

บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 โปรตีน และกรดอะมิโน

2.1.1 โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน 50-55 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 20-30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 15-18 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 6.6-8 เปอร์เซ็นต์ และ กำมะถัน 0-4 เปอร์เซ็นต์ ธาตุเหล่านี้จะรวมตัวเป็นหน่วยย่อยของโปรตีนคือ กรดอะมิโน (บุญล้อม, 2541)

โปรตีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของน้ำนม เนื้อ ผสม กีบ เล็บ ฮอร์โมน เอนไซม์ เลือด และอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด และเป็นสารที่มีระดับสูงสุดในเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ สัตว์จำเป็นต้องใช้โปรตีนในการสร้างเนื้อเยื่อ การเจริญเติบโต การสืบพันธุ์ และใช้ในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อต่าง ๆ (Pond *et al.*, 1995; Cunha, 1977) ภายในร่างกายสัตว์ชั้นสูงไม่สามารถสังเคราะห์โปรตีนได้เอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องได้รับจากอาหาร ถ้าในอาหารมีปริมาณโปรตีนไม่เพียงพอจะทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง หรือสูญเสียน้ำหนักตัวได้ ซึ่งสัตว์ที่อยู่ในระยะกำลังเจริญเติบโตจะมีความต้องการโปรตีนในระดับสูง แต่เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วความต้องการโปรตีนจะลดลง ยกเว้นในกรณีที่ร่างกายกำลังให้ผลผลิต เช่น การให้นม การตั้งท้อง ความต้องการโปรตีนจะเพิ่มสูงขึ้น เพราะน้ำนมและตัวอ่อนที่กำลังสร้างมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบหลัก และในระยะนี้ร่างกายสัตว์มีอัตราเมแทบอลิซึมที่สูงขึ้นด้วย (Pond *et al.*, 1995)

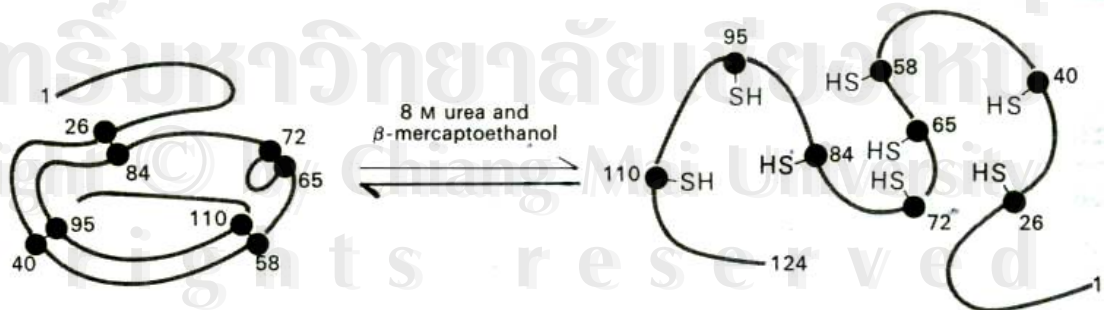
2.1.2 คุณสมบัติของโปรตีน (Properties of protein)

1. การละลาย โปรตีนทุกชนิดมีคุณสมบัติเป็นคอลลอยด์ (colloid) และการละลายได้ในน้ำมากน้อยต่างกัน โดยผันแปรตั้งแต่ละลายไม่ได้เลย เช่นเคราติน (keratin) จนถึงละลายได้ดี เช่น อัลบูมิน เป็นต้น โปรตีนที่ละลายได้สามารถตกตะกอนได้เมื่อเติมเกลือบางชนิดลงในสารละลายนั้น เช่น โซเดียมคลอไรด์ (sodium chloride) หรือแอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulphate) เป็นต้น การตกตะกอนนี้ไม่ทำให้คุณสมบัติของโปรตีนเสียไป เพราะเมื่อทำให้สารละลายเจือจางลง โปรตีนก็สามารถกลับมาละลายใหม่ได้อีก ในการวิเคราะห์ทางเคมีเพื่อแยกประเภทของโปรตีน นิยมใช้กรดทังสติก (tungstic) หรือกรด trichloro acetic (TCA) เป็นต้น (บุญล้อม, 2541)

2. การเป็นบัฟเฟอร์ เนื่องจากโปรตีนมีกลุ่มอะมิโน (amino group) และคาร์บอกซิล (carboxyl group) ที่เป็นอิสระอยู่ทั้งที่ปลายสายเปปไทด์และที่แตกแขนง ดังนั้นจึงมีลักษณะเป็น สวิตเตอร์ไอออน (zwitter ion) หรือแอมโฟเทอริก (amphoteric) คือมีทั้งขั้วบวกขั้วลบอยู่ในโมเลกุล มีลักษณะเป็นบัฟเฟอร์ (buffer) และมีไอโซอิเล็กตริก (isoelectric point) เช่นเดียวกับกรดอะมิโน (บุญล้อม, 2541)

3. การเสียสภาพของโปรตีน (denature) คือการที่พันธะในโครงสร้างทุติยภูมิ ตติยภูมิ และ/หรือจตุรภูมิ ซึ่งเป็นพันธะอย่างอ่อนถูกทำให้แยกแตกออก ทำให้โครงสร้างของโปรตีน เปลี่ยนไป เช่นคลายเกลียวออก (ภาพ 1) มีผลทำให้คุณสมบัติทางชีวภาพ เช่นการละลายได้ การตกตะกอน และการทำงานของโปรตีนเปลี่ยนแปลงไปด้วย แต่โครงสร้างปฐมภูมิคือการจับตัว กันของกรดอะมิโนด้วยพันธะเปปไทด์ยังคงอยู่ ปัจจัยที่ทำให้โปรตีนเสียสภาพได้แก่ ความร้อน กรด-ด่าง แอลกอฮอล์ ยูเรีย และเกลือของโลหะหนัก เป็นต้น การเสียสภาพนี้บางกรณีก็เป็นการเสีย สภาพอย่างถาวร แต่บางกรณีเมื่อนำปัจจัยที่ทำให้เสียสภาพออกไป ก็สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิมได้ (renaturation) ตัวอย่างของการเสียสภาพของโปรตีนที่เห็นกันโดยทั่วไป เช่น

- ไข่ขาวดิบ เนื้อกุ้ง ปู และปลา เมื่อโดนความร้อนจะเปลี่ยนสภาพเป็นขาวขุ่นไม่ละลาย น้ำ
- เอนไซม์ เมื่อถูกทำให้เสียสภาพจะสูญเสียคุณสมบัติในการย่อยไป
- นํ้านม เมื่อถูกทำให้เปรี้ยว (เป็นกรด) จะตกตะกอนจับตัวเป็นก้อน
- โปรตีน เมื่อทำปฏิกิริยากับแอนไอออน (anion) ขนาดใหญ่ เช่น กรดไตรคลอโรอะซีติก (trichloroacetic acid, TCA) หรือกรดเปอร์คลอโรอะซีติก (perchloroacetic acid, PCA) จะ ตกตะกอนได้ดี (บุญล้อม, 2541)



ภาพ 1 Ribonuclease ที่ถูกทำให้เสียสภาพ (denaturation) และกลับคืนสู่สภาพเดิม (renaturation) ที่มา : Stryer (1988)

4. คุณภาพของโปรตีน โดยทั่วไปพิจารณาจากปริมาณและสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acid pattern) ถ้าใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์ก็จัดว่าโปรตีนนั้นเป็นโปรตีนคุณภาพดี ทั้งนี้เพราะเมื่อโปรตีนดังกล่าวถูกย่อยและดูดซึมเข้าไปในร่างกาย สัตว์จะสามารถนำกรดอะมิโนไปใช้เพื่อการสร้างโปรตีนในร่างกายได้ แต่ถ้าโปรตีนนั้นมีปริมาณและสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นไม่เหมาะสมกับความต้องการของสัตว์ เช่น ขาดกรดอะมิโนตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัว สัตว์จะไม่สามารถนำกรดอะมิโนตัวอื่น ๆ ไปใช้สร้างโปรตีนได้ (บุญล้อม, 2541) โปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโน และมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมใช้ค่าสมมูลของไนโตรเจนมาประยุกต์ใช้วัดคุณภาพของโปรตีน โดยหลักการคือปริมาณไนโตรเจนที่สัตว์ได้รับ เท่ากับปริมาณไนโตรเจนที่สัตว์ขับออกมาทั้งในรูปของมูล และปัสสาวะรวมทั้งผลผลิตต่าง ๆ

- ในโตรเจนที่ได้รับมีปริมาณเท่ากับไนโตรเจนที่ขับออกมา สัตว์จะมีไนโตรเจนอยู่ในภาวะสมดุล (nitrogen equilibrium หรือ zero nitrogen balance)
- ในโตรเจนที่ได้รับมีปริมาณมากกว่าไนโตรเจนที่ขับออกมา สัตว์จะมีสมมูลไนโตรเจนเป็นบวก (positive nitrogen balance)
- ในโตรเจนที่ได้รับมีปริมาณน้อยกว่าไนโตรเจนที่ขับออก สัตว์จะมีสมมูลไนโตรเจนเป็นลบ (negative nitrogen balance) (McDonald *et al.*, 2002)

การประเมินโปรตีนโดยใช้สมมูลไนโตรเจนเป็นหลักมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี แต่วิธีที่เป็นที่รู้จัก และใช้กันแพร่หลาย คือ ค่าทางชีวภาพ (biological value; BV) ของโปรตีน เป็นการวัดปริมาณไนโตรเจนที่ร่างกายสามารถกักเก็บไว้ใช้ดำรงชีพ การเจริญเติบโต หรือเพื่อสร้างเนื้อเยื่อ และสารประกอบต่างๆ ในร่างกาย โดยเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์กับปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซึมโดยจะทำการวัดปริมาณของไนโตรเจนทั้งหมดที่กิน และปริมาณที่ขับออกมาในรูปปัสสาวะ และอุจจาระ เพื่อหาค่าทางชีวภาพ ได้จากสมการ (1) และ (2) (McDonald *et al.*, 2002)

$$BV = \frac{\text{ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกสะสมไว้ในร่างกาย}}{\text{ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซึม}} \quad (1)$$

$$= \frac{[N \text{ ที่กิน} - (N \text{ ในอุจจาระ} + N \text{ ในปัสสาวะ})]}{N \text{ ที่กิน} - N \text{ ในอุจจาระ}} \quad (2)$$

$$N \text{ ที่กิน} - N \text{ ในอุจจาระ}$$

เนื่องจากไนโตรเจนที่ขับออกมาในมูล และในปัสสาวะนั้น บางส่วนเป็นไนโตรเจนที่มาจากภายในร่างกายไม่ได้มาจากอาหาร เรียกว่า metabolic faecal nitrogen (MFN) หรือ endogenous faecal nitrogen ซึ่งเป็นส่วนของเยื่อทางเดินอาหาร เอนไซม์ ฮอร์โมน เป็นต้น เช่นเดียวกับในปัสสาวะก็มีส่วนของไนโตรเจนที่ไม่ได้มาจากอาหารโดยตรง แต่มาจากกระบวนการเมแทบอลิซึม เรียกว่า endogenous urinary nitrogen (EUN) (McDonald *et al.*, 2002)

การหาค่าเหล่านี้สามารถหาได้โดยการให้สัตว์ได้รับอาหารที่ไม่มีไนโตรเจน (N-free diet) แล้ววัดปริมาณไนโตรเจนที่ขับถ่ายออกมา ซึ่งไนโตรเจนเหล่านี้จะถูกขับออกนอกร่างกายอยู่แล้ว แม้ว่าสัตว์จะได้รับอาหารที่ไม่มีไนโตรเจน เพราะเป็นส่วนของไนโตรเจนที่ถูกเก็บไว้ภายในร่างกายก่อนหน้านี้ ถ้าเราไม่นำมาลบออกจากไนโตรเจนที่กินเข้าไปจะทำให้ได้ค่าทางชีวภาพที่ไม่ถูกต้องนัก เพราะจะทำให้ค่าไนโตรเจนจากมูล และปัสสาวะสูงเกินจริง ดังนั้นค่าทางชีวภาพนี้จึงจัดว่าเป็นค่าทางชีวภาพที่แท้จริง (true biological value; TBV) หาได้จากสมการ (3) (McDonald *et al.*, 2002)

$$TBV = \frac{[N \text{ ที่กิน} - (N \text{ ในอุจจาระ} - MFN) + (N \text{ ในปัสสาวะ} - EUN)]}{N \text{ ที่กิน} - (N \text{ ในอุจจาระ} - MFN)} \quad (3)$$

การวัดค่าทางชีวภาพควรคำนึงถึงระดับของโปรตีนในอาหาร ต้องมีระดับโปรตีนให้มากพอที่ร่างกายจะเกิดการสะสมไนโตรเจน หรือกักเก็บไว้ได้ แต่ต้องไม่เกินกว่าระดับที่มีการสะสมได้สูงสุด เพราะถ้าให้ไนโตรเจนในระดับสูงเกินไป กรดอะมิโนส่วนเกินจะถูกสลายและขับออกมา ซึ่งมีผลทำให้ค่าชีวภาพที่แท้จริงลดลง และจะต้องมีโภชนาการที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบอย่างพอเพียงด้วย เพื่อป้องกันไม่ให้โปรตีนถูกสลายมาใช้เป็นพลังงาน ในทางปฏิบัติอาหารที่ใช้ทดลองเพื่อหาค่าทางชีวภาพของโปรตีนนิยมแทนที่วัตถุดิบที่ต้องการทราบในสูตรอาหารนั้นให้มีระดับโปรตีน 10 เปอร์เซ็นต์ (Whittemore, 1993)

2.1.3 เมแทบอลิซึมโปรตีน (Protein metabolism)

อาหารโปรตีนจะถูกย่อยที่กระเพาะอาหาร โดยเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่กระเพาะอาหาร โปรตีนจะกระตุ้นเซลล์ของกระเพาะอาหารในส่วนแอนตรัม (antrum) ให้หลั่งฮอร์โมนแกสตริน (gastrin) ซึ่งจะออกฤทธิ์ที่กระเพาะอาหาร ทำให้เซลล์บุผนังของกระเพาะอาหาร (parietal cell) หลั่งกรดไฮโดรคลอริก และทำให้ซีฟเซลล์ (chief cell) หลั่งเอนไซม์เปปซินโนเจน (pepsinogen) (ทั้ง parietal cell และ chief cell จัดเป็นต่อมกระเพาะอาหารหรือ gastric gland) สารคัดหลั่ง

(secretion) จากต่อมกระเพาะอาหารดังกล่าวอาจเรียกรวม ๆ ว่าน้ำย่อยในกระเพาะ (gastric juice) ซึ่งมีค่า pH ต่ำมากประมาณ 1.5-2.5 ซึ่งเป็นผลจากกรดไฮโดรคลอริกในกระเพาะอาหาร ความเป็นกรดของน้ำย่อยในกระเพาะอาหารนี้ทำให้มีคุณสมบัติเป็นสารระงับเชื้อ (antiseptic) คือสามารถทำลายเชื้อแบคทีเรีย และสัตว์เซลล์เดียวบางชนิดที่ปนเปื้อนมาในอาหารได้ นอกจากนี้ยังทำหน้าที่เป็นตัวทำลายสภาพธรรมชาติของสารชีวโมเลกุล ทำให้อาหารโปรตีนในกระเพาะเสียสภาพธรรมชาติและถูกย่อยได้ง่ายขึ้นด้วยเอนไซม์ในกระเพาะอาหาร เอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีน (proteolytic enzyme) ในกระเพาะอาหารคือเปปซิน (pepsin) ซึ่งถูกสังเคราะห์และหลั่งออกมาในรูปที่ยังไม่สามารถทำงานได้ เรียกว่า เปปซิโนเจน จากนั้นจะถูกกระตุ้นโดยกรดไฮโดรคลอริกในกระเพาะอาหารและเปลี่ยนเป็นเอนไซม์เปปซินซึ่งเป็นรูปที่ทำงานได้ เอนไซม์นี้จะถูกกระตุ้นให้เปปซิโนเจนโมเลกุลอื่น ๆ เปลี่ยนเป็นเอนไซม์เปปซินได้อีก เราเรียกกระบวนการย่อยตัวเองแบบนี้ว่า การเร่งสลายตัวเอง (autocatalysis) (พจน์ และคณะ, 2543)

เอนไซม์ย่อยสลายโปรตีนหลาย ๆ ชนิดในทางเดินอาหารมักถูกสังเคราะห์ และหลั่งออกมาในรูปที่ยังไม่สามารถทำงานได้ และจะถูกกระตุ้นให้อยู่ในรูปที่ทำงานได้โดยเกิดการเร่งสลายตัวเอง อาหารในกระเพาะอาหารซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรดจะเคลื่อนตัวต่อไปที่ลำไส้เล็ก ความเป็นกรดนี้จะกระตุ้นให้มีการหลั่งฮอร์โมน secretin จากเซลล์เยื่อบุผนังของลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ฮอร์โมน secretin จะกระตุ้นให้ตับอ่อนหลั่งสารละลายไบคาร์บอเนต (bicarbonate solution) ลงสู่ลำไส้เล็ก และจะไปกระตุ้นการหลั่งเอนไซม์ย่อยสลายโปรตีนหลายชนิดจากตับอ่อน โดยเอนไซม์เหล่านี้ทำงานได้ดีที่ pH ประมาณ 7-8 (พจน์ และคณะ, 2543)

อาหารโปรตีนส่วนใหญ่จะถูกย่อยสลายเป็นกรดอะมิโนอิสระก่อนจึงจะถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) ส่วนที่เหลือจากการย่อยและการดูดซึมจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้สร้างโปรตีนของจุลินทรีย์ (microbial protein) ที่บริเวณลำไส้ใหญ่ ซึ่งโปรตีนเหล่านี้สัตว์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นค่าการย่อยได้ของโปรตีนจากการวิเคราะห์ทางมูลนั้นไม่สามารถบ่งชี้ถึงการย่อยของโปรตีนที่แท้จริง แต่เป็นค่าการย่อยได้แบบปรากฏ (apparent digestibility) สามารถคำนวณได้ดังสมการ 4 (Wang and Fuller, 1990; McDonald *et al.*, 2002)

$$\text{การย่อยได้ปรากฏ} = \frac{[\text{โภชนะที่กิน} - \text{โภชนะที่ขับออก}] \times 100}{\text{โภชนะที่กิน}} \quad (4)$$

ค่าการย่อยได้แบบปรากฏ เป็นการประเมินค่าที่ต่ำกว่าความเป็นจริง เพราะในมูลที่ขับออกมาไม่ได้มีแต่เฉพาะโปรตีน หรือกรดอะมิโนของอาหารที่ไม่ถูกย่อยและดูดซึมเท่านั้น แต่ยัง

มีส่วนที่ขับออกมาในมูลที่ไม่ได้มาจากอาหาร (endogenous substance) ที่ร่างกายขับออกมา เช่น เอนไซม์ในทางเดินอาหาร และเซลล์ของผนังทางเดินอาหารที่หลุดลอกออกมา รวมทั้งจุลินทรีย์ที่อยู่ในทางเดินอาหารนั้นด้วย ดังนั้นค่าการย่อยได้ที่แท้จริงต้องลบค่า endogenous substance ซึ่งสามารถคำนวณ ได้ดังสมการ 5 (Wang and Fuller, 1990; McDonald *et al.*, 2002)

$$\text{การย่อยได้จริง} = \frac{[\text{โภชนะที่กิน} - (\text{โภชนะที่ขับออก} - \text{endogenous substance})]}{\text{โภชนะที่กิน}} \times 100 \quad (5)$$

หากได้รับโปรตีนมากเกินไปเกินความจำเป็นของร่างกาย ร่างกายจะไม่สามารถสะสมไว้ได้ จะมีการทำลายหรือสลายเพื่อให้ได้พลังงาน (พจน์ และคณะ, 2543)

2.1.4 สัดส่วนของพลังงานต่อระดับโปรตีนในอาหาร (protein : energy ratio)

การให้อาหารสูตรแบบเต็มที สุกรจะกินได้ปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับระดับพลังงานในอาหาร ระดับความเข้มข้นของพลังงานที่ลดลงทำให้สุกรกินอาหารเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของพลังงานในอาหารมีผลต่อการกินได้ของโภชนะ รวมทั้งกรดอะมิโน (Lewis, 2001) ความต้องการความเข้มข้นของโปรตีนในอาหารขึ้นอยู่กับความต้องการกรดอะมิโน สำหรับการสร้างเนื้อแดงและกล้ามเนื้อ หรือผลิตน้ำนม ในการเปรียบเทียบความต้องการพลังงานสำหรับร่างกาย ถ้าสัตว์มีขนาดใหญ่ขึ้นจะมีความต้องการพลังงานสูงเพื่อใช้ในการดำรงชีพ และการเจริญของเนื้อแดงในระยะนี้จะลดลง ทำให้สุกรมีความต้องการ โปรตีนลดลงด้วย แต่ในสุกรที่ยังเล็กจะมีความต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีพต่ำ แต่จะเป็นช่วงที่มีการเจริญของเนื้อแดงที่สูงมาก จึงต้องการโปรตีนในระดับที่สูง ทำให้สัดส่วนโปรตีนต่อพลังงานมีค่ามาก (Whittemore, 1993)

2.1.5 การจำแนกชนิดของกรดอะมิโน

กรดอะมิโนถูกนำไปใช้ในกิจกรรมหลายอย่างในร่างกาย เช่น เป็นสารตั้งต้น (precursors) สำหรับการสังเคราะห์ฮอร์โมน สารสื่อประสาท (neurotransmitters) สารสี (pigments) และสารโมเลกุลเล็ก ๆ อีกมากมาย แต่ที่สำคัญที่สุดคือ การสังเคราะห์เป็นโปรตีนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่าง ๆ ของร่างกาย ในอาหารจะประกอบด้วยกรดอะมิโน 20 ชนิดที่เพียงพอ กรดอะมิโนทั้ง 20 ชนิดนี้อาจจะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังแสดงในตาราง 1 ตามลักษณะความจำเป็น หรือตามความต้องการของสัตว์ (Fuller, 1994) คือ

ตาราง 1 การแบ่งประเภทกรดอะมิโนในอาหารสุกร

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

ที่มา : Fuller (1994)

1. กรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acids or indispensable amino acids) เป็นกรดอะมิโนที่ร่างกายสัตว์ชั้นสูงสร้างเองไม่ได้ หรือสร้างได้ในปริมาณน้อย ไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายจึงจำเป็นต้องได้รับจากอาหารซึ่งมีเพียง 10 ชนิดเท่านั้น เมื่อขาดกรดอะมิโนเหล่านี้ตัวใดตัวหนึ่ง หรือหลายตัว มีผลทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของกรดอะมิโน หรือโปรตีนในอาหารนั้นเสียไป สัตว์มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตต่าง ๆ ลดลงด้วย หรือทำให้เกิดโรคได้ ดังนั้นในการประกอบสูตรอาหารควรจะต้องคำนึงถึงกรดอะมิโนเหล่านี้

2. กรดอะมิโนกึ่งจำเป็น (semi-essential amino acids or conditionally dispensable amino acids) กรดอะมิโนกลุ่มนี้เคยจัดเป็นกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นแต่ต่อมาพบว่า บางตัวสามารถใช้ทดแทนกรดอะมิโนที่จำเป็นได้บางส่วน หรือเรียกว่ามี sparing effect ซึ่งกันและกัน จึงถูกแยก

ออกมา เช่น tyrosine สามารถใช้แทน phenylalanine ได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และ cysteine สามารถใช้แทน methionine ได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ในสัตว์หลายชนิดยกเว้นแมว cysteine ที่ได้รับเข้าไปในร่างกายสามารถถูกเมแทบอลิซึมไปเป็น taurine ได้ ส่วนกรดอะมิโนอื่น ๆ เช่น arginine สามารถสังเคราะห์ได้ แต่บางช่วงเวลามีอัตราการสังเคราะห์ต่ำจนไม่เพียงพอต่อความต้องการนำไปใช้ในการเจริญเติบโต

3. กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น (non essential or dispensable amino acids) เป็นกรดอะมิโนที่ร่างกายสามารถสังเคราะห์ขึ้นได้เองอย่างเพียงพอภายในร่างกาย จึงไม่จำเป็นต้องได้รับจากอาหารในการประกอบสูตรอาหาร ไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงปริมาณของกรดอะมิโนเหล่านี้เป็นรายตัว เพียงแต่ให้มีปริมาณทั้งหมดครบตามความต้องการของสัตว์ก็พอแล้ว

2.1.6 คุณสมบัติของกรดอะมิโน (Properties of amino acids)

1. มีฤทธิ์เป็นบัฟเฟอร์ กรดอะมิโนสามารถเป็นบัฟเฟอร์ได้เพราะมีหมู่ amino ซึ่งเป็นค่าอ่อน ค่าคงที่ของการแตกตัว (pK) ประมาณ 9 และหมู่ carboxyl ซึ่งเป็นกรดอ่อน (pK ประมาณ 3) แต่อย่างไรก็ดีหมู่ทั้งสองนี้ไม่ค่อยมีประโยชน์ในการเป็นบัฟเฟอร์ของร่างกายนัก เพราะ pH ของร่างกายอยู่ที่ 7.4 ห่างจาก pK ของทั้งสองกลุ่มนี้มาก นั่นคือมี buffering capacity ต่ำกว่านั่นเอง ดังนั้นฤทธิ์ในการเป็นบัฟเฟอร์จึงอยู่ในสายข้างที่แตกตัวเป็นไอออนได้และมีค่า pK ใกล้เคียงกับ pH 7 คือกลุ่ม imidazole ของ histidine ซึ่งมีค่า pK ประมาณ 6-7 ด้วยเหตุนี้สายข้างของ histidine จึงมีบทบาทสำคัญในการทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ของโปรตีน

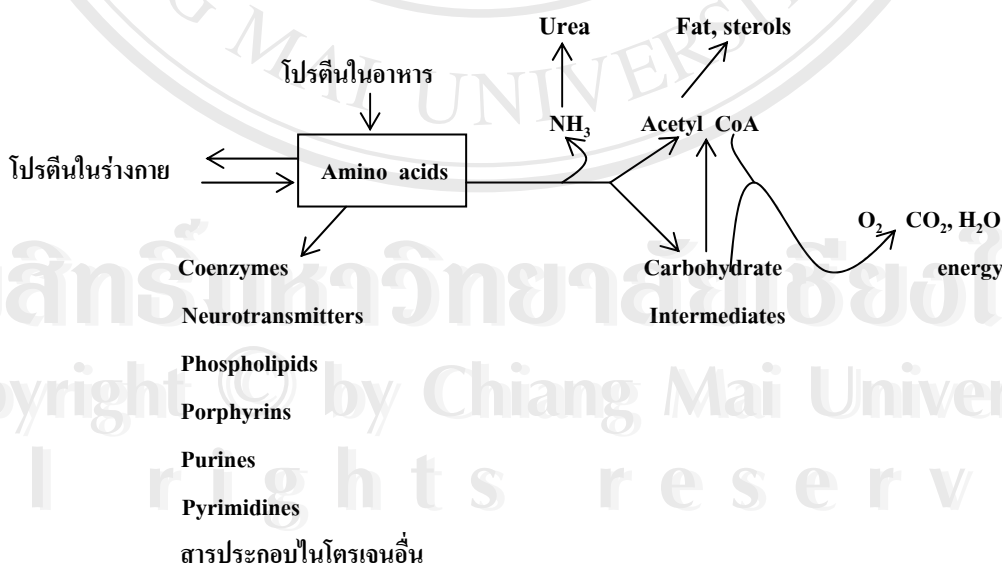
2. สามารถละลายในสารละลายที่เป็น polar solvents ได้ดี เช่น น้ำและเอทานอล เนื่องจากกรดอะมิโนมีหมู่ที่มีประจุอย่างน้อย 2 หมู่ แต่ไม่ละลายใน nonpolar solvents เช่น เบนซีน เฮกเซน และอีเทอร์ กรดอะมิโนมีจุดหลอมเหลวสูงมาก (>200 องศาเซลเซียส) แสดงว่าหมู่ที่มีประจุจะดึงดูดกันด้วยแรง ionic ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงในการทำลายแรงที่มีอยู่ในโครงผลึก (crystal lattice) อย่างไรก็ตามการละลายของกรดอะมิโนจะขึ้นอยู่กับ pH กล่าวคือใน pH ที่เป็นกรด หมู่อะมิโนสามารถรับโปรตอนได้ทำให้มีประจุบวก ถ้า pH เป็นค่าหมู่ carboxyl จะปล่อยโปรตอนทำให้ประจุเป็นลบ pH ที่ทำให้กรดอะมิโนมีประจุสุทธิเป็นศูนย์จะเป็น pH ที่กรดอะมิโนไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในสนามไฟฟ้ากระแสตรง ที่ pH นี้เรียกว่า จุดไฟฟ้าเสมอ (isoelectric pH, isoelectric point หรือ pI) ดังนั้นกรดอะมิโนจึงละลายได้น้อยที่สุดที่ pI

3. การจับกับโลหะ อะตอมที่มี unshared pair ของ electron สามารถจับกับโลหะหรือกลุ่มที่มีโลหะได้เช่น imidazole ของสายข้าง histidine กลุ่ม thioether (-S-CH₃) ของ methionine กลุ่ม -COO⁻ ของ aspartate และ glutamate เป็นต้น

4. การดูดกลืนแสง (light absorption) กรดอะมิโนทุกชนิดไม่สามารถดูดกลืนแสงในช่วง visible light ได้เพราะกรดอะมิโนไม่มีสี แต่กรดอะมิโน tryptophan, tyrosine, phenylalanine สามารถดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นแสง ultraviolet ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 280 นาโนเมตร ส่วนใหญ่ ความเข้มของการดูดกลืนแสงจะขึ้นกับปริมาณของกรดอะมิโน (นีโลบล, 2542)

2.1.7 เมแทบอลิซึมกรดอะมิโน (Amino acid metabolism)

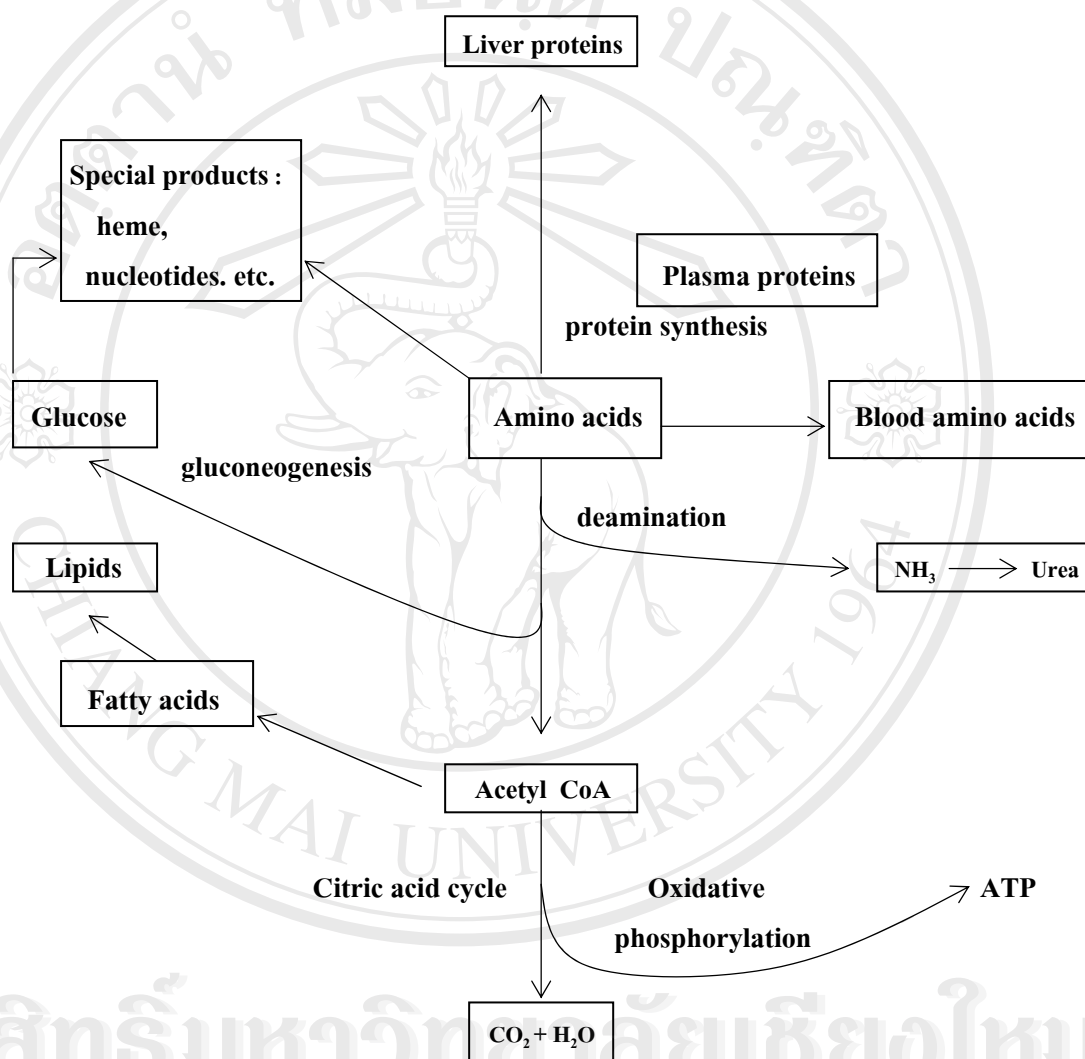
กรดอะมิโนส่วนใหญ่ได้มาจากการย่อยโปรตีนในอาหาร และมีการดูดซึมที่ลำไส้เล็ก ไปสู่ส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย แต่อย่างไรก็ตามกรดอะมิโนบางตัว ร่างกายสามารถสังเคราะห์ขึ้นมาได้จากสารชีวโมเลกุลอื่น ๆ เมื่อพิจารณาโครงสร้างของกรดอะมิโน $R-CH(NH_3^+)COO^-$ จะพบว่า อะตอมของคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน ในโมเลกุลของกรดอะมิโน อาจได้มาจากกรดอะมิโนตัวอื่นด้วยกัน หรือจากคาร์โบไฮเดรต และไขมัน แต่สำหรับอะตอมไนโตรเจนในกรดอะมิโนจะต้องมาจากกรดอะมิโนอื่นด้วยกัน ผลผลิตสุดท้ายของการย่อยโปรตีน ได้แก่ กรดอะมิโน ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 20 ชนิด ส่วนหนึ่งของกรดอะมิโนเหล่านี้ถูกนำไปใช้สังเคราะห์โปรตีนและเอนไซม์ของร่างกาย แต่อีกส่วนจะถูกสลายต่อไปเป็นพลังงาน หรือสะสมอยู่ในรูปของไขมัน และไกลโคเจน สำหรับหมู่อัลฟา-อะมิโน ($\alpha-NH_2$) จะถูกกำจัดเป็นแอมโมเนีย และยูเรีย หรือนำกลับมาใช้สังเคราะห์สารประกอบไนโตรเจนต่าง ๆ ต่อไป ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของกรดอะมิโน และสารชีวโมเลกุลอื่น (พรงาม, 2545) ดังแสดงในภาพ 2



ภาพ 2 ความสัมพันธ์ทางเมแทบอลิซึมของกรดอะมิโน และสารชีวโมเลกุลอื่น

ที่มา : พรงาม (2545)

กรดอะมิโนที่ถูกดูดซึมจะไปยังตับจากนั้นจะถูกส่งไปเลี้ยงทั่วร่างกาย โดยนำไปสังเคราะห์เป็นโปรตีนของเนื้อเยื่อต่าง ๆ หรือสังเคราะห์สารประกอบไนโตรเจน (nitrogenous compound) หลายชนิด เช่น พอร์ไฟริน และเบสของนิวคลีโอไทด์ต่าง ๆ เป็นต้น หรืออาจสังเคราะห์เป็นสารสื่อประสาท และฮอร์โมน (พจน์ และคณะ, 2543) ดังแสดงในภาพ 3



ภาพ 3 แสดงบทบาทหน้าที่ต่าง ๆ ของกรดอะมิโนในตับ
ที่มา : พจน์ และคณะ (2543)

การสร้าง และการสลายโปรตีนเกิดขึ้นตลอดเวลา เรียกว่าการ turnover ของโปรตีน การสร้างและการสลายนี้จะดำเนินต่อไปอยู่ตลอดเวลาไม่ว่าสัตว์จะมีการเจริญเติบโตอยู่ในระยะใด ซึ่งเป็นกระบวนการที่ดำเนินต่อไปตลอดเวลาชั่วชีวิตของสัตว์ (Bercovici and Fuller, 1995) สำหรับภายในเซลล์ที่มีความเข้มข้นทั้งหมดไม่เปลี่ยนแปลง เมื่อเวลาผ่านไปเซลล์สามารถรักษาให้มีระดับ

คงตัว (steady state level) อยู่ได้ตลอดเวลาโดยการทำให้อัตราเร็วของการสังเคราะห์โปรตีนนี้มีค่ามากพอที่สัตว์จะสร้างโปรตีนทดแทนส่วนที่ถูกสลายไป ซึ่งกรดอะมิโนที่ได้จากการ turnover ของโปรตีนจะนำกลับมาใช้โดยนำไปสังเคราะห์โปรตีน ส่วนกรดอะมิโนที่เหลือจะถูกขับออกนอกร่างกาย (พัชรา, 2544)

2.1.8 กรดอะมิโนที่มีจำกัด (Limiting amino acid) ในอาหาร

วัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิดต่าง ๆ ย่อมมีปริมาณ สัดส่วน และชนิดของกรดอะมิโนแตกต่างกัน และในสัตว์ที่มีระยะการเจริญเติบโตต่างกันย่อมมีความต้องการกรดอะมิโนต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ ดังนั้นหากสัตว์ได้รับอาหารชนิดใดแล้วแสดงอาการขาดกรดอะมิโนตัวนั้นออกมา แสดงว่ากรดอะมิโนตัวนั้นเป็นตัวที่มีจำกัดในอาหาร (limiting amino acid) และเป็นกรดอะมิโนที่ขาดเป็นอันดับแรกในอาหาร หรือเมื่อเทียบความต้องการของสัตว์จัดว่าเป็นกรดอะมิโนที่มีความสำคัญเป็นอันดับแรก (first limiting amino acid) และกรดอะมิโนที่มีจำกัดเป็นตัวต่อ ๆ ไปจึงจัดเป็น second-, third limiting amino acid ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 2 ซึ่งในอาหารสุกร lysine, threonine, methionine และ tryptophan จัดว่าเป็น limiting amino acid ในอาหารสุกร (Bercovici and Fuller, 1995)

ตาราง 2 กรดอะมิโนที่มีจำกัดในวัตถุดิบอาหารสุกร

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

ที่มา : Lewis (2001)

โดยทั่วไปพบว่าโปรตีนจากพืชมีคุณภาพต่ำกว่าโปรตีนจากสัตว์ เพราะมีไลซีนซึ่งเป็นกรดอะมิโนที่จำเป็นต่ำกว่าความต้องการของสัตว์มาก (บุญล้อม, 2541) ตัวอย่างองค์ประกอบของกรดอะมิโนในโปรตีนแต่ละชนิด แสดงไว้ในตาราง 3

ตาราง 3 ปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็น (เปอร์เซ็นต์ของโปรตีน) ในผลิตภัณฑ์จากสัตว์และพืช

Amino acid	Egg ^{1/}	Beef ^{1/}	Pork ^{1/}	Fish meal ^{2/}	Soybean meal ^{2/}	Corn ^{2/}
Arginine	5.9	6.6	6.4	4.37	7.14	4.47
Histidine	2.4	2.9	3.2	3.43	2.66	2.7
Isoleucine	7.1	5.1	4.9	3.07	4.45	3.41
Leucine	9.9	8.4	7.5	4.97	7.7	11.76
Lysine	6.4	8.4	7.8	5.16	6.11	3.06
Methionine	5.4	2.3	2.5	1.57	1.41	2.12
Phenylalanine	7.5	4.0	4.1	2.33	4.91	4.47
Threonine	4.0	4.0	5.1	2.12	3.91	3.41
Tryptophan	1.2	1.1	1.4	0.80	1.68	0.70
Valine	8.8	5.7	5.0	3.49	4.70	4.70

^{1/} Pond *et al.* (1995)

^{2/} NRC (1998)

ที่มา : บุญล้อม (2541)

2.1.9 การคำนวณสูตรอาหารโดยคำนึงถึงกรดอะมิโน

ในการประกอบสูตรอาหารมักคำนึงถึงความต้องการโปรตีนเป็นหลักมากกว่าที่จะคำนึงถึงความต้องการกรดอะมิโน จะทำให้สูตรมีการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตที่ยังไม่ดีมากนัก แต่การคำนวณสูตรอาหารโดยใช้กรดอะมิโนเป็นหลักแทนการใช้ปริมาณโปรตีนรวมจะให้ค่าที่แม่นยำ และใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์มากกว่า และทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโต และให้ผลผลิตสูงสุด ปัจจุบันสามารถคำนวณสูตรอาหารด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ต่าง ๆ ซึ่งสามารถจะพิจารณาถึงกรดอะมิโนในอาหารทั้งหมดทุกตัวได้ แต่ในความเป็นจริงไม่จำเป็นที่จะต้องพิจารณาทั้งหมด แต่ควรคำนึงถึงเฉพาะกรดอะมิโนตัวที่สำคัญ และจำเป็นที่จะต้องมีในปริมาณที่เพียงพอ คือพวก limiting amino acids โดยเฉพาะไลซีนเพราะเป็นกรดอะมิโนที่มักจะขาดเป็นอันดับแรกในอาหารสุกร และควรพิจารณาถึงระดับของ tryptophan, threonine และ methionine เพราะถือว่าการขาดอะมิโนเหล่านี้เป็น limiting amino acid ในอาหารสุกรเช่นกัน

ถ้าในการประกอบสูตรอาหารนั้นมีแหล่งวัตถุดิบ 2 แหล่งที่มีปริมาณโปรตีนแตกต่างกันมาก แต่มีระดับของไลซีนในวัตถุดิบใกล้เคียงกัน ควรคำนึงวัตถุดิบที่มีโปรตีนรวมเป็นหลัก เพราะถ้าการคำนวณสูตรอาหารโดยคำนึงถึงไลซีนเป็นหลัก อาจทำให้สูตรอาหารขาดกรดอะมิโนที่จำเป็นชนิดอื่น ๆ (Lewis, 2001)

ซึ่งในกรณีที่สูตรอาหารมีปริมาณของกรดอะมิโนไม่เพียงพอ ต้องมีการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ในสูตรอาหาร ซึ่งกรดอะมิโนส่วนใหญ่เป็น limiting amino acid คือ lysine, tryptophan, threonine และ methionine

กรดอะมิโนส่วนใหญ่ ยกเว้น glycine จะมีโครงสร้างที่มีลักษณะไม่สมมาตร (asymmetric) ที่อะตอมของคาร์บอน (C) ทำให้มีโครงสร้างได้ 2 แบบ คือ D- และ L-forms ซึ่งสุกรสามารถใช้ประโยชน์จากโครงสร้างแบบ L-forms ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ไลซีน เป็นกรดอะมิโนที่สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ถ้าอยู่ในรูป D-forms เนื่องจากไลซีนไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาแบบย้อนกลับได้ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่จำเป็นในการเปลี่ยนโครงสร้างของกรดอะมิโนจาก D-forms เป็น L-forms จึงทำให้สัตว์ไม่สามารถใช้ประโยชน์จาก D-lysine ได้ ดังนั้นในทางการค้าจึงผลิตไลซีนสังเคราะห์ออกมาในรูปของ L-lysine เพื่อให้สัตว์ใช้ประโยชน์ได้เต็มที่ ซึ่งไลซีนสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ 78.8 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับทรีโอนีนที่สุกรใช้ประโยชน์ได้ในรูปของ L-forms เท่านั้น สามารถใช้ประโยชน์ได้ 98.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนทรีปโตเฟน และ เมทไธโอนีน สุกรสามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งในรูปของ D- และ L-forms ซึ่งเมทไธโอนีนสามารถใช้ประโยชน์ได้ 99 เปอร์เซ็นต์ แต่ทรีปโตเฟนสุกรสามารถใช้ประโยชน์ในรูปของ L-forms ได้ 98.5 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในรูป D-forms ที่ใช้ประโยชน์ได้ 60-100 เปอร์เซ็นต์ (Lewis, 2001)

ถึงแม้ว่ากรดอะมิโนสังเคราะห์สามารถใช้ประโยชน์ได้เกือบ 100 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อนำมาเสริมในสูตรอาหารสุกรไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในร่างกายได้ทั้งหมด ขึ้นอยู่กับจำนวนหรือความถี่ในการให้อาหารในแต่ละวัน (Lewis, 2001) จากรายงานกรดอะมิโนสังเคราะห์ที่มีการดูดซึมเร็วกว่ากรดอะมิโนที่ได้จากวัตถุดิบอาหาร

2.1.10 สมดุลกรดอะมิโน หรือโปรตีนอุดมคติ (Amino acid balance or Ideal protein)

องค์ประกอบของกรดอะมิโนที่สมดุล หรือโปรตีนอุดมคติ (Ideal Protein) แสดงให้เห็นถึงชนิดและปริมาณของกรดอะมิโน ที่สัตว์ต้องการสำหรับดำรงชีพและสะสมไว้ในร่างกาย (ARC, 1981) การประเมินความต้องการสัดส่วนกรดอะมิโนในอาหารเป็นเรื่องที่ยาก การที่สัตว์จะมีการเจริญเติบโตสูงสุดจะต้องได้รับกรดอะมิโนที่มีระดับ สัดส่วน และในระยะเวลาที่ถูกต้อง และเหมาะสม โดยเฉพาะกรดอะมิโนที่จำเป็น สัดส่วนของกรดอะมิโนของสุกรแต่ละระยะต่างกัน เพราะว่าสุกรใช้กรดอะมิโนในการดำรงชีพ สร้างเนื้อเยื่อ สังเคราะห์น้ำนม และการเมแทบอลิซึมของร่างกายในแต่ละระยะต่างกัน (NRC, 1998) ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 สัดส่วนขององค์ประกอบของโปรตีนอุดมคติสำหรับการดำรงชีพ การสะสมโปรตีน การสังเคราะห์น้ำนม และการสร้างกล้ามเนื้อของร่างกาย

Amino Acid	Maintenance ^a	Protein Accretion ^a	Milk Synthesis ^a	Body Tissue ^a
Lysine	100	100	100	100
Arginine	-200	48	66	105
Histidine	32	32	40	45
Isoleucine	75	54	55	50
Leucine	70	102	115	109
Methionine+cystein	123	55	45	45
Phenylalanine+tyrosine	121	93	112	103
Threonine	151	60	58	58
Tryptophan	26	18	18	10
Valine	67	68	85	69

^aProportions of each amino acid relative to lysine

ที่มา : NRC (1998)

การกำหนดความต้องการสัดส่วนของกรดอะมิโนจะใช้ไลซีน (lysine) เป็นหลักเปรียบเทียบกับกรดอะมิโนตัวอื่น เนื่องจาก lysine เป็น first limiting amino acid ของสุกร ส่วนกรดอะมิโนที่จัดเป็นกรดอะมิโนที่จำกัดอันดับสอง สาม สี่ คือ เมทไธโอนีน ทรีโอนีน และทริปโตเฟน ตามลำดับ สูตรอาหารที่ค่านึงเปอร์เซ็นต์ของโปรตีนจะมีต้นทุนสูง และมีกรดอะมิโนบางตัวมากเกินไปจนความจำเป็น หลักการของโปรตีนอุดมคติเป็นที่ยอมรับกันทั่วโลกได้มีการศึกษาค้นคว้าวิจัยจนได้ข้อมูลมากมาย แต่ละแห่งก็จะยึดตัวเลขของตนเป็นหลัก ซึ่งข้อมูลแต่ละแห่งอาจต่างกันบ้างเล็กน้อย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพการจัดการ สายพันธุ์สุกร อาหาร และวัตถุดิบอาหารสัตว์ เป็นต้น หลักการนี้จะเปรียบเทียบปริมาณไลซีนเป็นหลัก (เทียบเป็น 100 เปอร์เซ็นต์) (วันดี, 2546) ดังแสดงในตาราง 5

สุกรแต่ละระยะมีอัตราการเจริญเติบโตไม่เท่ากัน จึงมีความต้องการกรดอะมิโนในสัดส่วนที่แตกต่างกัน จึงมีการกำหนดสัดส่วนของกรดอะมิโนโดยแบ่งตามระยะการเจริญเติบโตและน้ำหนักตัวของสุกร (ตาราง 6) ให้ได้รับกรดอะมิโนสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด เพื่อการเจริญเติบโตที่มีประสิทธิภาพสูงสุด (Baker *et al.*, 1993)

ตาราง 5 ความต้องการสัดส่วนของกรดอะมิโนในโปรตีนอุดมคติเมื่อเทียบกับไลซีน โดยให้ความต้องการไลซีนเท่ากับ 100

Amino acid	NRC (1998)	ARC (1981)	Yen <i>et al.</i> (1986)	Wang and Fuller (1989)
Lysine	100	100	100	100
Methionine	27	-	39	-
Methionine+cystein	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

ตาราง 6 รูปแบบของโปรตีนอุดมคติของสุกรในระยะต่าง ๆ

Amino acid	Ideal patterns of amino acid (% of lysine)		
	5-20 kg	20-50 kg	50-100 kg
Lysine	100	100	100
Methionine	30	30	30
Methionine+cystein*	60	65	70
Threonine	65	67	70
Tryptophan	18	19	20
Arginine	42	36	30
Histidine	32	32	32
Isoleucine	60	60	60
Leucine	100	100	100
Phenylalanine+tyrosine**	95	95	95
Valine	68	68	68
Cystine	30	35	40

*50% DL-methionine+50%L-cystein

**53%L- phenylalanine+47% L-tyrosine

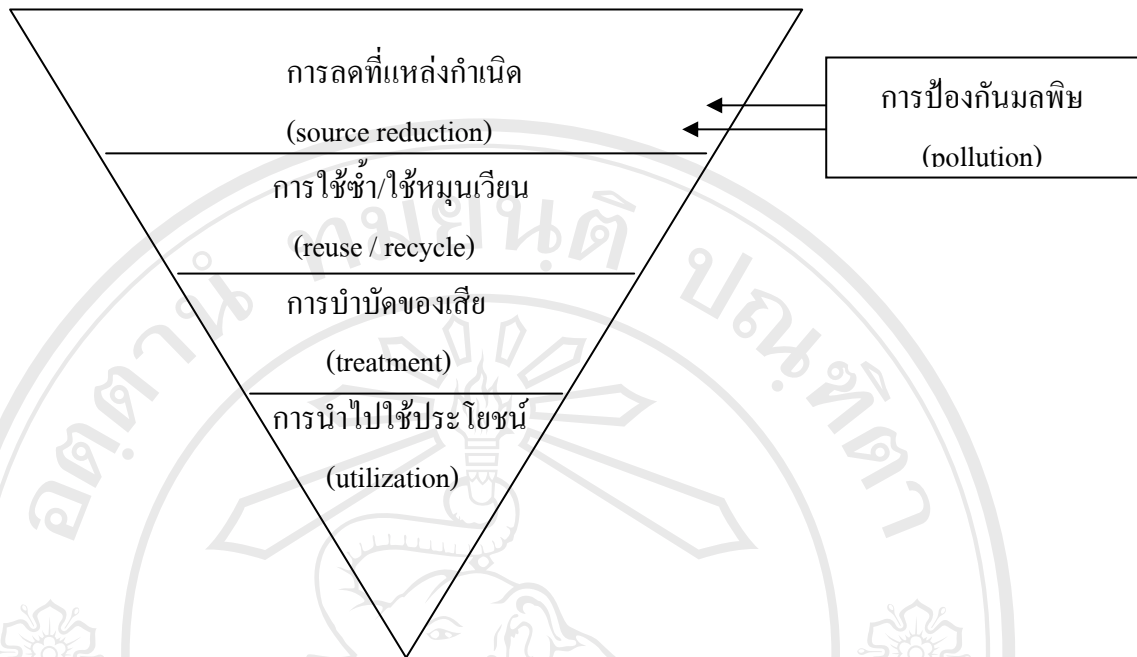
ที่มา : Baker *et al.* (1993)

2.1.11 อาหารโปรตีนต่ำ (Low-protein diet)

การลดระดับโปรตีนในอาหารสุกรลงเพื่อจุดมุ่งหมายคือ 1) ต้องการลดปัญหาสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นปัญหาที่สำคัญและควรได้รับการแก้ไข 2) ลดต้นทุนการผลิต เพราะต้นทุนการผลิตส่วนใหญ่มาจากค่าอาหารประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ (วันดี, 2546) ซึ่งเมื่อมีการลดระดับโปรตีนในอาหารแล้วต้องมีการเสริมกรดอะมิโนให้มีสัดส่วนที่เหมาะสม โดยยึดแนวคิดสมดุลกรดอะมิโนหรือโปรตีนอุดมคติ (ideal protein) เพื่อให้เกิดความสมดุลของกรดอะมิโนที่สัตว์ต้องการมากที่สุด โดยกรดอะมิโนทุกตัวจะต้องกำหนดให้มีในปริมาณที่พอเพียง จากที่มีการศึกษาการลดระดับโปรตีนในอาหารเพื่อลดปริมาณไนโตรเจนที่ขับออก พบว่าการลดระดับโปรตีนในอาหารสามารถลดลงได้มากกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้ปริมาณไนโตรเจนและแร่ธาตุที่ขับออกทางมูลลดลงและไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์ แต่ต้องมีการเสริมกรดอะมิโนให้เพียงพอกับความต้องการ (Jongbloed and Lenis, 1998) โดยทั่วไปอาหารโปรตีนต่ำที่มีการเสริมกรดอะมิโนให้สมดุลไม่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิตของสุกร และในบางการทดลองพบว่า ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตเนื่องจากว่าสัตว์ที่ได้รับโปรตีนสูงเกินไปในอาหาร ร่างกายจำเป็นต้องใช้พลังงานมากในการสลายโปรตีนที่ได้รับจากอาหารที่มากเกินไปออกจากร่างกาย ทำให้มีพลังงานไม่เพียงพอต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ภายในร่างกาย ซึ่งถ้าลดระดับโปรตีนในอาหารลง โดยที่สัดส่วนของโภชนาต่าง ๆ ยังสมดุลจะช่วยลดการนำพลังงานไปใช้ในการขับโปรตีนที่ได้รับจากอาหารมากเกินไปออกจากร่างกาย และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตของสุกร (Ketels, 1999)

2.2 แนวทางการลดผลกระทบจากของเสียของสุกรต่อสิ่งแวดล้อม

ของเสียจากฟาร์มสุกรแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือส่วนที่เป็นของแข็ง ได้แก่ มูลสุกร เศษอาหารที่ตกในคอก และของเสียที่เป็นของแข็งอื่น ๆ เช่น เข็มฉีดยา ถุงใส่อาหารซากสุกรที่ตาย เป็นต้น ส่วนที่เป็นของเหลว ได้แก่ น้ำเสียจากการทำความสะอาดทั่วไป เช่น การล้างคอก และปัสสาวะของสุกร ซึ่งมลพิษส่วนใหญ่เกิดจากมูล และของเสียส่วนที่เป็นของเหลว ความรุนแรงนั้นไม่เพียงแต่กลิ่นเหม็น อันเกิดจากการหมักหมมของมูลสุกรเท่านั้น ของเสียเหล่านี้ยังเป็นแหล่งเพาะเชื้อโรค แมลงวัน และยุง ซึ่งเป็นอันตรายต่อคนและสัตว์เลี้ยงในฟาร์ม ซึ่งปัญหาหลักของการเกิดมลพิษจากของเสียสุกร ส่วนหนึ่งมาจากไนโตรเจนในสิ่งขี้ถ่ายที่มากเกินไป (วันดี, 2546) แนวทางในการป้องกันมลพิษที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือการลดที่แหล่งกำเนิดของปัญหา รองมาเป็นการนำกลับไปใช้ใหม่ (reuse) หมุนเวียน (recycle) การบำบัดของเสีย (treatment) และการนำของเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้ประโยชน์ (utilization) ดังแสดงในภาพ 4

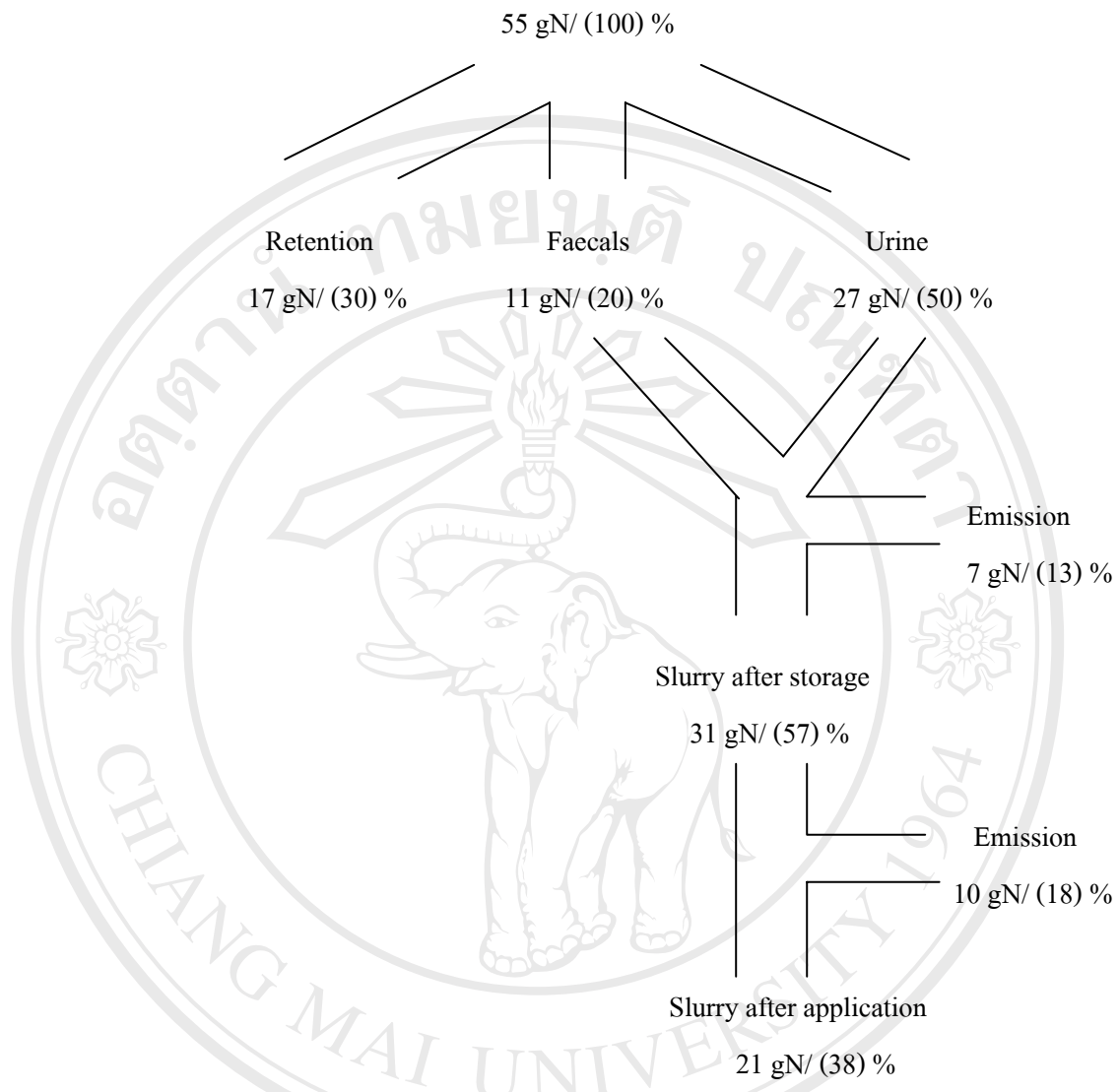


ภาพ 4 ลำดับความสำคัญของการจัดการสิ่งแวดล้อม
ที่มา : ดัดแปลงจาก กรมควบคุมมลพิษ (มปพ.)

2.2.1 ไนโตรเจนในสิ่งขี้ถ่ายของสุกร

การเลี้ยงสุกรเพื่อการค้าในปัจจุบันมีการคำนวณสูตรอาหาร เพื่อให้สุกรเจริญเติบโต และให้ผลผลิตสูงสุด โดยคำนวณจากความต้องการโภชนาโปรตีน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณโปรตีน หรือไนโตรเจนรวมในอาหารมีเปอร์เซ็นต์สูง สุกรสามารถนำไนโตรเจนที่กินเข้าไปในอาหารมาใช้ประโยชน์ได้เพียงส่วนหนึ่ง ไนโตรเจนที่เหลือถูกขับถ่ายออกจากร่างกายในรูปของของเสีย (สมชัย และสุริยะ, 2544) จากการศึกษาของ Aarmink and Canh (1999) พบว่าสุกรระยะรุ่น-ขุน สามารถนำไนโตรเจนจากอาหารที่กินเข้าไปมาใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตได้เพียง 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจนที่เหลือ 70 เปอร์เซ็นต์ จะถูกขับถ่ายออกมาในปัสสาวะ 50 เปอร์เซ็นต์ และในมูล 20 เปอร์เซ็นต์ ดังสรุปในภาพ 5 ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงปริมาณไนโตรเจนที่กักเก็บไว้ ปริมาณไนโตรเจนที่ขับออก ปริมาณของไนโตรเจนที่ขับออกแล้วระเหยสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งในที่สุดจะมีไนโตรเจนเหลือเพื่อการใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยในดิน 38 เปอร์เซ็นต์

Feed



ภาพ 5 แสดงเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนที่ได้รับ สะสม และสูญเสียในการผลิตสุกรรุ่น-ขุน
ที่มา : Aarnink and Canh (1999)

ซึ่งในแต่ละช่วงระยะเวลาเจริญเติบโตของสุกรจะมีปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับออกมาต่างกัน (Dourmad *et al.*, 1992) ดังแสดงในตาราง 7 ซึ่งในช่วงระยะเวลาเจริญเติบโตของสุกรตั้งแต่ระยะรุ่น-ขุน 1 ตัว กินอาหารที่มีไนโตรเจนประมาณ 7.5 กิโลกรัม ซึ่งในส่วนนี้ประมาณ 60-70 เปอร์เซ็นต์ หรือ 4.5-5.3 กิโลกรัมต่อตัว (Jongbloed and Lenis, 1992) จะถูกขับถ่ายออกมาในปัสสาวะ 50 เปอร์เซ็นต์ และในมูล 20 เปอร์เซ็นต์ (Aarnink and Canh, 1999) ปัญหาของไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายที่มากเกินไป ส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมทั้งอากาศ น้ำ และดิน

ตาราง 7 ปริมาณของไนโตรเจนที่ถูกขับออกมา ของสุกรแต่ละช่วงอายุ

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		11,023	100	65

ที่มา : Dourmad *et al.* (1992)

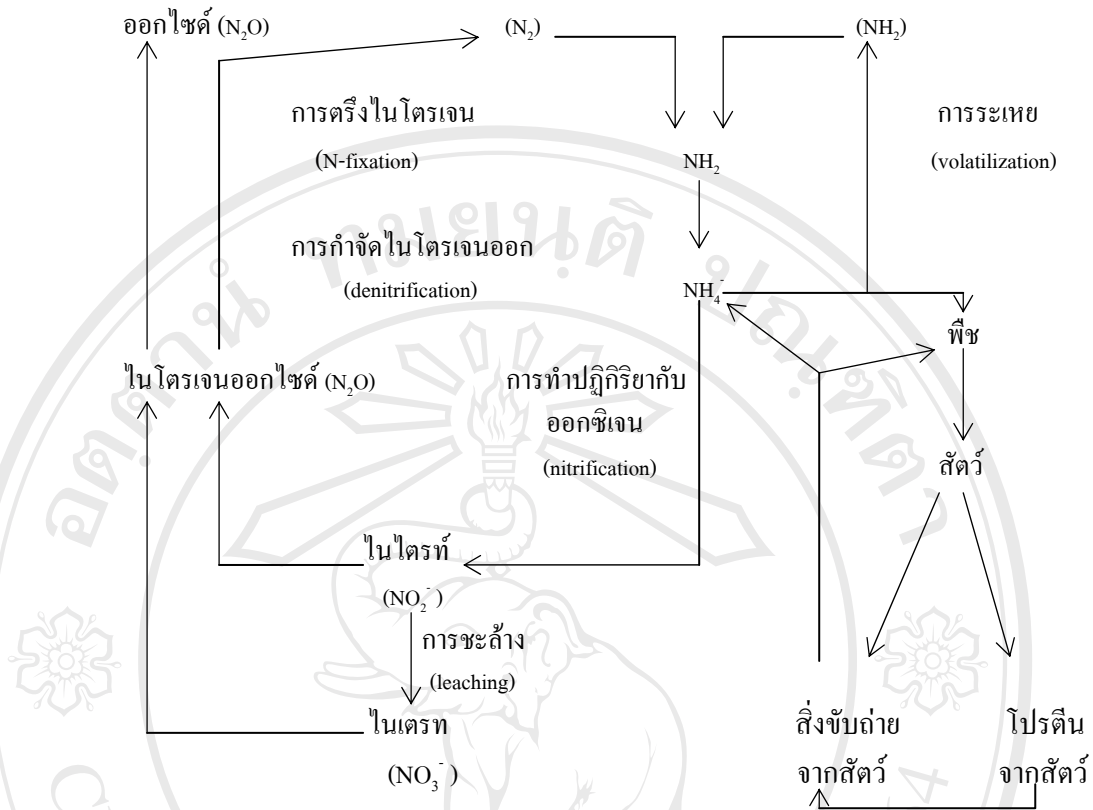
2.2.2 ปัญหาของไนโตรเจนต่อสภาพแวดล้อม

เมื่อสัตว์กินโปรตีนที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเข้าไป จะขับถ่ายของเสียที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบออกมา โดยของเสียที่อยู่ในรูปของแอมโมเนียจะถูกปลดปล่อยสู่ธรรมชาติโดยการระเหย หลังจากนั้นบางส่วนจะถูกออกซิไดซ์ให้เป็นไนไตรท์โดยแบคทีเรียพวก *Nitrosomonas* และ *Nitrosococcus* ต่อมาไนไตรท์ที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดซ์อีกครั้งให้เป็นไนเตรทโดยแบคทีเรียพวก *Nitrobacter* หรือเรียกปฏิกิริยานี้ว่า nitrification ซึ่งเกิดในสภาวะที่เหมาะสมคือ อุณหภูมิสูง และความเป็นกรด-ด่าง (pH) สูง ซึ่งในสภาพอากาศของเมืองไทยจะเป็นสภาวะที่เหมาะสม จากนั้นไนเตรทจะถูกสะสมในดิน แล้วจุลินทรีย์ในดินจะรีดิวซ์ให้เป็นไนไตรท์อีกครั้ง และระเหยในอากาศด้วยกระบวนการ denitrification ซึ่งพีชจะนำไปใช้อีกเกิดเป็นวงจรไนโตรเจนในธรรมชาติ ดังแสดงในภาพ 6 (วันดี, 2546)

ไนโตรเจน

ก๊าซไนโตรเจน

ก๊าซแอมโมเนีย



ภาพ 6 วัฏจักรของไนโตรเจนในธรรมชาติ
ที่มา : วันดี (2546)

2.2.2.1 ปัญหาคุณภาพดิน

การสะสมของไนโตรเจนในดินจะอยู่ในรูปของไนไตรท์ (NO_2^-) และจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปไนเตรท (NO_3^-) โดยการทำงานของจุลินทรีย์ในดิน หากมีการชะล้างเอาไนไตรท์และไนเตรทไปกับน้ำทำให้น้ำมีการปนเปื้อน และเป็นอันตรายกับลูกสุกรและทารกที่ได้รับน้ำเหล่านี้เข้าไป โดยสารที่เป็นพิษจะอยู่ในรูปของไนไตรท์ แต่ไนเตรทที่อยู่ในน้ำเหล่านั้นพร้อมที่จะถูกเปลี่ยนเป็นไนไตรท์ โดยการทำงานของเอนไซม์ไนเตรทรีดักเตส (nitrate reductase) ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบทางเดินอาหาร เมื่อไนไตรท์ถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดจะไปทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบิน (haemoglobin) โดยเข้าไปแทนที่เหล็ก (Fe) เป็นผลให้เลือดไม่สามารถพาออกซิเจนไปหล่อเลี้ยงเซลล์ของร่างกาย ทำให้ร่างกายขาดออกซิเจนเกิดภาวะโรคเลือดสีน้ำเงิน (methaemoglobin) และอาจถึงตายได้ สำหรับสัตว์ที่โตแล้วปริมาณกรดในกระเพาะเพิ่มขึ้น ทำให้จุลินทรีย์ที่จะผลิตเอนไซม์ไนเตรทรีดักเตสลดน้อยลงมาก การเปลี่ยนไนเตรทไปเป็นไนไตรท์ลดลง นอกจากนี้เม็ดเลือดขาวยังสามารถผลิตเอนไซม์ออกมาป้องกัน ไนไตรท์ที่จะเข้าไปทำปฏิกิริยากับฮีโมโกลบิน (วันดี, 2546)

2.2.2.2 ปัญหาอากาศเสีย

กลิ่นเหม็นและก๊าซที่เป็นพิษที่เกิดจากมูลสุกร โดยเฉพาะการเลี้ยงสุกรในโรงเรือนที่มีการจำกัดขอบเขต และมีความหนาแน่นมาก นับเป็นแหล่งที่เกิดกลิ่นและก๊าซที่ไม่พึงประสงค์ได้สูง ถ้าของเสียจากสิ่งขับถ่ายมีการสะสมภายในโรงเรือนหรือพื้นคอก การเกิดกลิ่นและก๊าซที่เป็นพิษนั้นเกิดจากการหมักย่อยของจุลินทรีย์ประเภทไม่ใช้ออกซิเจนเป็นอันดับแรก ก๊าซที่เป็นพิษที่สำคัญ ๆ ได้แก่ ก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) ส่วนมากเกิดจากปัสสาวะที่ปะปนอยู่กับมูลสด พื้นคอกแบบแอสทจะมีกลิ่นแอมโมเนียน้อยกว่าพื้นคอกแบบคอนกรีตทึบ ถ้ายังอุณหภูมิสูงขึ้นเท่าใดกลิ่นก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้น ก๊าซแอมโมเนียรบกวนสุขภาพของสุกร ถ้ามีความเข้มข้นถึง 100-200 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ทำให้สุกรมีอาการจาม น้ำลายฟูมปาก กินอาหารน้อย และหวั่น โดยปกติก๊าซแอมโมเนียถูกปลดปล่อยออกมาโดยการทำงานของเอนไซม์ยูรีเอส (urease) ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในมูล เอนไซม์ยูรีเอสเปลี่ยนยูเรียในปัสสาวะให้เป็นแอมโมเนียซึ่งระเหยได้ในระยะเวลาช่วงสั้น ๆ ดังนั้นปริมาณแอมโมเนียซึ่งเป็นพิษกับสุกรและผู้เลี้ยงจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับวิธีการจัดการมูลสุกรหลังจากขับถ่ายออกมา ถ้ามีการเก็บรวบรวมมูลบ่อยครั้ง แยกมูลแข็งออกมาจากบริเวณที่ปัสสาวะของสุกร หรือจะเรียกว่าแยกของแข็งและของเหลวให้ได้มากที่สุดและเร็วที่สุด ก็สามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้ส่วนหนึ่ง หรือจะใช้วิธีการเจือจางของเสียด้วยน้ำ ซึ่งวิธีนี้ใช้แรงงานและสิ้นเปลืองน้ำ การระเหยของแอมโมเนียเกิดขึ้นทั้งในโรงเรือน ช่วงการกักเก็บรอการบำบัด และช่วงที่นำไปใส่ในดินเพื่อเป็นปุ๋ยสำหรับพืช (Ritter and Bergstrom, 2001) ผลกระทบระยะยาวของก๊าซแอมโมเนียในชั้นบรรยากาศคือ ก๊าซแอมโมเนียเป็นก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gas) ชนิดหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะโลกร้อน (global warming) เนื่องจากก๊าซแอมโมเนียไปทำลายชั้นบรรยากาศ นอกจากนี้การที่แอมโมเนียในชั้นบรรยากาศ เมื่อถูกชะล้างโดยน้ำฝนจะทำให้เกิดลักษณะฝนกรด (acid rain) ซึ่งจะมีผลกระทบต่อเนื้อถึงพืชพรรณธรรมชาติ (วันดี, 2546)

2.2.2.3 ปัญหาคุณภาพน้ำ

ไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) ที่ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งทั้งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสนี้เป็นแหล่งของสารอาหารของพืชน้ำต่าง ๆ และสาหร่าย ทำให้มีการเจริญเติบโตและขยายพันธุ์อย่างรวดเร็ว ทำให้ค่าออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ความขุ่นของน้ำเพิ่มมากขึ้น และคุณภาพของน้ำลดลงอย่างรวดเร็ว (วันดี, 2546) ซึ่งกระบวนการดังกล่าวเรียกว่าภาวะยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) (Ritter, 2001) คือการที่มีธาตุอาหารอยู่มาก จะกระตุ้นให้สิ่งมีชีวิตในน้ำเจริญอย่างรวดเร็วทั้งจุลินทรีย์และพืชน้ำ ทำให้น้ำมีสีเขียวขุ่นและผิวน้ำมีฟองหรือฝ้าบางลอยเคลือบอยู่ ทำให้คุณภาพน้ำลดลง ซึ่งส่งผลถึงค่า BOD, COD และอื่น ๆ ที่เป็นตัวบ่งชี้คุณภาพน้ำมีค่าลดลง (Ritter and Bergstrom, 2001)

2.3 สมดุลกรด-ด่าง (Acid-Base Balance)

การทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ในร่างกายเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์ ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ เหล่านี้อาศัยกระบวนการควบคุมหลายอย่าง ตัวแปรสำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมี และองค์ประกอบของเซลล์คือ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่ต่างไปจากค่าปกติมากย่อมทำให้กระบวนการต่าง ๆ และองค์ประกอบของร่างกายเปลี่ยนแปลงได้ด้วยเหตุนี้ร่างกายจึงต้องมีกระบวนการที่พยายามรักษาให้ pH ของร่างกายมีค่าอยู่ในช่วงแคบ ๆ ช่วงหนึ่ง (สัญญา, 2535) ค่า pH ของของเหลวในร่างกาย (body fluids) โดยเฉพาะของพลาสมา (plasma) มีค่าค่อนข้างคงที่ มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่แคบมากคืออยู่ในช่วง 7.35-7.45 (อุดม, 2526) แต่ร่างกายยังมีชีวิตอยู่ได้ ซึ่งเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของ pH ตั้งแต่ 7.00-7.70 จะเกิดภาวะที่มีกรดคั่งในร่างกายเรียกว่า acidosis และถ้ามีกรดคั่งมากจนค่า pH ของเลือดต่ำกว่า 7.35 เรียกว่า acidemia ส่วนในภาวะที่ด่างเพิ่มขึ้นในร่างกายเรียกว่า alkalosis ซึ่งถ้าทำให้ pH ในเลือดเพิ่มขึ้นเกินกว่า 7.45 เรียกว่า alkalemia (Halperin and Goldstein, 1999) ซึ่งในภาวะปกติร่างกายได้รับกรดเพิ่มขึ้นทั้งจากภายใน และภายนอก ร่างกาย

2.3.1 สาเหตุที่ทำให้ร่างกายเป็นกรด

2.3.1.1 อาหาร

โปรตีน ฟอสโฟลิพิด และกรดนิวคลีอิก เป็นแหล่งของกรดที่สำคัญของร่างกายจะได้รับจากภายนอก นอกจากนี้เกลือคลอไรด์ของไลซีนจะถูกแมแทบอลิซึมเป็นกรดไฮโดรคลอริก และยูเรีย รวมทั้งฟอสโฟเอสเทอร์ของโปรตีน และกรดนิวคลีอิกจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดฟอสฟอริก ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส และกรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบเช่น เมทไธโอนีน (methionine) ซีสตีล (cystine) จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นกรดกำมะถัน หรือกรดซัลฟูริก ซึ่งกรดประมาณ 20-30 mEq ที่ผลิตขึ้นแต่ละวัน ส่วนใหญ่มาจากอาหารพวกโปรตีน (สัญญา, 2535)

2.3.1.2 กระบวนการเมแทบอลิซึม

การผลิตพลังงานเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดของเซลล์ กระบวนการนี้ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจน และผลผลิตสุดท้ายที่ได้คือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซนี้เมื่อละลายน้ำจะได้เป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งแตกตัวได้ $\text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ ด้วยเหตุนี้การผลิต CO_2 จึงทำให้ร่างกายได้รับกรดอยู่ตลอดเวลา ซึ่ง H_2CO_3 ที่แตกตัวได้ CO_2 จัดเป็นกรดระเหยได้สามารถขับออกทางปอดโดยการหายใจได้ และเป็นสาเหตุที่ทำให้ร่างกายเป็นกรดถ้าระบบการหายใจไม่ดีพอ กระบวนการออกซิเดชันสารอาหารบางอย่างที่ไม่สมบูรณ์จะทำให้มีกรดอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นใน

ร่างกาย (สัจญา, 2535) ส่วนกรดที่ระเหยไม่ได้เป็นกรดที่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น CO_2 ได้จะขับออกทางไตในรูปของกรดไตตรงได้และเกลือแอมโมเนีย กรดเหล่านี้เกิดจาก

- กำมะถันที่มีอยู่ในกรดอะมิโนบางชนิด ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็น H_2SO_4
- ฟอสโฟโปรตีนและฟอสโฟไลปิด จะสลายและเปลี่ยนได้เป็น H_2PO_4
- กรดอินทรีย์อื่น ๆ อีกจำนวนเล็กน้อย ที่เกิดจากการสลายสารอาหารในร่างกาย เช่น กรดแลคติก กรดคีโต กรดยูริก (นีโบล, 2542)

2.3.1.3 กระบวนการหายใจ

ภาวะที่เลือดมีความดันย่อยของออกซิเจนในเลือดแดง (pCO_2) สูงขึ้น โดยทั่วไปไม่ได้เกิดจากการที่อัตราการสร้าง CO_2 จากกระบวนการเมแทบอลิซึมเพิ่มมากขึ้น แต่เกี่ยวข้องกับ ความผิดปกติในการกำจัด CO_2 ออกทางการหายใจ สาเหตุที่สำคัญ ได้แก่ ระบบประสาทส่วนกลาง ถูกกดด้วยสารเคมีหรือถูกทำลาย โรคเกี่ยวกับระบบประสาทรวมกล้ามเนื้อ โครงสร้างของทรวงอกผิดปกติ ความผิดปกติของการเมแทบอลิซึม หลอดลมอุดตันเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง ความผิดปกติของสัดส่วนการระบายอากาศต่อการไหลเวียนเลือด (สัจญา, 2535)

2.3.1.4 การถ่ายอุจจาระ

อุจจาระมีคุณสมบัติเป็นด่างเล็กน้อยร่างกายเสียไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และด่างตัวอื่น ๆ ไปกับอุจจาระประมาณ 20-30 mEq ในสภาวะที่อวัยวะเสียด่างในอุจจาระจะเพิ่มขึ้นเป็น 10 เท่าของค่าปกติแล้วแต่ความรุนแรง การสูญเสียด่างทำให้ร่างกายมีกรดเพิ่มมากขึ้นอีกทางหนึ่งด้วย นั่นคือถ้าด่างลดลงจะมีการแตกตัวของกรดเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) และด่าง (หรือเกลือของกรด) มากขึ้น ทำให้ไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นในร่างกาย (สัจญา, 2535)

2.3.2 ภาวะการรักษาสมดุลกรด-ด่างในร่างกาย

ร่างกายจะมีกรดเกิดขึ้นตลอดเวลาจึงมีกลไกต่าง ๆ ที่ช่วยควบคุมภาวะกรด-ด่าง ดังนี้

2.3.2.1 กลไกการบัฟเฟอร์ (Buffering mechanism) แบ่งเป็น

1. กลไกบัฟเฟอร์ทางเคมี เป็นกลไกอันดับแรกในร่างกายใช้สำหรับควบคุม pH ได้อย่างรวดเร็วฉับพลัน จากนั้นแล้วจึงกำจัด H^+ ส่วนเกินออกไปทางการหายใจ หรือทางปัสสาวะในเวลาต่อมา ระบบบัฟเฟอร์ที่สำคัญของร่างกาย 4 ระบบแรกคือ

1.1. ไบคาร์บอเนต (Bicarbonate; $\text{HCO}_3^-/\text{H}_2\text{CO}_3$) เป็นบัฟเฟอร์ที่มีอยู่มากที่สุดในของเหลวนอกเซลล์ (Extracellular fluid; ECF) มีประสิทธิภาพในการบัฟเฟอร์ดีที่สุด เพราะเมื่อเกิด H^+ ขึ้น ก็จะเข้ามารวมกับ HCO_3^- ได้เป็น H_2CO_3 และจะสลายเป็น CO_2 และ H_2O อย่างรวดเร็ว และขับออกหมดทางลมหายใจซึ่งช่วยรักษาสมดุลกรด-ด่างไว้ได้

1.2. ฟอสเฟต (Phosphate; $\text{HPO}_4^-/\text{H}_2\text{PO}_4^-$) เป็นบัฟเฟอร์ที่มีอยู่มากในเซลล์โดยเฉพาะในเซลล์เม็ดเลือดแดง และเซลล์ของทิวบูล (tubule) แต่ใน ECF จะมีอยู่น้อยมาก เนื่องจากปริมาณของฟอสเฟตมีอยู่น้อยกว่าระบบไบคาร์บอเนตมาก บทบาทจึงมีน้อยกว่าและมีความสำคัญเฉพาะกรณีเท่านั้น เช่นเป็นบัฟเฟอร์สำคัญในทิวบูลของไต และการที่มีอยู่มากภายในเซลล์กระดูก จึงมีการขับออกมาเพิ่มขึ้นพร้อมกับ Ca^{++} , Na^+ และ K^+ ในภาวะที่เกิดกรดเรื้อรัง

1.3. โปรตีน (Protein/H.Proteins) โปรตีนในเซลล์ และในพลาสมา รวมทั้งฮีโมโกลบิน มีฤทธิ์เป็นบัฟเฟอร์ เพราะในอนุกรมมี titratable group หลายชนิดทั้งกลุ่มที่ให้ H^+ และกลุ่มที่รับ H^+ แต่อย่างไรก็ดี โปรตีนมีฤทธิ์บัฟเฟอร์น้อยกว่าฮีโมโกลบิน และยังมีปริมาณในเลือดน้อยกว่าด้วย

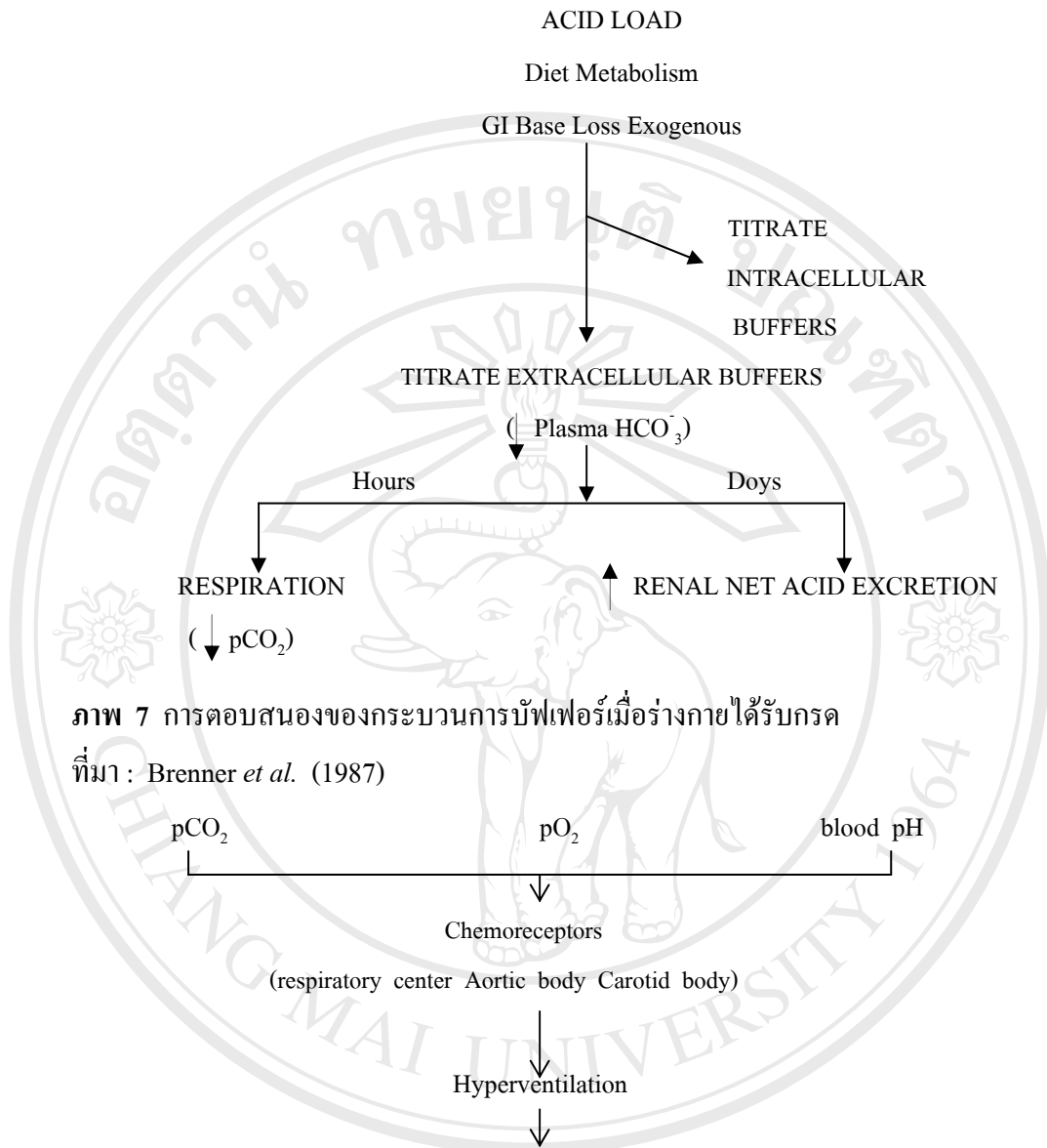
1.4. ฮีโมโกลบิน (Hb/HHb) เป็นบัฟเฟอร์ที่สำคัญในเม็ดเลือดแดง ประกอบด้วยเปปไทด์ 4 สาย แต่ละสายมีฮิสติดีนอยู่มาก

2. การบัฟเฟอร์ภายในเซลล์ และการแลกเปลี่ยนไอออน ในภาวะที่เกิดกรดหรือด่างมากเกินไปในเลือด ในปัจจุบันเชื่อว่าการบัฟเฟอร์ทั้งหมดในร่างกายจะเกิดขึ้นราว 55-60 เปอร์เซ็นต์ การบัฟเฟอร์ต้องใช้เวลากว่าจะสมดุล เนื่องจากต้องให้เวลาที่ H^+ ซึมเข้าเซลล์หรือปล่อยออกมา รวมกับการแลกเปลี่ยนกับไอออนต่าง ๆ ซึ่งมีได้ 3 วิธี คือ 1) แลกเปลี่ยนระหว่าง H^+ กับ K^+ 2) แลกเปลี่ยนระหว่าง H^+ กับ Na^+ 3) แลกเปลี่ยนระหว่าง Cl^- กับ HCO_3^-

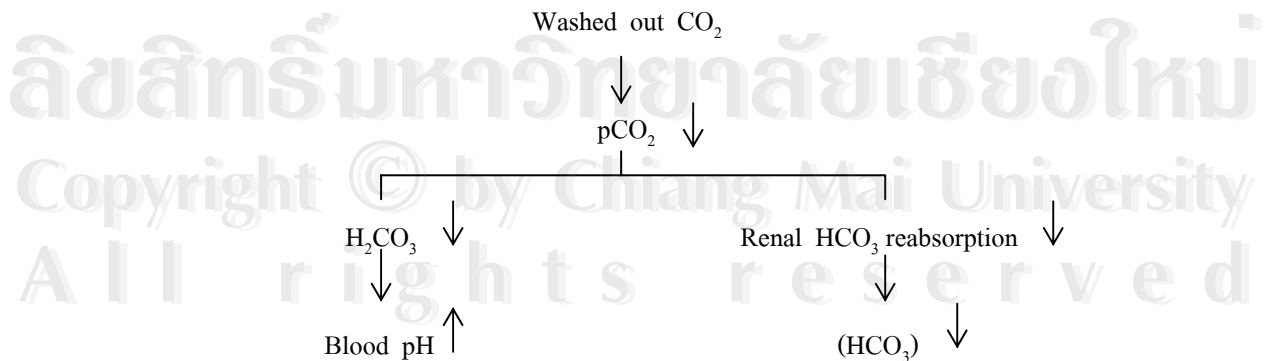
ในภาวะที่เป็นกรดเรื้อรัง (chronic acidosis) เซลล์กระดูกจะมีบทบาทในการช่วยลดความเป็นกรดได้มาก แคลเซียมฟอสเฟตจะละลายออกมาใช้แทน K^+ หรือ Na^+ และถ้าเกิดภาวะดังกล่าวนานไปเรื่อย ๆ จะทำให้กระดูกบางและหักง่าย การตอบสนองของกระบวนการบัฟเฟอร์เมื่อร่างกายได้รับกรดค้างแสดงในภาพ 7 (อุดม, 2526)

2.3.2.2 กลไกการหายใจ (Respiratory mechanism)

ระบบหายใจมีความสำคัญในการรักษา pH ของร่างกาย โดยการควบคุมปริมาตรของ H_2CO_3 ระบบหายใจทำหน้าที่โดยปอดและทางเดินหายใจ (นิโลบล, 2542) การเปลี่ยนแปลงของ pH นอกเซลล์ทำให้ pH ในเซลล์เปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เมื่อ H^+ เพิ่มขึ้นทั้งในและนอกเซลล์ เซลล์ที่ควบคุมการหายใจจะถูกกระตุ้นให้มีการหายใจแรง และลึกเพื่อขับกรดคาร์บอนิกออกไป pH จะกลับเป็นปกติ ระบบการหายใจจะป้องกันมิให้เกิดการเสียสมดุลได้ภายในเวลาไม่กี่นาที (สง่า, 2526) เช่น ในภาวะที่เลือดคั่งทำให้ pH ของเลือดลดต่ำลง จะกระตุ้นให้มีการหายใจหอบแรง และเร็วจนขับ CO_2 ออกไปโดยรวดเร็วเป็นผลให้ H_2CO_3 ในร่างกายลดลงและทำให้ pH ของเลือดเพิ่มขึ้นได้ ขณะเดียวกัน pCO_2 ที่ลดลงเป็นผลทำให้ไตดูดกลับ HCO_3^- ลดลง เพื่อให้ได้ตามสัดส่วนตามกันกับ pCO_2 ที่ลดลงทำให้ pH เปลี่ยนแปลงไปไม่มาก (ภาพ 8) (นิโลบล, 2542)



ภาพ 7 การตอบสนองของกระบวนการบัฟเฟอร์เมื่อร่างกายได้รับกรด
ที่มา : Brenner *et al.* (1987)



ภาพ 8 แสดงกลไกการหายใจที่ช่วยควบคุม pH ของเลือดให้คงที่
ที่มา : นีโลบล (2542)

2.3.2.3 กลไกทางไต (Renal mechanism)

กลไกทางไตเป็นกลไกที่สำคัญที่สุด โดยสามารถลดอันตรายจากภาวะกรดคั่งจากการเมแทบอลิซึมได้ดีที่สุด และชดเชยกลไกอื่น ๆ ได้หมด แต่ต้องใช้เวลาานกว่าคือ เป็นชั่วโมงไปจนถึงหลายวัน โดยทั่วไปเริ่มจาก 2-3 ชั่วโมง ไปจนถึง 2-4 วัน จึงจะมีการควบคุมได้เต็มที่ (นิโลบล, 2542) ทั้งนี้การควบคุม pH ของร่างกายทางไตทำได้โดยการควบคุมการขับไฮโดรเจนไอออน (ภาพ 9) ทำได้ 3 วิธีคือ

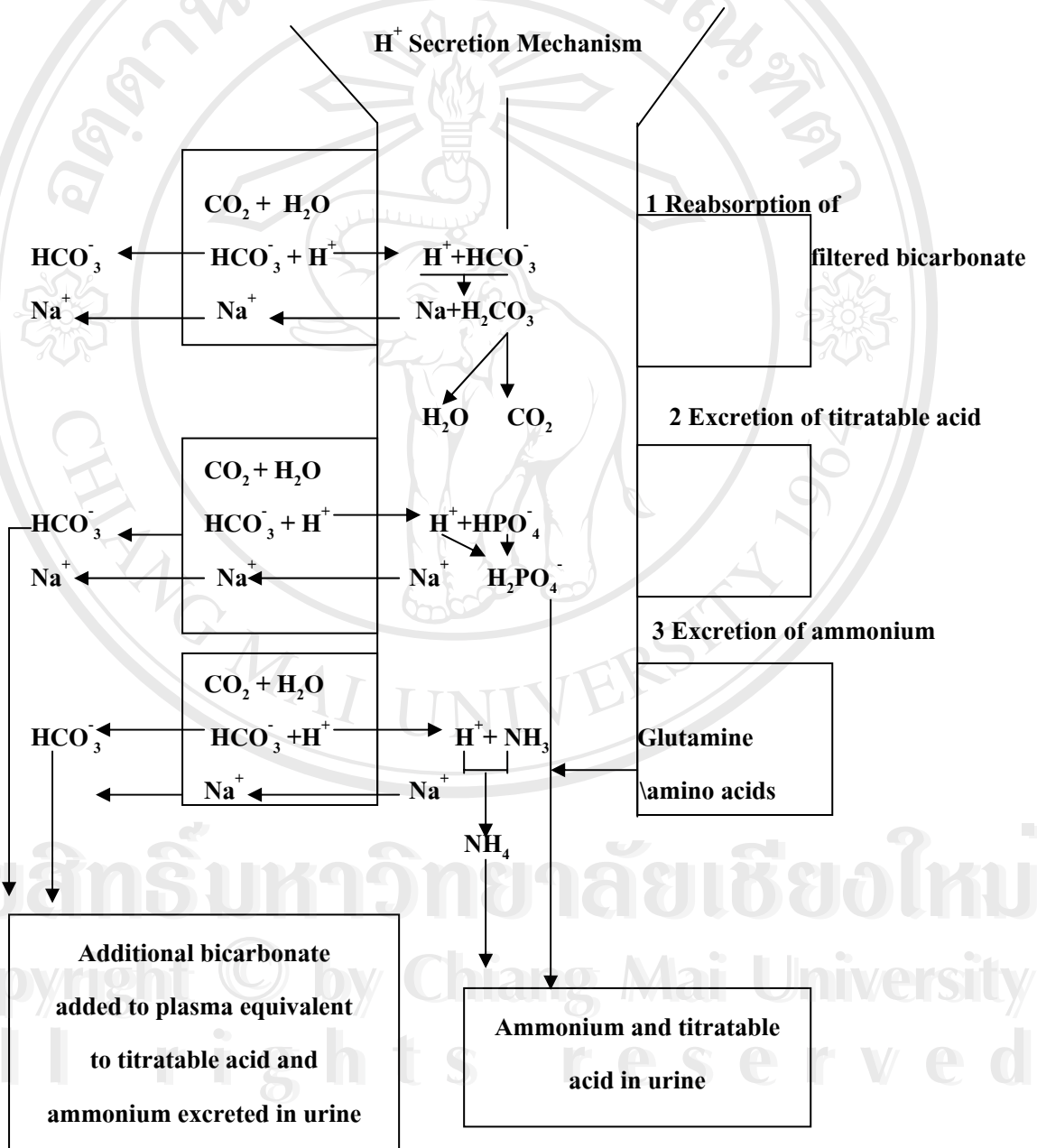
1. การขับไฮโดรเจนไอออนเพื่อแลกเปลี่ยนกับการดูดซึมโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ถูกกรองกลับหมด ในเซลล์หลอดเลือดฝอยของไตและของ collecting duct คาร์บอนไดออกไซด์ทำปฏิกิริยากับน้ำโดยอาศัย carbonic anhydrase เกิดกรดคาร์บอนิก ซึ่งมีกลายตัวเองเป็นไฮโดรเจนไอออน และไบคาร์บอเนต ที่หลอดเลือดฝอยของไตส่วนต้นไฮโดรเจนไอออนจะออกนอกเซลล์เพื่อแลกเปลี่ยนกับโซเดียมใน filtrate และเข้าทำปฏิกิริยากับไบคาร์บอเนตเกิดกรดคาร์บอนิกซึ่งจะกลายตัวเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำออกมาในปัสสาวะ บางส่วนซึมกลับเข้าเซลล์ใหม่ไบคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นในเซลล์ออกไปอยู่ในเลือดรวมกับโซเดียม

ดังนั้นไฮโดรเจนไอออนที่ออกมาจึงสามารถลดโซเดียมไบคาร์บอเนตใน filtrate ได้เท่ากับจำนวนที่ถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด ภาวะกรดจึงไม่ได้ลดน้อยลง แต่อย่างไรก็ดีในภาวะที่ขาดโปแตสเซียม และ pCO_2 เพิ่มขึ้น การขับไฮโดรเจนไอออนโดยวิธีนี้จะเพิ่มมากกว่าปกติที่เซลล์ของ collecting duct โซเดียมไบคาร์บอเนตที่เลือดลดประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ จะถูกดูดซึมกลับจนหมด ไตไม่ยอมเสียโซเดียมไบคาร์บอเนตไปเลย โดยการขับไฮโดรเจนหรือโปแตสเซียมมาแลกเปลี่ยน (สง่า, 2526)

2. การขับไฮโดรเจนไอออนออกมาในรูปของกรดไตเตรต (titratable acid) ผลิตโดยเซลล์หลอดเลือดฝอยของไต และ collecting duct ซึ่งผลิตได้มากกว่า titratable acid ได้แก่ไฮโดรเจนหรือกรดอิสระ ประกอบด้วย NaH_2PO_4 เป็นส่วนใหญ่ และครีอะตินีนเป็นส่วนน้อย การที่สร้าง titratable acid ทำให้ pH ของปัสสาวะลดต่ำและต่ำที่สุดเท่าที่เซลล์จะทำได้ โดยในขณะที่เลือดเป็นกรด pH ของปัสสาวะเท่ากับ 4.5 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในปัสสาวะเมื่อ pH 4.5 จะสูงกว่าความเข้มข้นของไอออนในเลือดถึง 1,000 เท่า เซลล์ไม่สามารถทำไฮโดรเจนไอออนในปัสสาวะให้เข้มข้นมากกว่านี้เพราะเซลล์ทน pH ที่ต่ำกว่านี้ไม่ได้ การสร้าง titratable acid 1 mEq เท่ากับการเพิ่มโซเดียมไบคาร์บอเนตให้กับเลือด 1 mEq (สง่า, 2526)

3. การขับไฮโดรเจนไอออนออกมาในรูปแอมโมเนียในปัสสาวะ และแอมโมเนียบัฟเฟอร์ ราว 60 เปอร์เซ็นต์ของไฮโดรเจนไอออนที่ขับออกมาทางปัสสาวะจะรวมกับแอมโมเนีย (NH_3) ได้เป็นเกลือแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) ปัจจุบันนี้เชื่อว่าแอมโมเนียถูกสังเคราะห์ขึ้นที่

ทูลตอนต้น ส่วนใหญ่ได้จากการสลายกลูตามีน (และอาจได้จากกรดอะมิโนอื่นเล็กน้อย เช่น ไกลซีน และอะลานีน) ดังสมการ 6 และ 7 (นีโลบล, 2542)



ภาพ 9 แสดงกลไกการขับไฮโดรเจนไอออน (H⁺) ของไต

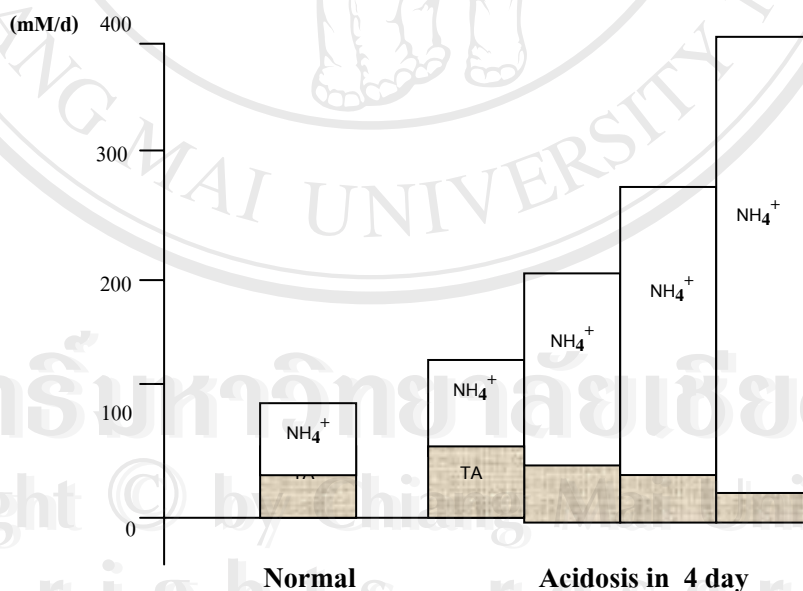
ที่มา : สง่า (2526)

การควบคุมอัตราการสร้างของแอมโมเนีย ในภาวะปกติแอมโมเนียจะถูกขับออกมาในปัสสาวะประมาณวันละ 30-50 มิลลิโมล ถ้าร่างกายอยู่ในภาวะ acidosis แอมโมเนียจะถูกสร้างเพิ่มมากขึ้น (ภาพ 10) และในภาวะ alkalosis การสร้างแอมโมเนียแทบจะไม่มีเลย ดังนั้นจึงเข้าใจว่าแอมโมเนียจะสร้างขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับ pH ของ tubular fluid ถ้า tubular fluid เป็นกรดมากเท่าใด แอมโมเนียจะถูกสร้างและขับออกมากขึ้นเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อจะจับ H^+ ไว้และเปลี่ยนเป็นแอมโมเนียมไอออน จากการศึกษาในภาวะปกติ (normal acid-base balance) และในภาวะ acidosis พบว่า tubular fluid จะมีความเป็นกรดมากกว่า peritubular fluid หรือส่วนของของเหลวระหว่างเซลล์ (interstitial fluid; ISF) ของไต แอมโมเนียจะถูกขับออกมากขึ้น (อุดม, 2526)

การหลั่งแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้น (Pitt, 1963) เมื่อ

- pH ของปัสสาวะยิ่งต่ำมากแอมโมเนียยิ่งซึมผ่านผนังเซลล์เข้ามาอยู่ในน้ำกรอง และถูกจับเป็นแอมโมเนียมไอออนได้มากขึ้น
- ภาวะกรดที่เพิ่มขึ้นก็กระตุ้นการผลิตแอมโมเนียในเซลล์เพิ่มขึ้น
- ปัสสาวะไหลผ่าน collecting duct ได้มากเท่าใด ก็จะพาแอมโมเนียมไอออนที่เกิดขึ้นออกไปได้เร็วเท่านั้น แอมโมเนียที่เกิดขึ้นใหม่มีโอกาสซึมผ่านผนังเซลล์มาอยู่ในปัสสาวะมากขึ้น

Urinary excretion



ภาพ 10 แสดงค่ากรดไตเตรต และ NH_4^+ ในภาวะปกติ และในภาวะ acidosis โดยที่ค่ากรดไตเตรต ในภาวะ acidosis จะขับออกมากที่สุดในวันที่ 2 จากนั้นค่าจะคงที่แต่ค่า NH_4^+ ยังคงเพิ่มขึ้น
ที่มา : Smith (1980)

2.3.3 ของเหลวในร่างกาย

ปริมาตรของน้ำในร่างกายมนุษย์มีค่าประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวในเพศชาย และ 52 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวในเพศหญิง (Collin, 1983) จึงทำให้น้ำเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิต ซึ่งปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ในร่างกายล้วนอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง เซลล์ต่าง ๆ ภายในอวัยวะของมนุษย์ และสัตว์อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นน้ำ และมีอิเล็กโทรไลต์เจือปนอยู่ ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในส่วนที่อยู่นอกเซลล์เปลี่ยนแปลงมากเกินไปที่ระบบปรับสมดุลของร่างกายจะทำให้ก็จะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบของเซลล์เป็นผลให้การทำงานของเซลล์ไม่สมบูรณ์ (สง่า, 2526)

น้ำหรือของเหลวในร่างกายจำแนกได้เป็น 2 แหล่ง (สง่า, 2526) คือ

1. ของเหลวนอกเซลล์ (extracellular fluid; ECF) ประมาณ 1 ส่วน 3 ของของเหลวทั้งหมดในร่างกาย หรือประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ของเหลวส่วนนี้แยกออกได้อีก 3 ส่วนคือ

1.1. พลาสมา (plasma) คือ ส่วนที่อยู่ภายในหลอดเลือดซึ่งไม่รวมเม็ดเลือดพบประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักตัว มีองค์ประกอบเป็นโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) เป็นจำนวนมาก แต่โปแตสเซียมไอออน (K^+) มีอยู่น้อย ส่วนโปรตีนและไอออนอื่นมีอยู่บ้าง

1.2. ส่วนของของเหลวระหว่างเซลล์ (interstitial fluid; ISF) เป็นของเหลวที่แทรกอยู่ระหว่างเซลล์

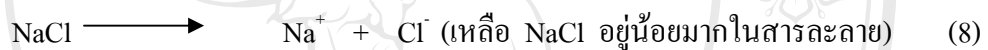
1.3. ของเหลวในช่องพิเศษ (transcellular fluid) เป็นของเหลวอีกส่วนหนึ่งของของเหลวระหว่างเซลล์ ซึ่งแยกออกมาจากช่องว่างภายนอกเซลล์ (extracellular space) ช่องว่างนี้จะถูกล้อมรอบด้วยชั้นของเซลล์บุผิว บางช่องสามารถเปิดออกสู่ภายนอกร่างกายได้ ได้แก่ ของเหลวในทางเดินอาหาร ทางเดินปัสสาวะ น้ำกาม เหงื่อ และน้ำตา เป็นของเหลวที่สามารถออกสู่ร่างกายได้ และส่วนที่ไม่สามารถออกสู่ภายนอกร่างกายได้ ได้แก่ ของเหลวร่วมไขสันหลัง (cerebrospinal fluid; CSF) ของเหลวในช่องว่างระหว่างเยื่อปอด ของเหลวในลูกตา ของเหลวในช่องว่างระหว่างเยื่อหัวใจ ของเหลวในช่องท้อง และน้ำไขข้อ ของเหลวในส่วนที่ 2 และ 3 นี้รวมกันจะมีปริมาณประมาณ 15.5 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตัว มีอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ใกล้เคียงกับพลาสมา ยกเว้นโปรตีนที่พบได้น้อยมาก

2. ของเหลวในเซลล์ (intracellular fluid; ICF) มีประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว ประกอบด้วย K^+ เป็นจำนวนมาก ส่วนโมเลกุลที่มีประจุนี้ประกอบด้วยฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-}) โปรตีน (protein) และซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-}) เป็นส่วนใหญ่

2.3.4 อิเล็กโทรไลต์ในร่างกาย

อิเล็กโทรไลต์ (Electrolytes) หรือสารละลายไฟฟ้า คือสารที่ละลายน้ำได้ แยกตัวให้อิออนหรือกลุ่มของไอออน (เช่น SO_4^{2-} และ HCO_3^-) และสามารถนำไฟฟ้าได้ อิเล็กโทรไลต์ใด ๆ ก็ตามเมื่อละลายได้ในน้ำจะแยกตัวให้ทั้งไอออนบวก (cations) และไอออนลบ (anions) ในปริมาณที่เท่ากันเสมอ โดยทั่วไปส่วนประกอบที่เป็นโลหะ เช่น Na, K, Ca และ Mg จะแยกตัวได้เป็นไอออนบวก เช่น Na^+ , K^+ , Ca^{2+} และ Mg^{2+} ขณะที่ส่วนประกอบที่เป็นอโลหะหรืออนุมูลของมันจะแสดงคุณสมบัติเป็นไอออนลบ เช่น Cl^- , F^- , Br^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- และ PO_4^{3-} ซึ่งอิเล็กโทรไลต์แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ

1. เป็นสารประกอบพวกเกลือ ได้แก่ NaCl , MgSO_4 , MgCl_2 , CaCl_2 , CaSO_4 , CaCO_3 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, KCl_2 และ KHCO_3 เป็นต้น เกลือกลุ่มนี้บางตัวถ้ามีความเข้มข้นต่ำสามารถแยกตัวได้อย่างสมบูรณ์เมื่อละลายน้ำ ได้แก่ NaCl และ KCl ส่วนตัวอื่น ๆ เช่น MgCl_2 , CaCl_2 และ CaSO_4 แยกตัวได้ แต่ไม่สมบูรณ์ถึงแม้ภาวะที่มีความเข้มข้นต่ำ



2. สารประกอบที่เป็นกรด เช่น HCl , H_2SO_4 , H_2CO_3 , H_3PO_4 , HNO_3 และกรดอินทรีย์ (organic acids) เช่น กรดแลกติก (lactic acids) คีโตนบอดี้ (ketone bodies) และกรดอะซิติก (acetic acids) กรดแก่ เช่น HCl จะแยกตัวอย่างสมบูรณ์ในภาวะที่ความเข้มข้นไม่สูงมากนัก ในขณะที่กรดอ่อน เช่น กรดอินทรีย์แยกตัวได้บางส่วนเท่านั้น

3. สารประกอบที่เป็นเบส เช่น NaOH , KOH , NH_3 , NH_4OH และ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ เบสแก่ เช่น NaOH และ KOH แยกตัวได้อย่างสมบูรณ์ในน้ำ ในขณะที่เบสอ่อน เช่น $\text{Ca}(\text{OH})_2$ และ NH_4OH แยกตัวได้เพียงบางส่วน สำหรับ NH_3 ละลายน้ำได้เป็น $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ เช่นเดียวกับ NH_4OH

จะเห็นว่าอิเล็กโทรไลต์ล้วนเป็นสารประกอบทั้งสิ้น เมื่ออิเล็กโทรไลต์ละลายน้ำจะแยกตัวให้ทั้งไอออนบวกและไอออนลบ อิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญในร่างกาย ได้แก่ Na^+ , Cl^- , K^+ , Ca^{2+} , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , H^+ และไอออนของกรดอินทรีย์ต่าง ๆ เป็นต้น

เนื่องจากอิเล็กโทรไลต์แต่ละตัวมีความสำคัญต่อร่างกายแตกต่างกัน การควบคุมอิเล็กโทรไลต์ในร่างกายนั้นจึงมีกลไกที่ซับซ้อน และอาจแตกต่างกันไปบ้างในแต่ละตัว (สัญญาณ, 2535)

2.3.5 อิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญในร่างกาย

2.3.5.1 โซเดียม (Sodium)

โซเดียมที่อยู่ในร่างกายนั้นส่วนใหญ่อยู่ในส่วนของของเหลวภายนอกเซลล์ (วันดี, 2523) ส่วนมากร่างกายได้รับโซเดียมจากอาหารซึ่งเฉลี่ยประมาณ 69-208 mEq ต่อวัน และโซเดียมจะถูกดูดซึมได้เกือบหมดที่ระบบทางเดินอาหาร ส่วนเกินจะถูกขับออกมาทางไต และมีการขับออกทางเหงื่อพร้อมกับคลอไรด์ (Collin, 1983) ซึ่งบทบาทของโซเดียมในร่างกายได้แก่

1. โซเดียมเป็นไอออนที่มีความเข้มข้นสูงสุดภายนอกเซลล์ จึงเป็นตัวสำคัญที่กำหนดออสโมแลลิตีของของเหลวภายนอกเซลล์ โซเดียมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้น้อย จึงเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดความสมดุลของออสโมแลลิตีระหว่างภายในกับภายนอกเซลล์ กระบวนการควบคุมปริมาตรของเหลวของเซลล์รวมทั้งของเหลวทั้งหมดในร่างกาย ผ่านกระบวนการควบคุมความเข้มข้นและปริมาณของโซเดียมในพลาสมาเป็นส่วนใหญ่
2. การควบคุมคั่งหลังกรดที่ไตเกี่ยวข้องกับ การควบคุมการขนส่งโซเดียมผ่านหลอดไตฝอยส่วนปลาย การดูดกลับโซเดียมจะทำให้มีการคั่งหลังกรดออกสู่โพรงหลอดไตฝอยส่วนปลายในลักษณะแลกเปลี่ยนกัน
3. ควบคุมสมดุลโปแตสเซียม และอิเล็กโทรไลต์อื่น ๆ สมดุลของอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ ภายนอกเซลล์ถูกควบคุมโดยกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งโซเดียมในอวัยวะต่าง ๆ ได้แก่ ระบบทางเดินอาหาร ระบบขับถ่ายปัสสาวะ และการแลกเปลี่ยนระหว่างภายในกับภายนอกเซลล์ คุณสมบัติเหล่านี้คล้ายกับการควบคุมปริมาตรของของเหลวภายนอกเซลล์
4. การดูดซึมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และกรดอะมิโน การขนส่งน้ำตาลกลูโคส และกรดอะมิโนในระบบทางเดินอาหารและหลอดไต เป็นกระบวนการที่อาศัยพลังงานภายในเซลล์ควบคู่กับการขนส่งโซเดียม (Na-dependent active transport) โดยเฉพาะในช่วงที่แพร่เข้าสู่เซลล์
5. โซเดียมเป็นไอออนที่สำคัญที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า ขณะเกิดศักยะเพื่อทำงานของเซลล์กล้ามเนื้อทุกชนิด และเซลล์ประสาท (สัญญา, 2535)

2.3.5.2 โปแตสเซียม (Potassium)

โปแตสเซียมเป็นอิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญภายในเซลล์ เนื่องจากมีปริมาณมากจึงเป็นตัวกำหนด ออสโมแลลิตีของของเหลวภายในเซลล์ (สง่า, 2526) ดูดซึมที่ลำไส้เล็ก และถูกขับออกทางไต (นีโลบล, 2542) ซึ่งบทบาทของโปแตสเซียมในร่างกาย ได้แก่

1. กำหนดออสโมแลลิตีและปริมาตรของเซลล์ คุณสมบัตินี้เกิดจากโปแตสเซียมเป็นตัวถูกละลายที่มีมากที่สุดภายในเซลล์ ปริมาณและความเข้มข้นของโปแตสเซียม ภายในเซลล์เองก็ถูกควบคุมให้คงที่อยู่ได้ด้วยกระบวนการต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานของเอนไซม์

$\text{Na}^+\text{-K}^+$ ATPase ทำให้ความเข้มข้นของโปแตสเซียม ออสโมแลลิตี และปริมาตรของเซลล์ถูกควบคุมให้คงที่อยู่ได้

2. การควบคุมกรด-ด่าง การขนส่งไฮโดรเจนไอออนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์นั้นจะแลกเปลี่ยนกับการขนส่ง K^+ ในทิศทางตรงกันข้ามกัน กลไกในการขนส่งนี้มีรายละเอียดอย่างไรไม่แน่ชัด ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้ภาวะที่เลือดเป็นด่างระดับโปแตสเซียมในเลือดจะต่ำเพราะว่าถูกนำเข้าสู่เซลล์มาก และในทางตรงกันข้ามในภาวะที่เลือดเป็นกรด ระดับโปแตสเซียมในเลือดจะสูงขึ้นเพราะมี K^+ ออกจากเซลล์เพิ่มขึ้นถ้าไม่มีการสูญเสียทางอื่น

3. การทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ โปแตสเซียมทำหน้าที่คล้ายโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์หลายตัวภายในเซลล์ โดยเฉพาะเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกรดนิวคลีอิก ด้วยเหตุนี้โปแตสเซียมจึงเกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีน และการเจริญเติบโตของเซลล์

4. ศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ เซลล์ประสาทและเซลล์กล้ามเนื้อมีศักย์ไฟฟ้าในขณะพักอยู่ค่าหนึ่ง (resting membrane potential) ศักย์ไฟฟ้านี้เกิดจากเยื่อหุ้มเซลล์มีความสามารถดูดซึมโปแตสเซียมไอออนสูงกว่าไอออนอื่น ๆ ดังนั้นค่าศักย์ไฟฟ้าของเซลล์เหล่านี้ในขณะที่พักจึงเกิดการกระจายตัวของโปแตสเซียมไอออนระหว่างภายในกับภายนอกเซลล์ นอกจากนี้เมื่อเกิดศักยะพ้องงาน (action potential) โปแตสเซียมไอออนช่วยทำให้เกิดการรีโพลาริเซชัน (repolarization) การเกิดและการแผ่ของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และสัญญาณประสาท ล้วนแต่อาศัยการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเยื่อเซลล์ทั้งสิ้น

5. การขนส่งไอออนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ โปแตสเซียมไอออนเกี่ยวข้องกับการขนส่ง H^+ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์แล้ว ยังควบคุมสมดุลของไอออนตัวอื่น ๆ ภายในเซลล์ โดยเฉพาะ Ca^{2+} และ Na^+ ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่มีการแลกเปลี่ยนกันโดยมีตัวพาเฉพาะ และมักอาศัยพลังงานภายในเซลล์ด้วย การขนส่งที่สำคัญคือ การนำโปแตสเซียมไอออนเข้าสู่เซลล์แลกเปลี่ยนกับการขับโซเดียมไอออน ออกมาโดยการสลายพลังงานด้วยเอนไซม์ $\text{Na}^+\text{-K}^+$ ATPase ในสัดส่วน $\text{Na}^+ : \text{K}^+$ ประมาณ 3 : 2 สัดส่วนนี้อาจแตกต่างกันออกไปขึ้นกับชนิดของเซลล์ (สัญญาณ, 2535)

2.3.5.3 คลอไรด์ (Chloride)

คลอไรด์เป็นไอออนที่มีมากในน้ำนอกเซลล์ ส่วนใหญ่จะมีคู่กันกับโซเดียม และระดับคลอไรด์ในน้ำเลือดจะแปรตามระดับโซเดียมในน้ำเลือดด้วย คลอไรด์ถูกดูดซึมผ่านลำไส้เล็กส่วนต้น โดยการซึมผ่านตามโซเดียมเข้าไป มีการขับถ่ายออกทางเหงื่อ อุจจาระ และปัสสาวะร่วมกับโซเดียมและโปแตสเซียมไอออน ซึ่งบทบาทของคลอไรด์ในร่างกายได้แก่

เป็นส่วนประกอบของกรดเกลือในน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร

ทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ของเอนไซม์อะไมเลส

มีบทบาทเกี่ยวกับเรื่อง Chloride shift ในการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปอด และเนื้อเยื่อ

มีบทบาทร่วมกับโซเดียม ทำหน้าที่เกี่ยวกับการกระจายของน้ำ ในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายและเกี่ยวกับแรงดันออสโมแลลิตี (นิโบล, 2542)

2.3.6 การควบคุมน้ำและอิเล็กโทรไลต์ในร่างกาย

2.3.6.1 ระบบควบคุมอิเล็กโทรไลต์ในร่างกาย

เมื่อพิจารณาอย่างง่าย ๆ จะพบว่าในระบบใดระบบหนึ่งที่เป็นระบบเปิดซึ่งสามารถติดต่อกับสิ่งแวดล้อมรอบ ๆ ตัวได้นั้น การคงตัวของตัวแปรใด ๆ ก็ตามในระบบขึ้นกับความสมดุลของสิ่งที่เข้ามาในระบบ (input) กับสิ่งที่ออกจากระบบ (output) เมื่อพิจารณาถึงปริมาณของน้ำในร่างกายตลอดจนความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์พบว่าค่อนข้างคงที่อยู่ตลอดเวลาทั้งนี้ต้องเกิดจากการที่ร่างกายได้รับน้ำ และอิเล็กโทรไลต์ในอัตราที่เท่ากับร่างกายต้องเสียสารดังกล่าวนี้ไปนั่นเอง (สัจญา, 2530)

2.3.6.2 การได้รับน้ำและอิเล็กโทรไลต์

ช่องทางที่สารสามารถเข้า-ออกจากร่างกายเพื่อรักษาสมดุลของน้ำ และอิเล็กโทรไลต์โดยสรุปมีดังนี้ (สัจญา, 2530)

1. การได้รับผ่านระบบทางเดินอาหารเป็นระบบที่สำคัญที่สุดในการได้รับน้ำและอิเล็กโทรไลต์ในภาวะปกติ
2. การให้สารเหลวทางหลอดเลือด เช่น การให้น้ำเกลือ และการฉีดยา เป็นต้น
3. ได้รับจากกระบวนการเมแทบอลิซึมในร่างกาย เช่น กระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ดังสมการ 10 ซึ่งจะได้น้ำ 6 โมเลกุล



2.3.6.3 การสูญเสียน้ำและอิเล็กโทรไลต์

1. การสูญเสียโดยผ่านระบบทางเดินอาหาร ในภาวะปกติจะออกมากับอุจจาระ ซึ่งเป็นทางที่เกิดการสูญเสียน้ำและอิเล็กโทรไลต์ได้ สำหรับปริมาณของน้ำและอิเล็กโทรไลต์ที่ร่างกายสูญเสียนั้นขึ้นอยู่กับความรุนแรงของความผิดปกติที่จะเกิดขึ้น และปริมาณของน้ำกับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นส่วนประกอบของของเหลวในกระเพาะและในลำไส้ ซึ่งในภาวะที่ผิดปกติจะสูญเสียน้ำออกทางปากโดยการอาเจียน และการเสียน้ำออกทางทวารหนักในภาวะอุจจาระร่วง

2. การสูญเสียโดยผ่านการขับเหงื่อ (ในคน) โดยทั่วไปเหงื่อนั้นเป็นสารละลายไฮโปโตนิก (hypotonic solution) คือมีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ที่น้อยกว่าที่พบในของเหลวในร่างกาย ดังนั้นถ้ามีการเสียเหงื่อมาก ผลที่ตามมาจะทำให้ร่างกายมีความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ต่าง ๆ มากขึ้น ปริมาณน้ำและอิเล็กโทรไลต์ที่ร่างกายจะสูญเสียทางเหงื่อนั้น ขึ้นกับอุณหภูมิและความชื้นของสิ่งแวดล้อม เช่นถ้าอุณหภูมิสูงแต่ความชื้นต่ำจะทำให้มีการสูญเสียน้ำ และอิเล็กโทรไลต์ทางเหงื่อมาก การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของร่างกายขณะออกกำลังกาย หรือเป็นไข้ก็จะช่วยเพิ่มเหงื่อได้เช่นกัน

3. การสูญเสียโดยผ่านระบบทางเดินหายใจ ปกติอากาศที่หายใจออกมานั้นจะอิ่มตัวด้วยไอน้ำซึ่งมีค่าความดันไอน้ำประมาณ 47 มิลลิเมตรปรอท น้ำที่ออกจากการหายใจนั้นไม่มีส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลต์แต่อย่างใด ปริมาณของน้ำที่จะเสียไปทางระบบทางเดินหายใจขึ้นกับปริมาณการหายใจ คล้ายกับการเสียน้ำทางเหงื่อ คือ ถ้าร่างกายมีอุณหภูมิสูง เช่น ขณะเป็นไข้ขณะออกกำลังกาย หรืออยู่ในสภาพอากาศร้อน จะมีปริมาณการหายใจสูงขึ้น ทำให้เสียน้ำไปได้มากขึ้นด้วย ผลที่ได้จะทำให้ร่างกายขาดน้ำ และความเข้มข้นของเลือดสูงขึ้น

4. การสูญเสียโดยผ่านระบบขับถ่ายปัสสาวะ ปกติไตจะขับน้ำและอิเล็กโทรไลต์ทิ้งด้วยปริมาณมาก หรือน้อยขึ้นกับสภาวะของร่างกาย คือ ถ้าร่างกายขาดน้ำและอิเล็กโทรไลต์จะมีการขับน้ำ และอิเล็กโทรไลต์ออกน้อย ถ้าได้รับมากก็จะขับทิ้งมาก (สัญญา, 2530)

2.3.7 ความสัมพันธ์ของอิเล็กโทรไลต์ต่อการย่อยและดูดซึมอาหาร

2.3.7.1 ความสัมพันธ์ของอิเล็กโทรไลต์ต่อการย่อยอาหาร

การย่อยอาหารในระบบทางเดินอาหารจำเป็นต้องอาศัยเอนไซม์ต่าง ๆ มาช่วยในการย่อยสารอาหารที่รับประทานเข้าไป เอนไซม์ต่าง ๆ ในบริเวณทางเดินอาหารจะทำหน้าที่ในการย่อยอาหารได้สมบูรณ์จำเป็นต้องอาศัยอิเล็กโทรไลต์ชนิดต่าง ๆ ที่หลั่งออกมาจากต่อมต่าง ๆ ภายในทางเดินอาหาร โดยพบว่าหน้าที่ที่สำคัญของอิเล็กโทรไลต์ในทางเดินอาหารมีดังนี้

1. ช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่าง ในแต่ละบริเวณของทางเดินอาหารทำให้มี pH ที่เหมาะสมแก่การทำงานของเอนไซม์ย่อยอาหารในบริเวณนั้น เช่น H^+ ไปทำให้เปปซิโนเจนเปลี่ยนไปเป็นเปปซิน และยังช่วยกระตุ้นการทำงานของเปปซินอีกด้วย นอกจากนี้ HCO_3^- ที่หลั่งออกมาจากตับอ่อนและเซลล์เยื่อบุลำไส้เล็กส่วนต้นจะช่วยปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างของอาหารที่เข้ามา และมีผลทำให้ทางเดินอาหารบริเวณลำไส้เล็กส่วนต้นมีความเป็นด่างเพื่อที่จะทำให้เอนไซม์ต่าง ๆ ในบริเวณดังกล่าวทำการย่อยได้เต็มที่

2. ทำหน้าที่เป็นตัวเร่ง (catalyst) การทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ที่หลั่งเข้าไปในบริเวณทางเดินอาหาร อิเล็กโทรไลต์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งที่สำคัญได้แก่ แคลเซียม สังกะสี คลอไรด์ แมกนีเซียม และแมงกานีส เป็นต้น ตัวอย่างเช่น Cl^- เป็นตัวเร่งการทำงานของเอนไซม์อัลฟาเอมิเลส (α -amylase) ที่หลั่งออกมาจากค่อมน้ำลาย และตับอ่อน (ชัยวัฒน์, 2541)

2.3.7.2 ความสัมพันธ์ของอิเล็กโทรไลต์ต่อการดูดซึมกรดอะมิโน

การดูดซึมกรดอะมิโนในบริเวณทางเดินอาหารนั้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้น ในบริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น และส่วนกลาง ส่วนบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลายจะมีการดูดซึมได้น้อย โดยปกติแล้วอัตราการดูดซึมกรดอะมิโนในบริเวณลำไส้เล็กจะเกิดขึ้นได้เร็วกว่าอัตราการย่อยของโปรตีนในโพรงลำไส้เล็ก ดังนั้นจึงไม่พบกรดอะมิโนในบริเวณโพรงทางเดินอาหาร การย่อยโปรตีนส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณลำไส้เล็กส่วนบน (proximal intestine) ดังนั้นกรดอะมิโนส่วนใหญ่จึงถูกดูดซึมที่ลำไส้เล็กส่วนต้นและกลาง จะพบว่ามีโปรตีนประมาณ 2-5 เปอร์เซ็นต์ของโปรตีนทั้งหมดในโพรงทางเดินอาหารเคลื่อนที่ผ่านลำไส้เล็กเข้าสู่ลำไส้ใหญ่ โดยไม่เกิดการย่อยและดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย และมีบางส่วนของโปรตีนจะถูกย่อยโดยเอนไซม์จากแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ และมีโปรตีนบางส่วนถูกขับออกนอกร่างกายซึ่งอาจจะเป็นโปรตีนจากแบคทีเรีย และเซลล์เยื่อลำไส้ใหญ่

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

1. การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนผ่านผนังบริสเบอร์เดอร์ของเซลล์ดูดซึม ผนังบริสเบอร์เดอร์ของเซลล์ดูดซึมในลำไส้เล็กจะมีตัวพาสำหรับกรดอะมิโนอยู่หลายชนิดเนื่องจากกรดอะมิโนแต่ละชนิดจะมีขนาด ความสามารถในการละลายตัวในไขมันและจำนวนประจุไม่เท่ากัน ดังนั้นจำนวนของตัวพาที่แน่นอนของกรดอะมิโนบนผนังบริสเบอร์เดอร์ของเซลล์ดูดซึมในบริเวณลำไส้เล็กยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดเนื่องจากการยากที่จะแยกออกจากกันได้เพราะการจับของกรดอะมิโนกับตัวพาไม่จำเพาะ (overlapping substrate specificities) แต่ในปัจจุบันพบว่าสามารถที่จะจำแนกตัวพาออกได้เป็นระบบ (transport system) บนผนังบริสเบอร์เดอร์ของเซลล์ดูดซึมในบริเวณลำไส้เล็กได้ 7 ระบบ ดังนี้

1.1. ระบบตัวพา B (system B) หรือ ระบบตัวพา NBB (neutral brush border system) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง (neutral amino acids) เท่านั้น เช่น ไกลซีนและอะลานีน เป็นต้น ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัยโซเดียม (Na^+) ดังนั้นการดูดซึม

ของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะเป็บบแบบแอกทีฟทุติยภูมิ (secondary active transport) คล้ายกับการดูดซึมกลูโคส การดูดซึมของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้มีอัตราการดูดซึมค่อนข้างเร็วและจะมีการแก่งแย่งกันจับกับตัวพาในกลุ่มของกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง

1.2. ระบบตัวพา $B^{0,+}$ (system $B^{0,+}$) การทำงานต่าง ๆ ของตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จะคล้ายกับระบบ B แต่ตัวพาในระบบ $B^{0,+}$ นอกจากจะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่าง (basic amino acids) และซีสตีดิน (cysteine) ได้ ระบบตัวพานิดนี้จะต้องอาศัย Na^+ เช่นเดียวกับระบบ B

1.3. ระบบตัวพา $b^{0,-}$ (system $b^{0,-}$) ตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลางเช่นเดียวกับระบบ B กรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่าง และซีสตีดินเหมือนกับในระบบ $B^{0,+}$ แต่พบว่าระบบตัวพา $b^{0,+}$ ไม่ต้องอาศัย Na^+

1.4. ระบบตัวพา y^+ (system y^+) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่างเช่น ไลซีน อาร์จินีน และออร์นิติน เป็นต้น ระบบตัวพานิดนี้ไม่ต้องอาศัย Na^+ อัตราการดูดซึมของกรดอะมิโนในกลุ่มที่มีฤทธิ์เป็นด่างนี้จะช้ากว่าการดูดซึมของกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง และมีการดูดซึมแบบแอกทีฟประมาณ 10-20 เท่า เนื่องจากมีการดูดซึมแบบแพร่กระจายโดยอาศัยตัวพา (facilitated transport)

1.5. ระบบตัวพาอิมิโน (imino system) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโน (amino acids) เช่น โพรลีน (proline) และฮัยดรอกซีโพรลีน (hydroxyproline) เป็นต้น ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัยทั้ง Na^+ และ Cl^- โดยพบว่าตัวพาในระบบนี้จะจับกับ Na^+ , Cl^- และโพรลีน ในอัตราส่วน 2 : 1 : 1 การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะอาศัยแรงผลักดันเนื่องมาจากความต่างทางความเข้มข้นของ Na^+ และ Cl^- รวมทั้งความต่างทางกระแสไฟฟ้าระหว่างโพรงลำไส้เล็กและภายในเซลล์ดูดซึม โซเดียมเมื่อจับกับตัวพาในระบบนี้จะทำให้ความสามารถในการจับโพรลีนของตัวพาเพิ่มมากขึ้น

1.6. ระบบตัวพาเบต้า (β -system) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนชนิดเบตา (β -amino acids) ซึ่งพบว่าทอรีน (taurine) จะเป็นกรดอะมิโนในกลุ่มที่มีความสามารถในการจับกับตัวพานิดนี้ได้สูงที่สุด ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัยทั้ง Na^+ และ Cl^- โดยพบว่าตัวพาในระบบนี้จะจับกับ Na^+ , Cl^- และ ทอรีน ในอัตราส่วน 2 : 1 : 1 การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนในกลุ่มนี้จะอาศัยแรงผลักดันเนื่องมาจากความต่างทางเข้มข้นของ Na^+ และ Cl^- รวมทั้งความต่างทางกระแสไฟฟ้า นอกจากนี้ยังพบว่าการทำงานของระบบนี้จะถูกยับยั้งได้โดย Ca^{2+}

1.7. ระบบตัวพา X_{AG}^- (system X_{AG}^-) ตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกรด (acidic amino acids) เช่น แอสปาร์เตท (aspartate) และกลูตาเมท (glutamate) เป็นต้น ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัย Na^+ และ K^+ โดยพบว่าตัวพาในระบบนี้จะจับกับ

Na^+ , K^+ และ กรดอะมิโนในอัตราส่วน 3 : 1 : 1 การเคลื่อนที่ของตัวพาที่สามารถยับยั้งได้ด้วย H^+ เนื่องจากสามารถไปแย่งที่จับกับ Na^+ ที่ตัวพา

2. การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนผ่านผนังด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์ดูคซิม กรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ ที่ถูกดูคซิมเข้ามาในเซลล์รวมทั้งที่เกิดจากการย่อยเปปไทด์ต่าง ๆ ภายใน เซลล์จะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ดูคซิมผ่านผนังทางด้านล่าง และด้านข้าง (basolateral membrane) โดยอาศัยตัวพาของกรดอะมิโนหลายชนิด ซึ่งในปัจจุบันสามารถที่จะจำแนกระบบตัวพา (transport system) บนผนังทางด้านล่างและด้านข้างของเซลล์ดูคซิมในบริเวณลำไส้เล็กได้ 5 ระบบ (ภาพ 11)

2.1. ระบบตัวพา A (system A) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง และกรดอะมิโนในระบบตัวพานี้ต้องอาศัย Na^+

2.2. ระบบตัวพา ASC (system ASC) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลางโดยเฉพาะกับกรดอะมิโนที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและมีจำนวนคาร์บอน 3-4 อะตอม เช่น อะลานีน ซีรีน และซิสตีน เป็นต้น ระบบตัวพานี้จะต้องอาศัย Na^+

เนื่องจากความเข้มข้นของ Na^+ ในกระแสโลหิตจะสูงกว่าความเข้มข้นของ Na^+ ภายในเซลล์ดูคซิมจึงเป็นไปได้ว่าการขนส่งกรดอะมิโนของระบบ A และระบบ ASC จะมีหน้าที่ส่วนใหญ่ในส่วนการเคลื่อนกรดอะมิโนจากกระแสโลหิตเข้าเซลล์ดูคซิมมากกว่าที่จะเคลื่อนกรดอะมิโนจากภายในเซลล์ดูคซิมเข้ากระแสโลหิต ดังนั้นการเคลื่อนที่กรดอะมิโนผ่านผนังเซลล์ทางด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์ดูคซิมเข้าสู่ร่างกายโดยระบบ A และระบบ ASC จะเกิดขึ้นได้น้อยมาก (ชัยวัฒน์, 2541)

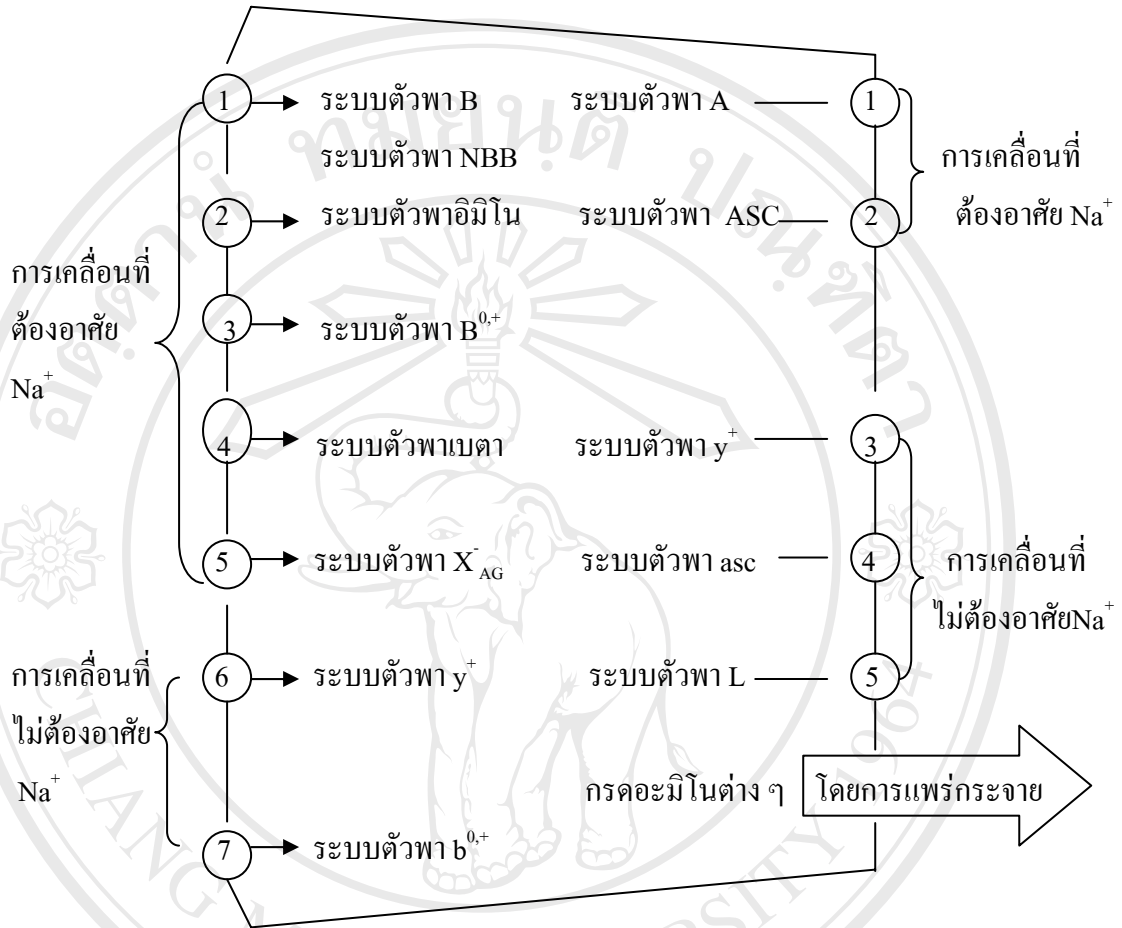
2.3. ระบบตัวพา L (system L) ตัวพากรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลาง ระบบตัวพาชนิดที่ไม่ต้องอาศัย Na^+ ส่วนใหญ่การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกลางจะเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ดูคซิมเข้าสู่กระแสโลหิตโดยใช้ตัวพาในระบบ L ซึ่งจะมีลักษณะเป็นการแพร่กระจายแบบใช้ตัวพา (facilitated diffusion)

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

2.5. ระบบตัวพา y^+ (system y^+) ตัวพาของกรดอะมิโนในระบบนี้จะจับกับกรดอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นด่าง ระบบตัวพาชนิดนี้ไม่ต้องอาศัย Na^+

ผนังรีสเบอร์เตอร์

ผนังด้านล่างและด้านข้าง



ภาพ 11 ระบบตัวพาต่าง ๆ ของกรโคอะมิโนในบริเวณผนังรีสเบอร์เตอร์ และผนังด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์คูดซิมของลำไส้เล็ก

ที่มา : ชัยวัฒน์ (2541)

สำหรับตัวพาของกรโคอะมิโนที่มีฤทธิ์เป็นกรดยังไม่มีการสรุปแน่ชัดว่ามีตัวพาจำเพาะหรือไม่บนผนังด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์คูดซิมในบริเวณลำไส้เล็ก ดังนั้นจะเห็นได้ชัดว่าการขนส่งกรโคอะมิโนจากภายในเซลล์ผ่านผนังด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์คูดซิมเข้าสู่กระแสโลหิต จะผ่านทางตัวพาของระบบ L ระบบ asc และ ระบบ y^+ นอกจากกรโคอะมิโนจะขนส่งผ่านทางระบบดังกล่าวแล้วยังพบว่ากรโคอะมิโนชนิดต่าง ๆ สามารถผ่านผนังเซลล์ทางด้านล่าง และด้านข้างของเซลล์คูดซิม โดยแพร่กระจาย (diffusion) ซึ่งอาศัยความต่างทางความเข้มข้นระหว่างภายในเซลล์ และในกระแสโลหิต เนื่องจากผนังเซลล์ด้านนี้ของเซลล์คูดซิมยินยอมให้กรโคอะมิโน

แพร่ผ่านไปได้ ดังนั้นการแพร่กระจายของกรดอะมิโนผ่านผนังเซลล์ด้านข้างและด้านข้างเป็นกลไกที่สำคัญของการขนส่งกรดอะมิโนเข้าสู่กระแสโลหิต (ชัยวัฒน์, 2541)

2.3.8 สารปรับสมดุลสารละลายไฟฟ้าในอาหาร (dietary Electrolyte Balance; dEB)

ในภาวะที่เกิดความไม่สมดุลของกรด-ด่าง โดยการสูญเสียน้ำและอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งในภาวะปกติร่างกายได้รับกรดเพิ่มขึ้นทั้งจากภายในและภายนอกร่างกาย แต่โดยทั่วไปปริมาณกรดที่เพิ่มมากขึ้นมิได้ทำให้ค่าความเป็นกรดเป็นด่างของร่างกายเปลี่ยนไป ทั้งนี้เพราะร่างกายมีกลไกที่ช่วยควบคุมให้มีการกำจัดกรดเหล่านั้นออกจากร่างกายได้อย่างเหมาะสม (นิโลบล, 2542) กลไกเหล่านี้ได้แก่ การขับเฟอร์ทางเคมีโดยสารขับเฟอร์ต่าง ๆ ที่อยู่ในของเหลวออกเซลล์และในเม็ดเลือดแดง โดยเฉพาะไบคาร์บอเนตขับเฟอร์และอีโมโกลบิน การทำงานของเนื้อเยื่อโดยการนำกรดเข้าหรือออกจากเซลล์อย่างเหมาะสม การทำงานของสองกระบวนการนี้ช่วยเพียงมิให้ pH เปลี่ยนแปลงมากเท่านั้น แต่มิได้เป็นการกำจัดกรดออกจากร่างกายโดยตรง กระบวนการที่สามคือการหายใจที่จะช่วยควบคุมการระบายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากร่างกายให้เหมาะสมกับการควบคุมสมดุลกรด-ด่าง กระบวนการนี้ถูกควบคุมโดยระบบควบคุมการหายใจ ส่วนกระบวนการสุดท้ายซึ่งใช้เวลานานในการตอบสนองคือ การทำงานของไตซึ่งควบคุมการดูดกลับไบคาร์บอเนต การคัดหลั่งกรดและสร้างไบคาร์บอเนตขึ้นมาใหม่อย่างเหมาะสมกับภาวะกรด-ด่างของร่างกาย ไตเป็นอวัยวะเดียวที่ช่วยขับกรดทิ้งได้อย่างสมบูรณ์ที่สุด อย่างไรก็ตามการทำงานของทั้งสามกระบวนการนี้มีความเกี่ยวข้องกันอย่างใกล้ชิด ถ้าเกิดความผิดปกติของระบบการควบคุมสมดุลกรด-ด่างดังกล่าว อาจเกิดจากร่างกายมีความผิดปกติ หรือได้รับกรด-ด่างมากขึ้นทำให้สมดุลกรด-ด่างในร่างกายเสียไป (สัญญา, 2535) ซึ่งในสุกรสามารถแยกสาเหตุที่ทำให้ร่างกายได้รับกรดเพิ่มขึ้นดังนี้ การเมแทบอลิซึม สุกรได้รับอาหารที่มีระดับของโปรตีนที่สูงเกินไปทำให้ร่างกายเกิดการเผาผลาญมากขึ้น จึงต้องมีการระบายความร้อนออกมา ซึ่งจะทำให้ร่างกายสูญเสียน้ำ (hypertonic dehydration) ส่งผลถึงภาวะความเป็นกรดในร่างกาย (สัญญา, 2530) หรือแม้แต่การลดระดับโปรตีนแล้วมีการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ก็จะส่งผลให้ร่างกายมีภาวะความเป็นกรดเช่นกัน (Patience, 1990) และการเลี้ยงสุกรแบบโรงเรือนเปิดในประเทศไทย ด้วยสภาพอากาศที่ร้อนชื้นทำให้สุกรมีการระบายความร้อน โดยการหายใจหรือการหอบมากยิ่งขึ้น เพราะสุกรไม่สามารถระบายความร้อนออกทางเหงื่อได้ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความเป็นกรดในร่างกาย นอกจากนี้ปัจจัยที่กล่าวมาแล้ว การที่สุกรเครียดจากการจัดการ และการเกิดภาวะท้องร่วง ล้วนแต่เป็นปัจจัยที่เพิ่มความเป็นกรดในตัวสุกร (สง่า, 2526; วันดี, 2546) การคง

สมดุลกรด-ด่างให้มีประจุเป็นกลางโดยใช้ค่า dietary Undetermined Anion; dUA ซึ่งแสดงไว้ในสมการ 11 (Chan, 1974) สามารถคำนวณได้จาก

$$dUA = (Na^+ + K^+ + Ca^{++} + Mg^{++}) - (Cl^- + P^{2-} + S_{inorganic}) \quad (11)$$

หรือจะใช้ค่าสารปรับสมดุลสารละลายไฟฟ้า (dietary Electrolyte Balance; dEB) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 12 (Patience, 1990)

$$dEB = Na^+ + K^+ - Cl^- \quad (12)$$

ส่วนใหญ่จะใช้ค่า dEB เนื่องจากง่ายและสะดวกในการวิเคราะห์ แต่ผลที่ได้ก็ไม่มี ความแตกต่างกัน (Patience, 1990) ในอาหารสัตว์ที่ประกอบด้วยข้าวโพดและกากถั่วเหลืองจะมีค่า dEB ประมาณ 175 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ปกติในอาหารจะมีประจุบวกมากกว่าประจุลบ

2.3.9 การเสริมสารปรับสมดุลสารละลายไฟฟ้าในอาหารของสุกร

การลดระดับโปรตีนในสูตรอาหารต้องมีการเสริมกรดอะมิโนให้เพียงพอแก่ความต้องการของสุกร (Sharda *et al.*, 1976; Easter *et al.*, 1980) ตามสัดส่วนของโปรตีนอุณหภูมิต่ำเพื่อให้กรดอะมิโนมีสัดส่วนที่สมดุลกัน (Whittemore, 1993) ระดับของโปรตีนที่ลดลง ทำให้ไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายลดลง (Ketel, 1999; Sutton *et al.*, 1999; Figueroa *et al.*, 2002) ซึ่งการลดลงของระดับโปรตีนในอาหาร ทำให้ปริมาณกากถั่วเหลืองซึ่งเป็นวัตถุดิบหลักที่เป็นแหล่งของโปรตีนในสูตรอาหารลดลงส่งผลถึงปริมาณของโปแตสเซียมในสูตรอาหารลดลง เพราะกากถั่วเหลืองมีความเข้มข้นของโปแตสเซียมสูงกว่าวัตถุดิบอื่น ๆ ในสูตรอาหาร (NRC, 1998) และจากรายงานของ Miller (1981) พบว่า การเสริมโปแตสเซียมในสูตรอาหารที่มีระดับของไลซีนไม่เพียงพอช่วยปรับปรุงสมรรถภาพการผลิต เช่นเดียวกับ Leibholz *et al.* (1966) รายงานว่า การเสริมโปแตสเซียม 10 – 20 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ในอาหารโปรตีนต่ำของลูกสุกรหลังหย่านม ช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหาร ส่วน Kephart and Sherritt (1990) รายงานว่า การเสริมโปแตสเซียมในอาหารที่มีระดับโปรตีนลดลง ไนโตรเจนที่ขับออกจะมีแนวโน้มลดลง การสะสมของไนโตรเจนในร่างกาย และค่าการย่อยได้ของไนโตรเจนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาของ Golz and Crenshaw (1990) พบว่า การเสริมโซเดียม โปแตสเซียม และคลอไรด์ในอาหาร ของลูกสุกรหลังหย่านมในระดับ 0.48, 0.82 และ 0.48 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ ทำให้สุกรมีอัตราการเจริญเติบโต และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่างกายดีขึ้น ส่วน *Patience et al.* (1986) รายงานว่า การเสริมโปแตสเซียมไบคาร์บอเนต (KHCO_3) หรือ โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ในสูตรอาหารที่มีข้าวโพดเป็นวัตถุดิบหลัก มีปริมาณของ ไนโตรเจนที่สะสมในร่างกาย ค่าการย่อยได้ของไนโตรเจน และกรดอะมิโน ไม่แตกต่างกันทาง สถิติ ($P>0.05$) และเมื่อเสริมโปแตสเซียมไบคาร์บอเนต หรือ โซเดียมไบคาร์บอเนต ในอาหารสุกร ที่มีระดับไลซีนไม่เพียงพอ จะช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของสุกร (*Patience, 1987*) จากการ ทดลองของ *Haydon et al.* (1990); *Wondra et al.* (1995) รายงานว่าระดับของ dEB ที่มีผลทำให้ สุกรมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงที่สุด คือที่ระดับ 250 และ 238 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ตามลำดับ และการทดลองของ *Kornegay et al.* (1973) รายงานว่าระดับ dEB ที่เพิ่มขึ้นมี แนวโน้มทำให้ความหนาไขมันสันหลังลดลง และพื้นที่หน้าตัดเนื้อสันเพิ่มขึ้น ระดับของ dEB ใน อาหารช่วยปรับภาวะสมดุลกรด-ด่างของร่างกาย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของสมดุลกรด-ด่างใน ร่างกายมีความสัมพันธ์กับการเมแทบอลิซึมกรดอะมิโน (*Patience, 1990*) ในภาวะที่ร่างกายเป็น กรดจะทำให้ร่างกายมีการขับแอมโมเนียออกมาก (*Smith, 1998*) สอดคล้องกับ *Moze et al.* (2002) ที่รายงาน ว่า ระดับ dEB ในอาหารที่เพิ่มขึ้นจาก 151 เป็น 291 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ทำให้ ไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะและมูลลดลง 10.42 และ 16.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมี ปริมาณไนโตรเจนที่กักเก็บในร่างกายเพิ่มขึ้น 3.08 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเมื่อเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ปริมาณ ไนโตรเจนที่กักเก็บกับไนโตรเจนที่ได้รับมีค่าเพิ่มขึ้น 8.46 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับการศึกษาของ *Cai et al.* (1995) ที่รายงานว่า การเสริมระดับ dEB ในอาหารที่เพิ่มจาก 146 เป็น 344 ช่วยลด แอมโมเนียในปัสสาวะอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.01$) นอกจากนี้ *Haydon and West* (1990) รายงานว่า ระดับของ dEB ในอาหารที่เพิ่มขึ้นจาก -50 เป็น 400 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ทำให้ค่าการย่อย ได้ของไนโตรเจน พลังงานทั้งหมด วัตถุแห้ง และกรดอะมิโนเพิ่มขึ้น และจากการศึกษาในไก่ *Ahmad et al.* (2005) รายงานว่า การเลี้ยงในไก่อุณหภูมิต่ำสูง เมื่อเสริมโซเดียมไบคาร์บอเนตใน อาหารเพื่อปรับให้ระดับ dEB ในอาหาร มีค่า 250 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ทำให้สมรรถภาพ การผลิตเพิ่มขึ้น อัตราการตายลดลง และคุณภาพซากสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับไก่ที่เสริม NH_4Cl ในอาหารที่ระดับ dEB 50 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม และจากรายงานของ *Okumura and Tasaki* (1968) พบว่า เมื่อเสริมโซเดียมไบคาร์บอเนตในอาหารไก่ทำให้ปริมาณกรดยูริกในปัสสาวะลดลง ซึ่งจากการศึกษารายงานต่าง ๆ เกี่ยวกับการลดระดับของโปรตีน และการเสริมสารปรับ สมดุลสารละลายไฟฟ้า จึงเป็นแนวทางในการศึกษาผลของระดับโปรตีน และสารปรับสมดุล สารละลายไฟฟ้า ต่อสมรรถภาพการผลิต คุณภาพซาก และไนโตรเจนในสิ่งขับถ่ายของสุกรขุน