

---

# SIMULASI DINAMIK SISTEM REAKTOR EKSOTERMAL ADIABATIK DENGAN ALAT PENUKAR PANAS UMPAN-KELUARAN (FEHE)

Tri P. Adhi, Gandi R. Setyadi

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung  
Labtek X, Jl. Ganesha 10, Bandung 40135

Email : [tpadhi@che.itb.ac.id](mailto:tpadhi@che.itb.ac.id)

## Abstrak

Sebuah kajian mengenai kelakuan dinamik sistem reaktor eksotermal adiabatik dengan alat pertukaran panas umpan-keluaran (*Feed-Effluent Heat Exchanger*, FEHE) disampaikan pada makalah ini. Dalam praktek industri proses kimia, konfigurasi integrasi panas sistem FEHE mudah ditemukan pada proses yang melibatkan reaktor eksotermal adiabatik, dengan kebutuhan pemanasan umpan reaktor dan pendinginan produk reaktor. Konfigurasi sistem FEHE memberikan peningkatan efisiensi thermal proses melalui pemanfaatan aliran panas produk reaktor untuk menaikkan temperatur aliran umpan reaktor. Dari sudut pandang ekonomi sistem tunak, tentu saja hal tersebut sangat menarik untuk diimplementasikan, akan tetapi pertimbangan-pertimbangan operasi dan pengendalian harus diperhatikan agar keuntungan ini tidak tereliminasi oleh permasalahan-permasalahan pengendalian dan pengoperasian. Simulasi dinamik dapat memberikan gambaran bagaimana kelakuan operasi proses pada sistem FEHE. Secara dinamik, sistem ini dapat diuji sehingga batas-batas parameter operasi yang menjaga kestabilan dan memicu ketidakstabilan dari sistem dapat diketahui dan ditentukan. Dalam kajian ini simulasi kondisi tunak dan dinamik sistem reaktor eksotermal adiabatik-FEHE dilakukan dengan bantuan simulator proses Aspen-Hysys dengan mengambil sintesis amoniak sebagai model proses. Kasus ketidak-stabilan yang dikaji adalah fenomena osilasi harmonik kondisi temperatur operasi. Tujuan yang hendak dicapai dari kajian ini adalah untuk mendapatkan suatu model korelasi matematik yang dapat digunakan untuk memprediksi kapan saat terjadinya fenomena ketidak-stabilan tersebut.

**Kata kunci :** Ketidak-stabilan Operasi, Osilasi Temperatur, Sistem FEHE

## Abstract

A study of dynamics behavior on adiabatic exothermal reactor with a Feed-Effluent Heat Exchanger (FEHE) is reported in this paper. In practice of a chemical proces industries, configuration of the heat integration of FEHE system are easily found at process that involving adiabatic exothermal reactor with the demand of feed's heating and of reactor product's cooling. The FEHE system configuration increase the process themal efficiency throught the use of heat flow on the reactor product to raise the temperature of reactor feed flow. From the steady state economical point of view, this off course be very interesting to be implemented, althought controllng and operational considerations are need to be taken into account to keep those advantages un-eliminted by operational and controllng matters. The dynamic simulation can give some illustration on how the behavior of process operation at FEHE system is. Dynamicly, this system can be examined so that the boundary of operational parameter which could maintain its stability and trigger unstable system can be known and determined. In this study, the simulation of dynamic and steady state condition on system of FEHE-adiabatic exothermal reactor has been performed by assist of process simulator Aspen-Hysys using ammonia synthesis as the model process. The examined un-stable case were the harmonic osilation phenomena on the operational temperature condition. The objective of this study was to obtain a mathematical correlation model that can be applied in predicting when the un-stable phenomena might be happen.

**Keywords :** FEHE System, Osilation Temperature, Unstabilize Operation

## 1. Pendahuluan

Pemanfaatan panas reaksi eksotermal dari reaktor adiabatik telah jamak dipraktekkan dalam industri proses kimia. Dalam salah satu konfigurasi sistem integrasi panas yang sering diterapkan, panas hasil reaksi yang dibawa oleh aliran keluaran reaktor digunakan sebagai media pemanas aliran umpan reaktor itu sendiri. Sistem pertukaran panas ini dilangsungkan dalam unit operasi yang sering dikenal sebagai alat penukar panas umpan-keluaran (*Feed-Effluent Heat Exchanger*, FEHE). Sistem ini dapat beroperasi secara autotermal bila kandungan panas aliran keluaran dapat memenuhi seluruh kebutuhan pemanasan umpan reaktor. Proses sintesis amoniak dan sintesis metanol adalah contoh umum proses yang melibatkan sistem ini.

Berdasarkan kajian perancangan kondisi tunak, strategi integrasi panas reaktor eksotermal-adiabatik dengan sistem FEHE autotermal ini secara ekonomi sangat menarik untuk diterapkan karena memiliki efisiensi termal yang tinggi. Konfigurasi proses ini juga ditunjukkan dapat dioperasikan dengan mudah dan bahkan tanpa memerlukan sistem pengendalian (Van Heerden, 1953). Namun, kajian kondisi tunak saja tidak mencukupi untuk melihat berbagai perilaku dinamik yang muncul dalam operasi sistem FEHE ini. Pertimbangan terhadap efek-efek merugikan dari kondisi dinamik operasi sistem FEHE ini perlu diperhatikan agar keuntungan efisiensi termal dari sistem ini tidak tereliminasi oleh permasalahan pengoperasian.

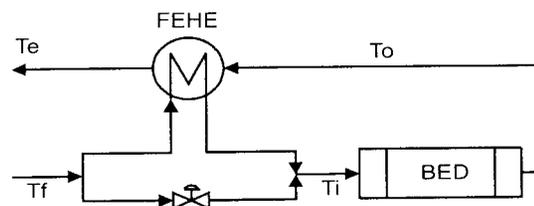
Salah satu permasalahan kondisi dinamik sistem FEHE adalah fenomena ketidak-stabilan operasi yang dicirikan oleh osilasi harmonik kondisi operasi. Contoh kasus skala industri yang pernah dipublikasikan adalah kegagalan operasi reaktor sintesis amoniak di Jerman pada tahun 1989 (Morud dan Skogestad, 1998). Setelah terjadi penurunan tekanan operasi secara mendadak

karena pengurangan umpan segar ke lingkaran proses sintesis, kondisi temperatur operasi reaktor mengalami osilasi dengan perioda 6 menit dan rentang jelajah sekitar 200 C (Gambar 1). Kondisi osilasi temperatur sebesar dan secepat ini tentu saja dapat merusak katalis.

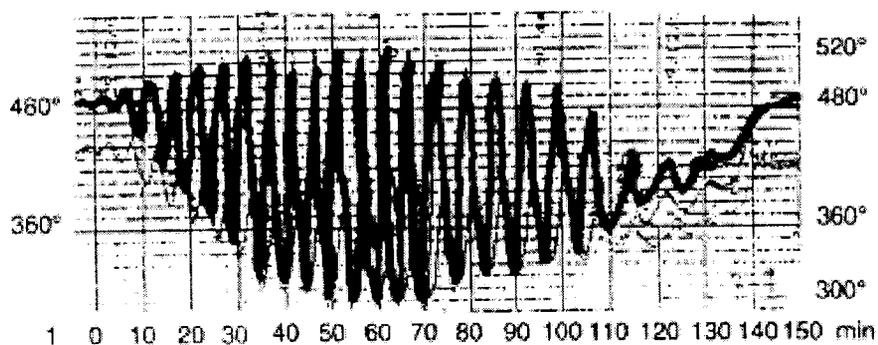
Makalah ini memaparkan kajian parametrik fenomena osilasi harmonik dalam sistem FEHE dengan mengambil sintesis amoniak sebagai model proses. Tujuan yang hendak dicapai dari kajian ini adalah untuk mendapatkan suatu model korelasi matematik yang dapat digunakan untuk memprediksi kapan saat terjadinya fenomena ketidak-stabilan tersebut. Bila dapat diperoleh dalam bentuk yang sederhana, korelasi ini sangat berguna sebagai panduan pengoperasian sistem FEHE. Untuk membatasi lingkup permasalahan, fokus kajian ini diarahkan pada pengaruh perubahan laju alir dan temperatur aliran umpan.

## 2. Fundamental

Gambar 2 menampilkan skema model konfigurasi dasar sistem proses yang dikaji. Sistem ini hanya melibatkan satu unggun reaktor adiabatik dan satu alat penukar panas FEHE. Pasokan umpan segar pada temperatur  $T_f$  dapat dibagi menjadi dua aliran. Aliran utama adalah aliran yang mengalami pemanasan di unit FEHE, sedangkan aliran cabang (*bypass*) disiapkan untuk mekanisme pengaturan temperatur aliran umpan reaktor pada harga  $T$ , yang diinginkan.



Gambar 2. Konfigurasi Sistem Reaktor Tunggal Adiabatik – FEHE



Gambar 1. Contoh rekaman grafik osilasi temperatur outlet reaktor sintesis amoniak skala industri

Model konfigurasi proses ini dibuat sederhana agar memudahkan dalam pelaksanaan komputasi dan analisis pengaruh parameter proses yang dikaji. Meskipun demikian, model proses ini masih mewakili prinsip dasar operasi autothermal skala industri yang menggunakan reaktor unggun jamak. Tujuan utama kajian ini tidak untuk mendapatkan kembali profil osilasi temperatur kasus industrial dengan tingkat akurasi numerik yang tinggi, tetapi lebih diarahkan untuk menghasilkan pemahaman kualitatif-prediktif (dalam bentuk model korelasi) tentang fenomena tersebut.

Untuk kasus reaksi tunggal, model matematika reaktor unggun adiabatik dan alat penukar panas FEHE pada kondisi tunak yang digunakan dalam kajian ini adalah model umum seperti yang dituliskan oleh Froment dan Bischoff (1990). Persamaan kinetika reaksi sintesis amoniak yang digunakan dalam kajian ini mengikuti persamaan Temkin-Pyzhev seperti yang digunakan oleh Morud dan Skogestad (1998):

$$r_{N_2} \rho_b = f \left[ k_1 \frac{P_{N_2} P_{H_2}^{1.5}}{P_{NH_3}} - k_2 \frac{P_{NH_3}^{1.5}}{P_{H_2}} \right] \quad \left[ \text{kmol/m}^3 \cdot \text{jam} \right] \quad (1)$$

$$k_1 = 1.79 \times 10^4 \exp\left(-\frac{87090}{RT}\right) \quad (2)$$

$$k_2 = 2.57 \times 10^{16} \exp\left(-\frac{198464}{RT}\right) \quad (3)$$

Konstanta  $f$  adalah faktor koreksi aktivitas katalis. Bila dibandingkan dengan katalis yang digunakan oleh Temkin dan Pyzhev, katalis masa kini memiliki harga  $f = 4,75$  (Morud dan Skogestad, 1998).

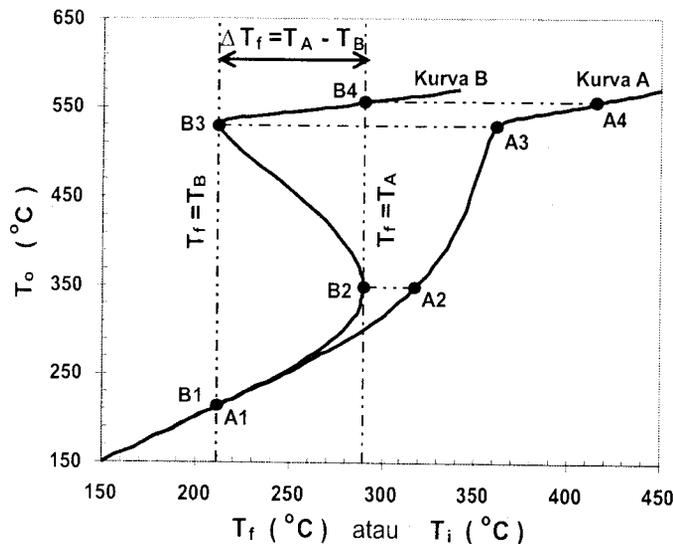
### 3. Metode Simulasi

Dalam kajian ini, simulasi kondisi tunak dan konisi dinamik dilakukan dengan memanfaatkan paket simulasi proses Aspen-Hysys. Menggunakan model termodinamika Peng-Robinson, reaktor aliran sumbat dan alat penukar panas buluh-cangkang kasus *dynamic-rating*, simulasi dilakukan dengan kondisi kasus basis berikut:

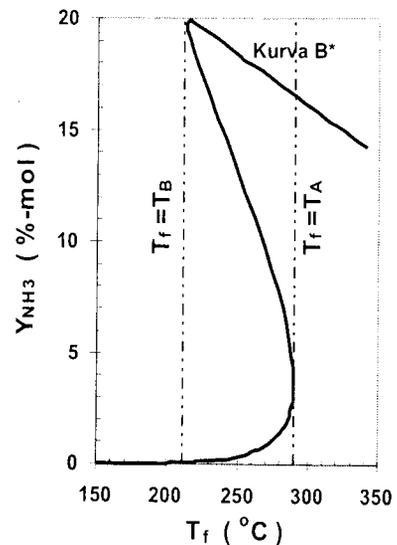
Umpan reaktor FEHE dimasukkan pada kondisi Temperatur 250 °C. Tekanan 200 bar, dan Laju alir massa 250 ton/jam. Komposisi umpan terdiri dari : N<sub>2</sub> sebesar 24 %, H<sub>2</sub> sebesar 72%; dan NH<sub>3</sub> sebesar 4 %. Reaktor tersebut memiliki nilai UA FEHE sebesar 0,5 – 1,3 10<sup>6</sup> kJ/C-jam. Variasi UA ini terutama disesuaikan dengan adanya perubahan harga U karena perubahan laju alir gas. Sementara dimensi Volume Reaktor sebesar 30 m<sup>3</sup>, dan Fraksi kosongnya adalah sebesar 0,4.

### 4. Hasil Simulasi dan Pembahasan

Simulasi pada kondisi tunak dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi temperatur umpan segar (T<sub>f</sub>) terhadap temperatur produk keluar reaktor (T<sub>p</sub>). Hal ini dilakukan untuk sistem yang memakai maupun tanpa menggunakan FEHE. Dalam pelaksanaan komputasi, harga temperatur umpan langsung ke reaktor (T<sub>f</sub>) yang divariasikan secara bebas, sedangkan T<sub>o</sub> dan T<sub>r</sub> adalah harga-harga yang terhitung. Langkah ini ditempuh untuk mengatasi fenomena histerisis pada pola kebergantungan T<sub>o</sub> sebagai fungsi dari T<sub>f</sub>.



Gambar 3. Karakteristik kondisi tunak untuk variabel temperatur operasi.



Gambar 4. Karakteristik kondisi tunak untuk variabel komposisi produk.

Hasil simulasi kondisi tunak disajikan pada Gambar 3 untuk kasus basis laju alir umpan 250 ton/jam. Sumbu tegak menyatakan harga  $T_o$ , sedangkan sumbu datar dapat menyatakan harga  $T_i$  atau  $T_r$ . Hubungan  $T_i > T_r$  berlaku untuk sistem FEHE, sedangkan  $T_i = T_r$  berlaku untuk sistem tanpa FEHE. Perlu dicatat bahwa sistem tanpa FEHE dapat difahami sebagai sistem pakai FEHE tetapi dengan porsi aliran cabang sebesar 100%.

Kedua kurva pada Gambar 3 memiliki makna yang bergantung pada pilihan variabel temperatur untuk menyatakan sumbu datar. Bila difahami sebagai fungsi dari  $T_o$ , Kurva A diperoleh untuk kasus tanpa FEHE dan Kurva B untuk kasus FEHE. Namun bila dipandang sebagai fungsi dari  $T_r$ , Kurva A berlaku untuk kedua kasus. Dengan demikian hubungan  $T_r$  dan  $T_i$  pada kasus sistem FEHE dapat ditentukan secara grafik menggunakan kedua kurva tersebut dengan harga  $T_o$  sebagai penghubung. Setiap garis datar pada posisi harga  $T_o$  tertentu akan memiliki satu titik potong di setiap kurva. Absis titik potong di Kurva A menyatakan harga  $T_i$  dan di Kurva B menyatakan harga  $T_r$ . Karena Kurva A selalu di sebelah kanan Kurva B, maka berlaku  $T_i > T_r$ .

Kurva A menyatakan  $T_o$  sebagai fungsi monotonik dari  $T_r$ . Setiap harga  $T_r$  tertentu akan memberikan hanya satu harga  $T_o$  tertentu, tidak peduli apakah harga  $T_r$  tersebut diperoleh dengan cara pemanasan ataupun pendinginan dari harga  $T_r$  sebelumnya. Ini berarti bahwa sistem tanpa FEHE akan selalu menunjukkan kestabilan operasi karena hanya memiliki titik stabilitas yang tunggal.

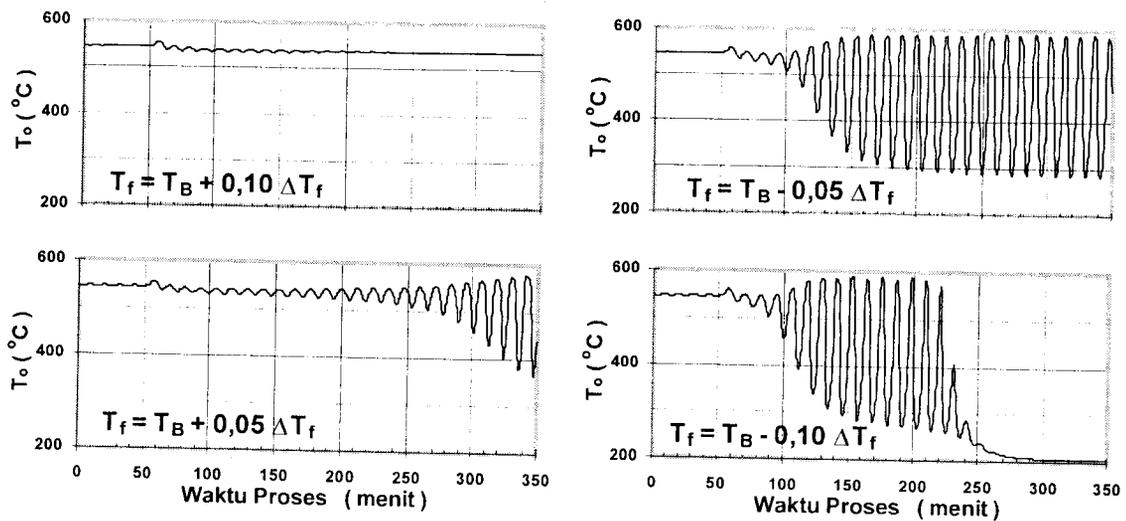
Untuk sistem FEHE, Kurva B menunjukkan bahwa terdapat suatu rentang harga  $T_r$  dimana setiap  $T_r$  dapat memberikan lebih dari satu harga  $T_o$ . Rentang  $T_r$  tersebut dibatasi oleh harga tertinggi  $T_r = T_A$  dan harga terendah  $T_r = T_B$ . Pada kondisi batas tersebut, terdapat dua harga  $T_o$  yang mungkin dapat diperoleh pada kondisi tunak, yaitu yang bersesuaian dengan titik-titik  $B_1$  dan  $B_3$  untuk  $T_r = T_B$  dan titik-titik  $B_2$  dan  $B_4$  untuk  $T_r = T_A$ . Untuk daerah  $T_B < T_r < T_A$ , terdapat tiga kemungkinan harga  $T_o$  yang dapat diperoleh, yaitu yang bersesuaian dengan titik-titik yang terletak pada penggal kurva  $B_1$ - $B_2$ ,  $B_2$ - $B_3$  dan  $B_3$ - $B_4$ .

Bila keberadaan  $T_r$  dalam rentang  $T_r$  diperoleh dari pemanasan harga  $T_r < T_B$ , maka perubahan harga  $T_r$  selanjutnya dalam rentang tersebut akan selalu memberikan harga  $T_o$  yang terletak pada penggal kurva  $B_1$ - $B_2$ . Hal sebaliknya, bila keberadaan  $T_r$  dalam rentang  $T_r$  diperoleh dari pendinginan harga  $T_r > T_A$ , maka perubahan harga

$T_r$  selanjutnya dalam rentang tersebut akan selalu memberikan harga  $T_o$  yang terletak pada penggal kurva  $B_3$ - $B_4$ . Dalam praktek, harga  $T_o$  yang terletak pada penggal kurva  $B_2$ - $B_3$  tidak pernah dijumpai pada kondisi tunak. Harga  $T_o$  pada rentang tersebut hanya dijumpai sebagai harga transisi ketika terjadi proses pemanasan umpan melewati  $T_r = T_A$  atau pendinginan umpan melewati  $T_r = T_B$ . Perbedaan harga  $T_o$  yang diperoleh karena perbedaan cara mencapai rentang harga  $T_r$  yang sama tersebut dikenal sebagai fenomena histerisis.

Analisis kestabilan sistem FEHE yang disajikan dalam makalah ini, yang didasarkan pada kajian kondisi tunak yang terangkum pada Gambar 3, bersifat melengkapi cara analisis klasik Van Heerden (1953) yang telah banyak dijadikan rujukan. Kesetaraannya dapat ditunjukkan dengan memperhatikan titik-titik  $A_1$ - $A_3$  pada Kurva A yang bersesuaian dengan titik-titik  $B_1$ - $B_3$  pada Kurva B. Bila melalui titik  $A_1$  dan titik  $A_3$  ditarik suatu garis lurus, maka garis tersebut, seperti yang dipahami dalam analisis klasik, menyatakan fungsi kebergantungan  $T_i$  pada  $T_o$  untuk suatu harga  $T_r$  tertentu (dalam hal ini  $T_r = T_B$ ). Untuk  $T_r = T_A$ , garis lurus  $T_i = f(T_o)$  tersebut dapat diperoleh dengan menghubungkan titik  $A_2$  dan titik  $A_4$ . Kedua garis ini bersifat paralel dan memiliki kemiringan yang bergantung pada efisiensi penukar panas FEHE dan porsi aliran cabang. Diapit oleh kedua garis ini, garis lurus lainnya dengan kemiringan yang sama dapat dibentuk untuk semua  $T_B < T_r < T_A$ . Garis-garis lurus ini dapat memiliki tiga titik potong yang terletak pada penggal kurva  $A_1$ - $A_2$ ,  $A_2$ - $A_3$  dan  $A_3$ - $A_4$  dengan makna seperti yang telah disampaikan untuk titik-titik potong pada penggal kurva  $B_1$ - $B_2$ ,  $B_2$ - $B_3$  dan  $B_3$ - $B_4$ .

Berdasarkan analisis ini, harga  $T_r$  pada kondisi operasi normal dalam praktek seringkali dikehendaki berada dalam rentang  $T_r$  yang memberikan harga  $T_o$  pada penggal kurva  $B_3$ - $B_4$ . Kondisi ini hanya dapat dicapai dengan mulai beroperasi pada  $T_r > T_A$  (misal dengan menggunakan *start-up heater*) dan kemudian dilakukan penurunan temperatur hingga mendekati  $T_B$  (misal dengan mengatur porsi aliran cabang). Seperti yang dapat dipahami dari Kurva B\* pada Gambar 4, kondisi yang makin dekat  $T_B$  adalah kondisi yang dikehendaki karena menghasilkan konversi amoniak yang lebih tinggi dan makin dekat ke harga maksimumnya. Tetapi, kondisi ini juga berarti makin mendekati daerah bahaya pemadaman reaksi yang dapat terjadi ketika  $T_r < T_B$ .



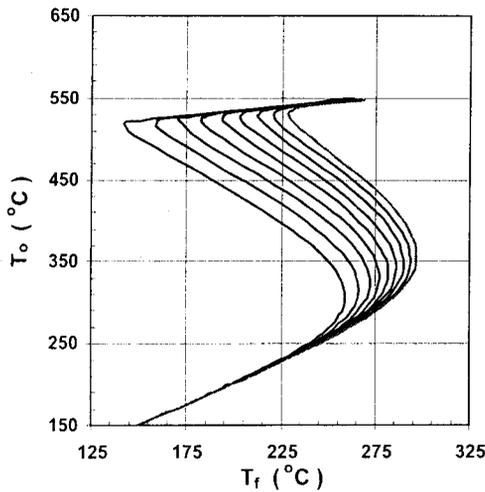
Gambar 5. Simulasi dinamik fenomena osilasi harmonik temperatur keluaran reaktor.

Untuk mengantisipasi terjadinya gangguan yang dapat membawa ke kondisi bahaya pemadaman reaksi ini, harga  $T_f$  biasa dipilih dengan faktor pengaman sejauh  $T$  dari  $T_B$ . Namun strategi ini memiliki kelemahan dalam mengantisipasi ketidak-stabilan proses. Berdasarkan analisa kondisi tunak, kestabilan proses dapat dijamin dengan menjaga  $T_f$  berada dalam rentang  $T_f$ . Hasil simulasi dinamik dalam makalah ini menunjukkan bahwa ketidak-stabilan dapat ditemui untuk harga  $T_f$  di sekitar  $T_B$ .

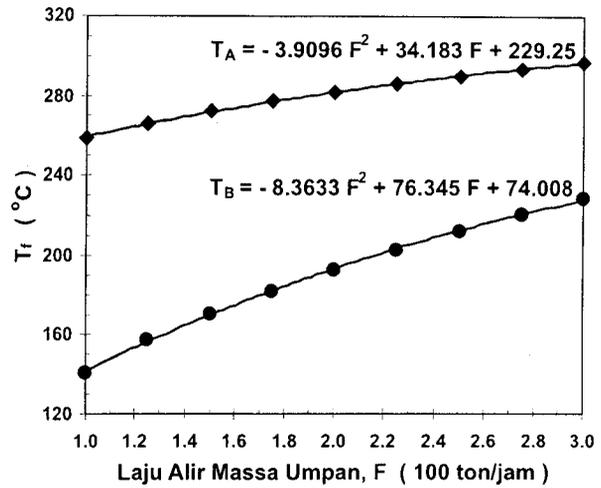
Gambar 5 menyajikan hasil simulasi dinamik contoh kasus yang terjadi karena perubahan harga  $T_f$  untuk kasus basis laju alir umpan 250 ton/jam. Pada kasus ini, simulasi kondisi tunak memberikan  $T_A = 290,3$  °C,  $T_B = 212,6$  °C dan  $T_f = 77,7$  °C. Diawali dengan kondisi tunak untuk  $T_f = 250$  °C selama 50 menit pertama, temperatur umpan kemudian diubah secara mendadak ke suatu harga  $T_f$  di sekitar  $T_B$  dengan jarak yang dinyatakan sebagai fraksi dari  $T_f$ . Perubahan hingga ke 10%  $T_f$  di atas  $T_B$  belum menghasilkan osilasi  $T_o$  yang berkelanjutan. Meskipun dengan saat kemunculan yang relatif lama dari saat terjadinya perubahan, osilasi mulai tampak ketika terjadi perubahan hingga ke 5%  $T_f$  di atas  $T_B$ . Osilasi ini makin cepat dijumpai dan dengan amplitudo yang maksimal ketika perubahan terjadi ke posisi yang makin mendekati dan bahkan hingga lebih kecil 5%  $T_f$  dari  $T_B$ . Untuk kasus perubahan ke 10%  $T_f$  di bawah  $T_B$ , osilasi dijumpai untuk beberapa waktu sebelum terjadi pemadaman reaksi yang ditunjukkan oleh penurunan drastis temperatur  $T_o$ .

Hasil simulasi dinamik ini menunjukkan bahwa osilasi dapat dijumpai ketika  $T_f$  berada di sekitar  $T_B$  pada kisaran 5%  $T_f$ . Penggunaan  $T_f$  sebagai satuan kisaran dimaksudkan agar patokan 5% dapat berlaku umum. Hal ini diperlukan mengingat harga  $T_A$ ,  $T_B$  dan  $T_f$  dipengaruhi oleh banyak parameter proses. Sebagai contoh kasus, Gambar 6 menampilkan 9 buah Kurva B untuk variasi laju alir massa umpan pada rentang 100 – 300 ton/jam. Harga  $T_A$  dan  $T_B$  dapat diperoleh dari setiap kurva dan hasilnya kemudian dapat dialurkan sebagai fungsi dari laju alir massa umpan. Seperti yang ditampilkan pada Gambar 7, aluran data numerik tersebut menunjukkan kecenderungan yang logis. Kenaikan laju alir umpan akan menghasilkan penurunan waktu tinggal reaksi dalam reaktor sehingga terjadi pula penurunan tingkat konversi. Hal ini akan diikuti dengan penurunan temperatur aliran produk, penurunan kemampuan pertukaran panas di FEHE, penurunan temperatur aliran masuk reaktor dan seterusnya berulang-ulang hingga terjadi kondisi pemadaman reaksi. Untuk mencegah hal ini, temperatur aliran umpan segar perlu dinaikkan dan ini diwakili dengan kecenderungan harga  $T_A$  dan  $T_B$  yang meningkat.

Gambar 7 juga menunjukkan bahwa fungsi kebergantungan  $T_A$  dan  $T_B$  pada laju alir umpan dapat dinyatakan dengan korelasi sederhana dalam bentuk fungsi kuadratik. Korelasi sederhana seperti ini dapat ditunjukkan memiliki kegunaan praktis yang banyak. Sebagai contoh kasus, andaikan sistem proses seperti pada Gambar 2 telah beroperasi mencapai kondisi tunak stabil pada laju alir massa umpan sebesar 173 ton/jam



Gambar 6. Profil  $T_o = f(T_r)$  pada berbagai harga laju alir massa umpan

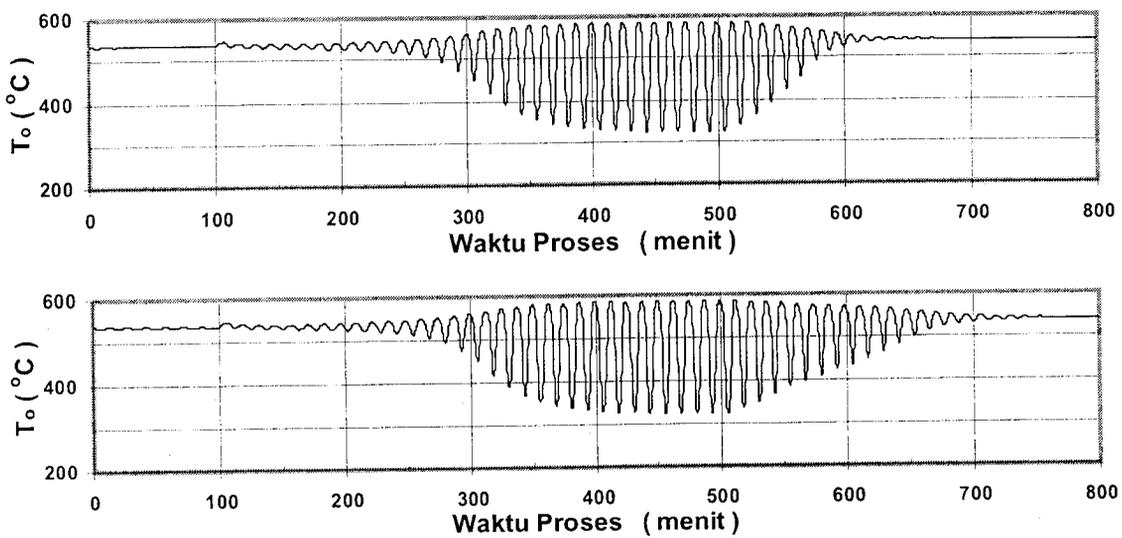


Gambar 7. Korelasi sederhana  $T_A = f(F)$  dan  $T_B = f(F)$

(75% kapasitas normal). Bila kemudian diinginkan pengembalian ke kapasitas normal 100% (laju alir umpan = 231 ton/jam), operasi boleh dipertahankan pada  $T_r = 210$  °C.

Dengan menganggap korelasi tadi telah dibangun untuk sistem yang sedang dikaji ini, perhitungan berdasarkan korelasi ini menghasilkan harga  $T_A = 287,4$  °C,  $T_B = 205,7$  °C dan  $T_r = 81,6$  °C. Bila dipertahankan pada  $T_r = 210$  °C, hal ini berarti proses masih beroperasi di sekitar  $T_B$  dalam batas kisaran 5%  $T_r$  sehingga akan terjadi kondisi osilasi harmonik. Untuk mencegah hal ini, salah satu pilihan kondisi operasi yang baru

meningkatkan temperatur umpan hingga 23,6%  $T_r$  di atas  $T_B$  ( $T_r = 225$  °C) dengan tetap mempertahankan porsi aliran cabang sebesar 25%. Atau sebaliknya, temperatur umpan tetap dipertahankan 210 °C tetapi diimbangi dengan penurunan porsi aliran cabang menjadi 10% saja. Kedua alternatif kondisi operasi ini diilustrasikan pada Gambar 8. Dalam simulasi ini, perubahan laju alir ke kapasitas normal terjadi pada  $t = 100$  menit dan tetap beroperasi dengan  $T_r = 210$  °C hingga ke  $t = 500$  menit ketika terjadi perubahan porsi aliran cabang (Gambar 8 atas) atau perubahan temperatur umpan (Gambar 8 bawah).



Gambar 8. Simulasi dinamik contoh kasus kegagalan operasi

## 5. Kesimpulan

Pada sistem reaktor adiabatik yang dilengkapi dengan alat penukar panas masukan-keluaran (FEHE) sebagai implementasi strategi panas, kondisi ketidak-stabilan proses dapat ditemui dengan ciri terjadinya osilasi harmonik temperatur operasi. Dalam makalah ini, fenomena ini ditunjukkan dapat dijumpai pada suatu rentang harga temperatur di sekitar temperatur terendah saat terjadinya pepadaman reaksi. Dengan mengambil parameter laju alir massa umpan, suatu korelasi sederhana dalam bentuk persamaan kuadrat dapat dihasilkan dan dimanfaatkan untuk keperluan praktek pengoperasian. Korelasi ini dapat dikembangkan untuk mencakup parameter proses lainnya.

## Daftar Pustaka

- [1.] Froment, G.F dan Bischoff, K.B., (1990), "Chemical Reactor Analysis and Design", Edisi 2, Wiley, New York, hal. 501-515.
- [2.] Morud, J.C dan Skogestad, S; (1998), "Analysis of Instability in an Industrial Ammonia Reactor", *AIChE.J.*, 44, hal. 888-895.
- [3.] van Heerden, C; (1953), "Autothermic Processes. Properties and Reactor Design", *Ind. Eng. Chem.*, 45, hal. 1242-1247.