dapat diketahui perkembangan terkini dari teknologi tersebut. Hal ini juga dapat dijadikan tambahan khazanah pengetahuan tentang perkembangan teknologi gasifikasi biomassa. Sehingga dapat disusun rekomendasi kebijakan yang mengarah pada upaya pengoptimalan penggunaan energi terbarukan di Indonesia.

2. METODOLOGI

Penulisan ini menggunakan sebagian besar data literatur dengan pendekatan perbandingan. Analisis *content* literatur dilakukan untuk mendapatkan gambaran perkembangan teknologi gasifikasi yang terjadi di beberapa negara. Hasil analisis kemudian dideskripsikan untuk dilakukan perbandingan. Metode perbandingan sebenarnya sudah sejak zaman Yunani-kuno telah dikenal, Aristoteles misalnya telah mengadakan studi perbandingan di antara negara kota (*city state*) pada waktu itu.

Studi perbandingan umumnya dikenal pada ilmu politik dan sosial. Namun, pada perkembangannya pendekatan ini juga dapat dipergunakan pada studi-studi yang bertujuan untuk mengetahui perkembangan dan kecenderungan suatu bidang (teknologi ataupun keilmuan) dari negara-negara atau pun kelompok komunitas. Analisis perbandingan yang dilakukan termasuk dengan membandingkan perkembangan dan kecenderungan dari penggunaan teknologi gasifikasi biomassa di beberapa negara.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Teknologi Gasifikasi Biomassa

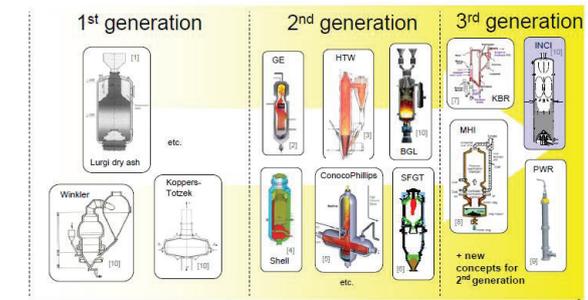
Gasifikasi merupakan salah satu proses konversi termokimia bahan bakar, seperti batubara, biomassa, dan limbah-limbah (Pratoto dan Raharjo, 2008). Proses termokimia lainnya adalah pembakaran dan pirolisis (pembakaran tanpa oksigen). Pada gasifikasi menurut Pratoto dan Raharjo (2008), bahan bakar padat diubah menjadi gas (*gas producer*) yang dapat dibakar secara langsung sebagai bahan bakar maupun digunakan sebagai bahan baku untuk produksi gas sintetik atau hidrogen.

Gasifikasi biomassa merupakan proses termokimia yang kompleks yang meliputi sejumlah reaksi kimia elementer. Gasifikasi diawali dengan oksidasi parsial bahan bakar lignoselulosik dengan agen gasifikasi (misalnya udara, oksigen, uap air, atau CO₂). Kemudian, unsur volatil (*volatile matter*) akan dilepaskan ketika bahan bakar dipanaskan melalui oksidasi parsial dan menghasilkan produk-produk pembakaran H₂O dan CO₂. Air yang terkandung dalam biomassa akan menguap dan proses pirolisis berlanjut bilamana bahan tersebut terus dipanaskan. Penguraian termal dan oksidasi parsial gas-gas pirolisis terjadi pada suhu yang lebih tinggi dan menghasilkan CO, H₂, CO₂, CH₄, H₂O, gas hidrokarbon lainnya, tar, arang, unsur anorganik, dan abu.

Secara sederhana Yulistiani (2008) menjabarkan bahwa gasifikasi adalah proses konversi biomassa menjadi gas umpan dengan kandungan utama gas H₂ dan CO₂ yang dibutuhkan untuk proses sintesis Fischer Tropsch terjadi di dalam reaktor gasifikasi. Peneliti-peneliti di seluruh dunia telah melakukan analisis proses gasifikasi biomassa dengan fokus pada agen gasifikasi, sistem penyediaan panas, tekanan proses, dan reaktor yang digunakan.

3.2 Perbandingan Teknologi Gasifikasi

Sejumlah negara seperti Finlandia, Swedia, Denmark, Austria dan beberapa negara lainnya telah mengembangkan teknologi gasifikasi dengan berbagai tipe.



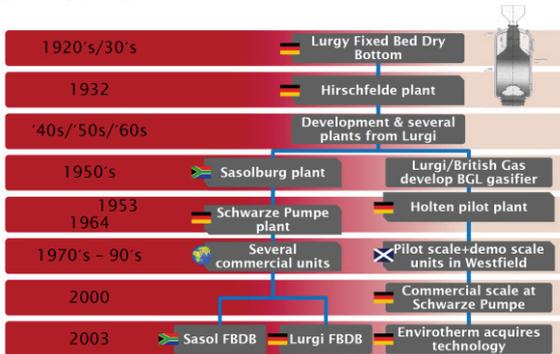
Since 1920s 1970s ~1990
 Sumber: Gräbner, M. et al (2009)

Gambar 2. Perkembangan Generasi Teknologi Gasifikasi.

Pada bagian ini dijelaskan beberapa status terkini dari pengembangan teknologi gasifikasi biomassa di negara-negara tersebut. Namun, sebelum itu terlebih dahulu akan dijelaskan mengenai perkembangan generasi teknologi gasifikasi yang dimulai tahun 1920-an sampai akhir tahun 1990-an yang merupakan generasi ketiga dari teknologi gasifikasi, seperti terlihat pada Gambar 2.

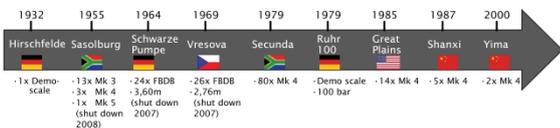
3.2.1 Generasi Teknologi Gasifikasi

Teknologi Gasifikasi telah mengalami perkembangan dari masa ke masa. Gräbner, M. *et al* (2009) mencatat setidaknya perkembangan teknologi gasifikasi telah sampai generasi ketiga (Gambar 2). Generasi pertama dari teknologi ini dikenal dengan *Fixed (Moving) Bed Gasifiers*, diperkenalkan pertama kali oleh Lurgi GmbH pada tahun 1920-an dengan nama “*Lurgi dry-ash gasification technology*” dan dikomersialkan di tahun 1936. Sejak saat itu jenis teknologi ini berkembang hingga ke Afrika Selatan, China, dan Amerika Serikat. Perkembangan teknologi ini terlihat pada Gambar 3 dan 4 berikut ini.



Sumber: B. Meyer, R. Pardemann, A. Laugwitz (2012)

Gambar 3. Perkembangan Teknologi *Fixed (Moving) Bed Gasifiers*.

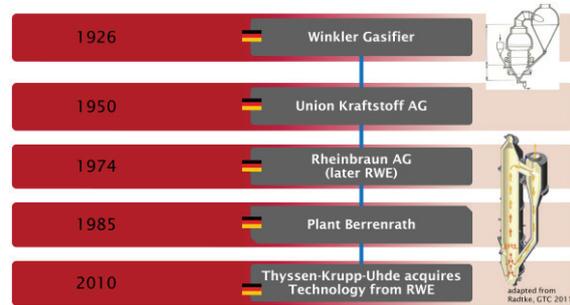


Sumber: B. Meyer, R. Pardemann, A. Laugwitz (2012)

Gambar 4. Perkembangan Kapasitas Teknologi *Fixed Bed Dry Bottom - Tipe Lurgi*.

Generasi kedua ditandai maraknya eksplorasi minyak bumi, batu bara, dan gas bumi oleh sejumlah perusahaan besar dunia, seperti Chevron Texaco (GE Energy), Conoco Phillips, dll. Eksplorasi ini kemudian menggunakan teknologi *Entrained Flow Gasifiers* dalam prosesnya. Generasi ini muncul sekitar tahun 1970-an. Generasi tiga hadir dengan menggunakan salah satu teknologi gasifikasi tertua, yaitu *Fluidized Bed Gasifiers*. Teknologi ini dikenal dengan “*The High Temperature Winkler Gasifier*”. Proses ini sebelumnya telah dikembangkan pada tahun 1926 oleh Rheinbraun AG di Jerman. Pada awal kemunculan HT Winkler Gasifier telah melayani sekitar 16 pabrik dan pada tahun 1970-an Rheinbraun (sekarang RWE) meningkatkan proses dengan mengoperasikan gasifikasi pada suhu yang lebih tinggi untuk meningkatkan konversi karbon

dan meningkatkan kualitas syngas yang dihasilkan. Kemudian di bulan Desember 2010 ThyssenKrupp Uhde dengan teknologi HTW™ dari RWE menjalankan sejumlah proyek biomassa di Swedia dan India (lihat Gambar 5).



Sumber: B. Meyer, R. Pardemann, A. Laugwitz (2012)

Gambar 5. Perkembangan Teknologi *High Temperature Winkler*.

Sementara itu, Yokoyama (2010) mengkategorikan empat tipe reaktor gasifikasi, yaitu *fixed bed, fluidized bed, entrained flow, dan rotary kiln* (lihat Tabel 1)

Tabel 1. Tipe Reaktor Gasifikasi

Type	Fixed		Fluidized	Entrained	Rotary kiln
	Down draft	Updraft			
Image					
Feedstock	chip, block	chip, block	chip, block	powder	chip, block
Temperature	700~1100°C	700~900°C	650~900°C	800~1000°C	700~1000°C
Remarks	•small scale •small amount of tar •power generation	•small scale •tar •power generation	•big scale •tar •power generation •liquid fuel •bubbling, circulating	•medium, large scale •small amount of tar •easy change of composition •liquid fuel •power generation	•small, medium scale •tar, reduced by after treatment •power generation

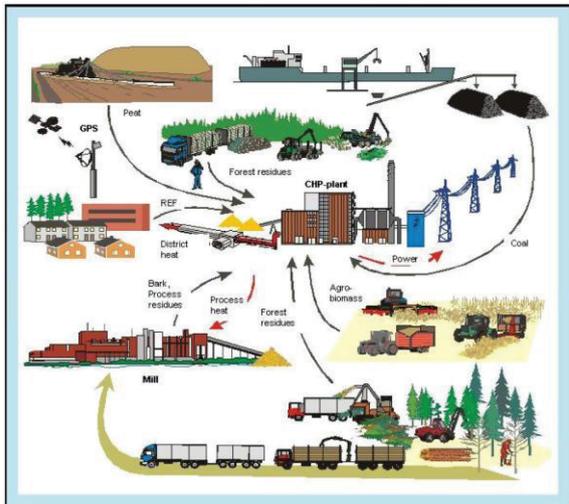
Sumber: (Yokoyama, 2010)

3.2.2 Teknologi Gasifikasi di Finlandia

Finlandia dapat dikatakan sebagai pemimpin dunia dalam pemanfaatan bioenergi (Makkonen, 2009). Penggunaan bahan bakar biomassa kayu di negara tersebut sebesar 20% dari konsumsi energi primer, dan 10% dari konsumsi listrik di Finlandia. Industri kehutanan berkontribusi besar dalam pengembangan biomassa, dimana sekitar 80% dari bahan bakar biomassa kayu merupakan hasil sampingan dan residu dari industri tersebut. Dalam Rencana Aksi untuk Sumber Energi Terbarukan (1999), Departemen Perdagangan dan Industri Finlandia menetapkan target untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan sebesar 50% dari 1995-2010. Peningkatan ini sesuai dengan 3 *Megatonne of oil equivalent* (Mtoe) (125 PJ), yang

90% diperkirakan akan ditutupi oleh bioenergi. Pada bulan Desember 2002, Rencana Aksi tersebut direvisi dengan target yang lebih ambisius dimana penggunaan energi terbarukan harus ditingkatkan sebesar 30% dari tahun 2001- 2010 menjadi hampir 10 Mtoe (412 PJ). Sebagian besar bioenergi di Finlandia diproduksi terkait erat dengan industri kayu (lihat gambar 6). Selain itu, sebagian besar masyarakat menggunakan biomassa berbasis bahan bakar di unit CHP (Combine Heat and Power) lokal. Unit-unit ini dapat ditemukan dalam ukuran kurang dari satu MWe sampai 240 MWe.

Penggunaan teknologi gasifikasi biomassa di Finlandia dimulai pada awal 1980-an, dengan mengembangkan reaktor unggun tetap (*fixed bed*) yang dinamai dengan “Bioneer”. Kehadiran Bioneer terbukti menjadi solusi untuk produksi energi skala kecil. Produk ini kemudian dikembangkan dengan melahirkan gasifikasi “Novel” yang telah diuji cobakan di pembangkit listrik CHP di Kokemäki. Pada skala ini produksi diperlakukan melalui tar reformer, kemudian dibersihkan dengan sistem pembersih gas canggih, dan dibakar dalam mesin gas untuk menyediakan listrik.



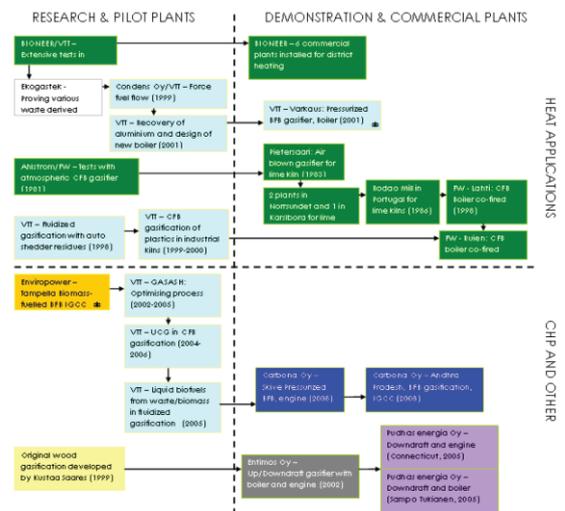
Sumber: Makkonen (2009:158)

Gambar 6. Ilustrasi Pola dan Alur Biomassa dari Residu Industri Kayu di Finlandia

Gasifikasi untuk produksi energi dalam skala sedikit lebih besar telah digunakan di Lahti, Finlandia sejak tahun 1998. Ide pengembangannya dengan *circulating fluidised bed* sebagai unit pengolahan bahan bakar. Hal ini memungkinkan penggunaan berbagai fraksi bahan bakar terbarukan dalam PC boiler tanpa modifikasi dalam sistem bahan bakar itu sendiri. Sehingga setiap produksi gas dilakukan tanpa pendinginan langsung disalurkan ke burner khusus yang terletak di tingkat terendah burner. Hal ini memungkinkan gas sisa untuk dibuang melalui *coal burners*, efeknya

memungkinkan pengurangan secara alami terhadap emisi NOx.

Pada perkembangan berikutnya di tahun 2001, terdapat pendekatan khusus dalam pemanfaatan proses gasifikasi dengan *treat liquid package residue*. Pendekatan ini dikembangkan di kota Varkaus (Finlandia Timur). Ide dasarnya diperoleh ketika melihat bahwa logam aluminium dalam material menyebabkan pencemaran dan korosi dari pembuangan pembangkit listrik. Pada *fluidised bed gasifier* logam aluminium akan bereaksi terhadap material yang jelek sehingga proses tersebut dapat ditiadakan dan tanpa adanya alat tambahan. Kondisi ini jelas sangat menguntungkan karena tidak membutuhkan boiler yang akan digunakan untuk pembakaran gas dari pencemaran dan korosi.



Sumber: A.D Duch & J.H Bermejo (2008:46)

Gambar 7. Evolusi Teknologi Gasifikasi Biomassa di Finlandia

Perkembangan evolusi teknologi gasifikasi biomassa di Finlandia terlihat pada Gambar 7, dan ilustrasi perjalanan penerapan teknologi gasifikasi di Finlandia terlihat pada Lampiran 1.

3.2.3 Teknologi Gasifikasi di Denmark

Teknologi Gasifikasi telah diperkenalkan di Denmark sejak tahun 1988 oleh sebuah perusahaan bernama Babcock & Wilcox Volund (BWV). Perusahaan tersebut mengembangkan teknologi CHP untuk sektor industri (Teislev, 2002). Namun, perkembangan energi terbarukan di Denmark sebenarnya turut dipengaruhi oleh kebijakan dalam negeri yang menetapkan 20% dari sumber energi listrik harus berasal dari energi terbarukan. Selain itu, kebijakan Uni Eropa juga ikut mempengaruhi, yaitu dengan adanya EU *white protocol* yang berisi ketentuan bahwa penggunaan energi terbarukan di kawasan Uni Eropa harus meningkat dari 6% di

tahun 1997 menjadi 12% pada tahun 2010 (Hummelshøj & Bentzen, 2000). Berdasarkan catatan (Hansen, 2011) setidaknya ada 11 jenis teknologi gasifikasi yang dikembangkan di Denmark (lihat Tabel 2).

Selain itu implementasi teknologi gasifikasi di Denmark, terutama dengan CHP dilakukan oleh perusahaan Carbona dengan fasilitas CHP di Skive. Model teknologi yang dikembangkan adalah *air-blown bubbling fluidized bed gasifier* dan beroperasi sejak akhir 2005. Teknologi ini mampu mengkonversikan 110 ton kayu/hari menjadi 6 MW listrik dan 12 MW untuk pasokan energi lokal.

Tabel 2. Gambaran Teknologi Gasifikasi di-Denmark

Name and stakeholder(s)	Technology type	Main purpose	Scale MW _{th}	Stage
<i>Alternating Gasifier</i> Ammongas A/S, Babcock & Wilcox Vølund A/S	Twin bed filter	Fuel (gas)	200+	Pilot
<i>Vølund Updraft Gasifier</i> Babcock & Wilcox Vølund A/S	Up-draft	CHP - IC engine	15-200	Commercial
<i>The CHP system of BioSynergi</i> BioSynergi Proses ApS	Open core down-draft	CHP - IC engine	0-15	Demonstration
<i>Staged Down Draft Gasification</i> Risø DTU, Weiss A/S, Dall Energy, COWI A/S	Multiple steps down-draft	CHP - IC engine	0-15	Demonstration
<i>Pyroreer A/S</i> DONG Energy A/S, Risø DTU, Danish Fluid Bed Technology ApS	Low temp. circulating fluid bed	CHP - cofiring Fuel (gas & liquid)	1-200	Demonstration
<i>Close Coupled Gasification (CCG)</i> EP Engineering ApS	Vibrating grate fluid bed	CHP - Steam engine	0-1	Pilot
<i>Tar reforming etc.</i> Haldor Topsøe	n.a. / "any"	Fuel (gas & liquid)	15-200+	Commercial
<i>Catalytic low temp. pyrolysis process</i> Organic Fuel Technology A/S	Catalytic low temperature pyrolysis	Fuel (liquid)	1-15	New/Pilot
<i>Stirling engine with up-draft gasifier</i> Stirling DK ApS	Up-draft	CHP - Stirling engine	0-1	Commercial
<i>BlackCarbon</i> Stirling DK ApS	Pyrolysis	CHP - Stirling engine	0-1	Demonstration
<i>Biomass Gasification Gas Engine</i> Aaen Consulting Engineers, Skive District Heating, Carbona	Circulating fluid bed	CHP - IC engine	15-200	Demonstration

Sumber : (Hansen, 2011)

3.2.4 Teknologi Gasifikasi di Thailand

Teknologi gasifikasi di Thailand sudah diimplementasikan di sektor industri walaupun pengembangannya baru pada tataran skala pilot dan demo. Teknologi ini disediakan langsung dari India (Ankhour), Jepang (Satake), Cina (Fengyu listrik dan Waktu Pro). Selain itu, ada juga sejumlah riset yang dilakukan untuk mendesain teknologi gasifikasi sesuai dengan kebutuhan masyarakat lokal di Thailand yang dikembangkan oleh perguruan tinggi dan lembaga penelitian (Salam, Kumar, & Siriwardhana, 2010). Keberadaan teknologi ini sepenuhnya mendapat dukungan dari pemerintah. Kementerian Energi Thailand memperkirakan bahwa potensi pembangkit listrik di Thailand dari biomassa, limbah padat perkotaan (Municipal Solid Waste/MSW) dan biogas sebesar 3.700 MW pada tahun 2011 (Amranand, 2008). Bahkan pemerintah, menerbitkan Rencana Pembangunan 15 Tahun untuk Energi Terbarukan (2008-2022), dengan target meningkatkan pasokan dari sumber energi alternatif menjadi 20,4%. Pada rencana tersebut, biomassa

dipatok sebesar 84% menyumbang untuk pasokan listrik nasional dari sumber energi terbarukan (Salam, Kumar, & Siriwardhana, 2010).

Sejak tahun 2005, Thailand telah membangun sekitar 26 sumber energi dengan mengimplementasikan teknologi gasifikasi (lihat Lampiran 2). Akan tetapi pembangunan tersebut cenderung mengalami kegagalan.

Kegagalan aplikasi teknologi yang terjadi di Thailand lebih disebabkan oleh alasan teknis dan non teknis. Alasan teknis lebih banyak bersumber dari ketidakmampuan mengelola sisa pembakaran yang dihasilkan, selain itu karena kurangnya pengembangan teknologi yang dilakukan oleh pusat-pusat penelitian dan perguruan tinggi. Sementara alasan non teknis disebabkan sumber daya pasokan yang tidak memadai atau tingginya harga bahan biomassa seperti sekam padi, dll. Selain itu tidak berpihaknya kebijakan pemerintah Thailand dalam pemenuhan bahan baku gasifikasi. Alasan lain yang cukup krusial adalah tidak adanya studi kelayakan proyek pembangunan pusat energi biomassa dengan teknologi gasifikasi di hampir semua proyek di Thailand (Salam, Kumar, & Siriwardhana, 2010).

3.2.5 Teknologi Gasifikasi di Sri Lanka

Sri Lanka merupakan salah satu negara yang menempatkan biomassa sebagai sumber energi primer. Biomassa memegang peran penting sebagai pemasok utama di negara tersebut. Bahkan keberadaan biomassa telah menggeser minyak bumi, batubara, hidro dan energi baru terbarukan lainnya sebagai pemasok utama kebutuhan energi. (Lihat Tabel 3)

Tabel 3. Pasokan Energi di Sri Lanka

Source (ktoe)	2000	2005	2008	2009	2010	2011
Biomass	4,469.8	4,668.3	4,675.0	4,786.2	4,954.0	4,944.4
Petroleum	3,656.1	4,289.7	4,066.3	4,130.9	4,420.5	4,914.8
Coal	-	64.9	57.6	58.7	59.9	324.0
Major hydro	675.1	773.4	888.1	805.3	1,197.2	964.2
New Renewable Energy	13.2	71.0	109.0	136.5	179.7	178.4
Total	8,814.1	9,867.3	9,796.0	9,917.7	10,811.4	11,325.8
Source (PJ)						
Biomass	187.1	195.5	195.7	200.4	207.4	207.0
Petroleum	153.1	179.6	170.2	173.0	185.1	205.8
Coal	-	2.7	2.4	2.5	2.5	13.6
Major hydro	28.3	32.4	37.2	33.7	50.1	40.4
New Renewable Energy	0.6	3.0	4.6	5.7	7.5	7.5
Total	369.0	413.1	410.1	415.2	452.7	474.2
Share (%)						
Biomass	50.7	47.3	47.7	48.3	45.8	43.7
Petroleum	41.5	43.5	41.5	41.7	40.9	43.4
Coal	-	0.7	0.6	0.6	0.6	2.9
Major hydro	7.7	7.8	9.1	8.1	11.1	8.5
New Renewable Energy	0.1	0.7	1.1	1.4	1.7	1.6

Sumber : (Authority, 2011)

Komitmen pemerintah merupakan kunci keberhasilan Sri Lanka menjadikan biomassa

ataupun energi terbarukan lainnya mampu menjadi pemasok utama bagi energi di negara tersebut. Bentuk komitmen pemerintah itu diwujudkan dalam kebijakan negara melalui “*Sri Lanka Sustainable Energy Authority - Act, No. 35 of 2007*”, bahkan pemerintah giat memberikan insentif bagi riset dan pengembangan teknologi biomassa, serta menetapkan beberapa kebijakan lain seperti menjadikan *Gliricidia Sepium* sebagai tanaman perkebunan keempat, selain teh, karet dan kelapa (Sugathapala, 2007).

Ada empat jenis bahan yang menjadi sumber produksi biomassa di Sri Lanka (Authority, 2011), yaitu kayu, sampah kota, limbah industri, dan limbah pertanian. Adapun bentuk konversi dari keempat bahan tersebut terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Pasokan Energi di Sri Lanka

Primary Source	Conversions
Firewood (natural yield, home gardens, dedicated woodlots)	Thermal energy for boilers to generate steam for industry uses and electricity generation and combustible gases to drive Internal Combustion engines for electricity generation
Coconut Shell	Charcoal, activated carbon; mostly for export as a non-energy product
Baggase	Thermal energy to generate steam for boiler-turbine units used for electricity generation
Wood	Charcoal; mostly for the hotels and household markets

Sumber: (Authority, 2011)

Tabel 5. Teknologi Gasifikasi Biomassa di - Sri Lanka

No.	Application	Technical details	Supplier
01.	Process heat generation for a brass melting furnace	Capacity: 120 kWh Design: Downdraft/Pressure blowing Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chips consumption: 40 kg/hr	Puritas Ltd.
02.	Process heat generation in a lime kiln	Capacity: 300 kWh Design: Down-draft Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 90 kg/hr	EnerFab (Pvt.) Ltd.
03.	Process heat generation for a heater in a rubber factory	Capacity: 750 kWh Design: Down-draft Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 250 kg/hr	EnerFab (Pvt.) Ltd.
04.	Process heat generation for a boiler in a rubber factory	Capacity: 1 MWh Design: Down-draft Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 330 kg/hr	EnerFab (Pvt.) Ltd.
05.	Process heat generation for a boiler in a tea factory	Capacity: 400 kWh Design: Downdraft Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 130 kg/hr	EnerFab (Pvt.) Ltd.
06.	Electricity generation in a private coconut plantation (Kohombe State, Kakapattiya)	Capacity: 6 kW Design: Downdraft gasifier-IC Engine Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 12 kg/hr	EnerFab / Ankur
07.	Electricity generation in a rural village (Mee Murava village, Kandy district)	Capacity: 10 kW Design: Downdraft gasifier-IC Engine Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 14 kg/hr	Ankur
08.	Electricity generation in a rural village (Handagala Yayavillage, Tharnamawala, Monaragala district)	Capacity: 3.5 kW Design: Downdraft gasifier-IC Engine Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 5 kg/hr	EnerFab / Ankur
09.	Electricity generation in a rural village (Galaruwa village, Kollonna, Rathnapura district)	Capacity: 6 kW Design: Downdraft gasifier-IC Engine Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 9 kg/hr	EnerFab (Pvt.) Ltd.
10.	Electricity generation in a tea factory	Capacity: 290 kW Design: Downdraft gasifier-IC Engine (two gasifiers) Fuel: <i>Gliricidia</i> wood chips Wood chip consumption: 225x2 kg/hr	TERI

Sumber: (Sugathapala, 2007)

Beberapa dekade terakhir sejumlah penelitian mengenai gasifikasi biomassa telah dilakukan di Sri Lanka, namun sebagian besar dari penelitian tersebut terbatas pada studi kelayakan dan desain/pengujian di tingkat laboratorium, bahkan belum ada satu pun proyek yang dapat memberikan dampak signifikan pada pengembangan sektor

energi biomassa di Sri Lanka (Sugathapala, 2007). Seiring perkembangan, sejumlah aplikasi gasifikasi biomassa telah diimplementasikan pada pembangkit listrik skala kecil di desa-desa terpencil dan pembangkit listrik untuk sektor industri (lihat Tabel 5).

3.2.6 Teknologi Gasifikasi di Kamboja

Kebutuhan bahan bakar yang bersumber dari kayu sangat tinggi di Kamboja. Duraisamy (2010) mencatat bahwa sekitar 80% dari total konsumsi energi nasional di Kamboja di pasok dari kayu. 80% wilayah perkotaan aktif menggunakan bahan bakar tersebut dan 94% masyarakat menggunakannya untuk memasak. Penggunaan kayu dalam jumlah besar dipergunakan pada industri perhotelan dan restoran. Kondisi lain, sekitar 22% populasi di Kamboja memiliki akses listrik (dimana 60% di wilayah perkotaan dan hanya 10% di daerah pedesaan). Kebutuhan penggunaan listrik terbesar terdapat di Phnom Penh dengan 85% dari total listrik negara tersebut, padahal wilayah itu hanya 10% dari populasi negaranya. Hingga saat ini wilayah yang belum mendapatkan pasokan listrik nasional, kebutuhan penerangan diperoleh dari baterai, minyak tanah ataupun lentera surya. Sedangkan untuk kelompok rumah tangga berpenghasilan menengah untuk kebutuhan listrik menggunakan mesin diesel berkapasitas 12-18hp yang digabungkan dengan generator kW 3-5.

Kondisi listrik yang belum merata di seluruh wilayah Kamboja menjadikan pemerintahnya aktif membangun sejumlah pusat-pusat energi berbasis gasifikasi di seluruh negeri. Namun, banyak proyek yang gagal (lihat Lampiran 3). Hambatan terbesar sama seperti yang dialami oleh pemerintah Thailand, dimana kurangnya pengembangan teknologi gasifikasi di dalam negeri. Banyak proyek yang didirikan sebagai hasil dari bantuan ataupun membeli teknologi dari negara lain. Demikian juga kemampuan tenaga ahli dalam mengelola pusat-pusat pembangkit listrik yang tidak memadai.

3.3 Pelajaran Berharga dari Beberapa Negara

Kebutuhan dan konsumsi energi secara nasional di Indonesia meningkat dengan pertumbuhana rata-rata 3,09% pertahun dari tahun 2000 sampai dengan 2010 dimana jumlahnya meningkat dari 737 juta SBM (2000) menjadi 1012 juta SBM di tahun 2010 (Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi - BPPT, 2012). Secara umum pengguna energi dapat dibagi ke dalam enam kelompok terdiri dari pemerintah, rumah tangga, komersial, industri besar, sedang, dan transportasi (Bargumono & Ilcham, 2011). Pasokan energi utama di Indonesia masih didominasi oleh Minyak Bumi (41,45%), Batu Bara (23,38%), dan

Gas Bumi (18,31%). Sementara Biomassa menempati urutan ke empat dengan kontribusi 13,52% (Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementerian ESDM, 2012).

3.3.1 Teknologi Gasifikasi Biomassa di Indonesia

Pemerintah Indonesia sejak awal 1960-an telah menyadari potensi biomassa yang banyak digunakan sebagai sumber utama energi adalah kayu bakar untuk rumah tangga pedesaan (Maniatis, 1989). Pada 1970-an, pemerintah kemudian memulai upaya menjadikan biomassa sebagai sumber energi yang lebih tinggi dari pada kayu bakar, dimana potensi yang ada diproduksi dalam sistem reaksi yang lebih canggih dan kompleks. Salah satu upaya tersebut dilakukan dengan gasifikasi. Sejak awal kemunculan teknologi gasifikasi di Indonesia, setidaknya ada tiga pelaku utama yang berkontribusi besar dalam pengembangan teknologi ini (Maniatis, 1989). Institut Teknologi Bandung (ITB) dan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) merupakan dua institusi yang secara kontinyu mempelajari teknologi ini, pada periode 1980-an kemudian muncul Kementerian Kehutanan (Departemen Kehutanan-dulu) mulai terlibat dalam riset dan pengembangan serta proyek-proyek percontohan. Penelitian gasifikasi di ITB dimulai pada tahun 1976 (Susanto, 2011), dengan satu unit gasifikasi berkapasitas 2 kg/jam atas kerjasama dengan TH Twente, Belanda. Melalui berbagai limbah pertanian telah dicoba untuk memahami latar belakang ilmiah dan dasar-dasar rancangan unit gasifikasi.

Dari pengalaman unit gasifikasi pertama tersebut, lahirlah: a) unit gasifikasi 20 kg/jam untuk demonstrasi di ITB; b) unit gasifikasi 20 kg/jam untuk uji coba lapangan di PTP XVII, Kebon Balong, Jepara, Jawa Tengah; c) unit gasifikasi 15 kg/jam untuk demonstrasi keliling, PT Boma Bisma Indra (BBI) Surabaya; dan d) unit gasifikasi 60kg/jam untuk uji coba lapangan di Perum Perhutani Randublatung, Jawa Tengah.

Melalui proses gasifikasi, 1,5 – 2,5 kg biomassa dapat digunakan untuk menghasilkan 1 kW listrik. Keempat unit tersebut digabung dengan motor diesel penggerak generator listrik produksi PT. BBI bersama-sama bengkel-bengkel kecil di Surabaya. Gasifier khusus untuk sekam padi telah berhasil dikembangkan pula di ITB, dan merupakan sumbangan baru kepada teknologi gasifikasi di dunia. Uji coba lapangan gasifier sekam padi ini telah dipasang di desa Jahi, kabupaten Majalengka, Jawa Barat (Susanto, 2011).

Perkembangan teknologi gasifikasi biomassa di Indonesia pada awal kemunculannya pernah diungkapkan oleh Maniatis (1989), membandingkan model yang dikembangkan oleh ITB, PTP XVII

(Kebon Balong, Jepara, Jawa Tengah), dan Randublatung. Selain itu, sebuah gagasan muncul dari Presiden Soeharto setelah mengunjungi Pameran Nasional Indonesia di tahun 1985, dimana beliau sangat terkesan dengan proyek 9A JTA sehingga memutuskan untuk membangun gasifikasi biomassa yang bersumber dari kayu dan sekam padi di enam lokasi pedesaan di wilayah Indonesia. Pengerjaan proyek itupun dilaksanakan oleh PT BBI di tahun 1987

3.3.2 Pelajaran Berharga bagi Indonesia

Kesuksesan implementasi teknologi gasifikasi biomassa di Finlandia dapat memberikan pelajaran bagi Indonesia, yaitu bagaimana negara tersebut merencanakan implementasi dan dilakukan dengan melibatkan semua pemangku kepentingan. Tidak hanya melibatkan semua aktor tetapi, aktor tersebut secara aktif melakukan aksi terhadap rencana implementasi yang telah direncanakan. Rencana aksi yang telah disepakati juga membagi habis peran dan tanggung jawab masing-masing aktor. Perjalanan panjang proses penelitian dan dukungan industri di Finlandia sejak tahun 1980-an untuk mengembangkan teknologi ini, bahkan dukungan tersebut berupa pendanaan dari pemerintah melalui Kementerian Perdagangan dan Perindustrian untuk aktivitas riset dan pengembangan serta implementasi dengan melibatkan pihak industri di teknologi ini. Tidak hanya itu, komitmen untuk memenuhi pasokan energi nasional melalui teknologi ini sangatlah ramah lingkungan. Hal ini dibuktikan dengan adanya penyediaan tanaman ataupun hutan sebagai bahan baku.

Hal yang tidak jauh berbeda dibuktikan oleh Sri Lanka, penanaman komitmen melalui “*Sri Lanka Sustainable Energy Authority - Act, No. 35 of 2007*” menjadikan pemerintah di negara tersebut giat memberikan insentif bagi riset dan pengembangan teknologi biomassa, serta menetapkan beberapa kebijakan lain seperti menjadikan *Gliricidia Sepium* sebagai tanaman perkebunan keempat. Bahkan sejumlah aplikasi gasifikasi biomassa telah diimplementasikan pada pembangkit listrik skala kecil di desa-desa terpencil dan pembangkit listrik untuk sektor industri.

Ketidak berhasilan dari implementasi teknologi ini di negara Thailand dan Kamboja dapat juga menjadi pelajaran berharga bagi Indonesia. Kedua negara tersebut banyak mengalami hambatan teknis yang bersumber dari ketidakmampuan mengelola sisa pembakaran yang dihasilkan, selain itu karena kurangnya pengembangan teknologi yang dilakukan oleh pusat-pusat penelitian dan perguruan tinggi. Kondisi semacam ini mengingatkan kita (Indonesia) bahwa studi kelayakan proyek pembangunan pusat energi biomassa dengan teknologi gasifikasi menjadi

penting, jangan hanya mendirikan banyak proyek sebagai hasil dari bantuan ataupun membeli teknologi dari negara lain. Namun, pengelola lokal tidak memiliki kemampuan dalam mengelola pusat-pusat pembangkit listrik tersebut.

4. KESIMPULAN

Sukses implementasi teknologi gasifikasi biomassa tidak dapat dilepaskan dari lima faktor, yaitu: pertama riset dan pengembangan yang dilakukan secara berkelanjutan dan berkesinambungan, kedua aktivitas riset dan pengembangan tersebut melibatkan tidak hanya pusat-pusat penelitian milik pemerintah (lembaga litbang dan perguruan tinggi) tetapi melibatkan pihak industri, ketiga implementasi dapat dilakukan pada skala kecil dahulu seperti yang dilakukan di Finlandia pada awal-awal kemuncula teknologi ini, keempat perencanaan peta jalan hingga aksi harus dapat dikawal oleh pemerintah bersama-sama dengan pihak industri dan dukungan pendanaan menjadi penting. Hal ini dikarenakan aktivitas dalam teknologi gasifikasi membutuhkan pendanaan yang kuat, dan kelima dukungan dari sumberdaya manusia terdidik dan terlatih baik di tingkat nasional maupun teknis lokal menjadi penting.

Rekomendasi kebijakan yang dapat diambil dari sejumlah pelajaran dalam studi ini adalah 1) diperlukan implementasi dari teknologi gasifikasi lebih masif di sejumlah lokasi di Indonesia, 2) diperlukan dukungan pendanaan yang kuat dalam mengimplementasikan teknologi ini, sehingga peran industri diperlukan dan dukungan pemerintah juga diperlukan melalui skema pembiayaan implementasi riset bersama antara Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi, Kementerian ESDM, Dewan Energi Nasional, dan Menko Ekonomi, dan 3) Memperkuat SDM di lembaga litbang dan perguruan tinggi yang tidak hanya di tingkat pusat (Jakarta/Bandung) tetapi di tingkat Daerah juga untuk mengetahui dan memahami teknologi ini.

DAFTAR PUSTAKA

Amranand, P., 2008. *Alternative Energy, Cogeneration and Distributed Generation : Crucial Strategy for Sustainability of Thailand's Energy Sector*, Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy, Thailand, Available at <http://www.eppo.go.th/doc/Piya-REin-Thailand.pdf>, diakses 20 Maret 2013.

Authority, S. L., 2011. *Sri Lanka Energy Balance 2011 and An Analysis of Energy Sector Performance*. Colombo: Sri Lanka Sustainable Energy Authority.

B. Meyer, R. Pardemann, A. Laugwitz, 2012. *Sector Overview from a European Perspective: Experiences of Gasification Technologies in Europe*. 4th EU South Africa Coal and Clean Coal Working Group Meeting 5 to 6 November 2012, Johannesburg.

Balat, Mustafa, & Ayar, Günhan, 2005. *Biomass Energy in the World, Use of Biomass and Potential Trends*. *Energy Sources*, 27: 931–940.

Bargumono, & Ilcham, A., 2011. *Review Aplikasi Bioenergi pada Sektor Industri di Indonesia*. Prosiding Seminar Nasional Teknik Kimia “Kejuangan”: Pengembangan Teknologi Kimia untuk Pengolahan Sumber Daya Alam Indonesia (hal. E12-1 - E12-6). Yogyakarta: Program Studi Teknik Kimia FTI UPN “Veteran” Yogyakarta.

Center for Data and Information on Energy and Mineral Resources - Ministry of Energy and Mineral Resources, 2012. *2012 Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia*. Jakarta : Ministry of Energy and Mineral Resources.

ESDM, 2010. *Kebijakan Pengembangan Energi Alternatif di India*, diakses dari <http://esdm.go.id/berita/56-artikel/3579-kebijakan-pengembangan-energi-alternatif-di-india.html>, tanggal 30 September 2015.

Duraisamy, J., 2010, *biomass energy potentials Cambodia*, The Ninth Asia Biomass Seminar, 26-30 July 2010, Siem Reap, Cambodia.

Gräbner, M. et al, 2009. *Development and Modelling of 3rd Generation Gasifiers for Low-rank and High-ash Coals*, Paper 18-1, ICCS&T 26.-28.10.2009, Cape Town, ZA

Hambali, Erliza., dkk., 2007. *Teknologi Bioenergi*. Agromedia: Jakarta.

Maniatis, K., 1989. *Biomass Gasification in Indonesia*. *Biomass Volume 18, Issues 3–4*, 221-239.

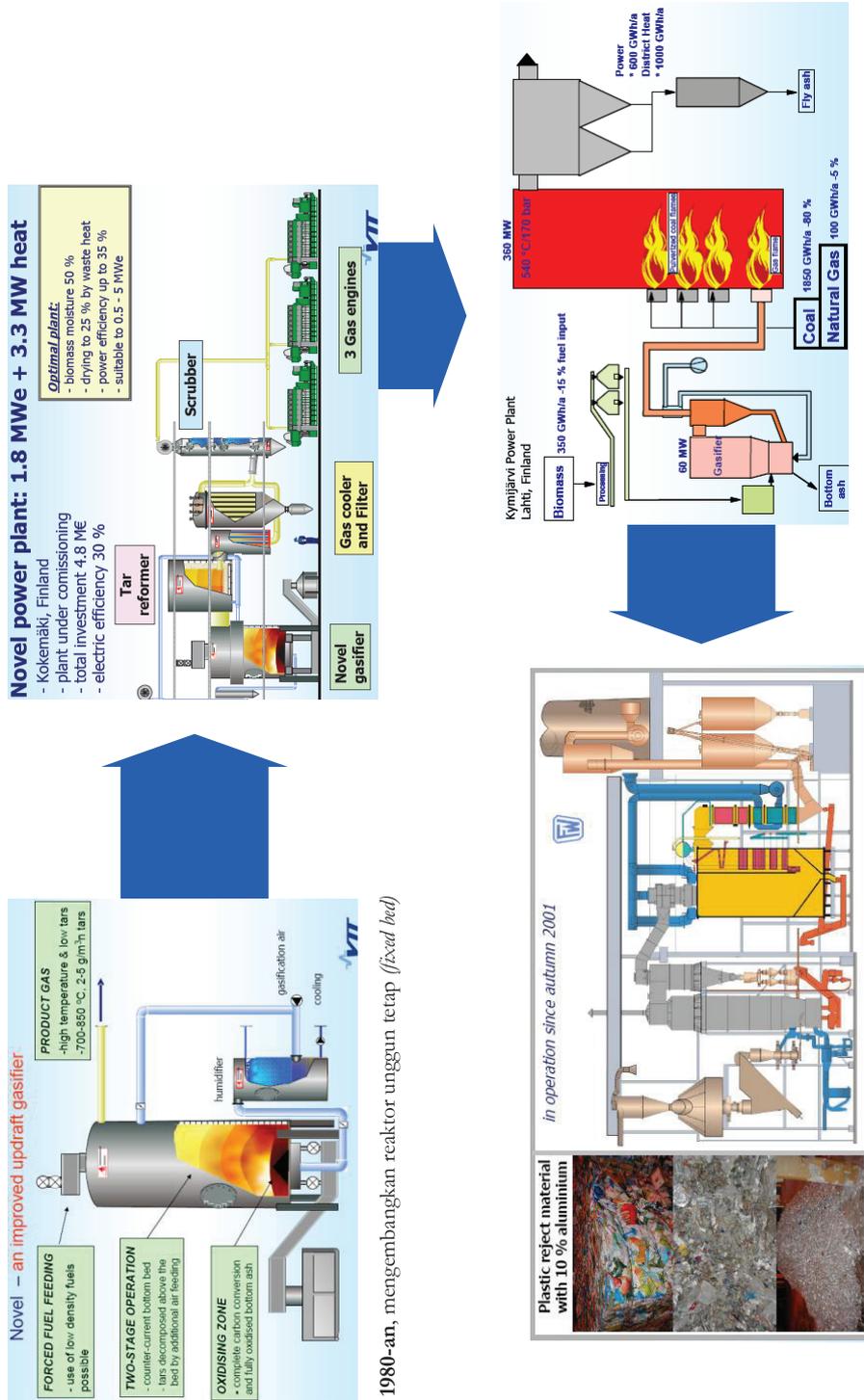
Hansen, M. T., 2011. *Strategy for research, development and demonstration of thermal biomass gasification in Denmark*. Denmark: FORCE Technology, Department of Biomass & Waste.

Hasjim, M., dan Toha, M.H, 2013. *Pengembangan Energi Non-Minyak Bimi yang Ramah Lingkungan*. diakses dari [http://fri2013.unissula.ac.id/files/FRI_2013-Prof_H_Machmud_Hasjim-Prof_Taufik_Toha-Energi_Non_BBM-\(Unsri\)-1.pdf](http://fri2013.unissula.ac.id/files/FRI_2013-Prof_H_Machmud_Hasjim-Prof_Taufik_Toha-Energi_Non_BBM-(Unsri)-1.pdf), tanggal 10 Agustus 2015.

- Hummelshøj, R. M., & Bentzen, J. D., 2000. Biomass Gasification: News from DBDH 4/2000. Dipetik Maret 27, 2013, dari <http://dbdh.dk/images/uploads/pdf-renewable-energy/biomass-gasification.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012. Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Summary for Policymakers and Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kotarumalos, Nur Aisyah, 2010. Menuju Ketahanan Energi Indonesia: Belajar dari Negara Lain. Jurnal Global dan Strategis, Vol. 3 No. 1 Tahun 2010: 1-18.
- Ladanai, Svetlana., & Vinterbäck, Johan, 2009. Global Potential of Sustainable Biomass for Energy. SLU, Swedish University of Agricultural Sciences Department of Energy and Technology: Swedish.
- Makkonen, P., 2009. Finnish experience on biomass utilization for cogeneration with emphasis on gasification, 1st European Conference on Polygeneration, Tarragona (Spain), 16-17 October 2007.
- Pratoto, Adjar., & Raharjo, Slamet, 2008. Pengaruh Katalis Terhadap Produksi Hidrogen Pada Gasifikasi Tandan Kosong Sawit. Artikel Ilmiah Hibah Penelitian Fundamental Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi - Departemen Pendidikan Nasional. Universitas Andalas: Padang. Tidak dipublikasikan.
- Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementerian ESDM, 2012. Kajian Supply Demand Energi. Jakarta: Pusat Data dan Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementerian ESDM.
- Pusat Teknologi Pengembangan Sumberdaya Energi – BPPT, 2012. Outlook Energi Indonesia 2012: Pengembangan Energi Masa Depan dalam Mendukung Pertumbuhan Ekonomi dan Ketahanan Energi Nasional. Jakarta: BPPT Press.
- Salam, P. A., Kumar, S., & Siriwardhana, M., 2010. The Status of Biomass Gasification in Thailand and Cambodia. Thailand: Energy Environment Partnership (EEP), Mekong Region.
- Sugathapala, A., 2007. Biomass gasification in Sri Lanka: A low-cost Option for The Future. hal. 42-50.
- Surmen, Y., 2002. The Necessity of Biomass Energy for Turkish Economy. Energy Edu. Sci. Technol. 10:19–26.
- Susanto, H., 2011. Sekilas Teknologi Gasifikasi. Dipetik Maret 12, 2013, dari Biomass Gasification: <http://esptk.fti.itb.ac.id/herri/index.html>
- Teislev, B., 2002, June. A Status Report on the Babcock Volund Biomass Gasification Project. Dipetik Maret 29, 2012, dari http://www.ieatask33.org/app/webroot/files/publications/IEABabcockVolund6_02.pdf
- UNESCAP., 2012. Finding a green engine for economic growth: China's renewable energy policies. Dipetik Maret 20, 2013, dari http://www.unescap.org/esd/environment/lcgg/documents/roadmap/case_study_fact_sheets/Case%20Studies/CS-China-Renewable-Energy-Policies.pdf.
- Vete, Anay, 2003. Review of The Electricity Act 2003. Working Paper No. 11, diakses dari http://www.mu.ac.in/arts/social_science/eco/pdfs/vibhuti/wp11.PDF, pada 16 April 2013.
- Yulistiani, Fitria., 2008. Kajian Tekno Ekonomi Pabrik Konversi Biomassa Menjadi Bahan Bakar Fischer-Tropsch Melalui Proses Gasifikasi. Makalah Metodologi dan Usulan Penelitian Semester II-2008/2009. ITB: Bandung. Tidak dipublikasikan.
- Yokoyama, S., 2010. DEVELOPMENT OF BIOMASS ENERGY IN ASIA. 7th Biomass Asia Workshop. Jakarta. <http://www.tambangnews.com/serba-serbi/opini/595-kebijakan-pengembangan-energi-alternatif-di-india.pdf>.

Lampiran 1.

Perjalanan Teknologi Gasifikasi di Finlandia



Sumber: diolah dari Makkonen (2009).

Lampiran 2.

Identifikasi Pembangunan Pusat Energi Biomassa dengan Teknologi Gafsikasi di Thailand

No	Nama Pembangkit/Lokasi	Kapasitas	Tipe Reaktor	Gas cleaning system	Tipe engine	Bahan bakar biomassa	Aplikasi	Working Condition
	Power							
1	Thermal Tech Ltd., Samutsakorn	200 kWe	Downdraft	Cyclones, wet scrubbers	Diesel	Waste plastic	Feed electricity to grid	Tidak Beroperasi
2	A+ Power Co., Ltd., Nhongmoung, Lopburi	1,500 kWe	Downdraft	Cyclone, 3x2 wet scrubbers, fabric filter	Gas	Wood chip	Feed electricity to grid	Dalam konstruksi
3	Rice Mill, Lam Luk Ka	80 kWe	Downdraft (3 stage)	Cyclones, HE, wet scrubbers	Diesel	Rice husk	Electricity in rice mill	Tidak beroperasi
4	Supreme Renewable Chiang Rai.	150 kWe	Downdraft	Cyclone, Venturi scrubber, HE, water trap, woodchip-sawdust filter, bag filter	Diesel	Corn cob	Feed electricity to grid	Beroperasi
5	Tha-Khlong Agricultural Cooperation, Lopburi	400 kWe	Downdraft (3 stage)	NA	Gas	Rice husk	NA	Tidak beroperasi
6	Ubon Rachathani University	80kW+	Downdraft (Double throat)	Cyclone, wet scrubber	Diesel	Firewood/corn cob	Water pumping	Beroperasi
7	Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani	30 kWe	Downdraft	Cyclones, HE	Gasoline	Charcoal	Feed electricity to grid	Beroperasi
8	Suranaree University of Technology, Nakhon ratchsima	100 kWe	Downdraft Chilled	water scrubber	Gas	Any	Feed electricity to grid	NA
9	Rice Mill Ban Non Muay, Surin	20 kW	Downdraft (Two stage)	Cyclones, wet scrubbers, bag filters	Diesel	Rice husk	Used in the rice mill	Tidak beroperasi
10	Prachuap Khiri Khan Province	100 kW	Downdraft	NA	NA	Woodchip/coconut shells	Feed electricity to grid	NA
11	Asian Institute of Technology, Pathumthani	25 ^{kwth} / 10 kWe	Downdraft	NA	NA	Woodchip	NA	NA
12	Naresuan University,	10 kW	Downdraft	NA	NA	woodchip	NA	NA
13	Rice Mill, Chai Nat	NA	NA	NA	NA	Rice husk	NA	NA

14	Prince of Songkla University, Songkla	30 kWe	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
15	Suratthani		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
16	Marry Rice Mill	200 kW	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
17	Alei Rice Mill	2 x 200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
18	Achen Rice Mill	4 x 200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
19	Lecai biomass power plant Heat	3 x 200	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
20	Lime and Minerals, SaraBuri		Updraft	Cyclone	Old tyre	Lime kiln	In operation			
21	Agricultural Industry Kahokoh, Petchabun	320 kWth	Imbert Downdraft	Cyclone, HE	Corn cob	Drying Kaffir Lime Leaves	Not in operation			
22	Thai Ceramic Company, Saraburi	4 x 5,000 kWth	Bubbling fluidized bed	No	Rice husk	Ceramic industry	In operation			
23	Ruang Silp 2 factory, Ratchaburi	26 kWth	Downdraft	Cyclone, HE, tar trapper, wet scrubber, dust filter	Woodchip	Ceramic industry	NA			
24	Sattahil fish processing, Chon Buri	300 kWth	Updraft	Cyclone	Woodchip	Heat for boiling fish	Not in operation			
25	Siam Cement Thongsong, Nakorn srithammarat	NA	NA	NA	NA	NA	NA			
26	Siam Cement Ta Luang	NA	NA	NA	NA	NA	NA			

N.A. Not applicable (Data tidak tersedia)

Sumber: (Salam, Kumar, & Siriwardhana, 2010)

Lampiran 3.

Identifikasi Pembangunan Pusat Energi Biomass dengan Teknologi Gafisikasi di Kamboja

No	Site/ Plant	Installed year	Capacity	Reactor type	Gas Cleaning	Engine type	Biomass Fuel	Application	Working Condition
1	Te Keang Rice Mill, Kampong Chhnang	Dec- 2008	200 kWe	Downdraft	Wet scrubbers, moisture removal, coarse filter (rice husk), 3 passive filters (saw dust), bag filter	Diesel	Rice husk	Electricity is used in rice mill	In operation
2	Bat Doeng Electricity Enterprise, Kampong Speu	Dec- 2008	200 kWe	Downdraft		Diesel	Rice husk/ wood chip	Rural electrification using mini grid	In operation
3	Yam Loung Rice Mill, Battambang	Jul-2009	300 kWe	Downdraft		Diesel	Rice husk	Electricity is used in rice mill	In operation
4	Yin Pou Rice Mill, Banteay Mean Cham	May-2008	200 kWe	Downdraft		Diesel	Rice husk	Electricity is used in rice mill	In operation
5	Teng Sarith Ice Factory, Phnom Penh	Jul-2010	200 kWe	Downdraft		Diesel	Rice husk	Electricity is used in ice factory	In operation
6	Ley Chhinh Rice Mill, Battambang	Jul-2010	600 kWe	Downdraft		2x 300 Diesel	Rice husk	Electricity is used in rice mill	Under construction
7	Eap Sophat Ice Factory, Siem Reap	Jul-2007	150 kWe	Downdraft		Diesel	Rice husk	Electricity is used in ice factory and sell	In operation

N.A. Not applicable (Data tidak tersedia)

Sumber : (Salam, Kumar, & Sriwardhana, 2010)