

Metal-Hidrid Yataklarda Hidrojen Depolanmasının Sayısal Analizi

Kemal ALDAŞ

*Niğde Üniversitesi, Aksaray Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
68100, Aksaray-TÜRKİYE*

Mahmut D. MAT

*Niğde Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,
51100, Niğde-TÜRKİYE*

Geliş Tarihi 28.03.2001

Özet

Bu çalışmada; metal-hidrid yataklarda hidrojen depolanması sayısal olarak incelenmiştir. Matematiksel model depolama sırasında meydana gelen ısı ve kütle transferi ve kimyasal reaksiyonu içermektedir. Depolama sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyon ekzotermik bir reaksiyon olduğu için yatak ısınmaktadır. Sayısal sonuçlar hidrojen absorpsiyonunun soğutulan cidar civarında kısa zamanda, merkez bölgesinde ise metal yatağın ısı iletkenlik katsayısı düşük olduğu için daha uzun zamanda gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Bu çalışmada, metal-hidrid oluşumu esnasında hidrid yataktaki sıcaklığın zamana göre değişimi ile H/M oranının dağılımları ve tankın değişik bölgelerindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Ortalama H/M oranı literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve bulunan sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Sözcükler: Metal-hidrid yatak, Depolama, Hidrojen absorpsiyonu, Matematiksel modelleme

Numerical Analysis of Hydrogen Storage in Metal-Hydride Beds

Abstract

In this study, hydrogen absorption in a metal-hydride bed is numerically investigated. The mathematical model considers the heat and mass transfer and the chemical reaction that take place during the absorption. The hydride bed heats up due to the exothermic reaction.

Numerical results show that hydrogen absorption is completed faster near the cooled wall, while it takes longer at the center. Hydriding processes are investigated with the temperature histories, H/M ratio and temperature distributions at several locations in the tank. The estimated H/M ratio is found to agree satisfactorily with the experimental data in the literature.

Key Words: Metal-Hydride Bed, Storage, Hydrogen absorption, Mathematical model

Giriş

Son yıllarda fosil yakıtların azalması ve çevreye zararları nedeniyle alternatif yakıt olarak düşünülen hidrojen üretimi, depolanması, taşınması ve kullanılması üzerinde birçok çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar arasında hidrojen depolanmasındaki

araştırmalar çok önem kazanmaktadır. Çünkü hidrojen depolama, hidrojen kullanımında maliyet yönünden önemli bir yük getirmektedir. Hidrojen depolama metotlarından biri olan metal –hidrid yatakları endüstrinin, ısıtma, soğutma, ısı pompası, ısı makinesi ve otomotiv gibi alanlarında

kullanılmaktadır. Metal-Hidrojen reaktörlerinde hidrojenin emilmesi ve bırakılması esnasında ısı transferinin ve kütle akışının bilinmesi hidrojen reaktörlerinin optimizasyonlarında çok önemlidir.

Suda ve Kobayashi(1980) çalışmalarında $TiMn_{1.5}$ - hidrid için yapılan deneysel sonuçlardan gazların denge şartlarını ve kinetik teori denklemlerini kullanarak efektif ısı transfer katsayısının basınçla ilgili $(K_e)_p$ ve hidrojenin kompozisyonuyla ilgili $(K_e)_H/M$ parametrelerine bağlı olduğu bir korelasyon geliştirmişlerdir.

Mayer ve arkadaşları(1986) çalışmalarında metal-hidrid kafesleri için zamana bağlı ısı ve kütle transferini içeren bir matematik model geliştirmişler ve deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Bu model konvektif etkileri içermemektedir, oysa konvektif terim metal-hidrid kafeslerine yüksek basınçla hidrojen emdirilmesinde önem kazanmaktadır.

Domschke ve arkadaşları(1989) çalışmalarında değişik metal alaşımlı hidridlerde hidrojen gazını ideal gaz ve alaşımları homojen kabul ederek farklı sıcaklık ve farklı hidrojen basınçlarında ölçümler yapmışlardır.

Sun ve Deng(1989) çalışmalarında $TiMn_{1.5}$ -hidrid kafeslerinde ısı transferinin hesaplarında kullanılan efektif ısı transfer katsayısının basınç ve hidrojen konsantrasyonuna bağlı olduğu teorik bir model geliştirmişlerdir. Bu modelden elde ettikleri efektif ısı transfer katsayısı için deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlar ve efektif ısı transfer katsayısını artırmak için boşluk oranının azaltılıp, partiküllerin iletkenliğinin yükseltilmesi gerektiğini aynı zamanda, hidrojen basıncının ve sıcaklığının yüksek olması gerektiğini belirtmişlerdir.

Khristenko ve Tomilin(1993) çalışmalarında metal-hidrid sistemi için tek boyutlu zamana bağlı matematik model geliştirmişlerdir. Gaz borular için havanın nüfuz etme ve konsantrasyon karakteristik dağılımını açıklayarak, yatay ve düşey borularda deneyler yapmışlardır. Deneyler sonucunda yatay tüp içine havanın nüfuz etme derinliğinin düşey tüpe nazaran daha fazla olduğunu belirlemişlerdir.

Gopal ve Murthy (1995a), $MmNi_{4.5}Al_{0.5}$ alaşımından yapılmış metal-hidrid kafesinin hidrojen emilmesi ve bırakılmasında değişik soğutucu akışkan sıcaklığı etkisini deneysel ve nümerik olarak araştırmışlar ve hidrojen emilmesinin düşük soğutucu akışkan sıcaklığında arttığını bulmuşlardır. Gopal ve Murthy (1995b) diğer çalışmalarında ise metal-hidrid soğutucularının performansına yatak kalınlığı, efektif ısı iletkenlik ve soğutucu

sıcaklığının etkilerini inceleyerek optimum efektif ısı iletkenliğinin kafes kalınlığının artmasıyla arttığını belirtmişlerdir.

Jemni ve Nasrallah(1995a,1995b,1997c) yaptıkları bir dizi çalışmada; metal-hidrid kafeslerinde hidrojenin emilmesi ve ayrılması esnasındaki ısı ve kütle transferlerini ve kimyasal reaksiyonları içeren matematik modeller geliştirmişlerdir. Yatakla hidrojen gazı arasındaki ısı denge kabulünün hidrojen emme durumlarında geçerli olduğu, buna karşın hidrojeni bırakma durumlarında soğuma yüzeylerine yakın bölgelerde bu kabulün doğru olmadığı ve ayrıca konvektif terimlerin ihmal edilebilir olduğunu göstermişlerdir.

Jemni ve Nasrallah'ın(1995a,1995b,1997c) matematik modeli hidrojen absorpsiyonu ve metal-hidrid oluşumunun incelenmesi için iyi bir teorik altyapı oluşturmasına rağmen deneysel sonuçlarla karşılaştırma yapmamışlardır.

Bu çalışmanın amacı Jemni ve Nasrallah'ın(1995a,1995b,1997c) matematik modelini kullanarak metal-hidrid oluşumunu sayısal olarak incelemek ve sonuçları literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırmaktır.

Matematik Model

Metal-hidrid oluşumu için Şekil 1'de gösterilen bir tankta incelenmiştir. Bu sistem, sayısal sonuçları karşılaştırabilmek için Mayer ve arkadaşlarının(1987) kullandığı deney düzemesinin aynısı kullanılmıştır. Yatak 23 mm çapında ve 305 mm uzunluğunda alınmıştır. Yatak gözenekli $LaNi_5$ alaşımından yapılmış ve hidrojen tankın altından 4,5 bar basınçla şarj edilmektedir. Sistem z eksenine göre simetri olduğundan sadece sistemin yarısı çözülmüştür.

Metal-hidrid yataklarda hidrojen absorpsiyonu karakterize eden diferansiyel denklemler aşağıda verilmiştir.

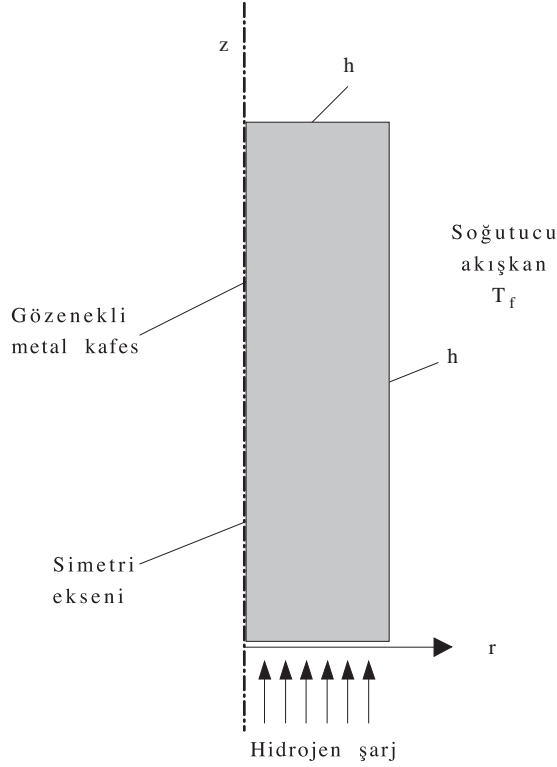
Enerji denklemi

Metal-hidrid yatak ile hidrojenin ısı dengede olduğu kabul edilerek enerji denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmiştir.

$$(\rho C_{ps})_e \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \lambda_e \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda_e \frac{\partial T}{\partial z}) - \dot{m} (\Delta H^0 - T (C_{pg} - C_{ps})) \quad (1)$$

Burada ρ , C_p , λ_e sırasıyla; efektif yoğunluk, özgül ısı ve ısı iletkenlik katsayısıdır. $(\rho C_p)_e$ terimi aşağıdaki denklemden hesaplanır.

$$(\rho C_p)_e = (\varepsilon \rho_g C_{pg} + (1 - \varepsilon) \rho_s C_{ps}) \quad (2)$$



Şekil 1. Sayısal çalışmada kullanılan fiziki model ve koordinat sistemi.

Burada, ε gözeneklilik oranını göstermektedir. Efektif ısı iletkenlik katsayısı ise;

$$\lambda_e = \lambda_g + \lambda_s \quad (3)$$

denklemleriyle ifade edilmiştir. Burada λ_g gaz fazı ve λ_s ise katı faz ısı iletkenlik katsayılarıdır.

Hidrojen kütle dengesi

$$\varepsilon \frac{\partial(\rho_g)}{\partial t} = -\dot{m} \quad (4)$$

Bu denklemde \dot{m} absorbe edilen hidrojen debisini göstermektedir.

Hidrojen ideal gaz kabul edilerek, basıncın hesaplanmasında $P_g = \rho_g T_g R / M_g$ ideal gaz denklemi kullanılmıştır. Burada R evrensel gaz sabiti ve M_g ise hidrojenin molekül ağırlığıdır.

Katı fazın kütle dengesi

Katı faz kütle dengesi aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial(\rho_s)}{\partial t} = \dot{m} \quad (5)$$

Reaksiyon kinetiği

Jemni ve Nasrallah(1995) hidrojen absorpsiyon miktarının reaksiyon hızıyla doğrudan ilgili olduğunu açıklamışlar ve bunu aşağıdaki denklemle ifade etmişlerdir.

$$\dot{m} = -C_a \exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right) \ln\left(\frac{P_g}{P_{eq}}\right) (\rho_{ss} - \rho_s) \quad (6)$$

Burada C_a malzemeye bağlı sabit, ρ_{ss} katı fazın doymuş durumdaki yoğunluğu ve P_{eq} denge basıncı olup, aşağıdaki van't Hoff denklemi kullanılarak bulunacaktır.

$$\ln P_{eq} = A - \frac{B}{T} \quad (7)$$

Burada A ve B malzeme sabitleridir ve değerleri Groll ve arkadaşlarının (1986) deneysel çalışmalarında $A=88,016$ $B=24225,2$ alınmıştır. Termofizik özellikler ve sayısal çalışmada kullanılan veriler Tablo 1 de verilmiştir.

Başlangıç ve sınır şartları

Başlangıçta hidrid kafesinin her tarafının aynı sıcaklıkta ve basınçta olduğu kabul edilerek, hidrojen $r=0$ da sabit basınçta şarj edilmektedir. Hidrid kafesinin çevresi, bir soğutucu akışkanla soğutulmaktadır. Yatak cidarı ile soğutucu akışkan arasındaki ısı transfer katsayısı sabit olarak alınmıştır. Buna göre başlangıç ve sınır şartları aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$t = 0 \text{ da} \quad (8)$$

$$P = P_o, \quad T = T_o$$

$$t > 0 \text{ da} \quad (9)$$

$$P(r, 0) = P, T(r, 0) = T_o$$

$$\frac{\partial P(0, z)}{\partial r} = 0, \quad \frac{\partial T(0, z)}{\partial r} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial P(r, H)}{\partial z} = 0, \quad \frac{\partial T(r, H)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

$$k \frac{\partial T(R, z)}{\partial r} = h(T - T_f) \quad (12)$$

$$\frac{\partial P(R, z)}{\partial r} = 0 \quad (13)$$

Sayısal Metot

Genel denklemler PHOENICS(Rosten,1986) programı yardımıyla sayısal olarak çözülmüştür.

PHOENICS programında olayları karakterize eden denklemler tamamen implicit olarak kontrol hacim yöntemi ile çözülmüştür. Bu yöntemde diferansiyel denklemler sonlu bir kontrol hacimde integre edilir. PHOENICS programı temel olarak aşağıdaki denklemleri çözmektedir.

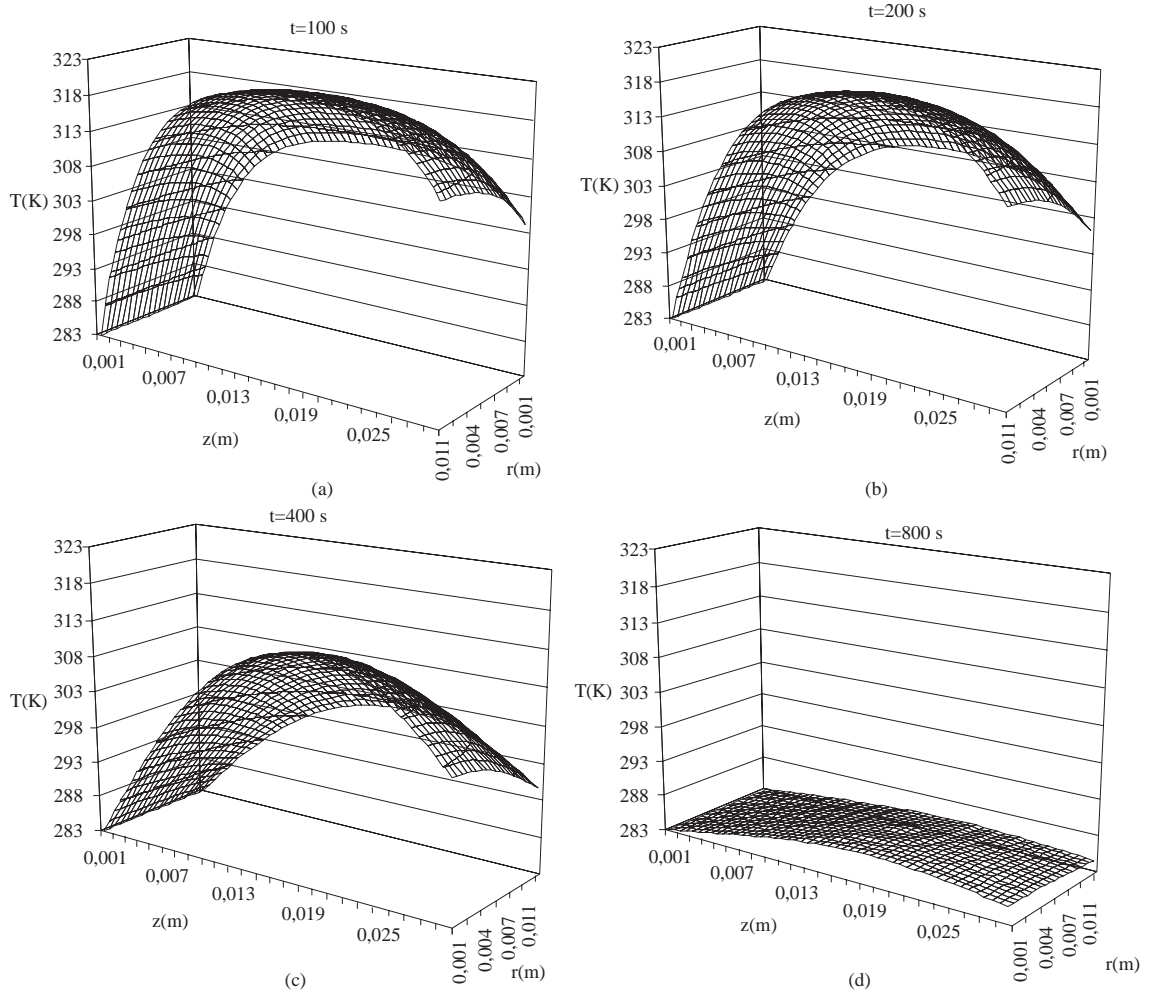
$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \nabla(u\phi) = \nabla(\Gamma\nabla\phi) + S \quad (14)$$

Burada ϕ çözüm için kullanılan (T, v, w, ρ_s, ρ_g gibi) genel değişkendir. S de kaynak terimini ifade etmektedir. PHOENICS programının avantajı gerekli olan fakat program içerisinde olmayan denklemleri uygun bir programla ana programa ilave edilmesidir. Denklemin çözümünde bir hücreden bağımsızlık testi uygulanmış ve çözüm alanı r ve z yönlerinde sırasıyla 30 ve 50 hücreye bölünmüştür.

Sonuçlar

Metal hidrid yatakta hidrojen absorpsiyonu, genel olarak, çeşitli zamanlarda yatak içindeki sıcaklık dağılımı, oluşan hidridin metale oranı (H/M) dağılım grafikleriyle açıklanmıştır.

Metal-hidrid yatak hidrojen şarj edilmeden önce $T_i = 283$ K sıcaklığında olduğu kabul edilmiştir. Yatak üst ve yan yüzeylerden soğutulmuştur. Şekil 2'de 100, 200, 400 ve 800 saniye sonundaki sıcaklık dağılımları görülmektedir. Depolama sırasında meydana gelen reaksiyon, ekzotermik bir reaksiyon olduğu için yatak ısınmaktadır. Şekil 2a'da görüldüğü gibi 100 saniye sonunda yatak merkezinde sıcaklık 321 K'e kadar yükselmektedir. Yatak girişinde ve soğutma yüzeylerinde sıcaklık daha düşük olmaktadır. Metal-hidrid yatağının ısı



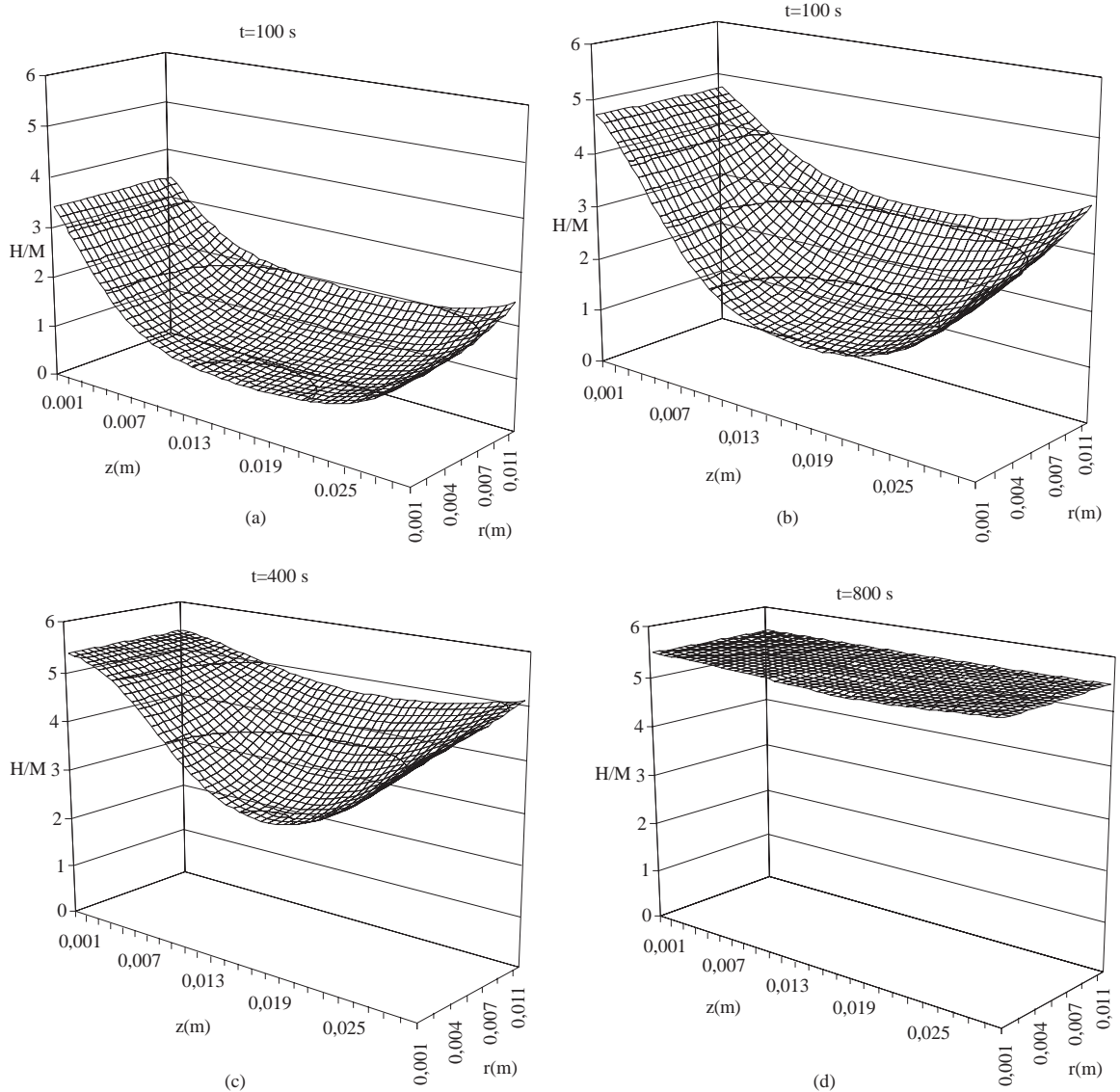
Şekil 2. Metal-hidrid yatakta belirtilen zamanlara göre sıcaklık değişimi. ($T_i=283$ K, $P_i=4,5$ bar)

iletim katsayısı düşük olduğundan reaksiyon sonucu açığa çıkan ısının atılması zaman almaktadır. Şekil 2b ve Sekil 2c de görüldüğü gibi $t=200$ ve 400 saniye

sonra tüm yataktaki sıcaklık düşmeye devam etmektedir. Fakat yatak merkezindeki sıcaklık hala yatak yüzey sıcaklığından daha yüksektir. Buda özellikle merkez bölgesinde kimyasal reaksiyonun devam ettiğini göstermektedir. $t=800$ saniye için sıcaklık profili Sekil 2d' de gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yataktaki sıcaklık oldukça düşmüştür ve yatak içindeki sıcaklık gradyenti azalmıştır. Bunun sebebi metal doyma durumuna yaklaşması ve kimyasal reaksiyonun çok yavaşlamasıdır. Fakat

yatak merkezinde hala azda olsa ısı üretimi mevcuttur.

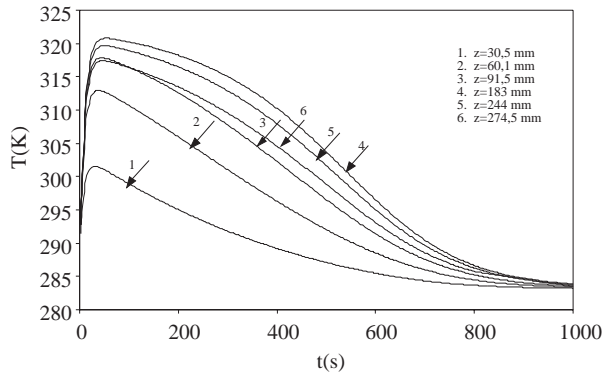
Şekil 3'de değişik zaman aralıklarında Hidrid/Metal (H/M) değişimi verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü gibi soğuk yüzeylerde H/M oranı yüksek olmaktadır. Yatak merkezi civarında ise, sıcaklık yüksek olduğundan H/M oranı daha düşük olmaktadır. Bunun nedeni sıcaklığın artmasıyla reaksiyon hızının azalmasıdır. Bu durum Denklem 6 ile açıklanabilir. Denklemden hidrid oluşumunda etkili parametreler denge basıncı ve sıcaklık olduğu görülmektedir. Bu denklemdeki $\exp\left(-\frac{E_a}{RT_s}\right)$ teriminden dolayı sıcaklık artması ile hidrojen miktarının



Şekil 3. Metal-hidrid yataкта değişik zamanlarda H/M oranı dağılımı. ($T_i=283$ K, $P_i=4,5$ bar)

artması beklenir. Fakat aynı denklemdeki $\ln\left(\frac{P_g}{P_{eq}}\right)$ teriminde bulunan P_{eq} ise sıcaklıkla artmakta dolayısıyla hidrid oluşumunu önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu sonuç emilen hidrojen miktarında etkili parametre denge basıncı olduğunu ortaya koymaktadır. $t=100$ s de (Şekil 3a) H/M oranı kafes girişinde ortalama olarak 3,4 ve soğutulan yüzeylerde ise 2,9 olmaktadır. $t=200$ s 'ye (Şekil 3b) ulaştığında H/M oranı kafes girişinde 4,8 soğutulan yüzeylerde 4,3 olmaktadır. $t=400$ s olduğunda (Şekil 3c) H/M oranı reaksiyon kafesinin girişinde ve soğutulan yüzeylerde birbirine yaklaşmaktadır ve 5,45 olmaktadır. Şekil 3d' de görüldüğü gibi 800 s zamanlarda kafes girişinde ve yüzeylerde hidrid oluşumu büyük ölçüde tamamlanmıştır.

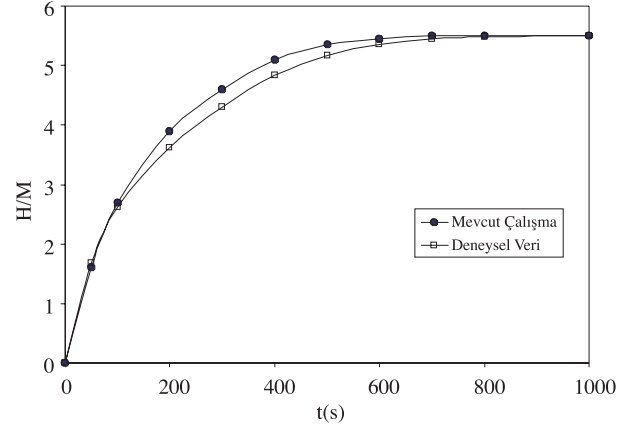
Şekil 4'de reaksiyon kafesinin girişinden ($z=0$) kafes boyunca altı değişik yerdeki sıcaklık dağılımının zamana göre değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi yatakta ilk sıcaklığı 283 K olmasına rağmen hidrojen metalin şarj edildikten kısa bir süre sonra yatakta sıcaklık aniden yükselmektedir. Bunun sebebi metalin hidrojenle ilk anda hızlı bir şekilde kimyasal reaksiyona girmesidir. Zaman arttıkça metal-hidrid kafesinin sıcaklığı düşmektedir. Şekil 4 de görüldüğü gibi $z=183$ mm de sıcaklık en yüksek değere ulaşmaktadır. Bunun sebebi reaksiyon kafesi çevresinden soğutulmakta olduğundan kafesin orta kısımlarında sıcaklık değeri daha yüksek olmaktadır. Bu durum Gopal ve Murthy'nin(1995) yaptığı deneylerde de gözlenmiştir.



Şekil 4. Hidrid yatakta değişik noktalarda hesaplanan zamana göre sıcaklık dağılımı. ($T_i=283$ K, $P_i=4,5$ bar)

Değişik zaman aralıklarında ortalama H/M değişimi Şekil 5'de verilmiştir. Hesaplanan sonuçlar

Mayer ve arkadaşlarının(1987) yaptıkları deney sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyum içinde olduğu görülmüştür. Şekilde görüldüğü gibi zaman arttıkça ortalama H/M oranı belli bir değere kadar artmakta, 800 saniye sonunda ise değişmemektedir. Buda yaklaşık 800 saniye sonunda hidrid oluşumunun tamamlandığını göstermektedir.



Şekil 5. Sayısal olarak elde edilen ortalama H/M oranı ile deneysel sonuçların karşılaştırılması.

Sonuç

Bu çalışmada metal-hidrid yatakta hidrojen depolanması sayısal olarak incelenmiştir. Kullanılan matematiksel model hidrid oluşumu sırasında gerçekleşen kompleks ısı kütle transferi ve kimyasal reaksiyon içermektedir. Hidrid oluşumu, metal-hidrid yatağın içindeki sıcaklık ve H/M oranı dağılımları ve sıcaklık-zaman ve H/M oranı-zaman grafikleri yardımıyla incelenmiştir.

Nümerik sonuçlar, hidrid oluşumunda en önemli parametrenin denge basıncı olduğunu göstermektedir. Denge basıncı sıcaklıkla artmaktadır. Kimyasal reaksiyon sonucu oluşan ısı yatakta sıcaklığın artmasına neden olmaktadır. Hidrid oluşumunun soğutulan yüzeylere yakın bölgelerde (denge basıncı düşük olduğu için) yüksek, merkeze yakın bölgelerde de yavaş gerçekleşmektedir. Metal-hidrid yatağının ısı iletim katsayısı düşük olduğu için özellikle kimyasal reaksiyonun hızlı olduğu ilk zamanlarda yatakta merkezle cidar arasında önemli ölçüde sıcaklık gradyenti olduğu görülmüştür. Sayısal olarak hesaplanan H/M oranı literatürdeki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve bulunan sonuçların uyum içinde olduğu görülmüştür.

Tablo 1. Metal ve hidrojen termofizik özellikleri ve hesaplamalarda kullanılan değerler

	Metal(LaNi ₅)	Hidrojen
Yoğunluk, ρ (kg m ⁻³)	:4230	:0,838
Özgül ısı, C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	:419	:14,89
Isı iletkenlik katsayısı, λ (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	:1,6	:0,761147 10 ⁻⁴
Isı transfer katsayısı, h (Wm ⁻² K ⁻¹)	:500	
Gözeneklilik, ε (%)	:50,5	
Aktivasyon enerjisi, E_a (Jmol ⁻¹)	:25817	
Üniversal gaz sabiti, R (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	:8,13	

Semboller

C_P	özgül ısı(J kg ⁻¹ K ⁻¹)
E_a	aktifleşme enerjisi(J mol ⁻¹)
ΔH°	reaksiyon ısısı(J kg ⁻¹)
H/M	hidrit - metal konsantrasyon oranı (kg hidrojen/kg metal)
m	emilen hidrojen miktarı(kg m ⁻³ s ⁻¹)
M	molekül ağırlığı(kg mol ⁻¹)
P	basınç (Pa)
R	evrensel gaz sabiti(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
T	sıcaklık(K)
t	zaman(s)

ε	gözeneklilik
λ	ısı iletkenlik(W m ⁻¹ K ⁻¹)
μ	dinamik viskozite(kg m ⁻¹ s ⁻¹)
ρ	yoğunluk(kg m ⁻³)

Alt indisler

e	efektif
eq	denge
g	gaz
i	ilk
s	katı

Kaynaklar

Domschke, T., Schütt, E., and Hass, I. R., "Research on Kinetics of Hydrogen Sorption in Low Temperature Metal Hydrides", Int. J. Hydrogen Energy, 14(9), 671-676, 1989.

Gopal, M.R., and Murty, S.S., "Prediction of Metal-Hydride Refrigerator Performance Based on Reactor Heat and Mass Transfer", Int. J. Hydrogen Energy, 20(7), 607-614, 1995.

Gopal, M.R., and Murty, S.S., "Studies on Heat and Mass Transfer in Metal Hydride Beds", Int. J. Hydrogen Energy, 20(11), 911-917, 1995.

Groll, M., Supper, W., Mayer, U., and Brost, O., "Heat and Mass Transfer Limitations in Metal Hydride Reactions Beds", World Science Press, Beijing, China, 1986.

Jemni, A., and Nasrallah, S.B., "Study of Two-Dimensional Heat and Mass Transfer During Absorption in a Metal-Hydrogen Reactor", Int. J. Hydrogen Energy, 20(1), 43-52, 1995.

Jemni, A., and Nasrallah, S.B., "Study of Two-Dimensional Heat and Mass Transfer During Desorption in a Metal-Hydrogen Reactor", Int. J. Hydrogen Energy, 20(7), 881-891, 1995.

Jemni, A., and Nasrallah, S.B., "Heat and Mass Transfer Models in Metal-Hydrogen Reactor", Int. J. Hydrogen Energy, 22(1), 67-76, 1997.

Khristenko, Y., and Tomilin, V., "Safe Operating Conditions Research For Hydrogen Systems With Gas Venting", Int. J. Hydrogen Energy, 18(11), 953-957, 1993.

Mayer, U., Groll, M., and Supper, W., "Heat and Mass Transfer in Metal Hydride Reaction Beds: Experimental and Theoretical Results", Journal of the Less-Common Metals, 131, 235-244, 1987.

Patankar, S. V., "Numerical Heat and Mass and Fluid Flow", Hemisphere, Washington, 1980.

Rosten, H., and Spalding, D. B., "Phoenix Manual", CHAM, TR/1000, London, UK. 1986.

Suda, S., and Kobayashi, N., "Thermal Conductivity in Metal-Hydride Beds", Int. J. Hydrogen Energy, 6(5), 521-528, 1981.

Sun, D., and Deng, S., "A Theoretical Model Predicting the Effective Thermal Conductivity in Powdered Metal Hydride Beds", Int. J. Hydrogen Energy, 15(5), 331-336, 1990.