

Submitted : 29 Maret 2021

Revised : 21 April 2021

Accepted : 10 Mei 2021

PENGARUH KADAR AIR DAN KONSENTRASI METANA TERHADAP UNJUK KERJA REAKTOR BOLAK BALIK DENGAN UMPAN EMISI GAS TAMBANG BATUBARA

Novan Prihasa^{1,2}, Teguh Kurniawan^{*1,2}, Anton Irawan^{1,2}

¹Program Studi Magister Teknik Kimia, Pascasarjana, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jalan Raya Jakarta Km. 4, Serang, 42124, Indonesia

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
Jalan Jenderal Sudirman Km. 3, Cilegon, 42435, Indonesia

*Email: teguh@untirta.ac.id

Abstrak

Proses ekstraksi batubara dalam setiap penambangan batubara melepaskan sejumlah emisi gas buang ke udara berupa gas metana sebesar 0,1 – 1%. Emisi gas metana pada tambang batubara merupakan salah satu kontributor efek rumah kaca dalam pemanasan global. Ketahanan gas metana berada di atmosfer rata-rata sekitar 12 tahun. Gas metana mampu menangkap panas dengan kemampuan 20 kali lipat lebih besar dari karbondioksida. Salah satu solusi yang dapat digunakan untuk mengoksidasi gas metana menjadi karbondioksida dengan konsentrasi rendah di bawah 1% adalah menggunakan *Reverse Flow Reactor (RFR)*. Dalam penelitian ini dipaparkan mengenai pengaruh konsentrasi gas umpan metana, kandungan kadar air pada aliran gas umpan metana, dan pemilihan nilai *switching time* terhadap unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR, dengan metode simulasi pengamatan kelakuan dinamik berupa profil temperatur reaktor dan konversi metana menggunakan *software FlexPDE* versi 7. Nilai konsentrasi gas umpan metana berbanding lurus terhadap nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Namun, nilai komposisi air pada gas umpan metana dan nilai *switching time* berbanding terbalik terhadap nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Nilai konversi metana sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi *auto-thermal* dan kestabilan panas dari RFR. Jika kondisi operasi *auto-thermal* dapat terjadi maka nilai konversi metana mampu mencapai 100%.

Kata Kunci: Emisi Metana, Reaktor Bolak Balik, Ototermal, Waktu Peralihan, Penghambatan Air

Abstract

The coal extraction process in every coal mining releases a number of exhaust gas emissions into the air in the form of methane gas of 0.1 - 1%. Methane emissions from coal mines are one of the contributors to the greenhouse effect in global warming. Methane gas resistance in the atmosphere for an average of about 12 years. Methane gas is capable of trapping heat with the ability 20 times greater than carbon dioxide. One solution that can be used to oxidize methane gas to carbon dioxide with a low concentration of less than 1% is to use a Reverse Flow Reactor (RFR). This research will explain the effect of methane feed gas concentration, moisture content in the methane feed gas stream, and the selection of switching time on reactor performance related to auto-thermal properties and heat stability of RFR, with a simulation method of observing dynamic behavior in the form of a reactor temperature profile and methane conversion using FlexPDE version 7. The methane feed gas concentration is directly proportional to the temperature of reactor. Meanwhile, the water composition in the methane feed gas and the selection of switching time are inversely proportional to the temperature of reactor. The methane conversion is strongly influenced by the auto-thermal operating conditions and the heat stability of RFR. If the auto-thermal operating conditions can occur, the methane conversion can reach 100%.

Keywords: Coal Mine Methane, Reverse Flow Reactor, Auto-thermal, Switching Time, Water Inhibitor

1. PENDAHULUAN

Pemanasan global merupakan salah satu permasalahan lingkungan yang paling mendapat perhatian serius dalam beberapa tahun terakhir. Salah satu bagian dari pemanasan global adalah efek rumah kaca. Efek rumah kaca disebabkan oleh meningkatnya konsentrasi gas karbondioksida (CO₂) dan gas-gas lainnya seperti metana (CH₄), dinitrogenmonoksida (N₂O), dan klorofluorokarbon (CFC) di atmosfer. Efek rumah kaca membuat temperatur udara lebih hangat sekitar 1-3 °C dari yang seharusnya (Houghton, 2009).

Penambangan batubara adalah salah satu kegiatan yang memberikan dampak bagi lingkungan. Dalam setiap penambangan batubara terdapat proses ekstraksi batubara. Selama proses ekstraksi, batubara akan melepaskan sejumlah emisi gas buang ke udara berupa gas metana sebesar 0,1–1 %v. Emisi gas buang berupa gas metana yang berasal dari kegiatan penambangan batubara menjadi salah satu kontributor efek rumah kaca dalam pemanasan global (Díaz, Fernández, Ordóñez, Canto, & González, 2012).

Gas metana yang berada di atmosfer terakumulasi dan akhirnya teroksidasi menjadi karbondioksida, tetapi dengan proses kinetika yang sangat lambat. Ketahanan gas metana berada di atmosfer rata-rata sekitar 12 tahun. Gas metana mampu menangkap panas dengan kemampuan 20 kali lipat lebih besar dari karbondioksida (atau setara dengan 100 tahun) dapat menjadi potensi pemanasan global (Karakurt, Aydin, & Aydiner, 2011). Oksidasi katalitik gas metana menjadi karbondioksida sebelum dilepaskan ke udara dan atmosfer merupakan proses yang dapat dilakukan untuk mengurangi efek jangka panjang rumah kaca yang disebabkan oleh gas metana.

Salah satu solusi yang dapat digunakan untuk mengoksidasi gas metana menjadi karbondioksida yang dihasilkan dari penambangan batubara dengan konsentrasi rendah di bawah 1 %v adalah menggunakan reaktor bolak balik atau yang biasa disebut dengan *reverse flow reactor (RFR)*. Reaktor ini merupakan jenis reaktor katalitik unggun tetap *unsteady state*, yang arah aliran umpannya dibalik secara berkala. Reaktor ini memungkinkan operasi dapat berlangsung secara *auto-thermal* meskipun konsentrasi gas metana sangat rendah. Reaksi maupun pertukaran panas dapat berlangsung dengan efisiensi termal yang tinggi (Marín, Ordóñez, & Díez, 2009).

Dalam operasi *auto-thermal* tidak ada penambahan energi panas ke reaktor dan tidak ada penghilangan energi panas yang disengaja dengan proses pendinginan melalui dinding reaktor (kecuali untuk kehilangan panas ke lingkungan), dan atau penghilangan energi panas dengan menggunakan aliran umpan dingin secara konvektif. Dalam operasi *auto-thermal* diperlukan prosedur *start-up* yang tepat yaitu dengan memanaskan unggun katalis dan atau

unggun *inert* terlebih dahulu pada temperatur tertentu, serta pemilihan variabel kondisi umpan yang tepat, sehingga tidak terjadi energi panas berlebih pada katalis dan reaktor (Balakotaiah, Sun, & West, 2019).

Prinsip dasar RFR terdiri dari unggun tetap dan satu set katup yang mempunyai fungsi untuk mengubah arah aliran (Gambar 1). Unggun tetap dapat menggunakan satu jenis bahan atau lapisan padatan yang berbeda, seperti bahan katalis, *inert*, dan atau adsorben. RFR katalitik terdiri dari unggun katalitik yang berada di bagian tengah dan di antara dua unggun *inert* yang berada di kedua sisi reaktor. Unggun tetap yang berbeda di dalam RFR dapat mempunyai fungsi yang berbeda-beda, diantaranya adalah sebagai katalis pada reaksi kimia, penyimpanan energi sebagai panas *sensible*, dan penyimpanan zat kimia melalui fungsi adsorpsi (Marín, Díez, & Ordóñez, 2019).

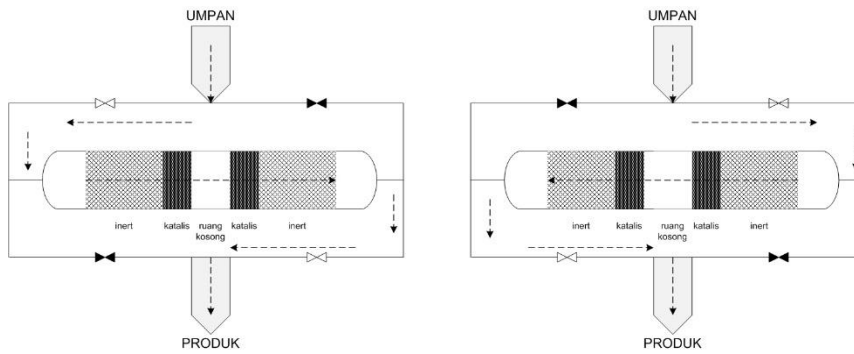
RFR memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan reaktor satu arah ketika diterapkan pada aliran umpan dengan konsentrasi dan temperatur yang rendah. Konversi metana diketahui mampu mencapai 99% pada RFR (Kurniawan, Budhi, & Bindar, 2018). Selain itu, kondisi dinamis pada RFR mampu meningkatkan aktivitas katalis sehingga konversi semakin tinggi (Effendy, Wardhono, & Arsana, 2019).

Gas metana dengan konsentrasi sekitar 5–16 %v mudah teroksidasi di udara. Namun gas metana dengan konsentrasi rendah di bawah 5 %v hanya mampu dilakukan oksidasi dengan menggunakan media katalis. Oksidasi katalitik memungkinkan oksidasi metana terjadi pada rentang konsentrasi yang lebih besar (Kurniawan et al., 2018). Diketahui oksidasi katalitik gas metana dapat dicapai pada temperatur sekitar 400 °C untuk mendapatkan nilai konversi di atas 99 % (Setiawan, Kennedy, & Stockenhuber, 2017).

Kandungan air dalam emisi tambang batubara seperti gas metana biasanya cukup tinggi. Kandungan air ini dapat menurunkan kinerja katalis terutama pada katalis dari golongan logam mulia. Kandungan air dalam gas metana selain dapat merusak katalis, juga berpengaruh terhadap sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas dari RFR (Fernández, Marín, Díez, & Ordóñez, 2015a).

Switching time (ST) merupakan salah satu parameter paling penting dalam penentuan kondisi operasi RFR. Pemilihan nilai ST sangat berpengaruh terhadap unjuk kerja RFR terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas dari RFR (Kurniawan et al., 2018).

Dalam penelitian ini akan dipaparkan mengenai pengaruh konsentrasi gas umpan metana, kandungan kadar air pada aliran gas umpan metana, dan pemilihan nilai ST terhadap unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR, dengan metode simulasi pengamatan kelakuan dinamik berupa profil temperatur reaktor dan konversi metana menggunakan perangkat lunak FlexPDE versi 7.



Gambar 1. Ilustrasi aliran RFR, a) aliran dari kiri ke kanan, b) aliran dari kanan ke kiri

2. METODE

Untuk keperluan perancangan dan memahami karakteristik RFR perlu dilakukan pemodelan matematik. Beberapa model sederhana mampu untuk mendeskripsikan secara kuantitatif kelakuan dinamik berupa profil temperatur reaktor dan konsentrasi metana selama proses pembolak-balikan arah aliran. Pemodelan harus mencakup ketentuan perpindahan massa, perpindahan panas, dan kinetika reaksi (Matros & Bunimovich, 1996).

Pemodelan matematik yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan pendekatan model 1D *pseudohomogeneous* untuk neraca massa dan heterogen untuk neraca energi. Karena perpindahan massa tidak menjadi hambatan dalam reaksi oksidasi katalitik gas metana pada reaktor unggun tetap untuk aliran yang dibolak-balik secara periodik. Teori pemodelan kondisi batas *Danckwerts* digunakan untuk menyelesaikan persamaan-persamaan yang ada. Zona RFR terdiri dari dua unggun katalis, dua unggun *inert*, dan satu zona ruang kosong (Gambar 2).

Neraca Massa (Kurniawan et al., 2018).

$$\frac{\partial c_g}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 c_g}{\partial z^2} - u \frac{\partial c_g}{\partial z} - r_{CH_4}(x, T_s) \tag{1}$$

Neraca Energi (Kurniawan et al., 2018).

$$\epsilon \rho_g c_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial t} = -u \rho_g c_{pg} \frac{\partial T_g}{\partial z} - \alpha a (T_g - T_s) - \frac{4U_{overall}}{d} (T_g - T_{ruang}) \tag{2}$$

$$[\epsilon_s \rho_s c_{ps} + (1 - \epsilon) \epsilon_p c_{pg} \rho_g] \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_{eff} \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} + \alpha a (T_g - T_s) + (-\Delta H_r) (r_{CH_4}(x, T_s)) \tag{3}$$

Mekanisme oksidasi katalitik gas metana secara sempurna adalah sebagai berikut (Karakurt et al., 2011).



Penelitian secara eksperimental yang telah dilakukan oleh Fernández, Marín, Díez, and Ordóñez (2015b) memperlihatkan persamaan laju reaksi untuk oksidasi gas metana menggunakan jenis katalis *monolithic based* dan memperhitungkan penghambatan yang disebabkan oleh air dengan menggunakan pemodelan kinetika *Langmuir-Hinshelwood* adalah sebagai berikut.

$$-r_{CH_4} = \frac{k_w \cdot p_{CH_4}}{1 + K_{inh} \cdot p_{H_2O}} \quad (\text{mol/kg.s}) \tag{4}$$

Nilai konstanta kinetika gas metana (k_w) dan konstanta kesetimbangan adsorpsi air pada jenis katalis *monolithic based* (K_{inh}) adalah sebagai berikut.

$$k_w = 1,56e^{-80000/RT} \quad (\text{mol/kg.s.Pa}) \tag{5}$$

$$K_{inh} = 8,07 \times 10^{-9} e^{67600/RT} \quad (\text{Pa}^{-1}) \tag{6}$$

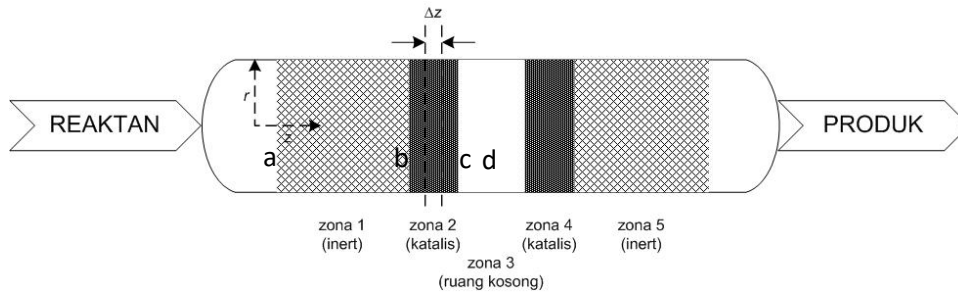
Dengan nilai $R = 8,314 \text{ J/mol.K}$, serta p_{CH_4} merupakan tekanan parsial metana, dan p_{H_2O} merupakan tekanan parsial air. Nilai persamaan laju reaksi pada persamaan (4) perlu diturunkan kembali dengan menyamakan satuannya (menjadi $\text{mol/m}^3.\text{s}$) agar dapat digunakan pada persamaan neraca massa dan neraca energi pada persamaan (1) dan (3).

Sedangkan untuk nilai-nilai dimensi reaktor (skala laboratorium), serta sifat fisik unggun katalis dan unggun *inert* diambil dari literatur yang dijelaskan dalam Tabel 1 sebagai berikut.

Tabel 1. Dimensi reaktor, sifat fisik katalis, dan *inert* (Kurniawan et al., 2018)

Diameter reaktor, d	0,108 m
Panjang total reaktor, L_{total}	0,26 m
Panjang zona <i>inert</i> , L_{int}	0,1 m
Panjang zona katalis, L_{kat}	0,01 m
Panjang zona ruang kosong, L_{kos}	0,04 m
Koefisien perpindahan panas, U	131 W/m ² .K
Material unggun katalis	Pt/Al ₂ O ₃
Diameter katalis, d_{kat}	1 x 10 ⁻⁵ m
Fraksi kosong, ϵ_{kat}	0,36
Densitas, ρ_{kat}	1082 kg/m ³
Kapasitas panas, C_{pkat}	836 J/kg.K
Konduktivitas termal, k_{cat}	0,042 W/m.K
Material unggun <i>inert</i>	Alumina
Diameter <i>inert</i> , d_{int}	0,003 m
Fraksi kosong, ϵ_{int}	0,4
Densitas, ρ_{int}	1440 kg/m ³
Kapasitas panas, C_{pint}	1040 J/kg.K
Konduktivitas termal, k_{int}	1,46 W/m.K

Dengan nilai faktor efektivitas internal katalis jenis *monolithic based* adalah sebesar 66% (Parentis, Bonini, & Gonzo, 2011).

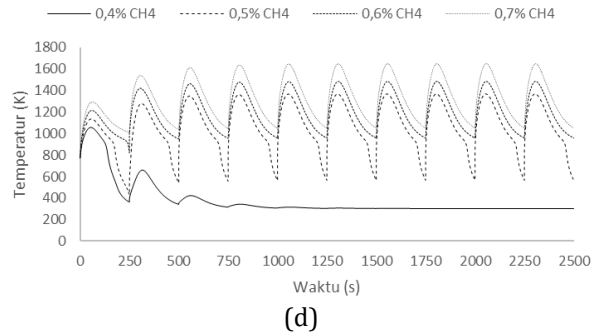


Gambar 2. Ilustrasi zona RFR untuk neraca massa dan energi

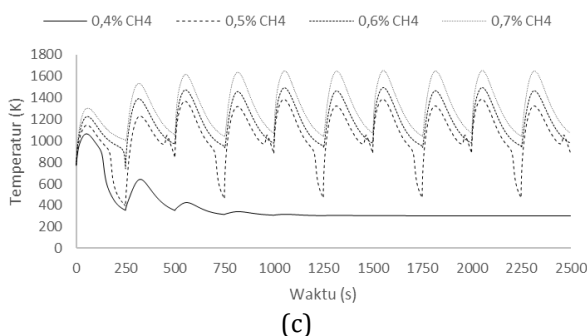
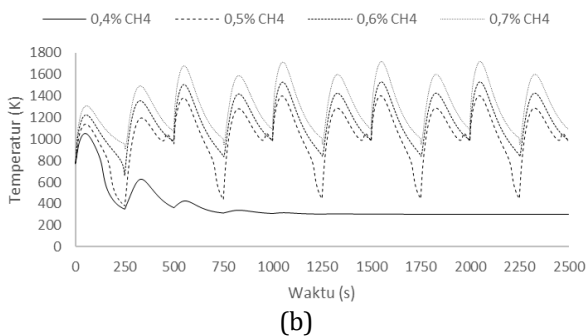
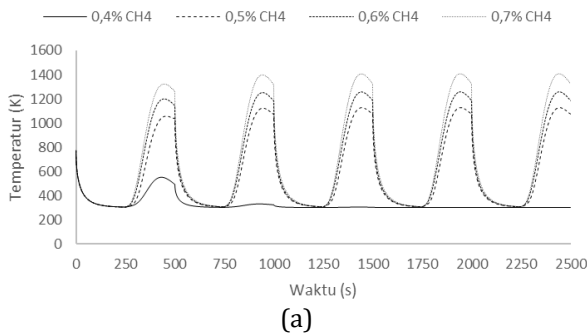
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh Konsentrasi Umpan CH₄

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Fernández et al. (2015b), S. Wang, Gao, and Wang (2014), dan Y. Wang, Man, and Che (2010) diketahui untuk konsentrasi gas metana pada kegiatan penambangan batubara adalah 0,1–0,75 %v. Dalam penelitian ini diberikan beberapa variasi konsentrasi gas umpan metana yaitu sebesar 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; dan 0,7 %v pada temperatur 30 °C, laju alir gas umpan 0,7 m/s, dan tekanan operasi 1,5 atm, dengan tanpa adanya kandungan air dalam gas umpan metana, serta pemilihan nilai ST sebesar 250 detik.

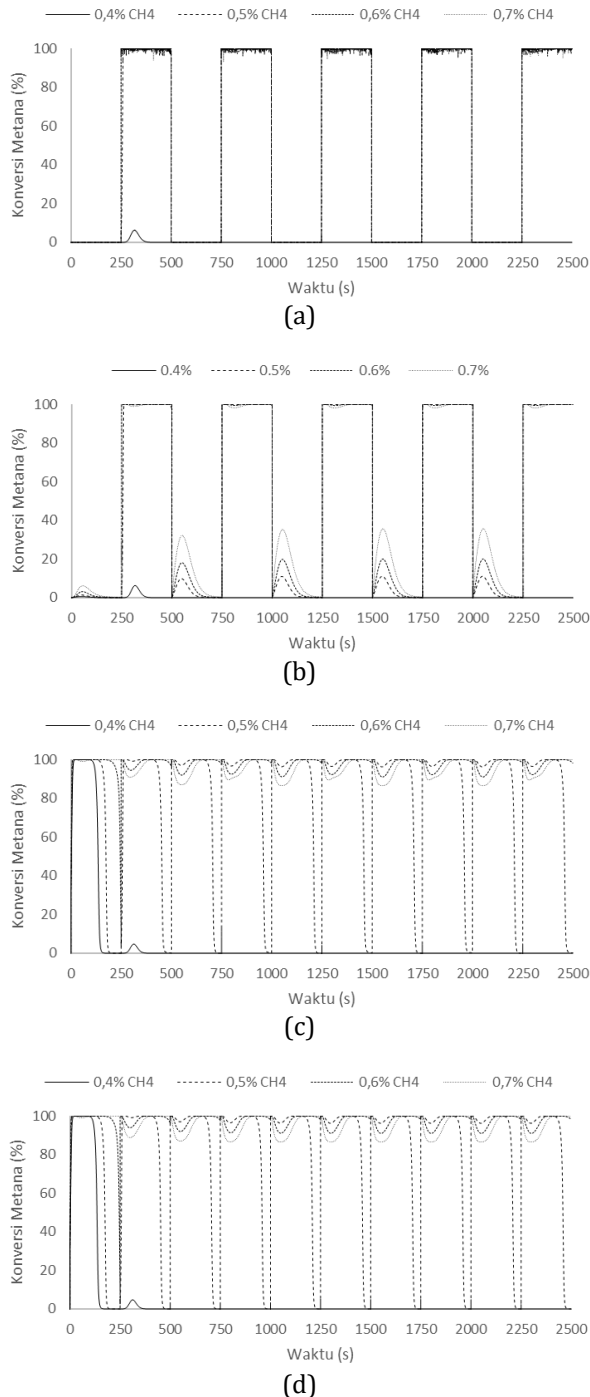


Gambar 3. Pengaruh konsentrasi umpan CH₄ terhadap profil temperatur RFR pada: a) ujung reaktor, b) *interface inert*–katalis, c) *interface* katalis–ruang kosong, dan d) ruang kosong



Untuk mendapatkan operasi *auto-thermal* pada simulasi RFR, diperlukan prosedur *start-up* yang tepat. Dalam simulasi ini pemanasan awal unggun *inert* dan unggun katalis dilakukan pada temperatur 500 °C. Terlihat dalam hasil simulasi yang telah dilakukan, bahwa nilai konsentrasi gas umpan metana berbanding lurus terhadap nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Semakin besar nilai konsentrasi gas umpan metana yang diberikan, maka akan semakin besar pula nilai temperatur yang dihasilkan reaktor, atau dengan kata lain mampu meningkatkan unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR (Gambar 3).

Nilai maksimum temperatur yang dihasilkan oleh reaktor yaitu sebesar 1700 K pada *interface inert*–katalis dengan konsentrasi gas umpan metana sebesar 0,7%v. Untuk nilai konsentrasi gas umpan metana sebesar 0,6%v didapatkan nilai maksimum temperatur yang dihasilkan oleh reaktor sebesar 1500 K pada *interface inert*–katalis. Sedangkan untuk nilai konsentrasi gas umpan metana sebesar 0,5 %v didapatkan nilai maksimum temperatur yang dihasilkan oleh reaktor sebesar 1400 K pada *interface inert*–katalis. Sedangkan untuk nilai konsentrasi umpan metana di bawah atau sama dengan 0,4 %v, operasi *auto-thermal* pada RFR tidak dapat terjadi (reaktor padam) jika dengan pemilihan nilai *switching time* sebesar 250 detik.



Gambar 4. Pengaruh konsentrasi umpan CH₄ terhadap konversi metana pada: a) ujung reaktor, b) *interface inert*–katalis, c) *interface* katalis–ruang kosong, dan d) ruang kosong

Selain dilakukan simulasi terkait profil temperatur reaktor, dilakukan pula simulasi terhadap profil konversi metana. Terlihat dalam hasil simulasi yang telah dilakukan, bahwa nilai konversi metana mampu mencapai 100 % dengan nilai konsentrasi umpan metana di atas atau sama dengan 0,5 %v, sementara untuk nilai konsentrasi umpan metana di bawah atau sama dengan 0,4 %v didapatkan nilai konversi metana

cenderung tidak berubah (0%) atau masih sama dengan nilai konsentrasi awal (Gambar 4).

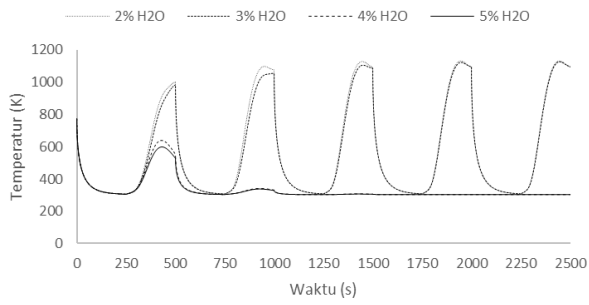
Hal ini dikarenakan nilai konversi metana dipengaruhi oleh unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR yang dapat berakibat pada padamnya reaktor dengan nilai konsentrasi umpan metana di bawah atau sama dengan 0,4 %v. Salah satu parameter terpenting dalam penentuan terjadinya kondisi operasi *auto-thermal* pada RFR adalah pemilihan nilai *switching time*. Sehingga untuk nilai konsentrasi umpan metana di bawah atau sama dengan 0,4 %v perlu dilakukan pemilihan nilai *switching time* yang paling optimal agar dapat terjadi kondisi operasi *auto-thermal* yang diharapkan pada RFR.

Nilai konsentrasi umpan metana sebesar 0,5 %v akan digunakan untuk variasi pada variabel simulasi berikutnya, karena nilai konsentrasi ini mampu menghasilkan operasi secara *auto-thermal* dan tidak menghasilkan nilai temperatur yang terlalu tinggi sehingga dapat menjaga *lifetime* dari reaktor dengan material *stainless steel*, serta nilai konversi metana yang dihasilkan mampu mencapai 100 %.

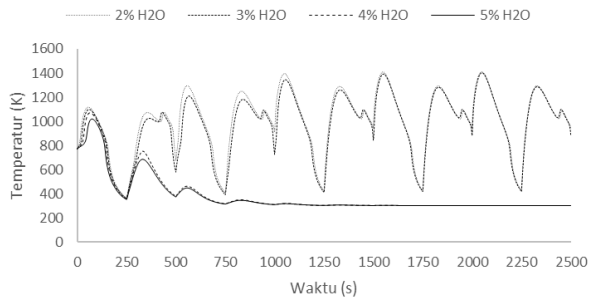
3.2. Pengaruh Komposisi H₂O pada Gas Umpan CH₄

Berdasarkan data penelitian yang telah dilakukan oleh Fernández, Marín, Díez, and Ordóñez (2016) diketahui komposisi air pada aliran gas umpan metana tambang batubara adalah sebesar 2–5 %v. Dalam penelitian ini diberikan beberapa variasi komposisi air pada aliran gas umpan metana yaitu sebesar 2, 3, 4, dan 5 %v, dengan konsentrasi gas umpan metana sebesar 0,5 %v (asumsi tetap/konstan). Temperatur gas umpan sebesar 30 °C, tekanan operasi 1,5 atm, laju alir gas umpan 0,7 m/s, dan pemilihan nilai *switching time* sebesar 250 detik, serta temperatur pemanasan awal unggun *inert* dan unggun katalis dilakukan pada temperatur 500 °C.

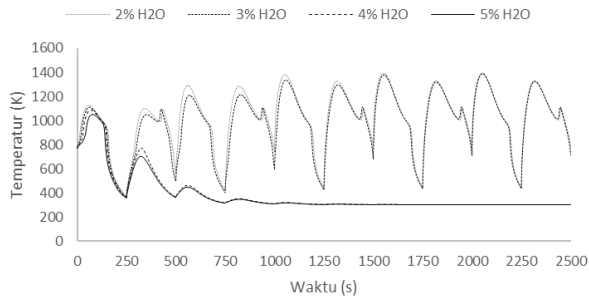
Terlihat dalam hasil simulasi yang telah dilakukan, bahwa nilai komposisi air pada gas umpan metana berbanding terbalik terhadap nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Semakin besar nilai komposisi air pada gas umpan metana yang diberikan, maka akan semakin menurunkan nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Selain itu, dengan adanya komposisi air pada gas umpan metana berpengaruh juga terhadap penurunan unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR yang dapat berakibat pada padamnya reaktor dengan komposisi air pada gas umpan metana di atas atau sama dengan 4 %v (Gambar 5).



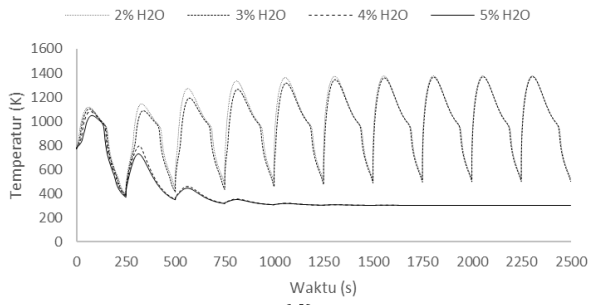
(a)



(b)



(c)

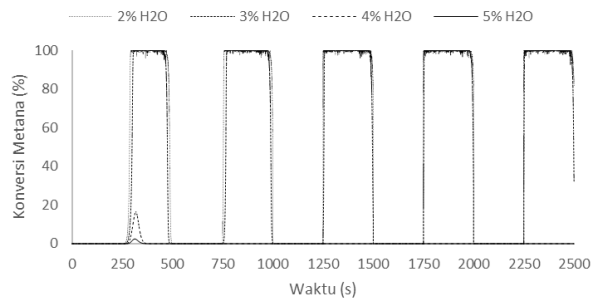


(d)

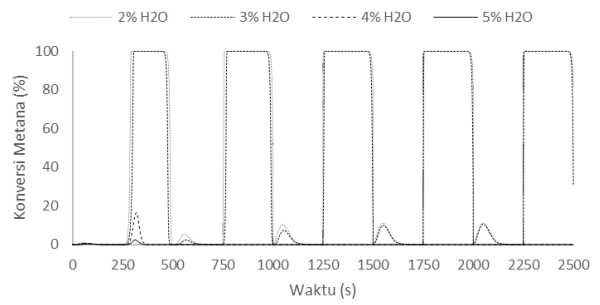
Gambar 5. Pengaruh komposisi H₂O pada umpan CH₄ terhadap profil temperatur RFR pada: a) ujung reaktor, b) *interface inert*-katalis, c) *interface* katalis-ruang kosong, dan d) ruang kosong

Selain dilakukan simulasi terkait profil temperatur reaktor, dilakukan pula simulasi terhadap profil konversi metana. Terlihat dalam hasil simulasi yang telah dilakukan, bahwa nilai konversi metana mampu mencapai 100 % dengan nilai komposisi air pada gas umpan metana di bawah atau sama dengan 3 %v, sementara untuk nilai komposisi air pada gas umpan metana di atas atau sama dengan 4 %v didapatkan nilai

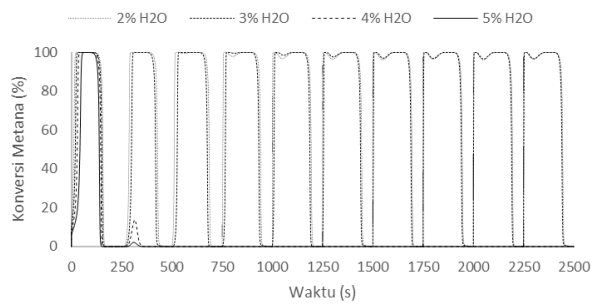
konversi metana cenderung tidak berubah (0 %) atau masih sama dengan nilai konsentrasi awal (Gambar 6).



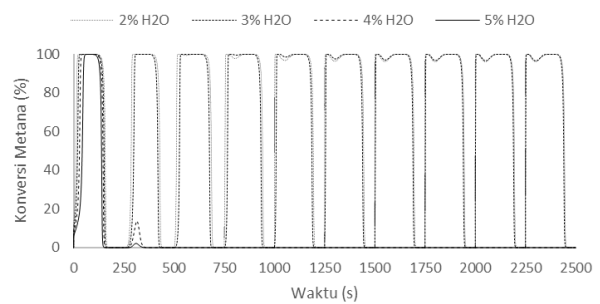
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 6. Pengaruh komposisi H₂O pada umpan CH₄ terhadap konversi metana pada: a) ujung reaktor, b) *interface inert*-katalis, c) *interface* katalis-ruang kosong, dan d) ruang kosong

Hal ini dikarenakan nilai konversi metana dipengaruhi oleh unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR yang dapat berakibat pada padamnya reaktor dengan komposisi air pada gas umpan metana di atas atau sama dengan 4 %v. Sehingga jika ditemukan komposisi air pada gas umpan

metana lebih tinggi dari atau sama dengan 4 %v, maka perlu dilakukan upaya untuk mengurangi komposisi air pada gas umpan metana agar tidak mengganggu atau menurunkan unjuk kerja dari RFR.

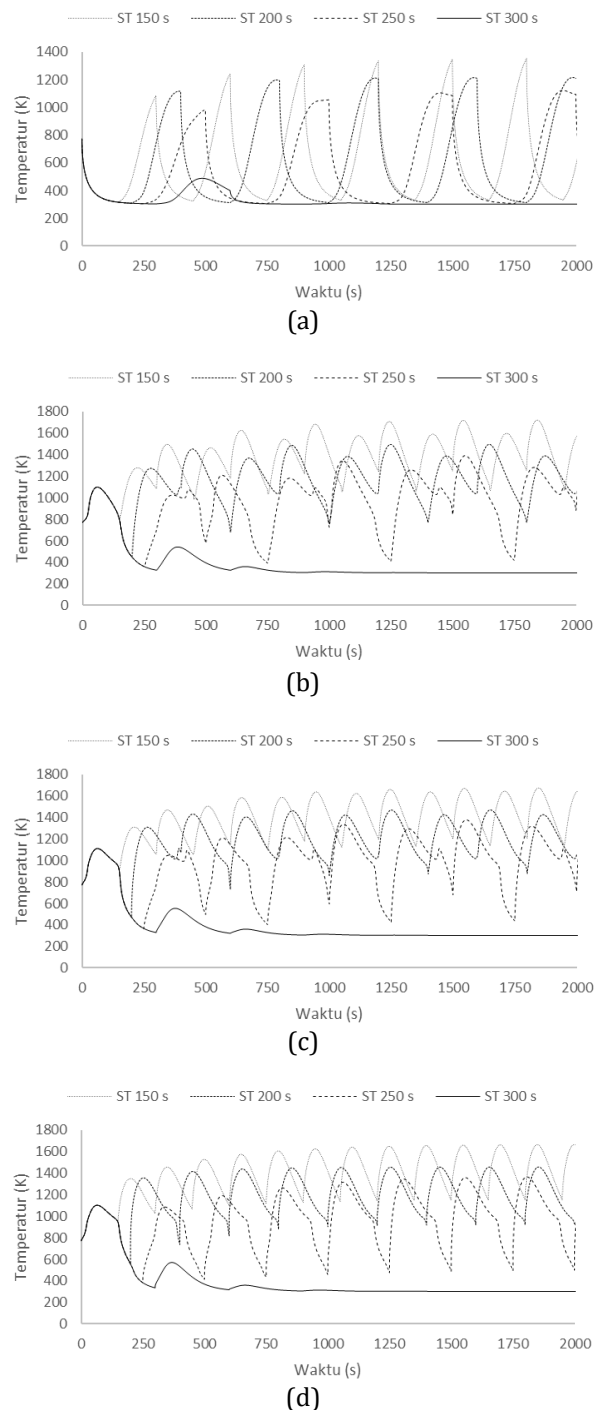
Nilai komposisi air sebesar 3 %v pada gas umpan metana dengan nilai konsentrasi gas metana sebesar 0,5 %v akan digunakan untuk variasi pada variabel simulasi berikutnya, karena nilai komposisi dan konsentrasi ini mampu menghasilkan operasi secara *auto-thermal* dan tidak menghasilkan nilai temperatur yang terlalu tinggi (nilai maksimum temperatur yang dihasilkan oleh reaktor sebesar 1400 °K pada *interface inert-katalis*) sehingga dapat menjaga *lifetime* dari reaktor dengan material *stainless steel*, serta nilai konversi metana yang dihasilkan mampu mencapai 100%.

3.3. Pengaruh *Switching Time*

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Kurniawan et al. (2018) diketahui bahwa nilai *switching time* berpengaruh terhadap unjuk kerja RFR terkait sifat *auto-thermal*, kestabilan panas RFR, dan juga nilai konversi metana yang dihasilkan. Dalam penelitian ini diberikan beberapa variasi nilai *switching time* yaitu sebesar 150, 200, 250, dan 300 detik. Konsentrasi gas umpan metana sebesar 0,5 %v, dengan nilai komposisi air sebesar 3 %v pada gas umpan metana (asumsi konsentrasi gas umpan metana dan komposisi air pada gas umpan metana adalah tetap/konstan). Temperatur gas umpan sebesar 30 °C, laju alir gas umpan 0,7 m/s, dan tekanan operasi 1,5 atm, serta temperatur pemanasan awal unggun *inert* dan unggun katalis dilakukan pada temperatur 500 °C.

Terlihat dalam hasil simulasi yang telah dilakukan, bahwa nilai *switching time* mempunyai pengaruh terhadap profil temperatur RFR. Nilai *switching time* berbanding terbalik terhadap nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Semakin kecil nilai *switching time*, maka akan semakin meningkatkan nilai temperatur yang dihasilkan reaktor, atau dengan kata lain mampu meningkatkan unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR (Gambar 7).

Dalam penelitian ini didapatkan bahwa jika RFR diberikan nilai *switching time* di atas 250 detik dapat menyebabkan operasi *auto-thermal* pada RFR tidak dapat terjadi (reaktor padam), sedangkan jika RFR diberikan nilai *switching time* di bawah atau sama dengan 250 detik operasi *auto-thermal* pada RFR masih dapat terjadi. Sehingga dapat dikatakan bahwa nilai *switching time* sebesar 250 detik merupakan nilai maksimum *switching time* untuk konsentrasi gas umpan metana sebesar 0,5 %v, dengan nilai komposisi air sebesar 3 %v pada gas umpan metana.



Gambar 7. Pengaruh *switching time* terhadap profil temperatur RFR pada: a) ujung reaktor, b) *interface inert-katalis*, c) *interface katalis-ruang kosong*, dan d) ruang kosong

Selain dilakukan simulasi terkait profil temperatur reaktor, dilakukan pula simulasi terhadap profil konversi metana. Terlihat dalam hasil simulasi yang telah dilakukan, bahwa nilai konversi metana mampu mencapai 100 % jika RFR diberikan nilai *switching time* di bawah atau sama dengan 250 detik (Gambar 8).

Karena seperti yang telah dibahas sebelumnya, bahwa nilai konversi metana sangat dipengaruhi oleh temperatur yang dihasilkan reaktor terkait kondisi

operasi *auto-thermal* dan kestabilan panas dari RFR. Jika kondisi operasi *auto-thermal* dapat terjadi atau dengan kata lain reaktor tidak padam, maka nilai konversi metana mampu mencapai 100%. Namun parameter yang perlu diperhatikan adalah terkait temperatur yang dihasilkan oleh reaktor, karena semakin tinggi nilai temperatur yang dihasilkan, maka akan semakin mengurangi *lifetime* dari reaktor, terutama jika reaktor menggunakan material berbahan *steel* yang cenderung tidak tahan terhadap temperatur panas yang cukup ekstrim.

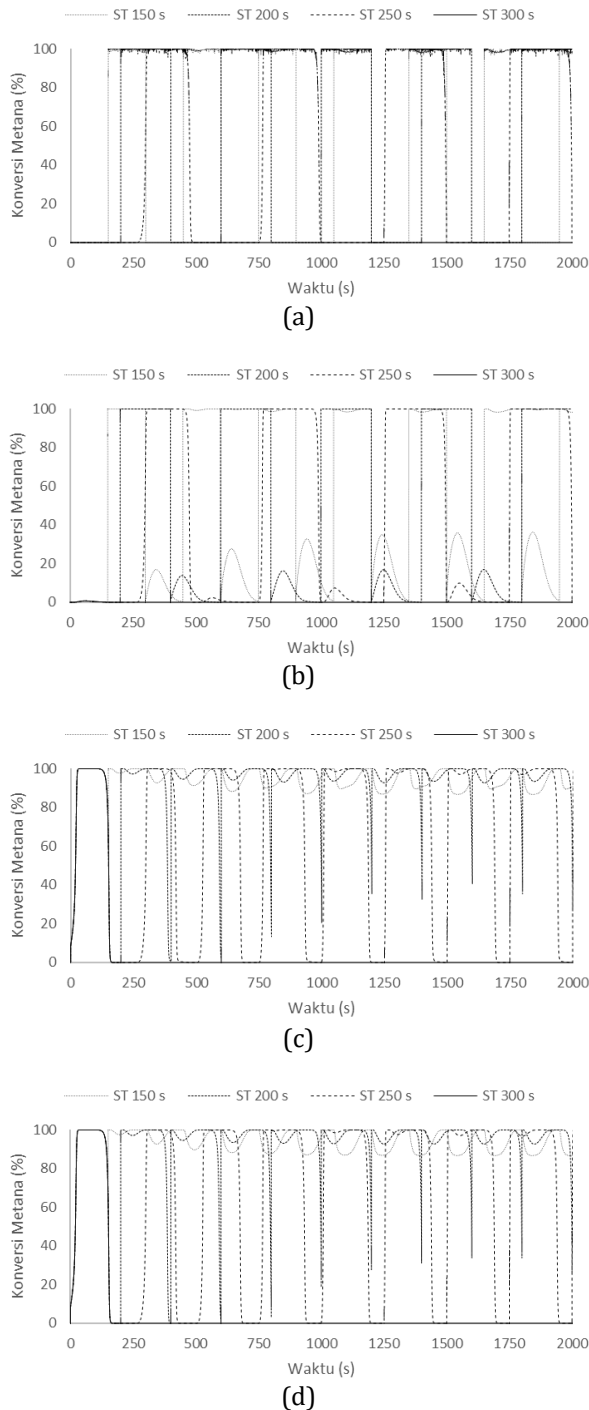
inert-katalis, c) *interface* katalis–ruang kosong, dan d) ruang kosong.

KESIMPULAN

Konsentrasi gas umpan metana, komposisi air pada gas umpan metana, dan pemilihan nilai ST pada RFR menjadi parameter paling penting dalam pengoperasian RFR terhadap unjuk kerja reaktor terkait sifat *auto-thermal* dan kestabilan panas RFR. Nilai konsentrasi gas umpan metana berbanding lurus terhadap nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Namun, nilai komposisi air pada gas umpan metana dan ST berbanding terbalik terhadap nilai temperatur yang dihasilkan reaktor. Nilai konversi metana sangat dipengaruhi oleh temperatur yang dihasilkan reaktor.

4. NOTASI LAMBANG

- a = luas permukaan spesifik (m^2/m^3)
- C_g = konsentrasi molar fase gas (mol/m^3)
- C_{pg} = kapasitas panas fase gas ($J/kg.K$)
- C_{ps} = kapasitas panas fase solid ($J/kg.K$)
- D_{eff} = koefisien difusi efektif (m^2/s)
- d = diameter reaktor (m)
- K_{inh} = konstanta kesetimbangan air pada katalis ($/Pa$)
- k_{eff} = konduktifitas panas efektif ($W/m.K$)
- k_w = konstanta kinetika metana ($mol/kg.s.Pa$)
- p_{CH_4} = tekanan parsial metana (Pa)
- p_{H_2O} = tekanan parsial air (Pa)
- R = konstanta gas ideal ($J/mol.K$)
- r_{CH_4} = laju reaksi metana ($mol/m^3.s$)
- T_g = temperatur fase gas (K)
- T_{ruang} = temperatur ruang (K)
- T_s = temperatur fase solid (K)
- t = waktu (s)
- $U_{overall}$ = koefisien perpindahan panas total ($W/m^2.K$)
- u = kecepatan *superficial* (m/s)
- x = konversi metana
- z = jarak *axial* (m)
- α = koefisien perpindahan panas ($W/m^2.K$)
- ϵ = fraksi kosong unggun
- ϵ_p = fraksi kosong partikel katalis
- ϵ_s = fraksi fase solid
- ΔH_r = perubahan energi panas (J/mol)
- ρ_g = densitas fase gas (kg/m^3)
- ρ_s = densitas fase solid (kg/m^3)



Gambar 8. Pengaruh *switching time* terhadap konversi metana pada: a) ujung reaktor, b) *interface*

5. DAFTAR PUSTAKA

Balakotaiah, V., Sun, Z., & West, D. H. (2019). Autothermal reactor design for catalytic partial oxidations. *Chemical Engineering Journal*, 374, 1403-1419.

Díaz, E., Fernández, J., Ordóñez, S., Canto, N., & González, A. (2012). Carbon and ecological footprints as tools for evaluating the environmental impact of coal mine ventilation air. *Ecological indicators*, 18, 126-130.

Effendy, M., Wardhono, E., & Arsana, I. (2019). Effect of intraparticle diffusion-reactions at reverse flow reactors. *Cases study: Methane catalytic oxidation*.

Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.

- Fernández, J., Marín, P., Díez, F. V., & Ordóñez, S. (2015a). Coal mine ventilation air methane combustion in a catalytic reverse flow reactor: Influence of emission humidity. *Fuel Processing Technology*, 133, 202-209.
- Fernández, J., Marín, P., Díez, F. V., & Ordóñez, S. (2015b). Experimental demonstration and modeling of an adsorption-enhanced reverse flow reactor for the catalytic combustion of coal mine ventilation air methane. *Chemical Engineering Journal*, 279, 198-206.
- Fernández, J., Marín, P., Díez, F. V., & Ordóñez, S. (2016). Combustion of coal mine ventilation air methane in a regenerative combustor with integrated adsorption: Reactor design and optimization. *Applied Thermal Engineering*, 102, 167-175.
- Houghton, J. (2009). *Global warming: the complete briefing*: Cambridge university press.
- Karakurt, I., Aydin, G., & Aydiner, K. (2011). Mine ventilation air methane as a sustainable energy source. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1042-1049.
- Kurniawan, T., Budhi, Y. W., & Bindar, Y. (2018). Reverse Flow Reactor for Catalytic Oxidation of Lean Methane. *World Chemical Engineering Journal*, 2(1), 21-26.
- Marín, P., Díez, F. V., & Ordóñez, S. (2019). Reverse flow reactors as sustainable devices for performing exothermic reactions: Applications and engineering aspects. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 135, 175-189.
- Marín, P., Ordóñez, S., & Díez, F. V. (2009). Procedures for heat recovery in the catalytic combustion of lean methane-air mixtures in a reverse flow reactor. *Chemical Engineering Journal*, 147(2-3), 356-365.
- Matros, Y. S., & Bunimovich, G. A. (1996). Reverse-flow operation in fixed bed catalytic reactors. *Catalysis Reviews*, 38(1), 1-68.
- Parentis, M. L., Bonini, N. A., & Gonzo, E. E. (2011). Effectiveness factor calculation and monolith reactor simulation with non-uniform washcoat and arbitrary catalytic activity distribution.
- Setiawan, A., Kennedy, E. M., & Stockenhuber, M. (2017). Development of Combustion Technology for Methane Emitted from Coal-Mine Ventilation Air Systems. *Energy Technology*, 5(4), 521-538.
- Wang, S., Gao, D., & Wang, S. (2014). Steady and transient characteristics of catalytic flow reverse reactor integrated with central heat exchanger. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(32), 12644-12654.
- Wang, Y., Man, C., & Che, D. (2010). Catalytic combustion of ventilation air methane in a reverse-flow reactor. *Energy & fuels*, 24(9), 4841-4848.