
FORMULASI SISTEMATIKA *KNOWLEDGE-BASED ENGINEERING* UNTUK PENANGANAN PERMASALAHAN PROSES

Surahmad W. Widodo, Yazid Bindar

Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri, ITB

Jl. Ganesha 10 Bandung 40132, Indonesia

e-mail : swwidodo@yahoo.com

Praharso

PT. Pupuk Kalimantan Timur

Jl. James Simanjuntak No.1 Bontang 75313, Indonesia

Abstrak

Pabrik pupuk adalah pabrik petrokimia yang termasuk salah satu industri strategis nasional. Pengetahuan merupakan aset penting bagi perusahaan yang harus dikelola sebaik-baiknya agar memberikan manfaat dan keuntungan yang optimal. Tanpa pengetahuan yang cukup dalam mengoperasikan pabrik, maka masalah proses yang dihadapi cenderung diselesaikan dengan percobaan di lapangan yang hasilnya tidak pasti dan mengakibatkan kerugian bagi perusahaan. Dengan sistem berbasis pengetahuan, maka pengetahuan disimpan, terorganisasi dan dapat diakses kembali untuk menyelesaikan masalah proses, serta tindakan coba-coba yang menghasilkan kesalahan dapat diminimalkan. Dalam tesis ini formulasi sistem berbasis pengetahuan untuk penanganan permasalahan proses pada unit reaktor sintesis urea dilakukan dengan melakukan kajian pengetahuan heuristik, kajian model kesetimbangan reaksi sintesis urea, kajian simulasi CFD tray reaktor, serta kajian model pengembangan sistem berbasis pengetahuan proses. Model kesetimbangan yang digunakan dapat menjelaskan pengaruh suhu, rasio NH_3/CO_2 dan rasio $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ terhadap konversi. Hasil perhitungan untuk konversi dan komposisi keluaran reaktor menunjukkan kesesuaian dengan data rancangan pabrik. Hasil kajian simulasi CFD menunjukkan bahwa dengan konfigurasi tray baru dihasilkan efek pencampuran fasa cair dan gas yang lebih baik daripada dengan tray konvensional. Pengetahuan heuristik dari pengalaman dan pengetahuan berdasarkan model proses menjadi basis pengetahuan yang dikembangkan sebagai model sistem berbasis pengetahuan untuk menyelesaikan masalah proses.

Kata Kunci : basis pengetahuan, pengetahuan proses, pengetahuan heuristik, simulasi, CFD, reaktor urea

Abstract

Urea plant is a petrochemical plant considered as one of strategic industries in Indonesia. Knowledge is important asset for the company that should be managed well in order to give the optimal profit. Without the adequate knowledge to operate the process plant, the process problems tend to be solved by trial-error effort in the field with unknown result and can cause the losses for the company. With the knowledge-based system, the knowledge can be stored, organized and can be accessed again to solve the process problem and minimize the trial-error losses. In this thesis knowledge-based system formulation for process problem solving in urea synthesis process unit done by study the heuristic knowledge, study the urea synthesis equilibrium model, study the urea tray reactor with CFD simulation and study of development of process knowledge-based system model. Urea reaction equilibrium model used can explain the impact of temperature, NH_3/CO_2 molar ratio and $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ molar ratio to the urea conversion. Calculation results of conversion and reactor outlet composition show the agreement with the reactor data. Results of CFD simulation show that the new configuration of reactor tray give the better mixing effect of liquid and gas phase than the conventional tray. Heuristic knowledge based on the experience and the knowledge based on process model become the knowledge base for development of knowledge-based system model for process problem solving.

Keywords : knowledge-based, process knowledge, heuristic, simulation, CFD, urea reactor

1. Pendahuluan

Industri pupuk urea dari bahan baku gas alam merupakan salah satu industri strategis nasional yang berperan penting dalam menyediakan kebutuhan pupuk sebagai komoditas yang memiliki peran sangat strategis dalam rangka menunjang program ketahanan pangan nasional. Data tahun 2005 menunjukkan total konsumsi urea untuk kebutuhan pertanian, perkebunan dan industri adalah sebesar 5,422,606 ton/tahun, serta sebanyak 732,909 ton terjual untuk ekspor (APPI, 2006).

Pengetahuan merupakan aset penting bagi perusahaan. Tanpa pengelolaan yang tepat aset tersebut tidak akan termanfaatkan secara optimal bahkan bisa hilang apabila hanya dikuasai karyawan tertentu yang kemudian berhenti baik karena usia maupun alasan lain. Diperlukan suatu cara menggali dan merekam pengetahuan yang dikuasai karyawan, agar dapat diakses dan dimanfaatkan lagi sesuai kebutuhan dalam menyelesaikan permasalahan yang dihadapi.

Dengan penerapan basis pengetahuan pada industri, maka pengetahuan mengenai proses, masalah dan pemecahannya yang telah dimasukkan sebagai basis pengetahuan dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah dengan cepat, sedangkan masalah yang baru menjadi masukan bagi basis pengetahuan sehingga terus terbaharui.

Pada siklus penyelesaian masalah pengetahuan diperlukan ketika mendefinisikan masalah, mengidentifikasi akar masalah, serta menentukan rekomendasi dan tindakan penyelesaian masalah. Makin tinggi tingkat pengetahuan/keahlian yang dikuasai, maka penyimpangan yang mungkin dilakukan makin kecil. Sebaliknya jika tingkat pengetahuan rendah, maka penyimpangan akan besar yang berakibat pada inefisiensi biaya. Untuk itulah sebuah sistem berbasis pengetahuan dibangun untuk meminimalkan setiap kesalahan dengan tujuan akhir terselesaikannya persoalan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mempelajari dan membuat suatu bentuk formulasi sistematis penyusunan basis pengetahuan proses untuk diimplementasikan pada penanganan permasalahan proses dengan studi kasus pada reaktor urea di pabrik Kaltim-1.

2. Fundamental

Kinerja pabrik sebagai unit bisnis diukur berdasarkan sasaran yang ditetapkan untuk periode tertentu terhadap beberapa parameter seperti produksi, pemasaran dan pencapaian finansial. Dari sisi teknik kinerja setiap pabrik diukur berdasarkan parameter kunci operasi yaitu tingkat produksi, efisiensi, mutu produk,

keselamatan dan kesehatan kerja, serta lingkungan hidup. Salah satu ukuran kinerja pabrik adalah tingkat utilisasi aset yang didefinisikan sebagai rasio produksi aktual terhadap produksi yang dapat dicapai jika pabrik berjalan pada kapasitas maksimal selama 365 hari setahun dan 100% kualitas produk terpenuhi (Ellis, 1998).

Masalah-masalah yang menyebabkan tidak tercapainya kinerja pabrik diidentifikasi dan diklasifikasikan berdasarkan dua kriteria utama yaitu jenis kelompok penyebab dan tingkat besar kecilnya penyimpangan yang ditimbulkannya. Ada empat kategori utama kelompok fungsional dalam mengklasifikasikan permasalahan yang mengakibatkan kehilangan produksi berdasarkan sistem *Manufacturing Excellence* yang diadopsi di PT. Pupuk Kaltim, yaitu operasi, pemeliharaan, bisnis dan eksternal.

Manajemen pengetahuan adalah aktifitas manajerial dalam mengembangkan, memindahkan, mengirimkan, menyimpan dan mengaplikasikan pengetahuan, serta menyediakan informasi bagi anggota organisasi untuk mengambil keputusan dan tindakan yang tepat dalam mencapai tujuan organisasi (Kanagasabapathy, 2006). Pengetahuan adalah sumber daya terpenting bagi organisasi modern, satu-satunya sumber daya yang tidak dapat direplikasi oleh pesaing, dan merupakan sumber keuntungan yang khas dan kompetitif (Davenport dan Prusak, 1998).

Basis pengetahuan adalah jenis basis data khusus yang ditujukan untuk manajemen pengetahuan (*knowledge management*). Basis pengetahuan menyediakan cara-cara mengumpulkan, mengorganisasi dan mengambil pengetahuan dengan bantuan komputer.

Representasi pengetahuan berkaitan dengan bagaimana menyimpan dan memanipulasi informasi pengetahuan dalam sebuah sistem informasi dengan cara formal sehingga dapat digunakan untuk menyelesaikan tugas tertentu. [en.wikipedia.org]. Sistem yang dibuat mampu melakukan penalaran atau menarik kesimpulan berdasarkan fakta-fakta, sehingga menirukan kecerdasan manusia. Beberapa bentuk representasi pengetahuan yang dikenal adalah : logika, struktur pohon, jaringan semantik, *frame*, naskah (*script*) dan sistem produksi (*rules*) (Kusumadewi, 2003).

Pengetahuan yang terdapat di pabrik proses sangat kompleks, bersifat hibrida dan dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria yaitu : pengetahuan proses spesifik dan pengetahuan proses umum, *shallow knowledge* dan *deep knowledge*, serta pengetahuan struktural dan perilaku (Pramanik, 1989). Sementara itu Chandrasekaran (1993)

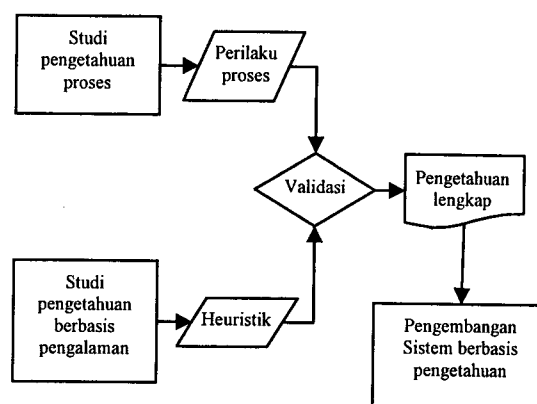
mengelompokkan pengetahuan proses berdasarkan empat kelompok yaitu pengetahuan struktur, perilaku, fungsi dan *mode*.

Representasi pengetahuan proses sebagai pendukung keputusan dapat dibagi menjadi dua jenis yaitu yang berpusat pada proses dan berpusat pada struktur (Elsas, 2001). Sistem yang berpusat pada proses difokuskan pada aliran bahan dan model fenomena fisika dan kimia yang terjadi pada proses. Sistem berpusat pada struktur mengacu pada representasi dari model peralatan dan komponen, serta menghubungkan perilaku proses yang terjadi dengan mempertimbangkan struktur alat-alat yang menyusun proses. Pada pengetahuan perilaku proses, hubungan interaksi sebab-akibat dari berbagai variabel proses direpresentasikan secara kualitatif dalam bentuk *signed-digraph* (SDG) (Pramanik, 1989). Pengetahuan struktural yang menggambarkan informasi mengenai konektifitas dari berbagai peralatan proses dapat direpresentasikan dengan frame. Model representasi pengetahuan proses lain berbasis struktural yang dikembangkan adalah representasi fungsional (FR) yang menguraikan pengetahuan proses berdasarkan struktur fisik, mode operasi, fungsi dan perilaku proses (Elsas, 2001).

Sistem berbasis pengetahuan proses dimanfaatkan pada banyak aplikasi sebagai pendukung keputusan pada berbagai aktifitas di pabrik. Madhavan dan Kirsten (1990) menguraikan potensi aplikasi sistem pakar di pabrik ammonia pada berbagai area seperti : pengoperasian reformer, *troubleshooting* proses pemisahan CO₂, pengoperasian sistem kukus, *troubleshooting* unjuk kerja kompresor/turbin, manajemen alarm proses, serta pengoperasian pabrik yang efisien. Secara garis besar sistem berbasis pengetahuan dapat diaplikasikan di pabrik proses untuk diagnosis kesalahan dan *troubleshooting* proses, pengendalian proses, pelatihan, analisis resiko dan keselamatan, serta pemeliharaan dan reliabilitas.

3. Metodologi

Penelitian untuk merumuskan sistem berbasis pengetahuan untuk penanganan masalah proses di pabrik, secara garis besar dilakukan dalam tahapan-tahapan : (i) kajian pengetahuan proses, (ii) kajian pengetahuan berdasar pengalaman, dan (iii) kajian model dan pengembangan aplikasi sistem berbasis pengetahuan proses. Kajian difokuskan pada unit reaktor sintesis urea di pabrik Kaltim-1.



Gambar 1. Metodologi formulasi sistem berbasis pengetahuan

Konsep kegiatan dan aliran informasi dibutuhkan dalam membangun basis pengetahuan ditunjukkan pada Gambar 1. Studi mengenai pengetahuan proses dilakukan berdasarkan prinsip-prinsip kimia dan fisika yang dapat menjelaskan bagaimana proses terjadi dan perilaku proses sebagai hasil interaksi dari variabel-variabel. Pada penelitian ini model kesetimbangan reaksi sintesis urea dan simulasi CFD untuk *tray* reaktor digunakan untuk menggali pengetahuan proses di unit reaktor urea.

Informasi selanjutnya yang dibutuhkan adalah pengetahuan heuristik diperoleh dari pengalaman. Fakta-fakta yang diketahui dari pengalaman merupakan sumber pengetahuan yang dapat digunakan untuk mengevaluasi validitas model proses. Begitu pula model proses menjadi alat untuk menganalisis kebenaran hipotesis masalah berdasar pengalaman.

Informasi-informasi berupa pengetahuan proses dan pengetahuan heuristik yang valid akan membentuk pengetahuan yang lengkap mengenai pabrik proses secara keseluruhan, sebagai basis pengetahuan dalam membangun sistem berbasis pengetahuan untuk menangani masalah proses di pabrik.

4. Hasil dan Analisis

Pengetahuan yang dikuasai berkembang sejalan dengan umur operasi pabrik. Permasalahan proses yang dihadapi diatasi berdasarkan pengetahuan yang telah dikuasai. Tanpa pengetahuan proses yang mendalam, penyelesaian masalah dilakukan dengan cara *trial-error*. Hal seperti ini terutama dominan pada awal operasi pabrik atau bagi tenaga operasi pabrik yang belum berpengalaman.

Berdasarkan pengalaman ketika menghadapi masalah proses dan menemukan cara untuk menyelesaikannya, berkembang penguasaan pengetahuan yang disebut pengetahuan heuristik. Selama belum dipunyai pengetahuan yang mendalam mengenai proses, maka cara penyelesaian berdasarkan pengetahuan heuristik terus dilakukan.

Dalam pengoperasian pabrik, begitu banyak variabel proses yang harus dipantau agar proses stabil dan kemungkinan terjadinya penyimpangan dapat diantisipasi. Variabel proses saling terkait dan mempengaruhi. Misalnya, penurunan laju alir umpan ammonia ke reaktor sintesis urea akan berpengaruh terhadap kondisi operasi dan produk dari reaktor. Perubahan pada kondisi proses di reaktor akan mempengaruhi unit proses berikut dan seterusnya. Kegagalan dalam mengamati dan mengendalikan kondisi operasi akan berakibat pada terjadinya masalah proses yang tidak dihindaki.

Peran operator dalam mengidentifikasi gejala penyimpangan yang terindikasi atau tercatat di ruang kendali, maupun gejala-gejala penyimpangan kerja alat proses di lapangan sangat penting. Operator pabrik biasanya berpatokan pada nilai proses, *setting* kendali serta grafik data untuk mendeteksi kondisi proses yang tidak normal dan membandingkannya dengan data normal berdasarkan pengalaman di waktu yang lalu. Begitu pula dengan pemantauan peralatan proses di lapangan, selain berpatokan terhadap indikasi yang ada, operator dapat mengenali penyimpangan kerja alat proses lewat gejala-gejala seperti suara yang lebih keras dari biasanya, permukaan alat yang terasa lebih panas, atau getaran yang lebih kuat. Kemampuan dalam mengenali dan mengambil tindakan terhadap penyimpangan proses seperti itu terbentuk dan berkembang sejalan dengan waktu. Kemampuan yang demikian merupakan contoh pengetahuan heuristik di pabrik. Pengetahuan heuristik tersebut diaplikasikan ketika menghadapi situasi atau masalah yang sama dengan cara melakukan hipotesis dan analisis secara cepat, kemudian bertindak sesuai dengan apa yang telah diketahuinya berdasarkan pengalaman. Apabila yang dihadapi merupakan masalah yang baru, maka proses pembentukan heuristik yang baru berlangsung. Tanpa pengetahuan yang pasti mengenai suatu masalah yang belum pernah dihadapi sebelumnya, maka langkah-langkah dalam melakukan hipotesis, analisis dan mengambil tindakan cenderung bersifat coba-coba sesuai dengan perbendaharaan pengetahuan yang telah dikuasai.

Pengetahuan yang berkembang berdasarkan pengalaman seperti itu dapat juga

terjadi pada unit-unit kerja lain di pabrik, seperti pemeliharaan, inspeksi teknik, rekayasa proses dan yang lainnya sesuai dengan ruang lingkup permasalahan yang dihadapi masing-masing. Pengetahuan heuristik yang telah dikuasai di pabrik merupakan asset berharga, meskipun untuk pemanfaatan yang optimal perlu memperhatikan beberapa hal sesuai dengan karakteristik pengetahuan heuristik. Langkah-langkah penyelesaian sebuah kasus menggunakan pengetahuan heuristik bisa berbeda antar individu atau kelompok berdasarkan pengalaman masing-masing. Oleh karena itu diperlukan pengetahuan proses yang dapat menjelaskan secara rinci suatu permasalahan proses berdasarkan teori-teori ilmu pengetahuan sangat perlu dikembangkan, sehingga cara-cara penyelesaian yang bersifat coba-coba dan beresiko di lapangan dapat dieliminasi.

Penggunaan pengetahuan heuristik sangat membantu sebagai pendekatan untuk menyelesaikan permasalahan proses dengan cara mudah dan cepat. Namun dalam penerapannya perlu diingat karakteristik dari setiap heuristik (Turton, 1998) yaitu : tidak menjamin suatu penyelesaian, dapat bertentangan dengan heuristik lain, dapat mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk menyelesaikan persoalan, serta kesesuaiannya tergantung kondisi tertentu bukan pada setiap keadaan.

Seperti telah dibahas di atas, jelas bahwa pengetahuan heuristik berperan penting dan banyak digunakan dalam menyelesaikan permasalahan proses di pabrik. Pengetahuan heuristik yang merupakan contoh dari *shallow knowledge* (Hui, 2006), yaitu pengetahuan tanpa didasari penjelasan atas hubungan sebab akibat pada suatu proses. Sebaliknya, *deep knowledge* adalah pengetahuan mengenai hubungan sebab akibat dari komponen atau variabel terkait berdasarkan prinsip-prinsip fundamental yang berlaku pada sebuah proses. Pengetahuan yang didapatkan dan dikembangkan oleh operator pabrik dari pengalamannya dalam mengatasi masalah proses ketika mengoperasikan pabrik merupakan contoh *shallow knowledge*. Berbagai kasus operasi mungkin dapat diatasi oleh operator, namun umumnya tidak diketahui penjelasannya.

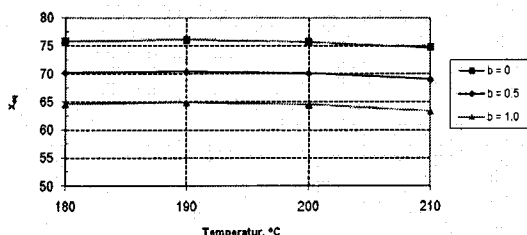
Pengetahuan heuristik yang telah dimiliki merupakan sumber berharga bagi basis pengetahuan di pabrik yang dapat dipakai untuk penyelesaian permasalahan proses tertentu yang spesifik. Namun untuk ke masa depan, model pengembangan heuristik yang mendasarkan atas pengalaman yang bersifat coba-coba dengan resiko terjadinya kesalahan, tidak dapat terus diandalkan tanpa *deep knowledge*. Pengembangan *deep knowledge* berupa model

proses yang dibangun berdasarkan prinsip-prinsip dan hukum fundamental yang mampu menjelaskan perilaku proses dari variabel-variabel proses yang terlibat sangat diperlukan. Selain sebagai penjelasan bagi pengetahuan heuristik yang telah ada, model proses dapat digunakan untuk mempelajari kemungkinan-kemungkinan masalah yang bisa terjadi sehingga langkah-langkah penyelesaian yang lebih pasti dapat ditentukan, tidak harus mengalami dan melakukan kesalahan terlebih dahulu.

Hubungan antar variabel proses dapat dinyatakan dengan persamaan-persamaan berdasarkan konsep-konsep hukum kimia dan fisika yang sesuai. Pada proses sintesis urea, konversi kesetimbangan reaksi adalah fungsi dari suhu, rasio mol NH_3/CO_2 dan rasio mol $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ (Piotrowski, 1998):

$$x_{\text{eq}} = -3,4792 + 8,2677 \times 10^{-1} a - 1,8998 \times 10^{-2} a^2 - 2,3155 \times 10^{-1} b - 1,144 \times 10^{-1} (T/100) + 2,9879 \times 10^{-2} - 1,3294 \times 10^{-1} a(T/100) + 4,5348 \times 10^{-1} (T/100)^2 - 5,5339 \times 10^{-2} (T/100)^3 \quad (1)$$

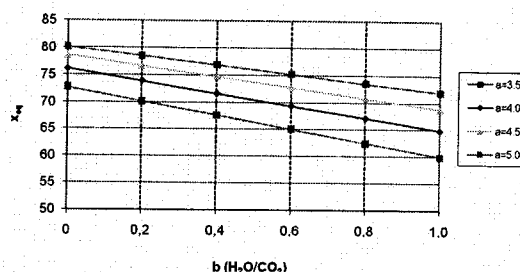
Dengan persamaan tersebut dapat dijelaskan pengaruh variabel proses yaitu suhu, rasio mol $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ dan rasio mol NH_3/CO_2 terhadap konversi kesetimbangan seperti ditunjukkan pada Gambar 2 hingga Gambar 4. Dari Gambar 2 terlihat bahwa kenaikan suhu berpengaruh pada kenaikan harga konversi kesetimbangan hingga mencapai maksimum pada suhu sekitar 190 °C dan setelah itu terlihat kecenderungan yang sebaliknya. Efek ini berkaitan dengan pengaruh panas dari kedua reaksi utama dalam proses sintesis urea. Reaksi pertama yaitu pembentukan karbamat yang bersifat eksotermik dan reaksi kedua yaitu pembentukan urea yang endotermik.



Gambar 2. Pengaruh suhu terhadap konversi kesetimbangan

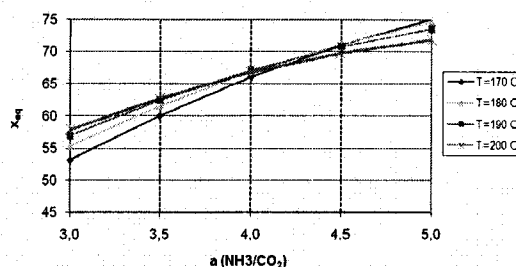
Dari Gambar 3 terlihat bahwa makin besar harga perbandingan mol $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$, maka harga konversi kesetimbangan makin rendah. Hal ini cukup jelas jika ditinjau dari persamaan reaksi, khususnya pada reaksi perubahan karbamat menjadi urea dan air. Kehadiran air

dalam campuran reaksi sintesis urea mengakibatkan kesetimbangan bergeser ke arah kiri, artinya konversi kesetimbangan menjadi lebih rendah dengan makin besarnya konsentrasi air dalam campuran.



Gambar 3. Pengaruh rasio mol $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ terhadap konversi kesetimbangan

Pada Gambar 4 terlihat bahwa pada suhu tertentu, makin besar harga perbandingan mol NH_3/CO_2 maka makin besar pula harga konversi kesetimbangan reaksi sintesis urea. Dapat dipahami bahwa pada perbandingan mol NH_3/CO_2 yang rendah berarti terdapat kelebihan karbondioksida sehingga konversi (basis CO_2) akan rendah, sedangkan sebaliknya terjadi kelebihan ammonia yang memungkinkan konversi tinggi pada perbandingan mol NH_3/CO_2 yang tinggi. Konversi kesetimbangan untuk garis kurva suhu yang lebih rendah adalah juga lebih rendah hingga pada angka perbandingan mol NH_3/CO_2 sekitar 4,25-4,50 namun lebih dari itu terlihat kebalikannya yaitu konversi kesetimbangan lebih tinggi untuk suhu yang lebih rendah.



Gambar 4. Pengaruh rasio mol $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ terhadap konversi kesetimbangan

Konversi sesungguhnya yang dicapai pada reaktor urea di pabrik, dinyatakan dalam perbandingan antara konversi sesungguhnya terhadap konversi kesetimbangan :

$$\eta = x_{\text{act}} / x_{\text{eq}} \quad (2)$$

Dari stoikiometris reaksi, persamaan konversi kesetimbangan dan persamaan hubungan tetapan kesetimbangan terhadap suhu, maka konversi di

reaktor dapat dihitung, dan hasilnya ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan konversi dari hasil perhitungan dan data perancangan

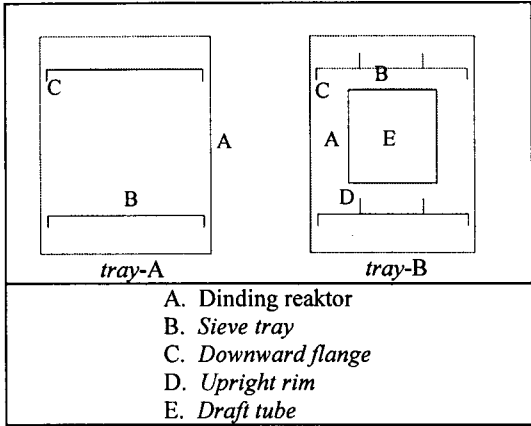
Parameter	Nilai	
a	4,01	
b	0,88	
T	463,15	
P	200	
	Data	Perhitungan
X _{Urea}	0,1107	0,1133
X _{NH3}	0,5333	0,5312
X _{CO2}	0,0765	0,0758
X _{H2O}	0,2746	0,2797
X _{Biuret}	0,0003	-
x _{eq}	-	0,6629
x _{act}	0,60	0,5992
η	0,95	0,9039

Dari Tabel 1 terlihat bahwa hasil perhitungan untuk komposisi dan konversi sesuai dengan data perancangan reaktor urea Kaltim-1, namun untuk fraksi konversi terhadap konversi pada kesetimbangan hasil perhitungan sekitar 5% lebih kecil daripada data. Perbedaan ini kemungkinan disebabkan oleh persamaan konversi kesetimbangan yang digunakan.

Pembahasan mengenai model kesetimbangan reaksi sintesis urea di atas, merupakan model pengetahuan proses yang dapat menggambarkan perilaku yang terjadi di reaktor urea sebagai hasil interaksi dari variabel proses yang berpengaruh. Pengetahuan berdasarkan model proses berguna untuk memilih kondisi operasi, mengendalikan proses, menganalisis penyimpangan dan memutuskan tindakan penyelesaian masalah proses dengan lebih akurat. Dengan model proses dapat dijelaskan bagaimana sebuah masalah proses dapat terjadi, sehingga akar penyebab masalah dapat ditentukan dan langkah solusi dapat diputuskan. Dengan model proses berbagai situasi masalah dapat disimulasikan sebagai bahan analisis agar tindakan penyelesaian yang tepat dapat ditentukan. Dengan didasari pengetahuan, maka langkah penyelesaian masalah proses lebih pasti dan tindakan *trial-error* pada proses di pabrik dapat dieliminasi.

Simulasi CFD digunakan untuk mendapatkan penjelasan yang nyata tentang

karakteristik aliran fluida pada alat proses, yang dapat dijadikan sebagai basis data alat tersebut. Kajian pola aliran fluida dengan simulasi CFD dilakukan untuk melihat pengaruh geometri *tray* reaktor terhadap pola aliran fluida di dalam reaktor urea. Pada Gambar 5 dan Tabel 2 ditunjukkan sketsa dan dimensi kedua tipe *tray* untuk simulasi.



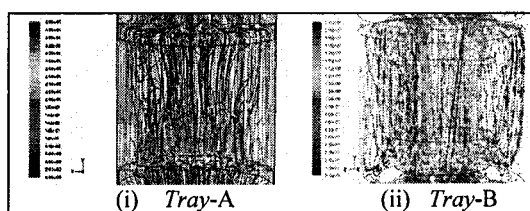
Gambar 5. Sketsa model *tray-A*(konvensional) dan *tray-B* (baru)

Tabel 2. Dimensi model *tray* (dalam meter) untuk simulasi CFD

Spesifikasi	Tray-A	Tray-B
Diameter dalam reaktor	2,806	2.806
Jarak antar <i>tray</i>	2,300	2,300
Diameter <i>tray</i>	2,750	2,750
Jarak <i>tray</i> - dinding reaktor	0,028	0,028
<i>Downward flange</i>		
- tinggi	0,230	0,230
- diameter		2,750
<i>Upright rim</i>		
- tinggi	-	0,230
- diameter (<i>perforated area</i>)	1,750	1,750
- jumlah lubang	44	44
- diameter lubang (mm)	0,100	0,100
<i>Draft tube</i>		
- tinggi	-	2,000
- diameter	-	1,7420
- jarak cylinder - dinding	-	0,530

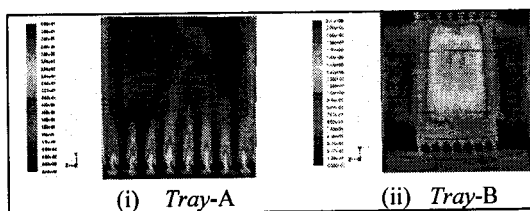
Komponen-komponen di dalam reaktor sintesis urea terdiri dari aliran fluida fasa cair dan fasa gas. Model multifasa digunakan adalah model Eulerian, dengan fasa cair sebagai fasa primer dan gas sebagai fasa sekunder. Untuk penyederhanaan dan memudahkan perhitungan, pada simulasi ini tidak melibatkan persamaan neraca energi dan reaksi kimia, serta densitas dan

viskositas fluida dianggap tetap. Fasa cair terdiri dari ammonia dan larutan karbamat dengan laju alir masa 78,10 kg/det, densitas dan viskositasnya masing-masing adalah 858,25 kg/m³ dan 0,000954 kg/m.s. Fasa gas memiliki laju alir 13,26 kg/det, dengan densitas 187,55 kg/m³ dan viskositas $3,35 \times 10^{-5}$ kg/m.s. Model *solver* yang digunakan adalah *segregated* dengan formulasi implisit, tiga dimensi pada keadaan tunak. Model turbulen yang dipilih adalah *k-ε* standar dengan konstanta dari *CFD solver*. Sebagai kondisi batas di inlet ditetapkan kecepatan fasa cair dan gas, serta fraksi volume gas. Sedangkan kondisi batas outlet dipilih jenis *outflow*.



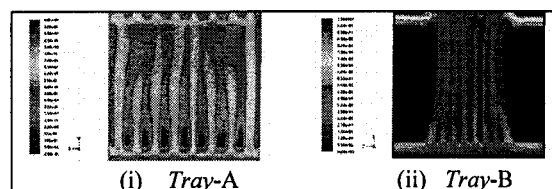
Gambar 6. Profil arah aliran fluida

Pada Gambar 6 ditunjukkan hasil simulasi CFD untuk profil aliran fluida (*pathline*) dari kedua tipe *tray*. Pada *tray-B* terlihat cukup jelas terjadinya aliran resirkulasi fluida di dalam kompartemen, sedangkan pada *tray-A* aliran resirkulasi tidak terlihat seintensif *tray-B*. Kedua *tray* memiliki sejumlah lubang sebagai tempat lewatnya aliran fasa gas dan annulus sebagai tempat lewatnya aliran fasa cair. Namun pada *tray-B* lubang-lubang lebih terpusat, dibandingkan pada *tray-A* yang relatif merata pada luasan *tray*. Dengan lubang yang lebih terpusat dan silinder *draft tube* pada *tray-B* diperoleh aliran gas yang lebih terpusat pula, memberikan efek menguntungkan terhadap aliran fasa gas sebagai gaya penggerak untuk sirkulasi fluida di dalam kompartemen reaktor. Dengan kondisi yang demikian, pada *tray-B* terbentuk aliran ke atas di bagian tengah kompartemen di dalam silinder, kemudian aliran dari bagian atas silinder sebagian mengalir ke arah bawah di sisi luar silinder dan selanjutnya dari bagian bawah kompartemen ada aliran masuk ke arah pusat di bagian dalam silinder termasuk sebagian aliran dari annulus.



Gambar 7. Kontur kecepatan aliran fluida

Pada Gambar 7 terlihat bahwa pada *tray-B* dihasilkan kecepatan aliran fluida yang lebih tinggi dan terpusat dibandingkan pada *tray-A*. Pada *tray-A* kecepatan fasa gas yang tinggi lebih merata di sepanjang *tray* sesuai distribusi lubang pada *tray*, sedangkan untuk *tray-B* kecepatan yang tinggi lebih terkonsentrasi di tengah. Pada *tray-B* diperoleh kecepatan fluida maksimum hingga sekitar 1,7 m/detik, sedangkan pada *tray-A* kecepatan tertinggi hanya sekitar 0,4 m/detik. Nampak pula arah kecepatan aliran yang membentuk aliran resirkulasi di dalam kompartemen reaktor seperti dijelaskan sebelumnya. Pola aliran resirkulasi yang demikian dan kecepatan aliran yang lebih tinggi memungkinkan terjadinya intensitas kontak antara fasa cair dan gas di dalam kompartemen reaktor pada *tray-B* lebih baik daripada *tray-A*, yang memungkinkan berlangsungnya reaksi yang lebih sempurna di dalam reaktor. Dengan demikian akan diperoleh peningkatan efisiensi reaktor sehingga lebih mendekati batas pada konversi kesetimbangan. Berdasarkan referensi, kecepatan ideal untuk aliran fasa cair dan fasa gas agar dihasilkan kontak yang intensif antara fasa cair dan gas adalah sekitar 0,1-0,6 m/detik untuk fasa cair, sedangkan untuk gas kecepatannya diharapkan berada dalam kisaran 2,5-10 m/detik (Mennen, 2001).



Gambar 8. Kontur fraksi volume gas

Dari Gambar 8 terlihat kontur fraksi volume gas yang menunjukkan pola distribusi fasa cair dan gas di dalam reaktor. Nampak bahwa aliran fasa gas terutama berada di area tengah di mana lubang-lubang pada *tray* terdistribusi dan aliran fasa cair melalui daerah annulus. Area dengan fraksi volume fasa gas tertinggi merupakan lapisan gas yang terbentuk di bagian bawah area *tray* yang tidak berlubang.

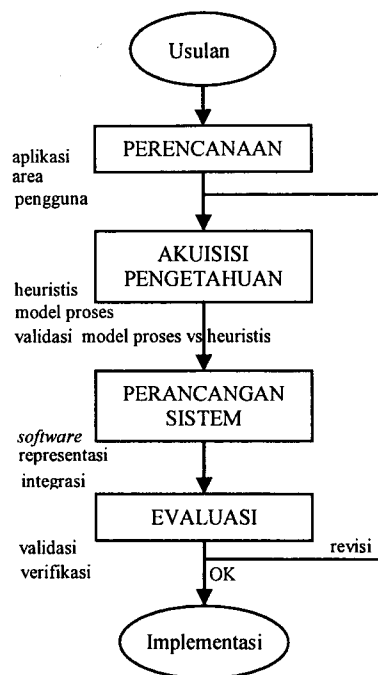
Untuk tujuan kontak antara fasa cair dan gas yang maksimal, reaktor urea dirancang sebagai kolom vertikal yang dibagi-bagi dalam beberapa kompartemen yang dipisahkan oleh *tray* reaktor. *Tray* dibuat agar dihasilkan pola distribusi aliran fasa cair dan gas yang akan memberikan kontak antar fasa yang intensif. Rancangan *tray* generasi awal berupa *tray* berlubang dengan luas *tray* sama dengan luas penampang dalam reaktor, belum ada fungsi pemisahan aliran fasa cair dan gas. Selanjutnya reaktor dengan tipe *tray-A* seperti pada simulasi

ini yang banyak dipakai di pabrik urea, terdapat area lubang-lubang pada *tray* sebagai jalan aliran gas dan area *annulus* sebagai jalan aliran fasa cair. Luas area berlubang untuk gas maupun luas area bukaan untuk aliran fasa cair dibuat untuk mendapatkan kecepatan aliran fasa gas dan cairan yang tertentu seperti di atas. Untuk fasa cair, luas bukaan dibuat dalam kisaran 1-10% dari luas penampang reaktor, sedangkan untuk fasa gas lubang-lubang pada *tray* dibuat dengan diameter dalam kisaran 3-10 mm.

Simulasi CFD yang dilakukan memberikan pemahaman bahwa dengan konfigurasi *tray* yang berbeda akan dihasilkan pola aliran fluida dalam reaktor yang berbeda pula. Dengan pola tersebut dapat diketahui bagaimana kemungkinan terjadinya kontak antar aliran komponen-komponen terutama ammonia dan karbondioksida yang akan melangsungkan reaksi. Pemahaman akan hal tersebut menjadi bagian pengetahuan mengenai peralatan proses yaitu reaktor urea, yang sangat diperlukan untuk menjelaskan bagaimana terjadinya proses kimia, dalam hal ini reaksi sintesis urea dipengaruhi oleh konstruksi dari reaktor.

Selain yang telah dibahas, potensi aplikasi pemanfaatan CFD di pabrik sangat luas. Di antaranya adalah untuk melakukan evaluasi dan menganalisis unjuk kerja peralatan proses yang ada secara lebih rinci dan sebagai alat analisis untuk menemukan penyebab masalah yang terjadi pada peralatan proses. Sebuah contoh kasus di mana CFD dapat dimanfaatkan di pabrik urea Kaltim-1 adalah masalah pembentukan deposit urea di evaporator tingkat pertama, simulasi dengan CFD dapat dilakukan untuk mengetahui profil aliran fluida yang terdiri dari larutan urea dan udara, serta profil suhu di dalam evaporator. Selanjutnya kemungkinan utama penyebab terjadinya pembentukan dan penumpukan deposit urea dapat dianalisis. Simulasi CFD kembali dapat dimanfaatkan untuk menganalisis alternatif rancangan atau modifikasi alat proses. Berdasarkan hasil simulasi dapat dipilih alternatif terbaik tanpa harus bereksperimen dahulu di lapangan. Pemanfaatan lain adalah untuk mengevaluasi pembelian alat proses, untuk menentukan pilihan yang paling tepat, sehingga potensi kerugian baik dari sisi teknis maupun ekonomi yang mungkin terjadi jika salah dalam memilih dapat dihindarkan.

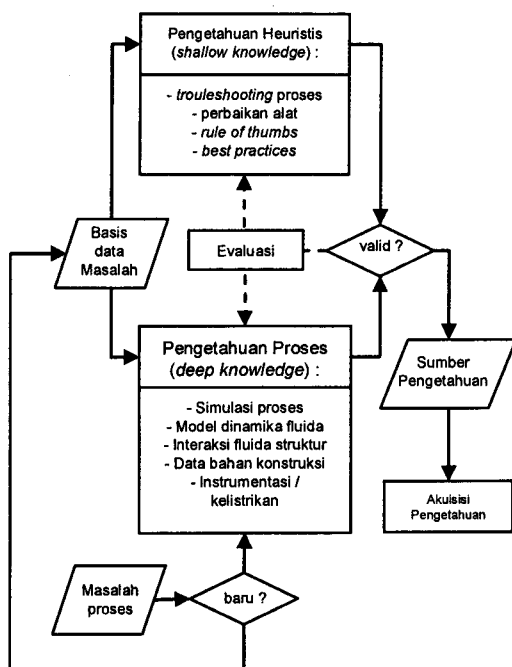
Pengembangan sistem berbasis pengetahuan dilakukan melalui empat tahapan yaitu perencanaan, akuisisi pengetahuan, perancangan sistem, dan evaluasi seperti ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Tahapan pengembangan sistem berbasis pengetahuan

Tahap perencanaan dalam pengembangan sistem mencakup tujuan yang akan dicapai dan spesifikasi yang disyaratkan. Di sini harus ditentukan dengan jelas definisi dan spesifikasi sistem yang akan dibuat, anggaran, jadwal pelaksanaan, serta sumber daya yang dibutuhkan. Aplikasi sistem berbasis pengetahuan yang dipilih harus ditentukan dengan jelas, misalnya aplikasi *troubleshooting* dan diagnosis proses, pengendalian proses atau pelatihan operator. Batasan area unit proses harus ditentukan, misalnya untuk keseluruhan proses di pabrik urea atau hanya untuk unit proses tertentu seperti unit sintesis, resirkulasi, evaporasi, produk akhir atau pengolahan limbah. Selanjutnya sasaran pengguna sistem tersebut juga harus jelas, misalnya operator ruang kendali, *supervisor* atau untuk *engineer*. Sebagai contoh, didefinisikan bahwa yang akan dibuat adalah : "sistem diagnosis masalah proses di pabrik Urea secara *online* untuk operator ruang kendali". Dengan definisi yang jelas mengenai sistem yang akan dibangun, maka berikutnya dapat ditentukan perangkat keras dan perangkat lunak yang tepat, yang akan digunakan untuk menjalankan aplikasi. Dari sisi perangkat keras, dengan perkembangan teknologi komputer yang sangat pesat, spesifikasi komputer saat ini (*Personal Computer*) umumnya sudah mencukupi untuk menjalankan aplikasi sistem berbasis pengetahuan proses. Dari sisi perangkat lunak, tersedia banyak pilihan perangkat lunak untuk

pengembangan sistem pakar mulai dari yang bersifat bebas dan terbuka hingga yang komersial. Perangkat lunak tersebut bisa berupa bahasa pemrograman seperti PROLOG (*programming in logic*) dan LISP (*list processing*), atau yang sudah berupa *expert system shell* seperti CLIPS (www.ghg.net/clips/CLIPS.html) dan G2 dari Gensym (www.gensym.com) yang bersifat komersial.



Gambar 10. Akuisisi pengetahuan untuk penyelesaian masalah proses

Akuisisi pengetahuan merupakan tahapan kunci dan yang paling sulit dari keseluruhan proyek pengembangan sistem. Pengetahuan baik yang berupa pengetahuan heuristik maupun pengetahuan proses dalam bentuk model proses, keseluruhannya merupakan sumber-sumber yang akan membentuk basis pengetahuan yang lengkap. Pada Gambar 10 ditunjukkan mengenai peran pengetahuan heuristik (*shallow knowledge*) dan pengetahuan proses (*deep knowledge*) sebagai sumber untuk akuisisi pengetahuan dalam menyelesaikan masalah proses. Basis data masalah berisikan kumpulan data masalah proses yang ada di pabrik. Analisis untuk penyelesaian masalah dalam basis data tersebut dilakukan dengan berdasarkan pada pengetahuan heuristik dan pengetahuan proses yang telah dikuasai, yang telah terbukti valid dan tidak ada ketidaksesuaian dari kedua sumber pengetahuan tersebut. Jika ada ketidakcocokan antara pengetahuan heuristik dan pengetahuan proses, harus dilakukan evaluasi untuk merevisi pengetahuan heuristik atau model pengetahuan

proses yang dibuat. Informasi pengetahuan yang telah valid menjadi sumber bagi basis pengetahuan dalam menyelesaikan masalah proses. Untuk masalah proses yang telah ada di dalam basis data, maka penyelesaiannya mengikuti analisis berdasarkan sumber pengetahuan yang telah tersedia. Jika masalah proses tersebut adalah baru, maka harus dilakukan analisis baru dengan pengetahuan proses yang dapat menjelaskan masalah yang terjadi, sehingga penyebab dan tindakan penyelesaian masalah dapat diputuskan.

Akuisisi pengetahuan dapat dilakukan melalui dua cara yaitu manual dan otomatis. Metode manual menggunakan cara-cara seperti wawancara dan pengamatan untuk mendapatkan pengetahuan yang dikuasai ahli dalam menyelesaikan kasus. Sementara metode otomatis adalah dengan memanfaatkan alat bantu yang memfasilitasi akuisisi pengetahuan, misalnya dengan perangkat lunak bantu yang telah dirancang untuk kegiatan akuisisi pengetahuan. Pemrograman dengan perangkat lunak untuk sistem pakar seperti CLIPS juga dapat digunakan untuk akuisisi pengetahuan secara otomatis (Chen, 1999). Produk dari tahapan akuisisi pengetahuan ini adalah basis pengetahuan yang kemudian harus direpresentasikan dalam format yang sesuai untuk dimasukkan ke dalam perangkat lunak pengembangan sistem pakar.

Setelah dilakukan akuisisi pengetahuan, tahapan selanjutnya adalah merancang dan memformulasikan sistem yang akan dibuat, kemudian menuliskannya dalam kode program yang sesuai. Pekerjaan pada tahap ini berhubungan dengan merepresentasikan pengetahuan sesuai jenis aplikasi sistem dan perangkat lunak yang dipilih. Sebagaimana telah diketahui ada beberapa metode representasi pengetahuan yaitu berbasis aturan, berbasis frame, berbasis obyek, serta berbasis model kasus. Metode yang banyak digunakan adalah representasi pengetahuan dengan berbasis aturan, seperti yang digunakan pada perangkat lunak pengembangan sistem pakar G2 dan CLIPS. Untuk sistem berbasis pengetahuan yang dibuat dengan berbasis aturan, maka pengetahuan proses dituliskan dalam bentuk aturan-aturan (*IF-THEN rules*). Pada aplikasi diharapkan agar dibuat rancangan antarmuka grafis yang akan memudahkan pengguna untuk berinteraksi dengan sistem. Selain itu perlu dipertimbangkan apakah sistem pakar hanya akan berdiri sendiri (*offline*) atau akan terintegrasi dengan basis data operasi pabrik, sistem pengendalian proses serta model simulasi proses, sehingga perlu

diperhatikan kompatibilitas antar perangkat lunak. Sebagai gambaran, aplikasi sistem pakar untuk deteksi dan diagnosis kesalahan yang dibuat dengan G2 dapat berinteraksi dengan program simulasi proses dan sistem kendali di unit granulasi (Corrie, 2001).

Tahap evaluasi dilakukan untuk memastikan bahwa sistem memenuhi spesifikasi yang telah didefinisikan. Dua cara yang umum dilakukan untuk mengevaluasi sistem pakar adalah verifikasi dan validasi. Verifikasi adalah langkah untuk memeriksa dan memastikan bahwa basis pengetahuan dan mesin pengambilan kesimpulan pada sistem pakar telah memenuhi spesifikasi yang disyaratkan dan bebas dari kesalahan. Verifikasi dilakukan dengan cara memeriksa kemungkinan kesalahan-kesalahan pada pembuatan atau penulisan basis pengetahuan. Langkah validasi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil dari sistem yang dibuat adalah benar. Teknik validasi yang dapat dilakukan adalah pengujian, dengan cara membandingkan hasil yang diperoleh dari sistem dengan penyelesaian jika dilakukan oleh seorang ahli dalam menyelesaikan kasus yang tercakup dalam basis data sistem. Sebagai tolok ukur adalah tingkat akurasi yang menunjukkan prosentasi hasil yang sesuai dari sistem dan tingkat kecukupan dari sistem pakar dalam memberikan alternatif penyelesaian terhadap sebuah kasus. Selain itu hasil dari sistem juga dapat dibandingkan dengan hasil standar yang sudah diketahui atau dari model teoritis. Simulasi proses yang telah dibuat sebelumnya dan terbukti validitasnya juga dapat digunakan untuk validasi sistem pakar. Berdasarkan hasil evaluasi dapat dilakukan perbaikan-perbaikan pada sistem hingga dapat diterima dan siap untuk diimplementasikan dan dipakai oleh pengguna akhir sesuai dengan tujuan semula. Perbaikan dan pengembangan yang berkelanjutan terus dilakukan sesuai dengan perkembangan pengetahuan di pabrik dalam menyelesaikan masalah proses.

2. Kesimpulan

Pengetahuan heuristik dari pengalaman dan pengetahuan proses berdasarkan model proses, menjadi sumber bagi basis pengetahuan proses di pabrik. Dari model konversi kesetimbangan reaksi sintesis urea dapat diperoleh pengetahuan mengenai perilaku proses sintesis urea yang dipengaruhi oleh suhu, rasio mol NH_3/CO_2 dan $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$. Dari kajian dengan simulasi CFD, diperoleh pemahaman mengenai karakteristik aliran fluida di dalam reaktor yang dipengaruhi oleh konfigurasi tray reaktor; pada konfigurasi baru tray-B dihasilkan pola aliran sirkulasi fluida dengan efek pengadukan dan

kontak fasa cair dan gas yang lebih baik daripada tray-A yang konvensional. Pengetahuan ini menjadi basis data dan cara untuk menganalisis masalah pada alat proses. Dengan berbasis pengetahuan, masalah proses diselesaikan mengikuti analisis berdasarkan sumber pengetahuan yang telah dikuasai, dan jika masalah proses tersebut adalah baru, maka harus dilakukan analisis baru berdasarkan pengetahuan proses yang sesuai.

Daftar Notasi

a	= perbandingan mol NH_3/CO_2 , mol/mol
b	= perbandingan mol $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$, mol/mol
T	= temperatur, K
P	= tekanan, kg/cm ²
x_{eq}	= konversi kesetimbangan
x_{act}	= konversi nyata
X_i	= fraksi mol komponen
$\square$	= perbandingan konversi nyata terhadap konversi kesetimbangan

Daftar Pustaka

- [1] Asosiasi Produsen Pupuk Indonesia – APPI, (2006), www.appi.com.
- [2] Chandrasekaran, B., A. K. Goel and Y. Iwasaki, (1993), "Functional representation as design rationale", *IEEE Computer*, 48-56.
- [3] Chen, Z., (1999), "Knowledge acquisition assisted by CLIPS programming", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 12(3), 379-387.
- [4] Corrie, S.R., (2001), "Implementation of a Fault Detection and Diagnosis System for a Dynamic Granulation Model Using Gensym G2 Expert System", *Thesis*, University of Queensland.
- [5] Davenport, T.H. dan Prusak, L., (1998), *Working Knowledge: How Organizations Manage What They Know*, Harvard Business School Press, Boston.
- [6] Ellis, R.P., (1998), "Asset utilization: a metric for focusing reliability efforts", *Seventh International Conference on Process Plant Reliability*, Houston.
- [7] Elsas, M.J., (2001), "Multipurpose Sharable Engineering Knowledge Repository", *PhD Thesis*, The Ohio State University.
- [8] Hui, K., (2006), "Lecture #2 Knowledge Base System Architecture & Rule-Based Systems", www.comp.rgu.ac.uk.
- [9] Kanagasabapathy, K.A., Radhakrishnan, R. dan Balasubramanian, S., (2006), *Empirical Investigation of Critical Success factor and knowledge management structure for successful implementation of*

- knowledge management system – a case study in Process Industry*".
- [10] Kusumadewi, S., (2003), "*Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya)*", Graha Ilmu, Yogyakarta.
- [11] Madhavan, S. dan Kirsten, R.A., (1990), Introduction to expert eystems and potential ammonia - plant applications", *Plant / Operations Progress*, 9 (1), 1-5.
- [12] Mennen, J.H., (2001), "Gas-liquid contacting apparatus", *U.S. Patent No.* 6,254,840.
- [13] PT Pupuk Kalimantan Timur, "*Operating Manual Kaltim-1 Urea Plant – after optimization*", (1995).
- [14] Piotrowski, J., Kozak, R. dan Kujawska, M., (1998), "Thermodynamic Model of Chemical and Phase Equilibrium in the Urea Synthesis Process", *Chem.Eng.Sci.*, 53(1), 183-186.
- [15] Pramanik, S. dan Venkataram, P., (1989), "Diagnosis of steady-state process behaviour using rules derived from signed directed graph".
- [16] Turton, R., Bailie, R.C., Whiting, W.B. dan Shaewitz, J.A., (1998), "*Analysis, Synthesis and Design of Chemical Process*", Prentice Hall, 232-235.