

음료수 제조 공정 폐수의 MBR 처리 기술 평가

정철중[†] · 박종민 · 김연국

코웨이(주) 환경기술연구소 물환경연구팀
(2014년 2월 5일 접수, 2014년 2월 25일 수정, 2014년 2월 26일 채택)

Technical Evaluation of MBR Process for the Wastewater Treatment of Beverage Fabrication Processes

Cheol Joong Jung[†], Jong min Park, and Youn Kook Kim

Coway Co. LTD, Institute of Environmental Technology, Water & Environment Research Team
(Received February 5, 2014, Revised February 25, 2014, Accepted February 26, 2014)

요약: 주류를 제외한 과일 및 탄산음료 등을 제조하는 비알코올성 음료품 제조시설에서 발생하는 폐수는 높은 농도의 유기물과 낮은 농도의 질소, 인 등을 함유한다. 이러한 폐수의 처리 시설은 주로 호기성 공정과 약품응집 공정으로 구성하고 후단에 사여과지 또는 활성탄 공정을 추가하기도 한다. 하지만 이러한 방식은 긴 체류시간과 침전지 설치로 인해 많은 부지를 필요로 하는 문제가 있다. 본 연구에서는 부지소요 문제와 슬러지 유출로 인한 수질저하 문제를 해결하고자 W식품공장 폐수처리장 인근에 MBR pilot plant를 설치하고 장기간 운영을 통해 데이터를 확보하고 처리 효율을 평가하였다. 약 3개월간 음료수 제조공정 폐수를 평막을 적용한 MBR pilot plant로 운전조건을 변화하며 처리한 결과, 처리유량 20 m³/day, HRT 29 hr, 4Q 반송조건까지는 유기물 제거율 97% 이상으로 안정적인 처리가 가능했다. 하지만 그 이상의 운전조건에서는 생물반응조의 오염물질 제거율이 감소하였고 TMP가 급격히 증가하는 모습을 보였다.

Abstract: Manufacturing facility for non-alcoholic drink, the parts of the food industry, disposes wastewater which includes high organic concentration and low nitrogen, phosphorus concentration. For this kind of wastewater, the treatment plant consists mainly of aerobic reactor and chemical coagulation process. And sand-filter or activated carbon process is normally installed further. However, aerobic reactor must have long HRT to treat high concentration of organic contaminant included in this wastewater, so the large site area is required. And settling tank which is normally applied for wastewater treatment facility has some problems such as water quality degradation caused by the sludge spill. To solve these problems, we applied MBR system for the wastewater. And the MBR pilot plant was installed nearby the wastewater treatment facility of W food factory and operated during long term to evaluate treatment efficiency. This plant was operated about 3 months and than the result was 97% of organic removal rate on conditions of flow rate 20 m³/day, HRT 29 hr, recycle 4Q. However, contaminant removal ratio of bio-reactor decreased and TMP of membrane increased rapidly on more conditions.

Keywords: MBR, wastewater, beverage industry, membrane bio-reactor

1. 서론

식품산업은 각종 축산물의 가공과 사람이 먹을 수 있는 제품의 제조 등을 포함하고 이곳에서 배출되는 식품산업폐수는 주로 원료의 부산물, 세척수, 응축수에 의해 발생된다[1]. 식품산업폐수는 보통 고농도의 유기물, 질

소, 인을 함유하여 효과적인 처리를 위해서는 긴 HRT (Hydraulic Retention Time)와 고도처리공정을 필요로 한다. 2010년 통계청 자료에 따르면 323,980 m³/day의 식품산업폐수가 배출되고 있으며 이 중에 23.7%인 76,548 m³/day가 음료수 제조업에서 발생하는 폐수로 나타났다.

음료수 제조업은 곡물, 과일 및 채소 등을 발효시켜

[†]교신저자(e-mail: newj@coway.co.kr)

증류하고, 이를 정제 또는 합성하여 증류주 및 합성주를 생산하는 산업과 식용 또는 냉장용 얼음, 인조눈 및 천연생수를 생산하는 산업활동을 말한다. 이 중 비알콜성 음료품 제조시설은 주류를 제외한 과일 및 탄산음료 제조시설 등이 해당되며 식용 또는 냉장용 얼음 및 인조눈을 생산하는 산업활동, 천연 생수를 생산하여 병 또는 기타 포장용기에 포장하는 산업활동, 물에 설탕, 감미료 또는 향미료를 첨가한 음료를 생산하거나, 과일주스, 과일추출물 또는 기타 합성추출물을 첨가하여 청량음료 또는 기타 비알콜성 음료를 제조하는 시설이 해당된다. 이들 시설의 제조공정은 원액의 여과, 혼합 및 희석, 살균공정으로 재이용되는 용기가 많기 때문에 용기의 세척공정에서 대부분의 폐수가 발생된다. 환경부 조사 결과에 따르면 이러한 비알콜성 음료품 제조시설에서 배출되는 폐수의 오염물질 농도가 BOD (Biochemical Oxygen Demand) 1,464~4,860 mg/L, COD (Chemical Oxygen Demand) 655.2~2,091.5 mg/L, SS (Suspended Solid) 101.8~186.0 mg/L, T-N (Total Nitrogen) 5.7~10.3 mg/L, T-P (Total Phosphorus) 1.5~3.6 mg/L를 나타내어 다른 업종의 배출시설에 비해 상대적으로 적은 양의 오염물질을 발생시키는 것으로 확인되었다(환경부, 산업폐수관리체계 개선방안 연구, 2008).

비알콜성 음료 및 얼음 제조시설 발생 폐수는 높은 농도의 유기물과 낮은 농도의 질소, 인을 함유하여 일반적으로 호기성 공정과 약품응집 공정을 조합하여 처리하고 후단에 사여과 공정이나 활성탄 공정을 추가하기도 한다[2]. 비알콜성 음료폐수는 생물학적으로 분해가 용이한 유기물 함량이 매우 높아 일반 활성슬러지 공정만으로 충분히 처리가 가능하지만 높은 유기물 농도로 인해 긴 체류시간을 필요로 하여 많은 부지가 소요된다. 여기에 침전조나 부상조까지 설치한다면 소요 부지면적은 더욱 커진다.

분리막 생물반응기(Membrane Bio-Reactor; MBR)는 생물반응조와 분리막 기술을 조합한 공정으로 높은 고액분리 효율로 인해 기존 활성슬러지 공정(Conventional Activated Sludge; CAS)보다 높은 MLSS (Mixed Liquor Suspended Solid)를 유지할 수 있어 처리효율 증대가 가능하고 별도의 침전조와 부상조가 필요치 않기 때문에 소요부지 절감이 가능하다[3-5]. 이러한 이유로 현재 하·폐수를 대상으로 다양한 MBR 공정이 연구되고 있다[6-11]. 국내 시장에서 MBR 공정은 지금까지 대부분 마을 하수도를 비롯한 중·소규모 처리장에 적용되어왔

Table 1. Influent Wastewater Characteristics

Parameter	Units	Mean	Max	Min
COD _{Cr}	mg/L	1,524	3,100	472
T-N	mg/L	5.8	23.0	0
T-P	mg/L	4.1	17.8	0

다. 하지만 최근에는 인천시 공촌 하수처리장에 65,000 m³/day 규모의 침지식 중공사막을 적용한 MBR 공정이 설치되는 등 점차 대형화되는 추세이다[12].

본 연구는 기존 음료수 제조공정 폐수 설비의 부지소요 문제와 슬러지 유출로 나타나는 수질저하 문제 등을 해결할 수 있는 효율적인 처리 공정을 확보하기 위해 c-PVC 재질의 평막을 장착한 MBR 시스템을 처리에 적용하고자 하였다. 이에 W식품 공장 폐수처리장 인근에 MBR pilot plant를 설치하고 운영하였으며 장기간 운영을 통해 데이터를 확보하고 처리 효율을 평가하였다.

2. 연구방법

본 연구를 위해 처리유량 20 m³/day 규모의 MBR pilot plant를 W식품 공장 폐수처리장 인근 부지에 설치하였고 공장 내 폐수처리장과 동일한 다단폭기 공정을 적용하여 운영하였다.

2.1. 대상폐수 성상

본 연구의 대상폐수는 W식품 공장 음료수 제조공정에서 발생하는 폐수로 공장 내 폐수처리장 원수 저류조에 수중펌프를 설치하여 대상폐수가 MBR 반응조로 직접 유입되도록 구성하였다. 운영기간 동안의 대상폐수 성상은 Table 1에 나타내었다.

대상폐수 성상은 일반적인 비알코올성 음료품 제조 시설에서 배출되는 폐수와 비슷하였으며 공장의 운영 조건에 따라 유기물 농도(COD_{Cr})가 최소 472 mg/L부터 최대 3,100 mg/L까지 큰 변화를 나타내었다.

2.2. 설비 제원

본 연구에 사용된 MBR pilot plant는 높은 농도의 유기물과 낮은 농도의 질소, 인을 함유한 음료수 제조공정 폐수를 처리하기 위해 다단폭기 공정을 적용하였다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 MBR pilot plant의 공정을 나타내었다.

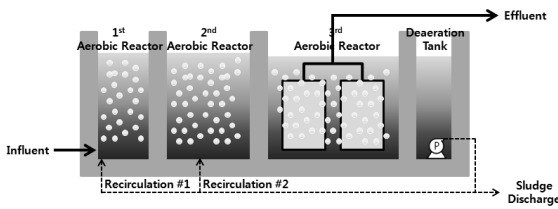


Fig. 1. Schematic diagram of MBR pilot plant.

Table 2. Specification of MBR Pilot Plant

Category	Specification
Flow rate	20 m ³ /day
Process	Multi-stage aeration system
Membrane type	Plate & Frame type module
Material	c-PVC
Pore size	0.4 μm
Membrane surface area	140 m ²

기존 처리시설은 3차호기조 후단에 침전조를 설치하여 고액분리된 처리수를 방류하는 반면에 MBR pilot plant는 3차호기조에 평막을 설치하고 이를 투과한 처리수를 방류하도록 구성했다. 분리막은 운전 7분, 휴지 3분의 간헐운전을 적용하였고 막 세정공기량은 7.7 L/m² · min를 유지하였다. Table 2는 본 연구에 사용된 MBR pilot plant의 제원을 나타낸 것이다.

2.3. 운전조건

대상폐수는 음료수 원액 또는 폐액으로 구성된 평균 COD_{Cr} 농도 1,524 mg/L의 고농도 유기폐수로 안정적인 실험 진행을 위해 처리유량 10 m³/day, 운영 flux 4 LMH (L/m²/hr)부터 점차적으로 처리유량을 증가시키며 실험을 진행하였다. 일반적으로 산업폐수는 각각의 폐수마다 함유된 오염물질과 농도가 다르기 때문에 생물 반응조 미생물 식종과 적용에 많은 시간이 소요된다. 본 연구에서는 W식품 공장 내부에 운영 중인 폐수처리장 슬러지를 생물반응조 미생물 식중에 사용하여 미생물 적응 기간을 단축하고 빠르게 실험을 진행할 수 있었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수 성상 분석

Fig. 2~Fig. 4는 MBR pilot plant 운영기간 동안의

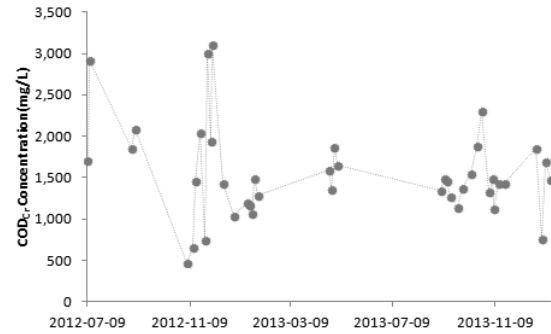


Fig. 2. COD_{Cr} Concentration of Influent.

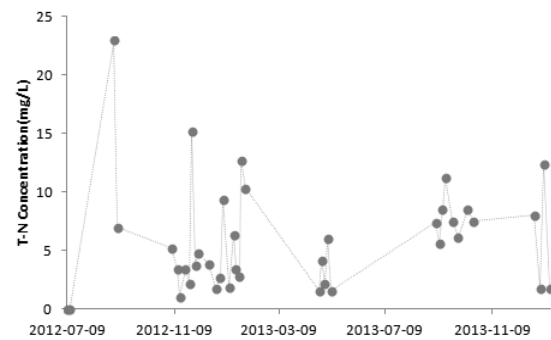


Fig. 3. T-N Concentration of Influent.

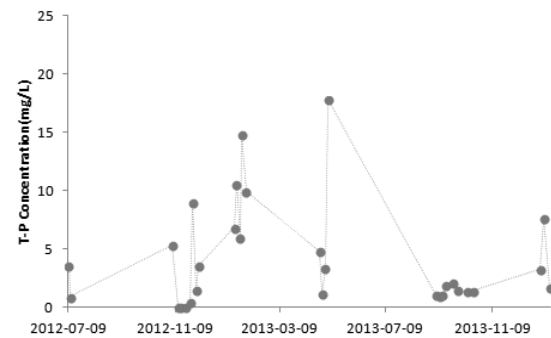


Fig. 4. T-P Concentration of Influent.

대상폐수 수질 분석 결과를 나타낸 것이다.

운영기간동안 COD_{Cr}, T-N, T-P를 측정된 결과 측정 일마다 수질에 큰 변동이 있음을 알 수 있었다. 운영기간 동안의 COD_{Cr} 평균농도는 1,471 mg/L이었으나 472 ~ 3,100 mg/L 사이에서 큰 변동을 보였고 T-N, T-P 평균농도도 각각 7.8 mg/L, 1.4 mg/L로 비교적 낮게 나타났으나 T-N은 최대 23 mg/L, T-P는 최대 17.8 mg/L으로 평균농도 대비 큰 변동을 보였다. 이는 W식품 공장에서 생산하는 제품과 수량이 매일 바뀌기 때문에 나타나는 수질변화로 생각되며 운영기간 동안의 대상폐수

Table 3. Operating Condition of MBR Pilot Plant

Parameter	Units	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
		2012.11.12~ 2013.01.10	2013.01.10~ 2013.01.18	2013.01.18~ 2013.01.22	2013.01.22~ 2013.01.29
Flow rate	m ³ /day	10	15	20	25
HRT	hr	42.6	37.2	29.0	23.2
SRT	days	2.5	5	5	4
flux	LMH	4	6	8	10
membrane operating time	min	7	7	7	7
membrane resting time	min	3	3	3	3
MLSS	mg/L	2,851	3,617	4,357	6,402
Recirculation #1	Q	2.0	4.0	4.0	3.5
Recirculation #2	Q	2.0	0.0	0.0	0.0

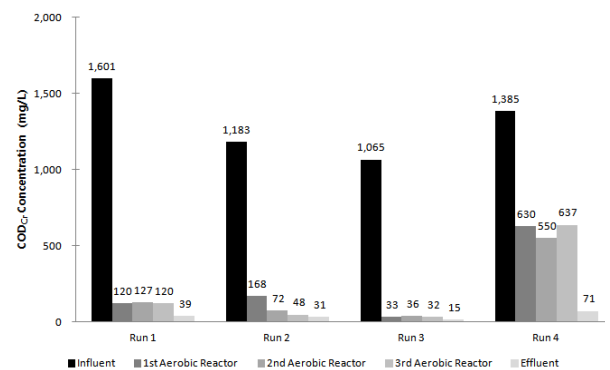
성상은 환경부에서 조사한 비알코올성 음료품 제조시설에서 발생하는 폐수의 성상과 크게 다르지 않았다.

3.2. 운전 조건에 따른 처리수질 분석

본 연구는 대상폐수에 적합한 MBR pilot plant 운전 조건을 확보하기 위해 처리유량 및 운전 flux, SRT (Solid Retention Time), 반송량을 변화하며 실험을 진행하였다. 실험은 분리막 오염을 최소화하면서 MBR 처리용량 및 처리효율을 확인하기 위해 처리유량을 10 m³/day부터 단계적으로 증가시키며 진행하였다. Table 3에는 운영기간동안 MBR pilot plant의 운전조건을 나타내었다.

보통 P사의 평막은 일반하수를 대상으로 설계 flux 20 LMH 정도로 운영하지만 본 연구의 대상폐수는 높은 농도의 유기물을 함유한 음료수 제조공정 폐수이고 이에 대한 해당 분리막의 적용사례가 많지 않기 때문에 비교적 낮은 flux인 4 LMH부터 운영하였다. 또한 대상폐수가 생물학적 분해도가 높은 유기물을 다량 함유하고 있기 때문에 중속영양 미생물(Heterotrophic bacteria)의 빠른 성장속도를 고려하여 초기 SRT를 2.5일로 결정하였다.

Fig. 5에는 운전조건에 따른 각 반응조별 COD_{Cr} 평균농도 변화를 나타내었다. 처리유량 10 m³/day를 시작으로 5 m³/day씩 증가시키며 Run 1~Run 4를 단계적으로 운영한 결과, 처리유량 20 m³/day의 이하의 운전 조건인 Run 1~Run 3에서는 대상폐수를 비교적 안정적으로 처리하는 모습을 보였다. 하지만 처리유량 25

**Fig. 5.** COD_{Cr} concentrations of each reactor.

m³/day으로 운전한 Run 4에서는 3차호기조의 COD_{Cr} 농도가 637 mg/L로 급증하고 처리수 COD_{Cr} 농도가 71 mg/L로 증가하여 생물학적으로 처리 가능한 부하를 초과한 것으로 판단되었다. 때문에 본 연구에서 MBR pilot plant의 대상폐수에 대한 최대처리용량은 20 m³/day로 사료된다.

운영기간동안 대상폐수의 T-N 농도는 0~23 mg/L로 대부분 방류수 수질기준인 20 mg/L 이하를 유지했고 처리수 T-N 농도 또한 낮게 나타났다. 이러한 이유로 본 연구에서는 질소제거에 대하여 별도의 처리기술을 적용하지 않았다.

운전기간동안 대상폐수 T-P 농도는 전체 평균 4.1 mg/L로 전반적으로 낮게 유입되었으나 공장 운영 상황에 따라 특정기간에는 높게 유입되는 경우도 있었다. 운전기간동안의 처리수 T-P 농도는 I지역 방류수 수질

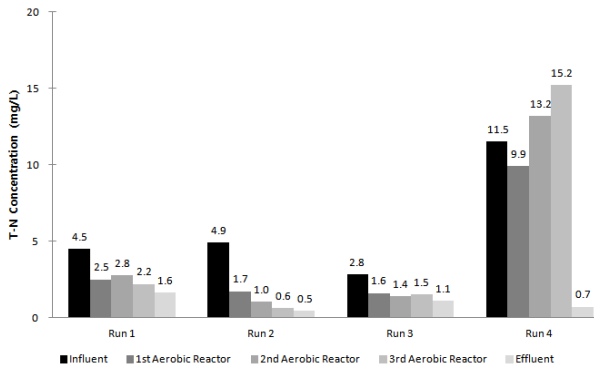


Fig. 6. T-N concentrations of each reactor.

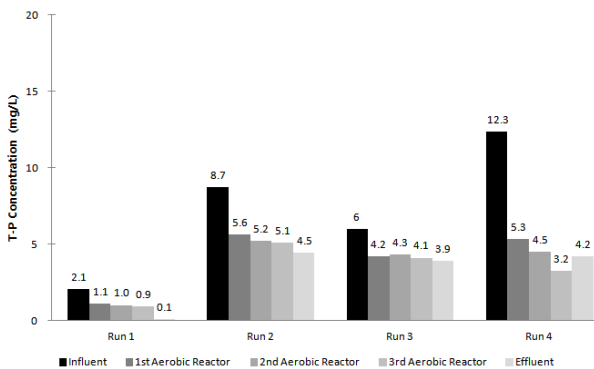


Fig. 7. T-P concentrations of each reactor.

기준인 0.2 mg/L보다 대부분 낮게 나타났으나 유입농도에 따라 방류수 수질기준보다 높게 나타나는 경우도 있었다. 이는 질소 등의 다른 영양염류 농도가 낮아 미생물 성장에 사용된 T-P의 양이 많지 않기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 때문에 본 공정에서 안정적인 T-P 제거를 위해서는 별도의 인제거 공정이 검토되어야 할 것으로 판단된다.

3.3. 분리막 TMP (Trans Membrane Pressure) 변화

Pilot plant 운영기간 동안 TMP는 점차 증가하는 모습을 보였다. Fig 8에 각 운전조건별 TMP 변화 추이를 나타내었다.

초기 운전조건인 Run 1에서는 운영 flux를 4 LMH 정도로 매우 낮게 운영했고 처리수조가 MBR 수위의 약 1.5m 하단에 설치되어 수압에 의한 생산이 가능했다. 때문에 Run 1 초기에는 수압에 의한 양압이 나타났고 약 90일 운영 후에 막오염으로 인해 점차 음압으로 바뀌는 현상이 나타났다. 운영 flux를 점차 증가시키며 실험을 진행한 결과, 10 LMH로 운영한 Run 4에서

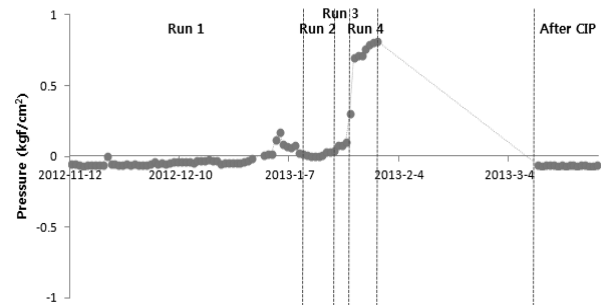


Fig. 8. Change of permeate pressure.

TMP가 급격히 증가하였다. 이는 생물반응조 처리용량 초과로 반응조 유기물 농도가 급증하여 막오염이 가속화되었기 때문으로 판단된다.

Run 4 실험 이후 오염된 분리막은 NaOCl 500 mg/L 용액을 이용하여 계외세정을 실시하였다. 계외세정 후 Run 1 운전조건으로 재가동을 실시했으며 TMP가 초기 값으로 회복되는 모습을 확인하였다.

4. 결론

음료수 제조공정 폐수는 높은 농도의 유기물과 낮은 농도의 질소, 인을 함유하여 유기물 제거에 중점을 두고 연구를 수행했다. 운영기간 동안 본 연구에서 사용된 대상폐수의 평균농도는 COD_{Cr} 1,471 mg/L, T-N 7.8 mg/L, T-P 1.4 mg/L로 나타났고 높은 유기물 농도와는 달리 T-N은 대부분 방류수질농도인 20 mg/L 이하로 유입되는 것으로 나타났다. 때문에 본 연구의 대상폐수는 대부분 다단폭기 공정만으로 충분히 처리가 가능했다.

연구기간 동안 대상폐수의 오염물질 농도는 공장의 운영 상황에 따라 변동이 매우 크게 나타났다. 운영기간 동안 COD_{Cr}은 472~3,100 mg/L, T-N은 0~23 mg/L, T-P는 0~17.8 mg/L의 비교적 큰 범위에서 농도 변화가 있었다. T-N은 대부분 방류수 수질기준인 20 mg/L 이하로 유입되어 처리에 큰 어려움이 없었으나 T-P는 별도의 인제거공정이 없어 높은 농도가 유입되는 날에는 처리에 어려움이 있었다. 유기물 대비 T-P의 농도가 매우 낮았음에도 제거가 잘 일어나지 않은 이유는 T-N을 비롯한 영양염류의 농도가 낮아 미생물 성장에 쓰인 T-P의 양이 적었기 때문으로 판단된다.

약 3개월간 음료수 제조공정 폐수를 평막을 적용한 MBR pilot plant로 처리유량을 증가시키며 실험한 결과, 20 m³/day, HRT 29 hr, 4Q 반송조건까지는 안정적

인 처리가 가능했다. 하지만 처리유량 25 m³/day, HRT 23.2 hr, 3.5Q 반응조건에서는 생물반응조의 COD_{Cr} 농도가 증가하였고 이에 따라 처리수 수질이 악화되고 TMP가 급격히 증가하는 모습을 보였다. 때문에 본 연구에 사용된 MBR pilot plant의 최대 처리유량은 20 m³/day로 판단되었다.

감 사

본 연구는 환경부 “글로벌탑 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임(과제번호 : GT-11-B-01-016-0).

참 고 문 헌

1. C. I. Jung, J. H. Ahn, W. K. Bae, and S. J. Kim, “High Strength Slaughter Wastewater Treatment in a Novel Combined System of Hybrid-Rotating Biological Contactor and Biological Aerated Filter”, *J. of KSEE*, **33**(2), 77 (2011).
2. M. G. Suh, J. H. Suh, and J. S. Kang, “The Treatment of Industrial Wastewater by the Fluidized-Bed Biofilm Reactor”, *Korean Journal of Food Science and Technology*, **25**(1), 69 (1993).
3. T. Asano, F. L. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, and G. Tchobanoglous. “Water Reuse: Issues, Technology and Applications”, pp. 1-10, McGraw-Hill, New York, USA (2007). *J. of KSBB*, **6**(4), 345 (1991).
4. S. G Kim, H. W. Lee, and Y. J. Kang, “Nutrient Removal Characteristics on Organic Material Loadings in Submerged Flat Sheet Type Sequencing Batch Membrane Reactor”, *Membrane Journal*, **20**(3), 241 (2010).
5. K. Y. Kim, J. H. Kim, Y. H. Kim, and H. S. Kim, “The Effect of Coagulant in Filtration Performance in Submerged MBR System”, *Membrane Journal*, **16**(3), 182 (2006).
6. A. Santos, W. Ma, and S. J. Judd, “Membrane bioreactors : Two decades of research and implementation”, *Desalination*, **273**(1), 148 (2011).
7. A. Santos and S. Judd, “The commercial status of membrane bioreactors for municipal wastewater”, *Separation Science and Technology*, **45**, 850 (2010).
8. I. Bemberis, P. J. Hubbard, and F. B. Leonard, “Membrane sewage treatment systems potential for complete wastewater treatment”, *Proc. Amer. Soc. Agric. Eng.*, **71**, 1 (1971).
9. M. S. Kang, S. S. Kim, G. D. Hwang, and J. L. Kang, “Treatment of textile wastewater by membrane-bioreactor process”, *Membrane Journal*, **7**(4), 175 (1997).
10. I. H. Cho and J. T. Kim, “Trends in the Technology and Market of Membrane Bioreactors (MBR) for Wastewater Treatment and Reuse and Development Directions”, *Membrane Journal*, **23**(1), 24 (2013).
11. H. Monclus, J. Sipma, G. Ferrero, I. Rodriguez-Roda, and J. Comas, “Biological nutrient removal in an MBR treating municipal wastewater with special focus on biological phosphorus removal”, *Bioresource Technology*, **101**, 3984 (2010).
12. D. Dolar, M. Gros, S. Rodriguez-Mozaz, J. Moreno, J. Comas, I. Rodriguez-Roda, and D. Barcelo, “Removal of emerging contaminants from municipal wastewater with an integrated membrane system, MBR - RO”, *Journal of Hazardous Materials*, **239**, 64 (2012).