

1  
2  
3

## 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
<b>Article Type</b>	Review article
<b>Article Title (English; within 20 words without abbreviations)</b>	Dietary fiber: classification, functional definition, and its role in modulating nutrient digestibility and gut health in growing pigs
<b>Article Title (Korean; English paper can be omitted)</b>	식이섬유의 분류 및 기능적 정의와 육성돈에서의 영양소 소화율 및 장 건강 조절에 대한 역할
<b>Running Title (English; within 10 words)</b>	Dietary fiber in nutrient utilization and gut health of pig
<b>Author (English)</b>	JaEun Goo
<b>Affiliation (English)</b>	<i>Department of Agricultural Science, Korea National Open University, Seoul 03087, South Korea</i>
<b>Author (Korean; English paper can be omitted)</b>	구자은
<b>Affiliation (Korean; English paper can be omitted)</b>	국립한국방송통신대학교 농업생명과학과
<b>ORCID (for more information, please visit <a href="https://orcid.org">https://orcid.org</a>)</b>	JaEun Goo( <a href="https://orcid.org/0009-0009-0412-7686">https://orcid.org/0009-0009-0412-7686</a> )
<b>Competing interests</b>	No potential conflict of interest relevant to this article was reported.
<b>Funding sources</b> State funding sources (grants, funding sources, equipment, and supplies). Include name and number of grant if available.	This manuscript has not received any funding.
<b>Acknowledgements</b>	Not applicable.
<b>Availability of data and material</b>	Upon reasonable request, the datasets of this study can be available from the corresponding author.
<b>Authors' contributions</b> Please specify the authors' role using this form.	Conceptualization: JaEun Goo, GeonIl Lee Data curation: JaEun Goo Formal analysis: Methodology: Software: Validation: GeonIl Lee Investigation: JaEun Goo Writing - original draft: JaEun Goo Writing - review & editing: GeonIl Lee
<b>Ethics approval and consent to participate</b>	This article does not require IRB/IACUC approval because there are no human and animal participants.

4  
5  
6  
7

8  
9

**CORRESPONDING AUTHOR CONTACT INFORMATION**

<b>For the corresponding author (responsible for correspondence, proofreading, and reprints)</b>	<b>Fill in information in each box below</b>
First name, middle initial, last name	GeonIl Lee
Email address – this is where your proofs will be sent	gilee@mail.knou.ac.kr
Secondary Email address	
Address	86, Daehak-ro, Jongno-gu, Seoul, Republic of Korea
Cell phone number	010-2707-1249
Office phone number	02-3668-4636
Fax number	02-3673-2381

10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29

Accepted

30 **식이섬유의 분류 및 기능적 정의와 육성돈에서의 영양소**  
31 **소화율 및 장 건강 조절에 대한 역할**

32 구자은, 이건일\*

33

34 **Dietary fiber: classification, functional definition, and its role**  
35 **in modulating nutrient digestibility and gut health in growing**  
36 **pigs**

37 JaEun Goo, Geonll Lee\*

38

39 국립 한국방송통신대학교 농업생명과학과

40 Department of Agricultural Science, Korea National Open University, Seoul 03087,  
41 South Korea

42

43 \*Corresponding author: Geonll Lee, Department of Agricultural Science, Korea National  
44 Open University, Seoul 03087, Korea Tel: 02-3668-4636 E-mail: gilee@mail.knou.ac.kr

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61 **Abstract**

62 Dietary fiber (DF) was traditionally classified as an anti-nutritional factor (ANF) due to its  
63 negative effects on digesta viscosity, nutrient digestibility, and endogenous nutrient losses. In  
64 recent years, however, this perspective has been increasingly re-evaluated and refined in light  
65 of emerging evidence underscoring the physiological and health-promoting roles of DF. In  
66 response to these emerging trends, DF has been considered as a critical nutritional component  
67 in swine diets, particularly in light of advances in molecular nutrition, gut microbiome research,  
68 and the characterization of fiber-degrading enzymes. Dietary fiber is an essential component  
69 of growing pig diets, which maintains normal physiological functions of the gastrointestinal  
70 tract (GIT), including mucosal integrity and microbial ecology. Besides, the physiological  
71 functions of DF, including its effects on digestibility and gut modulation, are significantly  
72 influenced by its chemical composition and structural features. In the swine diets, DF  
73 modulates the gut microbiota, promoting fermentative activity, which in turn stimulates the  
74 proliferation of beneficial bacteria in the GIT. However, the efficacy of DF might be constrained  
75 by the underdeveloped fiber-degrading capacity observed in young pigs, which is linked to  
76 immature gut morphology and reduced microbial diversity compared to that of adult sow.  
77 These physiological limitations, combined with the commercial swine industry's reliance on  
78 traditional cereal-based diets and increasingly restricted regulations on antibiotic use, present  
79 significant challenges for optimizing gut health and nutrient utilization in growing pigs. In this  
80 review, varying types and levels of dietary fiber in feed represent promising candidates as  
81 effective alternatives to antibiotics in swine nutrition. But there remains a paucity of systematic  
82 investigations into the roles of the physicochemical properties of dietary fiber—namely  
83 solubility, viscosity, and fermentability—within swine diets, as well as their impact on nutrient  
84 metabolism and gut microbiota composition in growing pigs. Accordingly, this review  
85 summarizes current knowledge on the nutritional digestibility and gut health regulation  
86 associated with DF supplementation in growing pigs, with particular emphasis on its  
87 physiological effects and limitations.

88

89 **Keywords**

90 dietary fiber; growing pig; digestibility; fermentation; gut health

91

92

93

94

96 **서론**

97 최근 분자영양학 및 장내 미생물 분야의 기술 발전과 섬유소 분해 효소제의 개발이  
 98 이루어지면서 사료 내 식이섬유(dietary fiber)가 돼지의 영양소 흡수 조절, 장 건강 개선 및  
 99 생산성 향상에 기여할 수 있는 핵심 영양소로 재조명되고 있다. 이에 따라, 육성돈의  
 100 사양관리 측면에서 식이섬유는 포만감 유도 및 변비 개선 효과를 넘어, 식이섬유의  
 101 이화학적 특성과 생리적 기능 간 연관성 연구에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다.  
 102 식이섬유 원료 및 특정 성분은 사료, 식품, 의약품, 생명공학 등 다양한 분야에서 활용되며,  
 103 다양한 구조적 특성을 가지고 있다. 이러한 성분의 구조적·화학적 특성이 생체 내에서  
 104 나타내는 작용 기전을 규명하는 것은 동물의 건강 증진 및 질병 예방에 미치는 효과를  
 105 과학적으로 입증하고 실용화하는 데 중요한 초석이 된다[1].

106 20 세기 후반까지 식이섬유는 양돈 영양학에서 주로 영양소의 소화 및 흡수를 저해하는  
 107 항영양인자(anti-nutritional factor, ANF)로 간주되어 왔다[2, 3]. 그러나, 식이섬유는 돼지의  
 108 정상적인 소화 생리 유지를 위해서 필수적인 요소이며, 육성돈의 생산성과 건강에 다양한  
 109 생리학적 이점을 제공하는 것으로 확인되고 있다[1, 3]. 육성돈 사료의 건물(dry matter, DM)  
 110 중 약 60~70%를 차지하는 주요 에너지원인 탄수화물은 돼지의 모든 사양 단계에서 성장  
 111 촉진과 에너지 대사 조절의 핵심적인 역할을 수행한다. 일반적으로 탄소(C), 수소(H),  
 112 산소(O)가  $C_nH_{2n}O_n$  의 비율로 이루어진 탄수화물은 단량체의 중합도(degree of  
 113 polymerization, DP) 및 구조에 따라 물리화학적 특성이 결정되고, 육성돈의 생리작용에  
 114 다양한 영향을 미치게 된다. 이러한 탄수화물은 단당류(monosaccharides),  
 115 이당류(disaccharides)와 같은 단순 당류부터 올리고당류(oligosaccharides),  
 116 다당류(polysaccharides), 그리고 식물 세포벽을 구성하는 복합 고분자 형태를 포함하여  
 117 다양한 화학적 형태로 존재하며, 돼지 체내에서 각기 고유한 생리적 기능을 수행한다.

118 최근에 이르러 식이섬유의 주요 성분인 비전분성 다당류(non-starch polysaccharides,  
 119 NSP)는 대장 내 미생물 발효를 통해 SCFA 를 생성하여 장내 환경 개선, 병원성 세균 증식  
 120 억제, 장점막 기능 강화 및 면역 반응 조절 등의 긍정적인 생리적 효과가 속속 밝혀지고  
 121 있다. 이러한 기능성 측면에서 NSP 를 포함한 식이섬유가 돼지의 영양소 이용 효율 향상, 장  
 122 건강 개선 및 면역력 증진에 기여할 수 있는 영양학적 요소로 주목받고 있으나, 식이섬유의  
 123 이화학적 특성과 이에 따른 생리적 기능 간의 연관성에 대한 체계적인 분석이 미흡한  
 124 실정이다. 이에 본 논문은 육성돈을 대상으로 한 식이섬유 급여가 영양소 소화율 및 장  
 125 건강 조절 등에 미치는 영향을 중심으로 주요 선행 연구들을 고찰하고, 관련 연구 동향을  
 126 정리하고자 한다. 기존 연구는 식이섬유 급여 시 돈육 품질 및 성장성적에 미치는 영향에  
 127 중점을 두고 있어 돼지를 대상으로 한 영양소 소화율과 장건강에 대한 실증적 연구는 여전히  
 128 제한적이다. 또한, 전통적인 식이섬유 분석법인 조섬유 분석법(crude fiber analysis) 또는

129 반소이스트 분석법(Van Soest method)은 식이섬유의 복잡한 구조와 생리학적 기능이 돼지의  
130 장내에 미칠 수 있는 영향을 규명하는 데 한계가 있다. 본 고찰은 식이섬유의 이화학적  
131 특성과 장내 기능 간의 상호작용에 대한 과학적 근거를 통합적으로 제시함으로써 돼지의 장  
132 건강과 생산성 향상을 도모하고, 나아가 국내 양돈 산업 및 기업측면에서 주요  
133 이론적·실무적 근거를 제시하고자 한다.

134

### 135 1. 탄수화물과 식이섬유의 화학적 분류

136 18세기 중반에 확립된 조섬유 분석법은 식물성 성분 중 소화가 어려운 일부 성분만을 측  
137 정하기 때문에 식이섬유의 복합적인 구조와 생리학적 기능을 충분히 설명하지 못하는 한계  
138 가 있다(Figure 1). 이와 같은 한계를 보완하기 위해 Van Soest(1967)는 중성세제 용액을 이용  
139 하여 셀룰로스(cellulose), 헤미셀룰로스(hemicellulose), 리그닌(lignin) 등 주요 세포벽 성분을  
140 분리 및 분석할 수 있는 반소이스트(Van Soest) 분석법을 개발하였다. 이를 통해 조섬유 분석  
141 법의 한계를 부분적으로 극복하는 데 기여하였으나, 중성세제섬유(neutral detergent fiber,  
142 NDF) 분석 과정에서 수용성 식이섬유와 불용성 펙틴 물질 등의 성분이 손실되어 대장 내 미  
143 생물 발효 특성에 대한 평가나 장 건강 관련 연구에 중요한 변수를 반영하지 못하는 제약이  
144 존재한다[4]. 산성세제섬유(acid detergent fiber, ADF) 분석법은 헤미셀룰로스를 제거하여 셀룰  
145 로스와 리그닌 함량을 측정하는 데 목표를 두고 있다. 그러나, 수용성 식이섬유 및 펙틴  
146 (pectin)과 같은 일부 섬유질 성분이 포함하지 않거나 용해되어 제거됨으로써 실제 섬유질  
147 함량과 생리적 기능을 평가하는 데에 한계가 존재한다[4, 5]. 또한, ADF 분석에서 얻어지는 잔  
148 여물에는 실리카(silica)와 같은 무기물이 포함될 수 있어 섬유질 함량의 과대평가 및 사료 소  
149 화율 산정 시 오차를 유발할 가능성에 유의해야 한다[6-8].

150 1953년 Hipsley에 의해 최초로 제안된 식이섬유(dietary fiber, DF) 개념은 세포벽 유래의  
151 비소화성 성분을 지칭하기 위해 도입되었으며, 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 그리고 리그닌을 포  
152 함한다. 1970년대 Trowell과 Burkitt 등은 이 용어를 채택하여 인간의 소화효소에 의해 가수  
153 분해되지 않는 식물 성분의 잔여물인 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 리그닌, 그리고 왁스(wax), 큐  
154 틴(cutin), 수베린(suberin) 등을 포함하는 물질을 식이섬유로 지칭하였다. 이들은 식이섬유가  
155 소장에서 소화되지 않고 대장까지 도달하는 생리학적 특성에 주목하여 식이섬유 섭취가 대  
156 장암 및 심혈관질환 발병률 간의 반비례관계를 가진다는 '식이섬유 가설'을 제시하며 식이섬  
157 유와 건강 간의 연관성에 대한 과학적 관심을 증가시켰다. 이후, 2009년 CODEX Alimentarius  
158 Commission(CAC)에 의해 식이섬유의 정의가 공식적으로 채택되면서 생리적 기능을 강조하  
159 며 현재까지 사용되고 있다. CODEX는 식이섬유 분석 격차를 해소하기 위해 총 식이섬유  
160 (total dietary fiber, TDF)를 '인간 소장에서 내인성 효소에 의해 가수분해되지 않는 10개 이상  
161 의 단량체로 구성된 탄수화물 중합체'로 재정의하였으며, DP 3~9 성분의 포함 여부는 국가  
162 별 재량으로 허용하였다. 이를 반영하여 AOAC 2009.01 및 2011.25와 같은 분석법을 통해  
163 수용성 및 불용성 식이섬유를 측정할 수 있다[9-11].

164 사료 내 탄수화물 성분은 중합도에 따라 크게 저분자(low molecular weight, LMW)와 고분  
165 자(high molecular weight, HMW) 탄수화물로 구분된다. 저분자 탄수화물에는 1~2개의 단당  
166 류로 이루어진 단당류와 이당류, 3~9개의 단당류가 짧은 사슬 구조로 연결된 올리고당이 해  
167 당된다. 고분자 탄수화물인 다당류는 10개 이상의 단당류가 중합된 고분자 구조를 가지며,  
168 전분(starch), 저항성 전분(resistant starch, RS), 프룩탄(fructan), NSP 등으로 분류된다. 비전분  
169 성 다당류는 다시 수용성과 화학적 구조에 따라 셀룰로스와 비셀룰로스 다당류(non-  
170 cellulosic polysaccharides, NCP)로 나뉘고, NCP는 수용성에 따라 수용성 NCP(soluble NCP, S-  
171 NCP)와 불용성 NCP(insoluble NCP, I-NCP)로 분류할 수 있다. 탄수화물의 주요 구성성분이자  
172 육성돈의 주요 에너지원인 전분은 소장에서 쉽게 소화되어 회장 소화율이 90~98%에 이르  
173 는 반면, 소장에서 소화되지 않는 전분을 RS로 분류한다. 한편, 리그닌은 탄수화물에 해당하  
174 지는 않으나 구조적 다당류와 함께 식물 세포벽의 주요 구성성분으로 작용하며, 식물 조직  
175 의 구조적 안정성을 유지하는 고분자화합물로서 식이섬유에 포함된다. 섬유질(fiber)은 식이  
176 섬유질의 하위 개념으로 간주되며, 주로 S-NCP, I-NCP, 셀룰로스, 리그닌을 포함하는 보다 제한  
177 적인 범위를 지칭한다(Figure 2). 이러한 분류를 기반으로, 식이섬유는 고유한 물리화학적 특  
178 성과 생리학적 기능을 나타내며[12, 13], 분자 구성성분 및 구조, 수용성에 따른 용해도, 장내  
179 미생물 발효율, 수분 보수력(water binding capacity, WBC) 및 점도 등의 다차원적 기준에 근  
180 거하여 체계적으로 분류할 수 있다.

181

### 182 1.1 식이섬유의 분자 구성성분에 따른 분류 및 구조적 특성

183 식이섬유는 단일 성분이 아니라 다양한 식물성 성분 및 비탄수화물 성분 등이 복합적으로  
184 결합되어 있다. 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 펙틴 등과 같은 NSP 와 리그닌이 주요 식이섬유로  
185 분류되며, 이외에도 RS, 이눌린(inulin), 올리고당, 그리고  $\beta$ -글루칸( $\beta$ -glucan) 등 다양한  
186 성분이 포함될 수 있다. 또한, 결합형태에 따라 선형(linear)과 분지(branched) 구조로 분류할  
187 수 있다. 일직선상으로 연결된 단순한 형태인 선형 구조와는 달리, 분지 구조는 주사슬에서  
188 가지가 뻗어 나온 복잡한 형태를 가지고 있다. 이러한 구조적 차이는 육성돈의 소화, 흡수,  
189 장내 미생물 조절, 그리고 전반적인 생리작용에 서로 다른 영향을 미치게 된다[14]. 곡류의  
190 주요 세포벽 식이섬유인 아라비노자일란(arabinoxylan)은  $\beta$ -(1,4)-결합된 D-자일로스(xylose)  
191 골격에  $\alpha$ -L-아라비노실(arabinosyl) 잔기가 단일 또는 이중으로 치환된 구조를 가지며,  
192 아라비노스(arabinose)와 자일로스의 비율(A:X)에 따라 수용성 또는 불용성 특성이 결정된다.  
193 일반적으로 A:X 비율이 높을수록 곁가지가 많아져 분지된 분자 구조를 형성하고 수용성을  
194 나타내며, A:X 비율이 낮을수록 곁가지가 적은 선형 구조로 인해 불용성을 나타낼 가능성이  
195 높다.  $\beta$ -글루칸은 보리와 귀리의 배유 세포벽에서 주로 발견되는 NSP 로  $\beta$ -D-글루코스  
196 단위가  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) 및  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3) 결합으로 교차 연결되어 있다. 이와 같이 긴 직선 사슬과 짧은  
197 곁가지가 혼합된 분자 골격을 형성하는  $\beta$ -글루칸은 높은 수용성을 보이며, 소화관 내  
198 점도를 증가시켜 소화 효소와 영양소의 상호작용을 제한하여 영양소 흡수율을 감소시킬 수

199 있다.  $\beta$ -글루칸의  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 3) 결합이 많을수록 수용성이 증가하고,  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4) 결합이 많아지면  
200 분자 간 수소결합이 강화되어 불용성에 가까워진다[15, 16]. 펙틴은 D-  
201 갈락투론산(galacturonic acid)이  $\alpha$ -(1 $\rightarrow$ 4) 글리코시드 결합으로 연결된 선형 구조의 기본  
202 골격 호모갈락투로난(homogalacturonan, HG)에 L-람노스(rhamnose)와 다양한  
203 중성당(아라비노스, 갈락토스 등)으로 이루어진 곁가지가 부착된 고도로 분지된  
204 구조(rhamnagalacturonan I, II 등)를 형성한 다당류이다. 메틸 에스터화 정도(degree of  
205 methylation), 분자량, 곁가지 구조 등에 따라 용해도와 겔(gel) 형성 특성이 달라지며,  
206 일반적으로 메틸 에스터화 정도가 낮고 곁가지가 많을수록 용해성이 증가한다. 이러한  
207 이화학적 특성은 돼지 소화물의 점도, WBC 및 대장 내 발효 위치 및 속도에 영향을 미칠  
208 수 있다.

209 저항성 전분은 원료와 특성에 따라 RS1, RS2, RS3, RS4, 그리고 RS5 로 나뉜다. RS1 은  
210 세포벽 및 단백질 매트릭스 내에 물리적으로 갇혀 있어 소화효소의 작용을 받지 않지만,  
211 분쇄나 가공과정에서 세포벽이 파괴될 경우 소화효소의 접근이 가능해지면서 저항성이  
212 감소할 수 있다. RS2 는 전분 입자의 결정 구조 및 형태적 특성으로 인해 소화효소의 접근이  
213 제한된 전분으로 생감자나 고아밀로스 옥수수 전분에 다량 함유되어 있으며,  $\alpha$ -  
214 아밀레이스( $\alpha$ -amylase)에 의해 서서히 가수분해되는 특성을 가지고 있다. RS3 은 조리 후  
215 냉각 과정에서 재결정화 및 결정화되어 형성되는 비과립 전분 유래 물질로 아밀로스가  
216 치밀하게 재배열되면서 소화효소에 저항성을 갖는 조밀한 구조를 형성한다. RS4 는 화학적  
217 변형 또는 재중합 과정을 거친 전분으로 사용된 전분의 종류와 변형 반응에 따라 소화  
218 저항성의 정도가 달라질 수 있다. RS5 는 아밀로스-지질 복합체 전분(AM-lipid complexed  
219 starch)으로 소화효소에 대한 저항성을 나타내 대장에서 발효되어 단쇄지방산(short-chain  
220 fatty acid, SCFA) 중 부티르산의 생성을 촉진한다. Gerrits 등(2012)에 따르면, 노화 전분  
221 급원의 가소화에너지(digestible energy, DE), 대사에너지(metabolizable energy, ME) 및  
222 정미에너지(net energy, NE)는 효소로 소화 가능한 전분 대비 각각 81%, 89%, 93% 수준이다.  
223 특히 발효 전분의 DE, ME, NE 는 소화성 전분 대비 각각 53%, 73%, 83%로 보고되어 RS 섭취  
224 에너지 기준으로는 각각 57%, 74%, 84%의 효율을 보였다[17]. 이러한 결과는 RS 가 소화  
225 가능한 전분에 비해 소화율은 낮지만, 장내 발효를 통한 최종 대사 단계인 NE 이용 효율은  
226 약 84%에 달하므로 잠재력 있는 에너지원임을 시사한다. 보통의 곡류 원료의 경우, 사료 내  
227 식이섬유의 함량이 높을수록 RS 의 함량도 높아지는 경향을 보일 수 있기에 사료 성분의  
228 정밀한 평가를 바탕으로 적정 수준의 RS 를 포함하여 사료를 설계해야 한다[17].

229 셀룰로스는 지구상에서 가장 풍부한 유기물 기질 중 하나로 대부분의 식물 세포벽에  
230 존재한다. 이는 식물의 종류에 따라 전체 구성 성분의 약 10~40%를 차지하는 것으로  
231 보고된다. 불용성 식이섬유(insoluble dietary fiber, IDF)의 주요 성분인 셀룰로스는  $\beta$ -1,4-  
232 글루코시드 결합으로 이루어진 선형 구조를 가지고 있으며, 장내 미생물에 의해 분해될 시  
233 포도당(glucose)과 SCFA 를 생성한다. 셀룰로스와 함께 구조 탄수화물에 속하는

234 헤미셀룰로스는  $\beta$ -1,4-글루코시드 결합을 가지는 비결정성 다당류로, 분지된 선형 구조의  
235 자일로스, 만노스(mannose), 갈락토스(galactose), 아라비노스, 글루쿠론산(glucuronic acid) 등  
236 다양한 당 잔기로 구성되어 있다.

237

## 238 1.2 식이섬유의 이화학적 특성

239 생리활성 기능을 지닌 생체분자인 식이섬유는 주로 식물성 세포벽, 리그닌, 단백질,  
240 지방산, 왁스 등과 결합된 NSP 로 구성되어 있으며[2, 18], 화학적 구조에 따라  
241 용해도(solubility), 점도(viscosity), WBC, 발효성(fermentability) 등 다양한 이화학적 특성이  
242 결정된다. 돼지의  $\alpha$ -아밀레이스 및 췌장 아밀레이스(pancreatic amylase)와 같은 소화효소의  
243 기질 특이성에 따라 탄수화물은 소화성 탄수화물(digestible carbohydrates)과 비소화성  
244 탄수화물(non-digestible carbohydrates, NDC)로 분류할 수 있다. 비소화성 탄수화물은  
245 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 펙틴 등의 구조적 다당류와 리그닌과 같은 비탄수화물성 화합물이  
246 복합적으로 결합된 이질적인 고분자 복합체로 구성되어 있다. 이러한 성분들은 대장에서  
247 미생물군의 발효 기질로 작용하며, 분해 과정에서 생성된 SCFA 가 돼지의 대사 메커니즘에  
248 영향을 미친다.

249 이화학적 특성 중 용해도는 식이섬유의 기능성에 중요한 영향을 미치는 요소로, 용액에  
250 대한 용해 여부에 따라 수용성 식이섬유(soluble dietary fiber, SDF)와 IDF 로 구분할 수  
251 있다(Figure 3)[19]. 수용성 식이섬유와 불용성 식이섬유는 모두 장내 미생물군에 의해  
252 발효되어 분해될 수 있으나, SDF 는 IDF 에 비해 상대적으로 높은 분해 효율과 발효 속도를  
253 나타낸다. 이러한 높은 발효성은 SDF 의 우수한 WBC 에 기인한다. 수용성 식이섬유가 물을  
254 흡수하여 팽창하고 소화물 내 점도를 형성함으로써 소화물 통과 속도(digesta passage  
255 rate)를 감소시키며, 미생물이 섬유 매트릭스 내부로 쉽게 침투하여 분해를 개시할 수 있는  
256 물리적 환경을 조성하기 때문이다[20, 21]. 기능적인 측면에서 SDF 는 장내 통과  
257 시간(intestinal transit time) 증가, 위 배출(gastric emptying) 지연, 포도당 흡수율 감소, 췌장  
258 소화효소의 분비 조절 및 영양소 흡수 속도 저하 등의 생리적 효과를 유도한다. 불용성  
259 식이섬유는 장내 통과 시간을 단축시키고, 장 운동을 촉진하며, WBC 및 분변의 부피를  
260 증가시켜 포만감을 유발하고 배변 활동을 개선할 수 있다.

261 식이섬유의 용해도에 따라 형성된 점도는 돼지의 소화관 내 영양소 소화율과 장 건강에  
262 중요한 영향을 미친다. 특히, 구아검(guar gum), 펙틴과 같은 SDF 에 의해 증가된 소화물  
263 점도는 영양소와 소화효소의 접촉을 제한하여 소화율을 저하시킬 수 있으며, 장내 미생물군  
264 조성 및 장 점막 건강에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 이러한 점도 변화는  
265 식이섬유의 농도와 식이섬유의 이화학적 특성, 그리고 위장관 내 위치 등에 따라 달라질 수  
266 있다[20, 22, 23]. 수용성 식이섬유의 경우 물에 용해되어 겔 또는 점성이 높은 용액을  
267 형성함으로써 사료 자체와 소화관 내 소화물의 점도에 영향을 미치게 된다. 또한, 수용성  
268 식이섬유인  $\beta$ -글루칸을 육성돈 사료에 0~10% 수준으로 첨가했을 때, 위 액체의 체류

269 시간이 유의미하게 증가하였고, 위 및 소장 후반부의 전분 소화율이 각각 6%, 0.3%씩  
270 감소하였으며, 위의 겉보기 단백질 소화율도 3%씩 감소했다.  $\beta$ -글루칸의 첨가 수준이  
271 증가할수록 사료 겉보기 점도(dietary apparent viscosity)는 증가하였으나 위 내 희석 효과로  
272 소화물의 건물 함량이 낮아져 겉보기 소화물 점도는 감소하였다[24].

273

## 274 2. 육성돈의 사료 원료 별 식이섬유 함량

275 육성돈 사료에 사용되는 원료는 탄수화물의 주요 공급원임과 동시에 식이섬유 등과 같은  
276 NDC를 필연적으로 함유하고 있다. 사료 내 식이섬유의 이화학적 특성은 원료의 식물학적  
277 기원, 원료의 입자 크기 및 효소 처리 등 가공 방식에 따라 달라지며, 이에 따라 사료의 영  
278 양학적 가치와 이용률에도 중대한 영향을 미칠 수 있다(Table 1). 곡물과 콩류에 포함된 식이  
279 섬유는 주로 NSP와 RS로 구성되어 있다[25]. 곡물의 세포벽은 주로 셀룰로스 및 헤미셀룰로  
280 스와 같은 중성 다당류로 구성되는 반면, 콩류에서는 셀룰로스 외에도 자일로글루칸  
281 (xyloglucan), 펙틴 등을 함유하고 있으며, 상대적으로 높은 비율의 SDF를 함유하고 있는 것  
282 이 특징이다[26]. 높은 전분 함량으로 육성돈 사료의 주된 에너지원 중 하나인 밀의 TDF는  
283 약 10.23~11.08%이며, 불용성 식이섬유가 약 1.02~1.44%를 차지한다. 밀은 다양한 식이섬  
284 유 성분을 함유하고 있는데, 이 중 곡물 세포벽의 주요 구조 성분인 아라비노자일란이 전체  
285 NSP의 약 70%를 차지하며 가장 풍부한 성분이다[27]. 밀의 겨(bran)에 높은 농도로 존재하  
286 는 아라비노자일란은 전분 및 단백질과 같은 주요 영양소를 캡슐화하여 소화효소의 접근을  
287 방해한다. 돼지 장내에는 이를 분해하는 내인성 효소(endogenous enzymes)가 없어 소장에  
288 서 거의 소화되지 않아 소화율을 저하시킬 수 있다. 또한, 수용성 아라비노자일란은 소화관  
289 내 점도를 증가시켜 소화효소와 기질 간의 접촉을 방해하고 위 비움시간(gastric emptying)  
290 을 지연시켜 영양소 흡수율을 저해할 수 있다. 밀은 옥수수에 비해 전분 및 조지방 함량이  
291 다소 낮은 반면, ADF(3.55%)와 NDF(10.60%) 함량이 높아, 낮은 수용성 식이섬유(1.02%) 함  
292 량으로 인해 대장 발효 효율이 상대적으로 저조한 것으로 평가된다. 옥수수의 총 식이섬유  
293 함량은 약 9.17~9.87%이며, 이 중 IDF(8.49~9.63%)가 SDF(0.39~0.68%)보다 높다[26]. 이러한  
294 높은 불용성 식이섬유 비율은 소화관 내에서 장 내용물의 부피를 증가시키고, 장내 통과 속  
295 도를 증가시킴으로써 영양소의 소화 및 흡수율을 저하시킬 수 있다[28-30]. 또한, 중성세제  
296 섬유 9.11%, 산성세제섬유 2.88%로 회장 소화율이 약 12~15% 감소하는 것으로 나타난다  
297 [31]. 귀리는 곡류 중 식이섬유 함량이 매우 높은 원료로 TDF가 약 33.93%이며, 특히 SDF인  
298  $\beta$ -글루칸이 약 40~60%를 차지한다.  $\beta$ -글루칸은 장 점액 내 점도를 증가시켜 소화물의 이동  
299 을 지연시키고, 소화효소와 영양소의 접촉을 제한할 수 있어 초기 급여 시에는 에너지 및  
300 단백질 소화율이 일시적으로 저하될 수 있다. 육성돈의 주요 단백질원으로 활용되는 대두박  
301 은 TDF가 약 19.1%이며, 가공 방법 및 껍질 함유 여부에 따라 식이섬유 함량이 달라질 수  
302 있다. 대두박에 함유된 식이섬유는 주로 IDF로 구성되어 있으며, 이 중 셀룰로스는 약  
303 5.9~6.33% 함유되어 있다. 이러한 셀룰로스는 단백질과 소화효소 간의 결합을 방해하여 아

304 미노산 소화율을 감소시킬 수 있다. 고식이섬유 사료는 사료 건물 기준으로 식이섬유 함량  
305 이 약 15~20% 수준에 이르며, 그 함량은 원료의 종류, 수확시기, 성숙도 및 기후 조건 등에  
306 따라 달라져 돼지의 영양소 소화율에도 영향을 미치게 된다. 또한, 식이섬유의 용해도는 돼  
307 지의 장내 발효 효율에 직접적인 영향을 미치는 요인이다. 수용성 식이섬유는 장 내용물 점  
308 도를 증가시켜 영양소의 확산 및 흡수를 저해하는 경향이 있는 반면, 불용성 식이섬유는 장  
309 의 연동운동을 자극하여 사료의 장내 체류 시간을 단축시키는 데 기여한다. 특히 리그닌 함  
310 량이 높은 사료 원료는 미생물 분해에 필요한 장내 체류 시간과 발효 에너지 간의 불균형을  
311 초래하여 NE 이용 효율이 감소할 수 있다.

312

### 313 3. 식이섬유의 이용 및 소화

314 육성기의 돼지는 생애에서 가장 빠른 성장과 근육 및 골격 발달이 활발하게 이루어진다.  
315 이 시기의 영양 불균형 및 사양관리 미흡은 성장 정체, 사료효율 저하, 출하 체중 감소 등의  
316 경제적인 문제로 이어질 수 있다. 식이섬유의 활용성은 자돈보다 육성 및 비육돈에서 더  
317 높은 것으로 확인되었으나[32], 육성돈은 성체 돼지에 비해 장내 미생물 다양성이 제한되어  
318 식이섬유 소화율이 낮다. Goff & Noblet (2001)에 따르면, 에너지 및 영양소의 소화율은  
319 모돈에서 육성돈보다 더 높게 나타났으며, NDF 소화율은 각각 모돈에서 64.4%, 육성돈에서  
320 56.3%로 보고되었다[33]. 이러한 차이는 모돈에서 발달된 대장 내 미생물 군집의 우수한  
321 섬유소 분해 능력과 성숙도로 인한 대장 용적 증가에 기인하는 것으로 해석된다[34-36].  
322 이러한 배경으로 식이섬유 소화율을 높이는 방법이 육성돈의 성장률, 사료효율, 그리고 장  
323 건강 증진 등의 핵심 요소로 주목받고 있다. 식물 세포벽의 주요 구성 성분인 식이섬유는  
324 셀룰로스, 헤미셀룰로스, 펙틴 등 다양한 다당류로 이루어져 있으며, 전분과 단백질 같은  
325 영양성분에 소화효소의 접근을 방해하여, 회장 소화율을 약 12~18% 감소시킬 수 있다[37].  
326 예를 들어,  $\beta$ -글루칸과 같은 수용성 식이섬유는 장 내용물 점도를 증가시켜 장내 영양소  
327 확산(단순확산, 촉진확산 등)을 약 20~25% 저해할 수 있다. 이러한 식이섬유의 대장 내  
328 분해는 원료의 유형, 용해도, 리그닌화 정도, 식이 내 함유량, 동물의 무게, 그리고 장내  
329 미생물 군집 구성 등 따라 다양한 요인의 영향을 받으며, 특히 식이섬유의 화학적 구조와  
330 결합 형태에 따라 소화율과 발효 특성이 크게 달라진다[38]. 육성돈은 미숙한 장관 발달로  
331 인해 성체 모돈 대비 에너지 및 조단백, 지방, NDF 와 같은 영양소의 외관상  
332 전장소화율(apparent total tract digestibility, ATTD)이 유의미하게 낮았으며, 사료 내 NDF,  
333 ADF, 조섬유(crude fibre, CF) 함량이 증가할수록 가소화에너지 차이가 커지는 것이  
334 보고되었다[33]. 곡류 부산물에 풍부한 아라비노자일란이나 대두박의 갈락토만난 등은  
335 미생물 효소에 대한 접근성 및 분해 효율에 차이를 보인다. 따라서 식이섬유의 소화율을  
336 높이기 위해서는 원료별 식이섬유 구성에 대한 이해와 함께 효소제 첨가나 사료 가공 기술  
337 등 맞춤형 전략이 필요하다.

338 육성돈의 식이섬유 소화율을 높이기 위해 자일라네이스(xylanase), 셀룰레이스(cellulase),  $\beta$ -  
339 글루카네이스( $\beta$ -glucanase), 만난네이즈(mannanase) 등과 같은 외인성 효소제(exogenous  
340 enzymes)를 첨가하여 회장 및 총 소화관 영양소 소화율을 증가시킴으로써 영양소 이용효율  
341 및 사료효율을 개선할 수 있다[39]. 사료 내 첨가된 외인성 효소제는 헤미셀룰로스 및  
342 아라비노자일란의  $\beta$ -1,4 결합을 분해하여 전분 회장 소화율을 약 18% 개선할 수 있다.  
343 탄수화물 분해효소인 자일라네이스는 식이섬유 중 세포벽 성분인 자일란을 기질로 하여  
344 아라비노자일란의  $\beta$ -1,4-글루코시드 결합을 절단하여 자일로스올리고당과 자일로스,  
345 단당류로 분해하여 장내 미생물에 의해 발효된다. 자일라네이스 첨가로 NSP 인 자일란을  
346 분해함으로써 소화관 내 점도 감소, 영양소 흡수율 증가 등 에너지 이용 효율에 기여할 수  
347 있다.  $\beta$ -글루카네이스는 외인성 효소로써 주로 보리 및 귀리와 같은 곡류의 세포벽에  
348 존재하는  $\beta$ -글루칸의  $\beta$ -1,3 및  $\beta$ -1,4 글리코시드 결합을 가수분해하여 고분자 NSP 인  $\beta$ -  
349 글루칸을 저분자의 올리고당 및 단당류로 분해한다. 이렇게 분해된  $\beta$ -글루칸은 소화관 내  
350 점도를 낮추고, 단백질 및 주요 영양소의 소화율과 흡수율을 개선할 수 있다. 식물 세포벽의  
351 주요 구성성분인 셀룰로스는 포도당 단위가  $\beta$ -1,4-글리코시드 결합을 통해 선형으로 중합된  
352 고분자 다당류로 돼지의 내인성 효소로 거의 분해되지 않는 특성을 지닌다. 셀룰레이스는  
353 단일 효소가 아닌 여러 효소로 구성된 효소군으로 셀룰로스 사슬 내부의  $\beta$ -1,4-글리코시드  
354 결합을 무작위로 절단하여 사슬을 짧게 만드는 엔도글루카네이스(endoglucanase), 셀룰로스  
355 사슬의 비환원 말단에 작용해 포도당 또는 셀로비오스를 생성하는  
356 엑소글루카네이스(exoglucanase), 그리고 셀로비오스 등 올리고당을 포도당으로 분해하는  $\beta$ -  
357 글루카네이스를 총칭한다. 셀룰레이스의 첨가를 통해 사료 중 NDC 의 이용률을 개선하고,  
358 생성된 분해산물은 장내 미생물의 발효 기질로 활용되어 에너지 및 영양소의 이용효율을  
359 증가시킬 수 있다. 더 나아가, 세포벽에 캡슐화된 단백질, 지방, 미네랄 등의 영양소를  
360 방출시켜 회장 소화율 증가에도 기여함으로써 사료 내 영양소의 활용이 개선됨에 따라 평균  
361 일당증체량(average daily gain, ADG)과 사료 요구율(feed conversion ratio, FCR)이 개선되는  
362 결과도 보고되고 있다. 또한, 질소 이용률을 개선하여 분변 내 질소 및 인 배출 감축에도  
363 영향을 미쳐 환경 부하를 조절할 수 있는 가능성이 있다[40]. 기존 연구에서 입증되었듯이  
364 여러 효소를 함께 사용하는 효소 복합제는 단일 효소제에 비해 각 효소 간의 상호작용을  
365 통해 시너지 효과를 발휘할 가능성이 크다.

366

#### 367 4. 식이섬유의 장내 발효 특성

368 식이섬유의 이화학적 구조와 성분은 발효 특성 및 돼지의 영양소 소화 위치와 위장관  
369 생리기능에 중요한 영향을 미친다. 돼지의 내인성 소화효소에 의해 분해되지 않는  
370 식이섬유는 소장에서 단백질, 지질 및 일부 무기질과 상호작용하여 영양소의 소화 및  
371 흡수를 저해하고 전체적인 소화율을 감소시킬 수 있다고 보고되고 있다[15, 16]. 소장에서  
372 식이섬유의 약 20~25%만이 제한적으로 분해되며, 나머지 대부분은 대장으로 이동하여 장내

373 미생물에 의해 발효 과정을 거쳐 이용된다[41]. 대장 미생물군은 식이섬유를 발효하여  
374 아세트산(acetate), 프로피온산(propionate), 그리고 부티르산(butyrate)과 같은 주요 대사  
375 산물인 SCFA 를 생성한다. 이외에도 젖산(lactate)과 수소, 이산화탄소, 메탄과 같은 가스도  
376 대사산물로 생성된다. 그중 부티르산은 장 상피세포의 주요 에너지원으로 작용하며, 장  
377 점막의 구조적 안정성과 건강 유지에 핵심적으로 기여한다. 미생물 발효 과정에서 생성된  
378 SCFA 는 대장 상피세포 에너지원으로 1 g 당 약 3.5~5.9 kcal 의 총 에너지(gross energy,  
379 GE)를 제공하고, 육성돈의 유지에너지 요구량의 약 30%를 제공할 수 있다[42, 43]. 돼지의  
380 대장에서 이용가능한 형태로 분해된 식이섬유는 사료에 포함된 탄수화물 종류에 따라 유지  
381 에너지의 약 10~24%를 공급할 수 있으며, 회장에서 유입된 유기산은 1~4%의  
382 대사에너지를 추가적으로 제공할 수 있다[2]. 돼지의 맹장에 SCFA 를 주입했을 때 99%  
383 이상이 대장에서 흡수되었으며, 분변으로 배설된 양은 1% 미만이었다. 이는 돼지  
384 후장(hindgut)의 우수한 SCFA 대사 능력을 나타내며, SCFA 가 중요한 에너지원으로서  
385 영양학적 가치를 지닌다는 것을 시사한다[44].

386 장 내의 다양한 미생물은 서로 다른 기질에 대한 결합 선호도를 가진다. 육성돈에게  
387 고식이섬유 식이를 급여할 경우, *Lactobacilli* 와 *Bifidobacteria* 와 같은 유익균 외에도  
388 셀룰로스 분해균인 *Ruminococcus*, *Fibrobacter*, 헤미셀룰로스 분해균인 *Prevotella*,  
389 *Roseburia* 와 같은 특정 식이섬유 분해 미생물의 증식을 촉진할 수 있다. 이들 미생물은  
390 식이섬유를 발효시켜 SCFA 를 생산하며, 이는 장내 pH 를 감소시켜 유해균 증식을 억제하고  
391 유익균의 상대적 증식을 촉진함으로써 장 점막 보호, 면역 조절, 병원균 억제 등을 통해 장  
392 건강 개선에 기여할 수 있다[45, 46]. 수용성 식이섬유는 비교적 빠르게 발효되어 미생물  
393 활성을 증가시키는 반면, 불용성 식이섬유는 발효 속도가 느리고 섬유 구조로 인해 미생물  
394 접근성이 제한되어 분해율이 낮은 경향을 보인다[28]. 특히, 돼지 사료원료로 사용되는  
395 일반적인 곡물의 주요 NSP 인 아라비노자일란과  $\beta$ -글루칸은 대장에서 핵심 발효 기질로  
396 작용하여 SCFA 생성을 촉진하며, 두 성분 간 비율은 장내 발효 패턴과 미생물 군집 구조에  
397 영향을 미치는 것으로 보고되었다. 식이 내 높은 겔보기 점도(dietary apparent viscosity, 1.21  
398 cp)와 높은  $\beta$ -글루칸 대 아라비노자일란(0.46) 비율 조합은 소화물의 장내 체류 시간을  
399 연장하여 미생물의 섬유소 이용률을 높일 수 있다. 이외에도, 체내 지질 대사를 조절하는  
400 *Christensenellaceae*, 부티르산 생산균인 *Lachnospiraceae*, SCFA 생성 보조 및 장내 pH  
401 안정화에 기여하는 *Shuttleworthia* 같은 유익한 박테리아의 상대적 풍부도를 증가시키는  
402 경향을 나타냈다[47]. 그러나 이러한 이화학적 특성은 열 발생 및 대사 손실을 늘려 에너지  
403 축적을 방해할 수 있으므로, 돼지의 성장 단계와 급여 목적에 맞춘 차별화된 식이섬유 배합  
404 전략을 선택해야 한다. 아라비노자일란의 자일란 골격은 주로 소장에서 부티르산을  
405 생성하는 기질로 작용하며, 아라비노스 측쇄는 소장에서 주로 프로피온산을 생성하고,  
406 대장에서는 부티르산 생성에 기여한다[48]. 육성돈의 농축분획 형태의 아라비노자일란  
407 급여는 맹장 내 총 SCFA 와 총량을 유의미하게 증가시켰다. 또한, 아라비노자일란 분해에

408 도움이 되는 *Prevotella intermedia*, *P. disiens*, *P. ruminicola* 등의 풍부도가 증가했고,  
409 부티르산 생성균인 Clostridial cluster IV(*Faecalibacterium prausnitzii*)와 cluster  
410 XIVa(*Ruminococcus obeum*, *Blautia producta*)의 풍부도가 높아졌다. 유익균의 증가 외에도  
411 단백질 발효를 통해 페놀과 p-크레졸을 생성하는 *Clostridium difficile*, *C. perfringens*,  
412 *Bacteroides fragilis* 군집이 유의미하게 감소했으며, 장내 pH를 높이고 장벽 손상 및 염증을  
413 유발하는 *Escherichia coli*(*E. coli*), *Desulfovibrio* sp., *Fusobacteria* 등 유해균 및 잠재적  
414 병원균의 상대적 풍부도도 대조군에 비해 낮게 나타났다[49]. 아라비노자일란 식이를 급여한  
415 육성돈에서 대조군 대비 맹장, 근위 결장 및 중부 결장에서 부티르산의 총량이 약 3~5 배  
416 유의미하게 증가하였고, *Faecalibacterium prausnitzii*, *Roseburia intestinalis*, *Blautia coccoides*-  
417 *Eubacterium rectale*, *Bifidobacterium* spp., *Lactobacillus* spp. 의 수가 유의미하게  
418 증가하였다[50]. 사료 내  $\beta$ -글루칸의 농도가 증가함에 따라 위 내 액체 성분의 체류 시간은  
419 증가하고 장 후반부와 결장 후반부의 소화물 WBC는 증가하였으나, 결장 전반부와 달리  
420 결장 후반부에서는 소화물의 점도 증가 현상이 나타나지 않았다. 이는 미생물 발효에 의해  
421  $\beta$ -글루칸이 분해되어 농도가 감소했기 때문이라고 추측된다[24].  $\beta$ -글루칸의 보충은  
422 *Lactobacilli*, *Bifidobacterium* 및 기타 부티르산 생성균의 선택적 증식을 촉진하는 것으로  
423 나타났다. 펙틴은 소장에서 소화물의 점도를 증가시켜 영양소 흡수를 조절할 수 있으며,  
424 주로 육성돈의 회장 말단부 및 결장 초기 부위 즉 대장 전반부에서 빠르게 발효되어 주로  
425 아세트산과 프로피온산 생산에 기여한다. 이는 장내 점액층(mucus layer) 강화 및 장벽  
426 기능을 향상시켜 육성돈의 장 건강과 미생물 조절에 영향을 미친다[51]. 귀리겨와 같은  
427 발효성이 높은 섬유원은 밀기울보다 더 높은 SCFA 생성을 유도하는 것으로 보고된다[52].  
428 저항성 전분 역시 소화되지 않고 대장에서 발효되어 에너지원으로 활용되며, RS가 포함된  
429 사료를 섭취한 돼지에서는 대장 내 미생물군 다양성이 증가하는 경향을 통해  
430 프리바이오틱스(prebiotics)로 기능할 가능성이 있다[25, 53-55]. 반면, 셀룰로스는  $\beta$ -(1 $\rightarrow$ 4)  
431 글리코사이드 결합 구조로 인해 주로 대장 후반부에서 느리게 발효되며, 반추동물에 비해  
432 상대적으로 매우 낮은 발효율을 보인다.

433 생감자전분과 옥수수전분을 고함량으로 포함한 사료를 육성돈에게 급여했을 때, 생  
434 감자전분 사료를 섭취한 돼지의 맹장 및 결장 전반부에서 발효가 활발히 일어나 직장에서의  
435 SCFA 농도가 옥수수전분 급여군 대비 유의하게 증가한 결과를 보였다. 결장 전반부에서  
436 측정된 총 SCFA 농도 99.82% 중 아세트산 55%, 프로피온산 19%, 부티르산 20%였으며,  
437 옥수수전분 급여군과 다르게 직장에서도 높은 SCFA 농도를 보였다. 또한, 생감자전분  
438 급여군은 옥수수전분 급여군에 비해 아세트산 비율은 상대적으로 감소했으나 부티르산  
439 비율은 약 2 배 증가한 수준을 보였다[25]. 식이섬유는 원료별 미생물 발효 양상의 다양성과  
440 이점을 통해 육성돈 사료에서 항생제 대체체로서의 응용 가능성을 제시하고 있다. 따라서,  
441 다양한 식이섬유의 배합 수준과 원료 조합이 장내 미생물 조성 변화에 미치는 영향에 대한  
442 후속 연구는 육성돈의 생산성과 장 건강을 유지할 수 있는 단초가 될 수 있다.

444 **5. 육성돈의 장내 질병과 식이섬유의 활용**

445 장내 세균 감염으로 유발되는 질병은 전 세계적으로 양돈 산업의 생산성과 경제적 손실  
 446 요인 중 하나로 간주된다. 그중 육성돈에서 가장 빈번하게 보고되는 질병인 돈적리(*swine*  
 447 *dysentery, SD*)는 혐기성 나선균인 *Brachyspira hyodysenteriae* 에 의해 유발되며, 점액성  
 448 혈변을 동반한 설사를 특징으로 한다. 본 질병은 주로 육성돈에서 집단적으로 발생하여  
 449 대장 내 심각한 점막염과 출혈, 에너지 및 영양소의 ATTD 저하, 식욕부진, 사료 효율 및  
 450 성장 성적에 부정적인 영향을 초래할 수 있다[56]. 돈적리는 항생제 처치를 통해 관리  
 451 가능한 질병이지만, 최근 항생제 사용에 대한 규제가 전 세계적으로 강화됨에 따라 그  
 452 발병률이 증가하는 추세를 보이고 있다. 돈적리는 주로 대장인 결장과 직장의 점막  
 453 표면에서 원인균이 증식하여 점액 분비 증가, 점막의 손상 및 출혈성 염증을 유발하는  
 454 장관성 질환이지만, 소장에서는 병변 및 원인균 증식이 거의 관찰되지 않는 것이 특징이다.  
 455 이러한 임상 증상은 사료의 식이 조성, 특히 식이섬유의 유형과 함량에 영향을 받는 것으로  
 456 보고되고 있다[57].

457 불용성 식이섬유는 구조적 특성상 대장에서 SDF 에 비해 상대적으로 적게 분해되거나  
 458 발효되는 양상을 보인다[41]. 이로 인해 대장 내로 비교적 많은 양의 IDF 가 도달하게 되며,  
 459 이는 장 내용물의 부피를 증가시키고 연동운동을 촉진하며 장 통과 시간을 단축시킴으로써  
 460 변비 예방 및 장 건강 기능에 기여할 수 있다. 과도한 불용성 식이섬유의 공급은 장점막을  
 461 자극하고 병원성 세균의 증식을 위한 기질로 작용할 수 있어, 돈적리와 같은 장관성 질병의  
 462 임상 증상을 악화시킬 우려가 있다. 특히, 주정박(DDGS)에 함유된 IDF 는 돈적리의 중증도를  
 463 높이는 데 영향을 미친 것으로 보고되었다. 아울러, *B. hyodysenteriae* 의 균주 특성과 숙주의  
 464 장내 미생물총 구성은 지역 및 국가 간 차이를 보이기 때문에 연구 결과 간에도 상이한  
 465 경향이 나타난다[58].

466 항생제 사용이 제한되는 현재의 양돈 산업 환경에서 식이섬유의 생리적 기능과 장 건강  
 467 개선 효과는 항생제 대체제로써 주목받고 있다. 이는 주로 고발효성 수용성 식이섬유에  
 468 초점이 맞춰져 있으며 올리고당, 이눌린, 프룩탄 등으로 구성되어 있다. 고발효성 수용성  
 469 식이섬유는 소장, 맹장과 결장 전반부에서 빠르게 발효되어 SCFA 와 같은 대사산물을  
 470 생성하고, 이는 장내 유익균의 성장을 촉진할 수 있다. 이러한 수용성 식이섬유는 대장  
 471 후반부에 도달하기 전에 대부분 분해되어 대장 내 *B. hyodysenteriae* 등과 같은 병원균의  
 472 직접적인 발효성 기질을 제한함으로써 예방효과를 나타낼 수 있다. 사탕무 펄프와 RS 같은  
 473 발효성이 높은 섬유소는 돈적리의 발병 시기를 지연시키고, 감염돈의 성장 성적을  
 474 향상시키는 것으로 보고되었다[59]. 또한, 대장에서 빠르게 분해되는 것이 특징인 프룩탄과  
 475 이눌린이 풍부한 치커리 뿌리와 갈락탄(galactan)이 함유된 스위트 루핀이 포함된 사료를  
 476 급여한 돼지에서 *B. thermacidophilum* 과 *M. elsdenii* 와 같은 유익균의 증식에 영향을 미쳐  
 477 돈적리 감염이 예방되는 결과도 보고되었다[60, 61].

478 한편, 기존의 선행 연구 결과들과는 상반되게, 사료 내 다양한 종류와 수준의 식이섬유  
479 첨가가 돈적리 감염을 예방하지 못한 결과도 보고된 바 있다[62]. 이 연구에서 감염돈과  
480 비감염돈 간의 회장 소화율에는 유의미한 차이는 없었지만, 맹장에서의 NSP, NCP, 그리고  
481 셀룰로스의 소화율은 감염돈에서 더 높게 나타났는데, 이는 *B. hyodysenteriae* 와 특정 맹장  
482 미생물 간의 상호작용에서 기인한 것으로 추정된다[62]. 또한, 발효성이 높은 섬유질 및  
483 대장에서 빠르게 발효되는 탄수화물인 구아검, SDF와 RS 등이 포함된 사료를 섭취한 감염된  
484 돼지에서 오히려 돈적리 발병률을 증가시킬 수도 있는 것으로 나타났다[63-65]. 따라서,  
485 단순히 고함량의 식이섬유를 급여하는 것만으로는 장 건강을 향상시키거나 질병을 예방할  
486 수 없으며, 항생제 대체 및 질병 증상 완화 등 목적에 부합하는 효과를 얻기 위해서는  
487 식이섬유의 종류와 특성을 고려한 적절한 원료 선택과 적용이 필요하다고 판단된다.  
488

## 489 결론

490 전통적으로 식이섬유는 소화율을 저해하고 식이섬유 내인성 분해효소가 부족한  
491 단위동물인 돼지에게는 항영양인자로 간주되어 왔지만, 최근에는 적절한 식이섬유 급여가  
492 장내 건강 증진, 생산성 향상, 복지 개선, 환경 부하 저감 등 여러 긍정적인 효과를  
493 나타내며 그 중요성이 점차 부각되고 있다. 특히, 전 세계적으로 항생제 사용이 제한되거나  
494 금지되는 추세 속에서 식이섬유는 항생제를 대체할 수 있는 유망한 영양학적 전략으로  
495 주목받고 있다. 또한, 식품 및 농산물 가공 과정에서 발생하는 고섬유성 부산물을  
496 활용함으로써 기존 곡물 기반 사료 원료를 대체하고 사료 비용의 변동성까지 완화할 수  
497 있는 가능성도 제시되고 있다. 식이섬유는 주로 식물의 세포벽을 구성하는 고분자 물질로,  
498 사료 내 첨가 수준과 구조적 특성에 따라 돼지 장내에서 다양한 이화학적 반응을 유도하며,  
499 이는 장 성숙도와 미생물 군집 구성의 차이에 따라 그 효과가 달라질 수 있다. 그러나,  
500 육성돈을 대상으로 한 식이섬유 대사 메커니즘, 장내 미생물군 변화, 생리적 요구량에  
501 부합하는 최적 급여 수준에 대한 체계적인 연구는 미흡한 실정이다. 육성기는 사료  
502 섭취량이 증가하고 장내 미생물 및 소화 효소 체계가 안정화되는 중요한 성장 단계로, 이  
503 시기의 영양 관리가 양돈 생산성 향상과 소비자 요구 충족에 있어 핵심적인 역할을 한다.  
504 따라서 국내 사양 환경에 적합한 육성돈을 대상으로 식이섬유의 작용 기전에 대한 연구가  
505 지속적으로 확대된다면, 이는 사료비 절감은 물론 돼지의 건강 증진, 환경 부하 감소, 더  
506 나아가 소비자에게 안전하고 신뢰할 수 있는 축산물을 제공하는 데 크게 기여할 수 있을  
507 것으로 기대된다.

508

509

510

511

Accepted

## Acknowledgments

513  
514 none  
515

## References

- 516  
517
- 518 1. Grzeškowiak Ł, Saliu EM, Martínez-Vallespín B, Aschenbach JR, Brockmann GA, Fulde  
519 M, et al. Dietary fiber and its role in performance, welfare, and health of pigs. *Animal Health  
520 Research Reviews*. 2022;23(2):165-93.
  - 521 2. Bach Knudsen KE. The nutritional significance of “dietary fibre” analysis. *Animal Feed  
522 Science and Technology*. 2001;90(1):3-20.
  - 523 3. Jha R, Berrocoso JD. Review: Dietary fiber utilization and its effects on physiological  
524 functions and gut health of swine. *Animal*. 2015;9(9):1441-52.
  - 525 4. Knudsen KEB. Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal  
526 feeding. *Animal Feed Science and Technology*. 1997;67(4):319-38.
  - 527 5. Van Soest PJ, Robertson JB, Lewis BA. Methods for Dietary Fiber, Neutral Detergent  
528 Fiber, and Nonstarch Polysaccharides in Relation to Animal Nutrition. *Journal of Dairy Science*.  
529 1991;74(10):3583-97.
  - 530 6. Crocker LM, DePeters EJ, Fadel JG, Essex SE, Perez-Monti H, Taylor SJ. Ash content of  
531 detergent fibers in feeds, digesta, and feces and its relevance in fiber digestibility calculations. *J  
532 Dairy Sci*. 1998;81(4):1010-4.
  - 533 7. Fahey G, Novotny L, Layton B, Mertens D. Critical Factors in Determining Fiber Content  
534 of Feeds and Foods and Their Ingredients. *Journal of AOAC International*. 2018;102.
  - 535 8. Pedrazzani C, Viscusi P, Fuso A, Caligiani A. Development of a protocol for fractionating  
536 and characterising fibres from lignocellulosic food waste. *Food Chem X*. 2024;22:101501.
  - 537 9. Alimentarius C. Guidelines on nutrition labelling CAC/GL 2-1985 as last amended 2010.  
538 Joint FAO/WHO Food Standards Programme, Secretariat of the Codex Alimentarius Commission,  
539 FAO, Rome. 2010.
  - 540 10. Devries J. On defining dietary fibre. *The Proceedings of the Nutrition Society*.  
541 2003;62:37-43.
  - 542 11. McCleary BV, DeVries JW, Rader JJ, Cohen G, Prosky L, Mugford DC, et al.  
543 Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber (CODEX definition) by enzymatic-  
544 gravimetric method and liquid chromatography: collaborative study. *J AOAC Int*. 2012;95(3):824-  
545 44.
  - 546 12. Dhingra D, Michael M, Rajput H, Patil RT. Dietary fibre in foods: a review. *J Food Sci  
547 Technol*. 2012;49(3):255-66.
  - 548 13. McCleary B, Cox J, Ivory R, Delaney E. CHAPTER 6: Definition and Analysis of Dietary  
549 Fiber in Grain Products. 2019. p. 103-26.
  - 550 14. Navarro DMD, Abelilla J, Stein H. Structures and characteristics of carbohydrates in diets  
551 fed to pigs: A review. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2019;10:39.
  - 552 15. Collins H, Burton R, Topping D, Liao ML, Bacic A, Fincher G. REVIEW: Variability in  
553 Fine Structures of Noncellulosic Cell Wall Polysaccharides from Cereal Grains: Potential  
554 Importance in Human Health and Nutrition. *Cereal Chemistry*. 2010;87:272-82.
  - 555 16. Zhang D, Williams BA, Mikkelsen D, Li X, Keates HL, Lisle AT, et al. Soluble  
556 arabinoxylan alters digesta flow and protein digestion of red meat-containing diets in pigs.  
557 *Nutrition*. 2015;31(9):1141-7.
  - 558 17. Gerrits WJJ, Bosch M, van den Borne JJGC. Quantifying Resistant Starch Using Novel,  
559 In Vivo Methodology and the Energetic Utilization of Fermented Starch in Pigs 1–23. *The Journal  
560 of Nutrition*. 2012;142(2):238-44.

- 561 18. McDougall GJ, Morrison IM, Stewart D, Hillman JR. Plant Cell Walls as Dietary Fibre:  
562 Range, Structure, Processing and Function. *Journal of the Science of Food and Agriculture*.  
563 1996;70(2):133-50.
- 564 19. Prosky L, Asp N-G, Schweizer TF, Devries JW, Furda I. Determination of Insoluble and  
565 Soluble Dietary Fiber in Foods and Food Products: Collaborative Study. *Journal of AOAC*  
566 *INTERNATIONAL*. 1992;75(2):360-7.
- 567 20. Hooda S, Metzler-Zebeli B, Vasanthan T, Zijlstra R. Effects of viscosity and  
568 fermentability of dietary fibre on nutrient digestibility and digesta characteristics in ileal-  
569 cannulated grower pigs. *The British journal of nutrition*. 2011;106:664-74.
- 570 21. Lee GI, Hedemann MS, Jørgensen H, Bach Knudsen KE. Influence of dietary fibre on  
571 nutrient digestibility and energy utilisation in growing pigs fed diets varying in soluble and  
572 insoluble fibres from co-products. *animal*. 2022;16(5):100511.
- 573 22. Owusu-Asiedu A, Patience JF, Laarveld B, Van Kessel AG, Simmins PH, Zijlstra RT.  
574 Effects of guar gum and cellulose on digesta passage rate, ileal microbial populations, energy and  
575 protein digestibility, and performance of grower pigs. *J Anim Sci*. 2006;84(4):843-52.
- 576 23. Rainbird AL, Low AG. Effect of guar gum on gastric emptying in growing pigs. *Br J Nutr*.  
577 1986;55(1):87-98.
- 578 24. Schop M, Jansman AJM, de Vries S, Gerrits WJJ. Increased diet viscosity by oat  $\beta$ -glucans  
579 decreases the passage rate of liquids in the stomach and affects digesta physicochemical properties  
580 in growing pigs. *Animal*. 2020;14(2):269-76.
- 581 25. Martínez D, Castillo M, Nofrarías M, Creus E, Pérez J. Long-term effects on the digestive  
582 tract of feeding large amounts of resistant starch: A study in pigs. *Journal of The Science of Food*  
583 *and Agriculture - J SCI FOOD AGR*. 2007;87:1991-9.
- 584 26. Liu T, Zhen X, Lei H, Li J, Wang Y, Gou D, et al. Investigating the physicochemical  
585 characteristics and importance of insoluble dietary fiber extracted from legumes: An in-depth  
586 study on its biological functions. *Food Chem X*. 2024;22:101424.
- 587 27. Rosenfelder P, Eklund M, Mosenthin R. Nutritive value of wheat and wheat by-products  
588 in pig nutrition: A review. *Animal Feed Science and Technology*. 2013;185(3):107-25.
- 589 28. Montagne L, Pluske JR, Hampson DJ. A review of interactions between dietary fibre and  
590 the intestinal mucosa, and their consequences on digestive health in young non-ruminant animals.  
591 *Animal Feed Science and Technology*. 2003;108(1):95-117.
- 592 29. Nguyen N, Jacobs M, Li J, Huang C, Li D, Navarro D, et al. Technical note: concentrations  
593 of soluble, insoluble, and total dietary fiber in feed ingredients determined using Method AOAC  
594 991.43 are not different from values determined using Method AOAC 2011.43 with the  
595 AnkomTDF Dietary Fiber Analyzer. *J Anim Sci*. 2019;97(9):3972-83.
- 596 30. Council NR, Earth Do, Studies L, Agriculture Bo, Resources N, Swine CoNRo. *Nutrient*  
597 *Requirements of Swine: Eleventh Revised Edition: National Academies Press; 2012.*
- 598 31. Patience JF, Rossoni-Serão MC, Gutiérrez NA. A review of feed efficiency in swine:  
599 biology and application. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2015;6(1):33.
- 600 32. Choct M, Dersjant-Li Y, McLeish J, Peisker M. Soy Oligosaccharides and Soluble Non-  
601 starch Polysaccharides: A Review of Digestion, Nutritive and Anti-nutritive Effects in Pigs and  
602 Poultry. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2010;23.
- 603 33. Goff G, Noblet J. Comparative digestibility of dietary energy and nutrients in growing  
604 pigs and adult sows. *Journal of animal science*. 2001;79:2418-27.
- 605 34. Casas GA, Stein HH. Gestating sows have greater digestibility of energy in full fat rice  
606 bran and defatted rice bran than growing gilts regardless of level of feed intake. *J Anim Sci*.  
607 2017;95(7):3136-42.

- 608 35. Lowell JE, Liu Y, Stein HH. Comparative digestibility of energy and nutrients in diets fed  
609 to sows and growing pigs. *Arch Anim Nutr.* 2015;69(2):79-97.
- 610 36. Shi XS, Noblet J. Digestible and metabolizable energy values of ten feed ingredients in  
611 growing pigs fed ad libitum and sows fed at maintenance level; comparative contribution of the  
612 hindgut. *Animal Feed Science and Technology.* 1993;42(3):223-36.
- 613 37. Longland AC, Low AG, Quelch DB, Bray SP. Adaptation to the digestion of non-starch  
614 polysaccharide in growing pigs fed on cereal or semi-purified basal diets. *Br J Nutr.*  
615 1993;70(2):557-66.
- 616 38. Knudsen K, Jørgensen H. Intestinal Degradation of Dietary Carbohydrates - from Birth to  
617 Maturity. 2001. p. 109-20.
- 618 39. Torres-Pitarch A, Gardiner GE, Cormican P, Rea M, Crispie F, O'Doherty JV, et al. Effect  
619 of cereal fermentation and carbohydrase supplementation on growth, nutrient digestibility and  
620 intestinal microbiota in liquid-fed grow-finishing pigs. *Sci Rep.* 2020;10(1):13716.
- 621 40. Le Gall M, Serena A, Jørgensen H, Theil P, Knudsen K. The role of whole-wheat grain  
622 and wheat and rye ingredients on the digestion and fermentation process in the gut – a model  
623 experiment with pigs. *The British journal of nutrition.* 2009;102:1590-600.
- 624 41. Knudsen KEB, Lærke HN, Ingerslev AK, Hedemann MS, Nielsen TS, Theil PK.  
625 Carbohydrates in pig nutrition – Recent advances. *Journal of Animal Science.* 2016;94(suppl\_3):1-  
626 11.
- 627 42. McDonald P. *Animal nutrition*: Pearson Education India; 2002.
- 628 43. Varel VH, Yen JT. Microbial perspective on fiber utilization by swine1. *Journal of Animal*  
629 *Science.* 1997;75(10):2715-22.
- 630 44. Jørgensen H, Larsen T, Zhao X-Q, Eggum BO. The energy value of short-chain fatty acids  
631 infused into the caecum of pigs. *British Journal of Nutrition.* 1997;77(5):745-56.
- 632 45. Heinritz SN, Weiss E, Eklund M, Aumiller T, Louis S, Rings A, et al. Intestinal  
633 Microbiota and Microbial Metabolites Are Changed in a Pig Model Fed a High-Fat/Low-Fiber or  
634 a Low-Fat/High-Fiber Diet. *PLoS One.* 2016;11(4):e0154329.
- 635 46. Pandey S, Kim ES, Cho JH, Song M, Doo H, Kim S, et al. Swine gut microbiome  
636 associated with non-digestible carbohydrate utilization. *Front Vet Sci.* 2023;10:1231072.
- 637 47. Yong F, Liu B, Li H, Hao H, Fan Y, Datsomor O, et al. Relationship between dietary fiber  
638 physicochemical properties and feedstuff fermentation characteristics and their effects on nutrient  
639 utilization, energy metabolism, and gut microbiota in growing pigs. *Journal of Animal Science*  
640 *and Biotechnology.* 2025;16(1):1.
- 641 48. Tiwari UP, Singh AK, Jha R. Fermentation characteristics of resistant starch,  
642 arabinoxylan, and  $\beta$ -glucan and their effects on the gut microbial ecology of pigs: A review.  
643 *Animal Nutrition.* 2019;5(3):217-26.
- 644 49. Belobrajdic DP, Bird AR, Conlon MA, Williams BA, Kang S, McSweeney CS, et al. An  
645 arabinoxylan-rich fraction from wheat enhances caecal fermentation and protects colonocyte DNA  
646 against diet-induced damage in pigs. *Br J Nutr.* 2012;107(9):1274-82.
- 647 50. Nielsen TS, Lærke HN, Theil PK, Sørensen JF, Saarinen M, Forssten S, et al. Diets high  
648 in resistant starch and arabinoxylan modulate digestion processes and SCFA pool size in the large  
649 intestine and faecal microbial composition in pigs. *Br J Nutr.* 2014;112(11):1837-49.
- 650 51. Drochner W, Kerler A, Zacharias B. Pectin in pig nutrition, a comparative review. *Journal*  
651 *of animal physiology and animal nutrition.* 2005;88:367-80.
- 652 52. Bach Knudsen KE, Hansen I. Gastrointestinal implications in pigs of wheat and oat  
653 fractions. 1. Digestibility and bulking properties of polysaccharides and other major constituents.  
654 *Br J Nutr.* 1991;65(2):217-32.

- 655 53. Brown I, Warhurst M, Arcot J, Playne M, Illman RJ, Topping DL. Fecal Numbers of  
656 Bifidobacteria Are Higher in Pigs Fed Bifidobacterium longum with a High Amylose Cornstarch  
657 Than with a Low Amylose Cornstarch<sup>1,2</sup>. *The Journal of Nutrition*. 1997;127(9):1822-7.
- 658 54. Fuentes-Zaragoza E, Sánchez-Zapata E, Sendra E, Sayas E, Navarro C, Fernández-López  
659 J, et al. Resistant starch as prebiotic: A review. *Starch - Stärke*. 2011;63(7):406-15.
- 660 55. Giuberti G, Gallo A, Moschini M, Masoero F. New insight into the role of resistant starch  
661 in pig nutrition. *Animal Feed Science and Technology*. 2015;201:1-13.
- 662 56. Helm ET, Lin SJ, Gabler NK, Burrough ER. *Brachyspira hyodysenteriae* Infection  
663 Reduces Digestive Function but Not Intestinal Integrity in Growing Pigs While Disease Onset Can  
664 Be Mitigated by Reducing Insoluble Fiber. *Frontiers in Veterinary Science*. 2020;Volume 7 - 2020.
- 665 57. Hampson D, Burrough E. Swine Dysentery and Brachyspiral Colitis. 2019. p. 951-70.
- 666 58. Wilberts BL, Arruda PH, Kinyon JM, Frana TS, Wang C, Magstadt DR, et al.  
667 Investigation of the impact of increased dietary insoluble fiber through the feeding of distillers  
668 dried grains with solubles (DDGS) on the incidence and severity of *Brachyspira*-associated colitis  
669 in pigs. *PLoS One*. 2014;9(12):e114741.
- 670 59. Helm ET, Gabler NK, Burrough ER. Highly Fermentable Fiber Alters Fecal Microbiota  
671 and Mitigates Swine Dysentery Induced by *Brachyspira hyodysenteriae*. *Animals (Basel)*.  
672 2021;11(2).
- 673 60. Thomsen LE, Knudsen KEB, Jensen TK, Christensen AS, Møller K, Roepstorff A. The  
674 effect of fermentable carbohydrates on experimental swine dysentery and whip worm infections  
675 in pigs. *Veterinary Microbiology*. 2007;119(2):152-63.
- 676 61. Mølbak L, Thomsen LE, Jensen TK, Bach Knudsen KE, Boye M. Increased amount of  
677 *Bifidobacterium thermacidophilum* and *Megasphaera elsdenii* in the colonic microbiota of pigs  
678 fed a swine dysentery preventive diet containing chicory roots and sweet lupine. *Journal of Applied*  
679 *Microbiology*. 2007;103(5):1853-67.
- 680 62. Lee GI, Skou Hedemann M, Borg Jensen B, Bach Knudsen KE. Influence of infection  
681 with *Brachyspira hyodysenteriae* on clinical expression, growth performance, and digestibility in  
682 growing pigs fed diets varying in type and level of fiber. *Journal of Animal Science*. 2022;100(5).
- 683 63. Kirkwood R, Huang S, McFall M, Aherne FX. Dietary factors do not influence the clinical  
684 expression of swine dysentery. 2000;8:73-6.
- 685 64. Durmic Z, Pethick DW, Mullan BP, Accioly JM, Schulze H, Hampson DJ. Evaluation of  
686 large-intestinal parameters associated with dietary treatments designed to reduce the occurrence  
687 of swine dysentery. *Br J Nutr*. 2002;88(2):159-69.
- 688 65. Pluske JR, Durmic Z, Pethick DW, Mullan BP, Hampson DJ. Confirmation of the Role of  
689 Rapidly Fermentable Carbohydrates in the Expression of Swine Dysentery in Pigs after  
690 Experimental Infection<sup>123</sup>. *The Journal of Nutrition*. 1998;128(10):1737-44.
- 691 66. Jaworski NW, Liu DW, Li DF, Stein HH. Wheat bran reduces concentrations of digestible,  
692 metabolizable, and net energy in diets fed to pigs, but energy values in wheat bran determined by  
693 the difference procedure are not different from values estimated from a linear regression  
694 procedure. *J Anim Sci*. 2016;94(7):3012-21.
- 695 67. Blok MC, Brandsma G, Bosch G, Gerrits WJJ, Jansman AJM, Everts H. A new Dutch Net  
696 Energy formula for feed and feedstuffs for growing and fattening pigs. Wageningen UR Livestock  
697 Research, 2015.
- 698 68. Pedersen M, Dalsgaard S, Knudsen K, Yu S, Lærke H. Compositional profile and  
699 variation of Distillers Dried Grains with Solubles from various origins with focus on non-starch  
700 polysaccharides. *Animal Feed Science and Technology*. 2014;197.
- 701 69. Knudsen KEB. Fiber and nonstarch polysaccharide content and variation in common  
702 crops used in broiler diets<sup>1</sup>. *Poultry Science*. 2014;93(9):2380-93.

- 703 70. Moughan PJ, and Hendriks, W. H. . Feed evaluation science. Wageningen: Wageningen  
704 Academic Publishers; 2018.
- 705 71. Do S, Jang JC, Lee GI, Kim YY. The Role of Dietary Fiber in Improving Pig Welfare.  
706 *Animals (Basel)*. 2023;13(5).
- 707 72. Jaworski NW, Lærke HN, Bach Knudsen KE, Stein HH. Carbohydrate composition and  
708 in vitro digestibility of dry matter and nonstarch polysaccharides in corn, sorghum, and wheat and  
709 coproducts from these grains<sup>1</sup>. *Journal of Animal Science*. 2015;93(3):1103-13.
- 710 73. Cervantes-Pahm SK, Liu Y, Stein HH. Comparative digestibility of energy and nutrients  
711 and fermentability of dietary fiber in eight cereal grains fed to pigs. *J Sci Food Agric*.  
712 2014;94(5):841-9.
- 713 74. Wang K, Wang Y, Guo L, Zhuo Y, Hua L, Che L, et al. Standardized ileal digestibility of  
714 amino acids in soybean meal fed to non-pregnant and pregnant sows. *J Anim Sci Biotechnol*.  
715 2023;14(1):123.
- 716 75. Zhang ZY, Zhang S, Lai CH, Zhao JB, Zang JJ, Huang CF. Effects of adaptation time and  
717 inclusion level of sugar beet pulp on nutrient digestibility and evaluation of ileal amino acid  
718 digestibility in pigs. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2019;32(9):1414-22.

Accepted

**Table 1. Dietary fiber content in pig feed ingredients (g/100g dry matter, %)**

Item(%)	Wheat <sup>1</sup>	Wheat <sup>1</sup> Bran	Oat	Barley	Rye	Corn <sup>2</sup>	Corn DDGS <sup>e</sup>	Soybean Meal	Sugar Beet Pulp
Starch	59.50-65.1	16.9-22.56	39.06-46.8	50.21-58.7	59.34-61.3	62.0-69.0	6.73-8.6	1.89-2.7	0.00-0.5
Cellulose	1.3-2.0	6.4-7.2	8.2	3.9	1.5-1.6	1.7-2.2	5.8	5.9-6.33	19.5-20.3
Hemicellulose	-	-	-	14.1	-	-	-	3.90	-
Soluble NCP <sup>a</sup>	1.9	2.9-3.8	4.0	5.6	4.2	0.9-2.5	3.4	6.33	20.9-40.7
Insoluble NCP <sup>a</sup>	6.2	24.3-27.3	11.0	8.8	9.4	3.9-6.6	15.8	9.2	20.7-17.7
NDF <sup>b</sup>	10.60	32.28	25.3	18.29	12.26	9.11	32.50	6.66-15.44	36.6-44.90
ADF <sup>c</sup>	3.55	11.00	13.7	5.78	4.60	2.88	11.75	4.56-10.99	22.2-23.50
TDF <sup>d</sup>	9.83	41.4	33.93	15.35	11.7	10.2-13.73	31.35-42.3	19.1	58.7
Reference	[11, 39, 66, 67]	[39, 66]	[11, 39, 66]	[39, 66]	[11, 39, 66, 68]	[11, 39, 66-68]	[66, 67]	[20, 39, 66, 69]	[39, 66, 70]

<sup>1</sup> wheat (*Triticum aestivum*), soft wheat

<sup>2</sup> Corn, yellow dent

-: not measured

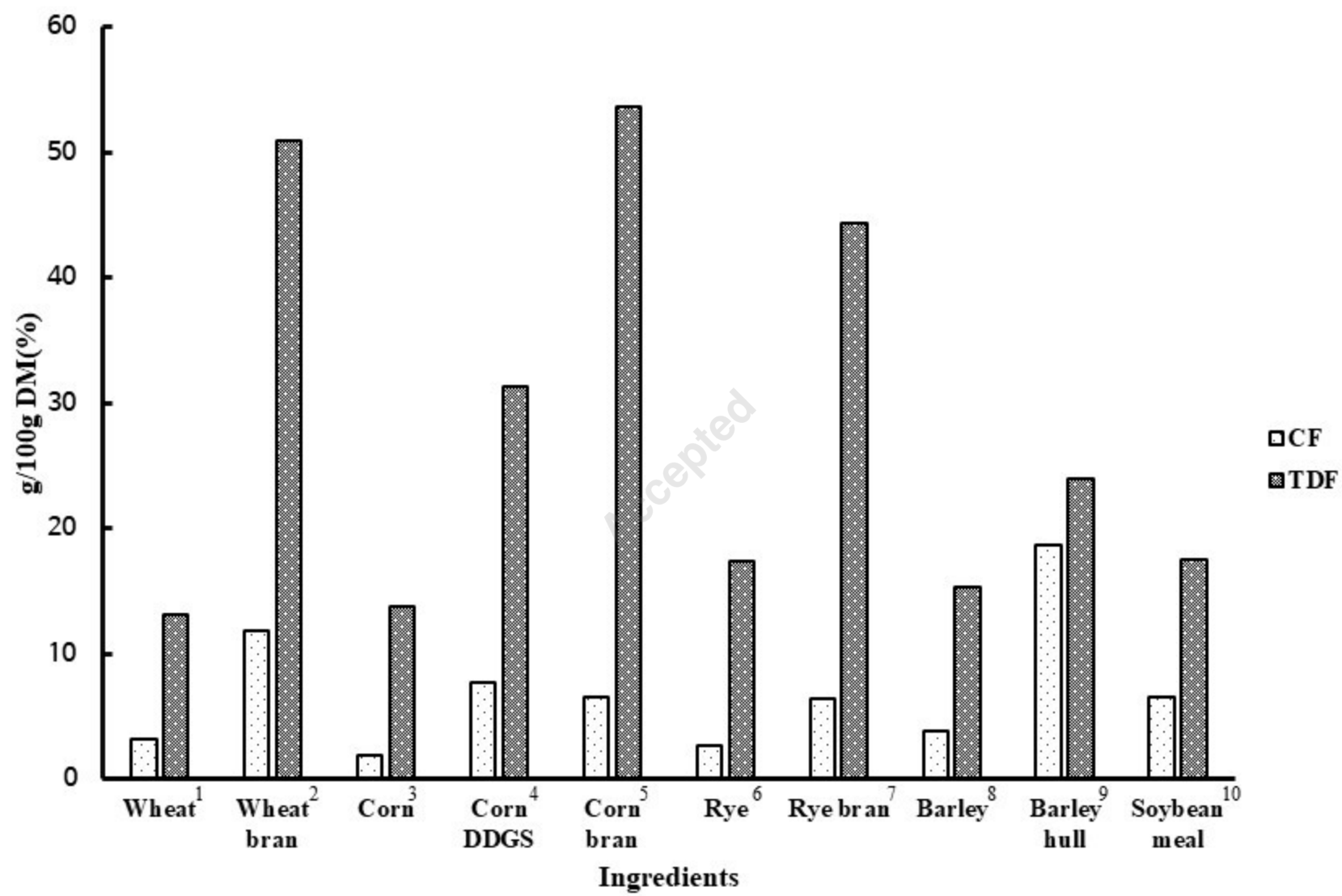
<sup>a</sup> NCP=non-cellulosic polysaccharides

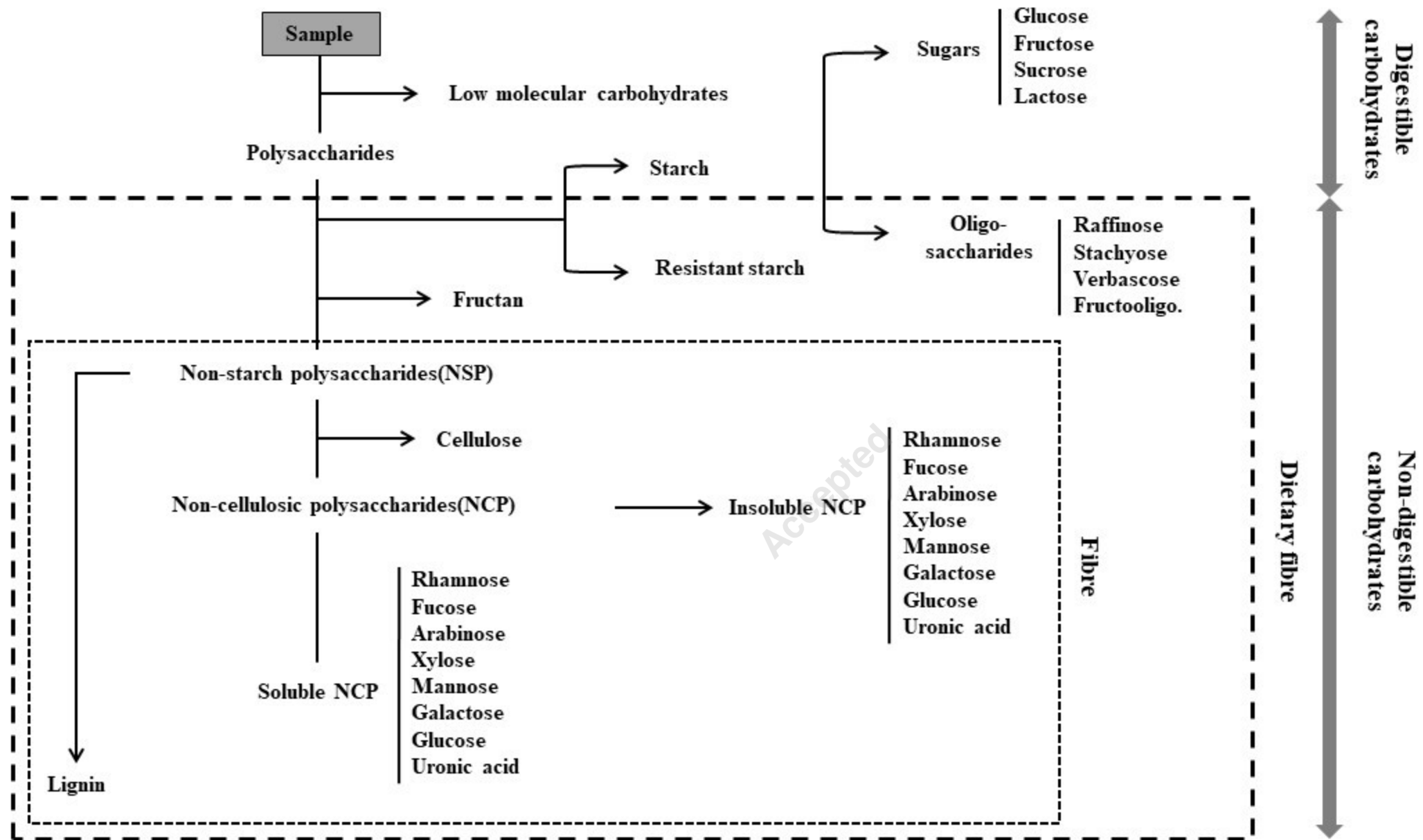
<sup>b</sup> NDF=neutral detergent fiber

<sup>c</sup> ADF=acid detergent fiber

<sup>d</sup> TDF=total dietary fiber

<sup>e</sup> DDGS: distillers dried grains with solubles





# Dietary fiber

