Research article

지하채널 환기시스템이 적용된 비육돈사의 외기온에 따른 암모니아 발생 특성 평가

신진호¹ · 노희철² · 김대훈¹ · 위지수³ · 정우희⁴ · 이승훈⁵ · 안희권^{6*}

¹충남대학교 동물자원과학부 박사과정, ²축산환경관리원 자원이용부 주임, ³국립축산과학원 동물영양생리와 농업연구사,
⁴충남대학교 동물자원과학부 석사과정, ⁵충남대학교 동물자원과학부 연구교수, ⁶충남대학교 동물자원과학부 교수

Evaluation of ammonia emission characteristics according to outside temperature variation from swine finishing barn installed with ground channel ventilation system

Jinho Shin¹, Hee-Cheol Roh², Daehun Kim¹, Jisoo Wi³, Woohee Chung⁴, Seunghun Lee⁵, Heekwon Ahn^{6*}

¹Ph.D. Student, Division of Animal and Dairy Science, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea

²Senior Clerk, Resource Use Department, Livestock Environmental Management Institute, 219 Hannuri-daero, Sejong, 30127, Republic of Korea

³Researcher, Animal Nutrition and Physiology Division, National Institute of Animal Science, 1500 Kongjwipatji-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do, 55365, Republic of Korea

⁴M.S. Student, Division of Animal and Dairy Science, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea

⁵Research Professor, Division of Animal and Dairy Science, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea

⁶Professor, Division of Animal and Dairy Science, College of Agriculture and Life Sciences, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Republic of Korea

Corresponding author

Heekwon Ahn
Chungnam National University, 99
Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon,
34134, Republic of Korea
Tel : +82-42-821-5785
Fax : +82-42-823-2766
E-mail : hkahn@cnu.ac.kr

This study was conducted to evaluate the ammonia emission characteristics depend on outside temperature variation, from swine finishing barn installed with ground channel ventilation system. Because the temperatures of outside air were tempered in the ground channel before flowed into the swine barn, the seasonal differences in ventilation rate were not greater than the general levels. Therefore, cold weather ammonia emissions ($62.4 \pm 9.4 \text{ g day}^{-1} \text{ AU}^{-1}$) were higher than those ($54.8 \pm 6.3 \text{ g day}^{-1} \text{ AU}^{-1}$) of hot weather ($p < 0.05$), which result was different from the general trend. In the case of swine barn installed with temperature control system caused less ventilation rate differences during cold and hot weather, it is possible to improve the room air condition during cold weather and reduce the hot weather ammonia emissions.

Key words : Ammonia emission, Ground channel, Swine finishing barn

서론

국내 양돈장의 돼지 사육 두수는 1983년 약 360만 두에서 2017년 약 1천만 두로 약 2.9배 증가하였으며, 돼지 5천 두 이상을 기르는 농가의 규모도 '83년 약 23만 두에서 '17

년 430만 두로 약 19배 증가하였다(KOSIS, 2020). 사육규모의 증가와 함께 국내의 양돈장에서 발생하는 분뇨의 양도 '15년 약 4천 6백만 톤에서 '19년 약 5천 2백만 톤으로 증가하였으며, 이 중 돈분뇨가 가장 많은 약 40%를 차지하

고 있다 (KREI, 2020). 이에 따라 양돈장에서 발생하는 악취로 인한 인근 주민의 건강과 민원 문제가 대두되고 있으며, 축산악취민원은 농림축산식품부 보도자료에 따르면 ‘13년 2,604건에서 ‘18년 6,718건으로 약 2.6배 증가하였다 (MAFRA, 2020).

양돈장에서 발생하는 악취성분은 주로 분뇨저장시설 내 유기물이 분해되는 과정에서 발생되며 (Aarnink et al., 1995), 여러 악취성분 중 암모니아는 무색의 시큼한 냄새가 나는 악취가스로 돼지로부터 배설된 분뇨 내 다량의 유기질소와 요소성 질소는 단시간 내 암모니아로 휘산되어 돼지 생산성에 부정적인 영향을 줄 수 있다 (Mackie et al., 1998). 돈사내부 암모니아는 10~40 ppm 수준에서 인간과 가축에게 호흡기, 안구 관련 불편함을 일으키고 50 ppm 이상에서 동물의 성장률 저해, 호흡기 질병 유발 등과 같은 부정적인 영향을 끼친다고 알려져 있다 (Group, 1992; Phillips, 1995; Ni et al., 2018). 이처럼 암모니아는 악취로 인한 문제뿐만 아니라 독성으로 인하여 여러 선행연구에서 악취의 지표 가스로 활용되고 있다.

돈사로부터 유래되는 암모니아의 발생은 돼지의 성장 단계, 분뇨 처리방법, 급이되는 사료의 특성, 온도변화에 따른 환기량 차이와 같은 다양한 요인에 의해 영향을 받는다 (Aarnink et al., 1995; Canh et al., 1998; Ni et al., 2000; Philippe et al., 2007; Ivanova-Peneva et al., 2008; Sun et al., 2008; Saha et al., 2010). 특히 밀폐식 돈사에서는 환기량 변화가 악취가스 발생 특성에 큰 영향을 미칠 수 있으며, 일반적으로 돈사 내 악취가스의 농도는 환기량이 많은 주간에 감소하고, 환기량이 적은 야간에는 증가한다. 그러나 지하채널 환기시스템과 같은 온도조절 시스템이 설치

되어 차가운 공기는 예열되고, 더운 공기는 예냉된 후 돈방으로 입기되는 돈사의 경우 암모니아 발생과 관련된 기존 연구결과와는 다른 경향을 나타낼 수 있으며, 지하채널 환기시스템이 설치된 돈사의 계절 변화에 따른 암모니아 발생량 비교 연구는 부족한 실정이다 (Bostami et al., 2015; Tabase et al., 2020). 그러므로 본 연구에서는 실시간으로 측정된 암모니아 농도와 환기량 자료를 바탕으로 지하채널 환기시스템이 설치된 밀폐식 비육돈사의 외기온 변화에 따른 암모니아 발생 특성을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 돈사 특성

본 연구는 충청남도 청양군에 위치한 무창 비육돈사에서 이루어졌다. 비육돈사는 8개의 돈방과 지하채널 환기시스템으로 구성되어 있었다. 체중 50 kg에 입식된 비육돈은 돈방 (195.9 m²)에서 약 두 달 간 사육 후 120 kg 출하 체중 도달 시 출하되었다. 본 연구는 늦가을 (Cold weather) 10일, 여름 (Hot weather) 9일 동안 8개의 돈방 중 1개의 비육 돈방을 대상으로 이루어졌다. 실험기간 동안 돈방 사육 밀도는 1.0~1.1 m² head⁻¹로 적정 사육밀도를 유지하고 있었다. 비육돈사 내 각 돈방은 깊이 1.2 m의 전면 슬러리피트에서 돼지로부터 배설되는 분뇨를 출하 전까지 저장하였으며, 저장된 분뇨는 돼지 출하 후 외부 분뇨저장조로 배출되었다.

해당 양돈장의 비육돈사는 지하채널 환기시스템을 갖춘 무창돈사로, 돈사 외부의 공기는 지하채널을 거친 뒤 돈방 내 중앙의 슬랏 입기구로 입기되었다 (Figure 1 and

Figure 1. Side view of swine finishing barn with ground channel ventilation system.

Figure 2. Ground channel ventilation system of swine finishing barn in this study.

Figure 2). 돼지 사육기간 동안 각 돈방은 상시 가동되며 내부 설정온도 (25°C)에 맞춰 자동으로 가동률이 조절되는 2대의 지붕 환기팬 (Φ500)에 의해 환기되었으며, 비육돈 출하 후 약 일주일의 수세 및 소독 기간에는 2대의 비상시 가동 지붕 환기팬 (Φ500)이 추가로 가동되었다.

2. 암모니아 농도 및 환기량

본 연구는 자동악취측정기 (OMS-200, Smart Control & Sensing Inc., Daejeon, Rep. of Korea)를 이용하여 실시간으로 양돈장 암모니아 농도, 환기량, 온도 등을 모니터링 하였다.

자동악취측정기의 전기화학식 암모니아 센서 (NH₃/CR-200, Membrapor Co. Wallisellen, Switzerland)는 표준 가스 (NH₃ 6, 12, 24, 48 ppm)를 이용하여 교정된 후 비육돈사 중천장에 설치되었다. 돈방 내부 암모니아 농도는 상시 가동 지붕환기팬의 배기관에서 포집한 공기를 이용하여 측정되었으며, 암모니아 센서는 돈방 내부 암모니아 농도 측정 전후 10분 간 돈사 외부 공기를 이용하여 Flushing되었다.

돈방의 각 지붕 환기팬은 Modified SWEAP system을 이용하여 교정되었으며 (DeVoe et al., 2016), 돈방내부, 지하채널 및 외기의 온도는 온습도 프로브 (Econarae, MHTP-485S)를 이용하여 측정되었다.

암모니아 발생량은 다음의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\begin{aligned} & \text{Ammonia emission } (g \text{ head}^{-1} \text{ hr}^{-1}) \\ &= \left(C_E \times V \times \frac{273.15 \times MW}{(273.15 + T_E) \times 22.4 \times 10^3} - C_A \times V \right) \\ & \quad \times \frac{273.15 \times MW}{(273.15 + T_A) \times 22.4 \times 10^3} \\ & \quad \times 60 \div \text{head} \end{aligned} \quad (1)$$

C_E : Ammonia concentration of exhausted air (mL m⁻³)

V : Room ventilation rate (m³ min⁻¹)

MW : Molecular weight of ammonia gas (g mol⁻¹)

T_E : Exhaust air temperature (°C)

C_A : Ammonia concentration of ambient air (mL m⁻³)

T_A : Ambient air temperature (°C)

주간과 야간의 데이터 평균 간 차이는 T-Test (StataCorp LLC, version 16/IC)를 통해 검정되었으며, 두 집단 간 통계적 차이는 5% 신뢰 수준에서 결정되었다.

결과 및 고찰

지하채널 환기시스템이 외기온에 따른 돈방 온도와 환기량에 미치는 영향을 Table 1에 나타내었다. 외기온이 낮은 기간 동안 외기온과 지하채널 온도는 각각 일평균 2.1 ± 2.3°C, 10.5 ± 0.8°C로 나타나, 지하채널에서 일평균 8.5 ± 1.6°C 예열된 후 돈방으로 입기되었음을 확인할 수 있었다. 반면, 외기온이 높은 기간 동안 23.0 ± 1.4°C의 외기는 돈방으로 입기되기 전 지하채널에서 4.0 ± 0.5°C 예냉된 후 입기되었다.

Table 1. Comparison of temperatures and ventilation rate between cold and hot weather. (Mean $\pm$ S.D.)

	Cold weather (n = 10)	Hot weather (n = 9)
Outside temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$2.1 \pm 2.3 \text{ b}^{\dagger}$	$23.0 \pm 1.4 \text{ a}$
Ground channel temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$10.5 \pm 0.8 \text{ b}$	$19.1 \pm 1.0 \text{ a}$
Room temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$26.1 \pm 0.4 \text{ b}$	$28.9 \pm 0.5 \text{ a}$
Ventilation rate ($\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ head}^{-1}$)	$39.5 \pm 3.9 \text{ b}$	$83.4 \pm 3.3 \text{ a}$

† Different superscripts in the same row meaning each group are significantly different ($p < 0.05$).

Table 2. Comparison of diurnal temperatures and ventilation rate between cold and hot weather. (Mean $\pm$ S.D.)

	Cold weather (n = 10)		Hot weather (n = 9)	
	Day	Night	Day	Night
Outside temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$3.9 \pm 2.4 \text{ a}^{\dagger}$	$0.2 \pm 2.2 \text{ b}$	$24.7 \pm 1.1 \text{ a}$	$21.4 \pm 2.0 \text{ b}$
Ground channel temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$10.5 \pm 0.8 \text{ a}$	$10.5 \pm 0.8 \text{ a}$	$20.2 \pm 0.7 \text{ a}$	$17.9 \pm 1.4 \text{ b}$
Room temperature ($^{\circ}\text{C}$)	$26.2 \pm 0.3 \text{ a}$	$25.9 \pm 0.4 \text{ a}$	$29.1 \pm 0.5 \text{ a}$	$28.7 \pm 0.6 \text{ a}$
Ventilation rate ($\text{m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ head}^{-1}$)	$40.6 \pm 4.7 \text{ a}$	$38.5 \pm 3.1 \text{ a}$	$85.4 \pm 3.1 \text{ a}$	$81.4 \pm 3.9 \text{ b}$

† Different superscripts in the same row meaning each group are significantly different ($p < 0.05$).

Table 3. Comparison of ammonia concentration and emission between cold and hot weather. (Mean $\pm$ S.D.)

	Cold weather (n = 10)	Hot weather (n = 9)
NH_3 concentration (ppmv)	$15.4 \pm 2.2 \text{ a}^{\dagger}$	$8.2 \pm 0.9 \text{ b}$
NH_3 emission ($\text{g day}^{-1} \text{ AU}^{-1}$)	$62.4 \pm 9.6 \text{ a}$	$54.8 \pm 6.3 \text{ b}$

† Different superscripts in the same row meaning each group are significantly different ($p < 0.05$).

이러한 지하채널 환기시스템의 온도조절 효과로 인하여 본 연구에서의 환기량은 Cold weather $39.5 \pm 3.9 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ head}^{-1}$, Hot weather $83.4 \pm 3.3 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ head}^{-1}$ 로 나타났다. 이러한 외기온에 따른 환기량은 MWPS (1983)에서 제시된 비육돈사 적정 환기량 (Cold weather: $17.0 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ head}^{-1}$, Hot weather: $203.9 \text{ m}^3 \text{ hr}^{-1} \text{ head}^{-1}$)의 각각 232%, 41% 수준이었다.

외기온에 따른 주간과 야간의 온도 차를 비교해볼 때, Cold weather 시 외기온은 주야간에 $3.7 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 의 온도차가 있었으나, 지하채널의 주야간 온도차는 없어 주야간 외기온 차이에도 불구하고 야간 환기량은 주간 환기량에 준하는 수준을 유지할 수 있었다 (Table 2). Hot weather 시 주야간 외기온에 $3.3 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$, 지하채널에 $2.2 \pm 1.1^{\circ}\text{C}$ 온도차가 있어 주야간 환기량에 차이는 있었으나 야간에 주간 환기량의 약 95% 수준으로 돈방 내부를 환기할 수 있었다 ($p < 0.05$).

외기온에 따른 암모니아 농도 및 발생량 차이를 Table 3에 나타내었다. 두 계절 간 환기량 차이로 인하여 (Table 1), Hot weather 암모니아 농도는 Cold weather 암모니아

농도 ($15.4 \pm 2.2 \text{ ppmv}$)보다 낮은 $8.2 \pm 0.9 \text{ ppmv}$ 로 나타났다 ($p < 0.05$). 문헌에 의하면, 여름철과 같이 외기온이 높은 기간의 암모니아는 환기량 차이로 인하여 외기온이 낮은 기간의 암모니아보다 많이 발생된다는 것이 일반적인 연구결과이다. 그러나 본 연구에서는 지하채널 환기시스템의 온도조절 효과로 인해 외기온에 따른 일반적인 돈사 환기량과는 다른 수준으로 돈사 내부를 환기하였으므로, Cold weather 암모니아 발생량이 Hot weather 암모니아 발생량보다 높은 결과를 확인할 수 있었다 ($p < 0.05$).

외기온에 따른 하루 중 주야간의 암모니아 농도 및 발생량 차이를 Table 4에 나타냈다. 일반적으로 기계식 강제환기시스템을 이용하는 무창돈사 내 악취성분의 농도는 외기온이 높은 주간에 환기량 증가로 인해 감소되며, 상대적으로 외기온이 낮은 야간에는 환기량 감소로 인하여 증가된다. Sun et al. (2008)은 주야간 환기량에 차이로 인해 육성·비육돈사의 주간 암모니아 농도가 야간의 약 54% 수준이었음을 보고한 바 있다. 그러나 본 연구가 이루어진 비육돈사는 지하채널 환기시스템의 영향으로 Cold weather 주간 암모니아 농도는 야간보다 높게 나타나 야간과 비교할

Table 4. Comparison of diurnal variation of ammonia concentration and emission between cold and hot weather. (Mean $\pm$ S.D.)

	Cold weather		Hot weather	
	Day	Night	Day	Night
NH ₃ concentration (ppmv)	16.6 $\pm$ 2.6 a [†]	14.2 $\pm$ 1.9 b	8.3 $\pm$ 1.2 a	8.2 $\pm$ 0.7 a
NH ₃ emission (g day ⁻¹ AU ⁻¹)	34.5 $\pm$ 6.1 a	27.9 $\pm$ 3.8 b	28.2 $\pm$ 4.6 a	26.6 $\pm$ 1.8 a

[†] Different superscripts in the same row meaning each group are significantly different ($p < 0.05$).

때 주간에 암모니아가 더 많이 발생되었다 ($p < 0.05$). 특히 Cold weather 기간의 시간당 암모니아 발생량은 정오부터 오후 6시 사이에 가장 많이 발생되어 (3.2 ± 0.2 g hr⁻¹ AU⁻¹), 야간 중 발생량이 가장 적은 자정부터 오전 6시의 시간당 암모니아 발생량인 2.3 ± 0.0 g hr⁻¹ AU⁻¹의 1.4배 수준인 것으로 나타났으며, 일평균 암모니아 발생량의 약 30% 이상을 차지하였다. 이처럼 온도조절 시스템이 갖추어져 주야간 비슷한 환기 수준을 유지하는 돈사에서의 암모니아 발생량은 암모니아 농도가 큰 영향을 미치며, 문헌에 의하면 암모니아 농도는 작업자의 주간 과업 및 돼지의 활동 등과 같은 영향요인에 의해 주간에 증가될 수 있다고 보고된 바 있다 (Zhu et al., 2000).

결론

지하채널 환기 시스템이 설치된 비육돈사에서 Cold weather 시의 외기는 돈방으로 입기되기 전 $8.5 \pm 1.6^\circ\text{C}$ 에 열렸었으며, Hot weather 시의 외기온은 지하채널에서 $4.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 에 냉각되었다. 이러한 지하채널의 온도조절 효과로, 환기량은 일반적으로 제시되는 Cold weather 시 비육돈사 적정 환기량의 232% 수준인 39.5 ± 3.9 m³ hr⁻¹ head⁻¹, Hot weather 적정 환기량의 41% 수준인 83.4 ± 3.3 m³ hr⁻¹ head⁻¹로 나타났다. 결과적으로 외기온에 따른 환기량 차이가 크지 않아 암모니아 발생량은 Cold weather 62.4 ± 9.6 g day⁻¹ AU⁻¹, Hot weather 54.8 ± 6.3 g day⁻¹ AU⁻¹으로 Cold weather 시 암모니아가 더욱 많이 발생되었다 ($p < 0.05$).

따라서 지하채널 환기시스템이 설치된 외기온이 환기량에 미치는 영향이 적은 돈사에서는 외기온이 낮은 계절에도 상대적으로 높은 수준으로 돈사 내부 암모니아를 배출할 수 있어 사육환경 개선이 가능하지만 이로 인한 발생량은 증가될 수 있으며, 외기온이 높은 계절 환기량 감소로 암모니아 발생량은 감소될 수 있으리라 본다. 또한, 외기온이 낮은 계절의 주간 암모니아 농도 증가로 인해 암모니아가 야간보다 많이 발생될 수 있으므로 주간에 이를 저감

하기 위한 노력이 필요하다고 판단된다.

인용문헌

- Aarnink, A.J.A., Keen, A., Metz, J.H.M., Speelman, L., Verstegen, M.W.A., 1995. Ammonia emission patterns during the growing periods of pigs housed on partially slatted floors. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 62(2), 105-116.
- Bostami, A.R., Mun, H., Islam, M., Yang, C.-J., 2015. Effect of ground channel ventilation system on gaseous emissions, air contaminants, performance and behavior of growing pigs during winter season. *Journal of Applied Environmental and Biological Sciences*, 5(12), 145-156.
- Canh, T.T., Aarnink, A.J.A., Schutte, J.B., Sutton, A., Langhout, D.J., Verstegen, M.W.A., 1998. Dietary protein affects nitrogen excretion and ammonia emission from slurry of growing-finishing pigs. *Livestock Production Science*, 56(3), 181-191.
- DeVoe, K.R., Hoff, S.J., Gao, Y., Ramirez, B.C., 2016. Commissioning of a segmented wand for evaluating airflow performance of fans in livestock and poultry housing. In: *Proceedings of 2016 ASABE Annual International Meeting*, Florida, USA, 1.
- Group, 1992. Climatization of animal houses. CIGR Working.
- Ivanova-Peneva, S.G., Aarnink, A.J.A., Verstegen, M.W.A., 2008. Ammonia emissions from organic housing systems with fattening pigs. *Biosystems Engineering*, 99(3), 412-422.
- KOSIS, 2020. Livestock Farming Trend Survey Korean Statistical Information Service, Republic of Korea.
- KREI, 2020. Research Reports. Korea Rural Economic Institute, Republic of Korea. Registered Nov 23, 2020, <https://www.krei.re.kr/krei/researchReportView.do?key=71&pageType=010302&biblioId=526722>.
- Mackie, R.I., Stroot, P.G., Varel, V.H., 1998. Biochemical identification and biological origin of key odor components in livestock waste. *Journal of Animal Science*, 76(5), 1331-1342.
- MAFRA, 2020. Making improvement livestock odor by intensive management of farm building. Press Release, <https://www.mafra.go.kr/mafra/293/subview.do>. Livestock Policy

- Dept., Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, Republic of Korea
- MWPS (Midwest Plan Service), 1983. Swine Housing and Equipment Handbook: Midwest Plan Service.
- Ni, J.-Q., Heber, A.J., Diehl, C.A., Lim, T.T., 2000. SE—Structures and Environment: Ammonia, hydrogen sulphide and carbon dioxide release from pig manure in under-floor deep pits. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 77(1), 53-66.
- Ni, J.Q., Heber, A.J., Lim, T.T., 2018. Ammonia and Hydrogen Sulfide in Swine Production. In *Air Quality and Livestock Farming*. CRC Press, pp. 29-47.
- Philippe, F.-X., Laitat, M., Canart, B., Vandenheede, M., Nicks, B., 2007. Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter. *Livestock Science*, 111(1-2), 144-152.
- Phillips, J., 1995. Control and pollution prevention options for ammonia emissions (No. PB-95-241790/XAB). VIGYAN, Inc., Vienna, VA (United States).
- Saha, C.K., Zhang, G., Kai, P., Bjerg, B., 2010. Effects of a partial pit ventilation system on indoor air quality and ammonia emission from a fattening pig room. *Biosystems Engineering*, 105(3), 279-287.
- Sun, G., Guo, H., Peterson, J., Predicala, B., Laguë, C., 2008. Diurnal odor, ammonia, hydrogen sulfide, and carbon dioxide emission profiles of confined swine grower/finisher rooms. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 58(11), 1434-1448.
- Tabase, R.K., Millet, S., Brusselman, E., Ampe, B., De Cuyper, C., Sonck, B., Demeyer, P., 2020. Effect of ventilation control settings on ammonia and odour emissions from a pig rearing building. *Biosystems Engineering*, 192, 215-231.
- Zhu, J., Jacobson, L., Schmidt, D., Nicolai, R., 2000. Daily variations in odor and gas emissions from animal facilities. *Applied Engineering in Agriculture*, 16(2), 153.