

가금류의 고온 스트레스 저감 방안

김영빈 · 염규림 · 박주영 · 이하늘 · 김종혁*

충북대학교 축산학과

Strategies to mitigate heat stress in poultry

Yeong Bin Kim, Gyu Lim Yeom, Ju Yeong Park, Ha Neul Lee, Jong Hyuk Kim*

Department of Animal Science, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea

Received: Jan 13, 2025
Revised: Apr 17, 2025
Accepted: Apr 24, 2025

*Corresponding author

Jong Hyuk Kim
Department of Animal Science,
Chungbuk National University,
Cheongju 28644, Korea
Tel: +82-43-261-2546
E-mail: jonghyuk@chungbuk.ac.krCopyright © 2025 Korean Society of
Animal Science and Technology.
This is an Open Access article
distributed under the terms of the
Creative Commons Attribution
Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>)
which permits unrestricted
non-commercial use, distribution,
and reproduction in any medium,
provided the original work is properly
cited.

ORCID

Yeong Bin Kim
<https://orcid.org/0009-0007-9151-0135>
Gyu Lim Yeom
<https://orcid.org/0009-0006-1849-053X>
Ju Yeong Park
<https://orcid.org/0009-0008-1938-977X>
Ha Neul Lee
<https://orcid.org/0009-0007-8352-4182>
Jong Hyuk Kim
<https://orcid.org/0000-0003-0289-2949>

Competing interests

No potential conflict of interest
relevant to this article was reported.

Abstract

The Poultry industry has been developing worldwide, with increasing in production and consumption of poultry meat. However, rising average temperatures due to climate change induce heat stress in poultry, decreasing the productivity and health of broiler chickens and laying hens. Poultry lack sweat glands and dissipate heat through respiration. In high temperatures, this can lead to alkalosis due to hyperventilation. Additionally, an increase in drinking behavior is observed, which regulates body temperature through water intake. Heat stress alters the mineral balance, concentration of reactive oxygen species, metabolic activities, fat accumulation, and psychological status of poultry, negatively affecting productivity, meat quality, immunity, and gut health. These factors result in economic losses in the poultry industry, so effective solutions are needed to address heat stress. Therefore, this review focuses on technologies and strategies that can alleviate negative impacts of heat stress. Supplementation of functional materials in feed, such as amino acids (glutamine, arginine, and threonine), vitamins (vitamin C and E), minerals (zinc, chromium, and selenium), and feed additives (herbs, polyphenols, betaine, biotics, and algae), can improve productivity, gut health, and immunity of poultry exposed to heat stress, and reduce stress. Providing cold water can increase water intake in poultry, facilitating heat dissipation, and the addition of functional materials to drinking water can support thermoregulation and reduce stress. Feed restriction and feeding pellets can reduce heat production and stress in poultry, while the use of fan-cooling pads, fogging cooling systems, sprinklers, and cool perches can lower body temperature directly and enhance productivity. In addition, implementing ventilation systems using tunnel-ventilated fans in poultry houses can positively reduce humidity and temperature, improving poultry productivity. Utilizing information and communication technology (ICT)-based smart farm technologies allows for detailed adjustments and timely applications of feeding methods, cooling systems, and ventilation systems. Moreover, using radio-frequency identification (RFID) data for individual analysis can validate the effects of stress reduction strategies. Therefore, supplementation of functional materials, water management, rearing facilities, environmental control, and the application of smart farm technologies are expected to improve productivity and reduce stress in poultry under heat stress conditions.

Keywords: Broiler chicken, Feed additive, Heat stress, Laying hen, Management, Smart farm

Funding sources

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. RS-2023-00210634).

Acknowledgements

Not applicable.

Availability of data and material

Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.

Authors' contributions

Conceptualization: Kim YB, Kim JH.
Data curation: Kim YB, Park JY, Kim JH.
Methodology: Kim YB, Kim JH.
Validation: Yeom GL, Park JY, Lee HN, Kim JH.
Investigation: Kim YB, Yeom GL, Park JY, Lee HN.
Writing - original draft: Kim YB.
Writing - review & editing: Kim YB, Yeom GL, Park JY, Lee HN, Kim JH.

Ethics approval and consent to participate

This article does not require IRB/ IACUC approval because there are no human and animal participants.

서론

가금 산업은 가금육 생산량 및 소비량이 증가함에 따라 전 세계적으로 꾸준히 성장하고 있다. 유엔식량농업기구(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)의 자료에 따르면 2020년 육류 생산량은 2억 3,874만 톤에서 3억 3,718만 톤으로 상승했으며, 닭고기 비율은 25%에서 35%까지 증가하였다[1]. 가금 산업은 축산 분야에서 중요한 역할을 맡고 있으며 여러 측면에서 그 중요성을 보이고 있다. 가금류는 인간에게 단백질 제공 원천인 닭고기와 계란을 제공하고 있으며, 다른 농장 동물보다 성장 속도가 비교적 빠르고 한정된 공간에서 효율적으로 생산할 수 있다[2].

기후변화는 지구의 평균 온도를 증가시키고 있으며, 이로 인해 가축 및 농작물은 부정적인 영향을 받고 있다[3]. 평균 기온 상승은 가축이 느끼는 체감 온도를 상승시켜 고온 스트레스를 유발하고, 여름철 가금류의 고온 스트레스로 인한 부정적인 효과에 의해 생산성을 감소시키고 있다. 고온 스트레스는 가금류의 생산성 및 건강을 하락시키고 가금육 및 계란의 품질을 감소시킨다[4-6]. 이로 인해, 가금류 산업은 연간 1억 2,800만 달러에서 1억 6,500만 달러 사이의 경제적 손실이 발생했으며, 고온 스트레스로 인한 미국 축산업 전체의 연간 경제적 손실은 16억 9,000만 달러에서 23억 6,000억 달러로 추정되었다[7]. 이러한 이유로 고온 스트레스로 인해 매년 발생하는 경제적 손실을 줄이기 위한 방안의 모색이 필요한 실정이며, 이를 해결하기 위한 기술 및 전략의 개발은 가금류의 고온 스트레스로 인한 피해를 줄이고, 미래 가금 산업 발전에 크게 기여할 수 있을 것이다. 따라서, 본 리뷰의 목적은 기후변화에 따른 고온 스트레스에 의한 부정적인 영향과 완화 기술 및 전략들에 대한 효과를 조사하고, 가금류의 생산성 및 건강을 향상시키는 방안을 확인하는 것이다.

고온 스트레스에 의한 가금류의 행동 반응

'Cooling behavior'은 고온 스트레스로 인하여 가금류에게 나타나는 가장 두드러진 행동 변화이다[8]. 이러한 비정상적인 행동은 가금류 스스로 체온을 낮추어 정상체온으로 회복하기 위해 발생된다. 가금류는 체열 손실을 용이하게 하는 땀샘이 없으면서도 깃털이 없는 체표면이 상대적으로 제한되어 있어 전도, 복사, 대류 및 증발을 통해 체온 손실을 효과적으로 일으킬 수 없다고 알려져 있다[4,9]. 주변 온도가 상승함에 따라 체표면과 주변 온도 사이의 열교환은 감소하게 되며, 고온 스트레스를 겪는 가금류는 호흡수를 증가시켜 호흡기를 통한 수분 증발을 유도한다[10]. 만약 고온 스트레스가 지속되면 탈수로 이어질 수 있는 열성 과호흡이라고 불리는 헐떡임 현상이 지속되게 된다[11]. 헐떡임은 결국 가금류의 체내 CO₂ 손실을 촉진하여 혈액 내 산-염기 불균형으로 인한 호흡성 알칼리증을 발생시킬 수 있다[12-15]. 고온 스트레스에 노출된 가금류는 날개를 들어 올려 깃털로 가려져 있는 신체 부위를 노출시켜 체온을 낮추는 행동을 보이게 된다[8]. 날개를 펴는 빈도가 증가할수록 상처 또는 멍이 생기게 되거나 건조한 삼출성의 가금육이 생산될 수 있다[16]. 주변온도가 높을 때, 가금류는 축사에서 가장 시원한 곳을 찾으려고 하는 경향이 있으며, 주로 바닥의 깔짚을 파헤쳐 체온을 낮추려는 시도를 한다[17]. 또한 땅에 쪼그려 앉아있는 시간이 많아지게 되며, 걸거나 움직이는 시간이 감소한다[18]. 이러한 행동 변화는 발바닥 질병 발생률을 증가시킬 수 있다[19]. 고온 스트레스에 노출된 가금류는 점점 무기력해지며, 이는 결국 사료섭취량과 골격 건강에 악영향을 끼친다. 또한 사료 섭취로 인한 소화, 흡수 및 영양소 이용 과정에서 생산되는 열을 줄이기 위해 사료섭취량이 감소하게

된다[20]. 이와 반대로 닭의 음수량은 증가하는 양상을 보인다. 1 mL의 수분이 증발할 때마다 540 kcal의 에너지를 잃게 되기 때문에 가금류는 음수를 통해 체열을 낮추며 에너지 손실을 방지하는 것으로 알려져 있다[21]. 고온 스트레스로 인해 물 소비량과 체내대사율은 증가하지만 사료섭취량 감소로 설사가 유발되며 체중이 크게 감소한다[7]. 또한, Zepp et al.은 조류에서 발생하는 공격적인 행동이나 깃털을 쪼는 행동의 주요 원인은 고온 스트레스이며, 심할 경우 깃털을 쪼아 다른 동물에게 부상을 입히고 폐사에 이를 수 있다고 보고하였다[22]. 이러한 가금류의 공격성은 사료요구율을 증가시켜 경제적 손실을 초래할 수 있다[23]. Altan et al.은 육계를 대상으로 한 연구에서 고온 스트레스가 강직성 부동화에 상당한 영향을 끼치며, 강직성 부동화의 지속 시간을 증가시켜 가금류가 두려움을 느끼는 경향이 더 높아진다고 보고하였다[24].

고온 스트레스에 의한 가금류의 생리적 반응 및 생산성 변화

고온 스트레스는 가금류의 행동 반응뿐만 아니라 체내 생리적 반응 및 생산성에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 고온 스트레스로 인한 사료섭취량 변화 및 생리적 반응은 가금류의 생산성 저하에 직접적으로 관여한다. 고온 스트레스는 혈액 내 Na^+ , K^+ , Cl^- 농도 및 이산화탄소 분압을 감소시키고 HCO_3^- 의 농도를 증가시킨다[25]. 이러한 변화는 미네랄 균형을 무너뜨리며 결국 가금류의 생산성을 감소시킨다. 또한 체내 미토콘드리아에서 활성산소(reactive oxygen species, ROS)의 생성이 증가하게 되고 단백질, 지질 및 DNA에 산화적 손상이 발생하여 아데노신 삼인산(adenosine triphosphate, ATP) 합성이 감소하게 된다[26]. 이는 가금류의 세포 투과성이 감소하고 세포 내 항상성 장애를 일으켜 세포 사멸 및 괴사로 이어지게 한다[26]. Mujahid et al.은 고온 스트레스에 노출된 가금류는 ROS에 의한 산화 정도를 측정하는 지표인 혈장 및 미토콘드리아 내 말론디알데하이드(malondialdehyde, MDA)의 농도가 증가했다고 보고하였다[27].

고온 스트레스는 가금류의 영양소 소화 및 대사에 부정적인 영향을 미치며 대표적인 영양소인 탄수화물, 단백질 및 지방의 소화율을 감소시킬 수 있다[28]. 여러 연구에 따르면 고온 스트레스를 받은 가금류는 지질 대사의 지표인 비에스테르화 유리 지방산이 점진적으로 감소하여 체내에 저장되어 있는 지방 사용이 감소했다[29,30]. 따라서 고온 스트레스를 받은 가금류는 체내 지방 사용 저하로 인하여 복부, 피하 및 근육 내에 지방이 더욱 많이 축적되는 것으로 밝혀졌다. 지방 축적으로 인하여 신체 말단 부위에 지질 보유량이 많아지면 체열 방출에 어려움을 겪으며 더욱 심한 고온 스트레스로 이어질 수 있다[11]. 고온 스트레스로부터 기인된 우울감은 가금류의 단백질 신진대사에 영향을 끼쳐 체내 단백질 합성을 저하시킨다는 연구 결과가 있다[31]. 고온 스트레스를 받은 산란계는 사료섭취량 감소로 인해 영양소 이용성 및 혈장내 단백질 농도가 감소해 작은 크기의 계란을 생산한다[32]. 또한 고온 스트레스로 인한 호흡성 알칼리증이 발생하게 되면 혈중 이온화 칼슘 수치가 감소하여 칼슘 이용성이 감소하게 된다[33,34]. 이로 인해 난각 두께가 감소하고 금이 가거나 깨진 계란의 수가 증가할 수 있다[35]. 또한 고온 스트레스는 난황색, 난각 무게, 난각 강도, 호우유닛, 계란의 영양소 및 유통기한 등에 부정적인 영향을 끼친다는 연구가 보고되었다[36,37].

고온 스트레스는 육계의 도체에도 영향을 준다. 고온 스트레스를 받은 육계는 도체율이 감소하며, 특히 닭가슴살의 품질 및 육량이 감소되는 것으로 보고되었다[38,39]. 고온 스트레스를 받은 가금류는 계육의 육즙 손실과 조리 시 영양분 손실로 인해 고기의 부드러움이 감소한다는 연구 결과가 있다[31]. Petracci et al.은 고온 스트레스는 미토콘드리아 기능을 손상시켜 근육에서 글리코겐이 포도당으로 분해되는 것을 촉진하고 근육의 에너지 저장 능력을 감소시키며, 생

화학적 변화를 가속화하여 pH 감소 속도가 증가하고 결과적으로 육계에서 하얗고 창백한 삼출성 육질을 생성한다[40]. 또한 단백질은 계육의 수분 결합 능력에 관여하기 때문에 높은 도체온도로 인한 단백질 손상은 단백질의 수분 결합 능력을 방해하여 더 높은 수분 손실에 기여한다고 알려져 있다[41].

고온 스트레스에 노출된 가금류는 시상하부-뇌하수체-부신피질 축이 활성화되어 코르티코스테론의 분비가 활발해지며, 가금류에서 높은 수준의 코르티코스테론은 생산성을 감소시키고 골격근에서의 단백질 분해를 유도하며, 지방 축적을 증가시키고, 장벽 기능과 심장에 악영향을 미치는 것으로 밝혀졌다[42]. 또한, Quinteiro-Filho et al.은 코르티코스테론혈증이 면역 억제 작용을 일으키기 때문에 고온 스트레스에 노출된 가금류는 면역 능력이 저하되고 콕시듐증과 같은 전염병에 걸리기 쉽다고 보고하였다[43]. 코르티코스테론뿐만 아니라 티록신의 감소도 고온 스트레스에 노출된 가금류에서 관찰된 바가 있다[44]. 티록신의 저하로 인한 갑상선 기능 저하는 가금류의 생산성 저하, 도체 지방 증가 및 난품질 저하를 일으킬 수 있다. 특히, Rozenboim et al.은 고온 스트레스가 산란계 체내의 프로게스테론, 프로락틴 및 에스트로겐의 감소를 유발하여 산란계의 산란율에 부정적인 영향을 미친다고 보고하였다[36]. 고온 스트레스에 노출된 가금류의 trans-epithelial electrical resistance(TEER)은 고온 스트레스로 인하여 감소하며, 낮은 TEER은 장세포의 투과성을 증가시켜 장벽 기능이 악화된 것을 나타낸다[45]. Smith et al.은 고온 스트레스에 노출된 육계는 장내 내독소(lipopolysaccharide, LPS)와 염증성 사이토카인이 증가하여 장 점막에서 국소 염증 반응이 일어나 육계에서 경미한 다발성 장염이 일어난다고 보고하였다[46]. 심할 경우 LPS가 혈류 전체로 확산되어 내독소혈증을 일으킬 수 있다. 내독소혈증은 다발성 장기부전과 치명적인 패혈성 쇼크를 일으킨다[47]. 또한 고온 스트레스는 장내 미생물 군총의 균형을 무너뜨리며, *Salmonella Enteritidis* 와 *Clostridium perfringens*와 같은 병원균의 확산을 촉진시킨다[48]. 고온 스트레스는 림프기관의 무게를 감소시키며 혈청 내 항체 농도를 낮추기 때문에 면역력을 저하시켜 가금류의 폐사율을 증가시킨다[7]. 고온 스트레스로 인하여 폐사하게 되는 가금류에서는 건조하고 끈적한 근육, 점성 혈액 및 오그라든 다리 등의 사후현상을 볼 수 있다.

사료 내 기능성 물질 첨가에 따른 가금류의 고온 스트레스 저감

아미노산

글루타민은 근육 조직 및 혈장에서 많이 발견되는 중성 유리 아미노산으로, 아미노산, 뉴클레오타이드, 핵산, 단백질 등을 합성하는 역할을 한다[49]. 글루타민은 글루타메이트와 뉴클레오타이드를 합성하는 전구체로, 특히 여러 세포 및 조직에서 중요한 역할을 하는 글루타치온의 합성을 위한 전구체이다[50]. 육계 및 산란계 사료 내 글루타민 첨가는 생산성, 육질, 도체율, 산란율 및 면역능력을 향상시킬 수 있으며, 고온 스트레스에 의한 부정적인 영향을 감소시킬 수 있다[51-53]. 고온 스트레스에 노출된 육계에게 글루타민 첨가 사료를 급여하였을 때 체중, 사료섭취량이 향상됐으며, 사료요구율이 감소하였다[54,55]. 또한, 닭가슴살의 pH, superoxide dismutase(SOD) 및 총항산화능이 증가하고 지방산패도는 감소하였으며, 다리살 내 Nrf2의 mRNA 발현량이 증가하였다[50,56,57]. 또한, 장내 용모 높이 및 용모 높이:음모 깊이 비율이 상승했으며, 장내 밀착연접 관련 유전자인 ZO-1, claudin-1 및 occludin의 mRNA 발현량이 증가하였다[58]. 따라서, 가금류의 사료 내 글루타민 첨가는 생산성, 면역력 및 장 건강을 향상시켜 고온 스트레스로 인한 부정적인 영향을 감소시킬 수 있다.

알지닌은 가금류의 기본적인 제한 아미노산으로, 요소회로에 관여하는 효소들이 결핍되어 있

어 자체적으로 알지닌을 합성하지 못하기 때문에 가금류의 생존에 중요한 역할을 한다[59]. 알지닌은 단백질과 대사에 중요한 역할을 하는 크레아틴, 산화질소, 글루타메이트, 폴리아민, 프롤린 및 글루타민을 합성한다[60,61]. 이 중 크레아틴은 근육세포에 에너지를 전달하고 ATP를 보충하는 기능이 있으며[62], 산화질소는 특정 신호를 전달하고 면역반응에 관여한다[63]. 육계 및 산란계 사료 내 알지닌 첨가는 생산성, 도체율, 혈장 내 산화질소, 소장 무게 및 길이를 증가시키고, 면역능력 및 사료요구율을 개선했다[63-66]. 고온 스트레스에 노출된 육계에게 알지닌 첨가 사료를 급여하였을 때, 증체량, 도체율 및 가슴살 면적이 증가하고, 사료요구율이 감소하였다[62,67]. 고온 스트레스에 노출된 산란계에게 알지닌 첨가 사료 급여는 난중을 증가시키고, 혈액 내 코르티코스테론, 글루코스, 크레아티닌, 중성지방 함량 및 산란계의 공격성을 감소시켰다[68,69]. 따라서, 알지닌은 고온 스트레스에 노출된 가금류의 생산성 및 면역력을 향상시키고 스트레스 호르몬을 감소시키는데 이용할 수 있다.

트레오닌은 가금류의 체내에서 거의 합성할 수 없는 제3 아미노산으로, 단백질, 뮤신, 면역글로불린 등을 합성한다[70,71]. 트레오닌은 뮤신 아미노산의 최대 11%를 구성하고 있으며, 뮤신은 트레오닌, 세린, 시스테인 같은 여러 아미노산과 단백질로 이루어져 있다[72]. 점막의 생성 및 유지 능력은 장 건강에 영향을 미치기 때문에 가금류의 트레오닌 섭취는 매우 중요하다. 육계 및 산란계 사료 내 트레오닌 첨가는 증체량, 산란율, 용모 높이 및 뉴캐슬병 항체가를 증가시키고, 사료요구율이 감소시켰다[73-76]. 고온 스트레스에 노출된 육계에게 트레오닌 첨가 사료 급여는 체중, 증체량, 용모 높이 및 뉴캐슬병 항체가가 증가하고, 사료요구율, 폐사율 및 heterophil: lymphocyte ratio(H:L ratio)를 개선하였다[70,77-80]. 고온 스트레스 조건에서 트레오닌 첨가 사료를 급여한 산란계에서는 산란율과 면역글로불린 및 간과 혈장내 SOD가 증가하며, 생산성이 개선되었다는 연구결과가 있다[81,82]. 그러므로 트레오닌의 긍정적인 효과들은 고온 스트레스에 노출된 가금류의 생산성, 장 건강, 면역력 및 항산화 능력을 향상시켜 고온 스트레스를 감소시킬 수 있다.

비타민

비타민 C는 가금류에서 합성될 수 있는 중요한 항산화제로, 산화된 분자에 전자를 공여하여 대사작용에 중요한 역할을 한다[83]. 비타민 C는 백혈구 생성 과정에 관련되어 있기 때문에 가금류의 면역력을 증가시킬 수 있다[84]. 그러나 고온 스트레스를 포함한 여러 악조건은 가금류의 비타민 C 합성을 감소시키고 이용률을 감소시킬 수 있다고 보고되었다[85,86]. 육계 및 산란계 사료 내 비타민 C 첨가는 체중, 단백질 및 지질소화율, 도체 품질 및 골격을 향상시키고 난중 및 산란율을 증가시켰다[87,88]. 고온 스트레스에 노출된 육계에게 비타민 C 첨가 사료를 급여하였을 때, 체중 및 사료요구율이 개선되고, 장기 무게, 용모 높이, 열충격단백질 70(Heat shock protein 70, HSP70), SOD 및 면역글로불린 함량이 증가하였다[89,90]. 고온 스트레스에 노출된 산란계에게 비타민 C 첨가 사료 급여는 산란량 및 생존율이 증가하고 난황색이 진해졌으며, 혈청내 칼슘의 농도가 향상되었다[91,92]. 따라서, 가금류의 비타민 C의 보충은 생산성, 장 건강, 면역력 및 항산화 능력을 향상시켜 고온 스트레스로 인한 피해를 저감시킬 수 있다.

비타민 E는 동물들에게 중요한 항산화제로 작용한다. 가금류는 체내 비타민 E 합성을 못하기 때문에 외부로부터 섭취해야 한다. 비타민 E는 단백질 키나제 C의 활동을 조절하고 민무늬근의 성장과 생산을 조절한다[93]. 또한, 림프구와 과립세포를 산화로부터 보호하고, 면역세포의 증식 및 기능을 향상시킨다[94]. 육계 및 산란계에게 비타민 E 첨가 사료를 급여하였을 때, 증체량, 산란율, 보수력, 뉴캐슬병 항체가 및 F-낭 무게가 증가하였고, 사료섭취량 및 복부지방 무게가

감소하였다[95-97]. 비타민 E를 첨가한 사료는 고온 스트레스에 노출된 육계의 체중, 도체율 및 용모 높이를 증가시키고, 사료요구율 및 간의 지방산패도를 감소시켰다[98-100]. 고온 스트레스에 노출된 산란계에게 비타민 E를 첨가한 사료의 급이는 산란계의 난관 및 난포 무게, 난중 및 갑상선 호르몬 분비량을 증가시켰다[92,101]. 그러므로 비타민 E는 고온 스트레스에 노출된 가금류의 생산성, 장 건강 및 면역력 능력을 향상시키는 데 사용할 수 있다.

미네랄

아연은 정상적인 성장, 뼈 발달, 깃털 형성 피부 질, 면역, 식이 조절 및 에너지 대사, 단백질 분해 및 합성, 핵산 합성 등과 관련된 300개 이상의 효소의 구조와 기능에 필요한 기본 요소이다[102]. 따라서 아연의 결핍은 가금류의 신체에 부정적인 영향을 끼칠 수 있다[103]. 고온 스트레스를 받은 가금류는 아연 요구량이 증가하게 되며, 사료 내 아연을 첨가 및 급이를 통해 증가한 아연 요구량을 대처할 수 있다[104]. 고온 스트레스에 노출된 육계에게 아연 첨가 사료를 급이할 경우 증체량 및 사료섭취량이 증가하고, 사료요구율이 개선되었다[105]. 또한 면역과 관련된 비장, 흉선 및 F-낭의 무게가 증가하였으며, 림프샘의 무게도 증가한 연구 결과가 보고되었다[106]. 고온 환경에서의 육계에게 아연 첨가 사료 급이는 분뇨내 질소 함량을 크게 감소시켰으며, 생산성에 부정적인 영향을 미치지 않는다고 보고하였다[107]. 고온 스트레스로 인하여 발생하는 체장 손상은 사료 내 아연 첨가를 통해 보호할 수 있으며, 체장의 기능을 도와 영양소 소화율을 향상시킬 수 있다[108]. 그러나 사료 내 아연을 다량으로 첨가하게 되면 분뇨로 배설되어 환경 오염을 유발할 수 있다[109]. 특히 산화아연 등의 기존 아연 공급원은 생체이용률이 낮아 사료 내 고용량으로 급여해야 효과가 있으며, 체내에 흡수되지 않은 아연은 대부분 분뇨로 배설되어 토양 및 수질 오염을 유발한다. 하지만 나노입자 산화아연은 높은 생체이용률을 가지고 있어 적은 양으로도 아연 요구량을 충족할 수 있다[109]. 나노입자 산화아연은 고용량 기존 아연 공급원의 문제점인 환경오염을 줄이면서도, 성장 촉진 및 면역 증진 등의 목적을 저용량으로 달성할 수 있는 지속 가능한 아연 공급원이다[110]. 따라서 생체 이용성이 높은 나노입자 산화아연(ZnONPs) 또는 아연-메티오닌이 기존 아연 공급원의 좋은 대안이 된다[110]. 이전 연구들에 따르면 육계 사료에 나노입자 산화아연을 첨가하여 고온 스트레스에 의해 감소한 생산성과 사료요구율을 개선할 수 있다고 보고했다[111,112]. 또한 아연-메티오닌 첨가 사료를 고온 스트레스 환경의 산란계에게 급이할 경우 난각 무게 및 품질이 증가하는 것으로 나타났다[113]. 따라서, 아연의 긍정적인 효과들은 고온 스트레스에 노출된 가금류의 생산성 및 면역력을 향상시킨 것으로 사료된다.

크롬은 영양소 대사 과정에 관여하며, 인슐린 신호 전달 작용을 하는 크로모듈린의 필수 구성 요소이다[114]. 또한 크롬은 고온 스트레스로 인한 지질 과산화를 방지하는 강력한 항산화 활성작용을 하기 때문에 가금류에게 필요한 주요 미네랄 중 하나이다[115]. 가금류에 대한 정확히 확립된 크롬 요구량은 부족하지만, 크롬 첨가 사료를 급이한 육계와 산란계에 대한 연구에서 생산성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 현재는 무기 크롬의 형태보다 독성이 낮고 생체 이용률이 높은 유기 크롬 화합물을 많이 사용하며[116], Bahrami et al.은 사료 내 크롬 첨가는 고온 스트레스를 받는 육계 병아리의 코르티코스테론 수치를 감소시킨다고 보고하였다[117]. 또한 크롬은 육계의 생산성 및 닭가슴살 품질을 향상시킨다는 연구결과가 있다[118]. 고온 스트레스를 받는 산란계에게 크롬 첨가 사료를 급이할 경우 난황색 개선, 난각 강도 및 혈청내 칼슘 농도가 증가하였다[119]. 따라서, 가금류의 크롬 보충은 생산성을 개선하고 스트레스를 감소시킬 수 있다.

셀레늄은 가금류에서 다양한 생물학적 기능을 담당하는 필수 미량 원소이다[120]. 셀레늄은

글루타치온 퍼옥시다제(GSH-Px)를 포함한 30가지의 셀레늄함유단백질의 필수성분으로, GSH-Px는 스트레스 조건에서 ROS종으로부터 세포를 보호한다[121,122]. 고온 스트레스에 노출된 육계에게 셀레늄을 첨가한 사료의 급이는 육계의 체중, 면역글로블린, IL-2 및 IL-6를 증가시키고, 사료요구율, 지방산패도, 혈장내 중성지방 및 콜레스테롤 농도를 감소시켰다[123,124]. 사료 내 셀레늄 첨가는 고온 스트레스에 노출된 산란계의 산란율, 백혈구, T림프구 및 B림프구 수를 증가시키고, 지방산패도 및 코르티코스테론을 감소시켰다[125]. 그러므로 셀레늄은 고온 스트레스에 노출된 가금류의 생산성 및 면역력을 향상시키는 데 이용할 수 있다.

허브

허브는 약용 및 방향성 특성으로 인해 가치가 높은 식물 부분으로 뿌리, 줄기, 구근, 나무껍질 등으로 분류된다[126]. 허브는 풍미, 맛, 분류학 또는 해당 식물의 일부에 따라 다양한 그룹으로 분류될 수 있다.

생강 뿌리에는 진저올, 쇼가올, 징기베렌 등의 활성 화학 성분이 포함되어 있어 소화불량, 항염증, 항산화, 진정 및 항균 효과가 있다[127]. 사료 내 생강 뿌리를 가루 형태와 오일 형태로 첨가하였을 때, 고온 스트레스에 노출된 육계의 총항산화능이 증가하였고, 지질과산화 수치가 감소하였다[128]. 따라서, 생강 뿌리는 고온 스트레스에 노출된 육계의 항산화 능력을 개선시키는데 사용할 수 있다.

개사철쭉은 일년생 잡초식물로 전 세계적으로 많은 나라에 분포되어 있다[129]. 개사철쭉은 아르테미시닌이 함유되어 있어 가금류에서 항기생충 및 항록시듬제로 사용된다[130]. 최근 육계 사료에 공급되는 개사철쭉은 플라보노이드 및 페놀릭과 같은 항산화 화합물이 많이 함유되어 있어 항산화 능력 및 면역 기능을 향상시킬 수 있다[131-133]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 개사철쭉을 첨가하였을 때, 증체량, 사료섭취량, 용모 높이:음와 깊이 비율, 총항산화능, 공장의 리파제 및 트립신 활성, Nrf2 및 ZO-1 이 증가하였고, IL-6, IL-10, IL-1 β , IFN- γ , HSP 70 및 MDA가 감소하였다[134,135]. 그러므로 개사철쭉의 긍정적인 효과들은 고온 스트레스에 노출된 육계의 생산성, 항산화 능력 및 장건강을 향상시켜 고온 스트레스를 저감시킬 수 있다.

시트룰러스 콜로신티스는 사막에서 자라는 일년생 식물로, 과육, 종자, 잎, 뿌리 등 모두 약용 특성을 가지고 있다[136]. 시트룰러스 콜로신티스는 당뇨병 위험을 줄이고 항암, 항산화, 항균 및 항염증 효과가 있다[136-139]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 시트룰러스 콜로신티스 씨앗을 첨가하였을 때, 증체량 및 총항산화능이 증가하였고, 사료요구율, 코르티코스테론, MDA, H:L ratio, HSP70, 아스파테이트 아미노전이효소(aspartate aminotransferase, AST) 및 알라닌 아미노전달효소(alanine aminotransferase, ALT)가 감소하였다[140]. 따라서, 육계의 시트룰러스 콜로신티스의 첨가는 생산성, 항산화 능력 증진 및 스트레스를 줄일 수 있다.

두충은 잎과 나무껍질에서 리그난, 이리도이드, 페놀, 스테로이드, 플라보노이드 등 약 112종의 화합물이 함유되어 있다[141]. 두충에는 주요 생체 활성 성분 중 하나로 간주되는 수용성 페놀 화합물인 클로로젠산이 많이 함유되어 있다[142]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 두충을 첨가하였을 때, 일당증체량, SOD, Nrf2, catalase(CAT) 및 가슴살 내 polyunsaturated fatty acid:saturated fatty acid(PUFA:SFA) 비율이 증가하였고 사료요구율, 육즙 손실, 조리 손실 및 MDA가 감소하였다[143]. 따라서, 두충은 고온 스트레스에 노출된 육계의 육질 및 항산화능력을 개선시킬 수 있다.

노니는 인도 뽕나무라고도 불리며, 식물성화학물질과 항산화 물질을 풍부하게 함유하고 있어 상처치료, 항산화, 항염증 및 뼈 보호 역할을 한다[144-146]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료

내 노니를 첨가하였을 때, HSP90, HSF 1, HSF 2 및 HSF 4가 감소하였다[147]. 그러므로 노니의 긍정적인 효과들은 육계의 고온 스트레스를 감소시킬 수 있다.

식물추출물

식물 추출물은 잎, 과일, 껍질, 씨앗, 꽃, 뿌리, 나무껍질 등에서 추출된 물질을 말한다. 각 추출물에는 수백 가지의 서로 다른 화학 물질이 포함될 수 있고, 복잡한 혼합물 내에서 개별 화학 물질은 비슷한 농도에서도 분리했을 때에도 다양한 특성을 가질 수 있다[148]. 커큐민은 천연 색소로써 심황에서 추출되며, 강한 항산화작용을 한다[149,150]. ROS 소거를 통해 세포 소기관의 안정성을 유지하는 지질 과산화 과정에 대한 보호 효과로 항염증, 항산화 및 항균 반응이 나타난다[151-154]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 커큐민을 첨가하였을 때, 일당 사료섭취량, 가슴살, GSH-Px 및 Nrf2가 증가하였고, 사료요구율, 복부 지방, ROS, 코르티코스테론, MDA 및 HSP70이 감소하였다[155-157]. 고온 스트레스에 노출된 산란계에게 커큐민을 급이하였을 때 산란율, 난각 두께, 난각 강도, 난백 높이, GSH-Px, IgA, IgM 및 IgG가 증가하였고, 사료요구율 및 코르티코스테론이 감소하였다[158]. 그러므로 커큐민은 고온 스트레스에 노출된 육계의 생산성, 항산화 능력 및 면역력을 향상시킬 수 있다.

올리브 나무는 오일, 과일 및 잎에 페놀릭 물질 및 파이토케미컬이 다량 함유되어 있는 것으로 알려져 있으며[159], 올레우로페인, 아글리론, 하이드록시티로솔 및 티로솔의 항산화 분자 성분으로 산화작용을 방지한다[160,161]. 사료 내 올리브 잎 추출물의 첨가는 고온 스트레스에 노출된 육계의 에너지, 회분, 칼슘, 인 소화율 및 GSH-Px가 증가하였고, 혈액 내 콜레스테롤, 요산, 중성지방 및 MDA가 감소하였다[162]. 따라서, 육계의 올리브 잎 추출물 급이는 생산성, 소화율 및 항산화 능력을 향상시킬 수 있다.

페퍼민트는 방부제, 진정제, 소화제, 항균제 및 가벼운 강장제 역할을 한다[163,164]. 또한, 유제놀, 카페익산, 로즈마린산, 플라보노이드 및 알파-토코페롤이 함유되어 있어 항산화 작용 및 항암제 효과를 기대할 수 있다[165,166]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 페퍼민트 알코올 추출물을 첨가하였을 때 혈액 내 총단백질 함량, high density lipoprotein(HDL) 농도 및 F-당의 무게가 증가하였으며, 사료요구율, 콜레스테롤 및 low protein lipoprotein(LDL)이 감소하였다[167]. 페퍼민트 추출물의 긍정적인 효과들은 고온 스트레스에 노출된 육계의 생산성 및 항산화 능력을 증가시킬 수 있다.

포도는 플라보노이드와 폴리페놀의 공급원이며, 플라보노이드는 대부분 소장에서 쉽게 흡수되고, 나머지는 결장에서 페놀산으로 대사된다[168]. 이전 연구에서 포도씨 추출물이 육계의 장내 *Clostridium*과 같은 잠재적 병원성 박테리아의 수를 감소시키고 장내구균(*Enterococcus*)과 같은 유익한 박테리아 수를 증가시킨다고 보고되었다[169]. 또한, 콕시듐증 원충에 감염된 육계의 체중을 개선하고 항산화 능력을 향상시킬 수 있다[170]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 포도씨 추출물을 첨가하였을 때, 증체량, 사료섭취량 및 뉴캐슬병 바이러스에 대한 항체 수치가 증가하였고, 사료요구율 및 MDA가 감소하였다[171]. 껍질과 씨앗에서 추출한 포도 찌꺼기 가루는 단백질, 지질, 탄수화물과 비타민 및 페놀 화합물과 함께 ROS중에 대한 항산화 활성을 가져 항종양, 노화 방지, 항균 및 항염증 역할을 한다[172-174]. 그러므로 육계 사료 내 포도 첨가는 고온 스트레스에 노출된 육계의 생산성, 항산화 능력 향상 및 질병 발생율을 감소시킬 것으로 판단된다.

폴리페놀

식물에는 자연적으로 폴리페놀이 함유되어 있으며, 이 화합물은 매우 다양하고 복잡한 구조

를 가지고 있으며, 페놀 고리의 강도에 따라 페놀산, 플라보노이드, 리그난 등으로 나뉜다. 식물성 식품에서 생물학적 활성을 가진 폴리페놀은 인간의 건강을 보호하는데 관여하는 식물화학물질로써 작용한다[175].

레스베라트롤은 자연에서 얻을 수 있는 폴리페놀이며 강한 항산화 작용을 하고 항염증, 노화 방지, 비만 방지 및 항암제 역할을 한다[176,177]. 육계에게 레스베라트롤 첨가 사료 급여는 고온 스트레스 저감, 면역 및 염증 반응을 활성화할 수 있다[178]. 고온 스트레스에 노출된 육계에게 사료 내 레스베라트롤을 첨가하였을 때, 사료섭취량, 증체량, 면역 기관 무게, 용모 높이:음와 깊이 비율, GSH-Px, 총항산화능, claudin-1 및 Occludin이 증가하였고, 사료요구율, MDA, ALT, AST 및 코르티코스테론이 감소하였다[179–182]. 따라서, 레스베라트롤의 긍정적인 효과들은 고온 스트레스에 노출된 육계의 생산성, 면역력, 장 건강을 향상시키고 스트레스를 줄일 수 있다.

엘라그산은 과일, 야채, 견과류 등에 함유된 폴리페놀의 일종으로 산화적 손상, 염증, 병원체 감염 등을 방지하는 역할을 한다. 고온 환경에 노출된 육계에게 엘라그산을 사료에 첨가하였을 때, 체중, ZO-1, claudin-1, SOD, GSH-Px, CAT 및 장내 락토바실러스가 증가하였고, 혈액

내 코르티코스테론, LPS, 디아민 산화효소 및 MDA가 감소하였다[183]. 따라서, 엘라그산은 고온 스트레스에 노출된 육계의 생산성, 항산화 능력, 장 건강을 및 스트레스를 개선시킬 수 있다.

플로레틴은 사과, 배 및 복숭아 등 과일, 잎, 나무 및 채소에서 추출되는 플라보노이드의 한 종류이다[184,185]. 플로레틴은 항산화, 저혈당, 혈관 보호, 면역력 향상, 항종양 등 많은 기능을 한다[186–188]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 플로레틴을 첨가하였을 때, 증체량, GSH-Px, Nrf2 및 총항산화능이 증가하였고, 사료요구율, MDA 및 HSP70이 감소하였다[189]. 따라서, 플로레틴의 긍정적인 효과들은 고온 스트레스에 노출된 육계의 생산성 및 상산화 능력을 증진시킬 수 있다.

비타민

비타민은 수소와 탄소로 이루어진 탄화수소이며, 글라이신 아미노산의 아미노기를 통해 결합된 3개의 메틸기가 부착된 아미드기를 포함한다. 비타민은 다수의 식물 및 동물로부터 합성되거나 자연적으로 발생한다[190]. 비타민 첨가 사료를 섭취한 육계는 고온 스트레스 환경에서 체중과 사료섭취량이 향상되었으며, 육계의 체온이 감소하였다[191,192]. 또한, 육계 사료 내 비타민 첨가는 고온 스트레스에 노출된 육계의 일당증체량, 사료섭취량, 도체 중량, SOD, GSH-Px, 닭가슴살의 수분 함량 및 용모 높이를 증가시켰으며, 코르티코스테론, H:L ratio, IL-1 β 및 HSP70 수치를 감소시켰다[193–197]. 고온 스트레스 환경에서 산란계 사료 내 비타민을 첨가하였을 때, 체중, 생존율, 산란량, 사료섭취량, 조단백질 소화율이 증가하였고, 사료요구율이 감소하였다[92]. 따라서, 가금류 사료 내 비타민의 첨가는 생산성, 항산화 능력을 증진시키고 스트레스를 저감시켜 고온 스트레스를 줄일 수 있다.

바이오틱스

프로바이오틱스는 육계의 장 건강 및 고온 스트레스 상황에서 생산성을 촉진시킬 수 있으며, *Bacillus subtilis*는 가금류를 포함한 농장 동물을 위한 상업용 프로바이오틱스 제품에 사용되는 일반적인 박테리아 종이다[8,198–201]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 *B. subtilis* 첨가하였을 때, 체중, 증체량, 도체 중량, 가슴살, 허벅지살, 용모 높이 및 유익균(*Lactobacillus*, *Bifidobacterium*)이 증가하였으며, 사료요구율, 폐사율, 콜레스테롤, 복부지방 및 유해균(*Clostridium*, *Coliforms*)이

감소하였다[202,203]. 고온 스트레스에 노출된 산란계에게 프로바이오틱스(*Enterococcus faecium* 및 *B. subtilis*) 첨가 사료 급이는 산란율, 난각 두께, 난각 강도, 난백 높이 및 occludin, ZO-1이 증가시키고, 장내 *Escherichia coli* 및 간 내 HSP이 감소시켰다[204].

키토산 올리고사카라이드는 기능성 올리고당으로 글루코사민의 천연 알칼리성 중합체로서 키토산의 화학적 및 효소적 가수분해로 얻을 수 있으며, 축산에서 항생제 대안으로 사용되는 프리바이오틱스이다[205,206]. 여러 환경에서 육계에게 사료 내 키토산 올리고사카라이드 첨가는 생산성, 항산화 작용, 장 형태학, 장벽 기능 및 면역을 향상시켰다[207,208]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 키토산 올리고사카라이드를 첨가하였을 때, 일당증체량, 흉선, F-낭, 간 무게, 근육 내 글리코겐 함량, GSH-Px 함량 및 응모 높이가 증가하였고, 코르티코스테론, ALT, 조리 손실 및 MDA가 감소하였다[209,210]. 따라서, 고온 스트레스에 노출된 가금류에게 프로바이오틱스 및 프리바이오틱스 첨가 사료 급이는 생산성, 면역력, 장 건강, 항산화 능력을 개선시켜 스트레스를 감소시킬 수 있다.

남조류

남조류는 지속가능한 에너지원으로 전 세계적으로 상업적 이용이 가능하다. 남조류는 단백질(65%), 탄수화물(25%), 필수 지방산(18%), 비타민 및 미네랄 등이 풍부할 뿐만 아니라 베타-카로틴, 페놀산, 플라보노이드, 알칼로이드 및 탄닌 등 기능성 생리활성 화합물 또한 풍부하여 인간 및 동물의 건강과 관련되어 ROS 제거 및 병원성 세균 억제 등과 같은 역할을 한다[211-215]. 고온 스트레스 환경에서 육계 사료 내 남조류의 첨가는 일당증체량, 도체중 및 닭가슴살 무게, 체중, 헤모글로빈 수, HDL, 총항산화능, 응모 높이, SOD 및 글루타치온 농도를 향상시키고 사료요구율, MDA, 콜레스테롤 및 코르티코스테론을 감소시켰으며, 장내 미생물 균총을 개선시켰다[216-218]. 그러므로 고온 스트레스 환경에서 사료 내 남조류의 첨가는 육계의 생산성, 장 건강, 항산화 능력을 향상시키고, 스트레스를 저감시킬 수 있다.

급수 관리 방법에 따른 가금류의 고온 스트레스 저감

가금류는 고온 스트레스 상황에서 효과적인 체온 관리를 위해 호흡기를 통한 높은 수분 손실을 유도한다. 효율적인 체온관리를 달성하기 위해 증발냉각을 통해 체온 항상성을 유지한다[219]. 고온 스트레스 상황에서 심각한 수분 손실은 가금류의 체온 조절 균형에 현저한 변화를 야기하며 폐사까지 초래할 수 있다[219]. 물은 다른 동물에 비해 가금류의 온도 조절에 더 중요하며, 특히 고온 조건에서 더 중요하다[220].

급수 형태

물의 중요성을 고려하여 가금 산업에서는 물 활용의 효율성을 극대화하기 위해 노력해왔다. 가금류가 일반적으로 사용하는 급수기는 니플형 급수기와 종형 급수기가 있다. 고온 스트레스 환경에서 육계는 급수기 사용빈도가 니플형이 종형보다 약 3배 높았던 반면, 총 음수량은 종형이 니플형보다 10배 높아, 결과적으로 급수기 사용빈도에 따른 총 음수량은 종형이 니플형보다 약 40배 높았다[220]. 니플형 급수기의 경우, 육계는 음수를 하기 위해 일어나 있어야 하는데 고온 스트레스 상황에서는 가금류가 이 행동을 비교적 힘들어하여 종형 급수기에 비해 음수량이 낮은 것으로 판단된다[220]. 또한, 컵형과 종형 급수기를 비교하였을 때, 사료섭취량 및 음수량이 종형에서 더 높은 결과를 나타냈다[221].

음수 온도

고온 스트레스 환경에서 육계에게 시원한 물에서 있도록 하거나 따뜻한 음수를 피하는 것과 같은 노력들이 고온 스트레스를 상쇄시키기 위해 제안되어 왔다[222]. 일반적으로 가금류는 고온 환경에서 음수량은 증가하게 되지만, 음수의 온도가 상승하게 되면 음수량 저하 및 생산성에 심각한 영향을 미친다[223]. 따라서, 음수의 온도를 감소시키면 음수의 온도와 체온의 차이가 커짐에 따라 열 방출이 용이해져 냉음수 섭취는 가금류의 고온 스트레스를 완화시킨다[224]. Fox는 고온 스트레스 환경에서 냉음수를 공급한 육계는 폐사율이 감소되었다고 보고하였다[225]. Harris et al.은 육계에게 17.8°C–40.6°C 범위의 음수를 나누어 공급했는데, 40.6°C의 음수를 섭취한 육계는 사료섭취량 및 증체량이 감소하였다[226]. 고온 스트레스에 노출된 산란계에게 냉음수를 공급하였을 때, 산란율, 난중, 사료섭취량, 산란양, 난백 높이, 호우유닛, 난각 강도, 난각 두께 및 HDL이 증가하였고, 혈액 내 트리글리세라이드 및 콜레스테롤이 감소하였다[227].

음수 내 첨가물질

가금류는 비타민 C를 체내에서 합성하는 능력이 있지만, 스트레스 환경에서는 적용되지 않는다. 따라서, 고온 스트레스 환경에 노출된 가금류에서 비타민 C의 급이는 체온과 혈액 내 코르티코스테론 함량을 조절하는 효과가 있으며 ROS를 억제하는 제1방어선으로 항산화제 역할을 한다[228–230]. 고온 스트레스 상황에서 음수 내 비타민 C를 150 mg을 첨가하였을 때, 대조구에 비해 4주 및 6주령 육계의 체온이 약 1°C 감소하였다[231]. 또한, 비타민 C가 풍부한 레몬즙을 음수 내 첨가하였을 때, 혈액 내 트리글리세라이드가 감소하였다[232]. *Satureja kbuzistanica*는 페놀릭 식물로, 항산화 및 항균 효과가 있다[233]. 고온 스트레스 환경에서 음수 내 *S. kbuzistanica* extract oil을 300 또는 500 mg/L 첨가하였을 때 육계의 증체량이 증가하였다[234].

고온 스트레스로 인하여 혈중 이산화탄소 농도가 감소한 닭에게 이산화탄소를 보충하기 위해 고온 스트레스에 노출된 육계에게 탄산수를 급수한 연구에서는 탄산수가 육계의 생산성 및 사료 요구율이 개선되었다고 보고하였다[235,236]. 이온을 보충하기 위해 고온 스트레스에 노출된 산란계의 이온수 급수는 산란율, 난중, 사료섭취량, 산란양, 난백 높이, 호우유닛, 난각 두께 및 HDL을 증가시켰다[227]. 고온 스트레스 환경에서 육계의 음수 내 올리브 잎 추출물을 5 또는 15 mL/L 첨가한 실험에서는 육계의 무게, 증체량, 사료섭취량 및 SOD가 증가하고 사료요구율 및 MDA가 감소하였다[237].

사육 시설 및 환경 관리에 따른 가금류의 고온 스트레스 저감

사료 급이

사료 제한 및 습식 사료와 같은 급이 방식은 가금류의 고온 스트레스를 완화할 수 있다고 보고되었다[15]. Saeed et al.에 따르면 고온에 노출된 닭에게 제한 사료 급이는 열 생산량을 줄이고 폐사율을 줄일 수 있다고 보고하였다[238]. 또한, 제한 사료 급이는 영양소 소화, 흡수 및 대사와 같은 열 발생을 감소시켜 고온에 노출된 닭의 경우 온도에 의한 영향을 완화할 수 있다고 시사하였다[239]. 이전 연구 결과에 따르면 사료 제한 환경에 노출된 산란계는 사료섭취량, 체중, 산란율이 증가하였으며, 음수 섭취량이 감소하였다[240].

고온에 노출된 육계에게 펠렛 형태의 사료를 급이하였을 때, 섭취 시간과 에너지를 소비가 감소하여 가루 사료에 비해 스트레스가 완화되었다[241].

습식사료 또한 고온 스트레스 저감에 도움이 될 수 있다. Kutlu는 습식 사료 급이 시 고온에 노출된 육계의 증체량, 사료섭취량 및 도체중이 향상했다고 보고하였다[242]. 다른 연구에서도 습식 사료 급이는 육계의 체중, 일당증체량이 향상시키고 추가적인 수분 섭취를 도와주며, 이는 육계의 호흡과정에서 증발하여 체내 열 감소에 도움을 줄 수 있다고 시사하였다[243,244].

쿨링 시스템

닭은 땀샘이 없어 체온조절이 어려운 가축이기 때문에 사육온도는 중요한 환경적 요인 중 하나이다[245]. 농장에서는 가금류의 체온을 낮추기 위해 팬-증발냉각패드, 안개분무시스템, 스프링클러, 냉각햇대와 같은 쿨링 시스템을 적용하여 계사 및 닭의 체온을 줄이고 있다.

팬-증발냉각패드는 팬과 증발냉각패드를 혼합한 시스템이다. 패드를 통해 유입된 외기가 빠르게 흘러갈 수 있도록 패드와 팬을 같이 사용한다[246]. 증발냉각패드를 육계사에 적용하였을 때 일당증체량, 생체중 및 사료섭취량이 증가하였으며, 사료요구율이 개선되었다고 보고되었다[247]. 산란계사의 경우 증발냉각패드 활용이 산란계의 스트레스를 완화시켰으며[248], Vipin et al.은 쿨링패드를 계사에 적용 시 사료섭취량 증가 및 혈떡거림이 감소했다고 보고하였다[249].

안개분무시스템은 노즐을 이용하여 계사에 온도 저감 효과를 불러일으키는 시스템이다. 안개분무시스템을 계사에 적용 시 가금류의 사료섭취량이 증가하고 혈떡거림이 감소하였다[249]. 또한 Kamel et al.은 가금류의 증체량 및 사료섭취량 증가와 사료요구율 및 체온 감소에 효과적이라고 시사하였다[250]. 안개분무시스템을 팬-증발냉각패드를 비교했을 때 안개분무시스템이 계사의 온도를 저감시키는데 더욱 효과가 있다는 연구결과가 보고되었다[251].

스프링클러는 안개분무시스템과 달리, 닭의 체표에 직접 물을 분사하여 체온을 낮추는 시스템이다. 스프링클러는 안개분무시스템에 비해 물을 적게 사용할 수 있으며, 계사에 스프링클러 적용 시 심부 온도 및 HSP70이 감소하고 증체량 및 사료섭취량이 증가하는 효과가 나타났다[252,253].

고온 환경에서 냉각햇대를 육계사에 적용했을 때, Fidan et al.은 육계의 체중이 증가한다고 보고하였다[254]. 또한, 다른 연구에서는 냉각햇대의 사용이 육계의 증체량 및 사료요구율을 개선했으며, 허벅지살 증가, 복부지방 감소 및 혈떡거림을 감소시켰다고 보고하였다[255,256]. 산란계사는 냉각햇대 설치가 HSP70 발현 및 산란계의 직장 온도를 감소시키고 산란율을 향상시켰다[257,258].

환기시스템

환기시스템을 계사에 적용하면 개방식 환기에 비해 육계의 체중, 일당증체량 및 사료섭취량이 증가하는 효과가 있다고 보고되었다[259]. 터널환기방식은 공기 속도를 증가시켜 강한 풍속으로 사육시설의 공기를 순환시키는 시스템이다. 터널환기식 계사는 일반적으로 120 m/min의 공기 속도로 운영된다[260]. 몇몇 연구에서 터널환기식 계사는 육계의 체중이 증가했다고 시사하였다[260,261]. 또한, 개방형과 달리 터널환기방식은 계사의 온도 및 습도가 저감되고 성장성에 긍정적인 영향을 주었다고 보고하였다[262].

여름철 계사에 과도하게 집적된 열 에너지를 효과적으로 제거하기 위해 증발냉각패드와 환기 터널환기방식을 같이 사용하는 경우가 많다[246]. 두 개의 시스템을 같이 사용하게 되면 냉각 공기의 분포가 크게 일어나 계사 내의 온도가 개선되는 효과를 가질 수 있기 때문이다[263].

이처럼 환기 시스템은 고온기 축사 환경에 효과적이거나, 제대로 구축되어 있지 않으면 오히려 온도 감소의 효과가 없기에 먼지 제거 및 보수 작업이 필요한 실정이다[246].

스마트팜 기술

축사 내에서의 온도를 저감하기 위한 방법으로 쿨링 시스템인 팬-증발냉각패드, 안개분무시스템, 스프링클러, 냉각패드와 먼지 및 암모니아 제거를 위한 환기 방식 등의 시설 및 환경을 통한 방법이 사용되고 있다. 시설 및 환경을 통한 온도 저감은 일시적으로 계사내의 온도가 저감되는 효과를 불러일으키지만 외부 환경에 영향을 많이 받기에 온도 저감이 아닌 상승 및 사고 발생과 같은 악영향을 가져올 수 있다[264]. 이와 같은 부분을 해결하기 위해 최근 새로운 동물 사양 시스템인 ICT(information and communication technology) 기반 스마트 축산이 부상하고 있다[265]. 국내외적으로 스마트팜 시장은 매년 늘어나고 있는 추세이지만, 국내 스마트팜 기술은 선진국에 비해 발전이 느린 상태이다[266]. 현재 국내에서는 1세대 원격 시설 제어, 2세대 정밀관리, 3세대 전주기 지능 및 자동 관리 환경 제어로 스마트팜을 1-3세대로 구분하였다[267].

하지만 가금 분야는 온도 및 습도 조절 등 환경 모니터링, 사료 및 물 공급 원격 제어와 같은 하드웨어 중심의 스마트팜 1세대에 머물러 있는 상황이다[268]. 가금의 생체 정보 및 데이터 기반을 통한 정밀 사양관리인 스마트팜 2세대 시스템 적용을 위해서는 현재 기술력으로는 한계가 있으며, ICT 보급과 종사자 간의 네트워크 형성을 통해 2세대 기술의 상용화가 요구된다[269].

국외에서는 국내와는 달리 기후변화에 대응하기 위해 온도, 습도 및 암모니아 제어 등과 같은 모니터링 시스템에 대한 연구결과 및 개발이 진행이 되고 있는 상황이다[270,271]. 또한, 전파식별 안테나(radio-frequency identification, RFID)를 통한 사료 섭취 행동 데이터 수집, 발성음을 이용한 건강상태 분석, 모이 쪼는 소리를 통한 사료섭취량 분석과 같은 개체별 데이터 분석 및 수집을 이용한 연구가 진행되고 있는 상황이다[272].

국내에서는 기후변화 대응을 위해 국내 농장 환경 및 지역별 여건에 맞춰 가금류의 데이터 수집 및 분석 연구, 데이터를 이용한 ICT 기술, ICT를 응용하기 위한 전문가 양성 및 종사자와의 네트워크 형성이 필요한 실정이다.

결론

지구온난화로 인한 평균 온도는 매년 상승하고 있으며, 이로 인해 고온 스트레스로 인한 가금 산업의 피해는 증가하고 있다. 고온 스트레스는 가금류의 성장 능력을 지연시키고 가금류의 생산성 및 난품질을 저하시켜 경제적인 손실을 불러 일으킨다. 고온 환경에서 가금류는 스스로 체내 열을 감소시키기 위한 행동을 보이지만 지속될 경우 생리적으로 부정적인 영향을 미치게 된다. 또한 체내 산화 스트레스가 발생하여 중요한 체내 대사에 영향을 받아 결국 가금류의 생산성 및 건강을 감소시키는 결과를 초래한다. 따라서, 여름철 고온 스트레스에 노출된 가금류의 스트레스를 저감시키는 방법이 필요하다. 가금류의 스트레스를 저감시킬 수 있는 방법으로 사료 내 기능성 물질 첨가, 급수 방식 및 음수 온도 조절, 여름철 사료 급여 방식, 계사내 다양한 쿨링 및 환기 시스템 및 스마트팜의 적용은 고온 스트레스로 인한 가금류의 피해를 저감시킬 수 있는 기술 및 전략으로 활용할 수 있을 것이다.

REFERENCES

1. Food and Agriculture Organization. 2022 Global food and agriculture statistical yearbook. Rome: ISO; 2022.
2. Mottet A, Tempio G. Global poultry production: current state and future outlook and challenges. *Worlds Poult Sci J.* 2017;73:245-56. <https://doi.org/10.1017/S0043933917000071>

3. Arneth A, Barbosa H, Benton T, Calvin K, Calvo E, Connors S, et al. Summary for policymakers. In: Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva: IPCC; 2019.
4. Rostagno MH. Effects of heat stress on the gut health of poultry. *J Anim Sci.* 2020;98: skaa090. <https://doi.org/10.1093/jas/skaa090>
5. Song DJ, King AJ. Effects of heat stress on broiler meat quality. *Worlds Poult Sci J.* 2015;71:701-9. <https://doi.org/10.1017/S0043933915002421>
6. Wang RH, Liang RR, Lin H, Zhu LX, Zhang YM, Mao YW, et al. Effect of acute heat stress and slaughter processing on poultry meat quality and postmortem carbohydrate metabolism. *Poult Sci.* 2017;96:738-46. <https://doi.org/10.3382/ps/pew329>
7. Lara LJ, Rostagno MH. Impact of heat stress on poultry production. *Animals.* 2013;3: 356-69. <https://doi.org/10.3390/ani3020356>
8. Wang WC, Yan FF, Hu JY, Amen OA, Cheng HW. Supplementation of *Bacillus subtilis*-based probiotic reduces heat stress-related behaviors and inflammatory response in broiler chickens. *J Anim Sci.* 2018;96:1654-66. <https://doi.org/10.1093/jas/sky092>
9. Nichelmann M, Baranyiová E, Goll R, Tzschentke B. Influence of feather cover on heat balance in laying hens (*Gallus domesticus*). *J Therm Biol.* 1986;11:121-6. [https://doi.org/10.1016/0306-4565\(86\)90032-X](https://doi.org/10.1016/0306-4565(86)90032-X)
10. Teeter RG, Smith MO, Owens FN, Arp SC, Sangiah S, Breazile JE. Chronic heat stress and respiratory alkalosis: occurrence and treatment in broiler chicks. *Poult Sci.* 1985;64: 1060-4. <https://doi.org/10.3382/ps.0641060>
11. Renaudeau D, Collin A, Yahav S, de Bascilio V, Gourdiere JL, Collier RJ. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal.* 2012; 6:707-28. <https://doi.org/10.1017/S1751731111002448>
12. Toyomizu M, Tokuda M, Mujahid A, Akiba Y. Progressive alteration to core temperature, respiration and blood acid-base balance in broiler chickens exposed to acute heat stress. *J Poult Sci.* 2005;42:110-8. <https://doi.org/10.2141/jpsa.42.110>
13. Etches RJ, John TM, Gibbins AMV. Behavioural, physiological, neuroendocrine and molecular responses to heat stress. In: Dagher NJ, editor. *Poultry production in hot climates*. Wallingford: CAB International; 2008. p. 48-79.
14. Abbas A, Khan MJ, Naeem M, Ayaz M, Sufyan A, Somro MH. Cation anion balance in avian diet: a review. *Agric Sci Res J.* 2012;2:302-7.
15. Wasti S, Sah N, Mishra B. Impact of heat stress on poultry health and performances, and potential mitigation strategies. *Animals.* 2020;10:1266. <https://doi.org/10.3390/ani10081266>
16. Sandercock DA, Hunter RR, Nute GR, Mitchell MA, Hocking PM. Acute heat stress-induced alterations in blood acid-base status and skeletal muscle membrane integrity in broiler chickens at two ages: implications for meat quality. *Poult Sci.* 2001;80:418-25. <https://doi.org/10.1093/ps/80.4.418>
17. Rath PK, Behura NC, Sahoo SP, Pratikshya Panda PP, Mandal KD, Panigrahi PN. Amelioration of heat stress for poultry welfare: a strategic approach. *Int J Livest Res.* 2015;5:1-9. <https://doi.org/10.5455/ijlr.20150330093915>
18. Mack LA, Felver-Gant JN, Dennis RL, Cheng HW. Genetic variations alter production and behavioral responses following heat stress in 2 strains of laying hens. *Poult Sci.* 2013;92: 285-94. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02589>
19. Part CE, Edwards P, Hajat S, Collins LM. Prevalence rates of health and welfare conditions

- in broiler chickens change with weather in a temperate climate. *R Soc Open Sci.* 2016;3:160197. <https://doi.org/10.1098/rsos.160197>
20. He Y, Maltecca C, Tiezzi F. Potential use of gut microbiota composition as a biomarker of heat stress in monogastric species: a review. *Animals.* 2021;11:1833. <https://doi.org/10.3390/ani11061833>
 21. Holik V. Managing heat stress - part 1 - layers respond to hot climatic conditions poultry world [Internet]. *Poultry World.* 2010 [cited 2024 Mar16]. <https://www.poultryworld.net/poultry/managing-heat-stress-part-1-layers-respond-to-hot-climatic-conditions>
 22. Zepp M, Louton H, Erhard M, Schmidt P, Helmer F, Schwarzer A. The influence of stocking density and enrichment on the occurrence of feather pecking and aggressive pecking behavior in laying hen chicks. *J Vet Behav.* 2018;24:9-18. <https://doi.org/10.1016/j.jveb.2017.12.005>
 23. Li Z, Zheng M, Abdalla BA, Zhang Z, Xu Z, Ye Q, et al. Genome-wide association study of aggressive behaviour in chicken. *Sci Rep.* 2016;6:30981. <https://doi.org/10.1038/srep30981>
 24. Altan Ö, Altan A, Çabuk M, Bayraktar H. Effects of heat stress on some blood parameters in broilers. *Turk J Vet Anim Sci.* 2000;24:145-8.
 25. Borges SA, Fischer da Silva AV, Majorca A, Hooge DM, Cummings KR. Physiological responses of broiler chickens to heat stress and dietary electrolyte balance (sodium plus potassium minus chloride, milliequivalents per kilogram). *Poult Sci.* 2004;83:1551-8. <https://doi.org/10.1093/ps/83.9.1551>
 26. Akbarian A, Michiels J, Degroote J, Majdeddin M, Golian A, De Smet S. Association between heat stress and oxidative stress in poultry: mitochondrial dysfunction and dietary interventions with phytochemicals. *J Anim Sci Biotechnol.* 2016;7:37. <https://doi.org/10.1186/s40104-016-0097-5>
 27. Mujahid A, Pumford NR, Bottje W, Nakagawa K, Miyazawa T, Akiba Y, et al. Mitochondrial oxidative damage in chicken skeletal muscle induced by acute heat stress. *J Poult Sci.* 2007;44:439-45. <https://doi.org/10.2141/jpsa.44.439>
 28. Andersson M, Nordin E, Jensen P. Domestication effects on foraging strategies in fowl. *Appl Anim Behav Sci.* 2001;72:51-62. [https://doi.org/10.1016/S0168-1591\(00\)00195-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1591(00)00195-7)
 29. Kubena LF, Lott BD, Deaton JW, Reece FN, May JD. Body composition of chicks as influenced by environmental temperature and selected dietary factors. *Poult Sci.* 1972;51: 517-22. <https://doi.org/10.3382/ps.0510517>
 30. Yunianto VD, Hayashit K, Kaiwda S, Ohtsuka A, Tomita Y. Effect of environmental temperature on muscle protein turnover and heat production in tube-fed broiler chickens. *Br J Nutr.* 1997;77:897-909. <https://doi.org/10.1079/BJN19970088>
 31. Zaboli G, Huang X, Feng X, Ahn DU. How can heat stress affect chicken meat quality? A review. *Poult Sci.* 2019;98:1551-6. <https://doi.org/10.3382/ps/pey399>
 32. Mashaly MM, Hendricks GL 3rd, Kalama MA, Gehad AE, Abbas AO, Patterson PH. Effect of heat stress on production parameters and immune responses of commercial laying hens. *Poult Sci.* 2004;83:889-94. <https://doi.org/10.1093/ps/83.6.889>
 33. Odom TW, Harrison PC, Bottje WG. Effects of thermal-induced respiratory alkalosis on blood ionized calcium levels in the domestic hen. *Poult Sci.* 1986;65:570-3. <https://doi.org/10.3382/ps.0650570>
 34. Usayran N, Farran MT, Awadallah HH, Al-Hawi IR, Asmar RJ, Ashkarian VM. Effects of added dietary fat and phosphorus on the performance and egg quality of laying hens subjected to a constant high environmental temperature. *Poult Sci.* 2001;80:1695-1701.

- <https://doi.org/10.1093/ps/80.12.1695>
35. Ebeid TA, Suzuki T, Sugiyama T. High ambient temperature influences eggshell quality and calbindin-D28k localization of eggshell gland and all intestinal segments of laying hens. *Poult Sci.* 2012;91:2282-7. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-01898>
 36. Rozenboim I, Tako E, Gal-Garber O, Proudman JA, Uni Z. The effect of heat stress on ovarian function of laying hens. *Poult Sci.* 2007;86:1760-5. <https://doi.org/10.1093/ps/86.8.1760>
 37. Sahin N, Hayirli A, Orhan C, Tuzcu M, Komorowski JR, Sahin K. Effects of the supplemental chromium form on performance and metabolic profile in laying hens exposed to heat stress. *Poult Sci.* 2018;97:1298-305. <https://doi.org/10.3382/ps/pex435>
 38. Temim S, Chagneau AM, Peresson R, Tesseraud S. Chronic heat exposure alters protein turnover of three different skeletal muscles in finishing broiler chickens fed 20 or 25% protein diets. *J Nutr.* 2000;130:813-9. <https://doi.org/10.1093/jn/130.4.813>
 39. Zhang ZY, Jia GQ, Zuo JJ, Zhang Y, Lei J, Ren L, et al. Effects of constant and cyclic heat stress on muscle metabolism and meat quality of broiler breast fillet and thigh meat. *Poult Sci.* 2012;91:2931-7. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02255>
 40. Petracci M, Bianchi M, Cavani C. The European perspective on pale, soft, exudative conditions in poultry. *Poult Sci.* 2009;88:1518-23. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00508>
 41. Woelfel RL, Owens CM, Hirschler EM, Martinez-Dawson R, Sams AR. The characterization and incidence of pale, soft, and exudative broiler meat in a commercial processing plant. *Poult Sci.* 2002;81:579-84. <https://doi.org/10.1093/ps/81.4.579>
 42. Abbas G, Mahmood S, Nawaz H. Effect of dietary inclusion of sodium bicarbonate on blood profile of caged layers during summer. *Pak J Agric Sci.* 2017;54:443-50. <https://doi.org/10.21162/PAKJAS/17.5014>
 43. Quinteiro-Filho WM, Ribeiro A, Ferraz-de-Paula V, Pinheiro ML, Sakai M, Sá LRM, Ferreira AJP, et al. Heat stress impairs performance parameters, induces intestinal injury, and decreases macrophage activity in broiler chickens. *Poult Sci.* 2010;89:1905-14. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00812>
 44. Beckford RC, Ellestad LE, Proszkowiec-Weglarz M, Farley L, Brady K, Angel R, et al. Effects of heat stress on performance, blood chemistry, and hypothalamic and pituitary mRNA expression in broiler chickens. *Poult Sci.* 2020;99:6317-25. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.09.052>
 45. Song J, Xiao K, Ke YL, Jiao LF, Hu CH, Diao QY, et al. Effect of a probiotic mixture on intestinal microflora, morphology, and barrier integrity of broilers subjected to heat stress. *Poult Sci.* 2014;93:581-8. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03455>
 46. Smith AL, Powers C, Beal RK. The avian enteric immune system in health and disease. In: Schat KA, Kaspers B, Kaiser P, editors. *Avian immunology*. London: Academic Press; 2014. p. 227-50.
 47. Wassenaar TM, Zimmermann K. Lipopolysaccharides in food, food supplements, and probiotics: should we be worried? *Eur J Microbiol Immunol.* 2018;8:63-9. <https://doi.org/10.1556/1886.2018.00017>
 48. Tsiouris V, Georgopoulou I, Batzios C, Pappaioannou N, Ducatelle R, Fortomaris P. Heat stress as a predisposing factor for necrotic enteritis in broiler chicks. *Avian Pathol.* 2018; 47:616-24. <https://doi.org/10.1080/03079457.2018.1524574>
 49. Shakeri M, Zulkifli I, Soleimani AF, O'Reilly EL, Eckersall PD, Anna AA, et al. Response to dietary supplementation of L-glutamine and L-glutamate in broiler chickens reared at

- different stocking densities under hot, humid tropical conditions. *Poult Sci.* 2014;93:2700-8. <https://doi.org/10.3382/ps.2014-03910>
50. Sifa D, Bai X, Zhang D, Hu H, Wu X, Wen A, et al. Dietary glutamine improves meat quality, skeletal muscle antioxidant capacity and glutamine metabolism in broilers under acute heat stress. *J Appl Anim Res.* 2018;46:1412-7. <https://doi.org/10.1080/09712119.2018.1520113>
 51. Soltan MA. Influence of dietary glutamine supplementation on growth performance, small intestinal morphology, immune response and some blood parameters of broiler chickens. *Int J Poult Sci.* 2009;8:60-8. <https://doi.org/10.3923/ijps.2009.60.68>
 52. Ayazi M. The effect of dietary glutamine supplementation on performance and blood parameter, carcass characteristics, quality and characteristics meat of broiler chickens under continuous heat stress condition. *Int J Farm Alli Sci.* 2014;3:1234-42.
 53. Dong XY, Yang CF, Tang SQ, Jiang QY, Zou XT. Effect and mechanism of glutamine on productive performance and egg quality of laying hens. *Asian-Australas J Anim Sci.* 2010;23:1049-56. <https://doi.org/10.5713/ajas.2010.90611>
 54. Jazideh F, Farhoomand P, Daneshyar M, Najafi G. The effects of dietary glutamine supplementation on growth performance and intestinal morphology of broiler chickens reared under hot conditions. *Turk J Vet Anim Sci.* 2014;38:264-70. <https://doi.org/10.3906/vet-1210-32>
 55. Hu H, Bai X, Shah AA, Wen AY, Hua JL, Che CY, et al. Dietary supplementation with glutamine and γ -aminobutyric acid improves growth performance and serum parameters in 22- to 35-day-old broilers exposed to hot environment. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 2016;100:361-70. <https://doi.org/10.1111/jpn.12346>
 56. Hu H, Chen L, Dai S, Li J, Bai X. Effect of glutamine on antioxidant capacity and lipid peroxidation in the breast muscle of heat-stressed broilers via antioxidant genes and HSP70 pathway. *Animals.* 2020;10:404. <https://doi.org/10.3390/ani10030404>
 57. Hu H, Dai S, Li J, Wen A, Bai X. Glutamine improves heat stress-induced oxidative damage in the broiler thigh muscle by activating the nuclear factor erythroid 2-related 2/Kelch-like ECH-associated protein 1 signaling pathway. *Poult Sci.* 2020;99:1454-61. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.001>
 58. Wu QJ, Liu N, Wu XH, Wang GY, Lin L. Glutamine alleviates heat stress-induced impairment of intestinal morphology, intestinal inflammatory response, and barrier integrity in broilers. *Poult Sci.* 2018;97:2675-83. <https://doi.org/10.3382/ps/pey123>
 59. Tamir H, Ratner S. Enzymes of arginine metabolism in chicks. *Arch Biochem Biophys.* 1963;102:249-58. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(63\)90178-4](https://doi.org/10.1016/0003-9861(63)90178-4)
 60. Ball Ronald O, Urschel Kristine L, Pencharz Paul B. Nutritional consequences of interspecies differences in arginine and lysine metabolism. *J Nutr.* 2007;137:1626S-41S. <https://doi.org/10.1093/jn/137.6.1626S>
 61. Khajali F, Wideman RF. Dietary arginine: metabolic, environmental, immunological and physiological interrelationships. *Worlds Poult Sci J.* 2010;66:751-66. <https://doi.org/10.1017/S0043933910000711>
 62. Esser AFG, Gonçalves DRM, Rorig A, Cristo AB, Perini R, Fernandes JIM. Effects of guanidionoacetic acid and arginine supplementation to vegetable diets fed to broiler chickens subjected to heat stress before slaughter. *Rev Bras Cienc Avic.* 2017;19:429-36. <http://doi.org/10.1590/1806-9061-2016-0392>
 63. Guo YW, Shi BL, Yan SM, Xu YQ, Li JL, Li TY. Effects of arginine on cytokines and nitric oxide synthesis in broilers. *J Anim Plant Sci.* 2015;25:366-71.
 64. Basoo H, Khajali F, Khoshoui EA, Faraji M, Wideman RF. Re-evaluation of arginine

- requirements for broilers exposed to hypobaric condition during the 3- to 6-week period. *J Poult Sci.* 2012;49:303-7. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0110133>
65. Sirathonpong O, Ruangpanit Y, Songserm O, Koo EJ, Attamangkune S. Determination of the optimum arginine: lysine ratio in broiler diets. *Anim Prod Sci.* 2019;59:1705-10. <https://doi.org/10.1071/AN18049>
 66. Yu J, Yang H, Wang Z, Dai H, Xu L, Ling C. Effects of arginine on the growth performance, hormones, digestive organ development and intestinal morphology in the early growth stage of layer chickens. *Ital J Anim Sci.* 2018;17:1077-82. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2018.1434692>
 67. Brugaletta G, Laghi L, Zampiga M, Oliveri C, Indio V, Piscitelli R, et al. Metabolic and microbiota response to arginine supplementation and cyclic heat stress in broiler chickens. *Front Physiol.* 2023;14:1155324. <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1155324>
 68. Bozakova NA, Sotirov LK, Sasakova N, Veszelits Lacticova K. Welfare improvement in laying hens during the hot period under a semi-open rearing system through dietary arginine and vitamin C supplementation. *Bulg J Vet Med.* 2015;18:216-26. <https://doi.org/10.15547/bjvm.869>
 69. Kwon CH, Nam JH, Han GP, Kim DY, Kil DY. Effect of dietary supplementation of arginine, tryptophan, and taurine on productive performance, egg quality, and health status of laying hens raised under heat stress conditions. *Trop Anim Sci J.* 2023;46:337-46. <https://doi.org/10.5398/tasj.2023.46.3.337>
 70. Ishii T, Shibata K, Kai S, Noguchi K, Hendawy AO, Fujimura S, et al. Dietary supplementation with lysine and threonine modulates the performance and plasma metabolites of broiler chicken. *J Poult Sci.* 2019;56:204-11. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0180104>
 71. Lee DT, Lee JT, Ashworth AJ, Kidd MT, Mauromoustakos A, Rochell SJ. Evaluation of a threonine fermentation product as a digestible threonine source in broilers. *J Appl Poult Res.* 2022;31:100252. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2022.100252>
 72. Gum JR Jr, Hicks JW, Toribara NW, Rothe EM, Lagace RE, Kim YS. The human MUC2 intestinal mucin has cysteine-rich subdomains located both upstream and downstream of its central repetitive region. *J Biol Chem.* 1992;267:21375-83. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)36620-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)36620-7)
 73. Najafi R, Ahmar R, Tazehkand GN. Effect of different dietary threonine levels on optimal growth performance and intestinal morphology in 1–14 days old Ross 308 broilers. *Rev Bras Cienc Avic.* 2017;19:59-66. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2016-0327>
 74. Moghaddam HS, Moghaddam HN, Kermanshahi H, Mosavi AH, Raji A. The effect of threonine on mucin2 gene expression, intestinal histology and performance of broiler chicken. *Ital J Anim Sci.* 2011;10:e14. <https://doi.org/10.4081/ijas.2011.e14>
 75. Eftekhari A, Rezaeipour V, Abdollahpour R. Effects of acidified drinking water on performance, carcass, immune response, jejunum morphology, and microbiota activity of broiler chickens fed diets containing graded levels of threonine. *Livest Sci.* 2015;180:158-63. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.07.010>
 76. Dong XY, Azzam MMM, Zou XT. Effects of dietary threonine supplementation on intestinal barrier function and gut microbiota of laying hens. *Poult Sci.* 2017;96:3654-63. <https://doi.org/10.3382/ps/pex185>
 77. Debnath BC, Biswas P, Roy B. The effects of supplemental threonine on performance, carcass characteristics, immune response and gut health of broilers in subtropics during pre-starter and starter period. *J Anim Physiol Anim Nutr.* 2019;103:29-40. <https://doi.org/10.1111/jpn.12991>

78. Miah MY, Saha S, Koiri N, Mahbub A, Ashraful Islam M, Channarayapatna G. Effects of dietary methionine and threonine on growth performance, carcass traits and blood metabolites of broilers in a hot environment. *Eur Poult Sci.* 2022;86:1-13. <https://doi.org/10.1399/eps.2022.348>
79. Shirzadegan K, Nickkhah I, Jafari MA. Impacts of dietary L-threonine supplementation on performance and intestinal morphology of broiler chickens during summer time. *Iran J Appl Anim Sci.* 2015;5:431-6.
80. Wasman PH. Effect of L-threonine supplementation to diet on some productive and physiological of traits broiler chickens under heat stress conditions. *Diyala Agric Sci J.* 2022;14:47-53. <https://doi.org/10.52951/dasj.22140106>
81. Azzam MMM, Dong XY, Xie P, Wang C, Zou XT. The effect of supplemental L-threonine on laying performance, serum free amino acids, and immune function of laying hens under high-temperature and high-humidity environmental climates. *J Appl Poult Res.* 2011;20:361-70. <https://doi.org/10.3382/japr.2010-00308>
82. Azzam MMM, Dong XY, Xie P, Zou XT. Influence of L-threonine supplementation on goblet cell numbers, histological structure and antioxidant enzyme activities of laying hens reared in a hot and humid climate. *Br Poult Sci.* 2012;53:640-5. <https://doi.org/10.1080/00071668.2012.726707>
83. Khan RU. Antioxidants and poultry semen quality. *Worlds Poult Sci J.* 2011;67:297-308. <https://doi.org/10.1017/S0043933911000316>
84. Ruzic Z, Kanacki Z, Jokanovic M, Vidakovic S, Knezevic S, Jovic S, et al. The influence of vitamin C and early-age thermal conditioning on the quality of meat and specific production characteristics of broilers during heat stress. *Turk J Vet Anim Sci.* 2020;44:314-22. <https://doi.org/10.3906/vet-1905-95>
85. Smith MO, Teeter RG. Potassium balance of the 5 to 8-week-old broiler exposed to constant heat or cycling high temperature stress and the effects of supplemental potassium chloride on body weight gain and feed efficiency. *Poult Sci.* 1987;66:487-92. <https://doi.org/10.3382/ps.0660487>
86. Whitehead CC, Keller T. An update on ascorbic acid in poultry. *Worlds Poult Sci J.* 2003;59:161-84. <https://doi.org/10.1079/WPS20030010>
87. Lohakare JD, Ryu MH, Hahn TW, Lee JK, Chae BJ. Effects of supplemental ascorbic acid on the performance and immunity of commercial broilers. *J Appl Poult Res.* 2005;14:10-9. <https://doi.org/10.1093/japr/14.1.10>
88. Ezenwosu C, Onodugo MO, Enyinnia IJ, Onyimonyi AE. Effect of varying supplementation of vitamin C on the performance and short term egg quality parameters of layer hens. *Asian J Res Rev Agric.* 2022;4:20-6.
89. Gouda A, Amer SA, Gabr S, Tolba SA. Effect of dietary supplemental ascorbic acid and folic acid on the growth performance, redox status, and immune status of broiler chickens under heat stress. *Trop Anim Health Prod.* 2020;52:2987-96. <https://doi.org/10.1007/s11250-020-02316-4>
90. Jahejo AR, Leghari IH, Sethar A, Rao MN, Nisa M, Sethar GH. Effect of heat stress and ascorbic acid on gut morphology of broiler chicken. *Sindh Univ Res J.* 2016;48:829-32.
91. Torki M, Zangeneh S, Habibian M. Performance, egg quality traits, and serum metabolite concentrations of laying hens affected by dietary supplemental chromium picolinate and vitamin C under a heat-stress condition. *Biol Trace Elem Res.* 2014;157:120-9. <https://doi.org/10.1007/s12011-013-9872-8>

92. Attia YA, Abd El-Hamid AEHE, Abedalla AA, Berika MA, Al-Harhi MA, Kucuk O, et al. Laying performance, digestibility and plasma hormones in laying hens exposed to chronic heat stress as affected by betaine, vitamin C, and/or vitamin E supplementation. *SpringerPlus*. 2016;5:1619. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3304-0>
93. Shakeri M, Oskoueian E, Le HH, Shakeri M. Strategies to combat heat stress in broiler chickens: unveiling the roles of selenium, vitamin E and vitamin C. *Vet Sci*. 2020;7:71. <https://doi.org/10.3390/vetsci7020071>
94. Franchini A, Canti M, Manfreda G, Bertuzzi S, Asdrubali G, Franciosi C. Vitamin E as adjuvant in emulsified vaccine for chicks. *Poult Sci*. 1991;70:1709-15. <https://doi.org/10.3382/ps.0701709>
95. Zdanowska-Sąsiadek Ż, Michalczyk M, Damaziak K, Niemiec J, Poławska E, Gozdowski D, et al. Effect of vitamin E supplementation on growth performance and chicken meat quality. *Eur Poult Sci*. 2016;80:1-14. <https://doi.org/10.1399/eps.2016.152>
96. Singh H, Sodhi S, Kaur R. Effects of dietary supplements of selenium, vitamin E or combinations of the two on antibody responses of broilers. *Br Poult Sci*. 2006;47:714-9. <https://doi.org/10.1080/00071660601040079>
97. Skřivan M, Marounek M, Englmaierová M, Skřivanová V. Influence of dietary vitamin C and selenium, alone and in combination, on the performance of laying hens and quality of eggs. *Czech J Anim Sci*. 2013;58:91-7. <https://doi.org/10.17221/6619-CJAS>
98. Pirgozliev VR, Mansbridge SC, Westbrook CA, Woods SL, Rose SP, Whiting IM, et al. Feeding dihydroquercetin and vitamin E to broiler chickens reared at standard and high ambient temperature. *Arch Anim Nutr*. 2020;74:496-511. <https://doi.org/10.1080/1745039X.2020.1820807>
99. Tatar A, Kasaeizadeh R, Shobeirinia B, Abdali L, Baeelashaki R. The effect of using different levels of vitamin E on the productive traits of broiler chickens. *J Life Sci Appl Res*. 2023;4:30-6. <https://doi.org/10.59807/jlsar.v4i1.56>
100. Zain H, Tatar A, Alabi OM, Samiei Zafarghandi M. The effect of using different levels of vitamin E on the antioxidants status of broiler chickens. *J Life Sci Appl Res*. 2023; 4:37-44. <https://doi.org/10.59807/jlsar.v4i1.58>
101. Ajakaiye JJ, Cuesta-Mazorra M, Garcia-Diaz JR. Vitamins C and E can alleviate adverse effects of heat stress on live weight and some egg quality profiles of layer hen. *Pak Vet J*. 2011;31:45-9.
102. Salim HM, Lee HR, Jo C, Lee SK, Lee BD. Supplementation of graded levels of organic zinc in the diets of female broilers: effects on performance and carcass quality. *Br Poult Sci*. 2011;52:606-12. <https://doi.org/10.1080/00071668.2011.616485>
103. Edwards HM Jr, Young RJ, Gillis MB. Studies on zinc in poultry nutrition: 1. the effect of feed, water and environment on zinc deficiency in chicks. *Poult Sci*. 1958;37:1094-9. <https://doi.org/10.3382/ps.0371094>
104. Laganá C, Ribeiro AML, Kessler A, Kratz LR, Pinheiro CC. Effect of the supplementation of vitamins and organic minerals on the performance of broilers under heat stress. *Rev Bras Cienc Avic*. 2007;9:39-43. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2007000100006>
105. Chand N, Naz S, Khan A, Khan S, Khan RU. Performance traits and immune response of broiler chicks treated with zinc and ascorbic acid supplementation during cyclic heat stress. *Int J Biometeorol*. 2014;58:2153-7. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0815-7>
106. Bartlett JR, Smith MO. Effects of different levels of zinc on the performance and immunocompetence of broilers under heat stress. *Poult Sci*. 2003;82:1580-8. <https://doi.org/>

- 10.1093/ps/82.10.1580
107. Kim WK, Patterson PH. Effects of dietary zinc supplementation on broiler performance and nitrogen loss from manure. *Poult Sci.* 2004;83:34-8. <https://doi.org/10.1093/ps/83.1.34>
 108. Sahin K, Sahin N, Kucuk O, Hayirli A, Prasad AS. Role of dietary zinc in heat-stressed poultry: a review. *Poult Sci.* 2009;88:2176-83. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00560>
 109. Swain PS, Rao SBN, Rajendran D, Dominic G, Selvaraju S. Nano zinc, an alternative to conventional zinc as animal feed supplement: a review. *Anim Nutr.* 2016;2:134-41. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2016.06.003>
 110. Ramiah SK, Awad EA, Mookiah S, Idrus Z. Effects of zinc oxide nanoparticles on growth performance and concentrations of malondialdehyde, zinc in tissues, and corticosterone in broiler chickens under heat stress conditions. *Poult Sci.* 2019;98:3828-38. <https://doi.org/10.3382/ps/pez093>
 111. Ahmadi F, Ebrahimnezhad Y, Sis NM, Ghalehkandi JG. The effects of zinc oxide nanoparticles on performance, digestive organs and serum lipid concentrations in broiler chickens during starter period. *Int J Biosci.* 2013;3:23-9. <https://doi.org/10.12692/ijb/3.7.23-29>
 112. Zhao CY, Tan SX, Xiao XY, Qiu XS, Pan JQ, Tang ZX. Effects of dietary zinc oxide nanoparticles on growth performance and antioxidative status in broilers. *Biol Trace Elem Res.* 2014;160:361-7. <https://doi.org/10.1007/s12011-014-0052-2>
 113. Balnave D, Zhang D. Research note: responses of laying hens on saline drinking water to dietary supplementation with various zinc compounds. *Poult Sci.* 1993;72:603-6. <https://doi.org/10.3382/ps.0720603>
 114. Jahanian R, Rasouli E. Dietary chromium methionine supplementation could alleviate immunosuppressive effects of heat stress in broiler chicks. *J Anim Sci.* 2015;93:3355-63. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8807>
 115. Şahin K, Tuzcu M, Smith MO, Sahin N. Chromium supplementation: a tool for alleviation of thermal stress in poultry. *CABI Rev.* 2009;4:1-11. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20094071>
 116. Piva A, Meola E, Gatta PP, Biagi G, Castellani G, Mordenti AL, et al. The effect of dietary supplementation with trivalent chromium on production performance of laying hens and the chromium content in the yolk. *Anim Feed Sci Technol.* 2003;106:149-63. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(03\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(03)00006-3)
 117. Bahrami A, Moeini MM, Ghazi SH, Targhibi MR. The effect of different levels of organic and inorganic chromium supplementation on immune function of broiler chicken under heat-stress conditions. *J Appl Poult Res.* 2012;21:209-15. <https://doi.org/10.3382/japr.2010-00275>
 118. Huang Y, Yang J, Xiao F, Lloyd K, Lin X. Effects of supplemental chromium source and concentration on growth performance, carcass traits, and meat quality of broilers under heat stress conditions. *Biol Trace Elem Res.* 2016;170:216-23. <https://doi.org/10.1007/s12011-015-0443-z>
 119. Akbari M, Toriki M. Effects of dietary chromium picolinate and peppermint essential oil on growth performance and blood biochemical parameters of broiler chicks reared under heat stress conditions. *Int J Biometeorol.* 2014;58:1383-91. <https://doi.org/10.1007/s00484-013-0740-1>
 120. Liao X, Lu L, Li S, Liu S, Zhang L, Wang G, et al. Effects of selenium source and level on growth performance, tissue selenium concentrations, antioxidation, and immune functions of heat-stressed broilers. *Biol Trace Elem Res.* 2012;150:158-65. <https://doi.org/10.1007/s12011-012-9517-3>
 121. Zhou J, Huang K, Lei XG. Selenium and diabetes—evidence from animal studies. *Free*

- Radic Biol Med. 2013;65:1548-56. <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2013.07.012>
122. Mehdi Y, Hornick JL, Istasse L, Dufrasne I. Selenium in the environment, metabolism and involvement in body functions. *Molecules*. 2013;18:3292-311. <https://doi.org/10.3390/molecules18033292>
 123. El-Deep MH, Ijiri D, Ebeid TA, Ohtsuka A. Effects of dietary nano-selenium supplementation on growth performance, antioxidative status, and immunity in broiler chickens under thermoneutral and high ambient temperature conditions. *J Poult Sci*. 2016; 53:274-83. <https://doi.org/10.2141/jpsa.0150133>
 124. Abdel-Moneim AME, Shehata AM, Mohamed NG, Elbaz AM, Ibrahim NS. Synergistic effect of *Spirulina platensis* and selenium nanoparticles on growth performance, serum metabolites, immune responses, and antioxidant capacity of heat-stressed broiler chickens. *Biol Trace Elem Res*. 2022;200:768-79. <https://doi.org/10.1007/s12011-021-02662-w>
 125. Abbas AO, Alaqil AA, Mehaisen GMK, El Sabry MI. Effect of organic selenium-enriched yeast on relieving the deterioration of layer performance, immune function, and physiological indicators induced by heat stress. *Front Vet Sci*. 2022;9:880790. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.880790>
 126. International Standards Organization. Spices and condiments – botanical nomenclature. Geneva: ISO; 1995.
 127. Ravindran PN, Babu KN. *Ginger: the genus Zingiber*. New York, NY: CRC Press; 2004.
 128. Habibi R, Sadeghi GH, Karimi A. Effect of different concentrations of ginger root powder and its essential oil on growth performance, serum metabolites and antioxidant status in broiler chicks under heat stress. *Br Poult Sci*. 2014;55:228-37. <https://doi.org/10.1080/00071668.2014.887830>
 129. Das S. *Artemisia annua* (Qinghao): a pharmacological review. *Int J Pharm Sci Res*. 2012;3:4573-7. [https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.3\(12\).4573-77](https://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.3(12).4573-77)
 130. Brisibe EA, Umoren UE, Brisibe F, Magalhães PM, Ferreira JFS, Luthria D, et al. Nutritional characterisation and antioxidant capacity of different tissues of *Artemisia annua* L. *Food Chem*. 2009;115:1240-6. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.01.033>
 131. Cherian G, Orr A, Burke IC, Pan W. Feeding *Artemisia annua* alters digesta pH and muscle lipid oxidation products in broiler chickens. *Poult Sci*. 2013;92:1085-90. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02752>
 132. Gholamrezaie Sani L, Mohammadi M, Jalali Sendi J, Abolghasemi SA, Roostaie Ali Mehr M. Extract and leaf powder effect of *Artemisia annua* on performance, cellular and humoral immunity in broilers. *Iran J Vet Res*. 2013;14:15-20. <https://doi.org/10.22099/IJVR.2013.1384>
 133. Brisibe EA, Umoren UE, Owai PU, Brisibe F. Dietary inclusion of dried *Artemisia annua* leaves for management of coccidiosis and growth enhancement in chickens. *Afr J Biotechnol*. 2008;7:4083-92.
 134. Song Z, Cheng K, Zhang L, Wang T. Dietary supplementation of enzymatically treated *Artemisia annua* could alleviate the intestinal inflammatory response in heat-stressed broilers. *J Therm Biol*. 2017;69:184-90. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.07.015>
 135. Song ZH, Cheng K, Zheng XC, Ahmad H, Zhang LL, Wang T. Effects of dietary supplementation with enzymatically treated *Artemisia annua* on growth performance, intestinal morphology, digestive enzyme activities, immunity, and antioxidant capacity of heat-stressed broilers. *Poult Sci*. 2018;97:430-7. <https://doi.org/10.3382/ps/pex312>
 136. Rahimi R, Amin G, Ardekani MRS. A review on *Citrullus colocynthis* Schrad.: from traditional

- Iranian medicine to modern phytotherapy. *J Altern Complement Med.* 2012;18:551-4. <https://doi.org/10.1089/acm.2011.0297>
137. Hussain AI, Rathore HA, Sattar MZA, Chatha SAS, Sarker SD, Gilani AH. *Citrullus colocynthis* (L.) Schrad (bitter apple fruit): a review of its phytochemistry, pharmacology, traditional uses and nutritional potential. *J Ethnopharmacol.* 2014;155:54-66. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2014.06.011>
 138. Halla N, Boucherit K, Boucherit-Otmani Z, Touati FZ, Rahmani N, Aid I. *Ammodaucus leucotrichus* and *Citrullus colocynthis* from Algerian Sahara: ethnopharmacological application, phytochemical screening, polyphenols content and antioxidant activity of hydromethanolic extracts. *J King Saud Univ Sci.* 2019;31:541-8. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2018.03.018>
 139. Ostovar M, Akbari A, Anbardar MH, Iraj A, Salmanpour M, Ghoran SH, et al. Effects of *Citrullus colocynthis* L. in a rat model of diabetic neuropathy. *J Integr Med.* 2020; 18:59-67. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2019.12.002>
 140. Alzarrah MI, Althobiati F, Abbas AO, Mehaisen GMK, Kamel NN. *Citrullus colocynthis* seeds: a potential natural immune modulator source for broiler reared under chronic heat stress. *Animals.* 2021;11:1951. <https://doi.org/10.3390/ani11071951>
 141. He X, Wang J, Li M, Hao D, Yang Y, Zhang C, et al. *Eucommia ulmoides* Oliv.: ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology of an important traditional Chinese medicine. *J Ethnopharmacol.* 2014;151:78-92. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2013.11.023>
 142. Xu JK, Li MF, Sun RC. Identifying the impact of ultrasound-assisted extraction on polysaccharides and natural antioxidants from *Eucommia ulmoides* Oliver. *Process Biochem.* 2015;50:473-81. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2014.12.021>
 143. Zhao JS, Deng W, Liu HW. Effects of chlorogenic acid-enriched extract from *Eucommia ulmoides* leaf on performance, meat quality, oxidative stability, and fatty acid profile of meat in heat-stressed broilers. *Poult Sci.* 2019;98:3040-9. <https://doi.org/10.3382/ps/pez081>
 144. Potterat O, Hamburger M. *Morinda citrifolia* (Noni) fruit - phytochemistry, pharmacology, safety. *Planta Med.* 2007;73:191-9. <https://doi.org/10.1055/s-2007-967115>
 145. Lin YL, Chou CH, Yang DJ, Chen JW, Tzang BS, Chen YC. Hypolipidemic and antioxidative effects of noni (*Morinda citrifolia* L.) juice on high-fat/cholesterol-dietary hamsters. *Plant Foods Hum Nutr.* 2012;67:294-302. <https://doi.org/10.1007/s11130-012-0309-x>
 146. Ali M, Kenganora M, Manjula SN. Health benefits of *Morinda citrifolia* (Noni): a review. *Pharmacogn J.* 2016;8:321-34. <https://doi.org/10.5530/pj.2016.4.4>
 147. Flees J, Rajaei-Sharifabadi H, Greene E, Beer L, Hargis BM, Ellestad L, et al. Effect of *Morinda citrifolia* (Noni)-enriched diet on hepatic heat shock protein and lipid metabolism-related genes in heat stressed broiler chickens. *Front Physiol.* 2017;8:919. <https://doi.org/10.3389/fphys.2017.00919>
 148. Mir SA, Manickavasagan A, Shah MA. *Plant extracts: applications in the food industry.* London: Academic Press; 2021.
 149. Goel A, Kunnumakkara AB, Aggarwal BB. Curcumin as "Curecumin": from kitchen to clinic. *Biochem Pharmacol.* 2008;75:787-809. <https://doi.org/10.1016/j.bcp.2007.08.016>
 150. Sahin K, Orhan C, Tuzcu Z, Tuzcu M, Sahin N. Curcumin ameliorates heat stress via inhibition of oxidative stress and modulation of Nrf2/HO-1 pathway in quail. *Food Chem Toxicol.* 2012;50:4035-41. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2012.08.029>
 151. Khan RU, Naz S, Javdani M, Nikousefat Z, Selvaggi M, Tufarelli V, et al. The use of turmeric (*Curcuma longa*) in poultry feed. *Worlds Poult Sci J.* 2012;68:97-103. <https://doi.org/10.1017/S0043933912000104>
 152. Griesser M, Pistis V, Suzuki T, Tejera N, Pratt DA, Schneider C. Autoxidative and

- cyclooxygenase-2 catalyzed transformation of the dietary chemopreventive agent curcumin. *J Biol Chem.* 2011;286:1114-24. <https://doi.org/10.1074/jbc.M110.178806>
153. Khalil OAK, de Faria Oliveira OMM, Velloso JCR, de Quadros AU, Dalposso LM, Karam TK, et al. Curcumin antifungal and antioxidant activities are increased in the presence of ascorbic acid. *Food Chem.* 2012;133:1001-5. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.02.009>
 154. Negi PS, Jayaprakasha GK, Jagan Mohan Rao L, Sakariah KK. Antibacterial activity of turmeric oil: a byproduct from curcumin manufacture. *J Agric Food Chem.* 1999;47:4297-300. <https://doi.org/10.1021/jf990308d>
 155. Zhang JF, Hu ZP, Lu CH, Yang MX, Zhang LL, Wang T. Dietary curcumin supplementation protects against heat-stress-impaired growth performance of broilers possibly through a mitochondrial pathway. *J Anim Sci.* 2015;93:1656-65. <https://doi.org/10.2527/jas.2014-8244>
 156. Zhang JF, Bai KW, Su WP, Wang AA, Zhang LL, Huang KH, et al. Curcumin attenuates heat-stress-induced oxidant damage by simultaneous activation of GSH-related antioxidant enzymes and Nrf2-mediated phase II detoxifying enzyme systems in broiler chickens. *Poult Sci.* 2018;97:1209-19. <https://doi.org/10.3382/ps/pex408>
 157. Salah AS, Ahmed-Farid OA, Nassan MA, El-Tarabany MS. Dietary curcumin improves energy metabolism, brain monoamines, carcass traits, muscle oxidative stability and fatty acid profile in heat-stressed broiler chickens. *Antioxidants.* 2021;10:1265. <https://doi.org/10.3390/antiox10081265>
 158. Liu M, Lu Y, Gao P, Xie X, Li D, Yu D, et al. Effect of curcumin on laying performance, egg quality, endocrine hormones, and immune activity in heat-stressed hens. *Poult Sci.* 2020;99:2196-202. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.12.001>
 159. Bouaziz M, Chamkha M, Sayadi S. Comparative study on phenolic content and antioxidant activity during maturation of the olive cultivar Chemlali from Tunisia. *J Agric Food Chem.* 2004;52:5476-81. <https://doi.org/10.1021/jf0497004>
 160. Allouche N, Fki I, Sayadi S. Toward a high yield recovery of antioxidants and purified hydroxytyrosol from olive mill wastewaters. *J Agric Food Chem.* 2004;52:267-73. <https://doi.org/10.1021/jf034944u>
 161. Jemai H, Fki I, Bouaziz M, Bouallagui Z, El Feki A, Isoda H, et al. Lipid-lowering and antioxidant effects of hydroxytyrosol and its triacetylated derivative recovered from olive tree leaves in cholesterol-fed rats. *J Agric Food Chem.* 2008;56:2630-6. <https://doi.org/10.1021/jf072589s>
 162. Agah MJ, Mirakzahi MT, Saleh H. Effects of olive leaf extract (*Olea europea L.*) on growth performance, blood metabolites and antioxidant activities in broiler chickens under heat stress. *J Anim Plant Sci.* 2019;29:657-66.
 163. Taylor B. The mechanism of the inhibitory action of menthol on gut smooth muscle. *Br J Surg.* 1984;71:902-8.
 164. Witkowska D, Sowińska J. The effectiveness of peppermint and thyme essential oil mist in reducing bacterial contamination in broiler houses. *Poult Sci.* 2013;92:2834-43. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03147>
 165. Knekt P, Kumpulainen J, Järvinen R, Rissanen H, Heliövaara M, Reunanen A, et al. Flavonoid intake and risk of chronic diseases. *Am J Clin Nutr.* 2002;76:560-8. <https://doi.org/10.1093/ajcn/76.3.560>
 166. Ghasemi-Pirbaluti M, Motaghi E, Bozorgi H. The effect of menthol on acute experimental colitis in rats. *Eur J Pharmacol.* 2017;805:101-7. <https://doi.org/10.1016/j.ejphar.2017.03.003>

167. Yarmohammadi Barbarestani S, Samadi F, Hassani S, Asadi G. Effects of encapsulated nano- and microparticles of peppermint (*Mentha piperita*) alcoholic extract on the growth performance, blood parameters and immune function of broilers under heat stress condition. *Iran J Appl Anim Sci.* 2017;7:669-77.
168. Azizi M, Seidavi AR, Ragni M, Laudadio V, Tufarelli V. Practical applications of agricultural wastes in poultry feeding in Mediterranean and Middle East regions. Part 1: citrus, grape, pomegranate and apple wastes. *Worlds Poult Sci J.* 2018;74:489-98. <https://doi.org/10.1017/S0043933918000478>
169. Viveros A, Chamorro S, Pizarro M, Arija I, Centeno C, Brenes A. Effects of dietary polyphenol-rich grape products on intestinal microflora and gut morphology in broiler chicks. *Poult Sci.* 2011;90:566-78. <https://doi.org/10.3382/ps.2010-00889>
170. Wang ML, Suo X, Gu JH, Zhang WW, Fang Q, Wang X. Influence of grape seed proanthocyanidin extract in broiler chickens: effect on chicken coccidiosis and antioxidant status. *Poult Sci.* 2008;87:2273-80. <https://doi.org/10.3382/ps.2008-00077>
171. Israr M, Chand N, Khan RU, Alhidary IA, Abdelrahman MM, Al-Baddani HH, et al. Dietary grape (*Vitis vinifera*) seed powder and Zn-Gly chelate complex for mitigating heat stress in broiler chickens: growth parameters, malondialdehyde, paraoxonase-1, and antibody titer. *Agriculture.* 2021;11:1087. <https://doi.org/10.3390/agriculture11111087>
172. Peixoto CM, Dias MI, Alves MJ, Calhelha RC, Barros L, Pinho SP, et al. Grape pomace as a source of phenolic compounds and diverse bioactive properties. *Food Chem.* 2018;253:132-8. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.163>
173. Taşeri L, Aktaş M, Şevik S, Gülcü M, Seçkin GU, Aktekel B. Determination of drying kinetics and quality parameters of grape pomace dried with a heat pump dryer. *Food Chem.* 2018;260:152-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.03.122>
174. Sies H, Jones DP. Reactive oxygen species (ROS) as pleiotropic physiological signalling agents. *Nat Rev Mol Cell Biol.* 2020;21:363-83. <https://doi.org/10.1038/s41580-020-0230-3>
175. Dragovic-Uzelac V, Levaj B, Mrkic V, Bursac D, Boras M. The content of polyphenols and carotenoids in three apricot cultivars depending on stage of maturity and geographical region. *Food Chem.* 2007;102:966-75. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2006.04.001>
176. Koch F, Thom U, Albrecht E, Weikard R, Nolte W, Kuhla B, et al. Heat stress directly impairs gut integrity and recruits distinct immune cell populations into the bovine intestine. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2019;116:10333-8. <https://doi.org/10.1073/pnas.1820130116>
177. Meng T, Xiao D, Muhammed A, Deng J, Chen L, He J. Anti-inflammatory action and mechanisms of resveratrol. *Molecules.* 2021;26:229. <https://doi.org/10.3390/molecules26010229>
178. He S, Yu Q, He Y, Hu R, Xia S, He J. Dietary resveratrol supplementation inhibits heat stress-induced high-activated innate immunity and inflammatory response in spleen of yellow-feather broilers. *Poult Sci.* 2019;98:6378-87. <https://doi.org/10.3382/ps/pez471>
179. Liu LL, He JH, Xie HB, Yang YS, Li JC, Zou Y. Resveratrol induces antioxidant and heat shock protein mRNA expression in response to heat stress in black-boned chickens. *Poult Sci.* 2014;93:54-62. <https://doi.org/10.3382/ps.2013-03423>
180. Zhang C, Zhao XH, Yang L, Chen XY, Jiang RS, Jin SH, et al. Resveratrol alleviates heat stress-induced impairment of intestinal morphology, microflora, and barrier integrity in broilers. *Poult Sci.* 2017;96:4325-32. <https://doi.org/10.3382/ps/pex266>
181. Zhang C, Zhao X, Wang L, Yang L, Chen X, Geng Z. Resveratrol beneficially affects meat quality of heat-stressed broilers which is associated with changes in muscle antioxidant status. *Anim Sci J.* 2017;88:1569-74. <https://doi.org/10.1111/asj.12812>

182. He S, Li S, Arowolo MA, Yu Q, Chen F, Hu R, et al. Effect of resveratrol on growth performance, rectal temperature and serum parameters of yellow-feather broilers under heat stress. *Anim Sci J.* 2019;90:401-11. <https://doi.org/10.1111/asj.13161>
183. Yang T, Liu B, Wang Y, Huang X, Yan Z, Jiang Q, et al. Ellagic acid improves antioxidant capacity and intestinal barrier function of heat-stressed broilers via regulating gut microbiota. *Animals.* 2022;12:1180. <https://doi.org/10.3390/ani12091180>
184. Wang H, Yang T, Wang T, Hao N, Shen Y, Wu Y, et al. Phloretin attenuates mucus hypersecretion and airway inflammation induced by cigarette smoke. *Int Immunopharmacol.* 2018;55:112-9. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2017.12.009>
185. Shao X, Bai N, He K, Ho CT, Yang CS, Sang S. Apple polyphenols, phloretin and phloridzin: new trapping agents of reactive dicarbonyl species. *Chem Res Toxicol.* 2008;21:2042-50. <https://doi.org/10.1021/tx800227v>
186. Chang WT, Huang WC, Liou CJ. Evaluation of the anti-inflammatory effects of phloretin and phlorizin in lipopolysaccharide-stimulated mouse macrophages. *Food Chem.* 2012;134:972-9. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2012.03.002>
187. Barreca D, Bellocco E, Laganà G, Ginestra G, Bisignano C. Biochemical and antimicrobial activity of phloretin and its glycosylated derivatives present in apple and kumquat. *Food Chem.* 2014;160:292-7. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.03.118>
188. Lin CC, Chu CL, Ng CS, Lin CY, Chen DY, Pan IH, et al. Immunomodulation of phloretin by impairing dendritic cell activation and function. *Food Funct.* 2014;5:997-1006. <https://doi.org/10.1039/C3FO60548E>
189. Hu H, Bai X, Xu K, Zhang C, Chen L. Effect of phloretin on growth performance, serum biochemical parameters and antioxidant profile in heat-stressed broilers. *Poult Sci.* 2021;100:101217. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101217>
190. Boch J, Kempf B, Bremer E. Osmoregulation in *Bacillus subtilis*: synthesis of the osmoprotectant glycine betaine from exogenously provided choline. *J Bacteriol.* 1994;176:5364-71. <https://doi.org/10.1128/jb.176.17.5364-5371.1994>
191. Hassan RA, Attia YA, El-Ganzory EH. Growth, carcass quality and serum constituents of slow growing chicks as affected by betaine addition to diets containing 1. Different levels of choline. *Int J Poult Sci.* 2005;4:840-50. <https://doi.org/10.3923/ijps.2005.840.850>
192. Klasing KC, Adler KL, Calvert CC, Remus JC. Dietary betaine increases intraepithelial lymphocytes in the duodenum of coccidia-infected chicks and increases functional properties of phagocytes. *J Nutr.* 2002;132:2274-82. <https://doi.org/10.1093/jn/132.8.2274>
193. Wen C, Chen Y, Leng Z, Ding L, Wang T, Zhou Y. Dietary betaine improves meat quality and oxidative status of broilers under heat stress. *J Sci Food Agric.* 2019;99:620-3. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9223>
194. Shakeri M, Cottrell JJ, Wilkinson S, Zhao W, Le HH, McQuade R, et al. Dietary betaine improves intestinal barrier function and ameliorates the impact of heat stress in multiple vital organs as measured by Evans blue dye in broiler chickens. *Animals.* 2020;10:38. <https://doi.org/10.3390/ani10010038>
195. Alhotan RA, Al Sulaiman AR, Alharthi AS, Abudabos AM. Protective influence of betaine on intestinal health by regulating inflammation and improving barrier function in broilers under heat stress. *Poult Sci.* 2021;100:101337. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101337>
196. Chand N, Naz S, Maris H, Khan RU, Khan S, Qureshi MS. Effect of betaine supplementation on the performance and immune response of heat stressed broilers. *Pak J Zool.* 2017;49:1857-62. <https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2017.49.5.1857.1862>

197. Liu W, Yuan Y, Sun C, Balasubramanian B, Zhao Z, An L. Effects of dietary betaine on growth performance, digestive function, carcass traits, and meat quality in indigenous yellow-feathered broilers under long-term heat stress. *Animals*. 2019;9:506. <https://doi.org/10.3390/ani9080506>
198. Joerger RD, Ganguly A. Current status of the preharvest application of pro- and prebiotics to farm animals to enhance the microbial safety of animal products. *Microbiol Spectr*. 2017;5:PFS-0012-2016. <https://doi.org/10.1128/microbiolspec.PFS-0012-2016>
199. Opalinski M, Maiorka A, Dahlke F, Cunha F, Vargas FSC, Cardozo E. On the use of a probiotic (*Bacillus subtilis* - strain DSM 17299) as growth promoter in broiler diets. *Braz J Poult Sci*. 2007;9:99-103. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2007000200004>
200. Teo AY, Tan HM. Evaluation of the performance and intestinal gut microflora of broilers fed on corn-soy diets supplemented with *Bacillus subtilis* PB6 (CloSTAT). *J Appl Poult Res*. 2007;16:296-303. <https://doi.org/10.1093/japr/16.3.296>
201. Gadde UD, Oh S, Lee Y, Davis E, Zimmerman N, Rehberger T, et al. Retracted: dietary *Bacillus subtilis*-based direct-fed microbials alleviate LPS-induced intestinal immunological stress and improve intestinal barrier gene expression in commercial broiler chickens. *Res Vet Sci*. 2017;114:236-43. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.05.004>
202. Abdelqader A, Abuajamieh M, Hayajneh F, Al-Fataftah AR. Probiotic bacteria maintain normal growth mechanisms of heat stressed broiler chickens. *J Therm Biol*. 2020;92:102654. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102654>
203. Al-Fataftah AR, Abdelqader A. Effects of dietary *Bacillus subtilis* on heat-stressed broilers performance, intestinal morphology and microflora composition. *Anim Feed Sci Technol*. 2014;198:279-85. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2014.10.012>
204. Zhang P, Yan T, Wang X, Kuang S, Xiao Y, Lu W, et al. Probiotic mixture ameliorates heat stress of laying hens by enhancing intestinal barrier function and improving gut microbiota. *Ital J Anim Sci*. 2017;16:292-300. <https://doi.org/10.1080/1828051X.2016.1264261>
205. Zou P, Yang X, Wang J, Li Y, Yu H, Zhang Y, et al. Advances in characterisation and biological activities of chitosan and chitosan oligosaccharides. *Food Chem*. 2016;190:1174-81. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.06.076>
206. Li J, Cheng Y, Chen Y, Qu H, Zhao Y, Wen C, et al. Dietary chitooligosaccharide inclusion as an alternative to antibiotics improves intestinal morphology, barrier function, antioxidant capacity, and immunity of broilers at early age. *Animals*. 2019;9:493. <https://doi.org/10.3390/ani9080493>
207. Qiao Y, Bai XF, Du YG. Chitosan oligosaccharides protect mice from LPS challenge by attenuation of inflammation and oxidative stress. *Int Immunopharmacol*. 2011;11:121-7. <https://doi.org/10.1016/j.intimp.2010.10.016>
208. Xu YQ, Xing YY, Wang ZQ, Yan SM, Shi BL. Pre-protective effects of dietary chitosan supplementation against oxidative stress induced by diquat in weaned piglets. *Cell Stress Chaperones*. 2018;23:703-10. <https://doi.org/10.1007/s12192-018-0882-5>
209. Chang Q, Lu Y, Lan R. Chitosan oligosaccharide as an effective feed additive to maintain growth performance, meat quality, muscle glycolytic metabolism, and oxidative status in yellow-feather broilers under heat stress. *Poult Sci*. 2020;99:4824-31. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2020.06.071>
210. Chang Q, Cai H, Wei L, Lan R. Chitosan oligosaccharides alleviate acute heat stress-induced oxidative damage by activating ERK1/2-mediated HO-1 and GSH-Px gene expression in breast muscle of broilers. *Poult Sci*. 2022;101:101515. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101515>

211. Brito M, Laranjo A, Nunes G, Oliveira C, Santos CA, Fonseca J. Anemia and hematopoietic factor deficiencies in patients after endoscopic gastrostomy: a nine-year and 472-patient study. *Nutrients*. 2020;12:3637. <https://doi.org/10.3390/nu12123637>
212. Pestana JM, Puerta B, Santos H, Madeira MS, Alfaia CM, Lopes PA, et al. Impact of dietary incorporation of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) and exogenous enzymes on broiler performance, carcass traits, and meat quality. *Poult Sci*. 2020;99:2519-32. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2019.11.069>
213. Dillard CJ, German JB. Phytochemicals: nutraceuticals and human health. *J Sci Food Agric*. 2000;80:1744-56. [https://doi.org/10.1002/1097-0010\(20000915\)80:12<1744::AID-JSFA725>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/1097-0010(20000915)80:12<1744::AID-JSFA725>3.0.CO;2-W)
214. Farag MR, Alagawany M, El-Hack MEA, Dhama K. Nutritional and healthical aspects of *Spirulina* (*Arthrospira*) for poultry, animals and human. *Int J Pharmacol*. 2016;12:36-51. <https://doi.org/10.3923/ijp.2016.36.51>
215. Wu Q, Liu L, Miron A, Klímová B, Wan D, Kuča K. The antioxidant, immunomodulatory, and anti-inflammatory activities of *Spirulina*: an overview. *Arch Toxicol*. 2016;90:1817-40. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1744-5>
216. Moustafa ES, Alsanie WF, Gaber A, Kamel NN, Alaql AA, Abbas AO. Blue-green algae (*Spirulina platensis*) alleviates the negative impact of heat stress on broiler production performance and redox status. *Animals*. 2021;11:1243. <https://doi.org/10.3390/ani11051243>
217. Mirzaie S, Zirak-Khattab F, Hosseini SA, Donyaei-Darian H. Effects of dietary *Spirulina* on antioxidant status, lipid profile, immune response and performance characteristics of broiler chickens reared under high ambient temperature. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2018; 31:556-63. <https://doi.org/10.5713/ajas.17.0483>
218. Chaudhary A, Mishra P, Amaz SA, Mahato PL, Das R, Jha R, et al. Dietary supplementation of microalgae mitigates the negative effects of heat stress in broilers. *Poult Sci*. 2023;102: 102958. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102958>
219. Belay T, Bartels KE, Wiernusz CJ, Teeter RG. A detailed colostomy procedure and its application to quantify water and nitrogen balance and urine contribution to thermobalance in broilers exposed to thermoneutral and heat-distressed environments. *Poult Sci*. 1993;72: 106-15. <https://doi.org/10.3382/ps.0720106>
220. Bruno LDG, Maiorka A, Macari M, Furlan RL, Givisiez PEN. Water intake behavior of broiler chickens exposed to heat stress and drinking from bell or and nipple drinkers. *Braz J Poult Sci*. 2011;13:147-52. <https://doi.org/10.1590/S1516-635X2011000200009>
221. Iyasere OS, Bateson M, Beard AP, Guy JH. Provision of additional cup drinkers mildly alleviated moderate heat stress conditions in broiler chickens. *J Appl Anim Welf Sci*. 2021;24:188-99. <https://doi.org/10.1080/10888705.2020.1846534>
222. Milligan JL, Marr JE, Eaton RC, Kifer PE, Wilcke HL. Environmental studies on broiler chicks. *Poult Sci*. 1957;36:1141.
223. Jones F, Watkins S. How does taste influence water consumption in broilers. *Avian Advice*. 2009;11:8-11.
224. Fairchild BD, Ritz CW. Poultry drinking water primer [Internet]. Extension Poultry Scientists. 2024 [cited 2024 Mar11]. <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=B1301&title=poultry-drinking-water-primer>
225. Fox Thomas W. Studies on heat tolerance in the domestic fowl. *Poult Sci*. 1951;30:477-83. <https://doi.org/10.3382/ps.0300477>
226. Harris GC Jr, Nelson GS, Seay RL, Dodgen WH. Effects of drinking water temperature

- on broiler performance. *Poult Sci.* 1975;54:775-9. <https://doi.org/10.3382/ps.0540775>
227. Lim CI, Rana MM, Li HL, Cho TH, Ryu KS. Effects of drinking ion water on performance, egg quality and blood biochemical composition of laying hens under high temperature conditions. *Korean J Poult Sci.* 2020;47:121-6. <https://doi.org/10.5536/KJPS.2020.47.3.121>
 228. Attia MS. Effect of different levels of vitamin C on body temperature of White Russian birds [laying hens] during heat stress [Egypt]. *Vet Med J.* 1976;24:111-5.
 229. Pardue SL, Thaxton JP. Ascorbic acid in poultry: a review. *Worlds Poult Sci J.* 1986; 42:107-23. <https://doi.org/10.1079/WPS19860009>
 230. McDowell LR. *Vitamins in animal nutrition: comparative aspects to human nutrition.* London: Academic Press; 1989.
 231. Alhassani DH, Alshukri AY. Comparative efficacy of different supplements with drinking water used to alleviate body temperature of heat-stressed broiler chickens. *Iraqi J Agric Sci.* 2016;47:12-8.
 232. Behboudi H, Esmailipour O, Mirmahmoudi R, Mazhari M. The influence of drinking water containing lemon juice and thyme supplemented diet on performance and some blood parameters of broilers under heat stress. *Iran J Appl Anim Sci.* 2016;6:169-74.
 233. Burt S. Essential oils: their antibacterial properties and potential applications in foods: a review. *Int J Food Microbiol.* 2004;94:223-53. <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.03.022>
 234. Khosravinia H. Effects of Satureja khuzistanica essential oils in drinking water on mortality, production performance, water intake, and organ weights in broiler chickens reared under heat stress condition. *Int J Biometeorol.* 2015;59:1711-9. <https://doi.org/10.1007/s00484-015-0979-9>
 235. Bottje WG, Harrison PC. Effect of carbonated water on growth performance of cockerels subjected to constant and cyclic heat stress temperatures. *Poult Sci.* 1985;64:1285-92. <https://doi.org/10.3382/ps.0641285>
 236. Bottje WG, Harrison PC. The effect of tap water, carbonated water, sodium bicarbonate, and calcium chloride on blood acid-base balance in cockerels subjected to heat stress. *Poult Sci.* 1985;64:107-13. <https://doi.org/10.3382/ps.0640107>
 237. Oke OE, Emeshili UK, Iyasere OS, Abioja MO, Daramola JO, Ladokun AO, et al. Physiological responses and performance of broiler chickens offered olive leaf extract under a hot humid tropical climate. *J Appl Poult Res.* 2017;26:376-82. <https://doi.org/10.3382/japr/pfx005>
 238. Saeed M, Abbas G, Alagawany M, Kamboh AA, El-Hack MEA, Khafaga AF, et al. Heat stress management in poultry farms: a comprehensive overview. *J Therm Biol.* 2019;84: 414-25. <https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.07.025>
 239. Richards MP, Proszkowiec-Weglarz M. Mechanisms regulating feed intake, energy expenditure, and body weight in poultry. *Poult Sci.* 2007;86:1478-90. <https://doi.org/10.1093/ps/86.7.1478>
 240. Şahin K, Küçük O. A simple way to reduce heat stress in laying hens as judged by egg laying, body weight gain and biochemical parameters. *Acta Vet Hung.* 2001;49:421-30. <https://doi.org/10.1556/004.49.2001.4.6>
 241. Gous RM, Morris TR. Nutritional interventions in alleviating the effects of high temperatures in broiler production. *Worlds Poult Sci J.* 2005;61:463-75. <https://doi.org/10.1079/WPS200568>
 242. Kutlu HR. Influences of wet feeding and supplementation with ascorbic acid on performance and carcass composition of broiler chicks exposed to a high ambient temperature. *Arch*

- Tierernahr. 2001;54:127-39. <https://doi.org/10.1080/17450390109381972>
243. Akinola OS, Onakomaiya AO, Agunbiade JA, Oso AO. Growth performance, apparent nutrient digestibility, intestinal morphology and carcass traits of broiler chickens fed dry, wet and fermented-wet feed. *Livest Sci.* 2015;177:103-9. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2015.04.016>
244. Syafwan S, Kwakkel RP, Verstegen MWA. Heat stress and feeding strategies in meat-type chickens. *Worlds Poult Sci J.* 2011;67:653-74. <https://doi.org/10.1017/S0043933911000742>
245. Yu J, Bao E, Yan J, Lei L. Expression and localization of Hsps in the heart and blood vessel of heat-stressed broilers. *Cell Stress Chaperones.* 2008;13:327-35. <https://doi.org/10.1007/s12192-008-0031-7>
246. Kwon KS. Broiler breeding facility ventilation fan operation plan. *Korea Poult Res.* 2021;7:68-71.
247. Gupta R, Kaur D, Chopra S, Nagra SS, Rai DR, Patil RT. Performance analysis of the broiler chicks under different cooling devices during hot-dry summer. *Indian J Anim Res.* 2014;48:480-5. <https://doi.org/10.5958/0976-0555.2014.00015.6>
248. Ghoname MS. Effect of pad water flow rate on evaporative cooling system efficiency in laying hen housing. *J Agric Eng.* 2020;51:209-19. <https://doi.org/10.4081/jae.2020.1051>
249. Vipin C, Navav S, Sanjita S, Monika K. Comparative efficacy of evaporative cooling pad and fogger system on behaviour of broiler chicken. *Indian J Anim Res.* 2023;57:165-70. <https://doi.org/10.5958/0974-8180.2022.00030.7>
250. Kamal EGE, Ahmed M. Effect of fogging fogging cooling system on physiological and performance characteristics of broiler chicken under tropical hot conditions. *SSRN.* 2024. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4746234>
251. Çaylı A, Akyüz A, Üstün S, Yeter B. Efficiency of two different types of evaporative cooling systems in broiler houses in Eastern Mediterranean climate conditions. *Therm Sci Eng Prog.* 2021;22:100844. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.100844>
252. Liang Y, Tabler GT, Dridi S. Sprinkler technology improves broiler production sustainability: from stress alleviation to water usage conservation: a mini review. *Front Vet Sci.* 2020;7:544814. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.544814>
253. Rajaei-Sharifabadi H, Greene E, Piekarski A, Falcon D, Ellestad L, Donoghue A, et al. Surface wetting strategy prevents acute heat exposure-induced alterations of hypothalamic stress- and metabolic-related genes in broiler chickens. *J Anim Sci.* 2017;95:1132-43. <https://doi.org/10.2527/jas.2016.1290>
254. Fidan ED, Kaya M, Nazligil A, Türkyılmaz MK. The effects of perch cooling on behavior, welfare criteria, performance, and litter quality of broilers reared at high temperatures with different litter thicknesses. *Braz J Poult Sci.* 2020;22:1-12. <https://doi.org/10.1590/1806-9061-2019-1083>
255. Zhao JP, Jiao HC, Jiang YB, Song ZG, Wang XJ, Lin H. Cool perch availability improves the performance and welfare status of broiler chickens in hot weather. *Poult Sci.* 2012;91:1775-84. <https://doi.org/10.3382/ps.2011-02058>
256. Zhao JP, Jiao HC, Jiang YB, Song ZG, Wang XJ, Lin H. Cool perches improve the growth performance and welfare status of broiler chickens reared at different stocking densities and high temperatures. *Poult Sci.* 2013;92:1962-71. <https://doi.org/10.3382/ps.2012-02933>
257. Hu JY, Hester PY, Makagon MM, Xiong Y, Gates RS, Cheng HW. Effect of cooled perches on physiological parameters of caged white Leghorn hens exposed to cyclic heat.

- Poult Sci. 2019;98:2317-25. <https://doi.org/10.3382/ps/pez012>
258. Hu JY, Hester PY, Makagon MM, Xiong Y, Gates RS, Cheng HW. Effect of cooled perches on performance, plumage condition, and foot health of caged White Leghorn hens exposed to cyclic heat. *Poult Sci.* 2019;98:2705-18. <https://doi.org/10.3382/ps/pez039>
259. Kaur M, Sharma A, Gupta R, Singh Y, Sethi APS, Singh C. Optimizing rearing duration to improve broiler production indices in conventional open sided and tunnel ventilated closed sheds during summer season. *Indian J Anim Prod Manag.* 2018;34:56-61.
260. Simmons JD, Lott BD, Miles DM. The effects of high-air velocity on broiler performance. *Poult Sci.* 2003;82:232-4. <https://doi.org/10.1093/ps/82.2.232>
261. Hamrita TK, Conway RH. Effect of air velocity on deep body temperature and weight gain in the broiler chicken. *J Appl Poult Res.* 2017;26:111-21. <https://doi.org/10.3382/japr/pfw051>
262. Kaur M, Sharma A, Gupta R, Singh Y, Sethi APS, Singh C. Resource use efficiency of broiler production in tunnel-ventilated environmental control vis-à-vis open-sided conventional shed during summer. *Trop Anim Health Prod.* 2017;49:1591-6. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1363-z>
263. Xue H, Qiang Z, Ni JQ, Baoming L, Zhengxiang S, Shumei Z, et al. Effect of cooling pad installation on indoor airflow distribution in a tunnel-ventilated laying-hen house. *Int J Agric Biol Eng.* 2016;9:169-77. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20160904.2447>
264. Gwon KS. Measures to prevent heat damage - chicken environment management to prevent heat damage in summer. *Korean Poult J.* 2020;52:124-7.
265. Park SO. Applying a smart livestock system as a development strategy for the animal life industry in the future: a review. *J Korean Appl Sci Technol.* 2021;38:241-62. <https://doi.org/10.12925/jkocs.2021.38.1.241>
266. Korea Trade-Investment Promotion Agency. 2022 Smart farm overseas expansion strategy report [Internet]. 2022 [cited 2024 Mar 17]. https://dream.kotra.or.kr/kotraneews/cms/indReport/actionIndReportDetail.do?pRptNo=13483&pHotClipTyName=DEEP&MENU_ID=280&CONTENTS_NO=1
267. Rural Development Administration. Overview of smart farming [Internet]. 2022 [cited 2024 Mar 7]. <https://www.mafra.go.kr/home/5280/subview.do>
268. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2024 Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs major project implementation plan [Internet]. 2024 [cited 2024 Mar 7]. <https://www.mafra.go.kr/home/5109/subview.do?enc=Zm5jdDF8QE8JTGyMjzJTJGaG9tZSUyRjc5MiUyRjU2OTYxOSUyRmFydGNsVmllldy5kbyUzRg%3D%3D>
269. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Smart livestock farming, finding answers in the field [Internet]. 2024. [cited 2024 Mar 6]. <https://www.mafra.go.kr/home/5109/subview.do?enc=Zm5jdDF8QE8JTGyMjzJTJGaG9tZSUyRjc5MiUyRjU2OTczNSUyRmFydGNsVmllldy5kbyUzRg>
270. Papatungan IV, Faruq AA, Puspasari F, Hakim FA, Fahrurrozi I, Oktiawati UY, et al. Temperature and humidity monitoring system in broiler poultry farm. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng.* 2020;803:012010. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/803/1/012010>
271. Perdanasari L, Etikasari B, Rukmi DL. Control system for temperature, humidity, and ammonia levels in laying hens farms based on Internet of things. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2023;1168:012053. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1168/1/012053>
272. Lee JW. Overseas smart farming cases [Internet]. 2018. [cited 2024 Mar 12]. <https://repository.krei.re.kr/bitstream/2018.oak/21358/1/%ED%95%B4%EC%99%B8%20%EC%8A%A4%EB%A7%88%ED%8A%B8%EB%86%8D%EC%97%85%20%EC%82%AC%EB%A1%80.pdf>