

Dinamika Reaktor Katalitik Aliran Bolak-Balik Untuk Oksidasi Emisi Gas Metana
Dynamics of Reverse Flow Catalytic Reactor for Oxidation of Methane Gas Emission

Yogi Wibisono Budhi ^{*}, Hans Gunawan Rimbuala, Andhika Feri Wibisono

¹Department of Chemical Engineering-Institut Teknologi Bandung Jl. Ganesha 10 Bandung 40132 Indonesia

^{*}Corresponding author: y.wibisono@che.itb.ac.id

Received: 2020-6-10

Received in revised: 2020-6-19

Accepted: 2020-8-20

Available online: 2020-8-21

Abstract

The performance of a reverse flow reactor (RFR) is strongly influenced by the switching time used to alternate the flow direction. This research aimed to study the effect of the switching time on reactor dynamics including the heat propagation along with the bed and reaction rate in the oxidation methane for low concentration using a catalytic reverse flow reactor. The experimental results show that the reverse flow operating mode can influence heat propagation along with the reactor and reaction conversion. Based on the three switching times that were tested, the temperature dynamics formed were in the sliding regime. The effect of switching time on RFR on conversion is very significant. When compared to steady operation, RFR operation provides the highest conversion at smaller switching times. At large switching times, the effect of the reversal of flow direction becomes less dominant and reactor behavior approaches steady state.

Keywords: Reverse flow reactor, oxidation methane, heat propagation, reactor.

Abstrak (Indonesian)

Kinerja reaktor aliran balik (RFR) sangat dipengaruhi oleh waktu switching yang digunakan untuk mengganti arah aliran. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh waktu switching terhadap dinamika reaktor termasuk perambatan panas di sepanjang unggun dan laju reaksi dalam metana oksidasi untuk konsentrasi rendah menggunakan reaktor aliran balik katalitik. Hasil percobaan menunjukkan bahwa mode operasi aliran balik dapat memengaruhi perambatan panas di sepanjang reaktor dan konversi reaksi. Berdasarkan tiga waktu switching yang diuji, dinamika suhu yang terbentuk berada pada rezim geser. Efek beralih waktu pada RFR pada konversi sangat signifikan. Bila dibandingkan dengan operasi stabil, operasi RFR memberikan konversi tertinggi pada waktu switching yang lebih kecil. Pada waktu switching yang besar, efek pembalikan arah aliran menjadi kurang dominan dan perilaku reaktor mendekati kondisi tunak.

Kata Kunci: Reverse flow reactor, oksidasi, metana, katalitik, propagasi panas, reaktor.

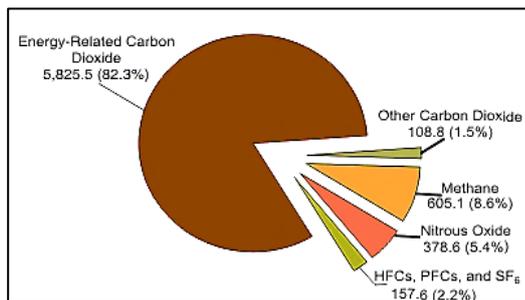
PENDAHULUAN

Perubahan iklim akibat pemanasan global merupakan salah satu permasalahan yang sedang dihadapi dunia saat ini. Penyebab dari pemanasan global ini adalah adanya kandungan berlebih gas-gas rumah kaca di atmosfer yang mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Metana merupakan gas rumah kaca yang paling utama setelah karbon dioksida (Gambar 1). Mengingat potensi bahaya pemanasan global dari metana adalah 23 kali lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida (Hayes, 2004; Bandjar dkk., 2014; Rachim dkk., 2017), emisi gas metana

dapat diupayakan untuk dikonversikan menjadi karbon dioksida yang potensi pemanasan globalnya lebih rendah (Sapoundjiev dan Aube, 1999). Melalui proses ini, pengaruh gas rumah kaca terhadap pemanasan global dapat direduksi hingga sebesar 87% (Hayes, 2004; Litto dkk, 2007; Di Benedetto dkk., 2013; Raksajati dkk., 2020). Emisi gas metana biasanya dihasilkan dari rumah kompresor sistem perpipaan gas alam dan tambang batubara Ledwich, 2001; Sapoundjiev dan Aube, 1999; Marín, 2005) dengan konsentrasi yang sangat rendah (0,3-1,0%(v/v)), sehingga pembakaran dalam fasa homogen tidak mungkin dilakukan Salomons dkk.

(2004). Pembakaran katalitik dapat menjadi solusi alternatif untuk menangani pembakaran metana dengan konsentrasi yang rendah (Salomons dkk., 2003).

Metana yang merupakan salah satu senyawa hidrokarbon yang terbakar sehingga memerlukan temperatur reaksi yang relatif tinggi ($\pm 500\text{ }^{\circ}\text{C}$). Namun, umumnya emisi gas metana ada pada temperatur lingkungan dan laju reaksi katalitik pada temperatur lingkungan sangat rendah. Hal ini mengakibatkan kondisi ototermal sulit dicapai tanpa pemanasan awal umpan (Baldwin dkk., 1990).

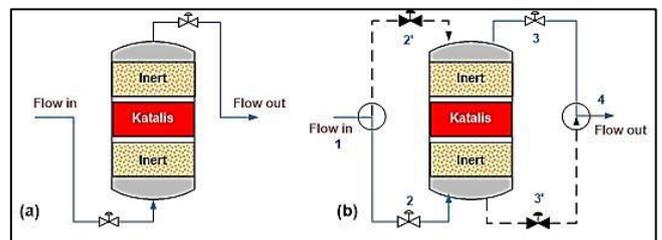


Gambar 1. Perbandingan sebaran gas – gas rumah kaca di atmosfer (Litto dkk., 2007).

Salah satu metode yang dapat mengatasi kendala tersebut adalah penggunaan reaktor aliran bolak-balik (Reverse Flow Reactor (RFR) berkatalis Matros dan Yu, 1990; Matros dkk., 1996). Arah aliran dalam reaktor ini diubah secara periodik pada setiap *switching time* tertentu (Budhi dkk., 2004a). RFR merupakan reaktor yang beroperasi dalam kondisi tak tunak untuk meningkatkan kinerja proses yang jauh lebih unggul, seperti penghematan energi, peningkatan konversi dan selektivitas (Salinger dan Eigenberger, 1996; Budhi, 2005). Faktor-faktor utama

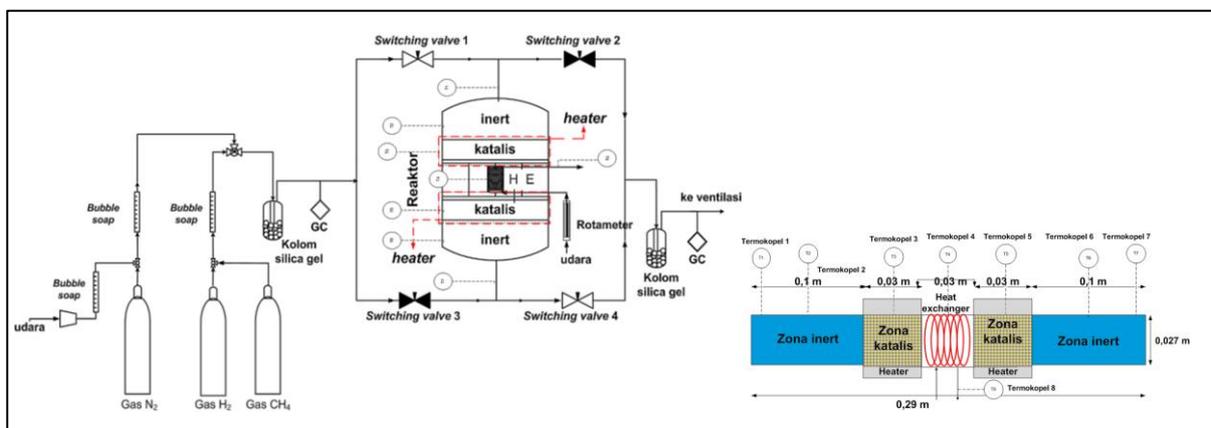
switching time, rancangan reaktor seperti umpan samping, sistem modulasi, dan prosedur operasi (Marín dkk., 2008).

Faktor integrasi dan propagasi panas yang dikendalikan dengan baik di sepanjang reaktor (katalis dan inert) memungkinkan sistem beroperasi secara ototermal walaupun umpan mempunyai konsentrasi yang encer dan kenaikan temperatur adiabatiknya sangat kecil. Besar kecilnya efek tak tunak juga dipengaruhi oleh laju alir dan temperatur umpan, jenis material unggun inert, diameter partikel, dan panjang unggun. Kelakuan tak tunak ini akan mempengaruhi distribusi temperatur dan konsentrasi di sepanjang RFR. Berbagai pengembangan metode, rancangan, dan sistem pengendalian RFR telah dilakukan (Budhi dkk., 2004a).



Gambar 2. Diagram alir sederhana reverse flow reactor

Untuk pengaturan kondisi operasi yang tepat sangat dibutuhkan agar konversi, selektivitas produk, dan penghematan energi dapat dicapai seoptimal mungkin melalui pembakaran super adiabatic (Dufour, 2003). Teknologi RFR ini biasanya digunakan untuk jenis reaksi yang bersifat eksotermik. Namun, pasangan reaksi eksotermik-endotermik juga dapat dilakukan sebagaimana yang dikembangkan oleh van Sint Annaland (2000). Pada



Gambar 3. Skema peralatan (kiri) dan kompartemen reaktor uji (kanan)

yang mempengaruhi kelakuan tak tunak pada RFR adalah konsentrasi umpan, temperatur umpan,

penelitian ini telah dilakukan studi untuk mempelajari pengaruh *switching time* terhadap dinamika reaktor

yang meliputi propagasi panas di sepanjang unggun dan laju reaksi, pada proses reaksi oksidasi emisi gas metana berkonsentrasi rendah menggunakan reaktor aliran bolak-balik. Kinerja RFR pada operasi ini yang dinyatakan dalam derajat konversi merupakan bagian yang sangat penting untuk ditelaah.

METODOLOGI

Susunan Alat Percobaan

Skema peralatan yang digunakan dalam percobaan ini ditunjukkan pada Gambar 2 dan skema reaktor yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 3. Pada Gambar 2 terlihat bahwa alat percobaan terdiri dari 3 bagian utama yaitu bagian gas umpan, bagian reaktor, dan bagian analisa data. Gambar 3 memperlihatkan bagian dalam reaktor yang terdiri dari zona *inert*, zona katalis, zona pemanasan oleh *heater*, dan zona pengambilan panas.

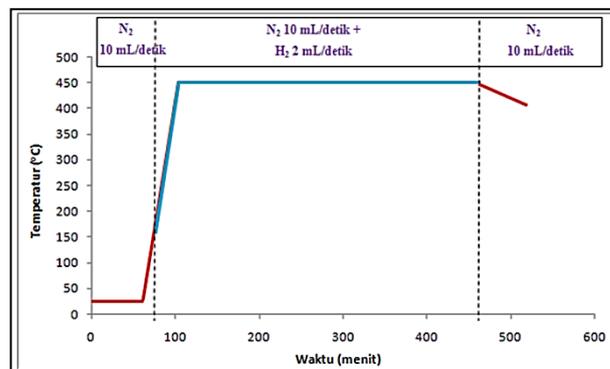
Aktivasi katalis

Prosedur untuk proses aktivasi katalis ditunjukkan pada Gambar 4. Proses aktivasi dimulai dengan melakukan *purging* menggunakan gas nitrogen dengan laju alir 10 ml/detik selama 1 jam. Setelah itu temperatur katalis dinaikkan dengan menggunakan pemanas secara berkala. Saat control pemanas menunjukkan temperatur 150 °C gas hidrogen dialirkan dengan laju alir 2 ml/detik. Temperatur terus dinaikkan hingga temperatur katalis mencapai 450 °C. Proses reduksi ini dijaga selama 6 jam dan setelah itu aliran hidrogen dihentikan. Temperatur katalis diturunkan hingga temperatur operasi yang diinginkan dan proses *purging* kembali dilakukan selama 1 jam.

Oksidasi Metana Dengan Operasi Tunak

Tahap ini bertujuan untuk mencari besarnya konversi reaksi pada aliran searah untuk kemudian dijadikan pembandingan nilai konversi pada aliran bolak-balik. Konsentrasi metana dalam gas inlet reaktor adalah 1% (v/v). Konsentrasi ini dipilih dengan pertimbangan konsentrasi emisi gas metana yang umum adalah 0,3-1,0% (v/v) dan pertimbangan presisi alat ukur yang akan semakin menurun jika konsentrasi yang akan diukur semakin kecil. Parameter kondisi reaksi yang akan ditentukan adalah temperatur reaksi dan waktu tinggal reaktan di katalis. Reaksi oksidasi metana dengan menggunakan katalis Pt/ γ -Al₂O₃ pada rentang temperatur optimum 400-500 °C. Pada studi ini, temperatur reaksi yang dipilih adalah 400 °C. Hal ini dimaksudkan agar konversi yang diperoleh tidak terlalu besar dan masih dapat diamati bagaimana pengaruh *switching time* pada

mode operasi *reverse flow* terhadap konversi yang terjadi. Pada studi ini waktu tinggal reaksi yang digunakan berdasarkan hasil studi sebelumnya yakni 1 detik (Devals dkk., 2003).



Gambar 4. Prosedur aktivasi katalis

Oksidasi Metana Dengan *Reverse Flow Operation*

Setelah parameter kondisi reaksi (temperatur dan waktu tinggal reaktan di katalis) dipilih, kemudian studi utama dilangsungkan, yaitu reaksi oksidasi metana dalam mode operasi *reverse flow*. Variasi *switching time* yang dipilih adalah 50, 75, dan 100 detik. Parameter yang diamati untuk mengetahui pengaruh variasi *switching time* adalah konversi reaksi dan profil temperatur di sepanjang reaktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

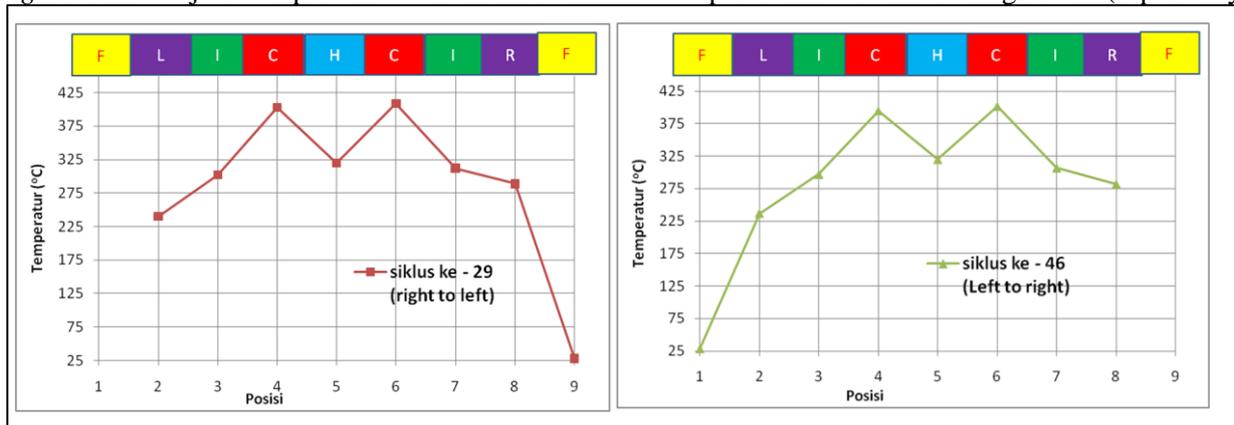
Pengaruh *Switching Time* terhadap Profil Temperatur Reaktor

Temperatur diukur pada enam lokasi di sepanjang reaktor, yaitu ujung kiri reaktor, *inert* kiri, katalis kiri, katalis kanan, *inert* kanan, dan ujung kanan reaktor. Temperatur di enam lokasi tersebut diukur pada saat reaksi dijalankan pada mode operasi tunak maupun pada mode *reverse flow*. Temperatur katalis rata-rata selama mode operasi tunak dijaga pada 400 °C. Profil temperatur di sepanjang reaktor pada saat mode operasi *reverse flow* diamati untuk mengetahui pengaruh pemilihan *switching time* terhadap temperatur di sepanjang reaktor dan pengaruhnya terhadap konversi reaksi.

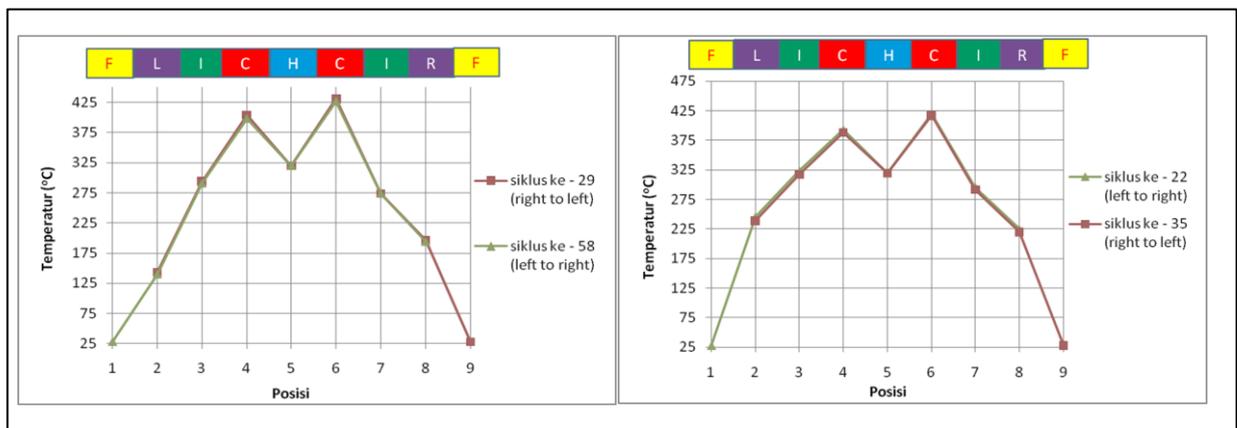
Profil Temperatur Reaktor sebagai Fungsi Waktu

Profil temperatur di sepanjang reaktor selama reaksi pada mode *reverse flow* akan berubah-ubah seiring waktu reaksi. Besarnya perubahan temperatur selama reaksi bergantung pula pada variasi *switching time* yang digunakan. Perubahan profil temperatur pada awal berjalannya reaksi, arah aliran ke kiri, dan arah aliran ke kanan untuk masing-masing variasi

switching time ditunjukkan pada Gambar 5 dan ditampilkan dalam satu grafik (seperti yang



Gambar 5. Profil temperatur di sepanjang reaktor saat aliran ke arah kanan (*left to right*) dan ke arah kiri (*right to left*) pada akhir siklus dengan *switching time* 50 detik. L = ujung kiri reaktor; I = bagian inert; C = bagian katalis; R = ujung kanan reaktor; F = *feed* pada temperatur 25°C



Gambar 6. Profil temperatur di sepanjang reaktor pada mode operasi *reverse flow* pada akhir siklus dengan *switching time* 75 detik (kiri) dan 100 detik (kanan) di berbagai waktu reaksi.

Gambar 6. Profil temperatur di bagian inert selama berlangsungnya reaksi ditunjukkan pada Gambar 7. Gambar 5 dan Gambar 6 menunjukkan profil temperatur yang semakin meningkat dari ujung reaktor hingga ke bagian katalis. Kurva temperatur menunjukkan penurunan temperatur di bagian tengah karena adanya *heater* di antara dua bagian katalis. Temperatur *heater* diatur konstan pada temperatur 320 °C.

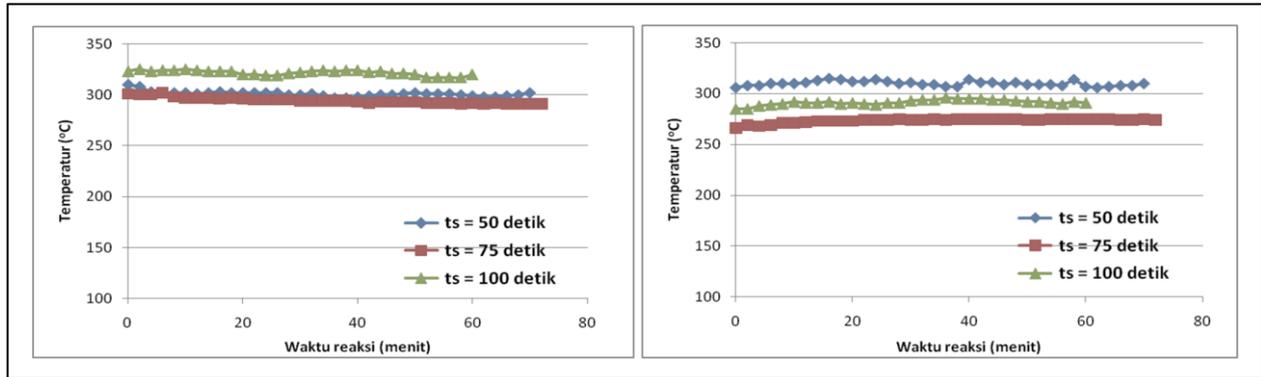
Profil temperatur yang menunjukkan arah aliran diambil pada setiap akhir siklus. Umpan masuk pada temperatur sekitar 28 °C. Gambar 7 menunjukkan profil temperatur *inert* yang mengalami osilasi selama berjalannya mode operasi *reverse flow*. Menit ke-0 pada Gambar 7 menunjukkan saat dimulainya mode operasi *reverse flow*. Dari Gambar 5 dapat dilihat profil temperatur di sepanjang reaktor saat arah aliran dari kiri ke kanan (*left to right*) dan dari kanan ke kiri (*right to left*) menunjukkan pola yang sama namun berlawanan arah. Apabila kedua pola tersebut

ditunjukkan pada Gambar 6) maka akan terbentuk profil temperatur yang simetris. Dari Gambar 6 juga terlihat bahwa profil temperatur kanan dan kiri yang terbentuk sangat rapat. Hal ini menunjukkan bahwa dinamika temperatur yang terjadi pada ketiga *switching time* yang diujikan berada pada rejim *sliding*. Dinamika temperatur yang berada pada rejim *sliding* ini juga dibuktikan melalui profil temperatur di bagian *inert* selama berjalannya reaksi yang ditampilkan pada Gambar 7. Dari Gambar 7, dapat terlihat bahwa temperatur katalis rata-rata membentuk osilasi di sekitar temperatur *steady state* (400 °C). Profil temperatur yang berosilasi di sekitar temperatur *steady state* dinyatakan sebagai kondisi *real steady state* dan merupakan ciri utama rejim *sliding*. Hal ini sesuai dengan teori yang dikemukakan oleh Matros dkk., (1996) yang menyatakan bahwa pada kondisi *sliding* gangguan diberikan pada skala waktu yang lebih cepat daripada waktu yang diperlukan sistem untuk merespon gangguan tersebut sehingga sistem

tersebut seolah-olah tidak merespon gangguan yang diberikan. Dari Gambar 7 juga terlihat bahwa profil temperatur *inert* pada bagian kiri memiliki kecenderungan menurun sementara profil temperatur *inert* pada bagian kanan memiliki kecenderungan meningkat.

Hal ini terjadi karena pada saat awal mode operasi *reverse flow* dijalankan, aliran berlangsung dari kanan ke kiri, dan pada saat arah aliran dibalik, umpan yang dingin masuk pada bagian kiri reaktor

Pada bagian tengah reaktor, ada kecenderungan penurunan temperatur yang merupakan nilai temperatur *heater* yang dijaga pada nilai 320 °C agar temperatur pada bagian katalis dapat dipertahankan pada suhu 400 °C. Temperatur tertinggi dicapai pada bagian katalis dan temperturnya semakin menurun hingga ke ujung reaktor. Gambar 8 menunjukkan bahwa *switching time* yang digunakan pada mode operasi *reverse flow* akan berpengaruh terhadap profil temperatur di sepanjang reaktor. Pada *switching time*



Gambar 7. Temperatur *inert* sisi kiri dan sisi kanan selama berjalannya reaksi pada berbagai variasi *switching time*.

dan produk yang panas keluar dari bagian kanan reaktor, sehingga temperatur *inert* di bagian kiri akan semakin menurun sementara temperatur *inert* di bagian kanan akan semakin meningkat.

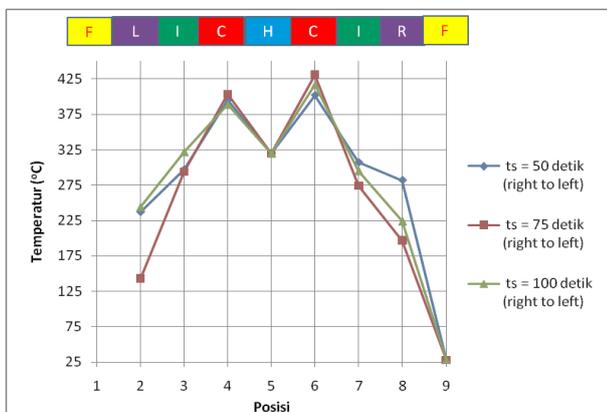
Profil Temperatur Reaktor sebagai Fungsi Posisi

Profil temperatur di sepanjang reaktor pada berbagai variasi *switching time* pada mode operasi *reverse flow* ditunjukkan pada Gambar 8. Dari gambar tersebut dapat diamati bahwa ada kecenderungan peningkatan temperatur dari tempat masuknya umpan di bagian kiri menuju ke bagian katalis kiri.

yang besar (75 detik dan 100 detik), temperatur di katalis kanan menjadi lebih tinggi dibandingkan temperatur di katalis kiri sedangkan pada *switching time* 50 detik temperatur di kedua bagian katalis hampir sama. Perbedaan profil temperatur reaktor pada bagian kanan dan kiri mungkin disebabkan oleh adanya beberapa faktor berikut, yaitu adanya *heat loss* yang tidak seragam antara bagian kiri dan bagian kanan reaktor dan profil temperatur belum mencapai osilasi yang stabil.

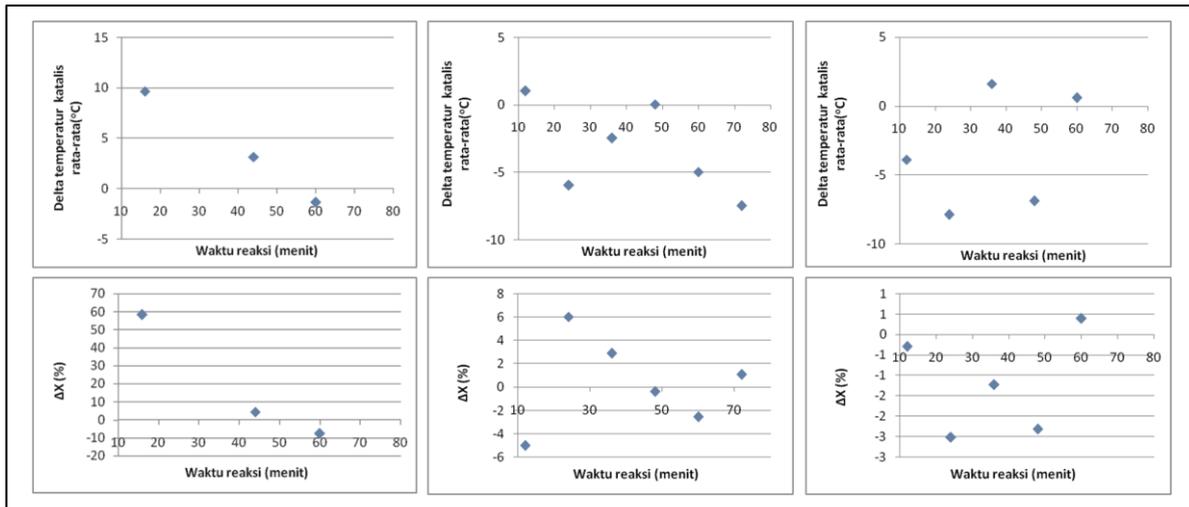
Pengaruh *Switching Time* Terhadap Konversi Reaksi

Selanjutnya diamati pula pengaruh *switching time* terhadap konversi reaksi. Dalam studi ini diperoleh bahwa nilai konversi reaksi pada mode *reverse flow* merupakan fungsi waktu. Nilai konversi reaksi *reverse flow* dan nilai temperatur sepanjang waktu reaksi di berbagai variasi *switching time* ditunjukkan pada grafik-grafik pada Gambar 9. Parameter konversi reaksi dalam Gambar 9 dinyatakan dalam delta konversi (ΔX), yaitu selisih konversi saat operasi RFR dengan konversi pada saat *steady state*. Apabila ΔX bernilai positif, maka konversi pada saat mode operasi *reverse flow* lebih tinggi dibandingkan konversi pada mode operasi *steady state*. Apabila ΔX bernilai negatif, maka konversi pada saat mode operasi *reverse flow* lebih rendah dibandingkan konversi pada mode operasi



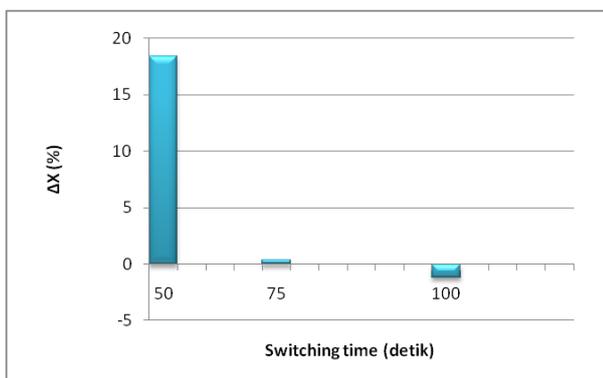
Gambar 8. Profil temperatur di sepanjang reaktor pada mode operasi *reverse flow*.

steady state. Parameter temperatur yang digunakan dalam Gambar 8 dinyatakan dalam delta temperatur katalis rata-rata, yaitu selisih temperatur katalis rata-rata saat operasi RFR dengan temperatur katalis rata-rata pada saat *steady state*. Temperatur katalis rata-rata adalah nilai rata-rata temperatur di bagian katalis kiri dan kanan. Gambar 9 menunjukkan adanya dinamika konversi yang terjadi pada mode operasi *reverse flow*.



Gambar 9. Hubungan nilai temperatur katalis rata-rata dan ΔX pada variasi *switching time* (a) 50 detik; (b) 75 detik; (c) 100 detik.

Dari Gambar 9 teramati bahwa temperatur rata-rata katalis selama reaksi pada mode operasi *reverse flow* tidak berbeda secara berarti dengan temperatur katalis rata-rata pada mode operasi *steady state*. Akan tetapi, pada beberapa variasi *switching time* yang diujikan terlihat adanya perbedaan delta konversi yang cukup berarti.



Gambar 10. Data selisih konversi pada mode *reverse flow* dan *steady state* pada masing-masing *switching time*.

Pada *switching time* 50 detik konversi pada mode operasi *reverse flow* sangat besar bila dibandingkan konversi saat *steady state*. Namun, seiring berjalannya

reaksi konversi tersebut semakin berkurang sehingga delta konversi yang diperoleh mengalami penurunan seiring bertambahnya waktu reaksi.

Pada *switching time* 75 detik dan 100 detik dapat diamati adanya dinamika nilai konversi reaksi pada mode operasi *reverse flow*. Konversi reaksi pada mode operasi *reverse flow* berhasil sepanjang waktu reaksi akibat adanya gangguan yang disebabkan oleh pembalikan arah aliran. Pengaruh variasi *switching*

time terhadap konversi reaksi pada mode operasi *reverse flow* dapat dilihat dengan membandingkan selisih konversi rata-rata pada mode operasi *reverse flow* terhadap konversi rata-rata reaksi pada mode *steady state* untuk setiap variasi *switching time*. Pengaruh *switching time* terhadap selisih konversi reaksi ditunjukkan pada Gambar 10. Dari Gambar 10 dapat diamati bahwa nilai delta konversi dipengaruhi oleh *switching time* yang digunakan. Pada *switching* 50 dan 75 detik, delta konversi positif atau dengan kata lain, konversi reaksi pada mode operasi *reverse flow* lebih besar dibandingkan konversi reaksi pada mode operasi *steady state*. Data yang diperoleh pada Gambar 10 menunjukkan bahwa semakin kecil *switching time* yang digunakan maka delta konversi akan semakin besar. Hal ini dikarenakan semakin besar *switching time* yang digunakan maka operasi akan makin mendekati kondisi *steady state*. Pada *switching time* 100 detik, kondisi operasi akan semakin mendekati kondisi *steady state* sehingga pembalikan arah aliran justru menyebabkan konversi total yang diperoleh lebih kecil dibandingkan konversi *steady state* karena adanya reaktan yang tidak terkonversi. Hal ini menyebabkan delta konversi yang diperoleh pada *switching time* 100 detik bernilai negatif.

KESIMPULAN

Penggunaan *Reverse Flow Reactor* (RFR) dapat mempengaruhi proses oksidasi metana menjadi karbon dioksida khususnya dalam hal konversi metana. Mode operasi *reverse flow* tidak selalu menghasilkan konversi reaksi yang lebih baik dibandingkan *steady state operation* namun dapat lebih baik daripada *steady state operation*. Variabel *switching time* merupakan salah satu parameter yang sangat berpengaruh terhadap unjuk kerja RFR, khususnya dalam propagasi panas di sepanjang reaktor dan konversi reaksi. Pada ketiga *switching time* yang diuji melalui percobaan ini (50, 75, dan 100 detik), dinamika temperatur yang diperoleh berada pada rejim *sliding*. Dari ketiga variasi *switching time* tersebut yang memberikan konversi oksidasi metana paling baik adalah *switching time* 50 detik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada beberapa pihak yang telah membantu dalam hal penyediaan dana penelitian melalui skema Riset Unggulan ITB 2009 dan European Roadmap for Process Intensification 2008-2009.

DAFTAR PUSTAKA

- Bandjar, A., Sutapa, I. W., Rosmawaty, R., and Mahulau, N., 2014. The Utilitasion of Beef Tallow Into Biodiesel With Heterogenous Catalyst, *Indo. J. Chem. Res.*, 2(1), 166-170.
- Rachim, G. S. A., Raya, I., dan Zakir, M., 2017. Modifikasi Katalis CaO Untuk Produksi Biodiesel Dari Minyak Bekas. *Indo. J. Chem. Res.*, 5(1), 47-52.
- Budhi, Y.W. Jaree, A., Hoebink, J.H.B.J., and Schouten, J.C., 2004a. Simulation of Reverse Flow Operation for Manipulation of Catalyst Surface Coverage in the Selective Oxidation of Ammonia, *Chem. Eng. Sci.*, 59(19), 4125-4135.
- Budhi, Y.W., 2005. *Reverse Flow Reactor Operation for Control of Catalyst Surface Coverage*, Disertasi Doktor, Technische Universiteit Eindhoven
- Budhi, Y.W., Hoebink, J.H.B.J., and Schouten, J.C., 2004b. Reverse Flow Operation with Reactor Side Feeding: Analysis, Modeling, and Simulation, *Indus. and Eng. Chem. Res.*, 43(22), 6955–6963
- Devals, C. Fuxman, A. Bertrand, F. Forbe, J.F., and Hayes, R.E., 2006. *Combustion of Lean Methane in a Catalytic Flow Reversal Reactor*, Proceedings of the COMSOL Users Conference Boston.
- Di Benedetto, A., Landi, G., Di Sarli, V., Barbato, P.S., Pirone R., and Russo G., 2012. Methane Catalytic Combustion Under Pressure, *Catal. Today*, 197(1), 206-213.
- Dufour, P., Couenne, F., and Tourre, Y., 2003. *Model Predictive Control of a Catalytic Reverse Flow Reactor*, IEEE Transactions on Controlled System Technology 11.
- Hanamura, K. Echigo, R. and Zhdanok, S. A., 1993. Superadiabatic combustion in a porous medium, *Inter. J. Heat and Mass Transfer*, 36, 3201–3209.
- Hayes, R.E., 2004. Catalytic Solutions for Fugitive Methane Emissions in Oil and gas Sector, *Chem. Eng. Sci.*, 19, 4073-4080.
- Ledwich, J., 2001. Catalytic Combustion of Coal Mine Ventilation Air - Part I Literature Review and Experimental Preparation, Individual Inquiry A, Department of Chemical Engineering, University of Queensland.
- Lee J.H., and Trimm D.L., 1995. Catalytic Combustion of Methane, *Fuel Process. Tech.*, 42, 339-359.
- Litto, R., Hayes, R.E., and Liu, B., 2007. Capturing fugitive methane emissions from natural gas compressor buildings, *J. Environ. Manag.*, 84, 347-361.
- Marín, P., Hevia, Miguel A.G., Ordóñez, S. and Díez, F.V., 2005. Combustion of methane lean mixtures in reverse flow reactors: Comparison between packed and structured catalyst beds, *Catal. Today*, 105, 701–708.
- Marín, P., Ordóñez, S. and Díez, F.V., 2008. Procedures for heat recovery in the catalytic combustion of lean methane–air mixtures in a reverse flow reactor, *Chem. Eng. J.*, 147, 356–365.
- Matro and, Yu.Sh., 1990. Performance of Catalytic Processes Under Unsteady Conditions, *Chem. Eng. Sci.*, 45, 2097-2102.
- Matros, Yu.Sh. and Buminovich, G.H., 1996. Reverse Flow Operation in Fixed Bed Catalytic Reactors, *Catal. Review-Science and Eng.*, 38, 1–86.
- Raksajati, A., Adhi, T., dan Ariono, D., 2020. Pengaruh Tekanan Dan Tahap Kompresi Dalam

- Pemurnian Biogas Menjadi Biometana Dengan Absorpsi CO₂ Menggunakan Air Bertekanan. *Indo. J. Chem. Res.*, 8(1), 1-5.
- Salomons, S. Hayes, R. E Poirier, M., and Sapoundjiev, H., 2003. Flow reversal reactor for the catalytic combustion of lean methane mixtures, *Catal. Today*, 83, 59–69.
- Salinger, A. G. and Eigenberger, G., 1996. The Direct Calculation of Periodic States of The Reverse Flow Reactor-1. Methodology and Propane Combustions Results, *Chem. Eng. Sci.*, 51(21), 4903-4913.
- Salomons, S. Hayes, R. E Poirier, M. and Sapoundjiev, H., 2004. Modelling a reverse flow reactor for the catalytic combustion of fugitive methane emissions, *Comp. and Chem. Eng.*, 28, 1599-1610.
- Sapoundjiev, H., and Aube, F., 1999. *Catalytic Flow Reversal Reactor Technology: An Opportunity of Heat Recovery and Greenhouse Gas Elimination from Mine Ventilation Air*, Natural Resources Canada, CANMET Energy Diversification Research Laboratory.
- Van Sint Annaland, M., 2000. *A Novel Reverse Flow Reactor Coupling Endothermic and Exothermic Reaction*”, Disertasi Doktor, Universiteit Twente, The Netherlands.