

Animal Industry and Technology(축산기술과 산업) TITLE PAGE

Upload this completed form to website with submission

ARTICLE INFORMATION	Fill in information in each box below
Article Type	Review article
Article Title (English; within 20 words without abbreviations)	Recent Trends in the Nutritional Value of Mealworm(<i>Tenebrio molitor</i>) and Its Feeding Effects in Monogastric Animals
Article Title (Korean; English paper can be omitted)	갈색 거저리의 영양가치 및 단위동물 급이 효과에 대한 최신 동향 분석
Running Title (English; within 10 words)	Recent Trends in Mealworm(<i>Tenebrio molitor</i>) Feeding Effects
Author (English)	Sena Jo ¹ , Seong-Min Koo ¹ , Jae-Hyeok Lee ¹ , Jae-Cheol Jang ²
Affiliation (English)	1. Department of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea 2. Division of Animal Science, and Institute of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju , Korea
Author (Korean; English paper can be omitted)	조세나 ¹ , 구성민 ¹ , 이재혁 ¹ , 장재철 ²
Affiliation (Korean; English paper can be omitted)	1. 경상국립대학교 축산과학부 2. 경상국립대학교 농업생명과학연구원
ORCID (for more information, please visit https://orcid.org)	Sena Jo: 0009-0001-0143-3110 Seong-Min Koo: 0009-0009-6168-0971 Jae-Hyeok Lee: 0009-0006-4865-104X Jea-Cheol Jang: 0000-0001-9843-3186
Competing interests	Not applicable
Funding sources State funding sources (grants, funding sources, equipment, and supplies). Include name and number of grant if available.	Not applicable
Acknowledgements	This study was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Science and ICT in 2023 (RS-2023-0021420061382116530003).
Availability of data and material	Not applicable
Authors' contributions Please specify the authors' role using this form.	Conceptualization: Sena Jo, Jea-Cheol Jang Data curation: Sena Jo Formal analysis: Sena Jo, Jae-Hyeok Lee Methodology: Not applicable Software: Not applicable Validation: Sena Jo, Seong-Min Koo Investigation: Sena Jo, Seong-Min Koo Writing - original draft: Sena Jo, Seong-Min Koo, Jae-Hyeok Lee Writing - review & editing: Sena Jo, Seong-Min Koo, Jea-Cheol Jang
Ethics approval and consent to participate	Not applicable

CORRESPONDING AUTHOR CONTACT INFORMATION

For the corresponding author (responsible for correspondence, proofreading, and reprints)	Fill in information in each box below
First name, middle initial, last name	Sena Jo
Email address – this is where your proofs will be sent	jsena05216@gmail.com
Secondary Email address	Jsenao5216@gnu.ac.kr
Address	Department of Animal Science, Gyeongsang National University, Jinju, Korea
Cell phone number	+82-10-8965-1517
Office phone number	
Fax number	

6
7

Accepted

(Unstructured) Abstract (up to 350 words)

With the global increase in population and the growing demand for livestock products, the need to secure sustainable feed ingredients has become increasingly important. Conventional major protein sources, such as soybean meal and fish meal, are limited by high price volatility and environmental burdens, prompting attention toward *Tenebrio molitor* as a promising alternative insect protein. Mealworms are characterized by high crude protein and crude fat contents and excellent digestibility, indicating substantial potential as an alternative protein source for monogastric animal diets. However, their proximate composition as well as amino acid and fatty acid profiles may vary depending on larval developmental stage, processing and pretreatment methods, and the nutrient composition of the rearing substrate. In addition, concerns regarding reduced oxidative stability and the potential generation of toxic compounds associated with their high fat content should also be considered. According to this review, dietary inclusion of mealworm powder in swine diets for weaned and growing pigs did not adversely affect overall growth performance, nutrient digestibility, or immune responses; however, partial reductions in productivity were observed when conventional protein sources were replaced at excessively high levels. In poultry diets, mealworm supplementation showed positive effects on early growth performance in broilers, while in laying hens, productivity and egg quality were generally maintained at low inclusion levels, although negative outcomes were observed at high dietary inclusion rates. In conclusion, for mealworms to be used as a stable alternative feed ingredient for monogastric animals, standardization of insect rearing and feed formulation is required to minimize variation in larval body composition, and precise determination of optimal inclusion levels considering the physiological characteristics of each livestock species is essential.

Keywords (3 to 6): *Tenebrio molitor*, insect protein, Alternative protein source, Monogastric animals, Nutritional value

서론 (Introduction)

현재 증가하는 세계 인구에 따라 안정적인 식량 생산에 대한 필요성이 강조되고 있다[1]. 국제연합 식량농업기구[2]에 따르면, 전 세계 섭취 열량의 약 12.9%와 단백질 섭취량의 27.9%를 가축이 담당하고 있으며, 인구 증가와 1인 소득 향상에 따라 육류 소비량은 2050년까지 크게 증가할 것으로 예측되었다. 이처럼 축산물에 대한 수요는 지속적으로 증가하고 있으나, 기존 축산물 생산 체계는 비용적, 환경적 측면에서 한계를 드러내고 있다.

39 경제적 측면에서, 축산업의 주요 사료 원료로 사용되는 옥수수과 대두박은 국제 곡물 시장의 가격
40 변동에 큰 영향을 받는다. 옥수수 가격이 부셸(bushel)당 \$0.10 변동 시, 사료비는 100 파운드 당 \$0.47,
41 대두박은 톤당 \$10 변동 시 사료비 100 파운드당 \$0.33 변동하는 것으로 보고되며, 곡물의 가격
42 변동은 곧바로 사료비 변동으로 연결된다[3]. 이러한 사료비 변동은 곧이어 축산물 생산 구조에
43 영향을 미치고 결과적으로 축산물과 가축의 가격에도 장기적인 변화를 초래하는 것으로
44 나타났다[4]. 환경적 측면에서는 사료 생산 과정 자체가 축산업 내 주요 온실가스 배출원으로
45 작용하며, 실제로 양돈에서 전체 온실가스 배출량의 88%, 양계에서는 91%가 사료 생산 과정에서
46 발생하는 것으로 보고되었다[5]. 특히 사료 중 주 단백질원으로 사용되고 있는 대두박에서 다른
47 원료들에 비해 탄소 집약도가 높게 관찰되어 단백질 사료로 사용 시 비용을 절감시킬 수 있지만,
48 온실가스 배출량을 증가시키는 원인으로 지목되었다[5]. 또 다른 주요 단백질 원료로 사용되는
49 어분은 생산 과정에서 사용되는 화석 연료와 에너지가 환경 부담 중 87%를 차지하며, 어분 생산을
50 위한 공장 건설 및 유지에도 자원과 에너지가 소모되는 것으로 보고되었다[6]. 이처럼 기존
51 단백질원의 경제적 불안정성과 환경적 부담이 점차 가중되어 이를 대체할 수 있는 지속 가능한 사료
52 원료의 필요성이 부각되고 있다.

53 최근 곤충 단백질이 낮은 자원 소모와 우수한 영양학적 특성을 바탕으로 기존 단백질원을 대체할
54 수 있는 사료자원으로 주목받고 있다[7]. 곤충 단백질은 토지 이용 효율성과 폐기물을 이용한 자원
55 순환으로 환경적 이점을 가지고 있으며, 사료 내 곤충단백질 사용 시 대두박 대비 22.2% 감소된
56 온실가스 배출 잠재력(Global warming potential, GWP)을 나타낸다고 보고되었다[8]. 이러한 곤충
57 자원 중 갈색 거저리(*Tenebrio molitor*) 분말은 높은 수준의 단백질과 지질을 함유하고 있으며, 높은
58 단백질 소화율을 나타내 영양학적 활용 가치가 높은 원료로 평가되고 있다[9]. 실제로 그동안
59 단위동물 대상으로 곤충 단백질의 급여 수준별, 성장 단계별 다양한 연구들이 보고되었다[10]. 갈색
60 거저리 분말을 첨가제로 활용하였을 때, 가금류 중 산란계에서는 육질 개선과 난각의 강도 증가가
61 관찰되었다[11]. 육계의 경우 체중과 도체 수율, 육질 향상이 관찰되었고, 동물 복지 측면에서도

긍정적인 영향이 보고되었다[12]. 양돈에서 이유자돈의 사료 내 단백질 원료를 갈색 거저리로 일부 대체한 결과 사료 효율과 ADG 증가 효과가 나타나 양돈 분야에서도 활용 가능성이 확인되었다[13]. 이처럼 갈색 거저리에 대한 연구가 지속적으로 축적되며 산업적 관심도 함께 증가함에 따라, 사육기술이 발달하고 갈색 거저리의 생산 체계 또한 안정화되고 있다[14]. 이에 따라 갈색 거저리의 영양 성분 변동에 영향을 미치는 요인을 규명하고, 이를 바탕으로 품질 안정성을 높이기 위한 연구가 이루어지고 있다. 따라서 본 리뷰에서는 최근 보고된 연구를 중심으로 갈색 거저리의 영양가치 및 단위동물 급이 효과에 대한 최신 동향을 분석하고자 한다.

갈색 거저리(*Tenebrio molitor*)의 영양가치

갈색 거저리 유충의 성분 구성

갈색 거저리의 생육 단계별 생유충과 건조 분말, 어분, 대두박의 성분 구성이 표 1에 제시되어 있다. 갈색 거저리의 조단백질 함량은 번데기, 성충 제외한 생유충에서 평균 53.9로 나타났으며, 성장 초기일수록 단백질 함량이 높은 것으로 분석되었다[15]. 하지만 건조 분말에서는 평균 48.5를 나타내었으며 생유충에서 관찰된 성장 수준에 따른 조단백질 변화는 나타나지 않았다[16,17]. 생유충과 건조 유충의 조단백질 함량은 대두박과 유사한 수준인 반면, 어분보다는 낮은 수준이다. 조지방은 생유충에서 30.41-35.9 수준으로 성장에 따라 증가가 관찰되었지만 건조 후 28.03-39.38 범위로 나타나 평균 33.71을 나타내며 성장 수준에 따른 변화는 나타나지 않았다. 갈색 거저리의 지방 함량은 어분 및 대두박과 비교하였을 때 매우 높은 수준으로 나타났다.

갈색 거저리 유충의 아미노산 구성

갈색 거저리의 생육 단계별 생유충과 건조 분말, 어분, 대두박의 아미노산 구성이 표 2에 제시되어 있다. 생유충의 아미노산 조성을 살펴보면, 성분 구성에서 성장에 따라 감소한 조단백질 함량이

아미노산 구성에서도 유사한 경향으로 나타나 필수아미노산 지수(Essential Amino Acid Index, EAAI)가 88.16 에서 80.62 로 감소하였으며, 이후 번데기와 성충 단계에서도 72.77 에서 68.88 로 감소하였다[15]. 비필수아미노산 함량 중 글루탐산(6.57-6.99%), 아스파르트산(5.01-5.51%), 알라닌(4.64-5.22%)이 상대적으로 높은 함량을 나타내었으며, 필수 아미노산 중 라이신(3.23-3.33%)과 류신(2.97-3.59%)이 가장 높게 관찰되었다. 유충 분말에서는 류신(3.93-5.12%)과 발린(2.97-3.98%)이 비교적 높은 수준으로 나타났다. 단백질 원료와 비교하여 갈색 거저리 분말이 어분보다 발린과 일부 분지사슬아미노산(Branched-Chain Amino Acids, BCAA)에서 상대적으로 높은 값을 나타냈지만, 라이신(4.56%)과 메티오닌(1.73%)은 더 낮게 나타났다. 주 단백질 원료인 대두박과 비교하였을 때, 메티오닌(0.66%)은 갈색 거저리의 생유충(0.98-0.59%)과 분말(0.66-0.81%)과 유사한 수준을 나타내지만, 라이신은 대두박(2.96%)보다 평균적으로 높은 값을 나타내는 것으로 나타났다.

가공 방식에 따른 갈색 거저리 성분 구성

갈색 거저리를 사료 내 첨가할 때 대부분 건조 후 분말 형태로 이용되며, 이때 진행하는 건조 및 가공 방식에 따라 사료 내 첨가되는 분말의 성분 구성이 달라질 수 있다. 갈색 거저리의 건조 방식 및 전처리에 따른 성분 구성이 표 3 에 제시되어 있다. 갈색 거저리 고주파, 적외선 및 마이크로파 방식으로 건조하였을 때, 평균 97.9%의 건물 함량을 보여 다른 건조 방식들보다 상대적으로 높은 값을 나타냈으며, 햇볕 건조는 89.44%로 건조 방식 중 가장 낮은 건물 함량을 나타냈다 [18,19]. 조단백질 함량에서도 적외선과 마이크로파 건조 방식은 평균 57.07%로 건조 전 함량인 57.57%와 가장 유사한 값을 보이며 지방제거 전처리를 거친 처리구를 제외한 다른 건조 방식들의 평균인 53.41%보다 높은 조단백질 함량을 보였다 [18,19]. 지방 제거 전처리를 거친 건조 방식의 조단백질 함량은 64.47%로 건조 전보다 높은 함량을 보였으나 이는 지방이 제거됨에 따라 상대적으로 조단백질의 비율이 높아진 결과일 수 있다 [20]. 햇볕 건조 방식은 조단백질 함량에서도 가장 낮은 50.96%으로 나타났다 [19]. 조지방 함량(%)은 데치기 전처리를 거친 처리구에서 평균 13.08 %로

110 건조 전 함량인 26.8%과 다른 처리구의 함량인 23.07 - 28.83 %보다 상대적으로 낮은 지방 함량을
111 나타지만, 이는 [20]에서 대조군과 비교하였을 때 데치기 전처리 자체의 지방 함량에 대한 유의적인
112 영향이 나타나지 않았다고 보고하여 갈색 거저리 자체의 사육 및 성분 차이 영향으로 해석할 필요가
113 있다. 키틴 함량은 [20]의 실험에서 지방 제거에 따라 키틴 함량이 낮게 보고되었다.

114

115 가공 방식에 따른 갈색 거저리 아미노산 구성

116 갈색 거저리의 건조 방식 및 전처리에 따른 아미노산 구성이 표 4에 제시되어 있다. 건조 방식에
117 따른 차이를 보면, [19]에서 오븐 및 동결건조 방식이 햇볕 건조 방식보다 대부분의 아미노산
118 함량에서 더 낮은 값을 나타낸다고 보고하였다. 반면, 탈지 처리에 대한 아미노산 구성의
119 차이에서는 유의적인 변화가 관찰되지 않았다[21]. 건조 가공에 따른 필수 아미노산 함량에서는
120 류신(3.5-3.84%), 발린(3-4.65%), 라이신(2.55-4.4%)이 가장 높게 나타났으며, 메티오닌(0.6-
121 0.8%)과 히스티딘(1.27-1.6%)의 함량이 상대적으로 낮은 수준으로 나타났다. 이러한 경향은
122 유충의 아미노산 구성과 유사하였으며 갈색 거저리는 유충과 가공 모두에서 비교적 높은 라이신
123 함량을 나타냈다. 하지만, 라이신의 함량이 높게 보고되더라도, 가공과정 중 실제 사용 가능한
124 반응성 라이신(Reactive lysine)이 감소할 수 있다. 표 4의 가공 방식 중 동결건조를 제외한 오븐
125 건조는 120°C에서 1시간 건조되었고, 전지방 및 탈지는 60°C에서 12시간 건조되었다. [22]는
126 라이신이 121°C에서 1-2시간 가열되거나 37°C에서 10-30일 저장될 경우, 각각 최대 59%, 39%의
127 반응성 라이신이 감소가 보고되었으며, 이러한 변화는 실제 생물학적으로 이용 가능한 라이신의
128 비율을 줄여 성장 성과 저하가 나타날 수 있음을 제시하였다. 또한 열처리에 의한 라이신의 손상은
129 단백질 함량에 반영되지 않아 함량만으로 평가하기 어렵고, 저온 장기 반응과 고온 단기 반응에
130 적합한 별도 측정법을 통해 이용 가능한 라이신 손상 정도를 평가해야 할 필요가 있다고 보고하였다.
131 추가로 라이신 외 시스테인과 같은 다른 아미노산의 파괴나 소화를 감소가 나타날 수 있어 종합적인
132 분석이 필요하다. 전지방과 탈지 방식에서도 메티오닌(0.5-1.2%)의 제한적인 함량이 나타났으며,
133 [21]에서는 갈색 거저리의 사료에 추가적인 합성 DL-메티오닌 첨가의 필요성을 제시하였다.

134

135 가공 방식에 따른 갈색 거저리 지방산 구성

136 갈색 거저리의 건조 방식 및 전처리에 따른 지방산 구성이 표 5에 제시되어 있다. 가공 방식에
137 따른 지방산 구성에서, 전체적으로 불포화 지방산 함량 중 올레산(32.82-43.76%)과 리놀레산(25.54-
138 41.27%)이 가장 높은 함량을 나타냈으며, 포화지방산은 팔미트산(10.89-20.6%)과 스테아르산(2.18-
139 8%)이 주요 포화지방산으로 나타났다. 총 포화지방산의 함량은 18.34-32.38%, 단일 불포화지방산은
140 34.29-46.2%, 다중 불포화지방산은 19.8-43.07%의 범위로 나타나 전체적으로 불포화 지방산의
141 함량이 포화 지방산보다 높은 경향을 나타냈다. 이와 관련하여 [23]에서는 동물성 기름에서 주로
142 높은 포화 지방산 함량이 나타나는 것과 달리, 갈색 거저리는 높은 불포화 지방산 함량과 n-6:n-3의
143 비율이 높아 지방산 조성에서 동물성 기름보다 식물성 기름과 유사한 특성을 가진다고 보고하였다.
144 가공 방식별로 차이를 보았을 때, 단일불포화지방산 함량이 마이크로파 건조 방식(45.33%)에서
145 가장 높았으며, 올레산과 리놀레산은 각각 마이크로파 건조 방식(43.76%)과 적외선 건조
146 방식(41.27%)에서 가장 높게 나타났다. 반면, 고주파 건조 방식의 총 포화지방산 함량은 32.38%로
147 가장 높았으나, 이는 단일불포화지방산 함량이 가장 낮게 나타난 동결 건조 방식(34.29%)보다 낮은
148 수준으로 나타나 가공된 갈색 거저리에서도 전반적으로 불포화 지방산 중심의 지방산 조성임을
149 보여주었다. 가공 방식 중 햇볕건조의 지방 함량이 다른 오븐건조 및 동결건조보다 유의하게 높은
150 지방 함량을 나타냈으며, 오븐 건조 방식의 단일불포화지방산 함량이 햇볕(37.54) 및 동결 건조
151 방식(36.62%)보다 유의미하게 높은 함량(38.21%)을 보였다 [19]. 그러나 이러한 갈색 거저리 분말의
152 지방산 조성 특징에도 불구하고, 건조 방식에 따른 지방산의 변화에서는 일부를 제외하고 유의미한
153 변화가 관찰되지 않았으며, 결과적으로 유사한 구성을 나타낸다고 보고하였다[21].

154

155

156

157

158

159 갈색 거저리의 영양가치 변이와 안정성

160 갈색 거저리는 단백질과 지방의 함량이 높은 원료로, 특히 표 5에 나타난 바와 같이 지방 성분 중
161 불포화지방산이 높은 비율을 차지하고 있다. 불포화 지방산은 산화 시 불쾌한 맛과 냄새를 유발하고,
162 가공 과정 중 생성되는 이차 반응 생성물에 의해 산패가 발생할 수 있다[24]. 또한 이렇게 산화된
163 지방을 섭취하게 되면, 장 내 환경을 변화시키고 건강에 영향을 미칠 수 있다[25]. 실제로 [26]에서
164 갈색 거저리 오일을 추출하여 열 산화를 통한 변화를 관찰하였을 때, 고온에서 장기간 노출 시
165 산패취를 유발하는 화합물이 생성되었고, 이를 통해 갈색 거저리의 오일 품질을 보존하기 위해서는
166 온도와 가열 과정 고려한 저장 및 가공 조건을 확립하는 것이 중요하다고 보고하였다[26]. 실제로
167 탈지 전처리를 진행한 갈색 거저리 분말의 휘발성 화합물을 분석한 결과, 지질 산화에서 유래되는
168 알데하이드류와 케톤류의 함량이 줄어 탈지 공정으로 인한 지방 함량 감소가 산패를 방지할 수
169 있다고 보고하였다[27]. 그러나 이러한 결과는 지방의 산패에 관련한 가능성으로, 이 외 갈색
170 거저리에서 발생하는 직접적인 세균이나 미생물의 독성에 대한 연구는 제한적으로 연구되었다.
171 따라서 향후 안정적인 대체 단백질원으로서 사용을 위해 산패, 미생물적 위해 및 독성 오염 지표에
172 대한 표준화된 안정성 평가가 필요하다.

173 갈색 거저리는 급이하는 사료의 성분에 따라 유충의 영양구성 뿐 아니라 성장 및 생존율에 영향을
174 미칠 수 있다. 이에 따라 갈색 거저리의 사료를 곡물로 대체하여 사료 성분에 따른 유충의 영양성분
175 변화와 그 영향에 대한 연구가 다양하게 보고되었다. 귀리, 보리 새싹과 이를 혼합한 사료 그룹을
176 갈색 거저리 유충에게 급이한 실험에서 유충에서 사료 내 단백질 함량에 비해 약 2~4 배 높은 수준의
177 단백질 함량이 나타나는 경향이 관찰되었다[28]. 또한 밀기울을 대조군으로 한 보리겨, 옥수수겨와
178 단백질 함량이 높은 병아리콩겨를 다양한 수준으로 혼합 급여한 연구에서 사료 조성에 따라 유충의
179 성장 및 사료 효율이 달라질 수 있음을 보고하였고, 병아리콩겨의 혼합 수준이 높은 실험군에서
180 가장 높은 유충 단백질 함량이 제시되었다[29]. 이 외 다양한 곡물을 급이한 실험에서 사료와 유충의
181 구성성분을 분석하였을 때, 사료 내 단백질 함량과 유충의 단백질 함량 간 상관관계가 관찰되었다

[30]. 또한, 사료 구성에 따른 유충의 단백질 함량 변화와 마찬가지로 아미노산 구성도 변화할 수 있다. [28]에서는 보리를 급여한 그룹에서 대조군보다 높은 라이신 함량이 보고되었고, [31]에서는 사료 및 사육 조건에 따른 유충의 성분 구성 변화를 나타내 통곡물 사료의 급여에 따라 메티오닌의 함량이 증가하는 것을 관찰하였으며, 시스테인은 사료 내 단백질 함량이 증가함에 따라 감소하는 것이 관찰되었다. 이는 사료의 단백질 함량과 구성이 유충의 아미노산 구성에도 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

최근 자원의 순환과 사료 비용 절감을 목적으로 음식물 폐기물 및 농업 부산물을 갈색 거저리의 사료원으로 활용하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 채소류 기반 사료 급여가 갈색 거저리의 성장과 체성분에 미치는 영향을 평가한 [32]에 따르면, 오이와 당근을 급여한 처리구는 대조구 대비 유충의 수분 함량이 14.93-18.00% 높게 나타났다. 해당 연구는 체내 수분 축적에 따른 영양소 흡수능력 향상이 거저리 유충의 성장을 촉진하였으며, 수분 섭취 증가에 따른 단백질 효율 개선이 총단백질 함량의 유의적 증가를 유도한 것으로 보고하였다[32]. 수분 공급에 따른 성장 성적 개선 효과는 당근을 급여한 [33]의 연구에서도 동일하게 보고되었다. 다만, 해당 연구에서는 당근의 급여 수준이 증가할수록 유충의 단백질 함량이 감소하였는데, 이는 대조구 사료 대비 당근 자체의 단백질 함량이 낮기 때문인 것으로 분석되었다. 이는 부산물 내 풍부한 수분 섭취가 유충의 생장 및 단백질 함량 개선에 기여할 수 있으나, 급여하는 부산물의 영양소 구성에 따라 그 결과가 달라질 수 있음을 시사한다.

한편, 채소보다 비교적 수분이 적은 오렌지 껍질 분말을 급여한 실험에서는 유충의 조단백질 함량 증가가 보고되었고, 유충의 지방산을 분석에서 포화지방산이 증가하고 불포화지방산이 감소하는 변화가 나타났다[34]. 또한, 지방산 조성 분석 결과 포화지방산은 증가하고 불포화지방산은 감소하는 변화가 관찰되었다. 아울러 해당 처리구에서 추출한 오일의 산화 안정성이 향상되어, 사료 조성을 통한 갈색거저리의 저장성 개선 가능성이 확인되었다. 사료 배합에 따른 지방산 조성 변화는 다른 문헌에서도 보고된 바 있다. [32]등은 채소 폐기물 급여 시 리놀레산(linoleic acid) 및

205 다가불포화지방산 함량이 증가하여 산화 안정성이 개선될 수 있음을 시사하였다. 반면, 앞서
206 언급한 [33]등의 당근 급여 연구에서는 조지방 및 조회분 함량에 유의적인 차이가 관찰되지 않았다.
207 이는 갈색거저리의 체성분 및 지방산 조성 변화가 급여하는 사료 원료의 특성에 따라 상이하게
208 나타남을 의미한다.

209 이와 같은 사료 조성에 따른 갈색 거저리 유충의 영양성분 변이는 이를 대체 단백질원으로
210 활용함에 있어 잠재적 제한 요인으로 작용할 수 있다. 따라서, 갈색 거저리를 안정적인 사료 원료로
211 활용하기 위해서는 유충의 체성분 균일화를 위한 사료 조성의 표준화 및 최적의 영양소 배합비율을
212 도출하는 전략이 필요하다.

213

214

215 양돈에서 갈색 거저리(*Tenebrio molitor*)의 첨가 효과

216

217 이유자돈

218 이유자돈에서 갈색 거저리 분말 급여의 성장 성과는 첨가 수준에 따라 상이하게 보고되었다. 기존
219 단백질원인 어분을 갈색 거저리 분말로 50% 대체하였을 때 성장 성적에 부정적인 효과가 나타나지
220 않았으나, 100% 대체한 경우 일당증체량이 감소하는 경향을 보였다 [13]. 반면, [35]의 연구에서는
221 어분 100% 대체 시 대조구 및 50% 대체구보다 사료 효율이 유의적으로 증가하였으며, 오히려 50%
222 대체 시 일당증체량과 종료 체중이 감소하여 앞선 연구와 상반된 결과를 나타냈다. [36]은 어분 50%
223 대체구의 아미노산 조성이 100% 대체구보다 우수하여 이러한 성분구성 차이가 성장 성적에 영향을
224 미친 것으로 해석하였다. 그러나 각 연구마다 대조구 사료 내 어분 첨가 수준이 상이하여,
225 결과적으로 실험 사료 내 갈색거저리의 실제 첨가 비율이 일정하지 않았을 가능성이 존재한다.
226 따라서 주 단백질원의 대체율뿐만 아니라 총 사료 내 갈색거저리의 실제 첨가 비율을 복합적으로
227 고려한 추가적인 후속 연구가 요구된다.

영양소 소화율 측면에서 갈색 거저리 분말을 6% 첨가한 사료의 아미노산 및 조단백질 소화율은
어분 및 혈장 단백질과 같은 기존 단백질 원료의 소화율과 유사한 수준을 나타냈다[37]. 어분을 갈색
거저리 분말로 50% 대체 시 이유 자돈의 체내 영양소 소화율에 영향을 미치지 않은 것을 확인하였고
[13], 혈장 단백질을 50% 대체한 연구에서도 건물 및 질소 소화율에 유의적인 변화가 없었고 분변
지수와 설사 발생률 또한 차이가 없었다[38]. 이는 갈색거저리가 이유자돈 사료에서 기존
단백질원과 대등한 수준의 소화율을 보이며, 영양소 흡수 기전에도 부정적인 영향을 미치지 않음을
시사한다.

면역학적 측면에서는 곤충 특이 성분인 키틴(chitin)에 주목할 필요가 있다. 키틴은 곤충 단백질
골격의 구조적 다당류로 면역반응을 유도하여 염증 및 알레르기 반응을 일으킬 수 있는 잠재적
요인으로 보고되었다[39]. [38]의 연구에 따르면, 혈장 단백질의 50%를 갈색거저리 분말로
대체하였을 때 실험 14 일 차까지 혈청 면역글로불린 A(IgA) 농도가 유의적으로 증가하였고, 이후
실험 종료 시까지 IgA 및 IgG 농도가 지속적으로 증가하는 경향을 보여 갈색거저리 급여가 이유
초기 면역 반응을 촉진할 가능성이 제시되었다. 반면, [36] 의 50% 어분 대체 실험에서는 혈청 내
사이토카인 농도에 유의적인 변화가 관찰되지 않았다. 이를 종합하면, 기존 단백질원의 50% 수준을
갈색거저리로 대체하는 것은 체내 과도한 염증 반응을 유발하지 않으면서 면역글로불린 등 면역
지표를 개선할 수 있는 가능성을 보여준다.

육성돈

육성돈에게 갈색 거저리 분말을 10% 첨가하여 급이 하였을 때 성장 초기 단계에서 체중이
유의적으로 증가하였지만, 이후 경향성만 나타내며 일일평균 사료 섭취량(Feed Intake, FI)이나 사료
전환율에서는 유의적 차이를 나타내지 않았다[40]. 사료 내 대두농축단백 및 대두유를 갈색
거저리로 대체하여 사료 내 5% 첨가한 실험에서 체중, 일당증체량 등 성장 성적에서 유의한 차이가
나타나지 않았다[41]. 한편, 대두박을 갈색거저리로 전량 대체하되 결핍될 수 있는 아미노산과
지방산을 유채유 및 홍화씨유 등으로 보정한 연구의 경우, 생장 성적 전반에는 큰 영향을 미치지

253 않았으나 10% 첨가구(100% 대체)에서 일당증체량이 유의적으로 낮게 나타났다[42]. 이는 육성돈
254 사료 내 갈색거저리 분말 첨가 시 첨가 수준에 따라 생산성에 미치는 영향이 변동될 수 있어 추가
255 연구가 필요함을 시사함과 동시에, 전반적으로는 성장 성적에 심각한 악영향을 미치지 않음을
256 보여준다.

257 영양소 소화 측면에서, 대두 단백질을 50% 대체하여 갈색 거저리를 5% 첨가했을 때 분변 내 질소
258 농도와 조지방 함량 및 질소 소화율에는 차이가 없었다 [41]. 그러나, 대두박을 전량 대체하고
259 부족한 아미노산과 지방산을 보충한 [42]의 실험에서는 대조구 대비 전체 소화율이 6.7~15.6%
260 감소하였으며, 특히 아스파르트산의 회장 소화율은 26.3% 낮게 나타났다. 저자들은 관찰 횟수의
261 한계를 언급하면서도, 이러한 회장 아미노산 소화율 저하가 키틴과 같은 불용성 다당류의 제한적인
262 분해능에서 기인한 것으로 추정하였다. 주 단백질원의 부분 대체는 소화율에 영향을 미치지
263 않았으나 완전 대체 시 소화율 감소가 관찰되었으므로, 육성돈의 영양소 소화 및 흡수에 관한 심도
264 있는 데이터 축적이 요구된다.

265 면역 및 산화 스트레스 반응에서 [43]은 대두박을 50% 및 100% 대체(사료 내 5%, 10% 첨가)하고
266 필수 영양소를 보충한 실험에서 체내 염증 반응 시 활성화되는 종양괴사인자(TNF)의 mRNA
267 발현량이 첨가구에서 유의하게 낮아짐을 확인하였다. 이는 갈색거저리 급여가 장내 염증 반응을
268 억제하고 면역에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 또한 소장 상피 장벽 기능과 관련된
269 밀착연접단백질(Tight junction protein, TJP)의 mRNA 발현량에는 그룹 간 유의차가 없어, 고비율
270 대체 시에도 장벽 기능에 부정적인 영향을 미치지 않는 안전한 단백질원임을 확인하였다. [44]의
271 연구에서도 지질 산패도 지표(Thiobarbituric Acid Reactive Substances, TBARS) 및 항산화지표
272 (토코페롤, 글루타치온) 농도에 유의차가 없었으며, 염증 조절유전자 (NF-KB) 및 활성산소 제거
273 유전자(Nrf2) 발현에도 영향을 미치지 않았다. 비록 소포체 스트레스(ER stress) 관련 유전자에서
274 일부 유의차가 발생하였으나 체내 스트레스 경로에 미치는 영향은 미미한 것으로 고찰되었다.

장내 미생물 환경의 경우, 갈색 거저리 첨가에 따른 α -diversity 은 유의차가 나타나지 않았다[41,43]. 하지만, [41]의 연구에서 대두 단백질 대체구의 베타 다양성(β -diversity)이 실험 기간 동안 유의한 차이를 보였으며, 특히 14 일 차에 군집 구조가 뚜렷이 분리되었다가 이후 장내 미생물총의 회복력에 의해 조절되는 결과를 보였다. 개별 분류군 단위에서는 갈색거저리 10% 첨가 시 *Escherichia coli* 와 *Clostridium spp.*가 감소하였고[40], *Elusimicrobium spp.* 증가 및 *Asteroplasma* 감소가 확인되었다[41]. 장내 미생물에 미치는 영향은 연구마다 다소 편차가 있으나 전반적으로 유해한 변화는 관찰되지 않았으며, 그 생태학적 의미를 명확히 규명하기 위한 후속 연구가 필요하다.

양계에서 갈색 거저리(*Tenebrio molitor*)의 첨가 효과

육계

육계 사료에서 갈색 거저리 분말 첨가 효과는 사료 내 적용 방식에 따라 상반된 결과를 나타냈다. 갈색 거저리 분말을 2.5% 및 5% 첨가 시 전 사육 기간 중 폐사율과 사료섭취량, 증체량, 사료 요구율에 유의한 영향이 없었으나, 초기 성장기(1-10 일)에서 증체량이 유의적으로 증가하였으며, 특히 2.5% 첨가 그룹에서 가장 높은 증체량(186.27g)과 가장 낮은 사료요구율이 관찰되었다 [17,45]. 이와 유사하게 2%를 첨가한 [46]의 연구에서도 대조구 대비 주간 BWG 와 FI 가 유의적으로 증가하였다. 이러한 FI 증가는 갈색거저리 분말 특유의 기호성과 연관된 것으로 보이며, [47]의 자유 급여 실험에서도 갈색거저리에 대한 육계의 높은 기호성이 입증된 바 있다. 결과적으로 2.5~3% 수준의 갈색거저리 분말 첨가는 육계의 초기 성장 성적을 개선하는 데 긍정적인 역할을 하는 것으로 평가된다.

반면, 기존 사료 내 어분(4%)을 갈색거저리 분말로 대체(25%, 50%, 75%, 100%)한 연구에서는 대체 수준이 증가함에 따라 BWG 와 FI 가 선형적으로 감소하는 상반된 결과가 보고되었다[48]. 해당 연구진은 섭취량 감소가 최종 체중, 지육률, 내부 장기 무게의 유의적인 감소로 이어졌다고 고찰하며, 어분을 25% 이상 대체하는 것은 성장 성적에 부정적인 영향을 미칠 수 있다고 지적하였다.

따라서 단순 첨가 시에는 2~2.5% 수준이 최적의 효율을 보이거나 단백질원 대체 방식으로 적용할 경우 발생할 수 있는 생산성 저하를 방지하기 위한 영양학적 보정 전략이 필요하다.

영양소 소화율 및 에너지 이용성 측면에서, 어분을 갈색거저리로 대체할 경우 대체 수준이 증가할수록 건물 및 조지방 소화율은 선형적으로 감소하였으나, 조단백질 소화율은 25% 대체구까지 증가한 후 감소하는 경향을 나타냈다[49]. 그러나 외관상 대사에너지(AME)와 질소 보정 대사에너지(AMEn)는 대체 수준에 비례하여 선형적으로 증가하였다. 이는 갈색거저리 분말을 30% 첨가한 [49]의 연구에서 AMEn 값이 유의적으로 높게 나타난 결과(3,815 vs 3,305 kcal/kg DM)와 일치하며, 곤충 단백질이 우수한 에너지 공급원으로 작용함을 의미한다. 또한 주요 제한 아미노산인 라이신(0.89), 메티오닌(0.87), 트레오닌(0.82)의 표준 회장 소화율(SIDC)이 높게 나타나, 갈색거저리가 가금류에 필수적인 아미노산을 효율적으로 공급할 수 있음을 확인하였다.

면역 및 장내 환경 지표를 살펴보면, 갈색거저리 분말 2% 첨가구에서 선천성 면역 반응과 관련된 MPO 활성이 증가하고 박테리아 활성도가 감소하여 긍정적인 면역 조절 효과가 확인되었다[46]. 장내 미생물의 경우 갈색거저리를 2.5% 첨가한 그룹에서 대장균 수가 유의적으로 감소하였고, 첨가 수준이 증가함에 따라 대장균 및 총 호기성 세균 수가 선형적으로 감소하는 항균 효과가 관찰되었다[45]. 장 용모 발달 등 형태학적 지표에는 유의적인 영향이 없었다.

314

315 산란계

산란계 사료에 10% 미만 수준으로 갈색거저리를 급여할 경우 일계산란율(HDEP)에 큰 영향을 미치지 않았으나, 3% 첨가 시 1~2% 첨가구보다 산란율이 낮아지는 경향이 보고되었다[13]. 또한 최대 20%까지 고함량으로 대체 시 체내 총 아미노산 함량이 감소하였으며, 특히 난각 형성 및 골격 발달에 관여하는 글루탐산 농도의 유의적인 감소가 확인되었다[11,50]. [11]은 이러한 글루탐산 저하가 생장 지연 및 초산 시기 지연을 유발할 수 있다고 분석하였다. 따라서 산란계에서 갈색거저리는 생산성 저하를 방지할 수 있는 엄격한 적정 첨가량(보통 2% 미만) 설정이 필수적이다.

322 계란의 품질 지표를 분석한 결과, 저수준(1~3%) 급여 시 난각의 색, 무게, 두께, 경도에는 뚜렷한
323 경향성이 나타나지 않았다[13]. 흥미롭게도 최대 20%까지 첨가한 실험에서 달걀 껍질 강도
324 지수(ESI)는 10% 첨가 시 가장 높은 강도(13.0 N)를 보이는 이차 함수 관계를 나타내, 적정 비율
325 첨가가 난각 강도 강화에 기여할 수 있음을 시사하였다[11]. 호우 단위(Haugh unit, HU)의 경우
326 대조구(78.43) 대비 실험구(82.74~84.52)에서 유의적으로 높게 나타나 계란의 신선도 개선 효과가
327 뚜렷하였다[52]. 다만, 일부 고함량(10~15%) 급여 시 난각 두께가 얇아지는 결과도 보고되었으므로
328 상업적 현장에서 파란 발생률에 미치는 경제적 영향 평가가 병행되어야 한다.

329 계란의 영양 성분 변화 측면에서, 저수준 첨가 시 난황 내 다가불포화지방산(PUFA) 농도가
330 선형적으로 증가하여 섭취 시 혈관 건강 및 콜레스테롤 대사에 긍정적인 기능성 계란 생산의
331 가능성을 보여주었다[36,51]. 그러나 고함량(최대 15%) 급여 시 대조구에 비해 계란의 총 아미노산
332 함량이 유의적으로 감소하는 현상이 보고되었다[52]. 그럼에도 불구하고 총 아미노산 중 식품
333 기호성을 높이는 글루탐산과 아스파르트산의 상대적 비율은 유지되었으며,
334 분지사슬아미노산(BCAA)의 함량이 높게 나타나 단백질 공급원으로서의 가치는 유효한 것으로
335 분석되었다. 향후 연구에서는 이러한 아미노산 프로파일의 변화가 총량 감소에 따른 상대적 비율
336 증가인지 절대적인 함량 변화인지 명확히 구명할 필요가 있다.

337

338 결론 (Conclusions)

339 갈색거저리(*Tenebrio molitor*)는 단백질 및 지방 함량이 높아 단위동물 사료의 유망한 대체
340 단백질원으로 평가받고 있다. 그러나 갈색거저리의 영양소 조성은 유충의 발육 단계, 가공 및
341 전처리 과정뿐만 아니라 급여하는 먹이원(사료)의 성분에 따라 크게 변동될 수 있다. 자원 순환
342 및 사료비 절감을 목적으로 수분 함량이 높은 농식품 부산물을 급여할 경우 유충의 성장 성적이
343 개선되는 효과가 확인되었으나, 사료 원료로서의 안정적인 활용을 위해서는 영양 성분의 변이를
344 최소화하고 균일한 품질을 확보할 수 있는 곤충 사료 배합 및 사양의 표준화 전략이 필수적이다.

조성에 따라 일반 성분을 비롯한 아미노산 및 지방산 프로파일에 변이가 발생할 수 있으며, 높은 지방 함량에 따른 산화 안정성 저하 및 독성 발생 우려 또한 고려되어야 한다. 본 고찰에 따르면, 양돈(이유자돈 및 육성돈) 사료 내 갈색거저리 분말의 급여는 전반적인 생장 성적, 영양소 소화율, 면역 반응에 부정적인 영향을 미치지 않았으나, 기존 단백질원을 지나치게 고비율로 대체할 경우 일부 생산성 저하가 관찰되었다. 양계 사료의 경우, 육계의 초기 생장 촉진에 긍정적인 효과를 보였으며, 산란계에서는 저수준 첨가 시 생산성 및 계란 품질이 온전히 유지되었으나 고함량 급여 시에는 부정적인 결과가 초래되었다. 결론적으로 갈색거저리를 단위동물의 안정적인 대체 사료 원료로 활용하기 위해서는 유충의 체성분 변이를 최소화하는 곤충 사양 및 사료 배합의 표준화가 우선적으로 선행되어야 하며, 축종별 생리적 특성을 고려한 정밀한 적정 첨가 수준 설정이 필수적이다.

Acknowledgments

이 연구는 2023 년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-0021420061382116530003).

References

1. Hemathilake DMKS, Gunathilake DMCC. Agricultural productivity and food supply to meet increased demands. In: Future Foods [Internet]. Elsevier; 2022 [cited 2026 Mar 19]. p. 539–53. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780323910019000165> doi:10.1016/B978-0-323-91001-9.00016-5
2. FAO. World livestock 2011: livestock in food security. Rome (Italy): FAO; 2011.
3. Langemeier M. Impact of Corn and Soybean Meal Prices on Swine Finishing Feed Cost [Internet]. 2016. doi:10.22004/AG.ECON.283320
4. Monteiro MA, Jammer BD. Price Dynamics in South African Agriculture: A Study of Cross-Commodity Spillovers between Grain and Livestock Markets. Sustainability. 2024 Apr 9;16(8):3136. doi:10.3390/su16083136

5. Benavides PT, Cai H, Wang M, Bajjalieh N. Life-cycle analysis of soybean meal, distiller-dried grains with solubles, and synthetic amino acid-based animal feeds for swine and poultry production. *Animal Feed Science and Technology*. 2020 Oct;268:114607. doi:10.1016/j.anifeedsci.2020.114607
6. Fréon P, Durand H, Avadí A, Huaranca S, Orozco Moreyra R. Life cycle assessment of three Peruvian fishmeal plants: Toward a cleaner production. *Journal of Cleaner Production*. 2017 Mar;145:50–63. doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.036
7. Liceaga AM, Aguilar-Toalá JE, Vallejo-Cordoba B, González-Córdova AF, Hernández-Mendoza A. Insects as an Alternative Protein Source. *Annu Rev Food Sci Technol*. 2022 Mar 25;13(1):19–34. doi:10.1146/annurev-food-052720-112443
8. Vatsanidou A, Konstantinidi S, Bonos E, Skoufos I. Comparative Life Cycle Assessment of Animal Feed Formulations Containing Conventional and Insect-Based Protein Sources. *AgriEngineering*. 2025 Aug 26;7(9):275. doi:10.3390/agriengineering7090275
9. Oliveira LA, Pereira SMS, Dias KA, Paes S da S, Grancieri M, Jimenez LGS, et al. Nutritional content, amino acid profile, and protein properties of edible insects (*Tenebrio molitor* and *Gryllus assimilis*) powders at different stages of development. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2024 Jan;125:105804. doi:10.1016/j.jfca.2023.105804
10. Hong J, Han T, Kim YY. Mealworm (*Tenebrio molitor* Larvae) as an Alternative Protein Source for Monogastric Animal: A Review. *Animals*. 2020 Nov 8;10(11):2068. doi:10.3390/ani10112068
11. Lan Z, Qiao G, Ni X, Yan Q, Li K, Zhang M, et al. Effects of Dietary Yellow Mealworm (*Tenebrio Molitor*) supplementation on meat and structural egg quality of different aged-laying hens. *Poultry Science*. 2025 Nov;104(11):105849. doi:10.1016/j.psj.2025.105849
12. Vasilopoulos S, Giannenas I, Savvidou S, Bonos E, Rumbos CI, Papadopoulos E, et al. Growth performance, welfare traits and meat characteristics of broilers fed diets partly replaced with whole *Tenebrio molitor* larvae. *Animal Nutrition*. 2023 Jun;13:90–100. doi:10.1016/j.aninu.2022.12.002
13. Ko H, Kim Y, Kim J. The produced mealworm meal through organic wastes as a sustainable protein source for weanling pigs. *J Anim Sci Technol*. 2020 May;62(3):365–73. doi:10.5187/jast.2020.62.3.365
14. Langston K, Selaledi L, Tanga C, Yusuf A. The nutritional profile of the yellow mealworm larvae (*Tenebrio molitor*) reared on four different substrates. *Future Foods*. 2024 Jun;9:100388. doi:10.1016/j.fufo.2024.100388
15. Yu X, He Q, Wang D. Dynamic Analysis of Major Components in the Different Developmental Stages of *Tenebrio molitor*. *Front Nutr*. 2021 Sep 20;8:689746. doi:10.3389/fnut.2021.689746

16. Toviho OA, Bársony P. Nutrient Composition and Growth of Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) at Different Ages and Stages of the Life Cycle. *Agriculture*. 2022 Nov 15;12(11):1924. doi:10.3390/agriculture12111924
17. Sedgh-Gooya S, Torki M, Darbemamieh M, Khamisabadi H, Abdolmohamadi A. Growth performance and intestinal morphometric features of broiler chickens fed on dietary inclusion of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae powder. *Veterinary Medicine & Sci*. 2022 Sep;8(5):2050–8. doi:10.1002/vms3.881
18. Keil C, Grebenteuch S, Kröncke N, Kulow F, Pfeif S, Kanzler C, et al. Systematic Studies on the Antioxidant Capacity and Volatile Compound Profile of Yellow Mealworm Larvae (*T. molitor* L.) under Different Drying Regimes. *Insects*. 2022 Feb 3;13(2):166. doi:10.3390/insects13020166
19. Selaledi L, Mabelebele M. The Influence of Drying Methods on the Chemical Composition and Body Color of Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*. 2021 Apr 8;12(4):333. doi:10.3390/insects12040333
20. Karoui R, Hentati F, Romdhana H, Mezdoor S. Physicochemical, nutritional and structural properties of mealworm powders manufactured by using different technological processes. *Food Research International*. 2025 Aug;214:116565. doi:10.1016/j.foodres.2025.116565
21. Son YJ, Choi SY, Hwang IK, Nho CW, Kim SH. Could Defatted Mealworm (*Tenebrio molitor*) and Mealworm Oil Be Used as Food Ingredients? *Foods*. 2020 Jan 2;9(1):40. doi:10.3390/foods9010040
22. Hurrell RF, Carpenter KJ. Mechanisms of heat damage in proteins: 4. The reactive lysine content of heat-damaged material as measured in different ways. *Br J Nutr*. 1974 Nov;32(3):589–604. doi:10.1079/BJN19740112
23. Martínez-Pineda M, Juan T, Antoniewska-Krzeska A, Vercet A, Abenaza M, Yagüe-Ruiz C, et al. Exploring the Potential of Yellow Mealworm (*Tenebrio molitor*) Oil as a Nutraceutical Ingredient. *Foods*. 2024 Nov 29;13(23):3867. doi:10.3390/foods13233867
24. Frankel EN. Lipid oxidation. *Progress in Lipid Research*. 1980 Jan;19(1–2):1–22. doi:10.1016/0163-7827(80)90006-5
25. Vieira SA, Zhang G, Decker EA. Biological Implications of Lipid Oxidation Products. *J Americ Oil Chem Soc*. 2017 Mar;94(3):339–51. doi:10.1007/s11746-017-2958-2
26. Choi JY, Park MK, Cho IH. Evolution of oxidation markers and rancid off-flavors in *Tenebrio molitor* mealworm oil during thermal oxidation. *Food Sci Biotechnol*. 2025 Dec;34(16):3829–47. doi:10.1007/s10068-025-01999-5
27. Zhang F, Li X, Zhao Z, Kong B, Cao C, Zhang H, et al. Changes of structural characteristics, functional properties and volatile compounds of *Tenebrio molitor* larvae protein after sustainable

- defatting process: Influence of the different volume ratios of n-hexane to ethanol. *Food Research International*. 2024 Nov;195:114974. doi:10.1016/j.foodres.2024.114974
28. Jajić I, Krstović S, Petrović M, Urošević M, Glamočić D, Samardžić M, et al. Changes in the chemical composition of the yellow mealworm(*Tenebrio molitor* L.) reared on different feedstuffs. *J Anim Feed Sci*. 2022 May 9;31(2):191–200. doi:10.22358/jafs/147848/2022
 29. Rashidi Ilzoleh R, Akmali V. Influence of dietary composition on the nutritional profile and feed conversion efficiency of *Tenebrio molitor*. Raposo A, editor. *PLoS One*. 2025 Jul 10;20(7):e0325262. doi:10.1371/journal.pone.0325262
 30. Rumbos CI, Karapanagiotidis IT, Mente E, Psoufakis P, Athanassiou CG. Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor*. *Sci Rep*. 2020 Jul 8;10(1):11224. doi:10.1038/s41598-020-67363-1
 31. Adámková A, Mlček J, Adámek M, Borkovcová M, Bednářová M, Hlobilová V, et al. *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae)—Optimization of Rearing Conditions to Obtain Desired Nutritional Values. Athanassiou C, editor. *Journal of Insect Science*. 2020 Sep 1;20(5):24. doi:10.1093/jisesa/ieaa100
 32. López-Gámez G, del Pino-García R, López-Bascón MA, Verardo V. Improving *Tenebrio molitor* Growth and Nutritional Value through Vegetable Waste Supplementation. *Foods*. 2024 Feb 16;13(4):594. doi:10.3390/foods13040594
 33. Rovai D, Ortgies M, Amin S, Kuwahara S, Schwartz G, Lesniasauskas R, et al. Utilization of Carrot Pomace to Grow Mealworm Larvae (*Tenebrio molitor*). *Sustainability*. 2021 Aug 20;13(16):9341. doi:10.3390/su13169341
 34. Kotsou K, Chatzimitakos T, Athanasiadis V, Bozinou E, Adamaki-Sotiraki C, Rumbos CI, et al. Waste Orange Peels as a Feed Additive for the Enhancement of the Nutritional Value of *Tenebrio molitor*. *Foods*. 2023 Feb 12;12(4):783. doi:10.3390/foods12040783
 35. Kolawole UK, Lee KJ, Kim IH. Dietary Inclusion Effects of Dried Mealworm, Hydrolyzed Mealworm, Fermented Poultry By-Product, and Hydrolyzed Fish Soluble Protein on Weaning Pigs' Performance, Fecal Score, and Blood Profiles. *Animals*. 2025 May 22;15(11):1507. doi:10.3390/ani15111507
 36. Ko H, Kim Y, Kim J. The produced mealworm meal through organic wastes as a sustainable protein source for weanling pigs. *J Anim Sci Technol*. 2020 May;62(3):365–73. doi:10.5187/jast.2020.62.3.365
 37. Pereira JC, da Silva ARA, Rossiti BCO, da Silva ER, da Silva LGR, Evangelista MZ, et al. Insect Meal (*Tenebrio molitor*) Has High Nutrient Digestibility for Newly Weaned Piglets. *Animal Science Journal*. 2025 Jan;96(1):e70036. doi:10.1111/asj.70036

38. Cho KH, Sampath V, Kim AJ, Yoo JS, Kim IH. Evaluation of full-fatted and hydrolysate mealworm (*Tenebrio molitor*) larvae as a substitute for spray-dried plasma protein diet in weaning pigs. *Animal Physiology Nutrition*. 2023 Mar;107(2):589–97. doi:10.1111/jpn.13763
39. Elieh Ali Komi D, Sharma L, Dela Cruz CS. Chitin and Its Effects on Inflammatory and Immune Responses. *Clinic Rev Allerg Immunol*. 2018 Apr;54(2):213–23. doi:10.1007/s12016-017-8600-0
40. Zacharis C, Bonos E, Giannenas I, Skoufos I, Tzora A, Voidarou C (Chrysa), et al. Utilization of *Tenebrio molitor* Larvae Reared with Different Substrates as Feed Ingredients in Growing Pigs. *Veterinary Sciences*. 2023 Jun 9;10(6):393. doi:10.3390/vetsci10060393
41. Ferri I, Dell’Anno M, Quiese A, Castiglioni B, Cremonesi P, Biscarini F, et al. Microbiota modulation by the inclusion of *Tenebrio molitor* larvae as alternative to fermented soy protein concentrate in growing pigs diet. *Vet Res Commun*. 2025 Feb;49(1):26. doi:10.1007/s11259-024-10588-6
42. Meyer S, Gessner DK, Braune MS, Friedhoff T, Most E, Höring M, et al. Comprehensive evaluation of the metabolic effects of insect meal from *Tenebrio molitor* L. in growing pigs by transcriptomics, metabolomics and lipidomics. *J Animal Sci Biotechnol*. 2020 Dec;11(1):20. doi:10.1186/s40104-020-0425-7
43. Meyer S, Gessner DK, Maheshwari G, Röhrig J, Friedhoff T, Most E, et al. *Tenebrio molitor* Larvae Meal Affects the Cecal Microbiota of Growing Pigs. *Animals*. 2020 Jul 7;10(7):1151. doi:10.3390/ani10071151
44. Ringseis R, Peter L, Gessner DK, Meyer S, Most E, Eder K. Effect of *Tenebrio molitor* larvae meal on the antioxidant status and stress response pathways in tissues of growing pigs. *Archives of Animal Nutrition*. 2021 Jul 4;75(4):237–50. doi:10.1080/1745039X.2021.1950106
45. Sedgh-Gooya S, Torki M, Darbemamieh M, Khamisabadi H, Karimi Torshizi MA, Abdolmohamadi A. Yellow mealworm, *Tenebrio molitor* (Col: Tenebrionidae), larvae powder as dietary protein sources for broiler chickens: Effects on growth performance, carcass traits, selected intestinal microbiota and blood parameters. *Animal Physiology Nutrition*. 2021 Jan;105(1):119–28. doi:10.1111/jpn.13434
46. Andrade JMM, Pereira RT, de Paula VRC, Moreira Junior H, Menten JFM. *Tenebrio* meal as a functional ingredient modulates immune response and improves growth performance of broiler chickens. *Journal of Applied Poultry Research*. 2023 Jun;32(2):100346. doi:10.1016/j.japr.2023.100346
47. Nascimento Filho MA, Pereira RT, Oliveira ABS de, Suckeveris D, Burin Junior AM, Mastrangelo T de A, et al. Cafeteria-Type Feeding of Chickens Indicates a Preference for Insect (*Tenebrio molitor*) Larvae Meal. *Animals*. 2020 Apr 6;10(4):627. doi:10.3390/ani10040627

- 536 48. Nascimento Filho MA, Pereira RT, Oliveira ABS, Suckeveris D, Burin Junior AM, Soares CAP,
537 et al. Nutritional value of *Tenebrio molitor* larvae meal for broiler chickens: metabolizable
538 energy and standardized ileal amino acid digestibility. *Journal of Applied Poultry Research*. 2021
539 Mar;30(1):100102. doi:10.1016/j.japr.2020.10.001
- 540 49. Parlar M, Ustundag AO. Effects of adding mealworm (*Tenebrio molitor* L.) as a replacement for
541 fish meal to broiler chicken diet on performance, carcass parameters, meat quality and nutrient
542 digestibility. *Trop Anim Health Prod*. 2024 Nov;56(8):386. doi:10.1007/s11250-024-04230-5
- 543 50. Pereira AP, Murakami AE, Stefanello C, Iwaki LCV, Santos TC. Productive performance, bone
544 characteristics, and intestinal morphology of laying hens fed diets formulated with L-glutamic
545 acid. *Poultry Science*. 2019 Jun;98(6):2500–8. doi:10.3382/ps/pey595
- 546 51. Radanović A, Kralik G, Drenjančević I, Galović O, Košević M, Kralik Z. n-3 PUFA Enriched
547 Eggs as a Source of Valuable Bioactive Substances. *Foods*. 2023 Nov 22;12(23):4202.
548 doi:10.3390/foods12234202
- 549 52. Kim DH, Kim DH, Park HW, Kim JK, Kim SW, Kim TW, et al. Egg quality characteristics of
550 layer chickens reared with *Tenebrio molitor* larvae. *J Life Sci*. 2020;30(10):860-866.
551 doi:10.5352/JLS.2020.30.10.860.
- 552 53. National Research Council. Nutrient requirements of swine: eleventh revised edition.
553 Washington, DC: The National Academies Press; 2012. doi:10.17226/13298.
- 554 54. Jajic I, Popovic A, Urosevic M, Krstovic S, Petrovic M, Guljas D, et al. Fatty and amino acid
555 profile of mealworm larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Bio Anim Husb*. 2020;36(2):167–80.
556 doi:10.2298/BAH2002167J

558

Tables and Figures

Table 1. Proximate composition of *Tenebrio molitor*

state	larve				dry						
	After the third moult	Before pupa- tion	Pupa e	Adult	Pre- molt	Moul- t	Cutic- le	Pupa e	Powd- er	Fish meal	Soyb- ean meal
DM					40.15	39.13	97.5	37.12	97.02	93.7	89.98
Crude protein	59.19	48.61	45.15	39.59	44.18	43.97	53.4	44	53.81	63.28	47.73
Crude Fat	30.41	35.9	36.63	13.31	39.38	39.29	12.2	38.25	28.03	9.71	1.52
Crude fiber					10.53	10.82	19.8	11.9	7.53	0.24	3.89
Ash					3.66	3.65	9.8	3.62	6.99	16.07	6.27
Chitin	7.19	9.93	9.54	11.79	23.82	23.65	35.6	23.42	5.6		
Ca	1.99	2.93	2.71	2.72					3.5	4.28	0.33
Referen- ces	[15]	[15]	[15]	[15]	[16]	[16]	[16]	[16]	[17]	[53]	[53]

559

560

Table 2. Amino acid composition of *Tenebrio molitor*

state	After the third molt	Larve Before pupation	Pupae	Adult	Adult	Powder Larve	Fish meal	Soybean meal
NEAA								
Ala	5.22	4.64	4.43	3.62	3.24	4.99	3.93	2.06
Asp	5.51	5.01	4.85	4.11	3.97	6.12	5.41	5.41
Cys	0.77	0.55	0.46	0.32	0.43	0.57	0.61	0.7
Glu	6.99	6.57	6.04	5.37	0.93	8.68	7.88	8.54
Gly	2.98	2.61	2.42	1.97	2.52	3.5	4.71	1.99
Pro	4.91	4.04	3.51	3.14	3.23	5.75	2.89	2.53
Ser	2.69	2.34	2.09	1.68	2.16	3.12	2.43	2.36
Tyr	4.13	3.5	3.06	2.87		2.81	1.88	1.59
EAA								
Arg	4.1	3.33	2.93	2.15	2.59	3.44	3.84	3.45
His	2.99	2.24	1.9	1.64	1.45	1.81	1.44	1.28
Lys	3.33	3.23	3.15	3.04	2.75	3.49	4.56	2.96
Thr	3.05	2.15	2.03	1.91	1.9	2.81	2.58	1.86
Ile	2.75	1.97	1.61	1.32	2.8	2.86	2.56	2.14
Leu	3.59	2.97	2.21	1.91	3.93	5.12	4.47	3.62
Met	0.98	0.59	0.44	0.32	0.66	0.81	1.73	0.66
Phe	2.44	1.88	1.53	1.23	1.75	2.42	2.47	2.4
Trp	0.45	0.26	0.19	0.14		0.79	0.63	0.66
Val	3.95	3.44	3.21	2.54	2.97	3.98	3.06	2.23
EAAI	88.16	80.62	72.77	68.66				
References	[15]	[15]	[15]	[15]	[17]	[42]	[53]	[53]

561
562

Table 3. Proximate composition of *Tenebrio molitor* according to processing and drying methods

State	Undried	Freeze-dried	Freeze-dried	Rack oven dried	Rack oven dried	Sun-dried	High-frequency dried	Infrared dried	Microwave dried	Blanch dried powder	Blanch dried partially defatted dried powder
DM	40.47	91.05	94.53	93.33	92.13	89.44	98.62	97.77	97.33	95.17	95.71
Crude protein	57.57	51.45	55.5	51.51	55.77	50.96	53	57.07	56.77	55.65	64.47
Crude Fat	26.8		28.43		28.83		23.07	27.47	27.47	15.92	10.24
Crude fiber		6.04		6.11		6.2					
Ash	3.9	4.23	3.63	4.15	3.73	4.15	3.67	3.47	3.67	2.98	2.56
Chitin										8.08	6.74
Ca											
References	[18]	[19]	[18]	[19]	[18]	[19]	[18]	[18]	[18]	[20]	[20]

563
564

Table 4. Amino acid composition of *Tenebrio molitor* according to processing and drying methods

State	Rack Oven dried	Sun-dried	Freeze- dried	Full-fat	Defatted	Sun-dried after blanching
NEAA						
Ala	4.2	4.23	3.2	8.1	8.1	4.53
Asp	4.87	5.72	3.57	8.4	8.4	4.3
Glu	7.01	8.56	5.54	13	13.2	6.44
Gly	2.91	2.91	2.55	5.3	5.3	3.67
Pro	5.36	5.2	4.91	5.2	5.4	2.67
Ser	2.53	2.8	2.01	4.8	4.8	2.38
Tyr				7.3	7.6	3.86
EAA						
Arg	2.6	3.17	2.71	5.7	5.7	3.6
His	1.27	1.6	1.6	3.1	2.9	
Lys	3.95	4.4	2.55	5.1	5.1	2.67
Thr	2.56	2.77	1.90	4.8	4.3	1.47
Ile	2.44	2.51	2.13	4.5	4.5	4.12
Leu	3.6	3.84	3.56	7.5	7.5	2.96
Met	0.8	0.76	0.6	0.5	1.2	1.76
Phe	3.57	3.46	2.295	3.9	3.9	3.06
Val	3.4	4.65	3	6.4	6.4	0.65
EAAI				93.5	94.1	
References	[19]	[19]	[19]	[21]	[21]	[54]

565
566

Table 5. Fatty acid composition of *Tenebrio molitor* according to processing and drying methods

State	Oil	Oil (average)	Overn dry	Overn dry	Free ze- dried	Free ze- dried	Sun- dried	High - freq uenc y dried	Infra red Dried	Micr owa ve Dried	Sun- dried after blan ching
Lauric (C12:0)	0.3	0.33	0.11	0.34	0.13	0.2	0.14	0.31	0.3	0.26	
Palmitic (C16:0)	15.8	19.2 7	17.6 15	19.7 8	17.3 2	19.9 4	17.6	20.6	10.8 9	17.2 5	4.08
Palmitoleic (C16:1c9)	1.8	1.7	1.15	1.46	1.11	1.47	1.23	1.34	1.77	1.57	
Margaric (C17:0)	0.1	0.13	0.13	4.42	0.20	2.88	0.16	3.48	3.19	3.49	
Stearic acid (C18:0)	2.3	2.89	3.01	3.45	3.05	4.48	2.94	8	3.39	2.18	0.56
Oleic (C18:1C9)		36.8 1	36.7 5	36.7 8	35.5	32.8 2	36.1 4	40.7 3	36.8 2	43.7 6	10.2 9
Linolelaidic (C18:2t9, 12 (n-6)		32.4 4	0.03		0.03		0.02				
Linoleic (C18:2c9,12 (n-6)		0.06	36.7 5	31.9 1	38.4 4	35.8 9	37.2 1	25.5 4	41.2 7	30.1 8	7.51
Arachidic (C20:0)	0.1	0.02	0.07	0.34	0.06	0.23	0.06		0.22	0.17	
α -Linolenic (C18:3c9,12, 15(n-3)	44.5		1.67		1.52		1.54				0.27
Total Saturated Fatty Acids (SFA)	22.6	25.8 1	23.1	28.7 4	23.2 2	28.3 5	23.4 5	32.3 8	18.3 4	23.4 8	
Total Mono Unsaturated Fatty Acids (MUFA)	46.2	40.2 6	38.2 1	38.2 4	36.6 2	34.2 9	37.5 4	42.0 7	38.5 9	45.3 3	
Total Poly Unsaturated Fatty Acids (PUFA)	19.8	33.9 4	37.7 1	33.0 2	40.1 1	37.3 6	38.8 3	25.5 4	43.0 7	31.1 9	
PUFA: SFA <i>n</i> -6/ <i>n</i> -3	0.9 47	1.32 22:0 1	1.64 21.5 5	1.15	1.71 24.6 7	1.2	1.63 23.6 4	0.78	2.35	1.33	
References	[21]	[23]	[19]	[18]	[19]	[18]	[19]	[18]	[18]	[18]	[54]