

PERANCANGAN SISTEM CATU-SIMPAN HIDROGEN

Hadi Suwarno

Pusat Elemen Bakar Nuklir, Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PERANCANGAN SISTEM CATU-SIMPAN HIDROGEN. Studi konservasi energi berwawasan lingkungan dalam bentuk pemanfaatan hidrogen sebagai suatu sumber tenaga baru dikembangkan untuk mencatu dan menyimpan bahan bakar hidrogen untuk pembangkit tenaga. Dalam makalah ini disajikan perancangan suatu tangki catu-simpan hidrogen dalam bentuk uranium hidrida, UH_3 , untuk sebuah pembangkit tenaga kapasitas 100 MW berbentuk silinder, model *fixed-bed*, dengan sistem perpindahan panas dari/ke *bed* secara konveksi dengan bantuan aliran hidrogen panas yang kontak langsung dengan partikel logam uranium. Dari perhitungan teoritis atas tangki catu-simpan hidrogen bentuk *fixed-bed* mampu membangkitkan daya sebesar 100 MW, dengan basis asumsi aliran hidrogen yang berlangsung lambat dan *uniform*, serta konduksi panas secara cepat dan arah transversal, diperoleh spesifikasi sebagai berikut: jumlah hidrogen diperlukan adalah 6 ton/j (pada $77^\circ F$), jumlah uranium 238 ton, diameter *bed* 20 ft, dan tebal uranium dalam *bed* 1,8 ft; sedangkan kondisi operasi sistem adalah: kecepatan gas pada $42 \text{ lb}_f/\text{ft}^2$, suhu gas masuk $892^\circ F$, dan suhu *bed* pada $842^\circ F$.

ABSTRACT

DESIGN OF HYDROGEN STORING SUPPLY SYSTEM. Environmentally friendly energy conservation studies in the form of hydrogen utilization as a new energy are developed for storing and supplying hydrogen fuel for power plant application. Design work on a storing-supplying tank for hydrogen in the form of uranium hydride, UH_3 , for a power plant capacity of 100 MW, with a cylindrical shape and fixed-bed type where heat is transferred to or from the bed by a convective flowing stream of hot hydrogen in direct contact with the particles is presented. From the theoretical calculation of the fixed-bed storing-supplying hydrogen designed to generate power of 100 MW, with the basic assumptions of low and uniform hydrogen flowing, heat conduction at a rapid rate in transversal direction, it has been obtained that the bed diameter is 20 ft, uranium-bed thickness is 1.8 ft, corresponding to an amount of 238 tons uranium, and a hydrogen consumption rate of tons/h (at $77^\circ F$) is required; Meanwhile, operating conditions of the system specified are inlet gas rate at 42 lbs/h/sqft , at temperature $892^\circ F$, and bed temperature of $842^\circ F$.

PENDAHULUAN

Sudah lama disadari bahwa hidrogen merupakan salah satu energi alternatif yang sangat menjanjikan untuk periode dimasa mendatang karena sifatnya yang karib dengan lingkungan. Hanya saja sampai saat ini masih banyak dijumpai hambatan untuk memanfaatkannya. Salah satu diantara hambatan teknik yang dihadapi dalam pemanfaatan hidrogen sebagai bahan bakar adalah cara penyimpanannya. Ada tiga cara penyimpanan hidrogen yang dikenal yaitu dalam bentuk: [1]

1. Gas, dengan tangki bertekanan
2. Cair, dengan metode cryogenic
3. Padat, sebagai logam hibrida

Menyimpan hidrogen dalam jumlah yang sangat besar sebagai gas bertekanan memerlukan kontainer yang sangat besar dan berat. Sementara, menyimpannya dalam bentuk cair

akan memerlukan sistem super pendinginan yang kontinyu. Kemungkinan ketiga, yaitu dengan mengikatnya dalam bentuk ikatan kimia sebagai logam hidrida, tampaknya merupakan hal baru yang sangat menjanjikan karena ikatan kimianya dapat dibentuk dengan densitas tinggi dan dapat disimpan untuk jangka waktu lama tanpa memerlukan sistem pendinginan atau penekanan.

Sasaran studi awal ini adalah merancang sebuah tangki catu-simpan berbentuk silinder yang mampu membangkitkan daya sebesar 100 MW dengan menggunakan uranium sebagai sarana simpan dengan memperhatikan prinsip konveksi dinamik.

Reaksi kimia pengikatan hidrogen oleh uranium dapat dituliskan dengan reaksi sebagai berikut:



Uranium dipilih karena pertimbangan bahwa, seperti beberapa logam dan logam paduan lainnya, UH_3 dapat melakukan hidridasi dan dehidridasi secara spontan pada tekanan dan suhu relatif rendah, yaitu 1 atm dan 250-400 °C. Selain itu uranium menyerap hidrogen relatif besar seperti yang sudah ditunjukkan oleh hasil percobaan yang sudah dilakukan oleh para peneliti terdahulu [1,2,3,4].

Reaksi pembentukan uranium hidrida berlangsung spontan dan bersifat eksotermik. Diperlukan satu atau pemindahan panas ke/dari sistem satu-simpan selama proses hidridasi-dehidridasi berlangsung dan hal ini dapat dilakukan dengan suatu sistem penukar panas, baik berupa sistem penukar panas langsung maupun tak langsung. Makalah ini akan membahas sebuah model dengan sistem penukar langsung yang berarti mengontakkan secara fisik keduanya.

Latar belakang

Kinetika

Keberhasilan studi ini tergantung atas pengetahuan dasar tentang kinetika pembentukan senyawa hidrida dan dekomposisinya. Hingga saat ini informasi tentang studi sifat dinamik senyawa hidrida logam/logam-paduan sangat terbatas. Untungnya, informasi tentang UH_3 sangat mudah diperoleh, sementara Penulis juga melakukan sendiri percobaan hidridasi-dehidridasi dan data yang diperoleh mempunyai kontribusi untuk perhitungan dalam studi ini. Dari data dukung yang dikumpulkan dari beberapa kepustakaan akan dicoba dibuat sebuah model penyimpanan.

Termodinamika

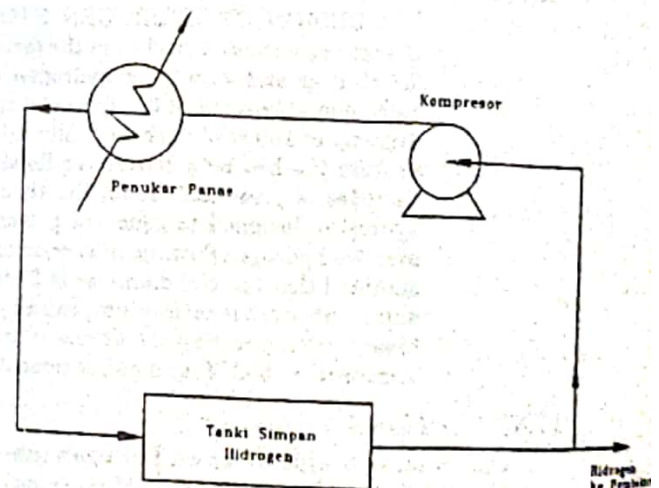
Berdasarkan hasil percobaan telah ditunjukkan bahwa sebagai akibat reaksi hidridasi-dehidridasi, uranium akan berubah dari bentuk padat pejal menjadi serbuk halus. Reaksi penyerbukan ini mudah dipahami karena selama proses berlangsung terjadi perubahan sifat fisis. Setelah beberapa siklus hidridasi-dehidridasi terlihat bahwa tidak terjadi lagi perubahan butiran yang berarti. Condon mengukur bahwa ukuran butir hasil hidridasi adalah $\pm 40 \mu\text{m}$ [11].

Sementara itu data sebelumnya menginformasikan bahwa reaksi pembentukan uranium hidrida berlangsung secara eksotermik dengan melepas sejumlah panas antara 30,3-31,5 kcal/gmole K [1,2,3,4].

Model Yang Diajukan

Dianggap bahwa senyawa hidrida yang akan disimpan adalah berbentuk serbuk. Seperti yang telah dilaporkan bahwa uranium akan berubah menjadi serbuk hidrida berukuran $\pm 40 \mu\text{m}$ selama hidridasi berlangsung, dan disimpan dalam wadah berbentuk silinder.

Model *convective bed* dengan sistem penukar panas langsung adalah model yang ingin dibuat. Panas yang diperlukan untuk membebaskan hidrogen dari logam hidrida dicatu oleh sirkulasi hidrogen panas, dipanaskan secara eksternal dalam suatu alat penukar panas, yang dikontakkan langsung dengan logam hidrida. Gambar 1 adalah konsep sistem yang dirancang. Keuntungan sistem ini adalah bahwa perpindahan panas menuju *bed* tidak dibatasi oleh konduktivitas termal seperti halnya sistem konduksi dan bahwa perancang dapat dilakukan dengan sistem yang sederhana.



Gambar 1. Konsep sistem yang dirancang.

Reaksi hidridasi berlangsung secara eksotermik sehingga selama pengisian bahan bakar hanya sedikit panas yang diperlukan, sedangkan reaksi dehidridasi adalah sebaliknya. Untuk maksud itu panas akan dipindahkan melalui salah satu ujung *bed* dan aliran berlangsung dari ujung *bed* panas menuju ujung *bed* dingin. Pembangkit panas direncanakan dari suatu alat penukar panas yang berfungsi memanaskan hidrogen sebelum dialirkan ke dalam sistem simpan. Tergantung dari kecepatan relatif per-

pindahan massa, panas, serta kinetiknya, zona reaksi bisa sempurna mencakup seluruh bed ataupun hanya sebagian saja.

Dalam makalah ini hanya dibahas sistem catu-simpan hidrogen saja dan tidak disinggung sistem penukar panas, kompresor, dan sebagainya.

Neraca panas dalam keadaan tak-seimbang (unsteady state) untuk fase gas dan fase padat dapat dihitung dengan persamaan yang diajukan oleh W.S. Yu, dkk. [5], yang digunakan pula oleh para peneliti di Brookhaven National Laboratory, USA, untuk sistem Fe-Ti, sebagai berikut :

Fase gas :

$$- C_g \frac{\delta (GT_g)}{\delta z} + 6h \frac{(1-\epsilon)}{D_p} (T_s - T_g) = \epsilon C_g \frac{\delta (T_g)}{\delta t} \quad (1)$$

Fase padat:

$$\frac{6h(1-\epsilon)}{D_p} (T_g - T_s) + k_z \frac{\delta^2 T_s}{\delta z^2} - (1-\epsilon) \Phi H = (1-\epsilon) [\rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t}] \quad (2)$$

dalam persamaan tersebut:

- C_g = kapasitas panas gas, BTU/lb °F
- C_s = kapasitas panas padatan, BTU/lb °F
- D_p = diameter serbuk, ft
- G = kecepatan alir gas, lb/j ft²
- H = panas reaksi hidrogen, BTU/lb H₂
- h = koefisien perpindahan panas, BTU/j °F ft
- k = konduktivitas termal, BTU/lb °F ft
- T_g = suhu gas °F
- T_s = suhu padatan, °F
- t = waktu, j
- ρ_s = kerapatan padatan, lb/ft³
- ϵ = waktu tak berdimensi
- Φ = kecepatan reaksi, jum. H₂/(waktu)(isi padatan), lb/j ft³

Kecepatan reaksi dianggap merupakan fungsi fase padat, T_s , rasio atom H per atom logam, H/M, dan tekanan hidrogen di dalam bed, P, yang dapat dinyatakan dengan formula :

$$\Phi = f(T_s, H/M, P) \quad (3)$$

Untuk menyelesaikan persamaan (1) dan (2) diterapkan beberapa asumsi untuk menyederhanakan permasalahan dan mempermudah perhitungan. Asumsi yang diterapkan adalah sebagai berikut :

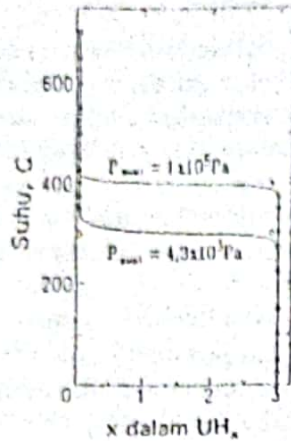
- hidrogen mengalir secara lamban dan merata
 - dinding terisolasi secara keseluruhan dengan suhu seragam
 - konduksi secara radial diabaikan
 - sifat fisis gas dan padatan tetap
 - konduksi panas antar serbuk terhadap permukaan serbuk adalah cepat,
- sedangkan kecepatan reaksi, pers. (3), dapat diperoleh dari data yang tersedia yang telah dilakukan oleh para peneliti terdahulu.

Untuk neraca gas dan logam uranium, perhitungan sederhana didasarkan atas kebutuhan teoritis hidrogen yang mampu membangkitkan daya sebesar 100 MW.

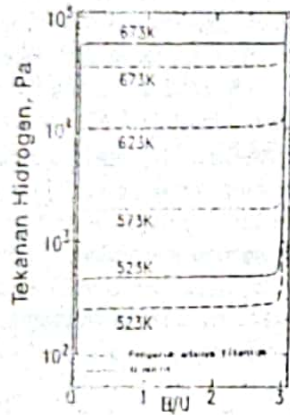
Profil distribusi suhu di dalam sistem telah diintroduksikan oleh Sneider [12] yang menghitung secara detil dengan pedoman bahwa perpindahan panas secara konveksi di permukaan sama dengan perpindahan panas secara konduksi di permukaan, dan memperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\frac{T - T_i}{T_\infty - T_i} = 1 - \operatorname{erf} x - \left[\exp\left(\frac{hx}{k}\right) + \left(\frac{h^2 \alpha \sigma}{k^2}\right) \right] \left[1 - \operatorname{erf}\left(x + \frac{h\sqrt{\alpha \sigma}}{k}\right) \right] \quad (4)$$

$x = k/(2\sqrt{\alpha \sigma})$, T_i = suhu awal padatan, dan T_∞ = suhu sekeliling. Persamaan (4) ini dapat diselesaikan dengan baik untuk padatan bentuk pelat, silinder, dan partikel berbentuk bola. Sementara itu data dukung lainnya yang diperlukan untuk perhitungan ini, selain diperoleh dari data pustaka [1,2,3,4,5,6] diberikan pula oleh Gambar 2 *history* absorpsi H₂ pada suhu bervariasi dan Gambar 3, desorpsi isothermik UH₃. Gambar 4a adalah pengukuran berat logam U selama hidridasi-dehidridasi, sedangkan Gambar 4b adalah kecepatan dekomposisi logam paduan Mg₂NiH₄, data yang tak ada hubungan dengan UH₃ tetapi ditampilkan dalam makalah ini dengan maksud sekedar untuk menggambarkan bahwa P proses hidridasi-dehidridasi U lebih cepat dibanding dengan Mg₂Ni.



Gambar 2. History absorpsi H₂ pada suhu bervariasi.



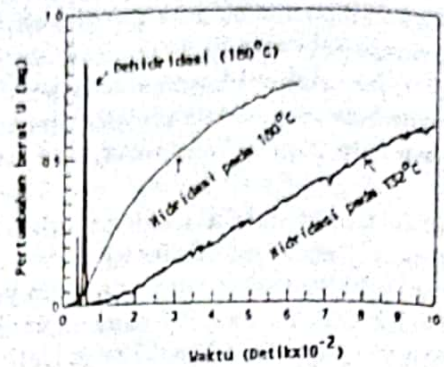
Gambar 3. Desorpsi isotermik UH₃

PEMBAHASAN

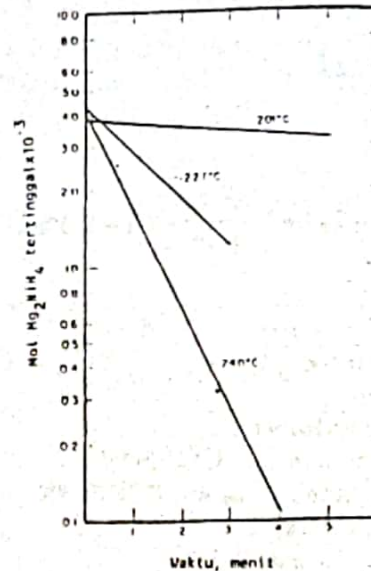
Dari persamaan tersaji terlihat bahwa pers. (1) dan pers. (2) sulit dipecahkan. Untuk itu diperlukan beberapa penyederhanaan untuk memecahkan secara numerik. Cara yang ditempuh adalah dengan mengasumsi bahwa kecepatan dehidridasi adalah konstan, kondisi menurut gas ideal, dan tekanan seragam. Dengan pendekatan ini maka ruas kanan pers. (1)

Tabel 1. Hasil Perhitungan

Hidrogen diperlukan, ton/j (pada 59 °F)	= 6
Uranium diperlukan, ton	= 238
Diameter bed, ft	= 20
Tebal bed, ft	= 1,8
Diameter partikel, D _p , ft	= 1,3 x 10 ⁻⁴
Fraksi kosong dalam bed	= 0,4
Tekanan bed, P _b , atm	= 1 atm
Suhu gas masuk, T _g , °F	= 892
Suhu bed, T _b , °F	= 842
Kecepatan gas, G, lb/j ft ²	= 42



Gambar 4a. Kecepatan hidridasi-dehidridasi uranium.



Gambar 4b. Kecepatan dehidridasi Mg₂NiH₄.

dan (2) adalah sama dengan nol, sehingga persamaan diubah menjadi bentuk persamaan diferensial sederhana. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 1.

Hasil perhitungan menunjukkan adanya keselarasan antara diameter dan tebal bed. Dengan diameter yang begitu besar maka luas permukaan bidang kontak antara uranium dengan hidrogen menjadi semakin besar, menjamin proses hidridasi-dehidridasi berjalan cepat.

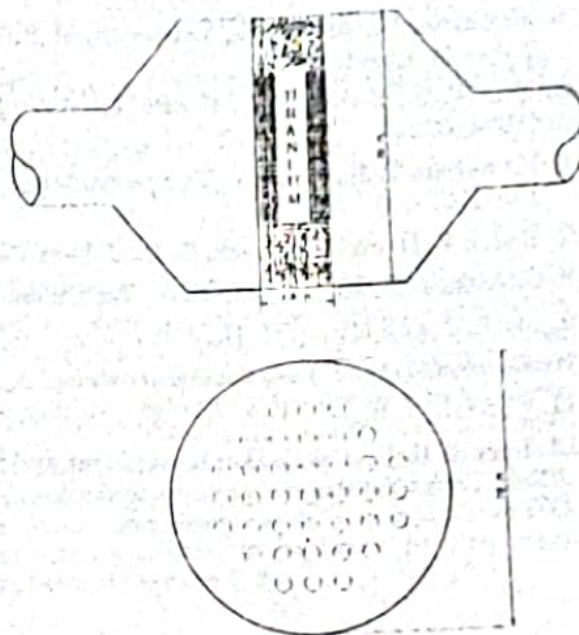
Selama hidridasi berlangsung suhu bed tidak harus dipertahankan pada 842 °F (450 °C) karena pada suhu tersebut tidak akan terjadi penyerapan hidrogen. Dengan referensi Gb. 2 dan Gb. 3, pada proses hidridasi, suhu 450 °C

hanya merupakan suhu awal. Dari gambar terlihat bahwa pada suhu 450 °C hidridasi belum berlangsung. Setelah suhu turun menjadi 425-250 °C hidridasi berlangsung dengan kecepatan yang bervariasi, yaitu semakin rendah suhu, semakin cepat proses hidridasinya. Sementara itu dehidridasi juga berlangsung pada suhu dan kecepatan yang bervariasi, yaitu semakin tinggi suhunya, kecepatan dehidridasi akan semakin besar pula. Berdasarkan data tersebut di atas, suhu 450 °C diambil sebagai suhu awal. Gambar 4a adalah kecepatan hidridasi-dehidridasi uranium yang diperleh oleh Condon. Dari gambar terlihat bahwa terdapat perbedaan kecepatan hidridasi dan dehidridasi, dimana dehidridasi berlangsung lebih cepat dibanding dengan hidridasi. Sebagai pembanding disajikan Gambar 4b, dekomposisi Mg_2NiH_4 yang diajukan oleh W.S. Yu, dkk. Di sini terlihat bahwa kecepatan hidridasi U lebih baik dibanding dengan Mg_2Ni , sehingga U mempunyai banyak kelebihan bila digunakan sebagai media simpan hidrogen.

Materi penyimpan dalam bentuk serbuk mempunyai keuntungan lebih dibanding dengan bentuk logam masif karena luas permukaan bidang kontak yang lebih besar akan menjamin proses hidridasi dan dehidridasi berlangsung dengan cepat. Lagi pula, ekspansi isi padatan logam hidrida selama proses hidridasi-dehidridasi tidak sedrastis kalau uranium berada dalam bentuk logam masif.

Perihal kondisi tangki simpan, kecepatan dehidridasi hidrogen merupakan fungsi kecepatan alir H_2 . Batas kecepatan maksimum dalam suatu sistem tangki simpan mungkin terjadi pada saat perpindahan panas menuju hidrogen yang dimasukkan ke dalam *bed*.

Variasi beban dinamik (perubahan secara mendadak akibat kebutuhan hidrogen) diatasi dengan luas permukaan *bed* pada suhu *plateau*. Seperti ditunjukkan oleh Gambar 2, reaksi pembentukan senyawa hidrida bersifat spontan membentuk UH_3 tanpa melalui hasil antara sebagai UH atau UH_2 , sedangkan dari Gambar 3 terbaca bahwa untuk uranium hidrida, suhu *plateau* hanya merupakan fungsi suhu dan tekanan saja. Dengan cara membiarkan tekanan *bed* turun selama suatu periode ketika kebu-



Gambar 5. Skema tangki catu-simpan yang dirancang.

tuhan hidrogen ditingkatkan, panas sensibel yang disimpan pada tangki *bed* menjadi tersedia tanpa harus menunggu tambahan catu gas panas dari luar.

Gambar 5, skema tangki catu-simpan yang dirancang, mempunyai beberapa lubang dengan maksud untuk mengurangi penurunan tekanan selama operasi dan tidak dimasukkan dalam perhitungan karena apabila hal itu dilakukan akan membuat perhitungan semakin kompleks. Untuk itu, perhitungan lebih teliti perlu dilakukan untuk penyempurnaan perancangan ini.

KESIMPULAN

Telah dilakukan perhitungan awal perancangan sebuah tangki catu-simpan hidrogen yang mampu mencatu tenaga setara 100 MW.

Perlu dilakukan perhitungan lebih teliti dengan menggunakan alat bantu komputer untuk menyempurnakan hasil perhitungan. Penelitian lebih lanjut dalam bentuk permodelan perlu dilakukan untuk membandingkan hasil perancangan dengan kondisi yang lebih realistik.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kats, J. J. and Rabinowitch, E., The Chemistry of Uranium, Dover, New York (1951) 183-213.
2. Libowitz, G. G. and Gibb, T. R. P., Jr., J. Phys. Chem., 61 (1957) 793.
3. Cordfunke, E. H. P., The Chemistry of Uranium, Elsevier, Amsterdam (1969) 59-62.

4. Suwarno, H., Anada, K., Yamawaki M., Sifat Penyerapan hidrogen logam uranium, Atom '94, Tokyo (4 Maret 1994).
5. Yu, W. S., Suuberg, E. Waide, C., Proc. Hydrogen energy, Part A, Miami Beach, Florida, (1974) 621.
6. Flanagan, T. B., Hydride for energy Storage, Proc. Intern'l. Symp. Norway (14-19 August 1977) 135-150.
7. Godel, P. D. and Sandroek, G. D., J. Less-Common Metals, 73 (1980) 135-142.
8. Condon, J. B. and Larson, E. A., J. of Chem. Physics, Vol. 59, No. 2 (1973) 855-865.
9. Bloch, J. and Mintz, M. H., J. Less-common metals, 81 (1981) 301-320.
10. Condon, J. B., J. Less common metals, 73 (1980) 105-112.
11. Condon, J. B., J. Less common metals, 90 (1983) L9-L11.
12. Eckert, R. G. and Drake, R. M., Heat and Mass Transfer, McGraw Hill Book Company, Inc., New York (1969).