

PRODUKSI HIDROGEN DARI AIR DENGAN METODA TERMOKIMIA (UT-3): EVALUASI MASALAH REAKSI SAMPINGAN DENGAN PROSES SIMULASI

Amir Rusli*



ID990000021

ABSTRACT

HYDROGEN PRODUCTION FROM WATER BY THERMO-CHEMICAL METHOD (UT-3): EVALUATION OF SIDE REACTIONS BY SIMULATION PROCESS. Hydrogen fuel with its advantages will be able to replace all the positions of fossil fuels post "oil and gas or migas". Among the advantages of hydrogen fuel are pollution free, abundant of raw material in the form of water molecule, flexible in application, able to storage and transport as well as fossil energy sources (oil and gas). Hydrogen could be produced from water by means of thermochemical, thermolysis, photolysis and electrolysis. Nuclear heat (HTGR), solar heat or waste heat from steel industry can be used as energy source for these processes. In case of thermochemical method, some problems related to production process should be studied and evaluated. Simulation is considered can be applied to study the effects of side reactions and also to resolve its problems in hydrogen production process. In this paper is reported the evaluation results of hydrogen production process by thermochemical (UT-3) through both of the experimental and computer simulation. It has been proposed a new flow chart of hydrogen production to achieve the hydrogen production continuously. A simulator has been developed based on experimental data and related mathematical equations. This simulator can be used to scale-up the UT-3 thermochemical cycle for hydrogen production process.

ABSTRAK

PRODUKSI HIDROGEN DARI AIR DENGAN METODA TERMOKIMIA (UT-3): EVALUASI MASALAH REAKSI SAMPINGAN DENGAN PROSES SIMULASI. Bahan bakar hidrogen dengan segala kelebihan yang dimilikinya diharapkan akan dapat menggantikan posisi bahan bakar fosil pasca "migas". Di antara kelebihan tersebut adalah bebas polusi, bahan baku yang melimpah dalam bentuk molekul air, fleksibel dalam penggunaan, dapat disimpan dan ditransportasi seperti layaknya sumber energi fosil (minyak, gas alam). Hidrogen dapat diproduksi dari air dengan berbagai cara antara lain melalui proses termokimia, termolisa, fotolisa dan proses elektrolisa. Dan sebagai sumber energi panasnya dapat diperoleh dari reaktor nuklir (HTGRs), kolektor sinar matahari atau panas buangan dari pabrik baja. Dalam proses produksi hidrogen dengan cara termokimia, banyak masalah proses yang harus dipelajari dan dievaluasi. Metoda simulasi dapat digunakan untuk mempelajari pengaruh reaksi sampingan dan cara mengatasinya dalam proses produksi. Dalam makalah ini dilaporkan hasil evaluasi masalah produksi hidrogen dari air dengan metoda termokimia (UT-3) baik secara percobaan maupun simulasi komputer. Diusulkan perubahan diagram alir proses produksi hidrogen dari sistem proses UT-3, sebagai upaya untuk mendapatkan kesinambungan produksi hidrogen. Telah berhasil dikembangkan suatu simulator berdasarkan data percobaan di laboratorium dan persamaan matematik terkait. Simulator ini diharapkan dapat dijadikan acuan dalam menaikan dari skala kecil ke skala besar dari proses produksi hidrogen dalam siklus termokimia "UT-3".

* Pusat Pengkajian Teknologi Nuklir - BATAN

PENDAHULUAN

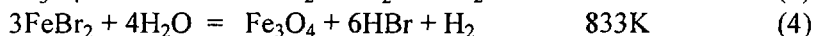
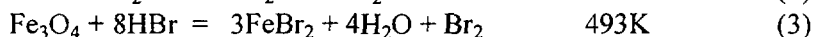
Perlunya Energi Alternatif yang Berwawasan Lingkungan

Pada saat ini lebih dari delapan puluh persen kebutuhan energi dunia dipenuhi dari sumber energi fosil (minyak bumi, gas alam dan batubara). Adanya revolusi industri telah memicu pemakaian sumber energi fosil terutama minyak bumi ke tingkat yang sukar dikontrol, sebagai gambaran tingkat pemakaian dunia dalam tahun 1995 ini saja mencapai 24 juta barrel per hari guna menghasilkan energi untuk berbagai keperluan (industri, transportasi dan keperluan lainnya). Sementara cadangan baru dengan biaya murah sulit ditemukan, terlebih untuk Indonesia, menurut perkiraan sementara dengan kenaikan produksi 6 persen per tahun bahwa Indonesia akan menjadi "net importer oil" pada permulaan tahun 2000-an [1]. Disadari pula bahwa pemakaian sumber energi fosil telah menimbulkan efek sampingan yang mematikan akibat gas buangan yang dilepaskan ke udara (SO_x , NO_x , CO , CO_2). Gas-gas ini selain dapat mengganggu kesehatan manusia, juga dapat membumi hanguskan hutan dan penghuninya dengan hujan asamnya, serta menaikkan temperatur global permukaan bumi akibat efek rumah kaca dari CO_2 yang selanjutnya akan merendam dua per tiga permukaan bumi akibat mencairnya es di kutub utara dan selatan [1,5,10].

Oleh karena itu perlu dilakukan program konservasi dan diversifikasi energi, serta pengembangan energi alternatif yang murah, bersih dan berwawasan lingkungan. Subsidi berbagai sumber energi alternatif terhadap pemakaian sumber energi fosil diharapkan akan dapat memperpanjang umur sumber daya energi fosil itu sendiri, di samping turut mengurangi emisi gas-gas rumah kaca ke atmosfer. Hidrogen dapat dipertimbangkan sebagai salah satu calon energi alternatif pasca "migas", karena di samping hidrogen mempunyai bahan baku yang melimpah juga dalam proses pembakarannya hanya mengeluarkan uap air yang dapat berfungsi kembali sebagai bahan baku.

Termokimia UT-3 dan Permasalahannya

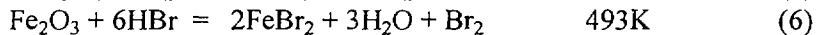
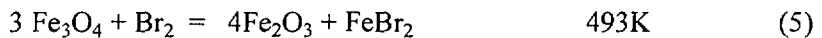
Pada tahun 1978 Kameyama dkk. memperkenalkan siklus termokimia generasi ke tiga dari Universitas Tokyo, kemudian lebih dikenal dengan nama UT-3 yang terdiri dari empat langkah reaksi seperti berikut:



Semua reaksi-reaksi dalam siklus UT-3 adalah reaksi antara zat padat dan gas. Dengan demikian pengoperasiannya sangat mudah, hanya dengan membuka dan menutup kran (valve) ke-empat persamaan reaksi akan dapat berlangsung secara berkesinambungan. Dan suatu keunikan lagi dari siklus UT-3 adalah bahwa kita tidak perlu memindah-mindahkan reaktan padat tersebut dari suatu reaktor ke reaktor lain [2,6].

Untuk maksud-maksud komersialisasi dari proses UT-3, kesinambungan produksi hidrogen adalah sangat penting. Kesinambungan produksi ini dapat dicapai bila ke-empat persamaan reaksi berlangsung serentak dengan kecepatan yang sama. Untuk itu semua parameter yang berpengaruh dalam reaksi seperti kesetimbangan massa, kesetimbangan panas dan waktu reaksi perlu direkam dan dievaluasi. Namun dalam prakteknya sangat sulit sekali membuat sistem peralatan simulator percobaan guna dapat melakukan perekaman data-data yang diinginkan, terlebih-lebih dalam mengendalikan proses yang sedang berlangsung. Kesulitan ini dapat diatasi dengan melakukan simulasi komputer untuk mempelajari dan mengevaluasi semua parameter yang berpengaruh dalam proses. Di samping simulasi sendiri dapat diharapkan akan menghemat biaya dan waktu untuk maksud komersialisasi suatu sistem [2,3].

Dalam hal mengembangkan suatu simulator dengan reaktor "fixed bed", ada masalah yang perlu penanganan dalam proses siklus termokimia UT-3 antara lain adanya reaksi sampingan yang mengganggu kesinambungan produksi hidrogen yakni, sebagian dari brom yang terbentuk pada persamaan reaksi (3) pada permulaan reaksi (ujung awal reaktor) bereaksi kembali dengan reaktan Fe_3O_4 disepanjang reaktor (ujung akhir reaktor), dan Fe_2O_3 yang terbentuk dari reaksi ini bereaksi dengan reaktan HBr. Kedua reaksi berturut-turut dinyatakan oleh persamaan reaksi (5) dan (6) sebagai berikut:



Karena reaksi (5) menyerap brom produk reaksi (3) mengakibatkan jumlah brom yang terbentuk pada luaran reaktor berkurang, sehingga menyulitkan dalam pengaturan kesetimbangan reaksi dengan ke-tiga persamaan reaksi lainnya. Pada penelitian sebelumnya telah berhasil ditentukan kecepatan persamaan reaksi dalam siklus UT-3 termasuk reaksi sampingan (5) dan (6) berdasarkan model reaksi homogen seperti terlihat pada Tabel 2[2,8]. Dalam proses pembuatan reaktan padat senyawa besi (pelet) semua partikel Fe_3O_4 berubah menjadi partikel Fe_2O_3 selama proses kalsinasi [2,6]. Untuk mengembalikan ke partikel Fe_3O_4 diperlukan reaksi pengolahan awal, reaksi brominasi (6) dan reaksi hidrolisa (4).

Dalam makalah ini dilaporkan hasil pengembangan simulator reaktor tipe "fixed-bed" dan hasil evaluasi pengaruh serta cara mengatasi reaksi sampingan pada proses produksi hidrogen dalam termokimia (UT-3).

TATA KERJA PERCOBAAN DAN SIMULASI

Percobaan

Pelet reaktan padat dibuat dari campuran serbuk Fe_3O_4 dengan zat aditif (silika, zirkonia-yteria, grafit dan selulose). Kemudian campuran diguli dan ditekan untuk mendapatkan pelet silindris, lalu dengan peralatan khusus "rounder" dibentuk bola pelet dengan diameter 4-5 mm. Bola pelet ini dikeringkan pada temperatur ruangan selama 24 jam, lalu dikalsinasi sampai 1473K. Dalam proses kalsinasi ini pelet menjadi lebih kecil berdiameter 3-4 mm dan di samping terjadi perubahan partikel dari Fe_3O_4 menjadi Fe_2O_3 dan perubahan ini harus dikembalikan ke bentuk senyawa semula (Fe_3O_4) melalui reaksi-reaksi pengolahan awal (brominasi dan hidrolisa). Dua tipe reaktor digunakan dalam percobaan, reaktor tipe "thermobalance" digunakan untuk penentuan kinetika reaksi. Dan reaktor tipe "fixed-bed" seperti terlihat pada Gambar 1 digunakan untuk mempelajari produksi hidrogen dan simulasi. Reaktor ini terbuat dari glas kwarsa berbentuk pipa tube berukuran panjang 500 mm dan berdiameter 25 mm. Pelet reaktan senyawa besi ditempatkan dalam reaktor sepanjang 50 mm. Setiap siklus terdiri dari reaksi brominasi dan hidrolisa.

Model Simulasi

Untuk menyederhanakan perhitungan beberapa asumsi telah dibuat sebagai model simulasi sebagai berikut:

- (1) Gas mengalir secara "plug-flow"
- (2) Distribusi temperatur radial dalam reaktor diabaikan
- (3) Perpindahan panas "turbulent" yang dominan adalah antara gas dan reaktan padat
- (4) Pertukaran panas berlangsung melalui dinding reaktor
- (5) Panas dipindahkan secara "axial" dengan konveksi gas dalam reaktor

Selanjutnya persamaan kesetimbangan massa dan panas untuk gas dan reaktan padat dengan batas-batas kondisi (Tabel 1) dan persamaan kinetika reaksi (Tabel 2) digunakan dalam proses simulasi. Dengan memodifikasi persamaan (1-4) pada Table 1 tersebut ke dalam persamaan diferensial, akan diperoleh solusi numerik dengan bantuan komputer.

Proses Simulasi dan Diagram Alir

Pengembangan proses simulasi dilakukan seperti terlihat pada Gambar 2, terdiri dari subrutin untuk setiap unit fungsi seperti reaktor, mesin penukar panas,

kompressor dan separator. Dua model perhitungan digunakan, simulasi dinamis untuk setiap reaktor dan simulasi statis untuk seluruh proses. Proses produksi hidrogen dalam termokimia UT-3 berdasarkan tipe proses “one-pass-flow” seperti terlihat pada Gambar 3. Pada proses tipe ini, setiap persamaan reaksi menempati satu blok reaktor merupakan proses yang sangat sederhana. Akan tetapi pada kenyataan dalam proses operasi proses tipe yang sederhana ini belum dapat menghasilkan produksi hidrogen secara berkesinambungan, hal ini disebabkan karena adanya reaksi sampingan yang mengganggu, seperti telah diterangkan di atas.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengembangan Simulator

Gambar 4 memperlihatkan rentangan waktu produksi brom dari persamaan reaksi (3) senyawa besi. Terlihat disini perbandingan kedua hasil baik percobaan maupun simulasi mendekati titik temu. Dari pengujian menunjukkan bahwa simulator yang dikembangkan telah sesuai dengan percobaan dan dapat digunakan untuk perhitungan guna mengevaluasi parameter lain yang berpengaruh dalam proses. Dengan keberhasilan pengembangan simulator ini, maka dapat dilakukan perhitungan-perhitungan parameter proses skala “pilot plant” dalam rangka komersialisasi siklus termokimia UT-3.

Pengembangan Proses Diagram Alir

Basis tipe proses UT-3 adalah tipe “one-pass-flow”, senyawa kalsium dan besi mengalami empat langkah reaksi. Namun pada kenyataannya pada reaksi brominasi senyawa besi terdiri dari tiga persamaan reaksi yakni persamaan (3), (5) dan (6). Sehingga secara keseluruhan siklus termokimia UT-3 menjadi 5 persamaan reaksi, yakni (1), (2), (4), (5) dan (6) dengan persamaan (5) dan (6) mewakili persamaan reaksi (3). Untuk menjaga kesinambungan produksi hidrogen diusulkan perubahan terhadap tipe proses (“one-pass-flow”) menjadi tipe proses alir seperti pada Gambar 5. Diumpamakan ada 5 buah reaktor tipe “fixed-bed”, Reaktor I dan II adalah reaktor untuk senyawa kalsium pada persamaan (1) dan (2), sedangkan reaktor III, IV dan V adalah reaktor untuk senyawa besi dari persamaan (5), (6) dan (4). Pertama-tama uap air (steam) dikirim ke reaktor I, produk gas dari reaksi persamaan (1) langsung dikirim ke reaktor V. Gas produk ini dikirim ke separator untuk dipisahkan hidrogennya dan sisanya dikirim ke reaktor IV. Dan 25% dari produk gas dari reaktor IV dikirim ke reaktor III. Selanjutnya produk dari reaktor III bersama sisa gas (75%) di reaktor IV dikirim bersama-sama ke reaktor II. Dengan proses ini memungkinkan

kesetimbangan reaksi dan kesinambungan produksi hidrogen dapat berjalan dan masalah reaksi sampingan dalam siklus termokimia UT-3 dapat diatasi.

Simulasi Siklus UT-3 Berdasarkan Diagram Proses yang Dikembangkan

Berdasarkan tipe diagram proses yang dikembangkan pada Gambar 5, dilakukan perhitungan simulasi proses produksi hidrogen. Gambar 6 dan 7 adalah contoh hasil simulasi masing-masing reaksi brominasi dan hidrolisa untuk senyawa kalsium dan besi. Dari gambar di atas terlihat perbandingan zone-reaksi distribusi masing-masing konsentrasi produk dan reaktan. Terlihat jelas bahwa hampir pada setiap siklus reaksi pola dan kecepatan reaksinya sama. Dari persamaan reaksi (1) sampai dengan (6), proses reaksi pada siklus UT-3 dapat terjadi pada temperatur relatif tinggi yaitu antara 493K dan 973K. Rentangan temperatur kerja ini sangat mungkin dipasok dari HTGRs, kolektor sinar matahari atau memanfaatkan panas buangan pabrik baja.

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Telah ditemukan cara mengatasi masalah reaksi sampingan dalam proses produksi hidrogen dalam termokimia UT-3, yakni dengan memodifikasi diagram alir proses produksinya
2. Telah berhasil dikembangkan simulator untuk reaktor "fixed bed" yang dapat menghitung sampai skala "pilot plant" dalam rangka komersialisasi siklus termokimia UT-3
3. Dengan sedikit modifikasi barangkali simulator ini dapat digunakan untuk persamaan reaksi reaksi lainnya yang berhubungan dengan produksi

DAFTAR PUSTAKA

1. **AMIR RUSLI** dkk., "Prospek Energi Hidrogen Pasca Migas", diserahkan ke majalah ELEKTRO untuk dipublikasi, Jakarta, 1995
2. **AMIR RUSLI**, "Studies on The Design of Solid Reactants and Process Operation for The UT-3 Thermochemical Hydrogen Production", PhD thesis, TUAT, Tokyo, 1993

3. **AMIR RUSLI**, "Simulasi Proses Siklus Termokimia "UT-3" Untuk Produksi Hidrogen dari Air", proseedng Lokakarya komputasi Dalam Sains dan Teknologi Nuklir V, 1995
4. **AMIR RUSLI**, "Sistem Energi yang Bersih untuk Masa Depan: Produksi Gas Hidrogen dari Air", Prosiding hasil studi program doktor BATAN, Jakarta, 1993
5. **AMIR RUSLI**, "Perkembangan Produksi Hidrogen dan Peranan RTT", Prosiding Seminar HTR dan aplikasi I, Jakarta, 1994
6. **AMIR RUSLI dkk**, "Produksi Hidrogen Secara Termokimia", Prosiding seminar HTR dan aplikasi II, Jakarta 1995
7. 10th World Hydrogen Energy Conference, Proceeding, Florida, 1994
8. **O. LEVENSPIEL**, "Chemical Reaction Engineering", 2nd edition, John Wiley & Son, New York, 1972
9. **J. BOCKRIS O'M et al.**, "Solar Hydrogen Energy", Mc Donald Optima, London, 1991

Tabel 1. Persamaan Kestimbangan Massa dan Panas

Gas:

Kestimbangan massa

$$\epsilon \frac{dC_i}{d\theta} = \frac{dG_i}{dz} - \frac{6(I - \epsilon)}{D_p^3} r_i \quad (1)$$

Kestimbangan panas

$$\epsilon \frac{d(C_{pg} \rho_g t_g)}{d\theta} = \frac{d(C_{pg} G t_g)}{dz} + h_p \frac{6(I - \epsilon)}{D_p^3} (t_s - t_g) - \frac{U}{D_0} (t_g - t_w) \quad (2)$$

Pelet: model reaksi homogen kestimbangan massa

$$r_i = \frac{1}{6} \pi D_p^3 K_i C_{s,i}^w CT \quad (3)$$

Kestimbangan panas

$$C_{ps} \frac{dt_s}{d\theta} = h_p \frac{6}{D_p} (t_g - t_s) - \Delta H_i \frac{6}{D_p} r_i \quad (4)$$

Batas-batas kondisi

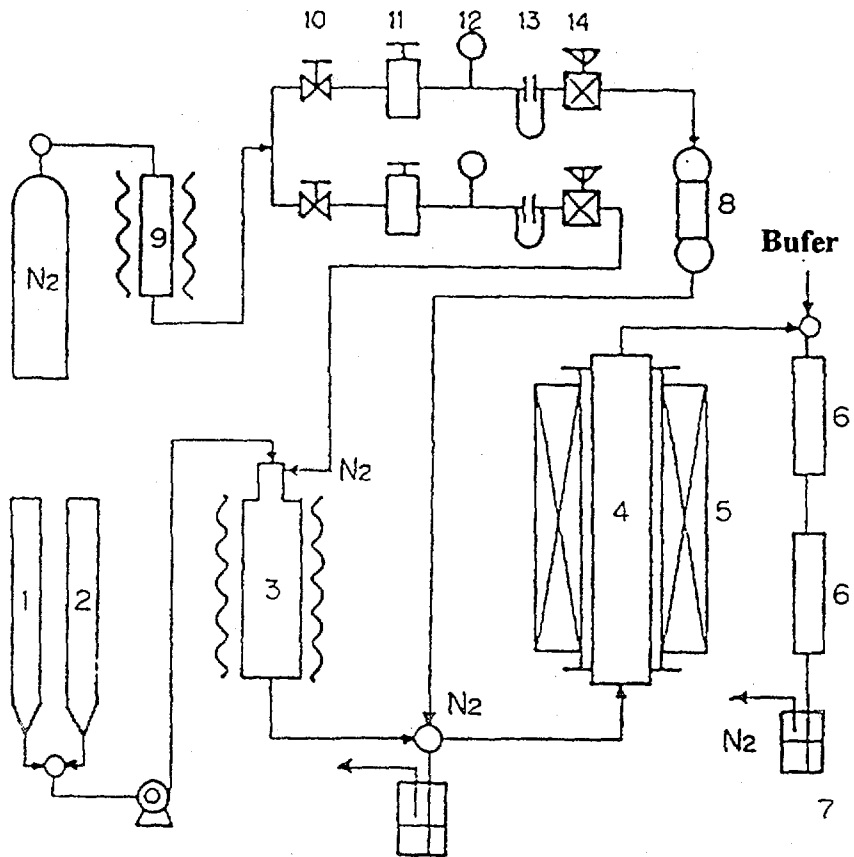
$$t_s = 1, \text{ for } z = 0 \text{ and } \theta = 0 \quad (5)$$

$$t_g = 1, C_i = 1, G_i = 1, \text{ for } z = 0 (\theta = 0) \quad (6)$$

$$t_s = 1, C_i = 0, G_i = 0, \text{ for } \theta = 0 (z = 0) \quad (7)$$

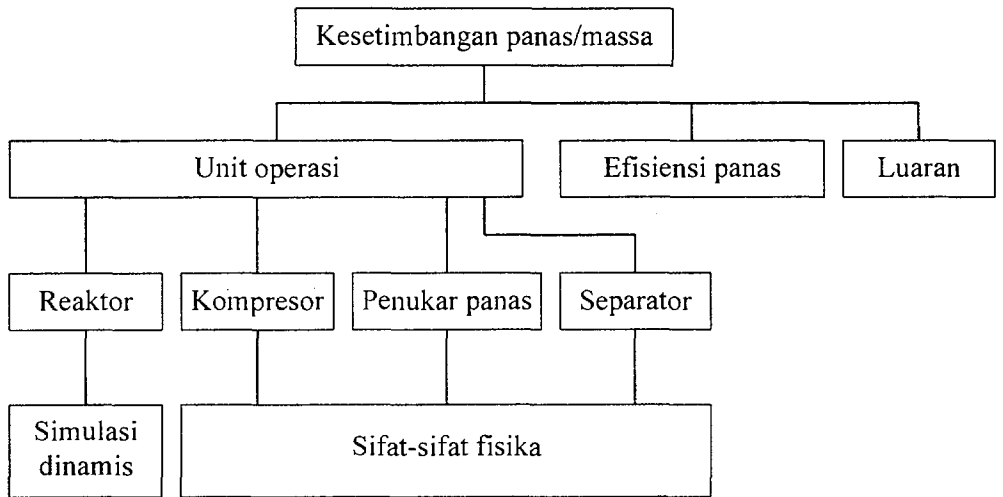
Tabel 2. Persamaan Kecepatan Reaksi [2]

No. Reaksi	Temperatur [K]	Persamaan kecepatan reaksi berdasarkan konsentrasi reaktan padat [mol. ⁻⁵ .s ⁻¹]
(1)	973	$6,10 \times 10^{-5} C_{CaBr_2} C_{H_2O}$
(2)	823	$4,47 \times 10^{-2} C_{CaO} C_{Br_2}$
(3)	493	$4,82 \times 10^{-5} C_{Fe_3O_4} C_{HBr}$
(4)	843	$3,12 \times 10^{-4} (C_{FeBr_2})^{0,75} C_{H_2O}$
(5)	493	$6,24 \times 10^{-1} (C_{Fe_3O_4})^{0,5} C_{Br_2}$
(6)	493	$1,46 \times 10^{-7} (C_{Fe_2O_3})^2 C_{HBr}$

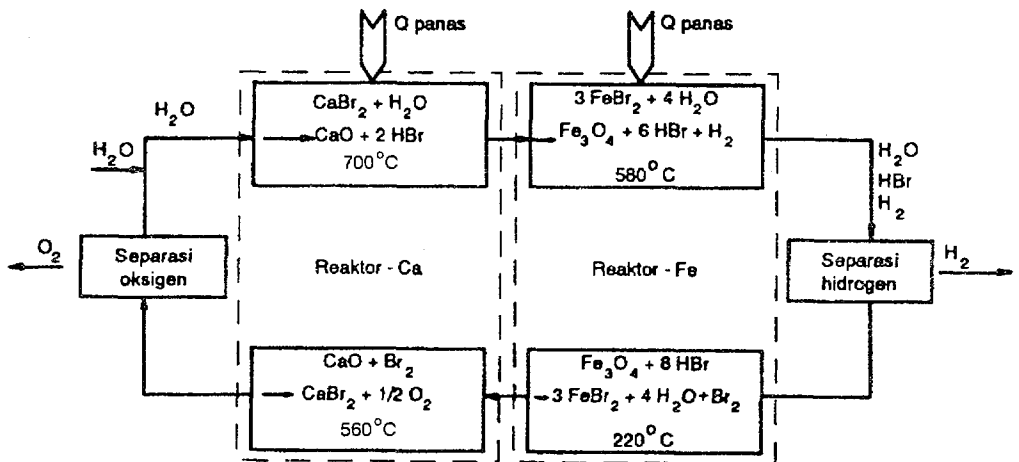


- | | |
|-------------------------|--------------------------|
| 1. Larutan | 8. Kolom CaCl_2 |
| 2. H_2O | 9. Kolom Deoksigen |
| 3. Evaporator | 10. Kran Stop |
| 4. Reaktor kwarsa | 11. Regulator tekan |
| 5. Pemanas listrik | 12. Gauge tekan |
| 6. Condensor | 13. Pengukur meter alir |
| 7. Absorber | 14. Kran alir massa |

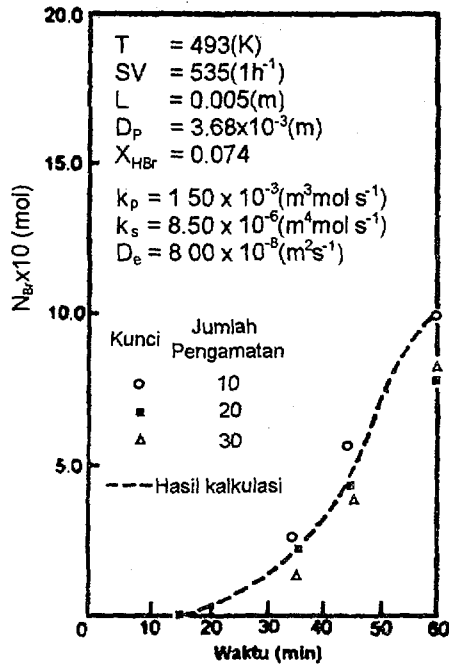
Gambar 1. Peralatan Percobaan Reaktor *Fixed-bed*



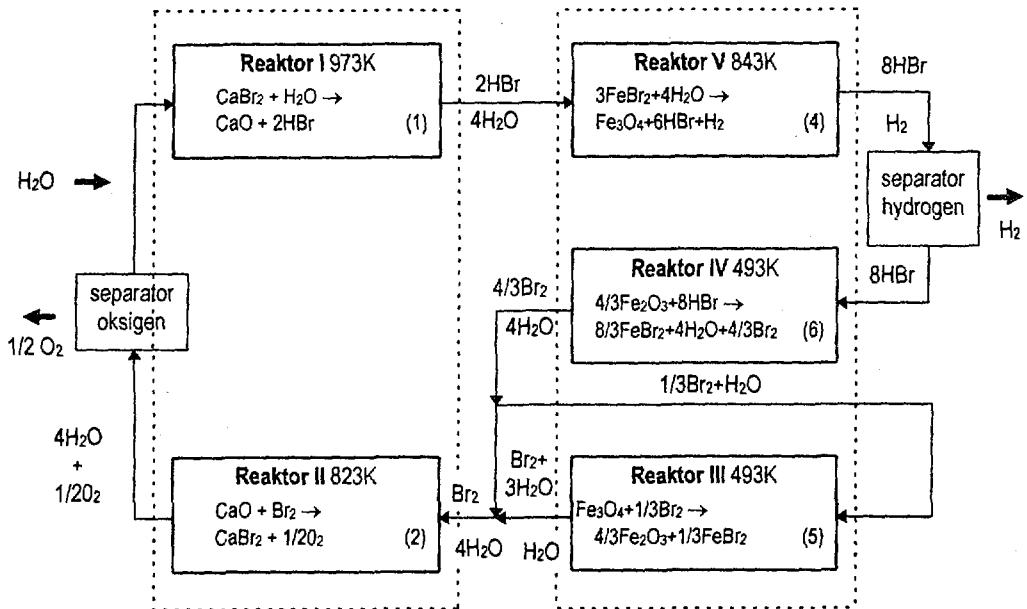
Gambar 2. Struktur Simulator yang sedang Dikembangkan



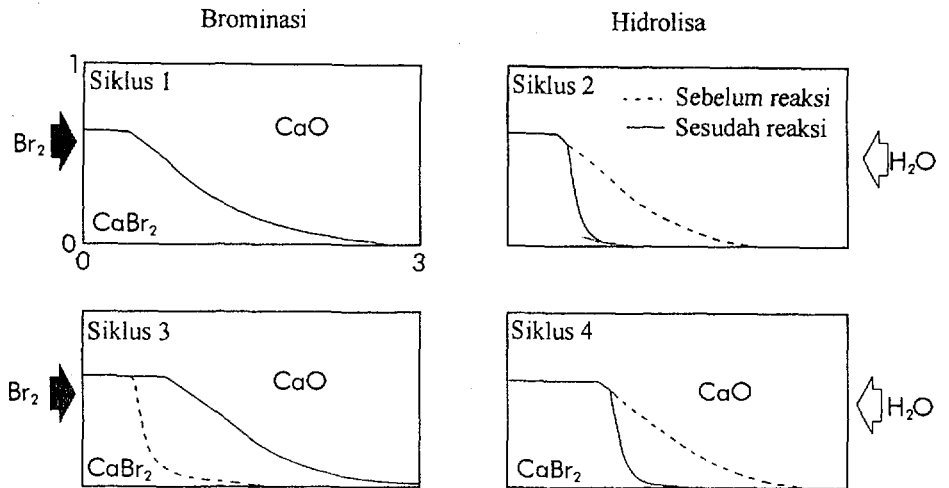
Gambar 3. Konsep Dasar Proses Diagram Alir Siklus Termokimia UT-3



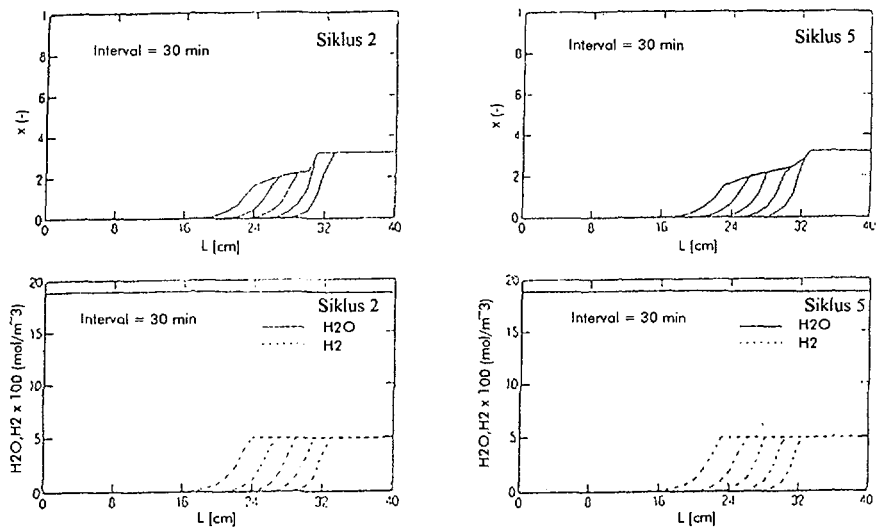
Gambar 4. Rentangan Waktu Produksi Br₂



Gambar 5. Skema Susunan Proses UT-3 yang Diusulkan



Gambar 6. Hasil Perhitungan Simulasi untuk Reaktor Kalsium
(Gas Dialirkan dari Arah yang Berlawanan)
 $L = 3 \text{ m}$, $F = 2.25 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $t = 2 \text{ jam}$



Gambar 7. Hasil Perhitungan Simulasi untuk Reaktor Besi.(4)
(Gas Dialirkan dari Arah yang Berlawanan)
 $T = 843 \text{ K}$, $L = 0.4 \text{ m}$, $F = 2.25 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, $t = 2.5 \text{ jam}$

DISKUSI

M. SUDJATMIKO

1. Berapa kecepatan alir air agar produktivitas Hidrogen maksimal?
2. Bagaimana sistem kontrol tekanan reaktor agar tetap aman?
3. Dengan memperhatikan biaya produksi dan biaya penjualan di pasar, bagaimana nilai ekonomisnya bila Hidrogen digunakan untuk menggantikan bahan bakar saat ini?

AMIR RUSLI

1. Kecepatan alir air dalam percobaan adalah 1-2 ml/menit.
2. Proses ini tidak menggunakan tekanan tinggi, yaitu hanya 1,1 atmosfer sehingga cukup aman. Walaupun demikian tetap dipasang alat pengukur tekanan.
3. Hidrogen sangat kompetitif dengan bahan bakar sintetis dari batu bara pascamigas. Tapi saat ini Hidrogen yang diproduksi dari air kalah bersaing dengan migas karena migas masih murah. Biaya produksi Ut-3 sedikit lebih mahal dari biaya produksi Hidrogen dari gas alam (*steam reforming*). Permintaan hidrogen di pasar sangat tinggi, antara lain untuk industri petrokimia, pupuk, dll.

INO SURYANA

1. Apakah air sebagai bahan baku gas Hidrogen (sampingan oksigen) harus bebas dari bahan lain, misalnya besi, kalium, dll?
2. Seberapa jauh limbah yang terbentuk dari instalator berbahaya bagi lingkungan?

AMIR RUSLI

1. Ya, sedapat mungkin air bebas dari logam pengganggu. Hal ini dapat dilakukan dengan melakukan pengolahan awal terhadap air sebelum dijadikan *steam* (uap air). Steamisasi (penguapan) ini dimaksudkan untuk mempermudah pemisahan logam.
2. Dalam operasi normal tidak ada limbah ke lingkungan, karena merupakan siklus tertutup.

SAHALA LUMBANRAJA

1. Pada dasarnya Hidrogen merupakan energi yang cukup bersih, tapi apakah proses produksi tidak menimbulkan bahan pencemar ke lingkungan? Bila ya, berapa besar pencemaran yang ditimbulkan dari proses produksi ini?
2. Bila dibandingkan dengan energi lain, apakah Hidrogen cukup ekonomis?

AMIR RUSLI

1. Dalam operasi normal proses produksi UT-3 tidak menimbulkan pencemaran karena merupakan proses tertutup, dengan catatan semua peralatan bekerja dengan baik, terutama separator H₂ dan O₂.
2. Kalau dalam perhitungan nilai ekonomis dimasukkan biaya sosial dan lingkungan (kerusakan), Hidrogen kompetitif dengan bahan bakar sintetis dari batu bara.

AMIR EFFENDI

Anda katakan bahwa alat simulator yang dipergunakan mempunyai panjang 40cm dan dapat digunakan untuk skala *pilot plant*. Mohon penjelasan lebih lanjut karena biasanya skala *pilot plant* berukuran besar.

AMIR RUSLI

Untuk produksi komersial (20.000Nm³/jam), panjang reaktor hanya 2 meter (hasil *feasibility study* Toyo Engineering, 1980). Secara umum panjang 40 cm - 100 cm dapat dianggap sebagai skala *pilot plant*. Perlu diketahui bahwa perhitungan masih dapat diteruskan dengan panjang lebih besar dari 40 cm, yaitu dengan mengubah input data panjang dan diameter reaktor.