Kişilik,
enerjiyi yönetebilme ve
verimli kullanabilme kabiliyetinin
bir göstergesidir

(A. Midilli)

SUMMER COURSE ON EXERGY AND ITS APPLICATIONS
June 20-22, 2013, Karabük-Turkey

Exergy Analysis of Hydrogen Compression and Storage Systems

M. Ozsaban[1], A. Midilli[1], I. Dincer[2]

1 Energy Division, Mechanical Eng. Dept. RTEÜ, 53900, Rize, Turkey
2 Faculty of Engineering and Applied Science, University of Ontario Institute of Technology, 2000 Simcoe Street North, Oshawa, Ontario L1H 7K4, Canada

Sosyal entropinin en büyük düşmanları: Saygı, sevgi, disiplin ve mütevaziliktir!

İçerik

1. Çalışmanın amacı
2. Hidrojen gazı sıkıştırma kompresörleri
3. Yüksek basınçlı hidrojen depoları
4. Tek aşamalı depolama sisteminin ekserji analizi
5. Çok aşamalı depolama sisteminin ekserji analizi
6. Sonuçlar ve tartışma

Çalışmanın Amacı

Hidrojen gazının tek aşamalı ve çok aşamalı sıkıştırılması ve depolama işleminin ekserji analizi

Motivasyon

Analiz Adımları

-Sistemin çalışma prensibini ve içeriğini anlamak,

-Uygulanacak analiz tekniğini belirlemek (deneysel, analitik veya nümerik)

-Uygun termodinamik çalışma sistemi seçmek (Kapalı veya açık sistem)

-Açık sistem durumunda sistemin termodinamik türünü belirlemek

-Kontrol kütlesi veya kontrol hacmi ve sistem sınırlarını belirlemek

-Uygun termodinamik kabuller yapmak

-Referans ortamı seçmek ve referans ortamın şartlarını belirlemek

-Sistemin çalışma şartlarını belirlemek

-Sistemde etkili olan parametreleri belirlemek ve gruplamak

-Sistemdeki iş, ısı ve kütle etkileşimlerini göstermek

-Genel termodinamik denge bağıntılarını yazmak (enerji/ekserji/entropi)

Analiz için gerekli parametrelere ait verileri doğru bir şekilde ölçmek ve listelemek

-Analiz için gerekli olan tablo veya grafik değerleri doğru bir şekilde belirlemek

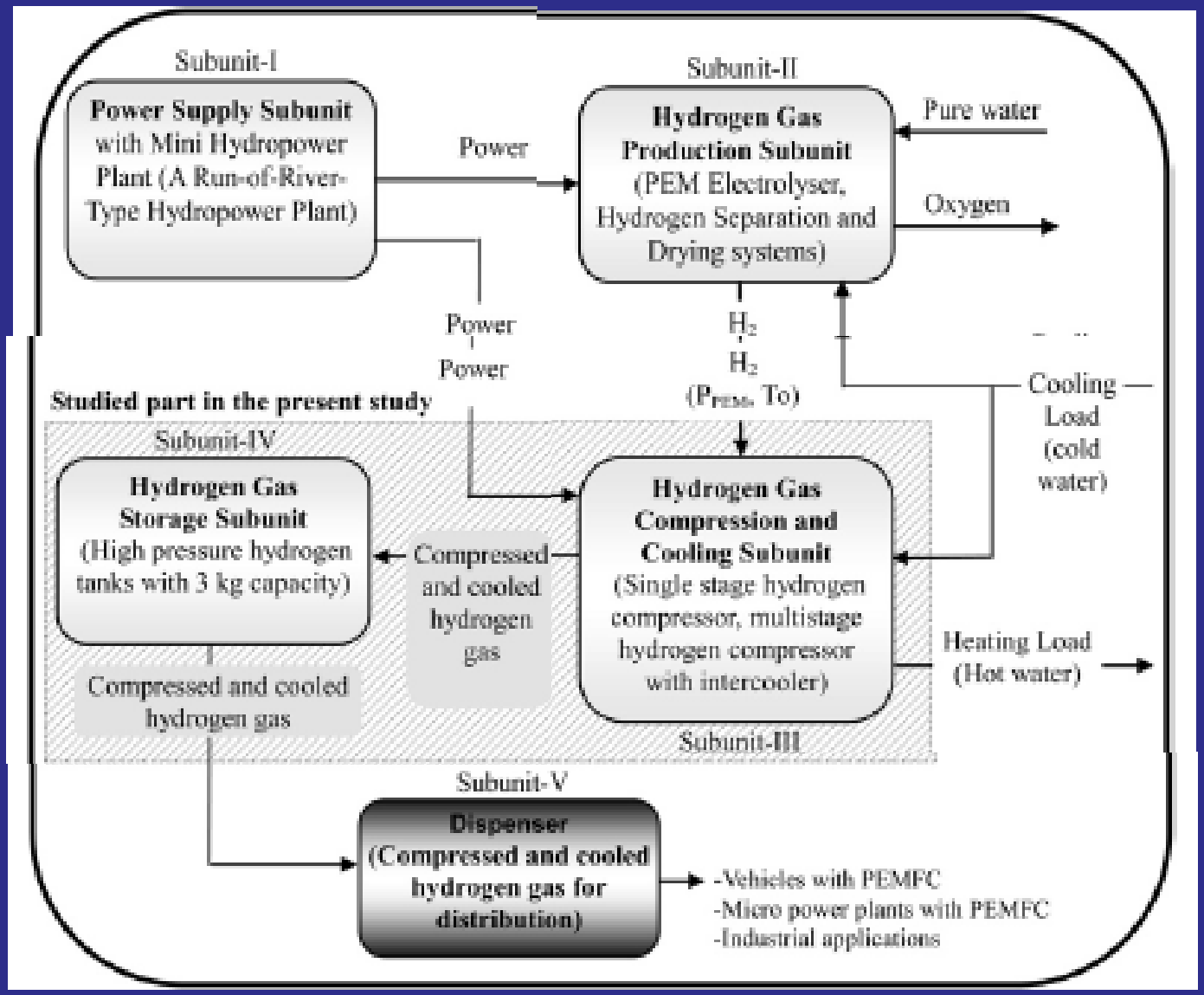
-Enerji ve ekserji ile ilgili büyüklükleri hesaplamak

-Mümkünse exergy band diyagramını çizmek

-Sonuçlar kontrol etmek, değerlendirmek, yorumlamak ve uygulamaya koymak

Sistemi tasarlamak, çalışma prensibini ve içeriğini anlamak,

Introduction- How to design a Micro HIGHPASS



Please cite this article in press as: Ozsaban M, et al., Exergy analysis of a high pressure multistage hydrogen gas storage system, International Journal of Hydrogen Energy (2011), doi:10.1016/j.ijhydene.2011.03.087

Fig. 1. A schematic illustration of a micro HIGHPASS' operation principle.

Sistemin termodinamik türünü belirlemek,

Bir Mikro HIGHPASS'ı Oluşturan Temel Elemanlar

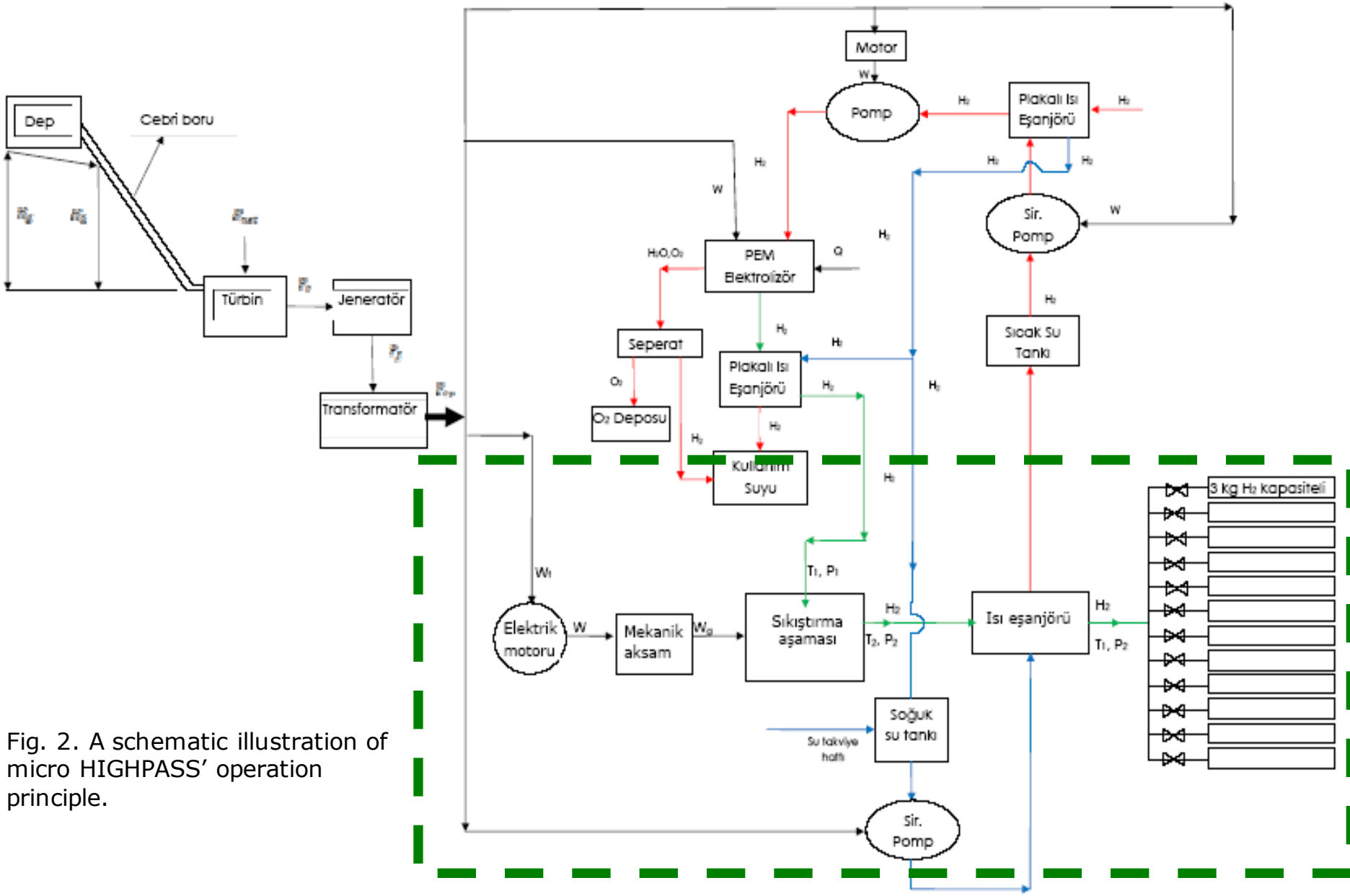


Fig. 2. A schematic illustration of micro HIGHPASS' operation principle.

Sistemin kontrol hacmini ve kontrol sınırlarını belirlemek ve parametrik etkileşimi ortaya koymak

Control Volume of Single stage compression and storage process

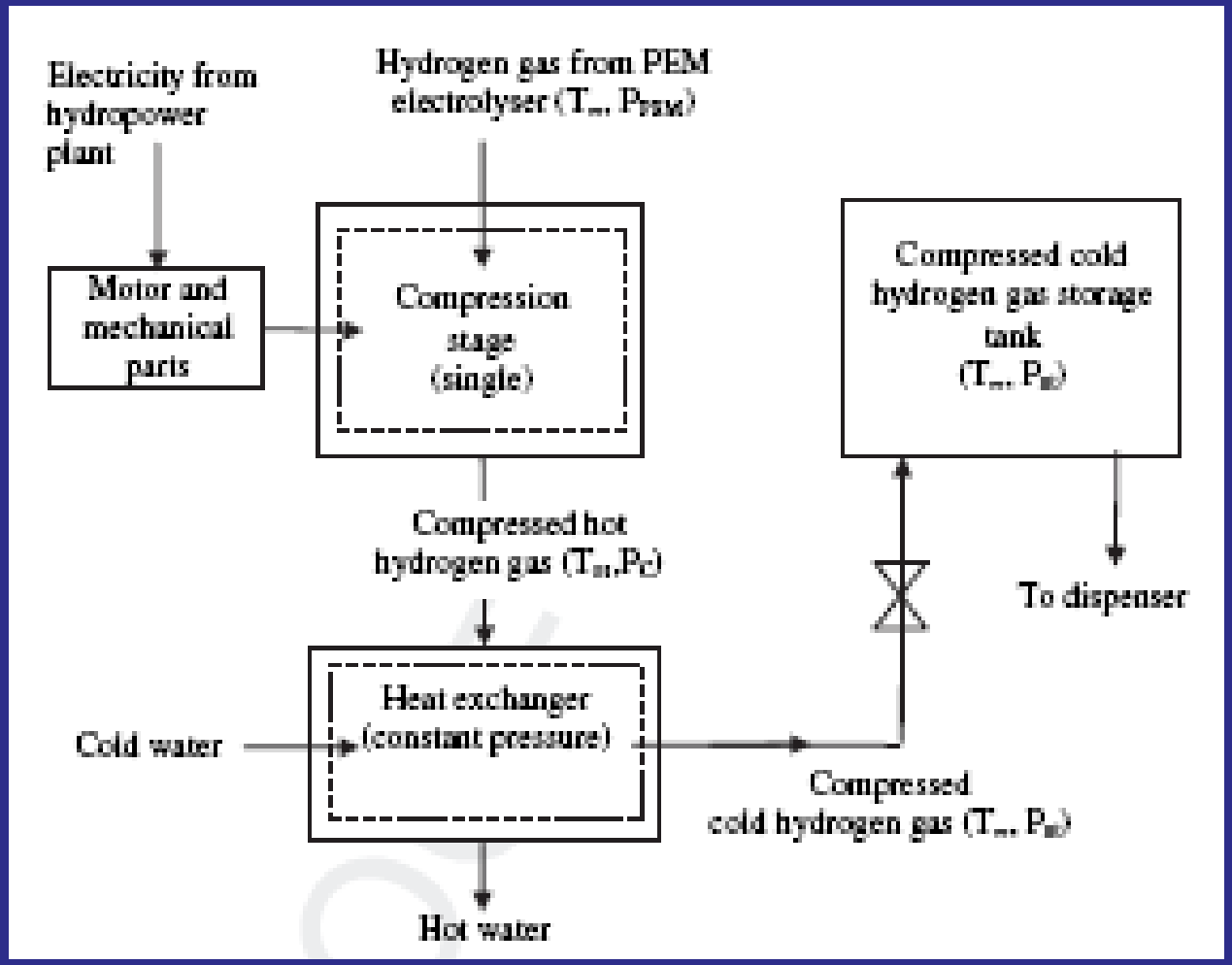


Fig. 6. Control volume of the single stage compression and storage process of hdrogen gas

Control Volume of multistage compression and storage process

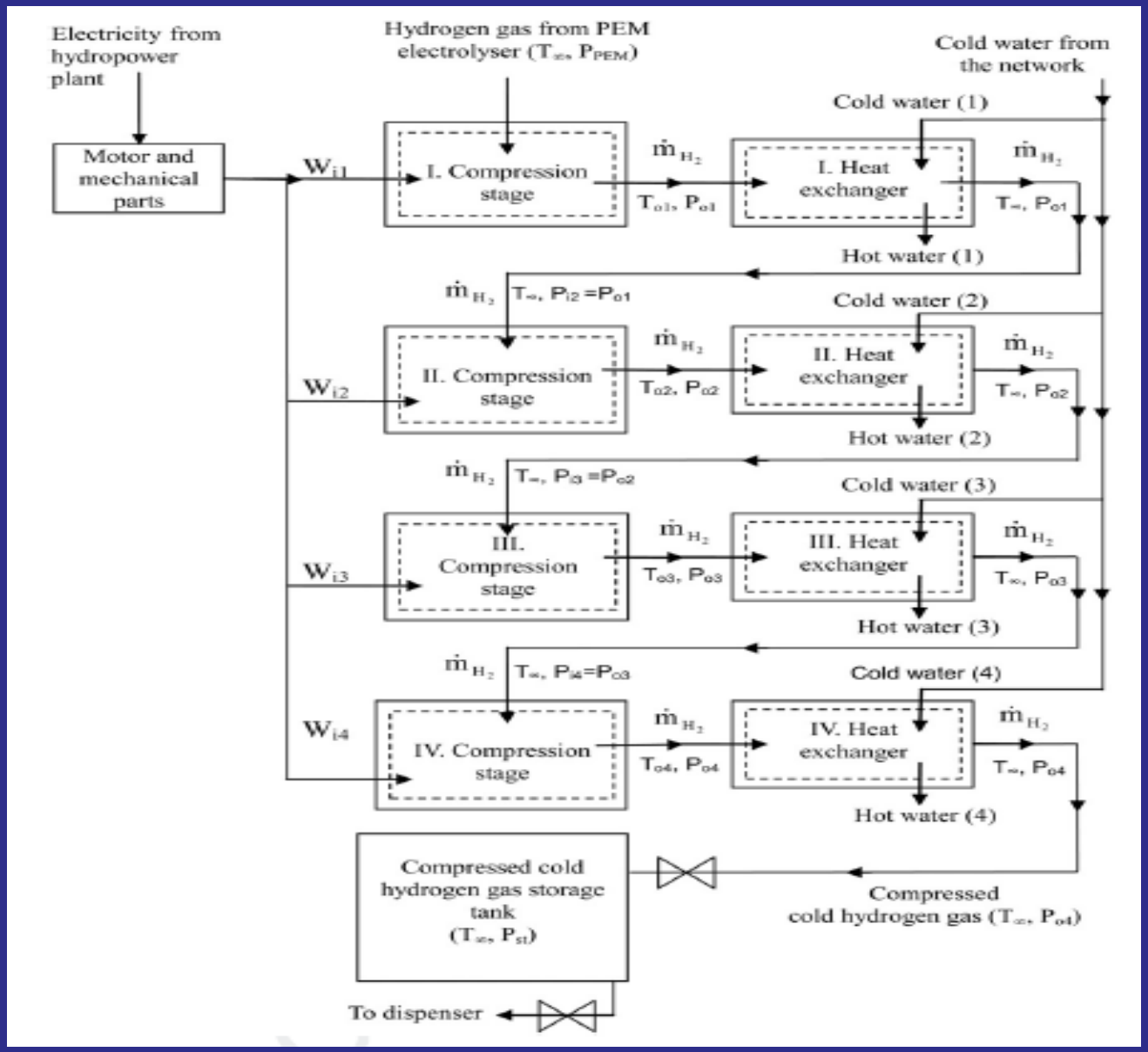


Fig. 6. Control volume of the single stage compression and storage process of hdrogen gas

Uygun termodinamik kabuller yapmak

Assumptions-1

1. Hidrojen gazı yüksek basınçlarda gerçek gaz kabul edilerek hesaplamalar yapıldı.

2. Pratik uygulamalarda hidrojenin sıkıştırılması izotermal, izantropik ve adyabatik değildir. Hidrojenin sıkıştırılması için gerçek iş yukarıda bahsedilen termodinamik prosesler arasındadır. Dolayısıyla pratik uygulamalarda hidrojenin sıkıştırılması işlemi için politropik proses yaklaşımı daha uygundur [6].

3. Politropik üs sıkıştırma işleminin kapsamına ve gazın tabiatına bağlıdır. Politropik üs izantropik üsten daha büyük olduğu zaman sıkıştırma sırasında gaza ısı transferi gerçekleşir [6]. Bu literatür bilgisi dikkate alınarak ve politropik verim 0,9 kabul edilerek n ve k değerleri sistemin çalışma basıncına göre $\frac{n}{n\text{-}1}=\frac{k}{k\text{-}1}\,\eta_p$ ifadesi yardımıyla hesaplandı ve n>k olduğu belirlenmiştir.

4. Sistemdeki tek ve çok aşamalı kompresörün politropik verim 0,90 alındı. Ayrıca mekanik verim 0,95 ve motor verimi 0,9 olarak seçilmiştir.

5. Daha geniş kullanım aralığı olan pistonlu kompresörler hidrojen gazının sıkıştırma işlemi için kullanılmıştır.

Assumptions-2

6. Kompresör sıkıştırma aşamalarında kullanılan ara soğutma işlemlerinin tam olarak gerçekleştiği kabul edilmiştir. Dolayısıyla modellemede bu amaç için kullanılan ısı değiştiricilerinin etkinliği 1 alınmıştır.

7. Sistem saatte 3 kg hidrojeni işleme tabi tutmak için tasarlanmıştır.

8. Sistemdeki bağlantı borularında basınç ve sıcaklık kaybının olmadığı kabul edilmiştir.

9. Sıkıştırma aşamasında kompresörün çevre ile ısı alışverişi olmadığı varsayılmıştır.

10. Sıkıştırma işlemleri boyunca hidrojen gaz sızıntısının olmadığı kabul edilmiştir.

11. Modelleme için gerekli termodinamik özelikler NIST'ten alınmıştır.

Sistemde etkili olan parametreleri belirlemek ve gerekli hesaplamaları yapmak

Referans çevre ve kompresör giriş basınçlarına bağlı olarak özgül ısı oranı ve poliktropik üs değerleri (ηp=0.9)

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\frac{n}{n-1} = \frac{k}{k-1}\eta_p$$

Giriş basıncı	1 bar	10 bar	20 bar	30 bar	40 bar	50 bar	100 bar	150 bar	200 bar
k	1,4053	1,4068	1,4083	1,4098	1,411	1,4123	1,4174	1,4207	1,4226
n	1,4359	1,4376	1,4392	1,4409	1,4422	1,4436	1,4492	1,4529	1,4550

Hidrojen gazının sisteme giriş basıncı ve sıcaklığı

PEM Elektroliz ünitesinde üretilen hidrojen gazı sabit basınçta çevre şartlarına kadar soğutulmakta ve sıkıştırma aşamasına gönderilmektedir.

Dolayısıyla, hidrojen gazının sıkıştırma ünitesine giriş sıcaklığı 25 oC, giriş basınçları ise sırasıyla; 1, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150 ve 200 bar olarak alınmıştır.

Sıkıştırma ünitesinden hidrojen gazının çıkış basıncı ise sırasıyla;

200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850, 900 bar olarak kabul edilmiştir.

Temel Bağıntılar

Model Denklemler-1: Tek Aşamalı Sistemde Temel Bağıntılar

Politropik İş Hesabı

$$\dot{W}_p = \dot{m} Z_{ort} \frac{n}{n-1} R T_1 \left[\left(r_p \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$$

Sıkıştırma işlemi için gerekli politropik iş, hidrojen gazının gerçek gaz kabul edilmesi sonucu bu gazın sıkıştırabilirlik faktörü de dikkate alınarak hesaplanmıştır.

Kompresördeki sıkıştırma için toplam gerçek iş

$$\dot{W}_T = \frac{\dot{W}_p}{\eta_p \times \eta_{mek} \times \eta_m}$$

Sıkıştırma işlemi için gerekli toplam iş değerinin hesaplanması için politropik, mekanik ve motor verimleri dikkate alınmıştır.

Sıkıştırılabilirlik Faktörü

Hidrojen yüksek basınçlarda ideal gazdan sapma gösterdiği için gerçek gaz olarak alınmış sıkıştırılabilirlik faktörü aşağıdaki bağıntılar yardımıyla hesaplanmıştır [26].

$$\rho = \frac{P}{ZRT}$$

$$Z = 1 + \left(B_0 - \frac{A_0}{RT} - \frac{C_0}{RT} \right) \rho + \left(b - \frac{a}{RT} \right) \rho^2 + \frac{a\alpha}{RT} \rho^5 + \frac{c\rho^2}{RT} \left[\left(1 + \gamma\rho^2 \right) \exp\left(-\gamma\rho^2 \right) \right]$$

$$Z_{ort} = \frac{Z_g + Z_ç}{2}$$

$a = -0{,}93433\ (m^3/kmol)^3\ kPa$; $A_o = 9{,}860848\ (m^3/kmol)^2\ kPa$;

$b = 0{,}00018\ (m^3/kmol)^2$; $B_o = 0{,}018041\ (m^3/kmol)$;

$c = -24939{,}1\ (m^3/kmol)^3\ K^2\ kPa$; $C_o = 39429{,}61\ (m^3/kmol)^2\ K\ kPa$;

$\alpha = -3{,}4 * 10^{(-06)}\ (m^3/kmol)^3$; $\gamma = 0{,}00189\ (m^3/kmol)^2$

Kaynak: Zhoua L., Zhoub Y., Determination of compressibility factor and fugacity coe(cient of hydrogen in studies of adsorptive storage, International Journal of Hydrogen Energy 26 (2001) 597–601, 2001.

Hidrojeni ortam şarlarına getirmek için gerekli soğutma yükü

Isı eşanjörüne giren soğutma suyu 20 ^{0}C'de girdiği ve 90 ^{0}C'de çıktığı kabul edilmiştir. Gerekli su debisi aşağıdaki formül yardımıyla bulunur;

$$\dot{Q}_{sy} = \left(\dot{m}\, c_p \left(T_1 - T_2\right)\right)_{hidrojen} = \left(\dot{m}\, c_p \left(T_{ç,su} - T_{g,su}\right)\right)_{su}$$

$$\dot{m}_{su} = \frac{\dot{Q}_{sy}}{\left(c_p \left(T_{ç,su} - T_{g,su}\right)\right)_{su}}$$

Sıkıştırma oranı

$$r_p = \left(\frac{P_{son}}{P_{ilk}}\right)^{\frac{1}{kademesayısı}}$$

Aşama çıkış sıcaklığı

$$T_2 = \left(r_p\right)^{\frac{n-1}{n}} T_1$$

Model Denklemler-2:

Dört Aşamalı Sistem Temel Bağıntılar

$$\dot{W}_{p,t} = \dot{m}\left(Z_{ort,1} + Z_{ort,2} + Z_{ort,3} + Z_{ort,4}\right)\frac{n}{n-1}RT_1\left[\left(r_p\right)^{\frac{n-1}{n}} - 1\right]$$

$$\dot{W}_T = \frac{\dot{W}_{p,t}}{\eta_p \times \eta_{mek} \times \eta_{mot}}$$

$$\dot{Q}_{sy} = 4\left(\dot{m}\,c_p\left(T_1 - T_2\right)\right)_{hidrojen} = 4\left(\dot{m}\,c_p\left(T_{ç,su} - T_{g,su}\right)\right)_{su}$$

Ekserji ile ilgili hesaplamaları yapmak

Model Denklemler-3:

Tek Aşamalı Sistemin Ekserji Analizi

tüm sistemin 2. Kanun verimi

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{E}x_{ç,ıeH}}{\dot{W}_T + \dot{E}x_{sy} + \dot{E}x_{gH}}$$

ısı eşanjörü 2. Kanun verimi

$$\eta_{ıe} = \frac{\dot{E}x_{c,ç} - \dot{E}x_{c,g}}{\dot{E}x_{h,g} - \dot{E}x_{h,ç}}$$

Dincer and Rosen, 2007

sıkıştırma aşamasının 2. kanun verimi

$$\eta_{sa} = \frac{\dot{W}_{tr,g}}{\dot{W}_g}$$

Model Denklemler-4:

Dört Aşamalı Sistemin Ekserji Analizi

her bir sıkıştırma aşamasının 2. kanun verimi

$$\eta_{sa,1} = \frac{\dot{W}_{tr,g1}}{\dot{W}_{g,1}} \quad \ldots \quad \eta_{sa,4} = \frac{\dot{W}_{tr,g4}}{\dot{W}_{g,4}}$$

tüm sistemin 2. Kanun verimi

$$\eta_{sistem} = \frac{\dot{E}x_{ç,ıe4H}}{\dot{W}_T + \dot{E}x_{sy} + \dot{E}x_{gH}}$$

her bir ısı eşanjörü 2. Kanun verimi

$$\eta_{ıe,1} = \frac{\dot{E}x_{c,ç1} - \dot{E}x_{c,g1}}{\dot{E}x_{h,g1} - \dot{E}x_{h,ç1}} \quad \ldots \quad \eta_{ıe4} = \frac{\dot{E}x_{c,ç4} - \dot{E}x_{c,g4}}{\dot{E}x_{h,g4} - \dot{E}x_{h,ç4}}$$

Model Denklemler-5: Depo hacmi ve depolanan hidrojenin ekserjisi

3 kg kapasiteli hidrojen deposunun iç hacminin litre cinsinden belirlenmesi:

$$Z=1+\left(B_0-\frac{A_0}{R_uT}-\frac{C_0}{R_uT}\right)\rho+\left(b-\frac{a}{R_uT}\right)\rho^2+\frac{a\alpha}{R_uT}\rho^5+\frac{c\rho^2}{R_uT}\left[\left(1+\gamma\rho^2\right)\exp\left(-\gamma\rho^2\right)\right]$$

$$\rho_1=\frac{100P}{ZR_uT}\ (\mathrm{kmol/m^3})$$

$$\rho_2=\frac{100P}{ZRT}\ (\mathrm{g/l})$$

$$V_{depo}=\frac{3000}{2.016\rho_1}$$

Buradaki V_{depo} 3 kg kapasiteli hidrojen tüpünün litre cinsinden hacmidir. ρ yoğunluk (kmol/m^3) olup, P depo basıncı (bar), Z sıkıştırılabilirlik faktörü, R_u üniversal gaz sabiti (kJ/kmol.K), T ise sıcaklıktır (Kelvin).

$$Ex_{depo}=Ex_{H,kim}+Ex_{ç,ıeH}$$

Buradaki Ex_{depo} depodaki hidrojen gazının toplam kullanılabilir ekserjisidir. Hidrojenin kimyasal ekserjisi ($Ex_{H,kim}$) 32.86 kWh/kg alınmıştır [1]. Buradaki $Ex_{ç,ıeH}$ ısı eşanjöründe soğutularak depoya gönderilen hidrojen gazının ekserjisidir.

Sonuçların yorumlanması

Results and Discussion

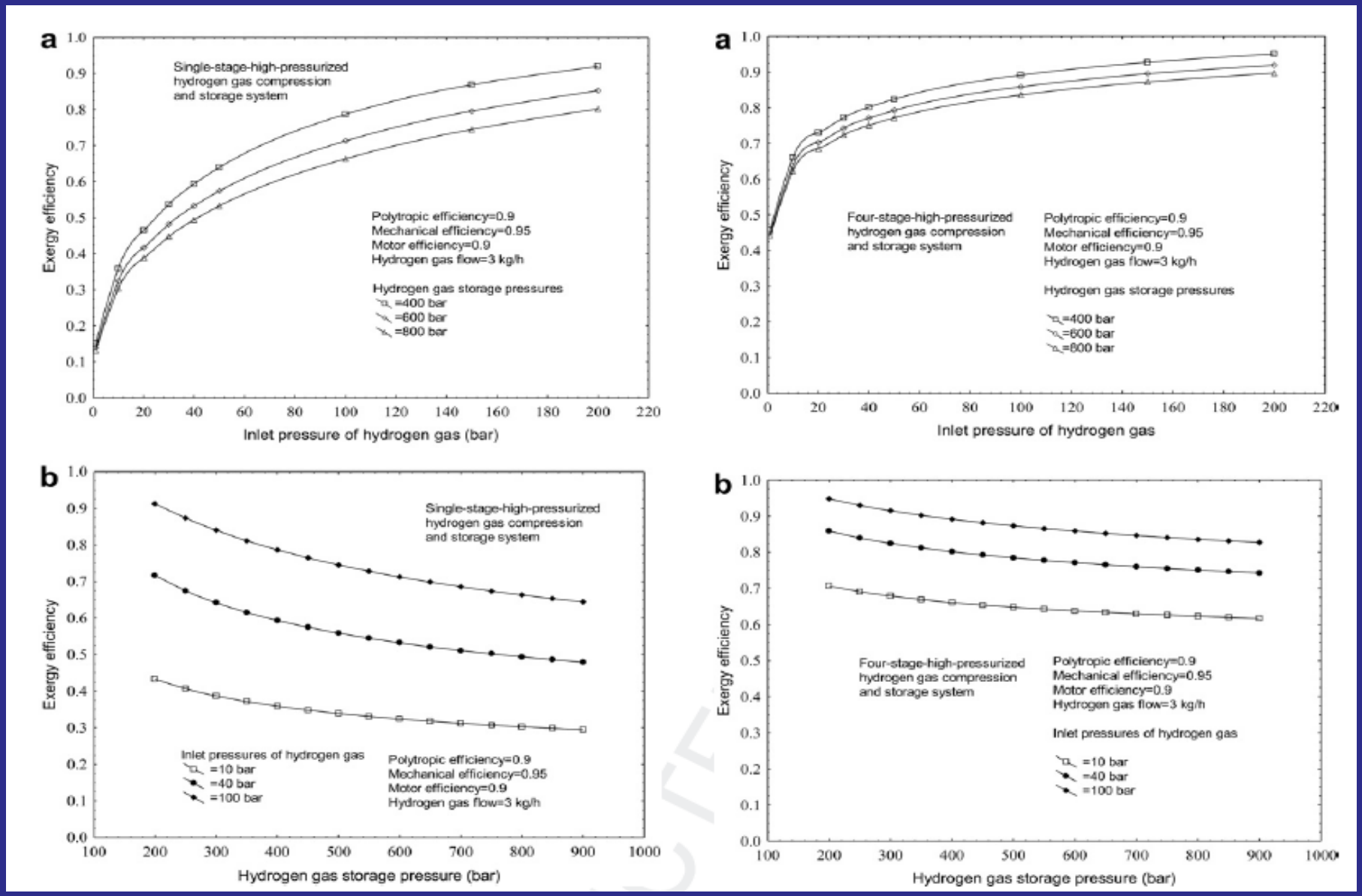


Fig. 7. Parametric variations of single and four stage-hydrogen gas compression and storage

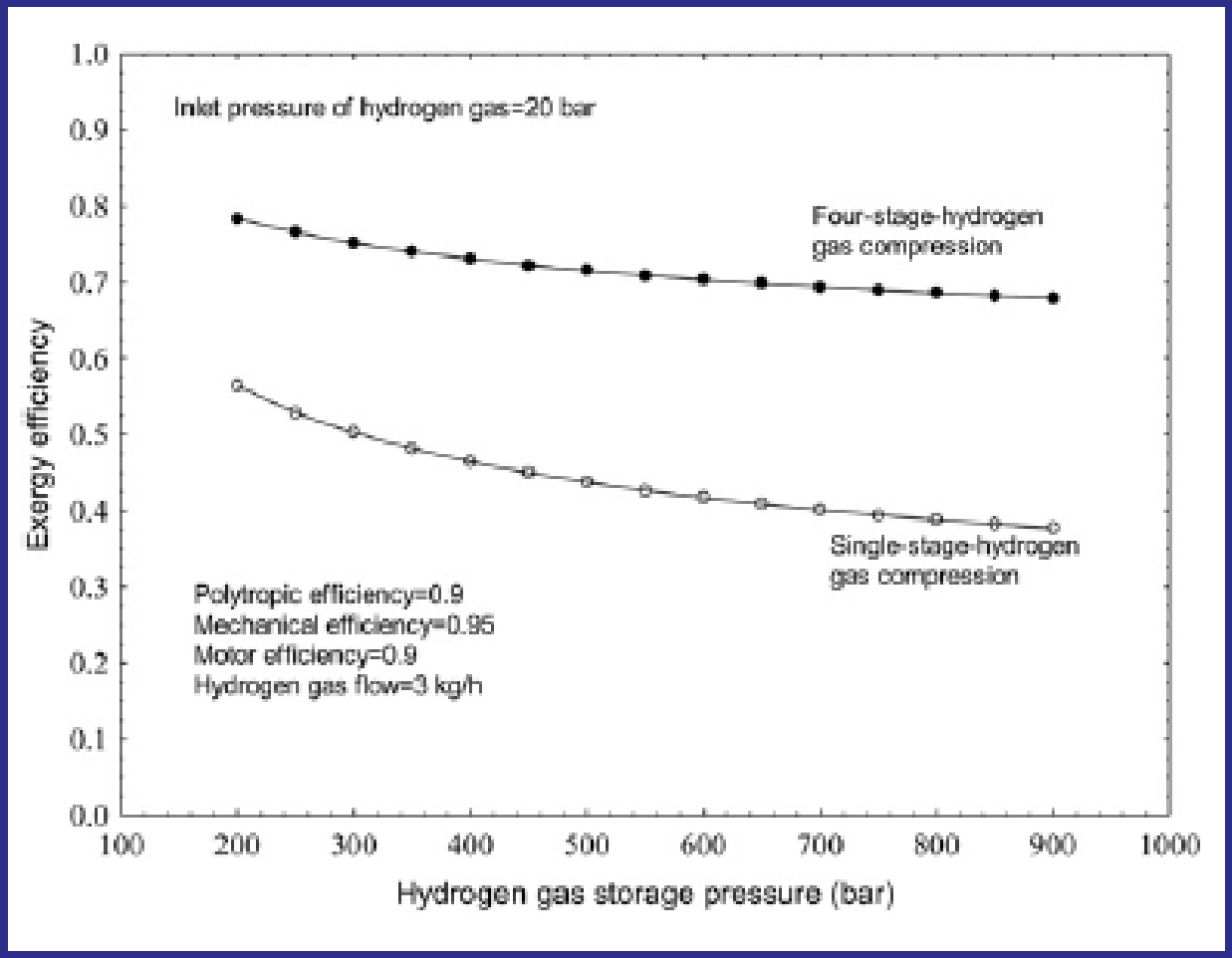


Fig. 8. Parametric variations of single and four stage-hydrogen gas compression and storage

Değişen depo basınçlarında depolanmış toplam ekserji değerleri

Depo basıncı (bar)	Depodaki hidrojenin yoğunluğu (g/l)	Depolanan hidrojen gazının miktarı (g)	Depo iç hacmi (litre)	Depodaki hidrojenin toplam ekserjisi (kWh)
200	14.49	3000	207.1	104.132
250	17.61	3000	170.4	104.392
300	20.54	3000	146.1	104.611
350	23.32	3000	128.6	104.802
400	25.95	3000	115.6	104.971
450	28.45	3000	105.4	105.124
500	30.83	3000	97.31	105.265
550	33.09	3000	90.66	105.395
600	35.25	3000	85.11	105.517
650	37.31	3000	80.41	105.632
700	39.28	3000	76.38	105.741
750	41.16	3000	72.88	105.845
800	42.97	3000	69.81	105.944
850	44.71	3000	67.1	106.039
900	46.38	3000	64.69	106.131

Dost arıyorsan entropi
üretimini azalt,

dost bulduysan
ekserji verimini muhafaza et,

ki dostluklar daim olsun!

For further information please consult with Professor Çengel!