

Research Article

초지 및 농경지에 살포되는 돼지 분뇨의 냄새에 미생물 첨가 및 분뇨 배양온도가 미치는 효과

황옥화¹ · 박성권² · 한덕우¹ · 이상룡¹ · 광정훈¹ · 조성백^{1*}

¹농촌진흥청 국립축산과학원, ²세종대학교 식품공학부

Effects Microbial Addition and Incubation Temperatures on Odor of Pig Manure as Fertilizer on Grass and Crop Fields

Ok Hwa Hwang¹, Sung Kwon Park², Deug Woo Han¹, Sang Ryoung Lee¹, Jeong Hoon Kwag¹ and Sung Back Cho^{1*}

¹National Institute of Animal Science, RDA, Wanju-Gun, Jeollabuk-Do, 55365, Korea,

²Department of Food Science and Technology, Sejong University, 209, Neungdong-Ro, Gwangjin-Gu, Seoul, 05006, Korea

ABSTRACT

Odor in pig manure affects the distribution of the manure over grass and crop fields as fertilizer. The objective of this study was to investigate the effect of different types of microbes (*Saccharomyces cerevisiae*, *Bacillus subtilis* and *Rodobacter capsulata*) and incubation temperatures (20°C and 35°C) on the levels of odorous compounds in pig manure. Pig manure was incubated with 0.03% microbes (v/v) at temperatures of 20°C or 35°C. At incubation temperature of 20°C, the addition of *Rodobacter capsulata* significantly ($p < 0.05$) decreased the levels of indoles and volatile fatty acid (VFA). At incubation temperature of 35°C, the addition of any microbes of the three used in this study did not significantly ($p > 0.05$) affect the levels of odorous compounds. When incubation temperature was increased from 20°C to 35°C, levels of odorous compounds were significantly ($p < 0.05$) increased. Taken together, these results suggest that *Rodobacter capsulata* could be utilized to reduce odor from pig manure in the spring and fall when the average temperature is around 20°C. However, alternative odor-reducing technology is needed to be developed to apply onto pig manure during the hot summer season (35°C).

(Key words : Odor, Microbe, Temperature, Pig manure, Fertilizer)

I. 서 론

초지 및 농경지에 부숙되지 않은 가축 분뇨를 비료로 살포하면 불쾌한 냄새가 휘산된다. 이로 인해, 농경지와 인접한 마을이나 주변의 고속도로를 이용하는 사람들에 의해 냄새 민원이 발생된다. 가축 분뇨 살포에 의한 냄새는 특히 외부 온도가 높은 여름철에 심하게 발생된다. 외부 온도는 가축 분뇨 내 존재하는 미생물 군집, 유기물 농도 및 냄새물질 생성에 영향을 준다(Lovanh et al., 2009). 온도가 낮으면 가축 분뇨 내 미생물의 활력이 감소되어 유기물의 분해 및 냄새물질의 생성이 줄어든다(Le et al., 2005; Verdoes and Ogink, 1997). 냄새물질은 200종 이상의 화학물질로 구성되어 있지만 이 중 불쾌도가 높은 주요한 냄새물질은 아민류, 암모니아, 휘발성지방산, 페놀류 및 인돌류

이다(Trabue et al., 2011). 돼지 분뇨를 농경지에 살포한 후 휘산되는 냄새물질 중에서 냄새강도가 높은 것을 평가하였을 때, p-크레졸이 79.5%로 가장 높았고 다음으로 스카톨과 휘발성지방산이 각각 12.3%와 4.8%를 차지하였다(Parker et al., 2013). 그러나 휘발성지방산의 높은 비율을 차지하는 아세트산과 프로피온산은 냄새감지 최소농도가 높기 때문에 냄새강도에 미치는 정도가 미약하다(Spiehs and Varel, 2009). 가축 분뇨 발생량 중 90%는 퇴·액비로 생산하여 이용되고 있는데(MAFRA, 2015), 돼지 분뇨에서 불쾌한 냄새가 강하게 발생되면 비료로 이용하기 어렵다. 이러한 냄새문제를 해결하기 위하여, 본 연구는 돼지 분뇨에 미생물 3종을 첨가한 후 2수준의 온도 조건에서 2주간 배양한 다음 냄새물질의 농도를 분석하여 미생물에 의한 냄새저감 효과를 평가하였다.

* Corresponding author : Sung Back Cho, Animal Environment Division, National Institute of Animal Science, RDA, Wanju-Gun, Jeollabuk-Do, 55365, Korea. Tel: 063-238-7412. E-mail: csb652@korea.kr

II. 재료 및 방법

1. 실험설계 및 돼지 분뇨 채취

실험은 돼지 분뇨에 미생물을 첨가하는 시험의 4처리구와 배양온도의 2처리구로 설계하였다. 미생물은 효모 (*Saccaromyce cerevisiae*), 바실러스 (*Bacillus subtilis*), 광합성균 (*Rodobacter capsulata*)을 첨가한 3처리구와 무처리구로 구성되었고, 배양온도는 20°C (봄·가을)와 35°C (여름)로 수행되었다. 돼지 분뇨는 비육돈사에서 채취되었으며, 비육돈 (80~110 kg)은 한국가축사양표준 돼지 (NIAS, 2012)를 기준으로 배합된 사료를 섭취하였다.

2. 실험방법

20 L 아크릴 반응조에 돼지 분뇨 15 L를 채운 후 분뇨량의 0.03%의 미생물 배양액을 첨가하였으며 처리구별로 4반복으로 수행하였다. 공기는 분 당 15 mL씩 반응조 상부에 주입되었고 배양온도 처리구별로 2주간 배양하였다. 배양기간이 완료된 후에 분뇨 시료를 채취하여 생화학적 산소요구량 (biochemical oxygen demand; BOD), 총 탄소 (total carbon; TC), 총 질소 (total nitrogen; TN), pH, 휘발성지방산 (volatile fatty acid; VFA), 페놀류, 인돌류 및 암모니아성 질소의 농도를 측정하였다.

3. pH, 생화학적 산소요구량, 총 탄소 및 총 질소 분석

pH는 pH 4, 7, 10의 표준용액을 이용하여 pH meter (850C, Schott, Germany)를 calibration한 후 분뇨의 pH를 측정하였다. 생화학적 산소요구량은 250 mL 배양병에 희석된 분뇨를 넣고 20°C에서 5일간 배양한 후 DOCM (Orion star A213, Thermo scientific, USA)을 이용하여 측정하였다. 총 탄소는 분뇨를 건조하여 분쇄한 후 원소분석기 (Vario macro, GmbH, Germany)를 이용하여 분석하였다. 총 질소는 분뇨에 황산칼륨 (Sigma-aldrich, USA) 용액 10 mL를 첨가하여 혼합한 후 120°C에서 30분간 가열한 후, 상등액을 분리하여 염산 (Merck, Germany) 5 mL과 혼합하여 흡광광도기 (Cary 300, Agilent, USA)로 측정하였다.

4. 냄새물질 분석

페놀류 및 인돌류는 분뇨에 4M 수산화나트륨 (Sigma-aldrich, USA)과 클로로포름 (Merck, Germany)을 첨가하여

혼합한 후 원심분리기를 이용하여 클로로포름 층을 분리하였다. 분석용 컬럼은 DB-1 (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Agilent, USA)을 이용하였고, 주입구와 검출구의 온도는 250°C 및 split ratio 5:1로 설정하여 FID (flame ionization detector)가 장착된 가스크로마토그래피 (6890N, Agilent, USA)로 분석되었다. 휘발성지방산 (단쇄지방산, 이성체지방산)은 분뇨에 25% 인산 (Sigma-aldrich, USA) 용액을 첨가하여 혼합한 후 원심분리기를 이용하여 상층액을 분리하였다. 상층액은 0.2 μm 필터 (Whatman, Sweden)를 이용하여 불순물을 제거한 후 FID (flame ionization detector)가 장착된 가스크로마토그래피 (6890N, Agilent, USA)로 분석되었다. 분석용 컬럼은 HP-INNOWax (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Agilent, USA)를 이용하였고 주입구와 검출구의 온도는 250°C 및 split ratio 10:1로 설정하였다. 암모니아성 질소는 분뇨에 산화마그네슘 (Wako, Japan) 0.3 g을 넣어 혼합한 후 킬달질소 분해장치 (1035 analysis, Foss, Denmark)를 이용하여 분석되었다.

5. 통계분석

모든 실험결과는 SAS (statistical analysis system, 2002) 프로그램을 이용하여 GLM (general linear model)의 분산분석으로 통계 처리되었다. 처리구 평균 간의 차이는 Duncan (1955)의 다중검정법에 의한 95% 유의수준으로 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 미생물 종류 및 돼지 분뇨 배양온도에 따른 돼지 분뇨의 pH, 생화학적 산소요구량, 총 탄소 및 총 질소

돼지 분뇨에 3종의 미생물 배양액을 각각 첨가한 후 20°C 또는 35°C 온도에서 2주간 배양한 다음 pH, 생화학적 산소요구량, 총 탄소 및 총 질소를 분석하였다 (Table 1). 두 배양온도에서 pH와 생화학적 산소요구량은 미생물 처리구간에 유의적인 차이를 보였으며, pH는 광합성균 처리구에서 가장 높았고 생화학적 산소요구량은 광합성균 처리구에서 가장 낮았다 ($p < 0.05$). 배양온도가 20°C에서 35°C로 상승되었을 때, pH는 감소되었고 생화학적 산소요구량, 총 탄소 및 총 질소는 증가되었다 ($p < 0.05$). 미생물 종류와 분뇨 배양온도의 상호작용에서는 pH, 생화학적 산소요구량 및 총 탄소에서 유의적인 차이를 보였다 ($p < 0.05$). 온도가 높아지면 분뇨 내 미생물의 활성이 활발해져서 유기물의 분해가 증가된다. 이때 미생물이 유기산을 생산하면서 분

Table 1. Effects of pH, BOD, TC and TN from pig manure according to microbial species and incubation temperatures

Microbe	Control		<i>Saccharomyce cerevisiae</i>		<i>Bacillus subtilis</i>		<i>Rodobacter capsulata</i>		P value		
	20°C	35°C	20°C	35°C	20°C	35°C	20°C	35°C	Mic ¹⁾	Tem ²⁾	Mic*Tem
Temperature											
pH	7.76	7.69	7.80	7.71	7.91	7.73	7.93	7.93	<0.05	<0.05	<0.05
BOD (mg/L)	2,773	4,988	3,688	4,945	2,325	5,190	1,955	4,848	<0.05	<0.05	<0.05
TC (mg/L)	4,011	4,283	4,070	4,751	3,757	4,480	3,374	4,771	0.44	<0.05	<0.05
TN (mg/L)	1,054	1,332	1,030	1,344	948	1,326	976	1,299	0.11	<0.05	0.39

¹⁾ Mic : Microbe; ²⁾ Tem : Temperature.

뇨의 pH 감소에 영향을 주었을 것이다. 또한 탄소와 질소를 포함하는 대사산물의 생산도 증가되면서 생화학적 산소 요구량, 총 탄소 및 총 질소의 농도에 영향을 주었을 것이다 (Popovic and Jensen, 2012).

2. 미생물 종류 및 돼지 분뇨 배양온도에 따른 분뇨 내 페놀류 및 인돌류 농도

미생물 종류 및 돼지 분뇨 배양온도에 따른 분뇨 내 페놀류 및 인돌류 농도를 Table 2에 정리하였다. 분뇨를 20°C 온도에서 배양하였을 때, 페놀류 농도는 무처리, 효모, 바실러스 및 광합성균 처리구에서 각각 3.63, 3.02, 3.59 및 4.74 mg/L으로 광합성균 처리구에서 가장 높았으며 ($p<0.05$) 다른 처리구간에는 유의적인 차이가 없었다 ($p>0.05$). 인돌류 농도는 각각 4.89, 5.06, 4.43 및 4.45 mg/L으로 바실러스와 광합성균 처리구에서 낮았다 ($p<0.05$). 분뇨를 35°C 온도에서 배양하였을 때, 페놀류 농도는 무처리, 효모, 바실러스 및 광합성균 처리구에서 각각 79.78, 84.68, 83.57 및 86.48 mg/L으로 처리구간에 유의적인 차이가 없었다 ($p>0.05$). 또한 인돌류 농도도 각각 6.82, 7.05, 6.77 및 6.88 mg/L으

로 처리구간에 유의적인 차이가 없었다 ($p>0.05$). 미생물 종류와 분뇨 배양온도의 상호작용에서는 페놀과 스키타톨의 농도가 유의적인 차이를 보였다 ($p<0.05$). 페놀과 스키타톨의 농도는 돼지 분뇨에 광합성균을 처리한 후 20°C에서 배양하였을 때 감소되었다. 광합성균은 돈사에서 배출되는 돼지 분뇨를 저장하는 라군 시스템에서 슬러리 색깔이 일시적으로 변화했을 때 냄새물질의 농도가 감소되는 것을 확인하게 되면서 주목받기 시작하였다 (Zahn et al., 2001). 광합성균은 가축 분뇨 및 산업 폐기물 처리 시에 이용되고 있으며, 스키타톨 농도를 감소하는데 효과가 있었다 (Sharma et al., 2014).

페놀류와 인돌류의 농도는 분뇨 배양온도를 20°C에서 35°C로 높였을 때 증가되었으며, 이때 미생물 처리구별로 유의적인 차이가 없었다 (Table 2). 가축 분뇨가 저장되는 라군에서 휘산되는 공기 중의 방향족 화합물 (페놀류 및 인돌류를 포함함) 농도를 1년 동안 측정하였을 때, 외부 온도가 높아질수록 방향족 화합물의 농도가 증가되었다 (Do et al., 2003). 돼지 분뇨를 15°C와 25°C에서 5일간 저장하였을 때, 15°C에 비해 25°C에서 분뇨 내 페놀류 및 인돌류 농도가 각각 25% 및 56% 높아졌다 (Spoelstra, 1977). 돼지 분뇨가

Table 2. Effects of phenols and indoles from pig manure according to microbial species and incubation temperatures
Unit : mg/L

Microbe	Control		<i>Saccharomyce cerevisiae</i>		<i>Bacillus subtilis</i>		<i>Rodobacter capsulata</i>		P value		
	20°C	35°C	20°C	35°C	20°C	35°C	20°C	35°C	Mic ¹⁾	Tem ²⁾	Mic*Tem
Phenol	0.43	4.35	0.32	4.72	0.17	4.61	0.21	4.51	0.86	<0.05	<0.05
p-Cresol	3.19	75.44	2.70	79.96	3.42	78.96	4.52	81.97	<0.05	<0.05	0.33
Indole	0.95	1.41	0.91	1.42	0.86	1.37	0.86	1.26	<0.05	<0.05	0.26
Skatole	3.94	5.42	4.15	5.63	3.57	5.40	3.59	5.62	<0.05	<0.05	<0.05
Phenols ³⁾	3.63	79.78	3.02	84.68	3.59	83.57	4.74	86.48	<0.05	<0.05	0.22
Indoles ⁴⁾	4.89	6.82	5.06	7.05	4.43	6.77	4.45	6.88	<0.05	<0.05	<0.05

¹⁾ Mic : Microbes; ²⁾ Tem : Temperature; ³⁾ Phenols : phenol + p-cresol; ⁴⁾ Indoles : indole + skatole.

저장되는 온도가 높아지면 분뇨 내 미생물의 활성이 증대되어 냄새물질의 생성 및 분해가 활발히 일어난다 (Le et al., 2005). 분뇨 배양온도 35℃에서 미생물 첨가에 의한 페놀류 및 인돌류의 농도가 감소되지 않은 것은 인위적으로 첨가해준 미생물이 분뇨 내 토착미생물보다 성장 능력이 낮아서 냄새 저감에 효과가 없었던 것으로 추측된다 (Watanabe et al., 2000; Egeraat, 1998).

3. 미생물 종류 및 돼지 분뇨 배양온도에 따른 분뇨 내 휘발성지방산 및 암모니아성 질소 농도

미생물 종류 및 돼지 분뇨의 배양온도에 따른 분뇨 내 휘발성지방산 및 암모니아성 질소 농도를 Table 3에 정리하였다. 분뇨를 20℃ 온도에서 배양하였을 때, 단쇄지방산 농도는 무처리, 효모, 바실러스 및 광합성균 처리구에서 각각 2,231, 2,361, 2,099 및 1,877 mg/L으로 바실러스와 광합성균 처리구에서 낮았다 ($p<0.05$). 이성체지방산의 농도는 각 327, 316, 318 및 295 mg/L으로 광합성균 처리구에서 낮았다 ($p<0.05$). 암모니아성 질소의 농도는 처리구간에 유의적인 차이가 없었다 ($p>0.05$). 분뇨를 35℃ 온도에서 배양하였을 때에 단쇄지방산의 농도는 무처리, 효모, 바실러스 및 광합성균 처리구에서 각각 3,381, 3,431, 3,374 및 3,691 mg/L으로 광합성균 처리구에서 가장 높았다 ($p<0.05$). 이성체지방산과 암모니아성 질소의 농도는 처리구간에 유의적인 차이가 없었다 ($p>0.05$). 미생물 종류와 분뇨 배양온도의 상호작용에서는 휘발성지방산의 농도가 유의적인 차이를 보

였다 ($p<0.05$). 휘발성지방산의 농도는 돼지 분뇨에 광합성균을 처리한 후 20℃에서 배양하였을 때 감소되었다. 광합성균의 활성과 비율은 휘발성지방산, 페놀류 및 인돌류를 포함하는 휘발성 유기화합물의 농도와 음의 상관관계를 가지며, 광합성균의 비율이 높아지면 휘발성지방산의 휘산율이 감소되었다 (Do et al., 2003).

단쇄지방산과 암모니아성 질소의 농도는 분뇨 배양온도를 20℃에서 35℃로 높였을 때 증가되었으며, 이 때 미생물 첨가에 의한 농도 감소효과는 없었다 (Table 3). 돼지 분뇨 저장조의 온도가 20℃에서 30℃로 증가되었을 때, 암모니아 가스의 농도가 46% 증가되었다고 한다 (Smits et al., 1995). Van det Stelt et al. (2007)의 연구결과에 따르면, 돼지 분뇨 저장온도를 20℃에서 35℃로 변화시켰을 때 암모니아 농도가 5.5~6.0배 증가되었다고 하였다. 배양온도 35℃는 미생물의 최적 성장온도(37℃)와 근접하기 때문에 분뇨에 존재하는 미생물의 활성이 활발해져서 냄새물질의 농도가 증가되었을 것이라고 하였다. 본 연구의 결과에서 배양온도가 증가되면 분뇨의 pH가 감소되었는데 (Table 1), 휘발성지방산과 암모니아성 질소는 분뇨의 pH가 감소되면 비휘발성 형태로 유도되기 때문에 농도가 증가되었을 것으로 판단된다 (Popovic and Jensen, 2012). 또한 생화학적 산소요구량은 휘발성지방산과 높은 선형상관관계 ($R=0.911$)를 가지고 있어서 휘발성지방산의 농도 증가는 생화학적 산소요구량의 농도 증가와 연관된다 (Zhu et al., 2001). 휘발성지방산 및 암모니아성 질소의 농도도 배양온도 35℃에서 미생물 첨가에 의해 감소되지 않았는데, Van det Stelt et al.

Table 3. Effects of VFA and ammonium nitrogen from pig manure according to microbial species and incubation temperatures

		Unit : mg/L										
Microbe	Control		<i>Saccharomyce cerevisiae</i>		<i>Bacillus subtilis</i>		<i>Rodobacter capsulata</i>		P value			
	20℃	35℃	20℃	35℃	20℃	35℃	20℃	35℃	Mic ¹⁾	Tem ²⁾	Mic*Tem	
Acetic acid	2,056	2,835	2,191	2,867	1,979	2,811	1,788	3,094	<0.05	<0.05	<0.05	
Propionic acid	143	457	137	483	91	479	63	528	0.52	<0.05	<0.05	
Butyric acid	32	89	32	81	29	84	25	69	<0.05	<0.05	0.58	
i-Butyric acid	140	123	136	124	138	119	129	129	<0.05	0.94	<0.05	
i-Valeric acid	188	188	180	185	179	182	167	188	0.19	<0.05	<0.05	
SCFA ³⁾	2,231	3,381	2,361	3,431	2,099	3,374	1,877	3,691	0.06	<0.05	<0.05	
BCFA ⁴⁾	327	311	316	309	318	300	295	317	0.06	<0.05	<0.05	
Ammonium nitrogen	642	1,060	659	1,048	665	1,071	654	1,077	0.93	<0.05	0.87	

¹⁾ Mic : Microbes; ²⁾ Tem : Temperature;
³⁾ SCFA (short chain fatty acid) : acetic acid + propionic acid + butyric acid.
⁴⁾ BCFA (branched chain fatty acid) : i-butyric acid + i-valeric acid.

(2007)의 연구에서, 분뇨에 살포한 미생물이 암모니아 휘산 감소에 영향을 주지 않았다는 결과와 유사하였다.

IV. 요약

초지 및 농경지에 비료로 살포되는 돼지 분뇨에서 불쾌한 냄새가 발생되면 가축 분뇨의 이용 및 냄새 민원의 발생에 영향을 줄 수 있다. 본 연구는 돼지 분뇨의 냄새를 감소하기 위하여 냄새 저감용으로 많이 이용되는 미생물 3종을 분뇨에 살포한 후 봄·가을(20℃) 및 여름(35℃)에 해당되는 온도에서 2주간 배양한 다음 냄새물질의 농도를 평가하였다. 분뇨를 20℃에서 배양하였을 때 인돌류와 휘발성 지방산의 농도가 광합성균 처리구에서 낮았다($p < 0.05$). 분뇨를 35℃에서 배양하였을 때에는 냄새물질의 농도가 미생물 처리구 간에 유의적인 차이가 없었다($p > 0.05$). 돼지 분뇨의 배양온도가 20℃에서 35℃로 상승되었을 때 냄새물질의 농도가 크게 증가되었다($p < 0.05$). 이상의 연구결과를 종합하면, 봄·가을(20℃)에는 돼지 분뇨의 냄새를 저감하기 위한 냄새저감 미생물로 광합성균을 이용할 수 있고, 여름(35℃)에는 분뇨에 첨가한 미생물의 활성을 높일 수 있는 다른 물질의 개발이 필요할 것으로 판단된다. 결론적으로, 돼지 분뇨에서 발생하는 냄새를 줄이는 것은 초지 및 농경지에 살포되는 가축 분뇨의 영양학적 가치를 높이고 이용성을 향상시키기 위해서 매우 중요하다.

V. 사 사

본 논문은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ01026302)의 지원에 의해 이루어진 것임.

VI. REFERENCES

- Do, Y.S., Schmidt, T.M., Zahn, J.A., Boyd, E.S., Mora, A. and DiSpirito, A.A. 2003. Role of *Rhodobacter* sp. strain PS9, a purple non-sulfur photosynthetic bacterium isolated from an anaerobic swine waste lagoon, in odor remediation. *Applied and Environmental Microbiology*. 1710-1720.
- Duncan, D.B. Multiple range and multiple F test. 1955. *Biometrics*. 11(1):1-42.
- Egeraat van, A.W. S.M. 1998. EM1 and the growth of microorganisms. *Microorganisms in EM1 (in Dutch)*. Land-nouwnuniversiteit Wageningen, Wageningen.
- Le, P.D., Aarnink, A.J., Ogink, N.W., Becker, P.M. and Verstegen, M.W. 2005. Odour from animal production facilities: its relationship to diet. *Nutrition Research Review*. 18(1):3-30.
- Lovanh, N., Loughrin, L.H., Cook, K., Rothrock, M. and Sistani, K. 2009. The effect of stratification and seasonal variability on the profile of an anaerobic swine waste treatment lagoon. *Bioresource Technology*. 100:3706-3712.
- MAFRA. 2015. Ministry of agriculture, food and rural affairs annual report 2015. Ministry of Agriculture Feed and Rural Affairs, Korea.
- NIAS. 2012. Korean feeding standard, Swine. National Institute of Animal Science, Korea.
- Parker, D.B., Gilley, J., Woodbury, B., Kim, K.H., Galvin, G. and Bartelt-Hunt, S.L. 2013. Odorous VOC emission following land application of swine manure slurry. *Atmospheric Environment*. 66:91-100.
- Popovic, O. and Jensen, L.S. 2012. Storage temperature affects distribution of carbon, VFA, ammonia, Phosphorus, copper and zinc in raw pig slurry and its separated liquid fraction. *Water Research*. 46:3849-3858.
- SAS. 2002. SAS/STAT software, version 9.1. SAS Institute Inc., Cary, N.C. USA.
- Sharma, N., Doerner, K.C., Alok, P.C. and Choudhary, M. 2014. Skatole remediation potential of *Rhodopseudomonas palustris* WKU-KDNS3 isolated from an animal waste lagoon. *Letters in Applied Microbiology*. 60(3):298-306.
- Smits, M.C.J., Valk, H., Elzing, A. and Keen, A. 1995. Effect of protein nutrition on ammonia emission from a cubicle house for dairy cattle. *Livestock Production Science*. 44(2):147-156.
- Spiehs, M.J. and Varel, V.H. 2009. Nutrient excretion and odorant production in manure from cattle fed corn wet distillers grains with solubles. *Journal of Animal Science*. 87:2977-2984.
- Spoelstra, S.F. 1977. Simple phenols and indoles in anaerobically stored piggery wastes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 28(5):415-423.
- Trabue, S., Kerr, B., Bearson, B. and Ziemer, C. 2011. Swine odor analyzed by odor panels and chemical techniques. *Journal of Environmental Quality*. 40(5):1510-1520.
- Van der Stelt, B., Temminghoff, E.J.M., Van Vliet, P.C.J. and Van Riemsdijk, W.H. 2007. Volatilization of ammonia from manure as affected by manure additives, temperature and mixing. *Bioresource and Technology*. 98:3449-3455.
- Verdoes, N. and Ogink, N.W.M. 1997. Odour emission from pig houses with low emission-In "Ammonia and odour control from production facilities". Vinkeloord, the Netherlands. p 6-10.
- Watanabe, K., Miyashita, M. and Harayama, S. 2000. Starvation improves survival of bacteria introduced into activated sludge. *Applied Environment Microbiology*. 66:3905-3910.

- Zahn, J.A., Hatfield, J.L., Laird, D.A., Hart, T.T., Do, Y.S. and KiSpirito, A. A. 2001. Functional classification of swine manure management systems based on effluent and gas emission characteristics. *Journal of Environmental Quality*. 30:635-647.
- Zhu, J., Ndegwa, P.M. and Luo, A. 2001. Effect of solid-liquid separation on BOD and VFA in swine manure. *Environmental Technology*. 22:1237-1243.
- (Received May 9, 2016 / Revised May 13, 2016 / Accepted May 17, 2016)