บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 โปรตีนและกรดอะมิโนในอาหารสุกร

2.1.1 โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) เป็นหลัก ในโมเลกุลของโปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนที่ต่อกันด้วยพันธะเพปไทด์ (peptide bond) เกิดเป็นสายเพปไทด์ (peptide chain) โปรตีนแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด ปริมาณ และการเรียงตัวของกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบ โปรตีนในร่างกายสัตว์จะทำหน้าที่แตกต่างกันออกไป (McDonald *et al*., 1995) ซึ่งโปรตีนเกือบทั้งหมดทำหน้าที่ต่าง ๆ ดังนี้ (Pond *et al*., 1995)

1. เป็นองค์ประกอบของเยื่อหุ้มเซลล์ (cell membrane) กล้ามเนื้อ และอวัยวะต่าง ๆ
2. เป็นองค์ประกอบของขน ผม กีบ และเล็บ
3. เป็นองค์ประกอบของเลือด (blood plasma) น้ำนม เอ็นไซม์ ฮอร์โมน และภูมิคุ้มกัน (immune antibodies)

เนื่องจากโปรตีนเป็นสารประกอบที่สำคัญของเซลล์ และเซลล์ออร์แกเนลล์ (cell organells) ของสิ่งมีชีวิต เป็นส่วนประกอบสำคัญของโปรโตพลาสซึม (protoplasm) นิวเคลียส และของเหลวต่าง ๆ ที่อยู่ภายนอกเซลล์ สัตว์ชั้นสูงไม่สามารถสังเคราะห์โปรตีนได้เอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องได้รับจากอาหาร ถ้าในอาหารมีปริมาณโปรตีนไม่เพียงพอจะทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโตลดลง หรือสูญเสียน้ำหนักตัวได้ โปรตีนที่ได้รับจากอาหารจะถูกนำไปใช้ในการสร้างเนื้อเยื่อ ซ่อมแซมเนื้อเยื่อต่าง ๆ การเจริญเติบโต และการสืบพันธุ์ (Cunha, 1977; Pond *et al*., 1995)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.2 กรดอะมิโน (Amino acid)

เมื่อโปรตีนถูกย่อยด้วยเอ็นไซม์ กรด หรือด่าง จะได้กรดอะมิโนซึ่งเป็นหน่วยย่อยของโปรตีน ในธรรมชาติพบว่ามีกรดอะมิโนมากกว่า 200 ชนิด แต่ที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนโดยทั่วไปมีเพียง 20 ชนิดเท่านั้น กรดอะมิโนที่ร่างกายสัตว์ชั้นสูงไม่สามารถสร้างได้ หรือสร้างได้

เพียงเล็กน้อย ไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกายเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและให้ผลผลิต จำเป็น ต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น เรียกว่า กรดอะมิโนจำเป็น (essential or indispensable amino acids) ส่วนกรดอะมิโนที่ร่างกายสัตว์สามารถสร้างได้เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย เรียกว่า กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น (nonessential or dispensable amino acids) (NRC, 1998) ซึ่งกรดอะมิโนชนิดที่ไม่จำเป็นบางตัวสามารถใช้ทดแทนกรดอะมิโนที่จำเป็นได้บางส่วนหรือเรียกว่ามี sparing effect ซึ่งกันและกัน เช่น ซีสเตอีน (cysteine) สามารถใช้ทดแทนเมทไธโอนีน (methionine) ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ ไทโรซีน (tyrosine) สามารถใช้แทนฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) ได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ กรดอะมิโนเหล่านี้ เรียกว่า กรดอะมิโนกึ่งจำเป็น (semi-essential amino acids or conditionally dispensable amino acids) (Fuller, 1994) ตัวอย่างของกรดอะมิโนที่จำเป็นกรดอะมิโนกึ่งจำเป็น และกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น แสดงไว้ในตาราง 1

ตาราง 1 การแบ่งประเภทของกรดอะมิโนในอาหารสุกร

Category	**Amino acids**
Essential	Threonine
	Methionine
	Valine
	Leucine
	Isoleucine
	Lysine
	Phenylalanine
	Tryptophan
	Histidine
Semi-essential	Cysteine
	Taurine
	Tyrosine
	Arginine
Non-essential	Glutamic acid, glutamine
	Glycine, serine, proline
	Aspatic acid, asparagine
	Alanine

ที่มา : Fuller (1994)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

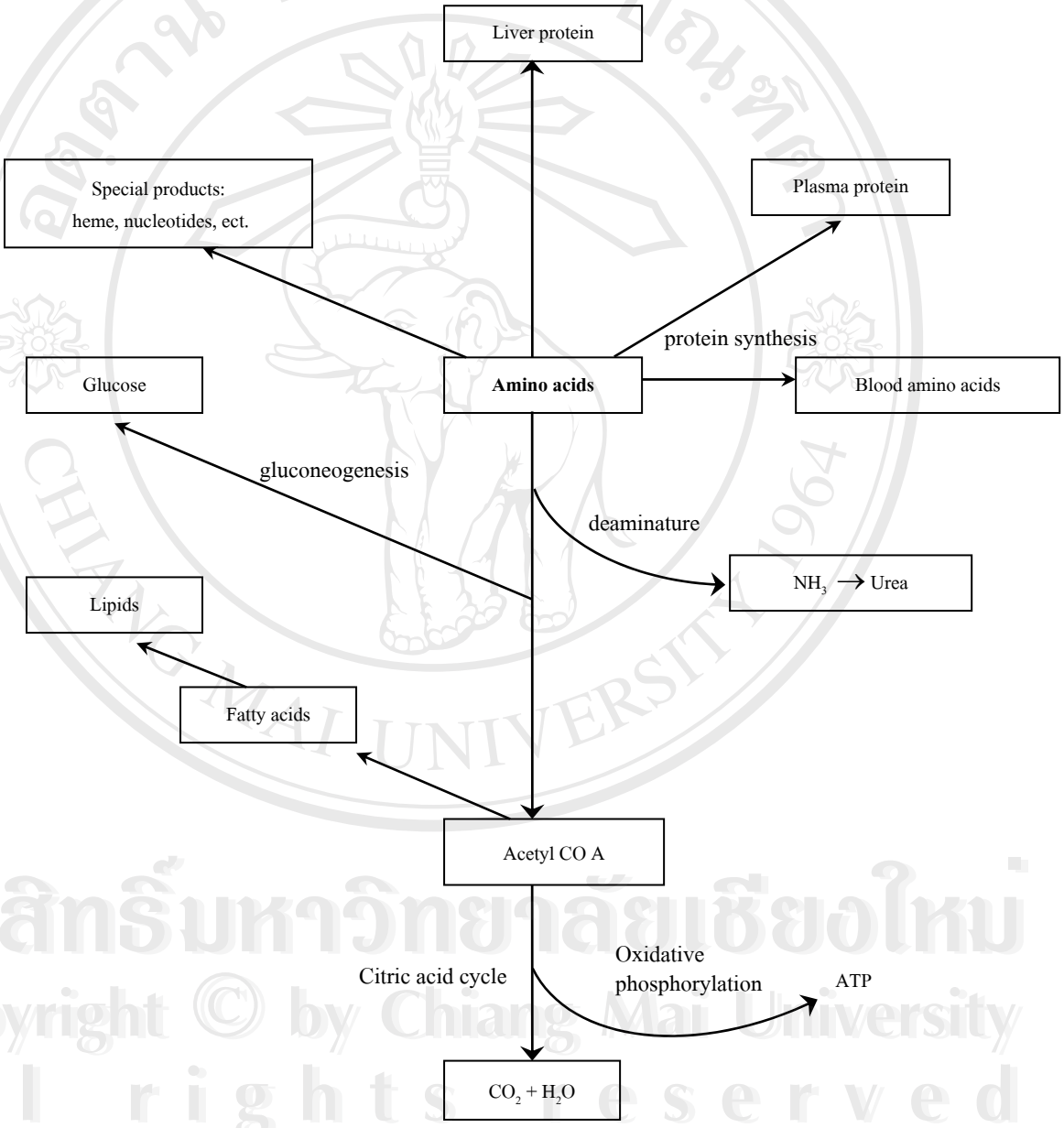
กรดอะมิโนที่สุกรได้รับจะถูกนำไปใช้ในกิจกรรมหลายอย่างในร่างกาย เช่น เป็นสารตั้งต้น (precursors) สำหรับการสังเคราะห์ฮอร์โมน สารสื่อประสาท (neurotransmitters) สารสี (pigments) และสารโมเลกุลเล็ก ๆ สำหรับใช้สังเคราะห์โปรตีนกล้ามเนื้อ (Lewis, 2001)

2.2 การย่อยและการดูดซึมของอาหารโปรตีน (Digestion and absorption of dietary protein)

อาหารโปรตีนจะถูกย่อยที่กระเพาะอาหาร โดยเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่กระเพาะอาหาร โปรตีนจะกระตุ้นเซลล์ของกระเพาะอาหารในส่วนแอนทรัม (antrum) ให้หลั่งฮอร์โมนแกสทริน (gastrin) ซึ่งออกฤทธิ์ที่กระเพาะอาหาร ทำให้เซลล์บุผนังของกระเพาะอาหาร (partial cell) หลั่งกรดไฮโดรคลอริก และชิฟเซลล์ (chief cell) หลั่งเอ็นไซม์เพปซิโนเจน (pepsinogen) สารคัดหลั่งจากกระเพาะอาหารดังกล่าวอาจเรียกรวม ๆ ว่า น้ำย่อยในกระเพาะ (gastric juice) กรดไฮโดรคลอริกในกระเพาะอาหารมีผลทำให้ค่า pH ในกระเพาะอาหารต่ำ คือ ประมาณ 1.5-2.5 อาหารโปรตีนจึงเสียสภาพธรรมชาติและถูกย่อยได้ง่ายขึ้นด้วยเอ็นไซม์เพปซิน (pepsin) ในกระเพาะอาหาร นอกจากนี้ความเป็นกรดของน้ำย่อยในกระเพาะอาหารยังมีคุณสมบัติเป็นสารระงับเชื้อ (antiseptic) คือ ทำลายเชื้อแบคทีเรีย และสัตว์เซลล์เดียวบางชนิดที่ปนเปื้อนมาในอาหาร อาหารในกระเพาะอาหารซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดจะเคลื่อนตัวต่อไปยังลำไส้เล็ก ความเป็นกรดนี้จะกระตุ้นให้มีการหลั่งฮอร์โมนซีครีทิน (secretin) จากเซลล์เยื่อบุผนังของลำไส้เล็กส่วนต้น ซึ่งซีครีทินจะกระตุ้นให้ตับอ่อนหลั่งสารละลายไบคาร์บอเนต (bicarbonate solution) ลงสู่ลำไส้เล็กเพื่อเปลี่ยนให้อาหารมีฤทธิ์เป็นกลาง (pH 7-8) และดำเนินการย่อยโปรตีนในลำไส้เล็กต่อไป กรดอะมิโนบางส่วนที่ได้จากการย่อยโปรตีนในกระเพาะอาหาร เมื่อเข้ามาในลำไส้เล็กจะไปกระตุ้นการหลั่งของเอ็นไซม์ย่อยสลายโปรตีนจากต่อมเอ็กโซไครน์ (exocrine gland) ในตับอ่อน ได้แก่ ทริปซิน (trypsin) และไคโมทริปซิน (chymotrypsin) ลงสู่ลำไส้เล็ก โดยเอ็นไซม์เหล่านี้ทำงานได้ดีที่ pH ประมาณ 7-8 หลังจากถูกย่อยจะได้โปรตีนที่มีขนาดโมเลกุลเล็กลงและมีเพปไทด์สายสั้น ๆ มากมาย ซึ่งจะถูกย่อยต่อจนสมบูรณ์ได้เป็นกรดอะมิโนอิสระ โดยเอ็นไซม์อีก 2 ชนิด คือ คาร์บอกซีเพปทิเดส (carboxypeptidase) และอะมิโนเพปทิเดส (aminopeptidase) ที่เซลล์เยื่อบุผนังลำไส้ กรดอะมิโนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกดูดซึมผ่านเซลล์เยื่อบุของลำไส้เข้าสู่กระแสเลือด และขนส่งไปยังตับเพื่อเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายต่อไป (มนตรี, 2530; นภา, 2543) โดยอาศัยวิตามินบี 6 (pyridoxal phosphate) ช่วยในกระบวนการขนส่ง การขนส่งนี้ต้องการพลังงานในรูปของ ATP โดยกรดอะมิโนหรือไดเพปไทด์จะจับกับโปรตีนขนส่งจำเพาะ (specific transport protein) ซึ่งต้องการโซเดียม จากนั้นโซเดียมจะช่วยพากรดอะมิโนหรือไดเพปไทด์เข้าสู่เซลล์อีกทีหนึ่ง กลไกนี้เรียกว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

“sodium co transport mechanism” หรือ “secondary active transport” อย่างไรก็ตาม กรดอะมิโนบางตัวไม่ได้ใช้กลไกนี้ในการขนส่งหรือดูดซึม แต่ใช้โปรตีนขนส่งตัวอื่นที่ไม่ต้องการโซเดียม (นภา, 2543)



ภาพ 1 บทบาทหน้าที่ต่าง ๆ ของกรดอะมิโนในตับ
ที่มา : นภา (2543)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โปรตีนจัดเป็นสารชีวโมเลกุลที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา โดยถูกสลายเป็นกรดอะมิโน ซึ่งกรดอะมิโนที่ถูกปลดปล่อยออกมาเหล่านี้หากไม่ได้นำไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนโมเลกุลใหม่ก็จะถูกสลายต่อไปเป็นพลังงาน ถ้าร่างกายได้รับกรดอะมิโนมากเกินความต้องการที่จะนำไปสังเคราะห์เป็นโปรตีน กรดอะมิโนที่มากเกินพอนี้จะถูกสลายไป เนื่องจากร่างกายไม่สามารถเก็บสะสมกรดอะมิโนไว้ได้ โดยปกติแล้วร่างกายจะไม่สลายโปรตีนในร่างกายเพื่อนำมาเป็นพลังงาน นอกเสียจากจะขาดพลังงานจากแหล่งพลังงานหลัก เช่น กรณีอดอาหาร (นภา, 2543)

2.3 การย่อยได้ปรากฏและการย่อยได้จริงของโปรตีน (Apparent and true digestibility of protein)

ค่าการย่อยได้ของโปรตีนและกรดอะมิโนมีความสำคัญมากในการประกอบสูตรอาหาร เพราะสุกรมีความต้องการกรดอะมิโนจำเป็นเพื่อใช้ในการดำรงชีพ และให้ผลผลิต ดังนั้นการประเมินค่าการย่อยได้ของโปรตีนและกรดอะมิโนในอาหารสัตว์ จึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการกำหนดคุณภาพของวัตถุดิบอาหารและคุณค่าของโภชนะต่าง ๆ อีกทั้งยังทำให้ทราบถึงปริมาณโภชนะที่สุกรต้องการและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างแท้จริง นอกจากนี้ยังมีข้อดีในด้านลดการสิ้นเปลืองจากการมีโปรตีนหรือกรดอะมิโนในสูตรอาหารมากเกินความต้องการ ซึ่งโปรตีนและกรดอะมิโนเหล่านี้ร่างกายจะทำการสลายและขับออกมากับมูลและปัสสาวะ เนื่องจากไม่สามารถเก็บสะสมไว้ได้ (พันทิพา, 2539)

การย่อยได้สามารถจำแนกได้ 2 ประเภท คือ การย่อยได้ปรากฏ (apparent digestibility) และการย่อยได้จริง (true digestibility) ซึ่งค่าที่ได้จากการย่อยได้ทั้ง 2 ประเภทนี้ เป็นค่าที่ได้รับความนิยมกันโดยทั่วไป เพราะเป็นการหาค่าการย่อยได้จากตัวสัตว์จริง และทำได้ง่ายที่สุด โดยคำนวณได้จากการนำโปรตีนหรือกรดอะมิโนที่กินเข้าไปหักลบออกจากโปรตีนหรือกรดอะมิโนที่ขับถ่ายออกมา โดยอนุมานว่าส่วนของโปรตีนหรือกรดอะมิโนที่หายไป คือ ส่วนที่สัตว์สามารถย่อยและนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากนั้นนำมาคิดเป็นร้อยละของโปรตีนหรือกรดอะมิโนในอาหาร ดังแสดงในสมการ 1 เรียกวิธีการนี้ว่า การหาค่าการย่อยได้ปรากฏทั้งระบบทางเดินอาหาร (total tract digestibility) หรือการย่อยได้ปรากฏในมูล (apparent faecal digestibility) ซึ่งค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีนี้มักสูงกว่าความเป็นจริง (ตาราง 2) เนื่องจากในมูลที่ขับออกมาไม่ได้มีแต่เฉพาะโปรตีนและกรดอะมิโนที่ไม่ถูกย่อยและดูดซึมเท่านั้น แต่ยังมี endogenous substance หรือ metabolic substance ซึ่งเป็นส่วนที่ร่างกายขับออกมา เช่น เอ็นไซม์ย่อยอาหาร เซลล์เยื่อบุผนังทางเดินอาหาร และเซลล์จุลินทรีย์ ปะปนด้วย ดังนั้นการหาค่าการย่อยได้จากมูลจึงไม่ได้แสดงถึงปริมาณการดูดซึมและนำโภชนะไปใช้ประโยชน์ได้อย่างแท้จริง (Just *et al*., 1985) การหาค่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การย่อยได้โดยทำการหักลบค่า endogenous substance ออกจากโปรตีนหรือกรดอะมิโนที่พบทั้งหมดที่ปลายลำไส้ใหญ่ เรียกว่า ค่าการย่อยได้จริงทั้งระบบทางเดินอาหาร (true faecal digestibility) (สมการ 2) (Batterham, 1994; McDonald *et al*.,1995; Whittemore, 1993)

$$\text{การย่อยได้ปรากฏ} = \frac{[\text{โภชนะที่กิน} - \text{โภชนะที่ขับออก}] \times 100}{\text{โภชนะที่กิน}} \quad (1)$$

$$\text{การย่อยได้จริง} = \frac{[\text{โภชนะที่กิน} - (\text{โภชนะที่ขับออก} - \text{endogenous substance})] \times 100}{\text{โภชนะที่กิน}} \quad (2)$$

ตาราง 2 การเปรียบเทียบระหว่างการย่อยได้ทั้งระบบทางเดินอาหารกับสิ้นสุดที่ปลายลำไส้เล็กของอาหารโปรตีนแบบปรากฏของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

	Apparent digestibility	
	Faecal	**Ileal**
Piglet	0.97	0.90
Growing pig	0.81	0.66
Preruminant calf	0.94	0.88
Adult human	0.89	0.87
Chicken	0.86	0.78
Rat	0.78	0.69

ที่มา : Moughan and Donkoh (1991)

เพื่อหลีกเลี่ยงการหมักย่อยจากจุลินทรีย์ที่ลำไส้ใหญ่ จึงได้มีการพัฒนาวิธีหาค่าการย่อยได้ โดยใช้การประเมินค่าการย่อยได้สิ้นสุดที่ปลายลำไส้เล็ก (distal ileal) ซึ่งการเก็บตัวอย่างจากปลายลำไส้เล็กมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี ที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือ การผ่าตัดสอดท่อเก็บตัวอย่างรูปที (simple T-cannula) จากนั้นจะนำตัวอย่างของเหลว (digesta) มาคำนวณหาค่าการย่อยได้ของโปรตีนหรือกรดอะมิโน วิธีดังกล่าวนี้เรียกว่า การย่อยได้ปรากฏสิ้นสุดที่ปลายลำไส้เล็ก (apparent ileal digestibility) ถ้าทำการหักลบ endogenous substance ที่ปลายลำไส้เล็กออกจากโปรตีนหรือกรดอะมิโนที่เหลือจากการย่อยและดูดซึมสิ้นสุดที่ปลายลำไส้เล็กแล้ว จะได้ค่าการย่อยได้จริงสิ้นสุดที่ปลายลำไส้เล็ก (true ileal digestibility) (Albin *et at*., 2001; Darragh and Hodgkinson, 2000) ซึ่งค่าที่ได้ให้ผลใกล้เคียงกับการย่อยได้ของโปรตีนหรือกรดอะมิโนที่เกิดจากตัวสัตว์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

มากที่สุด เนื่องจากลดความแปรปรวนจากอิทธิพลของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ และยังมีค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้สูงกว่าประมาณ 5-20 เปอร์เซ็นต์ (Whittemore, 1993; Darragh and Hodgkinson, 2000)

2.4 เอ็นโดจีนัส ซับสแตน (Endogenous substance)

Endogenous substance คือ สิ่งที่ขับออกมาในมูลซึ่งไม่ได้มาจากอาหาร (food origin) ทั้งหมด แต่มาจากส่วนของร่างกายด้วย (metabolic origin) ได้แก่ น้ำย่อย เยื่อเมือก (mucus) เซลล์เยื่อบุที่หลุดลอกจากทางเดินอาหาร และยูเรีย เป็นต้น (Moughan and Schuttert, 1991) นอกจากนี้ยังมีส่วนของโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยและจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารโดยเฉพาะที่ปลายลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ปะปนมาด้วย (Low, 1990) ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนทั้งหมดใน endogenous substance ที่ขับออกมาประกอบด้วย เพปไทด์ เอ็นไซม์จากแหล่งต่าง ๆ และกรดอะมิโนอิสระอีกเพียงเล็กน้อย (Low, 1985; Moughan and Rutherfurd, 1990) ใน endogenous substance มีกรดอะมิโนทั้งหมดประมาณ 72 - 89 กรัมต่อวัน น้ำลายและน้ำย่อยจากกระเพาะอาหาร ประมาณ 2.44 - 3.44 กรัมต่อวัน น้ำย่อยจากตับอ่อน น้ำดี และน้ำย่อยจากลำไส้เล็กประมาณ 13.73, 3.71 และ 55.45 กรัมต่อวัน ตามลำดับ (Low and Zebrowska, 1989)

ปริมาณของ endogenous substance สามารถประเมินได้จากการให้สุกรได้รับอาหารปราศจากโปรตีน (protein-free diet) ซึ่งเป็นอาหารที่มีแต่เฉพาะวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของพลังงาน เช่น แป้งข้าวโพด น้ำตาลทราย และน้ำมันพืช วัตถุดิบพวกเยื่อใย ซึ่งนิยมใช้เซลล์ลูโลส (cellulose) บริสุทธิ์ แร่ธาตุ และไวตามิน เป็นต้น จากนั้นนำตัวอย่างอาหารที่ผ่านกระบวนการย่อยมาวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโน ซึ่งปริมาณโปรตีนและกรดอะมิโนที่พบนั้นถือว่าเป็น endogenous substance เมื่อนำไปหักลบออกจากส่วนที่ไม่ถูกย่อยและดูดซึม ค่าที่ได้ก็คือ ค่าการย่อยได้ที่แท้จริง (true digestibility) (Sauer *et al*., 1977; De Lange *et al*., 1989; Furuya and Kaji, 1992)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5 วิธีการประเมินการย่อยได้ของโปรตีนในตัวสัตว์ (*In vivo* protein digestibility mesurements)

2.5.1 วิธีประเมินจากมูล (Faecal excreta assay)

เป็นการศึกษาการย่อยได้ทั้งระบบทางเดินอาหาร (faecal digestibility or total tract digestibility) จัดเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายและสะดวก เนื่องจากไม่ต้องทำการผ่าตัดสุกรเพื่อเก็บตัวอย่าง แต่ค่าที่ได้ก็ยังไม่ถูกต้องนัก เนื่องจากโปรตีนที่วัดได้ในมูลไม่ได้มาจากโปรตีนที่ได้รับเพียงอย่าง

เดียว แต่ยังมีส่วนของ endogenous substance รวมอยู่ด้วย การประเมินค่าการย่อยได้ของโปรตีนด้วยวิธีนี้สามารถทำได้ทั้งแบบปกติ (conventional faecal-collection or total methods) โดยหาความแตกต่างระหว่างโปรตีนที่ได้รับและโปรตีนที่ปรากฏในมูลและแบบใช้สารบ่งชี้ (index method) (Whittemore, 1993)

2.5.2 วิธีประเมินจากของเหลวสิ้นสุดที่ปลายลำไส้เล็ก (Ileal digesta assay)

เนื่องจากโปรตีนที่สุกรขับออกมาในมูลไม่ได้มาจากอาหารที่ได้รับเพียงอย่างเดียว แต่มาจากการสังเคราะห์ของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ด้วย เพื่อลดปัจจัยดังกล่าวจึงได้มีการนำวิธีต่าง ๆ มาช่วยในการเก็บตัวอย่าง ซึ่งมีอยู่หลายวิธีได้แก่

2.5.2.1 Simple T-cannulation

เป็นวิธีที่ทำการผ่าตัดสอดท่อรูปที (T-shape cannula) เข้าที่บริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย (distal ileum) ห่างจาก ileo-cecal junction or ileo-cecal valve ประมาณ 5-10 เซนติเมตร (Sauer *et al*., 1989) หรือประมาณ 15 เซนติเมตร (Tanksley and Knabe, 1984) ส่วนของปลายท่อเปิดออกนอกลำตัวติดกับบริเวณซี่โครงซี่สุดท้าย เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของท่อ วิธีการนี้มีข้อดีคือสามารถเก็บตัวอย่างได้หลังจากผ่าตัด 5 - 10 วัน เก็บตัวอย่างได้หลายครั้งจากสุกรตัวเดียว และสามารถใช้อาหารทดลองได้หลายชนิดโดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของท่อเก็บตัวอย่าง อีกทั้งยังคงความปกติทางสรีรวิทยาของระบบทางเดินอาหารเนื่องจากลำไส้เล็กไม่ถูกตัดขาดออกจากกัน ดังนั้นคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลำไส้ (myoelectric complex) ยังคงทำงานได้อย่างปกติ (Sauer *et al*., 1989) แต่วิธีการนี้ไม่สามารถเก็บตัวอย่างแบบเก็บหมดได้ (total collection method) การประเมินค่าการย่อยได้ จึงต้องใช้วิธีคำนวณจากความเข้มข้นของสารบ่งชี้ (index method) ในdigesta เท่านั้น (Gabert *et al*., 2001)

2.5.2.2 การฆ่าสุกรเพื่อเก็บตัวอย่าง (Slaughter method or intact ileal sampling)

วิธีการนี้จัดเป็นวิธีที่ทำได้ง่ายที่สุดสำหรับการวัดค่าการย่อยได้ที่ลำไส้เล็กส่วนปลาย โดยให้สุกรได้รับอาหารทดลองเป็นเวลา 5 - 7 วัน จากนั้นนำไปฆ่าด้วยวิธีช็อตด้วยกระแสไฟฟ้าหรือฉีดยาสลบเกินขนาด ตัดบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลายยาวประมาณ 150 เซนติเมตร นำเอา digesta ภายในลำไส้มาวิเคราะห์หาความเข้มข้นของสารบ่งชี้เพื่อใช้สำหรับประเมินค่าการย่อยได้ (Batterham, 1994) วิธีนี้ทำได้ง่ายแต่ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง สุกรหนึ่งตัวสามารถวัดค่าการย่อยได้ของอาหารหรือวัตถุดิบอาหารได้ 1 ชนิด ทำให้ใช้สุกรจำนวนมาก ซากของสุกรไม่

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สามารถจำหน่ายได้ และยังพบปัญหาการปะปนของ digesta จากลำไส้เล็กส่วนอื่น (Low,1990; Van Wijik *et al*., 1998)

2.5.2.3 Re-entrant cannulation or ileocaecal re-entrant cannulation (IR)

IR เป็นวิธีการเปลี่ยนทางเดินของ digesta โดยผ่าตัดใส่ท่อบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย เพื่อให้ digesta ไหลออกมานอกตัวสุกร หลังจากสุ่มเก็บตัวอย่างแล้ว digesta ที่เหลือจะถูกนำกลับเข้าสู่ ileum หรือ cecum (Easter and Tanksley, 1973; Sauer and de Lange, 1992) วิธีการนี้มีข้อดี คือ สามารถเก็บตัวอย่างแบบเก็บหมดได้ ทำให้ทราบถึงปริมาณ digesta ทั้งหมด และสามารถเก็บตัวอย่าง digesta ได้หลายครั้ง ส่วนข้อจำกัดของวิธีการนี้คือเป็นวิธีที่ต้องตัดส่วนของลำไส้เล็กขาดจากกัน ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลำไส้ (myoelectric complex) ทำงานผิดปกติ และยังเกิดการอุดตันได้ง่ายเมื่อใช้อาหารทดลองที่มีเยื่อใยสูง วิธีการนี้จึงไม่ค่อยเป็นที่นิยมนัก (Knabe, 1991; Sauer *et al*., 1989; Sauer and de Lange, 1992)

2.5.2.4 Mobile nylon bag technique (MNBT)

MNBT เป็นวิธีที่ใช้สำหรับหาค่าการย่อยได้ของโภชนะในอาหารหรือวัตถุดิบอาหารสำหรับสุกร โดยให้สุกรกิน nylon bag ขนาดเล็กซึ่งภายในบรรจุตัวอย่างอาหารหรือวัตถุดิบอาหารเข้าไป nylon bag จะคงอยู่ในลำไส้เล็กส่วน duodenum และในลำไส้ใหญ่นานประมาณ 23 ถึง 69 ชั่วโมง แล้วถูกขับออกมาพร้อมกับมูล ทำการประเมินค่าการย่อยได้ (apparent digestibility) ของโภชนะใน nylon bag แบบปกติ (conventional faecal-collection methods) (Graham *et al*., 1985) Sauer *et al*. (1983; 1989) and Leibholz (1991) รายงานว่า ค่าการย่อยได้แบบปรากฏในมูล และลำไส้เล็กส่วนปลายของโปรตีนที่ใช้ MNBT มีค่าต่ำกว่าการประเมินค่าการย่อยได้จากมูลโดยตรง ซึ่งขัดแย้งกับ Yin *et al*. (1995; 2002) ที่รายงานว่าค่าการย่อยได้ที่ปลายลำไส้เล็กจากการใช้ MNBT มีค่าสูงกว่า

2.5.2.6 Ileal-rectal shunt procedure and ileo-rectal anastomosis (IRA)

IRA เป็นวิธีที่นิยมใช้ทั่วไปในฝรั่งเศส เป็นวิธีการผ่าตัดแยก cecum และลำไส้ใหญ่ออกจากทางเดินอาหาร แล้วต่อส่วนของ ileum เข้ากับ rectum จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างจากทวารหนัก (anus) วิธีการนี้สามารถเก็บแบบ total collection และเก็บตัวอย่าง digesta จากอาหารได้ทุกชนิด การเกิดแก๊สในลำไส้สามารถแก้ไขได้โดยทำการสอดท่อรูปทีเข้าในส่วนของลำไส้ ข้อเสียของวิธีนี้ คือ ไม่สามารถคงความปกติของการทำหน้าที่ในระบบทางเดินอาหาร (Sauer and de Lange, 1992) ค่าการย่อยได้ของกรดอะมิโนในอาหารที่ประเมินได้จากการใช้วิธี IR และ IRA ไม่มีความแตกต่าง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

กันทางสถิติ แต่ IRA เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับใช้ในการประเมินการย่อยได้ของโภชนะโดยเฉพาะกรดอะมิโน (Yin *et al*.,1993)

2.5.2.7 Post-valvular T-cecum cannulation (PVTC)

van Leeuwen *et al*. (1991) ได้พัฒนาวิธีการนี้ขึ้น โดยแยกเอาส่วนของ cecum ออกมาแล้วสอดท่อซึ่งทำจากซิลิโคนขนาดใหญ่ ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางด้านในและด้านนอกเท่ากับ 25 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ วิธีการนี้ได้มีการทดสอบกับอาหารชนิดต่าง ๆ แล้วพบว่าไม่มีปัญหาเกี่ยวกับการอุดตันของท่อเนื่องจากการทดสอบอาหารพวกเยื่อใย (Sauer and de Lange, 1992) และยังไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับการใช้วิธี Simple T-cannulation และ IR (Köhler, 1990)

2.5.2.8 Steered ileo-cecal valve cannulation (SICV)

เป็นวิธีการใหม่ล่าสุดที่ Mroz *et al*. (1996) พัฒนาขึ้น โดยใช้ท่อสอดเข้าสู่ cecum บริเวณตรงข้ามกับ ilel-cecal valve ใช้วงแหวนสแตนเลส (stainless steel ring) ครอบรอบด้านนอกของ ileum และใช้วงแหวนอีกอันสอดใส่ภายใน ileum โดยมีด้ายไนลอนต่อกับวงแหวน ช่วงที่ทำการเก็บตัวอย่างจะดึงด้ายไนลอนทำให้วงแหวนด้านนอกติดกับ barrel ของท่อ ซึ่งในช่วงที่ไม่ได้เก็บตัวอย่างจะทำการปล่อยด้ายไนลอน เพื่อให้ digesta ไหลเข้าสู่ทางเดินอาหารตามปกติ วิธีการนี้สามารถเก็บแบบ total collection ได้ และสามารถใช้กับอาหารทดสอบได้หลายชนิด

2.6 ความต้องการโปรตีนและกรดอะมิโนจำเป็นของสุกร

2.6.1 ความต้องการโปรตีน (Protein requirement)

สุกรมีความต้องการโภชนะเพื่อใช้สำหรับดำรงชีพ การเจริญเติบโต และให้ผลผลิต ดังนั้นการประกอบสูตรอาหารสำหรับสุกรจึงควรคำนึงถึงความพอเพียงของโภชนะที่มีอยู่ในอาหารให้มีครบตามความต้องการของร่างกาย ซึ่งในอดีตที่ผ่านการประกอบสูตรอาหารมักคำนึงถึงความต้องการโปรตีนรวม (crude protein) เป็นหลัก ทำให้กรดอะมิโนที่สุกรได้รับมีปริมาณและสัดส่วนไม่สมดุล แต่ในปัจจุบันและอนาคตเราสามารถลดระดับโปรตีนในอาหารของสุกรลงได้ โดยทำการปรับสัดส่วนของกรดอะมิโนในอาหารให้เหมาะสมและเพียงพอต่อความต้องการ ความต้องการโปรตีนของสุกรขึ้นอยู่กับปัจจัยหลาย ๆ อย่าง ดังนั้นในการประกอบสูตรอาหารควรคำนึงถึงปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1. ปริมาณการใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีน (protein availability) และความแปรปรวนของปริมาณโปรตีนในอาหาร
2. ระยะของวงจรการให้ผลผลิต เช่น สุกรที่มีอายุน้อยจะต้องการความเข้มข้นของโปรตีนในอาหารมากกว่าสุกรที่อายุมาก เพื่อใช้สังเคราะห์เป็นกล้ามเนื้อโปรตีนหรืออวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย
3. สมดุลของกรดอะมิโนและความสัมพันธ์กับโภชนะอื่น ๆ รวมถึงพลังงานในอาหาร
4. ผลของขั้นตอนหรือกระบวนการผลิตอาหารที่มีต่อคุณค่าทางโภชนะของโปรตีนและกรดอะมิโน

นอกจากจะพิจารณาปัจจัยดังกล่าวแล้ว ควรคำนึงถึงการปรับสารอาหารในสูตรอาหารเพื่อให้สุกรตอบสนองได้มากที่สุดด้วย เนื่องจากปริมาณสารอาหารหรือกรดอะมิโนที่สุกรได้รับจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณอาหารที่กิน สุกรแต่ละระยะจะมีความต้องการระดับโปรตีนที่แตกต่างกัน (ตาราง 3) ทำให้สามารถประกอบสูตรอาหารได้เหมาะสมตามระยะ หรือน้ำหนักตัวของสุกร

ตาราง 3 ระดับความต้องการโปรตีนของสุกรแต่ละระยะ

Class of animal	**Liveweight range (kg)**	**Total feed intake (kg/d)**	**CP content of diet (%)**	**CP needed daily (kg)**
Growing-finishing	5 - 10	0.50	23.70	0.12
	10 - 20	1.00	20.90	0.21
	20 - 50	1.85	18.00	0.33
	50 - 80	2.57	15.50	0.40
	80 - 120	3.07	13.20	0.41
Bred sows	125 - 200	1.85	12.00	0.22
Lactating sows	175 - 200	5.25	18.00	0.94
Active boars	120 - 250	2.00	13.00	0.26

ที่มา : ดัดแปลงจาก NRC (1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.2 ความต้องการกรดอะมิโนที่จำเป็น (Essential amino acid requirement)

สุกรแต่ละระยะการเจริญเติบโต มีความต้องการกรดอะมิโนจำเป็นแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ สุกรที่อายุน้อยจะต้องการมากกว่าสุกรที่มีอายุมาก ซึ่งในแต่ละระยะของการเจริญเติบโต ความต้องการกรดอะมิโนที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับ ปัจจัยทางพันธุกรรม (Bercovici and Fuller, 1995) และสิ่งแวดล้อม (Bercovici and Fuller, 1995; Lewis, 2001) ได้แก่ ระดับโปรตีนในอาหาร ระดับพลังงานในอาหาร อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม เพศ อายุ ระยะการให้ผลผลิต และเกณฑ์มาตรฐาน ที่ใช้ในการประเมินความต้องการกรดอะมิโน (Lewis, 2001)

โดยทั่วไปสุกรจะต้องการกรดอะมิโนจำเป็นมากกว่ากรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น เพราะเป็นกรดอะมิโนที่ร่างกายสุกรสร้างเองไม่ได้ หรือสร้างได้ในปริมาณน้อย ไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกายจำเป็นต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น ถ้ากรดอะมิโนตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวมีไม่ครบตามความต้องการ จะส่งผลให้การใช้ประโยชน์ได้ของกรดอะมิโนหรือโปรตีนในอาหารนั้นเสียไป ทำให้สุกรมีการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตต่าง ๆ ลดลง หรืออาจทำให้เกิดโรคได้ (Fuller, 1994) ซึ่งความต้องการกรดอะมิโนของสุกรแต่ละระยะ (ตาราง 4) เป็นค่าแสดงระดับความต้องการต่ำที่สุด ที่ทำการเสริมหรือมีในอาหารสำหรับการเจริญเติบโตที่สูงสุด หรือเหมาะสมกับสมรรถภาพการผลิตในแต่ละวัน

ตาราง 4 ระดับความต้องการกรดอะมิโนของสุกรแต่ละระยะการเจริญเติบโต (g/kg diet)

Amino acid	**Growing pig (kg)**			**Lactating sows**
	10-20	**25-50**	**50-110**	
Lysine	9.5	7.5	6.0	6.0
Methionine+cysteine	4.8	4.1	3.4	3.6
Threonine	5.6	4.8	4.0	4.3
Tryptophan	1.4	1.2	1.0	1.2
Arginine	4.0	2.5	1.0	4.0
Histidine	2.5	2.2	1.8	2.5
Isoleucine	5.3	4.6	3.8	3.9
Leucine	7.0	6.0	5.0	4.8
Phenylalanine+tyrosine	7.7	6.6	5.5	7.0

ที่มา : ดัดแปลงจาก Lewis (2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7 แนวคิดโปรตีนในอุดมคติ (Ideal protein concept)

เนื่องจากแหล่งวัตถุดิบที่เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสุกร เช่น กากถั่วเหลือง ปลาป่น มักมีราคาสูง ดังนั้นการประกอบสูตรอาหารจึงต้องคำนึงถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตที่สูงสุด และขับโภชนะส่วนเกินออกมากับของเสียให้น้อยที่สุดด้วย ปัจจัยหลักที่ทำให้สุกรสามารถนำโปรตีนในอาหารไปใช้ได้อย่างเหมาะสมเพื่อการให้ผลผลิตที่สูงสุด คือ ความสมดุลของสัดส่วนและปริมาณกรดอะมิโนในอาหาร หรือโปรตีนในอุดมคติ (Ideal protein) (Lewis, 2001) ซึ่งปริมาณของกรดอะมิโนจะต้องไม่มากเกินความต้องการหรือขาดจนไม่เพียงพอ โดยเฉพาะกรดอะมิโนที่จำเป็น เนื่องจากสุกรที่ได้รับกรดอะมิโนที่เหมาะสมจะมีการนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าสุกรที่ได้รับกรดอะมิโนขาดหรือเกิน (Baker *et al*., 1993)

การประกอบสูตรอาหารตามแนวคิดโปรตีนอุดมคติ จะกำหนดสัดส่วนของกรดอะมิโนโดยเปรียบเทียบกับ lysine เป็นหลัก เนื่องจาก lysine จัดเป็นกรดอะมิโนจำเป็นที่มักขาดเป็นอันดับแรก ถ้าในอาหารมีปริมาณ lysine เพียงพอ กรดอะมิโนตัวอื่น ๆ มักจะมีเพียงพอตามไปด้วย ตัวอย่างสัดส่วนกรดอะมิโนของสุกรรุ่นตามแนวคิดโปรตีนในอุดมคติเมื่อเทียบกับไลซีนเป็นหลักแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 สัดส่วนกรดอะมิโนของสุกรรุ่นตามแนวคิดโปรตีนในอุดมคติเมื่อเทียบกับไลซีนเป็นหลัก

Amino acids	**NRC (1998)**	**ARC (1981)**	**Yen *et al*. (1986)**	**Wang and Fuller (1989)**
Lysine	100	100	100	100
Methionine	27	-	39	-
Methionine+cysteine	55	50	58	63
Threonine	60	60	67	72
Tryptophan	18	15	21	18
Arginine	48	-	-	-
Histidine	32	33	46	-
Isoleucine	54	55	76	60
Leucine	102	100	140	110
Phenylalanine	50	-	-	-
Phenylalanine+tyrosine	121	96	95	120
Valine	67	70	97	75

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

แม้ว่ากรดอะมิโนไม่จำเป็นจะไม่มีความสำคัญมากนัก แต่มีรายงานในไก่และหนูที่ได้รับอาหารที่มีกรดอะมิโนจำเป็น เป็นแหล่งของไนโตรเจนเพียงอย่างเดียว พบว่า มีประสิทธิภาพการนำไนโตรเจนไปใช้ประโยชน์น้อยกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีทั้งกรดอะมิโนที่จำเป็นและไม่จำเป็น การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนกรดอะมิโนจำเป็นต่อกรดอะมิโนไม่จำเป็นพบว่า มีผลช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและการสะสมไนโตรเจนในร่างกาย โดยมีสัดส่วนประมาณ 50 : 50 (Wang and Fuller, 1989; Lenis *et al*., 1999) หรือมีสัดส่วนที่สูงได้ไม่เกิน 70 : 30 เพื่อช่วยกระตุ้นประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ได้ของไนโตรเจน หากสัดส่วนสูงเกินกว่านี้ จะทำให้ส่วนเกินของกรดอะมิโนที่จำเป็นถูกนำมาสังเคราะห์เป็นกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต่อไป (Lenis *et al*., 1999)

2.8 การใช้ประโยชน์ได้ทางชีวภาพของกรดอะมิโน (Amino acid bioavailability)

การใช้ประโยชน์ได้ทางชีวภาพนับว่ามีความสำคัญอย่างมาก สำหรับใช้ในการประกอบสูตรอาหารสุกร เพื่อให้แน่ใจว่าสุกรได้รับกรดอะมิโนตามความต้องการและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการดำรงชีพ และการเจริญเติบโตได้อย่างแท้จริง

ความหมายของคำว่า amino acid bioavailable คือ การที่สัตว์สามารถดูดซึมกรดอะมิโนและนำไปใช้ในการดำรงชีพ (ซ่อมแซมโปรตีนส่วนต่าง ๆ ในร่างกาย) และเพื่อการสร้างผลผลิต เช่น การเจริญเติบโตของกล้ามเนื้อ (สร้างเนื้อเยื่อโปรตีนใหม่) การให้น้ำนมของแม่สุกร (การสังเคราะห์โปรตีนในนม) และใช้ในการคงความปกติของกระบวนการเมทาบอลิซึมต่าง ๆ ในร่างกาย (Lewis, 2001)

การวิเคราะห์การใช้ประโยชน์ได้ทางชีวภาพของกรดอะมิโนในวัตถุดิบอาหารสัตว์สามารถทำได้หลายวิธี มีทั้งวิธีที่วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการและจากตัวสัตว์ โดยปกติการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการค่อนข้างยุ่งยากและค่าที่ได้แตกต่างจากความเป็นจริง การประเมินโดยตรงจากตัวสัตว์จึงได้รับความนิยมมากกว่า โดยใช้การประเมินจากการเจริญเติบโต (growth assay) ซึ่งเป็นการทดสอบการใช้ประโยชน์ได้ทางชีวภาพของโปรตีนและกรดอะมิโน (bioavailability) ต่อการตอบสนองต่อการเจริญเติบโตของสัตว์ การประเมินการเจริญเติบโตมีลักษณะสำคัญ 2 ประการ คือ

1) ประเมินการตอบสนองในรูปการเจริญเติบโต ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญทางเศรษฐกิจของสัตว์
2) บ่งชี้ถึงผลสุทธิขององค์ประกอบที่มีผลต่อความเป็นประโยชน์ได้ทางชีวภาพ ได้แก่ การย่อยได้ การดูดซึม และการนำไปใช้ประโยชน์ได้ของสัตว์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การทดสอบการใช้ประโยชน์ได้ของกรดอะมิโนโดยการประเมินการเจริญเติบโตมีข้อจำกัดค่อนข้างมากเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูง ใช้ระยะเวลานาน และในการทดลองแต่ละครั้งสามารถประเมินการใช้ประโยชน์ได้ทางชีวภาพของกรดอะมิโนเพียงตัวเดียว จึงนิยมทดลองในสัตว์เล็ก เช่น หนู นอกจากนี้ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการวัดนี้ได้แก่ สภาพแวดล้อมในการทดลอง ความสมดุลของกรดอะมิโนในอาหาร ปริมาณโปรตีนและพลังงานในอาหาร สารต้านโภชนะ (anti nutritional) ที่มีในอาหาร และพันธุกรรมเป็นต้น (Lewis, 2001)

2.9 ความสัมพันธ์ของโปรตีนกับพลังงาน

ความต้องการอาหารของสุกรที่ได้รับอาหารแบบเต็มที่ (*ad libitum*) จะขึ้นอยู่กับระดับของพลังงานสุทธิ (net energy; NE) ในอาหาร ถ้าอาหารมีระดับของพลังงานต่ำ จะทำให้สุกรกินอาหารเพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้พลังงานเพียงพอกับความต้องการของร่างกาย ดังนั้นถ้าระดับพลังงานในอาหารมีการเปลี่ยนแปลง ระดับของกรดอะมิโนเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในอาหารควรจะปรับให้มีความเหมาะสมด้วย (Lewis, 2001) สัดส่วนความต้องการโปรตีนต่อพลังงานของสุกรจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักและระยะการให้ผลผลิตเป็นหลัก โดยสุกรที่มีขนาดเล็กจะมีสัดส่วนความต้องการโปรตีนต่อพลังงานมีค่ามากกว่าสุกรที่มีขนาดใหญ่ ดังแสดงในตาราง 6 ซึ่งจากตารางจะเห็นได้ว่า อาหารที่มีระดับพลังงานสูงจะมีระดับความต้องการโปรตีนในอาหารสูงตามไปด้วย (Whittemore, 1993)

ตาราง 6 ปริมาณโภชนะในอาหารสุกรระยะต่าง ๆ

	DE density (MJ/kg)	**CP density (g/kg)**	**CP (%)**	**Lysine (g/kg)**	**Lysine (g/MJ DE)**
Starter (up to 15 kg)	15.5	250	16	14.8	0.95
Young grower (up to 30 kg)	15.0	225	15	12.8	0.85
Finisher (up to 60 kg)	14.0	200	14	10.5	0.75
Finisher (up to 100 kg)	14.0	170	12	8.4	0.60
Pregnant breeder	12.5	150	12	6.9	0.55
Lactating breeder	13.5	165	12.5	8.1	0.60
Improve entire male grower (40 kg)	15.0	225	15	12.8	0.85
Unimprove castrated male grower (40 kg)	13.0	160	12	7.8	0.60

ที่มา : Whittemore (1993)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.10 การประกอบสูตรอาหารสำหรับสุกรโดยคำนึงถึงกรดอะมิโน

การประกอบสูตรอาหารสำหรับสุกรในปัจจุบัน ได้ลดความสำคัญของโปรตีนลงโดยมุ่งให้ความสำคัญไปที่ปริมาณของกรดอะมิโนที่จำเป็น และปริมาณไนโตรเจนที่ใช้สำหรับสังเคราะห์กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นที่มีในอาหารเป็นหลัก แทนการใช้โปรตีนรวม ซึ่งจะมีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์มากกว่า ทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงสุด (Lewis, 2001)

ปัจจุบันสามารถคำนวณสูตรอาหารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถพิจารณาถึงกรดอะมิโนที่มีทั้งหมดได้ แต่ในความเป็นจริงไม่จำเป็นต้องพิจารณากรดอะมิโนทั้งหมด ควรพิจารณาเฉพาะกรดอะมิโนตัวที่สำคัญ และจำเป็นต้องมีปริมาณที่เพียงพอในอาหาร วัตถุดิบที่นิยมใช้ประกอบอาหารสุกรซึ่งถือว่าเป็นแหล่งของพลังงานคือเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวบาร์เลย์ หรือข้าวสาลี เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้มีกรดอะมิโนเพียง 30-60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับความต้องการกรดอะมิโนทั้งหมด กรดอะมิโนที่มักขาดเป็นอันดับแรก (first limiting amino acid) คือ lysine ดังนั้นในการคำนวณสูตรอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพดเป็นหลัก จึงควรคำนึงถึงปริมาณ lysine เป็นอันดับแรก และควรพิจารณาถึง tryptophan (second limiting amino acid), threonine และ methionine (third limiting amino acid) ด้วย เพื่อให้แน่ใจว่ามีปริมาณกรดอะมิโนเหล่านี้ในอาหารเพียงพอกับความต้องการ (Allee and Baker, 1970; Lewis, 2001)

ถ้าในสูตรอาหารมีแหล่งพลังงานจากเมล็ดธัญพืช 2 ชนิด ที่มีปริมาณโปรตีนแตกต่างกันมาก แต่มีระดับของ lysine ใกล้เคียงกัน การประกอบสูตรอาหารโดยคำนึงถึง lysine เป็นหลักแทนโปรตีนรวมเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะถ้าคำนวณสูตรอาหารโดยยึดโปรตีนรวมเป็นหลัก วัตถุดิบที่มีระดับโปรตีนสูงอาจทำให้เกิดการขาดกรดอะมิโนบางตัวได้ง่าย ตัวอย่างวัตถุดิบอาหารจากธัญพืช 2 ชนิด ที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในสูตรอาหาร ได้แก่ ข้าวโพด และกากถั่วเหลือง ซึ่งกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบที่มีโปรตีนสูง มี methionine เป็น first limiting amino acid (Berry *et al*., 1966) ส่วนข้าวโพดซึ่งเป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งพลังงานมีโปรตีนระดับต่ำและมี lysine เป็น first limiting amino acid (Baker *et al*., 1969) ดังนั้นหากคำนวณสูตรอาหารโดยคำนึงถึงโปรตีนรวม โดยใช้วัตถุดิบจากกากถั่วเหลืองเป็นหลัก จะทำให้สูตรอาหารที่ได้ขาดกรดอะมิโนที่จำเป็น คือ lysine

การคำนวณสูตรอาหารโดยคำนึงถึงความต้องการกรดอะมิโน นอกจากจะให้ผลดีในด้านการใช้ประโยชน์จากโภชนะได้อย่างคุ้มค่า และลดค่าใช้จ่ายจากการลดโภชนะส่วนเกินแล้ว ยังมีผลดีต่อสภาพแวดล้อม คือช่วยลดการขับถ่ายโภชนะส่วนเกินโดยเฉพาะไนโตรเจนออกสู่สิ่งแวดล้อม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 7 กรดอะมิโนที่มีจำกัดในวัตถุดิบอาหารสุกร

Cereal Grain	Limiting amino acids		
	First	Second	Third
Barley	Lysine	Threonine	Histidine
Corn	Lysine and Tryptophan		Threonine
Oats	Lysine		
Sorghum	Lysine	Threonine	Tryptophan
Triticale	Lysine	Threonine	
Wheat	Lysine	Threonine	

ที่มา : Lewis (2001)

2.11 ไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายของสุกร (Nitrogen excretion of pig)

จุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่สามารถใช้ไนโตรเจนจากสารประกอบไนโตรเจนในอาหาร และยูเรียที่เคลื่อนเข้าสู่ทางเดินอาหาร รวมถึงเอ็นไซม์ที่หลั่งจากตัวสัตว์ เยื่อเมือก และเซลล์ของผนังลำไส้ที่หลุดลอกจากทางเดินอาหารมาสังเคราะห์เป็นเซลล์ของจุลินทรีย์ อาหารจะคงอยู่ในลำไส้ใหญ่นานประมาณ 20 - 38 ชั่วโมง สุกรที่มีน้ำหนักตัว 30 - 50 กิโลกรัมจะมีปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ลำไส้ใหญ่ประมาณวันละ 2 - 15 กรัม ปริมาณไนโตรเจนที่เข้าสู่ลำไส้ใหญ่จะขึ้นอยู่กับ ปริมาณไนโตรเจนที่ได้รับจากอาหาร อาหารเยื่อใย และอัตราการไหลผ่านของเยื่อใยในทางเดินอาหาร โดยไนโตรเจน หนึ่งในสี่ส่วนของไนโตรเจนทั้งหมดในลำไส้ใหญ่ส่วนปลายจะประกอบด้วย ยูเรีย เยื่อเมือก และผนังเซลล์ของทางเดินอาหาร ผลผลิตสุดท้ายของการย่อยไนโตรเจนในลำไส้ใหญ่ประกอบด้วย แอมโมเนีย เอมีน กรดไขมันระเหยได้และโปรตีนของจุลินทรีย์ (microbial protein) จากนั้นไนโตรเจนเหล่านี้จะถูกขับออกมาในมูลประมาณ 3 - 6 กรัมต่อปริมาณไนโตรเจนที่ได้รับในรูปวัตถุแห้ง 1 กิโลกรัม ซึ่งมีประมาณ 60 - 80 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนในมูลสุกร (Lewis, 2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สิ่งขับถ่ายของสุกรจะอยู่ในรูปก๊าซ ของแข็ง และของเหลว ซึ่งมีองค์ประกอบแตกต่างกันไป โดยในมูลจะมีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 65 - 85 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เป็นของแข็งประมาณ 15 - 35 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัยที่มีผลต่อองค์ประกอบของมูลมากที่สุด ได้แก่ อาหารที่สุกรได้รับ ซึ่งส่วนของของแข็งหรือมูลสุกรมีองค์ประกอบดังนี้ (วันดี, 2546) คือ

1) อาหารที่ไม่ถูกย่อยหรือย่อยได้แต่ไม่สามารถดูดซึม ได้แก่ เยื่อใย ขนสัตว์ เป็นต้น
2) ส่วนที่มาจากสัตว์โดยเฉพาะจากระบบทางเดินอาหาร เช่น เซลล์จากผนังลำไส้
3) จุลินทรีย์และสิ่งขับถ่ายของจุลินทรีย์

ในแต่ละช่วงระยะการเจริญเติบโตของสุกรจะมีปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับออกมาต่างกัน (Dourmad *et al*., 1992) ดังแสดงในตาราง 8 ซึ่งในสภาพปกติปริมาณการขับถ่ายของสุกรจะผันแปรไปตามอายุ เพศ และขนาดของสุกร ชนิดและปริมาณอาหารที่ได้รับ ปริมาณน้ำที่ได้รับ และปัจจัยอื่น ๆ อีกหลายประการ

ในช่วงระยะการเจริญเติบโตของสุกรตั้งแต่ระยะรุ่นถึงขุน 1 ตัว กินอาหารที่มีไนโตรเจนประมาณ 7.5 กิโลกรัม ซึ่งในส่วนนี้ประมาณ 60 - 70 เปอร์เซ็นต์ หรือ 4.5 - 5.3 กิโลกรัม จะถูกขับถ่ายออกมา ซึ่งคิดเป็น 20 และ 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณไนโตรเจนที่ขับถ่ายออกมาในมูลและในปัสสาวะเมื่อเทียบกับไนโตรเจนที่ได้รับ (Jongbloed and Lenis, 1992)

ตาราง 8 ปริมาณของไนโตรเจนที่ถูกขับออกมาของสุกรแต่ละช่วงอายุ

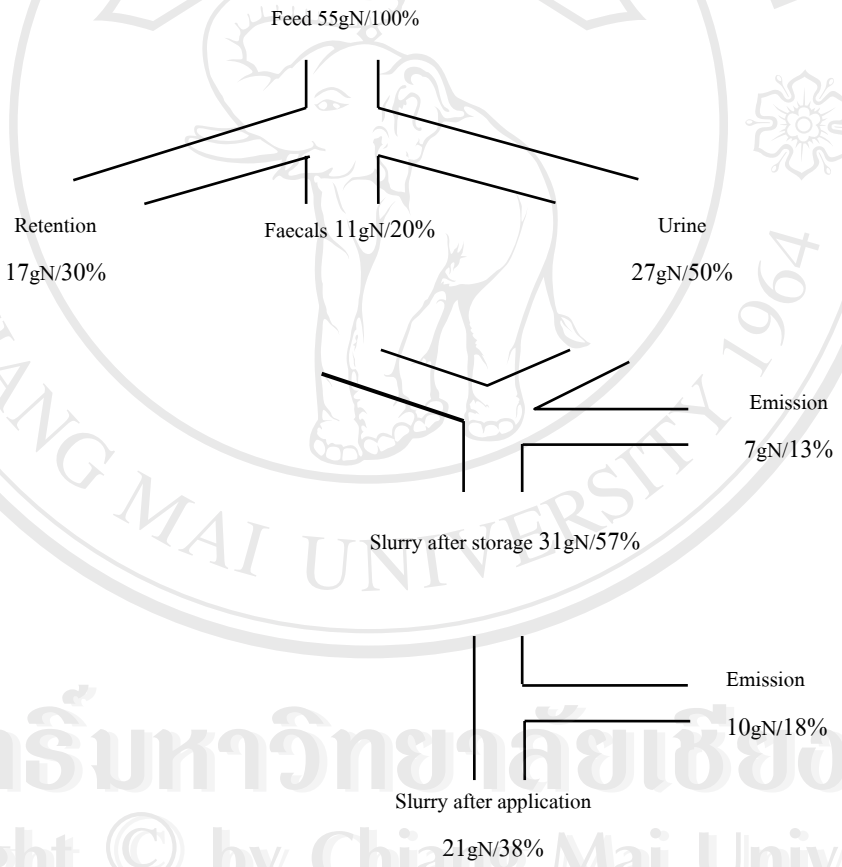
Class	Nitrogen output			
	Per pig (g/d)	Per space (kg/year)	% of total	N output/N intake (%)
Sow				
Replacement Gilts	51	186	1.7	69
Weaned Sows	42	103	0.9	73
Gestation	40	954	8.7	77
Lactation	79	459	4.2	57
Piglets				
Suckling (27 d)	1	54	0.5	14
Post-weaning (to 25 kg)	11	907	8.2	47
Growing-Finishing Pigs				
25 to 105 kg	38	8,360	75.8	67
Total	262	11,023	100	65

ที่มา: Dourmad *et al*. (1992)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.12 ไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายของสุกรกับปัญหาสิ่งแวดล้อม

ปัญหาหลักของการเกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมจากของเสียซึ่งมาจาการเลี้ยงสุกร คือ ปัญหาไนโตรเจนจำนวนมากที่ขับออกมาในสิ่งขับถ่าย (ภาพ 2) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทั้งทางดิน แหล่งน้ำธรรมชาติ และทางอากาศ โดยไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายของสุกรจะเข้าสู่วัฏจักรของไนโตรเจนตามธรรมชาติ ไนโตรเจนที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียม (NH_4^+) ไนเตรท (NO_3^-) และไนไตรท์ (NO^-_2) (วันดี, 2546)



ภาพ 2 แสดงการหมุนเวียนไนโตรเจนในการผลิตสุกรระยะรุ่น-ขุน

ที่มา : Aarnink and Cahn (1999)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.12.1 ปัญหาอากาศเสีย

การระเหยของแอมโมเนีย เข้าสู่ชั้นบรรยากาศของโลกนั้น เป็นกระบวนการที่ซับซ้อน ที่ควบคุมโดยปัจจัยต่าง ๆ ร่วมกัน ได้แก่ ปัจจัยทางชีววิทยา ปัจจัยทางเคมี และปัจจัยทางกายภาพ ต่าง ๆ การระเหยของแอมโมเนียที่มาจากสิ่งขับถ่ายของสัตว์ โดยประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของ ไนโตรเจนที่ขับถ่ายออกมา มาจากสัตว์ที่เลี้ยงในระบบการเลี้ยงหนาแน่น ซึ่งไนโตรเจนจะถูกปล่อย ออกสู่ชั้นบรรยากาศโดยตรง (Ritter and Bergstrom, 2001) โดยเฉพาะการเลี้ยงสุกรในโรงเรือนที่มี การจำกัดขอบเขต และมีความหนาแน่นมาก นับว่าเป็นแหล่งของการเกิดกลิ่นและก๊าซที่ไม่พึง ประสงค์ได้สูงถ้าของเสียจากสิ่งขับถ่ายมีการสะสมภายในโรงเรือนหรือพื้นคอก ซึ่งการเกิดกลิ่นนั้น เกิดจากการหมักย่อยของจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจนเป็นอันดับแรก

2.12.2 ปัญหาคุณภาพน้ำ

สารมลพิษ (pollutant) ที่มักก่อให้เกิดปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งมาจากของเสียจากฟาร์ม สุกรคือ ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส (Ritter, 2001) ถ้าถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ในปริมาณ มากเกินไปจะทำให้เกิดภาวะยูโทรฟิเคชั่น (eutrophication) (Ritter, 2001; ภิญโญ และคณะ, 2545) คือการที่มีธาตุซึ่งเป็นแหล่งของสารอาหารอยู่มาก กระตุ้นให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเจริญอย่างรวดเร็ว ทั้งจุลินทรีย์ สาหร่าย และพืชน้ำชนิดต่าง ๆ ทำให้น้ำมีสีเขียวขุ่น และผิวน้ำมีฝุ่นหรือฝ้าบางลอย เคลือบอยู่ทำให้คุณภาพน้ำลดลง ซึ่งส่งผลถึงค่า BOD (biochemical oxygen demand), COD (chemical oxygen demand) และอื่น ๆ ที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำที่ลดลง (Ritter and Bergstrom, 2001)

2.12.3 ปัญหาคุณภาพดิน

ในบรรยากาศประกอบด้วยก๊าซไนโตรเจนถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งอยู่ในรูปที่พืชไม่ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เมื่อฝนชะล้าง (leaching) ไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียม และไนไตรท์ ไหลลงสะสมในดิน จากนั้นไนไตรท์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของไนเตรทโดยการ ทำงานของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน การที่มีการชะล้างเอาไนไตรท์และไนเตรทไปกับน้ำทำให้น้ำมี การปนเปื้อนซึ่งเป็นอันตรายกับลูกสุกรและทารกที่ได้รับน้ำเหล่านี้ โดยรูปที่เป็นพิษ คือไนไตรท์ เมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดในร่างกาย จะไปทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบิน (haemoglobin) โดยเข้า ไปแทนที่เหล็ก เป็นผลให้ร่างกายขาดออกซิเจนเกิดภาวะโรคเลือดสีน้ำเงิน (methaemoglobin) และ อาจถึงตายได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.15 **การลดระดับโปรตีนในอาหารสุกร หรือการใช้อาหารโปรตีนต่ำ** (Low-protein diet)

ในการประกอบสูตรอาหารสุกร โดยยึดหลักการสมดุลโปรตีนหรือแนวคิดโปรตีนในอุดมคติ (ideal protein concept) เป็นหลักนั้น จะทำให้ในสูตรอาหารมีกรดอะมิโนในสัดส่วนที่เหมาะสม สำหรับการดำรงชีพ และการสะสมโปรตีนในร่างกาย ซึ่งกรดอะมิโนทุกตัวจะถูกกำหนดให้มีในปริมาณที่พอเพียง (Fuller, 1994; Wang and Fuller, 1989) การที่กรดอะมิโนทุกตัวถูกกำหนดให้มีในปริมาณที่พอเพียงในอาหาร จะช่วยลดปริมาณของกรดอะมิโนที่ถูกขับออก (Fuller *et al*., 1989; Wang and Fuller, 1990) ซึ่งจากหลักการนี้จะทำให้การประกอบสูตรอาหารคำนึงถึงแหล่งของโปรตีนลดลง (Lopez *et al*.,1994) ซึ่งจุดมุ่งหมายที่แท้จริงของการลดระดับโปรตีนในอาหารกระทำเพื่อ

1) ลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญในปัจจุบัน เนื่องจากการเลี้ยงสุกรด้วยอาหารที่มีความเข้มข้นของโภชนะที่สูง โภชนะส่วนเกินที่สัตว์ได้รับ เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส จะถูกขับออกมาพร้อมกับของเสีย เช่น มูล และปัสสาวะ ทำให้เกิดปัญหาน้ำเสีย กลิ่นเหม็น และปริมาณของก๊าซแอมโมเนีย ยังส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจของสัตว์และผู้ปฏิบัติงานในฟาร์ม รวมทั้งก่อให้เกิด ภาวะเรือนกระจก (green house effect) ซึ่งล้วนแต่เป็นปัญหาสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข

2) ลดต้นทุนการผลิต เพราะวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหาร ส่วนใหญ่มักมีราคาสูง การประกอบสูตรอาหารโดยลดระดับโปรตีนในอาหาร และเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ช่วยลดปริมาณการใช้แหล่งโปรตีนเหล่านั้นได้

3) ต้องการให้สัตว์ใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบอาหารสัตว์ได้สูงสุด เพราะการลดระดับโปรตีนและเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ เป็นการปรับสมดุลของกรดอะมิโนให้ใกล้เคียงกับความต้องการของสุกรมากขึ้น และลดปริมาณกรดอะมิโนบางตัวที่มีมากเกินความจำเป็น

การลดระดับโปรตีนในอาหาร และเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ให้เพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย มีผลดีในทางโภชนศาสตร์ คือ

1) ช่วยลดปริมาณไนโตรเจนที่ขับออก (nitrogen excretion) โดยไม่มีผลต่อการสะสมไนโตรเจนในร่างกาย (nitrogen retention) อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตัวต่อปริมาณอาหารที่กิน (Kerr *et al*., 1995; Tuitoek *et al*., 1997; Cahn *et al*., 1998)

2) ช่วยลดการสูญเสียพลังงานในรูปความร้อน (heat production) จากกระบวนการเมทาบอลิซึมกรดอะมิโนที่มากเกินความต้องการของร่างกาย และลดการสูญเสียพลังงาน (energy

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

loss) ที่ใช้ในการขับไนโตรเจน หรือกรดอะมิโนส่วนเกิน ออกนอกร่างกายในรูปยูเรียในปัสสาวะ (Le Bellego *et al*., 2001)

3) ช่วยเพิ่มปริมาณอาหารที่กินและสมรรถภาพการเจริญเติบโต ในสุกรที่เกิดภาวะเครียดเนื่องจากความร้อน นอกจากนี้อาหารโปรตีนต่ำยังช่วยลดการเกิดอาการท้องเสีย อันมีสาเหตุเหนี่ยวนำเนื่องจากการได้รับโปรตีนในอาหารมากเกินความต้องการ โดยเฉพาะในสุกรเล็ก (De Lange *et al*., 1999)

จากเหตุผลต่าง ๆ เหล่านี้จึงได้มีการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการจัดการด้านอาหารที่เหมาะสม สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระยะยาว สำหรับการเลี้ยงสุกรในสภาพอากาศร้อนชื้นอย่างในประเทศไทย และเพื่อให้เกิดการสิ้นเปลืองน้อยที่สุด

ตาราง 9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการด้านอาหารเพื่อลด N ในสิ่งขับถ่าย

ระยะสุกร	น้ำหนักตัวสุกร (กก.)	ระดับโปรตีนในอาหาร (%) *	ระดับโปรตีนในอาหารที่ลดได้ (%)	N ในสิ่งขับถ่ายที่ลดได้ (%)	เอกสารอ้างอิง
รุ่น	-	17→15.5	1.5	15-20	Gatel and Grosjean (1992)
ขุน	-	14.5→13.5	1		
รุ่น-ขุน	-	13→10	3	28	Sutton *et al.* (1997)
รุ่น-ขุน	-	18→10	8	40 และ 42**	
รุ่น	20-55	16.6→13	3.6	ไม่มีข้อมูลแต่ไม่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิต	Tuitoek *et al.* (1997)
ขุน	55-100	14.2→12.8	1.4		
ขุน	55	16.5→14.5	2	การเกิด NH_3 ลดลง 10-15% ทุก ๆ 1% โปรตีนที่ลดลง	Cahn *et al.* (1998)
		14.5→12.5			
รุ่น		18→16	2	42	กัตติกา (2547)
ขุน		15.5→13.5		32	

*ลดจาก a เปอร์เซ็นต์→ถึง b เปอร์เซ็นต์

* *Ammonium Nitrogen

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากการศึกษาที่ผ่านมาเกี่ยวกับการลดระดับโปรตีนในอาหาร พบว่า การลดระดับโปรตีนในอาหารสุกรรุ่นสามารถลดลงได้มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ คือ จาก 16.6 เหลือ 13.0 เปอร์เซ็นต์ โดยทำการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ให้เพียงพอกับความต้องการตามแนวคิดโปรตีนในอุดมคติ

(Ideal protein concept) ซึ่งช่วยลดปริมาณไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายได้ 40 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งกระทบผลต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของสัตว์ (Jongbloed and Lenis, 1998) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Gatel and Grosjean (1992) ที่รายงานว่า การลดระดับโปรตีนในอาหารสุกรรุ่นจาก 170 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เป็น 155 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัมหรือ 1.5 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และช่วยลดปริมาณไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายได้ประมาณ 15 - 20 เปอร์เซ็นต์ อีกทั้งยังมีผลเพียงเล็กน้อยต่อการย่อยได้ของไนโตรเจน นอกจากนี้ Aarnink *et al.* (1993) ยังพบว่าการเกิดแอมโมเนีย (ammonium nitrogen) ลดลง 9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อโปรตีนในอาหารลดลง 1 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าการลดระดับโปรตีนในอาหารจะมีข้อดีในด้านช่วยลดการขับถ่ายโภชนะส่วนเกินในมูลและปัสสาวะ แต่สิ่งที่ผู้ประกอบสูตรอาหารควรต้องคำนึงถึงอีกข้อก็คือต้นทุนค่าอาหาร เนื่องจากการลดระดับโปรตีนในอาหารจำเป็นต้องเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ซึ่งมีราคาแพง ทำให้สูตรอาหารที่ได้มีต้นทุนที่สูงขึ้น ยิ่งถ้าหากทำการลดระดับโปรตีนมากเท่าใด ก็ยิ่งจำเป็นต้องเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์หลายชนิดมากยิ่งขึ้น เพื่อให้สัดส่วนของกรดอะมิโนที่สุกรได้รับเพียงพอกับความต้องการ

นอกจากนี้ การลดระดับโปรตีนในอาหาร ยังมีผลกระทบต่อปริมาณแร่ธาตุที่มีในอาหาร เนื่องจากการลดระดับโปรตีนเป็นการลดปริมาณของกากถั่วเหลือง ซึ่งจัดเป็นวัตถุดิบที่มีโพแทสเซียมมาก ส่งผลให้ระดับของ dEB (dietary electrolyte balance) หรือสารปรับสมดุลสารละลายไฟฟ้าลดลง สามารถคำนวณได้จากสมการ 5 ค่า dEB เป็นค่าที่บอกถึงสัดส่วนของแร่ธาตุที่มีประจุบวกและประจุลบ ได้แก่ Na^+, K^+ และ Cl^- ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับอิเล็คโทรไลต์ในร่างกาย และมีบทบาทสำคัญต่อสมดุลของของเหลวและกรด-ด่างในร่างกาย

2.14 อิเล็คโทรไลต์ (Electrolyte)

อิเล็คโทรไลต์ หมายถึง สารที่ละลายน้ำได้ แล้วแตกตัวให้ไอออนหรือกลุ่มของไอออน ซึ่งมีทั้งไอออนบวก (cation) เช่น Na^+, Ca^{2+}, K^+ และไอออนลบ (anion) เช่น Cl^-, F^-, Br^-, SO_4^{2-}, HCO_3^- และ PO_4^{3-} (สัญญา, 2535) ทำหน้าที่ร่วมกับระบบอื่น ๆ ในร่างกาย ในการคงความสมดุลของของเหลว และความสมดุลของกรด-ด่าง ซึ่งความสมดุลของกรด-ด่างในร่างกายมีความสำคัญอย่างมากต่อการทำหน้าที่ต่าง ๆ ของเซลล์ รวมถึงหน้าที่ทางกระบวนการเมทาบอลิซึมด้วย (นีโลบล, 2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เนื่องจากอิเล็คโทรไลต์แต่ละตัวมีความสำคัญต่อร่างกายแตกต่างกัน การควบคุมอิเล็คโทรไลต์ในร่างกายนั้นมีกลไกที่ซับซ้อน และอาจแตกต่างกันไปบ้างในแต่ละตัว อิเล็คโทรไลต์ที่มีความสำคัญต่อการทำหน้าที่ของร่างกายได้แก่ Na^+, K^+ และ Cl^- (สัญญา, 2530; 2535)

2.14.1 บทบาทที่สำคัญของโซเดียม

1. เป็นตัวกำหนดออสโมแลลิตี (osmolality) ของของเหลวนอกเซลล์ (Extracellular fluid; ECF) และบ่งชี้ปริมาณน้ำในร่างกาย
2. รักษาความสมดุลของกรด-ด่าง โดยควบคุมการคัดหลั่งกรดที่ไต ซึ่งเกี่ยวข้องกับการควบคุมการขนส่งโซเดียมผ่านหลอดไตฝอยส่วนปลาย การดูดกลับโซเดียมจะทำให้มีการคัดหลั่งกรดออกสู่โพรงหลอดไตฝอยส่วนปลายในลักษณะแลกเปลี่ยนกัน
3. รักษาสมดุลของโพแทสเซียมและอิเล็คโทรไลต์อื่น ๆ
4. ช่วยในการดูดซึมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และกรดอะมิโน ในระบบทางเดินอาหาร และระบบขับถ่ายปัสสาวะ
5. ช่วยในการเกิดศักยะเพื่องาน (action potential) ซึ่งโซเดียมเป็นไอออนที่สำคัญที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า ขณะเกิดศักยะเพื่อการทำงานของเซลล์กล้ามเนื้อทุกชนิดและเซลล์ประสาท

2.14.2 บทบาทที่สำคัญของโพแทสเซียม

1. กำหนดออสโมแลลิตี และปริมาตรของเซลล์ คุณสมบัตินี้เกิดจากโพแทสเซียมเป็นตัวถูกละลายที่มีมากที่สุดภายในเซลล์ ปริมาณและความเข้มข้นของโพแทสเซียมภายในเซลล์เองก็ถูกควบคุมให้คงที่อยู่ได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานของเอ็นไซม์ Na^+ - K^+ ATPase ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ปริมาณน้ำในร่างกาย
2. ควบคุมความสมดุลของกรด-ด่าง
3. ช่วยในการทำงานของ เอ็นไซม์ภายในเซลล์ โดยเฉพาะเอ็นไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกรดนิวคลีอิค (nucleic acid)
4. ช่วยให้กล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อประสาทมีคุณสมบัติในการเร้า (exitability)
5. ควบคุมการขนส่งไอออนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์
6. ช่วยในปฏิกิริยาเมทาบอลิซึมในเซลล์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.14.3 บทบาทที่สำคัญของคลอไรด์

คลอไรด์และโซเดียมมีความสัมพันธ์กันมาก เช่นการดูดซึมที่ลำไส้เล็กจะมีการดูดซึมพร้อม ๆ กัน และระดับคลอไรด์ในน้ำเลือดจะแปรผันตามระดับโซเดียมในน้ำเลือดด้วย หน้าที่สำคัญของคลอไรด์ ได้แก่

1. รักษาความดันออสโมติค (osmotic pressure) ของ ECF
2. รักษาสมดุลของไฮโดรเจนไอออน
3. เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของระบบประสาท (เกี่ยวกับการเกิด inhibitory postsynaptic potential ของการส่งคลื่นประสาทระหว่างเซลล์ประสาท)

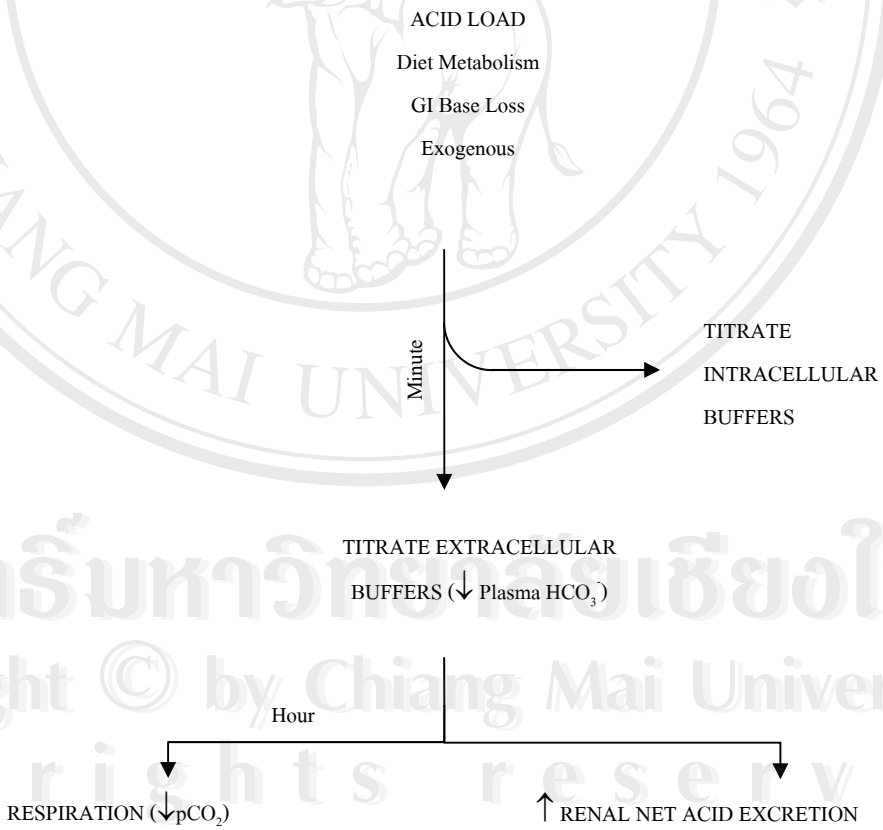
ความเข้มข้นของอิเล็คโทรไลต์ ค่อนข้างจะคงที่อยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้เพราะเกิดจากการที่ร่างกายได้รับน้ำ และอิเล็คโทรไลต์ในอัตราเท่ากับที่ร่างกายต้องเสียออกไปนั่นเอง ทางที่ร่างกายได้รับน้ำและอิเล็คโทรไลต์ ได้แก่ ระบบทางเดินอาหาร หลอดเลือด กระบวนการเมทาบอลิซึมในร่างกาย เช่น กระบวนการเมทาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต และระบบทางเดินหายใจ ส่วนทางที่ร่างกายสูญเสียน้ำและอิเล็คโทรไลต์ ได้แก่ ระบบขับถ่ายปัสสาวะ ระบบทางเดินอาหาร เช่น การอาเจียน หรือท้องร่วง และระบบทางเดินหายใจ คือ ถ้าร่างกายมีอุณหภูมิสูง เช่น ในสภาพอากาศร้อน จะมีอัตราการหายใจสูงขึ้นจนเกิดการหอบทำให้ร่างกายเสียน้ำและอิเล็คโทรไลต์มากขึ้น ส่งผลให้ร่างกายขาดน้ำ และความเข้มข้นของเลือดสูงขึ้น (hypertonic dehydration) และสูญเสียทางการขับเหงื่อ ซึ่งการสูญเสียทางเหงื่อนั้น จะขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม เช่น ถ้าอุณหภูมิสูงแต่ความชื้นต่ำจะทำให้มีการสูญเสียน้ำและอิเล็คโทรไลต์ทางเหงื่อมาก (สัญญา, 2530)

2.15 ความสมดุลของกรด-ด่าง (Acid-base balance)

การทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกาย เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ เหล่านี้อาศัยกระบวนการควบคุมหลายอย่าง ตัวแปรสำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีและองค์ประกอบของเซลล์ คือ ความเป็นกรด-ด่าง หรือ pH การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ที่ต่างไปจากค่าปกติมากย่อมทำให้กระบวนการ และองค์ประกอบต่าง ๆ ของร่างกายเปลี่ยนแปลงไปได้ ด้วยเหตุนี้ ร่างกายจึงต้องมีกระบวนการที่พยายามรักษาให้ความเป็นกรด-ด่างของร่างกายมีค่าคงที่อยู่ในช่วงแคบ ๆ ช่วงหนึ่ง โดยปกติแล้วร่างกายจะได้รับกรดจากอาหารและกระบวนการเมทาบอลิซึมในร่างกาย ซึ่งกรดที่ได้รับจากอาหารส่วนใหญ่มาจากอาหารพวกโปรตีน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

คือ มีประมาณ 20-30 mEq ต่อวัน กรดที่ได้จากกระบวนการเมทาบอลิซึม คือ CO_2 จัดเป็นกรดระเหยได้ (volatile acid) ที่ร่างกายสร้างขึ้นในแต่ละวันและถูกขับออกทางระบบหายใจได้อย่างเพียงพอ ส่วนกรดระเหยไม่ได้ เช่น NH_4^+, HPO_3^{2-} หรือ กรดอินทรีย์ เป็นต้น กรดที่ระเหยไม่ได้เหล่านี้ส่วนใหญ่ถูกขับออกจากร่างกายทางระบบขับถ่ายปัสสาวะ ด้วยเหตุนี้แม้ว่าในวันหนึ่ง ๆ ร่างกายจะได้รับกรดแต่ค่าความเป็นกรด-ด่างก็ไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เพราะมีการขับออกนอกร่างกายในปริมาณที่เท่ากับได้รับนั่นเอง อย่างไรก็ตามภายในร่างกายยังมีกระบวนการทางเคมีที่ช่วยปรับไม่ให้ pH ของร่างกายเปลี่ยนแปลงมากนักเมื่อได้รับกรด ก่อนที่ระบบหายใจและระบบขับถ่ายปัสสาวะจะทำการขับกรดส่วนเกินออกจากร่างกาย กระบวนการต่าง ๆ ที่ช่วยรักษาความสมดุลของกรด-ด่างในร่างกายมีความสามารถ ความรวดเร็ว และลักษณะการทำงานที่แตกต่างกัน (นีโลบล, 2542; สัญญา, 2535) ภาพ 3 สรุปการตอบสนองของกระบวนการต่าง ๆ ที่พยายามรักษาความสมดุลของกรด-ด่าง เมื่อร่างกายได้รับกรดเข้ามา



ภาพ 3 การตอบสนองต่อกระบวนการบัฟเฟอร์เมื่อร่างกายได้รับกรด

ที่มา **:** Brenner *et al*. (1987)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.16 การเปลี่ยนแปลงความสมดุลของกรด-ด่าง

การเปลี่ยนแปลงความสมดุลของกรด-ด่าง แบ่งได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

2.16.1 Acidosis คือ ภาวะที่มีกรดเกิดมากขึ้นหรือ pH มีค่าลดลงไปจากปกติ และถ้ามีผลทำให้ pH ของเลือดลดต่ำกว่าปกติ (ต่ำกว่า 7.35) เรียกว่า acidemia สามารถแบ่งแยกภาวะ acidosis ได้ 2 ชนิด คือ

1) Metabolic acidosis หมายถึง ภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของเมทาบอลิซึมและทำให้เกิดการคั่งของ H^+
2) Respiratory acidosis หมายถึงภาวะที่ระบบการหายใจผิดปกติ และทำให้เกิดการคั่งของ H_2CO_3

2.16.2 Alkalosis คือภาวะที่มีการสูญเสียกรดจำนวนมากออกไปจากร่างกายหรือได้รับด่างมากเกิน และถ้ามีผลทำให้ pH ของเลือดสูงกว่าปกติ (มากกว่า 7.45) เรียกว่า ภาวะ alkalemia สามารถแบ่งภาวะ alkalosis ได้ 2 ชนิด คือ

1) Metabolic alkalosis หมายถึง ภาวะที่มีการเปลี่ยนแปลงของเมทาบอลิซึมและทำให้ H^+ ในร่างกายลดต่ำกว่าปกติ
2) Respiratory alkalosis หมายถึง ภาวะที่ระบบการหายใจผิดปกติ และมีการขับ H_2CO_3 ในรูปของ CO_2 มากเกินไป (DuBose, 2002)

2.17 กลไกในการควบคุมความสมดุลของกรด-ด่างในร่างกาย

2.17.1 การบัฟเฟอร์ทางเคมี (Chemical buffer)

เป็นการทำงานของกรดอ่อนหรือด่างอ่อน ซึ่งสามารถลดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างในร่างกายในภาวะที่ได้รับกรดหรือด่างได้ จัดเป็นกลไกอันดับแรกที่ร่างกายใช้สำหรับควบคุม pH ได้อย่างรวดเร็ว จากนั้นจึงกำจัด H^+ ส่วนเกินออกไปทางการหายใจ หรือปัสสาวะในเวลาต่อมา ระบบบัฟเฟอร์ที่สำคัญของร่างกาย 4 ระบบแรก คือ (Drage and Wilkinson, 2001; Schwartz, 1977)

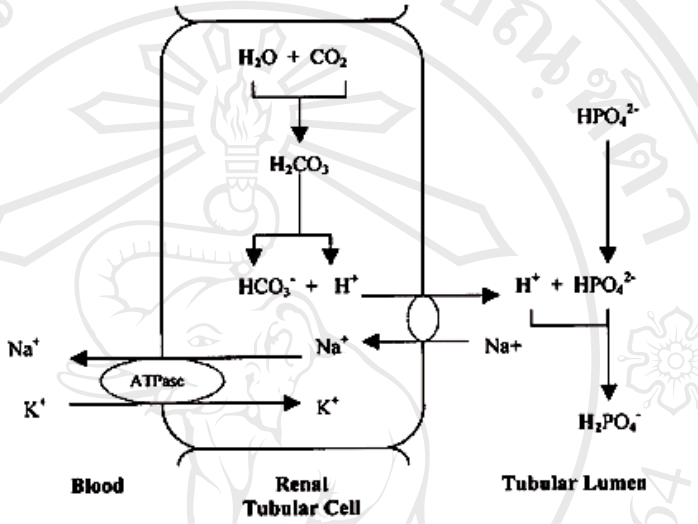
Bicarbonate buffer system (HCO_3^-/H_2CO_3) เป็นระบบบัฟเฟอร์ที่สำคัญในของเหลวนอกเซลล์ (extracellular fluid; ECF)

Phosphate buffer system ($HPO_4^{2-}/H_2PO_4^-$) เป็นระบบบัฟเฟอร์ที่สำคัญในเซลล์ โดยเฉพาะในเม็ดเลือดแดงและทางเดินปัสสาวะ (ภาพ 4)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

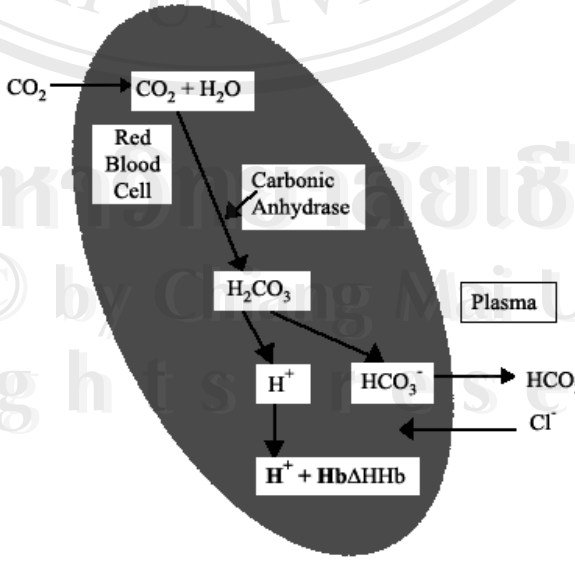
Protein buffer system (Proteins$^-$/H.Proteins) ส่วนใหญ่เป็นระบบบัฟเฟอร์ในเซลล์และในพลาสมา

Haemoglobin buffer system (Hb$^-$/HHb) เป็นบัฟเฟอร์ที่สำคัญในเม็ดเลือดแดง (ภาพ 5)



ภาพ 4 Phosphate buffer system

ที่มา : Drage and Wilkinson (2001)



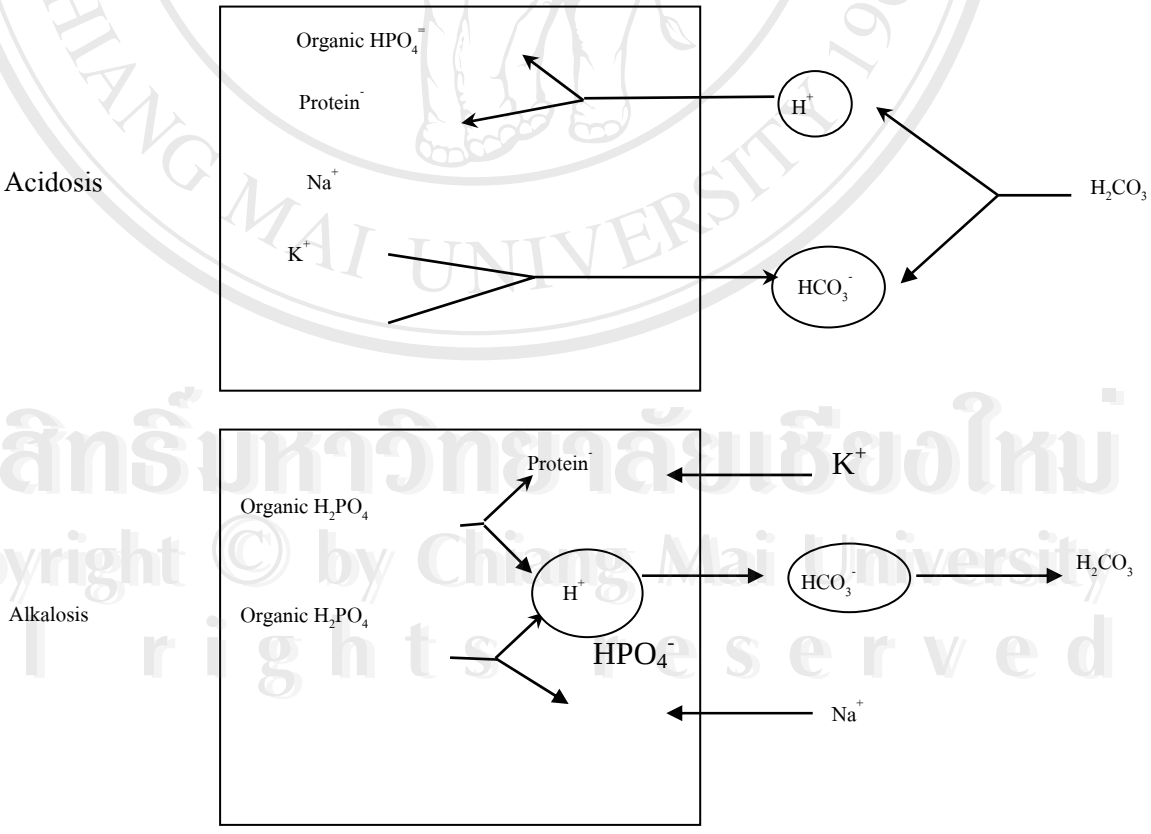
ภาพ 5 Haemoglobin buffer system

ที่มา : Drage and Wilkinson (2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.17.2 การบัฟเฟอร์โดยเนื้อเยื่อ (Tissue buffer)

การบัฟเฟอร์โดยเนื้อเยื่อ (ภาพ 6) จัดเป็นการบัฟเฟอร์ที่มีประสิทธิภาพมากเพราะเซลล์ทั่วไปมีโปรตีนซึ่งสามารถจับกับ H^+ ได้มาก การทำงานเกี่ยวข้องกับการขนส่ง K^+ และ Na^+ ผลของการบัฟเฟอร์ระบบนี้จะทำให้ระดับโพแทสเซียมในพลาสมาเปลี่ยนแปลงไป เช่น ถ้าร่างกายได้รับกรด การนำกรดเข้าเซลล์จะทำให้มีการขับโพแทสเซียมออกนอกเซลล์มากยิ่งขึ้น และเกิดภาวะเลือดมีโพแทสเซียมเกิน (hyperkalemia) แต่ถ้าร่างกายเสียกรดหรือมีภาวะเป็นด่าง จะเกิดภาวะเลือดมีโพแทสเซียมน้อยเกินไป (hypokalemia) เพราะมีการนำ H^+ จากภายในเซลล์ (ซึ่งอาจมาจาก CO_2 กรดอนินทรีย์ และกรดอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น lactic acid และ citric acid) ออกนอกเซลล์แลกกับการนำโพแทสเซียมเข้าเซลล์ สำหรับการแลกเปลี่ยนระหว่าง H^+ และ Na^+ นั้นสามารถเกิดขึ้นได้ในทำนองเดียวกันกับโพแทสเซียม การชดเชย (compensation) ในภาวะร่างกายเป็นกรดด้วยวิธีนี้จะดีกว่าการทำงานในกรณีที่ร่างกายเป็นด่าง อาจเป็นเพราะการสร้างกรดมีข้อจำกัดมากกว่าการที่เซลล์จะจับกับ H^+ ไว้ นอกจากนี้เซลล์ยังมีกระบวนการขนส่ง H^+ โดยใช้พลังงานอีกด้วย (H^+ pump) (นีโลบล, 2542; สัญญา, 2535)



ภาพ 6 การแลกเปลี่ยนของ cation และ anion เมื่อเกิดภาวะ Acidosis และ Alkalosis
ที่มา : นีโลบล (2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การทำงานของระบบบัฟเฟอร์นี้ค่อนข้างเร็วแต่ยังช้ากว่าการบัฟเฟอร์ทางเคมี และแม้จะมีประสิทธิภาพมากแต่ก็ไม่ได้เป็นการแก้ปัญหาความผิดปกติของสมดุลกรด-ด่างโดยตรง เป็นเพียงการทำงานเพื่อไม่ให้ pH เปลี่ยนแปลงไปจากปกติมากเท่านั้น ปริมาณกรดที่เพิ่มหรือขาดไม่ได้รับการชดเชยโดยสมบูรณ์ เช่น ได้รับกรดมากก็เก็บไว้มากโดยไม่ได้ขับออกนอกร่างกาย แต่ช่วยให้ความเข้มข้นของกรดในเลือดไม่สูงมากนัก การทำงานที่สมบูรณ์ต้องอาศัยระบบหายใจและระบบขับถ่ายปัสสาวะ ด้วยเหตุนี้การบัฟเฟอร์ทางเคมีจึงเป็นเพียงกระบวนการภายในร่างกายที่พยายามรักษาดุลกรด-ด่างไม่ให้เปลี่ยนแปลงมากเพื่อรอให้ระบบการหายใจและการขับถ่ายปัสสาวะทำงานต่อไป

ในภาวะที่เป็นกรดเรื้อรัง (Chronic acidosis) เซลล์กระดูกจะมีบทบาทในการช่วยลดความเป็นกรดได้มาก แคลเซียมฟอสเฟตจะสลายออกมาใช้แทน Na^+ หรือ K^+ ดังสมการ (3) ถ้าเกิดภาวะนี้นาน ๆ จะทำให้กระดูกบางและหักง่าย (นีโลบล, 2542)

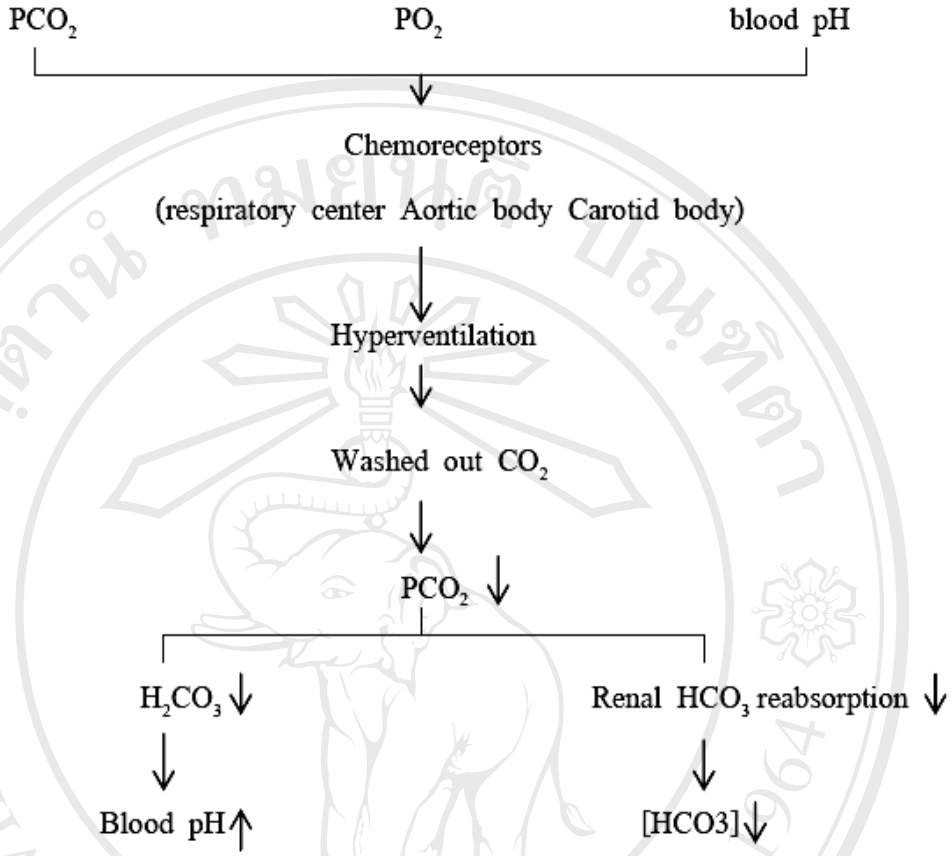
$$Ca_3(PO_4)_2 + 4HA \longrightarrow 3Ca_2^{++} + 2H_2PO_4^- + 4A^- \qquad (3)$$

2.17.3 **การทำงานของระบบหายใจ** (Respiratory mechanism)

ระบบหายใจมีความสำคัญในการรักษาระดับ pH ของร่างกาย โดยการควบคุมปริมาณของ HCO_3^- ซึ่งทำหน้าที่โดยปอดและทางเดินหายใจ โดย CO_2 จากหลอดเลือดฝอยที่มาที่ปอดจะซึมผ่านเข้ามาใน alveoli ของปอดและเคลื่อนผ่านทางหลอดลมฝอย (bronchiole) ออกมาทางอากาศที่หายใจออก ขณะเดียวกันกับที่ O_2 ในอากาศจะแลกเปลี่ยนกลับเข้าในร่างกาย

โดยปกติปอด และทางเดินหายใจจะถูกควบคุมโดย chemoreceptors ที่อยู่ในบริเวณ carotid body และ ศูนย์ควบคุมการหายใจ (Respiratory centre; RC) ใน medulla ซึ่งการควบคุมทางการหายใจนี้เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว โดยมีการตอบสนองภายในเวลาเป็นนาทีจนถึงชั่วโมง เช่น ในกรณีที่เกิดภาวะกรดคั่งในร่างกายทำให้ระดับ pH ของเลือดลดต่ำลง กระตุ้นให้มีการหายใจหอบแรงและเร็วจนขับ CO_2 ออกไปอย่างรวดเร็วเป็นผลให้ H_2CO_3 ในร่างกายลดลงและทำให้ pH ของเลือดเพิ่มขึ้นได้ ขณะเดียวกัน pCO_2 ที่ลดลง ทำให้ pH เปลี่ยนแปลงไปไม่มาก ดังแสดงในภาพ 7 การควบคุมทางการหายใจเป็นกลไกช่วยแก้ไขสมดุลของกรด-ด่างที่สำคัญและรวดเร็ว ขณะเดียวกันถ้ามีความผิดปกติก็จะมีอันตรายถึงแก่ชีวิตอย่างรวดเร็วด้วยเช่นกัน (นีโลบล, 2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 7 แสดงกลไกการหายใจที่ช่วยควบคุม pH ให้คงที่

ที่มา : นีโลบล (2542)

2.17.4 การทำงานของไต (Renal mechanism)

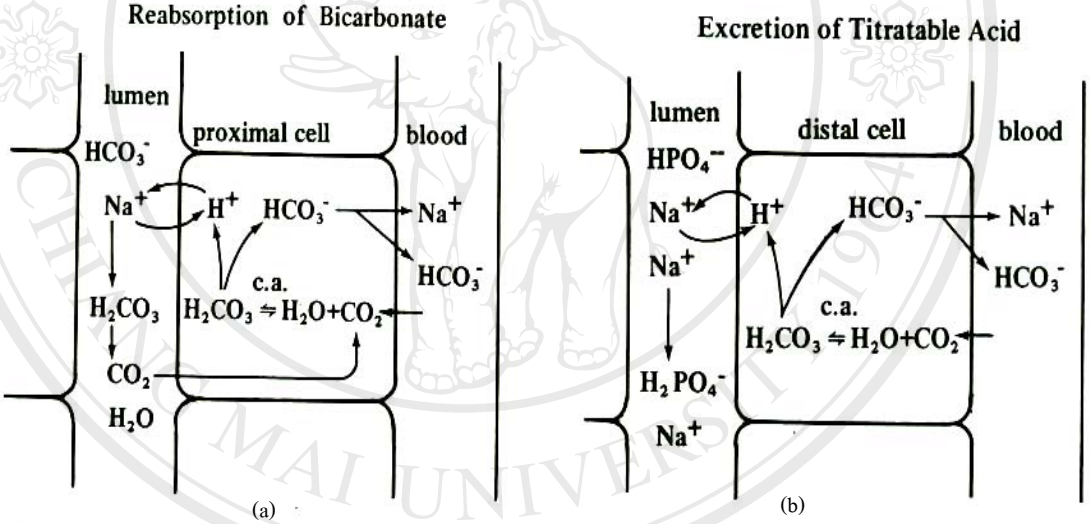
กลไกการทำงานของไตเป็นกลไกที่สำคัญที่สุด โดยสามารถลดอันตรายจากภาวะกรดคั่งจากเมทาบอลิซึมได้ดีที่สุดและชดเชยกลไกอื่น ๆ ได้ทั้งหมด แต่ใช้เวลานานกว่า คือเป็นชั่วโมงไปจนถึงหลายวัน โดยทั่วไปเริ่มจาก 2-3 ชั่วโมง ไปจนถึง 2-4 วัน จึงจะมีการควบคุมได้เต็มที่ ทั้งนี้การควบคุม pH ของร่างกายทางไตทำได้โดยการควบคุม

1) การดูดกลับ HCO_3^- จากน้ำที่กรองที่ผ่านมาในทูบูล (tubule)
2) การขับ H^+ ออกทางปัสสาวะ โดยแลกกับการดูดกลับ HCO_3^- และ Na^+ (อุดม, 2526)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.17.4.1 การดูดกลับของทุบูลตอนต้น

ทุบูลตอนต้นจะดูดกลับ HCO_3^- (equivalent HCO_3^-) เข้าสู่เลือดโดยมี carbonic anhydrase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเซลล์เพื่อให้ CO_2 และน้ำ รวมตัวกันเป็น H_2CO_3 เพื่อเปลี่ยนเป็น H^+ และ HCO_3^- การดูดกลับของ equivalent HCO_3^- จะเกิดขึ้นพร้อมกับการดูดกลับ Na^+ โดยอาศัย Na^+-K^+ ATPase พา K^+ เข้าเซลล์เพื่อแลกกับ Na^+ และขณะเดียวกัน จะทำการขับ H^+ ออกทาง brush border ของทุบูลพร้อม ๆ กับการดูดกลับ Na^+ เป็น Na^+-H^+ antiport ซึ่ง H^+ ที่ถูกขับออกมานี้จะรวมตัวกับ HCO_3^- ที่มีอยู่เป็น H_2CO_3 จากนั้นจะถูกเปลี่ยนเป็นน้ำและ CO_2 โดยการเร่งปฏิกิริยาของ carbonic anhydrase CO_2 ที่เกิดขึ้นในทุบูลจะซึมผ่านเข้าเซลล์ของทุบูล เพื่อขับออกทางปอดหรือถูกเซลล์เมทาบอไลส์ต่อไป (สัญญา, 2535) (ภาพ 8 a)



ภาพ 8 การดูดกลับ Na^+ และ HCO_3^- ที่ทุบูลตอนต้นเพื่อแลกกับการขับ H^+ (a) และการขับ Titrate acid (TA) ในทุบูลตอนปลาย (b)
ที่มา : สัญญา, 2535

2.17.4.2 การดูดกลับของทุบูลตอนปลาย สามารถสรุปการทำหน้าที่ได้ดังนี้

ทุบูลตอนปลายจะทำหน้าที่ดูดกลับ HCO_3^- ที่เซลล์ของทุบูลผลิตขึ้นใหม่ (regenerated HCO_3^-) เพื่อชดเชยกับการเสีย HCO_3^- ภายในร่างกายจากการบัฟเฟอร์กรดที่เกิดขึ้น การดูดกลับของ regenerated HCO_3^- จะเกิดพร้อมกับการดูดกลับ Na^+ แลกกับการขับ H^+ หรือ K^+ ซึ่ง H^+ จะถูกขับออกในรูปของ titratable acidity (TA) ซึ่งได้แก่ $H_2PO_4^-$ เป็นส่วนใหญ่ (ภาพ 8 b) และการขับ NH_4^+ ออกทางปัสสาวะ (สัญญา, 2535)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.17.4.3 การขับ H^+ ทางไต

ไตจะขับ H^+ ออกประมาณวันละ 50-100 มิลลิโมล ซึ่งการขับ H^+ ออกในทุบูลตอนต้นจะแลกเปลี่ยนกับการดูดกลับ Na^+ เพื่อให้ประจุเป็นกลางเท่าเดิม (electrical neutrality) ส่วนในทุบูลตอนปลายการขับ H^+ จะเป็นชนิด active ATP-dependent proton pump โดย H^+ ที่ขับออกมานอกเซลล์จะรวมตัวกับ HPO_4^{2-} ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ที่อยู่ในน้ำกรองได้เป็น $H_2PO_4^-$ ซึ่งเป็นค่าส่วนใหญ่ของ titratable acidity ที่ถูกขับออกทางปัสสาวะ H^+ อีกส่วนหนึ่งจะขับออกมาในทุบูลตอนปลายโดยรวมกับ NH_3 ที่ไตสังเคราะห์ขึ้น ได้เป็น NH_4^+ ซึ่งถูกขับออกมาในปัสสาวะเช่นกัน

ในขณะที่มีการขับ H^+ ทั้งในทุบูลตอนต้นและตอนปลาย ก็จะมีการดูดกลับของ Na^+ และ HCO_3^- ไปพร้อม ๆ กัน การดูดกลับของ Na^+ ในทุบูลตอนต้นเป็นการแลกเปลี่ยนกับ H^+ แต่ในทุบูล ตอนปลายเป็นการขับ H^+ ออกโดยอาศัยพลังงาน ดังนั้นในบางสภาวะที่แม้ไม่มีการดูดกลับของ Na^+ ก็ยังพบว่ามีการขับ H^+ ออกมาได้ (สัญญา, 2535)

2.18 ความสัมพันธ์ของอิเล็คโทรไลต์ต่อการดูดซึมกรดอะมิโน

การดูดซึมกรดอะมิโนในบริเวณทางเดินอาหารนั้น ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น และส่วนกลาง ส่วนบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลายจะมีการดูดซึมได้น้อย โดยปกติแล้วอัตราการดูดซึมกรดอะมิโนในบริเวณลำไส้เล็กจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าอัตราการย่อยของโปรตีนในโพรงลำไส้เล็ก ดังนั้นจึงไม่พบกรดอะมิโนในบริเวณโพรงทางเดินอาหาร การย่อยโปรตีนส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณลำไส้เล็กส่วนบน (proximal intestine) ดังนั้นกรดอะมิโนส่วนใหญ่จึงถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็กส่วนต้นและกลาง จะพบว่ามีโปรตีนประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนทั้งหมดในโพรงทางเดินอาหารเคลื่อนที่ผ่านลำไส้เล็กเข้าสู่ลำไส้ใหญ่โดยไม่เกิดการย่อยและดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย และมีบางส่วนของโปรตีนจะถูกย่อยโดย เอ็นไซม์จากแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ และถูกขับออกนอกร่างกายซึ่งโปรตีนที่ถูกขับออกนอกร่างกายนี้อาจจะเป็นโปรตีนจากแบคทีเรีย และเซลล์เยื่อบุลำไส้ใหญ่

สำหรับการเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ ผ่านเซลล์ดูดซึมของลำไส้เล็กพบว่ากรดอะมิโนที่มีโครงสร้างในรูปแบบแอล (L-isomer) จะดูดซึมได้เร็วกว่าในรูปแบบดี (D-isomer) และกรดอะมิโนในรูปแบบดี จะมีการดูดซึมแบบแพร่กระจาย ส่วนกรดอะมิโนในรูปแบบแอลจะมีการดูดซึมแบบแอคทีพ ดังนั้นการดูดซึมของกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ จะมีการเคลื่อนที่ผ่านเซลล์ดูดซึมของลำไส้เล็กดังนี้ (ชัยวัฒน์, 2541)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1. การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนผ่านผนังบรัสบอร์เดอร์ (brush border) ของเซลล์ดูดซึม ผนังบรัสบอร์เดอร์ของเซลล์ดูดซึมในลำไส้เล็กจะมีตัวพาสำหรับกรดอะมิโนอยู่หลายชนิดเนื่องจากกรดอะมิโนแต่ละชนิดจะมีขนาด ความสามารถในการละลายตัวในไขมัน และจำนวนประจุไม่เท่ากัน ดังนั้นจำนวนของตัวพาที่แน่นอนของกรดอะมิโนบนผนังบรัสบอร์เดอร์ของเซลล์ดูดซึมในบริเวณลำไส้เล็กจึงยังไม่ทราบแน่ชัด เนื่องจากเป็นการยากที่จะแยกออกจากกันได้เพราะการจับของกรดอะมิโนกับตัวพาไม่จำเพาะ (overlapping substrate specificities) แต่ในปัจจุบัน พบว่าสามารถจำแนกระบบตัวพาบนผนังบรัสบอร์เดอร์ของเซลล์ดูดซึมได้เป็น 7 ระบบ ดังนี้

1.1 ระบบตัวพา B (system B) หรือ ระบบตัวพา NBB (neutral brush border system) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง (neutral amino acids) เท่านั้น เช่น glycine และ alanine เป็นต้น ระบบตัวพาชนิดนี้จะต้องอาศัยโซเดียม (Na^+) ดังนั้นการดูดซึมของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะเป็นแบบแอคทีพทุติยภูมิ (secondary active transport) คล้ายกับการดูดซึมกลูโคส การดูดซึมของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะมีอัตราการดูดซึมค่อนข้างเร็ว และจะมีการแก่งแย่งกันจับกับตัวพาในกลุ่มของกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง

1.2 ระบบตัวพา $B^{0,+}$ (system $B^{0,+}$) การทำงานต่าง ๆ ของตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จะคล้ายกับระบบ B แต่ตัวพาระบบ $B^{0,+}$ นอกจากจะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (basic amino acids) และ cysteine ได้ ระบบตัวพาชนิดนี้จะต้องอาศัย Na^+ เช่นเดียวกับระบบ B

1.3 ระบบตัวพา $b^{0,+}$ (system $b^{0,+}$) ตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลางเช่นเดียวกับระบบ B กรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่าง และ cysteine เหมือนกับในระบบ $B^{0,+}$ แต่พบว่าระบบตัวพา $b^{0,+}$ ไม่ต้องอาศัย Na^+

1.4 ระบบตัวพา y^+ (system y^+) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่างเช่น lysine และarginine เป็นต้น ระบบตัวพาชนิดนี้ไม่ต้องอาศัย Na^+ อัตราการดูดซึมของกรดอะมิโนในกลุ่มที่มีฤทธิ์เป็นด่างนี้จะช้ากว่าการดูดซึมของกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง และมีการดูดซึมแบบแอคทีฟ ประมาณ 10-20 เท่า เนื่องจากมีการดูดซึมแบบแพร่กระจายโดยอาศัยตัวพา (facilitated transport)

1.5 ระบบตัวพาอิมิโน (imino system) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอิมิโน (imino acids) เช่น praline และ hydroxyproline เป็นต้น ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัยทั้ง Na^+ และ Cl^- โดยพบว่าตัวพาระบบนี้จะจับกับ Na^+ Cl^- และ proline ในอัตราส่วน 2 : 1 : 1 การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะอาศัยแรงผลักอันเนื่องมาจากความต่างทางความเข้มข้นของ Na^+ และ Cl^- รวมทั้งความต่างทางกระแสไฟฟ้าระหว่างโพรงลำไส้เล็กและภายในเซลล์ดูดซึมโซเดียมเมื่อจับกับตัวพาในระบบนี้จะทำให้ความสามารถในการจับ proline ของตัวพาเพิ่มมากขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1.6 ระบบตัวพาเบต้า (ß -system) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนชนิดเบต้า (ß-amino acids) ซึ่ง taurine จะเป็นกรดอะมิโนในกลุ่มที่มีความสามารถในการจับกับตัวพาชนิดนี้ได้สูงที่สุด ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัยทั้ง Na^+ และ Cl^- โดยตัวพาของระบบนี้จะจับกับ Na^+, Cl^- และ taurine ในอัตราส่วน 2 : 1 : 1 การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะอาศัยแรงผลักจากความต่างทางความเข้มข้นของ Na^+ และ Cl^- รวมทั้งความต่างทางกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่าการทำงานของระบบนี้จะถูกยับยั้งได้โดย Ca^{2+}

1.7 ระบบตัวพา X^-_{AG} (system X^-_{AG}) ตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกรด (acidic amino acids) เช่น aspartate และ glutamate เป็นต้น ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัย Na^+ และ K^+ โดยพบว่าตัวพาระบบนี้จะจับกับ Na^+, K^+ และ กรดอะมิโนในอัตราส่วน 3 : 1 : 1 การเคลื่อนที่ของตัวพานี้สามารถยับยั้งได้ด้วย H^+ เนื่องจากสามารถไปแย่งที่จับกับ Na^+ ที่ตัวพา

2. การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนผ่านผนังด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์ดูดซึม กรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ ที่ถูกดูดซึมเข้ามาในเซลล์รวมทั้งที่เกิดจากการย่อยเพปไทด์ต่าง ๆ ภายในเซลล์จะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ดูดซึมผ่านผนังทางด้านล่างและด้านข้าง (basolateral membrane) โดยอาศัยตัวพาของกรดอะมิโนหลายชนิด ซึ่งปัจจุบันสามารถจำแนกระบบตัวพา

2.1 ระบบตัวพา A (system A) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง และกรดอิมิโน ระบบตัวพานี้ต้องอาศัย Na^+

2.2 ระบบตัวพา ASC (system ASC) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง โดยเฉพาะกับกรดอะมิโนที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก และมีจำนวนคาร์บอน 3-4 อะตอม เช่น alanine, serine และ cysteine เป็นต้น ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัย Na^+

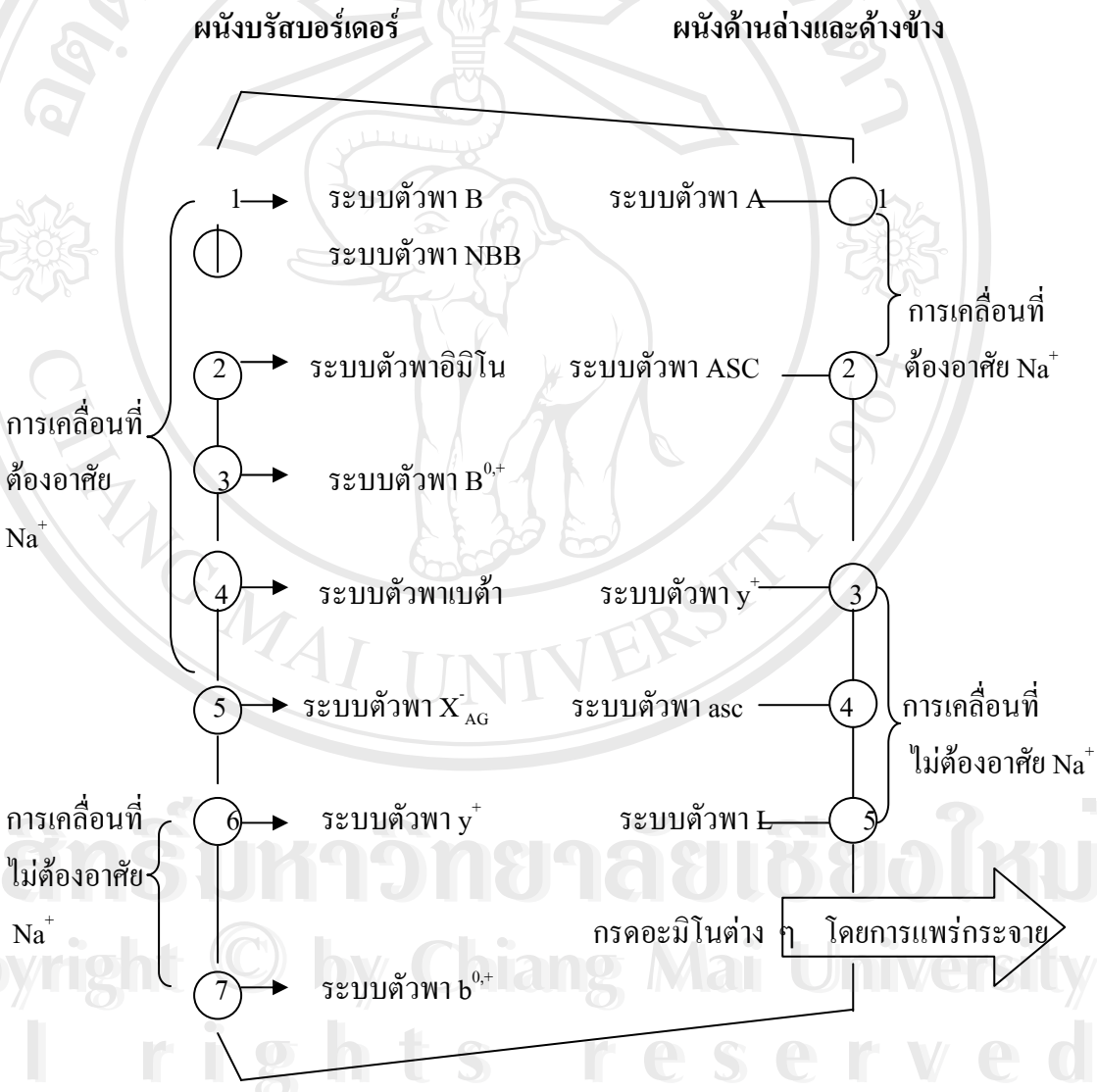
เนื่องจากความเข้มข้นของ Na^+ ในกระแสโลหิตจะสูงกว่าความเข้มข้นของ Na^+ ภายในเซลล์ดูดซึมจึงเป็นไปได้ว่าการขนส่งกรดอะมิโนของระบบ A และระบบ ASC จะมีหน้าที่ส่วนใหญ่ในการเคลื่อนกรดอะมิโนจากกระแสโลหิตเข้าเซลล์ดูดซึมมากกว่าที่จะเคลื่อนกรดอะมิโนจากภายในเซลล์ดูดซึมเข้ากระแสโลหิต ดังนั้นการเคลื่อนที่กรดอะมิโนผ่านผนังเซลล์ทางด้านล่างและด้านข้างของเซลล์ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยระบบ A และระบบ ASC จะเกิดขึ้นได้น้อยมาก

2.3 ระบบตัวพา L (system L) ตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง ระบบตัวพาชนิดที่ไม่ต้องอาศัย Na^+ ส่วนใหญ่การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลางจะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ดูดซึมเข้าสู่กระแสโลหิตโดยใช้ตัวพาในระบบ L ซึ่งจะมีลักษณะเป็นการแพร่กระจายแบบใช้ตัวพา (facilitated diffusion)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 ระบบตัวพา asc (system asc) การทำงานของตัวพาระบบนี้เหมือนกับในระบบ ASC ข้างต้นแต่ระบบตัวพาชนิดนี้ไม่ต้องอาศัย Na^+ โดยจะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง และมีจำนวนคาร์บอน 3-4 อะตอม

2.5 ระบบตัวพา y^+ (system y^+) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ระบบตัวพาชนิดนี้ไม่ต้องอาศัย Na^+ (ชัยวัฒน์, 2541)



ภาพ 9 ระบบตัวพา (transport system) บนผนังทางด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์ดูดซึมในบริเวณลำไส้เล็ก

ที่มา : ชัยวัฒน์, 2541

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.19 การเสริมสารปรับสมดุลสารละลายไฟฟ้าในอาหารสุกร

โดยปกติในอาหารสัตว์จะมีประจุบวกมากกว่าประจุลบ ดังนั้นการคงความสมดุลทางประจุให้คงความเป็นกลางโดยใช้ dietary undetermined anion (dUA) เช่น HCO_3^- ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ dUA ดังที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 4 (Chan, 1974) หรือจะใช้ค่า dietary electrolyte balance (dEB) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 5 (Patience, 1990)

$$dUA = (Na^+ + K^+ + Ca^{++} + Mg^{++}) - (Cl^- + P^{2-} + S_{inorganic}) \quad (4)$$

$$dEB = Na^+ + K^+ - Cl^- \quad (5)$$

โดยส่วนมากมักนิยมใช้ค่า dEB เพื่อทำการคงความสมดุลทางประจุมากกว่าการใช้ค่า dUA เนื่องจากง่าย และสะดวกในการวิเคราะห์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าในการคำนวณหาค่า dEB จะใช้เพียงค่าของ Na^+, K^+ และ Cl^- และผลที่ได้ ก็ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (Patience, 1990) ในอาหารสัตว์ทั่วไปที่ประกอบด้วยข้าวโพดและกากถั่วเหลืองจะมีค่า dEB ประมาณ 175 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ถ้าหากว่าค่า dEB ต่ำกว่า 175 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม จะทำให้ระดับของ pH และ HCO_3^- ในเลือดลดลงทำให้เกิดสภาวะ metabolic acidosis (intracellular K^+ ลดลง) การลดลงของ intracellular K^+ จะถูกชดเชยโดยความเข้มข้นของ Na^+ และ basic amino acid ในเซลล์ แต่หลักฐานที่แสดงเกี่ยวกับผลของกระบวนการเมทาบอลิซึมอาหารที่มี dEB ต่อการดูดซึมกรดอะมิโนในสัตว์ยังมีน้อยมาก ในทางกลับกันถ้าค่า dEB สูงกว่า 175 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม จะทำให้ ระดับของ pH และ HCO_3^- ในเลือดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดสภาวะ metabolic alkalosis (intracellular K^+ เพิ่มขึ้น) ดังนั้นระดับ dEB ในอาหารน่าจะมีผลต่อ กระบวนการดูดซึมและเมทาบอลิซึมกรด อะมิโน ซึ่ง interaction ของประจุบวกและกรดอะมิโนอาจเกี่ยวข้องกับสมดุลของความเป็นกรด-ด่างในร่างกาย (Austic and Calvert, 1981)

อาหารที่ได้รับเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความเป็นกรด-ด่างในร่างกาย ภายหลังจากเกิดกระบวนการดูดซึมและเมทาบอลิซึม (Patience, 1987; West, 1987) โดยเฉพาะการเมทาบอลิซึมอิออนของสารอินทรีย์ ซึ่งไม่สามารถวัดได้จากความแตกต่างระหว่างแร่ธาตุที่มีประจุลบ และประจุบวกในอาหาร ซึ่ง Haydon *et al*. (1990) ที่ทำการศึกษาในสุกรรุ่น (22 - 50 กิโลกรัม) ได้รายงานว่า ในสุกรรุ่นที่ได้รับอาหารที่มี dEB เพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 100, 175, 250, 325 และ 400 mEq ต่อกิโลกรัม มีผลทำให้ปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเพิ่มขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

(P<0.03 และ P<0.01 ตามลำดับ) และไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้อาหาร แต่สุกรที่ได้รับอาหารที่มี dEB เพิ่มขึ้น จาก 250 เป็น 325 และ 400 mEq ต่อกิโลกรัม มีแนวโน้มของอัตราการเจริญเติบโตที่ลงลดลง ซึ่งขัดแย้งกับ Patience *et al.* (1987) ที่รายงานว่า สุกรที่ได้รับอาหารที่มี dEB ระดับต่าง ๆ ตั้งแต่ 0-341 mEq ต่อกิโลกรัม ไม่มีผลช่วยปรับปรุงปริมาณอาหารที่กินหรืออัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันในสุกรเล็ก แต่ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันของสุกรมีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับอาหารที่มี dEB -85 mEq ต่อกิโลกรัม นอกจากนี้ยังรายงานว่า ระดับ dEB ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่า pH ในเลือด และ base excess มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของ HCO_3^- ลดลงต่ำลง ในสุกรที่ได้รับอาหารที่มี dEB ต่ำกว่า 175 mEq ต่อกิโลกรัม ค่า pH ในเลือด และความเข้มข้นของ HCO_3^- ลดลง เนื่องจากเกิด metabolic acidosis สอดคล้องกับ Haydon *et al.* (1990) ที่ทำการศึกษาผลของ dEB ต่อประสิทธิภาพการผลิตและสภาวะของเลือดในสุกรระยะรุ่นถึงขุนที่เลี้ยงในสภาวะที่อุณหภูมิสูง พบว่า สุกรมีปริมาณอาหารที่กินและอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น (P<0.03) เมื่อระดับของ dEB เพิ่มขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.70) ของค่าการใช้ประโยชน์ได้ของอาหาร ส่วนค่า pH ของเลือด ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด ปริมาณ HCO_3^- ความเข้มข้นของ Na^+ และ base excess มีการเพิ่มขึ้น (P<0.05) เมื่อระดับของ dEB ในอาหารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Haydon and West (1990) รายงานว่า ปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะจะเพิ่มขึ้น 11 เปอร์เซ็นต์เมื่อค่า dEB เพิ่มขึ้นจาก -50 เป็น 100 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม และพบว่า ปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะจะลดลง 13 และ 23 เปอร์เซ็นต์เมื่อค่า dEB เพิ่มขึ้นจาก 100 เป็น 250 และ 400 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ตามลำดับ

Patience *et al.* (1987) รายงานว่า สุกรที่ได้รับอาหารที่มี lysine เพียงพอ แต่ขาด tryptophan ซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่มักขาดเป็นอันดับที่สอง มีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวเพิ่มสูงขึ้น (P<0.001) เมื่อทำการเสริม $NaHCO_3$ เพื่อเพิ่มระดับของ dEB ในอาหารและมี แนวโน้มของอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวัน และการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่ดีขึ้นเมื่อสุกรที่ได้รับอาหารที่มี lysine ไม่เพียงพอ สอดคล้องกับรายงานของ Madubuike (1980) ที่ทำการเสริม sodium or potassium bicarbonate ในสุกรเล็กที่ได้รับอาหารที่ขาด lysine พบว่า ช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตได้ โดยรายงานเพิ่มเติมของ Leibhoz *et al.* (1966) แสดงให้เห็นว่าการเสริม potassium acetate 10-20 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารในสุกรหลังหย่านมที่ได้รับโปรตีนไม่เพียงพอได้ แต่ก็มีผู้รายงานว่าการเสริม alkaline salt ในอาหารที่มี lysine ไม่เพียงพอไม่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิต (Miller *et al*., 1981, 1984; Zimmerman, 1982; Froseth *et al.*, 1983)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ดังนั้น dEB ในอาหารจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อภาวะกรด-ด่างในร่างกายสัตว์ สำหรับปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อภาวะความเป็นกรด-ด่างของสัตว์ ได้แก่ อาหารที่ได้รับ สภาวะอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมที่สูง หรือในสภาวะความเจ็บป่วย เช่น ท้องเสีย หรืออาเจียน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลทำให้ความเป็นกรด-ด่างในร่างกายสุกรเสียสมดุลไป ส่งผลให้การทำหน้าที่ของเอ็นไซม์ในกระบวนการต่าง ๆ ของร่างกายผิดปกติ ดังนั้นจึงได้มีการให้ความสำคัญของสมดุลสารละลายไฟฟ้าในอาหารสุกรเพื่อรักษาภาวะสมดุลกรด–ด่าง และพบว่าภาวะสมดุลกรด–ด่าง มีผลต่อการเจริญเติบโต ความอยากอาหาร การตอบสนองต่อความเครียด เนื่องจากอุณหภูมิและเมทาบอลิซึมของกรดอะมิโนต่าง ๆ แร่ธาตุ รวมทั้งไวตามินด้วย (Patience *et al*., 1987)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved