บทที่ 2

ตรวจเอกสาร

2.1 โปรตีนและกรดอะมิโนในอาหารสุกร

2.1.1 โปรตีนและกรดอะมิโน (Protein and amino acid)

โปรตีนเป็นสารอาหารสำคัญที่ร่างกายจะขาดไม่ได้ เนื่องจากโปรตีนเป็นสารชีวโมเลกุลที่มีหน้าที่หลากหลายที่สุด โดยเฉพาะเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเซลล์ และเซลล์ออร์กะเนลล์ (cell organells) ของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด และเป็นสารอาหารที่มีระดับสูงสุดในเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อสัตว์ นอกจากนี้ โปรตีนยังทำหน้าที่ในการสังเคราะห์สารต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้ในการควบคุมกระบวนการเมทาบอลิซึมเพื่อให้การทำงานในส่วนต่างๆ ของร่างกายดำเนินไปตามปกติ เช่น เอนไซม์ และฮอร์โมน เป็นต้น เมื่อเหลือแล้วจึงใช้เป็นพลังงานหรือเก็บเป็นพลังงานสำรองในรูปของกลัยโคเจ็น (glycogen) และไขมัน (storage depot) ส่วนสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรทและไขมันนั้น ร่างกายจะใช้ประกอบเป็นโครงสร้างและเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อได้บ้าง แต่ส่วนใหญ่จะใช้เป็นแหล่งพลังงาน โดยทั่วไปคาร์โบไฮเดรตและไขมันจะมีคาร์บอน (Carbon; C) ไฮโดรเจน (Hydrogen; H) และออกซิเจน (Oxygen; O) เป็นองค์ประกอบ แต่โปรตีนนอกจากจะมีธาตุเหล่านี้แล้วยังมีไนโตรเจน (Nitrogen; N) เป็นองค์ประกอบด้วย (McDonald *et al*., 2002) โดยมีธาตุคาร์บอน 50 - 55 เปอร์เซ็นต์ ออกซิเจน 20 - 30 เปอร์เซ็นต์ ไนโตรเจน 15 - 18 เปอร์เซ็นต์ ไฮโดรเจน 6.6 – 8.0 เปอร์เซ็นต์ และกำมะถัน 0 - 4 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งธาตุเหล่านี้จะรวมตัวกันเป็นโมเลกุลหน่วยย่อยของโปรตีน คือ กรดอะมิโน (amino acid) ซึ่งจะเชื่อมโยงกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเปปไตด์ (peptide bond) โดยกรดอะมิโนเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในกิจกรรมหลายอย่างในร่างกาย เช่น เป็นสารตั้งต้น (precursors) สำหรับการสังเคราะห์ฮอร์โมน สารสื่อประสาท (neurotransmitters) สารสี (pigments) และสารโมเลกุลเล็กๆ อีกมากมาย แต่ที่สำคัญที่สุด คือ การสังเคราะห์เป็นโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบที่สำคัญต่างๆ ของร่างกาย ดังนั้น สัตว์จำเป็นต้องใช้โปรตีนในการสร้างเนื้อเยื่อ การเจริญเติบโต การสืบพันธุ์ และใช้ในการซ่อมแซมเนื้อเยื่อต่างๆ นอกจากนี้ โปรตีนยังเป็นองค์ประกอบของน้ำนม เนื้อ ผม ขน เล็บ ฮอร์โมน เอนไซม์ เลือด และอวัยวะต่างๆ ในร่างกาย ซึ่งความต้องการโปรตีนของสัตว์ในแต่ละระยะจะแตกต่างกัน เช่น สุกรอายุน้อยมีความต้องการความเข้มข้นของโปรตีนในอาหารมากกว่าสุกรที่อายุมากเพื่อใช้ในการสังเคราะห์เป็นกล้ามเนื้อ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

โปรตีนหรืออวัยวะต่างๆ ในร่างกาย หรือในช่วงที่ให้ผลผลิต เช่น การตั้งท้องหรือการให้นมก็จะต้องการโปรตีนในอาหารระดับที่สูงด้วยเช่นกัน แต่ในสุกรที่เจริญเติบโตเต็มที่แล้วความต้องการโปรตีนในอาหารก็จะลดลง ดังนั้นการประกอบสูตรอาหารควรคำนึงถึงปริมาณการใช้ประโยชน์ได้ (availability) ของโปรตีน ผลของขั้นตอนหรือกระบวนการผลิตอาหารที่มีต่อคุณค่าทางโภชนะของโปรตีนและกรดอะมิโน และระยะของวงจรการให้ผลผลิตของสุกร รวมทั้งต้องคำนึงถึงการปรับสารอาหารในสูตรอาหารเพื่อให้สุกรตอบสนองได้มากที่สุด เนื่องจากการที่สุกรได้รับสารอาหารหรือกรดอะมิโนมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณอาหารที่กินด้วย

ร่างกายจำเป็นต้องได้รับกรดอะมิโนเพื่อใช้ในการสังเคราะห์โปรตีน โดยกรดอะมิโนในอาหารมีมากกว่า 20 ชนิด ซึ่งกรดอะมิโนบางชนิดร่างกายจะได้รับจากอาหารและสามารถสังเคราะห์ได้จากสารอาหารชนิดอื่น แต่กรดอะมิโนบางชนิดร่างกายไม่สามารถสังเคราะห์เองได้หรือสังเคราะห์ได้แต่ไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกายจึงต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น เรียกว่า กรดอะมิโนจำเป็น (essential amino acid) ส่วนกรดอะมิโนที่ร่างกายสังเคราะห์เองได้จากกรดแอลฟา - คีโต (α-keto acid) ซึ่งเป็นอินเตอร์มิเดียทในกระบวนการเมทาบอลิซึม (intermediate metabolism) ของคาร์โบไฮเดรทและไขมัน โดยการเติมหมู่อะมิโน (amino group) เข้าไปในโมเลกุลของกรดแอลฟา - คีโต โดยอาศัยปฏิกิริยาทรานส์แอมมิเนชั่น (transamination) หรือใช้แอมโมเนีย (ammonia; NH_3) ที่ได้จากกระบวนการดีแอมมิเนชั่น (deamination) ของกรดอะมิโนชนิดอื่นๆ ที่เกินความต้องการของร่างกาย เรียกว่า กรดอะมิโนไม่จำเป็น (nonessential amino acid) ซึ่งชนิดของกรดอะมิโนจำเป็นและกรดอะมิโนไม่จำเป็นได้แสดงไว้ในตาราง 1

ส่วนกรดอะมิโนบางตัวที่อยู่ก้ำกึ่งระหว่างกรดอะมิโนจำเป็นกับกลุ่มที่ไม่จำเป็น (Semi-essential amino acid) ได้แก่ อาร์จินีน ซิสทีน และ ไทโรซีน ซึ่งอาร์จินีนมักจัดให้อยู่ในกลุ่มกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นต้องมีในอาหาร เนื่องจากปกติสุกรสามารถสังเคราะห์อาร์จินีนได้จากกลูตามีน แต่มีรายงานว่า ในระยะที่สุกรกำลังเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและสุกรระยะให้นมการสังเคราะห์อาจไม่เพียงพอต่อความต้องการของร่างกายที่ต้องการในปริมาณมาก อย่างไรก็ตามเมื่อสุกรระยะเติบโตเต็มที่หรือระยะสมบูรณ์พันธุ์จะสามารถสังเคราะห์ได้อย่างเพียงพอกับความต้องการของร่างกาย และกรดอะมิโนซีสทีนสามารถสังเคราะห์ได้จากเมทไธโอนีนจึงจัดให้อยู่ในกลุ่มกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น แต่หมายถึงต้องมีปริมาณเมทไธโอนีนสำรองไว้อย่างเพียงพอสำหรับสังเคราะห์ซิสทีน ซึ่งซิสเทอิน (Crystein) และซิสทีน (Cystine; ผลผลิตจากการออกซิเดชันของซิสเทอีน) จะต้องมีประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของกรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบทั้งหมด (ได้แก่ เมทไธโอนีน และซีสทีน) ดังนั้น ถ้าในอาหารมีซิสทีนในปริมาณหนึ่งจะลดความต้องการเมทไธโอนีนในอาหารลงได้ โดยที่เมทไธโอนีนไม่สามารถถูกสังเคราะห์ได้จากซิสทีน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ส่วนฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine) สามารถคลอบคลุมความต้องการของทั้งฟีนิลอะลานีนและไทโรซีน (Tyrosine) เนื่องจากฟีนิลอะลานีนสามารถเปลี่ยนไปเป็นไทโรซีนได้ ในขณะที่ไทโรซีนไม่สามารถเปลี่ยนไปเป็นฟีนิลอะลานีนได้ ดังนั้น ไทโรซีนจึงสามารถชดเชยความต้องการฟีนิลอะลานีนได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ของความต้องการในอาหารทั้งหมดเท่านั้น (วันดี, 2546)

ตาราง 1 การแบ่งประเภทของกรดอะมิโนในอาหารสุกร

Essential amino acid[a]	Nonessential amino acid[a]	Semi-essential amino acid[b]
Arginine	Alanine	Cyst(e)ine
Histidine	Asparagine	Taurine
Isoleucine	Aspartic acid	Tyrosine
Leucine	Cryteine	Arginine
Lysine	Glutamic acid	
Methionine	Glutamine	
Phenylalanine	Glycine	
Threonine	Proline	
Tryptophan	Serine	
Valine	Tyrosine	

ที่มา: [a]ดัดแปลงจาก Lewis (2001); [b] ดัดแปลงจาก Fuller (1994)

ในแต่ละระยะของการเจริญเติบโตของสุกร สุกรจะมีความต้องการโปรตีนและกรดอะมิโนที่แตกต่างกัน ดังแสดงไว้ในตาราง 2 และ 3 ซึ่งเป็นค่าแสดงถึงระดับความต้องการต่ำสุดที่ทำการเสริมหรือมีในอาหารสำหรับการเจริญเติบโตที่สูงสุด หรือเหมาะสมกับสมรรถภาพการผลิตในแต่ละวันของสุกร ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระดับความต้องการกรดอะมิโนในอาหารจะลดลงเมื่อสัตว์มีอายุหรือน้ำหนักตัวมากขึ้น โดยระดับของกรดอะมิโนในอาหารจะสัมพันธ์กับระดับของโปรตีนด้วย นั่นคือ ถ้าระดับความต้องการกรดอะมิโนสูงส่งผลให้ระดับของโปรตีนในอาหารสูงขึ้นด้วย ดังนั้นในการประกอบสูตรอาหารจึงต้องทำการปรับระดับของกรดอะมิโนที่จำเป็นแต่ละชนิดในอาหารให้เพียงพอต่อความต้องการของสุกรด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 2 ระดับความต้องการโปรตีนของสุกรแต่ละระยะ

Class of animal	Liveweight range (kg)	Total feed intake (kg/day)	Crude protein content of diet (%)	Crude protein 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)

ตาราง 3 ระดับความต้องการกรดอะมิโนของสุกรแต่ละระยะการเจริญเติบโต (กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร)

	Growing pig (kg)					
	10 - 20		20 - 50		50 - 110	
Amino acids	NRC (1998)	Lewis (2001)	NRC (1998)	Lewis (2001)	NRC (1998)	Lewis (2001)
Lysine	9.4	9.5	7.7	7.5	6.1	6.0
Methionine+Cystine	5.3	4.8	4.4	4.1	3.6	3.4
Threonine	5.6	5.6	4.6	4.8	3.7	4.0
Tryptophan	1.6	1.4	1.3	1.2	1.0	1.0
Arginine	3.9	4.0	3.1	2.5	2.2	1.0
Histidine	3.1	2.5	2.5	2.2	2.0	1.8
Isoleucine	5.2	5.3	4.2	4.6	3.4	3.8
Leucine	9.8	7.0	8.0	6.0	6.4	5.0
Phenylalanine+Tyrosine	8.9	7.7	7.2	6.6	5.8	5.5

ที่มา: ดัดแปลงจาก NRC (1998) และ Lewis (2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โดยทั่วไปแหล่งของโปรตีนในอาหารสุกรมาจากพวกธัญพืชซึ่งมักมีคุณภาพโปรตีนต่ำกว่าโปรตีนจากสัตว์เพราะมีกรดอะมิโนเมทไธโอนีน (methionine) และไลซีน (lysine) ที่จำเป็นต่ำกว่าความต้องการของสัตว์มาก ซึ่งโดยทั่วไปคุณภาพโปรตีนจะพิจารณาจากปริมาณและสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acid pattern) ถ้าใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์ ก็จัดว่าโปรตีนนั้นมีคุณภาพดี ทั้งนี้เพราะเมื่อโปรตีนดังกล่าวถูกย่อยและดูดซึมเข้าไปในร่างกายสัตว์จะสามารถนำกรดอะมิโนไปใช้เพื่อการสร้างโปรตีนในร่างกายได้ แต่ถ้าโปรตีนชนิดนั้นมีปริมาณและสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นไม่เหมาะสมกับความต้องการของสัตว์ เช่น ขาดกรดอะมิโนตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัวสัตว์จะไม่สามารถนำกรดอะมิโนตัวอื่นๆ ไปใช้สร้างโปรตีนได้ ซึ่งกรดอะมิโนตัวที่มักขาดเสมอในอาหารเรียกว่า limiting amino acid ในอาหารสุกรจะมีไลซีน ทรีโอนีน (threonine) เมทไธโอนีน และทริปโตเฟน (tryptophan) เป็น limiting amino acid โดยมีไลซีนเป็น first limiting amino acid ในอาหารสุกร ทั้งนี้เนื่องจากในธัญพืชอาหารสัตว์มีความเข้มข้นของไลซีนในระดับต่ำ (ดังแสดงในตาราง 4) โดยในข้าวโพดจะมีไลซีน เมทไธโอนีน และทริปโตเฟนต่ำกว่าความต้องการของสุกร แต่ในธัญพืชบางชนิด เช่น กากถั่วเหลืองจะมีไลซีนสูงแต่มีเมทไธโอนีนต่ำ ส่วนโปรตีนจากปลาป่นถือว่าเป็นโปรตีนคุณภาพดีเพราะมีกรดอะมิโนที่จำเป็นอยู่สูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมทไธโอนีนและไลซีนซึ่งมักมีไม่เพียงพอในอาหารสัตว์ ดังนั้นในการประกอบสูตรอาหารนอกจากจะคำนึงถึงระดับโปรตีนในอาหารแล้วยังต้องคำนึงถึงสัดส่วนของกรดอะมิโนในอาหารด้วย หรือต้องคำนึงถึงสัดส่วนของกรดอะมิโนในสูตรอาหารมากกว่าระดับโปรตีน ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ประโยชน์ได้ของวัตถุดิบอาหารสัตว์แต่ละชนิดแตกต่างกัน (Lewis, 2001)

ตาราง 4 กรดอะมิโนที่มีจำกัดในวัตถุดิบอาหารสุกร

	Limiting amino acids		
Cereal grain	**First**	**Second**	**Third**
Barley	Lysine	Threonine	Histidine
Corn	Lysine and Trytophan		Threonine
Oats	Lysine	-	-
Sorghum	Lysine	Threonine	Tryptophan
Triticale	Lysine	Threonine	-
Wheat	Lysine	Threonine	-

ที่มา: Lewis (2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.2 ภาวะสมดุลของไนโตรเจน (Nitrogen Balance)

โปรตีนประกอบด้วยกรดอะมิโนและมีไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ จึงนิยมใช้ค่าสมดุลของไนโตรเจนมาประยุกต์ใช้วัดคุณภาพของโปรตีน โดยวัดปริมาณไนโตรเจนที่กินเข้าไปในอาหารแล้วหักลบด้วยไนโตรเจนที่ถูกขับออกทางอุจจาระ ปัสสาวะ และผลผลิตต่างๆ เช่น น้ำนม (ถ้ามี) ส่วนปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะทำการวัดจากปริมาณไนโตรเจนที่ได้รับจากอาหารแล้วหักลบด้วยปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับออกมาทางมูล

ถ้าปริมาณไนโตรเจนที่สัตว์ได้รับจากอาหารเท่ากับปริมาณไนโตรเจนที่สัตว์ขับออกมา ถือว่า สัตว์จะมีไนโตรเจนในสภาวะสมดุล (nitrogen equilibrium) หรือค่าสมดุลไนโตรเจนเป็นศูนย์ (zero nitrogen balance) จะเกิดในสัตว์ที่โตเต็มที่ซึ่งไม่มีการเพิ่มน้ำหนักตัวหรือให้ผลผลิต (พันทิพา, 2539) ซึ่งถ้าปริมาณไนโตรเจนที่ได้รับจากอาหารที่กินเข้าไปมีมากกว่าปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกมา ถือว่า สัตว์จะมีสมดุลของไนโตรเจนเป็นบวก (positive nitrogen balance) นั่นคือ ร่างกายสัตว์สามารถกักเก็บไนโตรเจนไว้ได้ส่วนหนึ่ง จะเกิดในสัตว์ที่อยู่ในระยะเจริญเติบโตหรือให้ผลผลิตและในสัตว์ที่อยู่ในระยะพักฟื้น แต่ถ้าปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกมามีมากกว่าปริมาณไนโตรเจนที่ได้รับจากอาหารที่กินเข้าไป ถือว่า สัตว์จะมีสมดุลของไนโตรเจนเป็นลบ (negative nitrogen balance) หรือภาวะที่ร่างกายได้รับไนโตรเจนไม่เพียงพอ อาจเนื่องมาจากได้รับโปรตีนในอาหารไม่เพียงพอต่อความต้องการ ภาวะขาดอาหาร โปรตีนที่ร่างกายได้รับมีคุณภาพต่ำ หรือเกิดในสัตว์ที่กำลังเจ็บป่วยทำให้มีการดึงเอาโปรตีนในร่างกายที่สะสมไว้ในส่วนต่างๆ มาใช้

การประเมินคุณภาพโปรตีนโดยศึกษาสมดุลของไนโตรเจนเป็นหลัก มีหลายวิธี แต่วิธีที่รู้จักกันแพร่หลาย คือ คุณค่าทางชีวภาพ (biological value; BV) ของโปรตีน เป็นค่าที่บ่งบอกว่าปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซึมเข้าไปจะถูกสะสมไว้ในร่างกายร้อยละเท่าใด ซึ่งเป็นการวัดการใช้ประโยชน์จากโปรตีนในอาหารเพื่อใช้ในการสังเคราะห์เป็นส่วนประกอบและเนื้อเยื่อของร่างกาย (body tissue) การเจริญเติบโต และปริมาณไนโตรเจนที่ถูกกักเก็บไว้ในร่างกายของสัตว์ โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซึม (McDonald *et al*., 1973) หรือจะคำนวณหาค่า biological value ได้จากปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดที่ได้จากอาหารที่กิน และปริมาณที่ขับออกในรูปปัสสาวะ และอุจจาระ โดยสามารถหาได้จากสมการ 1 และ 2 (McDonald *et al*., 1973)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

$$\text{apparent BV} = \frac{\text{ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกสะสมไว้ในร่างกาย}}{\text{ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกดูดซึม}} \times 100 \quad \text{.....(1)}$$

$$= \frac{\text{N intake - (faecal N + urinary N)}}{\text{N intake - faecal N}} \times 100 \quad \text{.....(2)}$$

ปริมาณไนโตรเจนที่มีอยู่ในมูลไม่ได้เป็นไนโตรเจนของอาหารที่เหลือจากการย่อยและการดูดซึมเพียงอย่างเดียวแต่เป็น metabolic faecal nitrogen (MFN) คือเป็นส่วนหนึ่งของเซลล์เยื่อบุและเอนไซม์ที่ขับออกมาในทางเดินอาหาร รวมทั้งเซลล์ของจุลินทรีย์ในลำไส้ด้วย และไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์เป็นไนโตรเจนที่ได้จากปฏิกิริยาดีแอมมิเนชั่น (deamination) ของกรดอะมิโนในร่างกาย และจะถูกขับออกมาในรูปของยูเรียและแอมโมเนีย นอกจากนี้ ยังมีสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน เช่น ครีอะตินีน (creatinine) และกรดยูริค (uric acid) เป็นต้น ถ้าร่างกายได้รับอาหารที่ให้พลังงานเพียงพอ ปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะจะมีจำนวนน้อยที่สุด แต่ถ้าได้รับสารอาหารโปรตีนมากเกินพอร่างกายจะไม่เก็บสะสมไว้ และกรดอะมิโนส่วนเกินจะถูกเมตาบอไลซ์ผ่านปฏิกิริยาดีแอมมิเนชั่นและเปลี่ยนให้เป็นพลังงานหรือเก็บสะสมไว้ในรูปไขมันทำให้มีไนโตรเจนในปัสสาวะเพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งส่วนของไนโตรเจนที่ถูกขับออกมาเนื่องจากกระบวนการแคทาบอลิสม (catabolism) และการสร้างโปรตีนใหม่ในเนื้อเยื่อ (resynthesis of tissue protein) จะเป็นส่วนของ endogenous urinary nitrogen (EUN) ซึ่งเป็นส่วนของไนโตรเจนที่ไม่ได้รับโดยตรงจากอาหาร

การหาค่า MFN และ EUN นี้สามารถหาได้โดยการให้สัตว์ได้รับอาหารที่ไม่มีไนโตรเจน (N-free diet) แล้ววัดปริมาณที่ขับถ่ายออกมา ซึ่งไนโตรเจนเหล่านี้จะถูกขับออกนอกร่างกายอยู่แล้ว แม้ว่าสัตว์จะได้รับอาหารที่ไม่มีไนโตรเจน เพราะเป็นส่วนของไนโตรเจนที่ถูกกักเก็บไว้ในร่างกายก่อนแล้ว การนำมาหักออกจากปริมาณไนโตรเจนในมูลและในปัสสาวะจะทำให้ค่า biological value ถูกต้องยิ่งขึ้น ดังนั้น ค่าชีวภาพนี้จึงจัดว่าเป็นค่าชีวภาพที่แท้จริง (true biological value; TBV) หาได้จากสมการ 3 (McDonald *et al*., 1973)

$$\text{TBV} = \frac{\text{N intake - (faecal N - MFN) - (urinary N - EUN)}}{\text{N intake - (faecal N - MFN)}} \times 100 \quad \text{.....(3)}$$

ในการหาค่า BV ควรจะแทนโปรตีนที่ต้องการทดสอบลงในสูตรอาหารให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ และปริมาณโปรตีนที่ให้สัตว์กินจะต้องมากพอที่จะทำให้เกิดการสะสมไนโตรเจน แต่จะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ต้องไม่เกินกว่าปริมาณที่สะสมสูงสุด (maximum retention) เพราะถ้าให้ไนโตรเจนในระดับสูงเกินไป กรดอะมิโนส่วนที่เกินจะถูกสลายและขับออก เป็นผลให้ค่า BV ลดลง จึงจำเป็นต้องให้มีโภชนะที่ไม่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (nonnitrogenous nutrient) อย่างเพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการสลายตัวของโปรตีนมาใช้เป็นพลังงาน ซึ่งในทางปฏิบัตินิยมแทนที่วัตถุดิบในสูตรอาหารในระดับที่ทำให้สูตรอาหารนั้นมีระดับโปรตีน 10 เปอร์เซ็นต์ (บุญล้อม, 2541; Whittemore, 1993)

โปรตีนที่ร่างกายย่อยและดูดซึมเข้าไปได้มากที่สุด แล้วนำไปใช้ประโยชน์ได้หมดทำให้มีโปรตีนเหลืออยู่ในร่างกายมากจะมีค่า BV สูง ถือว่าเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพดี และโปรตีนที่ร่างกายย่อยและดูดซึมเข้าไปแล้วนำไปใช้ประโยชน์ได้บางส่วนและขับออกบางส่วนจะถือว่าเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพปานกลาง ส่วนโปรตีนที่ร่างกายย่อยและดูดซึมเข้าไปแล้วนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยและมีการขับออกทางอุจจาระมากทำให้มีโปรตีนเหลืออยู่ในร่างกายน้อยมากจะมีค่า BV ต่ำ ซึ่งถือว่าเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพต่ำด้วย

กรดอะมิโนที่สัตว์ดูดซึมเข้าไปจะถูกนำไปใช้ในการสร้างโปรตีนของร่างกาย การสร้างจะมีประสิทธิภาพมากน้อยเท่าใดขึ้นอยู่กับว่าสัดส่วนของกรดอะมิโนที่ถูกดูดซึมเข้าไปนั้นคล้ายคลึงกับสัดส่วนของกรดอะมิโนในร่างกายเพียงใด ถ้าคล้ายคลึงกันมากโปรตีนนั้นก็มีค่า BV สูง ทั้งนี้เพราะสัตว์มีความสามารถในการสะสมกรดอะมิโนในรูปอิสระได้น้อยมาก ถ้ากรดอะมิโนถูกดูดซึมเข้าไปไม่ถูกใช้ในการสร้างโปรตีนทันที ซึ่งอาจเนื่องจากการขาดกรดอะมิโนที่จำเป็นชนิดใดชนิดหนึ่งหรือหลายชนิด กรดอะมิโนที่จำเป็นชนิดอื่นๆ ที่มีอยู่ก็จะสลายตัวไปใช้ในการสร้างกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นหรือถูกใช้ไปในรูปของพลังงาน ซึ่งอาหารที่มีกรดอะมิโนที่จำเป็นชนิดใดชนิดหนึ่งไม่เพียงพอหรือมากเกินไปจะมีค่า BV ต่ำ

จากการที่สัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับประสิทธิภาพการนำโปรตีนนั้นไปใช้ในร่างกาย ดังนั้น การประเมินคุณค่าของโปรตีนโดยวัดปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นในอาหารนั้นเปรียบเทียบกับปริมาณกรดอะมิโนที่สัตว์ต้องการ หรือเปรียบเทียบกับกรดอะมิโนในโปรตีนมาตรฐาน เช่น ไข่ขาว หรือนม ซึ่งมีคุณภาพโปรตีนสูง วิธีการนี้เรียกว่า Chemical score (พันทิพา, 2539)

วิธีการ Chemical score มีหลักการว่า คุณภาพของโปรตีนจะถูกตัดสินจากปริมาณกรดอะมิโนที่จำเป็นตัวที่ขาดมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน ซึ่งกรดอะมิโนชนิดใดที่มีเปอร์เซ็นต์ต่ำสุดจะถือเป็น limiting amino acid และค่าดังกล่าวจะเป็น score ของโปรตีนนั้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.1.3 อาหารโปรตีนต่ำ (Low - protein diet)

การเลี้ยงสุกรเป็นการค้าในปัจจุบันมีการสร้างสูตรอาหารเพื่อทำให้สุกรเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงสุด โดยการคำนวณความต้องการโภชนะไนโตรเจนหรือโปรตีนจึงเป็นผลให้โปรตีนรวม (crude protein) ในอาหารมีเปอร์เซ็นต์สูงเกินความต้องการ สุกรสามารถนำไนโตรเจนที่กินเข้าไปในอาหารมาใช้ประโยชน์ได้เพียงส่วนหนึ่ง และส่วนที่เหลือจะถูกขับถ่ายออกจากร่างกายในรูปของเสีย ดังนั้น ในการประกอบสูตรอาหารจึงต้องคำนึงถึงการนำไปใช้ประโยชน์ในการเจริญเติบโตได้สูงสุดและมีการขับออกเป็นของเสียให้น้อยที่สุดด้วย สิ่งสำคัญที่สามารถทำให้สุกรมีการนำโปรตีนในอาหารไปใช้ได้อย่างเหมาะสม และสามารถมีการเจริญเติบโตที่สูงสุดได้ คือ รูปแบบสัดส่วนของกรดอะมิโนในอาหารที่สมดุล หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า โปรตีนอุดมคติ (Ideal protein) (Lewis, 2001) ซึ่งปริมาณของกรดอะมิโนต้องมีไม่มากเกินไป หรือขาดจนไม่เพียงพอ โดยเฉพาะกรดอะมิโนที่จำเป็น ดังนั้น ในการประกอบสูตรอาหารสุกร โดยยึดแนวคิดโปรตีนอุดมคติเป็นหลัก ซึ่งจะเปรียบเทียบปริมาณไลซีนเป็นหลัก (เทียบเป็น 100%) ทำให้มีกรดอะมิโนในสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการดำรงชีพและการสะสมโปรตีนในร่างกาย ซึ่งกรดอะมิโนทุกตัวที่ถูกกำหนดให้มีปริมาณที่พอเพียงในอาหารจะช่วยลดปริมาณของกรดอะมิโนที่ต้องถูกขับออกด้วย โดยระดับความต้องการกรดอะมิโนของสุกรแต่ละระยะของการเจริญเติบโตจะมีไม่เท่ากัน เพราะฉะนั้นจึงมีการกำหนดสัดส่วนของกรดอะมิโนตามระยะการเจริญเติบโต และน้ำหนักตัวของสุกร เพื่อให้สุกรได้รับกรดอะมิโนในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับความต้องการมากที่สุด

ในการประกอบสูตรอาหารสุกรมักจะยึดความต้องการโปรตีนเป็นหลักมากกว่าที่จะคำนึงถึงความต้องการกรดอะมิโนทำให้สุกรมีการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตที่ยังไม่ดีมากนัก เนื่องจากการคำนวณสูตรอาหารโดยใช้โปรตีนรวมเป็นหลักในอาหารที่มีแหล่งโปรตีนจากธัญพืชจะมีระดับโปรตีนรวมอยู่สูง แต่อาจทำให้ในสูตรอาหารมีโอกาสที่จะขาดกรดอะมิโนบางตัวได้ เช่น ในอาหารที่ใช้ข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักจะทำให้ในสูตรอาหารมีการขาดไลซีนซึ่งเป็นกรดอะมิโนจำเป็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากในกากถั่วเหลืองจะมีระดับโปรตีนรวมสูงแต่มีเมทไธโอนีนและไลซีนเป็น limiting amino acid ส่วนในข้าวโพดซึ่งเป็นแหล่งของพลังงานจะมีระดับโปรตีนรวมต่ำและมีไลซีนเป็น limiting amino acid เช่นเดียวกับกากถั่วเหลือง ซึ่งเมื่อใช้ธัญพืชทั้ง 2 นี้เป็นวัตถุดิบหลักในอาหารทำให้มีการขาดไลซีนได้ส่งผลให้สัตว์มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตไม่ดี ดังนั้น การคำนวณสูตรอาหารโดยใช้กรดอะมิโนเป็นหลักแทนการใช้ปริมาณโปรตีนรวมจะทำให้มีความแม่นยำและใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์มากกว่า และทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงสุด (Lewis, 2001)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การลดระดับโปรตีนรวมในอาหารลง แล้วเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ให้เพียงพอกับความต้องการไม่มีผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของสัตว์ แต่ยังช่วยลดปริมาณไนโตรเจนที่ขับออก (nitrogen excretion) โดยไม่มีผลต่อการกักเก็บไนโตรเจนไว้ในร่างกาย (nitrogen retention) และน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยลดพลังงานที่สูญเสีย (energy loss) ในการขับไนโตรเจนหรือกรดอะมิโนส่วนเกินออกนอกร่างกายในรูปยูเรียในปัสสาวะ และพลังงานที่สูญเสียในรูปความร้อน (heat production) (Bellego *et al*., 2001) โดยการลดระดับโปรตีนในอาหารลงสามารถลดได้ 2 หรือ 3 เปอร์เซ็นต์ไม่มีผลต่ออัตราเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (average daily gain; ADG) และประสิทธิภาพการใช้อาหาร (feed efficiency) แต่ต้องทำการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ให้เพียงพอต่อความต้องการ (Cromwell, 1996; Tuitoek *et al*., 1997) และการลดระดับโปรตีนในอาหารลง 1 เปอร์เซ็นต์ และเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์มีผลทำให้สุกรปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับออกในสิ่งขับถ่าย (มูล และปัสสาวะ) ลดลงอย่างน้อย 8 เปอร์เซ็นต์ (Kerr and Easter, 1995; Sutton *et al*., 1999) โดยไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตของสุกร

Tuitoek *et al*. (1997) ทำการศึกษาถึงผลของการลดระดับกรดอะมิโนส่วนเกินในอาหารสุกรระยุรุ่นถึงขุนต่อสมรรถภาพการผลิต โดยในแต่ละระยะสุกรได้รับอาหาร 3 สูตรมีความแตกต่างกันของระดับโปรตีน ซึ่งในสุกรระยะรุ่นได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีน 16.6, 15.0 และ 13.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในสุกรระยะขุนได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีน 14.2, 12.8 และ 11.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งมีการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ให้เพียงพอกับความต้องการของสุกร พบว่า สุกรในระยะขุนหรือระยะรุ่นถึงขุน การลดระดับโปรตีนในอาหารลงแล้วเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของสุกร ($P>0.10$) แต่ในสุกรระยะขุนที่ได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีน 11.0 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มว่าอัตราการเจริญเติบโตลดลงและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งอาหารที่มีระดับโปรตีนต่ำไม่มีผลต่อคุณภาพซาก แต่ความหนาไขมันสันหลังมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากการใช้อาหารที่มีโปรตีนต่ำจะช่วยเพิ่มพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้สำหรับการสะสมเนื้อเยื่อในร่างกาย ซึ่งให้ผลคล้ายคลึงกับการทดลองของ Figueroa *et al*. (2002) ที่ได้ทำการศึกษาถึงการลดระดับโปรตีนในอาหารลงและเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ในอาหารสุกรระยะรุ่น โดยมีระดับโปรตีนในอาหาร 16, 15, 14, 13, 12 และ 11 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ (lysine, tryptophan, threonine และ methionine) พบว่า การลดระดับโปรตีนในอาหารไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวัน อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวและคุณภาพซากของสุกร แต่สุกรที่ได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีน 11 เปอร์เซ็นต์ มีแนวโน้มว่าสุกรสมรรถภาพการผลิตลดลง อย่างไรก็ตาม การใช้อาหารที่มีระดับโปรตีนต่ำ พบว่า

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสุกรอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) (Gomez *et al.*, 2002)

การลดระดับโปรตีนในอาหารจะช่วยลดปริมาณไนโตรเจนที่ขับออก โดยปริมาณโปรตีนที่ลดลง 1 เปอร์เซ็นต์ในอาหารจะช่วยลดปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกได้ประมาณ 8.4 เปอร์เซ็นต์ (Sutton *et al.*, 1999) นอกจากนี้ การลดระดับโปรตีนในอาหารลงและเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ยังช่วยลดการเกิดก๊าซและกลิ่นที่เกิดจากสิ่งขับถ่ายสุกร ซึ่งการลดระดับโปรตีนในอาหารลง 4 เปอร์เซ็นต์จะช่วยลดการเกิดแอมโมเนียได้ถึง 75 เปอร์เซ็นต์และลดการเกิดกลิ่นได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ (Obrock *et al*., 1997)

2.1.4 อาหารโปรตีนต่ำ และระดับ dEB ของอาหาร

การลดระดับโปรตีนในอาหารลง แล้วทำการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับ dEB ในอาหารทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงระดับของวัตถุดิบหลักในอาหาร เช่น การประกอบสูตรอาหารที่ใช้ข้าวโพด และกากถั่วเหลืองเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีระดับโปรตีนในอาหาร 16 เปอร์เซ็นต์จะมีระดับ dEB (mEq/kg of diet; $Na^+ + K^+ - Cl^-$) ในอาหารประมาณ 175 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เมื่อทำการลดระดับโปรตีนในอาหารลงเป็น 12.5 เปอร์เซ็นต์ทำให้ระดับ dEB ในอาหารลดลงเป็น 135 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม (Kephart and Sherritt, 1990) เนื่องจากในการปรับระดับโปรตีนในอาหารลงทำให้มีการเปลี่ยนแปลงระดับของวัตถุดิบต่างๆ ในสูตรอาหาร ซึ่งการลดปริมาณกากถั่วเหลืองในสูตรอาหารทำให้ระดับของโพแทสเซียม (K) ในอาหารลดลงเพราะความเข้มข้นของโพแทสเซียมในกากถั่วเหลืองจะมีมากกว่าที่มีในข้าวโพดถึง 7 เท่า (NRC, 1998) และการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ในอาหารโปรตีนต่ำมีผลทำให้ระดับ dEB ในอาหารลดลงอีก เนื่องจากกรดอะมิโนสังเคราะห์ที่ใช้เสริมในอาหารจะอยู่ในรูปของเกลือคลอไรด์ (Cl^- salts) เช่น กรดอะมิโนไลซีนสังเคราะห์โดยทั่วไปจะอยู่ในรูป L-Lysine.HCL ทำให้ได้รับ Cl^- เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ระดับ dEB ในอาหารลดลง และการเสริม L-Lysine.HCL 1 กรัมทำให้ร่างกายได้รับกรดประมาณ 7 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม (Patience, 1990) และเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์ (lysine และ threonine) ในอาหารสุกรที่มีระดับโปรตีนต่ำคือ 12 เปอร์เซ็นต์และมีระดับ dEB ในอาหาร เท่ากับ 157 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัมมีผลทำให้สมรรถภาพการผลิตของสุกรลดลงเมื่อเทียบกับสุกรที่ได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์และระดับ dEB 212 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม แต่เมื่อทำการเสริม $NaHCO_3$ ในอาหารที่มีโปรตีนต่ำเพื่อปรับระดับ dEB ของอาหารให้เพิ่มขึ้นจาก 157 เป็น 212 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัมมี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ผลทำให้สุกรมีสมรรถภาพการผลิตใกล้เคียงกับสุกรที่ได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีน 16 เปอร์เซ็นต์ (Hansen *et al*., 1993) ซึ่งสอดคล้องกับ Austic and Calvert (1981) และ Patience *et al*. (1987) ที่รายงานว่า การเพิ่มระดับของ Na หรือ K ในอาหารที่มีระดับโปรตีนต่ำหรือขาดไลซีน (lysine-deficient diets) ทำให้สุกรมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ($P<0.05$)

2.2 ของเหลวในร่างกาย (body fluid) และอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte)

2.2.1 ของเหลวในร่างกายและสารละลายไฟฟ้า

ร่างกายมนุษย์และสัตว์ชั้นสูงต่างๆ ประกอบด้วยระบบการทำงานหลายระบบซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ ระบบทางเดินอาหารทำหน้าที่ย่อยและดูดซึมอาหาร ระบบหายใจทำหน้าที่แลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจน (O_2) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ระบบขับถ่ายปัสสาวะเพื่อการรักษาดุลน้ำ ดุลสารละลายไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) และการขับถ่ายของเสีย ระบบไหลเวียนทำหน้าที่ในการนำสารต่างๆ จากอวัยวะหนึ่งไปยังอวัยวะอื่นๆ ที่เหมาะสม ระบบสืบพันธุ์ทำหน้าที่เพื่อการดำรงชีวิตของเผ่าพันธุ์ ส่วนระบบประสาทและฮอร์โมนทำหน้าที่ควบคุมและประสานงานกิจกรรมของระบบต่างๆ ของร่างกาย การทำงานร่วมกันของระบบต่างๆ เหล่านี้เพื่อรักษาองค์ประกอบของของเหลวภายนอกเซลล์ให้อยู่ในภาวะที่คงตัว (steady state) ด้วยการเปลี่ยนแปลงการนำเข้าและการกำจัดทิ้งให้สมดุลกันโดยไม่ทำให้ค่าตัวแปรต่างๆ ของของเหลวภายนอกเซลล์ ได้แก่ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ ความเข้มข้นของน้ำตาล และความดันเลือด มีการเปลี่ยนแปลงไปมากจนเกิดอันตรายต่อการทำงานของระบบต่างๆ ในร่างกายได้ เรียกภาวะการทำงานดังกล่าวว่า ภาวะธำรงดุล (homeostasis) และกระบวนการที่พยายามรักษาให้ส่วนประกอบของของเหลวนอกเซลล์คงที่อยู่เสมอ เรียกว่า ภาวะธำรงดุลของร่างกาย ซึ่งอาศัยหลายๆ ระบบทำงานร่วมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งไต นอกจากระบบต่างๆ ต้องร่วมกันทำงานเพื่อให้เกิดสภาพคงตัวดังกล่าวแล้ว เซลล์แต่ละเซลล์ของร่างกายก็ต้องมีความสามารถที่จะรักษาองค์ประกอบภายในเซลล์เองให้คงตัวไว้ค่าหนึ่งเช่นกัน เช่น การมีสูบไอออน (ion pump) เป็นต้น เรียกว่า ภาวะธำรงดุลของเซลล์ (สัญญา, 2535)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.2 ของเหลวในร่างกาย (body fluid)

ร่างกายมนุษย์และสัตว์มีน้ำหรือของเหลวเป็นองค์ประกอบมากที่สุดถึง 60 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว จึงทำให้น้ำเป็นสิ่งจำเป็นในการดำรงชีพของสิ่งมีชีวิต ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในกระบวนการเมทาบอลิซึมต่างๆ ในร่างกายล้วนอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง เซลล์ต่างๆ ภายในอวัยวะของมนุษย์และสัตว์อยู่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นน้ำและมีอิเล็กโทรไลต์เจือปนอยู่ ดังนั้น เมื่อความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ในส่วนที่อยู่นอกเซลล์เปลี่ยนแปลงมากเกินกว่าที่ระบบปรับสมดุลของร่างกายจะทำได้ก็จะมีผลกระทบกระเทือนถึงส่วนประกอบของเซลล์ เป็นผลให้ทำให้การทำงานของเซลล์ไม่สมบูรณ์ (สง่า, 2526)

น้ำหรือของเหลวในร่างกายจำแนกได้เป็น 2 แหล่ง (อภิชัย, 2545) คือ

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

1.1) พลาสมา (plasma) คือ ส่วนที่อยู่ภายในหลอดเลือดซึ่งไม่รวมเม็ดเลือด พบประมาณ 4.5 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักตัว มีองค์ประกอบเป็นโซเดียมไอออน (Na^+) และคลอไรด์ไอออน (Cl^-) เป็นจำนวนมาก แต่มีโพแทสเซียมไอออน (K^+) อยู่น้อย ส่วนโปรตีนและไอออนอื่นมีอยู่บ้าง

1.2) ส่วนของของเหลวระหว่างเซล์ (interstitial fluid; ISF) เป็นของเหลวที่แทรกอยู่ระหว่างเซลล์

1.3) ของเหลวในช่องพิเศษ (transcellular fluid) เป็นของเหลวอีกส่วนหนึ่งของของเหลวระหว่างเซลล์ ซึ่งแยกออกมาจากช่องว่างภายนอกเซลล์ (extracellular space) ช่องว่างนี้จะถูกล้อมรอบด้วยชั้นของเซลล์บุผิว บางช่องสามารถเปิดออกสู่ภายนอกร่างกายได้ ได้แก่ ของเหลวในทางเดินอาหาร ทางเดินปัสสาวะ น้ำกาม เหงื่อ และน้ำตาเป็นของเหลวที่สามารถออกสู่ภายนอกร่างกายได้ และส่วนที่ไม่สามารถออกสู่นอกร่างกายได้ ได้แก่ ของเหลวสมองร่วมไขสันหลัง (cerebrospinal fluid; CSF) ของเหลวในช่องว่างระหว่างเยื่อบุปอด ของเหลวในลูกตา ของเหลวในช่องว่างระหว่างเยื่อบุหัวใจ ของเหลวในช่องท้องและน้ำไขข้อ

ของเหลวในส่วนที่ 1.2 และ 1.3 นี้รวมกันจะมีปริมาณประมาณ 15.5 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว มีอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นองค์ประกอบจะใกล้เคียงกับในส่วนของพลาสมา ยกเว้นโปรตีนที่พบได้น้อยมาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

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

2.2.3 สารละลายไฟฟ้า หรืออิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

สารละลายไฟฟ้า หรืออิเล็กโทรไลต์ คือสารที่อยู่ในของเหลวของร่างกาย ละลายน้ำได้ซึ่งจะแตกตัวให้ไอออนหรือกลุ่มของไอออน มีทั้งไอออนบวก (cation) และไอออนลบ (anion) ในปริมาณที่มีประจุเท่ากันเสมอ โดยทั่วไปส่วนประกอบที่เป็นโลหะ เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) และแมกนีเซียม (Mg) จะแตกตัวได้เป็นไอออนบวก คือ $Na,^+$ $K,^+$ $Ca,^{2+}$ และ Mg^{2+} ตามลำดับ ขณะที่ส่วนประกอบซึ่งเป็นอโลหะหรืออนุมูลของมันจะแสดงคุณสมบัติเป็นไอออนลบ เช่น $Cl,^-$ $HCO_3,^-$ $Protein,^-$ และ PO_4^{3-} เป็นต้น (สมโพธิ, 2530)

อิเล็กโทรไลต์แบ่งได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ (สัญญา, 2535) คือ

1) เป็นสารประกอบพวกเกลือ ได้แก่ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แมกนีเซียมซัลเฟต ($MgSO_4$) แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) แคลเซียมซัลเฟต ($CaSO_4$) แคลเซียมคาร์บอเนต ($CaCO_3$) แคลเซียมไบคาร์บอเนต ($CaHCO_3$) โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) โพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ($KHCO_3$) เป็นต้น ในภาวะที่มีความเข้มข้นต่ำ จะพบว่า NaCl และ KCl สามารถแตกตัวได้อย่างสมบูรณ์เมื่อละลายน้ำ (ดังสมการ 4) ส่วนตัวอื่นๆ เช่น $MgCl_2$, $CaCl_2$ และ $CaSO_4$ จะแตกตัวได้แต่ไม่สมบูรณ์ถึงแม้ในภาวะที่มีความเข้มข้นต่ำ ดังสมการ 5 (สัญญา, 2535)

$$NaCl \rightleftharpoons Na^+ + Cl^- \quad \text{.....} \quad (4)$$

$$CaCl_2 \rightleftharpoons Ca^{2+} + 2Cl^- \quad \text{.....} \quad (5)$$

2) สารประกอบที่เป็นกรด เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) กรดฟอสฟอริค (H_3PO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดไฮโดรคลอริก (HCl) และกรดอินทรีย์ (organic acid) เช่น กรดแลคติก (lactic acid) คีโตนบอดี (ketone body) และกรดอะซิติก (acetic acid) ในภาวะที่ความเข้มข้นไม่สูงมากนัก พวกที่เป็นกรดแก่ เช่น HCl จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ ในขณะที่กรดอ่อน เช่น กรดอินทรีย์ จะแตกตัวได้บางส่วน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3) สารประกอบที่เป็นด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) แอมโมเนีย (NH_3) แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($CaOH_2$) ซึ่งพวกเบสแก่ เช่น NaOH และ KOH จะแตกตัวอย่างสมบูรณ์ในน้ำ ในขณะที่เบสอ่อน เช่น $CaOH_2$ และ NH_4OH จะแตกตัวได้เพียงบางส่วน สำหรับ NH_3 เมื่อละลายน้ำจะได้เป็นแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) และ ไฮดรอกซิล (OH^-) เช่นเดียวกับ NH_4OH

จะเห็นได้ว่า อิเล็กโทรไลต์ล้วนเป็นสารประกอบทั้งสิ้น อย่างไรก็ตามเมื่ออิเล็กโทรไลต์ละลายน้ำจะแตกตัวให้ไอออนต่างๆ ดังนั้น เมื่ออิเล็กโทรไลต์ในร่างกายมักจะหมายถึงไอออนต่างๆ ในร่างกายนั่นเอง เช่น Na^+, K^+, Ca^{2+}, H^+, $H_2PO_4^-$, Cl^-, HCO_3^-, $Protein^-$, SO_4^{2-} และไอออนของกรดอินทรีย์ต่างๆ เป็นต้น

ความเข้มข้นของไอออนที่เป็นส่วนประกอบของของเหลวในส่วนต่างๆ ของร่างกายมนุษย์และสัตว์ได้แสดงดังในตาราง 5

ตาราง 5 แสดงปริมาณของอิเล็กโทรไลต์ในของเหลวส่วนต่างๆ ของร่างกาย

	พลาสมา (plasma) (mEq/L)	**ของเหลวระหว่างเซลล์ (ISF) (mEq/L)**	**ของเหลวในเซลล์ (ICF) (mEq/L)**
ไอออนประจุบวก			
- โซเดียมไอออน (Na^+)	145.0	139.0	10.0
- โพแทสเซียมไอออน (K^+)	4.5	4.0	158.0
- แมกนีเซียมไอออน (Mg^{2+})	1.6	1.0	31.0
- แคลเซียมไอออน (Ca^{2+})	5.0	4.0	6.0
ผลรวม	**156.0**	**148.0**	**205.0**
ไอออนประจุลบ			
- คลอไรด์ไอออน (Cl^-)	103.0	112.0	1.0
- ไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-)	27.0	25.0	10.0
- ฟอสเฟตไอออน (PO_4^{3-})	2.0	2.0	24.0
- ซัลเฟตไอออน (SO_4^{2-})	1.0	1.0	19.0
- โปรตีน ($Protein^-$)	18.0	2.0	65.0
- กรดอินทรีย์	5.0	6.0	16.0
- ฟอสเฟตอินทรีย์	0.0	0.0	70.0
ผลรวม	**156.0**	**148.0**	**205.0**

ที่มา: อภิชัย (2545)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

จากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า

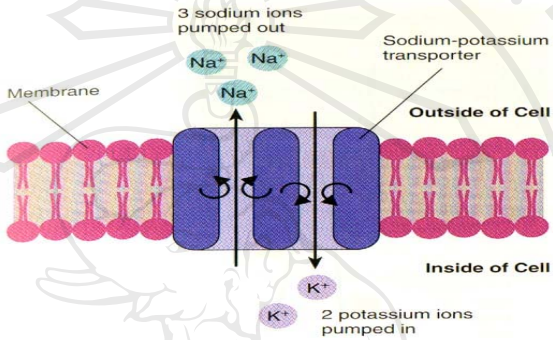
1) ความเข้มข้นของไอออนบวกและไอออนลบในน้ำส่วนใดส่วนหนึ่ง (fluid space) มักเท่ากัน (สง่า, 2526) เช่น ในพลาสมา จะมีไอออนประจุบวกและประจุลบอย่างละ 156 mEq/L

2) ของเหลวระหว่างเซลล์ (ISF) มีโปรตีนอยู่น้อยกว่าของเหลวส่วนอื่นๆ มาก หรือเกือบจะไม่มีอยู่เลย แต่จะมีน้ำและอิเล็กโทรไลต์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เพราะผนังหลอดเลือดฝอยประกอบด้วยชั้นเอ็นโดธีเลียมเพียงชั้นเดียว ถัดมาทางด้านนอกก็มีชั้นเบสเมนท์เมมเบรนล้อมรอบอยู่ ทำให้โมเลกุลที่มีขนาดเล็ก เช่น น้ำ ไอออนต่างๆ และน้ำตาลกลูโคสสามารถเคลื่อนที่ผ่านผนังหลอดเลือดฝอยได้ง่าย ส่วนโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ เช่น โปรตีน และเม็ดเลือดแดงถูกกักไว้ภายในหลอดเลือด

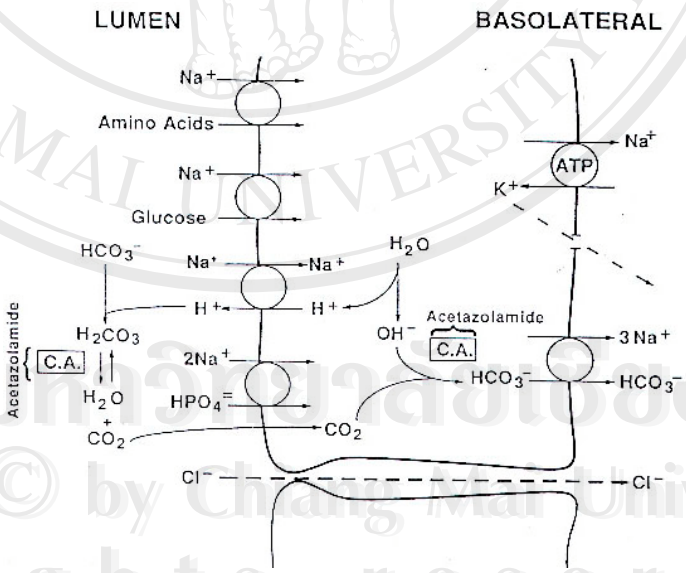
3) Na^+ เป็นไอออนที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดในของเหลวนอกเซลล์ ขณะที่ส่วนของของเหลวในเซลล์จะมี K^+ สูงที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากการทำงานของเอนไซม์ Na^+- K^+ ATPase เป็นแบบ antiport ต้านความเข้มข้น ซึ่งจะทำหน้าที่รักษาระดับของ Na^+ ให้มีมากในของเหลวนอกเซลล์ และมี K^+ มากภายในเซลล์ โดยเอนไซม์ ATPase นี้จะพบภายในเซลล์เมมเบรนของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด ซึ่งภายในโมเลกุลจะประกอบด้วยสายเปปไทด์ 2 ชนิด คือ สายเบต้าซึ่งเป็นพวกไกลโคโปรตีน 2 เส้น และสายแอลฟ่าซึ่งเป็นสายเปปไทด์ 2 เส้น เรียงตัวอยู่ตลอดความหนาของเซลล์เมมเบรนและมีตัวรับของโมเลกุล ATP และ Na^+ อยู่ด้านในเซลล์ ส่วนตัวรับ K^+ อยู่ทางด้านนอกเซลล์ โดยสายแอลฟ่านี้มีอยู่ 2 โครงสร้าง คือ โครงสร้างที่มีหมู่ฟอสเฟตเกาะ (phosphorylated) และไม่มีหมู่ฟอสเฟตเกาะ (dephosphorylated) ซึ่งโครงสร้างทั้ง 2 นี้สามารถเปลี่ยนแปลงกลับไปมาได้ โดยการทำงานของเอนไซม์ Na^+- K^+ ATPase จะเริ่มจาก Na^+ 3 ไอออน (3 Na^+) จับกับ ATP ภายในเซลล์ จากนั้นส่วนของ 3 Na^+ จะจับกับตัวรับที่อยู่ในโมเลกุลของเอนไซม์ ATPase ส่งผลให้มีการย้ายหมู่ฟอสเฟตจาก ATP ไปยังโมเลกุลของกรดอะมิโน (แอสพาทิก หรือ กลูทามิก) ของเอนไซม์ ATPase เกิดเป็นพันธะเอซิล – ฟอสเฟตพลังงานสูง (high energy acylphosphate) มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเอนไซม์ ATPase จาก dephosphorylated เป็น phosphorylated และปล่อย 3 Na^+ ออกสู่ของเหลวนอกเซลล์ ขณะเดียวกันก็รับ K^+ จำนวน 2 ไอออนเข้ากับตัวรับบนเอนไซม์ จากนั้นเอ็นไซม์ phosphatase จะทำการสลายพันธะเอซิล – ฟอสเฟตพลังงานสูงทำให้โครงสร้างของเอนไซม์ ATPase เปลี่ยนกลับมาเป็นแบบ dephosphorylated อีกครั้งพร้อมทั้งมีการปล่อย K^+ สู่ภายในไซโทพลาสซึม (อภิชัย, 2545) (ดังแสดงไว้ในภาพ 1) ดังนั้น จะเห็นได้ว่าเอนไซม์ Na^+- K^+ ATPase นี้มีส่วนในการควบคุมปริมาตรของเซลล์ ถ้าเกิดความไม่สมดุลย์กันระหว่างไอออนในของเหลวภายในและภายนอกเซลล์แล้ว จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของความดันออสโมติคได้ นอกจากนี้ความไม่สมดุลนี้ยังช่วยใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

การขนส่งน้ำตาลและกรดอะมิโนรวมทั้งไอออนอื่นๆ เข้าออกเซลล์โดยอาศัยพลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของสารหนึ่งซึ่งมักจะเป็น Na^+ หรือโปรตรอน (H^+) จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงผ่านเซลล์เมมเบรนไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า ซึ่งเป็นกระบวนการขนส่งสารแบบกัมมันต์ทุติยภูมิ และยังใช้พลังงานนี้ในการขนส่งสารอีกชนิดแบบต้านความเข้มข้น หรือต้านแรงผลักของประจุไฟฟ้าด้วยเช่นกัน เช่น Na^+- Glucose symporter, Na^+- Amino acid symporter, Na^+- H^+ exchanger และ Na^+- K^+- $2Cl^-$ cotransporter เป็นต้น (ดังแสดงไว้ในภาพ 2)



ภาพ 1 การทำงานของ Na^+- K^+ ATPase pump. (Murray *et al*., 2000)



ภาพ 2 วิธีการต่างๆ ที่ proximal tubule ใช้ขนส่งสารร่วมกับการขนส่ง Na^+ ผ่าน cell membrane: C.A. = carbonic anhydrase. (Jacobson *et al*., 1995)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การควบคุมปริมาตรสารน้ำในแต่ละส่วนของร่างกายให้คงที่นั้น ต้องอาศัยกลไกหลายอย่างร่วมกัน (นีโลบล, 2542) ที่สำคัญ ได้แก่

1) แรงดันออสโมติค เป็นแรงที่ทำให้มีการเคลื่อนที่ของน้ำ ซึ่งจะต้องได้ดุลกันระหว่างน้ำแต่ละส่วน เพื่อรักษาปริมาตรน้ำให้คงที่

2) การซึมซ่าน (diffusion) เกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออนต่างๆ

3) Gibbs - Donnan Equilibrium เป็นกลไกสำคัญในร่างกายที่ทำให้มีการกระจายของอิเล็กโทรไลต์ที่สารน้ำแต่ละส่วนแตกต่างกันออกไป เนื่องจากการที่ของเหลวในเซลล์ (ICF) มีโปรตีนมากกว่าในของเหลวนอกเซลล์ (ECF) จึงเป็นผลให้ที่ภาวะสมดุล ค่ารวมของ diffusion ions ใน ICF มีปริมาณมากกว่าใน ECF โดยที่แรงดันของออสโมติคของทั้ง ICF และ ECF เท่ากัน

4) Na^+ - K^+ pump เป็นกลไกสำคัญที่กำหนดให้มีการกระจายของ Na^+ และ K^+ ในของเหลวแต่ละส่วนแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้เพื่อควบคุมปริมาตรของเซลล์ให้คงที่ โดยที่ภายในเซลล์จะมี K^+ อยู่เป็นจำนวนมาก ในขณะที่ Na^+ จะถูกขับออกมาอยู่ในส่วน ECF โดยอาศัยการทำงานของ Na^+ - K^+ ATPase มิฉะนั้นแล้ว ปริมาณของ Na^+ จะมีอยู่มากภายในเซลล์และทำให้ขนาดของเซลล์พองออกเป็นผลเสียต่อการทำงานของเซลล์ได้ ในภาวะที่มีการยับยั้งเอนไซม์นี้ พบว่า การแลกเปลี่ยน Na^+ และ K^+ ยังพอเกิดขึ้นได้บ้าง จึงเชื่อว่าคงมีกลไกอื่นอีกที่ช่วยควบคุมอยู่นอกเหนือจากเอนไซม์ดังกล่าวแล้ว

5) Starling's force เป็นแรงที่ทำให้มีการแลกเปลี่ยนสารน้ำในพลาสมากับของเหลวระหว่างเซลล์ (ISF) ทั้งนี้ปัจจัยสำคัญเกิดจากความแตกต่างของแรงดันในหลอดเลือดกับแรงดันออสโมติคที่ได้จากโปรตีนเป็นผลให้น้ำและไอออนต่างๆ จะถูกขับออกทางหลอดเลือดแดงฝอย และ 90 เปอร์เซ็นต์จะถูกขับออกทางหลอดเลือดดำ ซึ่งน้ำส่วนที่เหลือจะถูกดูดกลับเข้าทางหลอดเลือดแดงฝอยจนหมด

การควบคุมทั้งหมดนี้มีผลร่วมกัน ทำให้ปริมาตรน้ำและความเข้มข้นของไอออนในแต่ละส่วนแตกต่างกัน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.4 หน่อยวัดความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์

ในการวัดค่าความเข้มข้นของอิเล็กโตรไลต์จะใช้ค่าหน่วยวัดเป็น equivalent/L (eq/L, Eq/L), millieqivalent/L (meq/L, mEq/L) เพื่อแสดงถึงภาวะประจุไฟฟ้า ซึ่งในการคำนวณนั้นจะใช้สูตรคำนวณที่แสดงในสมการที่ 6, 7 และ 8 ตามลำดับ

$$Eq = \frac{g \times valency}{MW} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (6)$$

$$mEq = \frac{mg \times valency}{MW} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (7)$$

$$1\ Eq/L = 1000\ mEq/L \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (8)$$

โดย valence คือ ค่าประจุไฟฟ้าของไอออนใน 1 โมลของไอออนนั้น ซึ่งสารที่เป็น univalent จะมีค่า 1 mole เท่ากับ 1 equivalent เช่น Na^+, K^+ และ Cl^- แต่สารที่เป็น divalent จะมีค่า 1 mole เท่ากับ 2 equivalent เช่น Ca^{2+} และ MW คือ ค่าน้ำหนักของสารชนิดใดๆ ก็ตาม คิดเป็นกรัมเท่ากับน้ำหนักโมเลกุลของสารนั้น เช่น 1 โมลของ Na^+ เท่ากับ 23 กรัม และ K^+ เท่ากับ 39.1 กรัม ส่วน Cl^- เท่ากับ 35.5 กรัม

ซึ่ง 1 equivalent คือ 1 โมลของไอออนใดๆ ก็ตามหารด้วยวาเลนซี (valence) เช่น

1 Eq ของ Na^+ มีค่าเท่ากับ 23 กรัม/1 = 23 กรัม

K^+ มีค่าเท่ากับ 39.1 กรัม/1 = 39.1 กรัม

Cl^- มีค่าเท่ากับ 35.5 กรัม/1 = 35.5 กรัม

ในการคำนวณระดับของ dEB ในสูตรอาหารจะใช้ค่าความเข้มข้นของ Na^+, K^+ และ Cl^- ในวัตถุดิบอาหาร ซึ่งจะหาเป็นปริมาณความเข้มข้นของ Na^+, K^+ และ Cl^- ในวัตถุดิบแต่ละชนิดที่ใช้ในการประกอบสูตรอาหาร แล้วนำมาคิดเป็นค่า dEB รวมของอาหาร 1 กิโลกรัม ซึ่งมีหน่วยเป็น millieqivalent (mEq) ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

2.2.5 บทบาทของอิเล็กโทรไลต์ที่สำคัญในร่างกาย

1. โซเดียม (Na)

ในของเหลวนอกเซลล์พบว่ามีไอออนบวกที่เป็น Na^+ อยู่มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของไอออนบวกทั้งหมด และประมาณ 60 – 65 เปอร์เซ็นต์ของ Na^+ ที่มีอยู่ทั้งหมดในร่างกายพบในพลาสมาและของเหลวนอกเซลล์อื่น นอกจากนั้นมีอยู่ในกระดูกกับของเหลวที่อยู่ในเซลล์เพียงเล็กน้อย

บทบาทของ Na ในร่างกาย (สัญญา, 2534)

1) เป็นตัวสำคัญในการรักษาแรงดันออสโมติค เนื่องจาก Na^+ เป็นไอออนที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดในของเหลวภายนอกเซลล์ และเคลื่อนผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ได้น้อยจึงเป็นตัวสำคัญที่กำหนดแรงออสโมติคของของเหลวนอกเซลล์ รวมทั้งควบคุมปริมาตรของของเหลวในส่วนต่างๆ ของร่างกาย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2) เป็นส่วนประกอบของน้ำย่อย น้ำหลั่งต่างๆ ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งในวันหนึ่งร่างกายจะมีการหลั่งประมาณ 8 ลิตร ซึ่งมี Na อยู่ประมาณ 1,000 mmol (ดังแสดงไว้ในตาราง 6)

ตาราง 6 ปริมาณและความเข้มข้นของ electrolyte ในน้ำหลั่งในส่วนต่างๆ ของทางเดินอาหาร

Site	Volume lites/day	$[Na^+]$ mmol/l	$[K^+]$ mmol/l	$[Cl^-]$ mmol/l	$[HCO_3^-]$ mmol/l
Salivary	1.5	10	26	10	30
Gastric	1.5	20	10	130	0
Duodenal	3 - 8	110	15	115	10
Pancreas	0.5	140	5	30	115
Bile Duct	0.5	140	5	100	25
Jajunal	3.0	140	5	100	20
Ileal	0.5	80	10	60	75
Colon	-	60	30	40	-

ที่มา: Halperin (1994)

3) ดุลกรด - ด่าง การควบคุมการคัดหลั่งกรดที่ไตเกี่ยวข้องกับการควบคุมการขนส่ง Na^+ ผ่านหลอดไตฝอยส่วนปลาย การดูดกลับ Na^+ จะทำให้มีการคัดหลั่งกรดออกสู่โพรงหลอดไตฝอยส่วนปลาย ในลักษณะแลกเปลี่ยนกัน

4) ดุล K^+ และอิเล็กโทรไลต์อื่นๆ ซึ่งดุลของอิเล็กโทรไลต์ต่างๆ ภายนอกเซลล์ถูกควบคุมโดยกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง Na^+ ในอวัยวะต่างๆ ได้แก่ ระบบทางเดินอาหาร ระบบขับถ่ายปัสสาวะ คุณสมบัตินี้คล้ายกับการควบคุมปริมาตรของของเหลวนอกเซลล์

5) จำเป็นในการทำงานของกล้ามเนื้อและเซลล์ประสาท เนื่องจาก Na^+ เป็นไอออนที่สำคัญที่กำหนดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าในขณะเกิดศักยะเพื่องาน (action potential) ในเซลล์กล้ามเนื้อทุกชนิดและเซลล์ประสาท

6) การดูดซึมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและกรดอะมิโน การขนส่งน้ำต่อกลูโคสและกรดอะมิโนในระบบทางเดินอาหารและหลอดไต เป็นกระบวนการที่อาศัยพลังงานภายในเซลล์ควบคู่กับการขนส่งโซเดียม (Na^+ – dependent active transport) โดยเฉพาะในช่วงที่แพร่เข้าเซลล์

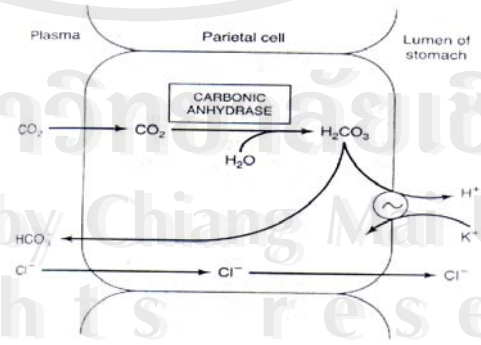
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2. โพแทสเซียม (K^+)

เป็นไอออนลบที่มีมากที่สุดภายในเซลล์ประมาณ 150 mEq/L และภายในเซลล์ของเม็ดเลือดแดงประมาณ 105 mEq/L ซึ่งมากกว่าปริมาณที่อยู่นอกเซลล์ถึง 23 เท่า

บทบาทของ K^+ ในร่างกาย

1) เป็นส่วนประกอบของน้ำหลั่งต่างๆ ในระบบทางเดินอาหาร (ดังแสดงในตาราง 6)
2) ช่วยการทำงานของเอนไซม์ภายในเซลล์ ซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายโคเฟคเตอร์ของเอนไซม์หลายชนิด เช่น pyruvate kinase, aldolase และ ATPase เป็นต้น โดยเฉพาะเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกรดนิวคลีอิก ด้วยเหตุนี้จึงเกี่ยวกับการสร้างโปรตีน และการเจริญเติบโตของเซลล์ (นีโลบล, 2542)
3) หน้าที่รักษาแรงดันออสโมติคและความเข้มข้นของไอออนภายในเซลล์ คุณสมบัตินี้เกิดจาก K^+ เป็นตัวถูกละลายที่มีมากที่สุดภายในเซลล์ ปริมาณและความเข้มข้นของ K^+ ภายในเซลล์เองก็ถูกควบคุมให้คงที่อยู่ได้ด้วยกระบวนการต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำงานของเอนไซม์ Na^+ - K^+ ATPase ทำให้ความเข้มข้นของ K^+ และแรงดันออสโมติคถูกควบคุมให้คงที่อยู่ได้
4) เป็นส่วนประกอบของเซลล์ ซึ่ง K^+ สามารถผ่านเข้าหรือออกจากเซลล์ได้ง่ายกว่า Na^+ โดยอาศัยการขนส่งแบบ active (นีโลบล, 2542) ซึ่งเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนกันโดยมีตัวพาเฉพาะและมักอาศัยพลังงานภายในเซลล์ด้วย นอกจากนี้ K^+ ยังเกี่ยวข้องกับการขนส่ง H^+ ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งเป็นการแลกเปลี่ยนในทิศทางตรงข้าม เช่น การขนส่ง H^+ เข้าสู่กระเพาะอาหารเพื่อเข้าไปรวมกับ Cl^- เป็นกรดไฮโรคลอริค (hydrochloric acid; HCl) (ดังแสดงในภาพ 3)



○ H^+ - K^+ ATPase

ภาพ 3 การเกิดกรดไฮโดรคลอริค (hydrochloric acid; HCl) ในน้ำย่อยภายในกระเพาะอาหาร (Murray *et al.*, 2000)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

5) ทำให้เกิดความต่างศักย์ หรือ polarization ที่ผนังเซลล์ ซึ่งความแตกต่างของความเข้มข้นของ K^+ ภายในและภายนอกเซลล์มีผลทำให้เกิดความต่างศักย์กันระหว่างผนังเซลล์ด้านในและด้านนอก ซึ่งคุณสมบัตินี้ทำให้ K^+ มีความสำคัญต่อการทำงานของกล้ามเนื้อและเซลล์ประสาท ในขณะที่กล้ามเนื้อหดตัว K^+ จะออกจากเซลล์ (depolarization) และเมื่อกล้ามเนื้อคลายตัว K^+ ก็จะกลับเข้าไปในเซลล์ (repolarization) โดย K^+ ที่ขับออกและกลับเข้าสู่เซลล์จะมีปริมาณเท่ากัน หากร่างกายเกิดภาวะการขาดหรือมีมากเกินก็จะทำให้กระบวนการ depolarization และ repolarization เกิดขึ้นไม่ได้ กล้ามเนื้อก็ไม่หดตัวทำให้รู้สึกอ่อนเพลียอย่างมาก กล้ามเนื้อไม่มีแรง เป็นเหตุให้หายใจลำบาก การเคลื่อนไหวของกระเพาะและลำไส้ได้ไม่ดีทำให้เกิดอาการท้องอืดได้ง่าย (สง่า, 2526)

3. คลอไรด์ (Cl^-)

เป็นไอออนลบที่มีมากในของเหลวภายนอกเซลล์ คือ ประมาณ 103 mEq/L ส่วนในเม็ดเลือดแดงจะมีประมาณ 49 – 54 mEq/L ส่วนใหญ่จะมีอยู่คู่กันไปกับ Na^+

บทบาทของ Cl^- ในร่างกาย

1) เป็นส่วนประกอบของกรดเกลือ (HCl^-) ในสารที่หลั่งจากกระเพาะ (gastric juice)
2) เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของของเหลวในส่วนต่างโดยจะทำงานร่วมกับ Na^+ (Na^+- K^+ -2Cl^- cotransporter)
3) ช่วยการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส (amylase) โดยทำหน้าที่เป็นโคเฟคเตอร์
4) เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่เนื้อเยื่อและปอด โดย Cl^- จากพลาสมาจะเคลื่อนเข้าไปในเซลล์เม็ดเลือดแดงเพื่อไปแทนที่ HCO_3^- และขับ HCO_3^- ออกสู่พลาสมา เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “Chloride shift” หรือ “Hamburger phenomenon” ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นที่เนื้อเยื่อกับหลอดเลือดฝอย ส่วนที่ปอดนั้นจะเป็น reverse chloride shift นั่นคือ การที่ HCO_3^- ที่อยู่ในพลาสมาผ่านเข้าสู่เซลล์เม็ดเลือดแดง Cl^- ที่อยู่ภายในเซลล์ก็ต้องขับออกมาสู่พลาสมา (นีโลบล, 2542)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3 สภาวะของความเป็นกรด – ด่างในร่างกาย

2.3.1 ความหมายและแหล่งของกรด - ด่างในร่างกาย

นีโลบล (2542) ให้ความหมายของคำว่า “กรด” คือสารที่ให้โปรตรอน หรือ H^+ (proton donor) และความหมายของคำว่า “ด่างหรือเบส” คือสารที่รับโปรตรอน หรือ H^+ (proton acceptor) ในสารละลาย กรดจะมีสัญลักษณ์เป็น HA เมื่ออยู่ในสภาพที่ไม่แตกตัว และเมื่อแตกตัวแล้วจะได้เป็น H^+ และ A^- ซึ่งนิยมเรียกว่า conjugate base ดังสมการ 9

$$HA \longrightarrow H^+ + A^- \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

ภาวะกรด – ด่างในร่างกายสัตว์ หมายถึง ความเข้มข้นของ H^+ ที่อยู่ภายในเซลล์และภายนอกเซลล์ ซึ่งสภาวะที่สัตว์พยายามคงปริมาณของ H^+ ทั้งภายในและภายนอกเซลล์ให้เกิดสมดุล (H^+ มีค่าเท่ากับศูนย์) เรียกว่า Acid – base homeostasis

ในการตรวจภาวะกรด – ด่างของร่างกายจะไม่นิยมใช้ค่าของ H^+ เพื่อแสดงว่าเลือดเป็นกรดหรือด่าง (สง่า, 2526) แต่จะแสดงความเป็นกรด – ด่าง (pH) ของเลือดแทน โดยคำนวณจากสูตรที่แสดงไว้ในสมการที่ 10 (Rahn and Howell, 1978; Stewart, 1978)

$$pH = 1/\log [H^+] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (10)$$

ซึ่ง pH เป็นตัวแปรสำคัญอันหนึ่งที่มีผลต่อปฏิกิริยาเคมีและองค์ประกอบของเซลล์ ค่า pH ของพลาสมาในภาวะปกติมีค่าระหว่าง 7.35 - 7.45 แต่ในเซลล์ซึ่งเป็นที่เกิดกรดจะมี pH น้อยกว่านี้ ในภาวะที่มีความผิดปกติค่า H^+ จะเปลี่ยนแปลงไปได้มาก ช่วงที่กว้างที่สุดเท่าที่ร่างกายจะสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของภาวะกรด - ด่างได้มากที่สุดที่ค่า pH ระหว่าง 6.9 - 7.7 ซึ่งมีค่า H^+ อยู่ระหว่าง 125 ถึง 20 mmol/L เมื่อค่า pH เปลี่ยนไปจากค่าปกติย่อมทำให้กระบวนการและองค์ประกอบต่างๆ ของร่างกายเปลี่ยนแปลงไป เนื่องมาจากขนาดและประจุของไฮโดรเนียมไอออน (hydronium ion) โดย H^+ จะไม่อยู่ในรูปอิสระแต่จะอยู่ในรูป H_3O^+, $H_5O_2^+$ เป็นต้น ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับโมเลกุลอื่นๆ โดยเฉพาะโปรตีน มีผลทำให้โปรตีนเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและยังมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ กระบวนการเคลื่อนย้ายสารต่างๆ ภายในร่างกาย การหดตัวและการทำหน้าที่ของกล้ามเนื้อ เป็นต้น (Christensen, 1979; Garrard *et al*., 1985; Hampson *et al*.,

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1987) ซึ่งภาวะที่มีกรดคั่งในร่างกาย เรียกว่า acidosis และถ้ามีกรดคั่งมากจนทำให้ความเป็นกรด – ด่างของเลือดน้อยกว่า 7.35 เรียกว่า acidemia ส่วนภาวะ alkalosis คือภาวะที่มีกรดลดต่ำลง หรือมีด่างเพิ่มมากขึ้นในร่างกาย ซึ่งถ้าความเป็นกรด – ด่างของเลือดสูงขึ้นเกินกว่า 7.45 เรียกภาวะนี้ว่า alkalemia ด้วยเหตุนี้ จึงจำเป็นต้องให้ความสนใจภาวะความเป็นกรด – ด่าง ความเข้มข้นของ H^+ และสมดุลอิเล็กโทรไลต์ของร่างกายด้วย

ในสุกรจะมีความรู้สึกไวต่อการเพิ่มขึ้นของกรดในเลือดมากกว่าการเพิ่มขึ้นของด่าง ในภาวะปกติหลอดเลือดดำจะมีค่า pH ต่ำกว่าหลอดเลือดแดงเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากหลอดเลือดดำมี CO_2 และกรดจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของเซลล์มากกว่าในหลอดเลือดแดง (แสดงไว้ในตาราง 7)

ตาราง 7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของภาวะสมดุลกรด - ด่างซึ่งวัดจากเลือดของสุกร

Parameter	Blood Source	
	Arterial	**Venous**
pH	7.48	7.41
$[H^+]$, nM.	33	39
pCO_2, mmHg.	44	54
HCO_3^-, mμ	30	33

ที่มา : Patience (1990)

โดยปกติร่างกายจะมีการผลิตกรดอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากร่างกายต้องการพลังงานในการทำงานอยู่ตลอดเวลา โดยพลังงานส่วนใหญ่จะได้จากการออกซิเดชั่น (oxidation) ของสารอาหารต่างๆ Gösta (1975) รายงานว่า การออกซิเดชั่นอย่างสมบูรณ์ของคาร์โบไฮเดรตและไขมันจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นน้ำและ CO_2 ดังแสดงในสมการที่ 11 (สง่า, 2526)

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O \quad \text{..... (11)}$$

โดย CO_2 ที่ได้จะผ่านเข้าสู่เม็ดเลือดแดง ซึ่งภายในเม็ดแดงจะมีเอนไซม์คาร์บอนิก แอนฮัยเดรส (carbonic anhydrase) ช่วยเร่งปฏิกิริยาให้น้ำรวมกับ CO_2 เป็นกรดคาร์บอนิค (carbonic acid; H_2CO_3) และแตกตัวเปลี่ยนเป็น H^+ และ HCO_3^- ดังแสดงในสมการที่ 12 (สง่า, 2526)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

carbonic anhydrase

$$CO_2 + H_2O \longleftrightarrow H_2CO_3 \longleftrightarrow H^+ + HCO_3^- \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (12)$$

ซึ่ง HCO_3^- ที่เกิดขึ้นจะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ในร่างกาย โดยจะซึมผ่านออกจากเม็ดเลือดแดงไปอยู่ในพลาสมาเป็นส่วนใหญ่ราว 5 ใน 6 ส่วน จะคงเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยในเม็ดเลือดแดง (ราว 1 ใน 6 ส่วน) ถ้าร่างกายไม่สามารถสลายสารอาหารได้โดยสมบูรณ์จะทำให้เกิดปัญหาที่สำคัญอย่างน้อย 2 อย่าง คือ ร่างกายได้รับพลังงานไม่พอใช้ และทำให้มีการสะสมสารตัวกลาง (intermediate) จากกระบวนการเมทาบอลิซึม เช่น สารคีโตน แลคเตต และซิเตรต เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะมีฤทธิ์เป็นกรดและต้องขับออกทางไต ถ้ามีมากเกินความสามารถที่ไตจะขับออกได้จะทำให้มีระดับที่สูงในเลือดจึงส่งผลต่อภาวะกรด – ด่างของร่างกายด้วย นอกจากนี้สารตัวกลางที่เพิ่มขึ้นอาจมีผลต่อการทำงานของกระบวนการเมทาบอลิซึมอื่นให้มากขึ้นหรือลดลงได้ (เจริญศรี, 2542)

2.3.2 ความสัมพันธ์ของอาหารกับภาวะความเป็นกรด – ด่างของร่างกาย

โปรตีน ฟอสโฟลิปิด และกรดนิวคลิอิกเป็นแหล่งของกรดที่สำคัญซึ่งร่างกายได้รับจากอาหาร โดยปกติในอาหารจะมีประจุไฟฟ้าที่เป็นประจุบวกมากกว่าประจุลบ เช่น ฟอสโฟเอสเตอร์ของโปรตีนและกรดนิวคลีอิกถูกเปลี่ยนเป็น H_3PO_4 ด้วยกระบวนการไฮโดรไลซีส นอกจากนี้กรดอะมิโนที่มีกำมะถัน (sulfur group) เป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เมทไธโอนีน (methionine) และซีสตีอีน (cysteine) จะถูกออกซิไดซ์ไปเป็นกรดกำมะถันหรือ H_2SO_4 (ดังแสดงในตาราง 8) ในกระบวนการเมทาบอลิซึมการผลิตพลังงานเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุดของเซลล์ กระบวนการนี้ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่ใช้ออกซิเจนและผลิตผลสุดท้ายที่ได้คือ CO_2 ซึ่งแก๊สนี้เมื่อละลายกับน้ำจะได้ H_2CO_3 ซึ่งแตกตัวได้ H^+ และ HCO_3^- (ดังสมการ 12) จึงทำให้ร่างกายได้รับกรดอยู่ตลอดเวลาและเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้ร่างกายมีกรดเพิ่มขึ้น นอกจากการผลิต CO_2 แล้ว ถ้าร่างกายอยู่ในภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอหรือมีกระบวนการออกซิเดชันสารอาหารบางอย่างไม่สมบูรณ์ โดยเฉพาะในอาหารที่มีโปรตีนต่ำและมีการเสริมกรดอะมิโนสังเคราะห์เพื่อให้ปริมาณกรดอะมิโนเพียงพอกับความต้องการของร่างกายทำให้ร่างกายมีกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดความเครียดขึ้นได้ และในภาวะผิดปกติบางอย่าง เช่น ภาวะการเกิดโรค พบว่า กรดอินทรีย์อาจถูกผลิตขึ้นมากกว่าปกติได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 8 แสดงการเกิดกรดและด่างจากกระบวนการเมทาบอลิซึม

Equation no.	Equation
(1)	การออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของคาร์โบไฮเดรตและไขมัน (neutral lipids[a])
	$Glucose + 6O_2 \longrightarrow 6CO_2 + 6H_2O \longrightarrow$ carbonic acid
(2)	การออกซิเดชันที่สมบูรณ์ของ sulfur amino acids (SAA)
	$2Methionine + 15O_2 \longrightarrow Urea + 9CO_2 + 7H_2O + 4H^+ + SO_4^{2-}$
(3)	กระบวนการเมทาบอลิซึมเกลือของกรดอินทรีย์ หรือด่าง
	$2NH_4Cl + CO_2 \longrightarrow Urea + H_2O + 2H^+ + 2Cl^-$
	$HCO_3^- \longrightarrow OH^- + CO_2$
(4)	การออกซิเดชั่นของ neutral lipids ไปเป็นกรดอินทรีย์ (เช่น ketosis)
	$Triglyceride + O_2 \longrightarrow Acetoacetate + H^+ + H_2O$
(5)	การออกซิเดชั่นของ neutral carbohydrates ไปเป็นกรดอินทรีย์ (เช่น lactic acidosis)
	$Glucose \longrightarrow lactate + 2H^+$
(6)	Bone formation
	$10Ca^{2+} + 4.8\ [HPO_4^{2-}] + 1.2\ [H_2PO_4^-] + 2H_2O \longrightarrow Hydroxyapatite + 9.2\ H^+$

[a] Acid only accumulates if respiratory function is impaired.

ที่มา: Patience (1990)

ในแง่การควบคุมภาวะกรด – ด่างของร่างกาย การเกิดกรดในภาวะปกติของร่างกายพบว่า H^+ ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมทาบอลิซึมของร่างกายในแต่ละวันมีปริมาณราว 150 mol ส่วนใหญ่ 80 – 90 เปอร์เซ็นต์จะถูกนำไปใช้ได้ใหม่ ส่วนที่เหลือที่ต้องขับทิ้งออกไปจะมีเพียงวันละ 15 – 100 mmol เท่านั้น ในส่วนนี้ถ้าแยกปริมาณที่ต้องขับทิ้งไปจะแบ่งกรดออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ กรดระเหยได้ (volatile acid) ส่วนใหญ่อยู่ในรูป H_2CO_3 ที่แตกตัวได้เป็น CO_2 และถูกระบายออกจากร่างกายทางปอดโดยการหายใจวันละประมาณ 15 – 1,000 mmol และกรดระเหยไม่ได้หรือคงตัว (nonvolatile acid หรือ fixed acid) เช่น $H_2PO_4^-$, HPO_4^{2-}, NH_4^+, Lactic acid, Keto acid และกรดอินทรีย์อื่นๆ (สัญญา, 2535) เป็นกรดที่ไม่สามารถขับออกทางปอดได้ แต่จะขับออกทางไตราววันละ 50 – 100 mmol ในรูปของกรดไตเตรตและเกลือแอมโมเนีย ซึ่งกรดเหล่านี้จะเกิดจาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1) กำมะถันที่มีอยู่ในกรดอะมิโนบางชนิด เช่น ซีสติอีน (cysteine) ซีสตีน (cystine) และเมทไธโอนีน เปลี่ยนเป็น H_2CO_3 และ H_2SO_4 ดังสมการ 13 และ 14 (นีโลบล, 2542) โดยเกิดขึ้นในแต่ละวันคิดเป็น 2 ใน 3 ของกรดระเหยไม่ได้ทั้งหมด

$$\text{cystine} \longrightarrow \text{pyruvic acid} + NH_3 + H_2S \longrightarrow H_2CO_3 \text{ ……..…....(13)}$$

$$\text{cysteine} \longrightarrow \text{cysteine sulfinic acid} \longrightarrow \text{alanine} + H_2SO_4 \text{ ……....(14)}$$

2) ฟอสโฟโปรตีนและฟอสโฟลิปิดจะสลายเปลี่ยนเป็น H_3PO_4 ดังสมการ 15 (นีโลบล, 2542)

$$\text{phosphoprotein} \longrightarrow \text{protein} + H_3PO_4 \text{……(15)}$$

3) กรดอินทรีย์อื่นๆ อีกจำนวนเล็กน้อยที่เกิดจากการสลายของสารอาหารในร่างกาย เช่น กรดแลคติค กรดคีโตน กรดยูริค และนิวคลีโอโปรตีน เป็นต้น

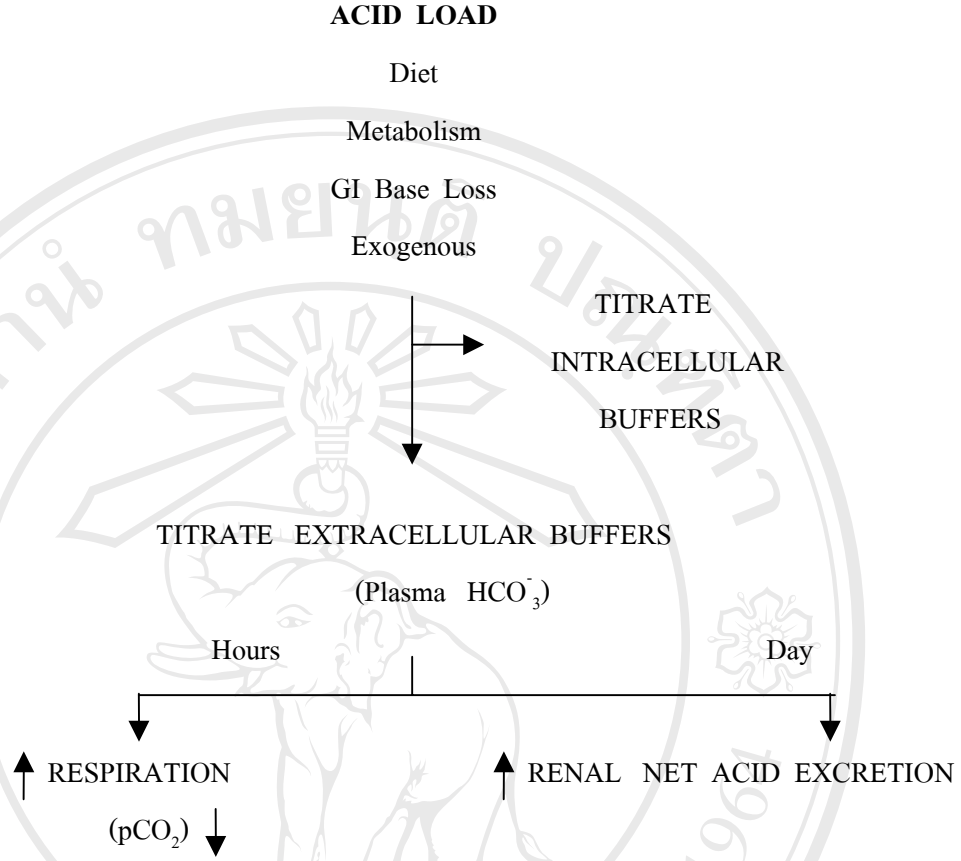
2.3.3 กลไกสำคัญที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลง pH ของร่างกาย

เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของภาวะกรด – ด่างในร่างกายมนุษย์หรือสัตว์ อันเนื่องมาจากการได้รับกรดจากกระบวนการเมทาบอลิซึมหรือในภาวะผิดปกติของร่างกาย อย่างไรก็ตาม ภายในร่างกายเองก็มีกระบวนการทางเคมีที่ช่วยปรับมิให้ pH ของร่างกายเปลี่ยนแปลงไปมากเมื่อได้รับกรดจากการเมทาบอลิซึม ซึ่งเกิดจากกระบวนการต่างๆ ที่ช่วยรักษาสมดุลกรด – ด่างของร่างกาย (แผนภาพที่ 1) ก่อนที่ระบบหายใจและระบบขับถ่ายปัสสาวะจะขับกรดส่วนเกินออกจากร่างกาย แต่ถ้าร่างกายได้รับกรดหรือด่างมากเกินไปจนกระบวนการรักษาสมดุลกรด – ด่างของร่างกายไม่สามารถควบคุมได้ก็จะทำให้ภายในร่างกายมีกรดหรือด่างสะสมมากเกินเป็นผลให้ระบบการรักษาสมดุลกรด – ด่างในร่างกายทำหน้าที่ในการปรับภาวะกรด – ด่างมิให้เปลี่ยนแปลง ซึ่งระบบการรักษาสมดุลกรด - ด่างนี้ประกอบด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1. กลไกการบัฟเฟอร์ (Buffering mechanism)

กลไกการบัฟเฟอร์เป็นกลไกทางเคมีอันดับแรกที่ร่างกายใช้ควบคุม pH ได้อย่างฉับพลัน ถือเป็นระบบตอบสนองเบื้องต้นต่อภาวะกรด – ด่างในร่างกาย ที่พยายามรักษาสมดุลกรด – ด่างมิให้เปลี่ยนแปลงมาก คล้ายกับชะลอความผิดปกติเพื่อรอให้ระบบหายใจและระบบขับถ่ายปัสสาวะ



แผนภาพ 1 แสดงการตอบสนองของร่างกายเมื่อได้รับกรด (Brenner *et al*., 1987)

ทำงานต่อไปอีกทอดหนึ่งเท่านั้น กลไกการบัฟเฟอร์ที่สำคัญของร่างกายแบ่งออกเป็น 4 ระบบ คือ

1) *ระบบไบคาร์บอเนต – กรดคาร์บอนิค (Bicarbonate – carbonic acid buffer system; HCO_3^-/H_2CO_3)* เป็นบัฟเฟอร์ที่มีปริมาณมากที่สุด และมีสมรรถภาพในการแก้ภาวะเสียสมดุลได้ดีที่สุด เมื่อความเข้มข้นของ H^+ สูงขึ้น โดย H^+ นี้จะจับกับ HCO_3^- ได้เป็น H_2CO_3 แล้วสลายตัวเป็นน้ำและ CO_2 ซึ่งจะถูกขับออกทางระบบหายใจทันที

2) *ระบบฟอสเฟต (Phosphate buffer system; $HPO_4^{-2}/H_2PO_4^-$)* เป็นบัฟเฟอร์ที่สำคัญในเซลล์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเซลล์เม็ดเลือดแดงและทางเดินปัสสาวะ แต่ในส่วนของของเหลวภายนอกเซลล์จะพบน้อยมาก ซึ่งฟอสเฟตที่เป็นบัฟเฟอร์มี 2 ชนิด คือ monohydrogen phosphate ion (HPO_4^{-2}) และ dihydrogen phosphate ion ($H_2PO_4^-$) บัฟเฟอร์ระบบนี้สามารถจับ H^+ ได้มากกว่าระบบไบคาร์บอเนต – กรดคาร์บอนิค แต่มีบทบาทน้อยกว่าเนื่องจากปริมาณของบัฟเฟอร์ระบบนี้มีน้อยกว่าจึงทำหน้าที่เพียงสนับสนุนหรือทดแทนความเข้มข้นของ HCO_3^- ที่ขาด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ไป โดย HPO_4^{-2} จะจับกับ H^+ ที่ได้จากกระบวนการเมทาบอลิซึมของร่างกาย แล้วให้ $H_2PO_4^-$ และ HCO_3^- ดังสมการ 16 (สง่า, 2526)

$$CO_2 + H_2O + HPO_4^{-2} \rightleftharpoons H_2PO_4^- + HCO_3^- \quad \text{.....(16)}$$

3) *ระบบโปรตีน (Protein buffer system; Protein$^-$/ H.Protein$^{(n-1)-}$)* ส่วนใหญ่ระบบนี้เป็นระบบบัฟเฟอร์ภายในเซลล์และพลาสมา โดย $Protein^-$ จะจับกับ H^+ ทำให้เกิดเป็น $H.Protein^{(n-1)-}$ และ HCO_3^- ดังสมการ 17 (สง่า, 2526)

$$CO_2 + H_2O + Protein^- \rightleftharpoons H.Protein^{(n-2)-} + HCO_3^- \quad \text{.....(17)}$$

ในพลาสมา $Protein^-$ สามารถจับกับ CO_2 ได้เป็น Protein - CO_2^- เรียกว่า สารประกอบคาร์บามิโน (carbamino compound) ซึ่งการจับกับ CO_2 นี้ส่งผลให้การสร้าง H^+ จากกระบวนการเมทาบอลิซึมของร่างกายลดลงได้ ดังสมการ 18 (นีโลบล, 2542)

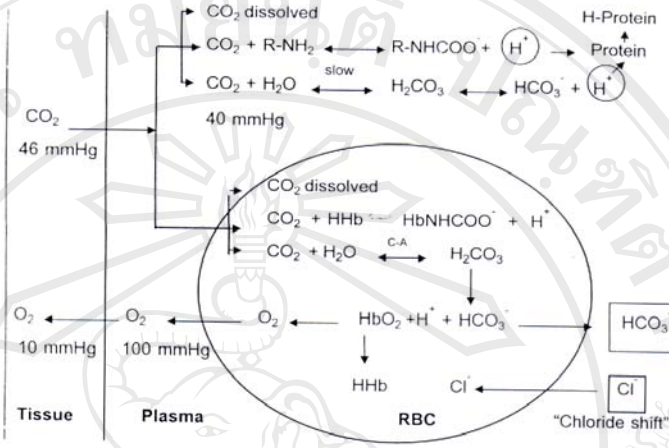
$$CO_2 + Protein^- \rightleftharpoons Protein - CO_2^- \text{ (carbamino compounds)} \quad \text{.....(18)}$$

4) *ระบบฮีโมโกลบิน (Haemoglobin buffer system; Hb$^-$/ H.Hb$^-$)* เป็นบัฟเฟอร์ที่สำคัญในเซลล์เม็ดเลือดแดง โดย CO_2 ที่อยู่ในเลือดจะอยู่ในสภาพต่างๆ กัน คือ จะละลายในพลาสมาประมาณร้อยละ 5 และประมาณร้อยละ 7 จะรวมกับ reduced haemoglobin (Hb^-) เป็นสารประกอบคาร์บามิโน (carbamino haemoglobin ; Hb- CO_2^-) ส่วนที่เหลือจะอยู่ในรูป HCO_3^- ประมาณร้อยละ 88 ซึ่งเกิดจากการสลาย H_2CO_3 โดยมีเอนไซม์ carbonic anhydrase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดย HCO_3^- ส่วนใหญ่จะออกจากเซลล์ไปอยู่ในพลาสมาโดยแลกเปลี่ยนกับ Cl^- (chloride shift) แต่บางส่วนยังอยู่ภายในเซลล์ในรูปของโพแทสเซียมไบคาร์บอเนต ($KHCO_3^-$) ส่วน H^+ ที่เกิดขึ้นจะรวมกับ Hb^- ได้เป็น $H.Hb^-$ เมื่อได้รับ O_2 ทำให้มีสภาพเป็นกรดจึงสามารถทำปฏิกิริยากับ HCO_3^- ส่วนที่ยังเหลืออยู่ในเซลล์ได้เป็น H_2CO_3 ดังสมการ 19 (สง่า, 2526)

$$H.Hb.O_2 + KHCO_3^- \rightleftharpoons H_2CO_3 + KHb.O_2 \quad \text{.....(19)}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

โดย H_2CO_3 ที่เกิดขึ้นจะถูกสลายเป็นน้ำและ CO_2 ต่อไป ซึ่งกระบวนการนี้ทำให้ความเข้มข้นของ HCO_3^- ในเซลล์ลดลง ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนย้ายของ HCO_3^- จากพลาสมากลับเข้าสู่ภายในเซลล์ แล้วปล่อย Cl^- กลับออกจากเซลล์ (ดังแสดงไว้ในภาพ 4)



ภาพ 4 การแลกเปลี่ยน CO_2 และ O_2 ระหว่างหลอดเลือดฝอย กับเนื้อเยื่อ (นีโลบล, 2542)

จะเห็นได้ว่า กลไกการทำงานของระบบบัฟเฟอร์ยังเกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนไอออนต่างๆ เพื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้า - ออกเซลล์ ซึ่งมีได้ 3 วิธี คือ แลกเปลี่ยนระหว่าง H^+ กับ K^+ หรือ Na^+ กับ K^+ และระหว่าง Cl^- กับ HCO_3^- ในภาวะที่เป็นกรดเรื้อรัง (chronic acidosis) เซลล์กระดูกจะมีบทบาทในการช่วยลดความเป็นกรดได้มาก โดยแคลเซียมฟอสเฟตจะละลายออกมาใช้แทน Na^+ หรือ K^+ ได้ แต่ถ้าเกิดภาวะนี้เป็นระยะเวลานานจะทำให้กระดูกบางและหักง่าย (นีโลบล, 2542)

2. กลไกทางการหายใจ (Respiratory mechanism)

ระบบหายใจมีความสำคัญในการรักษา pH ของร่างกาย โดยทำหน้าที่ในการขับ CO_2 ออกทางอากาศที่หายใจออก ขณะเดียวกันก็รับ O_2 ในอากาศกลับเข้าในร่างกาย เป็นการควบคุมปริมาณของ H_2CO_3 เมื่อใดที่ค่า plasma pH ลดลง หรือความดันย่อยของออกซิเจน (PO_2) ลดลง หรือความดันย่อยของคาร์บอนไดออกไซด์ (PCO_2) เพิ่มขึ้นจะมีการกระตุ้นให้เกิดการหายใจเพิ่มขึ้นทั้งอัตราและความแรงทำให้เกิดภาวะ hyperventilation ขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ CO_2 ถูกขับออกไปในปริมาณที่มากและรวดเร็ว ส่งผลให้ H_2CO_3 ในร่างกายลดลงทำให้ pH ของเลือดเพิ่มขึ้น ในภาวะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตรงกันข้ามถ้าค่า pH ของพลาสมาเพิ่มขึ้นหรือ PO_2 เพิ่มขึ้นหรือ PCO_2 ลดลง จะกดการหายใจให้ช้าและตื้นลงทำให้เกิดภาวะ hypoventilation ขึ้นเพื่อเก็บ CO_2 ไว้ในร่างกาย

3. กลไกทางไต (Renal mechanism)

กลไกทางไตเป็นส่วนที่สำคัญที่สุด ในการลดอันตรายจากภาวะกรดคั่งจากกระบวนการเมทาบอลิซึมแต่ต้องใช้เวลานานเป็นชั่วโมงจนถึง 2 – 4 วันจึงจะมีการควบคุมได้เต็มที่ การขับถ่ายออกทางไตหรือทางปัสสาวะเป็นวิธีการที่สำคัญในการขับสารออกนอกร่างกายทั้งทางด้านปริมาณและคุณภาพ วิธีการขับถ่ายของเสียของไต คือ เก็บของเสียที่มีอยู่ในพลาสมามารวมกันและขับออกทางปัสสาวะ

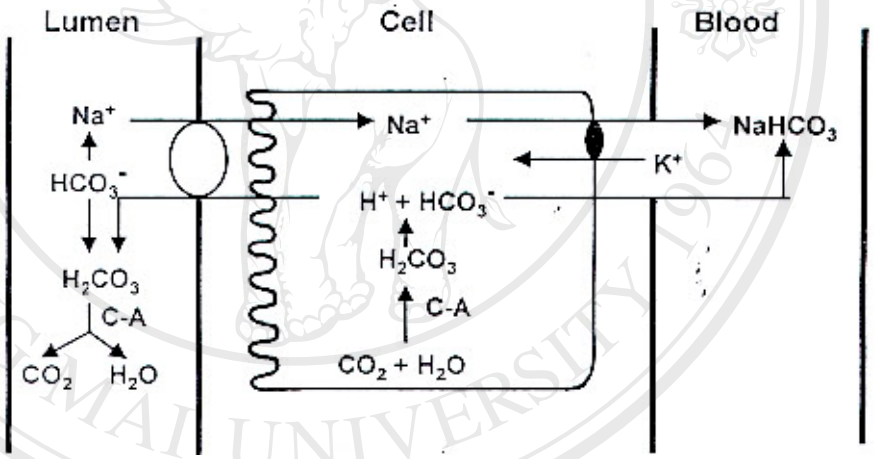
ในการผลิตปัสสาวะของไตประกอบด้วยกระบวนการ 3 อย่าง คือ การกรอง (filtration) เป็นการกรองน้ำและสารออกมาจากพลาสมา การดูดกลับ (reabsorption) โดยเลือกเก็บสารที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกายกลับคืนเข้าสู่กระแสเลือด และกระบวนการสุดท้าย คือ การขับถ่ายของเสีย (secretion) โดยการขับสารบางอย่างออกจากกระแสเลือดเพิ่มเติมจากการกรอง ทั้ง 3 กระบวนการจะเกิดในตำแหน่งที่แตกต่างกัน นั่นคือ การกรองจะเกิดในส่วนของโกลเมอรูลัส (glomerulus) และการดูดกลับและการขับถ่ายจะเกิดในส่วนของท่อไต (renal tubule) ปริมาณของอิเล็กโทรไลต์ที่จะถูกดูดกลับและขับทิ้งทางปัสสาวะจะมีปริมาณต่างกันโดยพบว่า HCO_3^- จะถูกดูดกลับหมดดังแสดงไว้ในตาราง 9 โดย Na^+ เมื่อผ่านการกรองที่โกเมอรูลัสจะถูกดูดกลับที่บริเวณหลอดฝอยส่วนต้น (proximal tubule) ของท่อไตประมาณ 60 – 70 เปอร์เซ็นต์ โดยการทำงานของ Na^+- K^+ ATPase ซึ่งจะทำหน้าที่ดึง Na^+ จากภายในเซลล์ออกสู่ของเหลวระหว่างเซลล์และดึง K^+ จากของเหลวระหว่างเซลล์กลับเข้าสู่ภายในเซลล์ทำให้ระดับ Na^+ ภายในเซลล์ลดลง และมีระดับ K^+ เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังมีการเคลื่อนที่ของ HCO_3^- จากภายในเซลล์ผ่านเมมเบรนออกสู่เลือดจะเกิดพร้อมกับการดูดกลับของ Na^+ ที่แพร่ออกจากเซลล์ไปพร้อมกัน ดังแสดงไว้ในภาพ 5 ซึ่งการแพร่ของ Na^+ นี้ทำให้การเคลื่อนที่ของกรดอะมิโน ฟอสเฟต (PO_4^{-3}) และน้ำตาลกลูโคสจากของเหลวในหลอดฝอยเข้าสู่ภายในเซลล์อีพิธีเลียมด้วย รวมทั้งมีการเคลื่อนที่ของ H^+ จากภายในเซลล์อีพิธีเลียมออกสู่ของเหลวในหลอดฝอยด้วยกระบวนการ Na^+ - H^+ antiport เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่าง Na^+ และ H^+ ส่วน HCO_3^- จะเคลื่อนที่จากเซลล์ผ่านเมมเบรนส่วนฐานออกสู่ของเหลวระหว่างเซลล์ตาม Na^+ ที่แพร่ออกจากเซลล์ ซึ่งการดูดกลับของ Na^+ ทำให้เกิดความต่างศักย์ภายในหลอดเลือดฝอยเป็นลบแล้วเกิดแรงผลัก Cl^- ผ่านเข้าสู่ของเหลวระหว่างเซลล์ ส่วนอิเล็กโทรไลต์ที่เหลือจากการดูดซึมจะถูกขับทิ้งทางปัสสาวะ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ตาราง 9 แสดงเปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำและอิเล็กโทรไลต์ที่ถูกดูดหลับทางท่อไตหลังจากถูกกรองผ่านโกลเมอรูลัสออกมา

	ปริมาณที่กรองออก (mmol/D)	ปริมาณในปัสสาวะ (mmol/D)	% ที่ท่อไตดูดกลับ
Na^+	25,000	100	99.6
Cl^-	18,000	100	99.5
HCO_3^-	5,000	0	100.0
K^+	700	50	93.0
H_2O	180L	1L	99.4

ที่มา: Smith (1980)

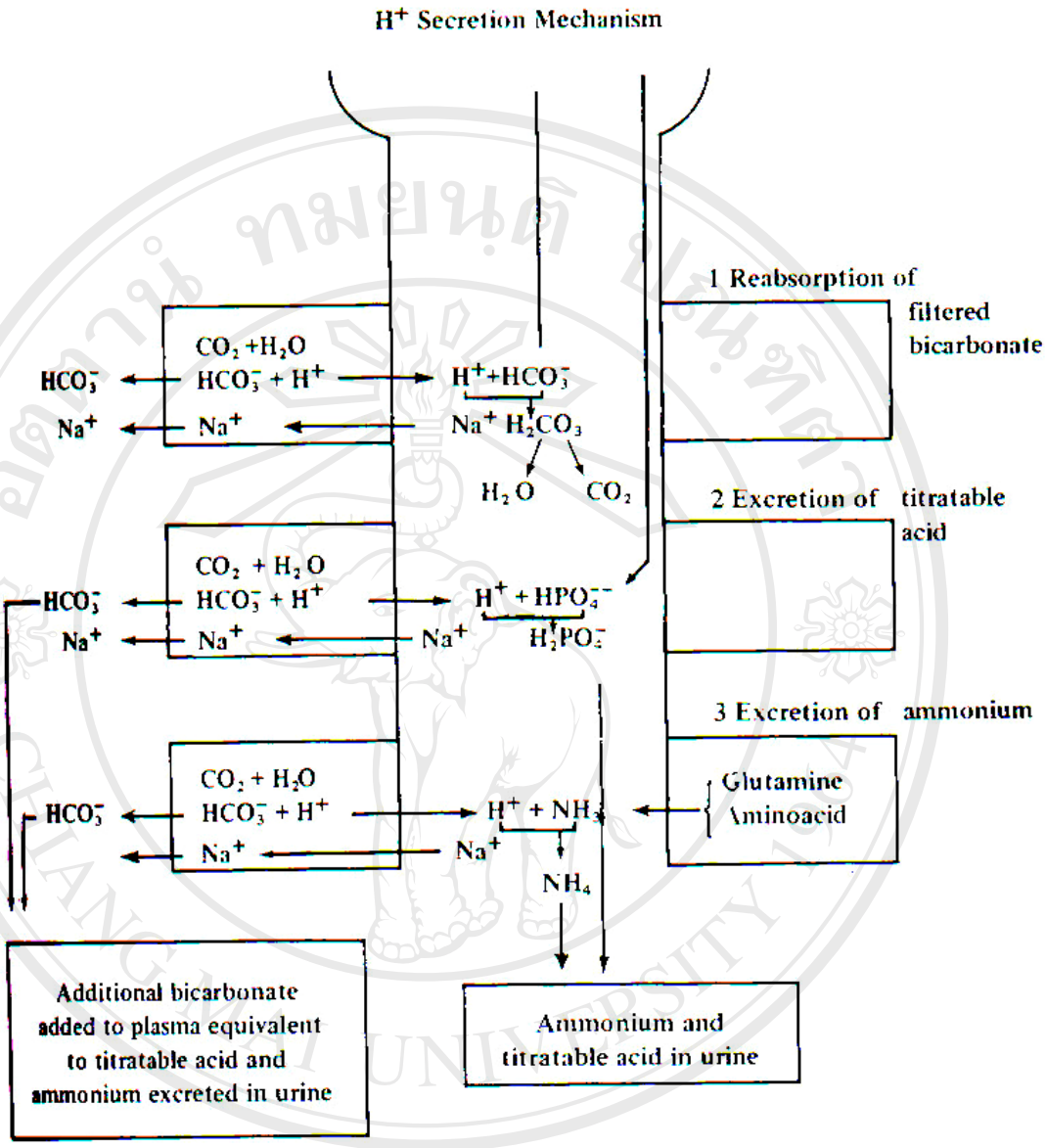


ภาพ 5 แสดงการดูดกลับ HCO_3^- ที่ท่อไตส่วนต้น โดยการทำงานของ Na^+ - H^+ Antiport และเอนไซม์ carbonic anhydrase (นีโลบล, 2542)

○ Na^+ - H^+ Antiport ● Na^+ - K^+ ATPase CA = carbonic anhydrase

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

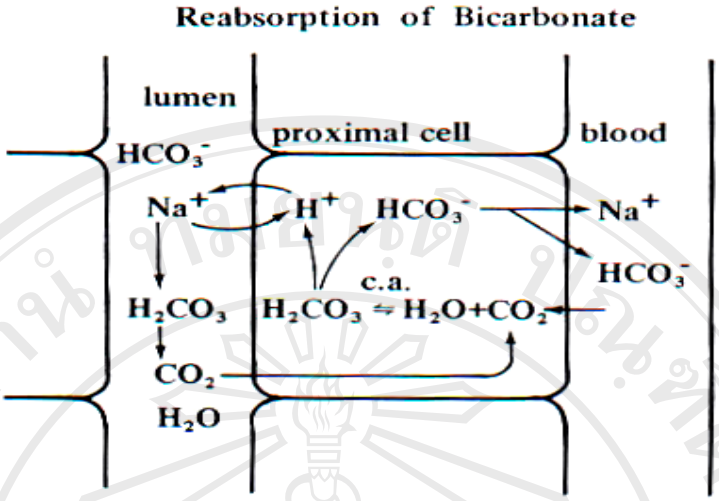
การที่ไตขับ H^+ เพื่อพยายามเพิ่มระดับ HCO_3^- ในพลาสมา กรดที่ได้รับจากอาหารหรือจากกระบวนการเมตาบอลิสมจะสลายตัวเป็น H^+ และอนุมูลกรด เช่น Cl^- เป็นอนุมูลของกรดแก่ซึ่งจะถูกขับออกมาในปัสสาวะในรูป NaCl หรือ KCl ส่วนการขับกรดกำมะถันจะปล่อย H^+ ก็ต่อเมื่อได้ NH_3 มาแลกและถูกขับถ่ายในปัสสาวะในรูปของแอมโมเนียมซัลเฟต การขับ H^+ ทำได้ 3 วิธี (ดังแสดงไว้ในภาพ 6) คือ



ภาพ 6 แสดงแผนผังกลไกการขับถ่าย H^+ ของไต (สง่า, 2526)

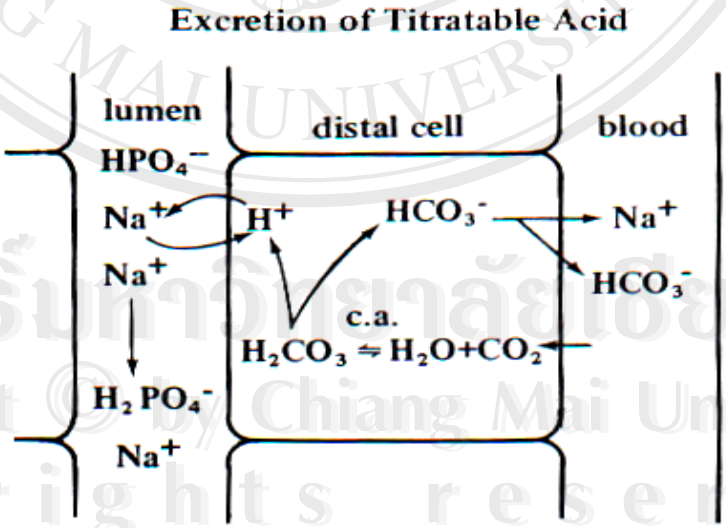
ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1) ขับ H^+ เพื่อแลกเปลี่ยนกับการดูดซึม HCO_3^- ที่ถูกกรองกลับหมด โดย H^+ จะออกนอกเซลล์เพื่อแลกเปลี่ยนกับ Na^+ ที่ผ่านการกรองแล้ว แล้วจะมารวมกับ HCO_3^- เกิดเป็น $H_2CO_3^-$ ซึ่งจะสลายตัวเป็น CO_2 และน้ำ การที่ H^+ ออกนอกเซลล์นี้สามารถลด Na^+ และ HCO_3^- ในของเหลวที่ผ่านการกรองได้เท่ากับจำนวนที่ถูกดูดซึมเข้ากระแสเลือด (สง่า, 2526) ดังแสดงไว้ในภาพ 7



ภาพ 7 แสดงการดูดซึม HCO_3^- กลับที่หลอดฝอยของไตส่วนต้น (สง่า, 2526)

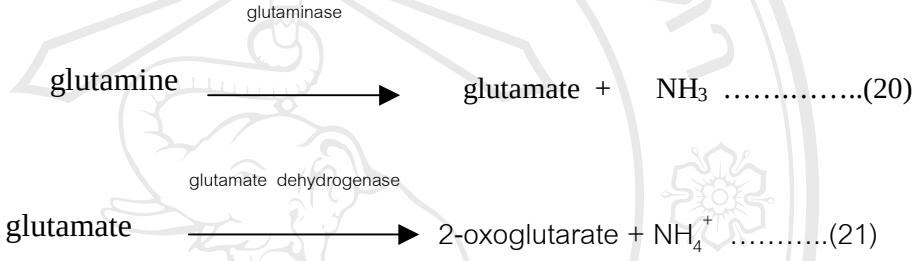
2) ขับ H^+ ออกมาในรูปของกรดไตเตรท (titratable acid) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของกรดคาร์บอนิค โดย H^+ ที่ได้จะรวมตัวกับ Na_2HPO_4 เกิดเป็น NaH_2PO_4 ส่วน Na^+ จะออกไปสู่กระแสเลือดในรูปของโซเดียมคาร์บอเนต ($NaHCO_3^-$) (ดังแสดงไว้ในภาพ 8) การสร้างกรดไตเตรทนี้จะทำให้ pH ของปัสสาวะลดต่ำลง

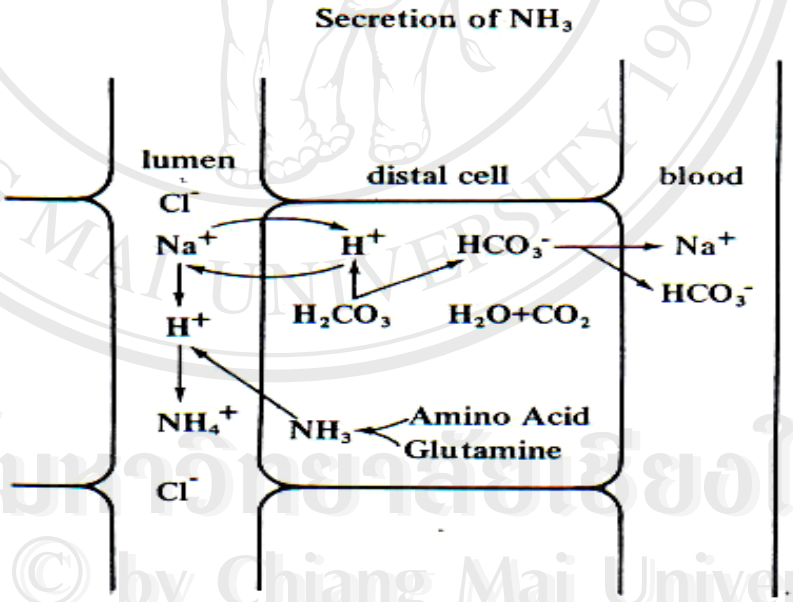


ภาพ 8 แสดงการขับถ่ายกรดไตเตรท (titratable acid) ที่หลอดฝอยของไตส่วนปลาย (สง่า, 2526)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

3) ขับ H^+ ออกมาในรูปของเกลือแอมโมเนียมประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ของ H^+ ที่ขับออกทางปัสสาวะจะรวมกับแอมโมเนีย (NH_3) ได้เป็นเกลือแอมโมเนียม (NH_4^+) (ดังแสดงไว้ในภาพ 9) ซึ่ง NH_3 ส่วนใหญ่ได้จากการสลายกลูตามีนให้เป็นกรดกลูตามิคและ NH_3 โดยอาศัยเอนไซม์ glutaminase (ดังสมการ 20) นอกจากนี้อาจได้จากการสลายตัวของกรดอะมิโนอื่นเล็กน้อย เช่น serine alanine และกรดกลูตามิค (ดังสมการ 21) Pitts (1980) รายงานว่า การหลั่ง NH_3 จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของปัสสาวะยิ่งต่ำมาก NH_3 จะถูกขับเป็น NH_4^+ มากขึ้น และเมื่อร่างกายเกิดภาวะกรดจะกระตุ้นการผลิต NH_3 ในเซลล์เพิ่มขึ้น





ภาพ 9 แสดงการสร้างแอมโมเนีย (สง่า, 2526)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.4 ภาวะกรด – ด่างเนื่องจากความผิดปกติของร่างกาย

สาเหตุสำคัญของการเกิดภาวะสมดุลกรด – ด่างผิดปกติ

1) *Metabolic acidosis* เป็นภาวะผิดปกติที่เกิดขึ้นได้บ่อยที่สุด ซึ่งมักพบในสัตว์ที่เกิดอาการท้องร่วง (diarrhea) หรือได้รับกรดเพิ่มเข้าไปในอาหาร ซึ่งภาวะนี้ทำให้สุกรมีการสูญเสียทั้ง Na^+, K^+, HCO_3^- และน้ำ ร่างกายจึงมีการสร้าง H^+ และ HCO_3^- เพิ่มมากขึ้นเพื่อชดเชย HCO_3^- ที่เสียไปนั่นเอง ส่งผลให้ค่า pH ของพลาสมาลดลง ซึ่ง H^+ ที่เกิดขึ้นบางส่วนอาจจะถูกจับด้วย HPO_4^{2-} และโปรตีนในพลาสมาแต่จะทำได้ในปริมาณที่จำกัด ส่งผลให้ร่างกายมีกรดสะสมมากกว่าปกติ (Andren and Person, 1983)

2) *Metabolic alkalosis* เป็นภาวะที่เกิดจากการเสียกรด เช่น การอาเจียนอย่างรุนแรง ทำให้ร่างกายมีด่างสะสมมากกว่าปกติ ทั้งนี้เนื่องจากการอาเจียนทำให้ร่างกายสูญเสีย H^+, Cl^-, Na^+, K^+ และน้ำ ซึ่งถ้าเกิดอาการอาเจียนบ่อยครั้งหรือติดต่อกันเป็นระยะเวลานานจะทำให้ร่างกายมีการสูญเสีย H^+ ไปมากทำให้มีการสร้าง H^+ จาก CO_2 เพิ่มขึ้นเพื่อชดเชย H^+ ที่สูญเสียไป เป็นผลให้ในพลาสมามีปริมาณ HCO_3^- จากการสลายตัวของกรดคาร์บอนิคเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ร่างกายเกิดภาวะที่เป็นด่าง (Blood *et al*., 1979)

3) *Respiratory acidosis* เป็นภาวะที่เกิดจากร่างกายมีการหายใจลดลง (hypoventilation) อาจเนื่องมาจากการอุดกั้นทางเดินของลมหายใจจากสิ่งแปลกปลอม หรือพยาธิสภาพของปอดที่ทำให้การทำหน้าที่ของปอดเสียไป เช่น ปอดอักเสบ ซึ่งการที่อัตราการหายใจลดลงหรือการแลกเปลี่ยนแก๊สที่ปอดไม่ดีจะทำให้มี CO_2 สะสมในร่างกายมากขึ้นเป็นผลให้เกิดการคั่งของกรดคาร์บอนิค และส่งผลให้เกิดภาวะ acidosis ตามมา

4) *Respiratory alkalosis* เป็นภาวะที่เกิดจากร่างกายมีการหายใจมากเกินไป (hyper-ventilation) อาจเนื่องมาจากการมีไข้สูง หายใจหอบแรงหรือจากสภาวะของอากาศที่มีอุณหภูมิสูง ร่างกายจะระบายความร้อนออกนอกร่างกาย โดยการหอบ ทำให้มีอัตราการหายใจเพิ่มขึ้นส่งผลให้ร่างกายมีการขับ CO_2 ออกไปมากและมีค่าความดันย่อยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (pCO_2) $[H^+]p$ และ $[HCO_3^-]p$ ลดลงเป็นผลให้ร่างกายมีกรดคาร์บอนิคลดลงและส่งผลให้เกิดภาวะ alkalosis ได้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.3.5 การเสริมสารปรับสารละลายไฟฟ้าในอาหารสุกร

โดยปกติในอาหารสัตว์จะมีสารละลายที่มีประจุบวกมากกว่าประจุลบ ดังนั้นการคงความสมดุลทางประจุให้คงความเป็นกลางโดย Dietary undetermined anion (dUA) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 22 (Chan, 1974)

$$dUA = (Na^{+} + K^{+} + Ca^{++} + Mg^{++}) - (Cl^{-} + P^{2-} + S_{inorganic}) \quad \text{.....(22)}$$

หรือจะใช้ค่า dietary Electrolyte Balance (dEB) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 23 (Patience, 1990)

$$dEB = Na^{+} + K^{+} - Cl^{-} \quad \text{.....(23)}$$

ส่วนใหญ่จะใช้ค่า dEB ในการคงความสมดุลมากกว่าการใช้ค่า dUA เนื่องจากง่ายและสะดวกในการวิเคราะห์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการคำนวณจะใช้เฉพาะค่าของ Na^{+}, K^{+} และ Cl^{-} และผลที่ได้ก็ไม่มีความแตกต่างกันกับค่า dUA (Patience, 1990) ในอาหารสัตว์ทั่วไปที่ประกอบด้วยข้าวโพดและกากถั่วเหลืองจะมีค่า dEB ประมาณ 175 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ถ้าหากว่าค่า dEB ต่ำกว่า 175 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัมจะทำให้ pH และ HCO_3^{-} ของเลือดลดลงทำให้เกิดสภาวะ metabolic acidosis (intracellular K ลดลง) ในทางกลับกันถ้าค่า dEB สูงกว่า 175 mEq/kg. อาหารจะทำให้ pH และ HCO_3^{-} ของเลือดเพิ่มขึ้นส่งผลให้เกิดสภาวะ metabolic alkalosis (intracellular K เพิ่มขึ้น) ดังนั้น dEB จึงเป็นปัจจัยที่สำคัญที่มีผลต่อภาวะกรด - ด่างของสัตว์

การหอบของสุกรเนื่องจากสภาพแวดล้อมรอบตัวที่สูง การเกิดโรคท้องเสีย หรือการอาเจียน ปัจจัยเหล่านี้มีผลทำให้ในร่างกายสุกรมีความเป็นกรดหรือด่างมากเกินไป ซึ่งจะส่งผลให้การทำหน้าที่ของเซลล์ต่างๆ เสียไป ดังนั้น จึงควรให้ความสำคัญต่อค่า dEB ในอาหารสุกรเพื่อรักษาภาวะสมดุลกรด – ด่าง และพบว่าภาวะสมดุลกรด – ด่างมีผลต่อการเจริญเติบโต ความอยากอาหาร การตอบสนองต่อความเครียดเนื่องจากอุณหภูมิ และกระบวนการเมทาบอลิซึมของกรดอะมิโนต่างๆ แร่ธาตุ และไวตามินด้วย (Patience *et al*., 1987)

ภาวะสมดุลกรด - ด่างจะมีผลต่อการเมทาบอลิซึมของกรดอะมิโน ได้แก่ กลูตามีน (glutamine) ซึ่งเป็น primary amino acid ที่มีผลต่อการสังเคราะห์ NH_3 ในไต และเป็นกระบวนการขับถ่ายกรดออกนอกร่างกาย และภาวะกรดในร่างกายที่เพิ่มขึ้นจะกระตุ้นให้กลูตามีน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สังเคราะห์ NH_3 ในเซลล์เพิ่มขึ้น (Pitts, 1980) นอกจากนี้ภาวะสมดุลกรด – ด่างยังมีผลต่อการเมทาบอลิซึมของกรดอะมิโนตัวอื่นๆ ด้วย เช่น ซีรีน (serine) และไกลซีน (glycine) ในทางกลับกันการเมทาบอลิซึมของกรดอะมิโนต่างๆ ก็มีผลต่อสมดุลกรด – ด่างในร่างกายเช่นเดียวกัน พบว่าร่างกายจะได้รับกรดจากการเมทาบอลิซึมของกรดอะมิโนที่มีกำมะถันเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ เมทไธโอนีน และซีสตีอีน ทั้งนี้เนื่องจากการออกซิเดชั่นของกรดอะมิโนเหล่านี้จะได้ H_2SO_4 แต่การเมทาบอลิซึมของกรดอะมิโนที่มีเอไมด์เป็นองค์ประกอบ (dicarboxylic amino acid) ได้แก่ กลูตาเมท (glutamate) แอสปาร์เตท (aspartate) (แต่ไม่รวมแอสปาราจีน และกลูตามีน) จะทำให้เกิดการสูญเสียความเป็นกรดเมื่อเกิดการออกซิเดชั่น (Patience, 1990)

Haydon and West (1990) ได้ทำการศึกษาผลของ dEB ต่อการย่อยได้ของโภชนะสิ้นสุดที่ปลายลำไส้เล็กและสิ้นสุดทั้งระบบทางเดินอาหารทั้งหมดในสุกรรุ่น โดยวัดการย่อยได้ของโภชนะในอาหารที่มีระดับของ dEB แตกต่างกัน คือ -50, 100, 250 หรือ 400 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ซึ่งพบว่า การย่อยได้ปรากฏที่ปลายลำไส้เล็ก (apparent ileal digestibility) ของไนโตรเจน พลังงาน วัตถุแห้ง และกรดอะมิโนทั้งหมดมีการย่อยได้เพิ่มขึ้น ($P<0.05$ to $P<0.02$) เมื่อได้รับอาหารที่มีระดับ dEB เพิ่มขึ้น แต่การย่อยได้ตลอดทางเดินอาหารไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.16$) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของระดับ dEB ในอาหารทำให้การขับออกของไนโตรเจนในปัสสาวะลดลง ($P<0.03$) ส่งผลให้ค่าไนโตรเจนที่ถูกกักเก็บในร่างกายให้เพิ่มขึ้นเมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณไนโตรเจนที่ได้รับ นั่นคือ ระดับของ dEB ในอาหารมีผลต่อการย่อยได้ของโภชนะในอาหารและกรดอะมิโน

Haydon *et al.* (1990) ได้ทำการศึกษาผลของ dEB ต่อประสิทธิภาพการผลิตและสภาวะของเลือดในสุกรระยะรุ่นถึงขุนที่เลี้ยงในสภาวะที่อุณหภูมิสูง (29.6 องศาเซลเซียส) โดยให้ dEB ที่ระดับ 25, 100, 175, 250, 325 หรือ 400 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม พบว่า ในสุกรระยะรุ่น (21-50 กิโลกรัม) ปริมาณอาหารที่กินและอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ($P<0.03$) เมื่อระดับของ dEB เพิ่มขึ้นแต่ไม่พบความแตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.70$) ของการใช้ประโยชน์ได้ของอาหาร ส่วนในระยะขุน (50 – 105 กิโลกรัม) พบว่า สุกรมีปริมาณอาหารที่กินเพิ่มขึ้น ($P<0.03$) เมื่อระดับของ dEB ในอาหารเพิ่มขึ้น (25 - 400 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม) และเมื่อคิดโดยรวมในสุกรระยะรุ่นถึงขุน (21 – 105 กิโลกรัม) พบว่า การเพิ่มขึ้นของระดับ dEB ในอาหารมีผลทำให้สุกรมีปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวันและอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ($P<0.03$)

นอกจากนี้สมดุลสารละลายไฟฟ้ายังมีผลต่อการเมทาบอลิซึมของไนโตรเจน ซึ่งพบว่าการผสมไฮโดรคลอไรด์ (HCl) ในอาหารมีผลทำให้มีปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะเพิ่มขึ้น และยังพบว่า pH ของปัสสาวะเป็นผลเนื่องมาจากอาหารเป็นอย่างมาก ดังนั้น ค่า dEB ใน

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

อาหารจึงมีผลต่อ pH ของปัสสาวะ คือ เมื่อค่า dEB ในอาหารลดลงทำให้ pH ของปัสสาวะลดลง ในทางกลับกัน เมื่อค่า dEB ในอาหารเพิ่มขึ้นทำให้ pH ของปัสสาวะเพิ่มขึ้นด้วย ถ้าเพิ่มระดับ Na^+ ในอาหารจะมีผลทำให้ pH ของปัสสาวะเพิ่มขึ้น เนื่องจากไตต้องพยายามขับ H^+ และประจุอื่นๆ ออก และมีรายงานว่า การเพิ่ม K^+ เป็นการช่วยลดการขับออกของกรด นอกจากนี้ ยังพบว่าการหลั่ง NH_3 จะเพิ่มขึ้นเมื่อ pH ของปัสสาวะยิ่งต่ำมาก โดย NH_3 จะถูกขับเป็น NH_4^+ มากขึ้น Haydon and West (1990) รายงานว่า ปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะจะเพิ่มขึ้น 11 เปอร์เซ็นต์เมื่อค่า dEB เพิ่มขึ้นจาก -50 ถึง 100 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม แต่จะลดลง 13 และ 23 เปอร์เซ็นต์เมื่อค่า dEB เพิ่มขึ้นเป็น 250 และ 400 mEq ต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ตามลำดับ และ Okumura and Tasaki (1978) รายงานว่า เมื่อเสริม HCl ในอาหารไก่ พบว่า มีการขับออกของกรดยูริคทางปัสสาวะเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันเมื่อเสริม $NaHCO_3$ ในอาหารไก่ พบว่า มีการขับออกของกรดยูริคทางปัสสาวะลดลง จากรายงานข้างต้นจึงมีความน่าจะเป็นไปได้ว่า สมดุลสารละลายไฟฟ้าจะมีผลต่อการช่วยลดปริมาณไนโตรเจนที่ขับออกทางปัสสาวะลงได้ จึงเป็นการลดปัญหาของเสียจากฟาร์มสุกรได้อีกทางหนึ่ง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved