

## 19章:DDGSを配合した家禽用飼料のペレット加工

### はじめに

DDGSは家禽用飼料における経済的なエネルギーおよび可消化栄養源であるが、ペレット加工において望ましい品質と生産効率を得るためには、多くの場合、配合割合は10%未満に制限される。その結果、配合飼料工場では、ペレット品質と生産効率を保つために、DDGSを多量に配合した場合のコストメリットを犠牲にせざるを得ない。

ペレット加工は家禽用飼料製造時に、最も一般的に使用される加熱処理であり(Abdollahら、2013)、飼料の無駄を減らし、でん粉の一部を糊化することによるエネルギーと栄養成分の消化率を改善することにより、飼料効率を高める(Richert and DeRouchey、2010; NRC、2012)。これに加えて、飼料のペレット加工により、粉塵の減少、輸送中の飼料成分の分離、有害微生物の抑制、粉餌飼料における粒子径が大きい原料の選り食いの抑制、かさ密度の増加による取扱い特性の向上が期待できることである(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(マッシュ)飼料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、配合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ナー内

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。一部の家禽用飼料では、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、エネルギー消費量および生産効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、高いペレット耐久性が達成できると、ペレットが製造時から家禽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、ブローラー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  $\mu\text{m}$ から 233  $\mu\text{m}$ 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  $\mu\text{m}$ から 1289  $\mu\text{m}$ 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、実現性は無い。

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<sup>®</sup> 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転倒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(ジステラーズ・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(Spiehs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(ジステラーズグレイン)は、ペレット加工性が低く、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

表 1. 粗脂肪含量が異なる DDGS の成分組成

| 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) <sup>3</sup> |
|---------|---------------------------------|------------------------------------|
| 水分 %    | 11.1 (9.8-12.8) <sup>1</sup>    | 12.5 (10.0-14.5)                   |
| 粗たん白質 % | 30.8 (28.7-33.3) <sup>1,2</sup> | 31.2 (29.8-32.9)                   |
| 粗脂肪 %   | 11.5 (10.2-12.6) <sup>1,2</sup> | 8.0 (4.9-9.9)                      |
| NDF %   | 41.2 (36.7-49.1) <sup>1</sup>   | 32.8 (30.5-33.9)                   |
| でん粉 %   | 5.3 (4.7-5.9) <sup>2</sup>      | 2.4 (0.8-3.4)                      |
| 灰分 %    | 5.2 (4.3 - 6.7) <sup>1,2</sup>  | 5.4 (4.9-6.1)                      |

<sup>1</sup> Spiehs et al. (2002) <sup>2</sup> Belyea et al. (2004) <sup>3</sup> Kerr et al. (2013)

表 2. 飼料成分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 |

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壊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。

## 家禽用飼料のペレット加工

### 家禽用飼料のペレット加工の利点と制限

一般に、ペレット加工したブロイラー用飼料は、粉餌に比べて発育成績が優れる。Jafarnejad ら (2010) は、クランブル飼料と粉餌を給与したブロイラーの発育成績を比較し、クランブル飼料は増体量と飼料効率を改善したと報告している。以前の研究でも、高品質のペレット飼料をブロイラーに給与した際に同様の結果が示されている

(Jensen ら、1962; Nir ら、1994)。ペレット加工による増体量と飼料効率の改善は、飼料摂取量増加の結果である (Engberg ら、2002; Svihus ら、2004; Abdollahi ら、2011)。ペレットの品質は最適な飼料摂取量を達成するために重要で、崩れていないペレットの割合が増加すると、崩れた微粉の摂取割合が低下し、増体量が高まる (Lily ら、2011)。さらに、まったく崩れていないペレットでは、AMEn(窒素補正した見かけの代謝エネルギー)価が 197 kcal/kg 高まると推定されている。ペレットが崩れて微粉の割合が高まると AMEn 価は低下するが、微粉の割合が 80%(正常なペレットが 20%)である場合でも AMEn 価は 76 kcal/kg 高まった (McKinney and Teeter, 2004)。同様に、Skinner-Noble ら(2005)は、ペレット加工により、粉餌に比べて AMEn 価が 151 kcal/kg 高まったと報告している。このようなエネルギー価の改善は、粉餌を給与する場合と比べて、飼料摂取時の熱生産が少なく、その分を発育のためのエネルギーに振り向けることが出来ることが要因となっている可能性がある (Latshaw and Moritz, 2009)。

ブロイラー用飼料をペレット加工することで、飼料の無駄が減り (Jensen, 2000)、バランスが取れていない飼料を摂取した場合に発生しやすい発育成績への悪影響を最小限に抑えることが出来る (Falk, 1985)。さらに、ペレット飼料を給与した家禽は、摂取時間が粉餌飼料に比べて短くなり、飼料摂取で消費されるエネルギー量が少なくなる (Jensen ら、1962; Jones ら、1995; Vilarino ら、1996)。Nir ら(1994)は、28~40 日齢のブロイラーは活動的ではなく、ペレット飼料を給与したブロイラーの飼料摂取時間は、粉餌飼料の 1/3 だったと報告している。

ブロイラーの発育成績を最大にするための最適なペレット径と長さに関する研究は少ない。Abdollahi and Ravindran(2013)は、長さが 3、5 または 7 mm のペレットを比較し、ペレットが長くなると PDI とペレットの硬度が高まったが、3 mm のペレットでは、同様の増体量を示した長さが 3 mm 以上のペレットに比べて飼料摂取量が増加した。

ペレット加工により、原料の分離が最小化され (Greenwood and Beyer, 2003)、かさ密度が増加することで、輸送と保管が効率的となり、配合飼料工場と飼育農

家における粉塵の発生が減少する (Abdollahi ら、2013)。

コンディショニング温度は一般的には 80~90°C であるが、サルモネラやカンピロバクターなどの有害微生物の減少と同時に、ペレット品質をより高めるために、コンディショニング温度を高めることがある (Abdollahi ら、2013)。しかし、エネルギーと栄養成分の消化率 (Abdollahi ら、2011) だけでなく、飼料に添加した酵素とビタミンの活性を低下させる可能性がある (Abdollahi ら、2013)。

飼料中の有害微生物抑制に関する最適なコンディショニング温度は 80°C (Veldryatteran ら、1995) であり、サルモネラを含まない飼料を生産するコンディショニング温度は 85°C が最適である (Jones and Richardson, 2004)。McCapes ら(1989)は、サルモネラと大腸菌の完全な不活化には、水分含量 14.5%、コンディショニング温度 85.7°C、加熱時間 4.1 分が必要であるとしている。飼料のペレット加工は、切断、熱、滞留時間および水分含量の組み合わせにより、飼料中のたん白質の部分的な変性を引き起こし (Thomas ら、1998)、溶解度を低下させ、消化率を改善する (Voragen ら、1995)。残念ながら、高温で低水分飼料を処理すると、メイラード反応 (褐色化) が起こり、たん白質やアミノ酸 (特にリジン)、炭水化物の消化率が低下する可能性がある (Pickford, 1992; Hendriks ら、1994; Thomas ら、1998)。しかし、Hussar and Robblee (1962)は、ペレット加工の際に使用される一般的なコンディショニング温度がリジンの消化率に及ぼす影響は非常に少ないことを示唆している。

飼料に添加されている酵素は熱処理の影響を受けやすく、ペレット加工により酵素活性が低下する事例が良く見られる。Inborr and Bedford(1994)は、ブロイラー用飼料をコンディショニング温度 75、85 または 95°C で、30 秒または 15 分間処理した場合の、飼料に添加した  $\beta$ -グルカナーゼの活性、でん粉、 $\beta$ -グルカン、非でん粉性多糖類への影響と発育成績を調査した。その結果、コンディショニング温度が高まると飼料効率と増体量は二次曲線的に低下し、飼料中の  $\beta$ -グルカナーゼ活性が高まると、飼料効率と増体量は直線的に改善された。具体的には、コンディショニング温度 75°C で 30 秒間処理したペレット飼料中の  $\beta$ -グルカナーゼ活性は 66% 低下した。こ

の結果は、ペレット加工が一部の酵素の活性を低下させることを示しているが、ブロイラーの発育成績は、コンディショニング温度が 85°C 以上の場合にのみ影響を受けた (Inbarr and Bedford, 1994)。

### DDGS を配合した家禽用飼料のペレット加工

DDGS を 5~7% 配合した場合、飼料中の粗脂肪含量が増加するが、でん粉が低下するため、ペレット加工工程中で粒子の結合に必要なでん粉が最小限となり、ペレット加工が困難となる場合がある (Behnke, 2007)。Shim ら (2011) は、DDGS をブロイラー中期用飼料に 8%、後期用飼料に 16% 配合するとペレットの耐久性が低下することを報告している。ただし、この報告では、DDGS の配合量の増加と対応して、油脂も添加されていたことから、これがペレットの耐久性の低下に影響した可能性もある。対照的に、いくつかの研究では、ブロイラーの発育成績には影響を及ぼさずに、DDGS の配合割合をより高めたペレット飼料を製造することが出来ることが報告されている。Wang ら (2007a, b, c) は、DDGS を最大 30% 配合したペレット飼料を用いた飼育試験を行っている。これらの研究ではペレットの耐久性は測定されていないが、いずれの飼料でも粘結剤を使用しており、DDGS を 15% 配合した飼料のペレット品質は対照飼料と同等であり、30% 配合した飼料より崩れたペレットの割合が少なかった (Wang ら, 2007a, b)。

Min ら (2008) は、粗脂肪含量が 8.9% の DDGS の配合割合 (0, 15 または 30%)、グリセリンの添加 (無添加または 5% 添加) が、家禽油脂を添加した等エネルギーのトウモロコシ・大豆粕主体飼料を、0~42 日齢のブロイラーに給与した。前期用飼料のペレット径は 2.38 mm、中期および後期用飼料のペレット径は 4.76 mm とした。その結果、2 mm 篩を通過する崩れたペレットの割合は、DDGS の配合割合が高まるとともに増加した (表 3)。しかし、崩れたペレットの割合が多いにも関わらず、DDGS を 15 および 30% 配合した飼料を給与したブロイラーの体重は 14 日齢で高まり、28 日齢および 42 日齢では差がなかった。DDGS を配合していない対照飼料の飼料要求率は 1.65 であったのに対して、DDGS を 15% 配合した飼料では

1.64 と差がなく、30% 配合した場合には飼料摂取量が増加したため、飼料要求率が劣った (1.71)。これはおそらく崩れたペレットの割合が増加したためだと考えられる。DDGS を 30% 配合した飼料では、枝肉歩留が低下したが、胸肉量には影響がなかった。

その後公表された Min ら (2009) の報告では、DDGS の配合割合を 25% まで高めると、崩れたペレットの割合が 1.49 から 10.81% に高まったが、粘結剤として、リグノスルホン酸を添加することで、ペレットの品質が改善され、崩れたペレットの割合が減少した。

家禽用の DDGS 配合飼料をペレット加工する際の生産効率を評価する最初の包括的な研究は、Loar ら (2010) によって行われた。DDGS を 0, 15 または 30%、DDGS 30% と砂 (粒子径 450  $\mu\text{m}$ ) を 2% 配合した飼料に、家禽油脂を 1.90~3.88% 添加し、直径 30.48 cm、0.476  $\times$  4.496 cm のダイを使用して、コンディショニング温度 82°C、蒸気圧 262 kPa で加工した。その結果、DDGS の配合割合の増加に伴い、崩れたペレットの割合が増加し、PDI が減少した。DDGS を 30% 配合した飼料に砂を 2% 添加してもペレットの品質は改善されなかった。これらの変化は、各飼料の脂肪含量は家禽油脂添加により増加していること、かつ、DDGS の配合割合の増加に伴って配デンプン量が減少したことによるものと思われる (表 4)。

Salmon (1985) は、ブロイラー用飼料中の脂肪含量を高めるとペレットの品質が低下することを示している。かさ密度も、DDGS の配合量の増加に伴い減少する。これは、これらの飼料で部分的に置き換えたトウモロコシに比べて DDGS のかさ密度が低いことによる。しかし、ペレットミルの生産効率は、DDGS の配合割合が 0, 15 または 30% の飼料間で同様だった。彼らは、DDGS を 30% 配合した場合の生産効率の数値的な低下は、ペレットダイ内の研磨効果を有する無機リン添加量の減少に起因する可能性があることを示唆している。DDGS には利用可能なリンがかなりの量含まれているため、家禽用飼料に DDGS を配合すると、リンの要求量を充足させるために必要な無機リンの添加量を減らすことが出来る。コンディショナーの電気使用量は、DDGS 30% 配合飼料で最大だったが、ペレットミルの電気エネルギー使用量は、

DDGS の配合量の増加に伴って減少した。ペレットミルの処理量は、油脂の添加量に伴って増加することが示さ

表 3. ブロイラー用のペレット品質への DDGS 配合割合の影響 (Min ら, 2008 から改編)

| 飼料の種類            | DDGS配合割合 % | 2 mm篩を通過するペレットの割合 % |       |       |
|------------------|------------|---------------------|-------|-------|
|                  |            | 平均                  | 標準偏差  | 変動係数  |
| 前期用 <sup>1</sup> | 0          | 1.05                | 0.67  | 63.32 |
|                  | 15         | 4.29                | 0.30  | 7.02  |
|                  | 30         | 12.04               | 2.40  | 19.90 |
| 中期用 <sup>1</sup> | 0          | 10.53               | 3.02  | 28.66 |
|                  | 15         | 18.96               | 7.94  | 41.88 |
|                  | 30         | 26.89               | 3.38  | 12.58 |
| 後期用 <sup>2</sup> | 0          | 12.83               | 6.34  | 49.40 |
|                  | 15         | 26.60               | 11.55 | 43.43 |
|                  | 30         | 42.64               | 16.68 | 39.11 |

<sup>1</sup> 2.38 mm径のダイを使用してペレット加工、<sup>2</sup> 4.76 mmのダイを使用してペレット加工

表 4. DDGS の配合割合と、ペレット品質、生産効率および電気エネルギー使用量 (Loar ら, 2010 から改編)

| DDGS配合割合 %        | Fines <sup>2</sup> % | PDI <sup>3</sup> % | かさ密度 kg/m <sup>3</sup> | 総生産率 トン/時 | コンディショナーの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン | ペレットミルの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン |
|-------------------|----------------------|--------------------|------------------------|-----------|------------------------------|----------------------------|
| 0                 | 30.8 <sup>c</sup>    | 74.4 <sup>a</sup>  | 631.8 <sup>a</sup>     | 1.211     | 0.659 <sup>bc</sup>          | 6.531 <sup>a</sup>         |
| 15                | 41.7 <sup>b</sup>    | 66.8 <sup>b</sup>  | 622.8 <sup>b</sup>     | 1.266     | 0.646 <sup>c</sup>           | 5.127 <sup>b</sup>         |
| 30                | 54.2 <sup>a</sup>    | 62.1 <sup>c</sup>  | 618.3 <sup>b</sup>     | 1.143     | 0.749 <sup>a</sup>           | 4.775 <sup>c</sup>         |
| 30+砂 <sup>4</sup> | 54.5 <sup>a</sup>    | 62.3 <sup>c</sup>  | 616.9 <sup>b</sup>     | 1.149     | 0.723 <sup>ab</sup>          | 5.019 <sup>bc</sup>        |

a-b異符号間で有意差あり (p<0.05)

<sup>1</sup> 各4バッチの平均

<sup>2</sup> クーラーにおけるペレット飼料に含まれる粉化の比率

<sup>3</sup> ペレットの耐久性指数: ASAE標準S269.4 (ASAE、1997)

<sup>4</sup> 全飼料の2%量を添加

れている (Thomas ら, 1998) ため、エネルギー使用量におけるこれらの差は、油脂の添加量が原因である可能性がある。一般的に、砂をくわえると、様々なペレットの品質と製造効率が改善されると考えられているが、この報告では影響はなかった。興味深いことに、DDGS を 0 または 8% 配合した前期用クランブル飼料 (0~14 日齢)、0、7.5、15、22.5 または 30% 配合した中期用ペレット飼料 (14~28 日齢) を給与した場合、中期用飼料への DDGS 配合量が 15% 以上の場合には増体量と飼料摂取量が低下した。

最近の研究では、Wamsley ら (2013) は、DDGS の配合割合の増加は、生産効率が高い後期用飼料においてはペレットの品質には影響を及ぼさない傾向があることを

示している (表 5)。興味深いことに、DDGS の配合割合を高めると、ペレットミルによるエネルギー消費量が減少する傾向を示すが、ペレットの品質、生産効率、電気エネルギー使用量の差が DDGS の配合によるものか、油脂の添加量によるものなのかはわからない。

最近のいくつかの研究では、ブロイラー用飼料における低脂肪 DDGS のペレット加工に関する評価が行われている。Dozier ら (2015) は、粗脂肪含量が 5.4% (低脂肪)、7.8% (中脂肪)、および 10.5% (高脂肪) の DDGS を 5、7 または 9%、あるいは、8、10 または 12% 配合した前期、中期、後期用飼料を給与した場合のブロイラーの育成成績と枝肉組成を調査した。低脂肪および中脂肪 DDGS 飼料では家禽油脂の添加量を増加させた。後期用飼料に

ついて New Holmen pellet tester を用いて PDI を測定した結果、粗脂肪含量が異なる 3 種類の DDGS を配合し

表 5. DDGS の配合割合と、ペレット品質、生産効率および電気エネルギー使用量(Wamsley ら、2013 から改編)

| 飼料  | DDGS 配合割合 % | 脂質添加量 <sup>1</sup> % | Fines <sup>2</sup> % | PDI <sup>3</sup> % | 総生産率 トン/時 | コンディショナーの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン | ペレットミルの相対電気エネルギー使用量、kwh/トン |
|-----|-------------|----------------------|----------------------|--------------------|-----------|------------------------------|----------------------------|
| 前期用 | 0           | 1.25                 | 12.2                 | 86.7               | 0.712     | 0.170                        | 6.36                       |
|     | 4           | 1.38                 | 15.1                 | 85.2               | 0.824     | 0.042                        | 5.35                       |
| 中期用 | 0           | 1.45                 | 11.4                 | 78.4               | 0.819     | 0.059                        | 5.56                       |
|     | 5           | 1.63                 | 6.8                  | 78.8               | 0.816     | 0.067                        | 5.58                       |
|     | 10          | 1.81                 | 14.6                 | 81.2               | 0.789     | 0.043                        | 4.93                       |
| 後期用 | 0           | 1.59                 | 6.7                  | 71.1               | 1.22      | 0.116                        | 4.94                       |
|     | 10          | 1.96                 | 11.2                 | 64.3               | 1.20      | 0.144                        | 4.87                       |
|     | 20          | 2.43                 | 10.0                 | 65.8               | 1.18      | 0.117                        | 4.12                       |

<sup>1</sup> ペレット加工前に添加する脂質

<sup>2</sup> クーラーにおけるペレット飼料に含まれる粉化の比率

<sup>3</sup> ペレットの耐久性指数

た飼料では PDI が変化し、DDGS を 9% 配合した場合の PDI は、低脂肪、中脂肪および高脂肪 DDGS 飼料で、それぞれ 75.6、70.8 および 88.3% だった。これらの研究者らは、低脂肪および中脂肪 DDGS を配合した飼料への家禽油脂の添加量が多いほど、PDI が数値的に低下することを示唆している。しかし、Shim ら(2011)によって報告された結果と同様に、DDGS の配合割合の増加による PDI の減少は、発育成績には悪影響を及ぼさなかった。

Kim ら(2016)は、28~42 日齢(後期 I)と 43~56 日齢(後期 II)の 2 種類の後期用飼料への粗脂肪含量が 7.4% の低脂肪 DDGS の最大配合量を調査する試験を実施している。DDGS の配合量は、後期 I では 0、8、16、18、24 または 30%、後期 II では 0、8、16 または 24% であった。すべての飼料は、コンディショナー温度 85°C で 0.476 × 3.81 cm のダイを用いてペレット加工した。この報告では、ペレットの品質は測定されていないが、後期 I および後期 II において、DDGS を最大 24% 配合しても、発育成績と枝肉特性には差がなかった。この結果は、最適なペレット品質は得られない可能性はあるものの、比較的高い配合割合(24%)で DDGS を使用しても、許容可能な発育成績と枝肉組成を得られることを示している。

最後に、家禽に対する DDGS 飼料へのエクストルード加工の影響を評価した報告を紹介する。Oryschak ら(2010)は、小麦 DDGS およびトウモロコシ DDGS を 0、

15 または 30% 配合した飼料を、二軸のエクストルーダーで処理すると、トウモロコシ DDGS のアミノ酸の AID(見かけの回腸消化率)が 10%、小麦 DDGS では 34% 改善されたと報告している。リジン、トレオニン、バリンおよびアルギニンの AID は、トウモロコシ DDGS または小麦 DDGS を 15% 配合した飼料へのエクストルード加工により、それぞれ 31、26、23 および 21% 増加した。さらに、総エネルギーと CP の AID は、小麦 DDGS ではエクストルード加工による影響は少なかったが、トウモロコシ DDGS ではわずかに改善された。これらの結果は、エクストルード加工によりトウモロコシ DDGS と小麦 DDGS を配合した飼料のアミノ酸消化率を改善出来ることを示唆している。さらに、エクストルード加工は、有害微生物汚染の抑制に有効であることが示されている(Said、1996)。

### 家禽用 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導いている。

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

この予測式の $R^2$ (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 $\mu\text{m}$ から298 $\mu\text{m}$ 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。

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

この予測式の $R^2$ 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., and V. Ravindran. 2013. Influence of pellet length on pellet quality and performance of broiler diets. *J. Appl. Poult. Res.* 22:516–522.
- Abdollahi, M.R., V. Ravindran, and B. Svihus. 2013. Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. *Anim. Feed Sci. Technol.* 179:1–23.
- 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. AllAboutFeed – 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 denitions and methods for determining density durability and moisture content. St Joseph, MI. ASAE Standards.
2003. S269.4. Cubes, pellet, and crumbles denitions 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, Kansas.
- Behnke, K.C. 2007. Feed manufacturing considerations for using DDGS in poultry and livestock diets. In: Proceedings of the 5th Mid-Atlantic Nutrition Conference, N.G. Zimmerman (Ed.), Maryland Feed Industry Council and Dept. of Animal and Avian Sciences, University of Maryland, College Park. pp. 77–81.
- 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](https://www.cpm.net/downloads/Animal_Feed_Pelleting.pdf) (accessed 11–11–17).
- 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.
- 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.
- Dozier III, W.A., and J.B. Hess. 2015. Growth and meat yield responses of Hubbard × Cobb 500 male broilers fed diets formulated with distillers dried grains with solubles varying in ether extract content and inclusion rate from 1 to 33 days of age. J. Appl. Poult. Res. 24:436–450.
- Engberg, R.M., M.S. Hedemann, and B.B. Jensen. 2002. The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity of the digestive tract of broiler chickens. Br. Poult. Sci. 43:569–579.
- Fahrenheit, 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, Kansas, 92 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.
- 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 Agricult. 18:331–340.
- Greenwood, M.W., and R.S. Beyer. 2003. Effect of feed manufacturing practices on nutrient availability and feed quality. In: Proc. 30th Annula Carolina Poultry Nutrition Conference, Raleigh, NC, pp. 7–16.
- Hendriks, W.H., P.J. Moughan, H. Boer, and A.F.B. van der Poel. 1994. Effects of extrusion on the dye-binding, filorodinitrobenzene-reactive and total lysine content

- of soybean meal and peas. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48:99–109.
- Hussar, N., and A.R. Robblee. 1962. Effect of pelleting on the utilization of feed by the growing chicken. *Poult. Sci.* 41:1489–1493.
- Inbarr, J., and M.R. Bedford. 1994. Stability of feed enzymes to steam pelleting during feed processing. *Anim. Feed Sci. Technol.* 46:179–196.
- Jafarnejad, S., M. Farkhoy, M. Sadegh, and A.R. Bahonar. 2010. Effects of crumble–pellet and mash diets with different levels of dietary protein and energy on the performance of broilers at the end of the third week. *Vet. Med. Intl.* Vol 2010, Article ID 328123, 5 pages, doi:10.4061/2010/328123.
- Jensen, L.S. 2000. Influence of pelleting on the nutritional needs of poultry. *Asian–Aust. J. Anim. Sci.* 13:35–46.
- Jensen, L.S., L.H. Merrill, C.V. Reddy, and J. McGinnis. 1962. Observations on eating patterns and rate of food passage of birds fed pelleted and unpelleted diets. *Poult. Sci.* 41:1414–1419.
- Jones, F.T., K.E. Anderson, and P.R. Ferket. 1995. Effect of extrusion on feed characteristics and broiler chicken performance. *J. Appl. Poult. Res.* 4:300–309.
- 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.
- Kim, E.J., J.L. Purswell, and S.L. Branton. 2016. Effects of increasing inclusion rates of a low–fat distillers dried grains with solubles (LF–DDGS) in finishing broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 15:182–187.
- Latshaw, J.D., and J.S. Moritz. 2009. The partitioning of metabolisable energy by broiler chickens. *Poult. Sci.* 88:98–105.
- Lily, K.G. S., C.K. Gehring, K.R. Beaman, P.J. Turk, M. Sperow, and J.S. Moritz. 2011. Examining relationships between pellet quality, broiler performance and bird sex. *J. Appl. Poult. Res.* 20:231–239.
- Loar II, R.E., J.S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with solubles to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242–2250.
- McCapes, R.H., H.E. Ekperigin, W.J. Cameron, W.L. Ritchie, J. Slagter, V. Stangeland, and K.V. Nagaraja. 1989. Effect of a new pelleting process on the level of contamination of poultry mash by *Escherichia coli* and *Salmonella*. *Avian Diseases* 33:103–111.
- McKinney, L.J., and R.G. Teeter. 2004. Predicting effective caloric value of non–nutritive factors: I. Pellet quality and II. Prediction of consequential formulation dead zones. *Poult. Sci.* 83:1165–1174.
- Min, Y.N., A. Hancock, F. Yan, C. Lu, C. Coto, A. Karimi, J.H. Park, F.Z. Liu, and P.W. Waldroup. 2009. Use of combinations of canola meal and distillers dried grains with solubles in broiler starter diets. *J. Appl. Poult. Res.* 18:725–733.
- Min, Y.N., F.Z. Liu, Z. Wang, C. Coto, S. Serrate, F.P. Costa, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2008. Evaluation of distillers dried grains with solubles in combination with glycerin in broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 7:646–654.
- 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.
- Nir, I., I. Twina, E. Grossman, and Z. Nitsan. 1994. Quantitative effects of pelleting on performance, gastrointestinal tract and behavior of meat–type chickens. *Br. Poult. Sci.* 35:589–602.

- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Oryschak, M., D. Korver, M. Zuidhof, X. Meng, and E. Beltranena. 2010. Comparative feeding value of extruded and nonextruded wheat and corn distillers dried grains with solubles for broilers. *Poult. Sci.* 89:2183–2196.
- 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 nutrient 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.
- 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. DeRouchey. 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, Ill, 96–103.
- Said, N.W. 1996. Extrusion of alternative ingredients: An environmental and nutrition solution. *J. Appl. Poult. Res.* 5:395–407.
- Salmon, R.E. 1985. Effects of pelleting, added sodium bentonite and fat in a wheat-based diet on performance and carcass characteristics of small white turkey. *Anim. Feed Sci. Technol.* 12:223–232.
- Shim, M.Y., G.M. Pesti, R.I. Bakalli, P.B. Tillman, and R.L. Payne. 2011. Evaluation of corn distillers grains with solubles as an alternative ingredient for broilers. *Poult. Sci.* 90:369–376.
- Skinner-Noble, D.O., L.J. McKinney, and R.G. Teeter. 2005. Predicting effective caloric value of non-nutritive factors: III. Feed form affects broiler performance by modifying behavior patterns. *Poult. Sci.* 84:403–411.
- 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.
- Spiels, 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 *Poult. 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.
- 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 Univ., Manhattan.
- Svihus, B., K.H. Kløvstad, V. Perez, O. Zimonjia, S. Sahlstrom, R.B. Schuller, W.K. Jeksrud, and E. Prestløkken. 2004. Physical and nutritional effects of pelleting broiler chicken diets made from wheat ground

- to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. *Anim. Feed sci. Technol.* 117:281–293.
- 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.
- Traylor, S.L. 1997. Effects of feed processing on diet characteristics and animal performance. Master's thesis. Kansas State Univ., Manhattan.
- 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.
- Veldry matteran, A., H.A. Vahl, G.J. Borggreve, and D.C. Fuller, D.C. 1995. A survey of the incidence of *Salmonella* species and *Enterobacteriaceae* in poultry feeds and feed components. *Vet. Rec.* 136:169–172.
- Vilarino, M., M.J. Picard, J.P. Melcion, and J.M. Faure. 1996. Behavioural adaptation of laying hens to dilution of diets under mash and pellet form. *Br. J. Poult. Sci.* 37:895–907.
- Voragen, A.G.J., H. Gruppen, G.J.P. Marsman, and A.J. Mul. 1995. Effect of some manufacturing technologies on chemical, physical and nutritional properties of feed. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*, P.C. Garnsworthy and D.J.A. Cole (Eds.), Feed Manufacturers Conference 1995, University of Nottingham, Nottingham University Press, pp. 93–126.
- Wamsley, K.G.S., R.E. Loar II, K.Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 22:279–297.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007a. Effect of rapid and multiple changes in level of distillers dried grain with solubles (DDGS) in broiler diets on performance and carcass characteristics. *Int. J. Poult. Sci.* 6:725–731.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007b. Use of constant or increasing levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 6:501–507.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007c. Utilization of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets using a standardized nutrient matrix. *Int. J. Poult. Sci.* 6:470–477.
- 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. 1995. Effects of particle size and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 73:757–763.
- 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.