

Simulasi Termodinamika Gasifikasi *Sludge* Pabrik Pulp Kraft untuk Penghematan Gas Alam Sebagai Bahan Bakar *Lime kiln*

Syamsudin^{*} dan Herri Susanto

^{*} Mahasiswa Program Doktor Teknik Kimia,
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung.
Jl. Ganesha No. 10, Bandung

Abstrak

Sludge merupakan biomassa dengan tipikal panas pembakaran (dasar kering) 24,1 MJ/kg sehingga memiliki potensi untuk digunakan sebagai sumber energi alternatif dan terbarukan. Sebuah pabrik pulp kraft biasanya menghasilkan *sludge* kira-kira 58 kg/ton pulp. *Sludge* sebanyak ini mungkin dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar pengganti gas alam untuk proses kalsinasi di dalam pabrik pulp kraft di Indonesia. Salah satu teknologi pemanfaatan *sludge* adalah proses gasifikasi yang dapat menghasilkan gas bahan bakar tipe medium joule value. Untuk dapat diolah dalam proses gasifikasi, *sludge* harus memiliki kadar air sekitar 15%, padahal dewatering masih menghasilkan *sludge* kadar air 60%. Penurunan kadar air lebih lanjut mungkin dapat dilakukan dengan memanfaatkan panas sensible gas hasil gasifikasi. Jika diperlukan, sebagian gas produser juga digunakan untuk pengeringan. Simulasi dilakukan dengan basis kebutuhan gas alam 129 Nm³/ton pulp. Simulasi proses gasifikasi *sludge* dengan kadar air 10% dapat menghasilkan gas produser dengan panas bakar 11752 kJ/Nm³. Untuk mencapai kadar air 10%, pengeringan *sludge* terpaksa dibantu dengan sebagian gas produser (23%), sehingga penghematan gas alam untuk proses kalsinasi hanya mencapai 17%. Jika *sludge* yang digasifikasi memiliki kadar air 30%, gas produser memiliki panas pembakaran 9140 kJ/Nm³. Pada kondisi ini penghematan gas alam mencapai 16% dan menghasilkan temperatur kesetimbangan 570 °C (lebih rendah dari temperatur gasifikasi dalam praktek). Komposisi dan panas bakar gas produser tergantung pada perbandingan steam/biomassa, oksigen/biomassa, di samping kadar air dalam *sludge*.

Kata kunci: gasifikasi *sludge*, kalsinasi, substitusi gas alam, pulp kraft

1. Pendahuluan

Pabrik pulp proses kraft merupakan salah satu sektor yang mengkonsumsi gas alam dalam jumlah besar, khususnya *lime kiln* di unit pemulihan bahan kimia. Penggunaan gas alam di unit *lime kiln* ini menjadi hambatan bagi pabrik pulp kraft untuk mencapai kemandirian energi. Cadangan gas alam yang mulai terbatas dan meningkatnya harga gas alam mendorong pabrik pulp untuk melakukan konservasi energi. Gas dan hasil samping tidak terkondensasi seperti methanol dan *tall oil*, yang tersedia di pabrik pulp, kadang-kadang digunakan sebagai sumber energi tambahan. Beberapa pabrik menggunakan bahan bakar alternatif seperti lindi hitam dan biomasa lainnya [Lundqvist, 2009].

Produksi pulp *bleached kraft* mengkonsumsi energi panas 10-14 GJ/ADt (tidak termasuk *steam* untuk produksi listrik) dan energi listrik 600-800 kWh/ADt [Ineris, 2010]. Konsumsi energi tergantung konfigurasi proses, peralatan proses, dan efisiensi proses. Pabrik pulp kraft merupakan pabrik yang mengkonsumsi energi dalam jumlah besar, namun juga dapat memproduksi *steam* dan listrik sendiri menggunakan biomassa. Pabrik pulp kraft memenuhi kebutuhan energi dengan cara membakar lindi hitam pekat di *recovery boiler* dan kulit kayu di *power boiler*. Konsumsi energi panas untuk proses produksi pulp kraft dapat dilihat pada Tabel 1.

Bahan bakar fosil digunakan sebagai bahan bakar tambahan, misalnya gas alam untuk bahan bakar *lime kiln*. Proses kalsinasi sendiri membutuhkan panas pada suhu sekitar 800°C [Adams, 1990]. Siklus proses kraft dapat dilihat pada Gambar 1. Tipikal pabrik pulp kraft mengkonsumsi CaO sebesar 250 kg atau 446 kg CaCO₃ per ton pulp kraft [Miner, 2002].

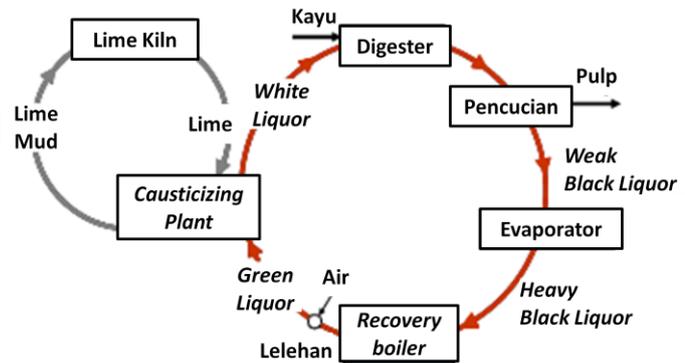
Di sisi lain, pabrik pulp merupakan penghasil limbah padat yang jumlahnya cukup besar yang berasal dari berbagai unit, diantaranya *sludge* dari unit pengolahan air limbah. *Sludge* yang dihasilkan dari sebuah pabrik pulp kraft umumnya mencapai 58 kg/ton pulp [Scott, *et al.*, 1995]. *Sludge* yang dihasilkan tersebut dapat diklasifikasi atas *sludge* primer dari pengolahan fisika-kimia, dan *sludge* sekunder dari pengolahan biologi. *Sludge* pabrik pulp merupakan bahan organik atau biomassa dengan panas pembakaran (dasar kering) mencapai

24,1 MJ/kg [Scott, *et al.*, 1995] sehingga berpotensi digunakan sebagai sumber energi alternatif dan terbarukan. *Sludge* pada umumnya sudah mendapat perlakuan pemisahan air sampai kadar padatan 45-50% [Linderoth, 1991]. *Sludge* ini dapat dimanfaatkan menjadi sumber bahan bakar gas non-fosil melalui proses gasifikasi. Dengan kondisi penyediaan gas alam yang kurang menjamin saat ini, maka potensi *sludge* perlu dikembangkan, antara lain melalui proses gasifikasi untuk menghasilkan gas bakar medium. Gas yang dihasilkan dapat digunakan untuk mensubstitusi gas alam pada pembakaran di unit *lime kiln* pabrik pulp.

Tabel 1. Konsumsi energi panas pabrik pulp *bleached kraft*

Proses	Konsumsi Energi Panas
Penanganan kayu	1,0%
Pemasakan	14,2%
<i>Oxygen delignification</i>	2,8%
<i>Bleaching</i>	3,5%
Persiapan kimia <i>bleaching</i>	0,5%
Pengeringan <i>pulp</i>	19,8%
Penguapan	28,5%
<i>Recovery boiler</i>	4,2%
<i>Lime kiln</i>	10,4%
Lain-lain	15,1%
Total	100,0%

[Ineris, 2010]



Gambar 1. Proses pemulihan bahan kimia pemasakan pulp kraft

Swamy (1990) melaporkan hasil gasifikasi *sludge* dari pabrik pulp kraft dengan nilai ultimate (bebas air dan abu): 59,36% C; 6,90% H; 28,02% O; 1,04% S; 4,68% N; dan proximate (*as received*): kadar air 62,40%; abu 7,10%; NHV (dasar kering) 24,1 MJ/kg. Gasifikasi *sludge* pada kondisi operasi dengan perbandingan *Steam/Biomassa* 2,07 kg/kg menghasilkan gas produser dengan komposisi (% volume): 52,94% H₂; 11,77% CO; 21,94% CO₂; 8,95% CH₄; 3,00% C₂₊; HHV 14 MJ/m³ dan temperature 676 °C.

Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari potensi pemanfaatan gas produser hasil gasifikasi *sludge* untuk substitusi gas alam di *lime kiln*, dan melihat pengaruh beberapa faktor penting terhadap kinerja proses gasifikasi *sludge*. Faktor-faktor penting yang dipelajari seperti kadar air *sludge*, nilai *equivalence ratio*, perbandingan *Steam/Sludge* (S/B), dan laju alir *sludge*. Simulasi dilakukan pada proses gasifikasi untuk menghasilkan gas produser dari *sludge*, dengan agen gasifikasi oksigen dan *steam*. Gas produser yang dihasilkan digunakan sebagai bahan bakar di *lime kiln* pabrik pulp.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Dalam simulasi ini digunakan *sludge* dari pabrik pulp kraft dengan nilai ultimate (basis kering): 48,0% C; 5,7% H; 36,3% O; 0,8% S; 1,2% N; dan proximate (basis kering): kadar air 60,0%; abu 8,0%; *Volatile Matter* 51,07%; *Fixed Carbon* 40,93%; LHV (dasar kering) 9 MJ/kg [James and Kane, 1991].

Konfigurasi proses

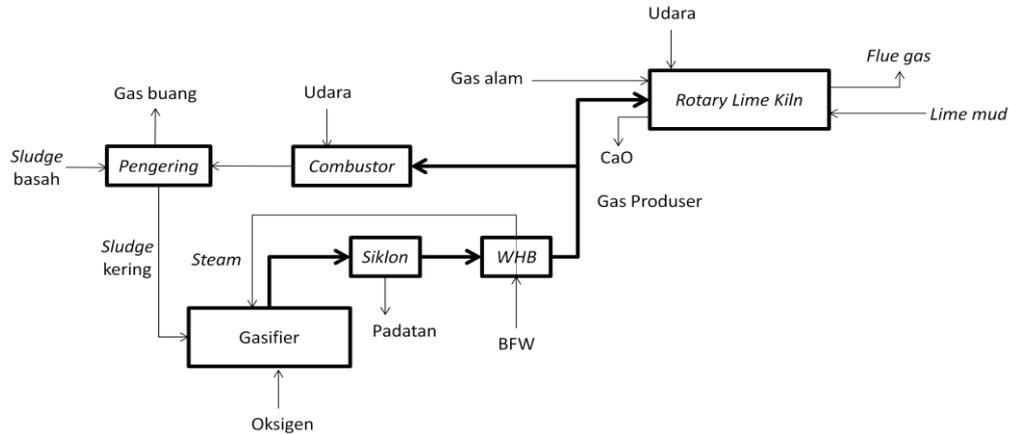
Konfigurasi proses yang disusun dalam penelitian ini adalah sistem gasifikasi satu *bed* dengan umpan *sludge* pabrik pulp kraft menggunakan agen gasifikasi O₂ dan *steam*. Penggunaan oksigen murni mahal, sehingga nantinya diganti dengan model konfigurasi gasifikasi lain yang menggunakan udara, yang sekarang sedang dikembangkan di Institut Teknologi Bandung (ITB). Gas produser keluar dari gasifier dibersihkan dari padatan yang terkandung di dalam umpan dan yang terbentuk selama proses gasifikasi menggunakan siklon. Temperatur gas produser keluar dari gasifier masih sangat tinggi sehingga memiliki panas sensibel yang tinggi. Panas sensibel gas produser keluar gasifier ini dimanfaatkan di *Waste Heat Boiler* (WHB) untuk produksi *steam* yang memenuhi kebutuhan proses gasifikasi. Sebagian gas produser keluar WHB dibakar untuk keperluan pengeringan umpan *sludge* dan sebagian lagi dimanfaatkan untuk substitusi gas alam sebagai bahan bakar *lime kiln*. Skema konfigurasi proses dapat dilihat pada Gambar 2.

Variabel masukan dan keluaran

Variabel masukan dalam simulasi ini adalah:

- Kadar air *sludge*. Evaluasi pengaruh kadar air dilakukan mengingat *sludge* pada umumnya sudah mendapat perlakuan pemisahan air sampai kadar padatan 45-50% melalui proses *dewatering* mekanik. Kadar air terkait dengan tingkat *dewaterability* dan energi yang diperlukan untuk proses pengeringan *sludge*. Pada simulasi ini,

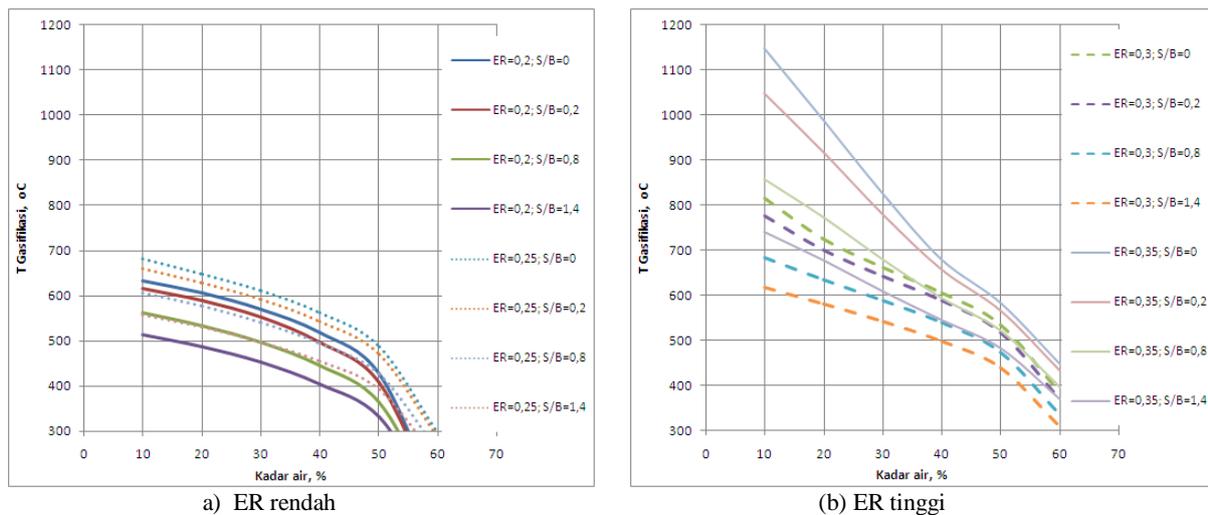
- kadar air *sludge* yang masuk gasifier divariasi 10-60%. Untuk mencapai kadar air tersebut, *sludge* basah dikeringkan dahulu dengan mengambil energi panas dari sebagian gas produser yang dihasilkan.
- Equivalence Ratio (ER).** Untuk menghasilkan gas bakar medium, proses gasifikasi dilakukan dengan O_2 sebagai oksidan, bukan dengan udara, untuk menghindari pengenceran N_2 . Gasifikasi dengan oksigen berlangsung pada nilai ER 0,25 - 0,3 [Lin, 2002]. Nilai ER yang digunakan dalam simulasi ini divariasi antara 0,2 - 0,35 kg/kg.
 - Perbandingan *Steam/Sludge* (S/B).** Untuk memperkaya kandungan H_2 , gasifikasi dilakukan dengan penambahan *steam*, walaupun *sludge* sendiri sudah mengandung relatif banyak hidrogen. Nilai S/B divariasi pada 0; 0,2; 0,8 dan 1,4 kg/kg. Variasi nilai S/B ini sesuai dengan nilai S/B yang banyak dipakai dalam penelitian gasifikasi biomassa, yaitu 0,2-2,0 [Corella, 2008].
 - Laju alir *sludge*,** untuk melihat potensi penghematan gas alam yang dapat dicapai. Laju alir *sludge* divariasi pada 30, 40, 50, 60, dan 300 kg *sludge* (dasar kering).



Gambar 2. Konfigurasi proses gasifikasi *sludge*-kalsinasi *lime mud*

3. Hasil dan Pembahasan

Pada simulasi ini, *sludge* basah sebelum pengeringan ditetapkan dengan kadar air 60%. Proses kalsinasi didefinisikan sempurna jika temperatur telah mencapai $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan konsumsi gas alam $129\text{ Nm}^3/\text{jam}$ dan produksi CaO sebesar 250 kg. Substitusi gas alam dengan gas produser dilakukan dengan melakukan variasi kondisi operasi gasifikasi dan laju alir kapasitas gasifikasi *sludge*, dengan menjaga suhu kalsinasi tetap $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan konversi $CaCO_3$ 100%. Oksigen *excess* pada proses kalsinasi ditetapkan 10%.

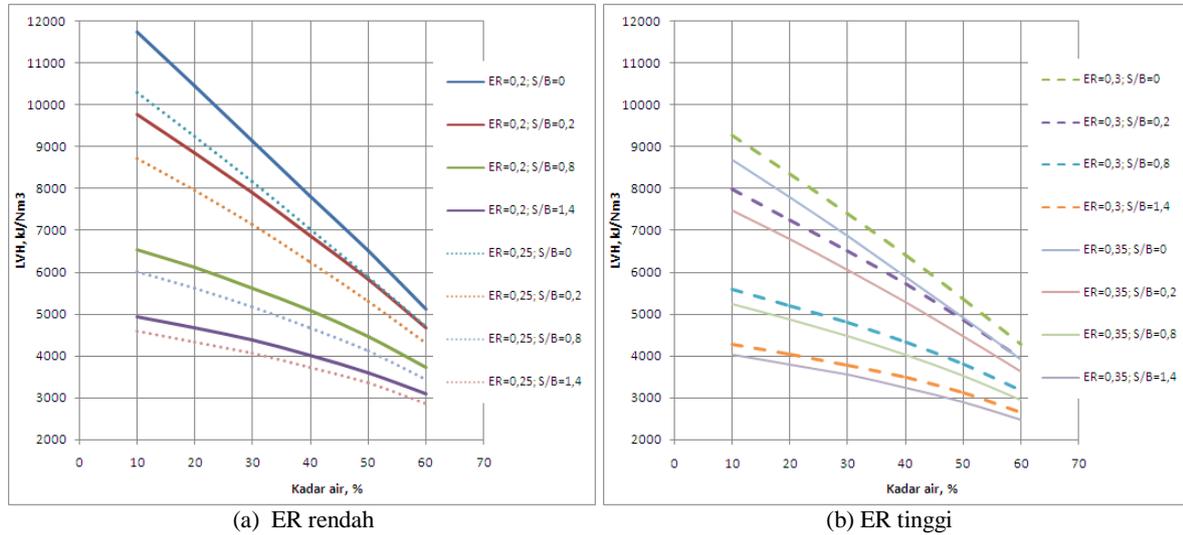


Gambar 3. Pengaruh kadar air *sludge* terhadap temperatur gasifikasi

Pengaruh kadar air

Kenaikan kadar air dalam *sludge* menyebabkan terjadinya penurunan temperatur gasifikasi, seperti terlihat pada Gambar 3. Penurunan ini terjadi karena berkurangnya ketersediaan panas untuk reaksi endotermik gasifikasi akibat penggunaan panas untuk menguapkan air dalam *sludge*.

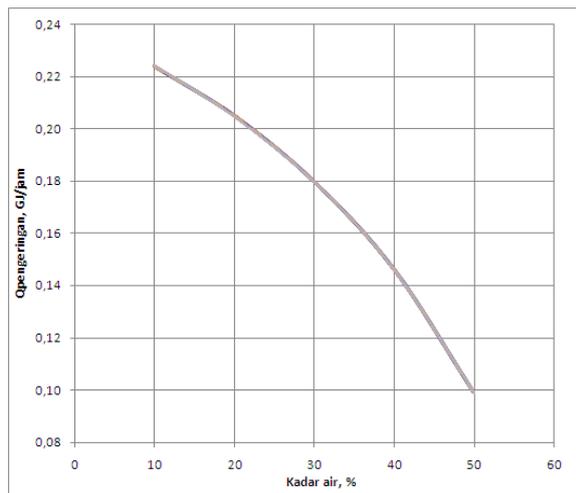
Semakin tinggi kadar air dalam *sludge* menyebabkan kebutuhan panas penguapan semakin besar, sehingga temperatur kesetimbangan gasifikasi juga semakin turun. Proses gasifikasi sendiri sebaiknya dijaga pada temperatur di atas 600 °C, karena proses gasifikasi lebih efektif pada suhu di atas 600°C. Selain itu, pada suhu yang lebih tinggi, tar yang terbentuk menjadi berkurang karena mengalami reaksi oksidasi. Dalam operasi gasifikasi, kandungan air dalam *sludge* dapat dimanfaatkan untuk menurunkan temperatur gasifikasi, sehingga tidak terjadi pelelehan abu dan kerusakan peralatan karena *overheating*. Dari simulasi ini, proses gasifikasi sebaiknya dilaksanakan dengan kadar air 15% agar temperatur gasifikasi tidak kurang dari 600 °C.



Gambar 4. Pengaruh kadar air *sludge* terhadap LHV gas produser

Reaksi gasifikasi merupakan reaksi kesetimbangan yang bersifat endotermik, yang sangat dipengaruhi oleh temperatur reaksi. Karena kenaikan kadar air dalam *sludge* menyebabkan terjadinya penurunan temperatur, maka kadar CO dan H₂ dalam gas produser sebagai hasil reaksi gasifikasi menurun akibat berkurangnya ketersediaan panas untuk reaksi endotermik. Sebaliknya, kadar H₂O naik secara drastis, kemungkinan karena terjadi penambahan kadar air dalam *sludge*.

Penurunan kadar CO dan H₂ sebagai komponen utama dalam gas produser menyebabkan LHV gas menjadi turun (Gambar 4). Dalam pengoperasiannya, LHV gas produser sebaiknya dijaga tetap di atas 4000 kJ/Nm³, karena LHV yang lebih rendah mengakibatkan gas produser yang dihasilkan sulit terbakar. Pada kadar air 40%, LHV gas produser masih di atas 4000 kJ/Nm³ untuk sebagian besar hasil simulasi. Pada proses gasifikasi tanpa *steam*, kenaikan kadar air dari 10% ke 60% mengakibatkan penurunan LHV gas produser dari 11700 menjadi 5100 kJ/Nm³ (ER=0,2) dan penurunan LHV dari 10200 menjadi 4600 kJ/Nm³ (ER=0,25).



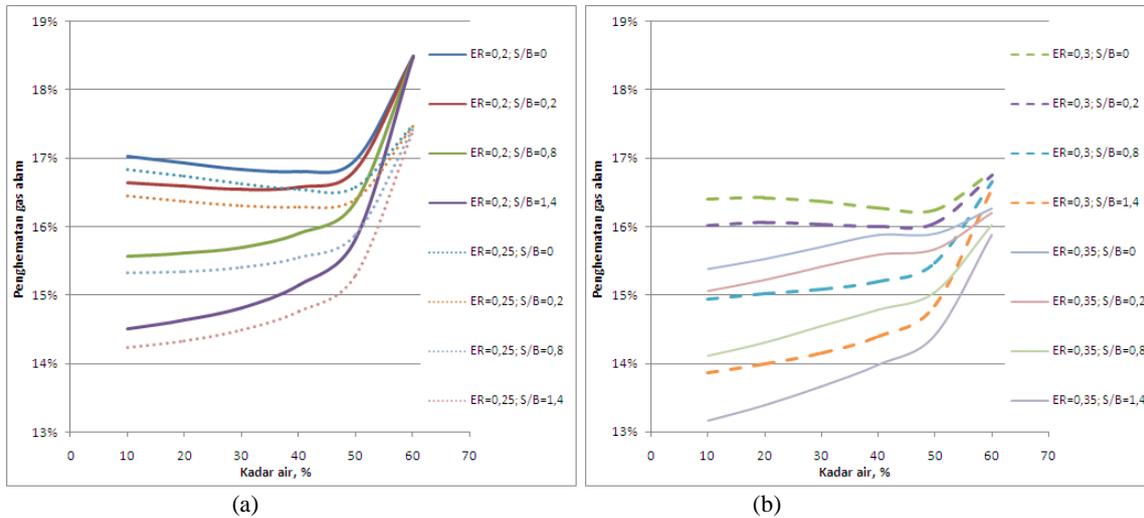
Gambar 5. Pengaruh kadar air *sludge* terhadap energi pengeringan (laju *sludge*, db=60 kg/jam)

Pengaruh nilai *equivalence ratio* (ER)

Makin tinggi nilai ER, maka proses gasifikasi mendekati kebutuhan stoisiometrik untuk pembakaran sempurna. Hal ini dapat dilihat pada kenaikan temperatur gasifikasi dan penurunan LHV gas produser. Pada nilai ER=1 nilai kadar CO dan H₂ ini akan mencapai nol pada kondisi pembakaran sempurna. Penurunan LHV gas

Kenaikan kadar air *sludge* umpam gasifier berdampak pada berkurangnya gas produser yang harus dibakar untuk proses pengeringan *sludge*, seperti terlihat pada Gambar 5, sehingga semakin besar laju alir gas produser yang dimanfaatkan untuk proses kalsinasi. Jadi, meskipun LHV gas produser mengalami penurunan, namun karena laju alir gas produser semakin besar, maka penghematan gas alam mengalami sedikit kenaikan. Pada penelitian ini, konsumsi gas produser sebagai pengganti gas alam dihitung berdasarkan kesetaraan panas pembakaran.

produser terjadi karena peningkatan kebutuhan energi kimia untuk berlangsungnya proses sehingga energi kimia yang tersisa pada gas produser yang dihasilkan menjadi kecil. Penurunan LHV gas produser yang tidak diimbangi dengan peningkatan laju alir gas produser menyebabkan penghematan gas alam yang dapat dicapai juga menjadi turun (Gambar 6).



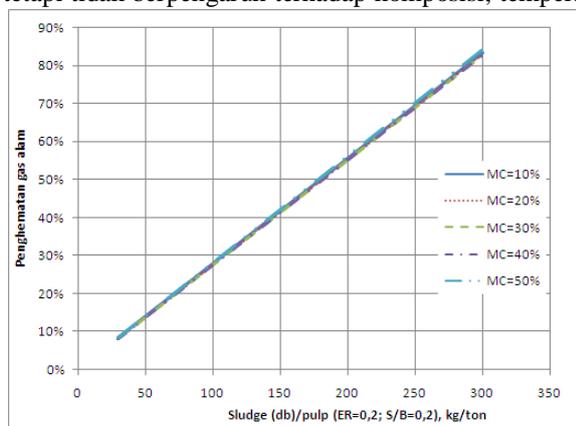
Gambar 6. Pengaruh kadar air *sludge* terhadap penghematan gas alam (laju *sludge*, $db=60$ kg/jam)

Pengaruh *Steam/Biomassa* (S/B)

Untuk memperkaya kandungan H_2 , gasifikasi dilakukan dengan penambahan *steam*, walaupun *sludge* sendiri sudah mengandung relatif banyak hidrogen. Makin tinggi nilai S/B, temperatur gasifikasi dan LHV gas produser mengalami penurunan. Penambahan *steam* terhadap proses gasifikasi perlu memperhatikan efeknya terhadap penurunan temperatur gasifikasi dan nilai LHV gas produser ini. Dari sisi proses kalsinasi, makin tinggi nilai S/B, menyebabkan terjadinya penurunan gas alam yang dapat dihemat. Penurunan penghematan gas alam ini sejalan dengan temperatur gasifikasi dan nilai LHV gas produser yang semakin rendah. Hasil simulasi menunjukkan penghematan gas alam mencapai maksimal pada kadar air *sludge* 10% kondisi $ER=0,2$ tanpa *steam*, dengan temperatur gasifikasi 633 °C dan LHV gas produser 11752 kJ/Nm³. Namun pada kondisi ini, kebutuhan pengeringan *sludge* menjadi besar, yaitu $224,7$ kJ/jam dan dibatasi kesulitan dalam proses pengeringan. Proses pengeringan kemungkinan akan lebih mudah dilakukan sampai pada kadar air 30%. Pada kadar air *sludge* 30% kondisi $ER=0,2$ tanpa *steam*, temperatur gasifikasi mencapai 570 °C dan LHV gas produser 9140 kJ/Nm³, dengan kebutuhan pengeringan *sludge* sebesar 180 kJ/jam.

Pengaruh laju alir *sludge*

Variasi laju alir *sludge* pada proses gasifikasi berpengaruh terhadap laju alir gas produser yang dihasilkan, tetapi tidak berpengaruh terhadap komposisi, temperatur gasifikasi, maupun LHV gas produser yang dihasilkan, selama kondisi operasi gasifikasi dijaga tetap. Semakin besar laju alir *sludge* yang digasifikasi, maka tentu saja semakin besar laju alir gas produser yang dihasilkan. Besarnya laju alir *sludge* dibatasi oleh kapasitas gasifier dan laju produksi *sludge* dari proses pengolahan air limbah.



Gambar 7. Pengaruh laju alir *sludge* terhadap penghematan gas alam

Untuk semua kondisi operasi gasifikasi dalam simulasi ini, meningkatnya laju alir *sludge* yang digasifikasi meningkatkan kenaikan penghematan gas alam (Gambar 7). Pada laju alir *sludge* 60 kg/ton pulp, penghematan gas alam mencapai 17%, sedangkan penghematan 100% dicapai kira-kira pada laju alir *sludge* 360 kg/ton pulp. Namun, penggantian gas alam dengan gas produser dengan nilai panas lebih rendah mengakibatkan laju alir gas bahan bakar dan laju alir *flue gas* meningkat. Peningkatan laju alir gas ini dibatasi oleh desain *burner* dan karakteristik pembakaran yang

diperlukan dalam proses kalsinasi.

4. Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa gas produser hasil gasifikasi *sludge* pabrik pulp kraft dapat digunakan untuk mensubstitusi gas alam sebagai bahan bakar di *lime kiln*. Substitusi gas alam tergantung pada panas pembakaran gas bakar medium yang tergantung pada kadar air *sludge* dan kondisi proses gasifikasi. Hasil simulasi menunjukkan penghematan gas alam mencapai maksimal pada kadar air *sludge* 10% kondisi ER=0,2 tanpa *steam*, dengan temperatur gasifikasi 633 °C dan LHV gas produser 11752 kJ/Nm³. Namun pada kondisi ini, kebutuhan pengeringan *sludge* menjadi besar, yaitu 224,7 kJ/jam dan dibatasi kesulitan dalam proses pengeringan. Proses pengeringan kemungkinan akan lebih mudah dilakukan sampai pada kadar air 30%. Pada kadar air *sludge* 30% kondisi ER=0,2 tanpa *steam*, temperatur gasifikasi mencapai 570 °C dan LHV gas produser 9140 kJ/Nm³, dengan kebutuhan pengeringan *sludge* sebesar 180 kJ/jam. Pada laju alir *sludge* 60 kg/ton pulp, penghematan gas alam mencapai 17%, sedangkan penghematan 100% dicapai kira-kira pada laju alir *sludge* 360 kg/ton pulp.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Dr. Sunu Pranolo yang telah memberi saran dan bantuan dalam melakukan penelitian ini.

Daftar Pustaka

- [1]. Adams, T.N., (1990), "Lime Reburning", in *1990 Kraft Recovery Operations Short Course*, TAPPI Press, Atlanta, hal. 61-74.
- [2]. Corella, J.C., Toledo, J.M., and Molina, G., (2008), "Biomass gasification with pure steam in fluidized bed: 12 variables that affect the effectiveness of the biomass gasifier", *Int. J. Oil, Gas and Coal Technology*, Vol. 1, Nos. 1/2, hal. 194-207.
- [3]. Ineris, 2010, http://aida.ineris.fr/bref/brefpap/bref_pap/english/bref_gb_kraft_niveau.htm, diakses 2 Juli 2010.
- [4]. James, B.A. dan Kane, P.W., (1991), "Sludge Dewatering an Incineration at Westvaco, North Charleson, Sc", in M.J. Coleman (Ed.), *Energy Engineering and Management in the Pulp and Paper Industry*, TAPPI Press, Atlanta, hal. 136-145.
- [5]. Lin, W., Zhang, D., dan Ren, Y., (2002), "Biomass Gasification Principles and Applications", Liaoning Institute of Energy Resources.
- [6]. Linderoth, C.E., (1991), "Paper Mill Sludge as a Valuable Fuel", in M.J. Coleman (Ed.), *Energy Engineering and Management in the Pulp and Paper Industry*, TAPPI Press, Atlanta, hal. 89-91.
- [7]. Lundqvist, P., (2009), "Mass and energy balances over the *lime kiln* in a kraft pulp mill", *Master Thesis*, Uppsala University, Uppsala, Stockholm.
- [8]. Miner, R. dan Upton, B., (2002), "Methods for Estimating Greenhouse Gas Emissions from *Lime kilns* at Kraft Pulp Mills", *Energy*, 27, hal.729-738.
- [9]. Scott, G.M., Abubakr, S., dan Smith, A., (1995), "Sludge Characteristics and Disposal Alternatives for the Pulp and Paper Industry", in *Proceedings of the 1995 International environmental conference*, TAPPI Press, Atlanta, hal. 269-279.
- [10]. Swamy, K.D., Houck, P.C., and Feng, Q.D., (1990), "Production of Clean Medium Btu Gas from Gasification of Sludge Wastes", <http://www.anl.gov>, diakses 15 Mei 2010.