
UJI KINERJA KATALIS ZEOLIT-Y KOMERSIAL HASIL REGENERASI TERHADAP REAKSI DEHIDRASI N-BUTANOL

Melia Laniwati Gunawan, Arry Susana Dewi, Fransisca Geronica
Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa 10, Labtek X, Bandung - 40132

Naskah diterima 19 Mei 2004, dinilai 20 Mei 2004, dan disetujui 30 Juli 2004

Abstrak

Dehidrasi n-Butanol dengan bantuan katalis asam, misalnya zeolit merupakan salah satu cara untuk memperoleh senyawa butena. Selama reaksi berlangsung, pada permukaan katalis akan terbentuk kokas yang merupakan hasil perengkahan senyawa hidrokarbon. Karena harga katalis tinggi, maka regenerasi katalis diperlukan. Regenerasi dilakukan dengan cara membakar kokas pada katalis dengan O_2 (udara). Agar semua kokas terbakar, sehingga kinerja katalis seperti semula dibutuhkan waktu tertentu. Kajian ini bertujuan untuk memperoleh waktu pembakaran kokas optimum serta mengamati kinerja katalis zeolit-Y komersial hasil regenerasi. Temperatur reaksi dan regenerasi adalah $450^\circ C$. Waktu pembakaran divariasikan dari 6 - 24 jam. Katalis diregenerasi hingga 2 kali. Uji kinerja katalis dalam mengkatalisis dehidrasi n-butanol dilakukan di dalam reaktor unggun tetap secara isothermal. Katalis segar maupun hasil regenerasi memperlihatkan kinerja yang sama terhadap dehidrasi n-butanol. Regenerasi menggunakan tungku beratmosfir udara lebih sempurna dibanding regenerasi dalam reaktor unggun tetap dengan aliran udara. Waktu regenerasi optimum pada penggunaan tungku beratmosfir udara adalah 6 jam.

Kata Kunci : Zeolit Y, Regenerasi Katalis, Dehidrasi N-butanol

Abstract

N-Butanol dehydration on acid catalyst (for example : zeolite) is an alternative route to produce butenes. This reaction is apparently followed or accompanied by cracking reaction to produce coke. The coke is deposited on the surface of catalyst and to make the catalyst loss its activity. The price of catalyst is expensive, so the catalyst regeneration is need to revert the activity of catalyst. The coke is removed by combustion using oxygen or air. The objectives of this research were to get the regeneration optimal condition and to study the catalytic performance of commercial zeolite-Y. The reaction and regeneration temperature were $450^\circ C$. The catalyst was regenerated twice from 6 until 24 hours. Performance test was carried out in the isothermal fixed bed reactor. The experiments show that catalytic performance of the fresh catalyst is similar with the regenerated catalysts. Regeneration in the atmospheric furnace is more complete than in the fixed bed reactor. The optimal regeneration time in the atmospheric furnace is 6 hours.

Key Words : Zeolite-y, Catalyst Regeneration, N-butanol Dehydration

1. Pendahuluan

Senyawa butena banyak digunakan sebagai bahan baku pembuatan MTBE (metil tertbutil eter), ETBE (etil tertbutil eter), isoprena, polimer dalam pembentukan karet sintetik dan material plastik, serta aikilat. Salah satu cara memperoleh senyawa butena adalah melalui dehidrasi N-butanol dengan katalis asam. n-Butanol dapat diperoleh melalui proses fermentasi senyawa berkarbohidrat dengan bantuan bakteri *Clostridium acetobutylicum*. Dengan demikian, proses pembuatan senyawa butena dari dehidrasi n-butanol merupakan proses yang menarik karena berbahan baku dasar sumber daya alam terbarukan.

Dehidrasi n-butanol menjadi senyawa butena membutuhkan katalis asam. Katalis asam berfasa padat lebih disukai, karena mudah dipisahkan dari campuran reaksi. Contoh katalis asam padat adalah zeolit, alumina aktif, dan lain-lain. Katalis asam yang dipilih dalam penelitian ini adalah zeolit-Y komersial, yang biasa digunakan pada proses perengkahan minyak bumi.

Dehidrasi n-butanol pada beberapa katalis asam padat (di antaranya : ZSM-5, zeolit alam asal Malang Jawa Timur, dan MCM-22) disertai reaksi perengkahan, sehingga terbentuk senyawa hidrokarbon C_1 , C_2 , C_3 , dan kokas (Melia, 2002). Pembentukan kokas ini dapat menyebabkan pori-pori dan pusat aktif katalis tersumbat atau tertutupi dan umumnya dapat menurunkan aktivitas (deaktivasi) katalis sehingga katalis tidak dapat berfungsi lagi. Proses deaktivasi katalis ini tergantung pada sifat fisik dan keasaman katalis. Harga katalis yang tinggi menyebabkan regenerasi katalis untuk mengembalikan aktivitas katalis sangat diperlukan. Seperti pada proses pengilangan minyak bumi, katalis diregenerasi untuk menyingkirkan kokas sehingga dapat dipakai kembali.

Regenerasi katalis dapat dilakukan dengan cara membakar kokas yang terdepositasi pada katalis dengan gas oksigen atau udara, sehingga karbon membentuk gas karbondioksida (CO_2) dan H_2O , semakin banyak oksigen yang berperan, jumlah kokas yang teroksidasi makin banyak pula. Secara umum, akibat regenerasi (terutama yang berulang-ulang), keaktifan katalis tidak seperti katalis segar. Itu sebabnya, sekalipun katalis dapat diregenerasi, pada suatu saat tertentu katalis tetap harus diganti.

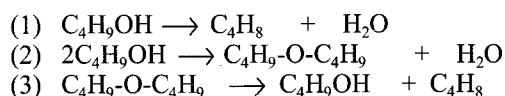
Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh kokas dan efek regenerasi terhadap aktivitas katalis tersebut. Pada saat diregenerasi, agar semua kokas tersingkir dibutuhkan waktu yang cukup untuk membakarnya. Oleh sebab itu, waktu optimum regenerasi merupakan parameter penting yang perlu dipelajari.

Kehadiran kokas pada proses perengkahan minyak bumi sangat mengganggu, sehingga katalis harus diregenerasi. Lain halnya dengan isomerisasi 1-butena pada katalis ZSM-35, karena kehadiran kokas membentuk pusat asam aromatik, sehingga proses isomerisasi tetap dapat berlangsung dengan baik (Guisnet, 1997).

Dehidrasi n-butanol menjadi butena selalu disertai dengan isomerisasi butena, dengan demikian masih ada harapan untuk tetap menghasilkan senyawa butena, sekalipun terbentuk kokas sebagai hasil reaksi samping yang menyertai dehidrasi n-butanol.

2. Fundamental

Dehidrasi n-butanol (C_4H_9OH) merupakan reaksi yang kompleks, karena selain membentuk senyawa-senyawa butena (C_4H_8) yang saling berisomerisasi, juga berpeluang membentuk senyawa dibutil eter ($C_4H_9-O-C_4H_9$).

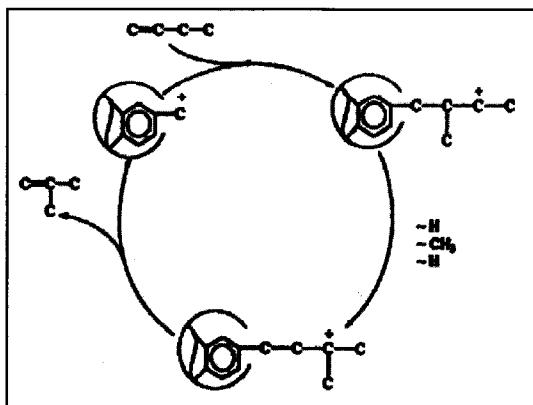


Berdasarkan data termodinamika (ΔG°), bila reaksi dilangsungkan pada suhu di atas $400^\circ C$, pembentukan senyawa butena lebih kompetitif. Pada suhu $400^\circ C$, nilai ΔG° dehidrasi n-butanol membentuk senyawa butena menjadi jauh lebih negatif (sekitar -60 kJ/mol) dibanding ke arah pembentukan dibutil eter ($-4,2$ kJ/mol) (Melia-2002).

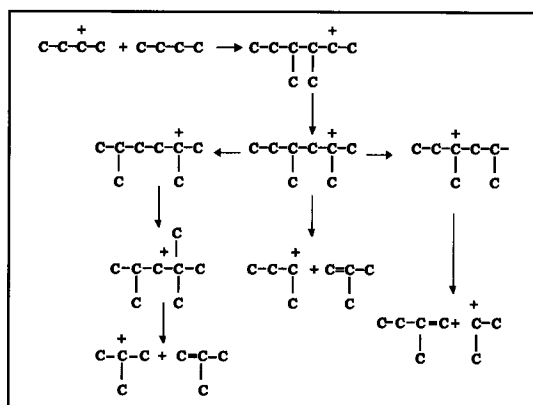
Isomer-isomer butena produk dehidrasi n-butanol adalah 1-butena, trans-2-butena, cis-2-butena, dan isobutena. Kehadiran katalis asam akan mengisomerisasi butena. Reaksi isomerisasi olefin terjadi melalui ion karbonium sebagai zat antara. Ion ini mengalami berbagai macam penataan ulang dan akhirnya berubah menjadi berbagai macam isomer. Ada dua jenis (macam) mekanisme yang diperkirakan terjadi pada isomerisasi butena, yaitu mekanisme mono-molekuler yang dilukiskan pada Gambar 1. dan bi-molekuler pada Gambar 2. Komposisi produk (senyawa-senyawa butena) bergantung pada kondisi reaksi dan katalis yang digunakan.

Untuk melangsungkan dehidrasi n-butanol dibutuhkan katalis asam. Katalis-katalis yang dapat digunakan adalah silika alumina, alumina aktif, aluminosilika amorf, dan zeolit. Katalis zeolit yang telah terbukti dapat mendehidrasi n-butanol menjadi senyawa butena adalah ZSM-5, analsim, mordenit, MCM-22, dan zeolit-Y. (Melia-2002).

Katalis yang digunakan dalam penelitian ini adalah katalis zeolit-Y komersial. Zeolit merupakan mineral kristal aluminosilikat terhidrasi dengan proton penetral kation alkali atau alkali tanah. Rumus empiris zeolit adalah $M_{2n}O \cdot Al_2O_3 \cdot xSiO_2 \cdot yH_2O$. Zeolit Y adalah katalis yang banyak digunakan pada proses perengkahan minyak bumi. Itu sebabnya, pada saat dipakai untuk mengkatalisis dehidrasi n-butanol, zeolit-Y juga mengkatalisis reaksi perengkahan, sehingga terbentuk senyawa-senyawa $C_1 - C_3$ dan kokas yang terdeposisi di permukaan aktif katalis.



Gambar 1. Mekanisme Mono-molekuler 1-Butena (Guisnet, 1997)



Gambar 2. Mekanisme Bi-molekuler 1-butena (Guisnet, 1996)

Untuk menghilangkan kokas, katalis perlu diregenerasi. Berdasarkan kajian pustaka, kondisi optimum regenerasi berkisar antara suhu 723-873 K, laju alir gas pembakar $3,33 \times 10^{-5} - 1,17 \times 10^{-4}$ m/s dan konsentrasi oksigen $2,08 \times 10^{-3} - 4,16 \times 10^{-3}$ kmol/m³ (A. Brito dkk, 1993).

3. Metodologi

Dehidrasi n-butanol (p.a) dilangsungkan secara isothermal pada suhu 450 °C dalam reaktor pipa dengan katalis zeolit -Y komersial sebagai unggun tetap. Sebagai pembawa digunakan gas nitrogen. Rangkaian reaktor dan alat pendukung lainnya disajikan dalam Gambar 3. Selama reaksi berlangsung, laju umpan dan laju gas pembawa dijaga tetap.

Produk reaksi dianalisis dengan metode *Gas Chromatography* (GC). Produk cair dianalisis dengan menggunakan kolom porapak P pada suhu 150°C dan detektor jenis pengionan (*Flame Ionization Detector*) pada suhu 300°C. Produk gas dianalisis menggunakan kolom 0,19% asam pikrat/carbopack C pada suhu 47°C dan detektor daya hantar bahang (*Thermal Conductivity Detector*) pada suhu 75°C. Kadar kokas pada katalis dianalisis secara gravimetri dengan bantuan Oven bersuhu 150 - 200 °C selama empat jam untuk menghilangkan kandungan air dan butanol yang tertinggal dalam katalis serta dilanjutkan dalam *furnace* yang bersuhu 500 °C selama 24 jam untuk membakar kokas.

Ada dua macam cara regenerasi yang dipilih. Pertama, regenerasi katalis di dalam tungku pembakar (*furnace*). Kedua, regenerasi di dalam reaktor (*in situ*). Waktu yang dibutuhkan untuk regenerasi divariasikan dari 6 - 24 jam. Katalis diregenerasi sebanyak 2 kali (dalam reaktor). Suhu reaksi maupun regenerasi 450°C. Untuk regenerasi di dalam reaktor, analisa kandungan karbon hanya dilakukan secara visual.

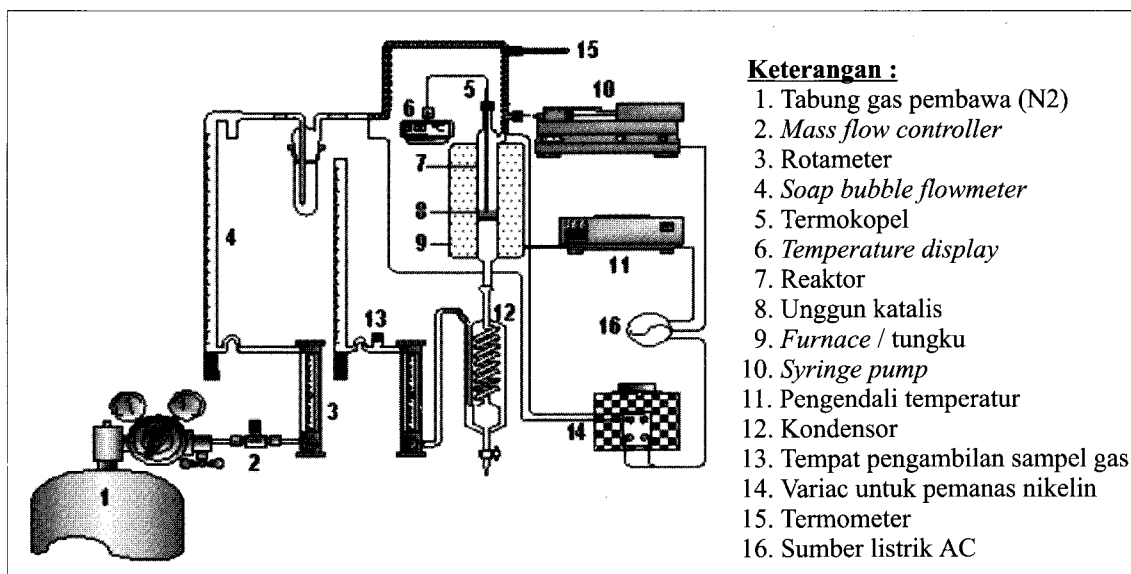
Kinerja katalis dinyatakan dalam aktivitas katalis yang diukur melalui konversi reaksi dan selektivitas produk

4. Hasil dan Diskusi

Deaktivasi Katalis

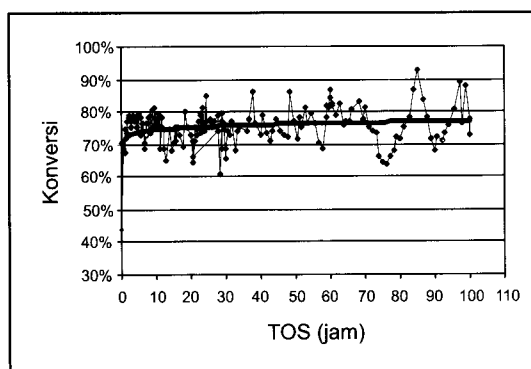
Penurunan konversi reaksi dapat dijadikan indikator adanya deaktivasi katalis. Untuk mengetahui adanya deaktivasi katalis dilakukan percobaan dehidrasi n-Butanol pada rentang waktu yang lama. Hasil pengamatan terhadap kinerja katalis selama 100 jam disajikan pada Gambar 4. Dari gambar tampak bahwa konversi reaksi belum menunjukkan penurunan hingga *time on stream* (TOS) 100 jam dan konversi reaksi cenderung konstan pada kisaran 75,35 %. Menurut A.T. Aguayo, deaktivasi karena pembentukan coke pada katalis dipengaruhi oleh sifat fisik dan keasaman katalis. sifat fisik yang dimaksud adalah ukuran pori katalis.

Zeolit -Y komersial merupakan campuran zeolit Y dengan beberapa bahan-bahan tambahan yang berbentuk amorf. Zeolit-Y tergolong zeolit



Gambar 3. Rangkaian Peralatan Sistem Reaksi

12-MR (*Member Ring*). Kelompok ini termasuk zeolit dengan pori ukuran besar (Subagjo, 1993). Pori ukuran besar dapat memperlambat katalis terdeaktivasi oleh kokas. Kokas yang terbentuk tidak cepat menutupi seluruh permukaan pori katalis, karena luas permukaannya yang besar. Pori yang tertutup oleh kokas masih memungkinkan untuk dapat dilewati oleh molekul n-butanol dan butena, sehingga kinerja katalis masih baik.



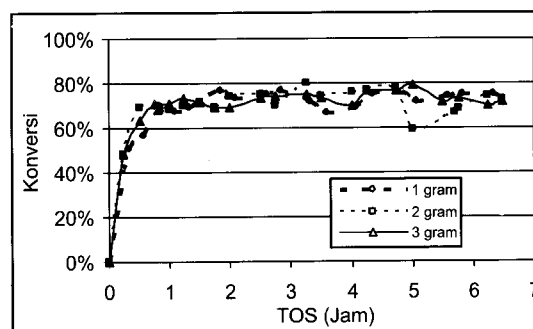
Gambar 4. Aktivitas Katalis dalam Mende-Hidrasi N-butanol pada Suhu 450°C

Secara visual, dalam waktu kurang dari 5 menit, warna katalis berubah menjadi hitam dengan kandungan karbon + 1,12 %. Hal ini disebabkan karena katalis zeolit-Y komersial memiliki keasaman yang cukup tinggi. Katalis dengan derajat keasaman tinggi mampu mempercepat pembentukan kokas. Dalam kasus ini, pembentukan kokas yang cepat ternyata tidak mempengaruhi kinerja katalis. Hal tersebut diduga karena kokas yang menutupi pusat asam membentuk kokas aromatik yang berfungsi sebagai pusat aktif yang baru (Guisnet, 1997). Pembentukan kokas berlangsung sangat cepat

pada awal berlangsungnya reaksi. Setelah reaksi berlangsung sekian waktu, pembentukan kokas cenderung konstan (Melia, 2002). Hal ini ditunjukkan oleh kandungan karbon pada selang waktu reaksi kurang dari 5 menit sebesar + 1,12 % dan untuk selang waktu reaksi selama 100 jam (6000 menit) sebesar ± 30 %. Pembentukan kokas yang konstan dengan laju rendah menyebabkan katalis semakin lambat terdeaktivasi.

Pengaruh Massa Katalis

Pada penggunaan katalis *fresh* (segar) yang berbeda massanya (variasi waktu ruang), konversi yang dihasilkan tidak memiliki perbedaan yang berarti. Selektivitas terhadap produk yang dihasilkan juga cenderung sama. Pengamatan terhadap hal tersebut ditampilkan pada Gambar 5.



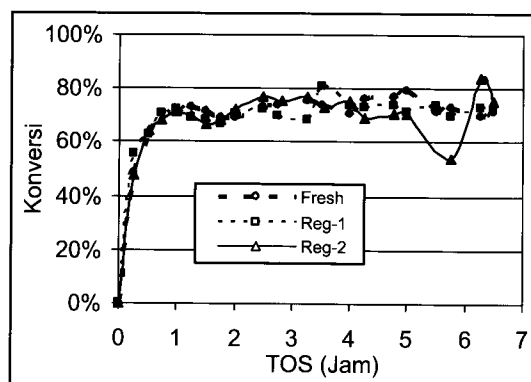
Gambar 5. Kinerja Katalis pada Variasi Massa Katalis Fresh

Jumlah katalis dalam reaktor sebanding dengan waktu tinggal (*space time*) campuran reaksi dalam reaktor. Katalis dengan unggun yang lebih tinggi memiliki *pressure drop* yang lebih besar terhadap fluida yang mengalir. Dalam hal ini,

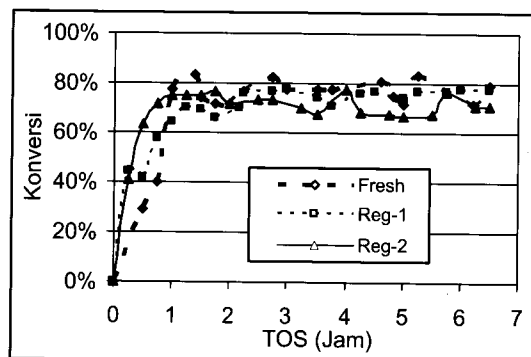
peningkatan *pressure drop* tidak mempengaruhi laju reaksi. Ini menunjukkan bahwa reaksi sudah berlangsung dalam rejim kinetik (kimia) artinya laju reaksi dikendalikan oleh proses kimia.

Aktivitas Katalis

Perbandingan aktivitas katalis *fresh* dengan katalis hasil regenerasi ditunjukkan oleh konversi reaksi pada TOS yang sama. Pada kondisi tersebut, konversi reaksi yang dicapai oleh katalis *fresh* dan katalis hasil regenerasi memiliki kecenderungan yang sama. Perbedaan perlakuan regenerasi juga tidak mempengaruhi konversi reaksi yang dicapai. Hasil percobaan tersebut disajikan pada Gambar 6 dan Gambar 7. Konversi yang dicapai adalah sekitar 70 - 71 %.



Gambar 6. Pengaruh Frekuensi Regenerasi di dalam Furnace terhadap Kinerja Katalis



Gambar 7. Pengaruh Frekuensi Regenerasi di dalam Reaktor terhadap Kinerja Katalis

Konversi reaktan ditentukan oleh jumlah pusat aktif. Deposit kokas diduga kuat dapat membentuk pusat aktif baru, sehingga perbedaan konsentrasi kokas yang terbentuk hampir tidak mempengaruhi kinerja katalis.

Perlakuan Regenerasi

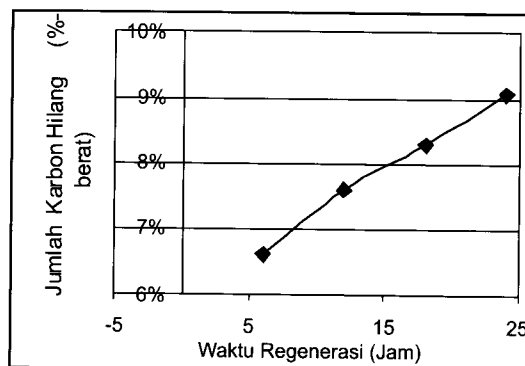
Deaktivasi katalis disebabkan oleh terbentuknya kokas pada permukaan katalis.

Pembentukan kokas dapat diindikasikan secara visual dengan perubahan warna katalis yang semula berwarna putih menjadi hitam. Kokas yang terbentuk dapat dihilangkan dengan mengalirkan udara panas. Pengaliran udara panas dalam percobaan ini dilakukan dengan dua cara, yaitu di dalam *furnace* dan *in situ* (di dalam reaktor secara langsung). Kondisi operasi regenerasi dalam *furnace* dijadikan acuan untuk melakukan regenerasi di dalam reaktor.

Setelah diregenerasi dalam *furnace*, katalis memberikan konversi reaksi sebesar 70 - 73 %, begitu pula jika regenerasi dilakukan di dalam reaktor. Dengan demikian, perbedaan perlakuan regenerasi tidak mempengaruhi kinerja katalis, yang diukur dalam besaran konversi reaksi, seperti tampak pada Gambar 6 dan Gambar 7.

Ketika regenerasi katalis dalam *furnace* dilakukan pada temperatur 400 °C, hingga waktu regenerasi 24 jam, katalis masih berwarna coklat. Perubahan warna katalis yang tidak mencapai warna asalnya (putih) menunjukkan bahwa temperatur tersebut tidak cukup optimal untuk membakar kokas dalam pori katalis.

Pada temperatur regenerasi 450 °C, secara visual warna katalis yang telah diregenerasi selama 6 jam kembali menjadi warna semula (putih). Pengaruh lama regenerasi terhadap jumlah kokas yang terbakar cukup signifikan (Gambar 8.). Waktu regenerasi yang lama memungkinkan terjadinya pembakaran yang efektif terhadap kokas yang terjebak dalam pori-pori katalis.



Gambar 8. Pengaruh Waktu Regenerasi terhadap Jumlah Karbon yang Hilang

Regenerasi yang langsung dilakukan dalam reaktor menggunakan aliran udara dengan laju tertentu (dari kompresor) dan temperatur regenerasi 450 °C hingga waktu regenerasi 24 jam menghasilkan katalis yang berwarna coklat. Regenerasi dengan cara ini tidak sebaik yang dilakukan dalam *furnace*. Diperkirakan hal tersebut terjadi karena laju udara yang lambat. Berdasarkan percobaan A. Brito dkk, kondisi

optimum regenerasi berkisar antara temperatur 450-600 °C, laju alir gas $3,33 \cdot 10^{-5}$ - $1,17 \cdot 10^{-4}$ m³/det dan konsentrasi oksigen $2,08 \cdot 10^{-3}$ - $4,16 \cdot 10^{-3}$ kmol/m³.

Jika kokas dibakar dengan udara, untuk kebutuhan O₂ yang sama pada temperatur 450 °C dan udara terdiri atas 21 % O₂ dan 79 % N₂, laju udara minimum yang diperlukan adalah 1276 mL/menit. Alat percobaan yang digunakan hanya mampu mengalirkan udara 20 mL/menit, sehingga mengakibatkan pembakaran kokas kurang sempurna.

Untuk kondisi temperatur yang sama, kinerja katalis yang diregenerasi dalam *furnace* dengan yang diregenerasi langsung di dalam reaktor tidak memberikan hasil yang sama (warnanya). Laju udara dalam *furnace* tidak (bisa) diketahui dengan pasti, sehingga regenerasi dalam reaktor tidak dapat dikondisikan sesuai dengan kondisi reaksi dalam *furnace*. Keuntungan utama regenerasi dalam reaktor (*in situ*) adalah meminimumkan kehilangan massa katalis dan waktu persiapan regenerasi-reaksi atau sebaliknya reaksi-regenerasi.

Laju alir udara yang optimum sangat diperlukan dalam regenerasi katalis. Kesempurnaan pembakaran kokas ditentukan oleh jumlah oksigen yang disuplai pada saat reaksi regenerasi tersebut. Temperatur yang tinggi diperlukan untuk memungkinkan terjadinya reaksi oksidasi kokas secara sempurna dan cepat.

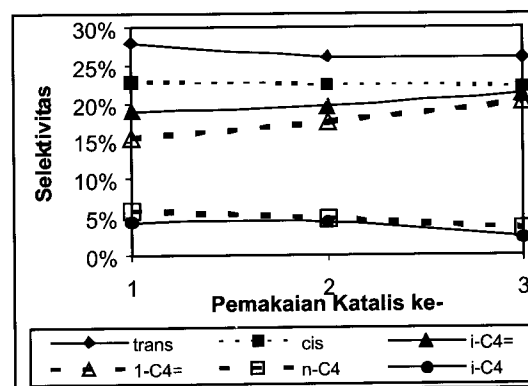
Selektivitas Produk

Reaksi dehidrasi n-butanol secara umum menghasilkan produk berupa senyawa butena dan air. Pada suhu kamar, air dan n-butanol yang tidak bereaksi berfasa cair, sedangkan butena dan produk samping (C₁ - C₄) berfasa gas, serta kokas menempel pada katalis. Jumlah dan jenis produk cair dan gas yang dihasilkan dijadikan acuan untuk mengetahui selektivitas produk yang dihasilkan oleh reaksi dehidrasi n-butanol. Hasil penelitian menunjukkan bahwa produk cair yang dihasilkan (secara umum) adalah 100% H₂O, yang berarti reaksi berlangsung sangat efektif dan sempurna bila ditinjau dari sisi reaktan (n-butanol).

Pada penggunaan katalis *fresh*, urutan selektivitas produk dari yang tertinggi adalah *trans*-2-butena yang diikuti oleh *cis*-2-butena, isobutilen, dan 1-butena. Penggunaan katalis yang telah diregenerasi menghasilkan selektivitas yang berbeda dengan penggunaan katalis *fresh*. Semakin sering katalis mengalami regenerasi, selektivitas isobutilen dan 1-butena semakin meningkat, meskipun nilainya tetap di bawah selektivitas *trans*-2-butena dan *cis*-2-butena yang

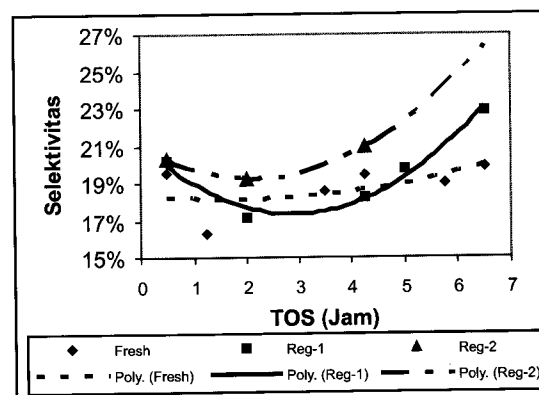
memiliki kecenderungan menurun.

Perbedaan nilai dan pola selektivitas yang dihasilkan oleh kinerja katalis *fresh* dan katalis hasil regenerasi disebabkan oleh berkurangnya selektivitas katalis tersebut terhadap produk yang dihasilkan. Penutupan sebagian pori katalis oleh kokas dapat mempengaruhi kinerja katalis. Pusat aktif asam tertutupi oleh kokas, sehingga selektivitas isobutilen meningkat. Terbentuknya kokas juga mengurangi ukuran pori, sehingga menghambat dimerisasi butena. Akibatnya, mekanisme yang dominan pada isomerisasi n-Butena akan beralih dari bi-molekuler menjadi mono molekuler (Melia, 1998).



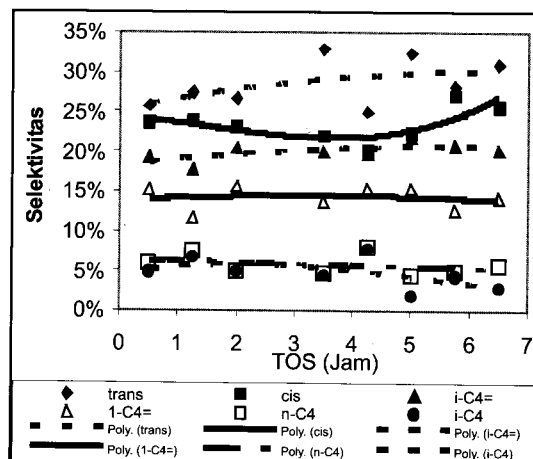
Gambar 9. Pengaruh Pemakaian Katalis terhadap Selektivitas Gas Produk

Pusat aktif tidak dapat lagi menjadi pusat aktif asam, karena telah mengikat *coke*. Aromat karbocation yang terbentuk dari molekul karbon (alkil-aromatik) yang berlokasi di pori katalis diperkirakan menjadi pusat aktif yang baru. Perbedaan mekanisme tersebut yang menyebabkan selektivitas produk yang dihasilkan berbeda sejalan dengan pembentukan kokas. Peningkatan selektivitas isobutilen seiring dengan waktu reaksi serta lama pemakaian katalis (TOS) ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Pengaruh Time On Stream (tos) terhadap Selektivitas Isobutilen

Pergeseran selektivitas produk tidak hanya terlihat pada penggunaan katalis yang telah diregenerasi. Dehidrasi n-butanol yang menggunakan katalis *fresh* juga mengalami pergeseran selektivitas produk seiring dengan bertambahnya waktu pemakaian katalis (TOS) Gambar 11. Fenomena yang terjadi ini serupa dengan penggunaan katalis hasil regenerasi.



Gambar 11. Selektivitas Gas Produk terhadap TOS untuk Reaksi menggunakan Katalis *Fresh*

5. Kesimpulan

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan dapat diambil beberapa kesimpulan. Aktivitas katalis zeolit-Y komersial dalam dehidrasi n-Butanol cukup baik dan katalis dapat digunakan hingga lebih dari 100 jam, sekalipun terbentuk kokas yang terdepositasi pada pori katalis. Adanya deposit kokas tidak mempengaruhi konversi reaksi secara signifikan.

Kokas yang terbentuk pada permukaan katalis diperkirakan membentuk pusat aktif baru yang dapat meningkatkan selektivitas terhadap isobutilen. Massa katalis (waktu tinggal dalam reaktor) tidak mempengaruhi konversi reaksi. Katalis zeolit-Y komersial hasil regenerasi memiliki aktivitas yang sama dengan katalis *fresh*. Regenerasi menggunakan *furnace* pada temperatur 450 °C dapat cukup dilakukan selama 6 jam untuk menghilangkan hampir semua kokas yang terbentuk. Regenerasi dalam reaktor dapat menghemat waktu dan materi. Pada penggunaan katalis *fresh*, urutan selektivitas produk dari yang tertinggi adalah *trans*-2-butenena yang diikuti *cis*-2-butenena, isobutilen, dan 1-butenena. Dibandingkan dengan katalis *fresh*, penggunaan katalis hasil regenerasi pertama dan kedua menyebabkan peningkatan selektivitas isobutilen dan 1-butenena (meskipun tetap di bawah nilai selektivitas *trans*-2-buten) serta penurunan selektivitas *cis*-2-butenena.

Jika dikehendaki regenerasi *in situ* (di dalam reaktor), maka suhu regenerasi harus lebih tinggi dari 450 °C dan atau laju gas pengoksidasi (udara) lebih tinggi. Untuk regenerasi pada temperatur yang lebih tinggi diperlukan reaktor dengan bahan konstruksi yang mampu dioperasikan pada temperatur lebih tinggi dari 500 °C. Agar pembakaran kokas lebih baik, sebaiknya digunakan *mass flow controller* yang dapat beroperasi pada laju yang lebih tinggi.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Dr. Subagio, Bambang Yudhistira, Hendrick, dan I Dewa G. Bayu Narayana.

Daftar Notasi /Singkatan

1-C4= = 1-butenena
cis = *cis*-2-butenena
i-C4= = isobutenena
i-C4 = isobututana
n-C4 = n-butanena
trans = *trans*-2-butenena

Daftar Pustaka

- [1]. Aguayo, A.T., A. Romero, J.M. Arandes, J. Bilbao, (1987), "Effect of The Properties of Silica-Alumina Catalysts on Their Deactivation by The Deposition of Coke", *Int. Chem. Eng.*, Vol. 27, No.4, hal. 642-648.
- [2] Brito, A., M.E. Borges, R. Arvelo, T. García, (1993), "Catalyst Characterization Variation of Several Parameters with The Deactivation/Regeneration Cycles", *Appl. Catalysis A: General*, 103, hal. 17-21.
- [3.] Guisnet M., et al, (1996), "Skeletal Isomerization of n-Butenes : I. Mechanism of n-Butene Transformation on a nondeactivated H-Ferrierite Catalyst", *J. of Catal.* 158, hal 551 - 560.
- [4.] Guisnet M., et al, (1997), " Mechanisms of The Skeletal Isomerization of n-Butene over a HFER zeolite. Influence of Coke Deposites", *Progress in Zeolite and Microporous Material, Studies in Surface Science and Catalysis*, 105, Elsevier Sci. B.V., Korea, hal 1365 - 1372.
- [5.] Jong, Sung-Jeng, Ajit R. Pradhan, Jin-Fu Wu, Tseng-Chang Tsai, Shang-Bin Liu, (1998) "On The Regeneration of Coked H-ZSM-5 Catalysts", *J. of Catal.*, 174, hal. 210-218.
- [6.] Li, Chao'en, et al, (1998), "Kinetics of CO and CO2 Evolution During The Temperature Programmed Oxidation of Coke Deposited on Cracking Catalysts", *J. of Catal.*, 178, hal. 275-283.

- [7.] Melia Laniwati, (1998), "Somerisasi Kerangka n - Buten pada Katalis ZSM-35 (Ferrierite)", *Prosiding Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia 1998*, ITS - Surabaya, hal. A09-1 - A09-6.
- [8.] Melia Laniwati, (2002), "Konversi n-Butanol menjadi Isobutilen", Disertasi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia.
- [9.] Subagjo, (1993), "Zeolit : Struktur dan sifat-sifatnya", *Warta Insinyur Kimia*, vol.7, No. 3.