บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

ในปัจจุบันการเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืด มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากได้รับความนิยมบริโภคทั้งตลาดภายในและต่างประเทศ จากปริมาณการเพาะเลี้ยงปลาน้ำจืดทั่วโลกในปี พ.ศ. 2542 ปริมาณ 18.58 ล้านตัน เป็นผลผลิตปลานิล 1.09 ล้านตัน (FAO, 1999) โดยทวีปเอเชียเป็นแหล่งผลิตปลานิลแหล่งใหญ่ที่สุด ผลผลิตปลานิลสูงถึง 75 % ของผลผลิตทั่วโลก เป็นปริมาณ 890,000 ตัน สาธารณรัฐประชาชนจีนผลิตปลานิลสูงที่สุดประมาณร้อยละ 50 ของผลผลิตทั้งหมด รองลงมาคืออียิปต์ ไทย ฟิลิปปินส์ และอินโดนิเซีย โดยตลาดที่สำคัญของการส่งออกปลานิลได้แก่ ประเทศสหรัฐอเมริกา และอังกฤษ ส่วนตลาดในทวีปยุโรป เป็นตลาดค่อนข้างเล็กปริมาณการค้าไม่มากนัก แนวโน้มการตลาดของปลานิลสามารถขยายตัวต่อไปได้อีก เพราะเนื้อปลานิลมีสีค่อนข้างขาว แล่เนื้อได้ง่าย มีก้างน้อย ไม่มีกลิ่นคาว รสชาติอ่อนๆใช้ปรุงอาหารได้หลายอย่าง และอาจใช้แทนปลาเนื้อขาวอย่างอื่นได้ดี (เครือวัลย์, 2545) สำหรับประเทศไทย จากข้อมูลทางสถิติการประมงแห่งประเทศไทย รายงานว่าผลผลิตจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดทั้งหมดในปี พ.ศ. 2542 มีปริมาณ 252,612 ตัน โดยเป็นผลผลิตปลานิลสูงสุด คือ 76,541 ตัน คิดเป็น 30.3 % ของผลผลิตทั้งหมด ผลผลิตปลาดุกเป็นอันดับ 2 คือ 72,247 ตัน คิดเป็น 28.6 % ของผลผลิตทั้งหมด ปลาตะเพียนขาวเป็นอันดับ 3 โดยมีผลผลิตเป็น 41,175 ตัน คิดเป็น 16.3 % ของผลผลิตทั้งหมด (กรมประมง, 2545) แต่ประเทศไทยส่งออกปลานิลเพียงร้อยละ 5 ของผลผลิตภายในประเทศ การเลี้ยงปลานิลส่วนใหญ่จึงเป็นการรองรับความต้องการบริโภคภายในประเทศ ดังนั้นหากสามารถเพิ่มกำลังการผลิตได้ การส่งออกปลานิลจึงมีลู่ทางที่แจ่มใส ระบบการเลี้ยงปลานิลจึงพัฒนาจากแบบดั้งเดิม ไปสู่การเลี้ยงปลานิลเพศผู้ เนื่องจากการเลี้ยงปลาเพศผู้รวมกับเพศเมีย ประสบปัญหาความหนาแน่นของลูกปลา ผลผลิตปลาที่ได้มีหลายขนาด เพราะปลาเพศเมียวางไข่ได้ตั้งแต่อายุ 2 เดือน สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้เองตามธรรมชาติตลอดทั้งปี (มานพ และคณะ, 2536) ปลาเพศผู้เจริญเติบโตเร็วกว่าเพศเมีย 20 % ปลาที่ได้จึงมีขนาดใหญ่และใกล้เคียงกัน สามารถควบคุมระยะเวลา

เลี้ยงได้ (วัชรินทร์ และ ไพบูลย์, 2545) นอกจากนี้การทดลองของ Ita และ Ekeoyo (1989) ศึกษาการเจริญเติบโตของปลานิล (*Oreochromis niloticus*) โดยเปรียบเทียบระบบการเลี้ยง 3 รูปแบบคือการเลี้ยงปลาเพศผู้ทั้งหมด การเลี้ยงปลาเพศเมียทั้งหมด และการเลี้ยงปลาเพศผู้รวมกับเพศเมีย ผลการทดลองพบว่าการเลี้ยงปลาเพศผู้ทั้งหมดปลาจะมีการเจริญเติบโตสูงที่สุด

จากระบบการเลี้ยงที่พัฒนาเป็นการเพาะเลี้ยงเชิงอุตสาหกรรม มีการคิดค้นสูตรอาหารต่างๆ โดยนำวัตถุดิบอาหารจากพืชหลายชนิดที่เหลือใช้ มาเป็นส่วนประกอบในสูตรอาหาร เช่น การทดลองของ Omoregie และ Ogbemudia (1993) พบว่าสามารถใช้กากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน (palm kernal meal) เป็นส่วนประกอบในอาหารทดลองที่ใช้เลี้ยงปลานิลได้ 15 % เป็นระดับที่ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต การทดลองของ Rojas และ Weerd (1997) พบว่าสามารถใช้เนื้อของผลกาแฟ (coffee pulup) เสริมในอาหารที่ใช้เลี้ยงปลานิลได้ 13 % Pouomogne และคณะ (1997) ทำการทดลองโดยใช้เปลือกโกโก้ (cacao husks) เป็นส่วนประกอบในอาหารทดลอง พบว่าสามารถใช้ได้สูงสุด 20 % จะเห็นได้ว่าปลานิลสามารถใช้วัตถุดิบพืชเหล่านี้ได้จำกัด เนื่องจากวัตถุดิบพืชส่วนใหญ่มีโครงสร้างจำพวกคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน (complex carbohydrate) ได้แก่ เซลลูโลส (cellulose) และเพคติน (pectin) ซึ่งเป็นโครงสร้างที่แข็งแรง ยากแก่การย่อย ทำให้สัตว์น้ำต้องสูญเสียพลังงานมากในการย่อยโครงสร้างเหล่านี้ ส่งผลให้การเจริญเติบโตไม่ดีเท่าที่ควร ดังเช่นการทดลองของนิรุทธิ์ (2544) พบว่าเมื่อเพิ่มระดับกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันในสูตรอาหารที่ใช้เลี้ยงปลานิลถึง 30 % จะส่งผลให้ประสิทธิภาพในการย่อยอาหาร และการเจริญเติบโตของปลาไม่ดี Phromkunthong และคณะ (2001) พบว่าการใช้โรโนไซม์ คอกเทล (Ronozyme cocktail) ซึ่งประกอบไปด้วยโรโนไซม์ วีพี (Ronozyme VP) และโรโนไซม์ ดับเบิ้ลยู (Ronozyme W) มีผลสามารถเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนให้อยู่ในรูปโมโนแซ็กคาไรด์ได้เพิ่มขึ้น โดยได้ทดสอบในวัตถุดิบพืชหลายชนิด ได้แก่กากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน รำข้าว กากถั่วเหลือง กากมะพร้าว และกากมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังพบว่าปลานิลที่ได้รับอาหารเสริมโรโนไซม์ มีแนวโน้มของการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น ดังนั้นการใช้เอนไซม์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้วัตถุดิบจากพืช จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่น่าสนใจ ที่จะทำให้สามารถใช้วัตถุดิบพืชเสริมในอาหารปลาได้มากขึ้น การศึกษาครั้งนี้เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของเอนไซม์โรโนไซม์ ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่มีความสามารถในการย่อยคาร์โบไฮเดรต สกัดจากเชื้อรา *Aspergillus aculeatus* ประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิดได้แก่เบต้า-กลูคาเนส (β-glucanase) เพคติเนส (pectinase) และเฮมิเซลลูเล

ส (hemicellulase) ทำหน้าที่ในการย่อยคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharide) ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในผนังเซลล์พืชทั่วไป เช่น เซลลูโลส และเพคติน ผลผลิตที่ได้คือโอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) เซลโลไบโอส (cellobiose) หรือกลูโคส (glucose) โดยใช้วัตถุดิบจากพืช 2 ชนิดคือกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน และกากถั่วเหลือง ในปลานิลดำแปลงเพศ 2 ขนาด คือปลานิลดำแปลงเพศน้ำหนักเฉลี่ย 4-5 กรัม ปลานิลดำแปลงเพศน้ำหนักเฉลี่ย 150-200 กรัม และปลานิลแดงแปลงเพศน้ำหนักเฉลี่ย 150-200 กรัม โดยคาดหวังว่าจะสามารถใช้วัตถุดิบพืชเสริมในอาหารสำหรับเลี้ยงปลากินพืชได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตปลา

ตรวจเอกสาร

1. เอนไซม์ (Enzyme)

การศึกษาทางด้านเอนไซม์ เริ่มตั้งแต่ปี ค.ศ. 1833 โดย ปาเยน (Payen) และ เปอร์โซ (Persoz) ได้ทดลองตกตะกอนสารสกัดจากมอลท์ด้วยแอลกอฮอล์ พบว่า เป็นโปรตีนที่สามารถเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาล จึงให้ชื่อว่า ไดแอสเทส (diastase) ซึ่งปัจจุบันรู้จักกันในชื่อ อะไมเลส (amylase) ต่อมาในปี ค.ศ. 1878 คุนม์ (Kuhne) ได้นำคำว่าเอนไซม์มาใช้โดยคำว่า เอนไซม์ มาจากภาษากรีก แปลว่า ในยีสต์ บุคเนอร์ (Buchner) ได้พิสูจน์ว่าสารที่สกัดได้จากยีสต์สามารถทำให้เกิดการหมักของน้ำตาลได้ โดยไม่ต้องอาศัยเซลล์ยีสต์ที่ยังคงมีชีวิตอยู่ ในปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าสารสกัดจากยีสต์มีเอนไซม์อยู่หลายชนิด ทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเอนไซม์เหล่านี้สามารถทำงานได้ทั้งในสภาพที่อยู่ในเซลล์ที่มีชีวิต หรือในสภาพที่ถูกสกัดจากเซลล์ ส่วนเอนไซม์อื่นๆ ได้มีการค้นพบในช่วงปลายของคริสต์ศักราชที่ 19 (Dixon and Webb, 1979)

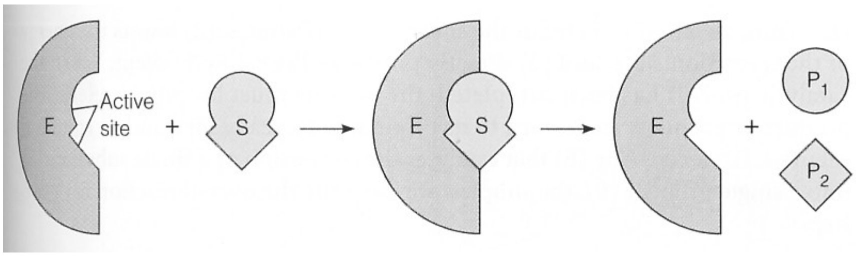
1.1 ความหมายของเอนไซม์

เอนไซม์ คือตัวเร่ง ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาในสิ่งมีชีวิต (biocatalyst) ทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มสูงขึ้น 10^{3}-10^{17} เท่าของปฏิกิริยาเดิมที่ไม่มีเอนไซม์เป็นตัวเร่ง สามารถเร่งปฏิกิริยาได้ภายใต้ภาวะไม่รุนแรง ซึ่งเหมาะสมอย่างยิ่งกับภาวะภายในเซลล์ และเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตทั่วไป มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารที่ทำปฏิกิริยาซึ่งเรียกว่า สับสเตรต (substrate) (Horton,

et al. 2002) เอนไซม์ส่วนใหญ่เป็นโปรตีนลักษณะกลม (globular protein) ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ขึ้นกับโครงรูป (conformation) ของโปรตีน ซึ่งมีการขดตัวที่จำเพาะและกำหนดโดยการเรียงลำดับของกรดอะมิโน (มนตรี และคณะ, 2543) เอนไซม์บางชนิดไม่สามารถทำงานได้หากขาดส่วนประกอบอื่นๆที่จำเป็นนอกเหนือจากโปรตีน เอนไซม์ที่ทำงานเมื่อมีไอออนของโลหะเรียกว่าโคแฟกเตอร์ (cofactor) เช่น Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+} และ Zn^{2+} หรืออาจเป็นสารประกอบอินทรีย์เรียกว่าโคเอนไซม์ (coenzyme) ส่วนของเอนไซม์ที่ประกอบไปด้วยโคเอนไซม์หรือไอออนของโลหะจะเรียกว่าโฮโลเอนไซม์ (holoenzyme) และส่วนที่เป็นโปรตีนจะเรียกว่าอะโพเอนไซม์ (apoenzyme) โดยส่วนใหญ่โคเอนไซม์เป็นสารอินทรีย์หรืออนุพันธ์ของวิตามิน (Lehninger, *et al.* 1993)

1.2 กลไกการทำงาน

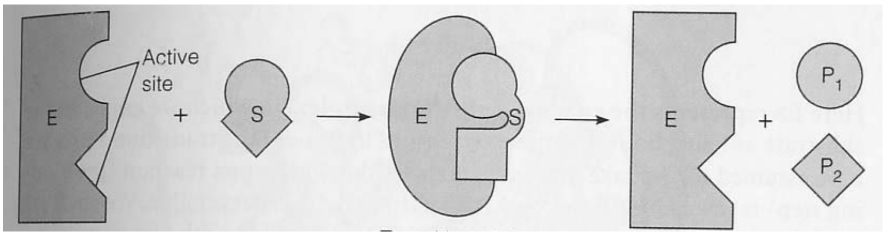
เอนไซม์เป็นโปรตีนลักษณะกลม ทำให้มีบริเวณเร่ง (active site) ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องบนผิวของโมเลกุล สามารถจับกับสับสเตรต โดยสับสเตรตจะจับได้พอดีกับบริเวณเร่ง มีความจำเพาะเจาะจง ตามทฤษฎีแม่กุญแจและลูกกุญแจ (lock-and-key model) ของอีมิล ฟิชเชอร์ (Emil Fischer) โดยเอนไซม์จะรวมตัวกับสับสเตรตก่อให้เกิด enzyme-substrate complex (ES) เป็นผลให้โมเลกุลของสับสเตรตมีความว่องไวมากขึ้น ต้องการพลังงานเริ่มต้นน้อยลง เกิดปฏิกิริยาได้อย่างรวดเร็ว เมื่อปฏิกิริยาสิ้นสุด สับสเตรตจะถูกเปลี่ยนเป็นผลผลิต (product) เอนไซม์จะหลุดออกจากโมเลกุล และเข้าไปจับกับสับสเตรตตัวอื่น กระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเช่นนี้อีก (Methews and Van holde, 1996)



ภาพที่ 1 ทฤษฎีแม่กุญแจและลูกกุญแจ

ที่มา: Methews และ Van holde (1996)

ต่อมาเดเนียล โคชแลนด์ (Daniel Koshland) ได้เสนอทฤษฎีเหนี่ยวนำให้พอดี (induced fit model) โดยเสนอว่าบริเวณเร่งของเอนไซม์ไม่จำเป็นต้องอยู่ในลักษณะ ขนาด และรูปร่างทางเลขาคณิตที่คงตัว แต่สามารถยืดหยุ่นได้ด้วยการเรียงตัวของหมู่อัลคิล (R-group) ของกรดอะมิโนใหม่ และเมื่อถูกชักนำด้วยโมเลกุลของสับสเตรต บริเวณหมู่เอนไซม์จับกับหมู่ต่างๆ บนสับสเตรตได้พอดี (Methews and Van holde, 1996)



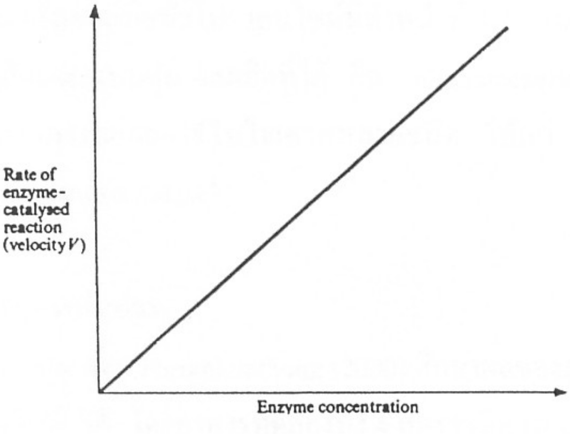
ภาพที่ 2 ทฤษฎีเหนี่ยวนำให้พอดี

ที่มา: Methews และ Van holde (1996)

1.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

1.3.1 ความเข้มข้นของเอนไซม์

เมื่อมีสับสเตรตจำนวนมากพอ ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของเอนไซม์ คือ เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์มีเพิ่มขึ้น จะทำให้อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น

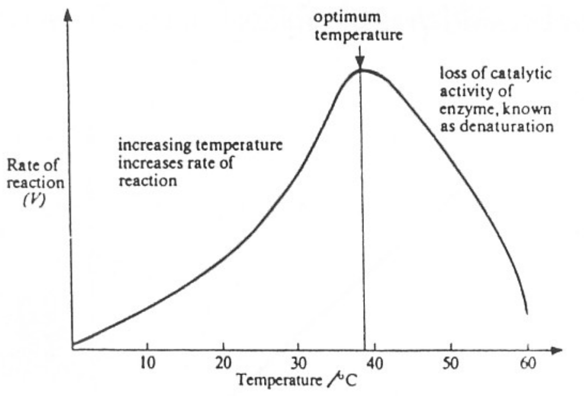


ภาพที่ 3 ผลของความเข้มข้นของเอนไซม์ต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

ที่มา: Dixon และ Webb (1979)

1.3.2 อุณหภูมิ

เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจะทำให้เอนไซม์ทำงานได้ดีขึ้น เพราะความร้อนทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่มากขึ้น มีโอกาสมาชนกัน และเกิดปฏิกิริยาได้มากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป คือหากเกิน 40 องศาเซลเซียส จะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ลดลงเรื่อย ๆ จนถึง 60 องศาเซลเซียส การทำงานทั้งหมดจะชะงักเนื่องจากโปรตีนถูกความร้อนทำให้โครงสร้างที่เป็นก้อน เปลี่ยนรูปไปหรือถูกทำลาย (denature) เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ ถ้าอุณหภูมิลดลงต่ำจนใกล้ถึงจุดเยือกแข็งหรือต่ำกว่า เอนไซม์จะถูกหยุดประสิทธิภาพการทำงานไว้ชั่วคราว แต่ไม่ถูกทำลาย เอนไซม์สามารถกลับคืนสู่สภาพเดิม เมื่อกลับไปอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิปกติ



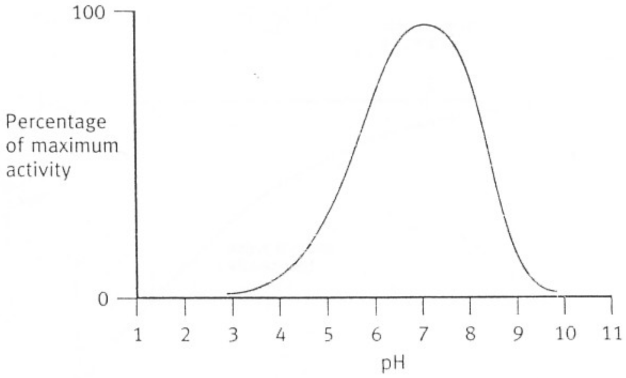
ภาพที่ 4 ผลของอุณหภูมิต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

ที่มา: Dixon และ Webb (1979)

1.3.3 ความเป็นกรดด่าง (pH)

เอนไซม์สามารถทำงานได้ดีในช่วงความเป็นกรดด่างที่แคบ ค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์จะสูงสุด เมื่อค่าความเป็นกรดด่างเปลี่ยนแปลงไปจากช่วงที่เหมาะสม ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ลดลง เพราะการเปลี่ยนความเป็นกรดด่าง จะมีผลต่อประจุของกรดอะมิโน ทำให้รูปร่างโปรตีนเปลี่ยนแปลงไปโดยเฉพาะบริเวณเร่ง เอนไซม์จะเสื่อมสภาพไปช่วงระยะเวลาหนึ่ง เมื่อสภาพแวดล้อมกลับเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสม ก็สามารถทำงานได้ตามปกติ ที่ความเป็นกรดหรือด่างมากๆ เอนไซม์จะเสื่อมสภาพถาวร เอนไซม์ส่วนใหญ่ทำงานได้ดีที่ความเป็นกรดด่างประมาณ 7 แต่บางชนิด

ทำงานได้ดีที่ความเป็นกรดด่างต่ำ เช่น เปปซิน (pepsin) ทำงานที่ความเป็นกรดด่าง ประมาณ 1-2.5

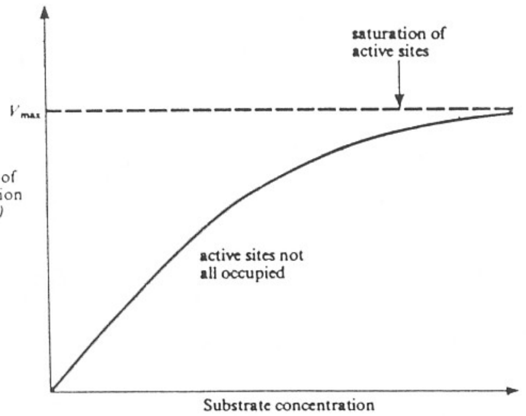


ภาพที่ 5 ผลของความเป็นกรดด่างต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

ที่มา: Dixon และ Webb (1979)

1.3.4 ความเข้มข้นของสับสเตรต

เมื่อความเข้มข้นของเอนไซม์คงที่ ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดเพิ่มขึ้นเมื่อสับสเตรตเพิ่มขึ้น แต่เมื่อสับสเตรตเพิ่มถึงจุด ๆ หนึ่ง ก็จะไม่มีผลต่ออัตราความเร็วของปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสับสเตรตในลักษณะเส้นโค้งอิ่มตัว และความเร็ว (velocity and substrate saturation curve) เป็นลักษณะเฉพาะของแอกติวิตี (Activity) ของเอนไซม์ คือความเร็วของปฏิกิริยาเริ่มต้น จะสัมพันธ์ตรงกับความเข้มข้นของสับสเตรต และความเร็วของปฏิกิริยาจะไม่สามารถเพิ่มไปมากกว่าจุดที่เอนไซม์อิ่มตัวด้วยสับสเตรต เรียกว่า จุดอิ่มตัว (saturation point) V_{max} คือความเร็วสูงสุดของปฏิกิริยาซึ่งจะเกิดเมื่อเอนไซม์อิ่มตัวด้วยสับสเตรต



ภาพที่ 6 ผลของความเข้มข้นของสับสเตรตต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา

ที่มา: Dixon และ Webb (1979)

1.4 การจำแนกชนิดของเอนไซม์

การจำแนกชนิดของเอนไซม์ตามข้อตกลงของเอนไซม์ (Commission on enzyme, EC) แบ่งออกเป็น 6 กลุ่ม ตามชนิดของปฏิกิริยาที่เอนไซม์เร่ง

1.4.1 ออกซิโดรีดักเตส (oxidoreductases) เร่งปฏิกิริยาที่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน (oxidation-reduction) ระหว่างโมเลกุล เช่นอะตอมของไฮโดรเจน ออกซิเจน หรืออิเล็กตรอน ปฏิกิริยามีหลายรูปแบบตามลักษณะตัวรับอิเล็กตรอน เอนไซม์กลุ่มนี้ ได้แก่ ดิไฮโดรจิเนส (dehydrogenases) เร่งปฏิกิริยาการรับอิเล็กตรอนด้วยตัวรับที่ไม่ใช่ออกซิเจน ออกซิเดส (oxidase) ถ่ายเทอิเล็กตรอนไปยังโมเลกุลของออกซิเจน

1.4.2 ทรานซ์เฟอร์เรส (transferases) เร่งปฏิกิริยาการเคลื่อนย้ายอะตอมหรือกลุ่มอะตอมระหว่าง 2 โมเลกุล จากตัวให้ (donor) ไปยังตัวรับ (acceptor)

1.4.3 ไฮโดรเลส (hydrolases) เร่งปฏิกิริยาการสลายพันธะเคมีในสารประกอบด้วยน้ำ เอนไซม์ในกลุ่มนี้ได้แก่ เอสเทอเรส (esterases), ไกลโคซิเดส (glycosidases), ไลเปส (lipases) และโปรติเอส (proteases)

1.4.4 ไลเอส (lyases) เอนไซม์กลุ่มนี้เร่งปฏิกิริยาการแยกโปรตอน (H^+) ของสารประกอบตั้งต้น ทำให้เกิดพันธะคู่ในสารประกอบผลผลิต หรือทำปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนพันธะคู่ในสารประกอบตั้งต้นเป็นสารประกอบที่มีพันธะเดี่ยว

1.4.5 ไอโซเมอเรส (isomerases) เอนไซม์กลุ่มนี้เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนไอโซเมอร์ของสารประกอบตั้งต้นจากซีสไอโซเมอร์ เป็นทรานส์ไอโซเมอร์ในผลผลิต หรือจากสารประกอบตั้งต้นแอลไอโซเมอร์ เป็นดีไอโซเมอร์ในผลผลิต

1.4.6 ไลเกส หรือ ซินเทเทส (ligases or synthetases) เอนไซม์กลุ่มนี้เร่งปฏิกิริยาการสร้างพันธะโควาเลนท์ (covalent bond) ระหว่างโมเลกุล 2 โมเลกุล (Chaplin and Bucke, 1990)

1.5 เอนไซม์ในระบบย่อยอาหารของปลา

กระบวนการย่อยและการดูดซึมอาหารเป็นกระบวนการสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโต ระบบการย่อยอาหารของปลา ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ท่อทางเดินอาหาร (digestive tract) และอวัยวะช่วยย่อยอาหาร (accessory gland) อาหารที่ปลากินเข้าไปจะถูก

เคี้ยวหรือกลืนผ่านหลอดอาหารไปยังกระเพาะและลำไส้ ซึ่งมีการย่อยอาหารโดยอาศัยเอนไซม์

1.5.1 เอนไซม์ย่อยโปรตีน (proteolytic enzyme)

โปรติเอส (proteases) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการแยกสลายพันธะเปปไทด์ (peptide links) ของโปรตีน เอนไซม์ต่างๆ มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาบนพันธะเปปไทด์ โดยเอนไซม์ที่สลายพันธะเปปไทด์ที่ตำแหน่งปลายสุดของโปรตีน เรียกว่าเอกโซเปปทิเดส (exopeptidases) ส่วนเอนไซม์ที่สลายพันธะเปปไทด์ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งภายในโปรตีน เรียกว่าเอนโดเปปทิเดส (endopeptidases) (De Silva and Anderson, 1995) การย่อยโปรตีนเกือบทั้งหมดเกิดขึ้นที่กระเพาะอาหาร เปปซิโนเจน (pepsinogen) จะถูกย่อยสลายในสภาพที่เป็นกรด แตกตัวเป็นเปปซิน จากนั้นเปปซินจะย่อยสลายโครงสร้างของโปรตีนออกมาเป็นโพลีเปปไทด์สั้นๆ (polypeptides) ทำงานได้ดีที่ความเป็นกรดด่าง 1.5-3 ทริปซิโนเจน (trypsinogen) ถูกกระตุ้นโดยเอนเตอร์โรไคเนส (enterokinase) จากลำไส้เปลี่ยนเป็นทริปซิน (trypsin) ส่วนไคโมทริปซิโนเจน (chymotrypsinogen) ที่สร้างจากตับอ่อน ถูกกระตุ้นโดยทริปซิน เปลี่ยนเป็นไคโมทริปซิน (chymotrypsin) ทริปซินและไคโมทริปซิน จะย่อยโพลีเปปไทด์ให้เป็นสายเปปไทด์สั้นๆ จากนั้นคาร์บอกซีเปปทิเดส (carboxypeptidases) และอะมิโนเปปทิเดส (aminopeptidases) จากตับอ่อนจะย่อยสายเปปไทด์ ในที่สุดได้กรดอะมิโน (Lovell, 1998)

1.5.2 เอนไซม์ย่อยไขมัน (lipolytic enzyme)

การย่อยไขมันเกิดขึ้นในลำไส้ เอนไซม์ที่พบคือ ไลเปส (lipases) ทำงานได้ดีที่ความเป็นกรดด่าง 7-7.5 ส่วนเอสเทอเรส ย่อยเอสเทอร์ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลน้อย ทำงานได้ดีที่ความเป็นกรดด่าง 8-9 ตับมีบทบาทสำคัญในการย่อยไขมัน โดยน้ำดีถูกสร้างขึ้นที่ตับ และเก็บไว้ในถุงน้ำดี จะหลั่งออกมาเมื่ออาหารมาถึงลำไส้ น้ำดีจะช่วยให้ไขมันแตกตัวจากหยดไขมันที่มีขนาดใหญ่ เป็นไขมันที่มีขนาดเล็ก ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิวและง่ายต่อการทำงานของเอนไซม์ (De Silva and Anderson, 1995) จากนั้นก็จะถูกย่อยสลายด้วยไลเปส การย่อยไขมันจึงถูกเร่งปฏิกิริยาโดยไลเปสเป็นส่วนใหญ่ (Lovell, 1998)

1.5.3 เอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรต

เอนไซม์ทำหน้าที่ย่อยคาร์โบไฮเดรต มีหลายชนิด โดยแต่ละชนิดมีความจำเพาะต่อปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในทางเดินอาหารของปลา ทำงานได้ดีที่ความเป็นกรดด่าง 6-8 โดยตับ

อ่อนจะเป็นแหล่งผลิตเอนไซม์ย่อยคาร์โบไฮเดรต การย่อยแป้ง (starch) และไกลโคเจน (glycogen) เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์ หรือมอลโตส (maltose) จะถูกย่อยโดย แอลฟา-อะไมเลส (α-amylases) ส่วนการย่อยไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) และโอลิโกแซ็กคาไรด์ เป็นโมโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide) และโพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) นั้น การทำงานของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต (De Silva and Anderson, 1995) ส่วนคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น เซลลูโลส และเพคติน เป็นโครงสร้างที่แข็งแรงย่อยยาก ต้องอาศัยเอนไซม์ที่ตัดพันธะไกลโคซิล (Xeu, *et al.* 1999) เอนไซม์กลุ่มไกลโคไซด์ไฮโดรเลส (glycoside hydrolases) ที่มีบทบาทมากที่สุดในการย่อยสลายสับสเตรตที่มีพันธะไกลโคซิล ได้แก่ แป้ง เซลลูโลส และเพคติน

1.5.3.1 อะไมเลส เป็นเอนไซม์ที่ย่อยสลายสับสเตรตจำพวกแป้ง และไกลโคเจน แบ่งออกเป็น

ก. แอลฟา-อะไมเลส มีชื่อสามัญว่า ไดแอสเทส (diastase) ชื่อเรียกตามระบบว่า α-1,4-glucan 4-glucanohydrolase หรือ EC 3.2.1.1 มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายแป้ง เป็นโอลิโกแซ็กคาไรด์ และไดแซ็กคาไรด์ ลักษณะสำคัญของปฏิกิริยาการย่อยสลาย คือเจาะจงต่อการย่อยสลายพันธะไกลโคซิลของแป้งที่ตำแหน่ง α-1,4 ในลักษณะตัดภายในสายพอลิเมอร์ ผลผลิตที่ได้คือ กลูแคน (glucan) และลิมิตเดกซ์ทริน (limit dextrin) ที่มีหน่วยกลูโคสประมาณ 2-6 หน่วย และยังคงมีโครงสร้างรูปเดิม (α-configuration)

ข. เบตา-อะไมเลส (β-amylase) มีชื่อเรียกตามระบบว่า α-1,4-glucan maltohydrolase หรือ EC 3.2.1.2 มักพบร่วมกับแอลฟา-อะไมเลส ลักษณะสำคัญของปฏิกิริยาการย่อยสลาย คือเจาะจงต่อพันธะไกลโคซิลของแป้งที่ตำแหน่ง α-1,4 ในลักษณะการตัดสายพอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบ จากปลายสายด้านที่ไม่มีหมู่รีดิวซ์ เข้าสู่ภายในสายไปทีละ 1 หน่วยของมอลโตส หรือทีละ 2 หน่วยของกลูโคส จะหยุดปฏิกิริยาที่พันธะไกลโคซิลตำแหน่ง α-1,6 ผลผลิตที่ได้คือ กลูแคน, ลิมิตเดกซ์ทริน และส่วนใหญ่เป็นมอลโตสที่มีโครงรูปต่างไปจากเดิม (β-configuration) คือ เบตา-มอลโตส (β- moltose)

ค. แกมมา-อะไมเลส, กลูโคอะไมเลส หรือ อะมิโนกลูโคซิเดส (γ-amylase, glycoamylase or amyloglucosidase) มีชื่อเรียกตามระบบว่า α-1,4-glucan glucohydrolase หรือ EC 3.2.1.3 ลักษณะสำคัญของปฏิกิริยาการย่อยสลายแป้ง คือสามารถย่อยสลายได้หลายพันธะ ไม่ว่าจะเป็นพันธะไกลโคซิลตำแหน่ง α-1,4 α-1,6 และ α-1,3

แต่จะช้ากว่าพันธะ α-1,4 ลักษณะการตัดสายพอลิเมอร์อย่างเป็นระเบียบจากปลายสาย โดยตัดจากปลายสายเข้าไปทีละ 1 หน่วยของกลูโคส ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นกลูโคสที่มีโครงรูปต่างไปจากเดิม คือ เบตา-ดีกลูโคส, ส่วนของกลูแคน และลิมิตเดกซ์ทริน

1.5.3.2 เซลลูเลส (cellulases) เซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เอนไซม์ที่ย่อยสลายเซลลูโลสและอนุพันธ์ของเซลลูโลส คือ เซลลูเลส โดยทั่วไปเป็นเอนไซม์ผสมประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิดทำงานร่วมกันคือ

ก. ไฮโดรเจน บอนด์เดส (hydrogen bondase) ทำหน้าที่กระตุ้น หรือแตกสลายเซลลูโลสให้มีสภาพที่เหมาะสม คือทำให้พันธะไฮโดรเจนอ่อนลง สำหรับเป็นสับสเตรตของเซลลูเลส

ข. เบตา-1,4 กลูคาเนส (β-1,4 glucanases) เป็นเซลลูเลสที่ย่อยสลายพันธะในเซลลูโลส หรืออนุพันธ์ของเซลลูโลสที่ละลายน้ำ สามารถย่อยสลายพันธะ β-1,4 ได้ แต่ไม่สามารถย่อยสลายสับสเตรตที่มีโครงสร้างซับซ้อน เอนไซม์ในกลุ่มนี้มี 2 ชนิด

(1) เอนโด-เบตา-1,4 –กลูคาเนส (endo-β-1,4 glucanases) ย่อยสลายสายพอลิเมอร์ภายในสายอย่างอิสระ ผลผลิตที่ได้เป็นโอลิโกเมอร์ และกลูโคส

(2) เอกซ์โซ-เบตา-1,4-กลูคาเนส (exo-β-1,4 glucanases) ย่อยสลายสายพอลิเมอร์จากปลายสายด้านไม่มีหมู่รีดิวซ์อย่างมีระเบียบ มีการเปลี่ยนโครงรูปของผลผลิต คือ เปลี่ยนจาก β- เป็น α-configuration ผลผลิตที่ได้เป็นเซลโลไบโอส และกลูโคส

ค. เบตา-กลูโคซิเดส (β-glucosidases) การทำงานคล้ายเอกซ์โซ-เบตา-1,4-กลูคาเนส แต่อัตราการย่อยสลายแตกต่างกัน คืออัตราเร็วจะลดลงเมื่อความยาวสายพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ผลผลิตที่ได้คือกลูโคส ซึ่งมีโครงรูปเปลี่ยนไปจากเดิม

1.5.3.3 เพคติเนส (pectinases) สารประกอบเพคติน พบทั่วไปในผนังเซลล์ของพืชชั้นสูง และชั้นระหว่างเซลล์ของพืชช่วยเพิ่มลักษณะคงตัวของเนื้อสัมผัส (texture) ในผักและผลไม้ เพคติเนสแบ่งเป็น 3 ชนิดคือ

ก. เพคตินเอสเทอร์เรส (pectinesterase) มีชื่อเรียกตามระบบว่า pectin pecthylhydrolase หรือ EC 3.1.1.11 หรือ PE เร่งปฏิกิริยาการแยกหมู่เมทิล จากสารประเภทเพคตินที่มีการเติมหมู่เมทิลที่หมู่คาร์บอกซิล ไม่ย่อยสลายพันธะไกลโคซิล แต่ยังจัด

อยู่ในกลุ่มของไฮโดรเลสที่ย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ ผลผลิตจากปฏิกิริยาได้ กรดเพคติค กรดเพคตินิค และเมทานอล

ข. พอลิกาแลกทูโรเนส (polygalacturonases) มีชื่อเรียกตามระบบว่า poly-α-1,4 galacturonide glycanohydrolase หรือ EC 3.2.1.15 หรือ PG ทำหน้าที่ย่อยสลายพันธะไกลโคซิลในสารประเภทเพคติน แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะการย่อยสลาย คือแบบสุ่ม และแบบเป็นระเบียบ และแบ่งย่อยลงไปตามชนิดสับสเตรต แบ่งกลุ่มย่อยดังนี้

(1) กลุ่มย่อยสลายแบบสุ่ม

(1.1) จำเพาะต่อสับสเตรตที่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ (endo-polymethyl galacturonases) จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นเพคตินได้ดีกว่ากรดเพคติค ลักษณะการย่อยสลายแบบไม่เป็นระเบียบ (endo-splitting) ในสายพอลิเมอร์

(1.2) จำเพาะต่อสับสเตรตที่ไม่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ (endo-polygalacturonases) จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นกรดเพคติค ได้ดีกว่าเพคติน ลักษณะการย่อยสลายแบบไม่เป็นระเบียบในสายพอลิเมอร์

(2) กลุ่มย่อยสลายแบบเป็นระเบียบ

(2.1) จำเพาะต่อสับสเตรตที่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ (exo-polymethyl galacturonases) จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นเพคติน ได้ดีกว่ากรดเพคติค ลักษณะการย่อยแบบเป็นระเบียบจากปลายสายพอลิเมอร์ (exo-splitting)

(2.2) จำเพาะต่อสับสเตรตที่ไม่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ (exo-polygalacturonases) จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นกรดเพคติค ได้ดีกว่าเพคติน ลักษณะการย่อยสลายแบบเป็นระเบียบจากปลายสายพอลิเมอร์

ค. เพคเทต ไลเอส (pectate lyases) มีชื่อเรียกตามระบบว่า poly-α-1,4-D-galacturonide lyase หรือ EC 4.2.2.2 หรือ PL เป็นเพคติเนสที่อยู่ในกลุ่มไลเอส ลักษณะปฏิกิริยาของการย่อยสลายพันธะไกลโคซิล ในเพคตินหรือกรดเพคติค ได้พอลิเมอร์สายสั้นที่มีปลายรีดิวซ์ อีกสายพอลิเมอร์มีพันธะคู่ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามลักษณะการย่อยสลาย คือแบบสุ่ม และแบบเป็นระเบียบ และแบ่งย่อยลงไปตามชนิดสับสเตรต แบ่งกลุ่มย่อยดังนี้

(1) กลุ่มย่อยสลายแบบสุ่ม

(1.1) จำเพาะต่อสับสเตรตที่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นเพคติน ลักษณะการย่อยสลายแบบไม่เป็นระเบียบในสายพอลิเมอร์

(1.2) จำเพาะต่อสับสเตรตที่ไม่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นกรดเพคติค ลักษณะการย่อยสลายแบบไม่เป็นระเบียบในสายพอลิเมอร์

(2) กลุ่มย่อยสลายแบบเป็นระเบียบ

(2.1) จำเพาะต่อสับสเตรตที่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นเพคติน ลักษณะการย่อยสลายแบบเป็นระเบียบจากปลายด้านไม่รีดิวซ์

(2.2) จำเพาะต่อสับสเตรตที่ไม่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์ จะย่อยสลายสับสเตรตที่เป็นกรดเพคติค ลักษณะการย่อยสลายแบบเป็นระเบียบจากปลายด้านไม่รีดิวซ์ (ปราณี, 2543)

2. โรโนไซม์ วีพี (Ronozyme VP)

โดยทั่วไปสารเยื่อใยที่พบในอาหาร มาจากส่วนของผนังเซลล์พืช (plant cell walls) ซึ่งเป็นส่วนที่มีความแข็งแรง ย่อยยาก เอนไซม์ในร่างกายไม่สามารถย่อยได้ (Buhlier, *et al.* 1998) สารเยื่อใยที่พบในปริมาณสูงในอาหาร ประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เบต้า-กลูแคน (β-glucan) และเพคติน ส่วนพวกลิกนิน และกัมส์ (gums) พบในปริมาณน้อย การเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์น้ำเพื่อเปลี่ยนสารเยื่อใยให้อยู่ในรูปที่สัตว์น้ำสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ชนิดและปริมาณเอนไซม์เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในการย่อยสารเยื่อใยซึ่งมีโครงสร้างที่ซับซ้อน (เสกสม, 2544)

โรโนไซม์ วีพี เป็นเอนไซม์ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบพืช สกัดจากเชื้อรา *Aspergillus aculeatus* ประกอบด้วยเอนไซม์หลายชนิด ได้แก่ เบต้า-กลูคาเนส เพคติเนส เฮมิเซลลูเลส และเซลลูเลส มีความสามารถย่อยคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญในผนังเซลล์พืชทั่วไป (Hunter, 2000)

ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมามีการพัฒนาด้านอาหารสัตว์โดยเริ่มมีการนำเอนไซม์เข้ามาใช้เสริมในอาหารสัตว์เพื่อการเจริญเติบโต เริ่มแรกมีการทดลองในอาหารสัตว์บกและสัตว์ปีก เอนไซม์ที่นำมาใช้ คือ เบต้า-กลูคาเนส และไซลาเนส (xylanase) โดยนำเอนไซม์ทั้งสองชนิดนี้เสริมลงไปในอาหารสุกร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อย วัตถุดิบพืชที่นำมา

ทดลอง คือ รำข้าวสาลี และแป้งข้าวโพด พบว่าสุกรมีอัตราการแลกเนื้อ และประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนดีขึ้น (Johnson, *et al.* 1993) จากนั้นมีการทำการทดลองในสัตว์ปีกโดยใช้เอนไซม์ทั้งสองชนิดเสริมในอาหารไก่ที่มีอายุต่างกันสองระดับ คือ ไก่อายุ 1 วัน และไก่อายุ 1 ปี เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการย่อยอาหาร การเจริญเติบโต และความสัมพันธ์ของอายุไก่กับการทำงานของเอนไซม์ ผลปรากฏว่าในไก่ที่มีอายุ 1 วัน มีประสิทธิภาพในการย่อยอาหารดีกว่าไก่อายุ 1 ปี เนื่องจากการพัฒนาของระบบย่อยอาหารของไก่อายุน้อยยังไม่สมบูรณ์ เมื่อมีการนำเอนไซม์เสริมในอาหารจึงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยอาหารให้สูงขึ้น ส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตดีขึ้น ส่วนในไก่อายุ 1 ปี ระบบการย่อยอาหารสมบูรณ์เต็มที่แล้ว ดังนั้นการเสริมเอนไซม์จึงไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหาร และการเจริญเติบโต (Almirall, *et al.* 1993) Rodriguez และคณะ (1996) อ้างโดยนิรุทธิ์ (2544) พบว่าปลานิลสามารถย่อยอาหารที่ไม่มีกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันได้ดีกว่าอาหารที่มีกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน ทั้งนี้เนื่องมาจากกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันมีส่วนประกอบของเยื่อใยส่วนที่เป็นกะลาอยู่ค่อนข้างสูง ทำให้ปลาไม่สามารถย่อยได้ จึงทำให้ประสิทธิภาพการย่อยอาหารต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับ McDonald และคณะ (1981) ที่กล่าวว่ากากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันมีลักษณะไม่น่ากิน และมีเยื่อใยสูงทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยอาหารต่ำ Carter และคณะ (1994) ทำการศึกษาโดยนำเอนไซม์มาประยุกต์ใช้ ทดลองเลี้ยงปลาแอตแลนติกแซลมอน (Atlantic salmon, *Salmo salar*) ด้วยอาหาร 3 สูตร ที่มีแหล่งของโปรตีนต่างกัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการใช้อาหาร และการเจริญเติบโต โดยอาหารสูตรที่ 1 มีปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีน สูตรที่ 2 ใช้ปลาป่นและถั่วเหลืองในอัตราส่วนที่เท่ากัน และสูตรที่ 3 ใช้ปลาป่นและถั่วเหลืองเสริมเอนไซม์ผสม โดยเอนไซม์ผสมประกอบไปด้วย ทริปซิน อัลคาไลน์ โปรติเอส (alkaline protease) เอซิด โปรติเอส (acid protease) อะไมโลกลูโคซิเดส (amyloglucosidase) อะไมเลสที่สกัดจากมอลต์ อะไมเลสที่สกัดจากแบคทีเรีย และเซลลูเลส ผลการทดลอง พบว่าปลาที่ได้รับอาหารทดลองสูตรที่ 3 มีน้ำหนักเพิ่มขึ้นสูงที่สุด และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำที่สุด จากผลการทดลองสรุปได้ว่า เอนไซม์มีผลต่อการเจริญเติบโต และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อในปลาแอตแลนติกแซลมอน เช่นเดียวกับการทดลองของ Boonyaratpalin และ Phromkunthong (2000) ซึ่งทำการหมักกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันด้วยโรโนไซม์ วีพี และนำไปผสมกับวัตถุดิบชนิดอื่น จากนั้นทำการอัดเม็ดอาหาร นำไปใช้เลี้ยงปลานิลแปลงเพศขนาด 1.5 กรัม พบว่าทำให้การเจริญเติบโตของปลาดีกว่าอาหารที่เสริมกากเนื้อเมล็ดใน

ปาล์มน้ำมันที่ไม่ได้หมักเอนไซม์ นอกจากนี้การศึกษาโดย Phromkunthong และคณะ (2001) พบว่าโรโนไซม์มีผลในการเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนให้อยู่ในรูปคาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยว คือโมโนแซ็กคาไรด์ โดยทำการทดสอบในวัตถุดิบพืชหลายชนิด คือกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน รำข้าว กากถั่วเหลือง กากมะพร้าว และกากมันสำปะหลัง โดยแต่ละชุดการทดลองจะเสริมโรโนไซม์ และไม่เสริมโรโนไซม์ในชุดควบคุม จากการวิเคราะห์ปริมาณโมโนแซ็กคาไรด์ ที่สภาพความเป็นกรดด่าง 2, 4, 6 และ 8 พบว่าปริมาณโมโนแซ็กคาไรด์เพิ่มขึ้นในชุดทดลองที่เสริมโรโนไซม์โดยแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม โดยปริมาณโมโนแซ็กคาไรด์ สูงสุดที่ระดับความเป็นกรดด่าง 6 Phromkunthong และคณะ (2001) ทำการทดสอบผลของโรโนไซม์ต่อการเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนให้อยู่ในรูปคาร์โบไฮเดรตเชิงเดี่ยว ในอาหารปลากินพืชและอาหารปลากินเนื้อสำเร็จรูป แต่ละชุดการทดลองจะเสริมโรโนไซม์ และไม่เสริมโรโนไซม์ในชุดควบคุม จากนั้นวิเคราะห์ปริมาณโมโนแซ็กคาไรด์ ที่สภาพความเป็นกรดด่าง 2, 4, 6 และ 8 พบว่าปริมาณโมโนแซ็กคาไรด์ ในชุดการทดลองที่เสริมโรโนไซม์มีความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญกับชุดควบคุม ระดับโมโนแซ็กคาไรด์จะเพิ่มสูงขึ้นที่ระดับความเป็นกรดด่าง 4 และ 6 จากนั้นทำการศึกษาต่อถึงผลของโรโนไซม์ต่อการเจริญเติบโตของปลา ทำการศึกษาโดยเสริมและไม่เสริมโรโนไซม์ ในอาหารปลากินพืชเนื้อสำเร็จรูป และอาหารปลากินเนื้อสำเร็จรูป พบว่าปลากลุ่มที่ได้รับอาหารที่เสริมโรโนไซม์มีแนวโน้มทำให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (weight gain) ดีกว่ากลุ่มที่ไม่เสริม พิศมัย และสมปราชญ์ (2538) ทำการศึกษาผลของการใช้เอนไซม์ช่วยย่อยอาหารในปลาดุกลูกผสม (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) น้ำหนักเฉลี่ย 25 กรัม เอนไซม์ที่ใช้ในการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยอาหารจากแหล่งโปรตีนพืชและสัตว์ คือ Ebizyme สกัดจากเชื้อรา *Rhizopus* sp. อาหาร 2 สูตร มีระดับโปรตีน 32 % และพลังงาน 300 กิโลคาลอรีต่ออาหาร 100 กรัมเท่ากัน จากผลการทดลองพบว่า น้ำหนักปลาที่กินอาหารที่คลุกและไม่คลุกเอนไซม์ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แต่การเสริมเอนไซม์ในอาหารที่มีแหล่งโปรตีนจากพืช ทำให้ประสิทธิภาพการใช้อาหาร (feed efficiency ratio) และโปรตีนที่สะสมในตัวปลาดีขึ้น แสดงว่าการเสริมเอนไซม์ในวัตถุดิบพืชช่วยให้ปลานำโปรตีนจากวัตถุดิบพืชไปใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้น

3. ความสามารถในการย่อย (Digestibility)

เป็นการศึกษาในเชิงปริมาณของกระบวนการย่อยอาหาร องค์ประกอบของสารอาหารที่ย่อยแล้วจะถูกดูดซึม ส่วนที่ไม่ถูกย่อยจะถูกขับถ่ายออกมาทางมูล จึงเป็นอัตราส่วนของปริมาณสารอาหารที่ย่อยได้ และส่วนที่ไม่ถูกย่อย ซึ่งแสดงออกมาในรูปความสามารถในการย่อยได้ทั้งหมด และความสามารถในการย่อยได้บนฐานของวัตถุแห้ง (total and dry matter digestibility) (De Silva and Anderson, 1995) ความสามารถในการย่อยสารอาหาร กล่าวถึงสารอาหาร เช่น โปรตีน ไขมัน กรดอะมิโน หรือ คาร์โบไฮเดรต

ความสามารถในการย่อย ขึ้นอยู่กับประเภทของวัสดุอาหาร และลักษณะทางฟิสิกส์ ได้แก่ ความกระด้าง ความน่ากิน และความคงทนในน้ำ ดังนั้นการสร้างสูตรอาหาร จึงจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับความสามารถในการย่อย (สารอาหารทั้งหมด และสารอาหารแต่ละตัว) ของวัสดุอาหาร เพราะอาหารที่ดีต้องเป็นอาหารที่ย่อยง่าย และสัตว์น้ำสามารถดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ผลที่เกิดจากอายุ ขนาด เพศ ความหนาแน่นของการปล่อย เวลา ความถี่ของการให้อาหาร คุณภาพ ปริมาณอาหาร ตลอดจนความแตกต่างทางสรีระวิทยาของระบบทางเดินอาหารของปลาต่างชนิดกัน ส่งผลต่อความสามารถในการย่อย การใช้ประโยชน์ของอาหาร และสารอาหารอีกด้วย (Maynard and Loosli, 1969)

การศึกษาความสามารถในการย่อยวัสดุอาหารเป็นขั้นตอนสำคัญ ในการประเมินและคิดค้นสูตรอาหารให้มีความสมดุล (Cho and Kaushik, 1990) เนื่องจากการใช้วัสดุอาหารชนิดเดียวในการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยและการดูดซึมอาหาร อาจมีปัญหาปลาไม่ยอมรับอาหารทดสอบ แนวทางการศึกษา คือสร้างสูตรอาหารโดยใช้อาหารที่ทราบค่าความสามารถในการย่อยที่เหมาะสมกับชนิดของสัตว์น้ำ ซึ่งได้ทำการศึกษาแล้วอาหารนี้จัดเป็นอาหารอ้างอิง (reference diet) การเตรียมอาหารทดสอบโดยนำวัสดุอาหารที่ต้องการทดสอบมา 20-30 % ผสมในอาหารอ้างอิง 70 % อาหารที่ได้จัดเป็นอาหารทดสอบ (test diet) (De Silva and Anderson, 1995)

3.1 การประเมินความสามารถในการย่อย

สามารถประเมินได้ 2 วิธี

3.1.1 วิธีตรง (direct method)

เป็นการประเมินจากปริมาณอาหารที่กินเข้าไป และมูลที่ถ่ายออกมา วิธีนี้เป็นการยากที่จะประเมินปริมาณอาหารที่กิน และปริมาณมูลที่ขับถ่ายออกมาจริง เนื่องจากการละลายของสารอาหารออกจากมูลทำให้เป็นการยากที่จะเก็บมูลได้ทั้งหมด เครื่องให้อากาศ และการว่ายน้ำของปลาทำให้มูลแตกเป็นชิ้นเล็กๆ มีส่วนที่แขวนลอยอยู่ในน้ำซึ่งไม่สามารถเก็บได้โดยวิธีกาลักน้ำปกติ การแก้ไขโดยพยายามสร้างเครื่องมือเก็บมูลที่สามารถเก็บได้ต่อเนื่องตลอดเวลา วิธีการเก็บมูลมีข้อผิดพลาด คือการละลายของสารอาหารในน้ำ ปลากินเศษอาหารและเศษมูลเข้าไปอีก ไม่สามารถเก็บมูลได้อย่างสมบูรณ์ และเครื่องมือที่ใช้มีราคาแพง (De Silva and Anderson, 1995)

สมการที่ใช้ในการประเมิน

ประสิทธิภาพการย่อยอาหาร (%) De Silva และ Anderson (1995)

$$= 100 \times \frac{(\text{ปริมาณอาหารที่กิน} - \text{ปริมาณมูล})}{\text{ปริมาณอาหารที่กิน}}$$

ประสิทธิภาพการย่อยสารอาหาร (%)

$$= 100 \times \frac{(\text{ปริมาณสารอาหารในอาหารที่กิน} - \text{ปริมาณสารอาหารในมูล})}{\text{ปริมาณสารอาหารในอาหารที่กิน}}$$

การประเมินความสามารถในการย่อยวิธีตรง วัดจากปริมาณอาหารที่ปลากิน และมูลที่ถูกขับถ่ายออกมา จึงมีข้อจำกัดด้านการเก็บรวบรวมมูลในน้ำซึ่งมีการสูญเสียสารอาหารที่ละลายลงสู่น้ำ (Choubert, *et al*. 1979)

3.1.2 วิธีอ้อม (indirect method)

ใช้ตัวบ่งชี้ (marker) ผสมในอาหารแล้วให้สัตว์น้ำกิน โดยคุณสมบัติของตัวบ่งชี้คือเป็นสารที่สัตว์ย่อยไม่ได้ ไม่เปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี ไม่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำ (De Silva, 1989) ใช้ในปริมาณน้อยไม่ทำให้การยอมรับอาหารของสัตว์น้ำเสียไป ไม่ส่งผลต่อระบบสรีระวิทยาของการย่อยอาหารของสัตว์ทดลอง เคลื่อนที่ในระบบทางเดินอาหารด้วยอัตราเร็วคงที่ในอัตราเดียวกับการเคลื่อนที่ของอาหาร (Maynard and Loosli, 1969) และกระจายได้ทั่วถึงใน

มูลและในอาหารทดลองในปริมาณที่เพียงพอที่จะสามารถตรวจสอบได้ (Owens and Hanson, 1992) การประเมินความสามารถในการย่อยวิธีอ้อม จึงไม่ต้องเก็บรวบรวมมูลปลาทั้งหมด จะเก็บมูลปลาเพียงบางส่วนเพื่อเป็นตัวแทนของมูลปลาทั้งหมด (Halver, 1989)

ตัวบ่งชี้แบ่งออกเป็น

3.1.2.1 ตัวบ่งชี้ภายนอก (external markers) ได้แก่ โครมิกออกไซด์ (Chromic oxide) ไตเตเนียมออกไซด์ (Titanium oxide) ซีเรียมคลอไรด์ (Cerium chloride) โพลีเอธิลีน (Polyethylene) และโพลีโพรไพรีน (Polypropylene)

3.1.2.2 ตัวบ่งชี้ภายใน (internal markers) ได้แก่ เยื่อใย (crude fiber) ไฮโดรไลซีสรีซิสแตน ออร์กานิก แมตเตอร์ (hydrolysis resistant organic matter, HROM) เป็นอินทรีย์สารที่ทนต่อการย่อย และไฮโดรไลซีสรีซิสแตนแอช (hydrolysis resistant ash, HRA) เป็นเถ้าที่ทนต่อการย่อย

สมการที่ใช้ในการประเมิน

ความสามารถในการย่อย (บนฐานของวัตถุแห้ง) (%)

$$= 100 - 100 \left\{ \frac{\text{\% ตัวบ่งชี้ในอาหาร}}{\text{\%ตัวบ่งชี้ในมูล}} \right\}$$

ความสามารถในการย่อยสารอาหาร (%)

$$= 100 - 100 \left\{ \frac{\text{(\% ตัวบ่งชี้ในอาหาร)}}{\text{(\%ตัวบ่งชี้ในมูล)}} \times \frac{\text{(\%สารอาหารในมูล)}}{\text{(\%สารอาหารในอาหาร)}} \right\}$$

การประเมินความสามารถในการย่อยวิธีนี้เป็นการประเมินค่าแบบปรากฏ (apparent digestibility) จะไม่นำค่าสารประกอบไนโตรเจนภายในตัวปลาซึ่งถูกขับออกมาพร้อมกับมูลมาใช้ในการคำนวณ (Lovell, 1988) การประเมินความสามารถในการย่อยแบบแท้จริง (true digestibility) ต้องพิจารณาถึงปริมาณของสารอาหารภายในตัวปลา (endogenous material) ซึ่งส่วนนี้เป็นสารประกอบไนโตรเจน เช่น เอนไซม์ เปปไทด์ (peptide) และเซลล์บุผิว (epithelial cell) ที่ถูกขับออกมาพร้อมกับมูล การแก้ไขความผิดพลาดเหล่านี้คือ ทำอาหารควบคุมที่ปราศจากโปรตีน ส่วนองค์ประกอบอื่นๆ คล้ายอาหารทดลอง ดูความแตกต่างของอาหารทั้ง 2 สูตรนี้ โดยความแตกต่างเป็นค่าแสดงความสามารถที่ย่อยได้จริงของโปรตีนในอาหาร

การประเมินความสามารถในการย่อยแบบแท้จริง (true digestibility coefficient) (Halver, 1989)

$$= 1 - \frac{(\%\text{ตัวบ่งชี้ในอาหาร})}{(\%\text{ ตัวบ่งชี้ในมูล})} \times \left\{ \frac{(\%\text{สารอาหารในมูลปลาที่ได้รับอาหารทดลอง} - \%\text{สารอาหารในมูลปลาที่ได้รับอาหารควบคุม})}{\%\text{ สารอาหารในอาหาร}} \right\}$$

3.2 วิธีการเก็บรวบรวมมูลปลาเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการย่อย มีหลายวิธี

3.2.1 การตัดลำไส้ (intestinal dissection) โดยตัดส่วนปลายลำไส้เหนือช่องทวารขึ้นมาประมาณ 2.5 เซนติเมตร หรือมากกว่าเล็กน้อย (ขึ้นกับชนิดของปลา) เนื่องจากเป็นบริเวณที่เสร็จสิ้นการย่อยอาหารแล้วพร้อมจะขับถ่ายออกนอกตัวปลา (Austreng, 1978)

3.2.2 การดูดช่องทวาร (anal suction) มีอุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นแก้ว (glass cannula) และมีปั๊มดูดอากาศ เพื่อดูดมูลปลาออกมาจากช่องทวารโดยไม่ต้องฆ่าปลา

3.2.3 การรีด (stripping) ทำโดยการจับปลามารีดบริเวณท้องและช่องทวาร เพื่อให้มูลไหลออกมา (Nose, 1967)

3.2.4 การรวบรวมในน้ำ (collection from water column) วิธีนี้ต้องปล่อยให้ปลาถ่ายมูลออกมาตามปกติ แล้วทำการรวบรวมมูลทันที วิธีการเก็บมูลอาจแตกต่างกันไปตั้งแต่การใช้ผ้าตาถี่หรือตะแกรงถี่รองอยู่ด้านล่างของตู้ทดลอง โดยเมื่อปลาถ่ายมูลออกมาก็สามารถยกผ้าหรือตะแกรงออก หรืออาจใช้สายอากาศพลาสติกขนาดเล็กเข้าไปดูดหรือกาลักน้ำให้มูลปลาไหลออกมา หรืออาจใช้เครื่องเก็บมูลอัตโนมัติ (Cho and Slinger, 1979)

การเก็บรวบรวมมูลในสัตว์น้ำยากกว่าสัตว์บก เนื่องจากมูลปลาอยู่ในน้ำทำให้สารอาหารบางส่วนละลายน้ำก่อนที่จะมีการเก็บรวบรวม ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยมีค่าสูงกว่าความเป็นจริง (Kaushik, 1990) การเก็บมูลสามารถเก็บได้จากตัวสัตว์น้ำโดยตรง เก็บนอกตัวสัตว์น้ำ หรืออาจเก็บจากน้ำ ข้อดีและข้อเสียของวิธีการเก็บมูลแบบต่างๆ ขึ้นอยู่กับโอกาส และการนำไปใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของสัตว์น้ำ (Austreng, 1987) ปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อความน่าเชื่อถือของการประเมินประสิทธิภาพการย่อย คือ การสูญเสียสารอาหารจากมูลปลาก่อนมีการเก็บ จึงมีการพัฒนาวิธีการเก็บรวบรวมมูลขึ้น ซึ่งมีการทำงานต่างๆกัน แต่ละวิธีป้องกันไม่ให้สารอาหารในมูลละลายไปกับน้ำ โดยเก็บมูลทันที หลังจากที่สัตว์น้ำขับถ่าย ระหว่างเก็บรวบรวมต้องระวังไม่ให้มูลแตกและฟุ้งกระจาย Windell และคณะ (1978) พบว่า การเก็บมูล

ล่าช้า โดยทิ้งให้มูลแช่อยู่ในน้ำนาน 1 ชั่วโมง ทำให้โปรตีนและไขมันในมูลหายไป 12 % และ 4 % ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน และไขมันเพิ่มขึ้น 10 % และ 3.7 % ตามลำดับ ถ้าปล่อยให้มูลแช่อยู่ในน้ำนาน 16 ชั่วโมง แม้ว่าโปรตีนจะเหลือเท่าเดิม แต่ไขมันในมูลหายไป 9.8 % ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยไขมันมีค่าเพิ่มขึ้น 8.2 % Lee (1997) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในปลาโกเรียน ร็อกฟิช (Korean rockfish, *Sebastes schlegeli*) วัยอ่อนและโตเต็มวัย โดยเปรียบเทียบวิธีการเก็บมูลปลา 3 วิธี คือวิธีตัดลำไส้ วิธีการรีด และการใช้เครื่องเก็บมูล ที่สร้างติดอยู่กับตู้เลี้ยงปลา (วิธี decantation) จากการทดลอง ขนาดของปลาไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหาร แต่วิธีการเก็บมูลส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหาร พบว่าวิธีรีด และการใช้เครื่องเก็บมูล มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับวิธีตัดลำไส้ ประสิทธิภาพการย่อยวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน และพลังงาน ของปลาวัยอ่อนและปลาโตเต็มวัย ที่ใช้เครื่องเก็บมูลมีค่าสูงที่สุดในปลาวัยอ่อนมีค่า 58 %, 93 % , 94 % และ 79 % ตามลำดับ และปลาโตเต็มวัยมีค่า 61 %, 94 %, 96 %และ 80 % ตามลำดับ สรุปได้ว่าการเก็บมูลด้วยวิธีรีด และการใช้เครื่องเก็บมูลมีความเหมาะสมกับปลาชนิดนี้ Storebakken และคณะ (1998) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในปลาแอตแลนติกแซลมอน โดยเปรียบเทียบวิธีการเก็บรวบรวมมูลปลา 3 วิธี คือ วิธีการรีด วิธีใช้เครื่องมือแยกมูลออกจากน้ำโดยการผ่านตาข่ายตาถี่ และวิธีตัดลำไส้ จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการย่อยวัตถุแห้ง และโปรตีนโดยใช้วิธีผ่านตาข่ายตาถี่มีค่าสูงที่สุด มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ 2 วิธี

3.3 การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยอาหารในปลา

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญและปลูกกันมากทางภาคใต้ของประเทศไทย ผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมสกัด (หีบ) น้ำมัน ได้กากปาล์มน้ำมัน และกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน ซึ่งเป็นวัสดุเศษเหลือที่มีคุณค่าทางโภชนะสูงพอสมควร หาได้ง่าย และมีราคาถูก (สุดารัตน์, 2540) โดยกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันมีโปรตีนประมาณ 12-13 % เป็นโปรตีนที่มีคุณภาพดี แต่เยื่อใยค่อนข้างสูงคือประมาณ 14-16 % (เสาวนิต และคณะ, 2541) ถั่วเหลืองเป็นพืชเศษฐกิจที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่ออุตสาหกรรมน้ำมันพืช การสกัดน้ำมันจากถั่วเหลืองได้ผลผลิตคือน้ำมัน และกากถั่วเหลือง ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณมากและมีบทบาทสูงในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (พิบูลย์, 2538) กากถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนจากพืชที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากมีกรดอะมิโนที่จำเป็นในปริมาณที่เพียงพอกับความต้องการ

สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์น้ำ (Carter and Hauler, 2000) เนื่องจากวัตถุดิบพืชดังกล่าวมีราคาถูก และปริมาณมาก แต่การใช้มากเกินไปทำให้การเจริญเติบโตลดลง การใช้วัตถุดิบพืชในอาหารสัตว์น้ำ ควรพิจารณาถึงประสิทธิภาพการย่อย

โครมิกออกไซด์ นำมาใช้เป็นครั้งแรกโดย Edin ในปี 1918 โดยใช้เป็นตัวบ่งชี้ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในสัตว์เคี้ยวเอื้อง ต่อมาในปี 1960 Nose ใช้โครมิกออกไซด์ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในปลา ตั้งแต่นั้นมาก็มีการใช้กันอย่างกว้างขวาง (Storebakken, *et al.* 1998) Sullivan และ Reigh (1995) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบอาหาร ในปลาสไตรป์บาสส์ลูกผสม (hybrid striped bass, *Morone saxatilis* × *Morone chrysops*) อาหารทดลอง ประกอบด้วยอาหารสูตรอ้างอิง 70 % กับวัตถุดิบที่นำมาทดสอบ 30 % ใช้โครมิกออกไซด์ 1 % เป็นตัวบ่งชี้ เก็บรวบรวมมูลด้วยวิธีรีด จากการทดลอง พบว่าประสิทธิการย่อยวัตถุแห้ง และพลังงานในปลาที่ได้รับอาหารที่มีปลาป่น (menhaden fish meal) มีค่าสูงที่สุดคือ 83.74±4.21 % และ 95.56± 5.09 % ตามลำดับ Gaylord และ Gatlin III (1996) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบอาหารต่างชนิดกันในปลาเรดดรัม (red drum, *Sciaenops ocellatus*) อาหารทดลองประกอบด้วยอาหารสูตรอ้างอิง 70 % กับวัตถุดิบพืชที่ต้องการทดสอบ 30 % ใช้โคมิกออกไซด์ 1 % เป็นตัวบ่งชี้ เก็บรวบรวมมูลด้วยวิธีรีด ผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลาที่ได้รับแป้งสาลี (wheat) มีค่าสูงสุดคือ 96.8 % McGoogan และ Reigh (1996) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบอาหารในปลาเรดดรัม อาหารทดลองประกอบด้วยอาหารสูตรอ้างอิง 70 % รวมกับวัตถุดิบที่นำมาทดสอบ 30 % ตัวบ่งชี้ที่ใช้คือโครมิกออกไซด์ 1 % รวบรวมมูลปลาด้วยวิธีรีด ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนจะมีค่าสูง เมื่อปลาได้รับอาหารทดลองที่มีโปรตีนสูงและเยื่อใยต่ำ คือปลาป่นมีประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนสูงที่สุด 76.79 % การทดลองของ Erfanullah และ Jafri (1998) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตในปลาคาร์ปอินเดีย (Indian major carp) 3 ชนิดคือ แคตลา (catla, *Catla catla*), มิลเกิ้ล (mrigal, *Cirrhinus mrigala*) และโรฮู้ (rohu, *Labeo rohita*) อาหารทดลอง ประกอบด้วยอาหารสูตรอ้างอิง 70 % กับวัตถุดิบ 30 % ใช้โครมิกออกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ เก็บรวบรวมมูลด้วยวิธีกาลักน้ำ ผลการทดลองพบว่า ปลาทั้ง 3 ชนิดที่ได้รับอาหารทดลองที่มีข้าวโพดเหลืองสุก และแป้งมันฝรั่งสุก มีค่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนและไขมันสูงที่สุด Omoregie (2001) ศึกษาการใช้ประโยชน์จากเม็ดมะม่วง (mango seeds) และกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน (palm kernal meal) ในปลายี่สก (*Labeo senegalensis)*

ระดับวัตถุดิบอาหารที่ศึกษาคือ 0 % (ชุดควบคุม) 10 %, 20 % และ 30 % ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นในปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับปลาที่ได้รับกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน 10 % Lee (2002) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบอาหารในปลาโกเรียน ร็อกฟิช ขนาด 30 กรัม และ 300 กรัม ใช้โคมิกออกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ อาหารทดลองประกอบด้วย อาหารสูตรอ้างอิง 70 % กับวัตถุดิบพืชที่ทดสอบอีก 30 % เก็บรวบรวมมูลปลาโดยใช้ท่อที่ติดอยู่กับถังตกตะกอน ผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลาขนาด 30 กรัม ที่ได้รับปลาป่นขาว (white fish meal) ปลาแองโชวี (anchovy) และแป้งสาลี มีค่าสูงที่สุดคือ 95 %, 95 % และ 95 % ตามลำดับ ในปลาขนาด 300 กรัม ที่ได้รับปลาแองโชวี คอร์น กลูเตน มีล (corn gluten meal) แป้งสาลี และเนื้อ (meat meal) มีค่าสูงที่สุดคือ 92 %, 92 %, 92 % และ 90 % ตามลำดับ Hanley (1987) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบอาหารในปลานิลขนาด 33.7 $\pm$ 1.5 กรัม ใช้โครมิกออกไซด์ 0.5 % เป็นตัวบ่งชี้ เก็บรวบรวมมูลด้วยวิธีกาลักน้ำ ผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลาที่ได้รับอาหารทดลองที่มีกากถั่วเหลืองมีค่าสูงที่สุดคือ 91 % Omoregie และ Ogbemudia (1993) ศึกษาผลของการแทนที่ปลาป่นด้วยกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันในปลานิลขนาด 2.57 กรัม ผลการทดลองพบว่า ปลาที่ได้รับกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน 15 % และปลาป่น 25 % (มีโปรตีน 28.56 % และเยื่อใย 13.49 %) มีการเจริญเติบโตดีที่สุด ในปลาที่ได้รับกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน 30 % และปลาป่น 10 % (มีโปรตีน 27.86 % และเยื่อใย 18.99 %) มีการเจริญเติบโตต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่า ระดับกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันที่เพิ่มขึ้น ทำให้เยื่อใยในอาหารเพิ่มขึ้นส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลง Sintayehu และคณะ (1996) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยในปลานิลขนาด 64$\pm$1.0 – 93$\pm$5.0 กรัม ใช้เถ้าที่ไม่ละลายในกรด (HCl-insoluble ash) เป็นตัวบ่งชี้ วัตถุดิบที่นำมาทดสอบมี 3 ชนิด คือกากถั่วเหลือง (soybean meal) เมล็ดฝ้าย (cottonseed meal) และเมล็ดทานตะวัน (sunflower seed meal) อาหารทดลองมีโปรตีนและพลังงานเท่ากันทุกสูตร ผลการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลาที่ได้รับกากถั่วเหลืองมีค่าสูงที่สุดคือ 93 % รองลงมาคือเมล็ดทานตะวัน 89.8 % และต่ำที่สุดในเมล็ดฝ้าย 79.4 % ประสิทธิภาพการย่อยไขมันในปลาที่ได้รับกากถั่วเหลืองมีค่าสูงที่สุดคือ 93 % รองลงมาคือเมล็ดฝ้าย 89.8 % และต่ำที่สุดในเมล็ดทานตะวัน 79.4 % ประสิทธิภาพการย่อยพลังงานในปลาที่ได้รับกากถั่วเหลืองมีค่าสูงที่สุดคือ 77.2 % รองลงมาคือเมล็ดฝ้าย 57.9 % และต่ำที่สุดในเมล็ดทานตะวัน 49.3 % Degani และคณะ (1997) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อย

โปรตีนและคาร์โบไฮเดรต ในปลานิลลูกผสมโตเต็มวัย (*Oreochromis aureus* × *O. niloticus*) ที่ได้รับวัตถุดิบต่างชนิดกัน ใช้โครมิกออกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ เก็บมูลปลาด้วยวิธีรีด อาหารทดลอง ประกอบด้วยอาหารสูตรอ้างอิง 50 % รวมกับวัตถุดิบ 50 % ผลการทดลอง พบว่าปลาที่ได้รับกากถั่วเหลืองมีประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนสูงที่สุดคือ 95 % และปลาที่ได้รับแป้งสาลี (wheat flour) มีประสิทธิภาพการย่อยคาร์โบไฮเดรตสูงที่สุดคือ 93 % Absalom และคณะ (1999) ศึกษาผลของถั่ว (phaseolus vulgaris meal) ต่อการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลานิล ระดับถั่วที่ใช้คือ 0 % (ชุดควบคุม), 20 %, 40 % และ 60 % ผลการทดลองพบว่า น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของปลาที่ได้รับถั่ว 0 % มีค่าสูงที่สุดคือ 92.02 % รองลงมาคือที่ระดับ 60 % มีค่าเท่ากับ 71.22 % ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนของปลาที่ได้รับถั่วที่ระดับ 0 % และ 60 % มีค่าเท่ากับ 85.04 % และ 81.04 % ตามลำดับ แสดงว่าปลานิลสามารถใช้ถั่วได้ 60 % เป็นระดับที่ไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโต Degani และ Yehuda (1999) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลานิลลูกผสมโตเต็มวัย วัตถุดิบพืชที่นำมาทดสอบมี 3 ชนิด คือ เมล็ดดอกทานตะวัน เรพซีด (rapeseed) และเมล็ดฝ้าย ใช้โครมิกออกไซด์เป็นตัวบ่งชี้ เก็บรวบรวมมูลปลาด้วยวิธีรีด อาหารทดลอง ประกอบด้วยอาหารสูตรอ้างอิง 52.5 % กับ วัตถุดิบพืชอีก 47.5 % ผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนในปลาที่ได้รับเรพซีดมีค่าสูงที่สุดคือ 86 % Furuya และคณะ (1999) ศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน และกรดอะมิโนในปลานิลขนาด 25.24±3.88 กรัม วัตถุดิบที่ใช้คือ คาโนลา (canola) ผลการทดลอง พบว่าประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนเท่ากับ 86.12 % และประสิทธิภาพการย่อยกรดอะมิโนรวมเท่ากับ 87.83 % แสดงให้เห็นว่าสามารถนำคาโนลาเป็นส่วนผสมในอาหารที่ใช้เลี้ยงปลานิลได้ Lee และ Wisner (2001) ศึกษาการเจริญเติบโตในปลานิลที่ได้รับเมล็ดฝ้าย โดยแทนที่ปลาป่นด้วยเมล็ดฝ้ายที่ระดับ 0 %, 25 %, 50 %, 75 % และ 100 % พบว่าการแทนที่ปลาป่นด้วยเมล็ดฝ้าย 50 % ทำให้การเจริญเติบโตลดลง แสดงว่าสามารถทดแทนปลาป่นด้วยเมล็ดฝ้ายในอาหารปลานิลได้ไม่เกิน 50 %

4. ปลานิล

4.1 ชีววิทยาของปลานิล

อนุกรมวิธานของปลานิลจัดจำแนกโดย Trewavas (1982)

Phylum Vertebrata

Class Osteichthyes

Order Perciformes

Family Cichlidae

Genus *Oreochromis*

Species *niloticus*

ปลาในตระกูลปลานิล (Tilapia specics) ต้นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟิกา มีการนำไปเลี้ยงในประเทศต่างๆทั่วโลก โดยมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* Linn. ชื่อสามัญ Nile tilapia เป็นปลาน้ำจืดที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจจัดอยู่ในวงศ์เดียวกับปลาหมอเทศ ริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน มีฟันบริเวณขากรรไกร และคอหอยหลายขนาด ตั้งแต่ค่อนข้างหยาบจนถึงละเอียด กระดูกเหงือก (gill arch) มีซี่กรอง 15-27 อัน บริเวณแก้มมีเกล็ดทั้งหมด 4 แถว โดยเกล็ด 3 แถวแรกอยู่บริเวณแก้ม และอีกหนึ่งแถวอยู่เหนือเส้นข้างลำตัว ลำตัวสีน้ำตาลมีลายพาดขวาง 9-10 แถบ ครีบหลัง ครีบก้น และครีบหางมีจุดขาว มีเส้นสีดำตัดขวาง ครีบหลังมีอันเดียวประกอบด้วยก้านครีบแข็ง 15-18 อัน และก้านครีบอ่อน 12-14 อัน ครีบก้นมีก้านครีบแข็ง 3 อัน และก้านครีบอ่อน 9-10 อัน บนแถบเส้นข้างลำตัวมีเกล็ด 33 เกล็ด ด้านข้างมีเกล็ดตามแนวเฉียงจากตอนต้นของครีบหลังลงมาถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด กระดูกแก้มมีจุดสีเข้มหนึ่งจุด (มานพ และคณะ, 2536) ตามปกติปลานิลเพศผู้และเพศเมีย สังเกตจากลักษณะภายนอกจะคล้ายคลึงกัน ลักษณะรูปร่างเริ่มต่างกันเมื่อเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์ ปลาเพศผู้มักจะมีขนาดใหญ่กว่าเพศเมียในฤดูผสมพันธุ์ และมีสีสันสดใสกว่า (คีรี, 2543) ความแตกต่างระหว่างเพศปลาเห็นได้ชัดเจนจากลักษณะของติ่งเพศ โดยเพศเมียมีติ่งเพศปลายมน ช่องเปิดบนติ่งเพศมี 2 ช่อง คือช่องเปิดที่ปลายติ่งเป็นทางออกของปัสสาวะ ส่วนช่องเปิดตามขวางบริเวณกึ่งกลางของติ่งเพศเป็นทางออกของไข่ ส่วนเพศผู้มีติ่งเพศที่ยาวเรียวปลายแหลม ช่องเปิดมีเพียงช่องเดียวที่ปลายติ่ง เพศผู้ส่วนใหญ่บริเวณใต้คางจะมีสีคล้ำเป็นสีแดงอมม่วง เพศเมียส่วนใหญ่

บริเวณใต้คางเป็นสีเหลือง บางครั้งพบว่าเพศผู้บริเวณใต้คางมีสีเหลือง จึงไม่ควรใช้ลักษณะสีในการแยกเพศ (อุทัยรัตน์, 2539)

ปลานิลเจริญเติบโตเร็ว แข็งแรง อดทน ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมได้ดี อาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูงตามแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง ทะเลสาบ และแหล่งน้ำจืด (กรมประมง, 2541) กินอาหารได้ทุกชนิด จัดเป็นปลากินทั้งพืชและสัตว์ (omnivorous) ซากอินทรีย์ อนินทรีย์ที่เน่าเปื่อย แบคทีเรีย และพืชน้ำชนิดต่างๆ (Bowen, 1982) นิสัยกินอาหารในเวลากลางวันจะหยุดกินอาหารในเวลากลางคืน (Philippart and Ruwet, 1982) กินอาหารได้ทั้งบนผิวน้ำ กลางน้ำ และก้นบ่อ ทำให้กินอาหารจำพวกพรรณไม้น้ำ และอินทรีย์สารก้นบ่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ อาหารจะถูกบดให้มีขนาดเล็กลงโดยฟันในคอหอย (pharyngeal teeth) และส่งไปยังกระเพาะอาหารตอนต้น ซึ่งมีความพิเศษตรงที่น้ำย่อยมีความเป็นกรดมาก (Moriarty, 1973) ไม่มีกระเพาะแท้ แต่มีเนื้อเยื่อที่มีโครงสร้างคล้ายกระเพาะที่สามารถหลั่งน้ำย่อยเพื่อลดความเป็นกรดด่างระหว่างการย่อยได้ ทางเดินอาหารยาวประมาณ 5-7 เท่าของลำตัว ทำให้มีประสิทธิภาพในการย่อยและดูดซึมอาหาร รวมทั้งเป็นที่อาศัยของจุลินทรีย์บางชนิดที่ช่วยสังเคราะห์สารอาหาร (กรมประมง, 2541)

4.2 ชนิด และสายพันธุ์ของปลานิล

4.2.1 ชนิดปลานิล

ปลาในตระกูลปลานิลที่นำเข้าสู่ประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2492 ถึง 2523 มีทั้งหมด 4 ชนิด คือ

4.2.1.1 *Oreochromis mossambicus* (Mozambique mouth breeder) มีชื่อเรียกในภาษาไทยว่า ปลาหมอเทศ เป็นปลาชนิดแรกที่ถูกนำจากปีนัง ประเทศมาเลเซีย เข้าสู่ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2492 (สันทนา และ ทัศนีย์, 2525) สามารถอยู่ในน้ำที่มีระดับความเค็มได้แตกต่างมาก คือ ตั้งแต่น้ำจืดจนกระทั่งถึงน้ำกร่อย มีบทบาทสำคัญในการควบคุมพรรณไม้น้ำในบ่อ (บรรลือ, 2542)

4.2.1.2 *Sarotherondon melanotheron* หรือ ปลาหมอเทศข้างลาย เป็นปลาที่นำมาจากประเทศเบลเยี่ยมเข้าสู่ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2498 ชอบกินพืชเป็นอาหาร เจริญเติบโตช้า จึงไม่เป็นที่นิยม

4.2.1.3 *Oreochromis niloticus* (Nile tilapia Egyptian strain) เป็นปลาที่สมเด็จพระจักรพรรดิอากิฮิโต เมื่อครั้งดำรงพระอิสริยยศเป็นมกุฎราชกุมารแห่งญี่ปุ่น ทูลเกล้าถวายแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช ในปี พ.ศ. 2508 ทรงพระราชทานนามว่าปลานิล เป็นปลาที่เจริญเติบโตเร็ว กินอาหารทุกชนิด ตั้งแต่แพลงค์ตอน ตัวอ่อนแมลง และพรรณไม้น้ำ สามารถอยู่ในน้ำที่มีความเค็มสูงถึง 20 ส่วนในพันส่วน (ppt)

4.2.1.4 *Oreochromis aureus* (blue tilapia) เป็นปลาที่นำมาจากประเทศอิสราเอล เข้าสู่ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2523 มีชื่อเรียกในภาษาไทยว่า ปลานิลอิสราเอล เป็นปลาที่กินอาหารทุกชนิด หากินที่พื้นก้นบ่อ ปลาชนิดนี้นำเข้ามาเพื่อใช้ผลิตปลานิลลูกผสม โดยนำไปผสมกับแม่ปลานิล (*O. niloticus*) (เพ็ญพรรณ, 2543)

4.2.2 สายพันธุ์ปลานิล

ปลาในตระกูลปลานิลทั้ง 4 ชนิด ที่นำเข้ามาสู่ประเทศไทย ปลานิล และปลาหมอเทศเท่านั้น ที่มีบทบาทในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดของไทย โดยเฉพาะปลานิลได้รับการพัฒนาและปรับปรุงพันธุ์ จากสถาบันพัฒนาพันธุกรรมสัตว์น้ำ กรมประมง และหน่วยงานเอกชน ทำให้เกิดสายพันธุ์ใหม่ขึ้น ดังนี้

4.2.2.1 สายพันธุ์จิตรลดา 1 เป็นสายพันธุ์ที่ถูกปรับปรุงและพัฒนา จากปลานิลที่เลี้ยงอยู่ในพระตำหนักจิตรลดารโหฐานเป็นระยะเวลาถึง 7 ชั่วอายุ ได้สายพันธุ์ใหม่ที่มีอัตราการเจริญเติบโตเร็วกว่าสายพันธุ์เดิม ประมาณ 22 % (ยุพินท์ และ พันธ์ศักดิ์, 2543)

4.2.2.2 สายพันธุ์จิตรลดา 2 (genetical male tilapia; GMT) คือลูกปลาที่ผลิตจากพ่อพันธุ์ YY (บางที่เรียกว่าปลานิลซูเปอร์เมล) ซึ่งเป็นปลาที่ถูกเปลี่ยนแปลงโครโมโซมเพศให้เป็น YY แทนที่จะเป็น XY ตามปกติ เมื่อนำพ่อพันธุ์ YY นี้ไปผสมกับแม่ปลานิลทั่วไปก็น่าจะได้ลูกปลาเพศผู้ (XY) ทั้งหมด แต่ปรากฏว่าอัตราเพศผู้ของปลานิลสายพันธุ์จิตรลดา 2 นี้ให้ลูกปลาเพศผู้ประมาณ 96.5 % และหากจะให้ได้เพศผู้ทั้งหมดแม่ปลานิลจะต้องเป็นสายพันธุ์เดียวกับพ่อพันธุ์ (เพ็ญพรรณ, 2543)

4.2.2.3 สายพันธุ์จิตรลดา 3 (genetically improved farmed tilapia line; GIFT) เป็นปลาที่ถูกปรับปรุงจากการคัดพันธุ์ปลานิล 7 สายพันธุ์ ประกอบด้วยสายพันธุ์อียิปต์ กานา เคนยา เซเนกัล สิงคโปร์ อิสราเอล และไต้หวัน ของหน่วยงาน International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM) ประเทศฟิลิปปินส์ ประมาณ 5 ชั่วอายุ จึงนำเข้าสู่ประเทศไทย และมีการคัดพันธุ์ต่ออีก 2 ชั่วอายุ ปลาพันธุ์นี้มีหัวเล็ก ลำตัว

หนาและกว้าง เจริญเติบโตได้ขนาด 3-4 ตัวต่อกิโลกรัม ภายใน 6-8 เดือน ผลผลิตสูงกว่าปลานิลทั่วไปถึง 40 % (ยุพินท์ และ พันธ์ศักดิ์, 2543)

4.2.2.4 ปลานิลสีแดงสายพันธุ์ไทย เป็นลูกผสมระหว่างปลานิล (*Oreochromis niloticus*) และปลาหมอเทศ (*Oreochromis mossambicus)* มีลักษณะของปลานิลและปลาหมอเทศรวมกัน คือปากเฉียงขึ้นคล้ายปลาหมอเทศ ลักษณะทั่วไปคล้ายปลานิล เป็นปลาที่กินทั้งพืชและสัตว์ สามารถเลี้ยงได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำทะเล มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดีระหว่างความเค็ม 11-25 ส่วนในพันส่วน สีสันสวยงาม มีคุณค่าทางอาหาร และรสชาติดี (พรรณศรี, 2531)

4.2.2.5 สายพันธุ์ซีพี หรือสายพันธุ์ทับทิม เป็นปลานิลสีแดงที่บริษัทเจริญโภคภัณฑ์ (ซีพี) ทำการปรับปรุงพันธุ์โดยได้ปลาที่มีลำตัวกว้างและหนา มีความสามารถในการกินอาหาร จึงมีการเจริญเติบโตเร็ว สามารถทนความเค็มได้ตั้งแต่น้ำจืดไปจนถึงน้ำทะเล ความเค็มที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตคือ 15-20 ส่วนในพันส่วน แต่สามารถทนความเค็มได้ถึง 30 ส่วนในพันส่วน (Ritmontri, 2001) จึงสามารถนำไปเลี้ยงแทนกุ้งกุลาดำที่ล้มเหลว เพราะปัญหาโรคกุ้งที่เกิดจากสภาวะแวดล้อมเสื่อมโทรม และมีการนำปลานิลสายพันธุ์ซีพีมาเลี้ยงร่วมในนากุ้งกุลาดำระบบปิด เพื่อทำหน้าที่กำจัดพรรณไม้น้ำ การเลี้ยงปลานิลในน้ำเค็มหรือน้ำทะเลมีข้อดี คือปลาจะไม่ค่อยเป็นโรค จึงไม่ต้องใช้ยาปฏิชีวนะ และสารเคมีกำจัดโรค นอกจากนี้ในน้ำเค็มมีแพลงค์ตอนที่ทำให้เกิดปัญหาเรื่องกลิ่นสาบในเนื้อปลา (geosmin) น้อยหรือไม่มีเลย ปลาที่เลี้ยงในน้ำเค็มจึงเป็นเนื้อคุณภาพสูง รสชาติใกล้เคียงกับปลาทะเล ทำให้ขายได้ราคาดี (ยุพินท์, 2543) นอกจากนี้ปลาทับทิมมีโครงกระดูกเล็ก กล้ามเนื้อขาว และผิวหนังสีขาว เจริญเติบโตดีในสภาพการเลี้ยงที่ความหนาแน่นสูง จึงเหมาะกับการเลี้ยงในกระชัง ซึ่งจะให้ผลผลิตสูงถึง 25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ภายในระยะเวลาการเลี้ยงเพียง 3 เดือน (Ritmontri, 2001)

4.3 การผลิตปลานิลเพศผู้

เนื่องจากปลานิลเป็นปลาที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายทั้งตลาดภายในประเทศ และตลาดในต่างประเทศ เพื่อจะผลิตปลานิลให้เพียงพอต่อความต้องการของผู้บริโภค รูปแบบการเพาะเลี้ยงมีการพัฒนาไปสู่ระบบการเลี้ยงเชิงพาณิชย์ จากระบบการเลี้ยงแบบเดิม คือมีการเลี้ยงปลานิลเพศผู้รวมกับเพศเมีย ทำให้ประสบปัญหาความหนาแน่นของ

ลูกปลา และผลผลิตปลาที่ได้มีหลายขนาด เนื่องจากปลาเพศเมียสามารถวางไข่ได้ตั้งแต่อายุ 2 เดือน สามารถแพร่ขยายพันธุ์ได้เองตามธรรมชาติตลอดทั้งปี ทั้งในสภาพแวดล้อมที่เป็นบ่อดิน บ่อซีเมนต์ กระชัง และสภาพแหล่งน้ำจืดอื่นๆ จากการที่สามารถขยายพันธุ์ได้ตลอดปี ส่งผลให้ปลานิลเพศเมียใช้พลังงานเพื่อการพัฒนาเซลล์สืบพันธุ์มากกว่าใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้งต้องสูญเสียพลังงานไปในการอนุบาลลูกปลาโดยการอมไว้ในปากเป็นเวลาประมาณ 10 วัน แม่ปลาไม่ได้กินอาหารจึงทำให้น้ำหนักลด (มานพ และคณะ, 2536) เพื่อให้ระบบการเลี้ยงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การเลี้ยงปลานิลเพศผู้จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มผลผลิตทางการเลี้ยงได้ เพราะปลาเพศผู้เจริญเติบโตเร็ว ปลาที่ได้ที่มีขนาดใหญ่ใกล้เคียงกัน ปลามีขนาดต่างกันน้อยมาก และสามารถควบคุมระยะเวลาในการเลี้ยงได้อีกด้วย (วัชรินทร์ และไพบูลย์, 2545)

การผลิตปลานิลเพศผู้สามารถดำเนินการได้หลายวิธี

4.3.1 การคัดเลือกโดยดูจากลักษณะเพศภายนอก (manual sexing) แต่วิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมเพราะผู้คัดเลือกต้องมีความชำนาญและจำนวนปลาต้องมากพอ เนื่องจากสภาพปกติอัตราส่วนของปลาเพศผู้และเพศเมียจะมีสัดส่วนใกล้เคียงกัน อีกทั้งขนาดปลาที่สามารถเห็นความแตกต่างระหว่างเพศได้ชัดเจน ควรมีขนาดความยาวตั้งแต่ 12 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 50 กรัมขึ้นไป

4.3.2 การผสมข้ามสายพันธุ์ (hybridization) การใช้วิธีการผสมข้ามพันธุ์ ทั้งข้ามสกุล (genus) และชนิด (species) ในปลาบางชนิดสามารถเกิดลูกเป็นเพศเดียวกันได้ทั้งหมด สำหรับปลานิลการผสมข้ามสายพันธุ์ระหว่าง *Oreochromis niloticus* × *O. aureus* จะได้ลูกพันธุ์ที่มีเพศผู้ 100 % จากการปฏิบัติในประเทศอิสราเอล

4.3.3 การใช้ฮอร์โมนเพศ การแปลงเพศปลาโดยให้กินอาหารผสมฮอร์โมน 17- เมทธิลเทสโทสเตอร์โรน (17-methyltestosterone หรือ 17- MT) ความเข้มข้น 40-60 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เป็นระยะเวลานาน 28-30 วัน แต่ขั้นตอนการผลิตลูกปลาแปลงเพศเหล่านี้ค่อนข้างยุ่งยาก ต้องมีความรู้ความชำนาญเพียงพอ อีกทั้งอาจเป็นอันตรายต่อผู้ผลิตลูกพันธุ์ปลา นอกจากนั้นฮอร์โมน 17-เมทธิลเทสโทสเตอร์โรน ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ มีราคาแพง และเสื่อมคุณภาพได้ง่าย ในสภาพภูมิอากาศร้อนอย่างในประเทศไทย ทำให้ต้นทุนการผลิตปลาเพศผู้ในลักษณะนี้ค่อนข้างสูง และประสิทธิภาพการผลิตก็ไม่สม่ำเสมอ หากลูกปลากินอาหารผสมฮอร์โมนไม่ครบ ก็จะให้ผลผลิตเพศผู้ไม่ได้ 100 % อย่างไรก็ตามแม้ว่า

ฮอร์โมนเหล่านี้จะได้รับการยืนยันว่าไม่มีผลตกค้างในเนื้อปลาโดยเฉพาะในปลาที่มีขนาดจับขายได้ แต่ก็ยังมีผู้บริโภคบางส่วนที่ไม่ยอมบริโภคปลานิลที่ถูกเปลี่ยนเพศด้วยฮอร์โมนเหล่านี้

4.3.4 การผลิตปลานิลเพศผู้โดยทางอ้อม (indirect monosex production) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะผลิตปลานิลเพศผู้ทั้งหมด สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาฮอร์โมนอาจตกค้างในเนื้อและปัญหาประสิทธิภาพการผลิตปลาเพศผู้ที่ไม่สม่ำเสมอ การผลิตปลานิลเพศผู้โดยทางอ้อมทำได้โดยผลิตพ่อพันธุ์ปลานิลซูเปอร์เมล (supermale หรือ YY-male) ซึ่งมีโครโมโซมเพศเป็น YY นำพ่อพันธุ์ปลานิลซูเปอร์เมลเหล่านี้ไปผสมกับแม่พันธุ์ปลานิลปกติจะได้ลูกปลาที่เป็นเพศผู้ทั้งหมด เนื่องจากลูกปลาเพศผู้เหล่านี้เป็นปลาเพศผู้โดยพันธุกรรม (genetically male tilapia) มีโครโมโซมเพศเป็น XY จึงนิยมเรียกปลาเพศผู้เหล่านี้ว่า ปลานิลเพศผู้ GMT สามารถอธิบายได้ดังนี้ และมีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 7

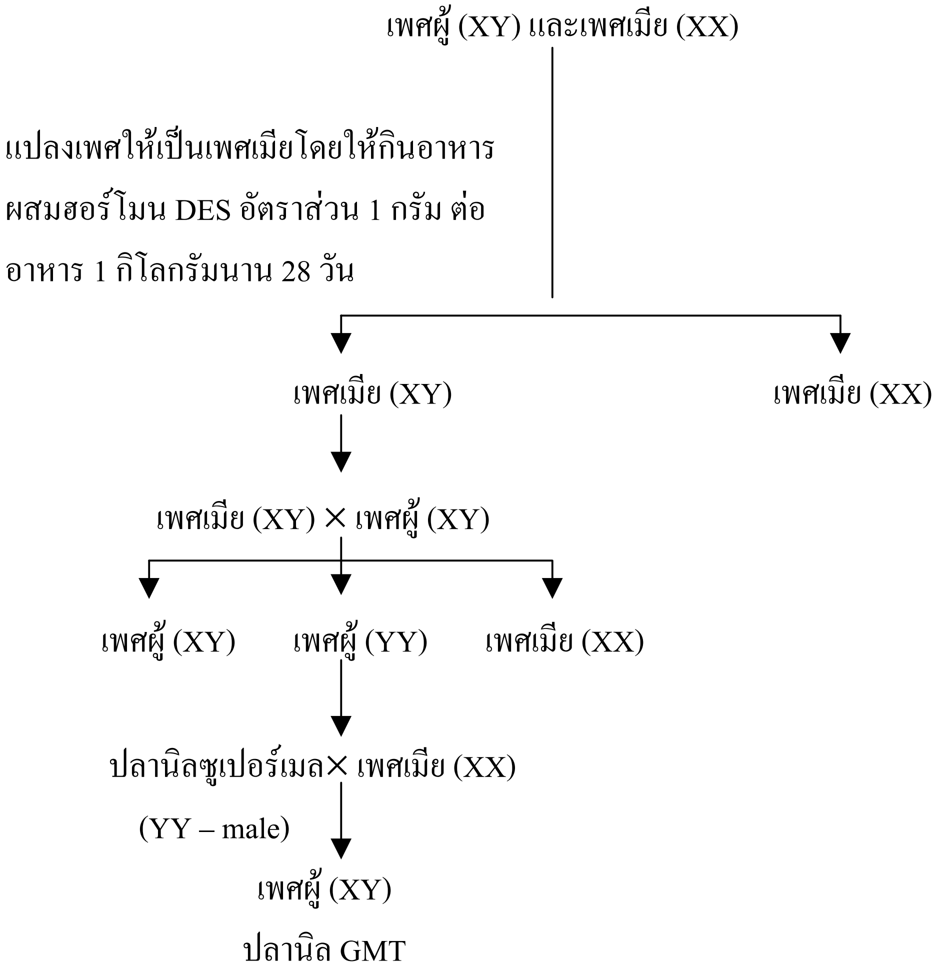
4.3.4.1 รวบรวมลูกปลาจากปากแม่ปลามาอนุบาลจนถุงไข่แดงยุบ และเริ่มกินอาหาร

4.3.4.2 เตรียมอาหารผสมฮอร์โมนไดเอทธิลสทิลเบสทรอล (diethylstilbestrol หรือ DES) อัตราส่วน 1 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ละลายฮอร์โมนในสารละลายเอทธิลแอลกอฮอล์ และคลุกกับอาหารให้ทั่ว ให้ลูกปลากินนาน 28 วัน จะได้ลูกปลาเพศเมียที่มีโครโมโซม 2 แบบคือ XX และ XY

4.3.4.3 ตรวจสอบว่าปลาเพศเมียตัวใดเป็นเพศเมียที่มีโครโมโซม XY โดยเลี้ยงปลาเหล่านั้นจนเป็นแม่พันธุ์ แล้วนำมาผสมกับปลาเพศผู้ปกติที่มีโครโมโซมเพศเป็น XY ถ้าแม่ปลาตัวใดผลิตลูกปลาที่มีอัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมีย เท่ากับ 3 ต่อ 1 แสดงว่ามีโครโมโซมเพศเป็น XY

4.3.4.4 นำปลาเพศเมียที่มีโครโมโซม XY ดังกล่าวมาผสมกับปลาเพศผู้ปกติ จะได้ลูกปลาเพศเมียต่อเพศผู้ เท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยในลูกปลาเพศผู้เหล่านี้จะมี 1 ส่วนที่มีโครโมโซมเพศเป็น YY

4.3.4.5 ตรวจสอบปลาเพศผู้ที่มีโครโมโซม YY โดยนำไปผสมกับปลาเพศเมียปกติ ถ้าลูกปลาเป็นเพศผู้ทั้งหมด แสดงว่ามีโครโมโซมเพศเป็น YY เป็นปลานิลซูเปอร์เมล เมื่อนำมาผสมกับปลาเพศเมียปกติ จะได้ปลาเพศผู้ GMT หรือที่เรียกว่าเป็นปลานิลสายพันธุ์จิตรลดา 2 การเลี้ยงปลานิลเพศผู้ GMT ให้ผลผลิตสูงกว่าการเลี้ยงปลานิลรวมเพศ 28.25 % (นวลมณี และ พุทธรัตน์, 2538)



ภาพที่ 7 แผนผังการผลิตปลานิลซูเปอร์เมลและปลานิล GMT
ที่มา: นวลมณี และ พุทธรัตน์ (2538)

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของเอนไซม์ย่อยเยื่อใยต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหาร การเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหาร ในปลานิลดำแปลงเพศน้ำหนักเฉลี่ย 4-5 กรัม ปลานิลดำแปลงเพศน้ำหนักเฉลี่ย 150-200 กรัม และปลานิลแดงแปลงเพศน้ำหนักเฉลี่ย 150-200 กรัม

2. เพื่อศึกษาระดับของเอนไซม์ย่อยเยื่อใยต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหาร ในวัตถุดิบพืช 2 ชนิด คือกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน และกากถั่วเหลือง