

# SISTEM PRODUKSI HIDROGEN DENGAN PROSES KOMBINASI TERMOLISIS DAN ELEKTROLISIS AIR MENGGUNAKAN ENERGI SURYA

**Sutarno**

Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknologi Industri  
Universitas Islam Indonesia  
Jl Kaliurang km 14 Yogyakarta

## Abstrak

*Suatu sistem produksi hidrogen proses kombinasi Termolisis dan Elektrolisis air menggunakan Energi Surya telah diuraikan dan dianalisis secara termodinamika dan ekonomi menggunakan model matematika yang sesuai. Hasil analisis sistem berskala industri menggunakan modul sel surya berkapasitas 324 GJ/tahun (172 GJ/tahun untuk proses Termolisis dan 152 GJ/tahun untuk proses Elektrolisis) telah disajikan. Dalam tulisan ini, untuk perhitungan analisis teknologi dan ekonomi digunakan asumsi-asumsi yang biasa dipakai terhadap teknologi sejenis. Diestimasi efisiensi sel surya yang digunakan adalah 13% dan biaya energinya sebesar \$ 39/GJ hidrogen.*

*Kata Kunci : termolisis, elektrolisis, hidrogen*

## 1. PENDAHULUAN

Termolisis air untuk menghasilkan hidrogen dapat dilakukan menggunakan energi matahari (solar). Hidrogen yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif yang ramah lingkungan, bersih dan dapat diperbarui. Proses ini biasa disebut sebagai termolisis air solar.

Pada umumnya, sistem termolisis air solar terdiri dari sistem kolektor surya dan sistem proses kimia untuk mengurai air, sehingga menghasilkan hidrogen. Akhir-akhir ini, kajian mengenai termolisis air solar telah dilakukan oleh beberapa ahli. Di antara kajian tersebut antara lain kajian kelayakan teknologi dengan penelakan teori termodinamika terhadap sistem termolisis air solar berskala industri berkapasitas 600 GJ/tahun yang dilakukan oleh S.Z Baykara pada tahun 1996[1]. Sistem ini menggunakan kolektor surya tipe konsentrator tunggal dan menghasilkan gas campuran yang kemudian melalui proses pemisahan gas dengan pemanasan suhu rendah menghasilkan hidrogen.

Analisis secara termodinamika mengindikasikan bahwa suhu maksimum pengurai air sekitar 2500 K. Suhu ini hanya sekitar 10% dari suhu tinggi yang dikumpulkan oleh energi surya yang digunakan secara langsung untuk proses termolisis. Pada sistem kolektor solar, selalu tersedia energi dalam proses untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik untuk digunakan dalam proses elektrolisis air. Sistem ini sangat baik untuk memaksimalkan produksi hidrogen [2]. Karena itu, pada tulisan ini, suatu kombinasi proses termolisis dan elektrolisis akan dikembangkan, dianalisis dan

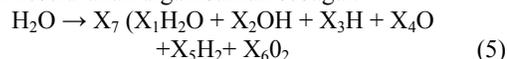
dievaluasi.

## 2. REAKSI TERMOLISIS-PENGURAIAN AIR

Reaksi kimia berikut merupakan proses termolisis pada tingkat suhu yang penting.



Reaksi keseluruhan digambarkan sebagai:



Komposisi kesetimbangan menghasilkan campuran gas yang ditentukan oleh fraksi mole yang tidak diketahui,  $X_i$ , dari hubungan persamaan melalui perhitungan menurut metode Newton-Raphson, dimana  $X_7$  adalah bilangan total dari mole gas;  $\text{H}_2$  adalah kesetimbangan konservasi atom

$$X_1 + 1/2X_2 + 1/2X_3 + X_5 = 1/X_7 \quad (6)$$

$\text{O}_2$  adalah kesetimbangan konservasi atom

$$1/2X_1 + 1/2X_2 + 1/2X_4 + X_6 = 1/2X_7 \quad (7)$$

Kendala fraksi mole:

$$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = 1 \quad (8)$$

Persamaan kesetimbangan :

$$K_1 = P X_2 X_3 / X_1 \quad (9)$$

$$K_2 = P X_3 X_4 / X_2 \quad (10)$$

$$K_3 = X_5 / P X_3 \quad (11)$$

$$K_4 = X_6 / P X_4 \quad (12)$$

Dimana  $K_i$  ( $i = 1$  sampai 4) adalah konstanta kesetimbangan untuk reaksi 1 sampai 4, dan  $P$  adalah

tekanan total (atm).

Saat kesetimbangan massa sekitar reaktor diperoleh, keperluan energi proses penguraian ditentukan dari kesetimbangan enthalpy, dan diakomodasi secara total oleh sistem solar.

### 3. METODE EVALUASI PROSES

#### 3.1. Evaluasi Termodinainika

##### Efisiensi Keseluruhan

$$Y = Y_1 Y_2 \quad (13)$$

$$Y_1 = Y_{op} Y_{tr} Y_{tu} Y_{db} Y_{re} Y_{ar} = \Delta H_o / Q_s \quad (14)$$

$$Y_2 = \Delta H_o / (Q_t + Q_h) \quad (15)$$

$$Y_{op} = Y_h Y_{ec} Y_{os} Y_{ds} \quad (16)$$

dimana

- $Y_1$  = efisiensi sistem solar ( $> 0,7$ )
- $Y_2$  = efisiensi sistem proses kimia
- $Y_{op}$  = efisiensi cermin konsentrator
- $Y_{ec}$  = efisiensi refleksi konsentrator
- $Y_{of}$  = batas koreksi untuk bayangan yang kadang-kadang (kebetulan) muncul.
- $Y_{dt}$  = batas koreksi untuk keadaan permukaan cermin (konsentrator) yang tidak sempurna, berdebu dan kesalahan design.
- $Y_{tr}$  = faktor transmisi kejernihan media di garis edar radiasi cahaya.
- $Y_{tu}$  = faktor koreksi untuk bayangan yang disebabkan oleh rintangan di garis edar yang ditunjukkan oleh sistem.
- $Y_{db}$  = efisiensi receiver (sehubungan dengan geometri).
- $Y_{re}$  = efisiensi panas receiver pada suhu tinggi.
- $Y_{or}$  = batas koreksi untuk menghitung fraksi rintangan radiasi oleh receiver itu sendiri
- $\Delta H_o$  = panas formasi air pada suhu 298 K dan tekanan 1 atm ( $\infty 286$  KJ/mole)
- $Q_s$  = energi solar yang masuk ke sistem
- $Q_t$  = energi panas total yang masuk dari proses kimia
- $Q_m$  = energi panas yang sebanding energi mekanis yang masuk dari proses kimia dengan efisiensi tertentu ( $Y_m \infty 0,3$ )

##### Efisiensi Keseluruhan

$$Q_t = Y_1 Q_s - Q_{rec} \quad (17)$$

Dimana  $Q_{rec}$  = panas yang didapatkan kembali dari proses.

##### Masukan Kerja Total

$$Q_m = Q_m / Y_m = (W_s + W_e + W_p) / Y_m \quad (18)$$

$$W_s = \text{Kerja pemisahan (separation)} = (\infty RT / Y_{s1}) \sum X_i \text{ linear } X_i \quad (19)$$

$$W_c = \text{kerja kompresi isothermal} = - (\infty RT / Y_c) \text{ linear } (V_2 / V_1) \quad (20)$$

$$W_p = \text{Kerja pompa} = \Delta H / Y_p \quad (21)$$

Dimana,  $Y_s \infty 0,5$  ;  $Y_c \infty 0,7$  ; can  $Y_p \infty 0,7$ .

#### 3.2. Evaluasi Teknologi

Ditinjau cari segi aliran proses, evaluasi teknologi dapat diusulkan dua kelompok, yaitu aliran proses yang hanya memuat peralatan pokok saja (dan ini akan lebih dapat memajukan kajian termodinamika diletakkan ke dalam perhitungan yang tidak dapat dirubah), dan aliran proses yang memperlihatkan semua peralatan yang terlibat di dalamnya.

Dalam evaluasi ini perlu memperhatikan sifat parameter proses, seperti misalnya rasio pengaliran, material konstruksi, efisiensi peralatan dan spesifikasi lainnya.

#### 3.3. Evaluasi Ekonomi

Evaluasi ekonomi suatu sistem produksi hidrogen pada dasarnya adalah evaluasi biaya teknologi sistem produksi bersangkutan. Dalam hal ini evaluasinya adalah dalam \$/GJ produksi hidrogen.

Biaya hidrogen pada sistem produksi hidrogen oleh termolisis air solar adalah fungsi dua kelompok biaya, yaitu biaya modal dan biaya operasi termasuk di dalamnya adalah biaya sistem pembangkit energi matahari dan sistem proses kimia yang digunakan. Untuk menghitung biaya hidrogen diperlukan metode estimasi dan asumsi-asumsi yang dapat dipercaya terhadap komponen sistem yang digunakan, oleh karena pada kenyataan ada beberapa komponen peralatan yang terlibat harus dibuat menurut rancangan individu.

### 4. MODEL EKONOMI

Model ekonomi adalah instrumen untuk menentukan investasi atau biaya modal dan biaya produksi hidrogen, Suatu metode untuk mengestimasi biaya modal didasarkan pada biaya instalasi peralatan yang dipasang.

#### 4.1. Investasi Modal Total

Investasi modal total (TCI) dalam nilai dollar yang berlaku, terdiri dari investasi modal tetap (FCI) dan investasi modal variable (VCI), yang mengacu pada modal kerja:

$$TCI = FCI + VCI \quad (22)$$

Komponen utama dari FCI adalah biaya total langsung (TDC), biaya total tidak langsung (TIC) dan kemungkinan terjadi biaya selama pembuatan konstruksi (CONT)

$$FCI = TDC + TIC + CONT \quad (23)$$

Komponen TDC adalah menunjukkan persentase biaya peralatan yang dipasang (biaya instalasi peralatan) (IEC), dan itu TIC adalah meunjukkan persentase dari TDC

$$TDC = C1 (IEC) \quad (24)$$

$$TIC = C2 (TDC) \quad (25)$$

$$CONT = C3 (TDC + TIC) \quad (26)$$

dimana C mewakili (representasi) nilai faktor

persentase total. Investasi modal total pada waktu memulai (nenghidupkan) (TCS) adalah ditentukan mempertimbangkan bunga modal (interest rate) C, kenaikan biaya modal E, dan durasi/umur konstruksi, n:

$$TCS = (1+E)^n (I+C) \quad (27)$$

#### 4.2. Biaya Tahunan dan Biaya Produksi (Product)

Biaya total tahunan (TAC) adalah terdiri dari biaya tetap dan sejumlah variasi (beberapa) biaya yang berhubungan/berkaitan dengan operasi (0 Q :

$$TAC = FC + OC \quad (28)$$

Biaya tetap adalah diekpresikan atau diperlihatkan sebagai persentase TCS, yang mengacu pada bunga (rate) standar biaya tetap (FCR).

$$FC = (FCR) (TCS) \quad (29)$$

Akhirnya, biaya produksi atau produksi (product) adalah diekpresikan atau diperlihatkan dalam ketentuan/syarat-syarat/TAC dalam kapasitas produksi dalam setahun (APROD)

$$PC = (TAC)/(APROD) \quad (30)$$

Penyesuaian asumsi ekonomi dalam studi ini adalah di daftar Tabel 1.

Tabel 1: Asumsi Ekonomi

	Nilai
Umur	20 tahun
Potongan harga	0,05
Angka inflasi	0,00
Suku bunga modal	0,0-0,30
Bunga modal setahun konstruksi	0,05
Lama konstruksi	1 bulan
Biaya tidak langsung	0,15 x biaya peralatan
Ketidakpastian	0,12 x biaya peralatan
Biaya variabel	0,01 x biaya peralatan
Bunga modal permulaan operasi dan perawatan	0,01 x biaya modal permulaan

#### 4.3. Biaya Instalasi Peralatan

Instalasi peralatan proses kimia: seperti terlihat pada bagian di atas, biaya modal (terutama) setiap tahun paling banyak atau terberat diperuntukkan untuk (biaya) Instalasi peralatan. Akibatnya (karena itu), disebut (dinyatakan) sebelumnya, evaluasi teknologi (engineering) realistik dan lembaran alir proses adalah hal pokok atau penting dalam pendekatan ekonomi ini. Begitu (sekali) rancangan (design) proses terinci (detailed) secukupnya, maka tidak bisa dipungkiri lagi bergantung pada kapasitas pabrik bersangkutan, proses pokok dan sifat dasar daripada kerumitan peralatan adalah ditetapkan.

Kemudian, bersangkutan dengan data biaya dikompilasi dari laporan yang dipublikasikan dan biaya

peralatan serta pabrikan diestimasi. Data biaya diperbaharui atau di-updated di keperluan, menggunakan index biaya semua industri "The Marshall dan Swift".

Elektrolizer : Biaya elektrolizer diestimasi menggunakan persamaan sebagai berikut, parameter yang mana dapat dilihat dalam tabel 2 [3].

$$C_e = 777 (APROD/3000) \{ [f_i + (1 - f_i) / ir] X_m + 0,5 2 [1/i + 1/ir] X_m + V1XR/ 100 YR_e \} \quad (31)$$

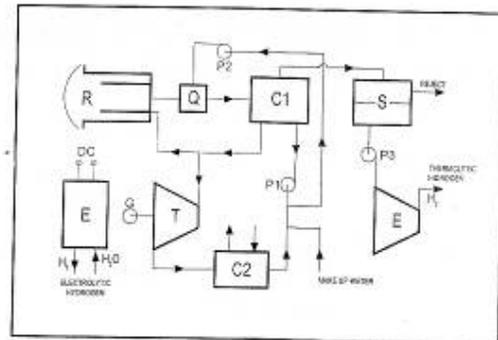
Tabel 2: Parameter untuk Teknologi Elektrolizer berteknologi banyak digunakan dalam EQ (31) diperbaharui 2007 dari [3]

Parameter	Nilai
F1	0,90
F2	0,45
Xk (\$/KW DC)	150,60
XR (\$/KW AC)	83,70
Ir (mA/cm <sup>2</sup> )	134,00
Vr (V)	1,82
Yrc	0,96

## 5. STUDI KASUS

### 5.1. Deskripsi Proses

Modul sel surya serangkaian cermin parabolik (parabolic dish) tipe reflector berkapasitas 230 KW untuk termolisis air dikaji secara termodinamika dari suatu teknologi dan ekonomi. Dalam proses yang diperlihatkan pada gambar 1, air diuraikan dimasukkan ke dalam lubang bagian reaktor R sebagai uap (steam) pada suhu 453 K, dipanaskan hingga sampai mencapai suhu 1700 K dan akhirnya mengalami reaksi termolisis di bagian tengah lubang reaktor dimana suhu naik mencapai 2500 K. Lubang diukur dengan mematuhi pengaliran pancaran dan pembagian suhu yang tersedia pada reflektor untuk menghasilkan 172 GJ/tahun setara (equivalent) hidrogen termolisis (thermolytic hydrogen).



Gambar 1 Alir proses sistem produksi hidrogen kombinasi termolisis dan elektrolisis

Gas yang dihasilkan dipadamkan dengan air di pemadam Q dan (dengan) secara cepat didinginkan hingga 473 K menghasilkan gas campuran molekul

hidrogen dan molekul oksigen, air dan uap (steam). Tiap air dibersihkan oleh/melalui/melewati condenser C1 dimana panas sisa (apkiran) digunakan untuk menghasilkan uap (steam) pada 453 K dan 10 atm bagian dari yang mana adalah menjadi umpan (fed) untuk 0,1 atm. Di dalam turbin uap, T untuk menghasilkan 21,2 KW tenaga listrik yang mana cukup untuk memenuhi total tenaga listrik yang disyaratkan proses dan tenaga sebuah "stuart cell" untuk menghasilkan 152 GJ/tahun setara hidrogen elektrolisis. Itu kapasitas total ditingkatkan mendekati 90%. Hidrogen yang dihasilkan dari termolisis dipisahkan dari oksigen disebarkan melewati sebuah membran Pd dan dikompres/dimampatkan (compressed) ke tekanan atmosfer. Map (steam) dikondensasi (condensed) dalam C1 dipompa balik ke quencher Q melalui pompa P1. Air dari kondensator C2 dicampur dengan air tambahan (make-up water) dan dipompa melalui P2 menuju kondensator C1. Sifat (karakteristik) proses diberikan/dicantumkan dalam tabel 3.

Tabel 3: Karakteristik Proses

	Nilai
Reflektor (cermin parabolik)	
Diameter	17,00 m
Diameter (focal plane)	0,60 m
Y (efisiensi konsentrator)	0,95
Receiver (concentric cavities)	
Bagian tengah (reaktor)	-
Bagian luar (steam superheater)	-
Efisiensi	0,90
Sistem proses kimia	
Masa operasi	3000 jam
Nilai produksi H <sub>2</sub> (Termolisis)	172 GJ/tahun
Suhu reaktor	2500 K
Tekanan reaktor	1 atm
Pemadaman mole H <sub>2</sub> /mole	2
kecepatan air	
Nilai konversi	37,4 mole
	H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>
Nilai produksi H <sub>2</sub> (Elektrolisis)	152 GJ/tahun

### 5.2. Evaluasi dan Hasil Proses

Alir proses (gambar 1) dengan karakteristik yang ditentukan dalam tabel 3 dievaluasi atau dihitung menggunakan sandi komputer yang dikembangkan sejak awal [1]. Hasil termodinamika dan teknologi (engineering) diturunkan/dikurangi untuk mendapatkan atau menghasilkan beban energi dalam peralatan yang bervariasi yang dipresentasikan dalam tabel 4.

Tabel 4: Tipe energi dan beban dalam proses dan harga komponen instalasi diperbarui sampai tahun 2007 (\$)

Peralatan	Tipe energi	Beban energi (M3/jam)	Harga (\$ 2007)
Konsentrator	Panas	828,00	14368
Receiver	Panas	828,00	222
Reaktor	Panas	439,20	-
Steam	Panas	388,80	-
Superheater	Panas	(1044,00)	21571
Conclensor C1	Panas	1,30	11300
Separator	Panas	(76,32)	6540
Turbine	Mekanik	7,20	14500
Compressor	Panas	(648,00)	13700
Conclensor C2	Panas	0,43	1178
Pompa P1	Mekanik	0,01	1280
Pompa P2	Mekanik	1,80	710
Pompa P3	Mekanik	64,80	4370
Elektrozer	Elektrical		
Total			89739

Biaya peralatan yang diinstal atau dipasang untuk modul dideskripsikan (digambarkan) pada bagian 4 adalah diperoleh dari [4] dan berbagai publikasi [5]. (Biaya) itu diperbaharui (updated) ketika diperlukan sampai tahun 1987 (dalam S) seperti dideskripsikan atau digambarkan di bagian 4.3 dan dicantumkan juga pada daftar tabel 2 dan 4. Menggunakan asumsi ekonomi yang dicantumkan dalam daftar tabel I dan biaya dalam daftar tabel 2 dan 4, keseluruhan biaya hidrogen (solar) dikalkulasi menggunakan suatu metode yang digambarkan atau dideskripsikan pada bagian 4 dan kode [1] di atas, suku bunga modal dan biaya konsentrator diletakkan sebagai biaya variabel. Energi total disediakan (supplied) untuk sistem adalah 828 MJ/jam yang mana digunakan dalam proses penguraian atau pemecahan untuk atau oleh uap berpanas tinggi (super heat) dan penguraian air. Energi panas (thermal) yang ada (tersedia) digunakan untuk air panas dan menghasilkan uap (steam). Energi mekanik yang dihasilkan dari energi panas (thermal) yang tersedia sejumlah urmlah mencapai 76,32 MJ/jam porsi (bagian) kecil (dari) yang mana adalah digunakan untuk tenaga kompresor dan pompa. Sebagian besar lainnya disediakan untuk elektrolizer. Efisiensi panas keseluruhan modul dihitung atau kalkulasi menggunakan persamaan 13 yaitu didapat diperoleh sebesar 13%.

### 6. DISKUSI DAN KESIMPULAN

Modul kombinasi (hybrid module) menghasilkan 200 mole H<sub>2</sub>/jam oleh atau dengan termolisis dan 177 mole H<sub>2</sub>/jam oleh elektrolisis. Oleh karena itu, efisiensi panas keseluruhan clapat juga diestimasi dari tabel IV sebagai:

$$\frac{(200 + 177)(286 \text{ KJ/mole H}_2)}{828000 \text{ K}^3/\text{jam}} = 0,13$$

828000 K<sup>3</sup>/jam

Kajian awal (earlier studies) pada proses termolisis[1,2] mengindikasikan bahwa efisiensi panas (thermal) sekitar 8-10%. Ini dapat memperlihatkan bahwa energi thermal adalah lebih baik digunakan dalam proses campuran atau cangkakan (hybrid process) dan untuk jumlah temperatur (suhu) tinggi yang sama dari energi solar, produksi hidrogen meningkat sekitar 90%.

Untuk kasus pokok atau dasar (53.45 \$/m<sup>2</sup> konsentrator) biaya total modul pada saat dimulai adalah \$ 115.344. Ini menjadi/cocok/pantas (become) \$ 107.242 untuk 30,00 \$/m<sup>2</sup> konsentrator. Efek dari peningkatan atau perbaikan (improvement) ini pada biaya hidrogen dapat diabaikan seperti dapat dilihat pada gambar 3.

Hal atau item (items) biaya besar lain sebagaimana seperti halnya membran Pd, kondenser dan kompresor tidak dipergunakan atau memberi (lend) untuk perbaikan lebih lanjut dalam biaya (in cost), namun demikian menekan (semua itu) merupakan perluasan kajian untuk solusi alternatif.

Untuk contoh, membran Pd dapat digantikan oleh yang lebih murah biarpun atau bagaimanapun efisiensi tak sebanyak material sejenis seperti vycor glass dan polymer. Perhitungan ekonomis dibawa untuk dollar konstan tahun 1987. Hasilnya pada gambar 3 mengindikasikan bahwa untuk tipe suhu bunga modal 10%, biaya hidup solar adalah sekitar 39\$/GJ. Ini dapat diperbandingkan terhadap atau dengan biaya hidrogen solar yang diperoleh oleh sistem lain; P.V-hidrogen elektrolisis dari (antara) 60-115\$/GJ [6]. Hidrogen solar kombinasi termokimia (hybrid thermochemical) antara atau dari 15-70\$/GJ [7]. Ini dapat terlihat bahwa hidrogen solar dari sistem kombinasi termolisis-elektrolisis adalah sungguh ekonomis dan kompetitif dibanding dengan pola (schemes) solar yang lain. Sistem tersebut akan paling pantas untuk modular produksi hidrogen dalam atau pada daerah terpencil yang cerah dimana permintaan/tuntutan barangkali atau kemungkinan dari 300 GJ/tahun sampai beratus-ratus modul.

Dalam kesimpulan ini, mungkin dapat disebutkan bahwa sekarang ini plant module adalah secara teknologi memungkinkan (possible), reflektor berdiameter 20 m tersedia di pasar. Hidrogen termolisis juga diperoleh tidal semahal dengan pemecahan barn saja dalam (hal) material/bahan dan teknologi pembuatannya. Jika program penelitian (research) tekun atau rajin diarahkan pada \$20/m<sup>2</sup> sukses, kemudian biaya/harga gas sekarang ini \$39/GJ dapat diturunkan sampai \$35/GJ, yang mana akan menyumbangkan hidrogen oleh termolisis air pun lebih menarik. Ini adalah memungkinkan untuk pengembangan kapasitas ratusan kali sederhana/modul dengan meningkatkan atau menambah jumlah modul.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Baykara, S. Z., Hydrogen Production by Water Thermolysis, Ph. D, Thesis, Ecole Polytechnique, Montreal, Canada, 1996.
- [2] Bilgen, E., Solar Hydrogen Production by Direct Water Decomposition Process: A Preliminary Engineering Assessment, Int. J. Hydrogen Energi, 9, 53, 1998.
- [3] \_\_\_\_\_, Solar Hydrogen Production by Hybrid Thermochemical Processes, Solar Energi, 41, 1, 1988.
- [4] DFVLR brochure for 17 m diameter concentrator system 1997; Rahomaell, K. and Butler, B., Advanced composites for stressedmembrance heliostats, Energi, 12, 3/4, 245-259, 2002.
- [5] Hammache, A. and Bilgen, E., Assessment of Solar hydrogen production by phatovoltaic-electrolyzer systems, solar 87, proc. 2002 ASES Annual Meeting, 158-113, 2002.
- [6] Ie Roy, R. L. and Stuart, A. K., Unipolar electrolyzes technology. A competitive technology, Proc, 2<sup>nd</sup> WHEC, 359-375, 2001.
- [7] Peters, M.S. and Timmerhaus, Plant Design and Economics for Chemical Engineers, Mc Graw-Hill Book co., New York, 1980.