บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำมันและไขมัน (Oils and Fats)

น้ำมันและไขมันเป็นเอสเทอร์ที่เกิดจากกรดไขมันทำปฏิกิริยากับกลีเซอรอล น้ำมันที่เกิดจากกรดไขมันเข้าทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิล (-OH) ในกลีเซอรอลทั้ง 3 กลุ่ม เรียกว่า Triglyceride น้ำมันบางชนิดเกิดจากกรดไขมันเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในกลีเซอรอล 1 หมู่ หรือ 2 หมู่ เรียกว่า Monoglyceride และ Diglyceride ตามลำดับ แต่น้ำมันที่พบมากที่สุดในธรรมชาติเป็น Triglyceride ถ้ามีสถานะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เรียกว่า ไขมัน (Fat) แต่หากมีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องจะเรียกว่า น้ำมัน (Oil) ทั้งไขมันและน้ำมันมีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) คือไม่ชอบน้ำ

กรดไขมันเป็นกรดอินทรีย์สายตรงที่มีหมู่คาร์บอกซิล 1 หมู่ (Straight chain aliphatic monocarboxylic acid) มีสูตรโมเลกุลเป็น R-COOH โดย R- คือ หมู่แอลคิล (Alkyl) ในโมเลกุลของกรดไขมัน มีสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) แต่จะละลายได้ในน้ำมันและตัวทำละลายอินทรีย์ชนิดที่ไม่มีโพลาร์ และหมู่คาร์บอกซิล (-COOH) มีสมบัติชอบน้ำ (Hydrophilic) สามารถแตกตัวออกได้เป็นประจุลบ (Anionic carboxylate) จึงทำให้โมเลกุลของกรดไขมันมีทั้งส่วนที่ละลายได้ในน้ำและน้ำมัน ดังสมการ

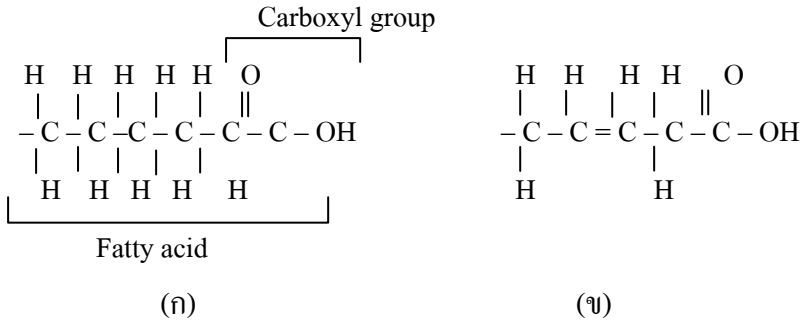
$$RCOOH \longrightarrow RCOO^- + H^+$$

กรดไขมันที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่ มีจำนวนคาร์บอน 4-24 อะตอม ซึ่งอาจเป็นโซ่ยาวที่อิ่มตัว ซึ่งมักพบจำนวนคาร์บอนอะตอมเป็นเลขคู่ หรือเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว โดยมีพันธะคู่อย่างน้อย 1 คู่ กรดไขมันแต่ละชนิดมีความยาวของสายไฮโดรคาร์บอน ตำแหน่ง และจำนวนของพันธะไม่อิ่มตัวไม่เท่ากัน จึงจำแนกออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

2.1.1 กรดไขมันอิ่มตัว (Saturated fatty acid) คือ กรดไขมันชนิดนี้มีสูตรทั่วไปเป็น $C_nH_2O_2$ หรือ $C_nH_{2n+1}COOH$ เป็นกรดไขมันที่ในโมเลกุลมีจำนวนไฮโดรเจนอะตอมอยู่เต็มที่ไม่สามารถรับไฮโดรเจนอะตอมได้อีก หรือพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอมเป็นพันธะเดี่ยวทั้งหมด (ภาพที่ 2.1 ก) กรดไขมันชนิดอิ่มตัวที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยที่สุด คือ กรดบิวทิริก (คาร์บอน 4 อะตอม) เป็นกรดไขมันที่ละลายได้ดีในน้ำและระเหยได้ง่าย กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 6-10 อะตอม ละลายน้ำได้เพียงเล็กน้อยและยังระเหยได้ ส่วนกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่

12 อะตอม ขึ้นไปไม่ละลายน้ำ กรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนในโมเลกุลต่ำกว่า 10 อะตอม จะเป็นของเหลวที่อุณภูมิห้อง ส่วนกรดไขมันที่มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 10 อะตอม ขึ้นไปจะเป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง

2.1.2 กรดไขมันไม่อิ่มตัว (Unsaturated fatty acid) คือ กรดไขมันที่โมเลกุลไฮโดรเจนอะตอมน้อยกว่าปกติ หรือพันธะในโมเลกุลระหว่างคาร์บอนอะตอมมีพันธะคู่อยู่อย่างน้อย 1 พันธะ กรดไขมันนี้มีจำนวนไฮโดรเจนอะตอมไม่เป็นไปตามสูตร $C_nH_{2n+1}COOH$ (ภาพที่ 2.1 ข)

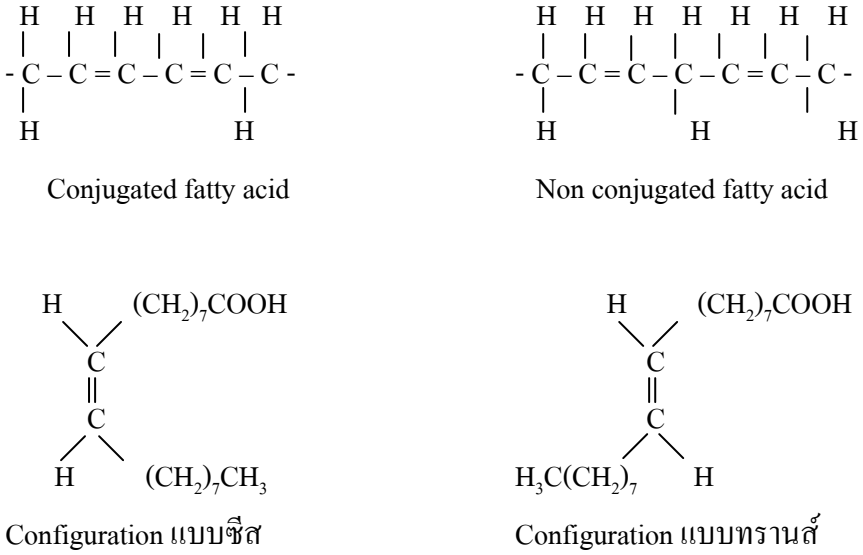


รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างของกรดไขมัน
(ก) กรดไขมันอิ่มตัว
(ข) กรดไขมันไม่อิ่มตัว
ที่มา : Stauffer (1996)

กรดไขมันที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่มีจำนวนคาร์บอนเป็นเลขคู่ คือ ประมาณ 14-22 อะตอม ที่พบมากเป็นกรดไขมันที่มีคาร์บอน 16 หรือ 18 กรดไขมันอิ่มตัวที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ คือ กรดพาล์มิติก (Palmitic acid, C16:0) และกรดลอริก (Lauric acid, C12:0) ตามลำดับ ส่วนกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่พบมากที่สุด คือ กรดไลโนลีอิก (Linoleic acid, C18:2)

ระดับความไม่อิ่มตัวขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะคู่ในสายไฮโดรคาร์บอนของกรดไขมันนั้น กรดไขมันไม่อิ่มตัวมีเสถียรภาพต่ำและเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างรวดเร็ว ในกรดไขมันที่มีจำนวนพันธะคู่เพียงหนึ่งพันธะ (Mono-unsaturated fatty acid) จะไม่มีบทบาทอะไรกับปริมาณคอเลส เทอรอลในเลือด แต่ถ้าเป็นกรดไขมันชนิดที่มีพันธะคู่มากกว่า 2 พันธะ จัดเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง (Polyunsaturated fatty acid) หากพันธะคู่ในสายไฮโดรคาร์บอนนั้นถูกคั่นด้วยคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมขึ้นไป จัดเป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวแบบ Non conjugated และถ้า

พันธะคู่ถูกคั่นด้วยคาร์บอนเพียงหนึ่งอะตอมอย่างสม่ำเสมอในสายคาร์บอน จัดเป็น Conjugated fatty acid ส่วน Configuration ของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นไปได้ทั้งแบบซีสและทรานส์ (ภาพที่ 2.2)



รูปที่ 2.2 ลักษณะการจัดเรียงตัวของพันธะภายในสายไฮโดรคาร์บอนของกรดไม่อิ่มตัว
ที่มา : อาภัสสรา (2537)

กรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูง มีความสำคัญต่อร่างกายมากที่สุด คือช่วยลดปริมาณคอเลสเทอรอลในเลือด ช่วยการทำงานของอวัยวะสำคัญของร่างกาย ช่วยสร้างเซลล์ขึ้นใหม่ เป็นกรดไขมันที่ส่วนใหญ่ได้จากพืชและปลา กรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงที่สำคัญและจำเป็นต่อร่างกาย คือ กรดไลโนลีอิก กรดไลโนลีนิก (Linolenic acid, C18:3) และกรดอราชิโดนิก (Arachidonic acid, C20:4) (สมพงศ์, 2536)

2.2 มาตรฐานน้ำมันและไขมันบริโภค

การผลิตน้ำมันและไขมันบริโภค เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญยิ่งอย่างหนึ่งของประเทศ กระทรวงอุตสาหกรรมจึงได้มีการกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมเพื่อเป็นแนวทางในการผลิต และเพื่อประโยชน์ของผู้บริโภค แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันและไขมันบริโภคธรรมชาติ และน้ำมันและไขมันบริโภครีไฟน์ ซึ่งมีคุณลักษณะที่ต้องการดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่ามาตรฐานของน้ำมันและไขมันบริโภค

คุณลักษณะ	ค่ามาตรฐาน
สี	เป็นไปตามลักษณะเฉพาะของน้ำมันหรือไขมันชนิดนั้นๆ
กลิ่นและรส	มีกลิ่นและรสตามลักษณะเฉพาะของน้ำมันและไขมันชนิดนั้นๆ และต้องไม่มีกลิ่นหืน
ค่าของกรด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อ 1 กรัมของน้ำมันหรือไขมัน)	1. น้ำมันและไขมันบริโภคธรรมชาติ ต้องไม่เกิน 4.0 2. น้ำมันและไขมันบริโภคชนิดรีไฟน์ ต้องไม่เกิน 0.6
ค่าเปอร์ออกไซด์ (มิลลิกรัมสมมูลต่อ 1 กิโลกรัมของน้ำมันหรือไขมัน)	ไม่เกิน 10

ที่มา : มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม น้ำมันและไขมันบริโภค (มอก. 47-2516) (2528)

สำหรับน้ำมันปาล์ม (Palm oil) เป็นน้ำมันชนิดหนึ่งที่นิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะตามร้านค้าทั่วไป ซึ่งมักใช้สำหรับผัดหรือทอดอาหาร กระทรวงสาธารณสุขและมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ได้กำหนดคุณภาพหรือมาตรฐานน้ำมันปาล์มที่ผลิตหรือนำเข้าสำหรับจำหน่าย เพื่อบริโภคหรือปรุงแต่งอาหาร ไว้ดังตารางที่ 2.2 และ 2.3

ตารางที่ 2.2 คุณภาพหรือมาตรฐานของน้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์มที่ผลิตหรือนำเข้าสำหรับจำหน่ายเพื่อบริโภคหรือใช้ปรุงแต่งอาหาร

ตัวบ่งชี้คุณภาพ	ค่ามาตรฐาน
ค่าของกรด (Acid value)	ไม่เกิน 10 มิลลกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำมัน 1 กรัม สำหรับน้ำมันปาล์มที่ทำโดยวิธีธรรมชาติ และไม่เกิน 0.6 มิลลกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำมัน 1 กรัม สำหรับน้ำมันปาล์มที่ทำโดยวิธีผ่านกรรมวิธี
ค่าเพอร์ออกไซด์ (Peroxide value)	ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมสมมูลย์ต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม
ค่าสปอนนิฟิเคชั่น (Saponification number)	ระหว่าง 190 ถึง 209 มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม
ค่าไอโอดีน (Iodine Number)	- ระหว่าง 50-56 สำหรับน้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์ม - ไม่น้อยกว่า 55 สำหรับปาล์มโอลีอินจากเนื้อปาล์ม - ไม่เกิน 48 สำหรับน้ำมันปาล์มสเตียรินจากเนื้อปาล์ม

ที่มา : โครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กตามพระราชดำริ (2531)

ตารางที่ 2.3 ส่วนประกอบของกรดไขมันเป็นร้อยละของกรดไขมันทั้งหมด ในน้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์ม

ชนิดกรดไขมัน	เกณฑ์ที่กำหนด
กรดลอริก (Lauric acid)	ไม่เกิน 1.2
กรดไมริสติก (Myristic acid)	0.5 ถึง 5.9
กรดพาล์มิติก (Palmitic acid)	32 ถึง 59
กรดพาล์มิโตลีอิก (Palmitoleic acid)	น้อยกว่า 0.6
กรดสเตียริก (Stearic acid)	1.5 ถึง 8.0
กรดโอลีอิก (Oleic acid)	27 ถึง 52
กรดไลโนลีอิก (Linoleic acid)	5.0 ถึง 14
กรดไลโนลีนิก (Linolenic acid)	ไม่เกิน 1.5
กรดอราชิดิก (Arachidic acid)	ไม่เกิน 1.0

ที่มา : โครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กตามพระราชดำริ (2531) และมาตรฐานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม (มอก.288-2535) (2535)

จากข้อมูลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณของกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันปาล์ม พบว่ามีสัดส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวกับกรดไขมันไม่อิ่มตัวดังตารางที่ 2.4 ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ของปราณี (2540) ซึ่งพบว่าในน้ำมันปาล์มประกอบด้วย กรดพาล์มิติก ปริมาณสูงสุดร้อยละ 38-52 ของกรดไขมันทั้งหมด รองลงมาคือ กรดไขมันไม่อิ่มตัว ได้แก่ กรดโอลีอิก ร้อยละ 34-46 และกรดไลโนลีอิกร้อยละ 8-17 ของกรดไขมันทั้งหมด และพบกรดไขมันชนิดอิ่มตัวพวกกรดสเตียริก (Stearic acid, C18:0) กรดไมริสติก (Myristic acid C14:0), กรดอราชิดิก (Arachidic acid, C20:0) และกรดลอริก กับกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวพวกกรดพาล์มิโตลีอิก (Palmitoleic acid, C16:1) และไลโนลีอิก อีกในปริมาณเล็กน้อยรวมกันประมาณร้อยละ 10 ของกรดไขมันทั้งหมด

ตารางที่ 2.4 ชนิดและปริมาณเป็นร้อยละของกรดไขมันในน้ำมันปาล์ม

ชนิดของกรดไขมันอิ่มตัว	ปริมาณของกรดไขมัน	ชนิดของกรดไขมันไม่อิ่มตัว	ปริมาณของกรดไขมัน
กรดไมริสติก (Myristic acid, C14:0)	2	กรดโอลีอิก (Oleic acid, C18:1)	39
กรดพาล์มิติก (Palmitic acid, C16:0)	43	กรดไลโนลีอิก (Linoleic acid, C18:2)	9
กรดสเตียริก (Stearic acid, C18:0)	7	กรดไลโนลีนิก (Linolenic acid, C18:3)	เล็กน้อย
		กรดพาล์มิโตลีอิก (Palmitoleic acid, C16:1)	เล็กน้อย
รวม	52	รวม	48

ที่มา : ดัดแปลงจากโครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กตามพระราชดำริ (2531)

2.3 น้ำมันและไขมันปลา

น้ำมันและไขมันปลา เป็นส่วนที่มีอยู่ในเนื้อและเครื่องในปลา มักเป็นผลพลอยได้หรือของเหลือจากอุตสาหกรรมสัตว์น้ำ สามารถแยกน้ำมันปลาจากส่วนของเครื่องในและของเหลวที่ออกจากตัวปลาในช่วงของการให้ความร้อน การใช้ประโยชน์ ได้แก่ การใช้ทำสีทาบ้าน น้ำมันชักเงาและน้ำมันหล่อลื่น เป็นต้น ปัจจุบันได้มีการปรับปรุงกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเพื่อให้ได้น้ำมันปลาที่เหมาะสมต่อการใช้เป็นน้ำมันบริโภค และเป็นอาหารสัตว์ นอกจากนี้ ยังใช้ในอุตสาหกรรมยาและเครื่องสำอาง อุตสาหกรรมฟอกหนังเพื่อให้หนังนิ่ม ทำหมึกพิมพ์เพื่อช่วยให้หมึกติดทน เป็นต้น

ในตัวปลาจะมีน้ำมันร้อยละ 2-30 ขึ้นอยู่กับชนิดของปลา ในจำนวนนี้ร้อยละ 25 เป็นกรดไขมันอิ่มตัวและอีกร้อยละ 75 เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัว กรดไขมันไม่อิ่มตัวนี้ส่วนใหญ่เป็น Polyunsaturated fatty acid (PUFA) ซึ่งปลาจะได้รับจากแพลงค์ตอนและสิ่งมีชีวิตเล็กๆ ที่กินเป็นอาหาร โดยในแพลงค์ตอนจะประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีคาร์บอน 16 และ 18 อะตอม เมื่อสิ่งมีชีวิตเล็กๆ กินแพลงค์ตอนเข้าไปก็จะเปลี่ยนจำนวนคาร์บอนเป็น 20 และ 22 อะตอม ดังนั้นปลาที่กินสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ก็จะได้รับกรดไขมันชนิดนี้ไปด้วย (Vedelar, 1982 และ Swern, 1964 อ้างถึงใน ยุวเรศ, 2538) อย่างไรก็ตามกรดไขมันในตัวปลาอาจมีการแปรผันได้ตามชนิด อายุ ขนาด สภาพแวดล้อม และฤดูกาล เนื่องจากสิ่งเหล่านี้มีอิทธิพลต่ออาหารของปลาและการเปลี่ยนแปลง

ของกรดไขมันในตัวปลา (Enser, 1991) ปลาทะเลสามารถสังเคราะห์น้ำมันปลาได้เองจากสารตั้งต้น คือ แอลฟาไลโนลีนิก (Alpha linolenic acid; ALA, C18:3n3) ซึ่งมีคาร์บอนเป็นแกนโครงสร้างอยู่ 18 ตัว ใช้เอนไซม์ Elongase ทำให้ยาวขึ้นเป็นคาร์บอน 20 หรือ 22 ตัว และจากคาร์บอนไม่อิ่มตัว 3 คู่ ใช้เอนไซม์ Desaturase เพิ่มตำแหน่งคาร์บอนไม่อิ่มตัวให้เป็น 5 คู่ หรือ 6 คู่ ผลจากการสังเคราะห์ ALA คือ อีโคซาเพนทาโนอิก (Eicosapentanoic acid; EPA, C20:5) และต่อมา คือ โดโคซาเฮกซาโนอิก (Docosa hexanoic acid; DHA, C22:6) ซึ่งในความเป็นจริงในร่างกายคนเราเปลี่ยน ALA เป็น EPA และ DHA ได้ยากมาก ต้องได้รับจากอาหารเสริม (สมศักดิ์, 2551)

ไขมันและน้ำมันปลาจากโรงงานปลากระป๋อง เป็นส่วนที่ได้จากกระบวนการล้างปลา ซึ่งจะไหลออกมาพร้อมน้ำล้างและลงไปรวมกันในบ่อดักไขมันเพื่อกำจัดต่อไป แต่สำหรับไขมันและน้ำมันปลาที่มีการนำมาใช้ประโยชน์บ้างแล้ว มักได้จากวัสดุเศษเหลือพวกเศษชิ้นปลาประกอบด้วย หัว กระดูก และเศษเนื้อที่ติดหนัง นำไปผ่านกระบวนการต่างๆ เช่น การสกัดและการบีบจนได้น้ำมันปลาออกมา สำหรับน้ำมันปลาทูน่าส่วนใหญ่ประกอบด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน ω-3 PUFA ซึ่งเป็นกรดไขมันที่จำเป็นที่สำคัญได้แก่ EPA และ DHA แต่มีกรดไลโนลีอิกและกรดไลโนลีนิกในปริมาณน้อย สำหรับชนิดปลาที่โรงงานปลากระป๋องในเขตอุตสาหกรรมจังหวัดปัตตานีใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตนั้น พบว่าโรงงานแต่ละแห่งจะใช้ปลาต่างชนิดกัน เช่น ปลาทูแขก ปลาโอแถบ ปลาหวาย ปลาหลังเขียว ปลาตาโต เป็นต้น ซึ่งจากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการของปลาชนิดต่างๆ ที่เป็นปลาเศรษฐกิจที่พบในจังหวัดปัตตานี โดยพายัพ และคณะ (2541) พบว่าในเนื้อปลา มีทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัวเป็นองค์ประกอบ แต่ส่วนใหญ่มักพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่า ได้แก่ กรดพาล์มิโตลีอิก, กรดโอเลอิก, กรดไลโนเล-อิก, กรดไลโนเลนิก, กรดออกตะเดคะเททระอิโนอิก (Octadecatetraenoic acid, C18:4n3), กรดกาโดเลอิก (Gadoleic acid, C20:1), กรดอีรูซิก (Erucic acid, C22:1n9), กรดโดโคซะเฮกซะโนอิก และกรดอีโคซะเพนตะอิโนอิก ส่วนกรดไขมันอิ่มตัว ได้แก่ กรดพาล์มิติก พบมากในเนื้อปลาโอแถบประมาณร้อยละ 29.2 สอดคล้องกับรายงานของรอมลี (2550) ที่ทำการวิเคราะห์ปริมาณกรดไขมันในตัวอย่างปลาทะเลในจังหวัดปัตตานี 21 ชนิด ซึ่งพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่ากรดไขมันอิ่มตัวเช่นเดียวกัน

การนำน้ำมันปลามาใช้ในอาหารสัตว์เพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตนั้น ยังสามารถเพิ่มวิตามินเอและดีในอาหารด้วย นอกจากนี้ เพื่อเพิ่มปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนในน้ำมันปลาให้มาอยู่ในส่วนของเนื้อไก่ หรือไข่ไก่ให้สูงขึ้น (Pappas *et al*., 2006) และมีรายงานยืนยันว่า EPA เป็นส่วนสำคัญในการป้องกันและต่อต้านโรคหัวใจ เบาหวาน และโรคอื่น ๆ ที่มีส่วนสัมพันธ์กับกรดไขมันในเลือด ส่วน DHA มีรายงานผลงานวิจัยใหม่ๆ พบว่า ในเซลสมองของคนมี DHA อยู่

ซึ่งมีแนวโน้มว่าจะใช้ DHA ในการส่งเสริมการพัฒนาสมองของคนต่อไป (สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา, 2550)

น้ำมันหรือไขมันโดยทั่วไปสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงของกลิ่น รส ได้โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นในวัตถุดิบ ระหว่างขั้นตอนการผลิตและระหว่างการเก็บรักษาน้ำมันหรือไขมัน โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดจากผลของการดูแลรักษาคุณภาพเนื้อเยื่อไขมันก่อนจะได้รับความร้อนเพื่อสกัดไขมันออกมา โดยมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Shernin, 1990 อ้างถึงใน สมบัติ, 2541) สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชันเกิดจากเชื้อแบคทีเรียเอนไซม์และปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ (Sonttag, 1979) การวัดปริมาณออกซิเจนที่ถูกดูดซับในน้ำมันหรือไขมัน จะใช้ค่าเปอร์ออกไซด์ (Peroxide value) ซึ่งอัตราการดูดซับออกซิเจนของน้ำมันจะถูกเร่งด้วยความร้อนและสารโปรออกซิแดนซ์ อาจเกิดร่วมกับแสงที่สัมผัสกับน้ำมันหรือไขมัน จากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่ออายุการเก็บรักษาน้ำมันสัตว์และน้ำมันพืชที่ใช้สำหรับผลิตขนมเค้ก พบว่าอัตราการเกิดออกซิเดชันที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส มีค่าเป็น 2.5 เท่าของที่อุณหภูมิ 97.8 องศาเซลเซียส (Sonttag, 1979) ดังนั้น เพื่อป้องกันการเกิดกลิ่นหืนควรเก็บน้ำมันไว้ที่อุณหภูมิต่ำ สำหรับน้ำมันหรือไขมันปลาก็อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวที่มีพันธะคู่ เช่น กลิ่นคาวปลาเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของกรดไลโนเลอิกเปลี่ยนเป็น 2 tran, 4 cis, 7 cis-decatrienal (Mejiboom, 1972 อ้างถึงใน Sonttag, 1979) นอกจากนี้ กลิ่น รสที่ไม่ต้องการอาจเกิดจากสารประกอบอื่นที่ไม่ใช่ไตรกลีเซอไรด์ เช่น ในน้ำมันปลาที่มีฟอสโฟไลปิดตกค้างปริมาณเล็กน้อย เมื่ออยู่ในช่วงระหว่างการเก็บรักษา สารฟอสโฟไลปิดอาจปลดปล่อยกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงอย่างช้าๆ ร่วมกับสารโคลีนซึ่งเป็นองค์ประกอบของอนุมูลฟอสฟอริกปล่อยสารไตรเมทิลลามีนออกมา ทำให้เกิดกลิ่นรสที่ไม่ต้องการได้ (Stanby, 1990)

นอกจากนี้ การเสื่อมเสียของน้ำมันปลาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเอนไซม์ไลเปสและแบคทีเรียที่อยู่ในน้ำมัน ซึ่งสามารถไฮโดรไลซ์น้ำมันก่อให้เกิดกรดไขมันอิสระปริมาณมาก การเก็บรักษาน้ำมันให้มีความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 0.3 สามารถชะลอการเจริญของแบคทีเรียและทำให้กิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ไลเปสลดลง การให้ความร้อน 80-100 องศาเซลเซียส สามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเปส (Ockman, 1992 อ้างถึงใน นิสิทธิ์, 2543)

2.4 กากไขมันจากโรงงานปลากระป๋อง

กากไขมันที่ได้จากบ่อดักไขมันโรงงานปลากระป๋อง เป็นไขมันที่มาจากกระบวนการต่างๆ ภายในโรงงาน ซึ่งประกอบด้วยไขมันจากการทำความสะอาดวัตถุดิบ คือการล้างปลาเป็นหลัก นอกจากนี้ ยังมีส่วนของไขมันที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ประเภททอด

เกิดการหก หรือรั่วไหลออกมารวมเข้าสู่บ่อดักไขมันทั้งหมด ซึ่งในโรงงานปลากระป๋องทั่วไปที่มีการแยกน้ำนึ่งปลาออกจากน้ำเสียรวม จะมีมลสารที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ ได้แก่ โปรตีน ไขมันและน้ำมัน ปริมาณโปรตีนมีอยู่ประมาณ 12 กิโลกรัมต่อตันปลาดิบ และไขมันและน้ำมันประมาณ 35 กิโลกรัมต่อตันปลาดิบ (พูนสุข, 2542) และน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานแปรรูปอาหารทะเลจะมีไขมันอยู่ถึง 32,182 มิลลิกรัม/ลิตร (สุวิทย์, 2535) ซึ่งโรงงานที่ทำการศึกษาเพื่อเก็บกากไขมันที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีการใช้น้ำประมาณ 700 ลิตรต่อวัตถุดิบ 1 ตัน โดยมีกำลังการผลิตเฉลี่ยวันละประมาณ 40-70 ตัน จึงคิดเป็นปริมาณการใช้น้ำประมาณ 28,000-49,000 ลิตรต่อวัน และมีปริมาณกากไขมันประมาณ 900-1,500 กิโลกรัมต่อวัน

ลักษณะของไขมันและน้ำมันในน้ำเสียสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

2.4.1 น้ำมันละลายน้ำ

ความสามารถในการละลายน้ำขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติประจำตัวของน้ำมันไฮโดรคาร์บอนที่ระเหยได้ง่าย (มักมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ) มักละลายน้ำได้ดี โมเลกุลที่ไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรคาร์บอนที่มีวงแหวนเบนซินจะละลายน้ำได้ดี ตัวอย่างเช่น น้ำมันเบนซินละลายน้ำได้ถึง 1,650 มก./ล. นอกจากนี้ ไฮโดรคาร์บอนที่มีโพลาริตีสูงและน้ำหนักโมเลกุลต่ำจะละลายน้ำได้ดี น้ำมันละลายน้ำมักจะมองไม่เห็นด้วยตาเปล่า แต่อาจรู้ได้โดยการดมหรือชิม นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำมันละลายน้ำมักเป็นพิษและต้นเหตุของมะเร็งน้ำเสียใหม่ๆ จากแหล่งกำเนิดอาจพบน้ำมันละลายได้มาก แต่เมื่อน้ำเสียไหลมาเข้าระบบบำบัดน้ำเสีย ผ่านเครื่องสูบน้ำแบบหอยโข่ง น้ำมันละลายน้ำจะถูกใบพัดของเครื่องสูบบดอัดจนเป็นน้ำมันอิมัลชัน (เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม, 2542)

2.4.2 น้ำมันในรูปอิมัลชัน

น้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันจะเป็นน้ำมันที่อยู่ในรูปอนุภาคขนาดเล็กคล้ายคอลลอยด์ ดังนั้นจึงมองเห็นเป็นความขุ่นในน้ำ น้ำมันละลายน้ำอาจกลายเป็นอิมัลชันได้เมื่อถูกกระทำด้วยแรงภายนอก เช่น ถูกบดอัด เป็นต้น ขนาดของเม็ดน้ำมันมีตั้งแต่เล็กกว่า 20 ไมครอนจนถึงขนาดใหญ่กว่า 100 ไมครอนทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประเภทของไฮโดรคาร์บอน ไฮโดรคาร์บอนที่มีแรงตึงผิวสูงจะมีขนาดใหญ่กว่าไฮโดรคาร์บอนที่มีแรงตึงผิวต่ำ

ในโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท มีการใช้สารซักฟอกหรือ Surfactant ในการชำระล้างน้ำมันหรืองานอื่นๆ ลักษณะของน้ำมันที่พบในน้ำจึงอาจมี Surfactant อยู่ด้วย เม็ดน้ำมันอิมัลชันชนิดนี้เป็นเม็ดน้ำมันที่มีความคงตัวมาก ทำให้แยกออกจากน้ำเสียได้ยาก สาเหตุมาจากสารซักฟอกทำให้น้ำมันมีประจุชนิดเดียวกัน (อาจเป็น + หรือ - ก็ได้) และลดแรงตึงผิวของเม็ดน้ำมันทำให้อนุภาคมีขนาดเล็กมาก (มักเล็กกว่า 20 ไมครอน)

2.4.3 น้ำมันลอยบนผิวน้ำ (เป็นฟิล์ม)

น้ำมันหรือไฮโดรคาร์บอนส่วนใหญ่มักมีความหนาแน่นต่ำกว่าน้ำ จึงเป็นเรื่องปกติที่จะพบว่ามีน้ำมันลอยอยู่เหนือน้ำเป็นฝ้า หรือเป็นฟิล์ม ซึ่งขวางกั้นการถ่ายเทออกซิเจนหรือบังแสง น้ำมันปริมาณเล็กน้อยก็สามารถสร้างฟิล์มปิดพื้นที่ผิวน้ำได้มากมายเนื่องจากฟิล์มเหล่านี้มักเป็นโมเลกุลเดี่ยว โดยเฉพาะอย่างยิ่งน้ำมันที่มีความหนืดต่ำ

น้ำเสียรวมจากกระบวนการผลิต ปริมาณความเข้มข้นของมลสารสูง มลสารที่ยังสามารถถูกกักเก็บมาใช้ประโยชน์ ได้แก่ โปรตีน น้ำมันและไขมันยังมีอยู่มากซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ ปริมาณไขมันและโปรตีนเมื่อพิจารณาจากไนโตรเจนทั้งหมดโดยวิธี Kjeldhal (TKN) ได้โปรตีนประมาณ 12 กิโลกรัมต่อตันปลาดิบ และไขมันประมาณ 35 กิโลกรัมต่อตันปลาดิบ (เทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม, 2542) ได้มีการวิเคราะห์พบโปรตีนจากตะกอนน้ำเสียนี้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง ซึ่งจากการทดลองชี้ว่าโปรตีนที่นำกลับมามีคุณค่าทางอาหารให้เลี้ยงไก่ได้ เนื่องจากมีกรดอะมิโนที่สำคัญในการเจริญเติบโตของไก่ (รับรองโดยสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาในกรณีที่ใช้โปรตีนเป็นอาหารสัตว์) จากกรณีที่ได้มีการศึกษาข้างต้นจึงน่าจะมีความเป็นไปได้ในการนำกากไขมันจากน้ำเสียในแหล่งเดียวกันนี้เพื่อเป็นส่วนผสมในอาหารเลี้ยงไก่เช่นกัน

นอกจากนี้ ในรายงานวิจัยของภัควดี (2543) ยังได้ทำการนำกลับโปรตีนและไขมันจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมซูริมิ ซึ่งมีปริมาณโปรตีนในรูปทีเคเอ็นประมาณ 1,930 – 6,550 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณไขมันประมาณ 2,430 – 7,240 มิลลิกรัมต่อลิตร จึงถือเป็นอีกอุตสาหกรรมหนึ่งที่สามารถนำตะกอนลอยกลับมาใช้ประโยชน์ต่อไปได้ แต่สำหรับกากไขมันที่ได้จากน้ำทิ้งนี้ยังมีน้ำเจือปนอยู่ค่อนข้างมาก การนำมาใช้ประโยชน์ จึงควรทำการแยกน้ำออก เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมัน นั่นคือ ทำให้กรดไขมันหลุดจากกลีเซอร์ไรด์เป็นกรดไขมันอิสระที่มีชื่อว่า กรดบิวทีริค (Butyric acid, C4:0) ซึ่งกรดไขมันอิสระที่เกิดขึ้นนี้ทำให้น้ำมันมีกลิ่นหืน และสุภารัตน์ (2538) ได้รายงานองค์ประกอบต่างๆ ในกากไขมันจากบ่อดักไขมันของโรงอาหารใกล้คณะพลังงานและวัสดุ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และความเป็นไปได้เพื่อใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์และอาหารสัตว์ พบว่า การนำกากไขมันไปทำปุ๋ยอินทรีย์นั้น มีความเป็นไปได้ เนื่องจาก มีธาตุอาหารที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ไนโตรเจนมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 4.09 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.97 และโพแทสเซียมร้อยละ 3.26 และมีความเป็นไปได้ในการนำไปเป็นอาหารสัตว์ เช่น อาหารปลาและสุกร เนื่องจากมีโปรตีนเฉลี่ยร้อยละ 26.04 และไขมันเฉลี่ยร้อยละ 37.14 ซึ่งธาตุหรือสารอาหารบางชนิดอาจยังมีค่าสูงหรือต่ำกว่ามาตรฐานที่พืชหรือสัตว์ต้องการจึงต้องมีการปรับเพิ่ม หรือลดตามความเหมาะสมต่อไป สำหรับสมบัติทางเคมีของน้ำมันปลา

สมบัติ (2541) ได้ทำการศึกษาในน้ำมันที่ได้จากน้ำนึ่งปลาทูน่า พบว่า มีความชื้น 1.80 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์ออกไซด์และค่าไอโอดีนเท่ากับ 16.29 มิลลิกรัมสมมูลย์/กิโลกรัม และ 191.63 ตามลำดับ มี EPA และ DHA ร้อยละ 7.7 และ 28.4 ตามลำดับ เมื่อเก็บรักษาน้ำมันปลาหลังจากการผลิตเป็นน้ำมันปลาสำหรับบริโภคที่อุณหภูมิ 4 และ 10 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง เป็นเวลานาน 4 เดือน พบว่า ค่าเปอร์ออกไซด์และกรดไขมันอิสระเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ4 และ 10 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์ออกไซด์เป็น 2.21 และ 2.49 มิลลิกรัมสมมูลย์/กิโลกรัม และกรดไขมันอิสระร้อยละ 0.13 เท่ากัน แต่การเก็บที่อุณหภูมิห้องน้ำมันมีค่าเปอร์ออกไซด์เป็น 2.89 มิลลิกรัมสมมูลย์/กิโลกรัม และมีกรดไขมันอิสระร้อยละ 0.19 และสำหรับนิศากร (2545) ก็ได้ศึกษาความเหมาะสมในการนำกากไขมันจากบ่อดักไขมันของสถานที่จำหน่ายอาหารกลับมาใช้ประโยชน์ในรูปเชื้อเพลิง โดยทำการสุ่มตัวอย่างไขมันที่สามารถเป็นตัวแทนของกากไขมันทั้งหมดมาวิเคราะห์ค่าความร้อนและคุณสมบัติด้านพลังงานด้วยวิธีแบบประมาณ (Proximate analysis) พบว่า เมื่อวิเคราะห์ตามสภาพที่ได้รับ กากไขมันมีปริมาณความชื้นร้อยละ 66.20 โดยน้ำหนัก เถ้าร้อยละ 0.38 โดยน้ำหนัก สารระเหยร้อยละ 32.90 โดยน้ำหนัก คาร์บอนเสถียรร้อยละ 0.52 โดยน้ำหนัก ค่าพลังงานรวม 2,769 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม

2.5 บทบาทของไขมันสำหรับไก่

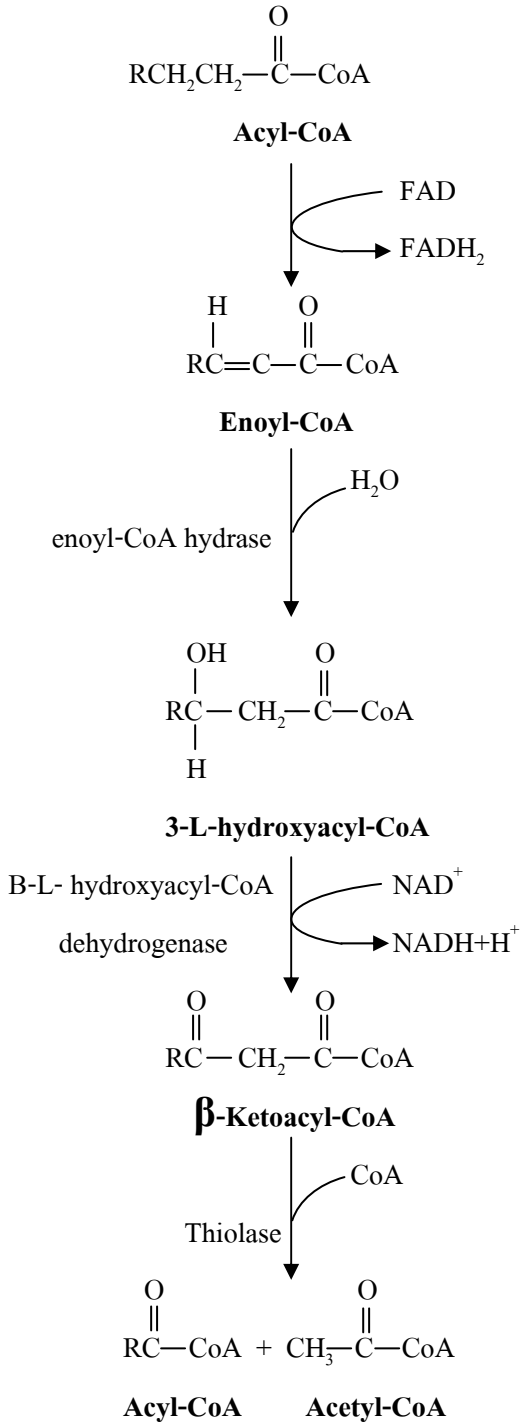
ไขมันเป็นสารอาหารที่ช่วยให้พลังงาน ให้ความอบอุ่น ทำให้อ้วน เพิ่มความน่ากินของอาหาร ทำให้อาหารอัดเม็ดได้ง่ายขึ้น และช่วยส่งเสริมการใช้ประโยชน์ของโภชนะอื่นๆ โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตให้ดีขึ้น และทำหน้าที่ในการละลายวิตามินที่ละลายในไขมัน (Fat soluble vitamin) ได้แก่ วิตามิน เอ ดี อี และเค เป็นแหล่งของกรดไขมันบางชนิดที่จำเป็นต้องมีในอาหารธรรมชาติ (พานิช, 2527) เป็นแหล่งไขมันที่มีประสิทธิภาพ สามารถเก็บไว้ในเนื้อเยื่อไขมัน (Apidose tissue) ในบริเวณเนื้อเยื่อใต้ผิวหนัง ซึ่งมีคุณสมบัติในการให้ความอบอุ่นแก่ร่างกาย และโดยเฉพาะอย่างยิ่งไขมันยังเป็นส่วนประกอบของสมองอีกด้วย โดยการรวมตัวกันของไขมันกับโปรตีนได้เป็นไลโพโปรตีน (Lipoprotein) จะเป็นส่วนประกอบของเซลล์ที่อยู่ภายในไซโทพลาสซึม (Cytoplasm) เช่นเยื่อหุ้มเซลล์ (Cell membrain) และไมโตคอนเดรีย (Mitocondria) (Martin *et al*., 1981 อ้างถึงในศศิพันธ์, 2546) อีกทั้งยังช่วยลดการเคลื่อนตัวของอาหาร ทำให้อาหารอยู่ในทางเดินอาหารนานขึ้น การย่อยและการดูดซึมของโภชนะอื่นมีประสิทธิภาพดีขึ้น จึงทำให้ค่าพลังงานใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นด้วย (Mateos and Sell, 1981) นอกจากนี้ ไขมันยังช่วยลด Heat increment หรือลดความร้อนที่เกิดขึ้นในร่างกายซึ่งมีส่วนช่วยในการเจริญเติบโต (Dale and Fuller, 1979) ไขมันที่เสริมลงไปในอาหารไก่ โดยทั่วไปมีทั้งไขมันจากสัตว์และพืช แต่ความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ได้ของไก่มีความแตกต่างกัน คือในช่วงไก่เล็กจะไม่สามารถย่อยไขมันที่มี

สัดส่วนของไขมันอิ่มตัวอยู่สูง โดยเฉพาะกรดสเตียริกซึ่งมีมากในไขสัตว์ เช่น ไขวัว แต่เมื่อไก่มีอายุมากขึ้นจึงสามารถใช้ไขมันจากสัตว์ได้ในปริมาณที่มากขึ้น ระดับของไขมันทั้งหมดในอาหารไม่ควรเกิน 9 เปอร์เซ็นต์ (สุวิทย์, 2539) ไขมันที่ไม่ถูกย่อย หรือดูดซึมจะถูกขับออกมาทางมูล ปริมาณไขมันที่มากเกินไปทำให้ไก่ถ่ายเหลวหรือท้องเสีย นอกจากนี้ ชนิดของไขมันที่ใช้เลี้ยงไก่ก็มีผลโดยตรงต่อองค์ประกอบของกรดไขมันในซากไก่ด้วย (Smith *et al*., 2006)

การขาดกรดไขมันไม่อิ่มตัวบางชนิด โดยเฉพาะในไก่เนื้อจะส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง สัตว์เบื่ออาหาร ผิวหนังอักเสบ ตับขยายใหญ่ มีไขมันภายในซากสูงขึ้น และความสามารถในการต้านทานการติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจลดลง กรดไขมันแต่ละชนิดยังมีบทบาทที่แตกต่างกันไปตามชนิดของกรดไขมันนั้นๆ ซึ่งยังไม่สามารถให้คำจำกัดความได้ บางชนิดเป็นสารตั้งต้นของฮอร์โมนบางชนิด เช่น พรอสตาแกลนดิน (Prostaglandin) ในรูปแบบต่างๆ เป็นโครงสร้างของเซลล์ซึ่งเกี่ยวข้องกับโครงสร้างของไมโตคอนเดรีย (Mitocondria) และยังมีผลต่ออวัยวะต่างๆ ของร่างกาย

2.6 เมแทบอลิซึมของไขมัน

ไขมันที่กินเข้าไปจะเกิดกระบวนการเผาผลาญเพื่อให้ได้พลังงาน โดยผ่านไปยังเซลล์ต่างๆ ในรูปไตรกลีเซอไรด์หรือฟอสโฟไลพิดก็ตาม ต้องมีเอนไซม์ภายในเซลล์ย่อย ซึ่งในขั้นแรกต้องใช้เอนไซม์ไลเพส (Lipase) ได้กรดไขมันและกลีเซอรอล ซึ่งกลีเซอรอลที่ได้จะถูกเปลี่ยนเป็นสารตัวกลางของกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) คือ กลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟต (Glyceroldehyde-3-phosphate) เข้าสู่การสลายตัวในกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) และวัฏจักรเครบส์ ส่วนกรดไขมันจะทำปฏิกิริยากับ ATP และโคเอนไซม์ เอ แล้วเปลี่ยนเป็นแฟตตีเอซิลโคเอ (Fatty acyl CoA) จากนั้นจะรวมกับคาร์นีทีน (Carnitine) ซึ่งเป็นตัวพาจากไซโตพลาสซึมเข้าสู่ไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) ในรูปแฟตตีเอซิลคาร์นีทีน (Fatty acyl carnitine) แต่จะเปลี่ยนเป็นแฟตตีเอซิลโคเอเหมือนเดิมหลังจากผ่านเข้าไปในไมโทคอนเดรีย จากนั้นจะเกิดการเผาผลาญด้วยกระบวนการบีตาออกซิเดชัน (β-oxidation) มีผลทำให้โมเลกุลของแฟตตีเอซิลโคเอ ถูกตัดคาร์บอนออกทีละ 2 อะตอม ซึ่งสารที่ถูกตัดออกมาก็คือ แอซีติลโคเอนไซม์ เอ (Acetyl co-enzyme A) ซึ่งเป็นสารเคมีหน่วยเล็กๆ ก็จะเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ เพื่อนำไปสลายเป็นพลังงาน หรือนำไปสร้างสิ่งต่างๆ ในร่างกายได้ เช่น นำไปสร้างกลูโคส หรือกรดอะมิโนได้ต่อไป การตัดแฟตตีเอซิลโคเอแต่ละรอบจะมีการสังเคราะห์ $FADH_2$ และ $NADH+H^+$ อย่างละ 1 โมเลกุลด้วย (ภาพที่ 2.4)

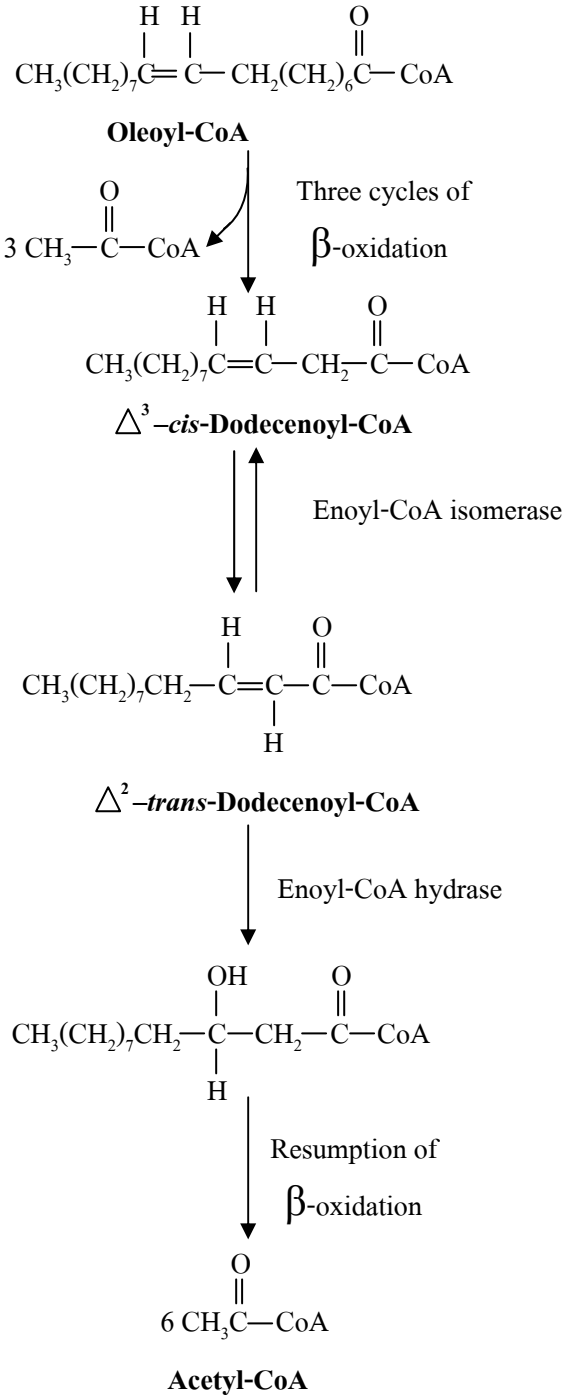


รูปที่ 2.3 กระบวนการบีตาออกซิเดชันของกรดไขมันอิ่มตัว

ที่มา : Geoffrey *et al.* (1995)

กระบวนการบีตาออกซิเดชันเกิดขึ้นโดยแฟตตีเอซิลโคเอถูกดึงโฮโดรเจนออกโดย Acyl-CoA dehydrogenase ได้ α, β *trans*-enoyl-CoA และ $FADH_2$ ซึ่งอิเล็กตรอนจาก $FADH_2$ จะถูกส่งไปยังลูกโซ่ หรือกระบวนการถ่ายทอดอิเล็กตรอน (Electron transport chain, ETC) และสำหรับ Enoyl-CoA ก็จะถูกไฮเดรต (Hydrate) โดย Enoyl-CoA hydrase ได้เป็น 3-L-hydroxyacyl-CoA และถูก β-L- hydroxyacyl-CoA dehydrogenase และ NAD^+ เปลี่ยนให้เป็น β-Ketoacyl-CoA พร้อมกับได้ $NADH+H^+$ และขั้นตอนสุดท้ายคือ การย่อยโดยเอนไซม์ไธโอเลส (Thiolase) ให้อยู่ในรูปเอซิลโคเอ (Acyl-CoA) และเอซิติลโคเอ (Acetyl-CoA) ที่มีคาร์บอนน้อยลง 2 อะตอม หลังจากนั้นเอซิลโคเอ (Acyl-CoA) สามารถเข้าสู่กระบวนการบีตาออกซิเดชันได้ใหม่ ได้เอซิลโคเอและเอซิติลโคเอ ที่มีคาร์บอนน้อยลง 2 อะตอมเหมือนเดิม ซ้ำจนท้ายสุดได้ 2 เอซิติลโคเอ

สำหรับกระบวนการสลายเพื่อให้ได้พลังงานของกรดไขมันไม่อิ่มตัว จะถูกสลายโดยกระบวนการบีตาออกซิเดชันเช่นเดียวกับกรดไขมันอิ่มตัว แต่เมื่อการสลายกรดไขมันจนถึงตำแหน่งที่มีพันธะคู่ ซึ่งเป็นกรดไขมันที่อยู่ในรูป $^3 - \triangle$cis-enoyl CoA ทำให้ Acyl-CoA dehydrogenase ไม่สามารถสลายได้ จะต้องอาศัย enoyl-CoA isomerase เข้ามาเปลี่ยนให้อยู่ในรูป $\triangle^2$- trans-enoyl CoA (ภาพที่ 2.4) แต่เนื่องจาก Acyl-CoA dehydrogenase ไม่สามารถทำงานได้ในบางขั้นตอนของกระบวนการ จึงทำให้ได้ $FADH_2$ น้อยกว่ากระบวนการสลายกรดไขมันอิ่มตัว 1 โมเลกุล และได้พลังงานน้อยลง 2 ATP



รูปที่ 2.4 กระบวนการบีตาออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว

ที่มา : ดัดแปลงจาก Geoffrey *et al.* (1995)

อาหารประเภทไขมันที่สัตว์กินเข้าไปจะอยู่ในรูปของ Triglycerides เป็นส่วนใหญ่ นอกเหนือจากนั้นแล้วจะเป็นพวก Cholesterol, Ester และ Phospholypid อีกเล็กน้อย การย่อยไขมันส่วนใหญ่เกิดในลำไส้เล็กโดยไขมันจะถูก Emulsified จากน้ำดี (Bile salt) ทำให้ไขมันมีขนาดเล็กลง เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้เอนไซม์ที่ย่อยไขมันทำงานได้ดีขึ้น ไขมันที่ย่อยจะได้ 2-monoglyceride, Fatty acid และ Cholesterol จะรวมตัวกับน้ำดีในรูปของไมเซลล์ (Micelle) และถูกดูดซึมบริเวณ Brush border membrane หลังจากที่ Monoglyceride และ Fatty acid อยู่ใน Epithelial cell แล้วจะมีการรวมตัวกันเป็น Triglyceride อีกครั้งและรวมตัวกับ Phospholypid, Cholesterol และ Cholesterol esters ได้เป็น Chylomicrons แล้วผ่านออกจาก Epithelial cell เข้าสู่ระบบน้ำเหลืองต่อไป (วิทธวัช, 2540; สาโรช, 2542; ประภาพร, 2545)

2.7 การทดแทนแหล่งไขมันในอาหารไก่เนื้อ

เนื้อไก่เป็นอาหารที่นิยมบริโภคโดยทั่วไป ในเนื้อไก่มีการสะสมของไขมันแตกต่างกันไปตามชนิดและปริมาณของกรดไขมันในอาหารที่กิน (Yeu *et al*., 1991) การเลือกใช้ไขมันในอาหารไก่เนื้อ จึงมีความจำเป็นเพื่อให้ไก่เนื้อสามารถใช้ประโยชน์ได้สูง และไม่มีการสะสมไขมันส่วนเกินมากเกินไป ได้มีการทดแทนแหล่งไขมันในอาหารไก่เนื้อจากแหล่งต่างๆ ทั้งพืชและสัตว์ เช่น น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันปาล์ม ไขวัว น้ำมันปลาทูน่า เป็นต้น เพื่อให้ได้สมรรถภาพการผลิตที่ดี จากรายงานของสาโรช (2542) กล่าวว่า การสะสมไขมันในร่างกายไก่มีองค์ประกอบของไขมันที่สะสมทั้งกรดไขมันอิ่มตัวและกรดไขมันไม่อิ่มตัว ไก่จะสามารถนำกรดไขมันไม่อิ่มตัวไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ส่วนกรดไขมันอิ่มตัวนั้นร่างกายไก่ไม่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง ต้องมีการดัดแปลงตัดต่อสายโมเลกุลให้มีลักษณะของกรดไขมันที่จำเพาะสำหรับไก่ ซึ่งไขมันสะสมที่พบในซากไก่ จะเป็นอิทธิพลของกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่ากรดไขมันอิ่มตัว Sim *et al.* (1973) รายงาน ผลการเสริมไขมันสัตว์กับอาหารไม่เสริมไขมัน พบว่าปริมาณไลโนลีอิกลดลง แต่ปริมาณโอลีอิกเพิ่มขึ้นในเลือดของไก่ที่ได้รับอาหารไม่เสริมไขมัน แสดงให้เห็นว่าไลโนลีอิกเป็นกรดไขมันที่สัตว์ปีกจำเป็นต้องได้รับจากอาหาร เนื่องจากสัตว์ปีกไม่สามารถสังเคราะห์ได้เองในร่างกาย ในขณะที่โอเลอิกสัตว์ปีกสามารถสังเคราะห์ได้จากกรดไขมันชนิดอื่น ในปัจจุบันพบว่ากรดไขมันที่จำเป็นสำหรับสัตว์ปีกประกอบด้วยไลโนลีอิก ไลโนลีนิก และอราชิโดนิก นอกจากนี้จากรายงานของกองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน (2549) กล่าวถึงการแปรสภาพของไนโตรเจนในไก่เนื้อที่กินอาหารที่มีโปรตีนร้อยละ 21.7 ว่ามีการแปรสภาพกักเก็บในร่างกายร้อยละ 42 ในมูลร้อยละ 10 และในปัสสาวะร้อยละ 48

ณัฐชนก (2550) รายงานในบทความของโรงพยาบาลไทยนครินทร์ สอดคล้องกับเวปไซท์ของห้องสมุด E-LIB เกี่ยวกับไขมันโอเมก้า-3 ซึ่งเป็นกรดไขมันที่ได้รับความนิยมอย่างมาก โดยเฉพาะคุณสมบัติในการลดอัตราเสี่ยงต่อการเป็นโรคหัวใจ และมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและการพัฒนาของเซลล์ประสาทและสมองของเด็ก ได้มีการนำความรู้เกี่ยวกับโอเมก้า-3 มาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาอาหารให้มีโอเมก้า-3 เช่นในไข่ไก่ โดยลดคอเลสเทอรอลในไข่แดง แต่มีไขมันโอเมก้า-3 เพิ่มแทน โดยเลี้ยงไก่ด้วยอาหารไก่ที่มีน้ำมันปลาสูง เลี้ยงในสภาพที่เหมาะสม ไก่จะให้ไข่ที่มีโอเมก้า-3 และจากการศึกษากลุ่มอาสาสมัครในต่างประเทศที่รับประทานไข่โอเมก้า-3 พบว่า โคเลสเทอรอลในเลือดต่ำกว่าผู้ที่รับประทานไข่ธรรมดา ซึ่งแหล่งที่สำคัญของโอเมก้า-3 คือ อาหารทะเล โดยเฉพาะปลาทะเล เช่น ปลาซาดีน ปลาทูน่า ปลาแซลม่อน ตลอดจนน้ำมันปลาเป็นต้น นอกจากนี้ Phettepace และ Watkins (1992) พบว่า การเสริมน้ำมันปลาเมนฮาเดนในอาหารไก่เนื้อยังช่วยลดปริมาณของไตรกลีเซอไรด์ในเลือด ตับและหัวใจได้

ได้มีงานวิจัยมากมายเกี่ยวกับการเสริมไขมันมากกว่า 1 ชนิดในอาหารไก่เนื้อ ทั้งไขมันพืชด้วยกัน ไขมันสัตว์ด้วยกัน และไขมันผสมระหว่างพืชและสัตว์ ซึ่งส่วนใหญ่จะได้ผลลัพธ์ที่ดีกับอาหารที่ใช้ไขมันผสมระหว่างไขมันพืชและไขมันสัตว์ หรือไขมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงรวมกับไขมันที่มีกรดไขมันอิ่มตัวสูง ซึ่งจะทำให้พลังงานใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้นมากกว่าผลรวมเฉลี่ยของไขมันชนิดเดียวรวมกัน ดังการทดลองของ Sibbald (1960) พบว่าการใช้ไขมันผสมระหว่างไขสัตว์กับน้ำมันถั่วเหลืองทำให้การเจริญเติบโตสูงกว่าการใช้ไขสัตว์อย่างเดียว และสอดคล้องกับรายงานของ Artman (1964) ที่ทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาปริมาณที่เหมาะสมของสัดส่วนไขมันทั้งสองชนิด พบว่าการใช้น้ำมันถั่วเหลืองผสมไขสัตว์ต้องใช้น้ำมันถั่วเหลืองอย่างน้อยที่สุด 24 เปอร์เซ็นต์ในไขมันผสม จึงจะทำให้การเจริญเติบโตดีกว่าการใช้ไขสัตว์เพียงชนิดเดียว นอกจากนี้ ยังพบว่าการสะสมไขมันในซากไก่จะลดลงเมื่อใช้ไขมันที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงเป็นส่วนประกอบในอาหาร (Ajuyah *et al.,* 1991)

การเสริมหรือทดแทนไขมันในอาหารไก่เนื้อ ยังพบว่าอาหารที่ไม่มีการเสริมไขมันหรือเสริมที่ระดับต่ำจะให้ประสิทธิภาพการเลี้ยงไก่ต่ำกว่าอาหารที่มีไขมันระดับสูง ดังรายงานวิจัยของไพโชค (2538) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเสริมไขมันในอาหารต่อการเจริญเติบโตของไก่กระทง โดยใช้ไขวัว น้ำมันหมู น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันปาล์ม โดยเสริมลงในอาหารที่ระดับ 6 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการเสริมไขมัน โดยควบคุมโปรตีนและพลังงานให้เท่ากันทุกกลุ่ม พบว่าการเสริมไขมันช่วยให้ไก่กินอาหารได้มากขึ้น น้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น ไนโตรเจนที่กินได้ และพลังงานที่กินได้ก็มีแนวโน้มสูงขึ้น แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารดีขึ้นเล็กน้อย ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และไม่

พบความแตกต่างของน้ำหนักซาก น้ำหนักเนื้อ และน้ำหนักไขมันช่องท้องของไก่กระทงทั้งในกลุ่มที่เสริมไขมันและไม่เสริมไขมัน เนื่องจากไก่จะมีความไวต่อการสะสมไขมันเมื่ออาหารมีพลังงานสูงมากกว่าชนิดของไขมันที่เสริมลงในอาหาร ดังนั้น ถ้าอาหารมีโปรตีนและพลังงานเท่ากันก็จะไม่มีผลต่อส่วนประกอบของซาก เช่นเดียวกับรายงานของสุธา และคณะ (2534) ซึ่งได้ทำการทดลองเลี้ยงไก่กระทงด้วยสูตรอาหารที่มีกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันต่างกัน 3 ระดับ คือไม่เสริมไขมัน (พลังงานใช้ประโยชน์ได้ 2,800 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) เสริมไขมันระดับต่ำ (พลังงานใช้ประโยชน์ได้ 3,000 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) และเสริมไขมันระดับสูง (พลังงานใช้ประโยชน์ได้ 3,200 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม) แต่อาหารทุกสูตรมีโปรตีนเท่ากันคือ ร้อยละ 23 ในระยะ 0-4 สัปดาห์ และร้อยละ 20 ในระยะ 4-6 สัปดาห์ พบว่าในทุกระยะของการทดลอง ไก่ที่ได้รับอาหารแตกต่างกันทุกสูตรมีปริมาณการกินและอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกัน ($P>0.05$) แต่สำหรับไก่ทดลองกลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีการเสริมไขมันในระดับสูง มีประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่ากลุ่มที่ไม่มีการเสริมไขมันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) เนื่องจากกลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีพลังงานใช้ประโยชน์ได้ระดับสูง มีประสิทธิภาพในการใช้โปรตีนดีกว่า ซึ่งการทดแทนแหล่งไขมันจากบ่อดักไขมันโรงงานปลากระป๋องในอาหารไก่เนื้อครั้งนี้ จึงเป็นการสร้างสูตรอาหารที่ทำให้ไก่เนื้อได้รับอาหารที่มีพลังงานจากไขมันอย่างเพียงพอต่อความต้องการและน่าจะส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพการเลี้ยงได้ตามรายงานวิจัยข้างต้น รวมถึงผลของชนิดกรดไขมันในกากไขมันต่อการสะสมในซาก ซึ่งได้มีรายงานการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลของแหล่งไขมันและระดับของไขมันที่เสริมหรือทดแทนในอาหารที่ใช้เลี้ยงไก่เนื้อ ซึ่งพอจะสรุปได้จากงานวิจัยของจินตนา (2518) ที่ได้ทำการศึกษาแหล่งและระดับของไขมันในอาหารที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและส่วนประกอบของกรดไขมันหน้าท้องของไก่กระทง โดยใช้แหล่งไขมันเป็นไขวัว น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันฝ้ายไม่ฟอกสี น้ำมันถั่วลิสงเกรด 1 กับเกรด 2 และน้ำมันข้าวโพด จากการวิเคราะห์กรดไขมันหน้าท้องของไก่กระทงพบว่า มีส่วนประกอบของกรดไขมันคล้ายกับกรดไขมันที่เสริมในสูตรอาหารนั้นๆ สอดคล้องกับสมชาย (2539) ซึ่งศึกษาผลการเสริมไขมันต่างชนิด (น้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันปาล์มสเตียริน น้ำมันปาล์มโอเลอิน น้ำมันถั่วเหลือง ไขวัว และน้ำมันปลาทูน่า) ในอาหารไก่กระทงและไก่ไข่ พบว่าส่วนประกอบกรดไขมันของไขมันที่เสริมในอาหาร มีผลต่อส่วนประกอบกรดไขมันที่สะสม แต่พบแตกต่างกันในเนื้อเยื่อกับในไข่แดง โดยพบในเนื้อเยื่อมากกว่าในไข่แดง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบกรดไขมันในเนื้อเยื้อสะสมไขมันและไข่แดง เป็นอิทธิพลจากกรดไขมันไม่อิ่มตัวมากกว่ากรดไขมันอิ่มตัวของไขมันที่เสริมในอาหาร เช่นเดียวกับ Cachaldora *et al.* (2006) ที่พบความแตกต่างของกรดไขมันในไข่แดงที่มีการเติมน้ำมันปลาในอาหารไก่ไข่ เปรียบเทียบกับสูตรอาหารควบคุมที่ไม่มีการเติมน้ำมันปลา เติมน้ำมันเมล็ดฝ้าย เติมน้ำมันถั่วเหลือง และเติมไขมันหมู โดยพบปริมาณกรดไขมัน

ไม่อิ่มตัวชนิดโอเมก้า-3 เช่น EPA, DHA และกรดโดโคซาเพนทาโนอิก (Docosapentanoic acid; DPA, C22:5) ที่สะสมในไข่แดงเพิ่มขึ้นในสูตรที่ใช้น้ำมันปลา ในช่วง 0-30 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร แตกต่างจากสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.001$) ขณะที่สูตรที่ใช้น้ำมันเมล็ดฝ้ายและน้ำมันถั่วเหลืองจะพบการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิดโอเมก้า-6 และโอเมก้า-3 ควบคู่กัน สำหรับสูตรอาหารที่เติมไขมันหมู 50 กรัมต่อกิโลกรัมอาหารพบกรดไขมันไม่อิ่มตัวชนิด Monounsaturated เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน และสำหรับ Pinchasov และ Nir (1992) ก็พบเช่นเดียวกันจากการศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงในอาหารต่อประสิทธิภาพการใช้อาหารไขมันสะสม และองค์ประกอบกรดไขมันในซากไก่เนื้อ พบว่ากรดไขมันในช่องท้องและกรดไขมันโดยรวมในซากมีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบในกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงที่เสริมในอาหาร ซึ่งการเพิ่มกรดไขมันไม่อิ่มตัวในอาหารของไก่เนื้อ ทำให้กรดไขมันโมโนอีโนอิค (Monoenoic fatty acid, C16:1 และ C18:1) ลดลง แต่มี C18:2 เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลให้พบกรดไขมันสะสมในช่องท้องของไก่เนื้อเป็นกรดไขมันชนิด C18:2 มากกว่าชนิด C16:1 และ C18:1 และสำหรับ Bavelaar และ Beynen (2001) ได้รายงานความสัมพันธ์ของกรดไขมันในอาหารกับจุดหลอมเหลว หรือปริมาณไขมันในเนื้อเยื่อไก่เนื้อ โดยทำการคำนวณปริมาณไขมันไม่อิ่มตัวต่อไขมันอิ่มตัว (Unsaturated fatty acid/Saturated fatty acid ratio, U/S ratio) ในอาหารแตกต่างกัน เพื่อบ่งบอกปริมาณไขมันในเนื้อเยื่อสัตว์ปีก จาก 3 การทดลอง ที่แตกต่างกัน พบว่า มีความสัมพันธ์แบบสมการเชิงเส้นของอาหารกับอัตราส่วน U/S ของไขมันในเนื้อเยื่อไก่เนื้อเป็น r^2 เท่ากับ 0.77 ซึ่งหมายถึงการสะสมกรดไขมันไม่อิ่มตัวและกรดไขมันอิ่มตัวในไก่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน หากมีการสะสมกรดไขมันชนิดอิ่มตัวมาก การสะสมกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวก็มากด้วยเช่นกัน ดังนั้นการทดแทนกากไขมันจากบ่อดักไขมันโรงงานปลากระป๋อง จึงน่าจะทำให้มีชนิดของกรดไขมันที่พบในปลา ซึ่งเป็นกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวที่สำคัญต่อร่างกาย สะสมในซากไก่เนื้อได้ด้วย รวมถึงประสิทธิภาพการเลี้ยงไก่เนื้อที่ดีกว่าไก่ที่ไม่ได้รับการทดแทนกากไขมันจากโรงงานปลากระป๋อง เนื่องจากสมชาย (2539) ยังพบว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่เสริมน้ำมันปลาทูน่ามีประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารดีที่สุด เช่นเดียวกับศศิพันธ์ (2546) ซึ่งได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปริมาณและสัดส่วนของไขวัวกับน้ำมันถั่วเหลืองในอาหารต่อการสะสมไขมันในซากไก่เนื้อ โดยคำนวณให้มีปริมาณไขมันในอาหาร 3 ระดับ คือ ร้อยละ 3.0, 6.0 และ 9.0 แล้วปรับให้มีสัดส่วนกรดไขมันอิ่มตัวต่อกรดไขมันไม่อิ่มตัว 5 สัดส่วนคือ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 ในการทดลองใช้ไก่เนื้อทางการค้า อาร์เบอร์ เอเคอร์ (อายุ 7-56 วัน) โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มขังเดี่ยว และกลุ่มขังรวม ผลการทดลองทั้ง 2 กลุ่ม พบว่า เมื่อเพิ่มระดับไขมันในอาหารจากร้อยละ 3.0 เป็นร้อยละ 6.0 และร้อยละ 9.0 มีผลทำให้ อัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนดีขึ้น และใน

สูตรอาหารที่มีสัดส่วนของกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงมีผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตดีขึ้น สอดคล้องกับ Popescu และ Criste (2003) ที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไขมันถั่วเหลืองในอาหารไก่เนื้อและผลต่อผลิตภัณฑ์เพื่อศึกษาสูตรพื้นฐานที่เตรียมขึ้นมาใหม่สำหรับไก่เนื้อ โดยแบ่งเป็น 2 กลุ่มการทดลอง ได้แก่กลุ่มที่ประกอบด้วย ข้าวโพด กากถั่วเหลือง น้ำมันและปลาป่น (กลุ่ม M) และกลุ่มที่เสริม Full fat soybean (กลุ่ม FFS) ซึ่งมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวสูง ผลที่ได้ปรากฏว่า กลุ่ม FFS มีปริมาณไขมันที่ร่างกายใช้ประโยชน์ได้เพิ่มขึ้น ปริมาณการกินลดลง ส่งผลให้ปริมาณอาหารที่ให้ลดลงและต้นทุนค่าอาหารก็ลดลง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับกากไขมันจากบ่อดักไขมันว่ายังมีคุณค่าทางโภชนะ ซึ่งสัตว์บางชนิดอาจนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยเฉพาะในไก่ ซึ่งมีรายงานวิจัยเกี่ยวกับการทดแทนแหล่งไขมันในอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุน และสำหรับการใช้ประโยชน์ของกากไขมันจากบ่อดักไขมันโรงงานปลากระป๋องนั้น แม้ยังมีข้อมูลการใช้ประโยชน์น้อยมาก แต่อย่างไรก็ตาม การทดแทนกากไขมันในอาหารไก่เนื้ออาจเป็นแนวทางสำหรับการเพิ่มมูลค่าและทางเลือกในการจัดการกากไขมันจากบ่อดักไขมันโรงงานปลากระป๋อง ทั้งยังเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไก่เนื้อ โดยสามารถลดต้นทุนการผลิตแก่เกษตรกรได้ต่อไป