

축전식 탈염 시스템을 위한 셀 구조에 관한 연구

이주영 · 서석준 · 박정우 · 문승현[†]

광주과학기술원 환경공학부
500-712 광주광역시 북구 첨단과기로 261
(2010년 5월 19일 접수, 2010년 6월 22일 채택)

A Study on the Cell Structure for Capacitive Deionization System

Ju-Young Lee, Seok-Jun Seo, Jung-Woo Park and Seung-Hyeon Moon[†]

School of Environmental Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology(GIST),
261 Cheomdan-Gwagiro, Buk-gu, Gwangju 500-712, Korea
(Received 19 May 2010; accepted 22 June 2010)

요 약

축전식 전기탈이온(Capacitive deionization: CDI) 시스템을 실제공정에 적용하기 위하여 대용량 제작이 가능하며 높은 처리 효율을 갖는 셀 구조 연구가 필요하다. 본 연구에서는 대용량 제작을 위하여 낮은 수압으로 운전할 수 있는 병렬형 구조와 처리효율을 증가시키기 위하여 집중형 유로를 동시에 적용하여 설계하고 성능 평가하였다. 설계한 유로 구조의 유입수 흐름을 확인하기 위하여 유체역학적 모델링이 가능한 COMSOL프로그램을 사용하여 집중형 유로가 형성되는 것을 확인하였고, 염 제거 효율을 확인하기 위하여 단위 셀과 20층으로 용량 증축된 스택을 사용하여 CDI 운전을 통한 제거효율을 확인하였다. 그 결과 210 cm² 면적의 단위 셀에서는 18 ml/min의 유량조건에서 1.1 psi의 수압으로 70.8%의 제거효율을 보였으며, 20층으로 용량 증축된 셀에서는 유량을 20배로 늘린 360 ml/min의 유량조건에서 1.3~1.5 psi의 수압으로 75.6%의 제거효율을 확인할 수 있었다. 연구된 유로 설계는 대용량 시스템을 제작하는데 있어서 적합한 병렬형 구조이며 효율적인 탈염을 할 수 있는 집중형 유로로 설계되어 실제공정에 적용할 수 있는 구조임을 확인할 수 있었다.

Abstract – This study presents channel design of a CDI stack to achieve high removal efficiency in a large scale by applying parallel flow structure with a concentrated stream. The flow pattern in the stack was simulated by COMSOL Multiphysics program. To prove the salt removal performance, a unit cell and 20 cell stacks were tested at a flow rate condition of 18 ml/min and 360 ml/min, respectively. The removal efficiencies of the unit cell and the 20 cell stacks were obtained as 70.8 % and 75.6 %, respectively, with 100 mg/L sodium chloride solution. During the operation of cell test, water pressures of unit cell and 20 cell pair stack maintained in the ranges of 1.1 psi and 1.3~1.5 psi, respectively. It was demonstrated that the parallel cell structure with two concentrated streams can be employed in a large scale CDI for salt removal.

Key words: Capacitive Deionization, Channel Structure, Scale-up Stack, Salt Removal

1. 서 론

산업의 발전과 인구의 증가에 따라 물 소비량은 매년 증가하지만 인간이 사용할 수 있는 물의 양은 제한되어 있다. 이에 따라 물 부족 문제를 해결하기 위하여 다양한 탈염기술들이 개발되었고 그 중의 하나로 축전식 전기탈이온(Capacitive deionization: CDI)을 꼽을 수 있다. CDI는 기초적인 전기화학이론을 사용하는 기술로, CDI 셀에 포함되어 있는 전극에 전위차를 공급하여 양극과 음극의 성질을 띠게 하고, 이온들을 포함하고 있는 원수를 전극 사이로 통과시켜 선택적 흡착에 따라 이온들이 전극에 흡착되게 만든다. 전극의 흡

착과정이 끝나면 전극에 공급되었던 전위차를 제거함으로써 탈착이 이루어지고 전극은 재생하게 된다[1]. 이처럼 CDI는 화학약품 없이 전기만 사용하는 시스템이기 때문에 2차 오염이 없고, 흡착단계에서 물 분해가 일어나지 않도록 낮은 전위를 인가하기 때문에 전력손실이 적다[2]. 이런 기술적 특징 때문에 CDI에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다.

근래의 CDI 연구는 이온들의 흡착과 탈착이 이루어지는 전극 중심으로 이루어졌다. 그러나 실제공정에 적용하기 위해서는 CDI 셀의 용량 증축을 위한 스택 구조 연구도 동반되어야 한다. 현재 개발된 스택의 구조는 Fig. 1처럼 유입수가 처리되어 나올 때까지 한 개의 셀을 통과하는 직렬형 구조[3]와 유입수가 여러 개의 셀을 동시에 통과하는 병렬형 구조[4]로 나눌 수 있다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: shmoon@gist.ac.kr

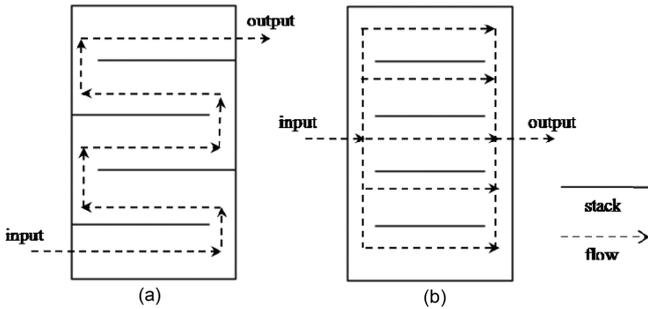


Fig. 1. Schematic of (a) single flow structure and (b) multi flow structure.

직렬형 구조는 원수가 유입되고 유출되는 과정에서 체류시간이 길어 고순도의 처리수를 얻을 수 있으나 수압이 크다는 단점 때문에 대용량으로 제작하는데 한계가 있다. 반대로 병렬형 구조는 원수가 분산되어 유입되므로 낮은 수압으로 운전이 가능하다는 장점 때문에 대용량 구축에 알맞은 스택으로 선호 받고 있으나 처리효율이 낮다는 단점이 있다.

이러한 문제점을 보완하기 위하여 M. D. Andelman은 병렬형 구조를 이루면서 집중형을 이루는 유로를 설계하였다[5]. M. D. Andelman의 구조는 스택의 4 면에서 원수가 유입되었다가 중앙으로 모여 처리수가 배출되기 때문에 원수와 전극의 접촉 면적이 넓어 고효율 구조를 이루고 있다. 본 연구에서는 유입수의 유로를 짧게 하고, 지지판(end plate)의 구조를 단순하게 하는 새로운 집중형 유로를 설계하였다. 정사각형의 전극 판에 대각선을 중심으로 돌로 나누어 중앙 부분에 유입구를 위치시키고 반대편 대각선의 양 꼭지점에 유출구를 위치시켜서 유입수의 경로를 짧게 하는 대신 두 개의 집중형 유로를 형성하여 병렬형 유로의 단점을 보완하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2-1. 유로 구조 설계

Fig. 2에서 나타냈듯이 CDI 셀의 설계는 조립성과 이동성을 생각하여 20×20 cm² 크기의 정사각형으로 정하고 스택 내부를 대각선 중심으로 돌로 나누어 대각선의 양 끝부분에 유입구를 위치시키고, 반대편 대각선의 양 꼭지점에 유출구를 위치시켰다.

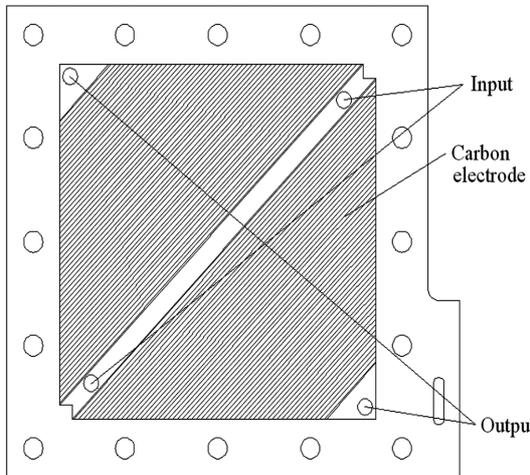


Fig. 2. Configuration of input and output for channel structure.

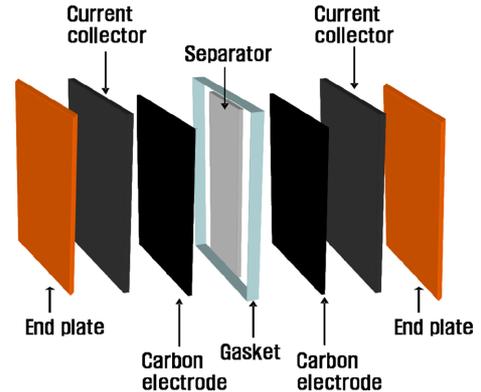


Fig. 3. Configuration of CDI components.

이에 따라 원수가 셀의 중심으로 들어와서 확산되기 때문에 원수와 전극과의 접촉면을 증가시키고, 처리수가 집중형 형태로 흘러가면서 유속이 빨라져 배출이 용이하도록 설계하였다.

2-2. 구성요소

한 셀의 구성은 end plate(지지체) - current collector(양극 전류공급판) - carbon electrode(양극 탄소전극) - separator(전극분리막) - carbon electrode(음극 탄소전극) - current collector(음극 전류공급판) - end plate(지지체)로 Fig. 3의 모식도처럼 구성하였다. 중심부분의 분리막과 양 옆의 탄소전극들은 gasket(가스켓)으로 감싸여 고정되어 있다[6].

전류공급판은 전도성이 좋은 탄소재질의 graphite를 사용하였고, 탄소전극은 흡착표면이 700~2,500 m²/g인 carbon cloth(Kuraray chemical, Japan)을 사용하여[7,8] 한 면이 약 210 cm²(14.5×14.5 cm²) 면적의 전극을 사용하였다. 전극분리막은 양극과 음극의 성질을 띠고 있는 각각의 전극을 분리시켜줘야 하기 때문에 두께가 얇으면서도 전극의 단락성이 좋으며 원수의 투과율이 좋은 SunMap LC-T (Nitto denko, Japan)를 사용하였다. 가스켓은 전극과 전극분리막의 위치가 고정될 수 있도록 돕고 외부적인 누수가 생기지 않도록 하는 역할로 NBR(nitrile-butadiene rubber) 재질의 가스켓을 사용하였다.

2-3. CDI 운전

Fig. 4는 염 제거 실험의 모식도를 나타낸 것이다. 용수는 펌프(Masterflex Cole-parmer, USA)를 사용하여 일정한 유량으로 CDI 스택에 유입되고, DC power supply(6674A system, HP, USA)를 사용하여 일정한 전압을 걸어주었다. 변화하는 배출수의 전도도는 conductivity instrument(YSI 3200, USA)를 사용하여 10초마다 CDI 스택에서 유출되는 배출수를 측정하여 RS232를 통해 컴퓨터에 입력하였고, CDI스택 유입구 앞 부분에 압력계지를 달아 실시간으로

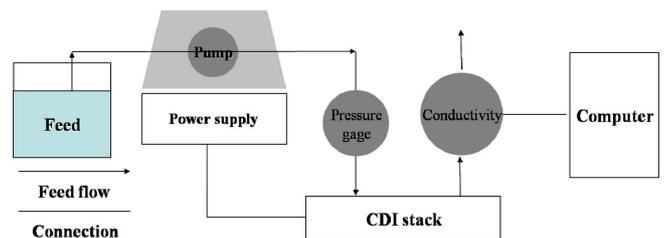


Fig. 4. Schematic of CDI experiment setup.

스택 내부에 걸리는 수압 변화를 확인하였다.

설계한 유료가 적용된 CDI 스택의 염 제거효율을 확인하기 위하여 CDI 운전 실험을 실행하였다. 단위 셀을 사용한 실험은 100 mg/L의 NaCl(Dongyang chemical, Korea)를 용수로 사용하여 18 ml/min의 유량을 공급하였고, 흡착과 탈착이 이루어지는 시간을 각각 6 분으로 안배하여 흡착과 탈착이 충분히 일어날 수 있도록 조건을 정해 주고 실험을 실시하였다. 셀에 인가된 전압은 1.5~1.6 V로 지정하였는데, 이는 인가전압이 높을수록 높은 염 제거효율을 보이지만 1.6 V 이상의 전압이 인가될 경우 물분해가 발생하므로[6-9], 정수로서 사용하기에 부적합하여 적정수준인 1.5~1.6 V로 지정하였다. 용량 증축된 CDI 실험은 스택을 단위 셀에 들어가는 전류공급관 - 탄소전극 - 전극 분리막 - 탄소전극 - 전류공급관을 20층 반복 구성하였고, 양끝은 전기가 통하지 않으며 전체적인 셀을 고정시켜 줄 수 있는 Bakelite 재질의 지지판으로 구성하였다. 용량 증축된 스택의 실험은 단위 셀의 실험과 같은 조건으로 이루어졌고 용수의 유량만 20 배로 늘려 360 ml/min의 조건으로 실행하였다. 이 용량 증축방식은 용수가 각 셀에 병렬적인 흐름으로 유입되어 수압이 단위 셀의 수압과 비슷하도록 유지하였고 실시간으로 압력게이지의 수압을 확인하여 단위 셀과의 수압을 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. COMSOL을 이용한 모델링

스택 내부의 유로를 예측하기 위하여 COMSOL Multiphysics 3.5a를 사용하여[10] 모델링한 결과를 Fig. 5에 나타냈다. COMSOL은 스택의 구조와 사용되는 물질의 기본 정보를 입력하면 물의 흐름을 모델링 할 수 있는 유체역학적 모델링 프로그램이다. 원수와 접촉하는 탄소전극과 전극분리막의 물성 값을 입력하고 3D의 steady-state 분석으로 1기압일 때 유입구로 들어가는 유속이 7.8 mm/s로 정하여 모델링 하였다. 유속을 7.8 mm/s로 정한 이유는 지지판의 유입구 지름이 8 mm이고 유량을 18 ml/min으로 지정하여 계산한 유속이다.

스택 내부의 밝기 변화는 와도(소용돌이도)의 정도를 나타내어 밝을수록 와도가 커 유체의 흐름이 활발하다는 것을 의미하고, 선은 유

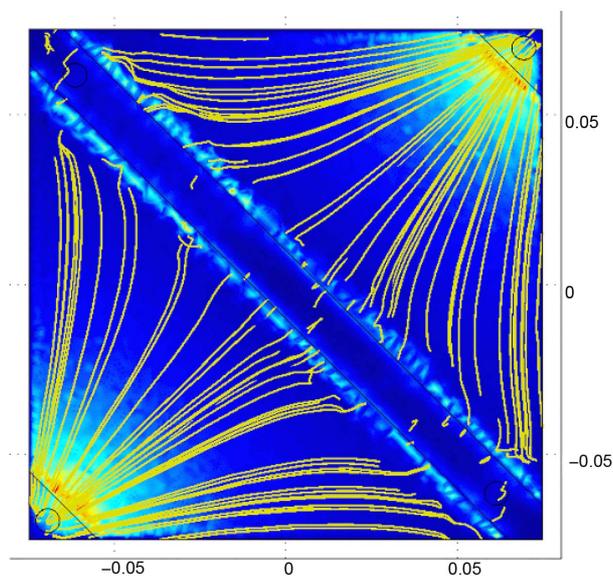


Fig. 5. Modeling of water flow by COMSOL program.

체의 흐름을 나타내어 유입되는 원수가 어떻게 흐르는지 확인할 수 있다. Fig. 5에서 볼 수 있듯이 중앙부의 대각선에서는 어두웠다가 유출구 부분으로 갈수록 표면이 밝아지는 것을 확인할 수 있다. 즉 대각선 중앙부에서는 천천히 확산되었다가 유출구로 가면서 속도가 빨라져 배출이 용이하게 이루어짐을 확인할 수 있고, 출구로 뻗어있는 선들이 유입구의 두 지점에서 시작하는 것이 아니라 중앙부의 대각선 경계면으로 끌고루 퍼졌다가 다양한 방향으로부터 집중되어 유출되는 것을 보여주어 유입된 원수의 확산이 원활하게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 즉 원수가 전극 위를 채널링 현상 없이 효율적인 집중형 유로를 형성하는 것을 확인할 수 있다.

3-2. 단위 셀의 운전

Fig. 6은 단위 셀을 사용하여 18 ml/min의 유량을 공급하며 1.5 V에서 1.6 V 사이의 전압을 인가하여 얻은 결과이다. 운전 중의 셀에 걸리는 수압은 1.1 psi이었고, 제거효율은 다음과 같은 식을 사용하여 계산하였다[11].

$$\eta(\%) = \frac{C_i - C_0}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

여기서, C_i 는 초기 용수의 전도도 값이고, C_0 는 배출수의 최저 전도도 값을 의미한다.

Fig. 6은 단위 셀의 연속적인 운전에 따른 전도도 변화를 그래프로 나타낸 것인데, 실선은 전도도를 나타내고 점선은 전압의 변화를 나타내고 있다. 이 결과의 초기 전도도 값은 230 $\mu\text{S/cm}$ 이고 최저 전도도 값은 67 $\mu\text{S/cm}$ 로 식 (1)을 사용하여 계산한 염 제거효율은 70.8%로 나타났다. 인가된 전압의 변화에 따라서 전도도가 변화 하는 것을 확인할 수 있으므로 정수기능을 할 수 있는 능력을 가지고 있다고 판단되어 이 제거효율을 목표로 용량 증축하였다.

3-3. 용량 증축된 셀의 운전

Fig. 7의 그래프는 단위 셀보다 20배로 용량이 증축된 스택의 실험 결과로 유량을 20배로 증가시킨 360 ml/min로 유입시켰고, 인가되는 전압은 단위 셀과 마찬가지로 1.5 V에서 1.6 V사이로 정해 주어 실험한 결과이다.

물 흐름의 압력은 1.3~1.5 psi 정도로 단위 셀과 비슷한 유압을 확

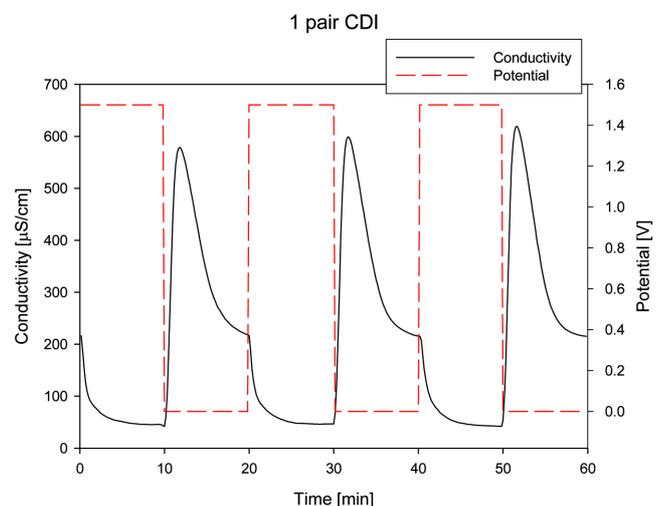


Fig. 6. Salt removal efficiency result of 1 pair stack.

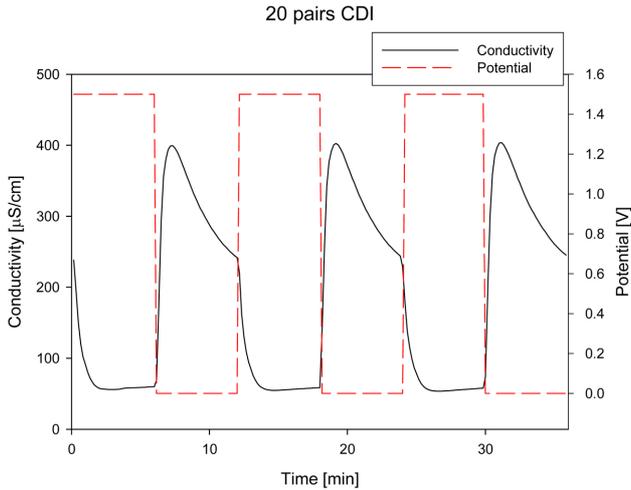


Fig. 7. Salt removal efficiency result of 20 pairs stack.

인할 수 있었다. 이 결과는 유량이 20배로 커졌으나 셀의 병렬적 증가로 인하여 용수의 흐름이 방해 없이 원활하게 흐르는 것을 의미한다. 초기 전도도 값은 $220 \mu\text{S}/\text{cm}$ 이고 최소 전도도 값은 $53.7 \mu\text{S}/\text{cm}$ 로 식 (1)을 사용하여 제거효율을 계산한 결과 약 75.6%의 제거율을 보이고 있다. 그러므로 용량 증축된 스택의 효율적인 염 제거를 확인할 수 있으며 Fig. 7의 그래프에서 볼 수 있듯이 연속적인 사이클의 변화를 보이므로 정수를 하기 위한 시스템을 구축하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 연구된 유로의 스택이 실제 공정에 적용될 수 있음을 보여준다.

4. 결 론

CDI시스템을 실제 공정에 적용하기 위하여 스택의 유로를 설계한 연구로서, 대용량 제작을 위한 병렬형 구조이며 제거효율을 최대화시키기 위한 새로운 집중형 유로를 도입하여 제작하고 성능 평가하였다. 스택의 이동성과 효율성을 고려하여 크기를 정하고 스택 내의 유로가 폭이 넓은 부분에서 유입되었다가 폭이 점점 좁아지게 설계하여 채널링 현상을 방지하며 충분한 흡착과 탈착이 일어날 수 있게 함과 동시에 유출구에 가까워질수록 유속이 빨라져 배출이 용이하도록 설계하였다. 유체역학 모델링 프로그램인 COMSOL을 사용하여 유로를 모델링한 결과 원수가 스택 내부로 유입되어 채널링 현상이 자유로운 흐름을 가지며, 유출부분에서 유속이 빨라져 원활한 흐름을 갖는 집중형 구조임을 확인할 수 있었다. 염 제거효율을 확인하기 위하여 단위 셀을 사용하여 $18 \text{ ml}/\text{min}$ 의 유량으로 운전한 결과 1.1 psi 의 수압으로 70.8%의 제거 효율을 확인할 수 있었고, 단위 셀

을 20층으로 쌓아 $360 \text{ ml}/\text{min}$ 의 유량으로 운전한 결과 $1.3\sim 1.5 \text{ psi}$ 의 수압으로 75.6%의 제거 효율을 확인할 수 있었다. 단위 셀과 용량 증축된 셀의 수압이 비슷한 이유는 병렬형 구조로 구성되어 수압의 큰 영향을 주지 않기 때문이다. 또한 집중형 구조로 형성하여 병렬형의 단점인 낮은 염 제거 효율을 보완하여 설계됨을 확인할 수 있었다. 전도도의 변화는 일정한 전압의 변화에 따른 전도도의 변화를 확인함으로써 실제 공정에 적용되어 운전이 가능함을 보여주었다.

참고문헌

- Kim, Y.-J. and Choi, J.-H., "Improvement of Desalination Efficiency in Capacitive Deionization Using a Carbon Electrode Coated with an Ion-exchange Polymer," *Water Res.*, **44**(3), 990-996(2010).
- Seo, S.-J., Jeon, H., Lee, J.-K., Kim, G.-Y., Park, D., Nojima, H., Lee, J. and Moon, S.-H., "Investigation on Removal of Hardness Ions by Capacitive Deionization (CDI) for Water Softening Applications," *Water Res.*, **44**(7), 2267-2275(2010).
- Farmer, J. C., "Method and Apparatus for Capacitive Deionization and Electrochemical Purification and Regeneration of Electrodes," US Patent No. 5,954,937(1999).
- Shiue, L.-R., "Deionisers with Energy Recovery," US patent No. 6,66,643 B2(2003).
- D. Andelman, M., "Charge Barrier Flow-Through Capacitor," US Patent No. 6,709,560 B2(2004).
- Lee, J.-B., Park, K.-K., Eum, H.-M. and Lee, C.-W., "Desalination of a Thermal Power Plant Wastewater by Membrane Capacitive Deionization," *Desalination*, **196**(1-3), 125-134(2006).
- Afkhami, A., Madrakian, T. and Karimi, Z., "The Effect of Acid Treatment of Carbon Cloth on the Adsorption of Nitrite and Nitrate Ions," *J. Hazard. Mater.*, **144**(1-2), 427-431(2007).
- Huang, C.-C. and Su, Y.-J., "Removal of Copper Ions from Wastewater by Adsorption/electrosorption on Modified Activated Carbon Cloths," *J. Hazard. Mater.*, **175**(1-3), 477-483(2010).
- Jung, H.-H., Hwang, S.-W., Hyun, S.-H., Lee, K.-H. and Kim, G.-T., "Capacitive Deionization Characteristics of Nanostructured Carbon Aerogel Electrodes Synthesized via Ambient Drying," *Desalination*, **216**(1-3), 377-385(2007).
- Akhtar, N., Decent, S. P., Loghin, D. and Kendall, K., "A Three-dimensional Numerical Model of a Single-chamber Solid Oxide Fuel Cell," *Int. J. Hydrog. Energy*, **34**(20), 8645-8663(2009).
- Dermentzis, K. and Ouzounis, K., "Continuous Capacitive Deionization-electrodialysis Reversal Through Electrostatic Shielding for Desalination and Deionization of Water," *Electrochim. Acta*, **53**(24), 7123-7130(2008).