

HIDROGENASI BENZEN

A. Roesyadi *)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan mempelajari unjuk kerja katalis ruthenium dan rhodium yang disupport dengan karbon aktif pada reaksi hidrogenasi benzen pada fasa cair dengan pelarut asam asetat. Percobaan dilakukan dalam reaktor bertekanan yang dilengkapi dengan pengaduk mekanis, indikator tekanan, termokopel dan jaket pemanas. Variabel penelitian adalah temperatur yaitu pada 30°C, 50°C, 75°C, 100°C, 125°C, dan 150°C. Sedangkan tekanan dilakukan pada 9 atm dan persentase katalis Metal C sebesar 5%. Analisa hasil dilakukan dengan Gas Chromatographi dengan memakai standar intern Toluen yang terpisah secara baik dengan benzen maupun sikloheksana sebagai produk reaksi hidrogenasi. Dari hasil penelitian didapat bahwa reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana dengan katalis 5 % Ruthenium yang disupport dengan karbon aktif memerlukan energi aktivasi sebesar 1416,73 kal mol, sedangkan dengan katalis Rhodium sebesar 110,202 kal mol. Energi aktivasi yang rendah, menunjukkan bahwa reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana dikontrol oleh transfer massa. Hasil sikloheksana bisa dianalisis secara kualitatif mulai pada suhu operasi 30 °C, tetapi analisis kuantitatif baru bisa dilakukan pada suhu operasi 50°C. Sikloheksana yang terbanyak diperoleh pada suhu 150°C. Dengan menganggap bahwa konsentrasi H₂ dalam larutan selalu konstan, reaksi ini mengikuti orde nol terhadap benzena.

Kata Kunci : Hidrogenasi; reaktor batch; benzena.

Pendahuluan

Pemakaian logam-logam golongan VIII untuk reaksi hidrogenasi seperti Palladium, Rhodium dan Ruthenium sebagai katalis metal (*active-site*), dewasa ini banyak dipelajari. Hal ini karena beberapa keuntungan, diantaranya logam-logam tersebut sangat stabil baik terhadap peristiwa fisis maupun terhadap peristiwa kimia. Sedangkan pemakaiannya sebagai puncak aktif katalis hanya sedikit saja yaitu berkisar antara 0.5% s/d 10%. Beberapa contoh dari pemakaian logam tersebut sebagai katalis yang sedang banyak dipelajari saat ini adalah :

- Reaksi pembentukan Ethylen glycol dari CO dan H₂
- Reaksi pembentukan Ethanol dari methanol
- Reaksi syntesa acetat dari methanol
- Reaksi pembentukan sorbitol dari glukosa dll.

Pada peristiwa hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana, pemakaian katalis di atas belum banyak dilakukan. Yang biasa dipakai sebagai katalis diantaranya Nikel, Platina, Molibdenum seperti yang dikerjakan oleh Katsuyuki Nakaro dkk (1982) dan Nasution (1985). Selama ini penelitian biasanya dilakukan dalam fasa gas, sedang penelitian hidrogenasi benzen dalam fasa cair masih jarang dilakukan. Masing-masing sistem tentunya mempunyai keuntungan serta kerugian sendiri-sendiri. Salah satu keuntungan sistem fasa cair adalah mudah

pengendalian operasinya serta dapat dilakukan pada tekanan dan suhu yang tak terlalu tinggi.

Hidrogenasi merupakan reaksi masuknya atom hidrogen kedalam suatu senyawa. Pada peristiwa hidrogenasi organik, terjadi penambahan hidrogen secara langsung pada ikatan rangkap dari molekul yang tidak jenuh sehingga dihasilkan suatu produk yang jenuh. Reaksi hidrogenasi bisa juga berlanjut dengan reaksi hidrogenolis dimana aksi hidrogen ini selain mengisi atau mensubstitusi juga dapat memecah rantai suatu senyawa organik seperti peristiwa pemecahan rantai cellulose menjadi senyawa-senyawa turunannya yang mempunyai rantai lebih pendek. Di dalam peristiwa proses cracking di kilang-kilang minyak terjadi juga proses reaksi hidrogenolis.

Pada mulanya proses hidrogenasi ini hanya dilakukan untuk mereduksi ikatan rangkap dua dari karbon pada lemak cair sehingga menjadi lemak padat. Hal ini sering disebut sebagai "*fat hardening*". Sekarang proses hidrogenasi merupakan salah satu proses yang penting dan banyak digunakan dalam pembuatan bermacam-macam senyawa organik. Industri yang menggunakan proses hidrogenasi antara lain adalah industri methanol, margarine, ammonia, dan lain-lainnya. Katalis yang dipakai pada reaksi hidrogenasi mengalami kemajuan yang sangat pesat akhir-akhir ini. Katalis berbasis Nickel yang dulunya sangat banyak digunakan di berbagai proses reaksi

*) Jurusan Teknik Kimia FTI-ITS
Kampus Sukolilo Surabaya Telp. (031) 5946240

Hidrogenasi mulai diganti dengan katalis-katalis berbasis metal terutama dari golongan VIII. Metal ini biasanya dipakai di atas suatu penyangga. Beberapa keuntungan dapat dijelaskan dengan pemakaian jenis katalis ini, antara lain pemakaian metal yang sangat sedikit, luas permukaan (penyangga) yang sangat besar, stabilitasnya yang sangat baik serta lama pakainya yang memadai. Akan tetapi pemakaian yang berlebihan katalis ini akan menyebabkan terjadinya reaksi liar yang sulit dikendalikan.

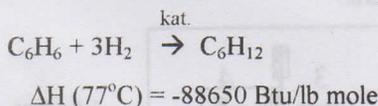
Pada reaksi hidrogenasi secara batch, biasanya berat katalis yang digunakan berkisar antara 1 sampai 10% berat dari berat senyawa yang akan dihidrogenasi. Dengan mengganti semua katalis tersebut dengan metal golongan VIII yang berpenyangga maka pemakaian metal hanya tinggal kurang dari 1 % saja terhadap total reagen.

Di dalam penelitian ini akan dipelajari unjuk kerja katalis Ruthenium dan Rhodium yang disangga dengan karbon aktif. Reaksi yang dipilih sebagai model adalah reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana pada fasa cair. Reaksi ini dipandang mudah dari segi teknis pelaksanaan maupun dari segi analisa hasil.

Salah satu proses hidrogenasi yang penting adalah reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana. Sikloheksana digunakan sebagai bahan pembuat nilon, pelarut selulosa, selain itu juga digunakan sebagai pembersih cat dan vernis.

Proses hidrogenasi benzen berlangsung selama beberapa jam, karena reaksi lambat. Proses ini berlangsung tanpa reaksi samping, kecuali jika temperatur operasi cukup tinggi (misalnya di atas 660°F) akan dihasilkan produk samping atau terjadi cracking. Benzen dapat dihidrogenasi pada (umumnya) suhu yang agak tinggi dengan menggunakan katalis Nikel, Tembaga dan Cobalt. Penggunaan katalis Platina, atau katalis-katalis yang sejenis, dapat menurunkan suhu reaksi maupun tekanan tetapi biasanya dipergunakan asam sebagai pelarut.

Reaksi hidrogenasi pada umumnya dan reaksi hidrogenasi benzen pada khususnya, relatif sederhana pengoperasiannya. Reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana pada fasa uap dapat dituliskan sebagai berikut:



Proses hidrogenasi benzen secara komersial biasanya berlangsung pada tekanan antara 300 sampai 500 psig, suhu berkisar antara 300°F sampai 500°F dan benzen yang terdapat dalam kesetimbangan dengan produk kira-kira 0,01%.

Menurut penelitian yang telah dilakukan oleh Katsuyuki Nakaro dkk (1982), pada reaksi hidrogenasi benzen dengan katalis, ditemukan bahwa benzen yang

diserap pada atom katalis sangat kecil bila dibandingkan dengan jumlah benzen yang diserap secara fisika pada support. Dengan demikian laju reaksi hidrogenasi sebanding dengan luas permukaan atom logam katalis dan dapat disimpulkan bahwa yang diserap support berpindah ke sisi aktif dari katalis yang terletak di logam-support (logam-support boundary) dan bereaksi dengan hidrogen.

Dari beberapa hasil penelitian (Franco, 1980) diperoleh perkiraan bahwa hidrogenasi benzen merupakan rangkaian dari reaksi penambahan hidrogen. Hal ini disebabkan oleh karena adanya sejumlah kecil produk intermediate dari proses hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana

Kesulitan yang ada sampai saat ini adalah mengenai mekanisme reaksi yang belum diketahui secara jelas. Ada dua kemungkinan mekanisme reaksi pada hidrogenasi benzen yaitu :

- Kemungkinan pertama dikenal sebagai mekanisme interaksi dari molekul yang berdekatan, dimana dua molekul yang akan bereaksi diserap secara kimia di sisi aktif pada monolayer, sesudah bereaksi pada monolayer produk yang dihasilkan didesorbsi.
- Kemungkinan kedua, salah satu molekul yang akan bereaksi diabsorb secara kimia pada permukaan katalis dan molekul yang lain bereaksi dengan molekul yang telah diabsorb ini dari fasa gas atau lapisan van der Waals (mekanisme ini disebut dengan van der Waals *chemisorbed - layer interaction*).

Secara komersial, kedua mekanisme reaksi di atas tidak memberikan dampak ekonomis.

Sampai akhir abad ke-18, para ahli kimia memperkirakan bahwa benzen hanya dapat dihidrogenasi bila uapnya dikontakkan dengan katalis, tetapi teori ini ditumbangkan oleh ahli kimia Ipatief dari Rusia pada tahun 1906. Sekarang produksi Sikloheksana secara komersial dilakukan di dalam reaktor fasa cair atau reaksi dari fasa campuran.

Secara garis besar teori mekanisme reaksi sistem gas-cair-padat dapat digambarkan dengan step sebagai berikut :

- Mula-mula gas hidrogen berdifusi melalui film gas dan film cair masuk ke badan cair.
- Dari badan cair gas berdifusi melalui pori-pori padatan menuju puncak aktif katalis
- Sampai di puncak aktif katalis baru terjadi reaksi permukaan antara hidrogen dan benzen.
- Produk yang terjadi didesorbsi dari pori menuju badan cair

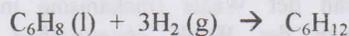
Hidrogenasi benzen pada umumnya berlangsung pada orde satu terhadap tekanan hidrogen dan orde nol terhadap konsentrasi benzen. Hidrogenasi benzen yang dilakukan dengan katalis nikel bisa mengalami perubahan orde hidrogen, dari orde nol (dibawah 230°F) menjadi orde satu (di atas 390 °F) sesuai dengan kenaikan temperatur. Perubahan orde ini kemungkinan disebabkan oleh molekul benzen yang lebih mudah diabsorb daripada molekul hidrogen

pada temperatur rendah 350 °F sampai 360 °F, tetapi fenomena ini menjadi sebaliknya pada temperatur tinggi.

Mekanisme reaksi, bagaimana reaktan dapat terikat oleh logam di atas support, masih sulit diterangkan. Hipotesa yang dapat dikemukakan ialah: logam terikat secara kompleks oleh support. Benzen lebih banyak diabsorpsi oleh support dari pada oleh logam; logam lebih mudah bereksistensi dengan atom hidrogen dan membentuk ikatan kompleks. Dalam keadaan demikian benzen tertarik oleh senyawa kompleks tersebut sehingga terjadilah reaksi substitusi atom hidrogen ke dalam molekul benzen secara serempak dan terjadilah molekul sikloheksana.

Secara total reaksi hidrogenasi benzen dapat digambarkan sebagai penjumlahan setiap step yang terjadi di atas. Walau demikian pada umumnya hanya salah satu step saja yang biasanya ditinjau, yaitu step yang paling besar tahanannya. Untuk mengetahui step yang mengontrol tersebut biasanya dibutuhkan beberapa seri percobaan pendahuluan yang berkaitan dengan mencari besaran-besaran konstanta dari setiap step.

Reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana pada fasa cair di atas permukaan aktif katalis secara sederhana dapat dituliskan sebagai berikut:



Persamaan kecepatan reaksi dari reaksi di atas adalah:

$$-r = k C_A^n C_B^m \quad (1)$$

n adalah orde reaksi terhadap Benzen dan m orde reaksi terhadap hydrogen sedang harga k konstan dan kedalamnya sudah termasuk konsentrasi katalis. Bila k C_B^m konstan (konsentrasi Hydrogen di dalam larutan konstan) maka persamaan (1) dapat ditulis:

$$-r = k' C_A^n \quad (2)$$

dimana:

$$k' = k C_B^m \quad (3)$$

Sehingga:

$$-(dCA/dt) = k' C_A^n \quad (4)$$

atau:

$$-(dCA/C_A^n) = k'.dt \quad (5)$$

Untuk menghitung energi aktivasi digunakan persamaan Arrhenius:

$$k' = k_0 e^{-E/RT} \quad (6)$$

Persamaan (6) dapat ditulis menjadi:

$$\ln(k') = \ln(k_0) - E/RT \quad (7)$$

Persamaan (7) di atas merupakan persamaan linear dalam 1/T, sehingga dengan membuat grafik ln(k') versus (1/T) akan dapat ditentukan nilai slope = -(E/R) dan nilai intersep = ln(k₀). Dari nilai slope ini selanjutnya dapat dihitung nilai energi aktivasi (E).

Metodologi Penelitian

Percobaan hidrogenasi Benzen ini dilakukan di dalam suatu reaktor batch bertekanan yang dilengkapi pemanas elektrik, pengaduk, kontrol tekanan dan pengontrol suhu. Set keseluruhan alat percobaan dapat dilihat di Gambar 1. Sedang pembuatan katalis

dilakukan di dalam suatu furnace silender yang dilengkapi dengan pengontrol suhu. Analisa hasil dilakukan di dalam suatu kromatografi gas. Bahan-bahan yang digunakan seperti asam asetat, benzen dan toluen, garam RuCl₂ dan RhCl₂ semua dalam kualitas murni produk (p.a). Karbon aktif yang dipakai adalah jenis P-30S buatan USA.

Variable penelitian yang digunakan dalam percobaan ini adalah suhu : 30°C, 50°C, 75°C, 100°C, 125°C dan 150°C. Tekanan 6,5 dan 9 atm.

Persiapan Penelitian

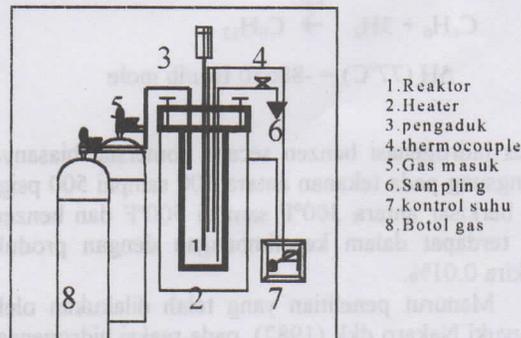
a. Pembuatan katalis dengan kadar 5%

Menimbang karbon aktif sebanyak 50 g, melarutkan 5,40 g RuCl₃ kedalam aquadest sebanyak 30 ml. Impregnasi larutan RuCl₃ ini ditambahkan sedikit demi sedikit kedalam karbon aktif dan dijaga agar karbon tetap kering. Katalis dipanaskan dalam oven pada temperatur 100°C selama 8 jam, kemudian didinginkan dalam eksikator. Kalsinasi katalis dengan cara memanaskan dalam tube furnace pada temperatur 300 - 350°C dengan dialiri 10 % gas H₂ di dalam He selama ± 2 jam.

Prosedur di atas diulang untuk katalis RhCl₃

b. Pelaksanaan reaksi hidrogenasi

Katalis ditumbuk, ditimbang sebanyak 19 gr ditambah 270 ml sampel dengan konsentrasi benzen tertentu dimasukkan ke dalam reaktor, pengaduk dijalankan, reaktor dialiri gas He selama ± 3 menit, kemudian valve pemasukan dan pengeluaran gas ditutup. Kedua valve dibuka kembali dan reaktor dialiri dengan gas H₂ selama ± 2 menit, valve pengeluaran ditutup, gas H₂ tetap dialirkan sampai manometer menunjukkan 80 psi. Temperatur dinaikkan lalu tekanan dinaikkan sampai manometer menunjukkan 120 psi. Setelah temperatur dan tekanan tercapai, dilakukan pengambilan sampel pertama. Pengambilan sampel dilakukan tiap 30 menit, sampai diperoleh 7 sampel. Sampel disaring kemudian diambil sebanyak 1 ml, lalu ditambahkan larutan baku toluene sebanyak 0,05 ml. Pengambilan sampel di atas diulang untuk temperatur yang lain. Pada akhir percobaan tekanan gas diturunkan menjadi tekanan atmosferik.



Gambar 1. Rangkaian Reaktor

Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dalam melakukan penelitian hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana dengan katalis Rhodium dan Ruthenium ini dilakukan beberapa penelitian pendahuluan sebagai berikut:

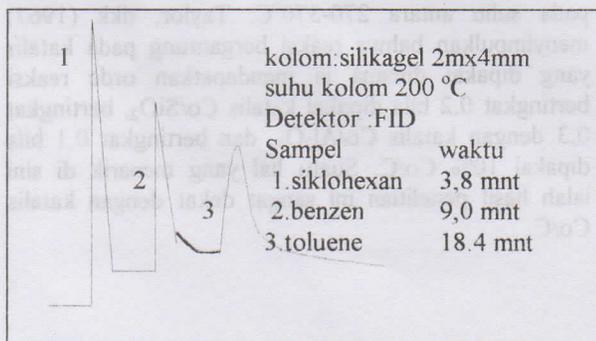
Manipulasi penelitian dengan variabel persen katalis yaitu 1% dan 5% katalis. Semua dalam bentuk bubuk 100 mesh, dimasukkan kedalam larutan sebanyak ± 10%. Reaksi di lakukan selama 1 jam pada tekanan 6 dan 9 atm dan 150°C. Analisis secara kualitatif dengan chromatografi menunjukkan bahwa pada tekanan 6 atm dengan kedua katalis sikloheksana belum terbentuk. Sedang pada tekanan 9 atm pada prinsipnya siklohexan teranalisa.

Hasil tersebut berbeda jauh dengan hasil yang didapat pada hidrogenasi glukosa menjadi sorbitol, dimana katalis yang sama dengan persentase 1% menunjukkan aktivitas yang sangat tinggi.

Dari hasil penelitian pendahuluan ini menunjukkan bahwa reaksi sangat sensitif terhadap tekanan. Hal ini segera memberi petunjuk bahwa reaksi ini berada pada rezim difusional mass-transfer di film gas. Tentunya bisa diduga bahwa tekanan yang tinggi akan menaikkan kecepatan total reaksinya. Beberapa literature (Akher, dkk, 1974, Brahme, dkk, 1976), menyebutkan bahwa dalam penelitian secara batch dengan katalis berbasis Nikel yang dipergunakan berkisar antara 1 sampai 10% berat dari senyawa yang akan dihidrogenasi, tekanan yang dibutuhkan untuk melakukan reaksi ini biasanya sangat tinggi mencapai ratusan atmosfer.

Pemilihan pelarut dan senyawa baku

Pada analisis dengan kromatografi asam asetat tidak mempengaruhi hasil kromatografi, seperti terlihat pada gambar-2. Maka dengan demikian asam asetat dapat digunakan sebagai pelarut. Persyaratan untuk senyawa baku adalah: (a) terpisah dengan baik dari puncak lain, (b) terelusi dekat dengan puncak senyawa yang dianalisis dan (c) mempunyai struktur yang serupa dengan struktur yang dianalisis. Berdasarkan pertimbangan ini, maka dipilih toluen sebagai senyawa baku dan dari hasil analisis dengan kromatografi toluen dapat terpisah dengan baik (gambar 2).



Gambar 2. Identifikasi Sikloheksana, Benzen dan Toluene

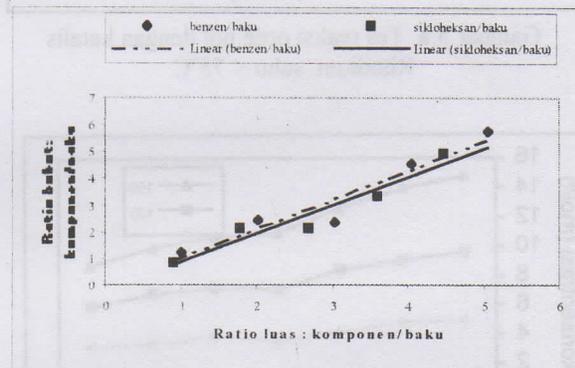
Analisis kuantitatif

Pada penelitian ini, digunakan cara pembakuan dalam untuk mencari hubungan antara luas puncak dengan konsentrasi. Diperoleh grafik dengan sumbu Y (rasio luas benzen atau sikloheksana) terhadap toluene dan sumbu x (rasio bobot/konsentrasi benzen atau sikloheksana terhadap toluene).

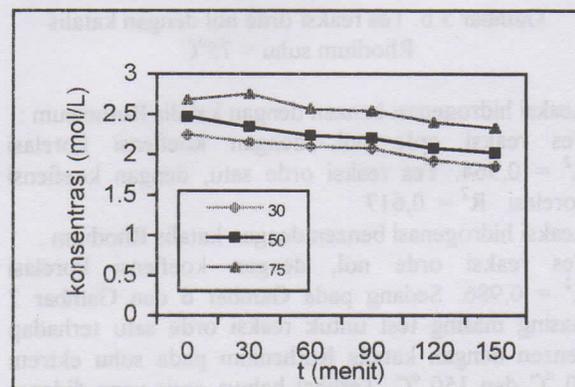
Konsentrasi benzen maupun sikloheksana pada saat t (waktu percobaan) kemudian dihitung berdasarkan grafik tersebut (lihat gambar 3).

Penentuan orde reaksi

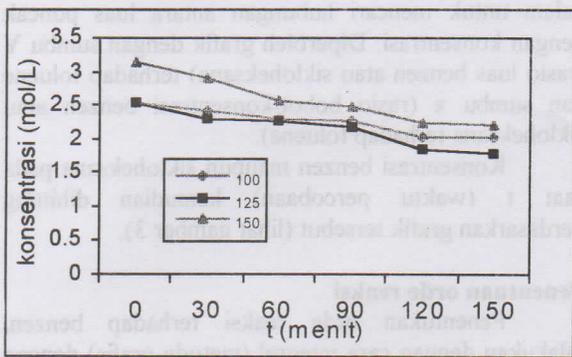
Penentuan orde reaksi terhadap benzen, dilakukan dengan cara integral (metode grafis) dengan mengevaluasi koefisien korelasi. Tes dilakukan untuk orde nol dan orde satu dengan cara membuat plot antara konsentrasi benzen (C_A) versus waktu (t). Jika data penelitian menunjukkan hubungan linier antara (C_A) versus (t) (ditandai nilai koefisien korelasinya mendekati 1 atau -1) maka berarti reaksi orde nol, dan jika dianggap tidak linier (koefisien korelasinya mendekati nol) maka bukan orde nol. Untuk itu perlu pula dicoba/dibandingkan orde reaksi yang lain yaitu orde satu dengan cara memplot antara $[-\ln C_A/C_{A0}]$ vs (t). Antara kedua uji ini diperoleh hasil hitungan koefisien korelasi sebagai berikut :



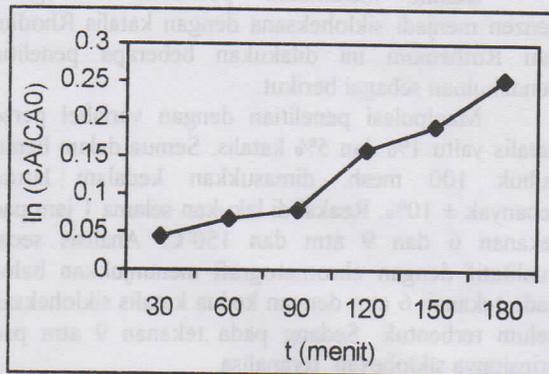
Gambar 3. Plot Rasio Luas Versus Rasio Bobot



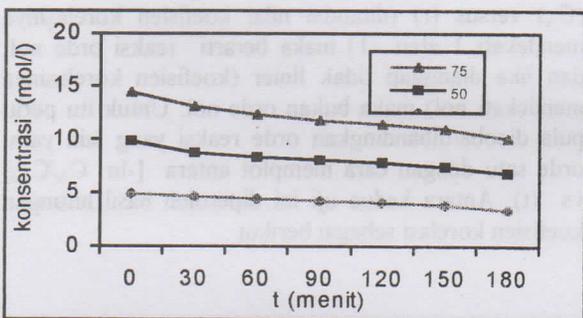
Gambar 4.a. Tes reaksi orde nol dengan katalis Ruthenium suhu <math>< 75^{\circ}\text{C}</math>



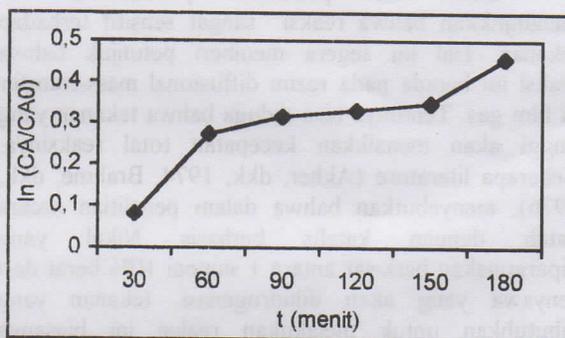
Gambar 4.b. Tes reaksi orde nol dengan katalis Ruthenium suhu > 75 °C



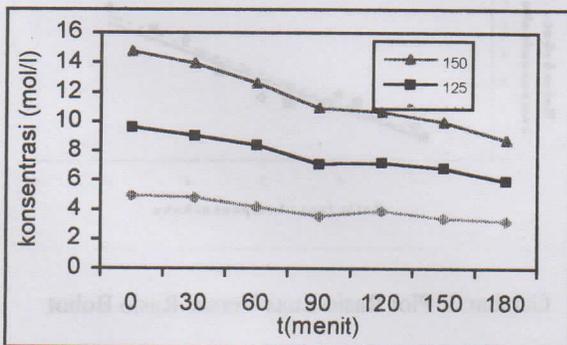
Gambar 6. Tes Reaksi Orde satu (30°C) dengan katalis Ruthenium



Gambar 5.a. Tes reaksi orde nol dengan katalis Rhodium suhu < 75°C



Gambar 7. Tes Reaksi Orde satu (30°C) dengan katalis Ruthenium



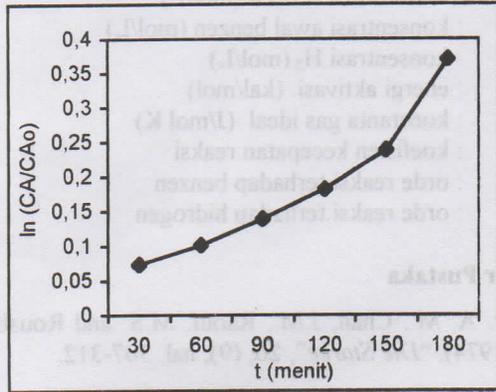
Gambar 5.b. Tes reaksi orde nol dengan katalis Rhodium suhu < 75°C

Reaksi hidrogenasi benzen dengan katalis Ruthenium :
 Tes reaksi orde nol, dengan koefisiensi korelasi $R^2 = 0,964$. Tes reaksi orde satu, dengan koefisiensi korelasi $R^2 = 0,617$.

Reaksi hidrogenasi benzen dengan katalis Rhodium :
 Tes reaksi orde nol, dengan koefisiensi korelasi $R^2 = 0,986$. Sedang pada Gambar 6 dan Gambar 7 masing masing test untuk reaksi orde satu terhadap benzen dengan katalis Ruthenium pada suhu ekstrem 30 °C dan 150 °C. Terlihat bahwa garis yang didapat sangat tidak linier.

Hal yang sama terjadi pada gambar 8 dan gambar 9 untuk katalis Rhodium. Dengan demikian hasil ini menunjukkan bahwa reaksi bukan orde satu terhadap Benzen.

Hasil yang didapat dalam penelitian ini ternyata sama dengan yang didapat oleh Haine (1987). Pada hidrogenasi benzen dengan katalis Palladium pada range suhu berbeda dengan penelitian ini adalah penelitian-penelitian yang dikerjakan antara lain oleh Nasution (1985) yang mendapat orde reaksi terhadap benzen sebesar 0,244 dengan katalis Co-Mo/Al₂O₃ pada suhu antara 270-370°C. Taylor, dkk (1967) menyimpulkan bahwa reaksi bergantung pada katalis yang dipakai dimana ia mendapatkan orde reaksi bertingkat 0,2 bila dipakai katalis Co/SiO₂, bertingkat 0,3 dengan katalis Co/Al₂O₃, dan bertingkat 0,1 bila dipakai 10% Co/C. Suatu hal yang menarik di sini ialah hasil penelitian ini sangat dekat dengan katalis Co/C.

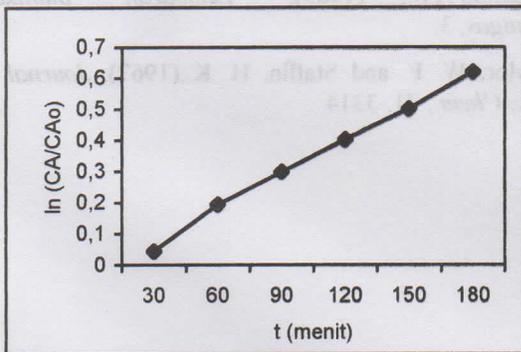


Gambar 8. Tes Reaksi Orde Satu (30⁰C) dengan katalis Rhodium

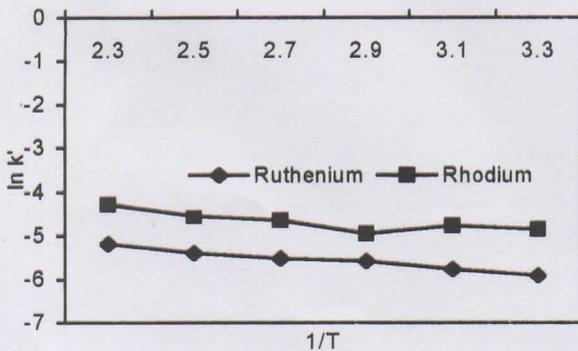
Menghitung energi aktivasi (E)

Dari test orde reaksi telah diketahui bahwa reaksi ini mengikuti orde nol terhadap benzen, sehingga dari grafik C_A versus t dapat diperoleh nilai k' yaitu slope dari masing-masing grafik. Nilai energi aktivasi dapat dihitung berdasarkan persamaan Arrhenius (persamaan 7)

$$\ln k' = \ln k_0 - E/RT \quad (7)$$



Gambar 9. Tes Reaksi Orde Satu (150⁰C) dengan katalis Rhodium



Gambar 10. Plot ln k' vs (1/T)

Dari persamaan ini dibuat kurva ln k' versus 1/RT pada Gambar 10, sehingga diperoleh kurve linier dan dari hasil perhitungan didapatkan :

Harga E dengan katalis Ruthenium = 416,731 kkal/mol
 Harga E dengan katalis Rhodium = 110,202 kkal/mol

Bila dibandingkan terhadap hasil beberapa peneliti dapat dibuat tabel sbb :

Tabel 1. Data hidrogenasi benzen dengan beberapa jenis katalis dan support

PENELITI	KATALIS	SUHU (°C)	E (kkal/mol)
Ingemor	RuCl ₃	113	5,6
Nakano	Ru/Al ₂ O ₃	150	18
Nasution	Co-Mo/ Al ₂ O ₃	270	23,33
Taylor	Co/SiO ₂	133	5,8
	Co/Al ₂ O ₃	116	5,4
	Co/C	205	1,2
Roesyadi	Ru/C	150	1,4
	Rh/C	150	1,0

Dari data tabel di atas dapat disimpulkan :

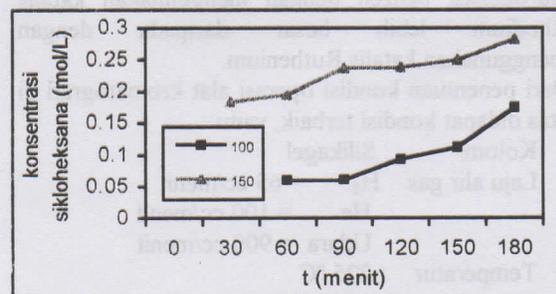
1. Jenis metal maupun macam support sangat mempengaruhi energi aktivasi.
2. Support karbon memberikan harga E terkecil.
3. Katalis Rhodium memberikan harga E lebih kecil dari pada katalis Ruthenium pada hidrogenasi benzen menjadi sikloheksanaa.

Produk sikloheksanaa pada berbagai temperatur dan jenis katalis

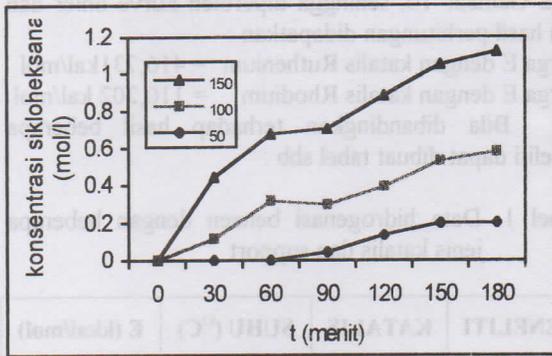
Gambar 11 dan Gambar 12 di bawah ini menunjukkan selektivitas reaksi terhadap produk siklohexana.

Dari grafik di bawah dapat dilihat makin tinggi temperatur, makin banyak sikloheksanaa yang dihasilkan. Perbandingan konsentrasi sikloheksanaa yang dihasilkan dari hidrogenasi benzen dengan menggunakan katalis Ruthenium dan katalis Rhodium. Pada suhu maksimum yaitu 150 °C dan waktu reaksi maksimum 180 menit dihasilkan sikloheksanaa sebagai berikut :

- Dengan katalis Ruthenium : 0,282 mol/L
- Dengan katalis Rhodium : 0,539 mol/L



Gambar 11. Konsentrasi sikloheksanaa vs waktu dengan katalis Ruthenium



Gambar 12. Konsentrasi sikloheksana vs waktu dengan katalis Rhodium

Dari data di atas terlihat bahwa dengan menggunakan katalis Rhodium, konsentrasi sikloheksana yang dihasilkan lebih besar dari pada dengan menggunakan katalis Ruthenium, sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa katalis Rhodium lebih efektif daripada Ruthenium pada hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana.

Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

- 1 Reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana dengan katalis Ruthenium memerlukan energi aktivasi sebesar 1416,731 kal/mol, sedangkan dengan katalis Rhodium memerlukan energi aktivasi sebesar 110,202 kal/mol.
- 2 Energi aktivasi yang rendah, menunjukkan bahwa reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana dengan kedua katalis dapat berlangsung baik pada kondisi percobaan. Tekanan di bawah 9 atm konversi sangat rendah sehingga mass transfer sangat berperan dalam reaksi ini.
- 3 Reaksi hidrogenasi benzen menjadi sikloheksana pada fasa cair mengikuti orde nol terhadap benzen (dengan menganggap bahwa konsentrasi H₂ dalam larutan selalu konstan).
- 4 Orde reaksi dan energi aktivasi sangat bergantung pada jenis katalis dan support yang dipakai.
- 5 Konsentrasi sikloheksana yang dihasilkan dari hidrogenasi benzen dengan menggunakan katalis Rhodium lebih besar daripada dengan menggunakan katalis Ruthenium.
- 6 Dari penentuan kondisi operasi alat kromatografi di atas didapat kondisi terbaik, yaitu:

Kolom : Silikagel
 Laju alir gas : H₂ = 65 cc/menit
 He = 100 cc/menit
 Udara = 900 cc/menit
 Temperatur : 225 °C
 Senyawa baku: toluene

Daftar Notasi

- C_A : konsentrasi benzen (mol/L)
- C_{A0} : konsentrasi awal benzen (mol/L)
- C_B : konsentrasi H₂ (mol/L)
- E : energi aktivasi (kal/mol)
- R : konstanta gas ideal (J/mol K)
- k : koefisien kecepatan reaksi
- m : orde reaksi terhadap benzen
- n : orde reaksi terhadap hidrogen

Daftar Pustaka

Akher, A. M., Chali, J.M., Raouf, M.S. and Roushdi M., (1974), "Die Starke", 26, (9), hal. 307-312.

Brahme, P.H., and Doraiswamy, L.K., (1976), *Ind. Eng. Chem, Process Des. Dev.* 15, (1), hal. 130-137.

Haines H.W., (1987), *Industrial and Engineering Chemistry*, 54, 7, 1459.

Ingemor, C. U., Brand, O. and Lunden, S. T., (1981) *Journal Chem. Tech. Biotechnology*, 31, 660

Klulemans AIM, (1959), *Gas Chromatography*, 2ndEd., Van Nostrand Reinhold Corp, New York.

Nakano, K., Fueda, Y., Uchino, T. and Kusunoki, K., (1987), *Journal of Chem. Eng. Of Japan*, 15,5, 397

Nasution A.S., (1985), *Lembaran publikasi Lemigas*, 3.

Taylor, W. F. and Staffin. H. K.,(1967), *Journal of Phy. Chem.*, 71, 3314