



국내 터널식환기 무창 육계사에서 여름철 쿨링패드 사용에 따른 계사 내부 온도 저감 효과 및 더위지수(THI)에 미치는 영향

김혜란¹ · 박설화¹ · 위지수¹ · 이성신¹ · 이성대² · 강환구² · 류채화^{3*}

¹농촌진흥청 국립축산과학원 동물영양생리과 농업연구사, ²농촌진흥청 국립축산과학원 동물영양생리과 농업연구관,
³농촌진흥청 국립축산과학원 동물영양생리과 박사후연구원

Effects of Pad Cooling Systems in Tunnel-Ventilated Broiler House on Reducing Indoor Temperature and Level of Temperature-Humidity Index during Summer

Hye Ran Kim¹, Seol Hwa Park¹, Jisoo Wi¹, Seongshin Lee¹, Sung Dae Lee², Hwan Ku Kang² and Chaehwa Ryu^{3*}

¹Researcher, Animal Nutrition and Physiology Division, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

²Senior Researcher, Animal Nutrition and Physiology Division, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

³Post Doctor, Animal Nutrition and Physiology Division, National Institute of Animal Science, Rural Development Administration, Wanju 55365, Republic of Korea

ABSTRACT As global warming worsens, it is feared that higher ambient temperatures and relative humidity might result in a more intense heat stress for livestock animals, especially broilers, which lack sweat glands for thermoregulation and have been selectively bred for rapid growth. Therefore, strategic livestock management is needed to mitigate the adverse effects of heat stress on broilers. In Korea's poultry farming systems, tunnel-ventilated broiler houses and pad cooling systems are commonly installed to lower indoor temperatures during the summer. However, caution is advised with pad cooling systems as they can increase the humidity inside the houses, potentially causing further harm. This study aimed to evaluate the effectiveness of pad cooling systems in tunnel-ventilated broiler house by assessing the reduction in indoor temperature using the Temperature-Humidity Index (THI), which accounts for the impact of relative humidity. Temperature and humidity data were collected during the summer (Jun to Sep) from eight farms with tunnel-ventilated broiler house located in different regions of Korea. The farms were divided into two groups based on the use of pad cooling systems is used, and temperature and humidity data, along with THI values, were analyzed two weeks before the birds were marketed. Meta-analysis results showed that at the hottest time of the day, 14:00, farms with pad cooling systems had significantly lower indoor temperatures compared to the control group, but observed an increase in indoor temperatures by 16:00 ($p < 0.05$). There is no significant difference in relative humidity ($p > 0.05$). The THI values decreased in the treatment group with cooling pads compared to the control group starting from 15:00, suggesting a diminished effect ($p < 0.05$). This study indicates the potential for developing optimal operational guidelines for cooling pads to reduce heat stress in broilers during the summer season.

(Key words: broiler, pad cooling systems, temperature, temperature-humidity index)

서론

최근 기후변화로 인해 고온이 지속되는 기간, 빈도 및 규모가 점점 커지고 있다(Perkins-Kirkpatrick and Lewis, 2020). 특히 우리나라는 사계절이라는 특성상 여름과 겨울의 온도차

이는 20℃ 이상 나타나기 때문에 가축을 사육하기에는 매우 열악한 기후 조건이라 할 수 있다(Pedrazzi et al., 2020). 가축 중 육계는 몸이 털로 덮혀 있고 땀샘이 없는 특징이 있어 여름철 사육시 고온 사양관리가 필요하다. 여름철과 같은 고온 스트레스가 높은 시기는 가끔류에 있어 건강 및 증체량과 같

* To whom correspondence should be addressed : chryu0629@korea.kr

은 생산성을 저하시키는 원인이 된다(Youssef et al., 2015). 일반적으로 가금의 신체에서는 고온스트레스 등을 받을 경우 체내 온도 유지를 위해 팬팅 등이 이뤄지지만 고온스트레스가 높아질 경우 열 생산과 균형에 대한 유지가 어려워지고 결과적으로 폐사로 이어지게 된다(Toyomizu et al., 2005).

더위지수(temperature-humidity index; THI)는 여름철 가축이 받는 스트레스를 지수화 한 것으로 이를 통해 영양소 및 사육 관리에 대한 적정 기준을 설정하고자 개발되었다(Kang et al., 2020). 최근 THI를 이용하여 가축의 고온스트레스에 대한 수준을 측정하고 이에 대한 사육관리와 접촉하고자 하는 노력이 증가하고 있으나 아직까지 부족한 실정이다. 고온스트레스 저감을 위해서 사료첨가제 및 냉각 시스템과 같은 다양한 기기들이 개발되고 있는 가운데 국내 가금류 농가에서 가장 많이 사용되는 것은 환기팬과 쿨링패드 시스템이라 할 수 있다(Mun et al., 2023). 이중 쿨링패드는 계사 측면에 패드를 설치하여 고온시 냉각수를 흐르게 하면서 외부에서 들어오는 뜨거운 바람을 차게 식히면서 내부로 유입되게 하는 방식으로 쿨링패드를 이용한 터널식 환기방법은 여름철 고온스트레스 저감에 효과적인 방법 중 하나이다(Dozier et al., 2005). 하지만 쿨링패드 사용 시 많은 비용과 에너지가 소비된다는 점에서 지금보다 경제적으로 효율적인 방법이 필요한 실정이다(Mathur et al., 2020). 따라서 본 연구에서는 여름철 쿨링패드 사용에 따라 계사 내부 온도 및 더위지수의 변화를 분석하여 효과적으로 쿨링패드를 사용할 수 있는 시간을 설정하고자 실험을 실시하였다.

재료 및 방법

1. 자료 수집

국내 대표적 육계 농장시설 형태인 터널식 환기 무창계사를 대상으로 하여 총 8개의 농가를 선정하여 시설환경 등을

조사하였다(Table 1). 여름철 온·습도 데이터를 수집하기 위해 2023년 6월 20일부터 9월 25일까지 농가 내·외부에 온·습도 로거(174H, Testo, Germany)를 설치하였으며, 로거는 계사 내부 사료조 라인 중앙 부근과 계사 인근 500 m 반경 그늘이 있는 구조물에 지상으로부터 1.5 m 높이에 위치하였다. 농가별 육계 입식과 출하일을 고려하였으며, 판단하기 위해 출하 2주전을 기준으로 온·습도 데이터를 추출하였다. 추출된 데이터는 THI 값을 산출하기 위해 NRC(1971) 공식을 사용하였다.

$$THI = (1.8 \times T + 32) - [(0.55 - 0.0055 \times RH) \times (1.8 \times T - 26)]$$

2. 자료의 분석

데이터는 계사 내 쿨링패드 유무에 따라 농가를 분류하고, 외부에서 내부의 값을 차감하여 평균값을 산출하였다(Table 2). 데이터의 분석은 대조구와 처리구의 평균을 비교하는 표준화평균차 분석방법을 사용하여 처리에 대한 종합적인 효과를 도출하였다. 표준화평균차이는 각 자료에서 제공하는 평균과 표준편차를 이용하여 계산하였다. 각 연구들의 효과들에 대한 가중치는 역분산가중치를 적용하여 산출하였고, 임의효과모형(random effect model)의 산출에서는 DerSimonian-Laird 통계량을 사용하였다. 연구들 간의 이질성(heterogeneity) 분석에는 Cochran's Q 통계량을 사용하였고, I² 통계량을 이용하여 이질성과 잠재적인 효과에 대한 분석을 수행하였다. 일련의 분석은 R statistical program(version 4.3.2)을 사용하였고, "meta" 및 "tydiverse" packages를 사용하였다.

결과 및 고찰

1. 자료의 특성

본 연구에서는 총 8개의 연구에서 16개의 실험결과를 도

Table 1. Information for used studies

Farm no.	Animals (head)	Area (m ²)	Stocking density (kg/m ²)	Pad cooling systems
A	11,000	595	33.1	No
B	19,000	992	34.5	No
C	15,000	496	32.3	No
D	23,000	1,388	31.1	No
E	17,000	916	33.4	Yes
F	25,000	1,322	34.0	Yes
G	30,000	1,653	28.3	Yes
H	40,000	1,983	34.5	Yes

Table 2. Descriptive statistics for used data

Items	Time	CON ¹		TRT ²	
		Mean	Standard deviation	Mean	Standard deviation
Temperature	10:00	1.40	4.17	3.53	5.25
	11:00	1.66	3.95	3.04	4.29
	12:00	1.84	4.08	3.07	3.63
	13:00	1.73	3.61	2.07	2.53
	14:00	1.77	3.64	1.98	1.66
	15:00	1.30	3.21	1.36	1.76
	16:00	0.30	2.82	1.26	1.71
Humidity	10:00	-7.91	14.16	-11.10	14.50
	11:00	-8.64	13.32	-10.39	12.17
	12:00	-9.65	14.83	-10.26	9.42
	13:00	-9.75	13.33	-8.12	7.60
	14:00	-9.21	12.91	-8.92	5.31
	15:00	-8.79	11.98	-6.66	5.74
	16:00	-5.42	10.95	-7.10	5.82
THI ³	10:00	0.11	3.99	2.24	4.45
	11:00	0.37	3.81	1.70	3.59
	12:00	0.45	3.97	1.88	3.22
	13:00	0.22	3.80	1.12	2.32
	14:00	0.29	3.76	1.01	1.40
	15:00	-0.16	3.39	0.58	1.78
	16:00	-0.83	3.12	0.42	1.78

¹ CON, control group (without cooling pads).

² TRT, treatment group (with cooling pads).

³ THI, temperature - humidity index.

출해 분석에 사용하였다. 따라서 서로 다른 연구 결과를 통합하는 메타분석이라는 통계 방법을 사용하여 분석을 진행하였다. 메타분석(meta-analysis)이란 동일하거나 유사한 목적 혹은 주제에 관하여 이미 수행된 연구 결과들을 병합하여 새로운 데이터를 구축하고, 종합 결과를 도출하는 분석 방법이다(Borestein et al., 2009). 본 연구에서는 쿨링패드 가 계사내 온습도 및 더위지수에 영향을 미칠 수 있다고 생각하였고, 자료수집과정에서 정확도를 높이기 위해 각 농가의 측정 결과를 내외부 편차로 사용하였다. 쿨링패드 가 없는 처리구의 내외부 편차 값이 쿨링패드 가 있는 대조구의 내외부 편차 값보다 클 때 양(positive)의 값이 산출되고, 쿨링패드 가 없는 처리구가 쿨링패드 가 있는 대조구보다 내외부 편차가 작을 때 음(negative)의 값이 산출되었다.

2. 온도에 대한 효과

쿨링패드의 유무에 따라 계사 내 온도에 미치는 효과는 Table 3에서 보는 것과 같다. 모든 시간에서 연구간의 이질성이 확인되었고($P < 0.01$), 높은 I^2 값(93.62~97.10%)이 관찰되었다. 고정효과모형의 결과에서는 10시($ES = -0.17$) 및 16시($ES = -0.30$)에 ES 가 음(negative)의 값이 나타나 온도를 저감하는 효과가 없었으나($P < 0.05$), 13시($ES = 0.18$)는 쿨링패드 가 온도저감에 유의적 효과를 보였다($P < 0.05$). 이에 따라 이질성을 고려한 임의효과모형의 14시($ES = 1.09$)에 유의적으로 온도저감 효과가 있었으나($P < 0.05$), 16시($ES = -0.77$)에는 온도저감 효과가 없었다($P < 0.05$). 유의적 결과를 나타낸 14시와 16시 분석에 사용된 각 연구들의 개별적 효과 크기는 Fig. 1에서 보는 것과 같다. 2023년 7~8월의 최고온도

Table 3. Summary effects of cooling pad on temperature

Time	Fixed effect model			Random effect model			Heterogeneity		
	ES ¹	SE ²	P-value	ES	SE	P-value	I ² (%)	Q	P-value
10:00	-0.17	0.07	<0.05	-0.12	0.33	0.71	95.73	351.38	<0.01
11:00	-0.07	0.07	0.30	-0.00	0.32	1.00	95.59	339.78	<0.01
12:00	-0.00	0.07	1.00	-0.03	0.36	0.94	96.25	399.68	<0.01
13:00	0.18	0.07	<0.05	0.23	0.35	0.51	96.06	381.02	<0.01
14:00	0.09	0.07	0.20	1.09	0.43	<0.05	97.10	517.73	<0.01
15:00	-0.04	0.07	0.51	-0.19	0.26	0.47	93.62	234.98	<0.01
16:00	-0.30	0.07	<0.01	-0.77	0.32	<0.05	95.52	334.75	<0.01

¹ ES, summarized effect size based on standardized mean difference.

² SE, standard error of summarized effect size.

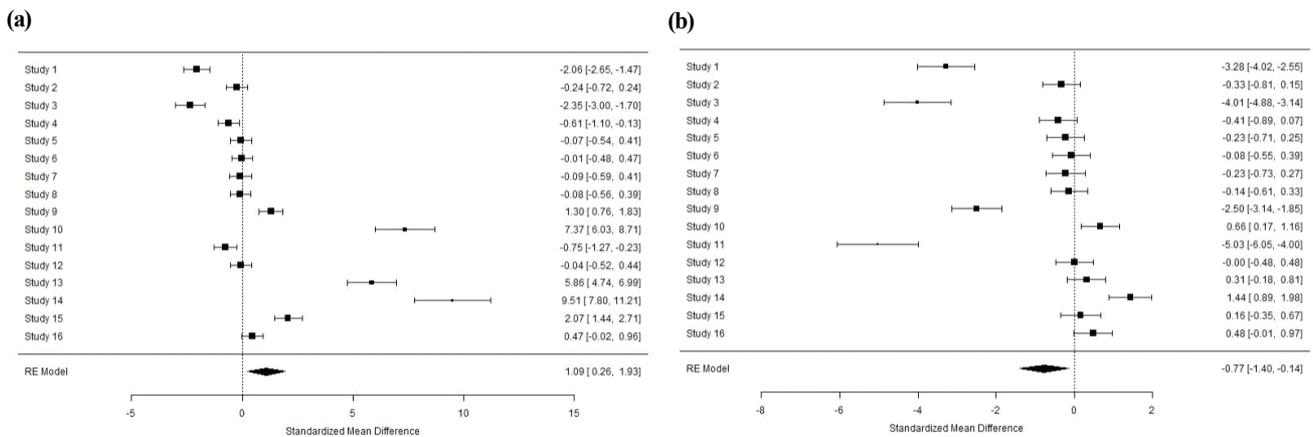


Fig. 1. Forest plot for individual effect size of used studies using random effect model on temperature (a) 14:00 (b) 16:00.

는 각 29.6℃, 30.9℃로 닭의 고온 임계온도인 28℃를 넘었으며(Fernandez et al., 2018), 12시부터 14시가 온도에 대한 피해가 가장 높은 시간대이다. 선행 연구에서는 쿨링패드 사용시 냉각효과가 나타났다고 보고된 바 있으며(Dagtekin et al., 2009), 고온 스트레스와 성장특성 개선에도 효과가 있다고 보고하였다(Petek et al., 2012). 외부 온도가 높은 14시경 쿨링패드가 온도저감에 대해 유의적 차이를 나타낸 결과는 선행 연구들과 유사한 결과로 볼 수 있다.

3. 상대습도에 대한 효과

쿨링패드의 유무에 따라 계사 내 상대습도에 미치는 효과는 Table 4에서 나타냈다. 모든 시간대 상대습도에서 연구 간의 이질성이 나타났으나(p<0.01), I²값은 61.48~88.04%로 관찰되었다. 고정효과모형의 결과에서는 13시부터 15시까지

지(ES=-0.15, -0.16, -0.14) 상대습도가 높아지는 유의적인 결과를 보였다(P<0.05). 이질성을 고려한 임의효과모형에서는 모든 시간대에서 유의적인 효과를 보이지 않았다. Bayraktar et al.(2004)의 연구에 따르면 온도보다 습도의 제어가 효과적이라고 얘기하고 있으나, Dagtekin et al.(2009)은 상대습도가 높을 때 쿨링패드의 효과는 미미했다고 보고하였다. 본 연구에서는 쿨링패드가 습도에 큰 영향을 미치지 않았고, 상대습도가 높았던 것으로 생각된다.

4. THI에 대한 효과

쿨링패드의 유무에 따라 계사 내 THI에 미치는 효과는 Table 5에서 보는 것과 같다. 모든 시간대 연구 간의 이질성이 나타났으며(P<0.01), I²값은 92.79~96.34%로 높게 관찰되었다. 고정효과모형의 결과에서는 10시(ES=-0.14), 15시

Table 4. Summary effects of cooling pad on humidity

Time	Fixed effect model			Random effect model			Heterogeneity		
	ES ¹	SE ²	P-value	ES	SE	P-value	I ² (%)	Q	P-value
10:00	-0.01	0.06	0.87	-0.02	0.16	0.91	84.29	95.51	<0.01
11:00	-0.03	0.06	0.60	-0.03	0.10	0.74	61.48	38.94	<0.01
12:00	-0.06	0.06	0.32	-0.06	0.11	0.59	68.23	47.22	<0.01
13:00	-0.15	0.06	<0.05	-0.18	0.13	0.18	77.61	66.99	<0.01
14:00	-0.16	0.06	<0.05	-0.30	0.19	0.11	87.95	124.47	<0.01
15:00	-0.14	0.06	<0.05	-0.16	0.13	0.22	76.84	64.76	<0.01
16:00	-0.01	0.06	0.89	-0.09	0.19	0.64	88.04	125.42	<0.01

¹ ES, summarized effect size based on standardized mean difference.

² SE, standard error of summarized effect size.

Table 5. Summary effects of cooling pad on temperature - humidity index

Time	Fixed effect model			Random effect model			Heterogeneity		
	ES ¹	SE ²	P-value	ES	SE	P-value	I ² (%)	Q	P-value
10:00	-0.14	0.07	<0.05	-0.14	0.29	0.64	94.66	281.11	<0.01
11:00	-0.02	0.07	0.82	-0.08	0.29	0.78	94.81	289.14	<0.01
12:00	0.04	0.07	0.59	0.03	0.37	0.93	96.49	427.00	<0.01
13:00	-0.00	0.07	0.96	-0.08	0.28	0.78	94.25	260.99	<0.01
14:00	-0.06	0.07	0.35	0.37	0.36	0.30	96.34	409.75	<0.01
15:00	-0.29	0.07	<0.01	-0.49	0.25	<0.05	92.79	208.18	<0.01
16:00	-0.36	0.07	<0.01	-0.80	0.29	<0.05	94.59	277.28	<0.01

¹ ES, summarized effect size based on standardized mean difference.

² SE, standard error of summarized effect size.

(ES=-0.29) 및 16시(ES=-0.36)에 쿨링패드로 인한 THI 저감효과가 없는 것으로 나타났다($P<0.05$). 이질성을 고려한 임의효과모형에서도 15시(ES=-0.49) 및 16시(ES=-0.80)에 THI 저감효과가 없었다($P<0.05$). 유의적 결과를 보인 15시와 16시 분석에 사용된 각 연구들의 개별적 효과 크기는 Fig. 2에서 보는 것과 같다. THI는 온도와 습도 이용해 더위 지수를 평가하는 지표로(Dikmen and Hansen, 2009), 특히 본 연구와 같은 무창계사에서는 더위지수와 가축의 고온스트레스가 직접적 관련이 있다고 연구된 바 있다(St-Pierre et al., 2003). 본 연구에서는 여름철 최대 온도 이후 15시부터 쿨링패드 사용이 THI 저감에 유의적 효과가 없는 것으로 나타나 온도의 결과와 일맥상통한 결과로 볼 수 있다.

적 요

전세계적인 기후변화로 인해 국내 평균기온과 여름철 폭염 강도가 심화되면서 고온스트레스로 인한 가축 피해를 완화하기 위한 사양 전략이 필요한 상황이다. 국내 육계사의 경우 터널식 환기계사나 쿨링패드 등 시설을 설치하여 여름철 실내온도를 저감하고 있다. 그러나 쿨링패드의 경우 계사 내부의 습도를 증가시켜 역으로 피해를 유발할 수 있어 사용시 주의를 요한다. 따라서 본 연구에서는 국내의 대표적 계사 형태인 터널식 환기 무창 육계사에서 쿨링패드를 가동시 계사 내부의 온도 저감 효과를 더위지수(temperature-humidity index; THI)로 함께 평가하고자 하였다. 본 연구에서는

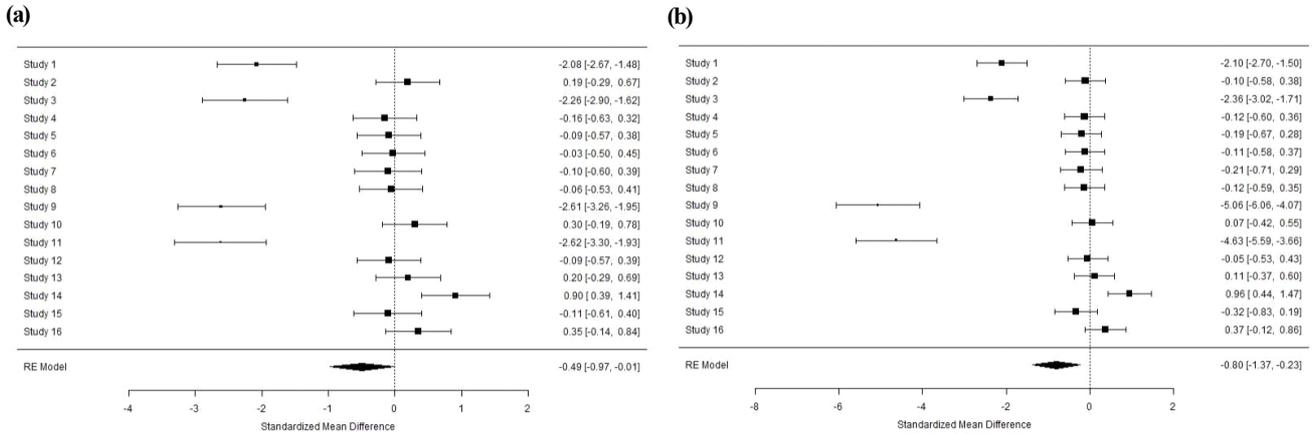


Fig. 2. Forest plot for individual effect size of used studies using random effect model on temperature - humidity index. (a) 15:00 (b) 16:00.

우리나라의 각각 다른 지역에 위치한 8개의 터널식 환기 무창계사 육계농가를 대상으로 여름철(6~9월) 온도와 습도 데이터를 수집하였다. 해당 농가들은 쿨링패드의 유무에 따라 2개의 처리군으로 나누었으며, 출하 2주 전 기준으로 온습도 데이터를 추출하여 계사 내·외부간 온습도 및 THI의 편차를 구하였다. 메타분석 결과, 여름철 가장 더운 낮시간대인 14시를 기준으로 대조구 대비 쿨링패드 보유 농가에서 내외부 온도의 차이가 크고, 해가 지는 16시대에 내외부 온도의 차이가 줄어드는 것으로 관찰되었다($P < 0.05$). 쿨링패드에 따른 상대습도에 대한 유의적인 차이는 없었으나($P > 0.05$), 스트레스를 수치화한 THI 지수로 환산하였을 때, 오후 3시부터 대조구 대비 쿨링패드 보유 처리구가 THI 편차 값이 감소하여 효과가 줄어드는 것으로 판단되었다($P < 0.05$). 본 연구의 결과 14시 쿨링패드를 보유한 농가는 쿨링패드가 없는 대조구 농가보다 계사내외부 온도차가 크게 나타났고, 이는 계사내부 온도저감에 효과가 있다고 판단할 수 있다. 따라서 쿨링패드 사용시 계사내 더위피해를 저감하는 데 효과가 있을 것으로 생각되며, 본 연구의 결과는 하절기 육계의 고온 스트레스 저감을 위해 쿨링패드 운용시 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 생각된다.

(색인어 : 브로일러, 쿨링패드 시스템, 온도, 온도-습도 지수)

사 사

본 연구는 2023년 농촌진흥청 축산연구사업(과제번호: PJ017240)에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

ORCID

- | | |
|---------------|---|
| Hye Ran Kim | https://orcid.org/0000-0003-2207-3668 |
| Seol Hwa Park | https://orcid.org/0000-0002-7218-8212 |
| Jisoo Wi | https://orcid.org/0000-0001-9437-6233 |
| Seongshin Lee | https://orcid.org/0000-0002-4872-3705 |
| Sung Dae Lee | https://orcid.org/0000-0002-9167-4099 |
| HwanKu Kang | https://orcid.org/0000-0002-4286-3141 |
| Chaehwa Ryu | https://orcid.org/0000-0002-7753-0929 |

REFERENCES

- Bayraktar H, Artukoglu M, Altan A 2004 Evaluation of the pad cooling system effectiveness used in hot weather conditions in broiler houses: Izmir case study. *Hayvansal Üretim* 45(2):1-9.
- Bronstein M, Hedges LV, Higgins JPT, Rothstein HR 2009 *Introduction to Meta-Analysis*. John Wiley and Sons Press, United Kingdom.
- Dagtekin M, Karaca C, Yıldız Y 2009 Performance characteristics of a pad evaporative cooling system in a broiler house in a Mediterranean climate. *Biosystems Engineering* 103(1):100-104.
- Dikmen S, Hansen PJ 2009 Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *J Dairy Sci* 92:109-116.
- Dozier WA, Lott BD, Branton SL 2005 Growth responses of

- male broilers subjected to increasing air velocities at high ambient temperatures and a high dew point. *Poult Sci* 84(6):962-966.
- Fernandez AP, Norton T, Tullo E, van Herterem T, Youssef A, Exadaktylos V, Marcella G, Berckmans D 2018 Real-time monitoring of broiler flock's welfare status using camera-based technology. *Biosyst Eng* 173:103-114.
- Kang S, Kim DH, Lee S, Lee TH, Lee KW, Chang HH, Moon BH, Ayassin T, Choi YH 2020 An acute, rather than progressive, increase in temperature-humidity index has severe effects on mortality in laying hens. *Front Vet Sci* 7:568093.
- Mathur S, Rawat P, Purohit J 2020 Passive cooling techniques in buildings: an overview. *Juni Khyat* 10(6):8.
- Mun JS, Kim RW, Lee SH, Lee SM, Choi SK 2023 Analysis of internal temperature change according to the application of thermal insulation paint and heat pump in broilers. *J Bio-Env Control* 32(3):197-204.
- National Research Council [NRC] 1971 Nutrient requirements of domestic animals. Nutrient requirements of dairy cattle No. 3. Washington, DC.
- Pedrazzi S, Allesina G, Muscio A 2020 Indirect evaporative cooling by sub-roof forced ventilation to counter extreme heat events. *Energy Build* 229:110491.
- Perkins-Kirkpatrick SE, Lewis SC 2020 Increasing trends in regional heatwaves. *Nat commun* 11(1):3357.
- Petek M, Dikmen S, Ogan MM 2012 Performance analysis of a two stage pad cooling system in broiler houses. *Turk J Vet Anim Sci* 36(1):21-26.
- St-Pierre NR, Cobanov B, Schnitkey G 2003 Economic losses from heat stress by US livestock industries. *J Dairy Sci* 86:52-77.
- Toyomizu M, Tokuda M, Mujahid A, Akiba Y 2005 Progressive alteration to core temperature, respiration and blood acid-base balance in broiler chickens exposed to acute heat stress. *J Poult Sci* 42:110-118.
- Youssef A, Exadaktylos V, Berckmans DA 2015 Towards real-time control of chicken activity in a ventilated chamber. *Biosyst Engstems Engineering* 135:31-43.

Received Mar. 21, 2024, Revised May. 16, 2024, Accepted May. 18, 2024