

22章: DDGS を配合した飼料のペレット加工

はじめに

米国では、養豚用飼料原料として DDGS を多く使用することで、長年にわたり飼料費の大幅な節減を図ってきた。米国中西部では、豚用の DDGS 配合飼料のほとんどは粉餌(マッシュ)を用いている。DDGS を含む飼料をペレット加工する必要がある場合、ペレット品質と生産速度の低下の懸念から、多くの場合、配合量を10%に制限している。配合飼料工場でペレットの品質と生産効率を確保するために設けられているこのような DDGS の配合割合の制限は、飼料製造業者と養豚業者が大きな経済的恩恵を受ける機会の減少につながっている。

ペレット加工は、養豚用飼料の製造において最も一般的に使用されている熱処理方法であり(Miller, 2012)、飼料の無駄を減らし、でん粉の部分的な糊化によるエネルギーと栄養成分の消化率の改善により、飼料効率を高める(Richert and DeRouchey, 2010, NRC, 2012)。その他に、飼料のペレット化による利点として、嗜好性の改善、かさ密度の増加による取り扱い特性の改善、粉塵の減少、輸送中の原料分離の抑制、有害微生物の抑制および給餌器内における大きな粒子の選り食いの防止等がある(Abdollahi ら、2012; NRC, 2012)。

ペレット加工工程

ペレット加工は、湿度、熱、圧力を使用して小さな粒子を大きな粒子に凝集させる機械的なプロセスである(Falk, 1985)。市販のペレットは、畜種と給与用途に応じて、直径(0.16~0.75 mm)、形状(三角形、正方形、楕円形または円筒形)および長さを調節している(California Pellet Mill Co., 2016)。

ペレット加工工程の最初のステップは、粉砕機を用いて飼料原料(主に穀物)の粒子径を小さくすることである。一般に、ペレット加工する飼料は、ペレットの耐久性を高めるために、粉餌に比べ粒子径が小さい(Wondra ら、1995)。次のステップは、飼料原料を個別に計量し、設計に基づく割合でミキサーに投入し、適切な時間混合する。

次いで、スチームコンディショニング内で蒸気を使用して熱と水分含量を適切なバランスに整える(Smallman, 1996)。スチームコンディショニングにはエネルギーが必要であり、加工コストの上昇を招くが、ドライコンディショニングと比べて、ペレットの生産性と PDI(ペレット耐久指数)が向上する(Skoch ら、1981)。スチームコンディショナー内で飼料に蒸気を吹き込んだ後、湿った高温の飼料がチャンバーに流れ込み、ダイを通過してペレットが形成される。ダイから排出されたペレットはクーラーに入り、品温が環境温度より 8°C 程度低くなるまで冷却される(Zimonja ら、2007)、この間に、周囲の空気の流れにより水分含量が 15~17% から 10~12% に低下する(Robinson, 1976)。クーラーから集められた微粉は、ペレットチャンバーに戻されてペレットに再加工される。一部の養豚用飼料では、冷却されたペレットをクランブラーで荒砕きしたクランブル飼料も利用されている。

ペレットの耐久性、エネルギー消費および生産率に影響を与える要因

高品質の家禽用ペレット飼料を製造する際の主要な目標は、加工工程におけるエネルギーコストを最小限に抑えながら、ペレットの耐久性を高め、生産効率を高めることである(All About Feed, 2012)。一般に、耐久性が高いペレットが製造できると、ペレットが製造時から豚が摂取するまでの間に損傷を受けずに無傷のままである可能性が高くなる。ただし、ペレットの耐久性を高めるために行われている措置の多くはペレットミルの生産効率を低下させ、エネルギーコストの増加を招く(Behnke, 2006)。高品質のペレット製造は、飼料の種類、油脂量、蒸気量、粒子径、水分含量、ダイの材質、ローラーの材質、ローラーとダイのギャップなどの要因に影響される(California Pellet Mill Co., 2016)。ペレット加工工程で使用されるエネルギーの主な用途は、蒸気の発生と、フィーダー、コンディショナー、ペレットミルおよびペレット冷却システムの運転に必要な電力(kwh/トンで測定)であ

るが、使用される電力のほとんど(最大 72%)は蒸気の発生に費やされており(Skoch ら、1983)、Payne(2004)は、豚用飼料におけるペレット加工での目標電力消費量は 10 kWh/トンであるとしている。ペレットの耐久性はわずかに低下するものの、ペレットの品質、生産効率、製造コストを、効果的に最適化する意思決定支援システム(Effective Decision Support Systems)が開発されている(Thomas ら、1997)。

ダイの特性(材質、孔の形状、孔のパターンおよび数)は、ペレットの耐久性、生産効率、エネルギー消費量に影響する(Stark、2009)。飼料がダイを通過する際の摩擦とその後の温度上昇には、ダイ内部の材質が大きく影響する(Behnke、2014 年)。孔の設計はストレートボアまたはレリーフ状だが、ダイにおける最も重要な要素は、孔の直径(D)に対するダイの厚さ(L)であり、一般に L:D で示されている。L:D が増える(ダイが厚くなる)と、摩擦係数とダイでの保持時間が長くなるため、ペレットの耐久性は向上するが、生産効率が低下し、エネルギー消費量が増加する(Traylor、1997)。

ペレットの物理的な品質とは、微粉の割合を最小限に抑えながら、畜産農家の給餌器に届くまでの間の袋詰め、保管、輸送中にペレットが無傷で残る能力を指している(Cramer ら、2003; Amerah ら、2007)。ペレットの品質は通常、PDI(ペレット耐久性指数、ASAE 1997)で示される。高い PDI を達成するためには、固体ブリッジの形成、固体粒子間の引力、機械的相互結合、接着力と凝集力および界面力と毛管圧という重要なメカニズムがある。(Thomas and van der Poel、1996; Kaliyan and Morey、2006)。

ペレットの品質と同様に、ペレットミルのエネルギー消費量は、ダイの直径、押出し速度、L:D、飼料原料の水分含量と成分組成などの変数に依存している(Tumuluru ら、2016)。ペレットミルの電気使用量は、生産効率または時間あたりのエネルギー単位として定量化され、一般に kWh/トンで示されており(Fahrenholz、2012)、飼料の配合設計による PDI への効果と、加工による PDI への効果をモデル化することで検証できる。生産効率を最大化した時のペレット飼料 1 トンあたりのエネルギー消費量

の最小化は、飼料の特性とダイの特性により影響を受け(Fahrenholz、2012)、PDI に対する配合および加工係数の影響をモデル化して調査することで実現できる。

ペレットミルの生産効率は、PDI とエネルギー消費量に影響を与えるもう 1 つの重要な要素である。Stark(2009)は、ペレットミルの生産効率を 545 kg/時から 1646 kg/時に高めると、ペレットミルの効率が 73.3 から 112.4 kg/馬力時間に増加し、PDI が 55.4 から 30.2 まで直線的に低下することを明らかにしている。コンディショニング温度を高めると、機械的な摩擦が減少するため、高い PDI を実現する上で重要な要素となり(Skoch ら、1981)、PDI が増加して、エネルギー消費量が減少する(Pfost、1964)。でん粉の糊化は、コンディショニング温度が上昇すると減少する(Abdollahi ら、2011)。コンディショナーパドルのピッチを変更すると(Briggs ら、1999)、保持時間(熱)が増加し、PDI が高まる(Gilpin ら、2002)。ただし、PDI の改善に対する蒸気圧の影響には一貫した影響は示されていない。Cutlip ら(2008)による報告では、蒸気圧の増加は、PDI をわずかに改善したとしているのに対し、Thomas ら(1997)は、蒸気圧と PDI の間には明確な関係はないと報告している。このような関係性は、PDI や生産効率に蒸気圧の影響がなかったとする初期の研究でも観察されている(Stevens、1987)。その結果、Briggs ら(1999)は、高い PDI を達成するための蒸気圧は 207-345 kPa で十分であると結論している。

多くの配合飼料工場では、飼料の粒子径がペレットの PDI に大きな影響を与えるとの認識を持っているが、これを裏付ける明確な科学的な証拠はない。理論的には、飼料の粒子径が大きくなるとペレットが崩れやすくなる(California Pellet Mill Co.、2016)。ただし、Stevens(1987)は、粉碎トウモロコシの粒子径が生産効率または PDI には影響を及ぼさないことを示している。同様に、Stark ら(1994)は、飼料の粒子径を 543 μm から 233 μm に減少させると、PDI がわずかに増加したと報告しているが、Reece ら(1985)の報告では、粒子径を 670 μm から 1289 μm に増加させても、PDI がわずかに低下しただけだった。飼料の粒子径は、望ましいペレット品質と製造効率を達成するための主要な要素ではないが、飼料の組成はダ

イの潤滑と摩耗および飼料のかさ密度に影響するため重要な要素となり (Behnke, 2006)、ペレット加工係数に基づく様々な飼料原料の特徴付けが行われている (Payne ら, 2001)。これらの相対的な飼料原料のペレット加工係数を配合設計時の制約変数として用いることは理論的には可能であるが、配合設計の主な目的は、安価で家禽の栄養要求量を満たすことであるため、実現性はない。

家禽用飼料のでん粉含量は PDI に大きく影響する。でん粉を 65% 含む飼料では最大の PDI を達成できるが、たん白質含量が高い低でん粉飼料は PDI を低下させる (Cavalcanti and Behnke, 2005a)。飼料中のでん粉とたん白質含量は、コンディショニング温度よりも PDI に大きな影響を与えることが示されている (Wood, 1987)。飼料の油脂含量を高めると PDI が減少し (Cavalcanti and Behnke (2005a)、油脂を 1.5 または 3% 添加すると PDI が 2 および 5% 減少することが示されている (Stark ら, 1994)。ペレット加工前の飼料は、飼料の成分組成間に多くの相互作用があるため、ペレット加工工程中のエネルギー消費量を必ずしも削減できない可能性がある (Briggs ら, 1999)。Cavalcanti and Behnke (2005b) は、トウモロコシ、大豆粕および大豆油を配合した飼料の CP (粗たん白質) 含量の増加は PDI を増加させるとしている。

加工前の粉餌の水分含量は、PDI と加工時のエネルギー消費量に影響を及ぼすもう 1 つの主要な要因である。Gilpin (2002) は、水分含量の増加が PDI を高め、エネルギー消費量を減少させることを示している。さらに、ペレット加工する前に水分を 5% 加えると、高油脂飼料をペレット加工する際の PDI が高まることが示されている (Moritz ら, 2002)。

ペレット品質の測定

ペレットの耐久性は、機械式タンブリングや空気式タンブリングなどの様々なタンブリング試験で測定でき、Stoke's® Tablet Hardness Tester、タンブリングボックステスト、Holman Pellet Tester 等がある (Behnke, 2001; Winowski ら, 1962)。飼料業界で行われている標準的な

ペレット耐久性試験は ASAE S269.4 (ASAE Standards, 2003) であり、これにより PDI を測定する。これは、篩にかけられたサンプルをタンブルボックス内で回転させた後に残るペレット全体の割合と定義されている。この他に使用される手法には、TekPro (英国、ノーフォーク) で製造している Homen pellet tester があるが使用頻度は少ない。Holmen pellet tester は、ピラミッド型の孔のあいたチャンバー内でペレットを攪拌し 20~120 秒においてチャンバーから出た微粉により定量化している。ASAE S269.4 と Holmen pellet tester を比較した報告は 2 報のみである。Winowski (1998) は両方法の結果は相関していたと報告し、Fahrenholz (2012) も両方法の結果は相関しているが、ASAE S269.4 を使用して測定した PDI 値にはより一貫性があるとしている。Fahrenholz (2012) も、PDI のペレットの硬度、密度、保持時間、初期/最終水分間と有意な相関があったが、これらの相関性は低く、PDI の予測変数因子としては使用できないとしている。

DDGS の成分組成

DDGS の化学組成は、米国のエタノール産業が収益性を高めるための新しい工程を採用するのに伴い変化し続けている。DDGS の成分組成はペレットの品質に影響を与える重要な因子であるため、供給源間のバラツキと DCO (ジステラース・コーン油) の抽出による影響を理解しておくことは重要である。表 1 に示すように、現在生産されている低脂肪 DDGS (Kerr ら, 2013) は、これまでの伝統的な DDGS (Spiels ら, 2002; Belyea ら, 2004) に比べて、粗脂肪、NDF およびでん粉含量が比較的 low、CP 含量が高い。しかし、これらの成分組成の変化に関わらず、DDGS の配合割合が高い家禽用飼料では、高品質のペレットを製造することは難しい。なぜなら、これらの化学成分は、望ましい PDI の達成に悪影響を与えるからである。

California Pellet Mill Company (2016) は、「ペレット性」の特性に基づいていくつかの一般的な成分を分類している。DG (ジステラースグレイン) は、ペレット加工性が

表 1. DCD(ジステラーズ・コーン油)を抽出した DDGS の栄養成分組成(乾物)

栄養成分	トウモロコシDDGS (粗脂肪10%以上)	トウモロコシDDGS (粗脂肪10%以下) ³
水分 %	11.1 (9.8-12.8) ¹	12.5 (10.0-14.5)
粗たん白質 %	30.8 (28.7-33.3) ^{1,2}	31.2 (29.8-32.9)
粗脂肪 %	11.5 (10.2-12.6) ^{1,2}	8.0 (4.9-9.9)
NDF %	41.2 (36.7-49.1) ¹	32.8 (30.5-33.9)
でん粉 %	5.3 (4.7-5.9) ²	2.4 (0.8-3.4)
灰分 %	5.2 (4.3-6.7) ^{1,2}	5.4 (4.9-6.1)

¹ Spiehs et al. (2002) ² Belyea et al. (2004) ³ Kerr et al. (2013)

表 2. 飼料成分の特性がペレット品質と生産能力に及ぼす影響(California Pellet Mill Co., 2016 から転載)

飼料原料の特性	ペレット品質への影響	ペレットミルの生産能力への効果
水分	水分含量の増加により品質が向上	N/A
たん白質	たん白質が高いと品質が向上	N/A
脂肪	脂肪含量が2%以上の場合品質が低下	脂質含有量が多い高いと生産速度が高まる
繊維	繊維含量が高いと品質が向上	繊維含量が多いと生産能力が高まる
でん粉	デンプン含量が多いと、加工時の高温多湿で糊化しない限り、品質が低下	N/A
高比重	N/A	高比重が高いと生産能力が高まる
粒度	細粒あるいは州程度の粒子により品質が向上	細粒あるいは州程度の粒子が生産能力を高める

低く、ダイに対して中程度の研磨性があると分類されている。表 2 に示すように、DDGS のペレット加工性が低いと分類される理由はいくつかある。まず、DDGS は、水分含量が比較的 low、高品質のペレットを製造するためには、コンディショナーで供給される蒸気に加えて、水分を加える必要がある。DDGS の CP 含量が比較的高いと、ペレット加工中にたん白質が可塑化することでペレットの品質が高まるが、DDGS では脂肪含量が比較的多く、飼料への配合量と他の原料由来の油脂量によって、ペレットの品質が低下する。DDGS は比較的多量の繊維を含んでいるが、繊維をペレットミルで圧縮することは難しいため、ペレットの生産効率が低下する。DDGS のでん粉含量は低いため、ペレットの品質向上にはつながらない。加えて、DDGS は適度なかさ密度を持っているため、飼料中の他の飼料原料のかさ密度や配合量によっては生産効率を低下させる可能性がある。DDGS の粒子径は、供給源によって 294 μm から 1,078 μm で変動する(Kerrら、

2013)。微粉および中程度の粒子径は、重量当たりの表面積が大きく、蒸気由来の水分をより多く吸収するため、ペレットの品質を向上させ、粒子径が大きい成分から微粉が生成されるための破断点として機能するのを防ぐ可能性がある。さらに、粒子径が低いまたは中程度の原料と飼料は、ダイの潤滑性を改善し、生産効率を高める可能性がある。

DDGS を含む豚用飼料のペレット加工

DDGS を配合した養豚用ペレット飼料の耐久性を評価した報告はそれほど多くなく、また、それらの結果には一貫性がない。Fahrenholz(2008)は、DDGS の配合割合の増加に伴い、PDI が低下した(配合量 0%:PDI 90.3、10%:88.3、20%:86.8)が、この PDI のわずかな減少は、実用上の影響はかなり少ない。Stender and Honeyman(2008)は、DDGS を 20%配合したペレット飼料と DDGS を含まないペレット飼料を比較すると、PDI は 78.9 から

66.8 に著しく低下した。一方で、Feoli(2008)は、トウモロコシ・大豆粕主体の養豚用飼料に DDGS を 30%配合すると、PDI が 88.5 から 93.0 に高まったと報告している。Farhenholz ら(2008)は、3.97 mm×31.75 mmのペレットダイで、コンディショニング温度を 85°Cとした場合に、DDGS の配合割合の増加に伴い、PDI とかさ密度が低下したとしている。De Jong ら(2013)は、ほ乳期子豚用のトウモロコシ・大豆粕主体飼料と DDGS 30%配合飼料を、3.18 mm×3.81 mmのダイを用いてペレット加工した場合の PDI(93.3 vs 96.9)、崩れたペレットの割合(1.2 vs 8.0%) および生産率(1,098 vs 1,287 kg/時間)には差がなかったと報告している。これらの一貫性がない結果は、各報告で DDGS を配合した飼料の PDI に影響する多くの要因には相互作用がある可能性が高いことを示唆している。

これらの要因の一つは、DDGS の粗脂肪含量にある可能性がある。前述のように、飼料と飼料原料の粗脂肪含量は、ペレットの品質と生産速度に影響を与える。米国のエタノール工場の大部分で DCO(ジスチラーズ・コーン・オイル)の部分的な抽出が行われているため、DDGS の粗脂肪含量には変動が大きい(5~13%)。Yoder(2016)は、トウモロコシ・大豆粕主体の肥育豚用飼料に低脂肪および高脂肪 DDGS を 15 または 30%配合してペレット加工した場合の影響を調査した。コンディショニング温度は 65.6°Cまたは 82.2°Cの 2 水準で、4.0 mm×32 mmのダイを使用し、680 kg/時で加工した。ペレットの品質は、4 つのペレット耐久性テスト(標準 PDI 法(ASABE S269.4, 2007)、3 つの 19 mm六角ナットを使用した修正 PDI 法、Holmen NHP 100 法(処理時間 60 秒)、Holmen NHP 200 法(処理時間 240 秒))を用いて評価した。DDGS の配合量(15 または 30%)とコンディショニング温度(65.6 または 82.2°C)は PDI に影響を与えなかったが、高脂肪 DDGS を配合した場合の PDI は、低脂肪 DDGS を配合した場合より低かった(82.8 vs 88.0)。また、使用したペレット耐久テストにより、得られた結果に大きな違いが認められた。すなわち、標準 PDI 法での値が最も高く(95)、以下、修正 PDI(91)、Holmen NHP 100 法(89%)、Holmen NHP 200 法(67%)であった。この結果は、DDGS を 30%まで配合したトウモロコシ・大豆粕主体

の豚肥育期用飼料では、PDI が比較的較的高いペレット飼料を製造出来ることを示しており、低脂肪 DDGS を使用すると、高脂肪 DDGS を使用する場合より、PDI が約 5%高まる。しかし、テスト方法によって、PDI の解釈に相違が生ずる可能性があるため、各文献間での PDI を比較する場合は注意が必要となる。

DDGSを含む飼料のペレット化がエネルギーと栄養成分の消化性に及ぼす効果

養豚用飼料のペレット化により、でん粉(Freire ら、1991; Rojas ら、2016)、粗脂肪(Noblet and van Milgen、2004; Xing ら、2004)、乾物、窒素および総エネルギー(Wondra ら、1995a)の消化率が高まることが示されている。DDGS を 30%含むほ乳期子豚用ペレット飼料は、粉餌に比べて、乾物、有機物、GE(総エネルギー)、CP(粗たん白質)の見かけの全消化管消化率を改善した(Zhu ら、2010)。最近では、Rojasら(2016)は、トウモロコシ・大豆粕主体飼料および DDGS を 25%配合したトウモロコシ・大豆粕主体飼料をペレット加工、エクストルード加工、エクストルードペレット加工した場合のエネルギーおよび栄養成分の消化率への影響を評価している。表 3 に示すように、ペレット加工、エクストルード加工あるいはエクストルード加工により、GE、でん粉、CP、乾物、灰分、酸分解粗脂肪およびアミノ酸の回腸消化率が高まった。多くの栄養成分において、消化率の改善効果が最も大きかったのはエクストルード加工で、エクストルードペレット加工には、エクストルード加工以上の改善効果はなかった。他のいくつかの報告では、アミノ酸の見かけの回腸消化率がペレット加工あるいはエクストルード加工によって改善されることが示されている(Muley ら、2007; Stein and Bohlke、2007; Lundblad ら、2012)が、常に改善効果があるわけではない(Herkleman ら、1990)。DDGS を含む飼料では、ペレット加工により ME 価が乾物換算値で 97 kcal/kg増加し、エクストルード加工により 108 kcal/kg乾物増加したが、エクストルードペレット加工では ME 科の改善はなかった(Rojasら、2016; 表 4)。同様に、トウモロコシ・大豆粕主体飼料をペレット加工すると、ME 価が 81 kcal/kg増加し、エクストルードとペレット加工に

表3. トウモロコシ DDGS あるいは大豆皮の配合の有無がトウモロコシ・大豆粕主体飼料の GE(総エネルギー)、乾物、有機物、酸分解粗脂肪、アミノ酸の AID(見かけの回腸消化率、%) (Rojas ら、2016 から転載)

	加工の種類			
	粉餌	ペレット	エクストルード	エクストルードペレット
総エネルギー	66.2 ^d	68.4 ^c	72.7 ^a	71.0 ^b
でん粉	96.4 ^b	97.7 ^a	98.0 ^a	98.4 ^a
CP	72.5 ^b	73.6 ^b	77.9 ^a	76.6 ^a
乾物	63.5 ^d	65.3 ^c	69.6 ^a	67.9 ^b
灰分	21.7 ^c	24.4 ^{bc}	32.4 ^a	27.4 ^b
有機物	66.2 ^c	67.9 ^b	71.9 ^a	70.4 ^a
アミノ酸 %				
アルギニン	88.3 ^b	88.6 ^b	91.6 ^a	91.1 ^a
ヒスチジン	83.1 ^b	84.9 ^a	85.8 ^a	85.6 ^a
イソロイシン	78.8 ^c	81.3 ^b	84.3 ^a	83.7 ^a
ロイシン	82.2 ^c	84.9 ^b	87.1 ^a	86.4 ^a
リジン	78.0 ^c	79.6 ^b	81.8 ^a	80.9 ^{ab}
メチオニン	83.3 ^c	86.5 ^b	87.7 ^a	86.7 ^{ab}
シスチン	66.7	68.6	67.9 ^a	67.6
フェニルアラニン	81.2 ^c	83.9 ^b	87.3 ^a	86.5 ^a
トレオニン	70.9 ^c	73.3 ^b	75.7 ^a	74.7 ^{ab}
トリプトファン	78.1 ^c	80.5 ^b	83.2 ^a	83.4 ^a
バリン	75.6 ^c	78.4 ^b	80.5 ^a	79.9 ^a

a - d 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

表 4. トウモロコシ・大豆粕主体飼料および DDGS を 25%配合したトウモロコシ・大豆粕主体飼料の大豆ミールの代謝エネルギー量-25%DDGS ダイエット(ミールの形態またはペレット加工(85°C)、エクストルード加工(115°C)およびエクストルードペレット加工後の育成豚における ME(代謝エネルギー)価(Rojas ら、2016 から改編)

	トウモロコシ・大豆粕主体飼料				トウモロコシ・大豆粕主体飼料+25%DDGS			
	粉餌	ペレット	エクストルード	EP	粉餌	ペレット	エクストルード	EP
ME kcal/kg	3,868 ^d	3,949 ^{bc}	3,893 ^{cd}	3,957 ^{bc}	3,947 ^{cd}	4,044 ^{ab}	4,055 ^a	3,926 ^{cd}

a - d 異符号間に有意差あり (p < 0.05)

より 89 kcal/kg増加したが、エクストルード加工のみでは ME 価は増加しなかった。

DDGS を含む飼料のペレット化が発育成績に及ぼす効果

養豚用飼料をペレット加工すると、飼料効率(Wondra ら、1995a; Nemechek ら、2015)と増体量(Wondra ら、1995a; Myers ら、2013; Nemechek ら、2015)が改善されることが示されている。養豚用のペレット飼料では、粉餌に比べて飼料摂取量が減少する事例がしばしば観察され

ているが、これは浪費される飼料の減少(Skoch ら、1983; Hancock and Behnke、2001)とエネルギー消化率の改善(NRC、2012)に起因している。DDGS を 15%配合したペレット飼料を給与すると、日増体量への影響はないものの、飼料摂取日量が低下し、飼料変換率が改善される。DDGS を 30%配合したペレット飼料を育成期～肥育期の豚に給与すると、全体的な増体量が高まる傾向を示し、飼料摂取量には影響はなかったため、飼料要求率が改善された(Fry ら、2012 ; Overholt ら、2016)。

DDGS を含む飼料のペレット化が枝肉形質と収量に及ぼす効果

Wondra ら(1995a)、Myers ら(2013)、Nemecek ら(2015)の報告では、ペレットまたは粉餌の給与が枝肉形質に及ぼす影響を調査していないが、Fry ら(2012)の報告では枝肉歩留の改善、Matthews ら(2014)の報告では背脂肪およびバラ肉の脂肪の増加が報告されている。最近の De Jong ら(2016)の報告では、DDGS を 15% 配合した飼料をペレット加工しても、粉餌と比べて、温屠体重量、枝肉収量、背脂肪厚および脂肪を除いた枝肉歩留に差はなかった。これに対して、Overholt ら(2016)は、育成期～肥育期の豚にペレット飼料を給与すると、粉餌に比べて温屠体重量および第 10 肋骨の背脂肪厚が増加し、赤身肉割合が低下したが、DDGS を 30% 配合しても影響はなく、肉質にも影響はなかった。ペレット飼料を給与すると、消化管重量が減少し、枝肉歩留が高まるが、DDGS を配合した飼料を給与すると、消化管の重量と内容物重量が増加し、結果として枝肉歩留収量が低下した。

DDGS を含む飼料のペレット化が取扱いと貯蔵性に及ぼす効果

DDGS 配合飼料のペレット加工は、飼料原料の分離を減らし、貯蔵ビンと給餌器における流動性を改善し、豚による粒子径が異なる飼料原料の選り食いを防止するために有効である(Clementson ら、2009; Ileleji ら、2007)。

DDGS を含む飼料のペレット化がカビ毒汚染に及ぼす効果

Frobose ら(2015)は、DON(デオキシニバレノール)を 20.6 mg/kg 含む DDGS への二亜硫酸ナトリウム(メタ重亜硫酸ナトリウム)の添加と、この DDGS を配合した飼料をペレット加工する際のコンディショニング温度化(66 および 82°C)および保持時間(30 および 60 秒)の影響を調査している。ペレットの加工条件は DON 濃度に影響を与えなかったが、DDGS への二亜硫酸ナトリウムの添加量を高めると、DON 濃度が低下した。二亜硫酸ナトリウムを添加した DDGS 配合飼料をペレット加工すると、ほ乳期子豚の増体量と飼料摂取量が増加した。この結果は、ほ乳期子豚をペレット加工する前に、DON で汚染された

DDGS に二亜硫酸ナトリウムを添加することが、DON による発育成績への悪影響を軽減するのに有効であることを示している。

DDGS を含む飼料のペレット化が PED ウイルスの生存性に及ぼす効果

PEDV(豚流行性下痢ウイルス)は、2013 年に米国の養豚産業において、若齢豚の死亡率を劇的に高めることで、壊滅的な影響を引き起こした。しかし、PEDV ウイルスは熱に敏感で、ペレット加工プロセス中の加温と曝露時間は、配合飼料による PEDV の感染性を低下させる可能性がある(Pospischil ら、2002; Nitikanjana、2014; Thomas ら、2015)。Cochrane ら(2017)は、ペレット加工工程中で、コンディショニング温度が 54.4°C を超えると、養豚用飼料中の PEDV の量と感染力を低下させるのに有効であると思われるとしている。実際、Cochrane ら(2017)の結果は、飼料のペレット化することで、Trudeau ら(2016)が示している条件(145°C、10 分間)よりも短い保持時間(30 秒)と、はるかに低い温度で PEDV が不活性化したことを示している。養豚用飼料をペレット加工することで他の病原体の量と感染力が低下するかどうかは明らかになっていないが、ペレット加工は PEDV が配合飼料工場から養豚農家に伝染するリスクを部分的に減らす有効な手段であるものと思われる。

DDGS を含む飼料のペレット化が飼料価格に及ぼす影響

ペレット加工によりコストが増加する(Wondra ら、1995b)が、増体量の改善と死亡率の低下による経済的利益がこのペレット加工による追加のコストを超える場合、ペレット加工によるコストの増加は許容範囲となる。DDGS そのもののペレット加工は、ペレット加工のコストに加えて、DDGS を飼料に配合する前に粉砕する必要があり、場合によっては、配合後に再度ペレット加工する必要が出てくるため、コストが高くなる。

PDI が低く、微粉が多いと発育成績を低下させる

PDI が低く、したがって微粉の量が多いペレットは、豚の発育成績に悪影響を与える可能性がある。Stark ら

(1993)は、ほ乳期と育成～肥育期の両方で豚の発育成績に及ぼすペレット品質の影響を評価した。ほ乳期において、25%の微粉を含むペレット飼料を給与すると、微粉を取り除いたペレット飼料と比べて、飼料効率が7%低下した。育成～肥育期においては、微粉の量が増加すると飼料効率が低下し、ペレット飼料を使用する有意性も低下した(Stark ら、1993)。一方で、Knauer(2014)は、粒子径が異なる DDGS(640 vs 450 μm)と、微粉の量が異なるペレット飼料の給与による影響を調査し、肥育豚の発育成績には影響がなかったとしている

ペレット化のための微粉碎は胃潰瘍の発生率を高める

胃の病変と潰瘍は、養豚経営において一般的な問題であり(Grosse Liesner ら、2009; Cappai ら、2013)、大きな経済的損失をもたらしている(Friendship、2006)。ペレット飼料を給与した豚では、粉餌を給与した場合に比べて、過角化症、粘膜びらん、出血性潰瘍がより一般的に観察されている(Mikkelsen ら、2004、Canibe ら、2005; Cappai ら、2013; Mößeler ら、2014; Liermann ら、2015)。この理由は明確ではないが、何人かの研究者は、飼料の粒子径の影響を示唆している(Vukmirovic ら、2017)。Vukmirovic ら(2017)は、ペレット加工工程中で、粒子径がさらに減少することを示しているが、利用可能なすべての公開文献の結果をまとめると、400 μm未満の粒子の量が29%未満の飼料では、豚における胃潰瘍発生のリスクが低いと結論付けている。De Jong ら(2016)は、豚に DDGS を0 または 15%配合したペレット飼料を少なくとも58日間給与した場合、粉餌を給与した豚と比べて、胃潰瘍と角質化の割合が高かったと報告している。なお、彼らは同時に、仕上げ段階でペレット飼料と粉餌を交互に給与することで、胃潰瘍の発生率を下げながら、飼料効率を改善し続けることができるとも報告している(De Jong ら、2016)。同様に、Overholt ら(2016)は、育成期の豚に DDGS を0 または 30%含む飼料をペレット加工し、ペレット飼料を給与した豚では食道領域の病変スコアが高いが、DDGS を30%配合しても病変の発生率には影響を与えなかったと報告している。

ペレット化は脂質過酸化を増加させ、添加したビタミンおよび酵素の活性を低下させる可能性がある

ペレット加工工程には熱と水分が加えられるため、脂質過酸化の増加(Shurson ら、2015)とビタミン活性の低下(Pickford、1992)をもたらす可能性がある。Jongbloed and Kemme(1990)は、フィターゼ活性がある養豚用飼料をコンディショニング温度80°Cでペレット加工すると、フィターゼの活性が低下し、リンの消化率が低下することを明らかにしている。ペレット加工工程には飼料に影響を与え得る多くの要素があるが、コンディショニング温度が高まるとフィターゼの活性が低下する(Simons ら、1990)。

豚の DDGS 飼料のペレット品質を改善するための予測式

豚および家禽に関する公表論文の中でペレットの耐久性、生産効率、エネルギー使用量について報告された結果には一貫性はなく、これらの重要な対策に影響を与える様々な要因の間には多くの相互作用があることが示されている。Fahrenholz(2012)は、これらの複雑な相互作用に対応して、豚や家禽用飼料に DDGS を配合する場合の影響を推定するために、DDGS 配合飼料の PDI とエネルギー消費量推定のための予測式を開発した。

$$\begin{aligned} \text{PDI} = & 53.90 - (0.04 \times \text{トウモロコシの粒子径, } \mu\text{m}) - \\ & (6.98 \times \text{油脂添加量, } \%) - (1.12 \times \text{DDGS 配合割合, } \%) - \\ & (1.82 \times \text{生産効率, kg/時}) + (0.27 \times \text{コンディショニング温度, } ^\circ\text{C}) + \\ & (0.04 \times \text{保持時間, 秒}) + \\ & (1.78 \times \text{ダイの L:D}) + (0.006 \times \text{粒子径} \times \text{ダイの L:D}) \\ & - (0.23 \times \text{油脂添加量} \times \text{DDGS 配合割合}) + (0.06 \times \text{油脂添加量} \\ & \times \text{コンディショニング温度}) + (0.15 \times \text{DDGS 配合割合} \times \text{ダイの L:D}) \end{aligned}$$

この予測式の R²(決定係数)は 0.92 で、推定された PDI と実測値の差は 1.1(約1%の変動)であった。ダイの L:D は、PDI に最大の影響を与える。ダイの厚さを業界では一般的な 8:1 から 5.6:1 に低下させると、PDI は 10.9 ユニット減少する。コンディショニング温度を 65°C から 85°C に高めると、PDI が 7.0 ユニット高まり、飼料への大豆油の添加量を 3% から 1% に低下させると、PDI が 5.4

ユニット高まった。粉碎トウモロコシの粒子径を 462 μm から 298 μm に減少させることは、PDI をわずかに(0.5 ユニット)高めた。同様に、飼料生産効率を 1,814 から 1,360 kg /時に下げると、PDI は 0.6 ユニット高まり、PDI への影響は最小限だった。

エネルギー消費量、kWh/トン = $55.93 - (0.01 \times \text{トウモロコシの粒子径, } \mu\text{m}) + (1.88 \times \text{油脂添加量, } \%) - (0.05 \times \text{DDGS 配合割合, } \%) - (30.90 \times \text{生産効率, kg/時}) - (0.41 \times \text{コンディショニング温度, } ^\circ\text{C}) + (0.17 \times \text{保持時間, 秒}) - (1.20 \times \text{ダイの L:D}) + (0.02 \times \text{トウモロコシの粒子径} \times \text{生産効率}) - (0.0001 \times \text{トウモロコシの粒子径} \times \text{コンディショニング温度}) - (1.41 \times \text{油脂添加量} \times \text{生産効率}) - (0.01 \times \text{油脂添加量} \times \text{DDGS 配合割合}) - (0.21 \times \text{DDGS 配合割合} \times \text{生産効率}) + (0.004 \times \text{DDGS 配合割合} \times \text{コンディショニング温度}) + (0.22 \times \text{生産効率} \times \text{コンディショニング温度}) - (0.11 \times \text{生産効率} \times \text{保持時間, 秒}) + (1.21 \times \text{生産効率} \times \text{ダイの L:D})$

この予測式の R² は 0.95 で、予測エネルギー消費量と実測値の差は 0.3 (約 3%の変動) だった。コンディショニング温度を 65°C から 85°C に高めると、エネルギー消費量が 2.7 kWh /トン削減され、L:D を 5.6:1 にすると、エネルギー消費量が 1.3 kWh /トン削減された。その他の要因(トウモロコシの粒子径、大豆油の添加量、生産速度および保持時間)によるエネルギー消費量への影響は 1.0 kWh /トン以下であった。この予測式が示しているように、各変数間には複数の相互作用がある。したがって、現在のペレット加工条件で、目標とする PDI やエネルギー消費量が得られない場合は、他の要因を検討することで、より良い結果が達成できる。

引用文献

Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Wester, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2012. The effect of manipulation of pellet size (diameter and length) on pellet quality and performance, apparent metabolisable energy and ileal nutrient digestibility in broilers fed maize-based diets. *Anim. Prod. Sci.*, 53:114-120.

Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Webster, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2011. Influence of feed form and conditioning temperature on performance, apparent metabolisable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:88-99.

All About Feed. 2012. All About Feed - The better the pellet, the better the performance <http://www.allaboutfeed.net/Nutrition/Research/2012/2/The-better-the-pellet-the-better-the-performance-AAF012746W/> (accessed 9-21-17).

Amerah, A.M., V. Ravindran, R.G. Lentle, and D.G. Thomas. 2007. Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. *World's Poult. Sci. J.* 63:439-455.

ASAE. 1997. S269.4. Cubes, pellet, and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture content. St Joseph, MI. ASAE Standards. 2003. S269.4. Cubes, pellet, and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture content. St. Joseph, MI.

Behnke, K.C. 2014. Pelleting with Today's Ingredient Challenges. Kansas State University, Manhattan, KS.

Behnke, K.C. 2006. The art (science) of pelleting. Tech. Rep. Series: Feed Tech. American Soya Association, Singapore.

Behnke, K.C. 2001. Factors influencing pellet quality. *Feed Tech.* 5:19-22.

Belyea, R.L., K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2004. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. *Bioresource Tech.* 94:293-298.

Briggs, J.L., D.E. Maier, B.A. Watkins, and K.C. Behnke. 1999. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poult. Sci.* 78:1464-1471.

California Pellet Mill Co., 2016. The Pelleting Process. https://www.cpm.net/downloads/Animal_Feed_Pelleting.pdf (accessed 11-11-17).

- Canibe, N., O. Hojberg, S. Hojsgaard, and B.B. Jensen. 2005. Feed physical form and formic acid addition to the feed affect the gastrointestinal ecology and growth performance of growing pigs. *J. Anim. Sci.* 83:1287–1302.
- Cappai, M.G., M. Picciau, and W. Pinna. 2013. Ulcerogenic risk assessment of diets for pigs in relation to gastric lesion prevalence. *BMC Vet. Res.* 9:36–44.
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005a. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: a mixture experimental approach. I. *Cereal Chem.* 82:462–467.
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005b. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: a mixture experimental approach. II. *Cereal Chem.* 82:462–467.
- Clementson, C.L., K.E. Ileleji, and R.L. Strohshine. 2009. Particle segregation within a pile of bulk density of distillers dried grains with solubles (DDGS) and variability in nutrient content. *Cereal Chem.* 86:267–273.
- Cochrane, R.A., L.L. Schumacher, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, A.R. Huss, C.R. Stark, J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, R.D. Goodband, J. Bia, Q. Chen, J. Zhang, P.C. Gauger, R.J. Derscheid, D.R. Magstadt, R.G. Main, and C.K. Jones. 2017. Effect of pelleting on survival of porcine epidemic diarrhea virus-contaminated feed. *J. Anim. Sci.* 95:1170–1178.
- Cramer, K.R., K.J. Wilson, J.S. Moritz, and R.S. Beyer. 2003. Effect of sorghum-based diets subjected to various manufacturing procedures on broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 12:404–410.
- Cutlip, S.E., J.M. Hott, N.P. Buchanan, A.L. Rack, J.D. Latshaw, and J.S. Moritz. 2008. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value. *J. Appl. Poult. Res.* 17:249–261.
- Dee, S., T. Clement, A. Schelkopf, J. Nerem, D. Knudsen, J. Christopher-Hennings, and E. Nelson. 2014. An evaluation of contaminated complete feed as a vehicle for porcine epidemic diarrhea virus infection of naïve pigs following consumption via natural feeding behavior: Proof of concept. *BMC Vet. Res.* 10:176.
- De Jong, J.A., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.C. Woodworth, and M.W. Allerson. 2016. Evaluating pellet and meal feeding regimens on finishing pig performance, stomach morphology, and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 94:4781–4788.
- De Jong, J.A., J.M. DeRouchey, M.D. Tokach, and R.D. Goodband. 2013. Effects of ne-grinding corn or dried distillers grains with solubles and diet form on growth performance and caloric efficiency of 25- to 50-lb nursery pigs. *Swine Day 2013*, Kansas State University, Manhattan, KS, p. 102–109.
- Fahrenholz, A. 2012. Evaluating factors affecting pellet durability and energy consumption in a pilot feed mill and comparing methods for evaluating pellet durability. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, 92 pages.
- Fahrenholz, A.C. 2008. The effects of DDGS inclusion on pellet quality and pelleting performance. Master's thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, 56 pages.
- Falk, D. 1985. Pelleting cost centre. In: *Feed manufacturing Technology III*, R.R. McElhiney (Ed.). American Feed manufacturers Association, Arlington, VA, pp. 167–190.
- Feoli, C. 2008. Use of corn- and sorghum-based distillers dried grains with solubles in diets for nursery and finishing pigs. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS, 152 pages.
- Freire, J.B., A. Aumaitre, and J. Peiniau. 1991. Effects of feeding raw and extruded peas on ileal digestibility, pancreatic enzymes and plasma glucose and insulin in early weaned pigs. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 65:154–164.
- Friendship, R.M., 2006. Gastric ulcers. In: *Diseases of Swine*, B.E. Straw, J.J. Zimmerman, S. D'Allaire, D.J. Taylor, and I.A. Ames (eds.). Blackwell Professional Publishing, UK, pp. 891–900.

- Frobose, H.L., E.D. Fruge, M.D. Tokach, E.L. Hansen, J.M. DeRouche, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2015. The influence of pelleting and supplementing sodium metabisulfite (Na₂S₂O₅) on nursery pigs fed diets contaminated with deoxynivalenol. *Anim. Feed Sci. Technol.* 210:152–164.
- Fry, R.S., W. Hu, S.B. Williams, N.D. Paton, and D.R. Cook. 2012. Diet form and by-product level affect growth performance and carcass characteristics of grow-finish pigs. *J. Anim. Sci.* 90(Suppl. 3):380 (Abstr.)
- Gilpin, A.S., T.J. Herrman, K.C. Behnke, and F.J. Fairchild. 2002. Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process. *Appl. Engineering Agriculture*. 18:331–340.
- Grosse Liesner, G.V., V. Taube, S. Leonhard-Marek, A. Beineke, and J. Kamphues. 2009. Integrity of gastric mucosa in reared piglets and effects of physical form of diets (meal/pellets), pre-processing grinding (coarse/–ne) and addition of lignocellulose (0/2.5 percent). *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 93:373–380.
- Hancock, J.D., and K.C. Behnke. 2001. Use of ingredient and diet processing technologies (grinding, mixing, pelleting, and extruding) to produce quality feeds for pigs. In: *Swine Nutrition*, 2nd ed., A.J. Lewis and L.L. Southern, editors. CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 480–486.
- Herkelman, K.L., S.L. Rodhouse, T.L. Veum, and M.R. Ellersieck. 1990. Effect of extrusion in the ileal and fecal digestibilities of lysine in yellow corn in diets for young pigs. *J. Anim. Sci.* 68:2414–2424.
- Ileleji, K.E., K.S. Prakash, R.L. Strohshine, and C.L. Clementson. 2007. An investigation of particle segregation in corn processed dried distillers grains with solubles (DDGS) induced by three handling scenarios. *Bulk Solids Powder Sci. Technol.* 2:84–94.
- Jongbloed, A.W., and P.A. Kemme. 1990. Effect of pelleting mixed feeds on phytase activity and the apparent absorbability of phosphorus and calcium in pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 28:233–242.
- Kaliyan, N., and R.V. Morey. 2006. Factors affecting strength and durability of densified products. In: 2006 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231–3243.
- Knauer, M. 2014. The effect of regrinding major feed ingredients to improve pellet quality, pig performance and producer profitability. *Res. Rep. Anim. Sci.*, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, p. 1–14.
- Liermann, W., A. Berk, V. Böschenb, and S. Dänicke. 2015. Effects of particle size and hydro-thermal treatment of feed on performance and stomach health in fattening pigs. *Arch. Anim. Nutr.* 69:455–472.
- Lundblad, K.K., J.D. Hancock, K.C. Behnke, L.J. McKinney, S. Alavi, E. Prestløkken, and M. Sørensen. 2012. Ileal digestibility of crude protein, amino acids, dry matter and phosphorous in pigs fed diets steam conditioned at low and high temperature, expander conditioned or extruder processed. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:237–241.
- Matthews, N., L. Greiner, C.R. Neill, S. Jungst, B. Fields, R.C. Johnson, and A. Sosmicki. 2014. Effect of feed form (mash vs. pellets) and ractopamine on pork fat quality. *J. Anim. Sci.* 92(Suppl. 2):148 (Abstr.).
- Mikkelsen, L.L., J.N. Patrick, S.H. Mette, and B.B. Jensen. 2004. Effects of physical properties of feed on microbial ecology and survival of *Salmonella enterica* serovar typhimurium in the pig gastrointestinal tract. *Appl. Environ. Microbiol.* 70:3485–3492.
- Miller, T.G. 2012. Swine feed efficiency: Influence of pelleting. Iowa Pork Industry Center Fact Sheet 12. http://lib.dr.iastate.edu/ipic_factsheets/12.

- MöBeler, A., M.F. Wintermann, M.J. Beyerbach, and J. Kamphues. 2014. Effects of grinding intensity and pelleting of the diet and fed either dry or liquid and on intragastric milieu, gastric lesions and performance of swine. *Anim. Feed Sci. Technol.* 194:113–120.
- Moritz, J. S., K.J. Wilson, K.R. Cramer, R.S. Beyer, L.J. McKinney, W.B. Cavalcanti, and X. Mo. 2002. Effect of formulation density, moisture, and surfactant on feed manufacturing, pellet quality, and broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 11:155–163.
- Muley, N.S., E. van Heugten, A.J. Moeser, K.D. Rausch, and T.A.T.G. van Kempen. 2007. Nutritional value for swine of extruded corn and corn fractions obtained after dry milling. *J. Anim. Sci.* 85:1695–1701.
- Myers, A.J., R.D. Goodband, M.D. Tokach, S.S. Dritz, J.M. DeRouche, and J.L. Nelssen. 2013. The effects of diet form and feeder design on the growth performance of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3420–3428.
- Nemeček, J.E., M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, J.M. DeRouche, and J.C. Woodworth. 2015. Effects of diet form and type on growth performance, carcass yield, and iodine value of finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:4486–4499.
- Nitikanchana, S. 2014. Potential alternatives to reduce porcine epidemic diarrhea virus (PEDV) contamination in feed ingredients. [http://www.asi.k-state.edu/species/swine/research-and-extension/PEDV percent20contamination percent20in percent20feed percent20ingredients_Feb percent202016.pdf](http://www.asi.k-state.edu/species/swine/research-and-extension/PEDV%20contamination%20in%20feed%20ingredients_Feb%202016.pdf).
- Noblet, J., and J. van Milgen. 2004. Energy value of pig feeds: Effect of pig body weight and energy evaluation system. *J. Anim. Sci.* 82(E-Suppl.):E229–E238.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Overholt, M.F., J.E. Lowell, E.K. Arkfeld, I.M. Grossman, H.H. Stein, A.C. Dilger, and D.D. Boler. 2016. Effects of pelleting diets without or with distillers' dried grains with solubles on growth performance, carcass characteristics, and gastrointestinal weights of growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:2172–2183.
- Payne, J.D., 2004. Predicting pellet quality and production efficiency. *World Grain* 3, 68–70.
- Payne, R.L., T.D. Bidner, L.L. Southern, and K.W. McMillin. 2001. Dietary effects of soy iso-avones on growth and carcass traits of commercial broilers. *Poult. Sci.* 80:1201–1207.
- Pfost, H.B. 1964. The effect of lignin binders, die thickness and temperature on the pelleting process. *Feedstuffs* 36:20–54.
- Pickford, J.R. 1992. Effects of processing on the stability of heat labile nutrients in animal feeds. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*, P.C. Garnsworthy, W. Haresign, and D.J. A. Cole (Eds.), Butterworth Heinemann, Oxford, UK. Pp. 177–192.
- Pospischil, A., A. Stuedli, and M. Kiupel. 2002. Update on porcine epidemic diarrhea. *J. Swine Health Prod.* 10:81–85.
- Reece, F.N., B.D. Lott, and J.W. Deaton. 1985. The effects of feed form, grinding method, energy level, and gender on broiler performance in a moderate (21 C) environment. *Poult. Sci.* 64:1834–1839.
- Richert, B.T., and J.M. DeRouche. 2010. Swine feed processing and manufacturing. In: D. J. Meisinger, editor, *National swine nutrition guide*. Pork Center of Excellence, Ames, IA. p. 245–250.
- Robinson, R. 1976. Pelleting-introduction and general definitions. *Feed manufacturing technology*. Feed Production Council, American Feed Manufacturing Association, Inc., Chicago, IL, 96–103.
- Rojas, O.J., E. Vinyeta, and H.H. Stein. 2016. Effects of pelleting , extrusion , or extrusion and pelleting on energy and nutrient digestibility in diets containing different levels of fiber and fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:1951–1960.
- Schumacher L.L., J.C. Woodworth, C.R. Stark, C.K. Jones,

- R.A. Hesse, R.G. Main, J. Zhang, P.C. Gauger, S.S. Dritz, and M.D. Tokach. 2015. Determining the minimum infectious dose of porcine epidemic diarrhea virus (PEDV) in a feed matrix. *Kansas Agric. Exp. Station Res. Rep.* Vol. 1, Issue 7. Manhattan, KS. p. 1–8.
- Shurson, G.C., B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. and Biotechnol.* 6:10 pp.
- Simons, P.C.M., H.A.J. Versteegh, A.W. Jongbloed, P.A. Kemme, P. Slump, K.D. Bos, M.G.E. Wolters, R.F. Beudeker, and G.J. Verschoor. 1990. Improvement of phosphorus availability by microbial phytase in broilers and pigs. *Br. J. Nutr.* 64:525–540.
- Skoch, E.R., S.F. Binder, C.W. Deyoe, G.L. Allee, and K.C. Behnke. 1983. Effects of steam pelleting condition and extrusion cooking on a swine diet containing wheat middlings. *J. Anim. Sci.* 57:929–935.
- Skoch, E.R., K.C. Behnke, C.W. Deyoe, and S.F. Binder. 1981. The effect of steam-conditioning rate on the pelleting process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 6:83–90.
- Smallman C. 1996. Maximizing conditioning potential. *Feed Milling International* 190:16–19.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639–2645.
- Stark, C.R. 2009. Effect of die thickness and pellet mill throughput on pellet quality. Abstract T89. Southern Poul. Sci. Soc. Meeting.
- Stark, C.R., K.C. Behnke, J.D. Hancock, S.L. Traylor, and R.H. Hines. 1994. Effect of diet form and fines in pelleted diets on growth performance of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 72(Suppl 1):214.
- Stark, C.R., R.H. Hines, K.C. Behnke, and J.D. Hancock. 1993. Pellet quality affects growth performance of nursery and finishing pigs. In: *Swine Day Conf. Proc.*, Manhattan, KS. pages 71–74.
- Stein, H.H., and R.A. Bohlke. 2007. The effects of thermal treatment of field peas (*Pisum sativum* L.) on nutritional and energy digestibility by growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:1424–1431.
- Stender, D., and M.S. Honeyman. 2008. Feeding pelleted DDGS-based diets to finishing pigs in deep-bedded hoop barns. *J. Anim. Sci.* 86 (Supp. 3):84.
- Stevens, C.A. 1987. Starch gelatinization and the influence of particle size, steam pressure and die speed on the pelleting process. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, KS.
- Thomas, M., and A.F.B van der Poel. 1996. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Anim. Feed Sci. Technol.* 61:89–112.
- Thomas, M., T. van Vliet, and A.F.B van der Poel. 1998. Physical quality of pelleted animal feed: 3. Contribution of feedstuff components. *Anim. Feed sci. Technol.* 70:59–78.
- Thomas, M., D.J. van Zuilichem, and A.F.B. van der Poel. 1997. Physical quality of pelleted animal feed. 2. Contribution of processes and its conditions. *Anim. Feed Sci. Technol.* 64:173–192.
- Thomas, P.R., L.A. Karriker, A. Ramirez, J. Zhang, J.S. Ellingson, K.K. Crawford, J.L. Bates, K.J. Hammen, and D.J. Holtkamp. 2015. Evaluation of time and temperature sufficient to inactivate porcine epidemic diarrhea virus in swine feces on metal surfaces. *J. Swine Health Prod.* 23:84–90.
- Traylor, S.L. 1997. Effects of feed processing on diet characteristics and animal performance. Master's thesis. Kansas State University, Manhattan, KS.
- Trudeau, M.P., H. Verma, F. Sampedro, P.E. Urriola, G.C. Shurson, J. McKelvey, S.D. Pillai, and S.M. Goyal. 2016. Comparison of thermal and non-thermal processing of swine feed and the use of selected feed additives on inactivation of porcine epidemic diarrhea virus (PEDV). *PLoS One* 11(6):e0158128. doi:10.1371/journal.pone.0158128.

- Tumuluru, J.S., C.C. Conner, and A.N. Hoover. 2016. Method to produce durable pellets at lower energy consumption using high moisture corn stover and a corn starch binder in a –at die pellet mill. *J. Vis. Exp.* 112:1–13.
- Vukmirović, D., R. Čolovic, S. Rakita, T. Brlek, O. Đuragić, and D. Sola–Oriol. 2017. Importance of feed structure (particle size) and feed form (mash vs. pellets) in pig nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.06.016>
- Winowski, T. 1998. Examining a new concept in measuring pellet quality: which test is best? *Feed Mgmt.* 49:23–26.
- Winowski, B.Y.T., E. By, C. Stark, A. Fahrenholz, and C. Jones. 1962. Measuring the physical quality of pellets. American Soybean Association. LingoTech USA, Inc.
- Wood, J.F. 1987. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 18:1–17.
- Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, R.H. Hines, and C.R. Stark. 1995a. Effects of particle size and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 73:757–763.
- Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, and C.R. Stark. 1995b. Effects of mill type and particle size uniformity on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 73:2564–2573.
- Xing, J.J., E. van Heugten, D.F. Li, K.J. Touchette, J.A. Coalson, R.L. Odgaard, and J. Odle. 2004. Effects of emulsification, fat encapsulation, and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 82:2601–2609.
- Yoder, A.D., J.W. Wilson, and C.R. Stark. 2007. Effects of Dakota Gold and high fat commodity DDGS in a complete swine diet on pellet quality. *J. Anim. Sci.* 94(E–Suppl. 5):472 (Abstr.).
- Yoder, A.D., Wilson, J.W., Stark, C.R., 2007. Effects of Dakota Gold and high fat commodity DDGS in a complete swine diet on pellet quality. *J. Anim. Sci.* 94(E–Suppl. 5): 472 (Abstr.).
- Zhu, Z., R.B. Hinson, L. Ma, D. Li, and G.L. Allee. 2010. Growth performance of nursery pigs fed 30 percent distillers dried grains with solubles (DDGS) and the effects of pelleting on performance and nutrient digestibility. *Asian–Aust. J. Anim. Sci.* 23:792–798.
- Zimonja, O., A. Stevnebø, and B. Svihus. 2007. Nutritional value of diets for broiler chickens as affected by fat source, amylose level and diet processing. *Can. J. Anim. Sci.* 87:553–562.