

## 섬모상담체를 이용한 고도처리공정의 운전인자 도출

안운희 · 박찬규 · 고광백 · 이강수<sup>\*†</sup>

연세대학교 공과대학 토목환경공학과 환경공학연구소  
<sup>\*</sup>경호엔지니어링

## Proposed Operating Parameters for Advanced Treatment Process using a Cilium Media BNR Process

Yoon Hee Ahn · Chan Gyu Park · Kwang Baik Ko · Lee Kang Soo<sup>\*†</sup>

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

<sup>\*</sup>Kyong-ho engineering & architects co., ltd

(Received 16 August 2007, Accepted 19 September 2007)

### Abstract

The study were conducted in order to investigate the effect of operating parameters including the internal recycle (nitrification return) rates, hydraulic retention times (HRTs) and temperature when using a cilium media method. The first experiment was for evaluating the effect of HRT (12 hr, 10 hr, 8 hr, 6 hr, 4 hr). The second experiment was for analyzing effect of internal recycle rate (100%, 200%, 300%, 400%). As a result of the first experiment, BOD was removed to 97~98% for 6~8 hr HRT. Effluent water quality was not significantly influenced with HRT within that range. However the nitrogen removal was sensitive to HRT. T-P removal efficiency was invariable at various HRTs. The average BOD removal efficiency was about 97% in spite of change of internal recycle rate while T-N removal efficiency was increased at the internal recycle rate of 100~200%, but invariable at the internal recycle rate of 200~300%.

**keywords** : Cilium media, Hydraulic reaction times (HRT), Internal recycle rate, Nitrification rate, Wastewater treatment

## 1. 서론

국내에서 기술 개발한 side stream인 P/L과 P/L-II 공정은 Phostrip 공정의 문제점인 탈질을 해결하여 질소와 인을 동시에 제거하고, 슬러지의 일부를 MLSS의 유지차원에서 사용하는 등 장점을 가지고 있어, 국내 수질특성에 적합한 공정으로 수정이 되었으나, 하수에 난분해성 물질이 유입되고 무산소조에 충분한 탈질이 일어나지 못할 때의 대비책이 미비한 것으로 보인다.

또한 C/N비가 매우 낮아 유기물이 상대적으로 부족하여 탈질 반응이 잘 일어나지 않는 경향을 보이므로(Gayle et al., 1989), 이러한 문제점들을 극복하기 위해서는 기존 하수처리장을 영양염류 처리를 위한 시설로 개선이 필요하며, 가능하면 기존 시설을 최대한으로 이용하도록 하여 비용을 최소화하고, 운전을 자동화하여 유지관리비를 절약할 수 있는 경제적인 공정개발이 필요하다.

최근에는 활성 슬러지 공정에서 임의성 미생물 대신에 담체표면에 부착 성장하는 미생물을 이용하는 방법에 관심이 커지고 있다.

특히, 부착성장 공정에서 질산화는 유입수의 TBOD/TKN

비와 담체의 재질, 비표면적, 수리학적 부하 등에 영향을 받으며 여재표면에 형성된 생물막의 양과 산소농도구배, 산소이용율, 기질이용율 그리고 유입수 고형물이 생물막에 부착되어 생물막 층에서의 국지적인 혐기화 현상 등이 주요 영향인자로서 작용한다(Gullicks et al., 1986).

또한 이러한 질산화 미생물들은 생장속도가 느려 부유성장 공법으로 운영 중인 기존 처리장에서는 일정시간 이상을 질산화조 체류시간으로 할당하여야 하는 한계가 있으나, 담체를 이용하면 부착성이 좋은 질산화 미생물들이 담체에 부착하므로 질산화조의 체류시간을 단축하여도 양호한 질산화를 확보할 수 있다. 이는 호기성조 내에 충전된 담체에 증식속도가 느린 질산화균(*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*)을 다량 고정화시켜 질산화 효율을 상승시키기 때문이다(Anthonisen et al., 1976). 위의 반응 외에도 질산화에 영향을 미치는 인자로는 pH, DO, 수온, SRT, 독성물질이 있으며 이러한 영향인자들에 대한 내성도 강하게 되는 장점이 있어(Hall et al., 1980) 국내·외에 적용사례가 증가하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 담체공법 중 섬모상담체공법을 대상으로 체류시간, 내부반송율의 운전인자에 따른 질소, 인 제거처리능력을 조사하고, 기존 하수처리장의 증설이 없이 효과를 최대한으로 볼 수 있는 최적의 고도처리의 설계인자를 제시하고자 하였다.

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
5368kang@hanmail.net

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. Pilot plant의 설계 제원 및 제작

반응조의 용량은 1 m<sup>3</sup>/day을 기준으로 하여 실 반응조의 체적은 250 L이며, 혐기조는 37.8 L, 무산소조는 75.6 L, 호기조는 136 L로 하였으며, 반응조의 외형은 acryl로 제작되었다. 각 단의 유입과 유출구는 대각선을 이루어 최장 길이가 되도록 상부로 유입되어 하부로 유출되게 구성되었다. 유입과 내·외부 반송은 정량펌프를 사용하여 HRT와 반송량의 변화에 용이하도록 하였으며, 호기조의 유출부와 최종침전지 사이에는 분배조를 두어 내부반송이 용이하도록 하였다. 담체는 충진율 1.0 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>을 기준으로 하여 호기조에 설치하였고, 담체의 지지대는 부식을 방지하고 담체와 고정을 이해서 SUS304를 이용하여 제작하였다. 혐기조와 무산소조는 완전혼합을 위하여 교반기를 설치하였다.

### 2.2. 섬모상담체의 제원

섬모상담체는 폴리에틸렌과 폴리프로필렌으로 만들어져 가볍고 부식이 안될 뿐 아니라 거의 모든 약품에 대해 내성이 있고 열에도 강해서 오폐수처리의 담체로서 적합한 특성을 가지고 있다. 섬모상담체는 비표면적이 높아(1,260 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>) 섬모상 생물막에 부착되는 슬러지의 양이 기타의 담체보다 많으므로 용적부하를 크게 할 수 있으며, 아울러 생물막의 슬러지 보유량이 많고 생물상이 다양하므로 부하 변동이나 수온 변화에 대한 저항력 또한 크다(Bliss et al., 1986).

### 2.3. Pilot plant의 운영방법

처리용량 1 m<sup>3</sup>/day인 반응조를 운영하였으며, 초기 미생물의 식종은 K 하수처리장 내의 반송슬러지를 반응조에 주입시킨 후 원수를 주입하였으며 원수의 주입량은 반응조의 미생물상과 유기물 제거, 질산화를 고려하여 서서히 증가시켜 정상 운전조건까지 유지하였다. 유입수의 정상은 BOD 135~145 mg/L, T-N 38.0~45.0 mg/L, T-P 4.5~5.5 mg/L였다. 외부 반송을 0.5Q로 유지한 상태에서 각 내부반송율을 100%, 200%, 300%, 400%로 HRT를 4 hr, 6 hr, 8 hr, 10 hr, 12 hr으로 변화시키며 BOD 및 질소, 인의 처리효율을 파악하였고 본 연구에서의 운전조건은 Table 2와 같다.

Table 2. Operation condition of pilot plant

Operation item		Condition
Influent	Influen flow (m <sup>3</sup> /d)	1.0
Anaerobic	ORP (mV)	-150 ~ -300
	MLSS (mg/L)	2,000 ~ 3,000
	DO (mg/L)	0 ~ 0.5
	External Recycle /rate (%)	50
Anoxic	ORP (mV)	-50 ~ -150
	MLSS (mg/L)	2,000 ~ 3,000
	DO (mg/L)	0 ~ 0.5
Aerobic	ORP (mV)	100 ~ 300
	MLSS (mg/L)	2,000 ~ 3,000
	DO (mg/L)	2 ~ 3

### 2.4 분석방법

시료는 채수 시 부유성 SS성분을 제거한 용존성 기질만

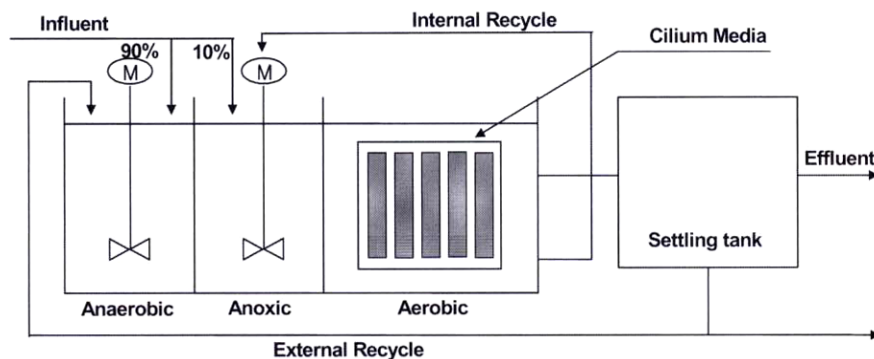


Fig. 1. Schematic diagram of pilot plant.

Table 1. Characteristics of cilium media

Quality of the material	Polyethylene & polypropylene
Specific gravity of outward appearance	1.2
Mollification point	145.2°C
Carbonization point	256.4°C
Tensile strength	650.2 (kg/20 cm)
Tension strength	95%
Durability	hardness
Standards	Width 200 mm, Length 500~3,000 mm
Application	Aerobic tank

을 분석하였으며 실험실로 운반시 변질을 방지하고자 냉장 보관하였다. 분석은 공정평가(pH, DO, ORP, 온도, SV30)는 1일에 1회, 유기물, 질산화 탈질에 관련한 평가(T-N, T-P, SS, VSS, TCOD<sub>Cr</sub>, TSS, VSS, alkalinity)는 1주일에 2회 측정하였다. 분석 방법은 다음과 같이 시행하였다.

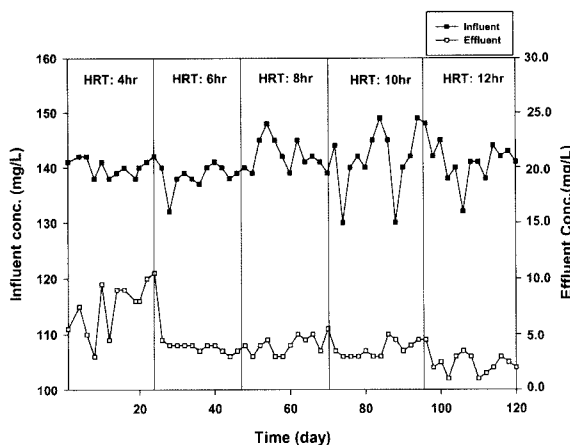
**Table 3.** Analytical methods in experiments

Constituents	Analytical methods
Influent (Q)	Used mass cylinder
Temperature	Thermometer
pH	pH meter (IJIMA)
DO	Winkler Method Azide Modification
BOD	Winkler Method Azide Modification
TCOD <sub>Cr</sub>	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> closed reflux method
TSS	Dried at 103~105°C
VSS	Fixed and Volatile Solids Ignited at 550°C
T-P	Standard Method (Ascorbic acid)
T-N	Kjeldahl Method
Alkalinity	Titrimetric Method

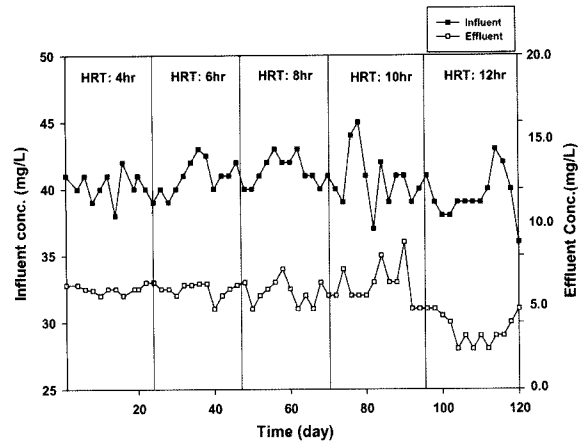
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. HRT의 변화에 따른 유기물 및 질소·인의 거동

생물반응조의 체류시간을 4 hr, 6 hr, 8 hr, 10 hr, 12 hr 으로 변화시키면서 각각의 체류시간에서의 유기물 제거효율을 평가하였다. Fig. 2는 탈질을 위한 내부반송율을 100% (1Q)로 고정했을 때 운전기간동안의 유입수의 유기물 (BOD) 농도와 유출수의 BOD농도를 나타내었다. 운전기간 동안 유입수는 BOD 130~150 mg/L의 범위로 운전하였고, 부유 MLSS는 2,000~3,000 mg/L로 유지하였으며, 담체는 호기조 단위 부피당 1 m<sup>2</sup>의 비율로 충전하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 체류시간 4 hr 조건에서는 유기물 제거효율이 95%로 상대적으로 낮게 나타났으며, 유입수의 농도 변동에 따라 유출수질 변동 폭 또한 큰 것으로 조사되었다. 그러나 체류시간 6 hr 이상에서는 BOD 제거효율이 97~98%의 범위로 매우 높게 나타났으며, 유입수의 변동이 심



**Fig. 2.** Organic matter removals according to various HRT at IR 100%.



**Fig. 3.** T-N removals according to various HRT at IR 100%.

하더라도 유출수질은 3~5 mg/L의 범위로 비교적 안정적으로 나타났다. 그러나 체류시간이 12시간으로 지속되는 동안 유출수질이 다소 불안정하게 나타났는데, 이는 운전기간 동안 슬러지의 인발 펌프 고장으로 인해 많은 양의 슬러지를 인발하여, MLSS 농도가 1,800 mg/L이하로 낮게 운영됨에 따른 일시적인 현상으로 보여진다. 또한 내부반송율을 200% (2Q)로 고정하고, 운영조건을 동일하게 한 결과 내부반송율 100%로 운전했을 때와 유사한 결과를 보였다.

호기조에서 질산화된 질산성 질소를 내부반송에 의해 무산소조로 유입시켜 탈질을 유도하도록 내부반송율을 각각 100%, 200%로 고정하고, 유기물 제거효율 평가와 동일한 운전조건으로 체류시간을 4 hr, 6 hr, 8 hr, 10 hr, 12 hr로 변화시키면서 각각의 체류시간에서 질소 제거효율을 평가하였다.

Fig. 3은 탈질을 위한 내부반송율을 100% (1Q)로 고정했을 때 운전기간동안의 유입수의 질소 (T-N) 농도와 유출수의 T-N농도를 나타내었다. 운전기간 동안 유입수의 T-N농도는 36~44 mg/L의 범위로 비교적 안정적으로 유입되었고, 이때의 제거효율은 체류시간 4 hr에서 61~73% (평균 68%)의 제거율로 평가되었다. 또한 체류시간 6 hr, 8 hr, 10 hr, 12 hr에서의 평균 질소제거 효율은 각각 74.5%, 78.0%, 77.8%, 85.2%로 나타나, 유기물제거효율 변화와는 달리 체류시간이 6 hr시간 이상에 평균제거율이 74.5%이상으로 나타나 질소제거를 위해서는 반응조 체류시간이 6 hr 이상 소요됨을 알 수 있었다.

또한 내부반송율을 200% (2Q)로 고정하고, 운영조건을 동일하게 운전한 결과로 내부반송율 100%로 운전했을 때보다 낮은 유출수질을 보여 질소제거효율이 근소한 증가 경향을 보였고, 유출수의 농도는 체류시간 4 hr을 제외하고 나머지 운전조건에서는 8~11 mg/L의 범위로 매우 안정적이었다.

생물반응조 체류시간 변화에 따른 총인의 제거효율을 평가하기 위해 내부반송율을 각각 100%, 200%로 고정한 상태에서 체류시간을 4 hr, 6 hr, 8 hr, 10 hr, 12 hr으로 변화시키면서 유입수의 총인 농도와 유출수의 농도를 평가하였다.

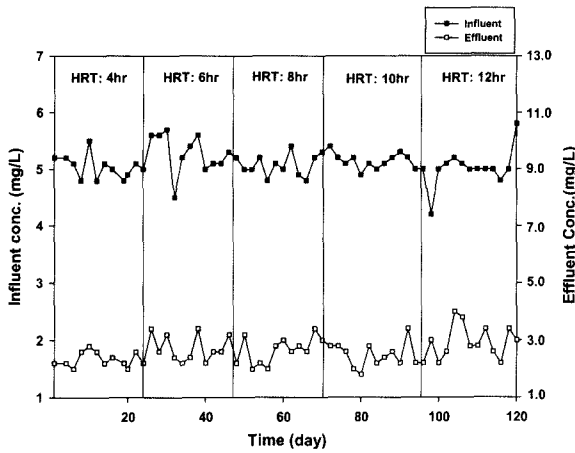


Fig. 4. T-P removals according to various HRT at IR 100%.

Fig. 4는 내부반송율 100%일 때 체류시간 변화에 따른 총인의 농도변화로 전체 운전기간동안 4.7~5.8 mg/L의 범위로 유입되고 0.8~1.8 mg/L의 범위로 유출되어 체류시간에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다.

또한 내부반송율 200%일 때 체류시간 변화에 따른 총인의 농도변화로 전체 운전기간동안 4.8~5.5 mg/L의 범위로 유입되고 0.8~1.9 mg/L의 범위로 유출되어 체류시간에 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 평가되었다.

전체적인 제거효율 측면에서는 내부반송율 100%와 200%가 비슷한 것으로 나타났으며, 체류시간 변화가 제거효율에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다. 이는 혐기조 체류시간이 최소 0.7 hr 이상을 확보하여 운전되었으므로 인방출에 필요한 최소한의 HRT인 0.5 hr 이상(Randall et al., 1992)이 유지되었기 때문으로 평가된다.

3.2. 내부반송율 변화에 따른 유기물 및 질소의 거동

Fig. 5는 유기물 제거효율 평가로 동일한 생물학적체류시간(HRT)에서 생물반응조내 내부반송율을 100%, 200%, 300%, 400%로 변화시켜 각각의 내부반송율에 따른 유기물 제거효율을 평가한 그림이다. 체류시간 6 hr 조건에서 내부반송율 100%인 경우에는 유기물 제거효율이 평균 97.7%로 나타났고 유입수의 농도변화에 대하여 비교적 안정적인 처리효율을 나타내었다. 또한 내부반송율을 200~400%로 증가시킨 경우에는 유기물 제거효율이 97.3%, 97.3%, 97.4%로 나타나 내부반송율의 변화에 비하여 유기물 제거효율이 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 내부반송율을 증가시키는데 불구하고 유기물 제거효율에 큰 변화를 나타내지 않은 것은 유입 유기물(BOD) 농도가 탈질과 탈인 시 충분히 소비되고 유출되는 BOD는 비용해성 BOD로 판단된다. 상기의 결과로 보아 생물학적 체류시간 6 hr 이상에서 호기조에 담체를 충전한 경우에는 내부반송율 100%이상에서 유기물 제거효율에 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있으며, 실제 처리장에 적용할 경우 유기물의 제거를 위한 내부반송율의 증가는 필요하지 않을 것으로 사료된다.

T-N 제거효율 평가는 유기물 제거효율 평가와 동일한 조건에서 운전되었으며, 유입수 T-N농도는 39.2~42.0 mg/L

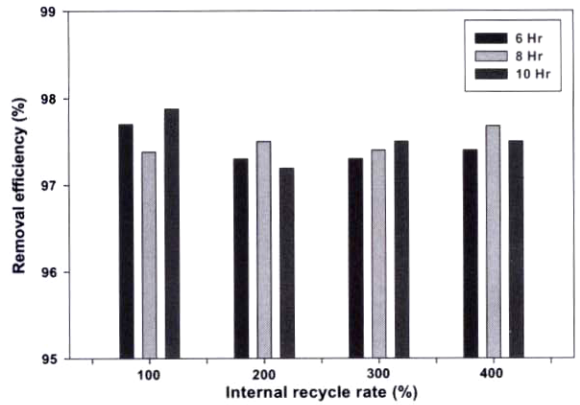


Fig. 5. Comparison of Organic removal rates at IRs 100~400%.

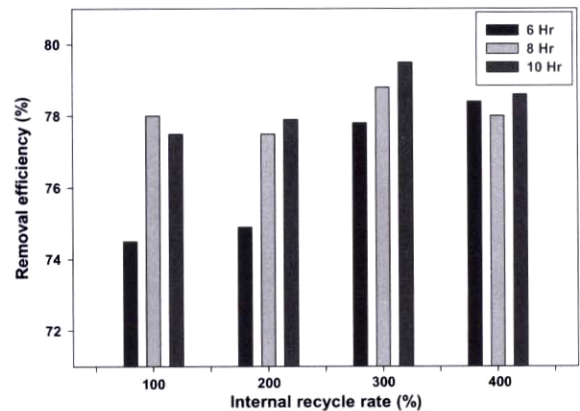


Fig. 6. Comparison of T-N removal rates at IRs 100~400%.

의 범위로 운전되었고 C/N비는 평균 3.45 mg/L이었다.

Fig. 6은 체류시간과는 무관하게 내부반송율이 증가함에 따라 제거효율이 증가함을 볼 수 있다. 이는 내부반송량의 증가로 인해 무산소조로 질산성 질소의 유입량이 증가해 탈질 되는 질소량이 증가하는 것으로 판단된다. 체류시간이 6 hr일 때는 짧은 체류시간으로 인해 질산화되는 질소 양의 부족 혹은 탈질 시 필요한 체류시간의 부족으로 인해 질소제거효율이 다소 떨어지는 것으로 판단된다.

이러한 결과로 보아 내부반송율 200% 및 300%에서 비교적 T-N제거효율이 높게 나타났으며, 내부반송율 400%에서는 오히려 T-N제거효율이 다소 낮아지는 것을 알 수 있으며, 실제 처리장에 적용할 경우에는 내부반송율을 200% 이하에서 T-N제거효율이 우수하므로 A<sup>2</sup>O공법에 비하여 동력비를 절감할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구는 혐기-무산소-호기 공정에서 호기조에 섬모상단체를 충전한 방법을 사용하여 유기물 및 질소, 인 처리효율을 최적화하기 위한 평가를 수행하였다. 이를 위해 온도, 내부반송율, HRT의 변화를 주면서 운전하여 유기물 및 질소, 인제거에 미치는 영향을 분석하였다.

- 1) 수리학적 체류시간 6 hr 이상에서는 유기물의 제거효율은 97~98%의 범위로 높게 나타났으며, 질소-인의 유출수질도 매우 안정적으로 나타났다. 따라서, 최소체류시간으로 6 hr정도는 확보하여야 할 것으로 판단된다.
- 2) 내부반송율의 변화에 따른 제거효율 평가 결과 체류시간이 6시간인 경우, 내부반송율이 200%에서 유기물 및 질소의 처리효율이 우수하였다. 따라서, 경제적인 조건을 감안할 때 높은 반송율보다는 200%이하에서의 운전이 효율적일 것으로 사료된다.

상기의 결론을 요약하면, 내부반송율은 200%이하, HRT는 6~8 시간을 유지하는 것이 적절한 운전조건인 것으로 판단되며, 또한 기존의 수리학적체류시간이 짧은 하수처리장을 표준활성슬러지공법에서 질소·인 고도처리공법으로 변환 시는 체류시간의 확보가 가장 중요한 요소이며, 운영 중인 폭기조를 고도처리공정으로 전환 시에는 폭기조의 수리학적 체류시간은 최소 6시간 이상이 되는 처리장에 대해서만 중설이 없이 가능할 것으로 사료되며, 6시간 이하의 처리장의 경우는 화학적처리 방법의 병용 및 처리장의 중설이 불가피할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

Anthonisen, A. C., Zidulka, A., Demedts, M. and Nadler, S., Inhibition of Nitrification by Ammonia and Nitrous Acid., *J. WPCF.*, **48**, pp. 832-838 (1976).

Bliss, P. and Barnes, D., Modelling nitrification in plant scale activated sludge, *Wat. Sci. Tech.*, **18**, pp. 139-148 (1986).

Gayle, B. P., Augers, E. A., Gough, G. R. and Gilham., P. T., Biological Denitrification of Water, *J. of Env. Engr. Amer. Soc. of Civil Engr.*, **115**, pp. 928-931 (1989).

Gullicks, H. A. and Cleasby, J. L., Design of trickling filter nitrification tower, *J. WPCF.*, **58**(1), pp. 60-68 (1986).

Hall, E. R. and Murphy, K. L., Estimation of Nitrifying Biomass and Kinetics in Wastewater, *Wat. Res.*, **14**, pp. 295-297 (1980).

Randall, C. W., Barnard, J. L. and Stensel, H. D., *Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal*, **5**, Water Quality Management Library, Technomic Publishing Co., Lancaster, PA (1992).