



## Intensifikasi Proses dalam Sistem Reaksi dan Pemisahan Dinamik

**Yogi Wibisono Budhi**

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha 10,  
Bandung 40132, Indonesia

\*E-mail: [Y.Wibisono@che.itb.ac.id](mailto:Y.Wibisono@che.itb.ac.id)

### **Abstract**

*Process Intensification (PI) presents a set of often substantially innovative and creative methods in process equipment design and operation method, which could bring considerable benefits in term of process performance. The process intensification in principle is a paradigm shift of thinking when compared to traditional processes. Transient reactors and separations are receiving increased attention due to its capability to influence the temperature and concentration profiles inside the fixed bed as well as main product recovery, leading to the possibility for improvement of conversion, selectivity, and recovery. The application of the transient fixed bed and membrane reactors is also gaining broad interest as an efficient method for energy saving, lower light-off temperature, and higher recovery. This technology may be considered as an alternative to various catalytic reactions in which heat storage and catalytic coverage can be manipulated for the process improvement. In this paper, possible operations and methods of fixed bed catalytic reactor and membrane operation are presented. Examples are given here for modulation of feed gas in catalytic converter and membrane, and application of reverse flow reactor. Overall, the process intensification opens a new way for improvement of process performance when proper design and operation can be developed.*

**Keywords:** *converter; dynamic; membrane; reactor; reverse flow*

### **Pendahuluan**

Intensifikasi proses merupakan kajian baru yang telah membuka khazanah dan menarik minat yang sangat tinggi dalam bidang teknik kimia (Stankiewicz dan Drinkenburg, 2004; Stankiewicz dan Moulijn, 2000). Dalam perkembangan terkini, ilmu intensifikasi proses mulai dimekarkan secara terstruktur menurut jalur pemutakhiran peralatan maupun jalur kebaruan metodologi, sehingga mampu memberikan ciri yang sangat berbeda jika dibandingkan dengan teknologi tradisional. Beberapa contoh intensifikasi proses yang sedang dikembangkan adalah reaktor mikro (pemutakhiran peralatan) (Ebrahimi dan Rahman, 2017) untuk menghasilkan gas hidrogen secara insitu dengan menggunakan bahan baku etanol (Budhi dkk., 2014; Budhi dkk., 2015; Zheng dkk., 2019), reaktor aliran bolak-balik (kebaruan metodologi dan peralatan) untuk mengkonversikan tar secara katalitik ataupun emisi gas metana fugitif (Hayes, 2004; Litto dkk., 2006; Marin dkk., 2005; Salomons dkk., 2004; Budhi dkk., 2008; Effendy dkk., 2008), metode *cold start-up* konverter katalitik kendaraan bermotor (kebaruan metodologi) (Budhi dkk.; 2019), pengumpulan dinamik pemisahan gas menggunakan membran (kebaruan metodologi) (Budhi dkk., 2011; 2015; 2020) dan lain-lain. Mengacu pada tuntutan untuk memperbaiki kinerja proses secara berarti di industri kimia dan dengan dikembangkannya kaidah intensifikasi proses, pengembangan intensifikasi proses dalam bidang teknik kimia dinilai sangat relevan pada saat ini. Di dalam makalah ini, dasar-dasar intensifikasi proses akan dikemukakan secara komprehensif yang mengacu dari berbagai pustaka dan pengalaman pribadi penulis baik dalam dunia pendidikan maupun penelitian. Secara umum, penyampaian makalah tentang intensifikasi proses ini dipandang sangat perlu terkait dengan kebutuhan pengembangan proses, mulai dari laboratorium hingga industri kimia. Karena itu, makalah ini juga ditujukan untuk memberikan sebuah pandangan akan pentingnya materi intensifikasi proses bagi insan teknik kimia sebagai wawasan yang penting dalam dunia kerja, baik di industri kimia, lembaga penelitian, dan pendidikan.

Adapun lingkup kajian yang menjadi pokok perhatian dalam makalah ini adalah pengertian dasar, sejarah perkembangan intensifikasi proses, manfaat dan struktur intensifikasi proses, dan signifikansi intensifikasi proses dalam teknik kimia. Bagi generasi muda, harapan yang diinginkan adalah dihasilkannya penguasaan dan kemampuan menerapkan serta mengembangkan pengetahuan dan ketrampilan di bidang teknik kimia dengan motivasi, inovasi, dan kreativitas yang terpacu untuk mengembangkan teknologi proses secara kompetitif.





## Pengertian Intensifikasi Proses

Salah satu kecenderungan yang sangat penting dalam pengembangan teknologi proses adalah intensifikasi proses (*Process Intensification*). Intensifikasi proses telah menarik perhatian banyak peneliti di berbagai negara. Untuk menjembatani pertukaran informasi dan ajang diskusi para peneliti dan praktisi, berbagai seminar internasional yang bertemakan intensifikasi proses telah dilakukan. Di samping itu, sejumlah aplikasi intensifikasi proses skala komersial juga telah terjadi. Intensifikasi proses merupakan kaidah baru yang dikembangkan di industri kimia untuk memperbaiki kinerja proses secara berarti. Perbaikan kinerja proses yang dimaksud dalam konteks ini harus memiliki angka kelipatan yang sangat besar, atau bermakna besar sekalipun secara kuantitatif mempunyai kelipatan yang relatif kecil. Intensifikasi proses merupakan metode pengembangan proses dan sistem pemroses yang bersifat inovatif dan kreatif yang mampu membawa perubahan secara substansial dalam fabrikasi (bio)-kimia, terutama jika dibandingkan dengan metode proses atau peralatan yang digunakan saat ini (konvensional). Intensifikasi proses bahkan telah menunjukkan kecenderungan yang banyak diminati oleh ilmuwan dan praktisi dalam bidang teknik kimia dan teknologi proses yang ditunjukkan dengan munculnya kompetisi guna menghasilkan teknologi yang lebih unggul. Filosofi intensifikasi proses telah dikarakteristikan secara tradisional dengan kata kunci: *smaller, cheaper, safer, dan slicker* (Stankiewicz dan Moulijn, 2003).

Beberapa pengembangan intensifikasi proses menuliskan makna intensifikasi proses dalam slogan "*using much less to produce much more*" (Stankiewicz dan Moulijn, 2003). "*Using much less*" dapat diartikan sebagai penggunaan bahan baku, waktu proses, ruang, konsumsi energi, investasi dll. yang lebih sedikit dibandingkan cara konvensional; sedangkan "*produce much more*" dapat diartikan sebagai derajat konversi, efisiensi, selektivitas, produktivitas, laju perpindahan panas dan massa dll. Dalam beberapa kasus, perubahan persentase dapat mencapai puluhan hingga ribuan kali lebih besar. Perubahan yang hanya beberapa persen seringkali tidak dapat dikategorikan sebagai hasil dari intensifikasi proses.

## Sejarah Perkembangan Intensifikasi Proses

Menurut Miriam-Webster's Collegiate Dictionary, kata intensif (intensive) mungkin telah muncul sekitar abad ke-15. Tidak berselang lama kemudian, tepatnya pada puncak masa Renaissance, yaitu ketika Georgius Agricola mempublikasikan bukunya yang terkenal *De Re Metallica*, yaitu buku yang dikenal sebagai buku teks komprehensif yang pertama pada rekayasa pertambangan dan metalurgi. *De Re Metallica* kaya akan ilustrasi potongan-potongan kayu yang menunjukkan peralatan dan metode proses yang digunakan pada zaman Agricola. Dalam berbagai potongan kayu tersebut, banyak dijumpai secara jelas adanya pemikiran yang berorientasi elemen-elemen yang menggambarkan rangkaian unit proses suatu pabrik kimia (Stankiewicz dan Moulijn, 2003).

Dalam literatur ilmiah, istilah intensifikasi mulai muncul pada pertengahan tahun 1960-an dan awal 1970-an, yang sebagian besar publikasinya berasal dari kawasan Eropa Timur dengan kajian pada pemrosesan metalurgi, dan bukan pada pemrosesan kimia. Tentu saja, makalah-makalah tersebut masih memahami intensifikasi proses sebagai perbaikan proses (*process improvement*). Hal yang sama juga terjadi pada artikel pertama yang berorientasi pada industri kimia yang juga berasal dari Eropa Timur bahwa pemahaman intensifikasi proses masih tertuju pada perbaikan proses.

Kelahiran intensifikasi proses sebagai disiplin teknik kimia muncul beberapa tahun kemudian di Inggris yang ditandai dengan publikasi dari Colin Ramshaw (1983) dari ICI New Science Group yang menggambarkan aplikasi medan sentrifugal (disebut "HiGee") dalam proses distilasi. Beberapa bulan kemudian, Annual Research Meeting bertajuk *Process Intensification* berlangsung di UMIST, Manchester. Yang menarik dalam pertemuan itu adalah artikel pertama yang disajikan membahas tentang pemrosesan biji emas menggunakan metode yang intensif – sebuah kebetulan yang aneh. Baik dalam artikel Ramshaw maupun laporan dari seminar di UMIST, definisi pertama dari intensifikasi proses berkenaan dengan upaya pembuatan alat yang lebih kompak yang ukurannya dapat direduksi dalam order 2-3 kalinya.

Hingga tahun 1990-an, intensifikasi proses masih merupakan bagian dari disiplin-disiplin di Inggris dengan fokus pada 4 hal utama: penggunaan gaya sentrifugal, alat perpindahan panas yang kompak, pencampuran yang intensif, dan teknologi-teknologi yang dikombinasi. Mulai pada masa-masa tersebut, intensifikasi proses mulai menjadi bisnis internasional yang mendorong para peneliti untuk mengembangkan bidang-bidang baru yang terkait. Di Belanda, Technische Universiteit Delft (TUD) yang bekerjasama dengan DSM mengembangkan sebuah reaktor terstruktur. Grup lain di TUD mengembangkan teknologi adsorpsi sentrifugal. Di Perancis, Greth CEN melangsungkan penelitian dengan topik alat penukar panas yang kompak. Di Jerman, penelitian tentang microtechnology dilakukan di Institut für Mikrotechnik Mainz. Di USA, sejumlah pusat penelitian mengembangkan peralatan baru seperti microchannel heat exchanger (Pacific Northwest National Laboratory) dan microreactor (MIT). Di Indonesia, penelitian tentang reaktor tak tunak mulai dikembangkan sejak 2005 yang terdiri dari reaktor aliran bolak-balik (*reverse flow reactor*) dan *automotive catalytic converter*. Reaktor aliran bolak-balik dikembangkan untuk mengolah tar yang terkandung di dalam gas produser hasil gasifikasi biomassa. Selain itu, reaktor aliran bolak-balik juga dikembangkan untuk menyingkirkan emisi metan yang sangat encer. Gas metan ini, jika tidak diolah, dapat menyebabkan efek rumah kaca yang tingkat bahayanya 21 kali lebih besar daripada CO<sub>2</sub>. Reaktor aliran bolak-balik yang digunakan dapat bersifat otothermal dan bahkan dapat menghasilkan sejumlah panas yang cukup berarti. Pada saat ini, reaktor aliran bolak-balik



untuk mengkonversikan emisi metan dan VOC (*Volatile Organic Compound*) sebagaimana yang sedang dikembangkan di Institut Teknologi Bandung dititik-beratkan pada pengembangan rancangan reaktor (umpan samping dan modifikasi lapisan katalis-inert) dan metode operasi reaktor (modulasi komposisi).

Pada tahun 2007, para peneliti di bidang intensifikasi proses di Belanda memotori *European Roadmap for Process Intensification* yang mengundang ahli-ahli di berbagai bidang dari berbagai negara. Dr. Budhi dari Teknik Kimia ITB dipercayai sebagai salah satu generasi muda dan sebagai *leading expert* di bidang teknologi *reverse flow reactor*, diundang untuk menyampaikan pandangannya terhadap perkembangan teknologi di bidang tersebut. Intensifikasi proses telah mengidentifikasi sekitar 70 ahli di seluruh dunia, 70 paten, berbagai publikasi ilmiah, dan 46 teknologi telah dideskripsikan oleh para ahli di bidangnya dalam sebuah "*technology report*".

Intensifikasi proses, selain telah memasuki sektor kimia komoditas, juga telah berkembang ke arah bioproses dan fermentasi. Karena itu, definisi intensifikasi proses juga telah berubah secara drastis. Intensifikasi proses tidak lagi secara eksklusif dikenal sebagai pengembangan peralatan yang berukuran sangat kecil. Saat ini, intensifikasi proses telah dipahami sebagai peralatan, teknik pemrosesan, dan pengembangan metode proses yang baru yang jika dibandingkan dengan proses konvensional dapat menawarkan perbaikan yang sangat substansial. Filosofi intensifikasi proses secara tradisional dicirikan dengan empat kata: *smaller, cheaper, safer, dan slicker*. Namun saat ini, intensifikasi proses harus dipahami dalam konteks yang lebih luas, termasuk *sustainable technology development* dan *green engineering* (Stankiewicz dan Moulijn, 2003; Harmsen, 2009).

### Manfaat dan Struktur Intensifikasi Proses

Implementasi intensifikasi proses dalam teknologi proses dapat memberikan banyak manfaat. Beberapa manfaat yang telah diidentifikasi sampai saat ini ditunjukkan dalam Gambar 1. Uraian masing-masing butir dalam diagram manfaat intensifikasi proses akan dijelaskan pada bagian berikut.



Gambar 1. Diagram manfaat intensifikasi proses.

### Ukuran Alat Lebih Kecil

Salah satu manfaat intensifikasi adalah ukuran alat menjadi lebih kecil. Hal ini dapat dilihat dari dua sudut pandang:

- Menggabungkan fungsi alat yang berbeda menjadi satu alat yang lebih kompak.
- Mereduksi ukuran alat dari skala makro menjadi skala mikro. Dalam hal ini, kapasitas produksi harus dikompensasi melalui *numbering-up* atau *scale-out*.



### **Operasi Lebih Aman**

Dalam skala yang kecil, proses produksi umumnya dapat dilakukan secara lebih terkendali, sehingga faktor keamanan operasi dapat lebih diutamakan. Selain faktor reduksi ukuran, maka pada dimensi alat yang sangat kecil tersebut, laju perpindahan panas dapat terjadi sangat cepat. Proses penyingkiran panas dapat dilakukan dengan sangat efisien, sehingga tingkat keamanan proses juga menjadi lebih baik.

### **Konsumsi Energi Lebih Sedikit**

Melalui manajemen penukaran panas atau integrasi panas, konsumsi energi dapat dikurangi secara berarti. Bahkan dengan menggunakan operasi reaktor tak tunak, temperatur umpan reaktor dapat menjadi lebih rendah. Kenaikan temperatur reaksi tidak lagi dilakukan dalam sebuah preheater, tetapi cukup dilakukan dalam sebuah rekuperator yang tersusun dari material padatan yang mempunyai kapasitas panas yang tinggi.

### **Waktu ke Pasar Lebih Cepat**

Proses konvensional menerapkan prinsip scale-up guna mencapai kapasitas produksi komersial. Adapun waktu yang diperlukan dari skala laboratorium hingga ke skala komersial adalah sangat lama, bisa berpuluh-puluh tahun. Di dalam intensifikasi proses, pencapaian skala komersial dilakukan dengan prinsip *scale-out* atau *numbering-up*, yaitu menduplikasi alat skala kecil (laboratorium) menjadi banyak hingga kapasitas komersialnya terpenuhi. Apa yang menjadi keberhasilan dalam skala laboratorium itulah yang langsung dioperasikan menjadi skala komersial, sehingga tidak diperlukan lagi waktu untuk mengembangkan proses hingga skala komersial seperti dalam proses konvensional. Keuntungan yang dapat dicapainya dapat lebih cepat diperoleh.

### **Limbah Lebih Sedikit**

Selektivitas produk reaksi pada dasarnya dapat diubah baik dengan penggantian katalis yang digunakan, kondisi operasi (terutama temperatur), dan metode operasi. Dalam hal jenis katalis dan temperatur reaksi tetap, penggantian jenis metode operasi dapat mengubah arah reaksi kimia atau selektivitas produk. Metode operasi memberi peran dalam mengubah laju reaksi lokal di dalam reaktor yang berkaitan langsung dengan selektivitas produk.

### **Citra Lebih Bagus**

Dalam bisnis komoditas kimia, pandangan manusia terhadap reputasi pabrik sangat penting. Pabrik yang memiliki citra buruk dalam hal pencemaran lingkungan akan menerima dampak yang kurang menguntungkan dalam bisnis. Di USA, hanya industri rokok dan nuklir yang mempunyai reputasi lebih buruk dibandingkan industri kimia.

### **Produktivitas Lebih Tinggi**

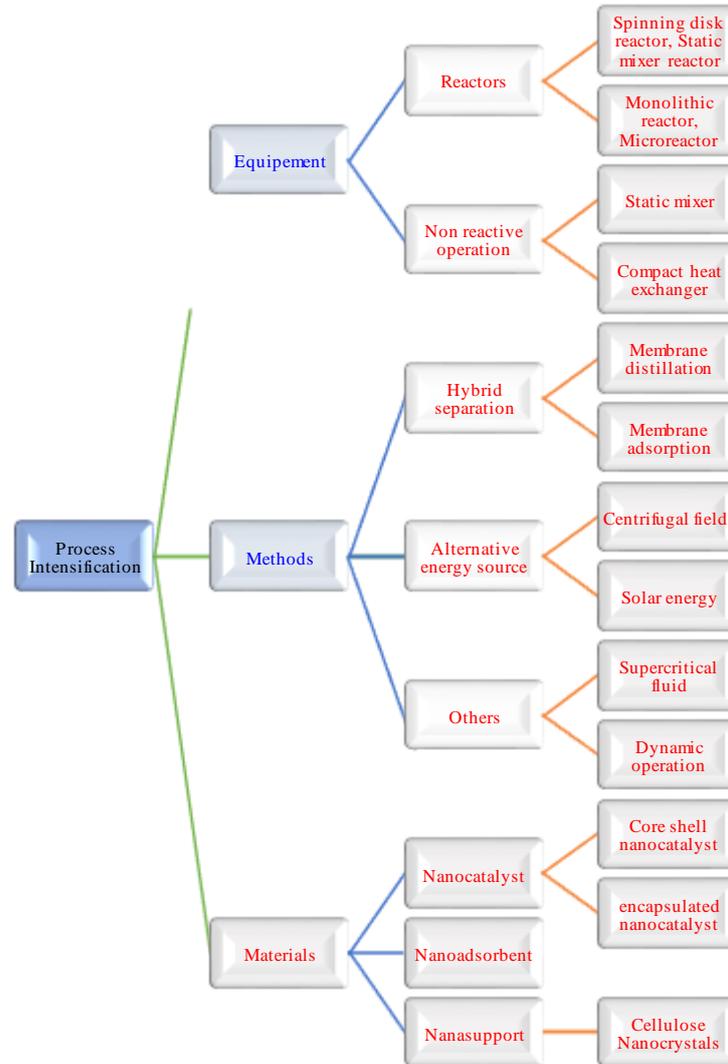
Hasil yang berlipat ganda dengan basis umpan yang sama menunjukkan adanya alur sintesis yang lebih efisien. Selektivitas ke arah produk samping dan/atau limbah dapat ditekan dan diarahkan ke produk utamanya. Di samping itu, tingkat konversi yang lebih baik juga akan mendorong produktivitas yang lebih unggul. Kedua faktor, konversi dan selektivitas, merupakan parameter yang penting dalam memperbaiki produktivitas proses.

### **Proses Lebih Murah**

Dengan adanya produktivitas yang lebih baik, efisiensi proses yang lebih tinggi, peralatan yang lebih sedikit, lahan yang lebih kecil, dan lain-lain merupakan faktor-faktor yang dapat menyebabkan proses lebih murah. Suatu proses katalitik yang menggunakan temperatur reaksi yang lebih rendah namun dengan konversi dan selektivitas yang sama juga berpeluang untuk membuat usia katalis lebih lama, sehingga biaya regenerasi atau penggantian katalis dapat ditekan.

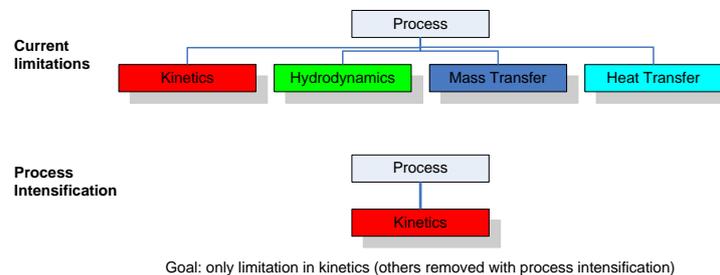
### **Struktur Intensifikasi Proses**

Struktur intensifikasi proses dapat dikategorikan menjadi dua, yaitu peralatan (hardware) dan metode (software). Peralatan-peralatan yang dimaksud meliputi reaktor-reaktor (*microreactor*, *spinning disk reactor*, *static mixer reactor*, dll.) dan alat-alat lain untuk operasi tak-reaktif (*static mixer*, *compact heat exchanger*, *rotating packed bed*, dll.). Sedangkan metode yang dimaksud meliputi reaktor multi-fungsi, pemisahan-pemisahan hibrid, sumber-sumber energi alternatif, dan teknik operasi reaktor. Gambar 2 menunjukkan struktur intensifikasi proses.



**Gambar 2.** Struktur intensifikasi proses. Pilar utama pada awalnya terdiri dari pengembangan peralatan dan metode, dan penulis menggagas pilar baru berupa pengembangan material.

Pengembangan unit proses juga dapat ditinjau dari dua sudut pandang, yaitu secara analitik dan holistik. Pengembangan proses secara analitik menitik-beratkan pada sebuah unit secara mendalam. Sebagai contoh, pengembangan sebuah reaktor mikro untuk melangsungkan reaksi fasa cair-gas dalam lapisan katalis padatan. Sebaliknya, pengembangan proses secara holistik mengarah pada kajian-kajian secara umum/universal. Sebagai contoh, integrasi proses dapat dilakukan dengan mereduksi 28 unit proses menjadi hanya 3 unit proses dalam proses pembuatan metil asetat (Eastman Chemical). Dalam kaitannya dengan “re-engineering”, intensifikasi proses telah membedakan secara jelas terhadap teknologi konvensional. Dalam melakukan suatu kajian, maka aspek yang perlu dikaji dapat terdiri dari 4 jenis, yaitu aspek kinetika, hidrodinamika, perpindahan massa, dan perpindahan panas. Sedangkan di dalam intensifikasi, maka tiga aspek terakhir bias menjadi ditiadakan (lihat Gambar 3).



**Gambar 3.** “Re-engineering” dalam intensifikasi proses. Aspek-aspek selain kinetik berlangsung sangat cepat sehingga faktor kinetik yang menjadi tahap pengendali.

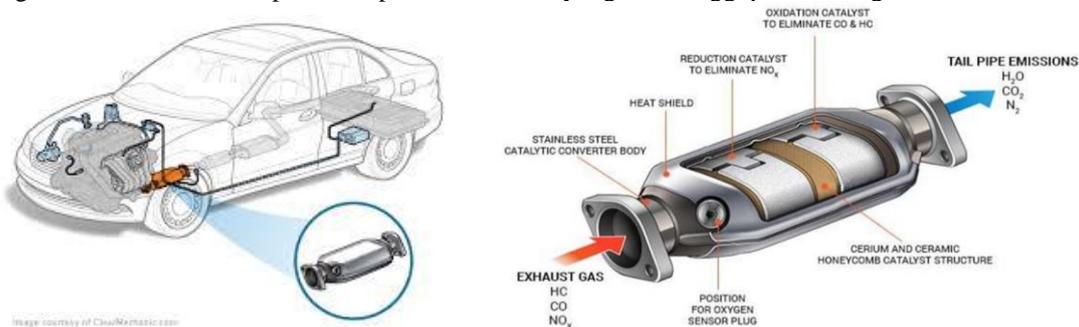
## Sistem Reaksi Dinamik

Dalam sistem reaksi kimia, konversi reaktan menjadi produk dapat dilangsungkan dalam reaktor *batch* (partaian), *plug flow reactor* atau PFR (reaktor aliran sumbat), atau *continuous stirred tank reactor* atau CSTR (reaktor tangki aliran kontinyu). Dalam keadaan natural, reaktor partaian beroperasi secara tak tunak, sedangkan PFR dan CSTR biasanya dioperasikan secara tunak. Kinerja reaksi sebenarnya dapat ditingkatkan melalui pengembangan metode operasi tak tunak karena di dalam metode operasi ini, banyak potensi variasi proses sebagai fungsi dari waktu yang dapat dikaji guna mendapatkan kinerja proses yang lebih unggul. Ada 3 cara yang dapat dilakukan, yaitu *regular admittance*, *feed cycling* atau *composition modulation*, dan *reverse flow reactor*.

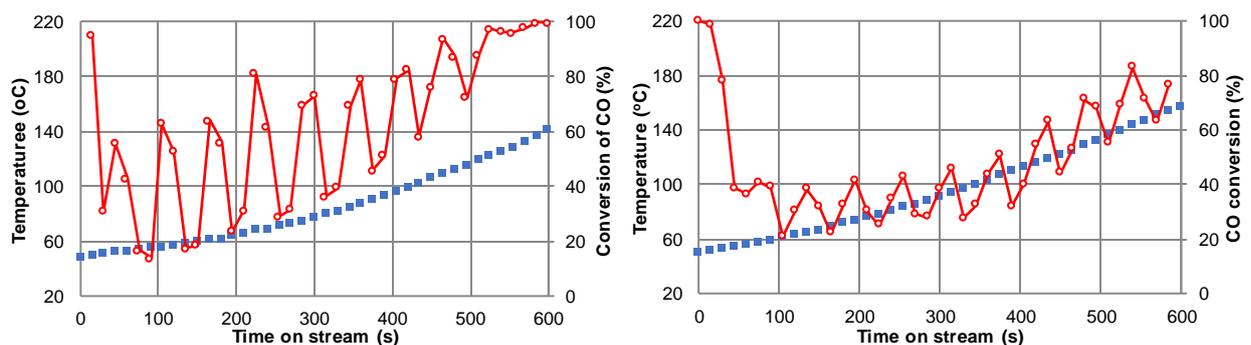
*Composition modulation* (modulasi komposisi) merupakan salah satu bentuk operasi periodik yang dilakukan dengan mengubah variabel proses aliran umpan (laju alir, temperatur, komposisi) dengan tujuan untuk menciptakan kondisi dinamik di dalam reaktor. Kondisi dinamik di dalam reaktor yang diciptakan secara sengaja tersebut dapat memberikan dampak terhadap perubahan laju reaksi lokal dan global, laju adsorpsi, laju reaksi permukaan, laju desorpsi, waktu tinggal, laju supervisial, atau juga mempengaruhi hambatan perpindahan massa dan panas eksternal. Contoh berikut merupakan modulasi umpan dalam konverter katalitik pada periode *cold start-up* untuk mengkonversikan CO menjadi CO<sub>2</sub>.

### Studi Kasus 1: Modulasi Laju Alir Umpan Konverter Katalitik

Dalam periode *cold start-up*, kinerja konverter katalitik dalam mengkonversikan emisi gas buang sangat tidak maksimum. Pada rentang suhu 25-250°C, mayoritas emisi gas buang seperti CO, NO<sub>x</sub>, dan hidrokarbon tidak terkonversikan dengan baik di dalam konverter katalitik. Hal ini disebabkan katalis (*three-way catalyst*) belum aktif, sehingga tidak dapat melangsungkan reaksi kimia. Ilustrasi posisi dan alat konverter katalitik ini disajikan dalam Gambar 4. Dalam perkembangan teknologi, modulasi umpan secara periodic dilakukan untuk mempercepat proses *cold start-up*. Gambar 5 menunjukkan inovasi modulasi umpan berupa dinamika laju alir mixed gas (emisi gas buang) dan dinamika laju alir udara. Dinamika laju alir mixed gas menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dinamika laju alir udara. Dinamika mixed gas ini sangat mempengaruhi laju adsorpsi dan desorpsi pada permukaan katalis serta menurunkan hambatan perpindahan massa eksternal. Proses adsorpsi gas CO dari fasa gas ke dalam pori katalis dan desorpsi gas CO<sub>2</sub> dari pori katalis menuju fasa gas menjadi tahap yang sangat menentukan. Dibandingkan operasi keadaan natural (tanpa modulasi), dilaporkan oleh Budhi dkk. (2019) bahwa modulasi mixed gas dengan switching time 6 s dan 30 s mampu mencapai konversi CO yang lebih tinggi pada berbagai suhu.



**Gambar 4.** Katalitik konverter dalam kendaraan bermotor biasanya diletakkan tepat di hilir mesin. Untuk jenis three-way catalyst, alat ini dapat digunakan untuk mengolah emisi gas buang yang mengandung sisa hidrokarbon, CO, dan NO<sub>x</sub>.

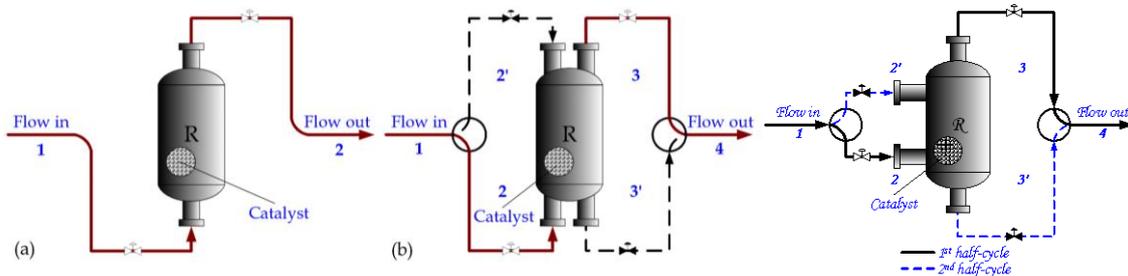


**Gambar 5.** Temperatur dan konversi CO sebagai fungsi waktu operasi ( $F/W$  0,4 mmol/s/gram) dengan laju alir udara 0,325 mmol/s dan laju alir mixed gas 0,650 mmol/s (kiri) dan laju alir mixed gas 0,325 mmol/s dan laju alir udara 0,650 mmol/s (kanan). Switching time 15 s (Budhi dkk., 2019).

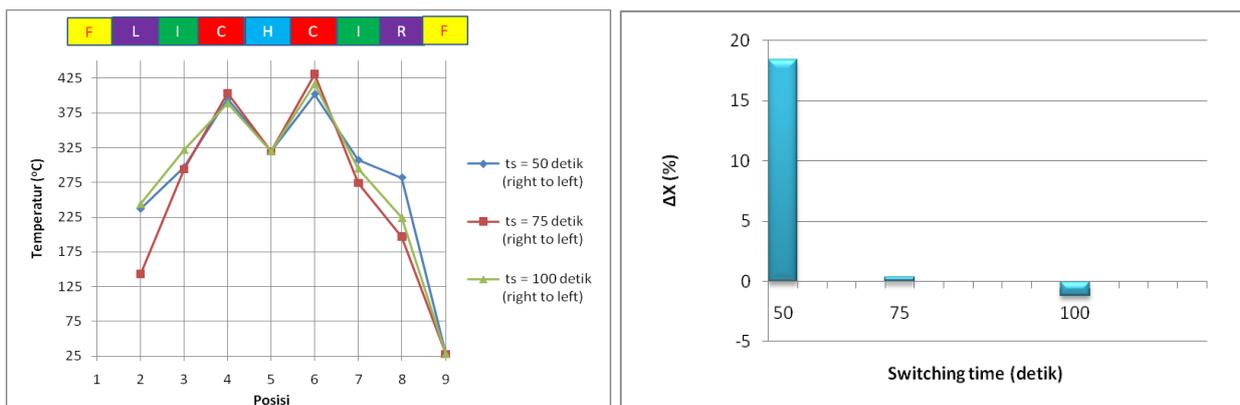
Oksidasi CO menggunakan katalis  $Pt/\gamma-Al_2O_3$  dalam reaktor unggun tetap dilakukan secara dinamik dengan teknik modulasi umpan. Modulasi gas umpan campuran memberikan light-off temperature yang lebih rendah dibandingkan kondisi start-up natural dengan suhu  $115^\circ C$ . Modulasi umpan gas campuran memberikan konversi CO rata-rata lebih tinggi daripada aliran umpan natural. Modulasi udara bertekanan memberikan konversi CO rata-rata yang lebih rendah, kecuali untuk *switching time* 15 detik. Modulasi umpan gas campuran dengan *switching time* 3 detik memberikan konversi CO rata-rata tertinggi 79,35%, sedangkan operasi natural hanya memberikan konversi CO rata-rata 48,86%. Modulasi gas umpan campuran akan sangat menarik untuk diterapkan karena kinerja reaktor yang lebih baik untuk mengurangi CO dalam emisi gas buang.

### Studi Kasus 2: Reaktor Aliran Bolak-Balik

Penggunaan *Reverse Flow Reactor* (RFR) atau reaktor aliran bolak-balik telah dikaji banyak peneliti dan dapat digunakan untuk mengoksidasi senyawa berkonsentrasi sangat rendah dengan kenaikan temperatur adiabatik yang sangat kecil. Dalam reaktor konvensional, proses oksidasi encer ini biasanya memerlukan pasokan energi dari luar, sehingga sangat mahal. RFR merupakan solusi inovatif dalam oksidasi encer ini yang mana reaktor dapat menyimpan panas di dalam unggunnya dengan model karakteristik propagasi panas yang tepat di dalam reaktor. Gambar 6 menunjukkan perbandingan diagram alir reaktor pipa konvensional, RFR, dan RFR dengan umpan samping sebagai inovasi yang lebih baru. Proses propagasi panas di dalam reaktor ini bergantung pada kapasitas panas unggun yang digunakan dan karakteristik panas reaksi yang ditentukan melalui *switching time*. Salah satu aplikasinya adalah oksidasi metana encer (*fugitive methane emission* dari tambang barubara) menjadi karbon dioksida untuk mengurangi global warming potential (GWP). Mode operasi *reverse flow* tidak selalu menghasilkan konversi reaksi yang lebih baik dibandingkan *steady state operation* jika prosedur operasi yang tepat dapat diciptakan. Variabel *switching time* merupakan salah satu parameter yang sangat berpengaruh terhadap unjuk kerja RFR, khususnya dalam propagasi panas di sepanjang reaktor dan konversi reaksi (lihat Gambar 7). 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, yaitu mencapai 18% lebih baik dibandingkan dengan kondisi operasi tunak.



**Gambar 6.** Diagram alir sederhana reaktor pipa konvensional (kiri), RFR (tengah), dan RFR dengan umpan samping (kanan) (Budhi dkk., 2004a; 2004b).



**Gambar 7.** Profil temperatur di sepanjang reaktor pada mode operasi *reverse flow* (kiri) dan data selisih konversi pada mode *reverse flow* dan *steady state* pada masing-masing *switching time* (kanan).

### Sistem Pemisahan Dinamik

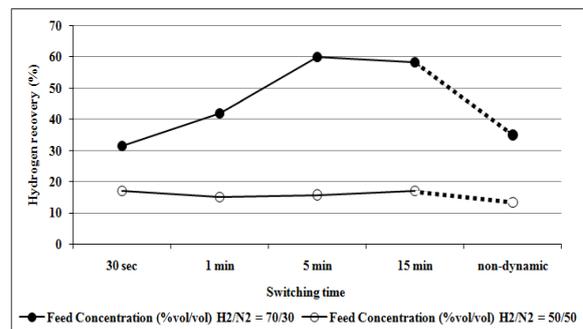
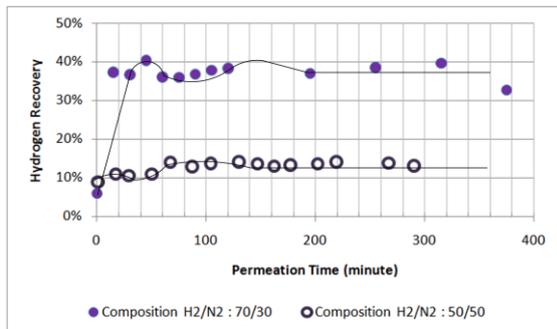
Salah satu metode pemisahan yang menarik untuk dikaji adalah pemisahan hidrogen dari campuran gas sintesis menggunakan membran berbasis Pd atau Pd-Ag, baik tanpa penyangga (Budhi dkk., 2011) maupun menggunakan penyangga  $Al_2O_3$  (Budhi dkk., 2015; 2020). Penggunaan Pd atau Pd-Ag sebagai media untuk memisahkan hidrogen

ini merupakan hal baru karena sifatnya yang *dense* (material logam tanpa pori), sehingga memungkinkan derajat perolehan yang sangat tinggi, yakni mencapai 99,99%.

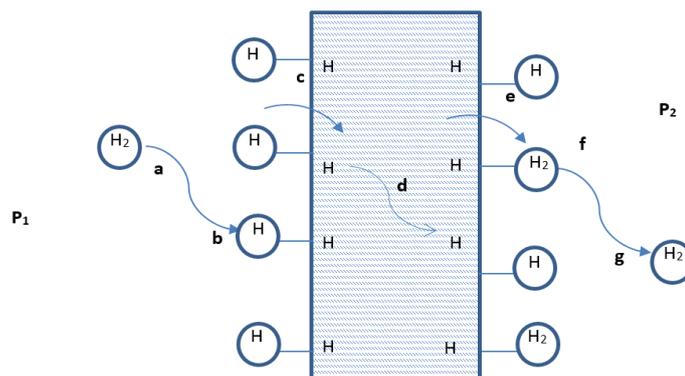
### Modulasi Laju Alir Sistem Membran Pd: Pemisahan Hidrogen

Hidrogen merupakan salah satu senyawa yang potensial di masa depan karena dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, seperti sintesis berbagai bahan kimia, umpan sel tunam untuk menghasilkan energi listrik yang ramah lingkungan dll. Hidrogen dapat diproduksi dari berbagai rute sintesis, seperti reformasi gas alam, reformasi kering gas alam, gasifikasi biomassa ataupun batubara dll. Pengkayaan kandungan hidrogen setelah proses-proses tersebut biasanya dilakukan menggunakan reaksi penggeseran gas air (Water Gas Shift Reaction). Selanjutnya, jika diperlukan hidrogen murni, maka aliran campuran gas yang mengandung hidrogen tersebut dapat diumpungkan ke dalam sistem pemisahan membran berbasis Pd. Budhi dkk. (2011, 2015, 2020) telah melakukan kajian pemisahan hidrogen dari campuran gas dengan menggunakan umpan dinamik dalam sebuah membran Pd. Tipe membran Pd yang digunakan dapat berupa Pd-Ag, Pd/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Pd-Ag/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dll.

Dalam proses pemisahan hidrogen secara konvensional menggunakan membran berbasis Pd, beberapa kendala yang ditemui adalah adanya *time lag* pada saat *start-up* dan deaktivasi membran pada saat operasi. Kedua persoalan tersebut dapat diatasi dengan berbagai cara, seperti menaikkan tekanan operasi sistem walau cara ini tergolong mahal. Budhi dkk. (2011) menggagas penerapan operasi dinamik dalam mengatasi *time lag* dan deaktivasi membran. Pada Gambar 8, proses *start-up* dan *time lag* disajikan untuk 2 jenis konsentrasi hidrogen di umpan yang berbeda. Pada saat awal, terjadi kelakuan dinamik, kemudian cenderung konstan dan di akhir mengalami kejadian deaktivasi. Fenomena *time lag* pada saat *start-up* disebabkan oleh lamanya proses adsorpsi dan besarnya hambatan perpindahan massa pada permukaan Pd sebagaimana diilustrasikan dalam Gambar 9. Sedangkan deaktivasi membran disebabkan oleh terlapisnya permukaan Pd oleh senyawa selain hidrogen, seperti nitrogen yang menghalangi proses adsorpsi pada permukaan dan permeasi pada dinding membran. Penerapan operasi dinamik menggunakan modulasi komposisi pada berbagai *switching time* memberikan pengaruh yang berarti untuk konsentrasi hidrogen di umpan yang tinggi. Pada *switching time* 1-15 menit, persen perolehan hidrogen dapat melebihi operasi tunak sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 8 (kanan).

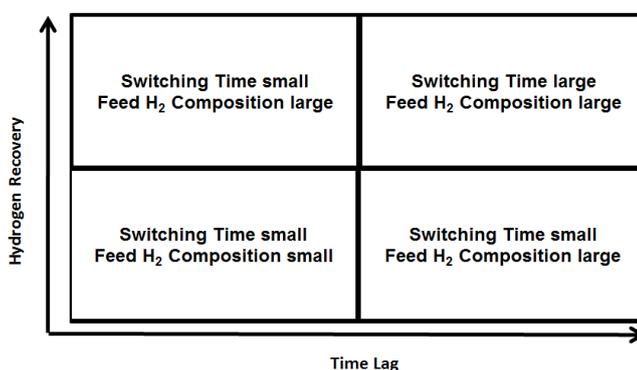


**Gambar 8.** Kelakuan dinamik permeasi hidrogen melalui membran Pd-Ag. Kondisi operasi: suhu 623 K dan tekanan atmosferik. Data pertama dimabil 30 detik setelah aliran dijalankan (Budhi dkk., 2011).



**Gambar 9.** Ilustrasi mekanisme permeasi hidrogen melalui dinding membran berbasis Pd. Disosiasi molekul H<sub>2</sub> pada permukaan sisi P1, *solution diffusion* pada dinding Pd, dan asosiasi atom H menjadi molekul H<sub>2</sub> pada sisi P2 (Zhang dkk., 2008).

Gambar 10 menunjukkan pemetaan terkait perolehan hidrogen dan time lag sebagai fungsi dari variabel proses switching time dan komposisi hidrogen umpan. Untuk mendapatkan perolehan hidrogen yang tinggi, namun dengan time lag yang singkat, maka metode operasi yang disarankan adalah pada switching time yang rendah dan komposisi hidrogen yang tinggi. Pemetaan ini dapat digunakan secara kombinasi dalam melangsungkan proses pemisahan hidrogen menggunakan membran Pd. Sebagai contoh, pada saat *start-up*, *switching time* dapat dipilih sangat singkat hingga proses mencapai keadaan stabil, kemudian *switching time* dinaikkan untuk tujuan mendapatkan perolehan hidrogen yang tinggi.



**Gambar 10.** Keterkaitan 2 parameter perolehan hidrogen dan time lag yang dipetakan dalam 4 daerah operasi yang memberikan prosedur memilih variabel switching time dan komposisi hidrogen di umpan.

### Kesimpulan

Intensifikasi proses merupakan salah satu kecenderungan yang sangat prospektif untuk dikaji dan dikembangkan dalam bidang proses. Makalah ini menyampaikan ulasan bagaimana intensifikasi proses diaplikasikan dalam bidang teknik reaksi kimia dan pemisahan yang dioperasikan secara dinamik. Pengoperasian reaktor maupun membran secara dinamik terbukti dapat meningkatkan unjuk kerja yang lebih baik dibandingkan dengan operasi dalam keadaan tunak. Contoh diberikan untuk pengoperasian konverter katalitik untuk mengolah emisi gas buang kendaraan bermotor, *reverse flow reactor* untuk mengolah emisi gas metana, dan pemisahan hidrogen menggunakan membran berbasis Pd atau Pd-Ag.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada ITB yang memberikan hibah penelitian melalui skema Riset Inovasi tahun 2007-2010, Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi melalui skema Kerjasama Luar Negeri tahun 2012-2018, Prof. Nishiyama dari Osaka University, Prof. Uemiya dan Dr. Miyamoto dari Gifu University yang telah membantu proses sintesis membran berbasis Pd dan Pd-Ag.

### Daftar Pustaka

- Budhi YW, Devianto H, Ignacia L, Mikhael HA. Process intensification of hydrogen production from ethanol using microreactor. The 3<sup>rd</sup> International Conference in Electrical Vehicular Technology (ICEVT), Solo, Indonesia; 2015
- Budhi YW, Devianto H, Mahardhika F, Ignacia L, Mikhael HA. Fluid dynamics and kinetic simulation for steam reforming of ethanol using a microchannel reactor. International Conference on Electrical Engineering and Computer Science (ICEECS), Bali, Indonesia; 2014
- Budhi YW, Gideon PE, Kristianto J, Susanto H. Studi eksperimental konversi tar menggunakan reverse flow reaktor. Pros. Seminar Teknik Kimia "Soehadi Reksowardojo", Bandung, Indonesia; 2008. (ISSN: 0854-7769).
- Budhi YW, Hoebink JHBJ, Schouten JC. Reverse flow operation with reactor side feeding: Analysis, modeling, and simulation. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2004b; 43: 6955-6963.
- Budhi YW, Jaree A, Hoebink JHBJ, Schouten JC. Simulation of reverse flow operation for manipulation of catalyst surface coverage in the selective oxidation of ammonia. *Chemical Engineering Science* 2004a; 59: 5365-5377.
- Budhi YW, Noezar I, Aldiansyah F, Kemala PV, Padama AAB, Kasai H. Forced unsteady state operation to improve H<sub>2</sub> permeability through Pd-Ag membrane during start-up. *International Journal of Hydrogen Energy* 2011; 36 (23): 15372-15381.
- Budhi YW, Putri AK, Nashira A. Forced unsteady state operation of a catalytic converter during cold start-up for oxidizing CO over Pt/ $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. *Asia Pacific Conference on Chemical Engineering*, Sapporo, Japan; 2019
- Budhi YW, Ronaldo YW, Padama AAB, Kasai H, Noezar I. Forced unsteady state operation for hydrogen separation through Pd-Ag membrane after start-up. *International Journal of Hydrogen Energy* 2015; 40 (32): 10081-10089.



- Budhi YW, Suganda W, Irawan HK, Restiawaty E, Miyamoto M, Uemiya S, Nishiyama N, van Sint Annaland M. Hydrogen separation from mixed gas ( $H_2$ ,  $N_2$ ) using Pd/ $Al_2O_3$  membrane under forced unsteady state operations. *International Journal of Hydrogen Energy* 2020; 45 (16): 9821-9835, 2020
- Ebrahimi H, Rahman M. Hydrogen production in membrane microreactor using chemical looping combustion: A dynamic simulation study. *International Journal of Hydrogen Energy* 2017; 42 (1): 265-278.
- Effendy M, Budhi YW, Susanto H. Pemodelan dan simulasi reverse flow reactor untuk mengkonversikan tar menjadi  $CO$  dan  $H_2$ . *Pros. Seminar Teknik Kimia "Soehadi Reksowardojo"*, Bandung, Indonesia; 2008. (ISSN: 0854-7769).
- Harmsen, J. Process Intensification in The Petrochemicals Industry: Drivers and Hurdles for Commercial Implementation. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2009; 49(1): 70-73.
- Hayes RE. Catalytic solutions for fugitive methane emissions in oil and gas sector. *Chemical Engineering Science* 2004; 19: 4073-4080.
- Litto R, Hayes RE, Liu B. Capturing fugitive methane emissions from natural gas compressor buildings. *Journal of Environmental Management* 2006; 84(3): 347-361.
- Marín P, Ordóñez S, Díez FV. Performance of reverse flow monolithic reactor for water-gas shift reaction. *Catalysis Today* 2009; 147: S185-S190.
- Matros YuSh, Buminovich GH. Reverse flow operation in fixed bed catalytic reactors. *Catalyst Review-Science and Engineering* 1996; 38: 1-96.
- Ramshaw C. Hige distillations – an example of process intensification. *Chemical Engineering* 1983; London, 389: 13–14.
- Salomons S, Hayes RE, Poirier M, Sapoundjiev H. Modelling a reverse flow reactor for the catalytic combustion of fugitive methane emissions. *Computers and Chemical Engineering* 2004; 28: 1599–1610.
- Stankiewicz A, Drinkenburg AAH. Process intensification: history, philosophy, principles. In: Stankiewicz A, Moulijn JA, editors. *Re-engineering the chemical processing plant: process intensification*. New York/USA: Marcel Dekker, 2004
- Stankiewicz A, Moulijn JA. *Re-engineering the chemical processing plant: process intensification*. CRC Press. 2003: ISBN 9780824743024.
- Zhang X, Xiong G, Yang W. A modified electroless plating technique for thin dense palladium composite membranes with enhanced stability. *Journal of Membrane Science* 2008; 314: 226-237.
- Zheng T, Zhou W, Yu W, Ke Y, Liu Y, Liu R, Hui KS. Methanol steam reforming performance optimisation of cylindrical microreactor for hydrogen production utilising error backpropagation and genetic algorithm. *Chemical Engineering Journal* 2019; 357: 641-654.



## Lembar Tanya Jawab

**Moderator** : Bambang Sugiarto (UPN "Veteran" Yogyakarta)  
**Notulen** : Yuli Ristianingsih (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : Muahammad Irfan (UPN "Veteran" Yogyakarta)

Pertanyaan : Apakah Heat Trap didalam reaktor aliran bolak-balik menjadi alasan utama umpan bisa dimasukkan dalam suhu dibawah kondisi operasi?

Jawaban : Iya betul, karena dengan adanya sistem heat trap didalam reaktor memungkinkan sirkulasi panas secara bolak-bali. Panas yang akan realese akan disirkulasikan kembali kedalam reaktor, sehingga memungkinkan kondisi didalam reaktor mempunyai suhu tinggi. Adanya penyimpanan panas didalam reaktor ini memungkinkan umpan masuk pada suhu reaktor pada suhu rendah. Akan terjadi kontak secara langsung antara bahan baku dengan panas didalam reaktor, sehingga bahan baku akan menjadi lebih panas sesuai dengan kondisi reaksi didalam reaktor. Hal ini memungkinkan ada penghematan energi, karena bisa meminimalkan penggunaan HE sebelum reaktor.