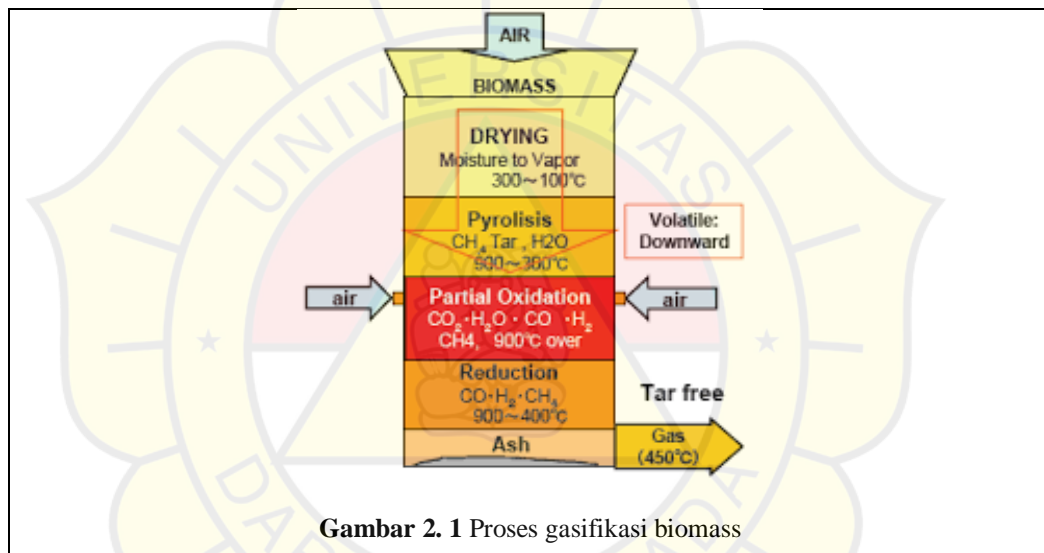


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Gasifikasi Biomass

Proses **gasifikasi biomassa** adalah konversi termokimia bahan organik padat (seperti kayu, jerami, sekam, limbah pertanian) menjadi **gas sintetis** (syngas) yang terdiri dari hidrogen (H_2), karbon monoksida (CO), metana (CH_4), dan gas lainnya, dengan menggunakan **jumlah oksigen terbatas** (kurang dari yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna). Dapat dilihat pada Error! Reference source not found..



Gambar 2. 1 Proses gasifikasi biomass

2.1.1 Proses Pengeringan (*Drying*)

Proses pengeringan bertujuan untuk menghilangkan kelembaban air dari biomassa. Umumnya biomassa mengandung 10-50% air, sehingga memerlukan proses pengeringan dengan pemanasan pada temperatur berkisar antara 100°C-200°C. Pada proses ini, tidak terjadi reaksi kimia besar, hanya perubahan fisik. Proses pengeringan penting karena air yang berlebih dapat mengurangi efisiensi proses.

2.1.2 Proses Pirolisis

Proses Pirolisis yaitu proses dimana memecah senyawa organik menjadi gas volatil, tar dan arang (char). Proses ini terjadi pada temperatur antara 200⁰C-500⁰C. Pada proses ini, terjadi siklus anaerobik (tanpa oksigen). Komponen yang bereaksi dari padatan terurai menjadi Gas volatil, Tar dan Char. Tahapan ini reaksi kompleks dan bervariasi tergantung jenis biomass.

2.1.3 Proses Oksidasi Parsial

Proses oksidasi parsial adalah proses yang dimana membakar sebagian char dan volatil untuk menghasilkan panas bagi proses gasifikasi selanjutnya. Dalam proses ini membutuhkan temperatur tinggi +- 700⁰C sampai dengan 1000⁰C. Udara atau oksigen di masukan dalam jumlah tertentu (Kadar oksigen kurang dari kebutuhan pembakaran sempurna). Reaksi ini menghasilkan panas yang dibutuhkan untuk reaksi pirolisis dan reduksi.

2.1.4 Proses Reduksi

Pada proses ini menghasilkan syngas (CO dan H₂) dari char, uap air dan CO₂. Tahapan ini memerlukan temperatur 800⁰C – 1000⁰C. Dari reaksi ini bersifat endotermik (Menyerap panas). Hasil syngas terdiri dari CO, H₂, CH₄, CO₂ dan N₂.

2.2 Jenis Reaktor Gasifikasi Biomass

Beberapa jenis reaktor yang umum nya digunakan untuk teknologi gasifikasi biomass terdapat beberapa jenis.

2.2.1 Reaktor Unggun Tetap (*Fixed Bed*)

Jenis reaktor yang menggunakan tumpukan biomassa yang tetap (tidak bergerak) selama proses gasifikasi berlangsung. Biomassa yang digunakan sebagai bahan bakar ini akan bereaksi dengan agen gasifikasi (seperti udara atau uap) untuk menghasilkan gas sintesis. Reaksi kimia terjadi di dalam reaktor saat biomassa bereaksi dengan agen gasifikasi (seperti udara atau uap) pada suhu tinggi. Reaksi

ini akan menghasilkan gas sintesis yang merupakan campuran dari gas-gas seperti hidrogen, karbon monoksida, metana, dan lain-lain

Reaktor fixed bed relatif sederhana dan mudah dioperasikan. Selain itu, biaya operasionalnya juga lebih murah dibandingkan dengan jenis reaktor gasifikasi lainnya. Namun, reaktor ini memiliki kapasitas produksi yang lebih rendah dibandingkan dengan jenis reaktor lainnya. Ada beberapa jenis reaktor fixed bed yang digunakan dalam gasifikasi, antara lain:

1. Updraft (Aliran naik): Aliran gas dan bahan bakar mengikuti arah yang sama, dari bawah ke atas.
2. Downdraft: Aliran gas dan bahan bakar mengikuti arah yang berlawanan, dari atas ke bawah.
3. Crossdraft: Aliran gas dan bahan bakar tidak mengikuti arah yang sama, tetapi saling bersilang.

2.2.2 Reaktor Unggun Terfluidasi (*Fluidized Bed*)

Reaktor ungun terfluidasi (*Fluidized Bed Reactor*, FBR) adalah jenis reaktor kimia yang memanfaatkan fenomena fluidisasi, yaitu keadaan di mana partikel padat (biasanya katalis atau bahan reaktan) disuspensikan oleh aliran fluida (gas atau cair) sehingga membentuk keadaan menyerupai fluida. Ketika laju aliran fluida meningkat melewati batas tertentu, gaya tarik ke atas dari fluida akan menyeimbangkan gaya gravitasi partikel, menyebabkan partikel "terfluidisasi". Menurut Kunii dan Levenspiel dalam buku klasik "*Fluidization Engineering*" (Kunii & Levenspiel, 1991), kondisi ini memberikan karakteristik perpindahan panas dan massa yang sangat baik, membuat FBR cocok untuk berbagai proses reaksi heterogen, termasuk pembakaran, pirolisis, dan konversi bahan bakar.

Reaktor ungun terfluidasi (fluidized bed reactor) telah menjadi pilihan utama dalam berbagai proses termokimia seperti pembakaran, pirolisis, dan gasifikasi karena berbagai keunggulan teknis dan ekonomisnya. Salah satu kelebihan utama dari sistem ini adalah kemampuan pencampuran yang sangat baik antara reaktan gas dan partikel padat, yang memungkinkan terjadinya reaksi yang lebih merata serta peningkatan efisiensi perpindahan panas dan massa. Selain itu, kontrol suhu dalam reaktor ini dapat dilakukan dengan presisi tinggi, karena suhu

dapat disesuaikan secara merata di seluruh volume reaktor akibat dari pencampuran intensif tersebut (Basu et al., 2010).

Reaktor ini juga mendukung operasi skala besar dan kontinu, menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi industri energi dan kimia yang membutuhkan kapasitas produksi tinggi dan stabilitas jangka panjang (Yang et al., 2008). Di sisi lain, fleksibilitas terhadap variasi ukuran partikel dan jenis bahan bakar memungkinkan penggunaan berbagai macam biomassa dan limbah sebagai umpan reaksi, sehingga meningkatkan efisiensi sumber daya (Sutton et al., 2001).

Namun demikian, terdapat beberapa kelemahan yang menjadi tantangan teknis dalam penerapan reaktor jenis ini. Salah satu masalah yang umum adalah erosi peralatan akibat gesekan partikel padat, terutama pada dinding reaktor dan pipa distribusi, yang dapat mengurangi umur pakai sistem dan meningkatkan biaya pemeliharaan (Kunii & Levenspiel, 1991). Selain itu, sistem ini juga rentan terhadap kehilangan partikel halus melalui aliran fluida ke luar sistem, sehingga diperlukan sistem pemisahan partikel seperti cyclone atau baghouse filter untuk menangkap partikel yang terangkut (Werther et al., 2000).

Kompleksitas desain dan sistem kontrol juga menjadi perhatian karena tingginya dinamika aliran fluida-partikel yang sulit dimodelkan secara presisi (Arena, 2012, *Waste Management*). Dalam kondisi operasi tertentu, masalah operasional seperti *channeling* atau *slugging* dapat terjadi, yang mengganggu kestabilan fluidisasi dan distribusi aliran reaktan dalam reaktor (Geldart, 1973). Oleh karena itu, meskipun *fluidized bed* memiliki banyak keunggulan, penggunaannya memerlukan desain teknik yang cermat dan kontrol proses yang canggih.

Proses gasifikasi dilakukan menggunakan berbagai jenis reaktor, termasuk reaktor *fluidized bed* (*bubbling*, *circulating*, *dual-bed*). Pemahaman prinsip aliran gas dan bahan bakar pada ketiga jenis ini penting sebagai dasar desain reaktor *fluidized bed* untuk gasifikasi. Berikut penjelasan dari ketiga jenis reaktor *fluidized bed*:

1. Bubbling Fluidized Bed Gasifier (BFB)

Reaktor *Bubbling Fluidized Bed* (BFB) beroperasi dengan kecepatan aliran gas di bawah kecepatan terminal partikel sehingga menghasilkan gelembung gas (bubbles) yang menyebabkan terjadinya pencampuran intens antara bahan bakar padat dan gasifikasi agent. BFB biasanya dioperasikan pada temperatur antara 800–1000 °C.

Kelebihan:

- Pencampuran yang baik antara bahan bakar dan gasifikasi agent menghasilkan efisiensi termal tinggi.
- Cocok untuk biomassa dengan ukuran partikel relatif seragam.
- Operasi relatif stabil dan mudah dikontrol.
- Desainnya sederhana serta biaya konstruksi dan operasi lebih rendah dibanding tipe lain (Basu, 2010).

Kekurangan:

- Terbatas dalam ukuran partikel bahan bakar.
- Kemungkinan terbentuknya tar dan char yang tidak sempurna.
- Efisiensi karbon konversi lebih rendah dibanding circulating bed (Arena, 2012).

2. *Circulating Fluidized Bed Gasifier* (CFB)

Pada reaktor *Circulating Fluidized Bed* (CFB), kecepatan aliran gas lebih tinggi dibandingkan BFB, sehingga partikel padat terbawa oleh aliran gas dan disirkulasikan kembali menggunakan *cyclone separator*. Reaktor ini sangat cocok untuk operasi skala besar dan gasifikasi biomassa dalam jumlah banyak.

Kelebihan:

- Transfer panas dan massa sangat efisien karena sirkulasi partikel padat yang terus-menerus.
- Konversi karbon tinggi dan pembentukan tar lebih rendah dibanding BFB.
- Kapasitas operasi besar dan cocok untuk co-firing atau co-gasification (Higman & van der Burgt, 2008).

Kekurangan:

- Sistem lebih kompleks dan membutuhkan kontrol operasi yang canggih.

- Lebih mahal dalam aspek desain, konstruksi, dan pemeliharaan.
- Rentan terhadap abrasi akibat kecepatan fluida yang tinggi.

3. *Dual Fluidized Bed Gasifier* (DFB)

Reaktor *Dual Fluidized Bed* (DFB) terdiri dari dua kolom terpisah: satu berfungsi sebagai reaktor gasifikasi dan satu lagi sebagai reaktor pembakaran. Partikel padat (biasanya pasir atau bahan inert lainnya) bersirkulasi antara dua kolom, membawa panas dari zona pembakaran ke zona gasifikasi. Ini memungkinkan gasifikasi autothermal tanpa pembakaran bahan bakar secara langsung dalam reaktor gasifikasi.

Kelebihan:

- Memungkinkan gasifikasi secara endotermik tanpa pengenceran gas produk karena tidak menggunakan oksigen atau udara secara langsung di reaktor gasifikasi.
- Menghasilkan gas sintetis (syngas) dengan kandungan CO dan H₂ yang tinggi dan kandungan N₂ rendah.
- Cocok untuk produksi bio-syngas yang digunakan dalam produksi biofuel atau bahan kimia (Hofbauer et al., 2002).

Kekurangan:

- Desain sistem dan kontrol lebih kompleks dibanding BFB dan CFB.
- Investasi awal dan biaya operasional tinggi.
- Diperlukan sinergi sistem yang sangat presisi antara pembakaran dan gasifikasi.

2.2.3 Reaktor Aliran Entrained

Menurut Higman & van der Burgt (2008), entrained flow gasifier adalah sistem yang memungkinkan pencampuran cepat antara bahan bakar dan agen gasifikasi, menghasilkan reaksi yang sangat efisien dan konversi karbon hampir sempurna.

Reaktor aliran entrained merupakan salah satu jenis reaktor gasifikasi yang bekerja pada temperatur tinggi (1200–1600 °C) dan tekanan tinggi (hingga 80 bar),

menggunakan bahan bakar berbentuk serbuk halus ($<100\ \mu\text{m}$) yang dialirkan bersama agen gasifikasi (oksigen/uap) dalam satu arah (co-current) dengan kecepatan tinggi. Reaktor ini menawarkan efisiensi konversi karbon sangat tinggi ($>99\%$), waktu tinggal sangat singkat (1–5 detik), dan pembentukan tar yang sangat rendah, sehingga cocok untuk produksi *syngas* bersih dalam skala industri besar seperti IGCC dan produksi bahan kimia. Namun, reaktor ini membutuhkan sistem penggilingan bahan bakar yang mahal dan desain yang kompleks, serta tidak cocok untuk bahan bakar dengan kadar abu tinggi.

Berdasarkan desain dan arah aliran, terdapat beberapa jenis reaktor entrained flow:

1. *Downflow Gasifier*: Reaktan dan gas hasil mengalir dari atas ke bawah (contoh: *GE/Texaco*). Cocok untuk batubara *slurry*, efisiensi tinggi.
2. *Upflow Gasifier*: Reaktan masuk dari bawah dan gas keluar dari atas (contoh: *Shell*). Waktu tinggal lebih lama, cocok untuk gasifikasi batubara kering.
3. *Opposed Jet/Multi-Injection*: Injeksi dari berbagai arah menciptakan turbulensi ekstrem (contoh: *Siemens Prepflo*). Pencampuran sangat baik.
4. *Slurry-Fed*: Bahan bakar berbentuk *slurry*. Mudah ditangani tapi efisiensi termal lebih rendah.
5. *Dry-Fed*: Bahan bakar kering diinjeksi menggunakan gas pembawa (contoh: *Shell*). Efisiensi termal lebih tinggi.

2.3 Pemanfaatan Gasifikasi Biomass

Dalam konteks energi terbarukan, panas buang geothermal atau *geothermal waste heat* merupakan energi termal sisa yang tidak sepenuhnya dimanfaatkan dalam sistem pembangkitan listrik geothermal konvensional. Studi terbaru menekankan pentingnya optimalisasi energi residual ini, terutama dengan menggunakan pendekatan sistematis berbasis analisis bibliometrik dan pemetaan literatur.

Menurut Nyakuma et al. (2021), integrasi teknik bibliometrik seperti co-occurrence dan co-citation analysis dalam kajian energi panas buang memungkinkan identifikasi teknologi relevan, tren penelitian, serta celah ilmiah yang dapat dieksplorasi. Pendekatan ini juga membantu dalam merumuskan

rekomendasi strategis yang berbasis data dan mendalam, untuk mengarahkan pengembangan sistem pemanfaatan panas buang secara lebih efektif dan efisien.

Menurut Basu (2010), gasifikasi biomassa merupakan teknologi yang menjembatani konversi energi terbarukan dari bentuk padat ke gas bersih yang serbaguna. Gasifikasi biomassa, proses termokimia yang mengubah bahan organik padat (seperti limbah pertanian, kayu, sekam, jerami, dan limbah organik lainnya) menjadi gas sintesis (syngas) melalui reaksi parsial oksidasi pada suhu tinggi (700–1000 °C) dalam lingkungan terbatas oksigen. Proses ini mencakup tahapan pengeringan, pirolisis, oksidasi, dan reduksi.

Tabel 2. 1 Spesifikasi PLTBm Siantan dan Tanjung Batu

PLTBm Siantan	PLTBm Tanjung Batu
Kab. Mempawah, Kalimantan Barat	Pulau Kundur, Kepri
Kapasitas 10MW	Kapasitas 2,4MW
Gasifikasi PKS & Limbah Pertanian	Gasifikasi woodchip

2.4 Metode Analisis Bibliometrik & SLR

Dalam studi panas buang geothermal, pendekatan terintegrasi memungkinkan identifikasi teknologi pemanfaatan yang relevan sekaligus pendalaman terhadap efektivitas dan implementasinya. Hasil dari integrasi ini tidak hanya memberikan pemetaan menyeluruh terhadap literatur yang tersedia, tetapi juga menghasilkan rekomendasi strategis yang komprehensif untuk mendukung pengembangan aplikasi panas buang geothermal secara optimal. Dengan menggabungkan analisis bibliometrik, tinjauan pustaka sistematis (*Systematic Literature Review/SLR*), dan pemetaan ilmu (*science mapping*), penelitian mampu mengidentifikasi celah penelitian yang signifikan, menentukan tren teknologi terkini, serta memahami dinamika pengembangan teknologi gasifikasi biomassa secara lebih mendalam.

Analisis bibliometrik sendiri merupakan metode ilmiah berbasis kuantitatif yang digunakan untuk mengevaluasi literatur akademik berdasarkan data seperti jumlah publikasi, kutipan, serta keterkaitan antar topik penelitian. Di sisi lain, tinjauan pustaka sistematis (SLR) adalah pendekatan kualitatif yang dilakukan secara terstruktur dan terstandarisasi untuk menilai, memilah, dan mensintesis literatur yang relevan secara komprehensif. Integrasi antara analisis bibliometrik

dan SLR, yang dikenal sebagai *bibliometric-SLR* (B-SLR), memberikan pendekatan yang holistik dan menyeluruh dalam menganalisis literatur ilmiah.

Metode ini memadukan keunggulan kuantitatif dari analisis bibliometrik dalam menggambarkan lanskap dan tren global, dengan kekuatan kualitatif dari SLR untuk memperoleh wawasan mendalam terhadap perkembangan dan implementasi teknologi spesifik, termasuk dalam konteks pemanfaatan panas buang dan teknologi gasifikasi biomassa.

2.4.1 Co-occurrence

Menurut Van Eck & Waltman (2010), *co-occurrence* digunakan dalam pemetaan ilmiah (*science mapping*) untuk mengidentifikasi struktur tematik dari suatu bidang pengetahuan. Semakin sering dua kata kunci muncul bersamaan dalam dokumen, maka semakin kuat hubungan konseptual di antara keduanya. Pengaplikasian:

- Mengidentifikasi **hot topics**, tren riset, dan bidang tematik utama.
- Dasar dalam pengembangan peta tematik (*thematic maps*) atau *network visualization*.
- Banyak digunakan dalam **analisis konten ilmiah**, menggunakan tools seperti VOSviewer, BibExcel, atau R-bibliometrix.

2.4.2 Bibliocoupling

Istilah ini pertama kali diperkenalkan oleh Kessler (1963). Ia menjelaskan bahwa bibliographic coupling bersifat **statis**, karena hubungan dibentuk berdasarkan kutipan dari masa lalu yang tidak berubah seiring waktu. Menurut Zupic & Čater (2015), bibliographic coupling lebih cocok untuk mengelompokkan dokumen baru atau terkini, karena mereka mungkin belum banyak menerima sitasi. Pengaplikasian:

- Mengidentifikasi klaster riset yang sedang berkembang.
- Cocok untuk mengelompokkan publikasi baru dalam bidang tertentu.
- Basis untuk visualisasi struktur jaringan dokumen (document clusters).

2.4.3 *Co-citation*

Co-citation terjadi ketika dua dokumen (A dan B) disitasi secara bersamaan oleh dokumen ketiga (C). Frekuensi *co-citation* mencerminkan tingkat keterkaitan antara dua dokumen berdasarkan pengakuan komunitas ilmiah. Menurut Small (1973), *Co-citation* yang menyatakan bahwa semakin sering dua makalah disitasi bersama, maka semakin besar kemungkinan keduanya memiliki hubungan intelektual.

