

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 เอ็นไซม์และสภาพการทำงานของเอ็นไซม์

เอ็นไซม์ หมายถึง สารอินทรีย์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาเคมีในสิ่งมีชีวิตให้เร็วขึ้น ซึ่งเอ็นไซม์โดยทั่วไปที่เป็นโปรตีนจำเพาะมีลักษณะโครงสร้างเป็นสามมิติมีโมเลกุลสลับซับซ้อน โดยมีคุณสมบัติในการเร่งปฏิกิริยาจำเพาะด้วยประสิทธิภาพที่สูงมาก เพราะเอ็นไซม์มีปริมาณเล็กน้อยก็สามารถเร่งปฏิกิริยาได้เป็นล้านเท่าหรือมากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีการใช้เอ็นไซม์ ซึ่งเอ็นไซม์ถูกนำมาใช้ครั้งแรกโดย Kuhn (1878 อ้างถึงใน สุนันทา, 2532)

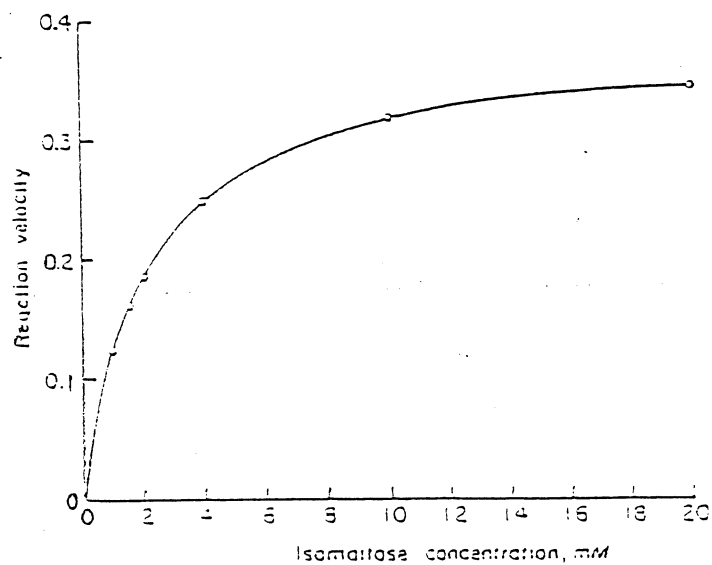
อัตราการเร่งปฏิกิริยาของเอ็นไซม์ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ อาทิ

2.1.1 ความเข้มข้นของสารที่ถูกย่อยหรือซับสเตรต (substrate)

Jorgensen (1963 อ้างถึงใน Reed, 1975) พบว่า อัตราการเร่งปฏิกิริยาของเอ็นไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส (α -glucosidase) ซึ่งมีความเข้มข้นคงที่จะผันแปรไปตามความเข้มข้นของไฮโดรโมลโตลในลักษณะโคเฟลิก คือมี สองระยะ (phase) ในระยะแรกเกิดขึ้นที่ความเข้มข้นของซับสเตรตค่อนข้างต่ำ receptor ของโมเลกุลเอ็นไซม์ยังไม่อิ่มตัวด้วยซับสเตรต ดังนั้นการเพิ่มความเข้มข้นของซับสเตรต จะทำให้โมเลกุลของซับสเตรตไปจับ receptor ของโมเลกุลเอ็นไซม์ได้มากขึ้น อัตราเร็วของปฏิกิริยาก็จะเพิ่มสูงขึ้น

ระยะที่สองเมื่อซับสเตรตมีความเข้มข้นสูง receptor ของโมเลกุลเอ็นไซม์ทุกโมเลกุลอิ่มตัวไปด้วยซับสเตรต เอ็นไซม์จะทำงานได้สูงสุด แม้เพิ่มความเข้มข้นซับสเตรต

ขึ้นอีกก็จะมี receptor ที่จะให้ซีสเตรพเข้าจับ ดังนั้นอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้น แม้เพิ่มความเข้มข้นมากขึ้นเพียงใด ดังภาพที่ 2-2

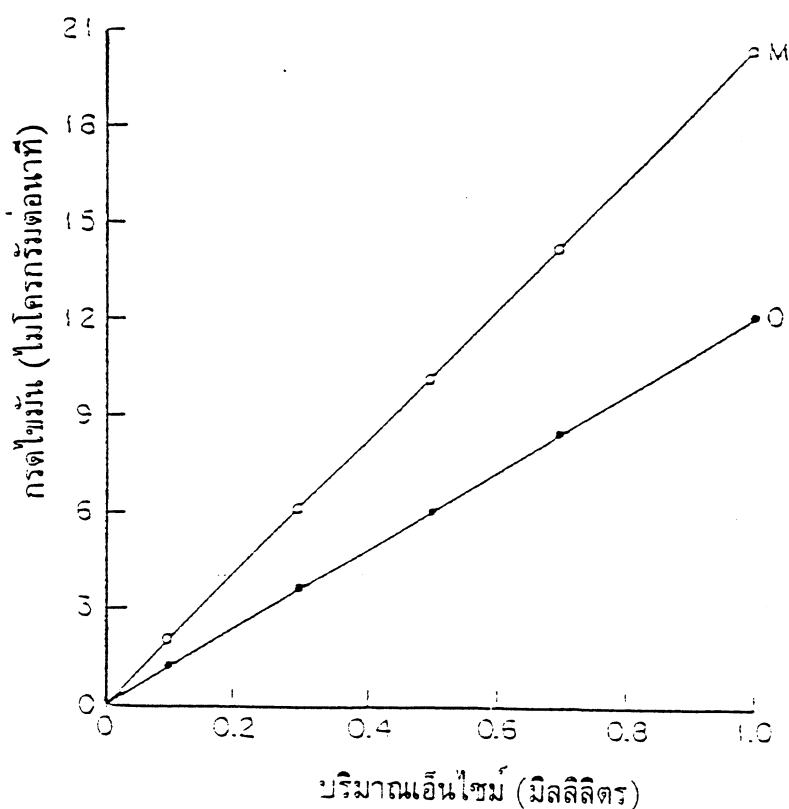


ภาพที่ 2-2 ผลของความเข้มข้นของไอโซมอลโตสต่ออัตราความเร็วของปฏิกิริยาของเอนไซม์แอลฟา-กลูโคซิเดส

ที่มา : Jorgensen (1963 อ้างถึงใน Reed, 1975)

2.1.2 ความเข้มข้นของเอนไซม์

อัตราความเร็วของปฏิกิริยขึ้นกับความเข้มข้นของเอนไซม์ ในช่วงแรกเมื่อมีความเข้มข้นของเอนไซม์น้อย อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะต่ำ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์ให้สูงขึ้น อัตราเร็วในการทำปฏิกิริยาจะเพิ่มสูงขึ้นด้วย Chandan และ Shahani (1963 อ้างถึงใน Reed, 1975) แสดงให้เห็นถึงอัตราการปลดปล่อยกรดไขมันจากปฏิกิริยาการย่อยไขมันเนยและน้ำมันโอล์ฟของเอนไซม์ไลเปส (lipase) เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์เพิ่มสูงขึ้น อัตราการเกิดกรดไขมันจะสูงขึ้นตามสัดส่วน ดังแสดงในภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 แสดงผลของปริมาณเอ็นไซม์ โลเปส ต่อการย่อยไขมันนม (M) และ น้ำมันโอเลฟ (O)

ที่มา : Chandan และ Shahani (1963 อ้างถึงใน Reed, 1975)

2.1.3 ความเป็นกรดและด่าง (pH)

เนื่องจากเอ็นไซม์ทุกชนิดเป็นโปรตีนที่มีประจุ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลง pH จึงมีผลต่อสถานะของไอออนที่มีหมู่เอมิโน หมู่คาบอกซิลิก และหมู่ฟังก์ชันเนล (functional group, R) ที่แตกตัวได้ในโมเลกุลของเอ็นไซม์ สถานะไอออนที่เปลี่ยนไปนี้ ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของเอ็นไซม์ ตลอดจนโครงสร้างสามมิติของ receptor ด้วย

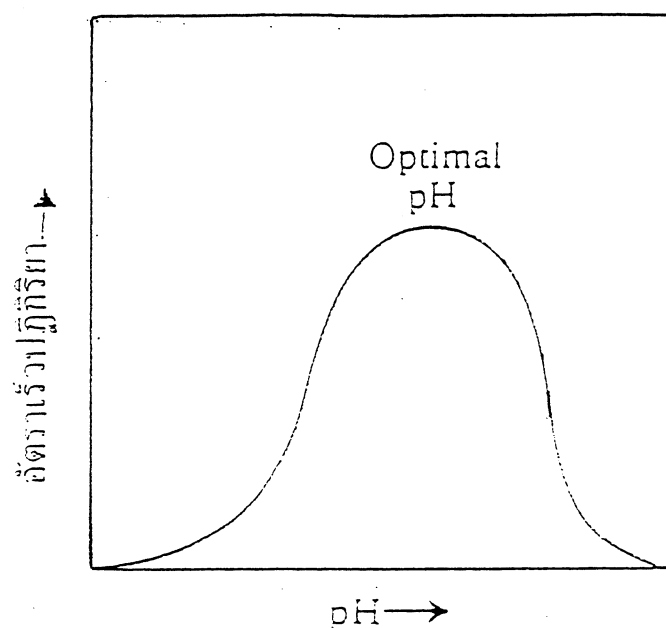
การเปลี่ยนแปลง pH ทำให้ประจุบนโมเลกุลเอ็นไซม์ (E) และซับสเตรท (S) เปลี่ยนไป จึงมีผลต่อแรงดึงดูดแบบไอออนิก หรือการรวมตัวระหว่างเอ็นไซม์กับซับสเตรท บางครั้ง pH ต่ำหรือสูงเกินไปอาจทำให้เอ็นไซม์สูญเสียสภาพธรรมชาติได้ ซึ่งเอ็นไซม์บางชนิดจะมีแคตไอออนอยู่ในโครงสร้าง ดังตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 แสดงเอนไซม์บางชนิดที่มีแคโทไอออนอยู่ในโครงสร้าง

แคโทไอออน	เอนไซม์
Zn^{+2}	alcohol dehydrogenase carboxypeptidase carbonic anhydrase
Mg^{+2}	phosphohydrolases
Mn^{+2}	arginase phosphotransferases
Fe^{+3} หรือ Fe^{+2}	cytochromes peroxidase
Cu^{+2} หรือ Cu^{+}	tyrosinase cytochrome oxidase
Na^{+}	ATPase (ต้องการ Mg^{+2} ด้วย)

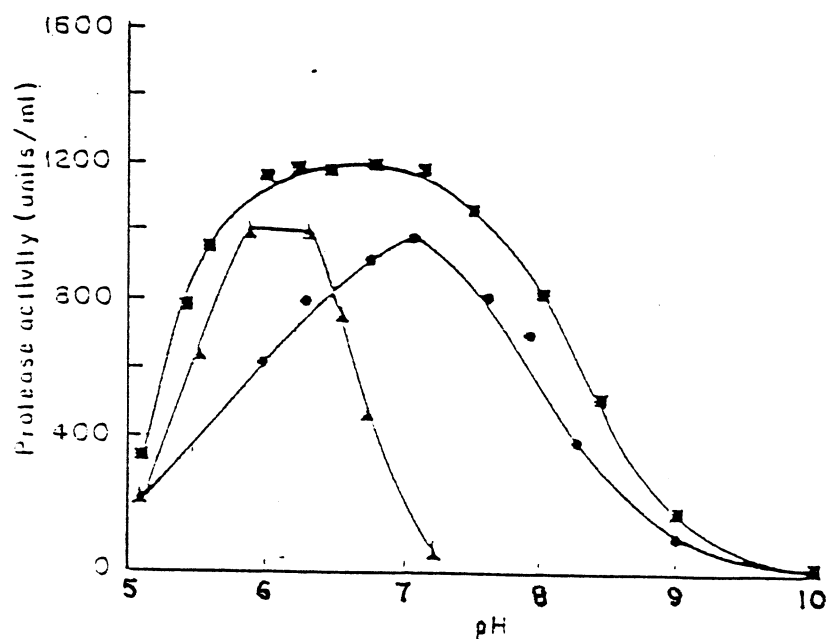
ที่มา : สุนันทา (2532)

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วปฏิกิริยาของเอนไซม์โดยทั่วไปกับ pH มักเป็นกราฟรูปประฆังคว่ำที่เป็นสมมาตรหรือไม่สมมาตร ซึ่ง pH ที่ทำให้อัตราเร็วปฏิกิริยาสูงสุดเรียก pH ที่เหมาะสมที่สุด (optimum pH) ดังแสดงในภาพที่ 2-4



ภาพที่ 2-4 แสดงผลของ pH ต่ออัตราเร็วปฏิกิริยาของเอนไซม์
ที่มา : สุนันทา (2532)

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง pH ที่เหมาะสมได้ Fogaty และ Giffin (1973, อ้างถึงใน Reed, 1975) แสดงให้เห็นว่า pH ที่เหมาะสมของเอนไซม์โปรตีนเอส (proteinase) ที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus polymixa* เปลี่ยนจาก 7.2 ที่อุณหภูมิ 20°C ไปเป็น 6.0 ที่ 45°C ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของ pH ทำให้การทำงานของ (activity) ของเอนไซม์ลดลง ดังแสดงภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 แสดงอิทธิพลของ pH ต่อค่าการทำงาน (activity) ของเอนไซม์

โปรตีนส ที่ระดับอุณหภูมิ : ● 20°C ■ 37°C และ ▲ 45°C

ที่มา : Fogaty และ Giffin (1973 อ้างถึงใน Reed, 1975)

2.1.4 อุณหภูมิ

ปฏิกิริยาของเอนไซม์ใด ๆ เกิดขึ้นในช่วงการผันแปรของอุณหภูมิไม่มากนัก หากอุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไปโปรตีนในเอนไซม์อาจเสียสภาพทางธรรมชาติของโมเลกุลได้ เอนไซม์แต่ละชนิดจะทนต่อความร้อนแตกต่างกัน เอนไซม์ส่วนใหญ่จะถูกทำลายสภาพธรรมชาติเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 50-60°C ยกเว้นเอนไซม์ของแบคทีเรียประเภท เทอร์โมฟิลิก (thermophillic) ที่สามารถทนต่อความร้อนประมาณ 50-60°C (Manning and Campbell, 1961 อ้างถึงใน Reed, 1975)

2.1.5 ความชื้น

อัตราเร็วของปฏิกิริยาของเอ็นไซม์จะขึ้นอยู่กับธรรมชาติ และความเข้มข้นของสารละลาย ผลกระทบของปริมาณความชื้นในอาหารต่ออัตราการทำงานของเอ็นไซม์จะมีความสำคัญมาก

จากการทดลองของ Guardia และ Haas (1967 อ้างถึงใน Reed, 1975) พบว่า เอ็นไซม์ไลเปสจากตับอ่อนจะย่อยสลายน้ำมันโอลีฟที่ระดับความชื้นต่ำ ที่มีน้ำอยู่ 0.06% (ความชื้นสัมพัทธ์ 43%) ทำให้การทำงานของเอ็นไซม์ไลเปสมีค่า 4.65 (ml 0.04 N KOH) แต่เมื่อเพิ่มระดับความชื้นเป็น 2% (ความชื้นสัมพัทธ์ 99%) ทำให้การทำงานของเอ็นไซม์ไลเปสเพิ่มขึ้นเป็น 102.0 (ml 0.04 N KOH)

2.1.6 ตัวยับยั้งเอ็นไซม์ (inhibitor)

ตัวยับยั้งเอ็นไซม์ เป็นสารที่ไปลดการทำงานของเอ็นไซม์ หรือทำให้เอ็นไซม์หยุดทำงาน โดยไปขัดขวางการเกิดเอ็นไซม์ซับสเตรท (ES) คอมเพล็กซ์ หรือไปแยกเอ็นไซม์ซับสเตรท คอมเพล็กซ์ ตัวยับยั้งแบ่งออกเป็นสองประเภท

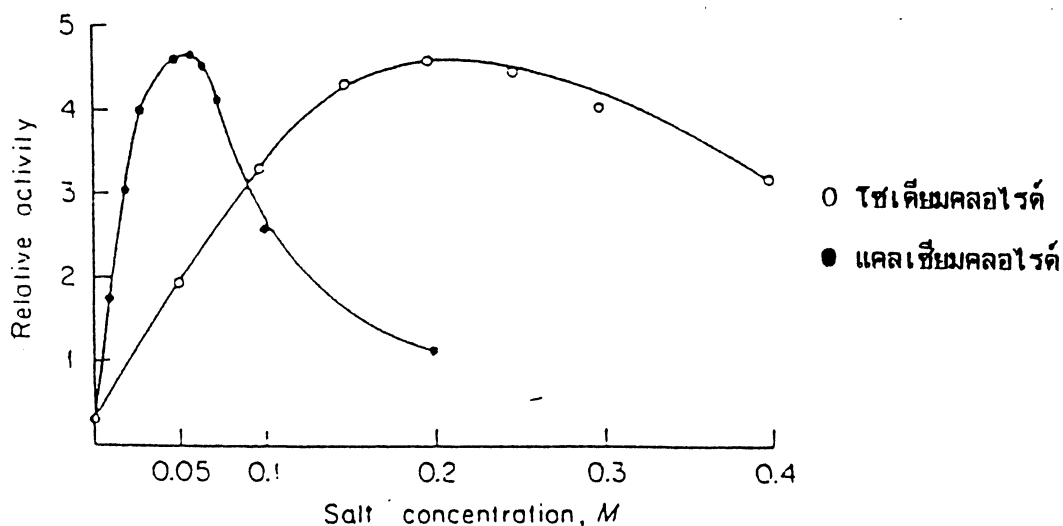
ประเภทแรกเป็นตัวยับยั้งแบบแข่งขัน (competitive inhibitor) จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของซับสเตรท (substrate-binding) โครงสร้างทางเคมีของตัวยับยั้งนี้จะเหมือนกับซับสเตรท โดยจะจับกับเอ็นไซม์แทนที่ซับสเตรทที่ตำแหน่งเดียวกัน เช่น มาโลเนต (malonate) เป็นตัวยับยั้งจับกับเอ็นไซม์ซักซิเนต ดีไฮโดรจีเนส (succinate dehydrogenase) แทนที่ซักซิเนตที่เป็นซับสเตรท

ประเภทที่สองเป็นตัวยับยั้งไม่แข่งขัน (noncompetitive inhibitor) ซึ่งยังแบ่งออกเป็นประเภทย่อยๆ อีก 2 ประเภท คือ แบบผันกลับได้ (reversible noncompetitive inhibitor) เกิดขึ้นระหว่างซับสเตรทกับตัวยับยั้ง โดยตัวยับยั้งจะมีโครงสร้างและตำแหน่งที่จับแตกต่างจากซับสเตรท ทำให้เอ็นไซม์จับกับซับสเตรทไม่ได้ และตัวยับยั้งแบบผันกลับไม่ได้ (irreversible noncompetitive inhibitor) ตัวยับยั้งชนิดนี้จะมีโครงสร้างแตกต่างจากซับสเตรท โดยจะจับกับเอ็นไซม์ ทำให้เอ็นไซม์หยุดทำงานอย่างถาวร (Hopkins et al., 1938, อ้างถึงใน Reed, 1975)

2.1.7 โคแฟกเตอร์ (cofactor)

โคแฟกเตอร์ของเอนไซม์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กลุ่มสารอนินทรีย์ และกลุ่มสารอินทรีย์

1. กลุ่มสารอนินทรีย์ ได้แก่ พวกโลหะต่างๆ เช่น Zn, Mg, Mn, Fe, Cu, K เป็นต้น โคแฟกเตอร์กลุ่มนี้มีบทบาทสำคัญในการทำงานของเอนไซม์ เช่น เพคติน เมทิล เอสเตอร์เรส (pectin methyl esterase) จากเชื้อรา จะถูกกระตุ้นโดยโลหะที่เป็นโมนิวาเลนต์ (monivalent) และไดวาเลนต์ (divalent) Van Buren และคณะ (1962 อ้างถึงใน Reed, 1975) แสดงให้เห็นโดยศึกษาการทำงานของเพคติน เมทิล เอสเตอร์เรส ในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่างกัน และที่ pH 6.5 แสดงให้เห็นว่า เอนไซม์ทำงานได้ดีในช่วงความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ 0.05 และ 0.07 โมล ขณะที่ทำงานได้ดีในช่วงความเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ที่กว้างกว่า อย่างไรก็ตามถ้าระดับความเข้มข้นของโลหะสูงเกินไป ปฏิกิริยาของเอนไซม์จะลดลง ในกรณีนี้เนื่องจากเกิดการเชื่อมกัน (crosslinking) ระหว่างสายของเพคติก แอซิด (pectic acid) มีผลทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของเอนไซม์จะลดลง ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 แสดงผลของระดับความเข้มข้นของเกลือ ต่อการทำงานของเอนไซม์ เพคติน เมทิล เอสเตอร์เรส

ที่มา : Van Buren และคณะ (1962 อ้างถึงใน Reed, 1975)

โคแฟกเตอร์ที่เป็นโลหะนี้ถ้าถูกแยกออกจากโมเลกุลของเอนไซม์ จะทำให้เอนไซม์สูญเสียคุณสมบัติไป Cromb และคณะ (1964); Vallee (1963 อ้างถึงใน Reed, 1975) รายงานว่า กลุ่มเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ตัดพันธะเปปไทด์ ที่ปลายของโมเลกุลของโปรตีน (exopeptidase) ที่มีโลหะเป็นโคแฟกเตอร์ (metalloenzyme) อาทิ เอนไซม์คาร์บอกซีเปปติเดส (carboxypeptidase) ซึ่งประกอบด้วยอะตอมสังกะสี (zinc) 1 อะตอมต่อโมล จะสูญเสียคุณสมบัติในการจับกับซับสเตรทเมื่อธาตุสังกะสีถูกเคลื่อนย้ายโดยการแยกออกจากฟีนันโทรลีน (phenanthroline)

2. กลุ่มสารอินทรีย์ มักจะเรียกโคแฟกเตอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ว่า โคเอนไซม์ (coenzyme) โคเอนไซม์ส่วนใหญ่สังเคราะห์มาจากวิตามินที่ละลายน้ำได้ (water soluble vitamin) โคเอนไซม์ที่สำคัญได้แก่ นิโคตินาไมด์อะดีนไดนิวคลีโอไทด์ (nicotinamide adenine dinucleotide, NAD⁺) ฟลาวินอะดีนไดนิวคลีโอไทด์ (flavin adenine dinucleotide, FAD) โคเอนไซม์เอ (coenzyme A) ไธอะมินไพโรฟอสเฟต (thiamine pyrophosphate, TPP) (สุนันทา, 2532)

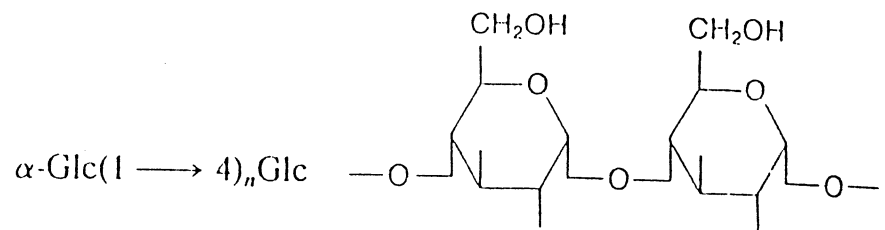
2.2 โครงสร้างของโภชนาในอาหารสัตว์

วัตถุดิบที่ใช้ในอาหารสุกรหลังหย่านมมีหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นธัญพืช ปากถั่วเหลือง ปลาป่น และอื่นๆ วัตถุดิบแต่ละชนิดมีโภชนาที่เป็นองค์ประกอบแตกต่างกัน คือ

2.2.1 คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) ซึ่งมีแป้ง (starch) และเยื่อใย (crude fiber) เป็นส่วนประกอบหลัก (Selvendran and O' Neil, 1973)

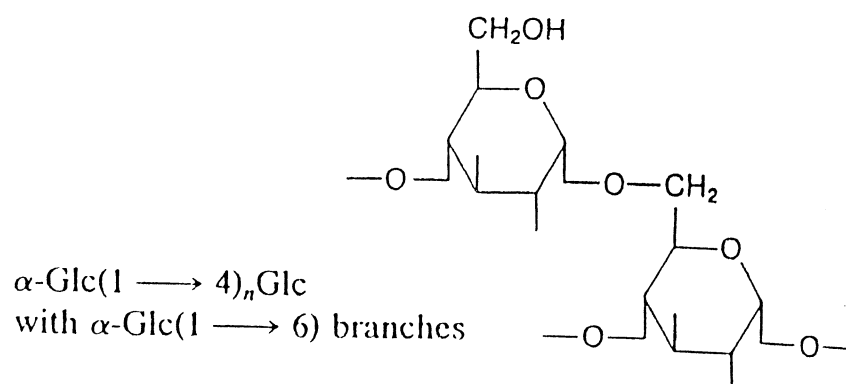
2.2.1.1 ธัญพืชมีองค์ประกอบหลักเป็นแป้ง ซึ่งประกอบด้วยอัมัยโลส (amylose) และอัมัยโลเพคติน (amylopectin) อัมัยโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลของกลูโคส (glucose) ต่อกันด้วยพันธะ แอลฟา-1,4 กลูโคซิดิก (α -1,4 glucosidic bond) ซึ่งส่วนใหญ่พบในปลายข้าว ข้าวโพด ดังภาพที่ 2-7 ส่วนอัมัยโลเพคตินเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลของกลูโคสต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1,4 กลูโคซิดิก และแอลฟา-1,6 กลูโคซิดิก

(α -1,6 glucosidic bond) ซึ่งพบในปลายข้าว ข้าวโพด (Devlin, 1992) ดัง
ภาพที่ 2-8



ภาพที่ 2-7 แสดงโครงสร้างของอมัยโลส

ที่มา : Devlin (1992)

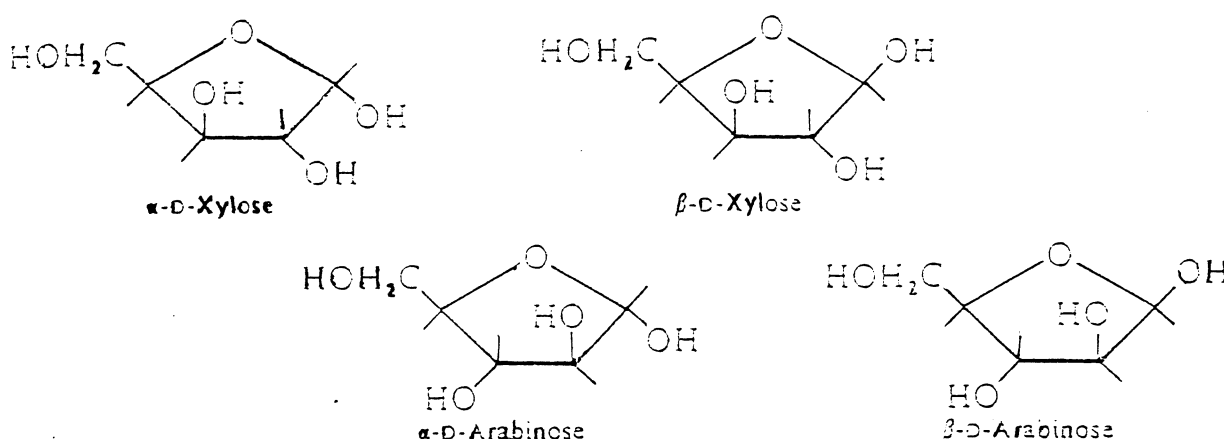


ภาพที่ 2-8 แสดงโครงสร้างของอมัยโลเพคติน

ที่มา : Devlin (1992)

2.2.1.2 ส่วนที่เป็นเยื่อใยหรือโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งนี้ ลักษณะทางกายภาพ ทำให้เอ็นไซม์ในระบบทางเดินอาหารย่อยได้จากัดหรือย่อยไม่ได้ในบางกรณี โพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งเหล่านี้มีอยู่หลายกลุ่ม อาทิ

(1) เพนโตแซน (pentosan) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลเพนโตส (pentose) ซึ่งได้แก่ อะราบินอส (arabinose) และไซโลส (xylose) เป็นส่วนใหญ่ พบมากใน ข้าวโพด กากถั่วเหลือง ข้าวสาลี และข้าวไรย์ (Selvendran and O' Neil, 1979) ดังภาพที่ 2-9



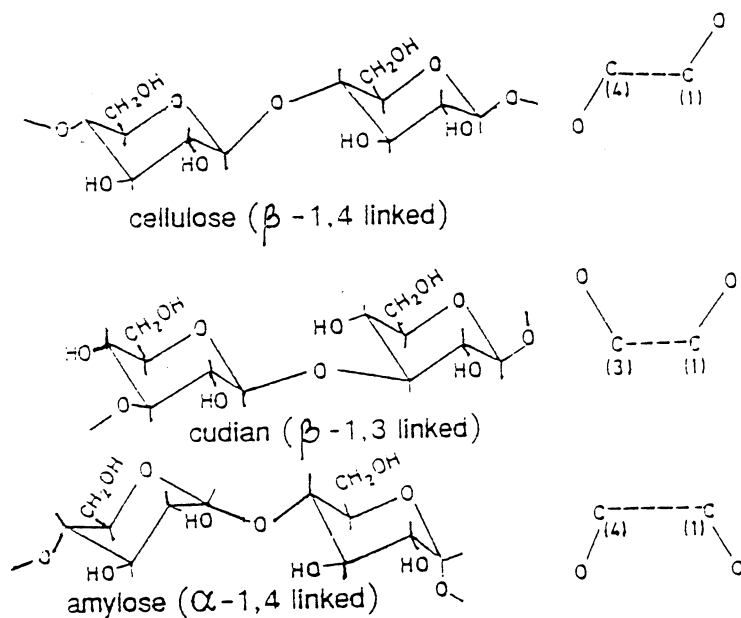
ภาพที่ 2-9 แสดงโครงสร้างของเพนโตส

ที่มา : Selvendran และ O'Neil (1987)

(2) แซกไซส (hexose) ซึ่งประกอบด้วย กลูโคส (glucose) แมนโนส (mannose) และกาแลคโตส (galactose) พบว่าใน มิกซ์ ลิงค์ เบต้า-กลูแคน (mixed-linked β -glucan) ประกอบด้วยพันธะเบต้า 1, 3 และ 1, 4 กลูแคนต่อกัน ซึ่งพบมากในข้าวบาร์เลย์และข้าวโอ๊ต (Selvendran and O'Neil, 1987) ดังภาพที่ 2-10

(3) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ประกอบด้วยพันธะ เบต้า-1,4-ลิงค์ ไซโลส (β -1,4-linked xylose) ต่อกัน โดยมีส่วนประกอบด้านข้าง (side

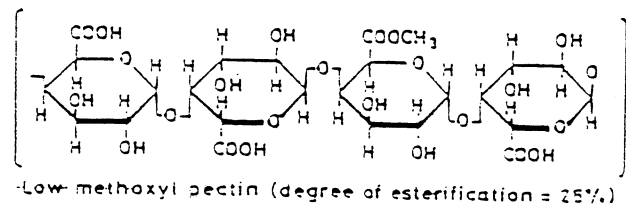
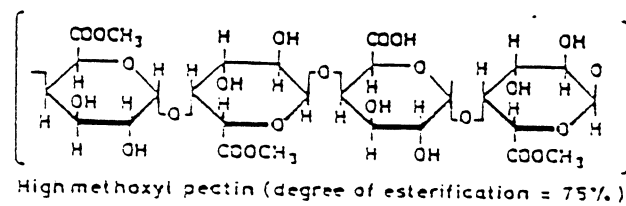
chains) เป็นอะราบินอส (arabinose), ดี-กลูคิวโรนิก แอซิด (D-glucuronic acid) และ 4-โอ-เมทิล-ดี-กลูคิวโรนิก แอซิด (4-O-methyl-D-glucuronic acid) ซึ่งพบในข้าวโพดเป็นส่วนใหญ่ (Hirst, 1958 อ้างถึงใน Bergmeyer, 1965)



ภาพที่ 2-10 แสดงโครงสร้างของกลูแคน

ที่มา : Morris (1979 อ้างถึงใน Blanshard และ Mitchell, 1979)

(4) เพคติน (pectin) ประกอบด้วยโครงสร้างแอลฟา-1,4 ลิงค์ (α -1,4 linked) ของ ดี-กาแลคทูโรนิก แอซิด (D-galacturonic acid) เชื่อมด้วยแอล-รามโนส (L-rhamnose) (Wiggins and Cummings, 1982 อ้างถึงใน Chesson, 1987) ดังภาพที่ 2-11



ภาพที่ 2-11 แสดงโครงสร้างของ เพคติน

ที่มา : Wiggins และ Cummings (1982 อ้างถึงใน Chesson, 1987)

2.2.2 ลิกนิน (lignin) เป็นองค์ประกอบของเยื่อใยที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต (non carbohydrate) ลิกนินมีโครงสร้างแบบฟีนิลโพรพานอยด์ โพลีเมอร์ (phenylpropanoid polymer) (Selvendran and O'Neil, 1987)

องค์ประกอบของเยื่อใยในวัตถุดิบประเภทพืชแสดงไว้ในตารางที่ 2-2

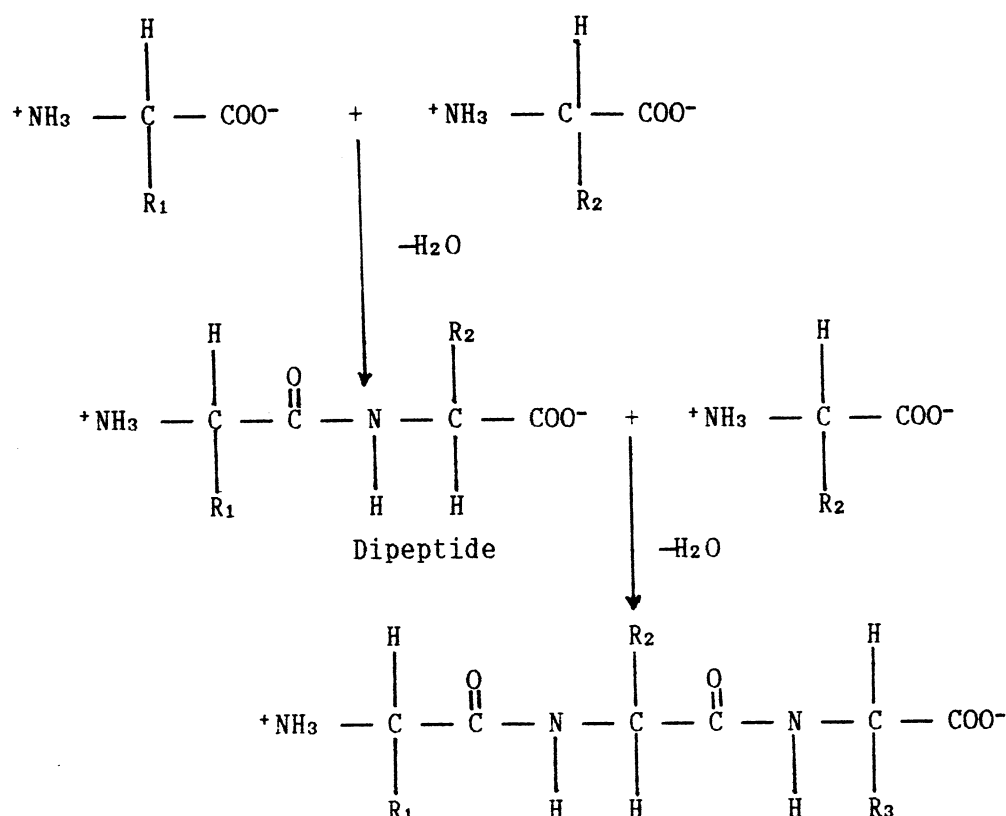
ตารางที่ 2-2 แสดงองค์ประกอบของเยื่อใยในวัตถุดิบอาหารสัตว์ (% ของสิ่งแห้ง)

ส่วนประกอบ เยื่อใย	รำ ¹ ละเอียด	ปลายข้าว ¹	ข้าว ² บาร์เลย์	ข้าวโพด ²	ข้าวไรย์ ²	ข้าว ² สาลี	กากถั่ว ² เหลือง
แรมโนส	-	-	0.1	0.1	4.0	0.2	0.5
อะราบีโนส	-	-	2.3	1.9	2.4	2.7	2.7
ไซโลส	-	-	4.7	2.4	3.7	3.7	1.9
แมนโนส	-	-	0.6	0.4	0.7	-	0.5
กาแลคโตส	-	-	0.4	0.7	0.5	-	2.4
กลูโคส	-	-	10.0	5.0	4.7	3.7	12.5
ยูโรนิค แอซิด	-	-	0.5	0.8	0.5	0.5	2.8
ลิคนิน	-	-	2.6	0.8	1.2	1.0	0.9
เยื่อใย (crude fiber)	12.9	0.6	5.0	2.3	2.2	7.3	5.5

ที่มา : ¹ NRC (1988)

² Selvendran และ O'Neil (1987)

2.2.3 โปรตีน (protein) ซึ่งเป็นสารประกอบที่มีไนโตรเจนในรูปของกลุ่มอะมิโนประกอบอยู่ในวัตถุดิบอาหารโปรตีน ได้แก่ ปลาบ่น กากถั่วเหลือง เป็นส่วนใหญ่ โปรตีนจะประกอบด้วย กรดอะมิโน ซึ่งต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide bond) โดยมีแอลฟา-อะมิโน คาร์บอกซิลิก แอซิด (alpha-amino carboxylic acid) เป็นโครงสร้างพื้นฐาน (Delvin, 1992) ดังภาพที่ 2-12



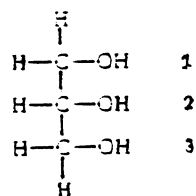
ภาพที่ 2-12 แสดงโครงสร้างของโปรตีน

ที่มา : Schultz และ Liebman (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

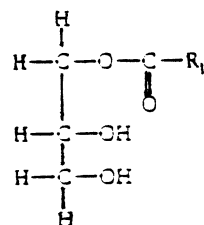
2.2.4 ไขมัน (Fats & Oils)

ไขมันที่อยู่ในองค์ประกอบในวัตถุดิบอาหาร มีองค์ประกอบที่เป็นไตรกลีเซอรอล สามารถจำแนกออกได้หลายชนิด ที่สำคัญได้แก่ ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ไลโปโปรตีน (lipoprotein) ฟอสโฟลิปิด (phospholipid) สเตอรอยด์ (steroids) และเทอร์ปีนอยด์ (terpinoids) เป็นต้น ไขมันในอาหารสุกรส่วนใหญ่จะมีไตรกลีเซอไรด์ เป็นองค์ประกอบหลัก ตามสูตรในโครงสร้างของไตรกลีเซอไรด์ ประกอบด้วยกลุ่มไฮดรอกซิล (hydroxyl) ของกลีเซอรอล และกรดไขมันจับกันด้วยพันธะเอสเทอร์ (ester bond) (Lehninger, 1975) ดังภาพที่ 2-13

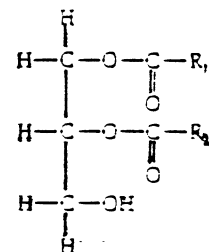
Glycerol



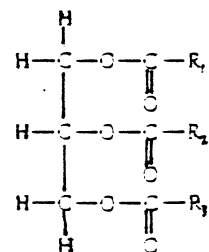
1-Monoacylglycerol



1,2-Diacylglycerol



Triacylglycerol



ภาพที่ 2-13 แสดงโครงสร้างของไขมัน

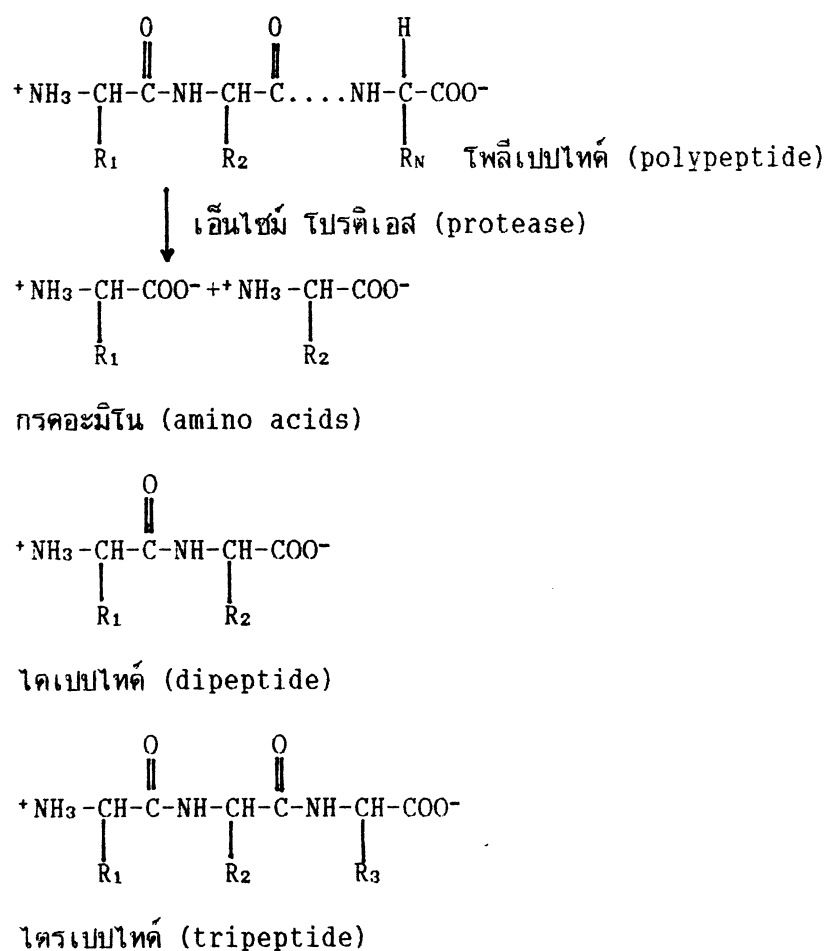
ที่มา : Lehninger (1975)

2.3 ชนิดและการทำงานของเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร

เอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของลูกสุกร ทำหน้าที่ในการย่อยสลายอาหารจำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งชนิดของเอนไซม์แตกต่างกันไปตาม ชนิดของอาหาร โดยทั่วไปเอนไซม์ทำหน้าที่ย่อยอาหารที่มีโมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็ก เอนไซม์ในกระเพาะอาหารอาจจำแนกออกเป็นกลุ่มๆตามชนิดของโภชนะที่เป็นขั้วสเตรท เช่น

2.3.1 เอนไซม์ที่ย่อยโปรตีน

เอนไซม์ที่ย่อยโปรตีนมีแหล่งผลิตหลายแหล่ง แหล่งละหลายชนิด เอนไซม์เหล่านี้ในภาพรวมจะช่วยย่อยโปรตีนที่เป็นโพลีเปปไทด์ (polypeptide) ให้เป็นเปปไทด์เล็ก ๆ และกรดอะมิโน ดังภาพที่ 2-14 โดยมีความจำเพาะในการย่อยแตกต่างกันตามแหล่งผลิต และชนิดของเอนไซม์



ภาพที่ 2-14 แสดงผลของเอนไซม์ที่ย่อยโปรตีน

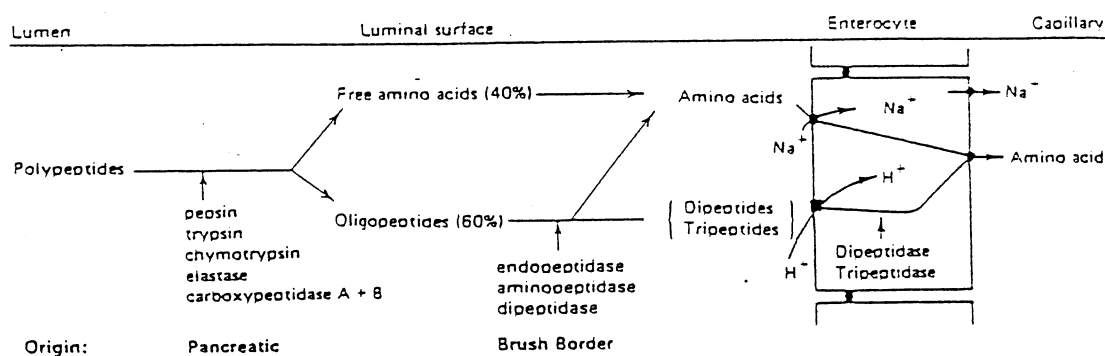
ที่มา : Devlin (1992)

2.3.1.1 เอนไซม์ในกระเพาะอาหาร

การย่อยสลายโปรตีนเริ่มในกระเพาะอาหาร (gastric lumen) เอนไซม์ที่ย่อยคือ เอนไซม์เปปซิน (pepsin) ซึ่งถูกผลิตมาในรูปไม่ทำงาน (inactive form) คือ เปปซิโนเจน (pepsinogen) จากนั้นจะมีการเปลี่ยนรูปเป็นเปปซิน (pepsin) ซึ่งเป็นรูปที่ทำงานได้ (active form) โดยปฏิกิริยาของกรดไฮโดรคลอริกที่ pH 2-3.9 (Taylor, 1968) เปปซินจะทำการย่อยสลายโปรตีนโดยตัดพันธะเปปไทด์ที่แอล-อะมิโนแอซิด (L-amino acid) ยึดเกาะกัน อัตราการย่อยจะรวดเร็วในพันธะที่มีอะโรมาติกอะมิโนแอซิด (aromatic amino acid) ได้แก่ ไทโรซีน (tyrosine) และฟีเนลอะลานีน (phenylalanine) ต่อกัน และจะช้าในพันธะระหว่างกลูตามิกแอซิด (glutamic acid) ซีสทีน (cystine) ระหว่างวาเลอีนและกลัยซีน (valine-glycine) ไทโรซีนและซีสทีน (tyrosine-cystine) และพันธะระหว่างไทโรซีนและเซอรีน (tyrosine-serine)

2.3.1.2 เอนไซม์ในลำไส้เล็ก

เอนไซม์ที่ย่อยโปรตีนในลำไส้เล็กผลิตและหลั่งมาจากตับอ่อน (pancreas) และจากลำไส้เล็กเอง ปฏิกิริยาการย่อยโปรตีนของเอนไซม์เหล่านี้แสดงไว้ในภาพที่ 2-15



ภาพที่ 2-15 แสดงผลการย่อยและการดูดซึมของโปรตีนในระบบทางเดินอาหาร

ที่มา : Hopter (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

ความจำเพาะในการย่อยของเอนไซม์เหล่านี้แตกต่างไปจากแหล่งที่มา ดังนี้

2.3.1.2.1 เอนไซม์จากตับอ่อน

พันธะเปปไทด์ที่มีกลัยซีนจะคงทนต่อการย่อยของเอนไซม์เปปซินในกระเพาะได้สูง การย่อยสลายพันธะโปรตีนโดยเอนไซม์เปปซินให้ได้กรดอะมิโนอิสระ หรือเปปไทด์ขนาดเล็ก เกิดขึ้นตั้งแต่ในกระเพาะอาหารจนถึงลำไส้เล็กส่วนต้น หรือดูโอดีนัม (duodenum) และในดูโอดีนัมจะมีน้ำย่อยจากตับอ่อนหลายชนิดซึ่งถูกหลั่งมาในรูปที่ไม่ทำงาน (inactive form) เช่น ทริปซินโนเจน (trypsinogen) ถูกปลดปล่อยสู่ลำไส้เล็กและถูกกระตุ้นโดยเอนไซม์เอนเทโรไคเนส (enterokinase) เปลี่ยนเป็นทริปซิน (trypsin) ซึ่งสามารถทำงานได้ ส่วนคัยโมทริปซินโนเจน (chymotrypsinogen) โปรคาร์บอกซีเปปติเดส เอ และ บี (procarboxypeptidase A & B) จะถูกทริปซินกระตุ้นทำให้เปลี่ยนเป็นคัยโมทริปซิน (chymotrypsin) คาร์บอกซีเปปติเดส เอ และ บี (carboxypeptidase A และ B) ตามลำดับ ซึ่งทริปซินและคัยโมทริปซินจะเป็นเอนไซม์ที่ย่อยพันธะข้างใน (endopeptidase) ส่วนคาร์บอกซีเปปติเดส เอ และ บี เป็นเอนไซม์ย่อยพันธะข้างนอก (exopeptidase) โดยคัยโมทริปซินจะตัดพันธะที่อะโรมาติก อะมิโนแอซิด ได้แก่ ไทโรซีน (tyrosin) ทริปโตเฟน (tryptophan) และ ฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) ขณะที่ทริปซินและคาร์บอกซีเปปติเดส บี จะตัดพันธะก่อให้เกิดกรดอะมิโน อาร์จินีน (arginine) และไลซีน (lysine) (Gartler *et al.*, 1980)

2.3.1.2.2 เอนไซม์จากลำไส้เล็ก

เอนไซม์ที่หลั่งจากลำไส้เล็กช่วยย่อยสลายโปรตีนและโอลิโกเปปไทด์ (oligopeptide) ให้เป็นกรดอะมิโน เอนไซม์เหล่านี้มี ไดเปปติเดส (dipeptidase) ซึ่ง Josefsson และ Sjostrom (1966 อ้างถึงใน Corring, 1982) รายงานว่า เอนไซม์ไดเปปติเดส นี้ถูกเก็บอยู่ในไซโตซอล (cytosol) ของเซลล์บุผนังลำไส้เล็กซึ่งอยู่ในส่วนที่ทำงานได้ (brush border) และ Lindberg (1966 อ้างถึงใน Corring, 1982) กล่าวว่า

เอ็นไซม์โคเปปติเดสจะทำหน้าที่ตัดพันธะเปปไทด์ระหว่างกลัยซีนและวาลีน เอ็นไซม์โคเปปติเดสส่วนใหญ่ทำงานในส่วนเจจูนัม (jejunum) และอิลีียมส่วนต้น (ilium) แต่อาจจะทำงานเล็กน้อยในส่วนตอนต้นของ คูโอดีนัม

ส่วนเอ็นไซม์ อะมิโนเปปติเดส (aminopeptidase) ทำหน้าที่ตัดลูซีน (leucine) และกรดอะมิโนชนิดต่างๆจากส่วนปลายอะมีน (amine end) ของเปปไทด์ (Smith และ Bergmann 1944 อ้างถึงใน Corring, 1982) โอลิโกเปปติเดส และอิมิโดเปปติเดส (imidopeptidase) จะตัดโพรลีน (proline) จากส่วนปลายอะมีนและคาร์บอกซิลของโอลิโกเปปไทด์ (Sjostrom et al., 1973) ซึ่งกรดอะมิโนโคเปปไทด์ และไตรเปปไทด์ ที่เกิดจากการย่อยของเอนโคเปปติเดส อะมิโนเปปติเดส และโคเปปติเดส จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของเยื่อบุผนังลำไส้ (enterocyte) จากนั้นโคเปปไทด์และไตรเปปไทด์บางส่วนที่ยังย่อยไม่สมบูรณ์ก็จะถูกเอ็นไซม์ โคเปปติเดส และไตรเปปติเดส ย่อยอีกครั้งได้กรดอะมิโน ซึ่งกรดอะมิโนจะถูกดูดซึมต่อไป ผลของการย่อยโปรตีนแสดงไว้ในตารางที่ 2-3

ตารางที่ 2-3 แสดงชนิดของเอ็นไซม์ต่อการย่อยโปรตีน

เอ็นไซม์	โปรเอ็นไซม์	ปฏิกิริยาในการย่อย	R
pepsin	pepsinogen	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{R} \\ \quad \quad \\ \text{CO-NHCHCO-NHCHCO} \\ \downarrow \end{array}$	Tyr, Phe Leu
Endopeptidase trypsin	trypsinogen	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{R} \\ \quad \quad \\ \text{CO-NHCHCO-NHCHCO} \\ \downarrow \end{array}$	Arg, Lys
chymotrypsin	chymotrypsinogen	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{R} \\ \quad \quad \\ \text{CO-NHCHCO-NHCHCO} \\ \downarrow \end{array}$	Tyr, Trp Phe, Met
elastase	proelastase	$\begin{array}{c} \text{R} \quad \quad \text{R} \\ \quad \quad \\ \text{CO-NHCHCO-NHCHCO} \\ \downarrow \end{array}$	Ala, Gly
Exopeptidase carboxypeptidase A	procarboxypeptidase A	$\begin{array}{c} \text{R} \\ \\ \text{CO-NHCHCO}_2- \\ \downarrow \end{array}$	Val, Leu Ile, Ala
carboxypeptidase B	procarboxypeptidase B	$\begin{array}{c} \text{R} \\ \\ \text{CO-NHCHCO}_2- \\ \downarrow \end{array}$	Arg, Lys

ที่มา : Hopfer (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

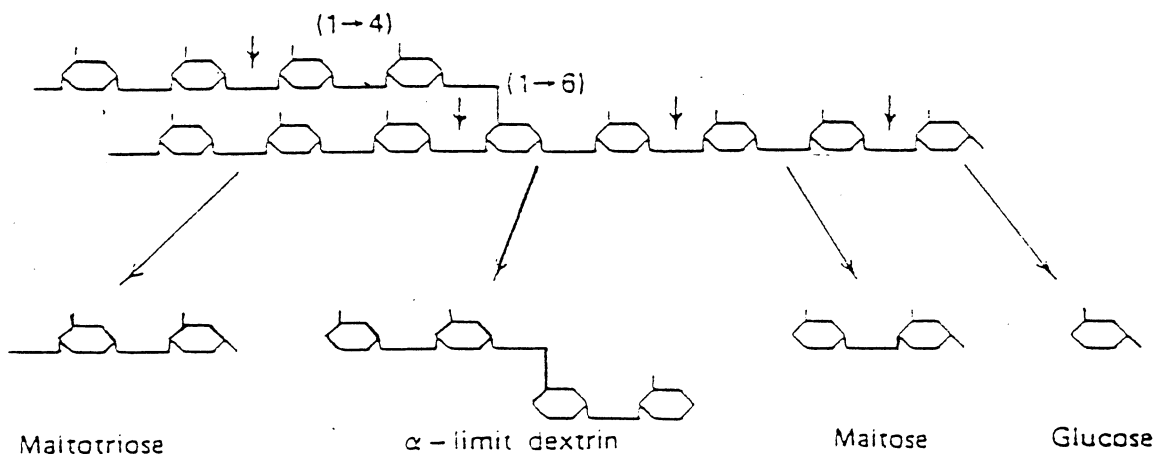


2.3.2 เอนไซม์ที่ย่อยคาร์โบไฮเดรต

การย่อยคาร์โบไฮเดรตเกิดขึ้นเล็กน้อยในปากและในกระเพาะอาหาร เนื่องจากระยะเวลาในการย่อยในปากมีน้อย และ pH ในกระเพาะอาหารไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส (amylase) การย่อยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในลำไส้เล็ก ปฏิกิริยาการย่อยของอะไมเลสส่วนใหญ่เป็นการตัดพันธะแอลฟา 1-4 และแอลฟา 1-6 กลูโคซิดิก (α 1-4, 1-6 glucosidic bond) ดังภาพที่ 2-15

2.3.2.1 การย่อยคาร์โบไฮเดรตในปาก

การย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตเริ่มต้นในส่วนของปาก โดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ซึ่งสามารถย่อยสลายแบ่งได้ มอลโตส (maltose) มอลโตไตรออส (maltotriose) และแอลฟา-แดกทริน (α -dextrins) แสดงในภาพ 2-16



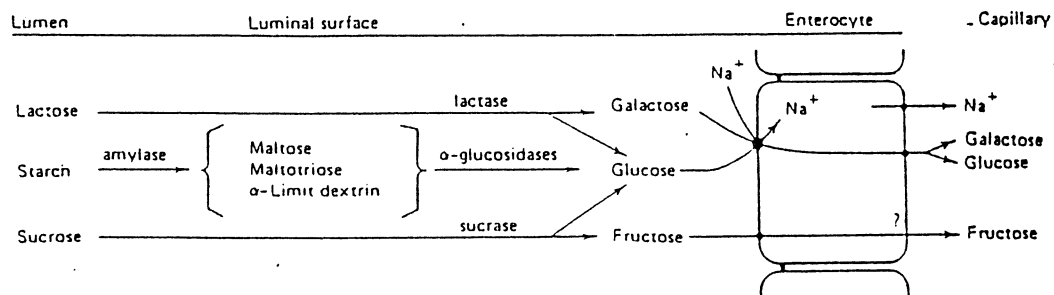
ภาพที่ 2-16 แสดงการย่อยของเอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส ต่อ อมัยโลเพคติน (amylopectin) จากน้ำลาย

ที่มา : Hopfer (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

pH ที่เหมาะสมของเอนไซม์อัมัยเลสในน้ำลายอยู่ที่ 6.9 ซึ่งส่งผลทำให้ความเป็นกรดในกระเพาะอาหารลดลง (Sambrook, 1980)

2.3.2.2 การย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำไส้เล็ก

ในส่วนของลำไส้เล็กจะเกิดการย่อยสลายแป้งมากที่สุด ส่วนใหญ่จะเป็นเอนไซม์แอลฟา-อัมัยเลส ซึ่งหลังจากตับอ่อน โดยจะย่อยสลายแป้งได้น้ำตาลและมอลโตสบางส่วน นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ย่อยโคแซ็กคาไรด์ เช่น ซูเครส (sucrase) แลคเตส (lactase) มอลเตส (maltase) และไอโซมอลเตส (isomaltase) จะถูกหลั่งจากส่วนเบรช บอเดอร์ของลำไส้เล็กในสุกร (Kidder and Manners, 1978) ดังภาพที่ 2-17



ภาพที่ 2-17 แสดงผลการย่อยและการดูดซึมของคาร์โบไฮเดรตในลำไส้เล็ก

ที่มา : Hopfer (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

โดยที่ เอนไซม์ ซูเครส จะย่อยสลายซูโคส เอนไซม์แลคเตสจะย่อยสลายแลคโตส และเอนไซม์ มอลเตส จะย่อยสลาย มอลโตส ดังตารางที่ 2-4

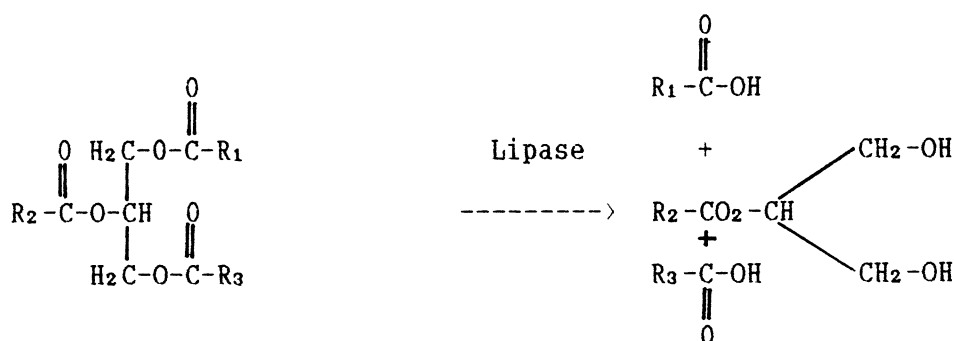
ตารางที่ 2-4 แสดงผลของเอนไซม์ต่อการย่อยคาร์โบไฮเดรทในลำไส้เล็ก

ชนิดเอนไซม์	ซับสเตรท	ตำแหน่งย่อย	ผลที่ได้
exo-1,4- α -glucosidase (glucoamylase)	amylose	α -(1--->4)glucose	glucose
oligo-1,6-glucosidase (isomaltase)	isomaltose- -dextrin	α -(1--->6)glucose	glucose
α -glucosidase (maltase)	maltose, maltotriose	α -(1--->4)glucose	glucose
sucrose- α -glucosidase (sucrase)	sucrose	α -glucose	glucose, fructose
α, α -trehalase	trehalose	α -(1--->1)glucose	glucose
β -glucosidase	glucosyn cermide	β -glucose	glucose, ceramide
β -galactosidase (lactase)	lactose		glucose, galactose

ที่มา : Hopfer (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

2.3.3 เอนไซม์ที่ย่อยไขมัน

การย่อยไขมันเกิดขึ้นในส่วนของลำไส้เล็ก โดยเอนไซม์ไลเปสทำหน้าที่ย่อยไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol) ที่พันธะเอสเทอร์ (ester bond) ได้เป็นกรดไขมันอิสระ (fatty acid) และโมโนเอซิลกลีเซอรอล (monoacylglycerol) ดังภาพที่ 2-18



Triacylglycerol -----> Fatty acids และ Monoacylglycerol

R = hydrocarbon chain

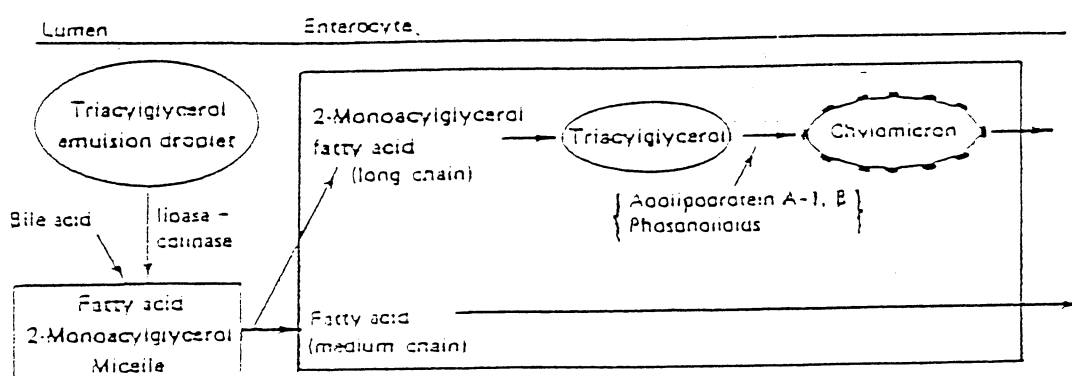
ภาพที่ 2-18 แสดงผลเอ็นไซม์ไลเปสต่อการย่อยไขมัน

ที่มา : Hopfer (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

ไขมันส่วนใหญ่อยู่ในรูปไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) ซึ่งจะย่อยสลายในส่วนของท่อลำไส้เล็ก (intestinal lumen) เท่านั้น ไตรกลีเซอไรด์จะออกจากกระเพาะในรูปโมเลกุลใหญ่ และเป็นลักษณะอิมัลชัน (emulsion) ที่ไม่คงรูป เมื่อเกลือน้ำดี (bile salt) หลั่งออกมาไขมันจะอยู่ในลักษณะคงรูป

เอ็นไซม์ ไลเปส (lipase) จากส่วนของตับอ่อนจะหลั่งเข้าสู่ลำไส้เล็กส่วนดูโอดีนัม และจะเข้าย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์ซึ่งประกอบด้วย กรดไขมันสายยาว (long chain fatty acid) โดยมี เอ็นไซม์ โคไลเปส (colipase) เข้าร่วมในการย่อยสลาย (Chapuc et al., 1975 อ้างถึงใน Corring, 1982) ในการย่อยโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ที่ตำแหน่ง 1 และ 3 ผลจากการย่อยจะได้เป็นไดกลีเซอไรด์ (diglyceride) โมโนกลีเซอไรด์ (monoglyceride) และกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ในสัดส่วนต่างกัน โมโนกลีเซอไรด์และกรดไขมันที่ได้จะถูกจับกับเกลือน้ำดีอยู่ในรูป มิกซ์ ไมเซลล์ (mixed micelles) ซึ่งส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ คอเลสเตอรอล (cholesterol) ไลโซฟอสโฟลิปิด (lysophospholipids) รวมทั้งวิตามินชนิดละลายในไขมัน ซึ่งจะถูกดูดซึมในส่วนกลางของ เจจูนัม (Corring, 1982) กรดไขมันที่มีคาร์บอน 10 อะตอม หรือน้อยกว่า จะถูกดูดซึมอย่างรวดเร็วเข้าสู่เซลล์เยื่อบุผนังลำไส้ (enterocyte) ส่วนกรดไขมันสายยาว

(long chain fatty acid) จะรวมกับโมเลกุลของแอลกอฮอล์และขจัดโมเลกุลของน้ำออกอีกครั้ง (re-esterified) ได้เป็นไตรกลีเซอไรด์ จากนั้นได้รวมตัวกับ apolipoprotein A-1, B และ phospholipids เกิดหยดไขมัน (droplets) เรียกว่า chylomicrons ซึ่งเกิดในส่วนน้ำเหลืองของลำไส้เล็ก (intestinal lymph) และจะถูกส่งไปยังตับหรือเนื้อเยื่ออื่นในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่อไป ดังแสดงในภาพที่ 2-19



ภาพที่ 2-19 แสดงผลของการย่อยและการดูดซึมไขมันในระบบทางเดินอาหาร

ที่มา : Hoffer (1992 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

2.4 ปริมาณเอ็นไซม์ในระบบทางเดินอาหาร

ปริมาณเอ็นไซม์ในระบบทางเดินอาหารจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับอายุสุกร ในช่วงสุกรอายุน้อย ปริมาณเอ็นไซม์ แลคเตส ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยน้ำตาลจะมีอยู่ปริมาณสูง โดยเฉพาะในช่วงแรกเกิดจนถึง 4 สัปดาห์ ส่วนปริมาณเอ็นไซม์ที่ย่อยถั่วพืชและกากถั่วเหลืองจะมีอยู่น้อยในช่วงแรกเกิดจนถึง 8 สัปดาห์ ได้แก่ เอ็นไซม์ โปรติเอส ไลเปส และ อมัยเลส เป็นต้น (Hardy, 1975 อ้างถึงใน Harker, 1991) เมื่อสุกรโตขึ้น ปริมาณเอ็นไซม์ที่ย่อยถั่วพืช และกากถั่วเหลืองจะมีปริมาณมากขึ้น ทำให้การย่อยได้ของอาหารเหล่านี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น (Froseth et al., 1992)

ปริมาณเอนไซม์ที่ผลิตในสักรช่วงอายุต่างๆ จะแสดงไว้ในตารางที่ 2-5, 2-6 และ 2-7

ตารางที่ 2-5 แสดงปริมาณเอนไซม์ แลคเตส ซูเครส และ อมัยเลส ในช่วงสักรอายุต่างๆ

ชนิดของเอนไซม์	ค่าการทำงานของ		
	อายุ	ของเอนไซม์	แหล่ง
แลคเตส ² /			
(ไมโครโมลต่อกรัมของ	17 วัน ⁴ /	15.40	Kelly และคณะ (1991)
มิวโคซาต่อหน้าที)	19 วัน ⁴ /	12.80	
	21 วัน ⁴ /	6.90	
แลคเตส ¹ /			
(ไมโครโมลต่อกรัมของ	8 สัปดาห์	2.75	Manners และ Stevens (1972)
มิวโคซาต่อหน้าที)	17-19 สัปดาห์	2.25	
	22-27 สัปดาห์	2.00	
	27-31 สัปดาห์	2.33	
ซูเครส ² /			
(ไมโครโมลต่อกรัมของ	17 วัน ⁴ /	9.0	Kelly และคณะ (1991)
มิวโคซาต่อหน้าที)	19 วัน ⁴ /	10.8	
	21 วัน ⁴ /	7.4	

ตารางที่ 2-5 แสดงปริมาณเอนไซม์ แลคเตส ซูเครส และ อมัยเลส ในช่วงสักรอายุต่างๆ
(ต่อ)

ค่าการทำงานของ			
ชนิดของเอนไซม์	อายุ	ของเอนไซม์	แหล่ง
(activity of enzyme)			
ซูเครส ¹ /			
(ไมโครโมลต่อกรัมของ	8 สัปดาห์	5.25	Manners และ Stevens (1972)
มิวโคซาต่อหน้าที)	17-19 สัปดาห์	9.75	
	22-27 สัปดาห์	11.57	
	27-31 สัปดาห์	17.75	
อมัยเลส ² /			
(ไมโครโมลต่อตับอ่อน	แรกเกิด	0.07-1.51	Pond และคณะ (1971)
ต่อหน้าที)	3 วัน	0.34-1.25	
	23 วัน	3.23-75.88	
อมัยเลส ² /			
(ไมโครโมลต่อกรัมของ	17 วัน ⁴ /	4.08	Kelly และคณะ (1991)
มิวโคซาต่อหน้าที)	19 วัน ⁴ /	5.55	
	21 วัน ⁴ /	5.00	
อมัยเลส ³ /			
(กรัมของแป้ง	4 สัปดาห์หลังหย่านม	61.00	Shields และคณะ (1980)
ที่ถูกย่อยต่อหน้าที)	6 สัปดาห์หลังหย่านม	192.00	
	8 สัปดาห์หลังหย่านม	571.00	

ตารางที่ 2-5 แสดงปริมาณเอนไซม์ แลคเตส ซูเครส และ อมัยเลส ในช่วงสุกรอายุต่างๆ
(ต่อ)

ค่าการทำงานของ			
ชนิดของเอนไซม์	อายุ	ของเอนไซม์	แหล่ง
(activity of enzyme)			
อัมัยเลส			
(อัมัยเลส ยูนิต)	21 วัน	61,499	Passill'e และคณะ (1989)
มอลเตส			
(ไมโครโมลต่อกรัม	17 วัน ^{1/}	2.11	Kelly และคณะ (1991)
มิวโคซาค่อนาที่)	19 วัน ^{1/}	2.65	
	21 วัน ^{1/}	2.28	

1/ ค่าเฉลี่ยจาก 6 ตำแหน่งตลอดความยาวของไพโลรัส (pylorus)

2/ ค่าเฉลี่ยจาก 5 ตำแหน่งตลอดความยาวของไพโลรัส (pylorus)

3/ กรัม ของแป้งค่อนาที่

4/ หย่านมเมื่ออายุ 14 วัน

ตารางที่ 2-6 แสดงปริมาณเอนไซม์ โปรติเอส คัยโมทริปซิน ทริปซิโนเจน และเปปซิน ในช่วง
สักรอายุต่างๆ

ชนิดเอนไซม์	อายุ	ค่าการทำงาน ของเอนไซม์ (activity of enzyme)	แหล่ง
โปรติเอส			
(มก. ไธโรซีนต่อนาที)	4 สัปดาห์หลังหย่านม	42.0	Shields และคณะ (1980)
	6 สัปดาห์หลังหย่านม	69.0	
	8 สัปดาห์หลังหย่านม	151.0	
	10 สัปดาห์หลังหย่านม	296.0	
คัยโมทริปซิน ^{1/}	แรกเกิด	1.10-3.01	Pond และคณะ (1971)
(ไมโครโมลต่อกรัม	3 วัน	0.38-1.03	
ของตับอ่อน)	23 วัน	1.69-14.91	
คัยโมทริปซิน			
(คัยโมทริปซิโนเจน หน่วย)	21 วัน	2,962	Passill'e และคณะ (1989)
ทริปซิโนเจน ^{2/}	แรกเกิด	0.02-0.17	Pond และคณะ (1971)
(ไมโครโมลต่อกรัม	3 วัน	0.02-0.18	
ของตับอ่อน)	23 วัน	0.10-8.53	
เปปซิน			
(เปปซิน หน่วย)	21 วัน	558,865	Passill'e และคณะ(1989)

^{1/} มิลลิโมลของ เอ็น-อะซีทิล-แอล-ไธโรซีน เอทิล เอสเทอร์ต่อนาที
(millimole of N-acetyl-L-tyrosine ethyl ester/min)

^{2/} มิลลิโมล ของ พี-โทลูอีน ซัลโฟนิล-แอล-อาร์จินีน เมทิล เอสเทอร์ต่อนาที
(millimole of P-toluene sulfonyl-L-arginine methyl ester/min)

ตารางที่ 2-7 แสดงปริมาณเอนไซม์ไลเปสในช่วงสักรอายุต่างๆ

ชนิดเอนไซม์	อายุ	ค่าการทำงาน ของเอนไซม์	
		(activity of enzyme)	
ไลเปส ^{1/}	แรกเกิด	0.23-0.95	Passill'e และคณะ
	3 วัน	0.15-1.35	(1989)
	23 วัน	0.33-3.59	

^{1/} กรัมของน้ำมันข้าวโพดต่อนาที

2.5 ความเป็นกรดและด่างที่เหมาะสม (Optimum pH) ต่อการทำงานของเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร

ในการศึกษาผลของ pH ต่อการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยอาหาร ซึ่งเอนไซม์แต่ละชนิดจะทำหน้าที่แตกต่างกันไป ในระบบทางเดินอาหารส่วนต่างๆ แบ่งได้เป็น

2.5.1 สภาพความเป็นกรดและด่าง (pH) ในกระเพาะอาหาร

ในส่วนกระเพาะอาหารจะมีเอนไซม์ที่ย่อยสลายโปรตีน ได้แก่ เปปซิน ซึ่งทำงานได้ดีในสภาวะที่เหมาะสมที่ pH 2.0 โปรตีนบางชนิด เช่น อัลบูมิน (albumin) ในไข่ จะถูกย่อยสลายได้ง่ายที่ pH ต่ำๆ และถ้า pH สูงขึ้นเป็น 4.0 เอนไซม์เปปซิน จะมีประสิทธิภาพในการย่อยได้ต่ำ และถ้า pH ไม่ถึง 2.0 การย่อยสลายโปรตีนก็จะถูกจำกัดลง (Kidder and Manners, 1978)

Kvasnitski (1951 อ้างถึงใน Kidder และ Manners, 1978) ได้รายงานไว้ว่า เอนไซม์โปรติโอไลติก (proteolytic) จะไม่ทำงานในส่วนกระเพาะของลูกสุกรอายุต่ำกว่า 3 สัปดาห์ เนื่องจากขาดกรดที่จะไปสร้างเอนไซม์

จากผลการทดลองของ Cranwell และคณะ (1968) ได้ชี้ให้เห็นว่าในลูกสุกรเลี้ยงรวมจะมี pH ในกระเพาะสูงประมาณ 3.5-6.0

2.5.2 สภาพความเป็นกรดและด่าง (pH) ในลำไส้

pH ระบบทางเดินอาหารของลำไส้เล็ก จะมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่หลั่งจากตับอ่อน และจากผนังลำไส้เล็กเข้าสู่ลูเมน ดังแสดงในตารางที่ 2-8

ตารางที่ 2-8 แสดง pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ในลำไส้เล็ก

ชนิดเอนไซม์	pH ที่เหมาะสม	ซับสเตรท
trypsin	8.2-9.2	haemoglobin
	7.3-8.6	gelatin
	7.8-8.8	casein
chymotrypsin	7.0-9.0	protein
	7.8	synthetic substrates
chymotrypsin	7.0-9.0	casein
carboxypeptidase A	7.0-8.0	hippuryl-L-phenylalanine
carboxypeptidase B	7.9-8.0	hippuryl-L-arginine
α -amylase	6.9	starch
lipase	7.6-8.2	olive oil
maltase	6.5-7.5	maltose
lactase	6.0	lactose
dipeptidase	7.4-7.9	dipeptides
trehalase	6.0	trehalose

ที่มา : Kidder และ Manners (1978)

จากตารางที่ 2-8 ได้แสดงให้เห็นว่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ที่หลังจากคัปอ่อน และหลังจากเย็บผนังลำไส้เล็ก พบว่าเอนไซม์ โปรติเอส จะมี pH ที่เหมาะสมในการทำงานช่วง 7.0-9.2 เอนไซม์ที่ย่อยคาร์โบไฮเดรตจะทำงานได้ดีในช่วง pH 6.0-7.5 และ pH ที่เหมาะสมของเอนไซม์ ไลเปส ขึ้นอยู่กับการเกิดกรดไขมันอิสระ (Kidder and Manners, 1978) โดยเอนไซม์จะทำงานได้ดีในระดับ pH 7.6-8.2

2.6 เอนไซม์หลายชนิด (multienzyme) ที่สังเคราะห์จากจุลินทรีย์

เอนไซม์สังเคราะห์ที่ใช้ในอาหารสัตว์ ส่วนใหญ่เป็นเอนไซม์ที่สังเคราะห์จากจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่ใช้สังเคราะห์เอนไซม์มีหลายชนิด อาทิ แบคทีเรีย ยีสต์ และเชื้อรา อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ที่ใช้สังเคราะห์เอนไซม์ประกอบด้วยแหล่งคาร์บอน แหล่งไนโตรเจน แร่ธาตุ และน้ำ และสภาพการณ์ที่ถูกควบคุมให้เหมาะสมสำหรับการหมัก ทั้งในด้านการควบคุมทางเคมีและทางกายภาพ ซึ่งต้องระมัดระวังเกี่ยวกับ pH ให้เหมาะสมในการผลิตเอนไซม์ เอนไซม์ที่ได้จากขบวนการหมักนั้นจำเป็นต้องทำให้บริสุทธิ์โดยขบวนการที่แตกต่างกันไปตามแหล่งผลิต เช่น อาจใช้วิธีการกรอง (sophisticated ultra-filtration process) และทำให้มีเสถียรภาพโดยวิธีดูดซับในสื่อพิเศษ เช่น ในผลิตภัณฑ์จากข้าวสาลี (wheat carrier) เป็นต้น (Inbarr, 1990)

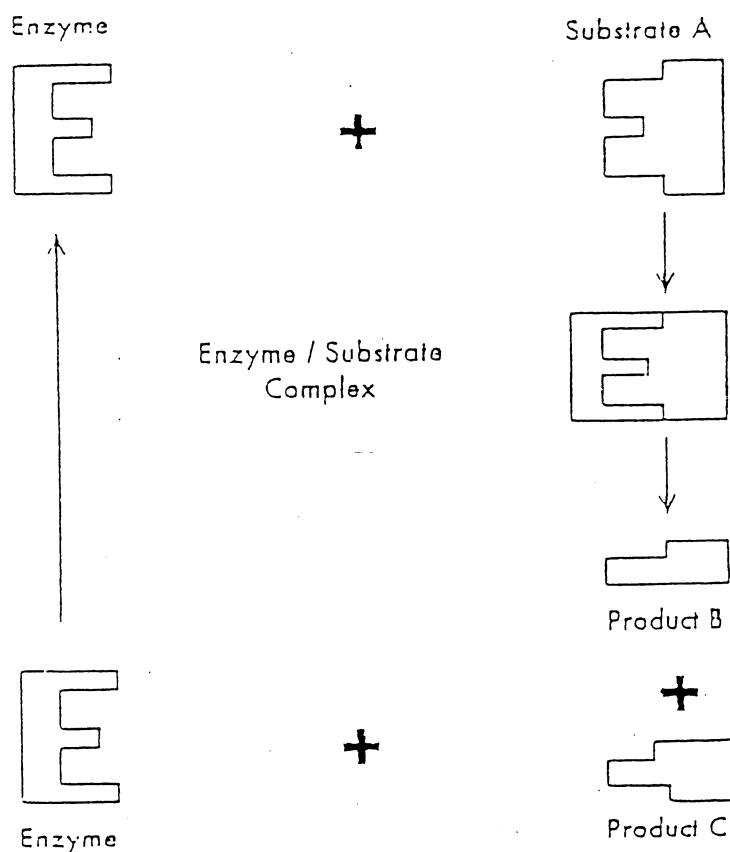
เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตเอนไซม์มีหลายชนิด อาทิ *Trichoderma longibrochiatum*, *Aspergillus niger* และ *Bacillus subtilis* ซึ่งใช้ผลิตเอนไซม์ที่มีจำหน่ายเพื่อการเสริมในอาหารสัตว์โดยทั่วไป ได้แก่ แอลฟา-อัมัยเลส (10,000 ยูนิต/กก.) เพคติเนส (25,000 ยูนิต/กก.) เบต้า-กลูคาเนส (150,000 ยูนิต/กก.) และไซลาเนส (800,000 ยูนิต/กก.) (Inbarr, 1990)

ส่วนเอนไซม์กลุ่มเอมิเซลลูเลส (15,000,000 ยูนิต/กก.) แอลฟา-อัมัยเลส (2,000,000 ยูนิต/กก.) โปรติเอส (1,500,000 ยูนิต/กก.) เพคติเนส (1,000,000 ยูนิต/กก.) เอนโคกลูคาเนส (40,000 ยูนิต/กก.) เบต้า-กลูคาเนส (14,000 ยูนิต/กก.) ซึ่งได้จากการผลิตจากเชื้อจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis*, *Bacillus licheniformis* และ *Aspergillus niger* (Lohmann-Lte, 1992)

โปรตีนเอส เบต้า-กลูคาเนส และแอลฟา-อไมเลส ซึ่งได้จากการหมักเชื้อจุลินทรีย์ *B. subtilis* (Buraczewska, 1988) เป็นต้น

2.7 การทำงานของเอนไซม์หลายชนิด (multienzyme) ที่สังเคราะห์จากเชื้อจุลินทรีย์

Fischer (1894 อ้างถึงใน Delvin, 1992) ได้ตั้งสมมุติฐานการทำงานของเอนไซม์ว่า เอนไซม์จะจับกับซับสเตรตเอ ได้เป็น เอนไซม์ ซับสเตรต คอมเพล็กซ์ (enzyme-substrate complex) จากนั้นเกิดการแยกออกเป็นผลผลิต บี และ ซี เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุดเอนไซม์ก็สามารถกลับไปทำปฏิกิริยาใหม่ได้อีก ดังภาพที่ 2-20



ภาพที่ 2-20 แสดงการทำงานของเอนไซม์

ที่มา : Fischer (1894 อ้างถึงใน Devlin, 1992)

เอ็นไซม์จะมีช่วงการทำงาน (half life) ที่กำหนด เมื่อเสื่อมสภาพก็จะถูกสลายเป็นกรดอะมิโนในระหว่างการย่อยโปรตีน ดังนั้นเอ็นไซม์จะไม่ตกค้างในร่างกายสัตว์ ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีช่วงหยุดใช้ (Inberr, 1990)

2.7.1 เอ็นไซม์เอมิเซลล์เลส

เอ็นไซม์เอมิเซลล์เลสทำหน้าที่ย่อยเอมิเซลล์เลสได้อนุพันธ์ต่างๆของคาร์โบไฮเดรต โดยเอ็นไซม์ทำหน้าที่ตัดพันธะในส่วนเบต้า-1,4 ลิงค์ ไชโลส โดยมีส่วนประกอบด้านข้างเป็นอะราบินอส ดี-กลูคิวโรนิก แอซิด และ แอลฟา-โอเมทิล-ดี-กลูคิวโรนิก แอซิด เอ็นไซม์เอมิเซลล์เลสแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ

ชนิดตัดพันธะภายนอก (exo-type) ตัดโพลีแซ็กคาไรด์ในส่วนปลายของพันธะ ไชโลสที่เป็น นอน-รีดิวซิง (non-reducing) ของพันธะทั้งสายเดี่ยวและหลายสาย

ชนิดตัดพันธะภายใน (endo-type) ซึ่งจะมีมาก โดยเอ็นไซม์ชนิดนี้จะตัดด้านในของโพลีแซ็กคาไรด์อย่างอิสระ เอ็นไซม์ชนิดตัดพันธะภายในของสายโพลีแซ็กคาไรด์ ต้องใช้เอ็นไซม์มากกว่า 1 โมเลกุลสำหรับการตัดพันธะของซัปสเตรทได้ 1 โมเลกุล (Greenwood and Milne, 1968 อ้างถึงใน Blanshard and Mitchell, 1978) ซึ่งผลของการทำงานของเอ็นไซม์จะได้ไชโลส อะราบินอส ดี-กลูคิวโรนิก แอซิด และ 4-โอ-เมทิล-ดี-กลูคิวโรนิก แอซิด เป็นผลผลิตซึ่งจะถูกดูดซึมในร่างกายต่อไป

2.7.2 เอ็นไซม์แอลฟา-อัมยเลส

แป้งที่พบในส่วนของเมล็ดธัญพืชที่ใช้เป็นอาหารสัตว์จะประกอบด้วยกลูโคส ต่อด้วยพันธะ แอลฟา-1,4 กลูโคซิดิก (อัมยเลส) และ แอลฟา-1,6 กลูโคซิดิก โดยเอ็นไซม์แอลฟา-อัมยเลส จะทำหน้าที่ย่อยพันธะ แอลฟา-1,4 กลูโคซิดิก ทำให้ได้กลูโคส (Hopfer, 1988 อ้างถึงใน Delvin, 1992)

2.7.3 เอ็นไซม์โปรติเอส

เอ็นไซม์ โปรติเอส ทำหน้าที่ตัดพันธะเปปไทด์ของโปรตีนซึ่งพบในเมล็ดถั่วพืช ปลาบ่น เป็นต้น ซึ่งผลของการย่อยโปรตีนจะทำให้ได้ ไคเปปไทด์ โพลีเปปไทด์ และ กรดอะมิโน (Delvin, 1992)

2.7.4 เอ็นไซม์เพคตินเอส

เอ็นไซม์เพคตินเอสเป็นเอ็นไซม์ที่ทำหน้าที่ในการย่อยเพคติน ซึ่งมีโครงสร้างแอลฟา-1,4 ลิงค์-ดี-กาแลคทูโรนิก แอซิด เชื่อมด้วย แอล-แรมโนส และมีส่วนประกอบด้านข้างที่ ประกอบด้วย อะราบิโนส, กาแลคโตส และไซโลส (Kulp, 1973, อ้างถึงใน Reed, 1975)

2.7.5 เอ็นไซม์ไลเปส

เอ็นไซม์ไลเปสที่ผลิตจากจุลินทรีย์ จะทำหน้าที่ตัดพันธะคาร์บอกซิลิก แอซิด เอสเทอร์ของไขมัน จะทำให้ได้กลีเซอรอล ไดกลีเซอไรด์ โมโนกลีเซอไรด์ และกรด ไขมันอิสระ ซึ่งจะถูกดูดซึมในระบบลำไส้ต่อไป (Kidder and Manners, 1978)

2.7.6 เอ็นไซม์เบต้า-กลูคาเนส

เอ็นไซม์ เบต้า-กลูคาเนส ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ จะทำหน้าที่ตัดพันธะ เบต้า-1,3 และเบต้า-1,4 ลิงค์ กลูแคน ซึ่งจะได้อนุพันธ์ของกลูแคน (Sevendran and O'Neil, 1987)

2.8 สภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์หลายชนิด (multienzyme) ที่สังเคราะห์จากเชื้อจุลินทรีย์

2.8.1 แอลฟา-อัมัยเลส

จากการศึกษาสภาพความเหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อัมัยเลสโดย Menzi และคณะ (1957 อ้างถึงใน Kulp, 1975) พบว่า เอนไซม์แอลฟา-อัมัยเลสที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus subtilis* จะทำงานได้เหมาะสมที่ pH 5.0-7.0 และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ 55-70°C (Manning and Campbell, 1961 อ้างถึงใน Kulp, 1975) และขณะเดียวกัน Kulp (1975 อ้างถึงรายงานของ Manning และ Campbell, 1961) ที่พบว่า เอนไซม์ แอลฟา-อัมัยเลส ที่ผลิตจาก *Bacillus stearothermophilus* มี pH ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานที่ 3.0

2.8.2 โปรติเอส

ผลการศึกษาของ Saletan (1968 อ้างถึงใน Bass และ Cayle, 1975) พบว่า เอนไซม์ที่ผลิตจากแบคทีเรียมี pH เหมาะสมที่ 7.0 อุณหภูมิ 75°C ส่วนเอนไซม์ที่ผลิตจากเชื้อรา *Aspergillus oryzae* มี pH ที่เหมาะสมที่ 5.1 อุณหภูมิ 49-54 °C

Bergkvist (1963 อ้างถึงใน Yamamoto, 1975) พบว่า เอนไซม์โปรติเอสผลิตจากเชื้อ *Aspergillus oryzae* 3 ชนิด มี pH และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำงานแตกต่างกัน คือ

โปรติเอส 1 มีลักษณะเป็นเบส (alkaline) มี pH ที่เหมาะสมที่ 8.2

โปรติเอส 2 มีลักษณะเป็นกลาง มี pH ที่เหมาะสมที่ 6.8

โปรติเอส 3 มีลักษณะเป็นกรด (acid) มี pH ที่เหมาะสมที่ 4.3

หากพิจารณาอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ในการย่อยเคซีน (casein) ที่ pH 6.0 พบว่าโปรติเอส 1 มีอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ 50°C โปรติเอส 2 อยู่ในระดับ 50°C และ โปรติเอส 3 อยู่ในระดับ 45°C

ผลการศึกษาของ Ichishima (1970 อ้างถึงใน Yamamoto, 1975) พบว่า เอ็นไซม์โปรติเอสที่ผลิตจากเชื้อ *Aspergillus* spp, *Pennicillium* spp. จะทำการย่อยเคซีนได้ดีที่ pH 2.5 และ 3.0

ผลการศึกษาของ Guntellelberg และ Ottesen (1952 อ้างถึงใน Yamamoto, 1975) พบว่าเอ็นไซม์โปรติเอส ที่ผลิตจากเชื้อ *Bacillus subtilis* ทำงานได้ดีที่ pH เป็นเบสเล็กน้อย

2.8.3 เอ็นไซม์เพคตินเนส

Phaff (1966 อ้างถึงใน Kulp, 1975) พบว่า เอ็นไซม์ เพคตินเนส ที่ผลิตจากเชื้อยีสต์ *Kluyveromyces fragilis* จะทำงานได้ดีที่ pH 4.4 Mill และ Tuttobello (1961 อ้างถึงใน Kulp, 1975) พบว่า เอ็นไซม์ที่ผลิตจากเชื้อรา *Aspergillus niger* ทำงานได้ดีที่ pH 4.0-4.2

Millar (1965); Papavizas และ Ayers (1966 อ้างถึงใน Kulp, 1975) พบว่า เอ็นไซม์ เพคตินเนส ที่ผลิตจากเชื้อ *Fusarium oxysporum* และ *Fusarium salani* (Hancock, 1968 อ้างถึงใน Reed, 1975) มี pH ที่เหมาะสมที่ 9.0-9.3

Kulp (1975) พบว่า เอ็นไซม์ เพคตินเนสที่ผลิตจากเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus polymyxa* ทำงานได้ดีที่ pH 8.9-9.4 และคงทน pH ที่เป็นกรดได้ถึงช่วง 5.0-8.0 อุณหภูมิเหมาะสมที่ 45°C เอ็นไซม์เพคตินเนสที่ผลิตจาก *Clostridium multifementane* ทำงานได้ดีที่ pH เหมาะสม 8.5 และที่ผลิตจาก *Erwinia aroideae* ทำงานได้ดีที่ pH 8.9-9.4 อุณหภูมิ 35°C

2.8.4 เบต้า-กลูคาเนส

จากการศึกษาสภาพความเหมาะสมต่อการทำงานของเอ็นไซม์เบต้า-กลูคาเนส Ducrou และ Delecourt (1971 อ้างโดย Bass และ Cayle, 1975) พบว่า

เอ็นไซม์ที่ผลิตจาก *B. subtilis* ทำงานได้ดีที่ pH 4.0-5.5 อุณหภูมิที่เหมาะสม 58-60°C และจะไม่ทำงานที่อุณหภูมิเกิน 70°C

2.8.5 ไลเปส

เอ็นไซม์ ไลเปส ที่ผลิตจาก *Aspergillus niger* จะทำงานได้ดีที่ pH ต่ำที่สุด ในขณะที่เอ็นไซม์ไลเปสที่ผลิตจาก *Staphylococcus aureus* ทำงานได้ดีที่ pH สูงสุด ซึ่งเอ็นไซม์ที่ผลิตจากเชื้อจุลินทรีย์แต่ละตัวจะทำงานได้ดีที่ pH และอุณหภูมิแตกต่างกัน (Alford and Pierce, 1961 อ้างโดย Shahani, 1975) โดยปกติแล้ว เอ็นไซม์ไลเปสที่ผลิตจากเชื้อจุลินทรีย์จะมีความคงทนกว่าเอ็นไซม์ที่ผลิตในร่างกายสัตว์ เช่น เอ็นไซม์ไลเปสที่ผลิตจากเชื้อ *Achromobacter lipolyticum* จะไม่ทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 90°C ใน 40 นาที ซึ่งระดับ pH อุณหภูมิที่เหมาะสม และอุณหภูมิที่ทำให้เอ็นไซม์ไม่ทำงาน ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 แสดงระดับอุณหภูมิและ pH ที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของเอ็นไซม์ไลเปส ที่ผลิตจากเชื้อจุลินทรีย์

แหล่งของเอ็นไซม์ไลเปส	pH ที่เหมาะสม	อุณหภูมิ ที่เหมาะสม (°C)	สภาพที่เอ็นไซม์ไม่ ทำงาน เวลา : อุณหภูมิ (นาที) (°C)
<i>Penicillium chrysogenum</i>	6.2-6.8	37	-
<i>Pseudomonas fragi</i>	7.0-7.2	32	15:72
<i>Rhizopus delemar</i>	5.6	35	15:50
<i>Aspergillus niger</i>	5.6	25	15:45
<i>Penicillium roqueforti</i>	8.0	37	10:50
<i>Staphylococcus aureus</i>	8.5	45	30:70
<i>Achromobacter lipolyticum</i>	7.0	37	40:99

ที่มา : Alford และ Pierce (1961 อ้างถึงใน Shahani, 1975)

2.8.6 เอมีเซลลูเลส

จากการศึกษาสภาพความเหมาะสมต่อการทำงานของเอ็นไซม์ เอมีเซลลูเลส โดย Dekker และ Richards (1976 อ้างถึงใน Blanshard และ Mitchell, 1978) พบว่า เอ็นไซม์ เอมีเซลลูเลสที่ผลิตจากเชื้อ *Aspergillus niger* จะทำงานได้ดีที่ pH เหมาะสม 4.5-5.0

2.9 ผลการศึกษาการใช้เอ็นไซม์หลายชนิด (multienzyme) เสริมอาหารลูกสุกร

2.9.1 การเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร

จากผลการทดลองเอ็นไซม์หลายชนิดที่ประกอบด้วย แอลฟา-อัมัยเลส เบต้า-กลูคาเนส เพคติเนส และไซลาเนส เยาวมาลย์ และ สำโรช (2536) เสริมเอ็นไซม์ กลุ่มดังกล่าวที่ระดับ 0.1% ในสูตรอาหารลูกสุกรน้ำหนัก 10-20 กก. ที่มีรำละเอียด และกากถั่วเหลือง พบว่า อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 4.88% และประสิทธิภาพการใช้ อาหารดีขึ้น 9.49% Inbarr (1989 อ้างถึงใน Rotter, 1990) พบว่า ในสูตร อาหารลูกสุกรหย่านมระยะแรกถึง 3 สัปดาห์ ที่มีข้าวโพด และข้าวสาลี เป็นหลัก อัตรา การเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 24.6% ปริมาณการกินได้ไม่แตกต่าง และประสิทธิภาพการใช้ อาหารดีขึ้น 15.5% Bohme (1990) พบว่า ในสูตรอาหารลูกสุกรน้ำหนัก 10-25 กก. ที่ มีข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์เป็นหลัก อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 9.7% และ 15% ปริมาณการกินได้ไม่แตกต่าง และประสิทธิภาพการใช้อาหารเพิ่มขึ้น 16% และ 10.5% ตามลำดับ Inbarr และคณะ (1991) พบว่า ในสูตรอาหารลูกสุกรในช่วง 0-21 วัน และ 21-42 วัน ที่มีข้าวบาร์เลย์และข้าวสาลีเป็นหลัก อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นของ ลูกสุกรเป็น 9.3% และ 3.8% ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างกัน

จากการทดลองเสริมเอ็นไซม์หลายชนิดที่ประกอบด้วย โปรติเนส แอลฟา-อัมัยเลส และเบต้า-กลูคาเนส ในสูตรอาหารที่มีข้าวบาร์เลย์ และข้าวสาลี เป็นหลักที่ระดับ 0.1% โดย Collier และ Hardy (1986 อ้างถึงใน Rotter, 1990) พบว่า อัตราการ

เจริญเติบโตของลูกสุกรหย่านมในระยะแรกถึง 3 สัปดาห์ เพิ่มขึ้น 17.5% และ ประสิทธิภาพการใช้อาหารดีขึ้น 18.38% แต่ปริมาณการกินอาหารไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ไม่ได้เสริม

2.9.2 การย่อยได้ของโภชนา

จากการศึกษาผลของเอ็นไซม์หลายชนิดที่ประกอบด้วย แอลฟา-อัมัยเลส เบต้า-กลูคาเนส เพคตินเนส และไซลาเนส ต่อการย่อยได้ Inbarr และ Graham (1990) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์หลายชนิดระดับ 0.1% ในสูตรอาหารที่มีข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ เป็นหลัก จะช่วยทำให้การย่อยได้ของสิ่งแห้งเพิ่มขึ้น 3.5% ในช่วงลูกสุกรน้ำหนัก 7-9 กก. เพิ่มขึ้น 1.12% ในช่วงน้ำหนัก 23-30 กก. ($P < 0.05$) Inbarr และคณะ (1991) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์หลายชนิดระดับ 0.1% ในสูตรอาหารสุกรหย่านมที่มี ข้าวบาร์เลย์ และข้าวสาลี เป็นหลัก การย่อยได้ของสิ่งแห้งเพิ่มขึ้น 5% การย่อยได้ในไตรเจนฟรีแอกแทรกซ์เพิ่มขึ้น 2.9% ($P < 0.05$) ส่วนการย่อยได้ของโปรตีนไม่แตกต่างกันกับกลุ่มไม่เสริมเอ็นไซม์หลายชนิด แต่จากรายงานของ Graham และคณะ (1988) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์หลายชนิดระดับ 0.1% ในสูตรอาหารที่มีข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ เป็นหลัก ไม่มีผลต่อการย่อยสลายได้ของสิ่งแห้ง แป้ง โปรตีน และเยื่อใย ในลูกสุกรหลังหย่านมสัปดาห์ที่ 6

ผลการทดลองของเอ็นไซม์หลายชนิด เบต้า-กลูคาเนส เซลลูเลส ไซลาเนส และ แอลฟา-อัมัยเลส โดย Inbarr และ Graham (1991) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์หลายชนิดระดับ 0.1% ในสูตรอาหารที่มีข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และกากถั่วเหลือง เป็นหลัก การย่อยสลายได้ของสิ่งแห้ง ไนโตรเจนฟรีแอกแทรกซ์ และโปรตีน เพิ่มขึ้นเป็น 4.54%, 2.10%, 4.65% และ 18.18 % ($P < 0.05$) ตามลำดับ ในลูกสุกรอายุ 2 สัปดาห์หลังหย่านม ส่วนสัปดาห์ที่ 6 หลังหย่านม พบว่า การย่อยสลายได้ของสิ่งแห้งเพียงอย่างเดียวเพิ่มขึ้น 1.12%

Buraczewska (1988) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์หลายชนิด แอลฟา-อัมัยเลส โปรติเนส และเบต้า-กลูคาเนส ระดับ 0.1% ในสูตรอาหารลูกสุกรหลังหย่านมที่มีข้าวไรย์

เป็นหลัก ทำให้การย่อยได้ของสิ่งแห้ง ในโตรเจนฟรีแอกแทรกซ์ และโปรตีนเพิ่มขึ้นเป็น 3.1%, 7.2% และ 4.2% ตามลำดับ

ผลการทดลองของ Inbarr และ Ogle (1988) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์หลายชนิดที่ประกอบด้วย แอลฟา-อัมัยเลส เบต้า-กลูคาเนส เพคตินเนส และไซลาเนส ในระดับ 0.1% จะช่วยลดอาการท้องเสียในลูกสุกรจาก 4.8% เป็น 1.7%

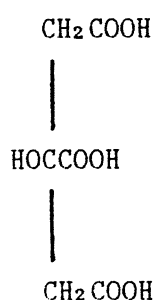
2.10 การเสริมกรดในอาหารสัตว์

กรดที่ใช้เสริมในอาหารสัตว์ เพื่อเพิ่มสมรรถนะการผลิตและการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะของลูกสุกร พบว่า มีอยู่หลายชนิด อาทิ กรดฟูมาริก (fumaric acid) กรดฟอร์มิก (formic acid) กรดโปรปิออนิก (propionic acid) กรดแลคติก (lactic acid) กรดมาลิก (malic acid) และกรดซิตริก (citric acid) เป็นต้น Kirchessner และ Roth (1982 อ้างถึงใน Ravindran และ Kornegay, 1993) ได้กล่าวว่า การเสริมกรดฟูมาริก 20 กรัมต่อ กก.อาหาร ช่วยปรับปรุงสมรรถนะการผลิตลูกสุกรหลังหย่านม ส่วน Eckel และคณะ (1992) พบว่า การเสริมกรดฟอร์มิกในระดับ 6, 12 และ 18 กรัมต่อ กก.อาหารสุกรหลังหย่านมที่มีข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต เป็นหลัก มีผลช่วยปรับปรุงอัตราการเพิ่มน้ำหนักตัวเป็น 23%, 31% และ 29% ตามลำดับ แต่พบว่า การเสริมมากกว่า 18 กรัมต่อ กก.อาหาร จะทำให้อัตราการเพิ่มน้ำหนักลดลงซึ่งเนื่องมาจากลดการกินได้ลง Bolduan และคณะ (1988b) รายงานว่า การเสริมกรดโปรปิออนิกในระดับ 10 กรัมต่อ กก.อาหาร ช่วยปรับปรุงอัตราการเพิ่มน้ำหนักของลูกสุกร จากการทดลองของ Sweet และคณะ (1990 อ้างถึงใน Ravindran และ Kornegay, 1993) พบว่า การเสริมกรดโปรปิออนิกในระดับ 1.5 กรัมต่อ กก.อาหาร ช่วยเพิ่มอัตราการเพิ่มน้ำหนัก และปริมาณการกินได้ในลูกสุกร แต่จากรายงานของ Giesting และ Easter (1985) รายงานว่า การเสริมกรดโปรปิออนิกในระดับ 20 กรัมต่อ กก.อาหารสุกรหลังหย่านม จะไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตหรือประสิทธิภาพการใช้อาหาร ทั้งนี้เพราะลูกสุกรลดปริมาณการกินได้ลง นอกจากนั้นยังมีการใช้กรดมาลิก (malic acid) และกรดแลคติก (lactic acid) เสริมอาหาร

ลูกสุกรเพื่อวัตถุประสงค์ ดังกล่าวด้วย ในระยะหลังได้มีการเลือกใช้กรดซิตริก (citric acid) เสริมอาหารสุกรมากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากนอกจากจะช่วยเพิ่มสมรรถนะการผลิต เหมือนกับกรดอื่นแล้ว กรดซิตริกยังเป็นส่วนประกอบสำคัญที่มีบทบาทอย่างมากในขบวนการเมตาโบลิซึมของคาร์โบไฮเดรต

2.11 คุณสมบัติของกรดซิตริก

กรดซิตริกมีชื่อทางเคมีว่า 2-ไฮดรอกซี-1,2,3-โพรเพนไตรคาร์บอกซิลิก แอซิด (2-Hydroxy-1,2,3-propanetricarboxylic acid) หรือ เบต้า-ไฮดรอกซีไตรคาร์บอกซิลิก แอซิด (β -hydroxytricarballic acid) และมีสูตรทางเคมีเป็น $C_6H_8O_7$ ดังภาพที่ 2-21



ภาพที่ 2-21 แสดงโครงสร้างของกรดซิตริก

ที่มา : Windholz และคณะ (1976)

กรดซิตริกมีน้ำหนักโมเลกุล 192.12 และประกอบด้วยคาร์บอน 37.51% ไฮโดรเจน 4.20% และออกซิเจน 58.29% (Windholz *et al.*, 1976)

กรดซิตริกพบกระจายอยู่ในแหล่งอาหารสัตว์หลายชนิด เช่น ในพืช ในเนื้อเยื่อและของเหลวของสัตว์ การสังเคราะห์กรดซิตริกได้จากการหมักของเชื้อรา ในกากน้ำตาลหรือคาร์โบไฮเดรตอื่น เช่น Loesecke (1952 อ้างถึงใน Windholz และคณะ, 1976) สังเคราะห์โดยใช้ *A. niger* หมักกากน้ำตาล นอกจากนี้กรดซิตริกยังหาได้จาก

การสกัดจากผลไม้ เช่น มะนาว ในมะนาวจะพบกรดประมาณ 5-8% (Wilson, 1923 อ้างถึงใน Windholz *et al.*, 1976)

กรดซิตริกที่อยู่ในรูป แอนไฮเดรท (anhydrate) จะมีจุดเดือดที่ 153°C ในรูปผลึกที่เป็น โมโนคลินิก โฮโลฮีดรา (monoclinic holohedra) จะมีค่าความหนาแน่น (d) 1.665 ที่อุณหภูมิ 25°C ค่า pK_1 เท่ากับ 3.128 ค่า pK_2 เท่ากับ 4.767 และ pK_3 เท่ากับ 6.396

กรดซิตริกจะละลายในน้ำได้ดีขึ้นหากอุณหภูมิของน้ำสูงขึ้น Bates และ Pinching (1941 อ้างถึงใน Windholz และคณะ, 1976) รายงานว่า ค่าการละลายในน้ำของกรดซิตริกที่อุณหภูมิ 10°C จะมีค่า 54.0% w/w ที่ 20°C มีค่า 59.2% w/w ที่ 30°C มีค่า 64.3% w/w ที่ 40°C มีค่า 68.6% w/w ที่ 50°C มีค่า 70.9% w/w ที่ 60°C มีค่า 73.5% w/w ที่ 70°C มีค่า 76.2% w/w ที่ 80°C มีค่า 78.8% w/w ที่ 90°C มีค่า 81.4% w/w ที่ 100°C มีค่าเป็น 84.0% w/w กรดซิตริกละลายอยู่ในรูปโมโนไฮเดรท (monohydrate) หรือออโธโรรมบิก คริสตัล (orthorhombic crystal) เมื่ออยู่ในอุณหภูมิปกติสารละลายกรดซิตริกมีความหนาแน่น 1.542 และสูญเสียในสภาวะอากาศแห้ง หรือมีอุณหภูมิที่ $40-50^{\circ}\text{C}$ แต่หากอยู่ในสภาวะอากาศชื้นจะละลายที่อุณหภูมิ 75°C จุดเดือดที่ 100°C pH 2.2 สารละลายกรดซิตริก 10% จะมีความหนาแน่น (d) 1.0392 ที่ 30% จะมีความหนาแน่น (d) 1.2244 ที่ 40% จะมีความหนาแน่น (d) 1.1709 ที่ 50% จะมีความหนาแน่น (d) 1.2204 ที่ 60% จะมีความหนาแน่น (d) 1.2738 (Halbeisen, 1948 อ้างถึงใน Windholz *et al.*, 1976)

2.12 บทบาทของกรดซิตริกในอาหารต่อสุกร

2.12.1 ช่วยลดจุลินทรีย์ที่เป็นโทษ

จากรายงานของ Ravindran และ Kornegay (1993) กล่าวว่า ความเครียดที่เกิดขึ้นในสุกรหลังหย่านมใหม่ จะมีผลต่อความสมดุลของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร หลังจากสุกรหย่านมในวันที่สอง จะพบว่าจำนวนของจุลินทรีย์ที่เป็นโทษจะเพิ่ม

จำนวนมากขึ้น และจุลินทรีย์พวก แลคโตบาซิลัส (*Lactobacillus*) จะลดลง จากการ ศึกษาของ Mathew และคณะ (1991 อ้างโดย Ravindran และ Kornegay, 1993) พบว่า แลคโตบาซิลัส ที่อยู่ในลำไส้ส่วนไอลีียมจะลดลงเกือบศูนย์ภายใน 2 วันหลังหย่านม ในทางตรงข้าม ประชากรของจุลินทรีย์ที่เป็นโทษพวก โคลิฟอร์ม (coliform) จะเพิ่ม มากขึ้น เนื่องจากผลจากการเพิ่ม pH ในไอลีียม

Fuller (1977) พบว่า การเสริมกรดจะมีผลต่อการลดจำนวนแบคทีเรียที่เป็น โทษ และเพิ่มจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์คือ แลคโตบาซิลัส ซึ่งจุลินทรีย์นี้จะมีผลยับยั้งการ แบ่งตัวของอีโคไล โดยจะกัน (block) ตัวรับ (receptor) ของอีโคไล และจะ หลังสารพิษในเมตาบอลิซึมของอีโคไล (Danieson *et al.*, 1989)

นอกจากนั้น แลคโตบาซิลัส จะผลิต ไฮโดรเจน เพอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) ซึ่งจะทำลายพวกแบคทีเรียที่เป็นโทษ (Reiter *et al.*, 1980 อ้างโดย Ravindran และ Kornegay, 1993)

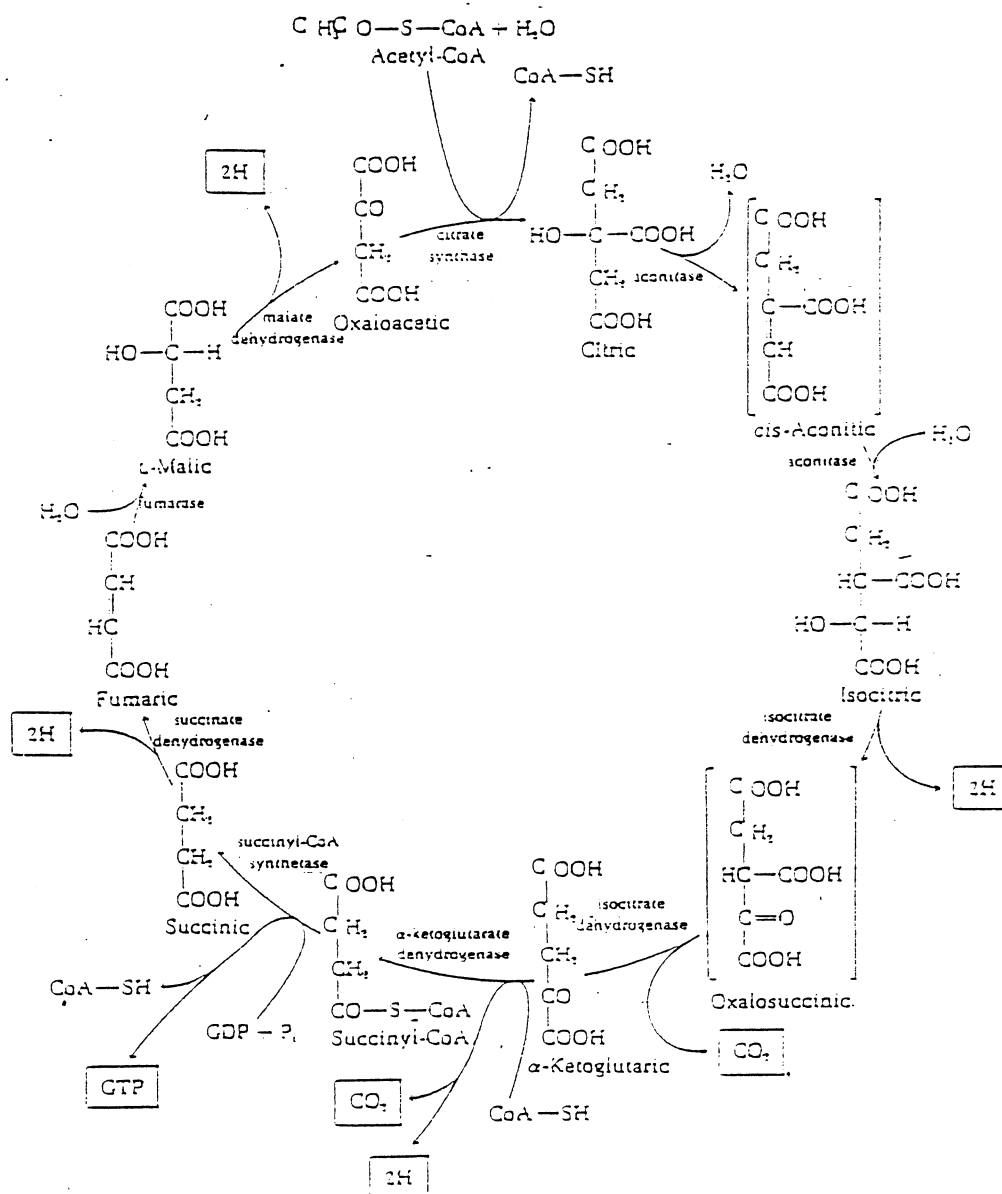
2.12.2 ผลต่อการเกิดกรดในกระเพาะอาหาร

Sciopioni และคณะ (1978) ได้กล่าวว่า การเสริมกรดชนิดรีก 1.0% จะ ช่วยลด pH ในกระเพาะอาหารและเจนนุ่มของลูกสุกรหย่านมจาก 4.55 และ 6.57 เป็น 3.5 และ 6.43 ตามลำดับ

2.12.3 ผลต่อแหล่งพลังงาน

ในช่วงลูกสุกรหย่านมจะมีไขมันที่เก็บสะสมเพื่อเป็นแหล่งพลังงานอยู่น้อย มีผลทำให้ การเจริญเติบโตได้ช้า และเกิดความเครียด (Fenten *et al.*, 1985) ดังนั้นการเสริม กรดชนิดรีกซึ่งเป็นตัวกลาง (intermediate) ในวัฏจักรไตรคาร์บอกซิลิกดังภาพที่ 2-22 จะมีผลช่วยเป็นแหล่งพลังงานของลูกสุกรเพิ่มเติม และช่วยลดการถูกทำลายของเนื้อเยื่อ ซึ่งเป็นผลจากอัตรา กลูโคเนโอจีนีซิส (gluconeogenesis) และไลโปไลซิส (lipolysis) สูง

นอกจากนี้ Kirchgessner และ Roth (1981 อ้างถึงใน Ravindran และ Kornegay, 1993) ได้กล่าวว่า การเสริมกรดลงในอาหารจะมีผลต่อเมตาบอลิซึม ช่วยให้การใช้ประโยชน์ของพลังงานและการดอมีโนในสักรมีประสิทธิภาพดีขึ้น



ภาพที่ 2-22 แสดงวัฏจักรไตรคาร์บอกซิลิก

ที่มา : Krebs (1937 อ้างถึงใน Lehninger, 1975)

2.12.4 ผลต่อคีเลชั่น (chelation) ของแร่ธาตุ

Gorner (1972 อ้างถึงใน Ravindran และ Kornegay, 1993) ได้กล่าวว่า กรดซิตริกจะเป็น คีเลตติ้ง เอเจนต์ ช่วยเพิ่มการดูดซึมแร่ธาตุในระบบลำไส้ แต่จากการทดลองของ Radecki และคณะ (1981) พบว่า การเสริมกรดในอาหารไม่มีผลต่อความสมดุลของแร่ธาตุในลูกสุกรที่หย่านมแล้ว

2.13 ปัจจัยที่มีผลต่อการตอบสนองของลูกสุกรที่ได้รับกรดซิตริก

2.13.1 ชนิดของอาหาร

ระดับบัฟเฟอร์ (buffer) ของอาหารที่เกิดจากการแตกตัวของไอออน จะเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้ pH ในกระเพาะอาหารลูกสุกรผันแปรไป (Bolduan et al., 1988a)

Manners (1970) รายงานว่า บัฟเฟอร์ของอาหารแตกต่างกันไปกับชนิดอาหารที่เสริมกรดในลูกสุกรหลังหย่านม และจะขึ้นอยู่กับระดับของวัตถุดิบที่เป็นส่วนประกอบของอาหารด้วย โดยทั่วไป pH ของอาหารที่เป็นธัญพืชและกากเมล็ดน้ำมัน (oil seed meal) จะตอบสนองต่อกรดมากกว่าอาหารที่มีนมเป็นส่วนประกอบ

Burnell และคณะ (1988) พบว่า การเสริมกรดซิตริกในอาหารที่มีข้าวโพดกากถั่วเหลือง สุกรจะมีอัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารได้ดีกว่าอาหารที่มีข้าวโพด กากถั่วเหลือง และข้าวสาลี

2.13.2 ระยะเวลาหลังจากการหย่านม

การตอบสนองต่อกรดจะเกิดขึ้นมากที่สุดในช่วงแรกหลังการหย่านม และจะลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้น ผลของการเสริมกรดในอาหารจะมองเห็นได้ชัดเจนในช่วงไม่กี่สัปดาห์หลังหย่านม (Sciopioni et al., 1978; Redecker et al., 1988;

Giesting *et al.*, 1991 ; Risley, 1992 อ้างถึงใน Ravindran and Kornegay, 1993) และหลังจากหย่านมแล้ว 4 สัปดาห์ สุกรจะมีระดับเอ็นไซม์ที่สมบูรณ์ การใช้ประโยชน์ของกรดที่ผลิตขึ้นเองในร่างกายจะมากขึ้น ทำให้การตอบสนองต่อการเสริมกรดในอาหารลดลง (Cranwell, 1985 ; Lindemann *et al.*, 1986)

2.13.3 ระดับของกรด

การตอบสนองของลูกสุกรต่อกรดที่เสริม ขึ้นอยู่กับระดับของกรดที่ใช้ โดยพบว่า การเสริมกรดชนิดที่ต่างกันในระดับต่างๆ เพื่อการเจริญเติบโตจะต้องขึ้นอยู่กับชนิดอาหาร และอายุของสัตว์ด้วย โดยทั่วไปแล้วการเสริมระดับที่สูงถึง 3.0% อาจจะมีประโยชน์ แต่จะทำให้ค่าใช้จ่ายสูงขึ้น และไม่คุ้มค่าต่อการลงทุน (Ravindran and Kornegay, 1993)

2.14 ผลการศึกษาการใช้กรดชนิดที่

2.14.1 ผลต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตของลูกสุกร

ระดับการเสริม 1.0% ของอาหาร Kornegay และคณะ (1976) พบว่า การเสริมกรดชนิดที่ระดับ 1.0% ในอาหารนม จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของลูกสุกรเพิ่มขึ้น 8.6% ($P>0.10$) ปริมาณการกินได้เพิ่มขึ้น 7.5% ($P>0.10$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 1.6% ($P>0.10$) ส่วนในอาหารที่มีข้าวโพด กากถั่วเหลือง และหางนม ลูกสุกร (อายุ 0-7 วัน) จะมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง 7.7% ($P>0.10$) ปริมาณการกินได้ไม่เปลี่ยนแปลง และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินลดลง 4.7% ($P>0.10$) Sciopioni และคณะ (1978) พบว่า การเสริมในอาหารลูกสุกรที่มีข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด กากถั่วเหลือง ปลาบ่น และหางนม ทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 6.9% ($P>0.10$) ปริมาณการกินได้เพิ่มขึ้น 4.7% และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 1.2% Falkowski และ Aherne (1984) พบว่า การเสริมในอาหารลูกสุกรหลังหย่านมที่มีข้าวบาร์เลย์ ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต กากถั่วเหลือง

และหางนม ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 3.9% ($P>0.10$) ปริมาณการกินได้ลดลง 0.9% ($P>0.01$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 5.2% ($P<0.05$) Burnell และคณะ (1988) พบว่า ในอาหารลูกสุกรอายุ 28 วัน ที่มีข้าวโพดและกากถั่วเหลือง ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 9.3% ($P<0.05$) ปริมาณการกินได้เพิ่มขึ้น 2.5% และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 5.9% ($P<0.01$) ส่วน Clark และ Batterham (1989) พบว่า ในอาหารลูกสุกรอายุเริ่มแรก 10 วัน ที่มีข้าวสาลี กากถั่วเหลือง ปลาป่น และเนื้อมัน ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 2.7% ($P<0.10$) ปริมาณการกินได้เพิ่มขึ้น 10.1% ($P<0.01$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินไม่เปลี่ยนแปลง

การเสริมกรดซิทริกที่ระดับ 1.5% Edmonds และคณะ (1985) พบว่า ในอาหารลูกสุกรอายุ 30 วัน ที่มีข้าวโพด กากถั่วเหลือง ข้าวสาลี และปลาป่น จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง 7.9% ($P>0.10$) ปริมาณการกินได้ลดลง 12.2% ($P>0.10$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 4.8% ($P<0.05$) Risley และคณะ (1991) พบว่า ในอาหารลูกสุกรอายุเริ่มแรก 25 วัน ที่มีข้าวโพดและกากถั่วเหลือง ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 3.5% ($P>0.10$) ปริมาณการกินได้ลดลง 3.0% ($P>0.10$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 6.2% ($P<0.10$) Johnson (1992 อ้างถึงใน Ravindran และ Kornegay, 1993) พบว่า ในสูตรอาหารลูกสุกรอายุเริ่มแรก 21 วัน ที่มีข้าวสาลี กากถั่วเหลือง ปลาป่น และเนื้อมัน ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 11.4% ($P>0.10$) ปริมาณอาหารที่กินได้เพิ่มขึ้น 10.3% ($P>0.10$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 0.8% ($P>0.10$) ตามลำดับ

การเสริมกรดซิทริกที่ระดับ 2.0% Giesting และ Easter (1988) พบว่า ในอาหารลูกสุกรอายุเริ่มแรก 30 วัน ที่มีข้าวโพด และกากถั่วเหลือง ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 3.2% ($P>0.10$) ปริมาณการกินได้ลดลง 3.9% ($P>0.10$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 7.8% ($P<0.05$)

การเสริมกรดซิทริกที่ระดับ 3.0% Henry และคณะ (1985) พบว่า ในอาหารลูกสุกรอายุเริ่มแรกทดลอง 10 วัน ที่มี ข้าวโอ๊ต กากถั่วเหลือง และนม ทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 14.3% ($P<0.05$) ปริมาณการกินได้เพิ่มขึ้น 19.6% ($P<0.05$) และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินเพิ่มขึ้น 1.0%

แต่จากผลการทดลองของ Radecki และคณะ (1988) พบว่า การเสริมกรดซิตริกระดับ 1.5% และ 3.0% ในสูตรอาหารสุกรอายุ 21 วัน ที่มีข้าวโพดและกากถั่วเหลือง มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง 8.3% และ 0.9% ($P>0.10$) ปริมาณอาหารที่กินได้และอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่ออาหารที่กินลดลง 6.0% และเพิ่มขึ้น 5.3% ตามลำดับ ($P>0.10$)

2.14.2 ผลต่อการย่อยได้

Falkowski และ Rooth (1980 อ้างถึงใน Radecki และคณะ, 1988) พบว่า การเสริมกรดอินทรีย์ในอาหารสุกรช่วยปรับปรุงการย่อยสลายได้ของโปรตีน และพลังงาน

Sciopioni และคณะ (1978) พบว่าการเสริมกรดซิตริกที่ระดับ 1.0% ในอาหารลูกสุกรช่วยปรับปรุงการย่อยสลายได้ของสิ่งแห้ง และ โปรตีน

แต่จากรายงานของ Radecki และคณะ (1988) พบว่า การเสริมกรดซิตริกระดับ 1.5% และ 3.0% ในอาหารลูกสุกร ไม่มีผลต่อการย่อยสลายได้ของสิ่งแห้ง พลังงาน (DE, ME) และโปรตีน เช่นเดียวกับรายงานของ Falkowski and Aherne (1984) พบว่า การเสริมกรดซิตริกที่ระดับ 1.0% และ 2.0% ไม่มีผลต่อการย่อยสลายได้ของโปรตีน และ สิ่งแห้ง ในลูกสุกรหลังหย่านม ในสูตรอาหารที่มี ธัญพืช หางนม กากถั่วเหลือง และปลาป่น

2.15 ผลการศึกษาการใช้เอ็นไซม์ร่วมกับกรด

จากการทดลองของ Thacker และคณะ (1992) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์ เบต้า-กลูคาเนส ระดับ 0.25% ร่วมกับกรดฟูมาริก (fumaric acid) 2.0% พบว่า อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณการกินได้ และประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างกัน นอกจากนั้นการย่อยได้สิ่งแห้ง โปรตีน และพลังงาน ไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่เสริมในลูกสุกรเล็ก