

# EKSTRAKSI PANAS PADA REVERSE FLOW REACTOR UNTUK OKSIDASI KATALITIK METANA SELAMA PERIODE START-UP

Teguh Kurniawan<sup>1</sup>, Yogi Wibisono Budhi<sup>2\*</sup>, Yazid Bindar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik  
Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Bandung,  
\*Y.Wibisono@che.itb.ac.id

## ABSTRAK

*Makalah ini mengkaji tentang pemodelan dan simulasi oksidasi katalitik metana menggunakan reverse flow reactor (RFR). Pokok bahasan tertuju pada pengembangan prosedur pengambilan panas dalam periode start-up untuk umpan dengan konsentrasi tetap, yaitu 1%-v metana dan umpan dengan konsentrasi berfluktuasi, yaitu pada rentang 0,1-1%-v metana, yang mengikuti fungsi gelombang persegi. Hasil simulasi menunjukkan pengambilan panas dapat dilakukan selama start-up baik untuk konsentrasi tetap maupun konsentrasi berfluktuasi tanpa menyebabkan RFR padam. Pengambilan panas pada switching time (ST) yang cepat memberikan beberapa keuntungan dibandingkan pada ST yang lama, yaitu lebih banyak panas yang dapat diekstrak dan lebih besar penurunan temperaturnya, sehingga aman bagi katalis dan reaktor.*

**Kata kunci:** pemodelan dan simulasi, prosedur start-up, reverse flow reactor, switching time, ekstraksi panas.

## ABSTRACT

*In this paper, the heat extraction procedure during start-up period was investigated for lean methane concentration of 1%-v and modulation concentration of 0.1-1%-v following the square wave function. The simulation showed that the heat can be extracted during start-up period both for fixed methane concentration and modulation without inducing the RFR extinct. The heat extraction at low switching time (ST) gives some benefits when compared to large switching time, which includes a larger extracted heat and larger temperature decrease, leading to safer operation for the catalyst and reactor.*

**Keywords:** modeling and simulation, start-up procedure, reverse flow reactor, switching time, heat extraction.

## 1. PENDAHULUAN

Peningkatan temperatur permukaan bumi secara global telah mengancam kelangsungan makhluk hidup di bumi. Kenaikan temperatur bumi ini atau lebih dikenal dengan istilah pemanasan global terjadi karena peningkatan konsentrasi gas-gas rumah kaca seperti karbondioksida (CO<sub>2</sub>), metana (CH<sub>4</sub>), dinitrogenmonoksida (N<sub>2</sub>O), dan emisi senyawa halokarbon sintetis (klorofluorokarbon, hidrofluorokarbon, perfluorokarbon, halon, dan sulfurheksafluorida) sejak era industrialisasi berlangsung sekitar tahun 1750 (Le Treut dkk., 2007). Gas-gas tersebut memerangkap radiasi matahari di dalam bumi sehingga temperatur bumi akan naik seperti efek yang ditimbulkan dalam rumah kaca. Kenaikan suhu bumi membuat lapisan es di kutub utara dan selatan akan mencair yang mengakibatkan permukaan laut naik. Pemanasan global juga berdampak pada perubahan pola iklim serta gangguan ekologis (Weart, 2008).

Berdasarkan parameter *Global Warming Potensial* (GWP), gas-gas rumah kaca memiliki potensi yang berbeda-beda dalam memberikan kontribusi terhadap pemanasan global. Metana berpotensi 21 kali lebih besar memerangkap panas di atmosfer bumi daripada karbondioksida (Forster dkk., 2007). Dengan demikian, metana berkonsentrasi rendah pun akan memberikan andil yang besar terhadap pemanasan global. Oleh sebab itu, usaha untuk mengurangi emisi metana perlu dilakukan.

Sumber emisi metana utamanya berasal dari pertambangan batubara, pengeboran minyak, gas alam, dan fermentasi anaerob bahan-bahan organik. Emisi metana dari pengeboran minyak dan gas alam serta pada waktu pendistribusiannya mencapai angka 15% dari total sumber emisi metana. Emisi metana pada stasiun kompresor perpipaan gas alam menyumbang angka tertinggi sebesar 27% dari emisi metana pada pengeboran minyak, gas alam, dan pendistribusiannya (Moore dkk., 1998) dengan konsentrasi emisi metana sebesar 0,1-1%-v (Litto dkk., 2007). Salah satu cara untuk mengurangi emisi metana dapat dilakukan dengan mengoksidasi metana menjadi karbondioksida. Oksidasi metana dapat menurunkan potensi metana terhadap pemanasan global hingga 87% (Hayes, 2004).

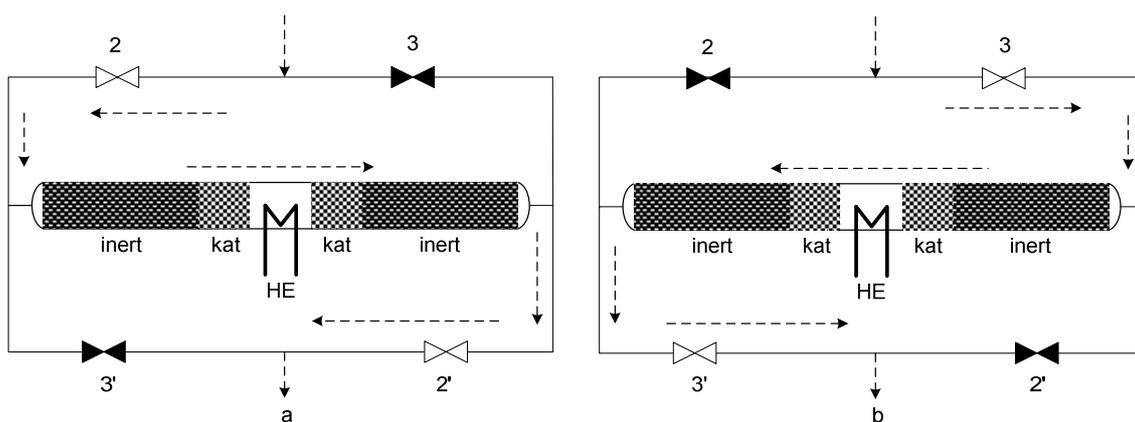
## 2. STUDI PUSTAKA

Metana merupakan senyawa yang mudah terbakar. Rentang persen volume daerah keterbakaran adalah 5-16% metana dalam udara (Hayes dan Kolaczowski, 1997). Emisi metana berkonsentrasi tinggi dapat mudah terbakar dengan menggunakan teknologi konvensional. Pada konsentrasi kurang dari 5%-v metana, reaksi pembakaran tidak dapat berlangsung dengan teknologi pembakaran konvensional.

Teknologi yang dikembangkan untuk membakar metana pada konsentrasi rendah adalah dengan menggunakan reaktor katalitik unggun tetap. Oksidasi katalitik dengan menggunakan katalis yang tepat memungkinkan reaksi berlangsung pada rentang konsentrasi umpan metana yang lebih lebar (Lee dan Trimm, 1995). Berbagai katalis yang diteliti untuk keperluan oksidasi metana umumnya berasal dari golongan logam mulia (Pd, Rh, dan Pt) dengan penyangga alumina ( $Al_2O_3$ ) (Otto, 1989; Lee dan Trimm., 1995; Hayes dkk., 2001).

Reaktor unggun tetap untuk keperluan reaksi oksidasi metana berkonsentrasi rendah perlu dirancang khusus agar panas yang diperlukan selama reaksi mampu dipenuhi dari panas hasil reaksi sendiri atau dengan kata lain reaktor bersifat ototermal. Kondisi ototermal pada reaktor unggun tetap dapat dicapai dengan merancang reaktor unggun tetap dengan pertukaran panas tipe rekuperatif atau tipe regeneratif (Kolios dkk., 2000). Efisiensi panas untuk tipe regeneratif dapat mencapai 95%. Harga efisiensi tipe regeneratif itu lebih besar daripada tipe rekuperatif yang hanya mencapai 75% (Baressi dkk., 2007).

Salah satu contoh pertukaran panas tipe regeneratif adalah *Reverse Flow Reactor* (RFR) (Gambar 1). Reaksi dalam RFR dapat berlangsung secara ototermal meskipun temperatur reaksi sangat tinggi dan kenaikan temperatur adiabatik relatif kecil. Fenomena ini dapat terjadi karena unggun katalis khususnya posisi di ujung-ujung reaktor bertindak sebagai penukar panas tipe regeneratif (Eigenberger dan Nieken, 1989).



**Gambar 1** Ilustrasi reverse flow reactor.

Operasi RFR katalitik menawarkan berbagai keunggulan berkaitan dengan kondisi dinamik yang terjadi selama reaksi berlangsung. Kondisi dinamik untuk konsentrasi dan temperatur pada RFR tercipta dengan cara membolak-balik arah aliran masuk umpan. Aliran umpan yang awalnya dari kiri ke kanan diubah secara periodik menjadi dari kanan ke kiri dalam siklus waktu tertentu. Matros dan Bunimovich (1996) menjelaskan bahwa kondisi dinamik akan meningkatkan konversi, selektivitas, dan atau temperatur dalam reaktor.

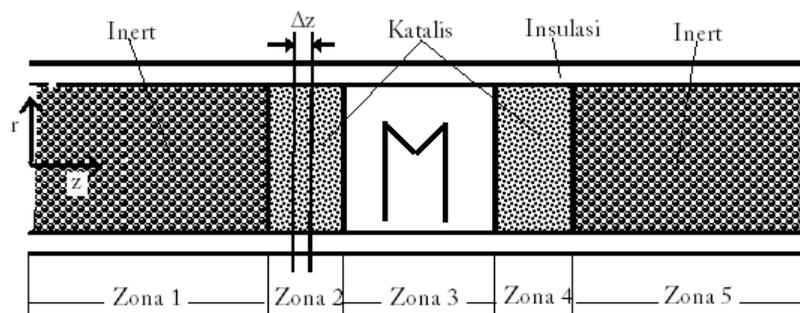
Riset eksperimental RFR katalitik telah berhasil dilakukan oleh para peneliti untuk mengoksidasi metana berkonsentrasi rendah dengan gas umpan bertemperatur lingkungan (Sapoundjiev dan Aube, 1999; Salomons dkk., 2003; Kushwaha dkk., 2004; Hayes, 2004; Kushwaha dkk., 2005). Hasil penelitian menunjukkan bahwa selain dapat mengurangi efek gas rumah kaca, oksidasi katalitik metana berkonsentrasi rendah pada RFR berpotensi menghasilkan panas (Sapoundjiev dan Aube, 1999; Kushwaha dkk., 2005). Unjuk kerja RFR untuk oksidasi katalitik metana berkonsentrasi rendah dipengaruhi oleh konsentrasi umpan, *switching time* (ST), dan kecepatan linier umpan (Salomon dkk., 2003). Penelitian lebih jauh mengenai pengaruh parameter desain khususnya tipe *inert* terhadap unjuk kerja RFR dilakukan oleh Kushwaha dkk. (2004).

Ada dua kriteria yang harus dipenuhi selama operasi RFR berlangsung khususnya untuk reaksi eksotermik, yaitu reaktor tidak padam karena kekurangan panas dan tidak meleleh oleh kelebihan panas. Simulasi *simple logic-based control* untuk memenuhi kedua kriteria tersebut dikaji dengan penetapan variabel kontrol berupa temperatur reaktor pada laju alir umpan tertentu dengan variabel yang menjadi respon adalah *switching time* (Balaji dan Lakshminarayanan, 2005). Prosedur operasi RFR untuk oksidasi metana dengan konsentrasi berfluktuatif telah berhasil dikembangkan melalui penentuan ST yang tepat dengan memperhatikan kedua kriteria tersebut (Effendy dkk., 2009).

Pemodelan matematis dilakukan untuk memahami karakteristik serta untuk keperluan perancangan RFR. Pemodelan satu dimensi (1D) homogen semu untuk oksidasi katalitik metana dengan memasukkan suku dispersi aksial serta menghilangkan suku dinamik neraca massa menghasilkan profil yang cukup berkesesuaian dengan data-data eksperimental (Eigenberger dan Niekien, 1988). Model heterogen untuk neraca energi dikembangkan oleh Gawdzik dan Rakowski (1989) tanpa melibatkan suku-suku dispersi. Model heterogen dengan memasukkan suku-suku dispersi dijelaskan oleh Matros dan Bunimovich (1996). Penyederhanaan model heterogen dapat dilakukan dengan mengabaikan suku-suku dinamik pada neraca gasnya (Gawdzik dan Rakowski, 1989; Matros dan Bunimovich, 1996).

### 3. METODOLOGI

Metode *start-up* sangat menentukan keberlangsungan reaksi oksidasi katalitik di dalam RFR secara ototermal. RFR dapat beroperasi secara ototermal jika reaksi oksidasi katalitik menghasilkan panas dengan jumlah yang cukup untuk memanaskan umpan. Namun, katalis dan reaktor dapat mengalami kerusakan apabila jumlah panas yang dihasilkan terlalu banyak. Dengan demikian, salah satu masalah yang dikaji dalam studi ini adalah penentuan metode *start-up* dengan pengambilan panas yang dapat menjaga keberlangsungan reaksi oksidasi katalitik metana secara ototermal dengan beban panas *start up* yang kecil dalam waktu pencapaian kondisi tunak semu (*pseudosteady state*) singkat dan konversi tinggi. Prosedur *start-up* yang dikaji adalah prosedur A, pemanasan dilakukan pada zona *inert* dan katalis bagian kiri saja dan prosedur B, pemanasan dilakukan untuk seluruh bagian reaktor (Kurniawan dkk., 2010). Pengambilan panas akan dilakukan dengan besar tertentu dan konstan dari bagian tengah-tengah reaktor.



**Gambar 2 Elemen volume dan pembagian zona.**

Model matematik yang dikembangkan adalah model homogen semu (*pseudohomogeneous*) untuk neraca massa dan heterogen untuk neraca energi. Adapun pemodelan dilakukan dalam 5 zona, yaitu zona 1 (*inert*), zona 2 (katalis), zona 3 (ekstraksi panas), zona 4 (katalis), dan zona 5 (*inert*) (Gambar 2).

Persamaan model matematik beserta kondisi batas-batasnya untuk RFR disajikan dalam persamaan 1-13.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - u \frac{\partial C}{\partial z} + (-r_M) \quad (1)$$

$$\epsilon \rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = -u \rho_g^o c_g \frac{\partial T_g}{\partial z} - \alpha_0 a_v (T_g - T_s) - \frac{4U_{overall}}{d} (T_g - T_{ruang}) - Q_{ekstrak} \quad (2)$$

$$[(1 - \epsilon) \epsilon_p \rho_s c_s + \epsilon_g \rho_g c_g] \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_{eff} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + \alpha_0 a_v (T_g - T_s) + (-\Delta H) r_M \quad (3)$$

Persamaan kinetika reaksi oksidasi pada 0,5%-Pt/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> diambil dari literatur berikut ini (Anderson dkk., 1961 dalam Bosomoiu dkk., 2008).

$$r_M = 2,24 \times 10^7 \exp(-98324/RT) C \quad (4)$$

Kondisi awal

$$C = C_{input}, \quad T_g = T_{g,input}, \quad (5)$$

Bagian kiri reaktor

$$T_{s,inert}, = T_{s,inert 0}, \quad T_{s,katalis} = T_{s,katalis 0} \quad (6)$$

Bagian kanan reaktor

$$T_{s,inert}, = T_{s,inert 0}, \quad T_{s,katalis} = T_{s,katalis 0} \quad (7)$$

Kondisi batas:

Pada  $z = 0$

$$D_{eff} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{(1+K(t))}{2} uL(C - C_{inp}) \quad (8)$$

$$k_{eff} \frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{(1+K(t))}{2} u c_g \rho_g^o (T_g - T_{g,inp}) \quad (9)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} = 0 \quad (10)$$

Pada  $z = L$

$$D_{eff} \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{(1-K(t))}{2} uL(C - C_{inp}) \quad (11)$$

$$k_{eff} \frac{\partial T_g}{\partial z} = \frac{(1-K(t))}{2} u c_g \rho_g^o (T_g - T_{g,inp}) \quad (12)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

$K(t)$  bernilai +1 untuk arah aliran ke kanan dan -1 untuk aliran ke kiri.

Parameter operasi RFR dan kondisi umpan disajikan pada Tabel 1. Sedangkan pertelaan detail mengenai rancangan RFR yang digunakan dalam simulasi disajikan pada Tabel 2.

**Tabel 1 Kondisi umpan dan operasi**

Parameter operasi	Harga
Temperatur gas umpan, $T_{g,inp}$	30°C
Laju alir linier gas umpan, $u$	0,7 m/detik
Tekanan, P	1,5 atm

Simulasi juga dilakukan dengan konsentrasi umpan berubah-ubah guna mengantisipasi sifat dinamik emisi metana dari rumah kompresor. Pada kajian ini, umpan dianggap berperilaku sebagai fungsi gelombang persegi (*square wave*) secara periodik. Konsentrasi umpan berfluktuasi tajam 0,1%-1%-v metana. Modulasi umpan dengan periode 10 detik mengikuti fungsi gelombang persegi disajikan pada Gambar 3.



**Gambar 3. Modulasi konsentrasi umpan tajam 0,1%-1%-v metana dengan periode 10 detik.**

**Tabel 2 Rancangan reaktor**

Dimensi	Angka
Diameter reaktor	0,0147 m
Panjang total reaktor	0,26 m
Koefisien perpindahan panas reaktor	131 W/m <sup>2</sup> .K
<i>Zona inert</i>	
Panjang per segmen <i>inert</i>	0,1 m
Material unggun <i>inert</i>	Alumina
Diameter rata-rata partikel <i>inert</i>	0,003
Luas permukaan spesifik <i>inert</i>	2000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Fraksi kosong dalam unggunkatalis, $\epsilon_{kat}$	0,36
<i>Zona katalis</i>	
Panjang zona katalis	0,01 m
Material unggun katalis	Pt/ $\gamma$ -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Diameter rata-rata partikel katalis	1 x 10 <sup>-5</sup> m
Luas permukaan spesifik katalis	2000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
<i>Zona pengambilan panas</i>	
Panjang zona pengambilan panas	0,04 m
Fraksi kosong dalam unggun, $\epsilon$	0,36
Fraksi kosong katalis, $\epsilon_p$	0,451
Fraksi kosong <i>inert</i> , $\epsilon_i$	0,4
Fraksi gas dalam unggun katalis, $\epsilon_g$	0,65
Fraksi solid dalam unggun katalis, $\epsilon_{sk}$	0,35
Fraksi gas dalam unggun <i>inert</i> , $\epsilon_i$	0,36
Fraksi solid dalam unggun <i>inert</i> , $\epsilon_{si}$	0,64

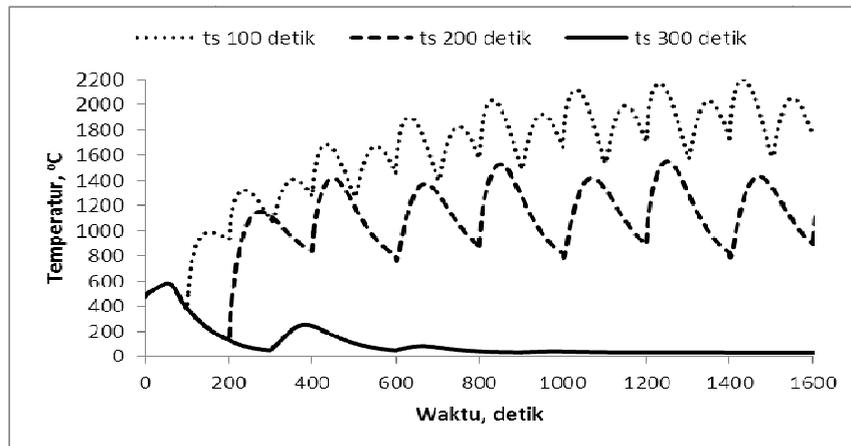
## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Konsentrasi Umpan Tetap

Pemanasan awal *inert* dan katalis bagian kiri saja pada temperatur 500°C mampu menciptakan kondisi ototermal dalam reaktor untuk ST 100 dan 200 detik (Gambar 4). Umpan bertemperatur lingkungan akan memperoleh panas dari *inert* bagian kiri dan siap bereaksi pada bagian katalis. Sementara itu, *inert* bagian kanan akan memperoleh panas dari hasil reaksi. Semakin lama reaksi berlangsung, temperatur *inert* bagian kiri akan semakin menurun sehingga dibutuhkan pembalikan arah agar umpan dapat tetap pada kondisi siap bereaksi saat menyentuh katalis.

*Switching time* memegang peranan penting dalam menjamin RFR berada dalam kondisi ototermal. ST yang terlalu lama akan membuat reaksi menjadi padam, seperti pada ST 300 detik (Gambar 4). Untuk kondisi pada prosedur *start-up* A, ST maksimum yang diperbolehkan agar RFR masih berada dalam keadaan ototermal adalah 230 detik.

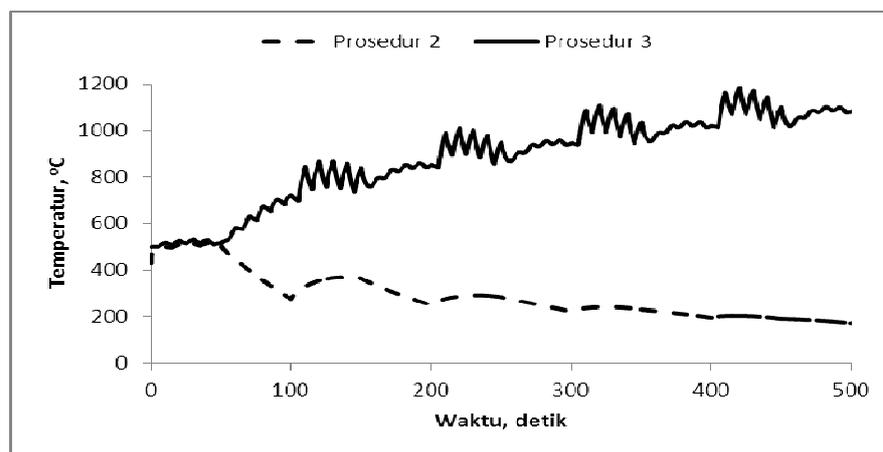
Waktu pencapaian kondisi tunak semu untuk ST yang lebih singkat ternyata menunjukkan waktu yang lebih lama. Dengan ST yang lebih singkat berarti RFR semakin sering mendapatkan gangguan. Pada ST 200 detik, kondisi tunak semu tercapai dalam waktu 1000 detik. Sedangkan ST 100 detik hingga waktu 1600 detik pun masih tampak terjadinya kecenderungan peningkatan temperatur katalis (Gambar 4).



**Gambar 4** Profil dinamik RFR untuk prosedur *start-up* A pada ST 100, 200, dan 300 detik.

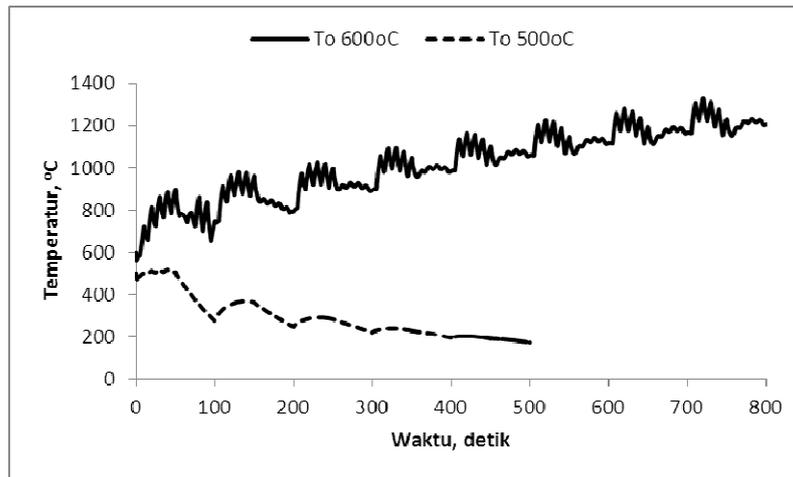
#### 4.2 Konsentrasi Umpam Berfluktuasi

Prosedur A pada temperatur awal 500°C tidak mampu membawa kondisi ototermal dalam RFR untuk modulasi tajam pada ST 50 detik. Sementara Prosedur B dapat mencapai kondisi ototermal dalam RFR pada ST 50 detik bahkan hingga 85 detik. Pada fluktuasi tajam, konsentrasi rata-rata umpam metana hanya sebesar 0,55%-v. Oleh sebab itu, kondisi ototermal tidak terjadi dengan Prosedur *start-up* A pada temperatur awal 500°C (Gambar 5). Cara lain yang dapat ditempuh untuk memperoleh kondisi ototermal, yaitu dengan meningkatkan temperatur awal pada Prosedur *start-up* A.



**Gambar 5** Profil dinamik temperatur: Prosedur *start-up* A dan B pada ST 50 detik untuk modulasi tajam (0,1%-1%-v metana) pada  $T_0 = 500^\circ\text{C}$ .

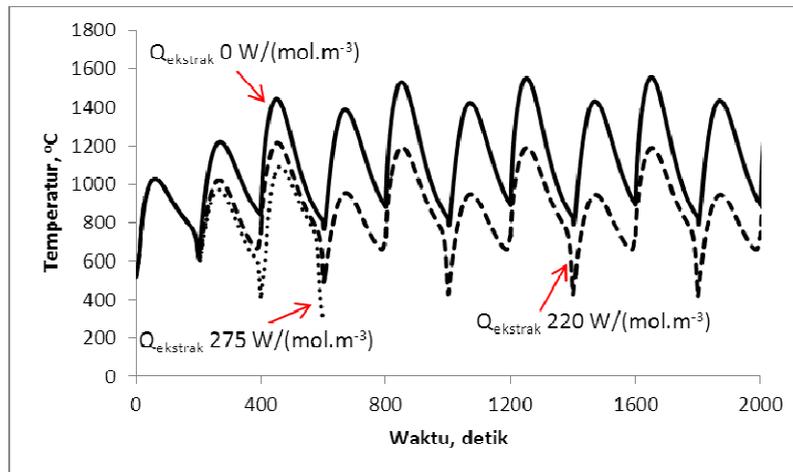
Penetapan temperatur awal 600°C pada Prosedur *start-up* A untuk umpam berfluktuasi tajam mampu membawa reaksi mencapai kondisi ototermal (Gambar 6). Dengan kenaikan temperatur awal dari 500°C menjadi 600°C, reaksi lebih cepat terjadi sehingga panas yang dihasilkan lebih besar untuk diserap oleh *inert* dan katalis pada bagian sebelah kanan. Akibatnya ketika aliran umpam dibalik pada detik ke-50, umpam dingin dapat terpanaskan dan bereaksi dengan baik pada katalis bagian kanan.



**Gambar 6** Profil dinamik temperatur katalis bagian kiri Prosedur start-up A untuk umpan berfluktuasi tajam (0,1%-1%-v metana) pada temperatur awal 500°C dan 600°C dengan ST 50 detik.

### 4.3 Ekstraksi Panas untuk Umpan Konstan

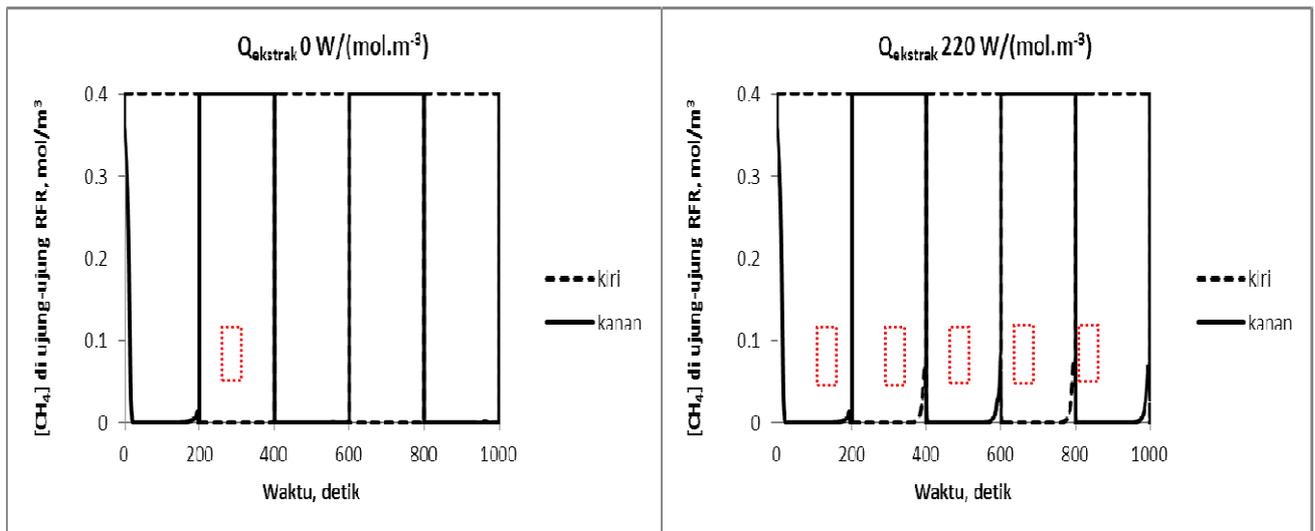
Ekstraksi panas dilakukan sesaat setelah aliran dibalik dengan besar panas yang diambil tetap. Simulasi pengambilan panas yang dilakukan untuk ST 200 detik menunjukkan hasil yang cukup baik. Jumlah panas yang diambil hingga 220 W/(mol.m<sup>-3</sup>) tidak membuat RFR padam. Namun pengambilan panas lebih besar dari 220 W/(mol.m<sup>-3</sup>) akan membuat reaktor tidak lagi bersifat ototermal. Sebagai contoh panas yang diambil sebesar 275 W/(mol.m<sup>-3</sup>) akan membuat RFR kehilangan sifat ototermalnya (Gambar 7).



**Gambar 7** Profil dinamik temperatur katalis bagian kiri untuk Prosedur start-up A dengan ekstrak panas pada  $T_0 = 550^\circ\text{C}$  dan ST 200 detik.

Pengambilan panas sebesar 220 W/(mol.m<sup>-3</sup>) pada ST 200 detik ternyata berpengaruh terhadap konversi. Pada kasus tidak dilakukan ekstraksi panas, metana yang tidak terkonversi hanya terjadi pada saat-saat mendekati detik ke-200 (bagian yang dikotaki dengan garis merah putus-putus pada Gambar 8a). Pengambilan panas sebesar 220 W/(mol.m<sup>-3</sup>) membuat metana yang tidak bereaksi menjadi bertambah besar. Peristiwa tersebut terekam pada Gambar 8b. Pada gambar tersebut penurunan konversi metana terjadi setiap mendekati periode 200 detik. Sementara itu dalam rentang 200-345, 400 s.d 530, 600 s.d 760, dan 800 s.d 945 konversi masih 100%.

Pengambilan panas pada ST 200 detik untuk temperatur awal 550°C tentunya juga akan berpengaruh terhadap konversi total. Penurunan konversi total yang terjadi cukup berarti. Konversi total untuk pengambilan panas sebesar 220 W/(mol.m<sup>-3</sup>) turun menjadi 93% dari sebesar 95% ketika panas tidak diambil. Untuk mengantisipasi penurunan tersebut, pengambilan panas dapat dilakukan pada ST yang lebih rendah.

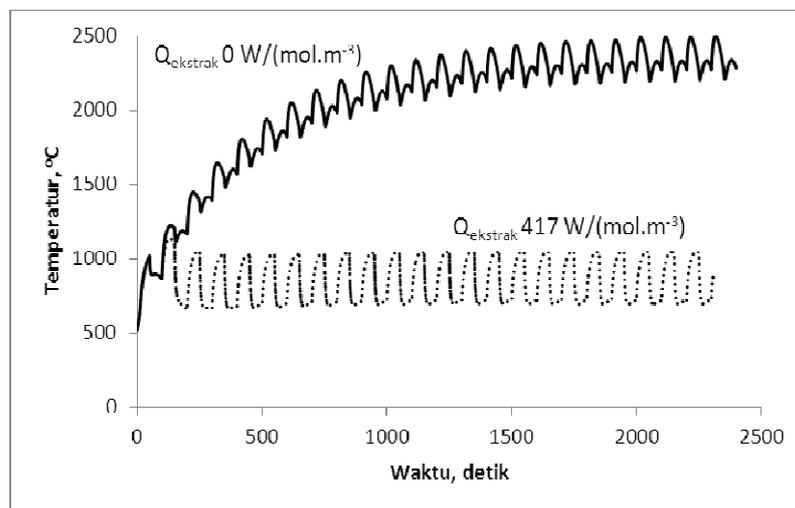


(a)

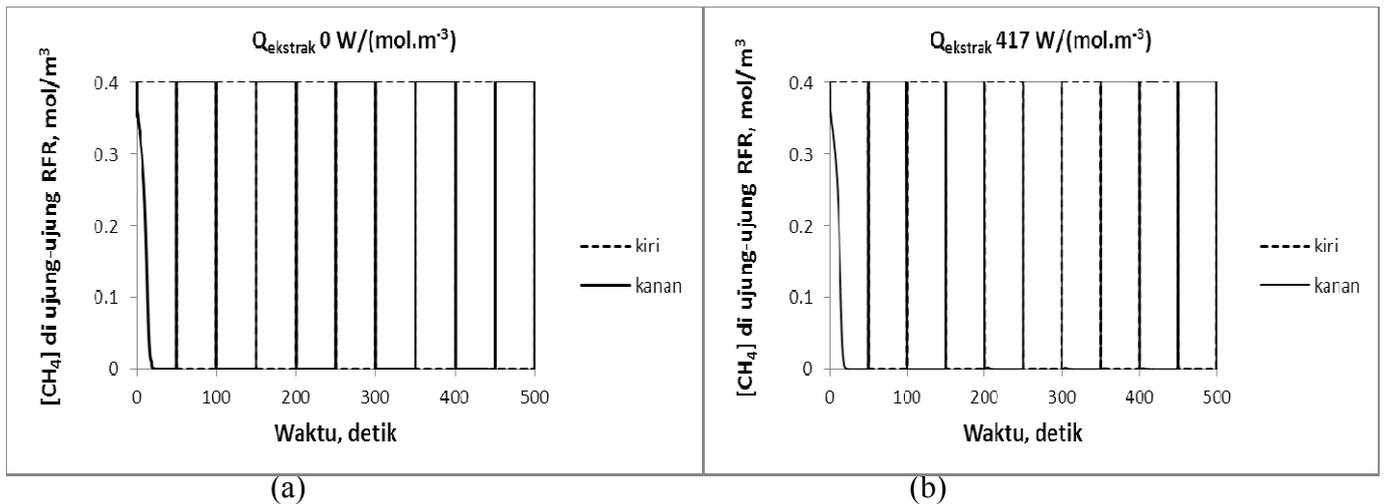
(b)

**Gambar 8 Pengaruh pengambilan panas terhadap konversi selama 1000 detik pertama untuk umpan konstan (a)  $Q_{ekstrak} 0$  (b)  $Q_{ekstrak} 220 \text{ W}/(\text{mol} \cdot \text{m}^3)$ .**

Selanjutnya, simulasi dengan ST 50 detik dan temperatur awal  $550^\circ\text{C}$  akan dilakukan untuk menghindari penurunan konversi akibat pengambilan panas. Pengambilan panas dilakukan setelah 100 detik reaksi berjalan. Hasil simulasi menunjukkan profil dinamik reaksi dengan ekstrak panas sebesar  $167 \text{ W}$  mampu menurunkan temperatur rata-rata dari  $2200^\circ\text{C}$  menjadi hanya  $850^\circ\text{C}$  (Gambar 9). Target untuk meningkatkan konversi juga tercapai (Gambar 10). Konversi total selama 1000 detik pertama tanpa ekstrak panas sebesar  $98,89\%$ . Konversi total selama 1000 detik pertama dengan pengambilan panas maksimum  $417 \text{ W}/(\text{mol} \cdot \text{m}^3)$  sebesar  $98,57\%$ . Ada dua hal penting dari kajian pengambilan panas pada ST yang rendah ini. Pertama, panas yang dapat diekstrak relatif besar. Kedua, temperatur dapat diturunkan hingga mencapai temperatur yang relatif aman untuk operasi katalis dan reaktor.



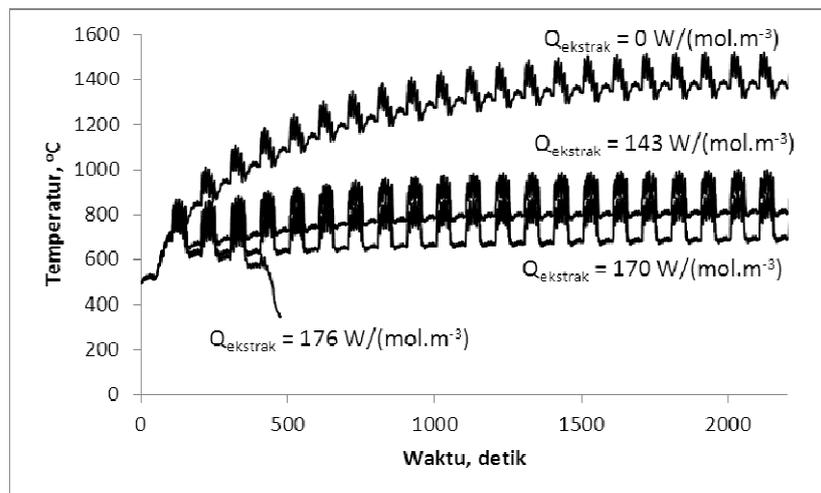
**Gambar 9 Profil dinamik temperatur katalis bagian kiri untuk Prosedur start-up A dengan ekstrak panas pada  $T_0 = 550^\circ\text{C}$  dan ST 50 detik.**



**Gambar 10** Profil konsentrasi ujung-ujung reaktor setelah untuk Prosedur start-up A pada ST 50 detik dan  $T_0$  550°C: (a) tanpa pengambilan panas dan (b) dengan pengambilan panas 417 W/(mol.m<sup>-3</sup>).

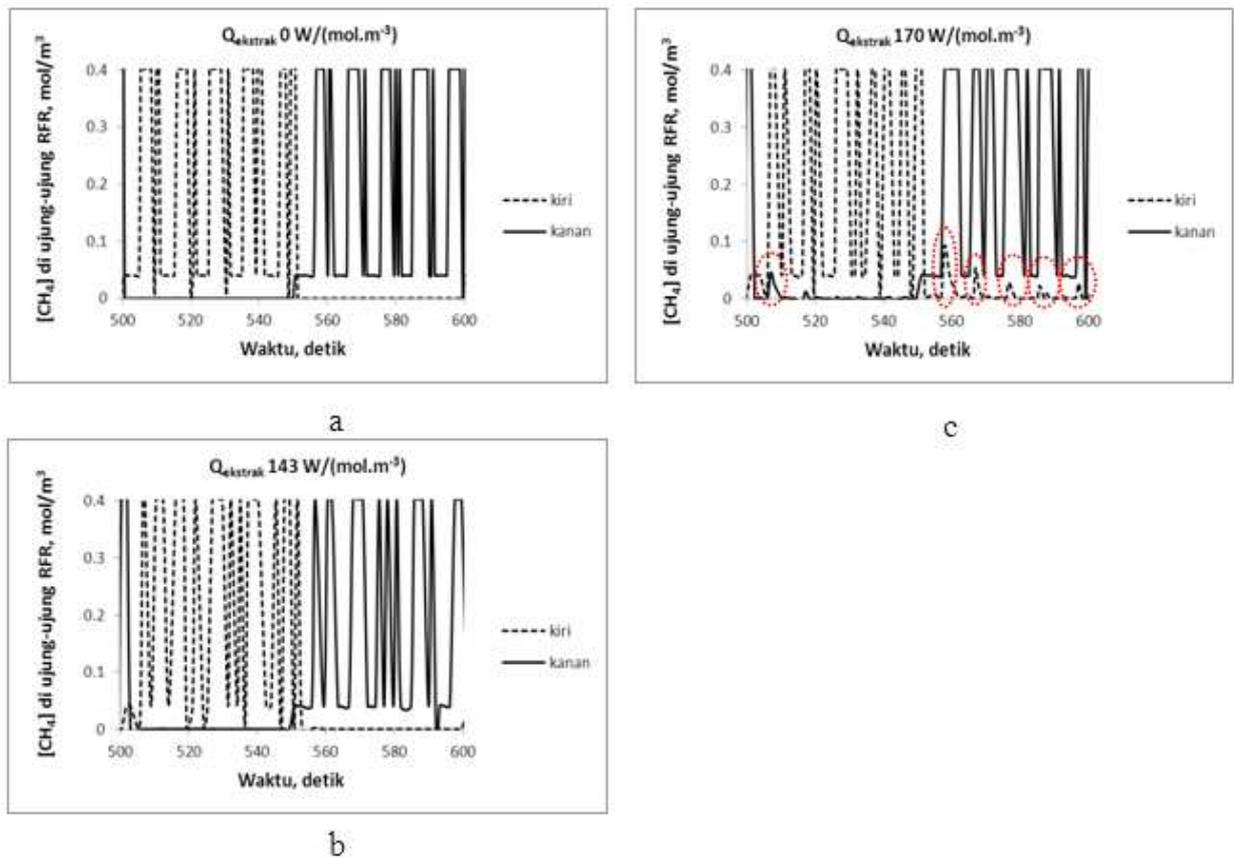
#### 4.4 Ekstraksi Panas untuk Umpan Berfluktuasi

Simulasi untuk umpan berfluktuasi dilakukan dengan pemanasan seluruh reactor pada saat *start-up* (Prosedur *start-up* B). Panas diambil setelah satu kali siklus (2 x ST), yaitu setelah reaksi berjalan 100 detik. Ekstraksi panas hingga 170 W/(mol.m<sup>-3</sup>) berhasil menurunkan temperatur secara berarti (Gambar 11). Temperatur rata-rata katalis tanpa pengambilan panas, dengan pengambilan panas 143 W/(mol.m<sup>-3</sup>), dan 170 W/(mol.m<sup>-3</sup>) masing-masing berurutan adalah 1340°C, 850°C, dan 760°C.



**Gambar 11** Profil dinamik temperatur katalis kiri Prosedur start-up B pada ST 50 detik dan  $T_0$  550°C untuk modulasi umpan 0,1-1%-v metana.

Salah satu target penyelenggaraan reaksi adalah menghasilkan konversi setinggi-tingginya. Profil konsentrasi di ujung-ujung RFR menunjukkan terjadinya penurunan konversi terutama untuk kasus pengambilan panas 170 W/(mol.m<sup>-3</sup>). Tampak bukit-bukit kecil yang menunjukkan metana yang tidak bereaksi keluar dari reaktor (Gambar 12c). Di lain pihak, sistem dengan tanpa pengambilan panas hingga ekstrak panas 143 W/(mol.m<sup>-3</sup>) tidak menunjukkan adanya bukit-bukit kecil pada keluaran reaktor (Gambar 12a dan Gambar 12b). Konversi total selama 2200 detik untuk umpan berfluktuasi tanpa ekstrak panas adalah 96% sedangkan konversi total dengan pengambilan panas sebesar 170 W/(mol.m<sup>-3</sup>) adalah 92%. Penurunan konversi total itu berkaitan dengan turunnya temperatur katalis dan *inert* secara keseluruhan, akibat dari pengambilan panas yang terlalu berlebihan. Oleh sebab itu, ekstraksi panas harus dilakukan hingga besaran tertentu agar konversi total tidak berkurang.



**Gambar 12** Profil konsentrasi di ujung-ujung reaktor untuk Prosedur start-up B, ST 50 detik,  $T_0$  550°C dengan pengambilan panas bervariasi: (a) 0 W/(mol.m<sup>3</sup>) (b) 143 W/(mol.m<sup>3</sup>) (c) 170 W/(mol.m<sup>3</sup>).

## 5. SIMPULAN

Pengambilan panas selama *start-up* dapat dilakukan hingga batas angka tertentu agar RFR masih dapat beroperasi secara ototermal. Pada ST yang rendah, panas yang dapat diambil lebih besar daripada ST yang tinggi, sehingga temperatur katalis dapat turun jauh lebih rendah. Di samping itu, pengambilan panas pada ST yang tinggi juga dapat menurunkan konversi total secara berarti. Dengan demikian, ekstraksi panas akan lebih menguntungkan dilakukan pada ST yang rendah.

## DAFTAR SIMBOL

- $a_v$  = luas permukaan spesifik partikel per volume ungun, m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.
- $c_g$  = kapasitas panas gas, kJ/(kg.K)
- $c_s$  = kapasitas panas padatan (*inert* atau katalis).
- $C$  = konsentrasi metana, mol/m<sup>3</sup>.
- $C_{inp}$  = konsentrasi umpan metana, mol/m<sup>3</sup>.
- $d$  = diameter reaktor, m.
- $D_{eff}$  = difusivitas efektif reaktan A dalam campuran gas, m<sup>2</sup>/detik.
- $E_a$  = energi aktivasi, J/mol.
- $k_{eff}$  = konduktivitas termal efektif, W/m.K
- $L$  = panjang total reaktor.
- $r_M$  = laju pengurangan metana, mol/(m<sup>3</sup>.detik).
- $R$  = konstanta gas ideal; 8,314 J/(mol.K).
- $ST$  = waktu pembalikan arah umpan, detik.
- $t$  = waktu ,detik.
- $T_g$  = temperatur gas, K.
- $T_{g,in}$  = temperatur gas umpan , K

$T_s$  = temperaturpadatan, K.  
 $T_{s,inert}$  = temperaturpadatan, K.  
 $T_{s,katalis}$  = temperaturpadatan, K.  
 $u$  = kecepatan linier gas umpan, m/detik.  
 $U_{overall}$  = Koefisien perpindahan panas *overall* pada dinding reaktor, W/(m<sup>2</sup>.K).  
 $z$  = panjangunggun, m.  
 $\alpha_0$  = koefisien perpindahan panas, W/(m<sup>2</sup>.K).  
 $K_{(t)}$  = vektorpenunjukaliran.  
 $\Delta H_r$  = panasreaksi, J/mol.  
 $\epsilon$  = porositasunggun  
 $\epsilon_g$  = fraksi fasa gas dalam unggun;  $\epsilon_g = \epsilon + (1 - \epsilon)\epsilon_p$ .  
 $\epsilon_p$  = fraksi kosong dari pelet katalis.  
 $\epsilon_s$  = fraksi fasa padat dalam unggun;  $\epsilon_s = (1 - \epsilon)(1 - \epsilon_p)$ .  
 $\rho_g$  = densitas gas, kg/m<sup>3</sup>.  
 $\rho_s$  = densitaspadatan, kg/m<sup>3</sup>.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Balaji, S., dan Lakshminarayanan, S. (2005). Heat removal from reverse flow reactors used in methane combustion. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 83.
- [2] Baressi, A.A., Baldi, G, dan Fissore, D. (2007). Forced Unsteady-State Reactors as Efficient Devices for Integrated Processes: Case Histories and New Perspectives. *Industrial & Engineering Chemistry Research, Vol.*,46(25).
- [3] Bosomiu, M., Bozga, G., dan Soare, G (2008). Methane Combustion Over a Commercial Platinum on Alumina Catalyst: Kinetics and Catalyst Deactivation. *Revue Roumaine de Chimie*, , 53(12), 1105–1115.
- [4] Effendy, M., Budhi, Y.W., Bindar, Y., Subagio (2009). Penentuan metode operasi *reverse flow reactor* dengan umpan fluktuatif dalam pengolahan emisi gas metana di stasiun kompresor. *Prosiding SNTKI*, Bandung.
- [5] Eigenberger, G. dan Nieken, U. (1988). Catalytic Combustion with Periodic Flow Reversal. *Chemical Engineering Science*, 43, 2109–2115.
- [6] Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland, (2007). Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. *In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [7] Gawdzik, A. dan Rakowski, L. (1989). The methods of analysis of the dynamic properties of the adiabatic tubular reactor with switch flow. *Computers chem. Engng*, 13(10), 1165-1173.
- [8] Hayes, R.E. dan Kolaczkowski, S.T. (1997). *Introduction to catalytic combustion*, Gordon and Breach, Reading, UK.
- [9] Hayes, R.E. (2004). Catalytic solutions for fugitive methane emissions in the oil and gas sector. *Chemical Engineering Science*, 59, 4073-4080.
- [10] Kurniawan, T., Budhi, Y.W., Bindar, Y., (2010). Pemodelan dan simulasi *reverse flow reactor* untuk oksidasi katalitik metana: pengembangan prosedur start-up. *Prosiding STKSR*, Bandung.
- [11] Kushwaha, A., Poirier, M., Sapoundjiev, H., Hayes, R.E. (2004). Effect of reactor internal properties on the performance of a flow reversal catalytic reactor for methane combustion. *Chemical Engineering Science*, 59, 4081 – 4093

- [12] Kolios G., Frauhammer, J., Eigenberger, G. (2000). Review Autothermal fixed-bed reactor concepts. *Chemical Engineering Science*, 55, 5945-5967.
- [13] Le Treut, H., Somerville, U., Cubasch, Y., Ding, Mauritzen C., Mokssit A., Peterson, T. dan Prather, M. (2007). Historical Overview of Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [14] Lee, J.H. dan Trimm, D.L (1995). Catalytic combustion of methane. *Fuel Processing Technology*, 42, 339-359
- [15] Litto, R., Hayes, R.E., & Liu, B. (2006). Capturing fugitive methane emissions from natural gas compressor buildings, *Journal of Environmental Management*, 84 (3), 347-361.
- [16] Matros, Y.S dan Bunimovich, G.A. (1996). Reverse flow operation in fixed bed catalytic reactors. *Catal. Rev.-sci. eng.*, 38(1), 1-68.
- [17] Moore, S., Freund, P., Riemer, P., Smith, A. (1998). *Abatement of methane emissions*. IEQ Greenhouse Gas R&D Programme, Cheltenham, ISBN 1898373167
- [18] Salomons, S., Hayes, R.E., Poirier, M, & Sapoundjiev, H. (2003). Flow reversal reactor for catalytic combustion of lean methane mixtures. *Catalysis Today*, 83, 59–69.
- [19] Sapoundjiev, H. dan Aube, F. (1999). Catalytic flow reversal reactor technology: an opportunity for heat recovery and greenhouse gas elimination from mine ventilation air. Canmet energy technology centre, Varennes, Canada.
- [20] Tsyulnikov, P.G., Sal'nikov V.S., Drozdov, V.A., Noskov, A.S., Chumakova, N.A., Ermolaev, V.K., dan Malakhova, I.V. (2001). Deep Oxidation of Methane on Alumina–Manganese and Pt-Containing Catalysts. *Journal of Catalysis*, 198, 164–171.
- [21] Weart, S.R. (2008). *The Discovery of Global Warming*. The American Institute of physics.