PEMANFAATAN EMISI GAS METANA DARI STASIUN KOMPRESOR SISTEM PERPIPAAN GAS ALAM SEBAGAI SUMBER ENERGI TERMAL

Yogi Wibisono Budhi*, Mohammad Effendy
Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
Jalan Ganesha 10 Bandung 40132
Email: Y.Wibisono@che.itb.ac.id

Abstrak

Emisi gas CH_4 ke atmosfer dapat menyebabkan pengaruh pemanasan global 21 kali lebih tinggi dibandingkan gas CO_2 . Salah satu strategi untuk mengurangi dampak tersebut adalah dengan mengkonversi gas CH_4 menjadi CO_2 dalam Reaktor Aliran Bolak-Balik (RABB). RABB adalah piranti yang tepat untuk mengolah gas yang berkonsentrasi sangat kecil (0,1-1 %-v). Reaksi pembakaran CH_4 bersifat eksotermis dengan $\Delta T_{\text{adiabatik}}$ berkisar antara 10–200 °C (konsentrasi 0,1–1 %-v), sehingga panas reaksinya dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi termal. RABB memiliki kemampuan dalam mengendalikan pergerakan panas di dalam reaktor, menyimpan panas, dan memberikannya kembali untuk memanaskan umpan yang bertemperatur rendah. Makalah ini menyampaikan hasil kajian tentang pengaruh pengambilan panas hasil reaksi pembakaran gas CH_4 sebagai sumber energi termal terhadap kinerja RABB. Metodologi yang digunakan adalah dengan simulasi komputer. Untuk laju alir umpan sebesar 0,22 L/s, panas optimum yang dapat dimanfaatkan adalah 43 kJ/m³.s (efisiensi pemulihan panas 50,4%) dan dibutuhkan laju alir udara sebesar 92,9 g/s untuk mengekstrak panas.

Kata kunci: Reaktor aliran bolak-balik, pembakaran katalitik metana, pemodelan, simulasi efek rumah kaca, sistem perpipaan gas

Abstract

Emission of CH_4 gas to the atmosphere may result in a global warming effect 21 times larger than that of CO_2 . One of the strategies to reduce this impact is to convert CH_4 to CO_2 in a Reverse Flow Reactor (RFR). RFR is a suitable apparatus to process gases with very low concentrations (0.1–1 %-v). The CH_4 combustion reaction is exothermic, with a $\Delta T_{\text{adiabatic}}$ between 10–200 °C (at a 0.1–1 %-v concentration), and therefore its heat of reaction may be used as a thermal energy source. RFR is capable of controlling heat transfer in the reactor, storing heat, and releasing it to heat low-temperature feeds. This paper presents the results of a study on the effect of the removal of heat generated by CH_4 combustion as thermal energy source on the performance of RFR. The methodology in this study involved computer simulations. For a feed flowrate of 0.22 L/s, the optimum rate of heat that can be recovered was 43 kJ/m³.s (heat recovery efficiency of 50.4%). An air flowrate of 92.9 g/s was required to extract the heat.

Keyword: Reverse flow reactor, methane catalytic combustion, modeling, green house effect simulation, gas piping system.

*korespondensi

1. Pendahuluan

Pengaruh emisi gas CH_4 terhadap pemanasan global dapat mencapai 21 kali lebih berbahaya dibandingkan CO_2 . Emisi gas CH_4 terutama ditimbulkan oleh sektor agrikultur (44%), pembakaran biomassa (22%), penambangan batubara (12%), dan industri minyak dan gas (15%), yang menghasilkan ± 15 Mt/tahun. Dalam industri minyak dan gas, pengaruh efek pemanasan global setara dengan 47 Mt/tahun. Emisi gas CH_4 dari sektor industri minyak dan gas dapat disebabkan oleh kebocoran di dalam jaringan pipa transmisi dan stasiun kompresor sistem perpipaan gas bumi. Sumber kebocoran dalam stasiun kompresor dapat berasal dari tiga tempat, yaitu reaksi pembakaran yang tidak sempurna pada mesin kompresor, kebocoran yang terjadi pada peralatan seperti *valve* dan *flange*, dan pada instrumen *venting* kompresor. Berdasarkan data dari *Clearstone Engineering Ltd.* (2008), setiap stasiun kompresor memiliki instrumen 5 kompresor (4 buah dengan daya 1650 hp dan 1 buah dengan daya 1450 hp), dehidrator glikol, dan dua buah generator. Gas bumi biasanya digunakan sebagai bahan bakar untuk mengoperasikan instrumen di stasiun kompresor tersebut. Emisi gas CH_4 yang ditimbulkan adalah sebesar 1330 ton/tahun yang terdiri dari 930 ton/tahun kebocoran di perpipaan (49 % dari instrument *venting* kompresor, 36% dari ventilasi tangki penghasil air, 7% akibat kebocoran, 7% dari dehidrator glikol, 1% dari sumber lain) dan 400 ton/tahun dari reaksi pembakaran tidak sempurna mesin.

Gas CH_4 yang terbuang ke lingkungan merupakan sumber gas rumah kaca. Pengaruh pemanasan global yang disebabkan oleh gas CH_4 bisa dikurangi dengan cara mengubah gas CH_4 menjadi gas CO_2 . Konversi gas CH_4 menjadi gas CO_2 merupakan reaksi pembakaran yang bersifat eksotermis. Panas hasil reaksi pembakaran gas CH_4 dapat digunakan sebagai sumber energi termal.

Sapoundjiev dan Aube (1999) telah berhasil mengurangi pengaruh pemanasan global akibat gas CH_4 yang dihasilkan pada tambang baubara dengan mengubah gas CH_4 menjadi gas CO_2 menggunakan reaktor katalitik aliran bolak-balik. Panas hasil pembakaran gas CH_4 diambil dengan menggunakan udara. Pada konsentrasi gas CH_4 0,3% (v/v), panas yang dapat diambil sebesar 52% dari panas yang dihasilkan oleh reaksi

pembakaran CH_4 . Temperatur udara keluar stabil pada 700 °C. Konsentrasi gas CH_4 di dalam udara yang semakin meningkat mengakibatkan efisiensi pemulihan panas juga semakin besar. Cittadini dkk. (2002) mempelajari pengaruh parameter desain (panjang unggun, *switching time*, dan fraksi dari unggun) dan parameter operasi (konsentrasi masuk dan laju alir) pada pengoperasian reaktor aliran bolak-balik. Pemilihan panjang unggun, waktu periodik, dan fraksi dari material inert adalah sangat penting untuk dikaji. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengamati pengaruh pengambilan panas hasil reaksi katalitik pembakaran gas CH_4 sebagai sumber energi termal terhadap kinerja reaktor katalitik aliran bolak-balik.

2. Metodologi

Reaksi pembakaran gas CH_4 dengan kadar yang kecil hanya dapat terjadi dengan bantuan katalis agar temperatur reaksi tidak terlalu tinggi. Konversi CH_4 menjadi gas CO_2 merupakan reaksi yang bersifat eksotermik. Panas yang dihasilkan akan digunakan sebagai sumber energi termal. Untuk mendapatkan jumlah panas yang besar, konfigurasi reaktor unggun tetap ditunjukkan pada Gambar 1. Bagian reaktor yang berisi inert berfungsi sebagai penyimpanan panas (*recuperative*) dan diletakkan di bagian ujung-ujung reaktor. Proses penyimpanan panas dilakukan dengan cara mengubah arah aliran secara periodik (*reverse flow*). Panas yang tersimpan di dalam reaktor bagian *inert* akan digunakan untuk memanaskan umpan yang masuk ke reaktor dengan temperatur lingkungan. Penukar panas di bagian tengah reaktor digunakan untuk mengambil panas

Gambar 1. Konfigurasi reaktor aliran bolak-balik

Tabel 1. Model *pseudo-homogenous* RABB untuk reaksi katalitik CH₄

Model <i>pseudo-homogenous</i> RABB	No
$\left(\varepsilon_g \rho_g c_g + \varepsilon_g \rho_g c_g \right) \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_{ef} \frac{\partial^2 T}{\partial l^2} - \rho_g^o c_g U(t) \frac{\partial T}{\partial l} + r_{CH_4} \Delta H_{CH_4} - Q_1 - Q_{heater}$	(1)
$\frac{\partial T_{udara}}{\partial t} = \left(\frac{h_{udara} A_{heater}}{m_{udara} C_{p,udara}} \right) (T - T_{udara})$	(2)
$\frac{\partial C_{CH_4}}{\partial t} = -U(t) \frac{\partial C_{CH_4}}{\partial x} - r_{CH_4}$	(3)
$\frac{\partial C_{O_2}}{\partial t} = -U(t) \frac{\partial C_{O_2}}{\partial x} - 2r_{CH_4}$	(4)
$\frac{\partial C_{H_2O}}{\partial t} = -U(t) \frac{\partial C_{H_2O}}{\partial x} + 2r_{CH_4}$	(5)
$\frac{\partial C_{CO_2}}{\partial t} = -U(t) \frac{\partial C_{CO_2}}{\partial x} + r_{CH_4}$	(6)
$\frac{\partial C_{N_2}}{\partial t} = -U(t) \frac{\partial C_{N_2}}{\partial x}$	(7)

Tabel 2. Dimensi reaktor

Dimensi	Uraian
Diameter reaktor	27 mm
Panjang total reaktor	960 mm
Panjang zona katalis	2x100 mm
Panjang zona <i>inert</i>	2 x 330 mm
Panjang zona <i>heat exchanger</i>	100 mm
Material reaktor	Stainless Steel SS 304 L

hasil reaksi pembakaran CH₄ di bagian katalis. Di dalam bagian ini, panas yang terambil akan digunakan sebagai sumber energi termal.

Pemodelan RABB merupakan langkah awal dalam bagian simulasi computer. Perangkat lunak yang digunakan adalah FlexPDE versi 3. Pemodelan dan simulasi RABB untuk neraca massa dan panas menggunakan model *pseudo-homogeneous* satu dimensi. Neraca momentum tidak dilibatkan dalam pemodelan karena hilang tekan untuk reaktor berskala laboratorium dirancang sekecil mungkin. Persamaan neraca massa dan energi RABB untuk reaksi katalitik CH₄ dapat dilihat dalam Tabel 1. Model reaktor terdiri dari 5 zona, yaitu zona *inert*, zona katalis, zona *heat exchanger*, zona katalis, dan zona *inert* (Gambar 1). Panjang zona *inert* di sebelah kiri/atas sama dengan. panjang zona *inert* di sebelah kanan/bawah dari zona katalis. Data lengkap dimensi reaktor dapat dilihat pada Tabel 2.

Panas yang hilang ke lingkungan dimodelkan dalam persamaan 8,

$$Q_1 = \frac{2\pi L(T - T_{udara})}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{K} + \frac{1}{r_2 h_0}} \quad (8)$$

di mana h_0 adalah koefisien perpindahan panas keseluruhan dengan nilai sebesar 0,18 Wm⁻²K⁻¹ (Cittadini, 2001). Panas hasil reaksi pembakaran katalitik CH₄ yang dapat diambil di penukar panas mengikuti persamaan 9.

$$Q_{heater} = m_{udara} C_{p,udara} (T_{udara} - T_{udara}^0) \quad (9)$$

Reaksi pembakaran katalitik CH₄ yang terjadi di dalam RABB dimodelkan sebagai berikut:

Sedangkan model untuk laju reaksi diperoleh dari peneliti pendahulu. Laju reaksi pembakaran CH₄ menggunakan katalis 10% PdO/ZrO₂ adalah sebagai berikut (Ibashi dkk., 2003):

$$r_{CH_4} = K_{CH_4} \left(\frac{w_{katalis}}{V_{reaktor} - V_{katalis}} \right) \left(C_{CH_4} RT \right) \left(\frac{1}{C_{H_2O}} \right) \left(\frac{1}{C_{CO_2} RT} \right) \quad (11)$$

Kondisi operasi dan parameter reaksi untuk menyelesaikan model dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Kondisi operasi dan parameter reaksi

Reaksi	Simbol	Nilai	Satuan
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$	k_{0,CH_4}	$2,22 \cdot 10^{-2}$	$Mol.Kgcat^{-1}.s^{-1}$
	E_{CH_4}	108	$kJ.mol^{-1}$
	$\Delta H_{r,C_7H_8}$	802	$kJ.mol^{-1}$
Material inert: Dolomit	C_p	0,920	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
	K	5	$W.m^{-1}.K^{-1}$
	ρ	3500	$Kg.m^{-3}$
	d	0,003	mm
Material katalis: 10% PdO/ZrO	C_p	1,050	$kJ.kg^{-1}.K^{-1}$
	K	18	$W.m^{-1}.K^{-1}$
	ρ	3720	$Kg.m^{-3}$
	d	0,003	mm
Kondisi operasi			
Switching time	ST	60	s
Waktu tinggal	t	1	s
Temp. umpan	T_0	303	K
Temp.reaktor	T_{awal}	773	K
Tekanan	P	1,5	atm
Komposisi gas umpan			
Laju volumetrik gas	q	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$m^3.s^{-1}$
Kadar CH_4	% CH_4 (v/v)	1	-
Kadar O_2	% O_2 (v/v)	20	-
Kadar N_2	% N_2 (v/v)	balance	-

3. Hasil dan Pembahasan

Di dalam penelitian ini, target yang ingin dicapai untuk mengetahui besarnya panas yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi termal dengan memperhatikan batas bawah temperatur reaksi agar tidak padam (*extinction*). Metode pengambilan panas menggunakan *shell and tube one pass*. Skema *shell and tube one pass* ditunjukkan pada Gambar 2. Udara dialirkan pada bagian *shell* dengan waktu tinggal 0,6 detik. Aliran panas akan berpindah dan bagian *tube* (campuran gas) menuju bagian *shell* (udara) melewati dinding reaktor bagian dalam. Pembalikan temperatur di bagian *shell* mengikuti persamaan 2. Panas hasil reaksi pembakaran yang dapat diambil oleh udara dipengaruhi oleh laju alir massa udara di bagian *shell*. Variasi massa udara yang mengalir melalui *shell* dilakukan untuk mengetahui kuantitas panas yang dapat diambil dengan pertimbangan bahwa reaksi pembakaran CH_4 tetap berlangsung.

Variasi laju alir massa udara di bagian *shell* menyebabkan perbedaan profil temperatur di sepanjang reaktor. Perbedaan profil temperatur di sepanjang reaktor

disebabkan jumlah panas yang dapat diambil oleh udara pada bagian *shell* berbeda-beda. Profil temperatur di sepanjang reaktor tiap saat ditunjukkan pada Gambar 3. Dalam proses pengoperasian reaktor katalitik aliran bolak-balik, reaktor dipanaskan sampai mencapai kondisi temperatur titik bakar CH_4 (773 K), kemudian campuran gas CH_4 dalam udara pada suhu 303 K dialirkan ke dalam reaktor.

Gambar 2. Skema shell and tube one pass **(a) $M_{udara} = 5,7$ gram/s** **(b) $M_{udara} = 23,1$ gram/s**

(c) $M_{udara} = 52,2 \text{ gram/s}$

(d) $M_{udara} = 92,9 \text{ gram/s}$

Gambar 3. Profil temperatur reaktor aliran bolak-balik sepanjang reaktor sesaat setelah aliran dibalik untuk variasi laju alir massa udara (a sampai d) dengan $T_{umpam} = -303 \text{ K}$, laju alir umpam CH_4 1%. $T_{awal \text{ reaktor}} = 773 \text{ K}$, dan $\tau = 1 \text{ s}$.

Gambar 4. Pengaruh penambahan laju alir massa udara terhadap Q yang diserap dan T reaktor pada bagian tengah HE.

Besarnya laju alir massa udara dalam mengekstrak panas dibatasi oleh temperatur reaktor zona katalis. Panas yang hilang sepanjang reaktor cukup tinggi (akibat diserap oleh udara ataupun hilang ke lingkungan) akan mengakibatkan reaksi pembakaran tidak akan berjalan. Pengaruh kenaikan laju alir massa udara terhadap penurunan temperatur rata-rata di zona katalis ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5. Pengaruh kenaikan laju alir udara terhadap temperatur rata-rata di zona katalis

Dari Gambar 4 dan 5 dapat dinyatakan, pada laju alir massa udara $92,9 \text{ g/s}$ merupakan titik optimum dalam pemanfaatan panas hasil reaksi pembakaran katalitik gas CH_4 . Panas reaksi pembakaran katalitik dapat dimanfaatkan adalah sebesar $43,5 \text{ kJ/s}$ dengan efisiensi pemulihan panas sebesar $50,4\%$. Perhitungan efisiensi pemulihan panas berdasarkan pada perbandingan panas yang dapat diambil oleh udara dengan panas hasil reaksi pembakaran gas CH_4 . Sisa panas yang terkandung dalam aliran gas digunakan untuk mempertahankan temperatur reaksi di zona katalis.

4. Kesimpulan

Pengembangan teknologi reaktor katalitik aliran bolak-balik untuk diaplikasikan pada proses pengurangan gas CH_4 dan pemanfaatan panas hasil pembakaran pada stasiun kompresor sistem perpipaan gas alam merupakan solusi yang tepat untuk mengatasi persoalan pemanasan global dan penyediaan energi. Rancangan reaktor, khususnya yang terkait dengan proses pengambilan panas hasil reaksi pembakaran gas CH_4 , harus menjadi perhatian khusus. Hal ini terkait dengan kemungkinan reaksi tidak akan berjalan apabila pengambilan panas yang cukup besar, yang menyebabkan temperatur di dalam zona katalis berada di bawah temperatur *ignition*.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ikatan Alumni Institut Teknologi Bandung (IA-ITB) yang telah memberikan bantuan dana penelitian dalam proyek Riset Internasional yang berjudul *New Alternative Thermal Energy Production While Reducing Greenhouse Gas Emission from Coal Mine Flue Gas Using a Novel Technology of Reverse Flow Reactor* untuk tahun 2008/2009.

Daftar Notasi

C	konsentrasi [mol.m ⁻³]
c_g	kapasitas panas fase gas [J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
c_s	kapasitas panas fase solid [J.kg ⁻¹ K ⁻¹]
E	energi aktivasi [m ³ atm.mol ⁻¹]
h_o	koefisien perpindahan panas konveksi [W m ⁻² K ⁻¹]
k_o	konstanta kecepatan reaksi [m ³ mol ⁻¹ s ⁻¹]
l	koordinat aksial [m]
Q	laju alir panas keluar [J.detik ⁻¹]
r	laju reaksi kimia [mol. m ⁻³ detik ⁻¹]
T	temperatur [K]
t	Waktu [detik]
U	kecepatan linier [m detik ⁻¹]
u	kecepatan linier mutlak [m.detik ⁻¹]

Daftar Simbol

ΔH	panas reaksi [J.mole ⁻¹]
ε_g	fraksi gas di unggun tetap [-]

ε_s	fraksi padat di unggun tetap [-]
ρ_g	massa jenis gas [kg.m ⁻³]
ρ_s	massa jenis solid [kg m ⁻³]
λ_{eff}	konduktifitas panas efektif [J.detik ⁻¹ .m ⁻¹ K ⁻¹]

Daftar Pustaka

Cittadini, M.; Vanni, M.; Baressi, A. A.; Baldi, G., *Simplified procedure for design of catalytic combustors with periodic flow reversal*, Chemical Engineering and Processing, 2001, Vol. 40(3), 255–262.

Cittadini, M.; Vanni, M.; Baressi, A. A., *Transient behaviour and start-up of periodic flow reversal reactors for catalytic decontamination of waste gases*, Chemical Engineering and Processing, 2002, Vol. 41(5), 437-443.

Clearstone Engineering Ltd., <http://www.clearstone.ca/services/felm.htm> (akses Oktober 2008).

Ibashi, W.; Groppi, G.; Forzatti, P., *Kinetic measurements of CH₄ combustion over a 10% PdO/ZrO₂ catalyst using an annular flow microreactor*, Catalysis Today, 2003, Vol. 83(1-4), 115-129.

Sapoundjiev, H.; Aube, F., *Catalytic flow reversal reactor technology: An Opportunity for heat recovery and greenhouse gas elimination from mine ventilation air*, Natural Resources Canada, 1999, www.nrcan.gc.ca