

## SBR에서 호기성 입상슬러지의 형성

윤주환<sup>†</sup> · 장희란<sup>\*</sup> · 한종훈<sup>\*\*</sup> · 한혜정

고려대학교 환경시스템공학과

<sup>\*</sup>한국건설기술연구원

<sup>\*\*</sup>육군3사관학교

## Shape and Formation of Aerobic Granulation in SBR

Zuwhan Yun<sup>†</sup> · Heeran Jang<sup>\*</sup> · Jonghun Han<sup>\*\*</sup> · Hyejung Han

Dept. of Environmental Engineering, Korea University

<sup>\*</sup>Korea Institute of Construction Technology

<sup>\*\*</sup>Faculty of Korea Third Military Academy

(Received 6 January 2004, Accepted 10 September 2004)

**Abstract** : Granulation characteristics have been studied with an aerobic sequencing batch reactor(SBR). Organic loading of 2.46 kg COD/m<sup>3</sup>/day followed by 4.14 kg COD/m<sup>3</sup>/day had been applied to the lab-scale SBR with a very short settling time during the operating cycle. The granulation proceeded to the diameter range of 3 to 5 mm with MLSS concentration of 12,000 mg/L at 45th days of operation while COD removal efficiency remained almost consistent after the granule formation. It has been noticed that aerobic granulation under the higher loading with a very short settling time seemed to be due to the microbial selection of better flocculating species.

**keywords** : Aerobic granular sludge, Granulation, SBR

### 1. 서 론

호기성 생물학적처리공정은 부유성장공정인 활성슬러지 공정과 다양한 종류의 생물막공정으로 크게 분류할 수 있다. 하·폐수처리에서는 활성슬러지공정의 변법들이 가장 흔히 사용되고 있으나 sludge bulking과 sludge rising 등과 같은 운전상의 문제점으로 인하여 설계와 운전이 이론과 같이 이루어지기 어려운 경우가 많다. 부유성장공정은 일반적으로 낮은 부하율에서 운전되고 있는데, Table 1에서 보면 활성슬러지공정 중 high rate aeration과 같은 특수한 경우를 제외하면 대개 1 kg BOD<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>/d 이하로 설계되며, 실제로는 더 낮은 부하로 설계·운전되고 있는 실정이다. 또 반응조에 유입수가 유입되면 혼합에 의하여 즉시 희석되므로 반응조내 부유하는 대부분의 미생물의 입장에서는 거의 항상 기질제한조건(substrate limiting)조건에 있다고 볼 수 있다. 한편, 생물막공정은 인공적인 매질의 표면에 고농도로 미생물을 축적시켜 하·폐수를 처리하는데, 살수여상 및 RBC 등이 대표적인 공정이며 최근에는 부유성 생물막 공정도 연구되고 있으나 근본적으로 생물막의 탈리(slough-off) 및 재생(biofilm renewal)을 조절하기 어려운 운전상의 문제점 때문에 부유성장 공정에 비하여 활용빈도가 낮은 실정이다. 실제 살수여상과 같은 생물막공정은 유입수내

의 유기물이 생물막표면과 접촉하는데, 생물막 접촉면에 존재하는 미생물들은 부유성장공정의 미생물에 비하여 상대적으로 고농도 조건에서 운전된다. 하지만 Table 1에서 보듯이 살수여상 및 RBC의 실질적인 설계 유기물 부하는 부유성장 공정에 비하여 높지 않기 때문에 포괄적으로 보면 기존 생물막 공정은 부유성장공정과 비교하여 유기물 부하 측면에서는 큰 차이가 없는 것 같다.

다만 기존 부유성장공정과 생물막 공정의 가장 큰 차이점은 침전공정이다. 부유성장공정에서 침전공정의 역할은 미생물의 고액분리이지만 생물막공정은 최소한 이론적으로는 침전지의 중요성이 상대적으로 낮은 것으로 인식되고 있다. 하지만 생물학적 반응조에서 환경조건 조절을 이용하여 다양한 미생물을 선택적으로 활용하고 있는 현재 시점에서 보면 침전공정 자체도 하나의 환경조건으로 활용할 수 있을 것이다. 이미 이러한 미생물학적 추론에 입각하여 다양한 시도가 근래 있어 왔으며 그 중 하나가 호기성 입상슬러지공정이다.

입상화된 슬러지(granular sludge)를 이용하는 공정은 생물막 공정으로 분류되는데 Lettinga(1980) 등이 고농도 유기성 폐수의 처리를 위하여 upflow anaerobic sludge blanket(UASB) 반응조를 개발하면서 그 중요성이 인식되었다. 최근에는 UASB 반응조와 같은 혐기성 조건 이외에도 다양한 조건에서 미생물들이 입상슬러지를 형성할 수 있다는 보고가 있는데, 혐기성 소화공정의 산형성 단계 미생물

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
envzyun@korea.ac.kr

**Table 1.** Design BOD loading range of various aerobic biological processes

	Process description	Design BOD loading range	References
Suspended growth	High-rate aeration	1.2 ~ 2.4 kg BOD/m <sup>3</sup> ·d	WEF (1998); Crites and Tchobanoglous (1998)
	Contact stabilization	1.0 ~ 1.3 kg BOD/m <sup>3</sup> ·d	
	Conventional plug flow	0.3 ~ 0.7 kg BOD/m <sup>3</sup> ·d	
	Extended aeration	0.1 ~ 0.3 kg BOD/m <sup>3</sup> ·d	
	SBR	0.1 ~ 0.3 kg BOD/m <sup>3</sup> ·d	
Biofilm	Trickling filter	0.07 ~ 0.22 kg BOD/m <sup>3</sup> ·d	Metcalf & Eddy, Inc. (1979) and WEF (2000)
	RBC	4 ~ 10 g BOD/m <sup>2</sup> ·d	Metcalf & Eddy, Inc. (2003)

(Beefink, 1987)이나 일부 질산화 미생물(de Beer *et al.*, 1993)과 탈질 미생물(van der Hoek, 1988), 그리고 일반적인 호기성 유기물제거 미생물(aerobic heterotrophs)까지도 입상슬러지를 형성할 수 있다고 보고되고 있다(Tijhuis *et al.*, 1994; van Benthum *et al.*, 1996; Morgenroth *et al.*, 1997; Beun *et al.*, 1999). 특히 호기성 유기물제거 미생물들의 경우, 고농도 조건에서 운전되는 biofilm airlift suspension 반응조에서 기질의 부하율과 반응조내 수리학적 전단력이 슬러지 입상화의 주요 조건이라는 보고들(Van Loosdrecht *et al.*, 1995; Kwok *et al.*, 1998)이 있으며, SBR에서도 이들 조건이 입상화에 중요하다고 한다(Beun *et al.*, 1999). 또 Beun 등 (1999)에 의하면 고부하 상태에서 반응조내 수리학적 전단력이 높은 조건이 균형을 이루면 슬러지 입상화가 보다 안정적으로 이루어진다고 보고하고 있다.

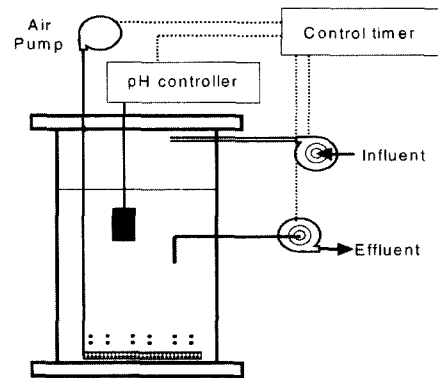
호기성 입상슬러지 공정은 아직까지는 개발단계의 공정이지만 슬러지가 자체적으로 입상화 될 수 있기 때문에 기존 부유성장 공정과 생물막 공정의 단점을 보완할 수 있는 새로운 공정 개념으로 대두되고 있다. 특히 침전지의 체류시간을 획기적으로 줄일 수 있기 때문에 그 가능성은 매우 크다 하겠다. 따라서 본 연구는 SBR 형태의 호기성 부유성장 공정에서 슬러지 입상화 형태와 형성 특성조건에 대한 기초적인 연구를 수행하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 반응조 및 운전 방법

실험은 유효 용량 5 L의 원통형 아크릴을 반응조로 사용하여 수행하였는데 Fig. 1은 그 모식도이다.

반응조의 운전은 digital timer를 feed 및 effluent pump (Cole Parmer, model 7521-50) 그리고 air pump (Medo vacuum pump, NITTO KOHKI, 50 L 106502)에 연결하여 SBR의 형태로 운전하였다. 유입유량 대비 exchange ratio는 60%였다. 미세 공기방울을 발생하는 산기석을 사용하여 7 L/min의 비율로 포기시켜 호기성 조건을 유지하였다. 운전 cycle은 "Feed (5 min) - Aeration (4 h) - Settling (2 min 미만) - Decant (5 min미만)" 단계를 연속적으로 반복하였



**Fig. 1.** Schematic diagram of lab-scale SBR for aerobic granulation study.

다. 유입유량 대비 hydraulic retention time(HRT)은 7.03 h였으며 chemical oxygen demand(COD) 부하량에 따라 운전 period 1과 2는 각각 2.46 kg COD/m<sup>3</sup>/day와 4.14 kg COD/m<sup>3</sup>/day의 고부하 조건을 유지하였다. 운전 기간은 COD 부하율에 따라 period 1 및 period 2를 각각 100일과 45일을 운전하며 입상슬러지의 형성 과정을 관찰하였다.

### 2.2. 유입 폐수의 성상

유입폐수는 glucose, beef extract 그리고 peptone을 주요 기질로 하였으며 성상은 Beun *et al.* (2000)과 Wilderer *et al.* (2001)이 사용한 합성폐수의 성상과 유사하였다(Table 2). 한편 모든 수질분석 방법은 *Standard Methods* (APHA, AWWA, and WEF, 1998)에 의거하여 수행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

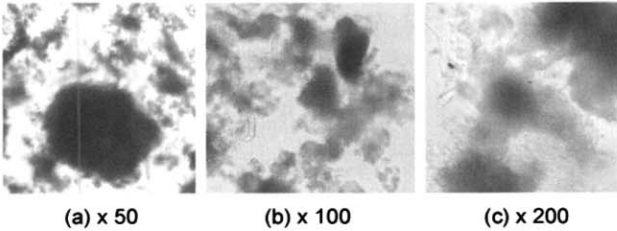
### 3.1. 호기성 입상슬러지의 형태와 형성과정

반응조는 서울시 J 하수처리장의 2차 침전지 sludge 100 mL를 seed sludge로 사용하여 운전을 시작하였다. Fig. 2는 2.46 kg COD/m<sup>3</sup> of reactor/d의 부하로 운전을 시작한 후 30일째 슬러지의 형태를 보여주고 있다. 이때 반응조의 DO농도는 2 mg/L로 호기성 조건을 유지하고 있었는데 Fig. 2의 첫 번째 사진 (a)에서 볼 수 있듯이 슬러지는 부분적으로 큰 입자를 형성하고 있으나 확대사진 (c)에서 볼 수 있듯이 다량의 사상균과 protozoa도 관찰되었다. 그리고

**Table 2.** Composition of the feed substrate used in this experiment

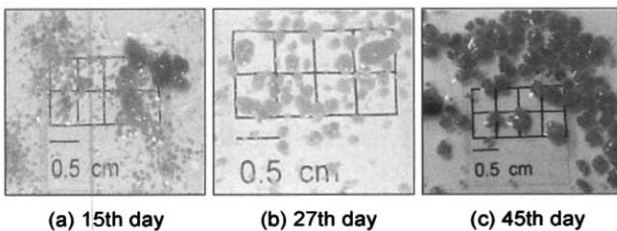
Parameter	Period 1	Period 2
COD (mg/L)	714	1200
TKN (mg/L as N)	99	129
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	40	40
T-P (mg/L as P)	43.58	72.4
PO <sub>4</sub> -P (mg/L)	5.06	7.03
Mg <sup>2+</sup> (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	72	23.9
Ca <sup>2+</sup> (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	145	48.3
Trace salts solution*	1 mL/L	1 mL/L

\* Trace salts solution: H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>: 0.15 g/L, FeCl<sub>3</sub> · 6H<sub>2</sub>O: 1.5 g/L, CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O: 0.03 g/L, MnCl<sub>2</sub> · 4H<sub>2</sub>O: 0.12 g/L, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> · 2H<sub>2</sub>O: 0.06 g/L, ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O: 0.12 g/L, CoCl<sub>2</sub> · 6H<sub>2</sub>O: 0.15 g/L, KI: 0.03 g/L (after Beun *et al.*, 1999)

**Fig. 2.** Shape of granules in Period 1 (30th day from start up operation).

큰 입자라 할지라도 그 입경은 1 mm미만이었으며 입자 자체의 형태도 그 결합력이 낮아 쉽게 분해되는 양상을 보였다. Fig 2의 사진에서 볼 수 있듯이 이들 입자는 입상슬러지라고 하기에는 입자의 크기나 밀도나 낮았다.

한편 Fig. 3은 4.14 kg COD/m<sup>3</sup> of reactor/d의 고부하로 운전된 Period 2에서 운전시작 15일, 27일 및 45일째의 슬러지 사진을 보여주고 있다. 운전시작 15일째의 평균입경 1 mm미만의 작은 입상슬러지가 형성되었으며, 27일째의 사진은 입상화가 더욱 진행된 것을 보여주고 있는데 이때 입자의 결합력은 비교적 낮은 편이었다. 45일째의 사진은 입경의 크기가 2 ~ 3 mm 정도로 성장하면서 비교적 단단한 입자형태로 관찰되었다. Period 2에서 입자 형성이 보다 잘 이루어진 이유는 고부하 운전과 함께 운전 cycle 중 침

**Fig. 3.** Granulation in SBR reactor operated in COD loading of 4.14 kg COD/m<sup>3</sup>/day with shorter settling time (Period 2)

전시간 및 decant 시간을 50% 이상 감소시켰기 때문으로 판단된다.

### 3.2. 호기성 입상슬러지의 유기물제거 특성

Period 1과 2에서의 COD 용적부하율은 각각 2.46 kg/m<sup>3</sup>/day와 4.14 kg/m<sup>3</sup>/day인 반면 biomass에 의한 COD 부하율은 각각 평균 1.09 kg COD/kg VSS/day와 평균 0.56 kg COD/kg VSS/day로 나타났다. Period 2에서 COD용적부하율을 증가시켰음에도 biomass 부하율이 감소한 것은 입상화가 진행되면서 반응조내 biomass의 축적량이 급격히 증가한 때문인데, Period 2에서 MLSS농도는 거의 12,000 mg/L에 달하였다. 전형적인 활성슬러지공정의 유기물 부하율이 0.6 kg COD/m<sup>3</sup>/d 정도 이하인 점을 감안하면 호기성 입상슬러지 공정은 고부하로 운전되었다. Table 3은 입상화 이전의 COD제거효율과 입상화 이후의 COD제거효율을 보여주고 있는데 COD제거효율은 큰 차이가 없으며, 제거효율 자체도 Wilderer 등 (2001)의 연구결과와 유사하였다.

**Table 3.** COD removal efficiency in aerobic granulation reactor

	Before granulation	After granulation
Inf. COD (mg/L)	714	714
Eff. SCOD (mg/L)	79	70
Removal (%)	88.9	90.2
Eff. SS (mg/L)	155.4	271.3

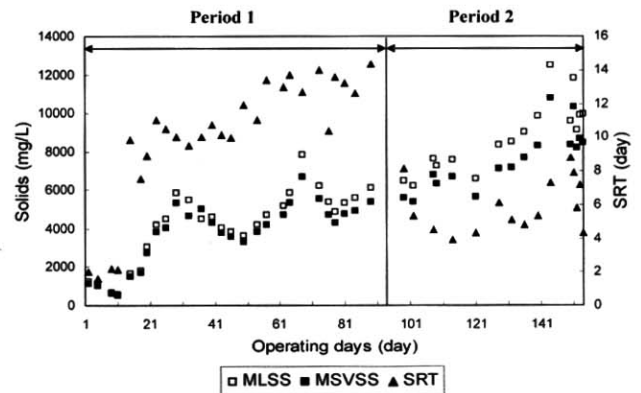
**Fig. 4.** Variation of MLSS, MLVSS and SRT of Period 1 and 2.

Fig. 4는 반응조 내 고형물 농도와 운전 SRT를 나타내고 있다. Period 1의 경우 침전시간은 2분으로 운전되었으므로 운전초기에는 washout 현상이 현저하여 미생물 농도가 낮았으나 이후 슬러지 농도가 증가하였다. Period 1의 경우 비록 완전한 입상화는 일어나지 않았으나 슬러지의 침전성은 30일경이 지나면서부터 양호하여져서 2분의 침전시간에서도 슬러지 침전이 잘 일어나서 미생물 농도가 지속적으로 증가하고 있다. 한편 Period 2의 경우 입상화가 진행되면서 반응조내 MLSS 농도가 더욱 증가하여 거의 12,000

mg/L 정도로 유지되었다. 이 기간동안 유출수의 SS농도는 거의 일정하게 나타났으며 운전 SRT는 5 ~ 10 day 정도로 유지되었다. 운전 SRT는 반응조에서 제거되는 고형물량으로부터 구해지는데 인위적인 sludge 폐기없이 거의 일정한 SRT를 보여주고 있다. 입상슬러지가 형성된 경우 biomass 농도의 유지는 입상화 슬러지의 지속적인 형성과정과 일정한 입경 이상으로 형성된 후 반응조내 수리학적 전단력에 의한 표면탈리(surface deflocculation) 과정의 균형에 의하여 이루어지는 것으로 추정된다.

### 3.3. 호기성 입상슬러지의 침전특성

입상 슬러지의 침전성을 측정하기 위하여 SVI<sub>5 min</sub>(5 min 동안 침전한 슬러지의 부피로 측정된 SVI)와 SVI<sub>30 sec</sub>(30 sec 동안 침전한 슬러지의 부피로 측정된 SVI)을 비교해 보았는데 그 값은 거의 차이가 나지 않았다. 그 이유는 입상슬러지는 침전시작 직후 거의 대부분이 즉시 침전되어 버리는 탁월한 침전성에 기인한다. 따라서 입상슬러지공정에서 전통적인 SVI 측정은 큰 의미가 없는 것으로 사료된다. Table 4는 입상슬러지 형성이 현저하게 관찰된 Period 2에서 날짜별로 측정된 SVI 값이다. 5분간 침전된 SVI<sub>5 min</sub> 값은 거의 50 mL/g 이하로 침전성이 탁월한 것으로 관찰되었는데, 69일 부터 SVI<sub>30 min</sub> 값이 증가한 이유는 침전된 상징액 부분에 존재하던 미세 부유물질이 30분간 계속 침전한 결과 SVI 값이 약간 증가하는 것으로 나타났다.

Table 4. SVI in Reactor of Period 2

Operating day (after start up)	34	39	46	53	60	69	79
SVI5 min (mL/g MLSS)	48	34	36	30	32	42	53
SVI30 min (mL/g MLSS)	-	-	36	31	32	42	53

### 3.4. 슬러지 입상화에서 미생물선택(microbial selection) 개념

본 실험에서 사용된 SBR의 침전시간은 전형적인 활성슬러지공정의 침전시간보다 수십분의 일 이하로 짧아서 전통적인 의미의 침전과정으로 보기 힘들다. 하지만 입상슬러지공정의 탁월한 침전성은 시운전초기부터 획득된 것은 아니다. 초기 시운전기간동안은 짧은 침전시간으로 인하여 고형물의 washout현상이 심하였으며 고액분리 자체도 거의 계면을 볼 수 없는 정도였다. 하지만 반응조내의 미생물들이 점차 짧은 침전시간에 적응하면서 고형물 유실현상은 거의 없어졌으며 이때 슬러지의 입상화가 진행되었다. 본 연구결과에 의하면 침전시간이 입상화를 유도하는 것으로 사료되는데, 따라서 침전시간을 최소한으로 조절하므로써 짧은 침전시간에 적응한 미생물군들만 선택적으로 반응조내에 우점하는 것으로 생각된다. 입상화된 슬러지의 또 하나의 미생물학적 특징으로는 슬러지 내 protozoa와 사상균이 현저히 감소하는 것이 관찰되었다.

5분이내의 짧은 침전시간과 고부하로 운전하는 경우, 반

응조 내에서는 짧은 침전시간에 적응한 미생물들이 주로 존재하며 그 결과로 슬러지의 입상화가 일어나는 것으로 판단된다. 다양한 공정을 이용한 유사한 연구에서 입상화를 이루는 데 있어 다양한 조건들이 제시되었으나 공통분모는 본 연구에서와 같이 짧은 침전시간으로 보인다. 침전성이 좋은 미생물들은 기본적으로 biofloculation 특성이 우수한 미생물군들이며, 이들 미생물들은 대개 미생물 체외분비 고분자물질(extracellular polymeric substances: EPS)를 다량 형성하는데, 이 EPS를 bridging agent로하여 입상화가 진행되는 것으로 사료된다. 실제 본 실험과정 중 관찰된 Fig. 3 (c)의 사진에서 볼 수 있듯이 호기성입자의 크기는 혐기성 UASB 공정에서와 같은 입자 크기로 증가하고 있었으나, 입자의 밀도는 낮아서 외부 수용액에 노출시킬 때 입자가 쉽게 풀어지는 특성을 보여주었다. 이러한 상대적으로 연약한 밀도특성은 혐기성 입상슬러지와 차이점으로 사료된다. 짧은 침전시간으로 인한 침전성 좋은 미생물 종의 선택으로 반응조 안의 지배적인 미생물은 좋은 침전성, 더 나아가 좋은 flocculation 특성을 가지는 미생물들이 남아있게 되므로 호기성 입상슬러지의 형성에 유리한 것으로 생각된다. 한편 입상슬러지의 해체기작에 대하여서는 더욱 연구가 필요한 것으로 생각된다. 혐기성 UASB와는 달리 aerobic granule은 입자의 밀도가 상대적으로 낮고 해체가 쉬운 단점이 있는데, 해체기작과 조건에 대하여서는 잘 알려져 있지 않다. 다만 본 연구과정에서 관찰한 바에 의하면 입상슬러지가 해체되는 경우 protozoan community가 번성하였다.

## 4. 결론

1. 입경 범위 3-5 mm 정도의 호기성입상슬러지가 성장하는데 4.14 kg COD/m<sup>3</sup>/day의 부하와 짧은 침전시간을 적용한 SBR공정에서 약 45일 정도가 소요되었으며 이때 반응조 내 MLSS는 최대 약 12,000 mg/L까지 증가하였다.
2. 이때 호기성 입상슬러지의 유기물 제거효율은 SCOD의 경우 90.2% 정도로 입상화 이전과 큰 차이가 없었으며, 유출수의 SCOD는 평균 70 mg/L정도였다.
3. SBR을 이용한 호기성생물학적 공정에서 호기성입상슬러지의 형성은 짧은 침전시간이 주요 요소로 보이는데 이때 미생물학적 전환과정에 대한 추후 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 학술진흥재단 선도연구자 지원사업(과제번호: 2001-41-E00393)인 “호기성 입상슬러지의 미생물학적 전환 특성과 공정응용”에 의하여 수행되었으며 고려대학교 교내 특별연구비(호기성입상슬러지에서 유기물부하의 영향)의 지원에도 감사드립니다. 본 연구 당시 장희란과 한종훈은 고려대학교 환경공학과 대학원에 재학 중이었습니다. 본 논문

에 대한 토의는 윤주환 교수(고려대학교 환경시스템공학과, Fax: 02-929-5391 혹은 이메일: envzyun@korea.ac.kr)에게로 하여주시기 바랍니다.

### 참고문헌

- APHA, AWWA, and WEF, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., Washington, D.C., USA (1998).
- Beefink, H. H. *Anaerobic Bacterial Aggregates. Ph.D. Thesis*, University of Amsterdam, The Netherlands (1987).
- Beun, J. J., Hendriks, A., van Loosdrecht, M. C. M., Morgenroth, E., Wilderer, P. A., and Heijnen, J. J., Aerobic Granulation in a Sequencing Batch Reactor, *Wat. Sci. & Tech.*, **33**(10), pp. 2283-2290 (1999).
- Beun, J. J., Van Loosdrecht M. C. M., Heijnen J. J., Aerobic granulation, *Water Science and Technology*, **41**(5), pp. 41-48 (2000).
- Crites, R. M., and Tchobanoglous G., *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*, McGraw-Hill, New York (1998).
- de Beer, D., van den Heuvel, J. C. and Ottengraf, S. P. P., Microelectrode Measurements of The Activity Distribution in Nitrifying Bacterial Aggregates, *Appl. & Envi. Micro.*, **59**(2), pp. 573-579 (1993).
- Kwok, W. K., Picioreanu, C., Ong, S. L., van Loosdrecht, M. C. M., Ng, W. J., Heijnen, J. J., Influence of Biomass Production and Detachment Forces on Biofilm Structures in a Biofilm Airlift Suspension Reactor, *Biotech. & Bioeng.*, **58**(4), pp. 400-407 (1998).
- Lettinga, G., van Velsen, A., Hobma, S., de Zeeuw, W. and Klapwijk, A. Use of the Upflow Sludge Blanket(USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment - Especially for Anaerobic Treatment, *Biotech. & Bioeng.*, **22**, pp. 699-734 (1980).
- Metcalf & Eddy Inc. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 2nd Ed., McGraw-Hill, New York (1979).
- Metcalf & Eddy Inc. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse*, 4th Ed., McGraw-Hill, New York (2003).
- Morgenroth, E., Sherden, T., van Loosdrecht, M.C.M., Heijnen, J. J. and Wilderer, P. A., Aerobic Granular Sludge in Sequencing Batch Reactor, *Wat. Res.*, **31**(12), pp. 3191-3194 (1997).
- Tijhuis, L., van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen, J. J., Formation and Growth of Heterotrophic Aerobic Biofilms on Small Suspended Particles in Air-lift Reactors, *Biotech. & Bioeng.*, **44**, pp. 595-608 (1994).
- van Benthum, W. A. J., Garrido-Fernandez, J. M., Tijhuis, L., van Loosdrecht, M. C. M. and Heijnen, J. J., Formation and Detachment of Biofilm and Granules in a Nitrifying Biofilm Airlift Suspension Reactor, *Biotech. Prog.*, **12**, pp. 764-772 (1996).
- van der Hoek, J. P. (1988). *Granulation of Denitrifying Sludge*, U. of Wageningen, The Netherlands.
- Van Loosdrecht M. C. M., Eikelboom D, Gjaltema A., Mulder A., Tijhuis L., Heijnen J. J., Biofilm Structures, *Water Sci. & Tech.*, **32**, pp. 35-43 (1995).
- W.E.F., *Design of Wastewater Treatment Plants*, 4th ed., Manual of Practice No. 8, Water Environment Federation, Alexandria, VA. (1998).
- W.E.F., *Aerobic Fixed-Growth Reactors; A Special Publication*, Water Environment Federation, Alexandria, VA. (2000).
- Wilderer, P. A., Etterer, T., Generation and Properties of Aerobic Granular Sludge, *Water Sci. & Tech.*, **43**(3), pp. 19-26 (2001).