

SIMULASI TERMODINAMIKA GASIFIKASI *BLACK LIQUOR* PABRIK PULP LARUT KRAFT SEBAGAI SUMBER ENERGI TERBARUKAN

Hamsar¹, Zuchra Helwani¹ dan Bahruddin¹

¹Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Kampus Bina Widya
Jalan Raya HR. Subrantas km 12,5 Simpang Baru Panam, Pekanbaru, 28293

E-mail: hamsar@student.unri.ac.id

ABSTRAK

Industri pulp di Riau menghasilkan 8,5 juta ton black liquor/tahun, merupakan biomassa dengan panas pembakaran 13,8 MJ/kg sehingga memiliki potensi untuk digunakan sebagai sumber energi alternatif dan terbarukan. Salah satu teknologi pengolahan *black liquor* adalah proses gasifikasi yang dapat menghasilkan gas bakar tipe medium. Penelitian ini mempelajari faktor-faktor yang mempengaruhi proses gasifikasi *black liquor* menjadi gas sintesis, dengan melakukan simulasi proses dalam *entrained flow gasifier* menggunakan agen gasifikasi oksigen. Beberapa tahap yang dipergunakan untuk menunjukkan seluruh proses gasifikasi, yaitu dekomposisi/pirolisis black liquor, pembakaran zat *volatile*, gasifikasi arang/char dan pemisahan gas-padatan. Umpan black liquor yang digunakan dengan nilai ultimate (basis kering): 34,0% C; 3,2% H; 4,8% S; 35,8% O; 18,2% Na; 3,1% K; 0,1% N; dan nilai proksimat (basis kering): kadar air 19,3%; zat *volatile* 38,3%, fixed carbon 11,8%; abu 30,6%. Variabel penelitian: temperatur 600-1200°C, ER 0,2-0,5 dan tekanan 1-35 atm. Pada tekanan 10 atm dan ER 0,5, peningkatan temperatur 600 sampai 1200°C menyebabkan produk syngas bertambah (41,21-81,45%), mengurangi konversi CH₄ (8,96-6,04%) dan CO₂ (9,28-3,79%). *Equivalent ratio* berpengaruh terhadap temperatur proses gasifikasi, optimal antara 0,5. Menaikkan tekanan operasi *gasifier* tidak terlalu berpengaruh terhadap produk komposisi *syngas*, tetapi desain tekanan tinggi operasi untuk mempertimbangkan penggunaan alat yang lebih efektif dan efisien sehingga akan mengurangi biaya investasi, tekanan optimal adalah 10 atm.

Kata kunci: *gasifikasi black liquor, entrained flow gasifier, pulp larut kraft.*

ABSTRACT

The pulp industry in Riau produces 8.5 million tons of black liquor/year, a biomass with heat value to 13.8 MJ/kg has the potential to be used as a source of alternative and renewable energy. One of the black liquor technology processing is gasification that can produce fuel gas medium type. The purpose of this research was study the factors that influence the process of black liquor gasification by simulating gasification process in entrained flow gasifier using gasification agent of oxygen. Some stages are used to show the entire process of gasification i.e. pyrolysis of black liquor, combustion of volatile matter, gasification of char and gas-solid separation. In this simulation used black liquor with ultimate value (dry basis): 34,0% C; 3,2% H; 4,8% S; 35,8% O; 18,2% Na; 3,1% K; 0,1% N and proximate value (dry basis): water content 19.3%, volatile matter 38.3%, fixed carbon 11.8%, ash 30.6%. Variable of research are temperature 600-1200°C, equivalent ratio 0.2-0.5 and pressure 1-35 atm. Simulation at pressure 10 atm, equivalent ratio 0.5, increased temperature 600 to 1200°C will produce more syngas (41.21-81.45%), reduce conversion of CH₄ (8.96-6.04%) and CO₂ (9.28-3.79%). Equivalent ratio is factor that very influential of gasification process temperature, optimum on 0.5. Increased the operating pressure of the gasifier not significantly affect the composition of the syngas, but high-pressure operation to consider the use of a more effective and efficient so as to reduce the cost of investment, pressure optimum is 10 atm.

Keywords: *black liquor gasification, entrained flow gasifier, dissolving pulp craft.*

PENDAHULUAN

Industri pulp larut kraft menghasilkan 1,7-1,8 ton

black liquor (berat kering) per ton pulp, merupakan residu dari proses kimia ekstraksi serat dari kayu dalam proses pembuatan pulp

larut kraft, mengandung 20% air, 30% bahan anorganik kimia pemasak berupa garam-garam sodium seperti NaOH, Na₂S, Na₂CO₃ dan Na₂SO₄, 50% lignin dan bahan organik lainnya yang dipisahkan dari pulp selama proses *cooking* dan *washing*.

Black liquor memiliki panas pembakaran mencapai 13,8 MJ/kg yang dimanfaatkan dengan proses pembakaran langsung dengan recovery boiler konvensional, tetapi dengan sistem gasifikasi mempunyai efisiensi energi yang lebih tinggi karena selain bahan bakar juga menghasilkan gas sintesis (Carlsson, 2010, Lindstrom, 2007, Marklund, 2006)

Propinsi Riau memiliki 2 perusahaan pulp terbesar, dengan kapasitas produksi pulp 5 juta ton/tahun menghasilkan 8,5 juta ton *black liquor* atau setara dengan 2,55 juta kiloliter minyak mentah, *black liquor* memiliki kelebihan dibanding sumber energi alternatif dan terbarukan lainnya, karena bisa di konversi menjadi cairan dengan proses gasifikasi.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi gasifikasi *black liquor* di industri pembuatan pulp larut kraft menjadi gas sintesis melalui simulasi komputer program Aspenplus V8.6 dengan agen gasifikasi oksigen murni. Dari hasil simulasi dalam penelitian ini, di ketahui ada tiga faktor yang mempengaruhi dalam proses gasifikasi *black liquor* yaitu temperatur, tekanan dan rasio oksigen per umpan *black liquor* (*Equivalen Ratio*).

Penelitian gasifikasi *black liquor* sudah banyak dilakukan, Carlsson dkk, 2010 melakukan penelitian dan modeling *Computational Fluid Dynamics* (CFD) gasifikasi *black liquor*, dengan tujuan menambah pengetahuan tentang mekanisme gasifikasi *black liquor* dan mengembangkan alat-alat teknis yang bisa digunakan untuk merancang dan memaksimalkan *pressurized entrained flow* gasifier *black liquor*. Lindblom, 2007 mempelajari tentang gasifikasi *black liquor* menjadi bahan bakar motor methanol dan Dimetil Eter (DME), potensi dan keuntungan di industri pulp, sebagai sumber energi alternatif dan terbarukan.

BAHAN DAN METODE

Simulasi dengan aspen plus bertujuan untuk menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi gasifikasi *black liquor* pulp larut kraft dengan agen gasifikasi oksigen. Faktor-faktor penting

yang dipelajari adalah temperatur, nilai *equivalent ratio* dan tekanan terhadap produk akhir syngas yang dihasilkan.

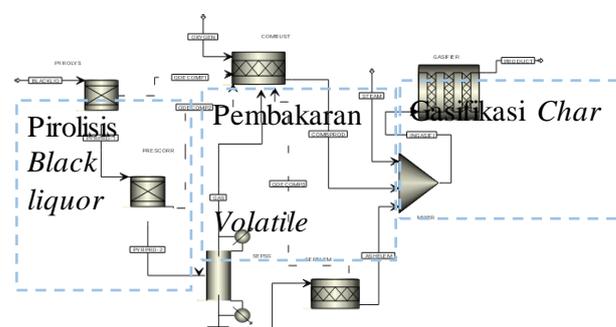
Dalam simulasi ini digunakan *black liquor* (Tabel 1) dari proses pulp kraft larut PT. Riau Andalan Pulp and Paper di Pangkalan Kerinci Kab. Pelawan Riau. Sampel *black liquor* (Tabel 1) di lakukan analisa proksimat untuk menentukan kadar air, zat *volatile* (CO, CO₂, H₂, CH₄, H₂S), *Fixed Carbon* (karbon tetap yang terdapat dalam *black liquor* setelah zat *volatile* dipisahkan) dan *ash/smelt* (Na₂SO₄, Na₂S, Na₂CO₃), sedangkan analisis ultimat untuk menentukan kadar karbon (C), hidrogen (H), Oksigen (O), Nitrogen (N), dan sulfur (S).

Tabel 1. Analisa Ultimat *Black liquor*

Komponen	% Massa
Karbon (C)	34,0
Hidrogen (H)	3,2
Sulfur (S)	4,8
Oksigen (O)	35,8
Sodium (Na)	18,2
Potassium (K)	3,1
Nitrogen (N)	0,1

Tabel 2. Analisa Proksimat *Black liquor*

Analisa Proksimat	Senyawa	Total (% berat)
Kandungan Air	H ₂ O _(l)	19,3
<i>Volatile Matter</i> (VM)	H ₂ S _(g) CO _(g) CO _{2(g)} H _{2(g)} CH _{4(g)}	38,3
<i>Fixed Carbon</i> (FC)	C _(s)	11,8
<i>Ash</i> (smelt)	Na ₂ SO _{4(l)} Na ₂ S _(l) Na ₂ CO _{3(l)} NaOH _(l)	30,6
Panas Pembakaran		13.8 MJ/kg



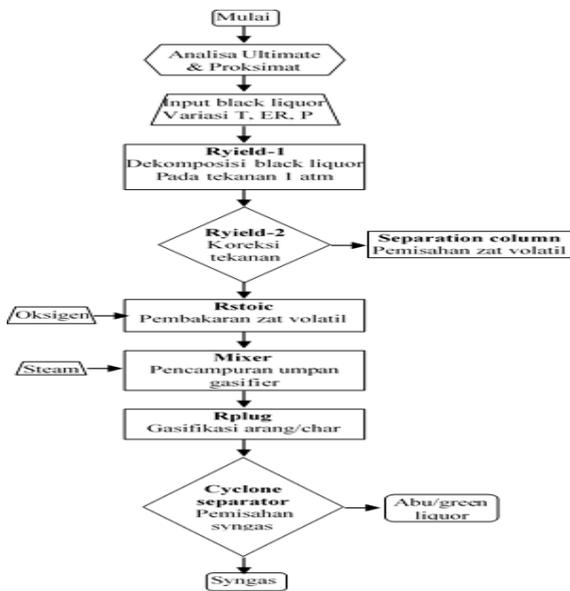
Gambar 1. Simulasi AspenPlus Gasifikasi *Black liquor*

Dalam simulasi Aspenplus ada beberapa tahap yang perlu dipertimbangkan untuk menunjukkan tahap-tahap proses gasifikasi, yaitu dekomposisi *black liquor* (pirolisis), pembakaran zat yang

mudah menguap (zat volatil), gasifikasi arang/*char* dan pemisahan syngas dan abu.

Gasifikasi ini menggunakan *entrained flow gasifier*, dalam simulasi Aspenplus dibagi beberapa tahap seperti pada Gambar 1

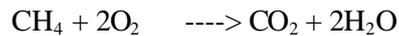
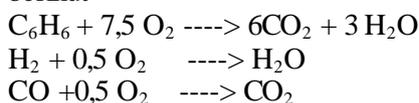
Algoritma tahapan proses gasifikasi *black liquor* pada Gambar 2



Gambar 2. Algoritma Gasifikasi *Black liquor*

Tahap-tahap proses simulasi gasifikasi black liuor berdasarkan Gambar 2 adalah

1. Input data ultimate dan proksimat *black liquor*, dengan variasi temperatur, tekanan dan *equivalent ratio*.
2. Tahap pertama terjadi proses *pirolisis* di bagian atas reaktor. Reaktor *Ryield* (blok PYROLYS) menguraikan *black liquor* menjadi unsur-unsurnya seperti CO, H₂, CO₂, H₂O, H₂S, N₂, CH₄, C₆H₆ dan green liquor (*ash*).
3. Reaktor *Ryield* kedua (blok PRESCORR) digunakan untuk koreksi tekanan masing-masing komponen hasil dari blok PYROLYS. Metode koreksi di hitung di aspen dengan menggunakan USRPRES.
4. Model separation column (blok SEPSG) digunakan untuk memisahkan gas dan padatan *char*
5. Pembakaran zat *volatile* (blok COMBUST) setelah proses pirolisis, *combustible gases* akan bereaksi dengan oksigen yang di umpankan ke dalam gasifier, seperti reaksi berikut



Karena kecepatan reaksi pembakaran *combustible gases* umumnya sangat cepat dan dalam waktu yang singkat, kinetika reaksi proses pembakaran zat *volatile* di abaikan. Konversi CO, H₂, CH₄ dan C₆H₆ dianggap 100%.

6. Dekomposisi *char* (blok SEPELEM) digunakan untuk dekomposisi *Char* menjadi C, H₂, O₂, S dan *ash (smelt)*
7. Mixer digunakan untuk pencampur gas yang keluar dari Rstoic dengan steam sebagai umpan blok *gasifier*.
8. Gasifikasi arang/*char* (blok Rplug) untuk gasifikasi gas. Setelah proses pembakaran zat *volatile*, terjadi proses gasifikasi, *Char* dari proses pirolisis akan beraksi dengan gas dalam fase gas, reaksi yang terjadi adalah

$$\begin{aligned} 3\text{C} + 2 \text{O}_2 &\text{---->} 2 \text{CO} + \text{CO}_2 \\ \text{C} + \text{H}_2\text{O} &\text{---->} \text{CO} + \text{H}_2 \\ \text{C} + \text{CO}_2 &\text{---->} 2 \text{CO} \\ \text{C} + 2\text{H}_2 &\text{---->} \text{CH}_4 \\ \text{S} + \text{H}_2 &\text{---->} \text{H}_2\text{S} \\ \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} &\text{<---->} \text{CO} + 3\text{H}_2 \\ \text{CO} + \text{H}_2\text{O} &\text{<---->} \text{CO}_2 + \text{H}_2 \end{aligned}$$
9. Pemisahan gas dan padatan berdasarkan berat jenis komponen menggunakan cyclone separator

Dekomposisi *black liquor*

Reaktor yield Aspenplus (*Ryield*) digunakan untuk simulasi dekomposisi *black liquor*. Pada tahap ini, massa *black liquor* dirubah menjadi komponen-komponen pembentuknya seperti C, H, O, S, N dan abu, yang ditentukan dari distribusi hasil analisa ultimat *black liquor*.

Pembakaran Zat Volatil

Reaktor Gibbs Aspenplus (*Rstoic*) digunakan untuk simulasi pembakaran zat *volatile* yang terdiri dari karbon fase gas dan fase padat (*char*) menghasilkan arang gasifikasi. Diasumsikan bahwa arang hanya mengandung karbon dan abu. Jumlah karbon dalam zat *volatile* dapat dihitung dengan mengurangi jumlah karbon dalam arang dari total karbon dalam *black liquor*.

Gasifikasi Arang (*char*)

Reaktor Rplug Aspenplus digunakan untuk melakukan gasifikasi arang dengan menggunakan kinetika reaksi. Parameter hidrodinamik membagi reaktor menjadi dua bagian, bed dan freeboard, masing-masing bagian disimulasikan dengan Rplug yang terdiri dari serangkaian reaktor Rplug

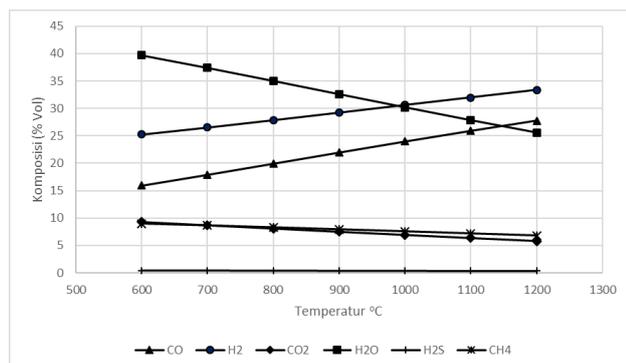
dengan volume yang sama, hidrodinamis dan parameter kinetika, seperti kecepatan superfisial, tekanan oksigen dan uap konstan dalam reaktor tersebut. Dimensi reaktor tergantung pada waktu tinggal, dimensi reaktor dan kondisi operasi. (Finlayson, 2012)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Variasi Temperatur

Temperatur dan tekanan parsial masing-masing reaktan adalah salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap komposisi hasil syngas karena temperatur yang lebih tinggi akan banyak membentuk H₂ dan CO, menghasilkan syngas yang bersih (kandungan *char* dan tar rendah) dan nilai kalor yang tinggi

Pengaruh temperatur dan *equivalent ratio* terhadap komposisi syngas dapat dilihat pada Gambar 3



Gambar 3. Pengaruh temperatur terhadap komposisi produk pada tekanan 1 atm, (ER) 0,5

Proses gasifikasi bersifat reaksi endotermik, sehingga perubahan temperatur sangat mempengaruhi komposisi produk gas. Dari Gambar 3 dapat dilihat konsentrasi H₂ meningkat terhadap kenaikan temperatur (25,3-33,3%).

Peningkatan temperatur juga mempengaruhi konsentrasi CO (15,9-27,8%), karena kecepatan konversi karbon terjadi pada temperatur tinggi, terjadi reduksi karbon dari CO₂ (9,28-5,79%) dan memperbesar konversi CH₄ (8,9—6,8%) menjadi CO.

Kenaikan konsentrasi CO terhadap temperatur karena kecepatan konversi karbon terjadi pada temperatur tinggi, menghasilkan syngas yang bersih dan nilai kalor yang tinggi. Pada temperatur diatas 500°C, terjadi reduksi karbon dari CO₂ menjadi CO, oleh karena itu, untuk mencapai

hasil pirolisis yang tinggi terjadi pada temperatur dibawah 500°C. (Bhavanam dkk, 2011).

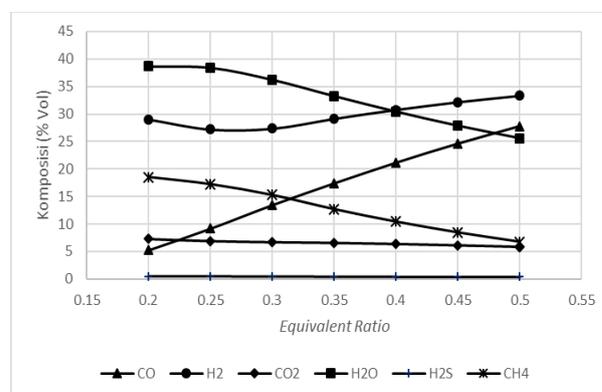
Konsentrasi H₂ akan bertambah seiring kenaikan temperatur mencapai maksimum dan akan turun jika temperatur semakin tinggi. Peningkatan temperatur pada tekanan rendah menghasilkan konsentrasi H₂S semakin berkurang, tetapi akan naik pada temperatur tinggi dan tekanan tinggi. (Huang dan Ramaswamy 2011).

Hidrogen pada saat kesetimbangan akan bertambah seiring kenaikan temperatur, mencapai maksimum dan berangsur-angsur menurun pada temperatur yang lebih tinggi. Pembentukan tar akan bertambah hingga temperatur gasifikasi mencapai 600°C, dan akan menurun jika sudah diatas temperatur tersebut. (Bhavanam dkk, 2011, Syamsudin, 2010)

Peningkatan temperatur akan memperbesar konversi metana yang dicapai. Jadi untuk memperoleh konversi yang tinggi akan lebih baik jika menggunakan temperatur setinggi mungkin karena dengan penggunaan temperatur tinggi akan mempercepat reaksi menuju kesetimbangan. (Basu, 2006, Gebart, 2011)

Pengaruh Variasi *Equivalent ratio*

Equivalent ratio adalah perbandingan antara aliran udara(oksigen)/bahan bakar (*black liquor*) yang digunakan dengan aliran udara/bahan bakar yang dibutuhkan secara stoikiometri untuk pembakaran biomassa. Laju aliran oksigen dapat mengontrol derajat pembakaran yang dapat mempengaruhi pengaturan temperatur proses gasifikasi. *Equivalent ratio* (ER) berpengaruh terhadap peningkatan temperatur *gasifier*, yang akan mempengaruhi konsentrasi dan nilai panas pembakaran produk gas.



Gambar 4. Pengaruh *Equivalent ratio* terhadap komposisi produk pada temperatur 1200°C

Berdasarkan tinjauan termodinamika, reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih rendah akan lebih mudah berlangsung daripada reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih tinggi. Perbedaan energi bebas Gibbs reaksi menentukan tingkat spontanitas reaksi. Reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih rendah bersifat lebih spontan daripada reaksi dengan energi bebas Gibbs yang lebih tinggi. Kecenderungan ini menyebabkan O₂ lebih mudah bereaksi dengan C yang lebih spontan (energi bebas Gibbs reaksi yang lebih rendah) untuk membentuk CO daripada bereaksi dengan H dan S (Novendra dkk, 2014) Pada Gambar 4 terlihat peningkatan umpan oksigen per berat kering umpan akan menaikkan kandungan H₂ dan CO (34,2-61,1%), menurunkan CH₄ (18,5-6,8%), H₂O (38,7-25,5%) dan H₂S (0,51-0,37%), tetapi tidak terlalu berpengaruh terhadap CO₂ (7,3-5,8%), Penambahan oksigen yang terlalu besar juga kurang ekonomis karena oksigen bereaksi simultan membentuk CO dan CO₂.

Peningkatan rasio oksigen-karbon yang berlebih, maka komposisi CO dan H₂ akan menurun. Ini terjadi karena adanya oksidasi berlebih, sehingga banyak membentuk CO₂ dan H₂O, semakin tinggi H₂O akan menggeser reaksi pergeseran gas membentuk H₂ dan CO₂ lebih banyak, namun gas CO akan menurun. Penurunan pembentukan CO lebih besar daripada kenaikan pembentukan CO₂. Hal ini memberikan nilai panas yang dihasilkan di puncak *gasifier* dan efisiensi karbon menurun. Maka efisiensi termal di puncak *gasifier* akan menurun. Selain itu, pembentukan H₂O yang semakin banyak akan mengurangi jumlah mol dari *syngas*. Ini berakibat menurunnya pembentukan atom karbon elementer pada *syngas* puncak *gasifier*, sehingga efisiensi karbon akan menurun.

Peningkatan Oksigen diatas limit maksimum akan membentuk panas oksidasi lebih banyak sehingga semakin banyak *gas* mengalami proses pirolisis di inlet *gasifier*, temperatur pirosis akan naik, pembentukan tar akan bertambah yang mengurangi pembentukan *char* didalam *gasifier*. Ini berakibat menurunnya pembentukan atom karbon pada *syngas* puncak *gasifier*, sehingga efisiensi karbon akan menurun., maka konsentrasi CO dan H₂ akan menurun karena banyak terbentuk CO₂ dan H₂O. Selain itu, pembentukan H₂O yang semakin banyak akan mengurangi jumlah mol dari *syngas*.

Penambahan oksigen yang terlalu besar juga kurang ekonomis karena oksigen bereaksi simultan membentuk CO dan CO₂ yang akan

mempengaruhi komposisi dan nilai panas pembakaran produk gas.

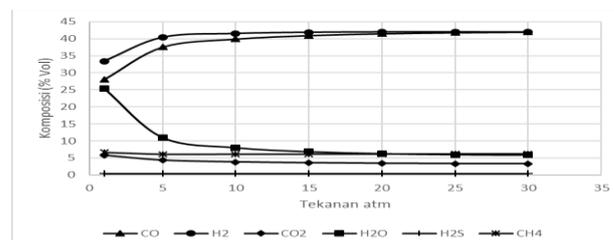
Pada rasio oksigen pengoksidasi yang relatif rendah, produk yang dihasilkan merupakan senyawa – senyawa yang tidak teroksidasi sempurna seperti H₂, CO, dan H₂S (Novendra dkk, 2014).

Jumlah *Equivalent ratio* yang tepat mempunyai keuntungan untuk mengurangi pembentukan tar sehingga lebih memudahkan oksigen bereaksi dengan zat *volatile* (Bhavanam dkk, 2011).

Pengaruh Variasi Tekanan

Dalam prakteknya, semua proses gasifikasi saat ini menggunakan tekanan di atas 10 bar, beberapa keuntungan yang perlu dipertimbangkan menggunakan *gasifier* bertekanan adalah penghematan dalam kompresi energi dan mengurangi ukuran beberapa peralatan, seperti reaktor, tekanan dan tangki penyimpanan.

Tekanan berdampak pada kebutuhan suplai oksigen. Jika kerugian tekanan dalam reaktor gasifikasi terlalu tinggi maka energi yang dibutuhkan untuk mensuplai udara pun semakin besar. (Young dkk, 2006)



Gambar 5. Pengaruh tekanan terhadap komposisi produk pada temperatur 1200°C

Pada Gambar 5 terlihat percobaan dengan berbagai variasi tekanan menyebabkan berkurangnya konsentrasi CO₂ (5,77- 3,26%) terhadap kenaikan tekanan. berbanding terbalik dengan CO (27,97-41,93%).

Peningkatan tekanan mempengaruhi jumlah produk gas (61,4-81,5%), dari tekanan 1 – 10 atm, tetapi hanya naik sedikit pada tekanan 30 atm (83,9), meningkatkan konsentrasi H₂S (0,36-0,43%), tetapi tidak terlalu mempengaruhi konsentrasi CH₄ (6,67-6,21%).

Dari hasil percobaan terlihat bahwa semakin besar tekanan operasi yang digunakan maka konversi H₂O menjadi *syngas* akan naik (25,5-5,8%). Hal ini dapat dijelaskan pada prinsip Le Chatelier,

yang menyatakan bahwa semakin tinggi tekanan yang digunakan pada sistem maka kesetimbangan akan bergeser ke arah jumlah mol yang lebih sedikit. Dalam kaitannya dengan reaksi steam reforming, kesetimbangan akan bergeser ke arah produk jika tekanan dinaikkan sehingga konversi akhir H₂O akan semakin besar.

KESIMPULAN

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sintesis gas hasil gasifikasi *black liquor* pabrik pulp kraft dapat digunakan sebagai alternatif bahan bakar dari energi terbarukan, hasil yang didapat 81,45% pada temperatur 1200°C, equivalen ratio 0,5 dan tekanan 10 atm.

Temperatur gasifikasi adalah salah satu faktor yang terpenting mempengaruhi komposisi dan properti *syngas*. Semakin tinggi suhu akan menambah *yield* gas karena meningkatkan efisiensi konversi. semakin tinggi *Equivalent ratio* akan menaikkan suhu *gasifier* yang akan berpengaruh terhadap komposisi produk gas.

Percobaan dengan berbagai variasi tekanan menyebabkan berkurangnya kandungan CO₂, berbanding terbalik dengan CO. Menaikkan tekanan *gasifier* sampai 10 atm akan meningkatkan produk *syngas*, tetapi tidak terlalu signifikan jika tekanan dinaikkan lagi, selain itu peningkatan tekanan juga menambah konsentrasi H₂S.

DAFTAR PUSTAKA

- Basu, P., 2006, *Combustion and Gasification in Fluid*, Taylor & Francis Group, Kanada
- Bhavanam A., Sastry R. C., 2011, *Biomass Gasification Process in Downdraft Fixed Bed Reactors: A Review*, International Journal of Chemical Engineering and Application, India.
- Carlsson P., Wiinikka H., Marklund M., Grönberg C., Petterson E., Lidman M., Gebart R, 2010, *Experimental investigation of an industrial scale black liquor gasifier. 1. The effect of reactor operation parameters on product gas composition*, Journal Elsevier Fuel 89 (2010) 4025-4034.
- Finlayson B. A., 2012, *Introduction to Chemical Engineering Computing*, 2nd edition, John Wiley & Sons, Inc, USA.
- Gebart B. R., Lidman M., Carlsson P., Marklund M., Grönberg C., Petterson E., Lidman M., 2011, *Influence from varying operating*

parameters on the syngas composition from a black liquor gasifier, Swedia.

- Heiskanen, L., 2011, *A study on rate correlations of gasification reactions*, Lappeenranta University of Technology, Finlandia.
- Huang H., Ramaswamy S., 2011, *Thermodynamic Analysis of Black liquor Steam Gasification*, Proceeding BioResources, USA
- Larson E. D., Consonni S., Katofsky R. E., Lisa K., Frederick W. J., 2006, *A Cost-Benefit Assesment of gasification-based Biorefinering in the Kraft Pulp and Paper Industry*, Final Report U.S. Department Energy and American Forest and Paper Association
- Lindblom M., 2007, *Gasification of Black Liquor and Sulphur Cycle in the Paper Industry*, Denmark.
- Lindström, E. V. M., 2007, *Integrating Black Liquor Gasification with Pulping Process Simulation, Economics and Potential Benefits*, Dissertation, North Carolina State University, USA
- Marklund M, 2006, *Pressurized Entrained-flow High Temperature Black Liquor Gasification. Ph.D. Thesis*, Luleå University of Technology, Swedia
- Novendra R, N., Helwani Z., Helianty S., Zulfansyah, 2014, *Pemodelan dan Simulasi Kinerja Downdraft Gasifier Menggunakan Teknik Minimisasi Energi Bebas Gibbs*, Teknik Kimia Universitas Riau, Indonesia
- Syamsudin, Susanto H., 2010, *Simulasi Termodinamika Gasifikasi Sludge Pabrik Pulp Kraft untuk Penghematan Gas Alam Sebagai Bahan Bakar Lime kiln*, Paper Seminar Rekayasa Kimia dan Proses, Indonesia
- Young C. A., Lisa K., Fredrick W. J., 2006, *On Pressure Effects on Black Liquor Gasification*, Chemical and Biomolecular Engineering, Georgia Institute of Technology, USA.