

## 염색폐수의 생물학적 색도제거 연구

김미경<sup>\*</sup> · 서상준<sup>\*</sup> · 신응배<sup>\*\*</sup>

한국건설기술연구원

(주)동명기술공단

<sup>\*\*</sup>지역환경기술개발센터 연합회

## Biological Decolorization Characteristics of Dyeing Wastewater

Mee-Kyung Kim<sup>\*</sup> · Sang-Jun Seo<sup>\*</sup> · Eung-Bai Shin<sup>\*\*</sup>

Korea Institute of Construction Technology

<sup>\*</sup>Dongmyeong Engineering Consultant & Architecture

<sup>\*\*</sup>Council of Regional Environmental Centers

(Received 21 November 2005, Accepted 1 February 2006)

### Abstract

The concept for the decolorization in biological dye wastewater treatment systems is based on anaerobic treatment, for the reductive cleavage of the dyes' azo linkages, in combination with aerobic treatment, for the degradation of the products from azo dye cleavage, aromatic amines. Batch tests were conducted to examine the conditions and the factors affecting biological treatment of dye wastewater. From the tests, the removal efficiencies of organics and colors of dyeing wastewater were improved to COD<sub>Cr</sub> 27% and color 9% by injecting 10% of the domestic wastewater as a cosubstrate, and COD<sub>Cr</sub> 30%, color 22% with 30% injection of domestic wastewater. Therefore it was proved that decolorization efficiency is demonstrated with domestic wastewater as a cosubstrate. The analysis of aromatic amines in wastewater showed that decolorization was achieved by cometabolism while aromatic amines were produced by cleavage of azo bonds under anaerobic conditions and these products were removed in an aerobic tank subsequently.

**keywords** : Aromatic amines, Cometabolism, Decolorization, Dye wastewater

### 1. 서론

점차적으로 강화되는 하수처리장 방류수 수질기준에 맞추어 기존 하수처리장의 고도 처리시설 도입이 추진되고 있으며, 이에 대한 생물학적 질소·인 처리 공정과 이론에 대한 연구가 활발히 진행되어 소기의 목적을 달성하고 있다.

그러나 염색폐수를 포함한 산업폐수의 처리 방법은 대부분이 화학적 처리방법에 의존하고 있는 실정이며, 개별사업장 혹은 공동처리시설에서 처리된 폐수는 종말처리장으로 유입되어 생물학적 처리를 거쳐 최종방류되고 있다.

염색폐수의 생물학적 처리는 폐수의 난분해성과 독성이 미생물에 미치는 영향으로 인하여 크게 집중받지 못하여 왔으나 근래들어 전통적인 혐기-호기 시스템에 의한 색도 제거 가능성이 검증되면서 이에 대한 연구와 적용이 활발해 지고 있다.

염색폐수의 생물학적 처리의 경우, 전통적인 호기성 폐수 처리시스템으로 폐수의 색도를 효과적으로 제거할 수 없다

고 알려져 있으며(Carliell et al., 1996), 많은 연구에서 혐기성 색도제거의 효능을 보고하였다(Banat et al., 1996). 색도의 분해과정은 Fig. 1과 같이 혐기성 조건에서 염료의 azo 결합이 파괴되어 상대적으로 색도가 낮거나 아니면 색도가 없는 aromatic amines 중간체를 형성한다(Frank et al., 2005). 이러한 aromatic amines은 발암성이거나 돌연변이 유발 물질이지만 호기성 조건에서 분해가능하다고 알려져 있다. 또한 다양한 염료의 생분해 연구에서, 혐기성 공정은 염색폐수의 색도를 제거하며 후단의 호기성 처리를 위해 염색폐수의 생분해도를 증가시키는 것으로 보고되었다(Seshadri et al., 1994). 따라서 혐기-호기 시스템은 염색폐수의 색도 및 유기물의 처리에 적합한 공정이라고 많은 연구에서 제안하였다. 혐기-호기 시스템의 색도제거 효율에 미치는 영향 인자는 Rahman(1991)에 따르면 유기 물질, 염료의 농도, 온도 등이 혐기 조건에서 azo 결합의 파괴를 조절하는 주요인자라고 보고하였다.

따라서 본 연구에서는 염색폐수의 색도 제거에 미치는 영향인자 즉, 반응조건(혐기/호기), cosubstrate 종류 및 투입량, 질산성 질소의 농도가 색도제거에 미치는 영향을 파악하여 염색폐수의 생물학적 색도제거 특성을 알아보았다.

<sup>\*</sup> To whom correspondence should be addressed.

mkkim@kict.re.kr

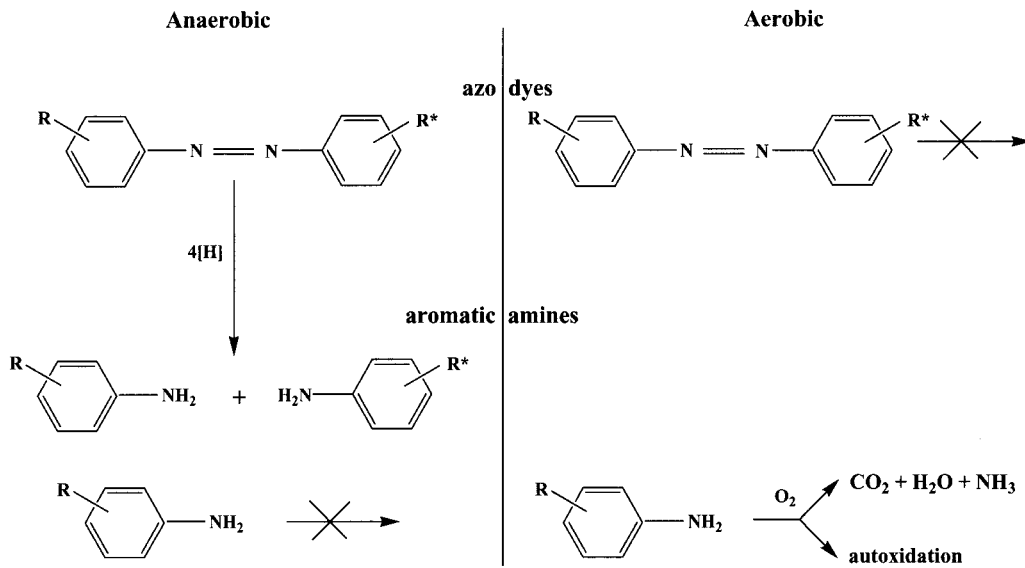


Fig. 1. General overview of the fate of azo dyes and aromatic amines during anaerobic-aerobic treatment.

2. 재료 및 방법

미생물에 의한 염색폐수의 색도제거는 크게 2 가지 기전으로 나눌 수 있다. 첫 번째는 미생물 floc에의 흡착에 의한 색도 제거현상이며, 두 번째는 미생물의 대사작용에 의한 색도의 제거현상이다. 본 연구에서는 미생물의 대사작용에 의한 색도제거 현상을 cometabolism에 의한 것으로 보고 가정하수를 성장 기질로 이용하여 가정하수의 주입에 따른 색도 제거효율을 살펴보았으며, cosubstrate의 종류와 주입량에 따른 색도제거 현상과 질산성질소의 농도가 색도제거에 미치는 영향을 살펴보았다. 마지막으로 색도제거 시 생성되는 중간생성물인 aromatic amines을 분석하여 cometabolism에 의한 제거 기전을 증명하였다.

본 연구에 사용된 미생물은 염색폐수의 생물학적 처리 연구를 위하여 경기도 A 하수처리장에 설치된 MLE 공정의 pilot plant(10 m<sup>3</sup>/day 규모)에서 장기간 염색폐수와 가정하수에 순응된 미생물을 사용하였다. 또한 염색폐수는 pilot test를 위해 매일 이송된 B 염색공단 공동폐수처리 시설의 유입수를 사용하였고 cosubstrate로서 사용된 가정하수는 A 하수처리장의 일차 침전지 유출수를 사용하였으며, 그 성상은 Table 1과 같다.

2.1. 반응조건(혐기/호기)에 따른 염색폐수의 색도제거 현상

본 실험은 일반적인 염색폐수의 색도제거 현상이 호기조건보다는 혐기조건에서 우세하게 일어나는 현상을 실험적으로 증명하기 위하여 수행되었다. 염색폐수 원수를 증류수로 2배 희석하고 염색폐수에 장기간 동안 순응된 슬러지를 이용하여 호기조건과 혐기조건에서 회분식 실험을 8시간동안 수행하였다. 분석을 위하여 시료는 채취하는 대로 5A filter paper로 여과한 후 COD<sub>Cr</sub>을 측정하고 색도는 시료를 0.45 μm membrane filter(Whatman 25 mm, 0.45 μm, Cat No. 6786 2504)에 여과한 후 APHA Pt-Co 법으로 측정하였다.

2.2. Aromatic amines의 분석

실폐수를 적용한 실험에서 혐기조건에서 생성된 염색폐수의 중간생성물을 분석하는 일은 매우 어려운 일이다. 본 연구에서는 다양한 업체에서 배출된 실제의 염색폐수를 대상으로 가정하수의 주입유무(30%)에 따른 혐기(3 hr)-호기(3 hr) 회분식 실험을 수행하여 aromatic amines을 HPLC(HP 1100 series)를 이용하여 분석하였다. 이때 사용된 컬럼은 ZORBAX Eclipse XDB-C8(4.6\*150 mm, 3.5 micron)

Table 1. Characteristics of dye wastewater and domestic wastewater

	Dye wastewater	Domestic wastewater
BOD (mg/L)	251* (216~298)**	122 (57~147)
COD <sub>Cr</sub> (mg/L)	681 (435~800)	202 (128~247)
COD <sub>Mn</sub> (mg/L)	256 (148~321)	59 (40~77)
color (units, APHA Pt-Co)	1655 (1338~2238)	172 (149~192)
T-N (mg/L)	41 (25~61)	34 (21~50)
T-P (mg/L)	3.9 (0.5~10.4)	2.6 (1.0~7.1)
SS (mg/L)	112 (64~162)	56 (32~78)

\* : average, \*\* : (min-max)

을 이용하였고 carrier로 메탄올을 사용하였다. 또한 30분 간격으로 시료를 채취하여 COD와 색도를 동시에 측정하였다.

### 2.3. Cosubstrate의 주입량에 따른 염색폐수의 색도제거 현상

Cosubstrate로서 가정하수의 주입량을 0, 10, 30%로 변화시켜 회분식 실험을 실시하였으며, cosubstrate의 종류를 가정하수 뿐만 아니라 acetate로도 수행하여 두 결과를 비교하였다. 본 실험에 사용한 가정하수는 Table 1과 같이 A 하수처리장의 가정하수 일차침전지 유출수를 이용하였으며 acetate는 sodium acetate를 COD<sub>C</sub>, 200 mg/L 용액으로 제조하여 이용하였다. Cosubstrate의 주입량에 따라서 초기 색도가 달라지므로 data의 분석은 비제거량으로 계산하여 비교하였다.

### 2.4. 질산성 질소의 농도가 색도제거에 미치는 영향

일반적으로 색도제거에 있어 질산성 질소는 저해를 일으킨다고 알려져 있다. 색도제거 효율에 미치는 질산성 질소 농도의 영향을 밝히기 위하여 본 연구에서는 질산성 질소의 농도를 0, 40, 80, 120 mg/L로 조정하여 색도제거율을 관찰하였으며 이 때 cosubstrate로서 가정하수를 30% 첨가하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 반응조건(혐기/호기)에 따른 유기물 및 색도제거 특성

본 연구의 회분식 실험에서 혐기조건과 호기조건 유기물과 색도제거는 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다. 즉 염색원수의 색도는 호기조건에서 20.3%, 혐기조건에서 25.6% 제거되어 혐기조건에서의 제거율이 높았으며, 유기물은 호기

조건에서 43.0%, 혐기조건에서 38.5% 제거되어 호기조건에서 제거율이 더 높게 나타났다.

위의 실험결과는 4 종류의 염료를 대상으로 혐기-호기 시스템의 색도제거능을 분석한 Luangdilok 등(2000)의 연구결과와 같은 경향을 나타내었는데, 그들의 연구에 따르면 혐기조건에서 azo 계열 염료의 경우 57%, anthraquinone 계열의 경우에는 32%의 색도제거율을 보였다. 또한 호기조건에서는 azo 염료의 경우 2%의 색도가 제거되었으며 anthraquinone 염료는 오히려 색도가 증가하는 경향을 나타내었다. 반응성 azo 염료를 대상으로 수행한 Panswad 등(2001)의 연구결과에서도 혐기조건에서 35~63%의 색도제거율을 얻었으며 호기조건에서의 색도제거는 15~18%로 나타나 혐기조건에서의 색도제거율이 더 높게 나타나는 것을 확인하였다. 이들은 이러한 현상을 색도제거의 주요기전 즉, 미생물에 의해 혐기조건에서 염료의 공유결합이 생화학적으로 파괴되어 aromatic amines을 형성하는 현상과 미생물 floc에의 흡착현상으로 설명하였다. 또한 호기조건에서의 색도제거는 대부분 biosorption에 의한 것이며 이는 호기조건에서 일어나는 색도의 제거현상이 염료 분자구조의 변환을 수반하지 않는다고 실험결과를 토대로 결론지었다. 또한 염색폐수의 혐기성 처리는 색도제거 현상 뿐만 아니라 폐수의 생분해도가 개선되어 후단의 호기성 처리를 용이하게 하는 효과가 있다고 보고되고 있다(Seshadri et al., 1994).

본 연구에서는 실제의 염색폐수를 대상으로 수행하여 단일 염료를 대상으로 한 다른 연구의 결과와는 그 값에 있어서 차이가 있으나 경향은 일치하고 있는 것으로 나타났다. 또한 혐기조건에서 염료의 azo 결합이 파괴되어 생성되는 중간생성물인 aromatic amines의 생성과 이의 호기조건에서의 분해경향을 아래와 같이 분석하였다.

### 3.2. Aromatic amines의 분석 결과

Cosubstrate로서 가정하수의 첨가 유무에 따라서 연속적

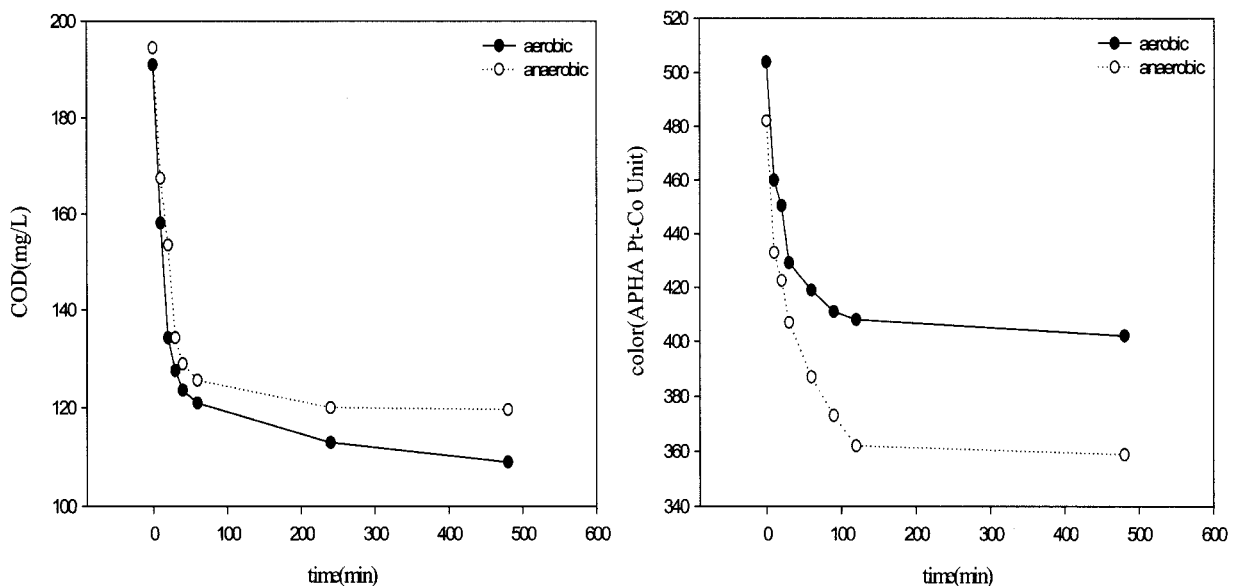


Fig. 2. COD and color removal under aerobic/anaerobic conditions.

인 혐기-호기 회분식 실험에서의 색도와 aromatic amines의 생성과 분해되는 경향을 HPLC로 분석하여 Fig. 3~5에 나타내었다. 실험결과, 혐기조건에서 반응 60분만에 가정하수를 첨가하지 않은 것과 30% 첨가한 실험에서 총 제거된 색도는 각각 123 units와 164 units으로 나타나 가정하수의 첨가에 따른 색도제거율의 향상을 확인하였으며 이 때 aromatic amines은 각각 11.5%, 13.1% 씩 증가한 것을 확인하였다. 연속된 호기조건에서 색도는 45 units과 35 units이 제거되었으며 혐기조건에서 생성된 aromatic amines이 호기조건에서 14.9%와 15.1% 제거되었음을 확인하였다.

Setiadi 등(1997), Nigam 등(1995)의 HPLC를 이용한 연구에서 azo 염료의 주요 peak가 혐기조건에서 변화하는 것을 관찰하였으며, Flores 등(1997)은 염료의 혐기성 분해 산물인 aromatic amines의 호기조건에서 분해가 됨을 aromatic amines의 분석을 통하여 증명하였다.

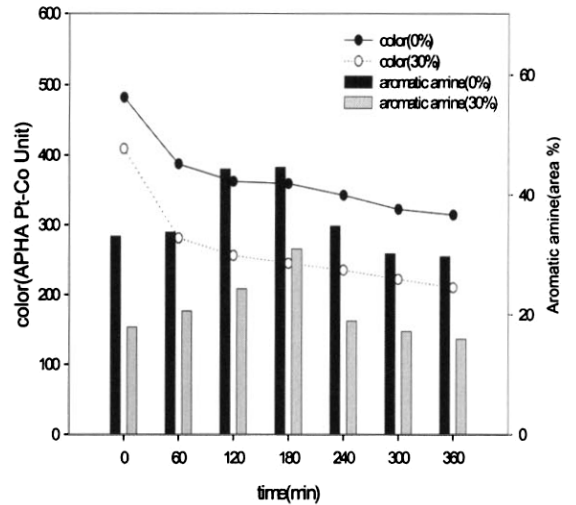


Fig. 5. Relationship between color and aromatic amines with/without cosubstrate.

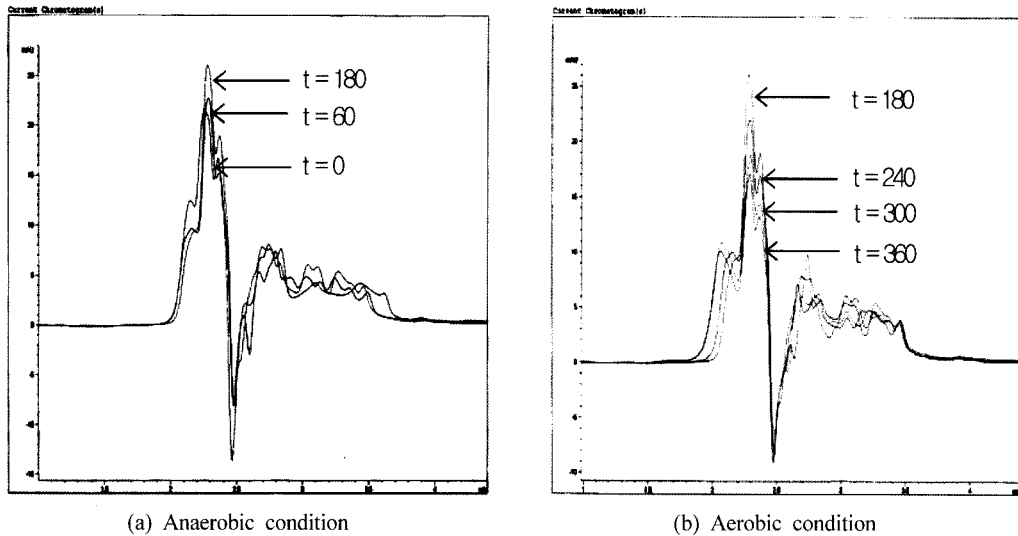


Fig. 3. Behavior of aromatic amines under sequentially anaerobic and aerobic conditions (with domestic wastewater as a cosubstrate).

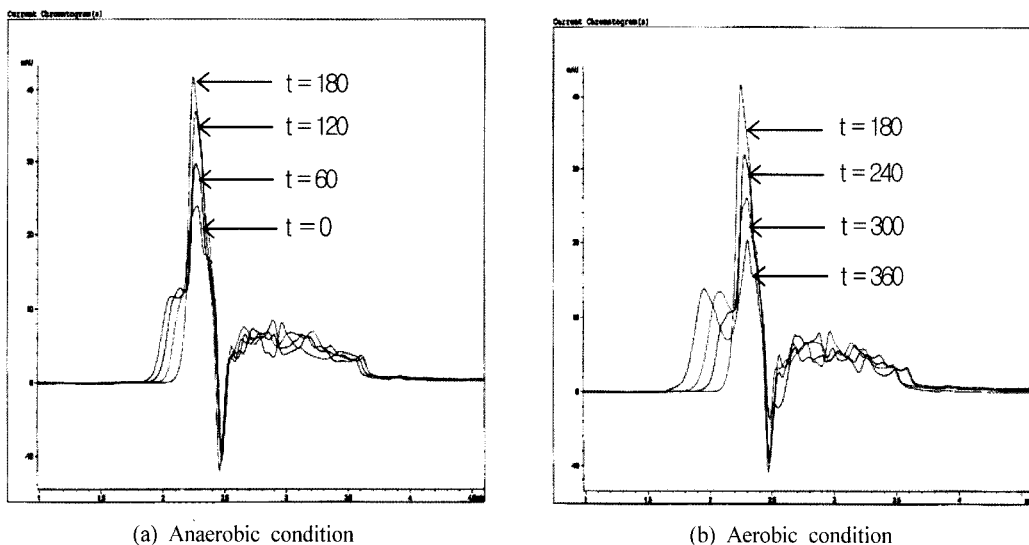


Fig. 4. Behavior of aromatic amines under sequentially anaerobic and aerobic conditions (without cosubstrate).

이러한 결과로 볼 때 azo 계열 염료의 중간생성물인 aromatic amines이 혐기조건에서 생성되며 호기조건에서 제거됨을 확인할 수 있었다. 그러나 염색폐수의 색도제거에 있어서 cosubstrate의 첨가에 따른 영향이 크지 않게 나타난 이유는 기존의 연구들이 단일 염료를 대상으로 수행된데 반하여 본 연구에서는 실페수를 사용하여 염색폐수 내에 이미 미생물이 이용 가능한 유기물이 공존하기 때문에 첨가한 cosubstrate의 영향이 희석되었기 때문이라고 판단된다.

### 3.3. Cosubstrate 종류와 주입량에 따른 유기물 및 색도 제거특성

Rahman(1991)에 의하면 유기물, 염료의 농도, 온도 등이 혐기 조건에서 azo 결합의 파괴 시 주요한 영향 인자라고 하였으며, Chinwetkitvanich 등(2000)은 염색폐수의 색도제거 효율을 향상시키기 위해 cosubstrate로서 glucose와

acetate의 두 종류 탄소원을 시스템에 첨가한 연구를 수행하였다. Panswad 등(2001)의 연구에서도 기질의 종류와 농도가 색도제거에 영향을 끼치며, glucose보다는 acetate를 cosubstrate로 사용한 경우의 색도제거율이 향상되었다고 보고하였다.

#### 3.3.1. 가정하수 주입율에 따른 색도 제거능

Fig. 6과 Fig. 7에 가정하수의 주입율 0%, 10%, 30%에서 COD와 색도의 제거 결과를 비제거량으로 나타내었다. 호기상태에서 반응 8 시간동안 COD는 순서대로 82, 107, 118 mg  $\Delta$ COD/g MLSS 제거되었으며, 혐기상태에서는 75, 103, 108 mg  $\Delta$ COD/g MLSS 제거된 것으로 나타났다. 또한 색도는 호기상태에서 102, 118, 138  $\Delta$ units/g MLSS 제거되었으며, 혐기상태에서 123, 136, 159  $\Delta$ units/g MLSS 제거되었다. 가정하수를 주입함에 따라 색도의 비제거량이

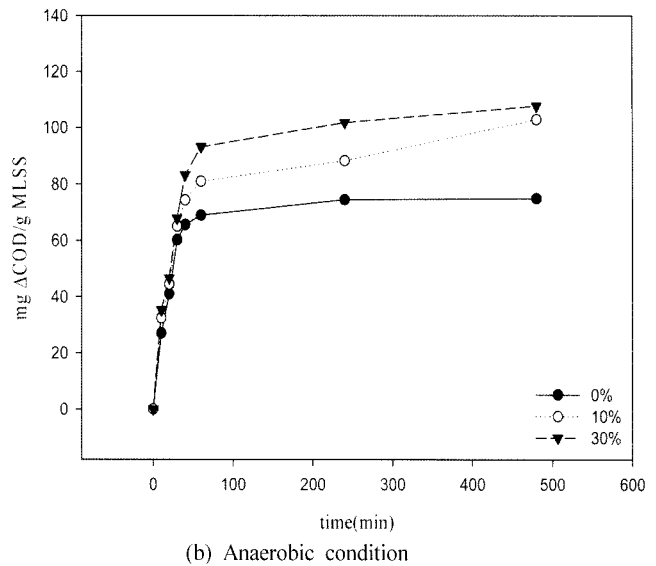
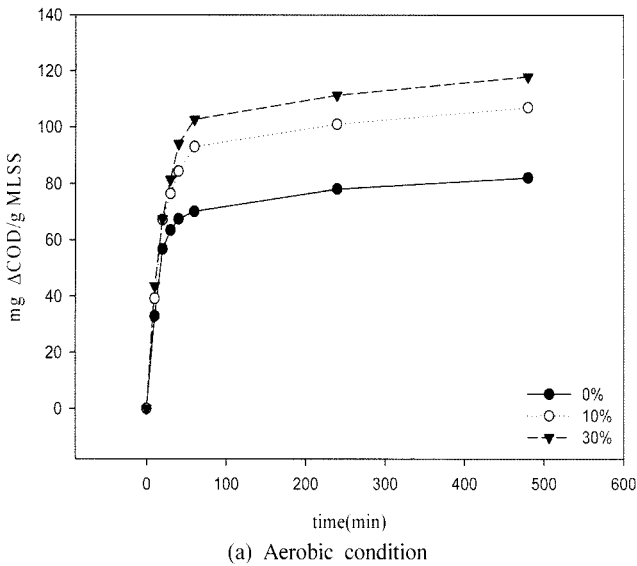


Fig. 6. COD removal with addition of domestic wastewater.

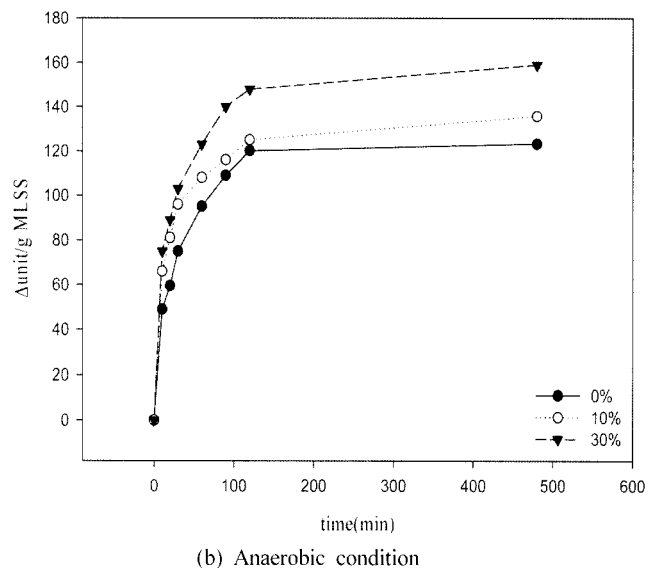
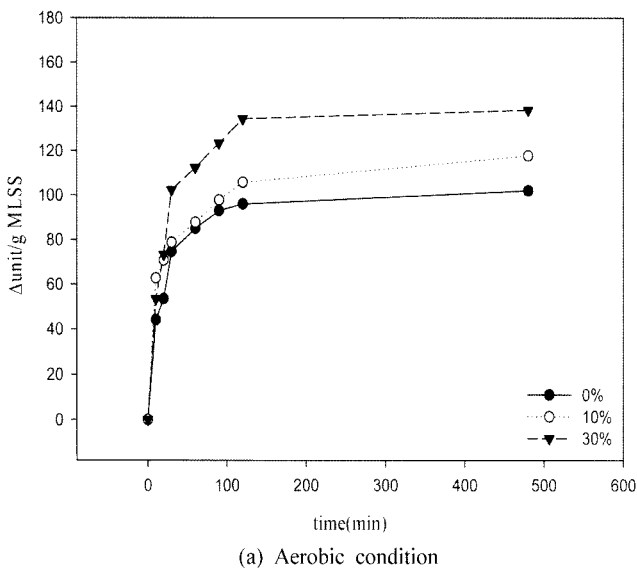


Fig. 7. Color removal with addition of domestic wastewater.

증가하는 현상은 가정하수를 염색폐수의 색도제거에 cosubstrate로서 사용하였다는 증거이며 이는 Panswad 등(2001)의 연구에서도 실패수인 가정하수를 적용하지는 않았으나 acetate를 이용하여 이와 같은 연구결과를 얻었다. Chinwetkitvanich 등(2000)의 연구에서는 cosubstrate로서 tapioca를 이용하여 주입량에 따른 염색폐수의 색도와 유기물제거를 살펴본 결과, cosubstrate를 주입하지 않은 경우에 비해 주입한 경우의 색도와 유기물제거율이 각각 39%, 27%에서 57%, 45%로 증가하였으나 주입량에 따른 제거율의 차이는 근소한 것으로 나타났다.

이를 통하여 미생물의 색도제거능의 향상을 위해서 cosubstrate의 첨가는 필요하지만 실패수의 경우에는 이미 이용가능한 탄소원이 폐수 내에 존재하므로 cosubstrate의 첨가에 의한 영향이 크지 않은 것으로 사료된다.

3.3.2. Acetate의 주입율에 따른 색도 제거능

Acetate를 cosubstrate로 이용하여 염색폐수의 색도제거를

관찰한 결과(Fig. 8과 Fig. 9), COD는 8 시간동안 호기조건에서 주입율 0%, 10%, 30%에 따라 150, 163, 175 mg ΔCOD/g MLSS가 제거되었으며 혐기조건에서는 139, 147, 152 mg ΔCOD/g MLSS가 제거되어 가정하수를 cosubstrate로 사용한 앞의 실험결과와 같은 경향을 나타내었다. 그러나 가정하수보다 미생물의 이용도가 높은 것으로 알려진 acetate의 비제거량이 높게 나타났다.

색도는 호기조건에서 122, 133, 151 Δunits/g MLSS, 혐기조건에서 147, 175, 190 Δunits/g MLSS가 제거되었다. acetate의 경우에도 마찬가지로 혐기조건에서 색도제거율이 높게 나타났으며 가정하수보다는 acetate가 염색폐수의 색도제거에 더 효율적인 cosubstrate로 사용됨을 알 수 있었다. 이는 Panswad 등(2001)의 연구결과와 같은 경향을 나타내고 있다.

Pansuwan 등(1997)의 A/O 공정을 이용한 염료의 색도제거 연구에서 cometabolism에 이용될 외부 탄소원으로 sucrose와 acetate를 사용한 결과 색도제거효율이 향상되는

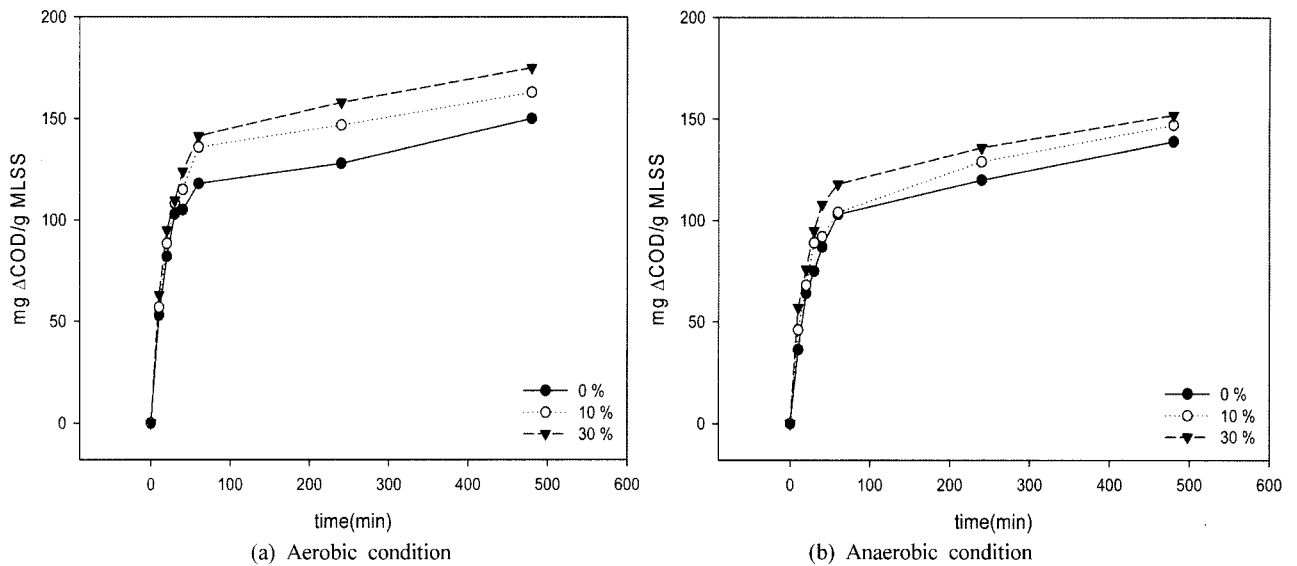


Fig. 8. COD removal with addition of acetate.

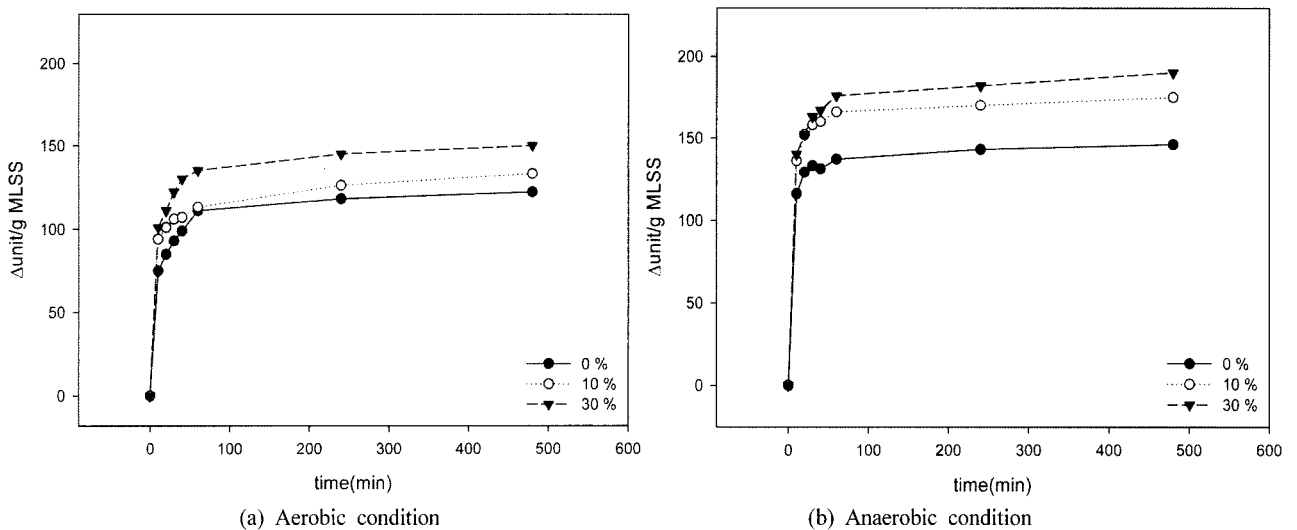


Fig. 9. Color removal for addition of acetate.

것을 관찰하였다. 그러나 glucose를 cosubstrate로서 이용한 경우에는 시스템 내에 GAO가 번성하여 인제거 효율을 저하시키는 원인이 된다고 지적하였다.

3.3.3. 가정하수와 acetate의 제거를 비교

Cosubstrate로서 실패수인 가정하수와 acetate의 염색폐수

처리능을 비교한 결과(Fig. 10 ~ Fig. 12) cosubstrate로서 acetate를 이용하는 것이 더 효율적임을 알 수 있었다.

Acetate를 이용하는 경우의 처리효율이 높은 것은 많은 연구에서 이미 밝혀진 바 있으나, 본 연구의 회분식 실험에 이용된 미생물이 가정하수에 순응되어 있음을 감안한다면 두 기질사이의 실제적인 효율차이는 더 클 것으로 사료된다.

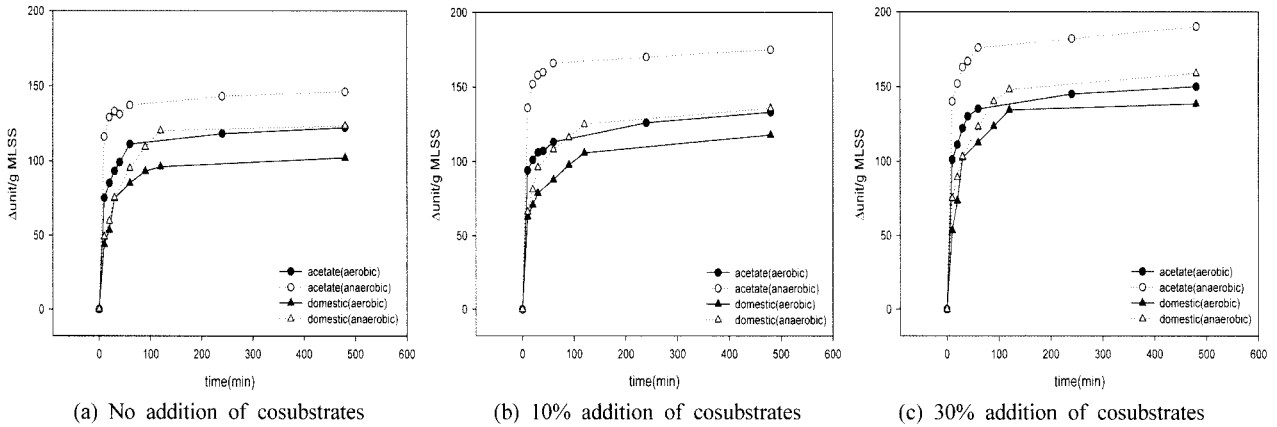


Fig. 10. Comparison of decolorization efficiency under different cosubstrates (acetate and domestic wastewater).

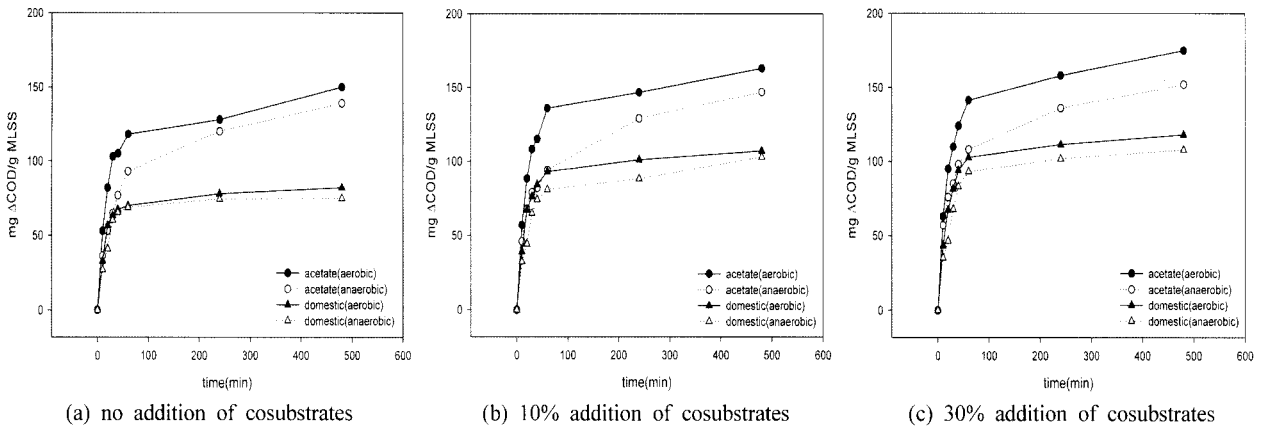


Fig. 11. Comparison of COD removal efficiency under different cosubstrates (acetate and domestic wastewater).

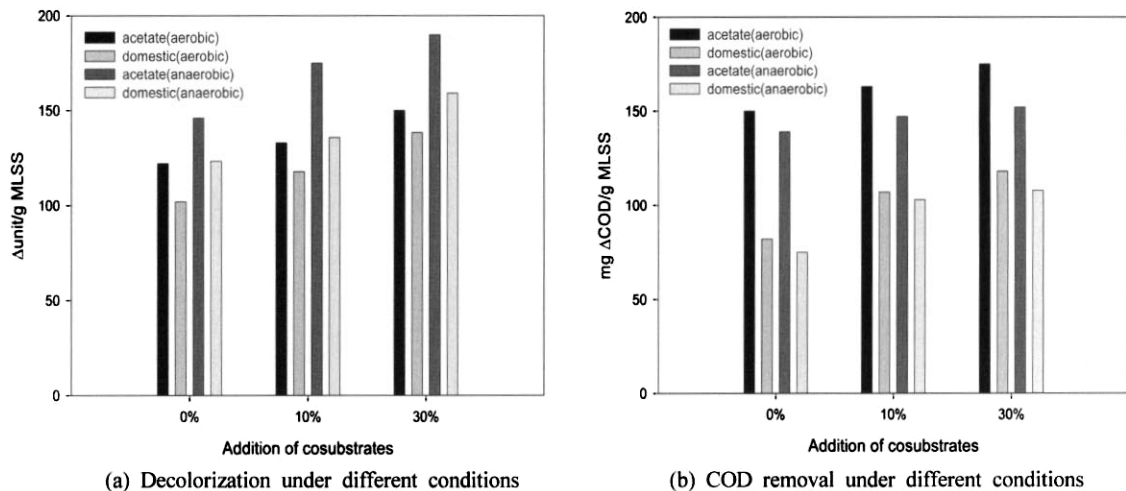


Fig. 12. Color and COD removal efficiency of acetate and domestic wastewater as cosubstrates.

### 3.4. 질산성 질소의 농도가 색도제거에 미치는 영향

질산성 질소와 같은 전자수용체가 존재할 때 염료 제거 기전에서 이의 제거를 위한 lag phase가 존재하며 이에 따라서 색도제거율이 감소한다고 알려져 있다(Carliell et al., 1996).

Fig. 13에서 보는 바와 같이 색도제거에 있어서 질산성 질소는 저해를 일으키는 것으로 나타났다. 즉 색도의 비제거량이 질산성 질소의 농도가 0, 40, 80, 120 mg/L로 증가함에 따라서 59, 53, 52, 47  $\Delta$ units/g MLSS로 약간 감소하는 경향을 나타내었다. Panswad 등(2000)에 의하면 질산성 질소 농도의 증가는 탈질반응으로 인하여 COD 제거율을 일정정도 향상시키지만 색도제거는 저해한다고 하였다. 이는 질산염 이온과 azo 결합사이의 환원력 경쟁때문으로, 이 경우 질산염 이온이 azo 결합보다 전자전도도가 더 큰 전자수용체로 작용하기 때문이다. Zissi 등(1996)이 수행한 연구에서도 질산성 질소가 존재하는 무산소 조건에서 색도제거와 함께 azo 결합의 파괴에 의한 aromatic amines의 현상을 관찰하여 질산성 질소의 색도제거 저해를 관찰하였다.

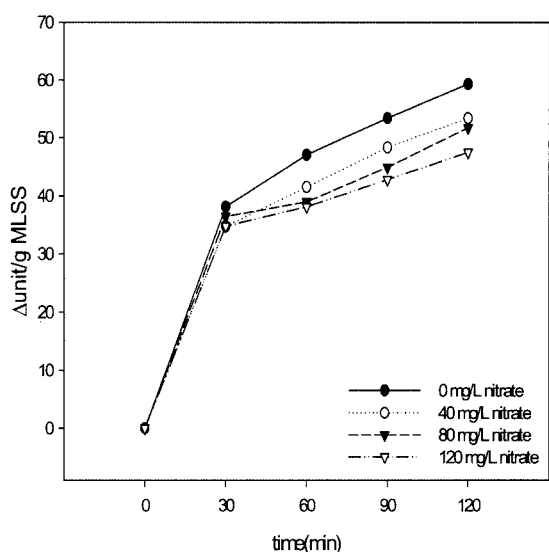


Fig. 13. Color removal with nitrate addition.

## 4. 결론

- 1) 혐기조건과 호기조건에서 염색폐수의 색도와 유기물제거를 비교한 결과, 유기물은 호기조건에서 43.0%, 혐기조건 38.5% 제거되었으며 색도는 호기조건 20.3%, 혐기조건 25.6%가 제거되는 것으로 나타나, 색도는 호기조건보다는 혐기조건에서, 유기물은 호기조건에서 제거율이 높은 결과를 보여주었으며 기 발표된 많은 연구의 결과와도 일치하는 경향을 나타내고 있다.
- 2) Cosubstrate로서 실패수인 가정하수와 acetate를 이용하여 주입량에 따른 염색폐수의 제거능을 분석한 결과, 가정하수를 주입한 경우, 주입량을 0%, 10%, 30%로 증가시켰을 때 색도제거량이 호기조건에서 각각 102, 118, 138  $\Delta$ units/g MLSS, 혐기조건에서 123, 136, 159  $\Delta$

units/g MLSS으로 분석되었다. 또한 acetate를 주입하였을 경우에는 호기조건에서 122, 133, 151  $\Delta$ units/g MLSS, 혐기조건에서 147, 175, 190  $\Delta$ units/g MLSS로 나타났다.

즉, 가정하수보다는 acetate가 색도제거에 있어서 더 효율적인 cosubstrate임을 알 수 있었으며, 두 종류의 기질 모두 호기조건 보다는 혐기조건에서 제거율이 높았고 기질의 주입량에 따라 제거 효율도 증가됨을 알 수 있었다.

- 3) 질산성 질소의 농도가 염색폐수의 색도제거에 미치는 영향을 분석한 결과, 질산성 질소의 농도를 0, 40, 80, 120 mg/L로 증가함에 따라서 색도제거량이 각각 59, 53, 52, 47  $\Delta$ units/g MLSS로 약간 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 질산염 이온과 azo 결합사이의 환원력 경쟁때문이며 효율적인 색도제거를 위해서는 무산소조 보다는 혐기조를 두는 것이 더 바람직하다고 사료된다.
- 4) HPLC를 이용한 aromatic amines의 분석결과, cosubstrate를 0%와 30% 첨가하였을 때 혐기조건에서 aromatic amines의 생성이 각각 11.5%와 13.1%씩 증가하였으며 호기조건에서는 각각 14.9%와 15.1%가 제거됨을 확인하였다. 이 때 cosubstrate의 첨가에 따른 영향이 크지 않은 이유는 사용된 염색폐수가 실패수이므로 폐수 내에 미생물이 사용가능한 유기물이 이미 존재하기 때문에 그 영향이 희석되었기 때문으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 안산환경기술개발센터의 사업 중 “염색폐수 처리효율 개선 및 별도배출허용기준 검토”의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

Banat, I. M., Nigam, P., Singh, D. and Marchant, R., Microbial Decolorization of Textile-Dye-Containing Effluents : A Review, *Bioresource Technology*, **58**, pp. 217-227 (1996).

Carliell, C. M., Barclay, S. J. and Buckley, C. A., Treatment of Exhausted Reactive Dyebath Effluent Using Anaerobic Digestion: Laboratory and Full-Scale Trials, *Water SA*, **22**(3), pp. 225-233 (1996).

Cech, J. S. and Hartman, P., Glucose Induced Break Down of Enhanced Biological Phosphorus Removal, *Environ. Technol.*, **11**, pp. 651-656 (1990).

Chinwetkitvanich, S., Tuntoolvest, M. and Panswad, T., Anaerobic Decolorization of Reactive Dyebath Effluents by a Two-Stage UASB System with Tapioca as a Co-substrate, *Wat. Res.*, **34**(8), pp. 2223-2232 (2000).

Flores, E. R., Luijten, M., Donlon, B. A., Lettinga, G. and Field, J. A., Complete Biodegradation of the Azo Dye Azodisalicylate under Anaerobic Conditions, *Environ. Sci. Technol.*, **31**, pp. 2098-2103 (1997).



- Frank, P. Z. and Santiago, V., Combined Anaerobic-Aerobic Treatment of Azo Dyes-A Short Review of Bioreactor Studies, *Water Research*, **39**, pp. 1425-1440 (2005).
- Luangdilok, W. and Panswad, T., Effect of Chemical Structures of Reactive Dyes on Color Removal by an Anaerobic-Aerobic Process, *Wat. Sci. Tech.*, **42**(3-4), pp. 377-382 (2000).
- Nigam, P., Singh, D. and Marchant, R., An Investigation of the Biodegradation of Textile Dyes by Aerobic and Anaerobic Microorganisms, In *Environmental Biotechnology: Principles and Applications*, Kluwer Academic, The Netherlands, pp. 278-292 (1995).
- Pansuwan, J. and Panswad, T., Color Removal of Disperse, Reactive and Sulfur Dye Wastewaters by an A/O-SBR Process, *Proc. of the Asian Waterqual '97(6th IAWQ: Asia-Pacific Regional Conference)*, Seoul, Korea, pp. 802-809 (1997).
- Panswad, T. and Luangdilok, W., Decolorization of Reactive Dyes with Different Molecular Structures under Different Environmental Conditions, *Wat. Res.*, **34**(17), pp. 4177-4184 (2000).
- Panswad, T., Techovanich, A. and Anotai, J., Comparison of Dye Wastewater Treatment by Normal and Anoxic+ Anaerobic/Aerobic SBR Activated Sludge Processes, *Wat. Sci. Tech.*, **43**(2), pp. 355-362 (2001).
- Rahman, R. A., Factor Analysis for Identification of Most Influential Variables for the Growth of Biodecolourisation Culture, *Env. Tech.*, **12**, pp. 609-615 (1991).
- Seshadri, S., Bishop, P. L. and Agha, A. M., Anaerobic/Aerobic Treatment of Selected Azo Dyes in Wastewater, *Waste Mgmt.*, **15**, pp. 127-137 (1994).
- Setiadi, T. and Loosdrecht, M. V., Anaerobic Decolorization of Textile Wastewater Containing Reactive Azo Dyes, *Proc. of the 8th International Conference on Anaerobic Digestion*, **2**, Sendai, Japan, pp. 437-444 (1997).
- Zissi, U. and Lyberatos, G., Azo-Dye Biodegradation under Anoxic Conditions, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(5-6), pp. 495-500 (1996).