

Reaktor Kimia

(Konsep Dasar Perancangan dan Studi Kasus Perhitungan Neraca Massa Reaktor Kimia dengan Menggunakan Polymath)

Didiek Hari Nugroho, S.T. M.T.

Dr. Ir. Abu Hasan, M.Si.

Reaktor Kimia
(Konsep Dasar Perancangan dan
Studi Kasus Perhitungan Neraca
Massa Reaktor Kimia dengan
Menggunakan Polymath)

UU No. 28 Tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan Sifat Hak Cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. Penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. Penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Reaktor Kimia

(Konsep Dasar Perancangan dan Studi Kasus Perhitungan Neraca Massa Reaktor Kimia dengan Menggunakan Polymath)

Didiek Hari Nugroho, S.T. M.T.

Dr. Ir. Abu Hasan, M.Si.



Cerdas, Bahagia, Mulia, Lintas Generasi.

Reaktor Kimia (Konsep Dasar Perancangan dan Studi Kasus Perhitungan Neraca Massa Reaktor Kimia dengan Menggunakan Polymath)

Penulis : Didiek Hari Nugroho, S.T. M.T. dan Dr. Ir. Abu Hasan, M.Si.
Desain Cover : Rulie Gunadi
Sumber : www.shutterstock.com (Uwe Aranas)
Tata Letak : Tata
Proofreader : M. Royfan Ardian

Ukuran:

x, 140 hlm., Uk.: 17.5x25 cm

ISBN:

978-623-02-9437-2

Cetakan Pertama:

Oktober 2024

Hak Cipta 2024 pada Penulis

Copyright © 2024 by Deepublish Publisher

All Right Reserved

PENERBIT DEEPUBLISH

(Grup Penerbitan CV BUDI UTAMA)

Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

Jl. Rajawali, Gg. Elang 6, No. 3, Drono, Sardonoharjo, Ngaglik, Sleman

Jl. Kaliurang Km. 9,3 – Yogyakarta 55581

Telp./Faks: (0274) 4533427

Website : www.penerbitdeepublish.com

www.deepublishstore.com

E-mail : cs@deepublish.co.id

Hak cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

Isi di luar tanggung jawab percetakan.

KATA PENGANTAR PENERBIT

Segala puji kami haturkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas limpahan segala anugerah dan karunia-Nya. Dalam rangka mencerdaskan dan memuliakan umat manusia dengan penyediaan serta pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi untuk menciptakan industri *processing* berbasis sumber daya alam (SDA) Indonesia, Penerbit Deepublish dengan bangga menerbitkan buku dengan judul ***Reaktor Kimia (Konsep Dasar Perancangan dan Studi Kasus Perhitungan Neraca Massa Reaktor Kimia dengan Menggunakan Polymath)***.

Menguasai perhitungan neraca massa adalah kunci dalam merancang dan mengoperasikan reaktor kimia. Buku ini hadir sebagai acuan lengkap bagi mahasiswa dan tenaga pendidik. Dengan bahasa yang mudah dipahami dan didukung oleh berbagai pendalaman materi yang relevan, buku ini mengajak pembaca untuk mendalami konsep-konsep dasar perancangan reaktor serta menguasai penggunaan perangkat lunak Polymath. Dengan menggunakan perangkat lunak Polymath, pembaca dapat melakukan simulasi dan menguraikan data secara lebih mendalam. Melalui pembahasan mendalam mengenai reaktor *batch*, *semi-batch*, alir tangki berpengaduk, alir pipa, seri, dan katalistik heterogen, pembaca akan dibekali pengetahuan yang solid untuk menghadapi tantangan di dunia industri proses.

Terima kasih dan penghargaan terbesar kami sampaikan kepada penulis, Didiek Hari Nugroho, S.T. M.T. & Dr. Ir. Abu Hasan, M.Si., yang telah memberikan kepercayaan, perhatian, dan kontribusi penuh demi kesempurnaan buku ini. Semoga buku ini bermanfaat bagi semua pembaca, mampu berkontribusi dalam mencerdaskan dan memuliakan umat manusia, serta mengoptimalkan pemanfaatan ilmu pengetahuan dan teknologi di tanah air.

Hormat Kami,

Penerbit Deepublish

DAFTAR ISI

| | |
|---|------|
| KATA PENGANTAR PENERBIT..... | v |
| DAFTAR ISI | vii |
| DAFTAR GAMBAR..... | viii |
| DAFTAR TABEL | ix |
| | |
| KONSEP DASAR PERANCANGAN REAKTOR | 1 |
| | |
| REAKTOR <i>BATCH</i> (PARTAIAN)..... | 8 |
| | |
| REAKTOR SEMI <i>BATCH</i> (REAKTOR GELEMBUNG PANCARAN) | 20 |
| | |
| REAKTOR ALIR TANGKI BERPENGADUK (RATB)..... | 36 |
| | |
| REAKTOR ALIR PIPA (RAP) | 50 |
| | |
| REAKTOR SERI..... | 64 |
| | |
| REAKTOR KATALISTIK HETEROGEN | 115 |
| | |
| SOLUSI SOAL LATIHAN | 123 |
| | |
| DAFTAR PUSTAKA..... | 138 |
| TENTANG PENULIS..... | 139 |

DAFTAR GAMBAR

| | | |
|-----------|---|-----|
| Gambar 1. | Skema reaktor batch/partaian | 9 |
| Gambar 1. | Skema reaktor gelembung pancaran (RGP) | 20 |
| Gambar 2 | Skema reaktor alir tangki berpengaduk | 38 |
| Gambar 5. | Skema reaktor alir pipa | 51 |
| Gambar 3. | Reaktor seri antara RATB-RATB | 65 |
| Gambar 3. | Reaktor seri antara RATB-RAP | 75 |
| Gambar 4. | Reaktor seri antara RAP-RATB | 87 |
| Gambar 5. | Reaktor seri antara RAP | 100 |

DAFTAR TABEL

| | | |
|----------|--|----|
| Tabel 1. | Penyisihan kadar amonia | 27 |
| Tabel 2. | Nilai- $\ln C_t C_0$ dan efisiensi | 28 |
| Tabel 3. | Penyisihan kadar amonia | 34 |

KONSEP DASAR PERANCANGAN REAKTOR

Tujuan Pembelajaran

Subcapaian Pembelajaran – Mata Kuliah (kemampuan akhir yang diharapkan):

1. Mahasiswa mampu menjelaskan konsep dasar perancangan reaktor
2. Mahasiswa mampu menjelaskan tujuan dalam pemilihan reaktor
3. Mahasiswa mampu menjelaskan faktor-faktor pertimbangan dalam perancangan reaktor

Pengantar

Reaktor kimia adalah sebuah alat industri kimia, di mana digunakan sebagai tempat berlangsungnya reaksi antara reaktan sehingga menjadi produk yang lebih berharga. Perancangan suatu reaktor kimia harus lebih memaksimalkan produksi serta mengutamakan efisiensi reaksi kimia, sehingga diperoleh hasil produk lebih besar dibandingkan dengan reaktan masuk dengan biaya minimum baik berupa biaya modal maupun operasi. Namun, tidak mengabaikan faktor keselamatan kerja. Ada tiga hal yang perlu diketahui dalam mempelajari dasar-dasar perancangan reaktor, yaitu:

1. Konsep dasar perancangan reaktor
2. Tujuan dalam pemilihan suatu reaktor
3. Faktor-faktor pertimbangan dalam merancang reaktor

Selain ketiga hal dasar dalam perancangan reaktor di atas, ada beberapa parameter yang harus menjadi pertimbangan cermat dalam merancang suatu reaktor agar dapat bekerja secara

optimal, efektif, dan efisien. Berikut ini adalah parameter-parameter yang mempengaruhi rancangan suatu reaktor:

- Laju Reaksi dan Kinetika, merupakan dua hal yang sangat penting untuk mengontrol dan mengoptimalkan reaksi kimia. Laju reaksi mengukur seberapa cepat reaktan yang dikonversi menjadi produk dalam suatu reaksi kimia. Laju reaksi biasanya dinyatakan sebagai perubahan konsentrasi reaktan atau produk per satuan waktu. Sementara kinetika reaksi mempelajari mekanisme dan laju reaksi kimia. Konsentrasi, temperatur, tekanan, katalis, luas permukaan kontak merupakan faktor-faktor yang mempengaruhi laju reaksi.
- Kondisi Operasi, mengelola kondisi operasi reaktor dengan tepat sangat penting untuk mengoptimalkan efisiensi, keamanan, dan hasil reaksi. Temperatur (T), tekanan (P), konsentrasi reaktan, katalis, waktu tinggal (t), rasio laju alir, pencampuran, dan tipe reaktor merupakan beberapa jenis kondisi operasi utama yang perlu menjadi pertimbangan.
- Ukuran Reaktor, Volume (V) reaktor dan rasio (L/D), merupakan salah satu parameter kunci dalam desain reaktor, dan biasanya dapat ditentukan berdasarkan berbagai faktor termasuk laju reaksi, volume produksi, dan sifat fisiokimia dari reaktan dan produk.
- Konsentrasi (C), merupakan parameter penting dalam perancangan reaktor kimia karena dapat mempengaruhi laju reaksi, konversi, dan efisiensi keseluruhan dari proses reaksi.
- Koefisien perpindahan panas (h, U), memainkan peranan penting dalam perancangan reaktor kimia. Perpindahan panas ini dapat mempengaruhi kontrol suhu, efisiensi energi, keamanan operasi, dan biaya peralatan. Agar operasi reaktor dapat efisien, aman, dan ekonomis, maka diperlukan desain yang baik dalam mempertimbangkan cara peningkatan koefisien perpindahan panas.

Konsep Dasar Perancangan Reaktor

Ada beberapa konsep dasar dalam merancang suatu reaktor kimia, di antaranya:

- Jenis reaktor
Secara umum reaktor terbagi menjadi tiga jenis yaitu: reaktor *batch*/partaian, reaktor aliran kontinu, dan reaktor alir pipa. Namun, di buku ini, kita akan membahas beberapa jenis reaktor di antaranya reaktor *batch*/partaian, reaktor semi *batch*/partaian (reaktor gelembung pancaran/RGP), reaktor alir tangki berpengaduk (RATB)/CSTR, reaktor alir pipa (RAP)/PFR, reaktor seri, dan reaktor katalistik heterogen.
- Kinetika reaksi
Kinetika reaksi merupakan salah satu faktor penting dalam merancang sebuah reaktor kimia, hal ini dikarenakan persamaan laju reaksi sering digunakan untuk menghitung, konstanta kinetika reaksi/laju reaksi, waktu tinggal yang diperlukan dan konversi produk.
- Perhitungan transfer massa dan panas
Dua perhitungan ini sangat dibutuhkan dalam merancang sebuah reaktor, dikarenakan untuk mengetahui efisiensi transfer massa antara reaktan dengan penambahan katalis serta tanpa katalis. Dalam mengontrol reaktor diperlukan juga perhitungan panas agar reaksi yang terjadi di dalam reaktor dapat berjalan secara optimal.
- Mekanisme dan alur reaksi kimia
Untuk memahami setiap tahapan yang terjadi selama reaksi dan juga mengetahui bagaimana setiap masing-masing tahapan mempengaruhi kinetika reaksi yang terjadi di dalam reaktor, maka diperlukan suatu analisis mekanisme reaksi dan alur reaksi kimia.
- Permodelan matematika
Permodelan matematis dapat berupa hukum konservasi neraca massa dan energi, yang digunakan untuk

memprediksi perilaku reaktor. Permodelan teknik optimasi dapat menentukan kondisi operasi terbaik, efektif, dan efisien. Simulasi komputer biasanya digunakan untuk memodelkan perilaku dan memprediksi kinerja reaktor di bawah berbagai kondisi operasi.

- **Pemilihan material konstruksi**
Reaktivitas kimia, tekanan, dan suhu operasi merupakan faktor yang sangat penting dalam memilih material konstruksi yang tepat dan efektif untuk membuat suatu reaktor. Pemilihan material konstruksi terhadap ketahanan korosi, kemampuan material menahan tekanan dan suhu operasi yang salah akan berdampak kepada kinerja reaktor yang tidak optimal dan bahkan dapat mengancam keselamatan reaktor.
- **Keselamatan reaktor**
Keselamatan reaktor merupakan salah satu poin penting dalam merancang suatu reaktor, terutama untuk suatu reaksi yang eksotermik atau berbahaya. Agar keselamatan reaktor terjaga terhadap reaksi yang eksotermik atau berbahaya, pemilihan material dan konstruksi suatu reaktor perlu menjadi pertimbangan utama.

Tujuan dalam pemilihan reaktor

Selain pemahaman tentang dasar-dasar dalam merancang suatu reaktor kimia, kita juga harus mengetahui tujuan dalam pemilihan suatu reaktor kimia yang merupakan keputusan penting karena memiliki dampak signifikan pada efisiensi, biaya, keselamatan dan kualitas produk akhir, di antaranya adalah:

- Mendapatkan keuntungan yang besar, merupakan hal yang esensial dalam konteks industri dan bisnis. Agar keuntungan dapat diperoleh sebesar-besarnya, perlu mempertimbangkan efisiensi biaya investasi awal, waktu pengembalian investasi

- Biaya produksi rendah, adalah salah satu tujuan utama dalam pemilihan reaktor dikarenakan memiliki dampak langsung pada profitabilitas dan daya saing industri.
- Modal kecil/volume reaktor minimum, adalah pertimbangan penting dalam desain dan pemilihan reaktor kimia terutama bagi perusahaan yang ingin mengoptimalkan biaya dan efisiensi operasional. Reaktor dengan volume yang lebih kecil pada umumnya memiliki biaya pembelian dan instalasi yang lebih rendah dibandingkan dengan reaktor berkapasitas besar. Investasi awal yang lebih kecil memungkinkan industri untuk memulai produksi dengan modal yang lebih rendah untuk mengurangi risiko finansial.
- Operasi sederhana dan murah, menjadi tujuan penting dalam pemilihan reaktor kimia karena memiliki berbagai manfaat yang dapat langsung mempengaruhi efisiensi, mengurangi biaya, meningkatkan keandalan dan keselamatan, serta mempertahankan fleksibilitas dan keberlanjutan operasional, dan kelangsungan bisnis.
- Keselamatan kerja terjamin, merupakan satu elemen krusial dalam pemilihan reaktor karena alasan risiko seperti kebocoran bahan kimia, radiasi, dan ledakan reaktor bisa menyebabkan cedera serius atau kematian.
- Polusi terhadap sekelilingnya (lingkungan) dijaga sekecil-kecilnya, adalah tujuan penting dalam pemilihan reaktor untuk memastikan keberlanjutan operasional, perlindungan lingkungan, dan kesehatan masyarakat sekitar. Meminimalkan polusi adalah kunci untuk melindungi ekosistem dan keanekaragaman hayati di sekitar area operasi reaktor.

Faktor Pertimbangan dalam Merancang Reaktor

Ada beberapa faktor penting yang harus menjadi pertimbangan untuk memastikan reaktor dapat bekerja secara

optimal, efektif, dan efisien tanpa mengabaikan keamanan dan keselamatan reaktor, di antaranya:

- Jenis reaksi Kimia, pemahaman terhadap reaksi yang terjadi secara eksotermik ataupun endotermik, dan reaksi bersifat homogen atau heterogen. Selain itu juga, harus memahami kecepatan reaksi dan mekanismenya sangat penting untuk menentukan ukuran dan jenis reaktor.
- Jenis Reaktor Kimia, jenis reaktor yang dipilih memiliki pengaruh besar terhadap berbagai faktor pertimbangan dalam desain reaktor. Ada beberapa jenis reaktor kimia yang umum atau sering digunakan di industri di antaranya reaktor *batch* (partaian), reaktor aliran tangki berpengaduk (RATB/CSTR), reaktor alir pipa (RAP/PFR), reaktor aliran turbular, reaktor *fluidized bed*, dan reaktor membran.
- Kondisi Operasi, merupakan salah satu faktor terpenting dalam menentukan suhu dan tekanan optimal untuk reaksi agar mencapai efisiensi maksimal. Pengetahuan tentang kondisi tunak (*steady state*) atau transien juga diperlukan agar reaktor dapat dioperasikan dalam kondisi stabil atau mengalami perubahan kondisi secara periodik.
- Material dan konstruksi, pemilihan material yang tahan terhadap korosi, tekanan, dan temperatur tinggi yang mungkin dapat terjadi selama proses, serta material harus tahan terhadap reaksi kimia yang terjadi di dalam reaktor.
- Skalabilitas, untuk menentukan bagaimana proses yang telah berhasil dilakukan pada skala laboratorium untuk diskalakan ke produksi industri.
- Keamanan, agar kondisi operasi tetap dalam batas aman maka implementasi *system control* perlu dijaga. Desain reaktor juga harus memperhitungkan kemungkinan terjadi kebocoran, ledakan, atau kegagalan lainnya serta bagaimana melakukan mitigasi.

- Ekonomi, mempertimbangkan biaya investasi awal dan biaya operasional jangka panjang. Memastikan efisiensi energi digunakan dalam reaksi minimal dan efisien.
- Lingkungan, desain harus mempertimbangkan bagaimana pengelolaan dan pembuangan limbah yang dihasilkan, serta mengurangi emisi gas berbahaya atau zat beracun ke lingkungan.

Soal Latihan

1. Sebutkan dan jelaskan beberapa konsep dasar dalam mendesain suatu reaktor kimia
2. Sebutkan dan jelaskan tujuan dalam pemilihan suatu reaktor
3. Sebutkan dan jelaskan faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi kinerja reaktor
4. Jelaskan parameter-parameter penting yang mempengaruhi desain suatu reaktor

REAKTOR *BATCH* (PARTAIAN)

Tujuan Pembelajaran

Subcapaian Pembelajaran – Mata Kuliah (kemampuan akhir yang diharapkan):

1. Mahasiswa mampu menjelaskan pengertian dan proses reaktor *batch*/partaian
2. Mahasiswa mampu menjelaskan keunggulan dan kelemahan reaktor *batch*/partaian
3. Mahasiswa mampu membuat dan menghitung neraca massa reaktor *batch*/partaian

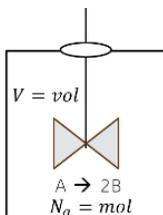
Pengertian dan Proses Reaktor *Batch*/Partaian

Reaktor ini merupakan reaktor dalam bentuk tangki berpengaduk yang dirancang untuk mereaksikan reaktan menjadi produk, di mana saat terjadi reaksi selama periode tertentu hingga reaksi selesai, tidak ada reaktan yang masuk maupun produk yang keluar. Reaktor jenis ini biasanya sangat cocok digunakan untuk fase cair, skala proses yang kecil, dan proses yang membutuhkan waktu lama. Reaktor ini sangat penting karena sering kali digunakan untuk memperoleh data-data kinetika reaksi yang nantinya dapat di *scale-up* pada skala industri. Karena untuk memperoleh data kinetika reaksi, maka sangat penting untuk mengetahui penurunan persamaan-persamaan umum yang digunakan dalam perancangan reaktor *batch*. Aplikasi reaktor *batch*/partaian sering digunakan di industri farmasi dan industri makanan.

Keunggulan dan Kelemahan Reaktor *Batch*/Partaian

- Keuntungan dari reaktor ini adalah:
 - Pengadukan sempurna sehingga konsentrasi di setiap titik dalam reaktor sama pada waktu yang sama.
 - Perubahan volume reaktor *batch* dapat dianggap linier terhadap konversi.
 - Lebih murah
 - Lebih mudah pengoperasian dan pengontrolan kondisi reaksi (temperatur, tekanan dan waktu reaksi)
 - Cocok untuk produksi dengan skala kecil dan khusus
- Kelemahan dari reaktor ini adalah:
 - Reaktor ini tidak dapat dijalankan pada proses-proses yang sulit.
 - Kurang baik untuk reaksi antara fase gas atau reaksi antara fase gas dan cair, karena reaktor akan bocor dan waktu banyak akan terbuang.
 - Skala produksi terbatas oleh ukuran reaktor.
 - Tidak efektif untuk skala besar karena waktu yang lama (tidak produktif).
 - Diperlukan pengawasan kondisi dan prosedur yang intensif.
 - Efisiensi produk rendah.
 - Biaya operasional lebih tinggi.

Persamaan Neraca Massa Reaktor *Batch*



r_a = laju reaksi [Conc/time]

asumsi: Well mixed

Gambar 1. Skema reaktor batch/partaian

Kesetimbangan massa sangat penting dalam analisis reaktor karena memberikan informasi penting tentang komposisi dan bagaimana variasi konsentrasi terjadi di dalam reaktor. (Hayes, 2001). Membuat sebuah kesetimbangan massa untuk komponen A di atas dapat kita gunakan persamaan kesetimbangan sebagai berikut: (Levenspiel, 1999)

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{matrix} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{matrix} \right] = [akumulasi]$$

...Pers (1)

Dalam reaktor *Batch* tidak ada aliran masuk dan keluar dan a adalah reaktan, maka:

$$[0] - [0] + \left[\int r_A dV \right] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right]$$

...Pers. (2)

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna maka: $r_A \neq f(V)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_A dV = r_A V$, apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2), akan diperoleh:

$$r_A V = \frac{dN_A}{dt}$$

...Pers. (3)

Persamaan (3) merupakan persamaan dalam bentuk diferensial. Untuk menyelesaikan persamaan tersebut yaitu dengan metode diferensiasi.

Apabila diketahui nilai $r_A = -kf(C_A)$ atau $r_A = -kf(N_A)$, maka persamaan (3) akan menjadi:

$$-kf(N_A)V = \frac{dN_A}{dt}$$

...Pers. (4)

$$-kV \int dt = \int \frac{dN_A}{f(N_A)}$$

...Pers. (5)

Bentuk persamaan (5) di atas merupakan bentuk integral yang dapat diselesaikan dengan metode integrasi.

Contoh soal 1.

Reaksi orde satu dan elementer fase cair dari $A \rightarrow B$ yang terjadi secara isothermal dan pengadukan sempurna pada reaktor *batch*. Pada kondisi awal, konsentrasi A adalah 3 mol/m³. Jika

laju reaksi destruksi A dinyatakan dalam $r_A = -kC_A$ dan nilai $k = 0,5 \text{ menit}^{-1}$. Hitunglah konsentrasi A (dalam mol/m³) setelah 4 menit. Uraikan jawaban anda dalam 2 tempat desimal

Solusi:

Neraca massa reaktor *batch*:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{matrix} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{matrix} \right] = [akumulasi]$$

Dalam reaktor *batch* tidak ada aliran masuk dan keluar dan A adalah reaktan, maka:

$$[0] - [0] + \left[\int r_A dV \right] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena diketahui adalah nilai konsentrasi A, di mana $N_A = C_A V$ dan $\int r_A dV = r_A V$, maka persamaan di atas akan menjadi:

$$r_A V = \left[\frac{dC_A V}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena nilai V merupakan konstan, maka persamaan (2) akan berubah menjadi:

$$r_A V = V \left[\frac{dC_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

diketahui bahwa $r_A = -kC_A$, maka persamaan (3) akan berubah menjadi:

$$-kC_A = \left[\frac{dC_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

Untuk menyelesaikan persamaan (4) dapat kita integrasi dengan batasan integrasi: pada saat $t = 0$ maka konsentrasi $C_A = C_{A0}$ dan pada saat $t = t$ maka nilai $C_A = C_{At}$

$$-k \int_0^t dt = \int_{C_{A0}}^{C_{At}} \frac{dC_A}{C_A} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

$$-kt = \ln \left(\frac{C_{At}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

$$C_{At} = C_{A0} e^{-kt} \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

Karena yang ditanyakan adalah konsentrasi CA_t pada saat 4 menit dengan nilai C_A = 3 mol/m³ dan k = 0,5 menit⁻¹, maka kita dapat memasukkan nilai yang diketahui tersebut ke persamaan (7) akan diperoleh nilai CA_t:

$$C_{At} = \{3 \text{ mol/m}^3\} e^{-\{0,5 \text{ menit}^{-1}\} 4 \text{ menit}}$$

$$C_{At} = 0,41 \text{ mol/m}^3$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Perhitungan konsentrasi Ca

$$\begin{aligned} \text{Ca0} &= 3 \\ k &= 0.5 \\ t &= 4 \\ \text{Ca} &= \text{Ca0} * \exp(-k*t) \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | t | 4 |
| 4 | Ca | 0.40600585 |

Contoh soal 2.

Reaksi orde dua dan elementer fase cair dari 2A → B yang terjadi secara isothermal dan pengadukan sempurna pada reaktor *batch*. Pada kondisi awal, konsentrasi A adalah 10 mol/L. Jika laju

reaksi destruksi A dinyatakan dalam $r_A = -kC_A^2$ dan nilai $k = 1$ L/mol jam-1. Hitunglah konsentrasi A (dalam mol/L) setelah 90 menit. Uraikan jawaban anda dalam 2 tempat desimal

Solusi:

Neraca massa reaktor *batch*:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{matrix} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{matrix} \right] = [akumulasi]$$

Dalam reaktor *batch* tidak ada aliran masuk dan keluar dan a adalah reaktan, maka:

$$[0] - [0] + \left[\int r_A dV \right] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena diketahui adalah nilai konsentrasi A, di mana $N_A = C_A V$ dan $\int r_A dV = r_A V$, maka persamaan di atas akan menjadi:

$$r_A V = \left[\frac{dC_A V}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena nilai V merupakan konstan, maka persamaan (2) akan berubah menjadi:

$$r_A V = V \left[\frac{dC_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

diketahui bahwa $r_A = -kC_A^2$, maka persamaan (3) akan berubah menjadi:

$$-kC_A^2 = \left[\frac{dC_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

Untuk menyelesaikan persamaan (4) dapat kita integrasi dengan batasan integrasi: pada saat $t = 0$ maka konsentrasi $C_A = C_{A0}$ dan pada saat $t = t$ maka nilai $C_A = C_{At}$

$$-k \int_0^t dt = \int_{C_{A0}}^{C_{At}} \frac{dC_A}{C_A^2} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

$$-kt = -\left(\frac{1}{C_{At}} - \frac{1}{C_{A0}}\right) \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

$$C_{At} = \frac{C_{A0}}{C_{A0}kt + 1} \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

Karena yang ditanyakan adalah konsentrasi C_{At} pada saat 90 menit (1,5 jam) dengan nilai $C_{A0} = 10 \text{ mol/L}$ dan $k = 1 \text{ jam}^{-1}$, maka kita dapat memasukkan nilai yang diketahui tersebut ke persamaan (7) akan diperoleh nilai C_{At} :

$$C_{At} = \frac{10 \text{ mol/L}}{\{10 \text{ mol/L}\}\{1 \text{ jam}^{-1}\}1,5 \text{ jam} + 1}$$

$$C_{At} = 0,625 \text{ mol/L}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Perhitungan konsentrasi Ca

$$\begin{aligned} \text{Ca0} &= 10 \\ k &= 1 \\ t &= 1.5 \\ f(\text{Ca}) &= -k*t + 1/\text{Ca} - 1/\text{Ca0} \\ \text{Ca(max)} &= 10 \\ \text{Ca(min)} &= 0 \end{aligned}$$

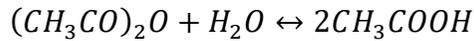
Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|-------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca | 0.625 | -6.6E-09 | 5 | -1.4E00 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|-------|---------------|
| 1 | Ca0 | 10 | 10 |
| 2 | k | 1 | 1 |
| 3 | t | 1.5 | 1.5 |

Contoh soal 3.

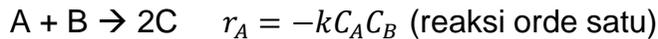
Hidrolisa asam anhidrat dari asam asetat yang terjadi di dalam reaktor *batch* (partaian) dengan volume 1250 L. Konsentrasi asam anhidrat dan air yang masuk kedalam reaktor masing-masing 15 mol/L dan 50 mol/L, dengan reaksi:



Reaksi orde pertama pada $(CH_3CO)_2O$ dan H_2O . Pada saat temperature reaktor, laju konstan adalah 0,075 L/(mol s). Bagaimana dengan konsentrasi asam anhidrat setelah 1 menit?

Solusi:

Misalkan reaksi di atas dapat disederhanakan sbb:



Maka dari soal di atas diketahui bahwa:

| | |
|----------|---|
| V | = 1250 L (volume reaktor) |
| k | = 0,075 L/(mol s) |
| C_{A0} | = 15 mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat) |
| C_{B0} | = 50 mol/L (konsentrasi awal air) |
| t | = 1 menit |

Neraca massa reaktor *batch* (partaian):

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Dalam reaktor *batch* tidak ada aliran masuk dan keluar dan a dan b adalah reaktan, maka:

$$[0] - [0] + \left[\int r_A dV \right] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Neraca massa untuk reaksi A:

Karena diketahui adalah nilai konsentrasi A, di mana $N_A = C_A V$ dan $\int r_A dV = r_A V$, maka persamaan di atas akan menjadi:

$$r_A V = \left[\frac{dC_A V}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

Karena nilai V merupakan konstan, maka persamaan (3a) akan berubah menjadi:

$$r_A V = V \left[\frac{dC_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

diketahui bahwa $r_A = -k C_A C_B$, maka persamaan (4a) akan berubah menjadi:

$$-k C_A C_B = \left[\frac{dC_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

Untuk menyelesaikan persamaan (5a) dapat kita integrasi terhadap C_A maka C_B dianggap konstan dengan batasan integrasi: pada saat $t = 0$ maka konsentrasi $C_A = C_{A0} = 15 \text{ mol/L}$ dan pada saat $t = 1$ menit (60 detik) maka nilai $C_A = C_A$

$$-k C_B \int_0^{60} dt = \int_{15}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

$$-0,075 \times C_B \times 60 = \ln C_A - \ln 15 \quad \dots \text{Pers. (7a)}$$

$$-4,5 C_B = \ln(C_A/15) \quad \dots \text{Pers. (8a)}$$

Neraca massa untuk reaksi B:

$$r_A V = \left[\frac{dC_B V}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

Karena nilai V merupakan konstan, maka persamaan (3a) akan berubah menjadi:

$$r_A V = V \left[\frac{dC_B}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

diketahui bahwa $r_A = -kC_A C_B$, maka persamaan (4b) akan berubah menjadi:

$$-kC_A C_B = \left[\frac{dC_B}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

Untuk menyelesaikan persamaan (5b) dapat kita integrasi terhadap C_B maka C_A dianggap konstan dengan batasan integrasi: pada saat $t = 0$ maka konsentrasi $C_B = C_{B0} = 50 \text{ mol/L}$ dan pada saat $t = 1$ menit (60 detik) maka nilai $C_B = C_B$

$$-kC_A \int_0^{60} dt = \int_{50}^{C_B} \frac{dC_B}{C_B} \quad \dots \text{Pers. (6b)}$$

$$-0,075 \times C_A \times 60 = \ln C_B - \ln 50 \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

$$-4,5C_A = \ln \frac{C_B}{50} \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

$$C_B = 50e^{-4,5C_A} \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

Untuk mencari C_A maka kita substitusikan persamaan (9b) ke persamaan (8a) akan diperoleh:

$$-4,5 \times 50e^{-4,5C_A} = \ln(C_A/15)$$

$$\ln(C_A/15) + 225e^{-4,5C_A} = 0$$

Untuk mencari nilai C_A dapat kita lakukan dengan *trial & error* dan selanjutnya interpolasi sebagai berikut:

| | |
|-----|------------------------------------|
| CA | $\ln(C_A/15) + 225e^{-4,5C_A} = 0$ |
| 0,9 | 1,107 |
| CA | 0 |
| 1 | -0,209 |

$$C_A = 0,9 + \frac{0 - 1,107}{-0,209 - 1,107}(1 - 0,9)$$

$$C_A = 0,98 \text{ mol/L}$$

Maka konsentrasi asam anhidrat setelah 1 menit adalah 0,98 mol/L

Penyelesaian dengan Polymath:

Perhitungan konsentrasi Ca

$$Ca_0 = 15$$

$$Cb_0 = 50$$

$$k = 0.075$$

$$t = 60$$

$$f(Ca) = \ln(Ca/Ca_0) + k \cdot t \cdot Cb_0 \cdot \exp(-k \cdot Ca \cdot t)$$

$$Ca(\max) = 15$$

$$Ca(\min) = 0$$

Calculated Values

Solution #1 of 2

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|---------|---------------|--------------|
| 1 | Ca | 0.98059111 | 6.5E-09 | 7.5 | -6.9E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|-------|---------------|
| 1 | Ca0 | 15 | 15 |
| 2 | Cb0 | 50 | 50 |
| 3 | K | 0.075 | 0.075 |
| 4 | T | 60 | 60 |

Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip kerja reaktor *batch*/partaian
2. Sebutkan dan jelaskan beberapa kelebihan dan kekurangan penggunaan reaktor *batch*/partaian

3. Reaksi orde satu dan elementer fase cair dari $A \rightarrow 2B$ yang terjadi secara isothermal dan pengadukan sempurna pada reaktor *batch*. Pada kondisi awal, konsentrasi A adalah 15 mol/L. Jika laju reaksi destruksi A dinyatakan dalam $r_A = -kC_A$. Hitunglah harga konstanta laju reaksi (k) jika setelah 120 menit konsentrasi A (dalam mol/L) adalah 5 mol/L.
4. Reaksi orde dua dan elementer fase cair dari $2A \rightarrow B$ yang terjadi secara isothermal dan pengadukan sempurna pada reaktor *batch*. Pada kondisi awal, konsentrasi A adalah 5 mol/L. Jika laju reaksi destruksi A dinyatakan dalam $r_A = -kC_A^2$ dan nilai $k = 0,5 \text{ L/mol jam-1}$. Hitunglah waktu yang dibutuhkan untuk mendapatkan konsentrasi A adalah 0,5 mol/L.
5. Reaksi orde tiga dan elementer fase cair dari $3A \rightarrow B$ yang terjadi secara isothermal dan pengadukan sempurna pada reaktor *batch*. Pada kondisi awal, konsentrasi A adalah 10 mol/L. Jika laju reaksi destruksi A dinyatakan dalam $r_A = -kC_A^3$ dan nilai $k = 1 \text{ L}^2/\text{mol}^2 \text{ jam-1}$. Hitunglah konsentrasi A (dalam mol/L) setelah 60 menit. Uraikan jawaban anda dalam dua tempat desimal.

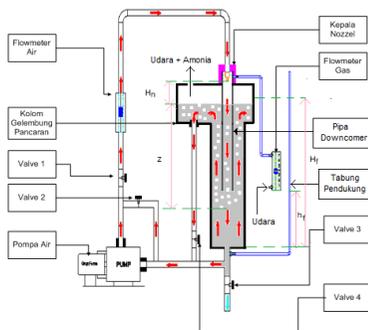
REAKTOR SEMI *BATCH* (REAKTOR GELEMBUNG PANCARAN)

Tujuan Pembelajaran

Subcapaian Pembelajaran – Mata Kuliah (kemampuan akhir yang diharapkan):

1. Mahasiswa mampu menjelaskan pengertian dan proses reaktor gelembung pancaran
2. Mahasiswa mampu menjelaskan keunggulan dan kelemahan reaktor gelembung pancaran
3. Mahasiswa mampu membuat dan menghitung neraca massa reaktor gelembung pancaran

Pengertian dan Proses Reaktor Gelembung Pancaran (RGP)



Gambar 1. Skema reaktor gelembung pancaran (RGP)

Reaktor Gelembung Pancaran merupakan salah jenis reaktor yang dapat diaplikasikan untuk mereduksi kadar amonia yang terkandung di dalam limbah cair industri pupuk dengan bantuan pelucutan udara. Pada Gambar 1, menggambarkan skema reaktor gelembung pancaran dan mekanisme kerja alat ini sangatlah sederhana, di mana limbah cair akan dialirkan oleh pompa melalui *nozzle* dengan kecepatan jet akan menarik/membawa udara di

sekitarnya masuk ke dalam kolom dan menumbuk cairan limbah yang berada di dalam kolom. Peristiwa tumbukan cairan limbah pertama kali terjadi di dalam pipa *downcomer* yang berada simetris di dalam kolom. Tumbukan antara cairan limbah tersebut akan membentuk aliran turbulen dan selanjutnya menghasilkan sejumlah gelembung-gelembung udara seperti awan. Selanjutnya, gelembung-gelembung awan akan pecah di permukaan cairan limbah dan membawa sejumlah amonia dalam bentuk gas meninggalkan kolom. Desain serta ukuran diameter *nozzle* akan sangat berpengaruh terhadap kecepatan tumbukan cairan limbah, aliran turbulen yang terbentuk, dan kecepatan udara masuk ke dalam reaktor. Dari hasil eksperimen pada kolom reduksi dengan volume 12 liter, diameter *nozzle* 12mm dan kecepatan cairan limbah 40L/menit, dapat menghasilkan kecepatan udara masuk 9 Liter/menit, dan efisiensi reduksi kadar amonia hingga 95% yang terkandung dalam limbah cair industri pupuk urea dengan durasi 6 jam.

Selain digunakan untuk mereduksi kadar amonia yang terkandung di dalam limbah cair pupuk urea, reaktor gelembung pancaran juga dapat digunakan untuk pengolahan air dan limbah jenis lainnya, reaksi kimia antara gas dan cair, proses bioteknologi, dan industri makanan dan minuman.

Keunggulan dan Kelemahan Reaktor Gelembung Pancaran (RGP)

- Keunggulan reaktor gelembung pancaran
 - Desain reaktornya sederhana dan ekonomis
 - Biaya operasional murah
 - Pencampuran yang terjadi sangat baik dan efektif
 - Kontrol suhu yang efektif dikarenakan distribusi panas yang merata
 - Sangat efektif untuk mereaksikan antara fase gas dan cair
 - Efisiensi *ammonia removal* bisa mencapai di atas 95%

- Kelemahan reaktor gelembung pancaran
 - Memerlukan kecepatan cairan tinggi untuk menginjeksi gas masuk ke dalam reaktor
 - Efisiensi *ammonia removal* dan koefisien transfer massa mungkin bisa menurun pada skala reaktor yang sangat besar
 - Memerlukan desain yang lebih kompleks pada skala yang sangat besar
 - Ukuran dan distribusi gelembung udara dapat bergantung pada desain *nozzle* dan kondisi operasi

Persamaan Neraca Massa Reaktor Gelembung Pancaran

Neraca amonia keseluruhan yang terjadi di dalam reaktor gelembung pancaran: (Nugroho, Adisalamun, & Machdar, 2014)

$(Neraca\ massa)_{in} - (Neraca\ massa)_{out} = Akumulasi$

$$Q_g C_{g_{in}} - Q_g C_{g_{out}} = V_l \frac{dC_l}{dt} + V_g \frac{dC_g}{dt} \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

$$V_g = \varepsilon_g \cdot V_l \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

$$Q_g C_{g_{in}} - Q_g C_{g_{out}} = V_l \frac{dC_l}{dt} + \varepsilon_g V_l \frac{dC_g}{dt} \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

di mana:

Q_g : laju volumetrik gas (L/menit)

$C_{g_{in}} ; C_{g_{out}}$: konsentrasi amonia masuk dan keluar kolom (mg/L)

V_l : volume cairan (L)

C_l : konsentrasi amonia dalam fase cair (mg/L)

Karena amonia masuk pada fase udara ($C_{g_{in}}$) dan bentuk akumulasi bernilai nol, maka Pers. (3) akan dibentuk sbb:

$$-Q_g C_{g_{out}} = V_l \frac{dC_l}{dt} \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

Untuk sistem larutan encer, kesetimbangan (Demergenci, Nuri, & Yildiz, 2012)

(Neraca massa) In – (Neraca massa) Out = Akumulasi

$$Q_g C_g - Q_g (C_g + dC_g) + K_L a V_l (C_l - C_l^*) = \varepsilon_g V_l \frac{dC_g}{dt} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

$$C_l^* = \frac{C_g}{He} \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

$$Q_g dC_g = K_L a V_l \left(C_l - \frac{C_g}{He} \right) \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

$$\int_{C_{g_{in}}=0}^{C_{g_{out}}} \frac{dC_g}{\left(C_l - \frac{C_g}{He} \right)} = \frac{K_L a V_l}{Q_g} \quad \dots \text{Pers. (8)}$$

$$C_{g_{out}} = C_l \cdot He \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{K_L a V_l}{He \cdot Q_g} \right)} \right\} \quad \dots \text{Pers. (9)}$$

Substitusikan Pers. (9) ke Pers. (4) akan diperoleh:

$$-\int_{C_{l_0}}^{C_{l_t}} \frac{dC_l}{C_l} = \frac{Q_g \cdot He}{V_l} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{K_L a \cdot V_l}{He \cdot Q_g}\right)} \right\} \int_0^t dt \quad \dots \text{Pers. (10)}$$

$$-\ln \left(\frac{C_{l_t}}{C_{l_0}} \right) = \frac{Q_g \cdot He}{V_l} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{K_L a \cdot V_l}{He \cdot Q_g}\right)} \right\} t \quad \dots \text{Pers. (11)}$$

Ketika $\frac{K_L a \cdot V_l}{He \cdot Q_g} \ll 1$, maka Pers. (11) akan menjadi: (Demergenci, Nuri, & Yildiz, 2012)

$$-\ln \left(\frac{C_{l_t}}{C_{l_0}} \right) = K_L a \cdot t \quad \dots \text{Pers. (12)}$$

Menghitung efisiensi reduksi amonia dengan menggunakan Pers. (13):

$$\text{Efisiensi}(\%) = \frac{C_{l_0} - C_{l_t}}{C_{l_0}} \quad \dots \text{Pers. (13)}$$

Neraca absorpsi gas CO2 dalam solven MEA yang terjadi di dalam reaktor gelembung pancaran:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena ada aliran CO2 masuk dan keluar yang terjadi di kolom gelembung pancaran, maka:

$$F_{CO_2}(V) - F_{CO_2}(V + \Delta V) + r\Delta V = \left[\frac{dN_{CO_2}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2), akan menjadi:

$$F_{CO_2}(V) - F_{CO_2}(V + \Delta V) + r\Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

Diketahui bahwa $F_{CO_2} = Q_g C_{CO_2}$, maka Pers. (3) akan menjadi:

$$Q_g C_{CO_2}(V) - Q_g C_{CO_2}(V + \Delta V) + r\Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

$$r = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} \frac{Q_g C_{CO_2}(V + \Delta V) - Q_g C_{CO_2}(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

Karena Q_g merupakan nilainya konstan, maka persamaan (5) akan menjadi:

$$r = Q_g \frac{dC_{CO_2}}{dV} \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

Dan diketahui bahwa $V_g = Q_g t$, maka persamaan (6) akan menjadi:

$$r = Q_g \frac{dC_{CO_2}}{d(Qg t)} \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

$$r = \frac{dC_{CO_2}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (8)}$$

Diketahui bahwa $r = -k C_{CO_2} C_{MEA}$, maka pers. (8) akan menjadi: (Danckwertz & Agar, 2003)

$$-k C_{CO_2} C_{MEA} = \frac{dC_{CO_2}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (9)}$$

Untuk memperoleh C_{MEA} , dapat dilakukan dengan perhitungan stoikiometri sebagai berikut:



$$\begin{array}{l} \text{Mula-mula:} \quad (C_{CO_2})_0 \qquad (C_{MEA})_0 \\ \text{Reaksi:} \quad (C_{CO_2})_0 - (C_{CO_2})_t \quad 2 \times \{(C_{CO_2})_0 - (C_{CO_2})_t\} \\ \hline \text{Setimbang:} \quad (C_{CO_2})_t \qquad \{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_t \end{array}$$

Di mana C_{CO_2} dan C_{MEA} dalam keadaan setimbang, maka persamaan (9) akan menjadi:

$$-k(C_{CO_2})_t \left(\{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_t \right) = \frac{dC_{CO_2}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (10)}$$

$$-k \int_0^t dt = \int_{(C_{CO_2})_0}^{(C_{CO_2})_t} \frac{dC_{CO_2}}{(C_{CO_2})_t \left(\{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_t \right)} \quad \dots \text{Pers. (11)}$$

$$-kt = \int_{(C_{CO_2})_0}^{(C_{CO_2})_t} \frac{A dC_{CO_2}}{(C_{CO_2})_t} + \int_{(C_{CO_2})_0}^{(C_{CO_2})_t} \frac{B dC_{CO_2}}{\left(\{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_t \right)} \quad \dots \text{Pers. (12)}$$

$$-kt = A \ln \left(\frac{(C_{CO_2})_t}{(C_{CO_2})_0} \right) + 1/2 B \ln \left(\frac{\{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_t}{\{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_0} \right) \quad \dots \text{Pers. (13)}$$

$$kt = -A \ln \left(\frac{(C_{CO_2})_t}{(C_{CO_2})_0} \right) - 1/2 B \ln \left(\frac{\{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_t}{(C_{MEA})_0} \right) \quad \dots \text{Pers. (14)}$$

Mencari nilai A dan B:

$$A \left(\{ (C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0 \} + 2(C_{CO_2})_t \right) + B(C_{CO_2})_t = 1$$

Untuk mencari nilai A, maka misalkan $(C_{CO_2})_t = 0$

$$A = 1 / \{ (C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0 \}$$

Untuk mencari nilai B, maka misalkan $(C_{CO_2})_t = (C_{CO_2})_0 - 1/2 (C_{MEA})_0$

$$B = 1 / \{ (C_{CO_2})_0 - 1/2 (C_{MEA})_0 \}$$

Contoh soal 1

Data hasil penelitian yang terjadi di dalam reaktor gelembung pancaran untuk penyisihan kadar amonia yang terkandung di dalam limbah cair pupuk urea dapat dilihat pada table di bawah ini. Hitunglah koefisien perpindahan massa (KLa) dan efisiensi penyisihan amonia?

Tabel 1. Penyisihan kadar amonia

| t (menit) | C (ppm) |
|-----------|---------|
| 0 | 243,6 |
| 30 | 195,1 |
| 60 | 139,3 |
| 90 | 108,1 |
| 120 | 70,5 |
| 150 | 61,8 |
| 180 | 45,3 |
| 210 | 33,7 |
| 240 | 24,6 |
| 270 | 11,9 |

Solusi:

Untuk menghitung koefisien perpindahan massa (KLa) dan efisiensi penyisihan amonia (*ammonia removal*) dapat kita gunakan persamaan (12) dan persamaan (13):

$$-\ln\left(\frac{C_{it}}{C_{i0}}\right) = K_L a. t \quad \dots \text{Pers. (12)}$$

$$\text{efisiensi}(\%) = \frac{C_{i0} - C_{it}}{C_{i0}} \times 100 \quad \dots \text{Pers. (13)}$$

Misalkan:

$y = -\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ dan $t = x$, maka persamaan (12) akan menjadi:

$$y = K_L a. x \quad \dots \text{Pers. (14)}$$

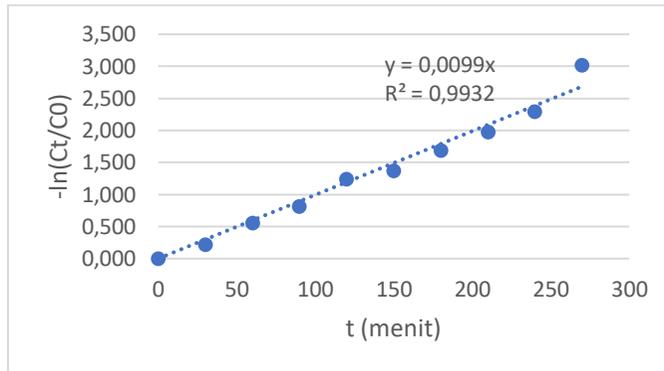
Karena bentuk persamaan (12) seperti persamaan garis lurus, maka untuk menentukan nilai KLa dapat diperoleh dari plot grafik antara $-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ dengan t, dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Membuat tabel perhitungan $-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ yang dapat dilihat pada tabel (2) di bawah ini:

Tabel 2. Nilai $-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ dan efisiensi

| t (menit) | C (ppm) | $-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ | % Efisiensi |
|-----------|---------|------------------------------------|-------------|
| 0 | 243,6 | 0 | 0 |
| 30 | 195,1 | 0,222 | 19,91 |
| 60 | 139,3 | 0,559 | 42,82 |
| 90 | 108,1 | 0,812 | 55,62 |
| 120 | 70,5 | 1,240 | 71,06 |
| 150 | 61,8 | 1,372 | 74,63 |
| 180 | 45,3 | 1,682 | 81,40 |
| 210 | 33,7 | 1,978 | 86,17 |
| 240 | 24,6 | 2,293 | 89,90 |
| 270 | 11,9 | 3,019 | 95,11 |

2. Plot kurva antara $-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ versus t, sehingga diperoleh persamaan garis lurus $y = 0,0099 x$ dengan harga $R^2 = 0,9932$.



Dari grafik di atas diperoleh *slope* garis lurus = 0,0099, maka nilai KLa adalah 0,0099 menit⁻¹ atau 0,594 jam⁻¹. Dari tabel 2. diperoleh nilai efisiensi sebesar 95,5%.

Tanpa menggunakan grafik kita dapat juga dapat menghitung nilai KLa dengan menggunakan persamaan regresi linier sebagai berikut:

| t = x | C | y = $-\ln\left(\frac{C_t}{C_0}\right)$ | x ² | xy |
|-------|-------|---|----------------|---------|
| 0 | 243,6 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 195,1 | 0,222 | 19,91 | 6,66 |
| 60 | 139,3 | 0,559 | 42,82 | 33,53 |
| 90 | 108,1 | 0,812 | 55,62 | 73,12 |
| 120 | 70,5 | 1,240 | 71,06 | 148,79 |
| 150 | 61,8 | 1,372 | 74,63 | 205,74 |
| 180 | 45,3 | 1,682 | 81,40 | 302,80 |
| 210 | 33,7 | 1,978 | 86,17 | 415,39 |
| 240 | 24,6 | 2,293 | 89,90 | 550,27 |
| 270 | 11,9 | 3,019 | 95,11 | 815,13 |
| 1350 | | 13,18 | 256500 | 2551,43 |

$$K_{La} = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$K_{La} = \frac{10 \times 2551,43 - 1350 \times 13,18}{10 \times 256500 - 1350^2} = 0,01$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Fit Linear Curve

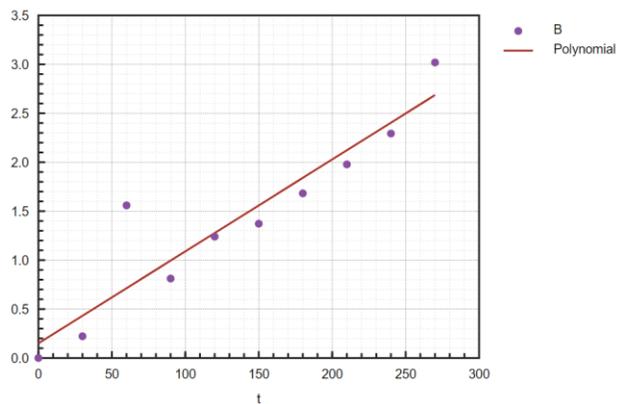
Y = a0 + a1*Time

[

t C

0 0
 30 0.222
 60 1.559
 90 0.812
 120 1.240
 150 1.372
 180 1.682
 210 1.978
 240 2.293
 270 3.019

Linear Regression Plot



]

polyfit x y order [origin]

polyfit t C 1

C=a0 +a1t

| Variable | Value | 95% confidence |
|----------|------------|----------------|
| a0 | 0.14938182 | 0.48407813 |
| a1 | 0.00939495 | 0.00302254 |

| R^2 | R^2adj | Rmsd | Variance |
|-----------|-----------|-----------|----------|
| 0.8652664 | 0.8484247 | 0.1010196 | 0.127562 |

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|-----------|-----------|
| 1 | CaO | 243.6 |
| 2 | Ca | 11.9 |
| 3 | efisiensi | 95.114943 |

Contoh soal 2

Penelitian penyisihan kadar amonia yang terkandung di dalam limbah cair pada reaktor gelembung pancaran memiliki konsentrasi amonia awal adalah 300 ppm dan koefisien perpindahan massa (KLa) 0,6 jam⁻¹. Hitunglah konsentrasi dan efisiensi penyisihan amonia pada waktu 8 jam.

Solusi:

Untuk menghitung konsentrasi penyisihan amonia pada saat 8 jam dapat kita gunakan persamaan (12):

$$-\ln\left(\frac{C_{it}}{C_{i0}}\right) = K_L a \cdot t \quad \dots \text{Pers. (12)}$$

$$C_{it} = C_{i0} e^{-K_L a \cdot t}$$

$$C_{it} = (300 \text{ ppm}) e^{(-0,6 \text{ jam}^{-1} \times 8 \text{ jam})}$$

$$C_{it} = 2,47 \text{ ppm}$$

Dan untuk menghitung efisiensi penyisihan amonia (*ammonia removal*) dapat kita gunakan pers. (13):

$$\text{efisiensi}(\%) = \frac{C_{i0} - C_{it}}{C_{i0}} \quad \dots \text{Pers. (13)}$$

$$\text{efisiensi}(\%) = \frac{300 - 2,47}{300} \times 100 = 99,2\%$$

Penyelesaian dengan Polymath:

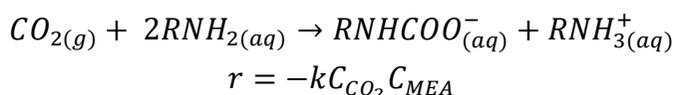
$$\begin{aligned} C_{i0} &= 300 \\ KLa &= 0.6 \\ t &= 8 \\ C_{it} &= C_{i0} * \exp(-KLa * t) \\ \text{efisiensi} &= (C_{i0}-C_{it})/C_{i0} \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|-----------|------------|
| 1 | Ci0 | 300 |
| 2 | Kla | 0.6 |
| 3 | T | 8 |
| 4 | Cit | 2.46892411 |
| 5 | efisiensi | 0.99177025 |

Contoh Soal 3.

Hitunglah konstanta laju reaksi CO₂, apabila pada waktu 5 menit konsentrasi CO₂ yang keluar dari reaktor gelembung pancaran adalah 400 ppm. Reaksi antara CO₂ dengan konsentrasi 800 ppm dengan larutan absorben MEA 900 ppm mengikuti persamaan reaksi dan laju reaksi sebagai berikut:



di mana R = MEA

Solusi:

Untuk menghitung nilai konstanta (*k*) dapat menggunakan persamaan berikut:

$$k = \left\{ -A \ln \left(\frac{(C_{CO_2})_t}{(C_{CO_2})_0} \right) - \frac{1}{2} B \ln \left(\frac{\{(C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0\} + 2(C_{CO_2})_t}{(C_{MEA})_0} \right) \right\} / t$$

...Pers. (14)

Mencari nilai A dan B:

$$A \left(\{ (C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0 \} + 2(C_{CO_2})_t \right) + B(C_{CO_2})_t = 1$$

Untuk mencari nilai A, maka misalkan $(C_{CO_2})_t = 0$

$$A = \frac{1}{\{ (C_{MEA})_0 - 2(C_{CO_2})_0 \}} = \frac{1}{\{ 900 - 2 \times 800 \}}$$

$$A = -0,0014$$

Untuk mencari nilai B, maka misalkan $(C_{CO_2})_t = (C_{CO_2})_0 - \frac{1}{2}(C_{MEA})_0$

$$B = \frac{1}{\{ (C_{CO_2})_0 - \frac{1}{2}(C_{MEA})_0 \}} = \frac{1}{\{ 800 - \frac{1}{2} \times 900 \}}$$

$$B = 0,0029$$

Maka nilai k:

$$k = \left\{ 0,0014 \ln \left(\frac{400}{800} \right) - \frac{1}{2} 0,0029 \ln \left(\frac{\{ 900 - 2 \times 900 \} + 2 \times 400}{900} \right) \right\} / 5$$

$$k = 0,0004 \text{ menit}^{-1}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-------|
| 1 | Ca | 800 |
| 2 | Ma | 900 |
| 3 | Cs | 400 |
| 4 | T | 5 |

| | <i>Variable</i> | <i>Value</i> |
|---|-----------------|--------------|
| 5 | A | -0.00142857 |
| 6 | B | 0.00285714 |
| 7 | K | 0.00042974 |

Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip kerja, keunggulan dan kelemahan reaktor gelembung pancaran
2. Data hasil penelitian yang terjadi di dalam reaktor gelembung pancaran untuk penyisihan kadar amonia yang terkandung di dalam limbah cair pupuk urea dapat dilihat pada table di bawah ini. Hitunglah koefisien perpindahan massa (KLa) dan efisiensi penyisihan amonia?

Tabel 3. Penyisihan kadar amonia

| t (menit) | C (ppm) |
|------------------|----------------|
| 0 | 179,3 |
| 20 | 155,8 |
| 40 | 136,9 |
| 60 | 136,2 |
| 80 | 108,1 |
| 100 | 104,9 |
| 120 | 103,5 |
| 140 | 83,5 |
| 160 | 80,4 |
| 180 | 65,3 |
| 200 | 56,2 |
| 220 | 50,2 |

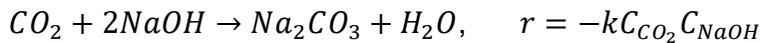
3. Efisiensi penyisihan kadar amonia yang terkandung di dalam limbah cair pada reaktor gelembung pancaran adalah 95% dengan waktu proses penyisihan 5 jam. Konsentrasi amonia awal adalah 250 ppm, hitunglah konsentrasi dan koefisien perpindahan massanya (KLa).
4. Berapakah menit penyisihan amonia yang dibutuhkan untuk mencapai efisiensi 98%, apabila diketahui konsentrasi awal

penyisihan amonia dan koefisien perpindahan massa (KLa) masing-masing adalah 175 ppm dan 0,5 jam-1?

5. Hitunglah konstanta laju reaksi K_2CO_3 , apabila pada waktu 5 menit konsentrasi CO_2 yang keluar dari reaktor gelembung pancaran adalah 400 ppm. Reaksi antara CO_2 dengan konsentrasi 800 ppm dengan larutan absorben K_2CO_3 900 ppm mengikuti persamaan reaksi dan laju reaksi berikut ini:



6. Hitung konsentrasi CO_2 yang keluar reaktor gelembung pancaran setelah 10 menit apabila diketahui konsentrasi CO_2 awal 900 ppm bereaksi dengan $NaOH$ dengan konsentrasi 1200 ppm ($k = 0,0005$ menit-1) mengikuti persamaan dan laju reaksi berikut ini:



REAKTOR ALIR TANGKI BERPENGADUK (RATB)

Tujuan Pembelajaran

Subcapaian Pembelajaran – Mata Kuliah, kemampuan akhir yang diharapkan:

1. Mahasiswa mampu menjelaskan pengertian dan proses reaktor alir tangki berpengaduk
2. Mahasiswa mampu menjelaskan keunggulan dan kelemahan reaktor alir tangki berpengaduk
3. Mahasiswa mampu membuat dan menghitung neraca massa reaktor alir tangki berpengaduk

Pengertian dan Proses Reaktor Alir Tangki Berpengaduk (RATB)

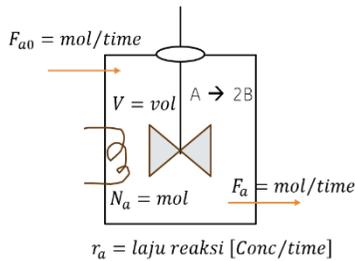
Reaktor ini dikenal juga sebagai reaktor tangki ideal kontinu. adalah reaktor sederhana yang sering digunakan dalam industry kimia dan proses, karena desainnya yang sederhana dan murah. Di reaktor yang berupa tangki yang dilengkapi dengan pengaduk (agitator) ini, satu atau lebih reaktan dengan kecepatan volumetrik masuk kedalam reaktor dan bersamaan dengan itu sejumlah produk dengan kecepatan volumetrik yang sama dikeluarkan dari reaktor. Reaksi berlangsung secara optimal dikarenakan campuran teraduk secara sempurna dan homogen. Adanya pengadukan yang sempurna menyebabkan komposisi di dalam reaktor sama dengan komposisi yang keluar reaktor begitu juga dengan parameter lainnya, seperti suhu. Reaktor ini biasa digunakan untuk reaksi homogen atau reaksi yang terjadi dalam satu fase saja, seperti cair-cair atau gas-gas. Reaktor ini biasa digunakan untuk berbagai jenis reaksi kimia, termasuk reaksi

sintesis, dekomposisi, dan reaksi pengolahan lainnya. Aplikasi reaktor alir tangki berpengaduk biasanya sering ditemukan pada industry yang memproduksi bahan kimia, polimer, bahan farmasi, industry makanan dan minuman, industry pemisahan dan pemurnian bahan kimia, dan industry produk sintesis.

Keunggulan dan Kelemahan Reaktor Alir Tangki Berpengaduk (RATB)

- Keunggulan di antaranya:
 - Memungkinkan kontrol yang baik terhadap kondisi reaksi dikarenakan adanya pengaduk yang dapat memastikan pencampuran yang homogen.
 - Pemantauan dan penyesuaian parameter proses secara real-time
 - Dapat dioperasikan dalam berbagai ukiuran reaktor
 - Cocok untuk produksi dalam jumlah kecil maupun besar
 - Cocok untuk berbagai jenis reaksi kimia
 - Dapat digunakan untuk reaksi berkelanjutan ataupun reaksi *batch*
- Kelemahan di antaranya:
 - Masih mungkin terjadi gradien suhu dan konsentrasi di dalam reaktor
 - Memerlukan perawatan berkala khususnya pada bagian pengaduk
 - Tidak cocok untuk jenis reaksi yang eksotermis atau berbahaya
 - Waktu proses yang panjang

Persamaan Neraca Massa Reaktor Alir Tangki Berpengaduk (RATB)



Gambar 2 Skema reaktor alir tangki berpengaduk

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + [pembentukan]_{karena\ reaksi} = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_A] + [\int r_A dV] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_A \neq f(V)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_A dV = r_A V$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_A}{dt} \right] = 0$. Apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2), akan diperoleh:

$$[F_{A0}] - [F_A] + r_A V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

$$V = \frac{[F_{A0}] - [F_A]}{r_A} \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

Persamaan (4) merupakan persamaan dalam bentuk aljabar. Untuk menyelesaikan persamaan tersebut yaitu dengan metode substitusi dan eliminasi. Apabila diketahui nilai $r_A = -kf(C_A)$ atau $r_A = -kf(N_A)$, maka persamaan (4) akan menjadi:

$$V = \frac{[F_{A0}] - [F_A]}{-kf(C_A)} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

Contoh soal 1.

Hitunglah konsentrasi A setelah reaksi yang terjadi di dalam reaktor alir tangki berpengaduk dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume Reaktor (V) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

Solusi:

Neraca massa reaktor alir tangki berpengaduk:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_A] + \left[\int r_A dV \right] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_A \neq f(V)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_A dV = r_A V$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_A}{dt} \right] = 0$. Apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2), akan diperoleh:

$$[F_{A0}] - [F_A] + r_A V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi A awal asam anhidrat (C_{A0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V), maka persamaan (3) di atas akan dirubah menjadi:

$$[QC_{A0}] - [QC_A] - kC_A V = 0 \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

$$[QC_A] + kC_A V = [QC_{A0}] \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

$$C_A [Q + kV] = [QC_{A0}] \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

$$C_A = \frac{QC_{A0}}{Q + kV} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

Dari soal diketahui nilai:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume Reaktor (V) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

Dengan memasukan nilai konsentrasi A awal, koefisien laju reaksi, volume reaktor, dan laju *volumetric* kedalam persamaan 5, maka kita bisa menghitung nilai CA sebagai berikut:

$$C_A = \frac{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} \times 3 \text{ mol}/\text{m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} + 0,5 \text{ 1}/\text{menit} \times 5 \text{ m}^3}$$

$$C_A = \frac{3,75 \text{ mol}/\text{menit}}{3,75 \text{ m}^3/\text{menit}} = 1 \text{ mol}/\text{m}^3$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

| | | |
|-----|---|---------------|
| Ca0 | = | 3 |
| k | = | 0.5 |
| V | = | 5 |
| Q | = | 1.25 |
| Ca | = | Q*Ca0/(Q+k*V) |

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | V | 5 |
| 4 | Q | 1.25 |
| 5 | Ca | 1 |

Contoh soal 2.

Hitunglah konsentrasi A setelah reaksi yang terjadi di dalam reaktor alir tangki berpengaduk dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume Reaktor (V) = 5 m³
- Laju volumetric (Q) = 1,25 m³/menit

Solusi:

- Neraca massa reaktor alir tangki berpengaduk:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_A] + \left[\int r_A dV \right] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_A \neq f(V)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_A dV = r_A V$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_A}{dt}\right] = 0$. Apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2), akan diperoleh:

$$[F_{A0}] - [F_A] + r_A V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi A awal asam anhidrat (C_{A0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V), maka persamaan (3) di atas akan dirubah menjadi:

$$[QC_{A0}] - [QC_A] - kC_A^2 V = 0 \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

$$kVC_A^2 + QC_A = QC_{A0} \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

Karena CA bentuk persamaan di atas adalah persamaan kuadrat, maka untuk mendapatkan nilai CA dapat diselesaikan dengan cara sebagai berikut:

$$C_A^2 + \frac{Q}{kV} C_A = \frac{QC_{A0}}{kV} \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

$$C_A^2 + \frac{Q}{kV} C_A = \frac{QC_{A0}}{kV} \quad \dots \text{Pers. (4c)}$$

$$\left(C_A + \frac{Q}{2kV}\right)^2 - \frac{Q^2}{4k^2V^2} = \frac{QC_{A0}}{kV} \quad \dots \text{Pers. (4d)}$$

$$\left(C_A + \frac{Q}{2kV}\right)^2 = \frac{QC_{A0}}{kV} + \frac{Q^2}{4k^2V^2} \quad \dots \text{Pers. (4e)}$$

$$\left(C_A + \frac{Q}{2kV}\right)^2 = \frac{4kVQC_{A0}}{4k^2V^2} + \frac{Q^2}{4k^2V^2} \quad \dots \text{Pers. (4f)}$$

$$C_A + \frac{Q}{2kV} = \sqrt{\frac{4kVQC_{A0} + Q^2}{4k^2V^2}} \quad \dots \text{Pers. (4g)}$$

$$C_A = \frac{-Q \pm \sqrt{4kVQC_{A0} + Q^2}}{2kV} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

Dari soal diketahui nilai:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume Reaktor (V) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

Dengan memasukan nilai konsentrasi A awal, koefisien laju reaksi, volume reaktor, dan laju *volumetric* kedalam persamaan 5, maka kita bisa menghitung nilai CA sebagai berikut:

$$C_A = \frac{-Q + \sqrt{4kVQC_{A0} + Q^2}}{2kV}$$

$$C_A = \frac{-1,25 + \sqrt{4 \times 0,5 \times 5 \times 1,25 \times 3 + 1,25^2}}{2 \times 0,5 \times 5} = 1$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Perhitungan konsentrasi Ca

$$Ca0 = 3$$

$$k = 0.5$$

$$V = 5$$

$$Q = 1.25$$

$$f(Ca) = Q \cdot Ca0 - Q \cdot Ca - k \cdot V \cdot Ca^2$$

$$Ca(\text{max}) = 3$$

$$Ca(\text{min}) = 0$$

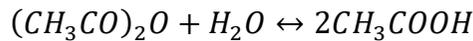
Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|-------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca | 1 | -8.4E-15 | 1.5 | -3.8E00 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|-------|---------------|
| 1 | Ca0 | 3 | 3 |
| 2 | k | 0.5 | 0.5 |
| 3 | Q | 1.25 | 1.25 |
| 4 | V | 5 | 5 |

Contoh soal 3.

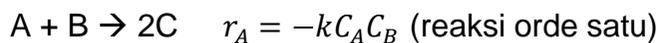
Hidrolisa asam anhidrat dari asam asetat yang terjadi di dalam reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) dengan volume 1250 L. Konsentrasi asam anhidrat dan air yang masuk ke dalam reaktor masing-masing 2,5 mol/L dan 50 mol/L, dengan reaksi:



Reaksi orde pertama pada $(CH_3CO)_2O$ dan H_2O . Pada saat temperatur reaktor, laju konstan adalah 0,075 L/(mol s). Kecepatan alir masuk 15 L/s. Bagaimana dengan konversi asam anhidrat?

Solusi:

Misalkan reaksi di atas dapat disederhanakan sbb:



Maka dari soal di atas diketahui bahwa:

- V = 1250 L (volume reaktor)
- k = 0,075 L/(mol s)
- C_{A0} = 2,5 mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat)
- C_{B0} = 50 mol/L (konsentrasi awal air)
- Q = 15 L/s (kecepatan alir/laju alir masuk)

- **Neraca massa reaktor alir tangki berpengaduk:**

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{matrix} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{matrix} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_A] + \left[\int r_A dV \right] = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_A \neq f(V)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_A dV = r_A V$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_A}{dt} \right] = 0$. Apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2a), akan diperoleh:

$$[F_{A0}] - [F_A] + r_A V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa di A: $(CH_3CO)_2O$**

$$[F_{A0}] - [F_A] + r_A V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi awal asam anhidrat (C_{A0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V), maka persamaan (3a) di atas akan dirubah menjadi:

$$[QC_{A0}] - [QC_A] - kC_A C_B V = 0$$

$$[15 \times 2,5] - [15C_A] - 0,075C_A C_B 1250 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

$$37,5 - 15C_A - 93,75C_A C_B = 0 \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

- **Neraca massa di B: H_2O**

$$[F_{B0}] - [F_B] + r_A V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi awal air (C_{B0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V), maka persamaan di atas akan diubah menjadi:

$$[QC_{B0}] - [QC_B] - kC_A C_B V = 0$$

$$[15 \times 50] - [15C_B] - 0,075C_A C_B 1250 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

$$750 - 15C_B - 93,75C_A C_B = 0 \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

Lakukan eliminasi persamaan (5a) dan (5b) akan diperoleh

$$C_B = 47,5 + C_A \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

Substitusikan persamaan (7) ke persamaan (4) akan diperoleh:

$$37,5 - 15C_A - 93,75C_A(47,5 + C_A) = 0$$

$$C_A^2 + 47,66C_A - 0,4 = 0 \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

Untuk mendapatkan nilai C_A pada persamaan (7) yang merupakan bentuk kuadrat dapat diselesaikan dengan rumus abc sebagai berikut:

$$C_A = \frac{-47,66 + \sqrt{47,66^2 - 4(1)(-0,4)}}{2(1)} = 0,0084 \text{ mol/L}$$

Maka untuk mencari nilai C_B dapat dilakukan dengan cara menyubstitusi ke persamaan (8)

$$C_B = 47,5 + 0,0084 = 47,508 \text{ mol/L}$$

Sehingga nilai konversi:

$$X = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} = \frac{2,5 - 0,0084}{2,5} = 0,997$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Mencari harga Ca dan Cb serta nilai konversi

| | | |
|----------|---|----------------------|
| Ca0 | = | 2.5 |
| Cb0 | = | 50 |
| k | = | 0.075 |
| V | = | 1250 |
| Q | = | 15 |
| f(Ca) | = | Q*Ca0-Q*Ca-k*Ca*Cb*V |
| Cb | = | (Q*Cb0)/(Q + k*Ca*V) |
| Ca(min) | = | -1 |
| Ca(max) | = | 5 |
| konversi | = | (Ca0-Ca)/Ca0 |

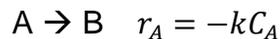
Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|-----------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca | 0.0083913 | -1.7E-08 | 2 | -6.9E02 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca0 | 2.5 | 2.5 |
| 2 | Cb | 47.508391 | 3.7037037 |
| 3 | Cb0 | 50 | 50 |
| 4 | k | 0.075 | 0.075 |
| 5 | konversi | 0.99664348 | 0.2 |
| 6 | Q | 15 | 15 |
| 7 | V | 1250 | 1250 |

Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip kerja, keunggulan dan kelemahan reaktor alir tangki berpengaduk
2. Hitunglah konversi A menjadi B yang berlangsung di dalam reaktor alir tangki berpengaduk dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 10 mol/m³

Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit

Volume Reaktor (V) = 5 m³

Laju *volumetric* (Q) = 1,5 m³/menit

3. Hitunglah konsentrasi A dan konsentrasi B yang terjadi di sebuah CSTR yang memiliki volume 500 L dengan konsentrasi umpan A adalah 5 mol/L A dan konsentrasi B adalah 25 mol/L. Reaksinya:



merupakan reaksi orde total tiga dengan laju alir umpan adalah 10 L/menit, dan konstanta laju reaksi adalah 0,1 L/(mol s). Silahkan nyatakan jawaban anda ke dua tempat desimal.

4. Hitunglah konsentrasi A dan konsentrasi B yang terjadi di sebuah CSTR yang memiliki volume 50 L dengan konsentrasi umpan A adalah 25 mol/L A dan konsentrasi B adalah 50 mol/L. Reaksinya:



merupakan reaksi orde total tiga dengan laju alir umpan adalah 50 L/menit, dan konstanta laju reaksi adalah 0,5 L/(mol s). Silahkan nyatakan jawaban anda ke dua tempat desimal

REAKTOR ALIR PIPA (RAP)

Tujuan Pembelajaran

Subcapaian Pembelajaran – Mata Kuliah (kemampuan akhir yang diharapkan):

1. Mahasiswa mampu menjelaskan pengertian dan proses reaktor alir pipa
2. Mahasiswa mampu menjelaskan keunggulan dan kelemahan reaktor alir pipa
3. Mahasiswa mampu membuat dan menghitung neraca massa reaktor alir pipa

Pengertian dan Proses Reaktor Alir Pipa (RAP)

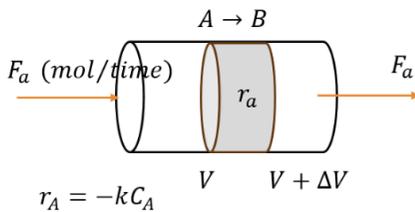
Reaktor ini memiliki ciri khas berupa pipa (tube) yang disusun paralel, adalah salah satu jenis reaktor aliran yang umum digunakan dalam industri kimia untuk mereaksikan reaktan yang mengalir secara kontinu. Prinsip kerja reaktor pipa, diawali dengan masuknya reaktan secara kontinu ke dalam reaktor pipa dengan laju aliran yang dapat dikendalikan. Setelah reaktan memasuki reaktor pipa, reaktan akan bereaksi sesuai dengan kondisi parameter yang ditetapkan seperti temperatur, tekanan dan laju aliran reaktan. Karena adanya aliran yang terjadi di dalam reaktor pipa, maka pencampuran antar reaktan dapat terjadi secara alami di dalam reaktor pipa. Produk yang merupakan hasil dari reaksi, dapat diambil secara kontinu dari ujung reaktor pipa atau dapat diambil pada titik tertentu di sepanjang reaktor pipa, hal ini tergantung pada kebutuhan produk yang diinginkan. Reaktor pipa ini juga sangat cocok untuk jenis reaktan dalam bentuk gas maupun cairan. Aplikasi reaktor alir pipa biasanya dapat kita jumpai pada industri kimia yang memproduksi bahan kimia seperti etilena, amonia, atau produk petrokimia, industri

farmasi yang menyintesis obat-obatan, vitamin serta produk farmasi lainnya, dan industri pangan seperti industri proses pemurnian, fermentasi serta pemrosesan makanan.

Keunggulan dan Kelemahan Reaktor Alir Pipa (RAP)

- Keunggulan di antaranya:
 - Pengontrolan yang baik
 - Efisiensi tinggi
 - Dapat dioperasikan dalam berbagai ukuran
 - Cocok untuk berbagai jenis reaksi, termasuk reaksi yang kompleks
- Kelemahan di antaranya:
 - Pencampuran antar reaktan hanya terjadi karena adanya aliran dalam reaktor pipa
 - Sulit mempertahankan suhu konstan di sepanjang reaktor pipa khususnya reaksi yang sangat eksotermis
 - Risiko kontaminasi dapat meningkat jika tidak dibersihkan secara berkala

Persamaan Neraca Massa Reaktor Alir Pipa (RAP)



not well mixed

Gambar 5. Skema reaktor alir pipa

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + [pembentukan]_{karena\ reaksi} = [akumulasi] \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir pipa, maka:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2), akan menjadi:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

$$r_A = \frac{F_A(V + \Delta V) - F_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

Apabila persamaan (4) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_A = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} \frac{F_A(V + \Delta V) - F_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

$$r_A = \frac{dF_A}{dV} \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

Karena persamaan (6) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara diferensiasi atau dalam bentuk integral sebagai berikut:

$$\int dV = \int \frac{dF_A}{r_A} \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

$$V = \int \frac{dF_A}{r_A} \quad \dots \text{Pers. (8)}$$

Contoh soal 1

Hitunglah konversi A menjadi B yang berlangsung di dalam reaktor alir pipa (RAP) dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume Reaktor (V) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

Solusi:

Neraca massa reaktor pipa alir:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi]$$

...Pers. (1)

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir pipa, maka:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = \left[\frac{dN_A}{dt} \right]$$

...Pers. (2)

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2), akan menjadi:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0$$

...Pers. (3)

Diketahui bahwa $F_A = QC_A$, maka Pers. (3) akan menjadi:

$$QC_A(V) - QC_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0$$

...Pers. (4)

$$r_A = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} \frac{QC_A(V + \Delta V) - QC_A(V)}{\Delta V}$$

...Pers. (5)

Karena Q merupakan nilainya konstan, maka persamaan (5) akan menjadi:

$$r_A = Q \frac{dc_A}{dV}$$

...Pers. (6)

Dan diketahui bahwa $V = Qt$, maka persamaan (6) akan menjadi:

$$r_A = Q \frac{dc_A}{d(Qt)}$$

...Pers. (7)

$$r_A = \frac{dC_A}{dt} \quad \dots \text{Pers. (8)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_A = -kC_A$, maka Pers. (8) akan menjadi:

$$-kC_A = \frac{dC_A}{dt} \quad \dots \text{Pers. (9)}$$

$$-k \int_0^t dt = \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} \quad \dots \text{Pers. (10)}$$

$$-k(t - 0) = \ln \left(\frac{C_A}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (11)}$$

$$C_A = C_{A0} e^{-kt} \quad \dots \text{Pers. (12)}$$

Dari soal diketahui data-datanya sebagai berikut:

| | | |
|----------|---|----------------------------|
| C_{A0} | = | 3 mol/m ³ |
| k | = | 0,5 1/menit |
| V | = | 5 m ³ |
| Q | = | 1,25 m ³ /menit |

Untuk mencari t dapat kita peroleh dari:

$$t = V/Q = 5 \text{ m}^3 / 1,25 \text{ m}^3 / \text{menit} = 4 \text{ menit}$$

Apabila nilai C_{A0} , k , dan t disubstitusikan ke persamaan (12) akan diperoleh nilai C_A :

$$C_A = 3e^{-(0,5 \times 4)} = 0,406 \text{ mol/m}^3$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Mencari harga Ca

$$Ca_0 = 3$$

$$k = 0.5$$

$$V = 5$$

$$Q = 1.25$$

$$t = V/Q$$

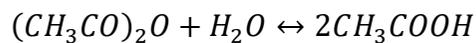
$$Ca = Ca_0 \cdot \exp(-k \cdot t)$$

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | K | 0.5 |
| 3 | V | 5 |
| 4 | Q | 1.25 |
| 5 | T | 4 |
| 6 | Ca | 0.40600585 |

Contoh soal 2.

Hidrolisa asam anhidrat dari asam asetat yang terjadi di dalam reaktor alir pipa (RAP) dengan volume 15 L. Konsentrasi asam anhidrat dan air yang masuk kedalam reaktor masing-masing 2,5 mol/L dan 50 mol/L, dengan reaksi:

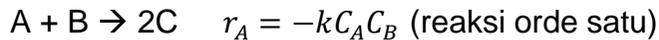


Reaksi orde pertama pada $(CH_3CO)_2O$ dan H_2O . Pada saat temperature reaktor, laju konstan adalah 0,075 L/(mol s). Kecepatan alir masuk 15 L/s. Bagaimana dengan konversi asam anhidrat?

Untuk soal ini kita akan bagi menjadi 2 penyelesaian sebagai berikut:

Solusi 1:

Misalkan reaksi di atas dapat disederhanakan sbb:



Maka dari soal di atas diketahui bahwa:

$$V = 15 \text{ L (volume reaktor)}$$

$$k = 0,075 \text{ L/(mol s)}$$

$$C_{A0} = 2,5 \text{ mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat)}$$

$$C_{B0} = 50 \text{ mol/L (konsentrasi awal air)}$$

$$Q = 15 \text{ L/s (kecepatan alir/laju alir masuk)}$$

Neraca massa reaktor pipa alir:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi]$$

...Pers. (1)

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa pada A: $(CH_3CO)_2O$**

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2a), akan menjadi:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

$$r_A = \frac{F_A(V + \Delta V) - F_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

Apabila persamaan (4) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_A = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} \frac{F_A(V + \Delta V) - F_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

$$r_A = \frac{dF_A}{dV} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

Karena persamaan (6a) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara diferensiasi atau dalam bentuk integral sebagai berikut:

$$\int dV = \int \frac{dF_A}{r_A} \quad \dots \text{Pers. (7a)}$$

$$V = \int \frac{dF_A}{r_A} \quad \dots \text{Pers. (8a)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_A = -kC_A C_B$, kita akan melakukan integrasi terhadap CA maka nilai CB diasumsikan konstan, maka Pers. (8a) akan menjadi:

$$-kC_A C_B = \frac{dC_A}{dt} \quad \dots \text{Pers. (9a)}$$

$$-kC_B \int_0^t dt = \int_{C_{A0}}^{C_A} \frac{dC_A}{C_A} \quad \dots \text{Pers. (10a)}$$

$$-kC_B(t - 0) = \ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) \quad \dots \text{Pers. (11a)}$$

$$-kC_B t = \ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) \quad \dots \text{Pers. (12a)}$$

$$C_A = C_{A0} e^{-C_B k t} \quad \dots \text{Pers. (13a)}$$

- **Neraca massa pada B: H_2O**

$$F_B(V) - F_B(V + \Delta V) + r_A \Delta V = \left[\frac{dN_B}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2b)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2b), akan menjadi:

$$F_B(V) - F_B(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

$$r_A = \frac{F_B(V+\Delta V) - F_B(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

Apabila persamaan (4b) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_A = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} \frac{F_B(V+\Delta V) - F_B(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

$$r_A = \frac{dF_B}{dV} \quad \dots \text{Pers. (6b)}$$

Karena persamaan (6b) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara diferensiasi atau dalam bentuk integral sebagai berikut:

$$\int dV = \int \frac{dF_B}{r_A} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

$$V = \int \frac{dF_B}{r_A} \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_A = -kC_A C_B$, kita akan melakukan integrasi terhadap C_B maka nilai C_A diasumsikan konstan, maka Pers. (8b) akan menjadi:

$$-kC_A C_B = \frac{dC_B}{dt} \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

$$-kC_A \int_0^t dt = \int_{C_{B0}}^{C_B} \frac{dC_B}{C_B} \quad \dots \text{Pers. (10b)}$$

$$-kC_A (t - 0) = \ln \left(\frac{C_B}{C_{B0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (11b)}$$

$$-kC_A t = \ln \left(\frac{C_B}{C_{B0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (12b)}$$

$$C_B = C_{B0}e^{-C_Akt} \quad \dots\text{Pers. (13b)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA, kita dapat menyubstitusikan persamaan (13b) ke persamaan (12a), menjadi:

$$-kC_{B0}e^{-C_Akt}t = \ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right) \quad \dots\text{Pers. (14)}$$

$$\ln C_A - \ln C_{A0} + kC_{B0}e^{-C_Akt}t = 0 \quad \dots\text{Pers. (15)}$$

di mana $t = \frac{V}{Q} = \frac{15L}{15L/s} = 1s$

$$\ln C_A - \ln 2,5 + 0,075 \times 50 \times e^{-C_A \times 0,075 \times 1} \times 1 = 0$$

$$\ln C_A + 3,75e^{-0,075C_A} - 0,92 = 0$$

Untuk mendapatkan nilai CA kita dapat lakukan *trial & error* sebagai berikut:

| | |
|------|--------------------------------------|
| CA | $\ln C_A + 3,75e^{-0,075C_A} - 0,92$ |
| 0,05 | -0,176 |
| CA | 0 |
| 0,06 | 0,0034 |

$$C_A = 0,05 + \frac{0 + 0,176}{0,0035 + 0,176}(0,06 - 0,05)$$

$$C_A = 0,059 \text{ mol/L}$$

Untuk mendapatkan nilai B, kita substitusikan nilai CA ke persamaan (13b)

$$C_B = 50 \times e^{-0,059 \times 0,075 \times 1} = 49,77 \text{ mol/L}$$

Maka nilai konversi:

$$X = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} = \frac{2,5 - 0,056}{2,5} = 0,98$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Mencari harga Ca, Cb, dan konversi

$$Ca_0 = 2.5$$

$$Cb_0 = 50$$

$$k = 0.075$$

$$V = 15$$

$$Q = 15$$

$$t = V/Q$$

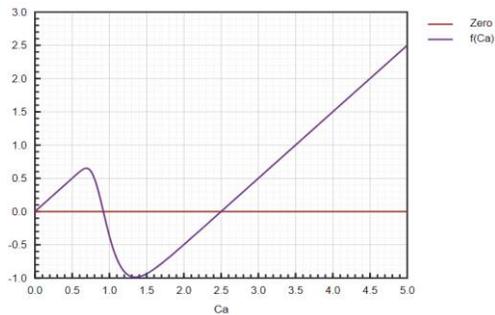
$$f(Ca) = Ca - Ca_0 \cdot \exp(-k \cdot t \cdot Cb)$$

$$Cb = Cb_0 \cdot \exp(-k \cdot t \cdot Ca)$$

$$Ca(\min) = 0$$

$$Ca(\max) = 2.5$$

$$\text{konversi} = (Ca_0 - Ca) / Ca_0$$



Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca | 0.05978914 | -8.3E-17 | 1.25 | 1.2E00 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca0 | 2.5 | 2.5 |
| 2 | Cb | 49.776293 | 45.525518 |
| 3 | Cb0 | 50 | 50 |
| 4 | K | 0.075 | 0.075 |
| 5 | konversi | 0.97608434 | 0.5 |
| 6 | Q | 15 | 15 |
| 7 | T | 1 | 1 |
| 8 | V | 15 | 15 |

Solusi 2:

Dari data diketahui nilai CA_0 dan CB_0 , kita asumsi bahwa nilai konsentrasi A (CA) pada kondisi setimbang (kondisi waktu t) adalah CA maka secara stoikiometri dapat kita lakukan sebagai berikut:

| | | | | | | |
|-----------|---|-----------|---|-------------|---|---|
| | | A | + | B | → | C |
| Mula-mula | : | 2,5 | | 50 | | |
| Bereaksi | : | 2,5- CA | | 2,5- CA | | |
| Setimbang | : | CA | | $47,5 + CA$ | | |

Diketahui dari soal bahwa $r_A = -kC_A C_B$, kita akan melakukan integrasi terhadap CA dengan menggunakan persamaan (9a) sebagai berikut:

$$-kC_A C_B = \frac{dC_A}{dt} \quad \dots \text{Pers. (9a)}$$

Di mana nilai CA dan CB adalah nilai masing-masing konsentrasi pada keadaan setimbang maka persamaan (9a) akan berubah menjadi:

$$-kC_A(47,5 + C_A) = \frac{dC_A}{dt} \quad \dots \text{Pers. (9)}$$

$$-k dt = \frac{dC_A}{C_A(47,5 + C_A)} \quad \dots \text{Pers. (10)}$$

Selanjutnya kita integrasi dengan batasan $t = 0$ dengan nilai $CA = CA_0$ dan pada saat $t = t$ dengan nilai $CA = CA$

$$-k \int_0^t dt = \int_{CA_0}^{CA} \frac{dC_A}{C_A(47,5 + C_A)} \quad \dots \text{Pers. (11)}$$

Bentuk integral pada persamaan (11) dapat diselesaikan dengan cara sebagai berikut:

$$-k \int_0^t dt = \int_{CA_0}^{CA} \frac{A dC_A}{C_A} + \int_{CA_0}^{CA} \frac{B dC_A}{(47,5 + C_A)} \quad \dots \text{Pers. (12)}$$

$$-kt = A \ln \left(\frac{C_A}{C_{A0}} \right) + B \ln \left(\frac{47,5 + C_A}{47,5 + C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (13)}$$

Untuk mencari nilai koefisien A dan B dapat kita lakukan sebagai berikut:

$$A(47,5 + C_A) + B(C_A) = 1$$

Untuk mendapat nilai A maka kita dapat menjadikan nol nilai B dengan cara memisalkan nilai $C_A = 0$, sehingga diperoleh nilai $A = 1/47,5$ dan untuk mendapatkan nilai kita dapat menolak nilai A dengan cara memisalkan nilai $C_A = -47,5$ sehingga diperoleh nilai $B = -1/47,5$. Apabila nilai A dan B kita substitusikan ke persamaan (13) akan diperoleh:

$$-kt = 1/47,5 \ln \left(\frac{C_A}{C_{A0}} \right) - 1/47,5 \ln \left(\frac{47,5 + C_A}{47,5 + C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (14)}$$

Dari soal diketahui nilai:

| | |
|----------|--|
| V | = 15 L (volume reaktor) |
| k | = 0,075 L/(mol s) |
| C_{A0} | = 2,5 mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat) |
| Q | = 15 L/s (kecepatan alir/laju alir masuk) |

Untuk mencari $t = V/Q = 1250 \text{ t} = V/Q = 15L/15L/s = 1 \text{ s}$, semua nilai ini disutisikan kerpsamaan (14) akan diperoleh:

$$0,075 \times 1 = 1/47,5 \left\{ \ln \left(\frac{47,5 + C_A}{47,5 + 2,5} \right) - \ln \left(\frac{C_A}{2,5} \right) \right\} \quad \dots \text{Pers. (15)}$$

$$3,56 = \ln \left(\frac{47,5 + C_A}{50} \times \frac{2,5}{C_A} \right) \quad \dots \text{Pers. (16)}$$

$$35,25 = \left(\frac{47,5 + C_A}{50} \times \frac{2,5}{C_A} \right) \quad \dots \text{Pers. (17)}$$

$$\begin{aligned}
 C_A &= 0,067 \\
 C_B &= 47,5 - 0,067 = 47,43
 \end{aligned}$$

Maka nilai konversi:

$$X = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} = \frac{2,5 - 0,067}{2,5} = 0,97$$

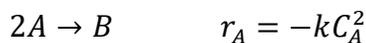
Soal Latihan

1. Jelaskan prinsip kerja reaktor alir pipa
2. Jelaskan kelebihan dan kekurangan reaktor alir pipa
3. Hitunglah harga koefisien laju reaksi (1/menit) yang terjadi di sebuah RAP jika yang diinginkan konsentrasi A adalah 0,2 mol/m³, menurut reaksi:



Adapun data

- Konsentrasi A awal = 4 mol/m³
 - Volume reaktor = 40 m³
 - Kecepatan laju *volumetric* = 10 m³/menit
4. Hitunglah harga koefisien laju reaksi (1/menit) yang terjadi di sebuah RAP jika yang diinginkan konsentrasi A adalah 0,3 mol/m³, menurut reaksi:



Adapun data

- Konsentrasi A awal = 3 mol/m³
- Volume reaktor = 5 m³
- Kecepatan laju *volumetric* = 0,5 m³/menit

REAKTOR SERI

Tujuan Pembelajaran

Subcapaian Pembelajaran – Mata Kuliah (kemampuan akhir yang diharapkan):

1. Mahasiswa mampu menjelaskan pengertian dan proses reaktor seri
2. Mahasiswa mampu menjelaskan keunggulan dan kelemahan reaktor seri
3. Mahasiswa mampu membuat neraca massa pada reaktor seri antara dua reaktor alir tangki berpengaduk (RATB)
4. Mahasiswa mampu membuat neraca massa pada reaktor seri kombinasi antara reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) dengan reaktor alir pipa (RAP)
5. Mahasiswa mampu membuat neraca massa pada reaktor seri antara dua reaktor alir pipa (RAP)

Pengertian dan Proses Reaktor Seri

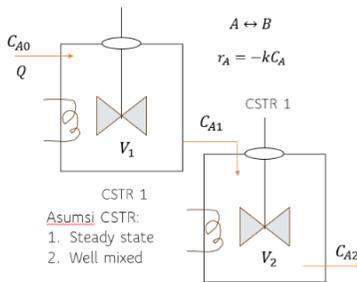
Reaktor seri merupakan susunan dari beberapa reaktor berbeda yang terhubung secara berurutan di mana reaksi kimia berlangsung melalui tahap-tahapan yang terpisah di masing-masing reaktor. Konsep reaktor seri sangat penting dalam rekayasa suatu proses karena memungkinkan pengaturan yang fleksibel dan pengoptimalan proses reaksi agar mencapai efisiensi dan konversi reaktan dapat ditingkatkan. Proses reaktor seri dapat terdiri dari berbagai jenis reaktor seperti rangkaian berurutan antara dua reaktor alir tangki berpengaduk (RATB), rangkaian antar dua reaktor alir pipa (RAP), atau kombinasi dari reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) dengan reaktor alir pipa (RAP). Produk dari suatu reaktor akan menjadi bahan baku atau reaktan untuk reaktor berikutnya dalam suatu rangkaian

berurutan. Untuk menghasilkan produk dengan kualitas dan jumlah yang diinginkan oleh industri, reaktor seri sering digunakan dalam proses industri kimia, farmasi, dan bioteknologi.

Keunggulan dan Kelemahan Reaktor Seri

- Keunggulan di antaranya:
 - Dapat mengontrol kondisi reaksi dengan baik
 - Dapat meningkatkan konversi reaktan dan pengoptimalan kondisi reaksi
 - Cocok untuk berbagai jenis reaksi kimia
 - Dapat diadaptasi untuk berbagai skenario reaksi
- Kelemahan di antaranya:
 - Memerlukan perencanaan yang teliti dan pengaturan yang cermat
 - Biaya investasi dan operasional tinggi

Persamaan Neraca Massa Reaktor Seri (RATB-RATB)



Gambar 3. Reaktor seri antara RATB-RATB

Neraca massa di reaktor RATB 1

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + [pembentukan]_{karena\ reaksi} = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1a)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + \left[\int r_{A1} dV_1 \right] = \left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_{A1} \neq f(V_1)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume)

sehingga $\int r_{A1} dV_1 = r_{A1} V_1$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] = 0$.
 Jika diketahui $F = QC$ dan $-r_{A1} = k_1 C_{A1}$, apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2), akan diperoleh:

$$QC_{A0} - QC_{A1} - k_1 C_{A1} V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

$$QC_{A1} + k_1 C_{A1} V_1 = QC_{A0} \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

$$C_{A1}(Q + k_1 V_1) = QC_{A0} \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

$$C_{A1} = \frac{QC_{A0}}{Q + k_1 V_1} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

Neraca massa di reaktor RATB 2

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi]$$

...Pers. (1b)

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$QC_{A1} - QC_{A2} - k_2 C_{A2} V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (2b)}$$

$$QC_{A2} + k_2 C_{A2} V_2 = QC_{A1} \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

$$C_{A2}(Q + k_2 V_2) = QC_{A1} \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

$$C_{A2} = \frac{QC_{A1}}{Q + k_2 V_2} \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

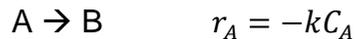
Apabila ingin dicari nilai C_{A2} , maka kita dapat menyubstitusikan persamaan (6a) ke persamaan (5b):

$$C_{A2} = \frac{Q}{Q + k_2 V_2} \left(\frac{QC_{A0}}{Q + k_1 V_1} \right) \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

$$C_{A2} = \frac{Q^2 C_{A0}}{(Q+k_2 V_2)(Q+k_1 V_1)} \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

Contoh Soal 1

Hitunglah konsentrasi A setelah reaksi yang terjadi di dalam dua buah reaktor alir tangki berpengaduk yang dirangkai secara seri dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume Reaktor 1 dan 2 (V) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

Solusi:

Pertama-tama kita akan menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir tangki berpengaduk 1, yaitu dengan menggunakan persamaan (6a) sebagai berikut:

$$C_{A1} = \frac{QC_{A0}}{Q+k_1 V_1} = \frac{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} \times 3 \text{ mol/m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} + 0,5 \text{ 1/menit} \times 5 \text{ m}^3}$$

$$C_{A1} = \frac{3,75 \text{ mol/menit}}{3,75 \text{ m}^3/\text{menit}} = 1 \text{ mol/m}^3$$

Selanjutnya kita bisa menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir tangki berpengaduk yang kedua, yaitu dengan menggunakan persamaan (5b) sebagai berikut:

$$C_{A2} = \frac{QC_{A1}}{Q+k_2 V_2} = \frac{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} \times 1 \text{ mol/m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} + 0,5 \text{ 1/menit} \times 5 \text{ m}^3}$$

$$C_{A2} = \frac{1,25 \text{ mol/menit}}{3,75 \text{ m}^3/\text{menit}} = 0,33 \text{ mol/m}^3$$

Selain itu juga, untuk menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir tangki berpengaduk 2, kita dapat menggunakan persamaan (7) sebagai berikut:

$$C_{A2} = \frac{Q^2 C_{A0}}{(Q+k_2 V_2)(Q+k_1 V_1)}$$

Karena nilai $k_1 = k_2 = k$ dan $V_1 = V_2 = V$ maka persamaan di atas dapat kita ubah menjadi:

$$C_{A2} = \frac{Q^2 C_{A0}}{(Q+kV_2)^2} = \frac{(1,25 \text{ m}^3/\text{menit})^2 \times 3 \text{ mol/m}^3}{(1,25 \text{ m}^3/\text{menit} + 0,5 \text{ l/menit} \times 5 \text{ m}^3)^2}$$

$$C_{A2} = \frac{4,6875 \text{ mol. m}^3/\text{menit}^2}{14,0625 \text{ m}^6/\text{menit}^2} = 0,33 \text{ mol/m}^3$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Menghitung nilai konsentrasi A

$$\begin{aligned} \text{Ca0} &= 3 \\ k &= 0.5 \\ V1 &= 5 \\ V2 &= 5 \\ Q &= 1.25 \\ \text{Ca1} &= Q \cdot \text{Ca0} / (Q + k \cdot V1) \\ \text{Ca2} &= Q \cdot \text{Ca1} / (Q + k \cdot V2) \end{aligned}$$

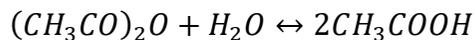
Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | Ca1 | 1 |
| 7 | Ca2 | 0.33333333 |

Contoh soal 2

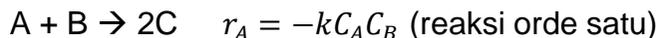
Hidrolisa asam anhidrat dari asam asetat yang terjadi di dalam dua reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) yang dirangkai secara seri dengan volume masing-masing 50 L dan 75 L. Konsentrasi asam anhidrat dan air yang masuk kedalam RATB pertama masing-masing 2,5 mol/L dan 5 mol/L, dengan reaksi:



Reaksi orde pertama pada $(CH_3CO)_2O$ dan H_2O . Pada saat temperature reaktor, laju konstan adalah 0,075 L/(mol s). Kecepatan alir masuk 15 L/s. Hitunglah konsentrasi asam anhidrat dan air yang keluar pada RATB 2?

Solusi:

Misalkan reaksi di atas dapat disederhanakan sbb:



Maka dari soal di atas diketahui bahwa:

- V1 = 50 L (volume RATB 1)
- V2 = 75 L (volume RATB 2)
- k1 = 0,075 L/(mol s)
- C_{A0} = 2,5 mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat)
- C_{B0} = 5 mol/L (konsentrasi awal air)
- Q = 15 L/s (kecepatan alir/laju alir masuk)

Neraca massa RATB 1:

$$[\text{massa}]_{in} - [\text{massa}]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [\text{akumulasi}]$$

...Pers. (1a)

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + \left[\int r_{A1} dV_1 \right] = \left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right]$$

...Pers. (2a)

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_{A1} \neq f(V_1)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_{A1} dV_1 = r_{A1} V_1$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] = 0$. Apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2), akan diperoleh:

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + r_{A1} V_1 = 0$$

...Pers. (3a)

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa di A: $(CH_3CO)_2O$**

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + r_{A1} V_1 = 0$$

...Pers. (3a1)

Karena yang diketahui adalah konsentrasi awal asam anhidrat (C_{A0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V_1), maka persamaan (3a) di atas akan dirubah menjadi:

$$[QC_{A0}] - [QC_{A1}] - k_1 C_{A1} C_{B1} V_1 = 0$$

...Pers. (4a1)

$$[15 \times 2,5] - [15C_{A1}] - 0,075C_{A1}C_{B1}50 = 0$$

...Pers. (5a1)

$$15C_{A1} + 3,75C_{A1}C_{B1} = 37,5 \quad \dots\text{Pers. (6a1)}$$

- **Neraca massa di B: H_2O**

$$[F_{B0}] - [F_{B1}] + r_{A1}V_1 = 0 \quad \dots\text{Pers. (3a2)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi awal air (C_{B0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V_1), maka persamaan di atas akan diubah menjadi:

$$[QC_{B0}] - [QC_{B1}] - k_1C_{A1}C_{B1}V_1 = 0 \quad \dots\text{Pers. (4a2)}$$

$$[15 \times 5] - [15C_{B1}] - 0,075C_{A1}C_{B1}50 = 0 \quad \dots\text{Pers. (5a2)}$$

$$15C_{B1} + 3,75C_{A1}C_{B1} = 75 \quad \dots\text{Pers. (6a2)}$$

Lakukan eliminasi persamaan (6a1) dan (6a2) akan diperoleh:

$$C_{B1} = 2,5 + C_{A1} \quad \dots\text{Pers. (7a)}$$

Substitusikan persamaan (7a) ke persamaan (6a1) akan diperoleh:

$$15C_{A1} + 3,75C_{A1}(2,5 + C_{A1}) = 37,5$$

$$C_{A1}^2 + 6,5C_{A1} - 10 = 0 \quad \dots\text{Pers. (8a)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA_1 pada persamaan (8a) yang merupakan bentuk kuadrat dapat diselesaikan dengan rumus abc sebagai berikut:

$$C_{A1} = \frac{-6,5 + \sqrt{6,5^2 - 4(1)(-10)}}{2(1)} = 1,28 \text{ mol/L}$$

Maka untuk mencari nilai C_{B1} dapat dilakukan dengan cara menyubstitusi ke persamaan (7a)

$$C_{B1} = 2,5 + 1,28 = 3,78 \text{ mol/L}$$

Dari soal di atas diketahui bahwa:

$$V_2 = 75 \text{ L (volume RATB 2)}$$

$$k_2 = 0,075 \text{ L/(mol s)}$$

$$Q = 15 \text{ L/s (kecepatan alir/laju alir masuk)}$$

$$C_{A1} = 1,28 \text{ mol/L (konsentrasi A keluar dari RATB 1)}$$

$$C_{B1} = 3,78 \text{ mol/L (konsentrasi B keluar dari RATB 1)}$$

Neraca massa RATB 2:

- **Neraca massa di A: $(CH_3CO)_2O$**

$$[F_{A1}] - [F_{A2}] + r_{A2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (3b1)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi asam anhidrat (C_{A1}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V_2), maka persamaan (3b1) di atas akan dirubah menjadi:

$$[QC_{A1}] - [QC_{A2}] - k_2C_{A2}C_{B2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (4b1)}$$

$$[15 \times 1,28] - [15C_{A2}] - 0,075C_{A2}C_{B2}75 = 0 \quad \dots\text{Pers. (5b1)}$$

$$15C_{A2} + 5,625C_{A2}C_{B2} = 19,2 \quad \dots\text{Pers. (6b1)}$$

- **Neraca massa di B: H_2O**

$$[F_{B1}] - [F_{B2}] + r_{A2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (3b2)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi air (C_{B1}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V_2), maka persamaan (3b2) di atas akan diubah menjadi:

$$[QC_{B1}] - [QC_{B2}] - k_2 C_{A2} C_{B2} V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4b2)}$$

$$[15 \times 3,78] - [15C_{B2}] - 0,075C_{A2}C_{B2}75 = 0 \quad \dots \text{Pers. (5b2)}$$

$$15C_{B2} + 5,625C_{A2}C_{B2} = 56,7 \quad \dots \text{Pers. (6b2)}$$

Lakukan eliminasi persamaan (6b1) dan (6b2) akan diperoleh:

$$C_{B2} = 2,5 + C_{A2} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

Substitusikan persamaan (7b) ke persamaan (6b1) akan diperoleh:

$$15C_{A2} + 5,625C_{A2}(2,5 + C_{A2}) = 19,2 \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

$$C_{A2}^2 + 5,17C_{A2} - 3,41 = 0 \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA2 pada persamaan (9b) yang merupakan bentuk kuadrat dapat diselesaikan dengan rumus abc sebagai berikut:

$$C_{A2} = \frac{-7,42 + \sqrt{7,42^2 - 4(1)(-0,29)}}{2(1)} = 0,59 \text{ mol/L}$$

Maka untuk mencari nilai CB2 dapat dilakukan dengan cara menyubstitusi nilai CA2 ke persamaan (7b);

$$C_{B2} = 2,5 + 0,59 = 3,09 \text{ mol/L}$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Menghitung nilai konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RATB1

$$\begin{aligned} \text{Ca0} &= 2.5 \text{ \#konsentrasi asam anhidrat awal} \\ \text{Cb0} &= 5 \text{ \#konsentrasi air awal} \\ k &= 0.075 \\ \text{V1} &= 50 \text{ \#volume RATB 1} \\ \text{Q} &= 15 \\ f(\text{Ca1}) &= \text{Q} \cdot \text{Ca0} - \text{Q} \cdot \text{Ca1} - k \cdot \text{Ca1} \cdot \text{Cb1} \cdot \text{V1} \\ \text{Cb1} &= \text{Q} \cdot \text{Cb0} / (\text{Q} + k \cdot \text{Ca1} \cdot \text{V1}) \\ \text{Ca1(max)} &= 2.5 \\ \text{Ca1(min)} &= 0 \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca1 | 1.28458929 | -3.9E-12 | 1.25 | 8.9E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca0 | 2.5 | 2.5 |
| 2 | Cb0 | 5 | 5 |
| 3 | Cb1 | 3.78458929 | 3.80952381 |
| 4 | k | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | V1 | 50 | 50 |

Menghitung nilai konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RATB2

$$\begin{aligned} \text{Ca1} &= 1.28 \text{ \#konsentrasi asam anhidrat keluar RATB1} \\ \text{Cb1} &= 3.78 \text{ \#konsentrasi air keluar RATB1} \\ k &= 0.075 \\ \text{V2} &= 75 \text{ \#volume RATB2} \\ \text{Q} &= 15 \\ f(\text{Ca2}) &= \text{Q} \cdot \text{Ca1} - \text{Q} \cdot \text{Ca2} - k \cdot \text{Ca2} \cdot \text{Cb2} \cdot \text{V2} \end{aligned}$$

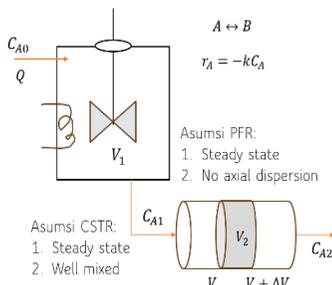
$$\begin{aligned}
 C_{b2} &= Q \cdot C_{b1} / (Q + k \cdot C_{a2} \cdot V_2) \\
 C_{a2}(\max) &= 1.5 \\
 C_{a2}(\min) &= 0
 \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|-----------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca2 | 0.5926617 | -1.3E-10 | 0.75 | -4.5E00 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|-----------|---------------|
| 1 | Ca1 | 1.28 | 1.28 |
| 2 | Cb1 | 3.78 | 3.78 |
| 3 | Cb2 | 3.0926617 | 2.9502439 |
| 4 | k | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | V2 | 75 | 75 |

Persamaan Neraca Massa Reaktor Seri (RATB-RAP)



Gambar 3. Reaktor seri antara RATB-RAP

Neraca massa di reaktor 1 RATB

$$\begin{aligned}
 &[massa]_{in} - [massa]_{out} + \\
 &[pembentukan]_{karena\ reaksi} = [akumulasi] \\
 &\dots \text{Pers. (1a)}
 \end{aligned}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + \left[\int r_{A1} dV_1 \right] = \left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_{A1} \neq f(V_1)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_{A1} dV_1 = r_{A1} V_1$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] = 0$.

Jika diketahui $F = QC$ dan $r_{A1} = -k_1 C_{A1}$, apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2), akan diperoleh:

$$QC_{A0} - QC_{A1} - k_1 C_{A1} V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

$$QC_{A1} + k_1 C_{A1} V_1 = QC_{A0} \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

$$C_{A1}(Q + k_1 V_1) = QC_{A0} \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

$$C_{A1} = \frac{QC_{A0}}{Q + k_1 V_1} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

Neraca massa di reaktor 2 RAP

$$[\text{massa}]_{in} - [\text{massa}]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [\text{akumulasi}] \quad \dots \text{Pers. (1b)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir pipa, maka:

$$F_{A1}(V_2) - F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2} \Delta V_2 = \left[\frac{dN_{A2}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2b)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2b), akan menjadi:

$$F_{A1}(V_2) - F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2} \Delta V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

Diketahui $F_A = QC_A$, maka persamaan (3b) akan menjadi:

$$QC_{A1}(V_2) - QC_{A2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2} \Delta V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

$$r_{A2} = \frac{QC_{A2}(V_2 + \Delta V_2) - QC_{A1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

Apabila persamaan (5b) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A2} = \lim_{\Delta V_2 \rightarrow \infty} Q \frac{C_{A2}(V_2 + \Delta V_2) - C_{A1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (6b)}$$

$$r_{A2} = Q \frac{dC_{A2}}{dV_2} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

Diketahui bahwa $r_{A2} = -k_2 C_{A2}$, maka persamaan (7b) akan menjadi:

$$-k_2 C_{A2} = Q \frac{dC_{A2}}{dV_2} \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

Karena persamaan (8b) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara diferensiasi dan integral sebagai berikut:

$$-k_2 \int_0^{V_2} dV = Q \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_{A2}}{C_{A2}} \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

$$-k_2 V_2 = Q \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10b)}$$

$$\frac{-k_2 V_2}{Q} = \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (11b)}$$

$$C_{A2} = C_{A1} e^{\frac{-k_2 V_2}{Q}} \quad \dots \text{Pers. (12b)}$$

Selanjutnya substitusikan Persamaan (6a) ke Persamaan (12b) akan diperoleh nilai C_{A2} sebagai berikut:

$$C_{A2} = \left(\frac{QC_{A0}}{Q+k_1 V_1} \right) e^{\frac{-k_2 V_2}{Q}} \quad \dots \text{Pers. (13b)}$$

Contoh soal 1

Hitunglah konsentrasi A yang keluar pada reaktor kedua (RAP) apabila reaktor dirangkai secara seri antara reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) dengan reaktor alir pipa (RAP) dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume RATB 1 (V_1) = 5 m³
- Volume RAP 2 (V_2) = 5 m³
- Laju volumetric (Q) = 1,25 m³/menit

Solusi:

Pertama-tama kita akan menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir tangki berpengaduk 1, yaitu dengan menggunakan persamaan (6a) sebagai berikut:

$$C_{A1} = \frac{QC_{A0}}{Q+k_1V_1} = \frac{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} \times 3 \text{ mol}/\text{m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit} + 0,5 \text{ 1}/\text{menit} \times 5 \text{ m}^3}$$

$$C_{A1} = \frac{3,75 \text{ mol}/\text{menit}}{3,75 \text{ m}^3/\text{menit}} = 1 \text{ mol}/\text{m}^3$$

Selanjutnya kita bisa menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir pipa yang kedua, yaitu dengan menggunakan persamaan (12b) sebagai berikut:

$$C_{A2} = C_{A1} e^{\frac{-k_2V_2}{Q}} = (1 \text{ mol}/\text{m}^3) e^{\frac{-0,5/\text{menit} \times 5 \text{ m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit}}}$$

$$C_{A2} = 0,13 \text{ mol}/\text{m}^3$$

Untuk menghitung nilai CA2 dapat juga kita menggunakan persamaan (13b) sebagai berikut:

$$C_{A2} = \left(\frac{Q C_{A0}}{Q + k_1 V_1} \right) e^{-\frac{k_2 V_2}{Q}} = \left(\frac{1,25 \times 3}{1,25 + 0,5 \times 5} \right) e^{-\frac{0,5 \times 5}{1,25}}$$

$$C_{A2} = 0,13 \text{ mol/m}^3$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Menghitung konsentrasi A yang keluar RAP

$$Ca0 = 3 \text{ #konsentrasi A awal}$$

$$k = 0.5$$

$$V1 = 5 \text{ #volume RATB}$$

$$V2 = 5 \text{ #volume RAP}$$

$$Q = 1.25$$

$$Ca1 = \frac{Q \cdot Ca0}{Q + k \cdot V1}$$

$$Ca2 = Ca1 \cdot \exp(-k \cdot V2/Q)$$

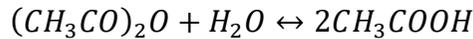
Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | Ca1 | 1 |
| 7 | Ca2 | 0.13533528 |

Contoh soal 2

Hidrolisa asam anhidrat dari asam asetat yang terjadi di dalam dua reaktor yang dirangkai secara seri antara reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) dengan reaktor alir pipa (RAP) dengan volume masing-masing 50 L dan 75 L. Konsentrasi asam

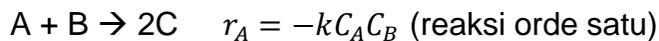
anhidrat dan air yang masuk kedalam RATB masing-masing 2,5 mol/L dan 5 mol/L, dengan reaksi:



Reaksi orde pertama pada $(CH_3CO)_2O$ dan H_2O . Pada saat temperature reaktor, laju konstan adalah 0,075 L/(mol s). Kecepatan alir masuk 15 L/s. Hitunglah konsentrasi asam anhidrat dan air yang keluar pada RAP?

Solusi:

Misalkan reaksi di atas dapat disederhanakan sbb:



Maka dari soal di atas diketahui bahwa:

| | |
|----------|--|
| V_1 | = 50 L (volume RATB) |
| V_2 | = 75 L (volume RAP) |
| k_1 | = 0,075 L/(mol s) |
| C_{A0} | = 2,5 mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat) |
| C_{B0} | = 5 mol/L (konsentrasi awal air) |
| Q | = 15 L/s (kecepatan alir/laju alir masuk) |

Neraca massa RATB:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1a)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + \left[\int r_{A1} dV_1 \right] = \left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_{A1} \neq f(V_1)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_{A1} dV_1 = r_{A1} V_1$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] = 0$. Apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2a), akan diperoleh:

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + r_{A1} V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa di A: $(CH_3CO)_2O$**

$$[F_{A0}] - [F_{A1}] + r_{A1} V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a1)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi awal asam anhidrat (C_{A0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V1), maka persamaan (3a1) di atas akan diubah menjadi:

$$[QC_{A0}] - [QC_{A1}] - k_1 C_{A1} C_{B1} V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4a1)}$$

$$[15 \times 2,5] - [15C_{A1}] - 0,075 C_{A1} C_{B1} 50 = 0 \quad \dots \text{Pers. (5a1)}$$

$$15C_{A1} + 3,75 C_{A1} C_{B1} = 37,5 \quad \dots \text{Pers. (6a1)}$$

- **Neraca massa di B: H_2O**

$$[F_{B0}] - [F_{B1}] + r_{A1} V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a2)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi awal air (C_{B0}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V1), maka persamaan di atas akan diubah menjadi:

$$[QC_{B0}] - [QC_{B1}] - k_1 C_{A1} C_{B1} V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4a2)}$$

$$[15 \times 5] - [15C_{B1}] - 0,075C_{A1}C_{B1}50 = 0 \quad \dots\text{Pers. (5a2)}$$

$$15C_{B1} + 3,75C_{A1}C_{B1} = 75 \quad \dots\text{Pers. (6a2)}$$

Lakukan eliminasi persamaan (6a1) dan (6a2) akan diperoleh;

$$C_{B1} = 2,5 + C_{A1} \quad \dots\text{Pers. (7a)}$$

Substitusikan persamaan (7a) ke persamaan (6a1) akan diperoleh:

$$15C_{A1} + 3,75C_{A1}(2,5 + C_{A1}) = 37,5 \quad \dots\text{Pers. (8a)}$$

$$C_{A1}^2 + 6,5C_{A1} - 10 = 0 \quad \dots\text{Pers. (9a)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA1 pada persamaan (9a) yang merupakan bentuk kuadrat dapat diselesaikan dengan rumus abc sebagai berikut:

$$C_{A1} = \frac{-6,5 + \sqrt{6,5^2 - 4(1)(-10)}}{2(1)} = 1,28 \text{ mol/L}$$

Maka untuk mencari nilai CB1 dapat dilakukan dengan cara menyubstitusi ke persamaan (7a)

$$C_{B1} = 2,5 + 1,28 = 3,78 \text{ mol/L}$$

Dari soal di atas diketahui bahwa:

$$V2 = 75 \text{ L (volume RATB)}$$

$$k2 = 0,075 \text{ L/(mol s)}$$

$$Q = 15 \text{ L/s (kecepatan alir/laju alir masuk)}$$

$$C_{A1} = 1,28 \text{ mol/L (konsentrasi A keluar dari RATB)}$$

$$C_{B1} = 3,78 \text{ mol/L (konsentrasi B keluar dari RATB)}$$

Neraca massa RAP:

$$[\text{massa}]_{in} - [\text{massa}]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [\text{akumulasi}]$$

...Pers. (1b)

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa pada A: $(CH_3CO)_2O$**

$$F_{A1}(V_2) - F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2}\Delta V_2 = \left[\frac{dN_{A2}}{dt} \right]$$

...Pers. (2b1)

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2b1), akan menjadi:

$$F_{A1}(V_2) - F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2}\Delta V_2 = 0$$

...Pers. (3b1)

$$r_{A2} = \frac{F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{A1}(V_2)}{\Delta V_2}$$

...Pers. (4b1)

Apabila persamaan (4b1) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A2} = \lim_{\Delta V_2 \rightarrow \infty} \frac{F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{A1}(V_2)}{\Delta V_2}$$

...Pers. (5b1)

$$r_{A2} = \frac{dF_{A2}}{dV_2}$$

...Pers. (6b1)

Diketahui dari soal bahwa $r_{A2} = -k_2 C_{A2} C_{B2}$, kita akan melakukan integrasi terhadap CA2 maka nilai CB2 diasumsikan konstan, maka persamaan (6b1) akan menjadi:

$$-k_2 C_{A2} C_{B2} = \frac{dC_{A2}}{dt}$$

...Pers. (7b1)

$$-k_2 C_{B2} \int_0^t dt = \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_{A2}}{C_{A2}}$$

...Pers. (8b1)

$$-k_2 C_{B2}(t - 0) = \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (9b1)}$$

$$-k_2 C_{B2} t = \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10b1)}$$

$$C_{A2} = C_{A1} e^{-C_{B2} k_2 t} \quad \dots \text{Pers. (11b1)}$$

- **Neraca massa pada B: H_2O**

$$F_{B1}(V_2) - F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2} \Delta V_2 = \left[\frac{dN_{B2}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2b2)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2b2), akan menjadi:

$$F_{B1}(V_2) - F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2} \Delta V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3b2)}$$

$$r_{A2} = \frac{F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{B1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (4b2)}$$

Apabila persamaan (4b2) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A2} = \lim_{\Delta V_2 \rightarrow \infty} \frac{F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{B1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (5b2)}$$

$$r_{A2} = \frac{dF_{B2}}{dV_2} \quad \dots \text{Pers. (6b2)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_{A2} = -k_2 C_{A2} C_{B2}$, kita akan melakukan integrasi terhadap C_{B2} maka nilai C_{A2} diasumsikan konstan, maka persamaan (6b2) akan menjadi:

$$-k_2 C_{A2} C_{B2} = \frac{dC_{B2}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (7b2)}$$

$$-k_2 C_{A2} \int_0^t dt = \int_{C_{B1}}^{C_{B2}} \frac{dC_{B2}}{C_{B2}} \quad \dots \text{Pers. (8b2)}$$

$$-k_2 C_{A2}(t - 0) = \ln\left(\frac{C_{B2}}{C_{B1}}\right) \quad \dots \text{Pers. (9b2)}$$

$$-k_2 C_{A2} t = \ln\left(\frac{C_{B2}}{C_{B1}}\right) \quad \dots \text{Pers. (10b2)}$$

$$C_{B2} = C_{B1} e^{-C_{A2} k_2 t} \quad \dots \text{Pers. (11b2)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA2, kita dapat menyubstitusikan persamaan (11b2) ke persamaan (11b1), menjadi:

$$-k_2 C_{B1} e^{-C_{A2} k_2 t} t = \ln\left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}}\right) \quad \dots \text{Pers. (12b)}$$

$$\text{di mana } t = \frac{V2}{Q} = \frac{75L}{15L/s} = 5s$$

$$-0,075 \times 3,78 \times e^{-C_{A2} \times 0,075 \times 5} \times 5 = \ln\left(\frac{C_{A2}}{1,28}\right)$$

$$\ln C_{A2} + 1,42 e^{-0,375 C_{A2}} + 0,25 = 0 \quad \dots \text{Pers. (13b)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA2 kita dapat lakukan *trial & error* sebagai berikut:

| | |
|------|--|
| CA2 | $\ln C_{A2} + 1,42 e^{-0,375 C_{A2}} + 0,25$ |
| 0,3 | 0,022 |
| CA2 | 0 |
| 0,29 | -0,012 |

$$C_{A2} = 0,3 + \frac{0 + 0,022}{-0,012 - 0,022} (0,29 - 0,3)$$

$$C_{A2} = 0,293 \text{ mol/L}$$

Untuk mendapatkan nilai B, kita substitusikan nilai CA2 ke persamaan (11b2)

$$C_{B2} = 3,78 \times e^{-0,293 \times 0,075 \times 5} = 3,386 \text{ mol/L}$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Menghitung konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RATB

$$\begin{aligned} \text{Ca0} &= 2.5 \text{ \#konsentrasi asam anhidrat (A) awal} \\ \text{Cb0} &= 5 \text{ \#konsentrasi air (B) awal} \\ k &= 0.075 \\ \text{V1} &= 50 \text{ \#volume RATB} \\ Q &= 15 \\ f(\text{Ca1}) &= Q \cdot \text{Ca0} - Q \cdot \text{Ca1} - k \cdot \text{Ca1} \cdot \text{Cb1} \cdot \text{V1} \\ \text{Cb1} &= Q \cdot \text{Cb0} / (Q + k \cdot \text{Ca1} \cdot \text{V1}) \\ \text{Ca1(max)} &= 2.5 \\ \text{Ca1(min)} &= 0 \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca1 | 1.28458929 | -3.9E-12 | 1.25 | 8.9E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca0 | 2.5 | 2.5 |
| 2 | Cb0 | 5 | 5 |
| 3 | Cb1 | 3.78458929 | 3.80952381 |
| 4 | k | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | V1 | 50 | 50 |

Menghitung konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RAP

$$\begin{aligned} \text{Ca1} &= 1.28 \text{ \#konsentrasi asam anhidrat (A) keluar RATB} \\ \text{Cb1} &= 3.78 \text{ \#konsentrasi air (B) keluar RATB} \\ k &= 0.075 \\ \text{V2} &= 75 \text{ \#volume RAP} \\ Q &= 15 \\ t &= \text{V2}/Q \end{aligned}$$

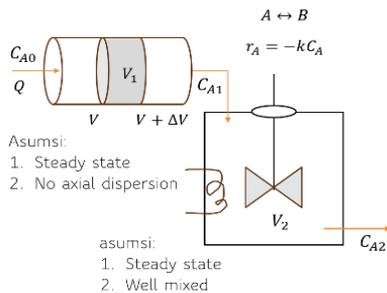
$$\begin{aligned}
 f(\text{Ca}_2) &= \ln(\text{Ca}_2/\text{Ca}_1) + k \cdot \text{Cb}_2 \cdot t \\
 \text{Cb}_2 &= \text{Cb}_1 \cdot \exp(-\text{Ca}_2 \cdot k \cdot t) \\
 \text{Ca}_2(\text{max}) &= 1.28 \\
 \text{Ca}_2(\text{min}) &= 0
 \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca2 | 0.37325591 | -6.0E-15 | 0.64 | 4.2E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca1 | 1.28 | 1.28 |
| 2 | Cb1 | 3.78 | 3.78 |
| 3 | Cb2 | 3.28626954 | 2.97345331 |
| 4 | k | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | t | 5 | 5 |
| 7 | V2 | 75 | 75 |

Persamaan Neraca Massa Reaktor Seri (RAP-RATB)



Neraca massa di reaktor 1 RAP:

$$\begin{aligned}
 &[\text{massa}]_{in} - [\text{massa}]_{out} + \\
 &[\text{pembentukan}] \\
 &[\text{karena reaksi}] = [\text{akumulasi}]
 \end{aligned}$$

...Pers. (1a)

Gambar 4. Reaktor seri antara RAP-RATB

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir

pipa, maka:

$$F_{A0}(V_1) - F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1} \Delta V_1 = \left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2a), akan menjadi:

$$F_{A0}(V_1) - F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

Diketahui $F_A = QC_A$, maka persamaan (3a) akan menjadi:

$$QC_{A0}(V_1) - QC_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

$$r_{A1} = \frac{QC_{A1}(V_1 + \Delta V_1) - QC_{A0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

Apabila persamaan (5a) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A1} = \lim_{\Delta V_1 \rightarrow \infty} Q \frac{C_{A1}(V_1 + \Delta V_1) - C_{A0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

$$r_{A1} = Q \frac{dC_{A1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (7a)}$$

Diketahui bahwa $r_{A1} = -k_1 C_{A1}$, maka persamaan (7a) akan menjadi:

$$-k_1 C_{A1} = Q \frac{dC_{A1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (8a)}$$

Karena persamaan (8a) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara diferensiasi dan integral sebagai berikut:

$$-k_1 \int_0^{V_1} dV_1 = Q \int_{C_{A0}}^{C_{A1}} \frac{dC_{A1}}{C_{A1}} \quad \dots \text{Pers. (9a)}$$

$$-k_1 V_1 = Q \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10a)}$$

$$\frac{-k_1 V_1}{Q} = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (11a)}$$

$$C_{A1} = C_{A0} e^{\frac{-k_1 V_1}{Q}} \quad \dots \text{Pers. (12a)}$$

Neraca massa di reaktor 2 RATB

$$[\text{massa}]_{in} - [\text{massa}]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [\text{akumulasi}] \quad \dots \text{Pers. (1b)}$$

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A1}] - [F_{A2}] + \left[\int r_{A2} dV_2 \right] = \left[\frac{dN_{A2}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2b)}$$

Karena pengadukan di dalam reaktor RATB terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_{A2} \neq f(V_2)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_{A2} dV_2 = r_{A2} V_2$, dan kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_{A2}}{dt} \right] = 0$. Jika diketahui $F = QC$ dan $r_{A2} = -k_2 C_{A2}$, apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2b), akan diperoleh:

$$QC_{A1} - QC_{A2} - k_2 C_{A2} V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

$$QC_{A2} + k_2 C_{A2} V_2 = QC_{A1} \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

$$C_{A2}(Q + k_2 V_2) = QC_{A1} \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

$$C_{A2} = \frac{QC_{A1}}{Q + k_2 V_2} \quad \dots \text{Pers. (6b)}$$

Selanjutnya substitusikan Persamaan (12a) ke Persamaan (6b) akan diperoleh nilai C_{A2} sebagai berikut:

$$C_{A2} = \left(\frac{QC_{A0}}{Q + k_2 V_2} \right) e^{\frac{-k_1 V_1}{Q}} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

Contoh soal 1

Hitunglah konsentrasi A yang keluar pada reaktor kedua (RATB) apabila reaktor dirangkai secara seri antara reaktor alir pipa (RAP) dengan reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume RAP 1 (V_1) = 5 m³
- Volume RATB 2 (V_2) = 5 m³
- Laju volumetric (Q) = 1,25 m³/menit

Solusi:

Pertama-tama kita akan menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir pipa 1, yaitu dengan menggunakan persamaan (12a) sebagai berikut:

$$C_{A1} = C_{A0} e^{\frac{-k_1 V_1}{Q}} = (3 \text{ mol/m}^3) e^{\frac{-0,5/\text{menit} \times 5 \text{ m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit}}}$$

$$C_{A1} = 0,41 \text{ mol/m}^3$$

Selanjutnya kita bisa menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir tangki berpengaduk yang kedua, yaitu dengan menggunakan persamaan (6b) sebagai berikut:

$$C_{A2} = \frac{QC_{A1}}{Q+k_2 V_2} = \frac{1,25 \times 0,41}{1,25 + 0,5 \times 5}$$

$$C_{A2} = 0,13 \text{ mol/m}^3$$

Untuk menghitung nilai CA2 dapat juga kita menggunakan persamaan (7b) sebagai berikut:

$$C_{A2} = \left(\frac{QC_{A0}}{Q+k_2V_2} \right) e^{\frac{-k_1V_1}{Q}} = \left(\frac{1,25 \times 3}{1,25 + 0,5 \times 5} \right) e^{\frac{-0,5 \times 5}{1,25}}$$

$$C_{A2} = 0,13 \text{ mol/m}^3$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Menghitung konsentrasi A yang keluar RATB

| | |
|-----|-------------------------|
| Ca0 | = 3 #konsentrasi A awal |
| k | = 0.5 |
| V1 | = 5 #volume RAP |
| V2 | = 5 #volume RATB |
| Q | = 1.25 |
| Ca1 | = Ca0 * exp(-k*V1/Q) |
| Ca2 | = Q*Ca1/(Q + k*V2) |

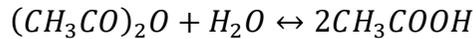
Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | K | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | Ca1 | 0.40600585 |
| 7 | Ca2 | 0.13533528 |

Contoh soal 2

Hidrolisa asam anhidrat dari asam asetat yang terjadi di dalam dua reaktor yang dirangkai secara seri antara reaktor alir pipa (RAP) dengan reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) dengan volume masing-masing 50 L dan 75 L. Konsentrasi asam

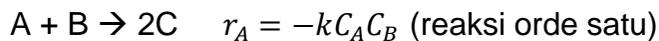
anhidrat dan air yang masuk kedalam RAP masing-masing 2,5 mol/L dan 5 mol/L, dengan reaksi:



Reaksi orde pertama pada $(CH_3CO)_2O$ dan H_2O . Pada saat temperature reaktor, laju konstan adalah 0,075 L/(mol s). Kecepatan alir masuk 15 L/s. Hitunglah konsentrasi asam anhidrat dan air yang keluar pada RATB?

Solusi:

Misalkan reaksi di atas dapat disederhanakan sbb:



Maka dari soal di atas diketahui bahwa:

- V1 = 50 L (volume RAP)
- V2 = 75 L (volume RATB)
- k1 = 0,075 L/(mol s)
- C_{A0} = 2,5 mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat)
- C_{B0} = 5 mol/L (konsentrasi awal air)
- Q = 15 L/s (kecepatan alir/laju alir masuk)

Neraca massa RAP:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{matrix} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{matrix} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1a)}$$

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa pada A: $(CH_3CO)_2O$**

$$F_{A0}(V_1) - F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = \left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a1)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2a1), akan menjadi:

$$F_{A0}(V_1) - F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a1)}$$

Diketahui $F_A = QC_A$, maka persamaan (3a) akan menjadi:

$$QC_{A0}(V_1) - QC_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4a1)}$$

$$r_{A1} = \frac{QC_{A1}(V_1 + \Delta V_1) - QC_{A0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (5a1)}$$

Apabila persamaan (5a1) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A1} = \lim_{\Delta V_1 \rightarrow \infty} Q \frac{C_{A1}(V_1 + \Delta V_1) - C_{A0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (6a1)}$$

$$r_{A1} = Q \frac{dC_{A1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (7a1)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_{A1} = -k_1 C_{A1} C_{B1}$, kita akan melakukan integrasi terhadap CA1 maka nilai CB1 diasumsikan konstan, maka persamaan (7a1) akan menjadi:

$$-k_1 C_{A1} C_{B1} = Q \frac{dC_{A1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (8a1)}$$

Karena persamaan (8a1) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara diferensiasi dan integral sebagai berikut:

$$-k_1 C_{B1} \int_0^{V_1} dV_1 = Q \int_{C_{A0}}^{C_{A1}} \frac{dC_{A1}}{C_{A1}} \quad \dots \text{Pers. (9a1)}$$

$$-k_1 C_{B1} V_1 = Q \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10a1)}$$

$$\frac{-k_1 C_{B1} V_1}{Q} = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (11a1)}$$

dan $t = V_1/Q$, maka persamaan (11a1) akan menjadi;

$$-k_1 C_{B1} t = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (12a1)}$$

$$C_{A1} = C_{A0} e^{-k_1 C_{B1} t} \quad \dots \text{Pers. (13a1)}$$

- **Neraca massa pada B: H_2O**

$$F_{B0}(V_1) - F_{B1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1} \Delta V_1 = \left[\frac{dN_{B1}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a2)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2b), akan menjadi:

$$F_{B0}(V_1) - F_{B1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1} \Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a2)}$$

Diketahui $F_B = Q C_B$, maka persamaan (3a2) akan menjadi:

$$Q C_{B0}(V_1) - Q C_{B1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1} \Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (4a2)}$$

$$r_{A1} = \frac{Q C_{B1}(V_1 + \Delta V_1) - Q C_{B0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (5a2)}$$

Apabila persamaan (5a2) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A1} = \lim_{\Delta V_1 \rightarrow \infty} Q \frac{C_{B1}(V_1 + \Delta V_1) - C_{B0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (6a2)}$$

$$r_{A1} = Q \frac{dC_{B1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (7a2)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_{A1} = -k_1 C_{A1} C_{B1}$, kita akan melakukan integrasi terhadap C_{B1} maka nilai C_{A1} diasumsikan konstan, maka persamaan (7a2) akan menjadi:

$$-k_1 C_{A1} C_{B1} = Q \frac{dC_{B1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (8a2)}$$

Karena persamaan (8a2) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara diferensiasi dan integral sebagai berikut:

$$-k_1 C_{A1} \int_0^{V_1} dV_1 = Q \int_{C_{B0}}^{C_{B1}} \frac{dC_{B1}}{C_{B1}} \quad \dots \text{Pers. (9a2)}$$

$$-k_1 C_{A1} V_1 = Q \ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10a2)}$$

$$\frac{-k_1 C_{A1} V_1}{Q} = \ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (11a2)}$$

dan $t = V_1/Q$, maka persamaan (11a2) akan menjadi;

$$-k_1 C_{A1} t = \ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (12a2)}$$

$$C_{B1} = C_{B0} e^{-k_1 C_{A1} t} \quad \dots \text{Pers. (13a2)}$$

Untuk mendapatkan nilai C_{A1} , kita dapat mensubstitusikan persamaan (13a2) ke persamaan (12a1), menjadi:

$$-k C_{B0} e^{-C_{A1} k t} t = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (14a)}$$

$$\text{di mana } t = \frac{V_1}{Q} = \frac{50L}{15L/s} = 3,33s$$

$$-0,075 \times 5 \times e^{-C_{A1} \times 0,075 \times 3,33} \times 3,33 = \ln\left(\frac{C_{A1}}{2,5}\right)$$

$$\ln C_{A1} + 1,25e^{-0,25C_{A1}} - 0,92 = 0$$

Untuk mendapatkan nilai CA1 kita dapat lakukan *trial & error* sebagai berikut:

| | |
|-----|---|
| CA1 | $\ln C_{A1} + 1,25e^{-0,25C_{A1}} - 0,92$ |
| 0,9 | -0,052 |
| CA1 | 0 |
| 1 | 0,053 |

$$C_{A1} = 0,9 + \frac{0 + 0,052}{0,053 + 0,052} (1 - 0,9)$$

$$CA1 = 0,96 \text{ mol/L}$$

Untuk mendapatkan nilai CB1, kita substitusikan nilai CA1 ke persamaan (13a2)

$$C_{B1} = 5 \times e^{-0,96 \times 0,075 \times 3,33} = 3,93 \text{ mol/L}$$

Neraca massa RATB:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi]$$

...Pers. (1b)

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir tangki berpengaduk, maka:

$$[F_{A1}] - [F_{A2}] + \left[\int r_{A2} dV_2 \right] = \left[\frac{dN_{A2}}{dt} \right]$$

...Pers. (2b)

Karena pengadukan di dalam reaktor kedua atau RATB terjadi secara baik dan sempurna, serta kondisi *steady state* (tunak), maka: $r_{A2} \neq f(V_2)$ (nilai/variabel laju reaksi bukan merupakan fungsi dari volume) sehingga $\int r_{A2} dV_2 = r_{A2} V_2$, dan

kondisi *steady state* $\left[\frac{dN_{A2}}{dt}\right] = 0$. Apabila persamaan ini disubstitusikan ke persamaan (2b), akan diperoleh:

$$[F_{A1}] - [F_{A2}] + r_{A2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (3b)}$$

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa di A: $(CH_3CO)_2O$**

$$[F_{A1}] - [F_{A2}] + r_{A2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (3b1)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi asam anhidrat yang masuk ke reaktor RATB (C_{A1}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V2), maka persamaan (3b1) di atas akan diubah menjadi:

$$[QC_{A1}] - [QC_{A2}] - k_2C_{A2}C_{B2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (4b1)}$$

$$[15 \times 0,96] - [15C_{A2}] - 0,075C_{A2}C_{B2}75 = 0 \quad \dots\text{Pers. (5b1)}$$

$$15C_{A2} + 5,625C_{A2}C_{B2} = 14,4 \quad \dots\text{Pers. (6b1)}$$

- **Neraca massa di B: H_2O**

$$[F_{B1}] - [F_{B2}] + r_{A2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (3b2)}$$

Karena yang diketahui adalah konsentrasi air masuk kedalam reaktor RATB (C_{B1}), laju alir (Q) dan volume reaktor (V2), maka persamaan di atas akan diubah menjadi:

$$[QC_{B1}] - [QC_{B2}] - kC_{A2}C_{B2}V_2 = 0 \quad \dots\text{Pers. (4b2)}$$

$$[15 \times 3,93] - [15C_{B2}] - 0,075C_{A2}C_{B2}75 = 0 \quad \dots\text{Pers. (5b2)}$$

$$15C_{B2} + 5,625C_{A2}C_{B2} = 58,95 \quad \dots\text{Pers. (6b2)}$$

Lakukan eliminasi persamaan (6b1) dan (6b2) akan diperoleh:

$$C_{B2} = 2,97 + C_{A2} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

Substitusikan persamaan (7b) ke persamaan (6b1) akan diperoleh:

$$15C_{A2} + 5,625C_{A2}(2,97 + C_{A2}) = 14,4 \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

$$C_{A2}^2 + 5,64C_{A2} - 2,56 = 0 \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA2 pada persamaan (9b) yang merupakan bentuk kuadrat dapat diselesaikan dengan rumus abc sebagai berikut:

$$C_{A2} = \frac{-5,64 + \sqrt{5,64^2 - 4(1)(-2,56)}}{2(1)} = 0,42 \text{ mol/L}$$

Maka untuk mencari nilai CB2 dapat dilakukan dengan cara menyubstitusi ke persamaan (7b)

$$C_{B2} = 2,97 + 0,42 = 3,39 \text{ mol/L}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Menghitung konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RAP

$$Ca0 = 2.5 \text{ #konsentrasi asam anhidrat (A) awal}$$

$$Cb0 = 5 \text{ #konsentrasi air (B) awal}$$

$$k = 0.075$$

$$V1 = 50 \text{ #volume RAP}$$

$$Q = 15$$

$$t = V1/Q$$

$$f(Ca1) = \ln(Ca1/Ca0) + k \cdot Cb1 \cdot t$$

$$Cb1 = Cb0 * \exp(-k * Ca1 * t)$$

$$Ca1(\max) = 2.5$$

$$Ca2(\min) = 0$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca1 | 0.92779711 | -1.0E-15 | 1.25 | 2.2E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca0 | 2.5 | 2.5 |
| 2 | Cb0 | 5 | 5 |
| 3 | Cb1 | 3.96493172 | 3.65807814 |
| 4 | K | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | T | 3.33333333 | 3.33333333 |
| 7 | V1 | 50 | 50 |

Menghitung konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RATB

$$Ca1 = 0.93 \text{ \#konsentrasi asam anhidrat (A) keluar RAP}$$

$$Cb1 = 3.96 \text{ \#konsentrasi air (B) keluar RAP}$$

$$k = 0.075$$

$$V2 = 75 \text{ \#volume RATB}$$

$$Q = 15$$

$$f(Ca2) = Q * Ca1 - Q * Ca2 - k * Ca2 * Cb2 * V2$$

$$Cb2 = Q * Cb1 / (Q + k * Ca2 * V2)$$

$$Ca2(\max) = 1$$

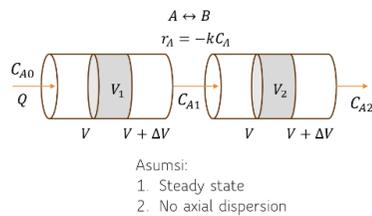
$$Ca2(\min) = 0$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca2 | 0.40635602 | -6.3E-09 | 0.5 | -2.9E00 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca1 | 0.93 | 0.93 |
| 2 | Cb1 | 3.96 | 3.96 |
| 3 | Cb2 | 3.43635602 | 3.33473684 |
| 4 | K | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | V2 | 75 | 75 |

Persamaan Neraca Massa Reaktor Seri (RAP-RAP)



Neraca massa di reaktor RAP

1:

$$\begin{aligned}
 & [massa]_{in} - [massa]_{out} + \\
 & [pembentukan] = [akumulasi] \\
 & [karena reaksi]
 \end{aligned}$$

...Pers. (1)

Gambar 5. Reaktor seri antara RAP

Karena ada aliran masuk dan keluar yang terjadi di reaktor alir pipa, maka:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = \left[\frac{dN_A}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2), akan menjadi:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

Diketahui $F_A = QC_A$, maka persamaan (3) akan menjadi:

$$QC_A(V) - QC_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

$$r_A = \frac{QC_A(V+\Delta V) - QC_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

Apabila persamaan (5) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_A = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} Q \frac{C_A(V+\Delta V) - C_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

$$r_A = Q \frac{dC_A}{dV} \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

Diketahui bahwa $r_A = -k_1 C_A$, maka persamaan 7 akan menjadi:

$$-k_1 C_A = Q \frac{dC_A}{dV} \quad \dots \text{Pers. (8)}$$

Karena persamaan (8) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara integral sebagai berikut:

$$-k_1 \int_0^{V_1} dV = Q \int_{C_{A0}}^{C_{A1}} \frac{dC_A}{C_A} \quad \dots \text{Pers. (9)}$$

$$-k_1 V_1 = Q \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (9a)}$$

$$\frac{-k_1 V_1}{Q} = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

$$C_{A1} = C_{A0} e^{\frac{-k_1 V_1}{Q}} \quad \dots \text{Pers. (10)}$$

Neraca massa di reaktor RAP 2:

$$F_A(V) - F_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (11)}$$

Diketahui $F_A = QC_A$, maka persamaan (11) akan menjadi:

$$QC_A(V) - QC_A(V + \Delta V) + r_A \Delta V = 0 \quad \dots \text{Pers. (12)}$$

$$r_A = \frac{Q C_A(V+\Delta V) - Q C_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (13)}$$

Apabila persamaan (13) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_A = \lim_{\Delta V \rightarrow \infty} Q \frac{C_A(V+\Delta V) - C_A(V)}{\Delta V} \quad \dots \text{Pers. (14)}$$

$$r_A = Q \frac{dC_A}{dV} \quad \dots \text{Pers. (15)}$$

Diketahui bahwa $r_A = -k_2 C_A$, maka persamaan 15 akan menjadi:

$$-k_2 C_A = Q \frac{dC_A}{dV} \quad \dots \text{Pers. (16)}$$

Karena persamaan (16) dalam bentuk diferensial, maka dapat diselesaikan dengan cara integral sebagai berikut:

$$-k_2 \int_0^{V_2} dV = Q \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_A}{C_A} \quad \dots \text{Pers. (17)}$$

$$-k_2 V_2 = Q \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (17a)}$$

$$\frac{-k_2 V_2}{Q} = \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (17b)}$$

$$C_{A2} = C_{A1} e^{\frac{-k_2 V_2}{Q}} \quad \dots \text{Pers. (18)}$$

Selanjutnya substitusikan persamaan (10) ke persamaan (18) akan diperoleh:

$$C_{A2} = \left(C_{A0} e^{\frac{-k_1 V_1}{Q}} \right) e^{\frac{-k_2 V_2}{Q}} \quad \dots \text{Pers. (19)}$$

$$C_{A2} = C_{A0} e^{-\left(\frac{k_1 V_1 + k_2 V_2}{Q}\right)} \quad \dots \text{Pers. (20)}$$

Contoh soal 1

Hitunglah konsentrasi A yang keluar pada reaktor RAP kedua apabila reaktor dirangkai secara seri antara kedua reaktor alir pipa (RAP) dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume RAP 1 (V_1) = 5 m³
- Volume RAP 2 (V_2) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

Solusi:

Pertama-tama kita akan menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir pipa 1, yaitu dengan menggunakan persamaan (10) sebagai berikut:

$$C_{A1} = C_{A0} e^{\frac{-k_1 V_1}{Q}} = (3 \text{ mol/m}^3) e^{\frac{-0,5/\text{menit} \times 5 \text{ m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit}}}$$

$$C_{A1} = 0,41 \text{ mol/m}^3$$

Selanjutnya kita bisa menghitung nilai konsentrasi A yang keluar pada reaktor alir pipa yang kedua, yaitu dengan menggunakan persamaan 18 sebagai berikut:

$$C_{A2} = C_{A1} e^{\frac{-k_2 V_2}{Q}} = (0,41 \text{ mol/m}^3) e^{\frac{-0,5/\text{menit} \times 5 \text{ m}^3}{1,25 \text{ m}^3/\text{menit}}}$$

$$C_{A2} = 0,05 \text{ mol/m}^3$$

Untuk menghitung nilai CA2 dapat juga kita menggunakan persamaan (20) sebagai berikut:

$$C_{A2} = C_{A0} e^{-\left(\frac{k_1 V_1 + k_2 V_2}{Q}\right)}$$

$$= (3 \text{ mol/m}^3) e^{-\left(\frac{0,5/\text{menit} \times 5\text{m}^3 + 0,5/\text{menit} \times 5\text{m}^3}{1,25\text{m}^3/\text{menit}}\right)}$$

$$C_{A2} = 0,05 \text{ mol/m}^3$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Menghitung konsentrasi A yang keluar RAP2

- Ca0 = 3 #konsentrasi A awal
 k = 0.5
 V1 = 5 #volume RAP 1
 V2 = 5 #volume RAP 2
 Q = 1.25
 Ca1 = Ca0*exp(-k*V1/Q) #konsentrasi A keluar RAP 1
 Ca2 = Ca1*exp(-k*V2/Q) #konsentrasi A keluar RAP 2

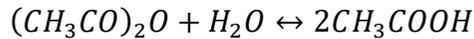
Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | K | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | Ca1 | 0.40600585 |
| 7 | Ca2 | 0.05494692 |

Contoh soal 2

Hidrolisa asam anhidrat dari asam asetat yang terjadi di dalam dua reaktor alir pipa (RAP) yang dirangkai secara seri dengan volume masing-masing 50 L dan 75 L. Konsentrasi asam

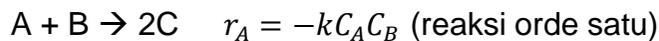
anhidrat dan air yang masuk kedalam RAP pertama masing-masing 2,5 mol/L dan 5 mol/L, dengan reaksi:



Reaksi orde pertama pada $(CH_3CO)_2O$ dan H_2O . Pada saat temperature reaktor, laju konstan adalah 0,075 L/(mol s). Kecepatan alir masuk 15 L/s. Hitunglah konsentrasi asam anhidrat dan air yang keluar pada RAP kedua?

Solusi:

Misalkan reaksi di atas dapat disederhanakan sbb:



Maka dari soal di atas diketahui bahwa:

| | |
|----------|--|
| V_1 | = 50 L (volume RAP1) |
| V_2 | = 75 L (volume RAP2) |
| k | = 0,075 L/(mol s) |
| C_{A0} | = 2,5 mol/L (konsentrasi awal asam anhidrat) |
| C_{B0} | = 5 mol/L (konsentrasi awal air) |
| Q | = 15 L/s (kecepatan alir/laju alir masuk) |

Neraca massa RAP 1:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{matrix} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{matrix} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa pada A: $(CH_3CO)_2O$**

$$F_{A0}(V_1) - F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = \left[\frac{dN_{A1}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2a), akan menjadi:

$$F_{A0}(V_1) - F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

$$r_{A1} = \frac{F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) - F_{A0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

Apabila persamaan (4a) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A1} = \lim_{\Delta V_1 \rightarrow \infty} \frac{F_{A1}(V_1 + \Delta V_1) - F_{A0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

$$r_{A1} = \frac{dF_{A1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_{A1} = -k_1 C_{A1} C_{B1}$, kita akan melakukan integrasi terhadap CA1 maka nilai CB1 diasumsikan konstan, maka Pers. (8a) akan menjadi:

$$-k_1 C_{A1} C_{B1} = \frac{dC_{A1}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (7a)}$$

$$-k_1 C_{B1} \int_0^t dt = \int_{C_{A0}}^{C_{A1}} \frac{dC_{A1}}{C_{A1}} \quad \dots \text{Pers. (8a)}$$

$$-k_1 C_{B1} (t - 0) = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (9a)}$$

$$-k_1 C_{B1} t = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10a)}$$

$$C_{A1} = C_{A0} e^{-C_{B1} k_1 t} \quad \dots \text{Pers. (11a)}$$

- **Neraca massa pada B: H_2O**

$$F_{B0}(V_1) - F_{B1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = \left[\frac{dN_{B1}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2b)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2b), akan menjadi:

$$F_{B0}(V_1) - F_{B1}(V_1 + \Delta V_1) + r_{A1}\Delta V_1 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

$$r_{A1} = \frac{F_{B1}(V_1 + \Delta V_1) - F_{B0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

Apabila persamaan (4b) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A1} = \lim_{\Delta V_1 \rightarrow \infty} \frac{F_{B1}(V_1 + \Delta V_1) - F_{B0}(V_1)}{\Delta V_1} \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

$$r_{A1} = \frac{dF_{B1}}{dV_1} \quad \dots \text{Pers. (6b)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_{A1} = -k_1 C_{A1} C_{B1}$, kita akan melakukan integrasi terhadap C_{B1} maka nilai C_{A1} diasumsikan konstan, maka Pers. (8b) akan menjadi:

$$-k_1 C_{A1} C_{B1} = \frac{dC_{B1}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

$$-k_1 C_{A1} \int_0^t dt = \int_{C_{B0}}^{C_{B1}} \frac{dC_{B1}}{C_{B1}} \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

$$-k_1 C_{A1} (t - 0) = \ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

$$-k_1 C_{A1} t = \ln \left(\frac{C_{B1}}{C_{B0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10b)}$$

$$C_{B1} = C_{B0} e^{-C_{A1} k_1 t} \quad \dots \text{Pers. (11b)}$$

Untuk mendapatkan nilai C_{A1} , kita dapat menyubstitusikan persamaan (11b) ke persamaan (10a), menjadi:

$$-k_1 C_{B0} e^{-C_{A1} k_1 t} t = \ln \left(\frac{C_{A1}}{C_{A0}} \right) \quad \dots \text{Pers. (14)}$$

$$\text{di mana } t = \frac{V_1}{Q} = \frac{50L}{15L/s} = 3,33s$$

$$-0,075 \times 5 \times e^{-C_{A1} \times 0,075 \times 3,33} \times 3,33 = \ln \left(\frac{C_{A1}}{2,5} \right)$$

$$\ln C_{A1} + 1,25 e^{-0,25 C_{A1}} - 0,92 = 0$$

Untuk mendapatkan nilai CA1 kita dapat lakukan *trial & error* sebagai berikut:

| | |
|-----|---|
| CA1 | $\ln C_{A1} + 1,25 e^{-0,25 C_{A1}} - 0,92$ |
| 0,9 | -0,052 |
| CA1 | 0 |
| 1 | 0,053 |

$$C_{A1} = 0,9 + \frac{0 + 0,052}{0,053 + 0,052} (1 - 0,9)$$

$$C_{A1} = 0,95 \text{ mol/L}$$

Untuk mendapatkan nilai CB1, kita substitusikan nilai CA1 ke persamaan (11b)

$$C_{B1} = 5 \times e^{-0,95 \times 0,075 \times 3,33} = 3,94 \text{ mol/L}$$

Neraca massa RAP 2:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi] \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

Karena reaktan ada 2, maka pertama kita akan meninjau neraca massa yang terjadi pada asam anhidrat $(CH_3CO)_2O$.

- **Neraca massa pada A: $(CH_3CO)_2O$**

$$F_{A1}(V_2) - F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2}\Delta V_2 = \left[\frac{dN_{A2}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2a), akan menjadi:

$$F_{A1}(V_2) - F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2}\Delta V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3a)}$$

$$r_{A2} = \frac{F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{A1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (4a)}$$

Apabila persamaan (4a) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A2} = \lim_{\Delta V_2 \rightarrow \infty} \frac{F_{A2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{A1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

$$r_{A2} = \frac{dF_{A2}}{dV_2} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_{A2} = -k_2 C_{A2} C_{B2}$, kita akan melakukan integrasi terhadap C_{A2} maka nilai C_{B2} diasumsikan konstan, maka Pers. (6a) akan menjadi:

$$-k_2 C_{A2} C_{B2} = \frac{dC_{A2}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (7a)}$$

$$-k_2 C_{B2} \int_0^t dt = \int_{C_{A1}}^{C_{A2}} \frac{dC_{A2}}{C_{A2}} \quad \dots \text{Pers. (8a)}$$

$$-k_2 C_{B2} (t - 0) = \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (9a)}$$

$$-k_2 C_{B2} t = \ln \left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10a)}$$

$$C_{A2} = C_{A1} e^{-C_{B2} k_2 t} \quad \dots \text{Pers. (11a)}$$

- **Neraca massa pada B: H_2O**

$$F_{B1}(V_2) - F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2}\Delta V_2 = \left[\frac{dN_{B2}}{dt} \right] \quad \dots \text{Pers. (2b)}$$

Karena tidak ada disperse aksial serta kondisi *steady state* (tunak), maka persamaan (2b), akan menjadi:

$$F_{B1}(V_2) - F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) + r_{A2}\Delta V_2 = 0 \quad \dots \text{Pers. (3b)}$$

$$r_{A2} = \frac{F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{B1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (4b)}$$

Apabila persamaan (4b) dilimitkan akan diperoleh:

$$r_{A2} = \lim_{\Delta V_2 \rightarrow \infty} \frac{F_{B2}(V_2 + \Delta V_2) - F_{B1}(V_2)}{\Delta V_2} \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

$$r_{A2} = \frac{dF_{B2}}{dV_2} \quad \dots \text{Pers. (6b)}$$

Diketahui dari soal bahwa $r_{A2} = -k_2 C_{A2} C_{B2}$, kita akan melakukan integrasi terhadap C_{B2} maka nilai C_{A2} diasumsikan konstan, maka Pers. (6b) akan menjadi:

$$-k_2 C_{A2} C_{B2} = \frac{dC_{B2}}{dt} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

$$-k_2 C_{A2} \int_0^t dt = \int_{C_{B1}}^{C_{B2}} \frac{dC_B}{C_B} \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

$$-k_2 C_{A2} (t - 0) = \ln \left(\frac{C_{B2}}{C_{B1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (9b)}$$

$$-k_2 C_{A2} t = \ln \left(\frac{C_{B2}}{C_{B1}} \right) \quad \dots \text{Pers. (10b)}$$

$$C_{B2} = C_{B1} e^{-C_{A2} k_2 t} \quad \dots \text{Pers. (11b)}$$

Untuk mendapatkan nilai CA2, kita dapat menyubstitusikan persamaan (11b) ke persamaan (10a), menjadi:

$$-k_2 C_{B1} e^{-C_{A2} k_2 t} = \ln\left(\frac{C_{A2}}{C_{A1}}\right) \quad \dots \text{Pers. (14)}$$

$$\text{di mana } t = \frac{V2}{Q} = \frac{75L}{15L/s} = 5s$$

$$-0,075 \times 3,93 \times e^{-C_{A2} \times 0,075 \times 5} \times 5 = \ln\left(\frac{C_{A2}}{0,95}\right)$$

$$\ln C_{A2} + 1,474 e^{-0,375 C_{A2}} + 0,051 = 0$$

Untuk mendapatkan nilai CA2 kita dapat lakukan *trial & error* sebagai berikut:

| CA2 | $\ln C_{A2} + 1,474 e^{-0,375 C_{A2}} + 0,051$ |
|-----|--|
| 0,2 | -0,19 |
| CA2 | 0 |
| 0,3 | 0,16 |

$$C_{A2} = 0,2 + \frac{0 + 0,19}{0,16 + 0,19} (0,3 - 0,2)$$

$$C_{A2} = 0,25 \text{ mol/L}$$

Untuk mendapatkan nilai CB2, kita substitusikan nilai CA2 ke persamaan (11b)

$$C_{B2} = 3,93 \times e^{-0,25 \times 0,075 \times 5} = 3,6 \text{ mol/L}$$

Penyelesaian dengan menggunakan Polymath:

Menghitung konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RAP 1

$$Ca0 = 2.5 \text{ #konsentrasi asam anhidrat (A) awal}$$

$$Cb0 = 5 \text{ #konsentrasi air (B) awal}$$

$$k = 0.075$$

$$\begin{aligned}
 V1 &= 50 \text{ \#volume RAP 1} \\
 Q &= 15 \\
 t1 &= V1/Q \\
 f(Ca1) &= \ln(Ca1/Ca0) + k \cdot Cb1 \cdot t1 \\
 Cb1 &= Cb0 \cdot \exp(-Ca1 \cdot k \cdot t1) \\
 Ca1(\max) &= 2.5 \\
 Ca1(\min) &= 0
 \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca1 | 0.92779711 | -1.0E-15 | 1.25 | 2.2E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca0 | 2.5 | 2.5 |
| 2 | Cb0 | 5 | 5 |
| 3 | Cb1 | 3.96493172 | 3.65807814 |
| 4 | K | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | t1 | 3.33333333 | 3.33333333 |
| 7 | V1 | 50 | 50 |

Menghitung konsentrasi asam anhidrat (A) dan air (B) yang keluar RAP2

$$\begin{aligned}
 Ca1 &= 0.93 \text{ \#konsentrasi asam anhidrat (A) keluar RAP 1} \\
 Cb1 &= 3.96 \text{ \#konsentrasi air (B) keluar RAP 1} \\
 k &= 0.075 \\
 V2 &= 75 \text{ \#volume RAP 2} \\
 Q &= 15 \\
 t2 &= V2/Q \\
 f(Ca2) &= \ln(Ca2/Ca1) + k \cdot Cb2 \cdot t2 \\
 Cb2 &= Cb1 \cdot \exp(-Ca2 \cdot k \cdot t2) \\
 Ca2(\max) &= 1 \\
 Ca2(\min) &= 0
 \end{aligned}$$

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca2 | 0.23927888 | -3.7E-10 | 0.5 | 6.1E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|------------|---------------|
| 1 | Ca1 | 0.93 | 0.93 |
| 2 | Cb1 | 3.96 | 3.96 |
| 3 | Cb2 | 3.62014633 | 3.28295531 |
| 4 | K | 0.075 | 0.075 |
| 5 | Q | 15 | 15 |
| 6 | t2 | 5 | 5 |
| 7 | V2 | 75 | 75 |

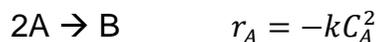
Soal Latihan

1. Hitunglah konsentrasi A yang keluar dari reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) kedua apabila reaktor dirangkai seri antara 2 buah reaktor tangki berpengaduk (RATB) dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
 - Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
 - Volume RATB1 (V_1) = 5 m³
 - Volume RATB1 (V_2) = 5 m³
 - Laju volumetric (Q) = 1,25 m³/menit
2. Hitunglah konsentrasi A yang keluar dari reaktor alir pipa (RAP) kedua apabila reaktor dirangkai seri antara dua buah reaktor alir pipa (RAP), dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume RAP1 (V_1) = 5 m³
- Volume RAP2 (V_2) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

3. Hitunglah konsentrasi A yang keluar dari reaktor alir tangki berpengaduk (RATB) kedua apabila reaktor dirangkai seri dengan reaktor alir pipa (RAP). Dan dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume RAP (V_1) = 5 m³
- Volume RATB (V_2) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

4. Hitunglah konsentrasi A yang keluar dari reaktor alir pipa (RAP) kedua apabila reaktor dirangkai seri dengan reaktor alir tangki berpengaduk (RATB). Dan dengan mengikuti persamaan berikut:



Properti sistem:

- Konsentrasi A awal (C_{A0}) = 3 mol/m³
- Koefisien laju reaksi (k) = 0,5 1/menit
- Volume RATB (V_1) = 5 m³
- Volume RAP (V_2) = 5 m³
- Laju *volumetric* (Q) = 1,25 m³/menit

REAKTOR KATALISTIK HETEROGEN

Tujuan Pembelajaran

Subcapaian Pembelajaran – Mata Kuliah (kemampuan akhir yang diharapkan):

1. Mahasiswa mampu menjelaskan pengertian dan proses reaktor katalistik heterogen
2. Mahasiswa mampu menjelaskan keunggulan dan kelemahan reaktor katalistik heterogen
3. Mahasiswa mampu membuat neraca massa pada reaktor katalistik heterogen

Pengertian dan Proses Reaktor Katalistik Heterogen

Reaktor katalistik heterogen merupakan jenis reaktor yang digunakan dalam proses katalisis heterogen, di mana reaksi kimia yang terjadi antara reaktan dalam bentuk fase gas, cairan, atau padatan dengan katalis biasanya dalam bentuk fase padatan. Katalis yang merupakan material yang dapat memfasilitasi atau mempercepat reaksi kimia tanpa mengalami perubahan secara permanen, sering kali berupa logam atau oksida logam yang diendapkan pada substrat. Rancangan ruang reaktor harus dapat memberikan kontak yang efektif dan efisien antara fase reaktan dan katalis. Jenis reaktor katalis heterogen dapat berupa *fixed bed reactor*, *fluidized bed reactor*, dan *slurry reactor*. Prinsip kerja katalis dapat berupa: Katalis dapat menyerap reaktan pada permukaannya (*absorbs*), molekul-molekul reaktan yang diserap oleh katalis akan bergerak dan berinteraksi di permukaan katalis untuk membentuk produk (*desorpsi*), proses reaksi kimia terjadi di antara reaktan yang

teradsorpsi di permukaan katalis (reaksi kimia), dan produk reaksi terdesorpsi dari permukaan katalis (desorpsi produk).

Tahapan reaksi katalistik secara umum adalah sebagai berikut:

1. Transfer massa (difusi) reaktan (baik salah satu atau lebih)
2. Jika katalis yang digunakan porous, maka terjadi difusi reaktan dari mulut pori
3. Adsorpsi reaktan pada sisi aktif di permukaan katalis
4. Reaksi pada permukaan katalis membentuk produk
5. Desorpsi produk dari permukaan katalis
6. Difusi hasil dari permukaan katalis, atau jika katalis berpori difusi dari dalam pori ke mulut pori katalis
7. Transfer massa (difusi) produk dari bagian luar katalis ke "*bulk fluid*"

Keunggulan dan Kelemahan Reaktor Katalistik Heterogen

- Keunggulan:
 - Efisiensi konversi tinggi dikarenakan adanya kontak antara fase reaktan dengan katalis
 - Kontrol proses sangat baik berupa pengontrolan suhu, tekanan, dan laju aliran yang merupakan parameter reaksi
 - Rekayasa yang fleksibel, di mana reaktor dapat dirancang sesuai dengan kebutuhan proses
 - Katalis padat biasanya lebih tahan terhadap kondisi ekstrem seperti suhu tinggi dan tekanan tinggi
- Kelemahan:
 - Deaktivasi katalis, karena *fouling*, *sintering*, atau pencemaran oleh bahan reaksi atau produk samping
 - Proses regenerasi atau pemulihan katalis bisa lebih mahal dan kompleks
 - Biaya investasi dan operasional tinggi
 - Masalah pengendalian difusi yang sering kali terbatas oleh laju difusi reaktan ke permukaan katalis
 - Kompleksitas desain dan operasi

Persamaan Neraca Massa Reaktor Katalistik Heterogen

Persamaan neraca massa untuk reaktor katalistik heterogen menggabungkan aliran reaktan masuk, aliran produk keluar, dan laju reaksi yang terjadi di permukaan katalis. Persamaan neraca massa berbeda tergantung pada jenis reaktor yang digunakan seperti reaktor alir tangki berpengaduk (RATB), reaktor gelembung pancaran (RGP), maupun reaktor alir pipa (RAP) yang prinsip dasarnya sama yaitu:

Neraca massa reaktor katalistik heterogen:

$$[massa]_{in} - [massa]_{out} + \left[\begin{array}{l} \text{pembentukan} \\ \text{karena reaksi} \end{array} \right] = [akumulasi]$$

...Pers. (1)

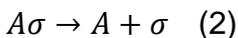
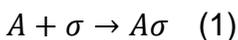
Contoh soal 1.

Reaksi $A \leftrightarrow B$ ada dua tahap yang menentukan laju reaksi, yaitu adsorbs A dan unimolekuler dekomposisi A teradsorbsi. Tentukan persamaan laju reaksinya jika diketahui data percobaan sebagai berikut: (Kusmiyati, 2014)

| P_a | P_b | r_A |
|-------|-------|--------|
| 1,5 | 0,7 | 1,2575 |
| 1,2 | 1 | 1,0244 |
| 0,8 | 1 | 0,8235 |

Solusi:

Persamaan stoikiometrinya:



Saat *steady state*, laju reaksinya:

- Laju reaksi pada persamaan stoikiometri (1):
$$r_A = k_1 P_a v_v^* \quad \dots \text{Pers. (1)}$$

- Laju reaksi pada persamaan stoikiometri (2):

$$r_A = k_2 v_a^* \quad \dots \text{Pers. (2)}$$

$$v_a^* = r_A / k_2 \quad \dots \text{Pers. (2a)}$$

di mana:

$$v_v^* = 1 - v_a^* - v_v \quad \dots \text{Pers. (3)}$$

dan

$$v_v = k_b P_b v_v^* \quad \dots \text{Pers. (4)}$$

Substitusikan Pers. (2a) dan Pers. (4) ke Pers. (3), akan diperoleh:

$$v_v^* = 1 - r_A / k_2 - k_b P_b v_v^* \quad \dots \text{Pers. (5)}$$

$$v_v^* + k_b P_b v_v^* = 1 - r_A / k_2 \quad \dots \text{Pers. (5a)}$$

$$(1 + k_b P_b) v_v^* = 1 - r_A / k_2 \quad \dots \text{Pers. (5b)}$$

$$v_v^* = \frac{1 - r_A / k_2}{(1 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (5c)}$$

Substitusikan Pers. (5c) Ke Pers. (1), akan diperoleh:

$$r_A = k_1 P_a \frac{1 - r_A / k_2}{(1 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (6)}$$

$$r_A = \frac{k_1 P_a - k_1 P_a r_A / k_2}{(1 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (6a)}$$

$$r_A = \frac{k_1 P_a}{(1 + k_b P_b)} - \frac{k_1 P_a r_A / k_2}{(1 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (6b)}$$

$$r_A + \frac{k_1 P_a r_A / k_2}{(1 + k_b P_b)} = \frac{k_1 P_a}{(1 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (6c)}$$

$$\left(1 + \frac{k_1 P_a / k_2}{(1 + k_b P_b)} \right) r_A = \frac{k_1 P_a}{(1 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (6d)}$$

$$\left(\frac{(1 + k_b P_b)}{(1 + k_b P_b)} + \frac{k_1 P_a / k_2}{(1 + k_b P_b)} \right) r_A = \frac{k_1 P_a}{(1 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (6e)}$$

$$\left((1 + k_b P_b) + \frac{k_1 P_a}{k_2} \right) r_A = k_1 P_a \quad \dots \text{Pers. (6f)}$$

$$r_A = \frac{k_1 P_a}{(1 + k_1 P_a / k_2 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (7)}$$

$$\frac{r_A}{P_a} = \frac{k_1}{(1 + k_1 P_a / k_2 + k_b P_b)} \quad \dots \text{Pers. (7a)}$$

$$\frac{P_a}{r_A} = \frac{1 + (k_1 / k_2) P_a + k_b P_b}{k_1} \quad \dots \text{Pers. (7b)}$$

$$\frac{P_a}{r_A} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} P_a + \frac{k_b}{k_1} P_b \quad \dots \text{Pers. (7c)}$$

Pers. (7c) di atas dapat kita misalkan dalam bentuk:

$$y = a + b x_1 + c x_2 \quad \dots \text{Pers. (8)}$$

Di mana:

$$a = \frac{1}{k_1}, \quad b = \frac{1}{k_2}, \quad \text{dan} \quad c = \frac{k_b}{k_1}$$

Dari data percobaan akan kita hitung nilai $\frac{P_a}{r_A}$ yang dapat disajikan dalam tabel berikut ini:

| $P_a (x_1)$ | $P_b (x_2)$ | r_A | $\frac{P_a}{r_A} (y)$ |
|-------------|-------------|--------|-----------------------|
| 1,5 | 0,7 | 1,2575 | 1,193 |
| 1,2 | 1 | 1,0244 | 1,171 |
| 0,8 | 1 | 0,8235 | 0,971 |

Apabila kita substitusikan nilai-nilai tabel di atas ke Pers. (8) akan kita peroleh 3 buah persamaan sbb:

$$1,193 = a + 1,5b + 0,7c \quad \dots \text{Pers. (8a)}$$

$$1,171 = a + 1,2b + c \quad \dots \text{Pers. (8b)}$$

$$0,971 = a + 0,8b + c \quad \dots \text{Pers. (8c)}$$

Untuk mencari nilai a, b dan c dapat kita lakukan eliminasi ke tiga persamaan di atas dengan Langkah-langkah sbb:

- Eliminasi Pers. (8b) dengan Pers. (8c) akan diperoleh nilai a:

$$\begin{array}{r} 1,171 = a + 1,2b + c \\ 0,971 = a + 0,8b + c \\ \hline 0,5 = b \end{array}$$

- Eliminasi Pers. (8a) dengan Pers. (8b) dan menyubstitusikan nilai $b = 0,5$, akan diperoleh nilai c:

$$\begin{array}{r} 1,193 = a + 1,5(0,5) + 0,7c \\ 1,171 = a + 1,2(0,5) + c \\ \hline 0,427 = c \end{array}$$

- Substitusikan nilai $b = 0,5$ dan $c = 0,427$ ke Pers. (8c) akan diperoleh nilai a:

$$\begin{array}{r} 0,971 = a + 0,8(0,5) + 0,427 \\ a = 0,144 \end{array}$$

Setelah diketahui nilai a, b, dan c maka selanjutnya kita mencari nilai k1, k2 dan kb

$$a = \frac{1}{k_1}$$

$$0,144 = \frac{1}{k_1}$$

$$k_1 = 6,94$$

$$b = \frac{1}{k_2}$$

$$0,5 = \frac{1}{k_2}$$

$$k_2 = 2$$

$$c = \frac{k_b}{k_1}$$

$$0,427 = \frac{k_b}{6,94}$$

$$k_b = 0,854$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Mencari nilai a, b dan c

$$a + 1.5*b + 0.7*c = 1.193$$

$$a + 1.2*b + c = 1.171$$

$$a + 0.8*b + c = 0.971$$

Linear equations solution

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | a | 0.14433333 |
| 2 | b | 0.5 |
| 3 | c | 0.42666667 |

Mencari nilai k1, k2 dan kb

$$a = 0.144$$

$$b = 0.5$$

$$c = 0.423$$

$$k_1 = 1/a$$

$$k_2 = 1/b$$

$$k_b = c*k_1$$

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-------|
| 1 | a | 0.144 |
| 2 | b | 0.5 |
| 3 | c | 0.423 |

| | <i>Variable</i> | <i>Value</i> |
|---|-----------------|--------------|
| 4 | k1 | 6.94444444 |
| 5 | k2 | 2 |
| 6 | kb | 2.9375 |

Karena yang ditanya adalah persamaan laju reaksi, maka nilai k1, k2 dan kb dapat disubstitusikan ke Pers. (7) akan diperoleh:

$$r_A = \frac{6,94P_a}{\left(1 + \frac{6,94P_a}{2} + 0,854P_b\right)}$$

$$r_A = \frac{6,94P_a}{(1 + 3,47P_a + 0,854P_b)}$$

SOLUSI SOAL LATIHAN

Solusi Latihan Soal Reaktor *Batch*

No.3

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{C_A}{C_{A0}}\right)}{t}$$

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{5\text{mol/L}}{15\text{mol/L}}\right)}{120 \text{ menit}} = 0,0092 \text{ menit}^{-1}$$

atau $k = 0,55 \text{ jam}^{-1}$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-----------|
| 1 | Ca0 | 15 |
| 2 | Ca | 5 |
| 3 | t | 120 |
| 4 | k | 0.0091551 |

No.4

$$t = \frac{(1/C_A - 1/C_{A0})}{k}$$

$$t = \frac{(1/0,5 - 1/5) \text{ L/mol}}{0,5 \text{ L/mol jam}^{-1}} = 3,6 \text{ jam}$$

t = 216 menit

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-------|
| 1 | Ca0 | 5 |
| 2 | Ca | 0.5 |
| 3 | k | 0.5 |
| 4 | t | 3.6 |

No. 5

$$C_A = \sqrt{\frac{C_{A0}^2}{(2C_{A0}kt+1)}}$$

$$C_A = \sqrt{\frac{(10\text{ mol/L})^2}{2((10\text{ mol/L})^2 \times 1\text{ L}^2/\text{mol}^2 \text{ jam}^{-1} \times 1\text{ jam} + 1)}}$$

$$C_A = 0,71 \text{ mol/L}$$

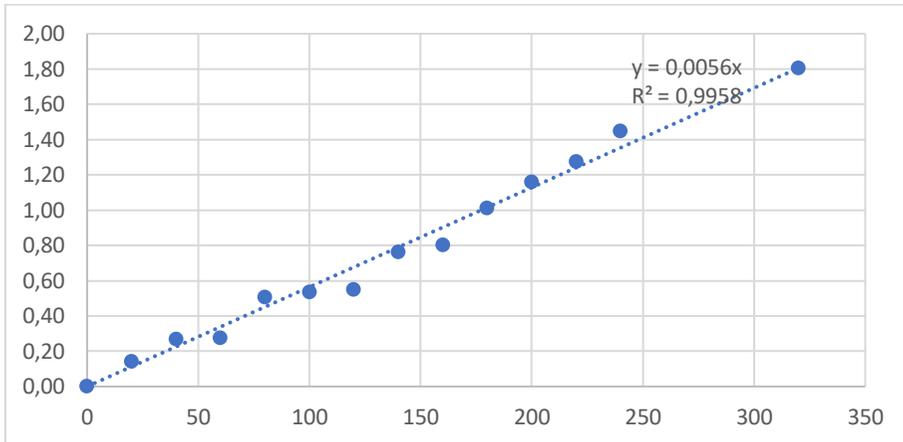
Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 10 |
| 2 | k | 1 |
| 3 | t | 1 |
| 4 | Ca | 0.70534562 |

Solusi Soal Latihan Reaktor Gelembung Pancaran

No.2



Dari grafik di atas diperoleh $KLa = 0,0056 \text{ jam}^{-1}$, dan nilai efisiensi penyisihan amonia:

$$efisiensi = \left| \frac{C_t - C_0}{C_0} \right| \times 100\%$$

$$efisiensi = \left| \frac{29,5 - 179,3}{179,3} \right| \times 100\% = 83,5\%$$

Penyelesaian dengan Polymath:

$$C = a_0 + a_1 t$$

| Variable | Value | 95% confidence |
|----------|-------------|----------------|
| a0 | -0.01511435 | 0.06763534 |
| a1 | 0.00571362 | 0.00042038 |

| R ² | R ² adj | Rmsd | Variance |
|----------------|--------------------|-----------|----------|
| 0.9865032 | 0.9853785 | 0.0158282 | 0.004092 |

| | Variable | Value |
|---|-----------|-----------|
| 1 | Ca0 | 179.3 |
| 2 | Ca | 29.5 |
| 3 | Efisiensi | 83.547128 |

No.3

$$C_A = C_{A0}(1 - efisiensi)$$

$$= 250 \text{ ppm}(1 - 0,95) = 12,5 \text{ ppm}$$

Untuk mencari nilai KLa, sebagai berikut:

$$K_L a = - \frac{\ln(C_A/C_{A0})}{t}$$

$$= - \frac{\ln(12,5 \text{ ppm}/250 \text{ ppm})}{5 \text{ jam}} = 0,6 \text{ jam}^{-1}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|-----------|------------|
| 1 | Ca0 | 250 |
| 2 | efisiensi | 0.95 |
| 3 | Ca | 12.5 |
| 4 | k | 0.59914645 |

No.4

$$C_A = C_{A0}(1 - efisiensi)$$

$$= 175 \text{ ppm}(1 - 0,98) = 3,5 \text{ ppm}$$

$$t = -\frac{\ln(C_A/C_{A0})}{K_L a}$$

$$= -\frac{\ln(3,5 \text{ ppm}/175 \text{ ppm})}{0,5 \text{ jam}^{-1}} = 7,8 \text{ jam}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|-----------|------------|
| 1 | Ca0 | 175 |
| 2 | efisiensi | 0.98 |
| 3 | KLa | 0.5 |
| 4 | Ca | 3.5 |
| 5 | t | 7.82404601 |

No.5

$$A = 1/\{(C_{K_2CO_3})_0 - (C_{CO_2})_0\} = 1/\{900 - 800\}$$

$$A = 0,01$$

$$B = 1/\{(C_{CO_2})_0 - (C_{K_2CO_3})_0\} = 1/\{800 - 900\}$$

$$B = -0,01$$

$$k = \left\{ -0,01 \ln\left(\frac{400}{800}\right) + 0,01 \ln\left(\frac{900 - 800 + 400}{900}\right) \right\} / 5$$

$$k = 0,0002$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca | 800 |
| 2 | Ka | 900 |
| 3 | Cs | 400 |
| 4 | t | 5 |
| 5 | A | 0.01 |
| 6 | B | -0.01 |
| 7 | k | 0.00021072 |

No.6

$$A = \frac{1}{\{(C_{NaOH})_0 - 2(C_{CO_2})_0\}} = \frac{1}{\{1200 - 2 \times 900\}}$$

$$A = -0,0017$$

$$B = \frac{1}{\{(C_{CO_2})_0 - 1/2(C_{NaOH})_0\}} = \frac{1}{\{900 - 1/2 \times 1200\}}$$

$$B = 0,0033$$

$$3 = \left\{ \ln \left(\frac{(C_{CO_2})_t}{900} \right) - \ln \left(\frac{2(C_{CO_2})_t - 600}{1200} \right) \right\}$$

$$20,1 = \left(\frac{(C_{CO_2})_t}{3} \right) \left(\frac{2}{(C_{CO_2})_t - 300} \right)$$

$$(C_{CO_2})_t = 310,3 \text{ ppm}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

Solution #1 of 2

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|-------|--------|---------------|--------------|
| 1 | Cs | 900 | 0.0E00 | 450 | 2.3E-01 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|-------------|---------------|
| 1 | A | -0.00166667 | -0.00166667 |
| 2 | B | 0.00333333 | 0.00333333 |
| 3 | Ca | 900 | 900 |
| 4 | k | 0.0005 | 0.0005 |
| 5 | Na | 1200 | 1200 |
| 6 | t | 10 | 10 |

Solusi Soal Latihan Reaktor Alir Tangki Berpengaduk (RATB)

No.2

$$C_A = \frac{QC_{A0}}{Q+kV}$$

$$= \frac{1,5\text{m}^3/\text{menit} \times 10\text{mol}/\text{m}^3}{1,5\text{m}^3/\text{menit} + 0,5/\text{menit} \times 5\text{m}^3} = 3,75 \text{ mol}/\text{m}^3$$

$$\text{konversi} = 1 - \frac{C_A}{C_{A0}}$$

$$= 1 - \frac{3,75 \text{ mol}/\text{m}^3}{10 \text{ mol}/\text{m}^3} = 0,625$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-------|
| 1 | Ca0 | 10 |
| 2 | Q | 1.5 |
| 3 | k | 0.5 |
| 4 | V | 5 |
| 5 | Ca | 3.75 |
| 6 | konversi | 0.625 |

No.3

$$C_A^3 + 20C_A^2 + 0,2C_A - 1 = 0$$

$$C_A = 0,22 \text{ mol/L}$$

$$C_B = 20 + C_A$$

$$C_B = 20,22 \text{ mol/L}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|-----------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca | 0.2175095 | -5.4E-08 | 2.5 | -7.0E03 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|-----------|---------------|
| 1 | Ca0 | 5 | 5 |
| 2 | Cb | 20.217509 | 22.5 |
| 3 | Cb0 | 25 | 25 |
| 4 | k | 0.1 | 0.1 |
| 5 | Q | 10 | 10 |
| 6 | V | 500 | 500 |

No.4

$$C_A^3 + 50C_A^2 + 627C_A - 50 = 0$$

$$C_A = 0,08 \text{ mol/L}$$

$$C_B = 25 + C_A$$

$$C_B = 25,08 \text{ mol/L}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value | f(x) | Initial Guess | Initial f(x) |
|---|----------|------------|----------|---------------|--------------|
| 1 | Ca | 0.07924327 | -1.1E-07 | 2.5 | -4.6E04 |

| | Variable | Value | Initial Value |
|---|----------|-----------|---------------|
| 1 | Ca0 | 25 | 25 |
| 2 | Cb | 25.079243 | 27.5 |
| 3 | Cb0 | 50 | 50 |
| 4 | k | 0.5 | 0.5 |
| 5 | Q | 50 | 50 |
| 6 | V | 50 | 50 |

Solusi Soal Reaktor Alir Pipa (RAP)

No.3

$$t = V/Q = 40m^3 / 10m^3/menit$$

$$t = 4 \text{ menit}$$

$$k = -\frac{\ln(C_A/C_{A0})}{t}$$

$$k = - \frac{\ln(0,2 \text{ mol/m}^3 / 4 \text{ mol/m}^3)}{4 \text{ menit}}$$

$$k = 0,75 \text{ menit}^{-1}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 4 |
| 2 | Ca | 0.2 |
| 3 | V | 40 |
| 4 | Q | 10 |
| 5 | t | 4 |
| 6 | k | 0.74893307 |

No. 4

$$t = V/Q = 5 \text{ m}^3 / 0,5 \text{ m}^3 / \text{menit}$$

$$t = 10 \text{ menit}$$

$$k = \frac{(1/C_A - 1/C_{A0})}{t}$$

$$k = \frac{(1/0,3 \text{ mol/m}^3 - 1/3 \text{ mol/m}^3)}{10 \text{ menit}}$$

$$k = 0,3 \text{ menit}^{-1}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|-------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | Ca | 0.3 |
| 3 | V | 5 |
| 4 | Q | 0.5 |
| 5 | t | 10 |
| 6 | k | 0.3 |

Solusi Soal Reaktor Seri

No.1

$$QC_{A0} - QC_{A1} - kC_{A1}^2V_1 = 0$$

$$2,5C_{A1}^2 + 1,25C_{A1} - 3,75 = 0$$

$$C_{A1} = \frac{-1,25 + \sqrt{1,25^2 - 4 \times 2,5 \times (-3,75)}}{2 \times 2,5}$$

$$C_{A1} = 1 \text{ mol/m}^3 \text{ (konsentrasi A keluar reaktor RATB 1)}$$

$$QC_{A1} - QC_{A2} - kC_{A2}^2V_2 = 0$$

$$2,5C_{A2}^2 + 1,25C_{A2} - 1,25 = 0$$

$$C_{A2} = \frac{-1,25 + \sqrt{1,25^2 - 4 \times 2,5 \times (-1,25)}}{2 \times 2,5}$$

$$C_{A2} = 0,5 \text{ mol/m}^3 \text{ (konsentrasi A keluar reaktor RATB 2)}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | Ca1 | 0.99498996 |
| 7 | Ca2 | 0.48992904 |

No. 2

$$t_1 = V_1/Q = 5\text{m}^3/1,25\text{m}^3/\text{menit}$$

$$t_1 = 4 \text{ menit}$$

$$C_{A1} = \frac{1}{kt_1 + 1/C_{A0}} = \frac{1}{0,5 \times 4 + 1/3}$$

CA1 = 0,43 mol/m³ (konsentrasi A keluar reaktor RAP 1)

$$t_2 = V_2/Q = 5\text{m}^3/1,25\text{m}^3/\text{menit}$$

$$t_2 = 4 \text{ menit}$$

$$C_{A2} = \frac{1}{kt_2 + 1/C_{A1}} = \frac{1}{0,5 \times 4 + 1/0,43}$$

CA2 = 0,23 mol/m³ (konsentrasi A keluar reaktor RAP 2)

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | t1 | 4 |
| 7 | Ca1 | 0.42857143 |
| 8 | t2 | 4 |
| 9 | Ca2 | 0.23076923 |

No.3

$$QC_{A0} - QC_{A1} - kC_{A1}^2V_1 = 0$$

$$2,5C_{A1}^2 + 1,25C_{A1} - 3,75 = 0$$

$$C_{A1} = \frac{-1,25 + \sqrt{1,25^2 - 4 \times 2,5 \times (-3,75)}}{2 \times 2,5}$$

$$C_{A1} = 1 \text{ mol/m}^3 \text{ (konsentrasi A keluar reaktor RATB)}$$

$$t_2 = V_2/Q = 5\text{m}^3 / 1,25 \text{ m}^3/\text{menit}$$

$$t_2 = 4 \text{ menit}$$

$$C_{A2} = \frac{1}{kt_2 + 1/C_{A1}} = \frac{1}{0,5 \times 4 + 1/1}$$

$$C_{A2} = 0,33 \text{ mol/m}^3 \text{ (konsentrasi A keluar reaktor RAP)}$$

Penyelesaian dengan Polymath

Calculated Values

| | Variable | Value |
|---|----------|------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | D1 | 38.75 |
| 7 | Ca1 | 0.99498996 |
| 8 | t2 | 4 |
| 9 | Ca2 | 0.3327748 |

No.4

$$t_1 = V_1/Q = 5\text{m}^3 / 1,25\text{m}^3/\text{menit}$$

$$t_1 = 4 \text{ menit}$$

$$C_{A1} = \frac{1}{kt_1 + 1/C_{A0}} = \frac{1}{0,5 \times 4 + 1/3}$$

$$C_{A1} = 0,43 \text{ mol/m}^3 \text{ (konsentrasi A keluar reaktor RAP)}$$

$$QC_{A1} - QC_{A2} - kC_{A2}^2V_2 = 0$$

$$2,5C_{A2}^2 + 1,25C_{A2} - 0,54 = 0$$

$$C_{A2} = \frac{-1,25 + \sqrt{1,25^2 - 4 \times 2,5 \times (-0,54)}}{2 \times 2,5}$$

$$C_{A2} = 0,28 \text{ mol/m}^3 \text{ (konsentrasi A keluar reaktor RATB)}$$

Penyelesaian dengan Polymath:

Calculated Values

| | <i>Variable</i> | <i>Value</i> |
|---|-----------------|--------------|
| 1 | Ca0 | 3 |
| 2 | k | 0.5 |
| 3 | V1 | 5 |
| 4 | V2 | 5 |
| 5 | Q | 1.25 |
| 6 | t1 | 4 |
| 7 | Ca1 | 0.42857143 |
| 8 | Ca2 | 0.26408726 |

DAFTAR PUSTAKA

- Danckwartz, P., & Agar, D. W. (2003). *Gas Liquid Reaction*. Bangalore: McGraw-Hill Book Company.
- Demergenci, N., Nuri, A. O., & Yildiz, E. (2012). Ammonia removal by air stripping in a semi-batch jet loop reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 399-404.
- Fogler, S. (1999). *Elements of Chemical Reaction Engineering. Third Edition*. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- Hayes, R. (2001). *Introduction to Chemical Reactor Analysis*. Alberta: Gordon and Breach Science.
- Kusmiyati. (2014). *Kinetika Reaksi dan Reactor: Teori dan soal penyelesaian dengan SCILAB*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Levenspiel, O. (1999). *Chemical Reaction Engineering*. New York: John Wiley & Sons.
- Nugroho, D. (2017). Pengaruh Diameter nozzle, Temperatur, dan pH terhadap Penyisihan Kadar Amonia Dengan Menggunakan Udara Stripping pada Kolom Gelembung Pancaran. *Jurnal Hasil Penelitian Industri, Vol.6, No.1*, 59-64.
- Nugroho, D. H., Adisalamun, & Machdar, I. (2014). Recovery of Amonia Solutions From Fertilizer Industry Wastewater by Air Stripping Using Jet Bubble Column. *The 5th Sriwijaya International Seminar on Energy and Environmental Science & Technology* (pp. 102-108). Palembang: Universitas Sriwijaya.
- Quan, X., Wang, F., Zhao, Q., Zhao, T., & Xiang, J. (2009). Air Stripping of Amonia in a Water-sparged aerocyclone reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 983-988.
- Setiadi, & Nugroho, D. H. (2007). Studi Hidrodinamika Dan Kinetika Absorpsi CO₂ Kolom Gelembung Pancaran. *Seminar Nasional Rekayasa Kimia Dan Proses*, (pp. 1-9).

TENTANG PENULIS



Didiek Hari Nugroho, S.T., M.T. Lahir di Maumere, 1980, adalah alumni Sarjana Teknik Kimia Universitas Indonesia dan Magister Teknik Kimia Universitas Syiah Kuala. Selain itu juga merupakan alumni pada Program Drilling, Production and Liquidified Natural Gas Applied Competencies di Southern Alberta Institute of Technology (SAIT), Calgary, Canada; Program IVLP di Wright State University, Ohio, U.S.A; dan Program Wastewater Treatment di Environment Protection Training and Research Institute (EPTRI), Hyderabad, India. Saat ini penulis berprofesi sebagai Dosen di Program Studi D4 Teknologi Kimia Industri, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya.

Penulis aktif mengajar di Program Studi D4 Teknologi Kimia Industri, salah satunya mata kuliah Reaktor Kimia. Selain mengajar, penulis juga aktif melakukan penelitian di bidang teknologi proses kimia dan pengolahan limbah industri. Beberapa penelitian yang telah dilaksanakan oleh penulis dibiayai oleh DRPM Kemdikbudristek dan hasil penelitiannya juga diterbitkan di beberapa jurnal ilmiah nasional maupun internasional, buku, dan paten. Penulis sering juga diundang baik sebagai pembicara maupun konsultan yang merupakan bagian dalam melaksanakan kegiatan Pengabdian kepada Masyarakat.



Dr. Ir. Abu Hasan, M.Si. Dilahirkan di kota Palembang 23 Oktober 1964. Menempuh Pendidikan S1 di Jurusan Teknik Kimia Universitas Sriwijaya Palembang dan selesai di tahun 1991. Kemudian dia melanjutkan studi S2 di Program

Studi Materials Science Universitas Indonesia yang selesai tahun 1996, selanjutnya dia menimba ilmu di Universitas Gadjah Mada Progran Studi Ilmu Teknik Kimia dan selesai tahun 2013. Bekerja di Jurusan Teknik Kimia Politeknik Negeri Sriwijaya Palembang sebagai dosen sejak tahun 1992 sampai dengan sekarang. Terlibat di pengajaran D3 Teknik Kimia sejak tahun 1992, D4 Teknologi Kimia Industri sejak tahun 2014, dan S2 Magister Terapan Teknik Energi Terbarukan sejak tahun 2017. Selama menempuh S2 dan S3 tersebut, Abu Hasan menggali ilmu dan teknologi karet. Penelitian yang digeluti adalah teknologi karet yang melibatkan laboratorium di Politeknik Negeri Sriwijaya, Baristand Palembang, Sentra Teknologi Polimer (STP) dan Pusat Teknologi Material (PTM) di Puspiptek Serpong. Juga dilakukan penelitian di LIPI Bandung (BRIN), laboratorium kimia MIPA ITB, Pusat Penelitian Nanosains dan nanoteknologi ITB, PAU ITB, BATAN Sepong dan Yogyakarta, laboratorium MIPA UI, PT IRC Tangerang, vulkanisir dan pabrik ban Coyo di Pekalongan, laboratorium Teknik Kimia UGM, dan Badan Geologi Bandung. Telah menerbitkan paper dengan kualifikasi Q2-Q4, Sinta 1-Sinta 5, Paten Sederhana 2019 dan 2023, prosiding international dan nasional terindex scopus, WoS atau google scholar. Selain ilmu dan teknologi karet, Abu Hasan juga meneliti keilmuan Teknik Kimia dan Teknik Energi Terbarukan.

Reaktor Kimia

(Konsep Dasar Perancangan dan Studi Kasus Perhitungan
Neraca Massa Reaktor Kimia dengan Menggunakan Polymath)

Menguasai perhitungan neraca massa adalah kunci dalam merancang dan mengoperasikan reaktor kimia. Buku ini hadir sebagai acuan lengkap bagi mahasiswa dan tenaga pendidik. Dengan bahasa yang mudah dipahami dan didukung oleh berbagai pendalaman materi yang relevan, buku ini mengajak pembaca untuk mendalami konsep-konsep dasar perancangan reaktor serta menguasai penggunaan perangkat lunak Polymath. Dengan menggunakan perangkat lunak Polymath, pembaca dapat melakukan simulasi dan menguraikan data secara lebih mendalam. Melalui pembahasan mendalam mengenai reaktor *batch*, *semi-batch*, alir tangki berpengaduk, alir pipa, seri, dan katalistik heterogen, pembaca akan dibekali pengetahuan yang solid untuk menghadapi tantangan di dunia industri proses.

Dengan memanfaatkan perangkat lunak Polymath, buku ini tidak hanya memberikan pemahaman konseptual yang mendalam, tetapi juga melatih pembaca untuk berpikir secara teratur dan sistematis. Polymath memungkinkan visualisasi proses reaksi yang kompleks, sehingga memudahkan pembaca dalam memahami interaksi antara berbagai variabel proses. Selain itu, Polymath juga dapat digunakan untuk mengoptimalkan desain reaktor dan memprediksi kinerja proses.

Penerbit Deepublish (CV BUDI UTAMA)
Jl. Kaliurang Km 9,3 Yogyakarta 55581
Telp/Fax : (0274) 4533427
Anggota IKAPI (076/DIY/2012)

✉ cs@deepublish.co.id
📘 Penerbit Deepublish
📱 @penerbitbuku_deepublish
🌐 www.penerbitdeepublish.com



Kategori : Teknologi Kimia

ISBN 978-623-02-9437-2



9 786230 294372