

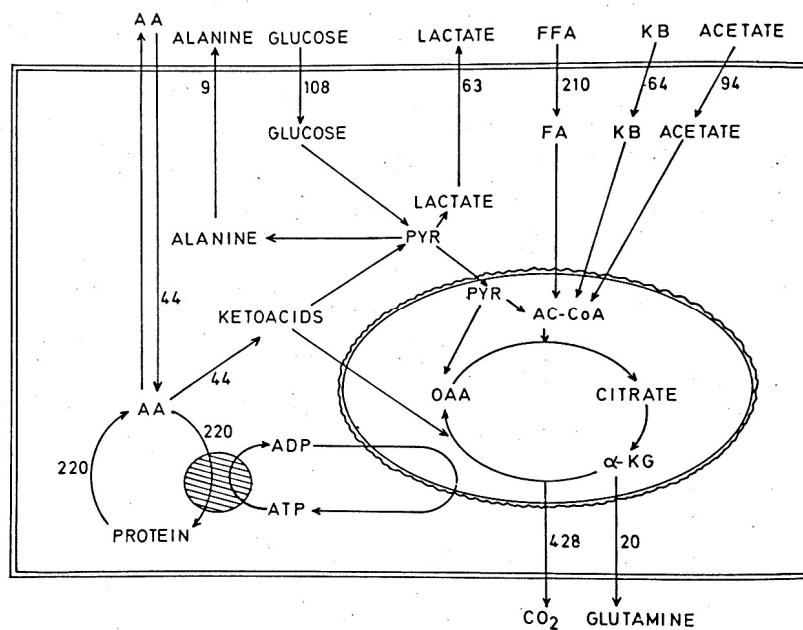
บทที่
9

เมแทบอลิซึมของโภชนะในกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อไขมัน
Metabolism of Nutrients in Muscle and Adipose Tissue

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. อธิบายถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมของโภชนะต่างๆที่เกิดขึ้นในกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อไขมัน
2. มีความเข้าใจและสามารถเปรียบเทียบกระบวนการใช้ประโยชน์ของโภชนะในสัตว์แต่ละกลุ่มได้

โภชนะที่มีบทบาทมากที่สุดในเซลล์กล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อไขมัน คือ โปรตีนและไขมัน ซึ่งพบว่าจะมีการสะสมและมีการปลดปล่อยออกมาเพื่อใช้ประโยชน์กับร่างกายสิ่งมีชีวิต ในขณะที่โภชนะอื่นๆ จะมีบทบาทสำคัญลดลงมา ดังนั้น ในบทนี้จึงจะเน้นโภชนะด้านโปรตีนและไขมัน เป็นหลัก นอกจากนี้ กระบวนการเมแทบอลิซึมของโภชนะบางอย่างพบพบในกล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อไขมัน อาจมีความคล้ายคลึงกันกับเมแทบอลิซึมในตับ ดังนั้นผู้อ่านสามารถย้อนกลับไปดูในบทที่ผ่านมา เพื่อทำความเข้าใจถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมมากยิ่งขึ้น



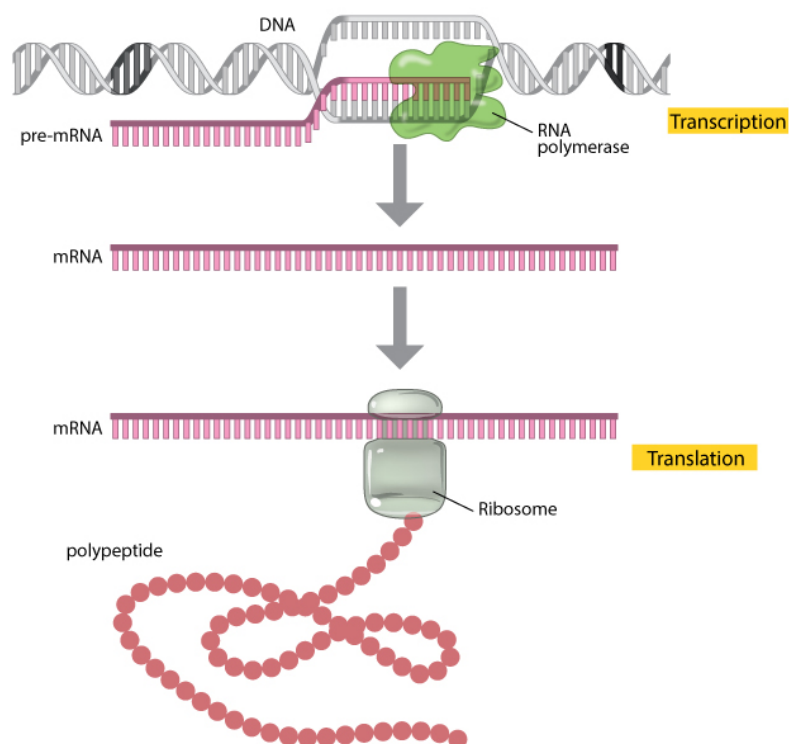
ภาพที่ 9.1 เมแทบอลิซึมหลักที่เกิดขึ้นในเซลล์กล้ามเนื้อ

ที่มา: Riis (1983)

เซลล์กล้ามเนื้อ (muscle cell) มีหน้าที่สำคัญที่สุดคือเก็บสะสมโปรตีนเพื่อใช้ประโยชน์ ส่วนหน้าที่รองลงมาคือการปลดปล่อยกรดอะมิโน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเซลล์อื่นๆ โดยจาก ภาพที่ 9.1 ได้สรุปถึงวิถีต่างๆที่เกิดขึ้นในเซลล์กล้ามเนื้อต่อบทบาทหน้าที่ทั้งสองอย่าง ซึ่งทั้ง การสะสมโปรตีนและการปลดปล่อยกรดอะมิโนจะต้องมีความสมดุลกันระหว่างกระบวนการ สังเคราะห์และการย่อยสลายของโปรตีนในเซลล์กล้ามเนื้อ จากนี้การสะสมโปรตีนจะเกี่ยวข้องกับ กระบวนการสังเคราะห์โปรตีนที่เซลล์กล้ามเนื้อด้วย

ในส่วนของเซลล์เนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานของ ร่างกายในรูปของ triacylglyceride ไว้ภายในเซลล์โดยมีเอนไซม์ต่างๆ สำหรับกระบวนการสร้าง ไขมันและสลายไขมัน รวมทั้ง ระบบต่อมไร้ท่อที่มีฮอร์โมนหลายชนิดที่มีผลต่อการใช้หรือเก็บ สะสมพลังงานหรือเกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึม (Klaus, 1994)

เมแทบอลิซึมของโปรตีนในกล้ามเนื้อ
การสังเคราะห์โปรตีนที่เซลล์กล้ามเนื้อ



ภาพที่ 9.2 การสังเคราะห์โปรตีนในเซลล์กล้ามเนื้อ

จากภาพที่ 9.2 แสดงขั้นตอนในการสังเคราะห์โปรตีนที่เซลล์กล้ามเนื้อและปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การสังเคราะห์โปรตีนจะเริ่มจาก การถอดรหัสพันธุกรรม (transcription) ไปเป็นสาย mRNA เพื่อเป็นตัวสื่อความหมายทางพันธุกรรมจาก DNA จากนั้นสาย mRNA จะ แปลรหัสพันธุกรรม (translation) เพื่อสังเคราะห์สายโปรตีน (Riis, 1983)

การถอดรหัสพันธุกรรม (transcription): สาย RNA ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นมีอยู่ 4 ชนิด คือ messenger RNA (mRNA), ribosomal RNA (rRNA), transfer RNA (tRNA) และ small nuclear RNA (snRNA) ซึ่งแต่ละ RNA มีหน้าที่ๆ แตกต่างกันดังนี้คือ

mRNA เป็นโมเลกุลที่สื่อความหมายทางพันธุกรรมจากโมเลกุล DNA เพื่อไป กำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนที่อยู่ในสายโพลีเพปไทด์ที่จะสังเคราะห์ขึ้นใน กระบวนการทรานสเลชัน สาย mRNA ที่สร้างขึ้นจากสาย DNA ต้นแบบ (sense DNA) สามารถเรียกอีกชื่อหนึ่งได้ว่าเป็นสาย sense RNA

rRNA เป็นโมเลกุลที่มีขนาดแตกต่างกัน และเป็นองค์ประกอบของไรโบโซม (ribosome) ซึ่งมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการทรานสเลชันในการแปลลำดับเบสที่อยู่บนสาย mRNA ให้ไป เป็นลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนที่อยู่ในสายโพลีเพปไทด์

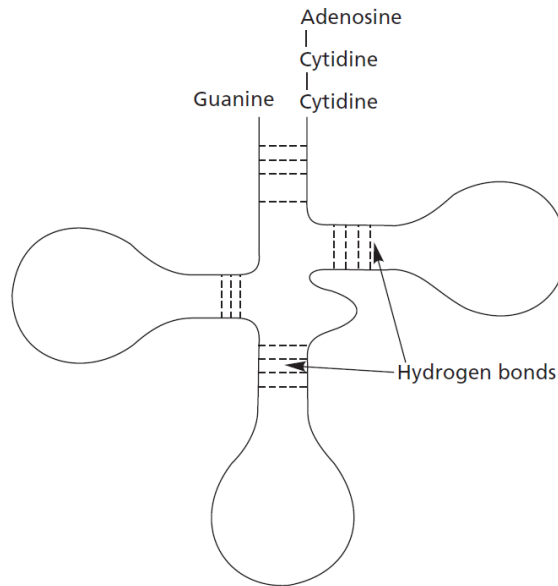
tRNA เป็นโมเลกุลขนาดเล็กมีหน้าที่นำพากรดอะมิโนชนิดต่างๆ ไปเรียงตัวบนไรโบโซม หน่วยย่อยขนาดใหญ่ที่อยู่บนสาย mRNA ขณะที่เกิดกระบวนการทรานสเลชัน (ภาพที่ 9.3)

snRNA เป็นโมเลกุลที่เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของ spliceosomes ซึ่งมีหน้าที่ใน การปรับแต่งสาย mRNA ในเซลล์ของยูคาริโอตให้มีเฉพาะส่วนที่สามารถแปลรหัสพันธุกรรมได้ (coding region)

กลไกการถอดรหัสพันธุกรรมประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. กระบวนการเริ่มต้น (initiation): เมื่อมีการคลายเกลียวของสาย DNA จากนั้นสาย DNA 3' → 5' จะถูกใช้เป็นสาย ต้นแบบในการถอดรหัสพันธุกรรม เพื่อสังเคราะห์สาย RNA เรียกสาย DNA สายต้นแบบนี้ว่า sense strand DNA

2. กระบวนการต่อสายยาว (elongation): เป็นการเติม ribonucleoside triphosphate เข้าไปที่ตำแหน่ง 3'-OH บริเวณปลายสาย RNA โดยมีเอนไซม์ RNA polymerase เป็นตัวช่วยทำปฏิกิริยา



ภาพที่ 9.3 โมเลกุลของ tRNA

ที่มา: McDonald et al. (2011)

3. กระบวนการสิ้นสุดการสังเคราะห์ (termination): สาย RNA ที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นสายเดี่ยว (single strand) และต้องมีเบสที่จำเพาะเจาะจงกับสาย DNA ที่เป็นต้นแบบด้วย สาย RNA ที่สังเคราะห์ขึ้น และเป็นตัวกำหนดการสังเคราะห์โปรตีน จะเรียกว่า premRNA หรือ sense strand RNA (แต่สำหรับสาย RNA ที่มีเบสที่จำเพาะเจาะจงกับสาย premRNA นี้ เรียกว่า antisense RNA) หลังจากนั้นจะมีการดัดแปลงรูปร่างของสาย pre-mRNA เพื่อเพิ่มความคงตัวและไม่ให้ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์นิวคลีเอส นอกจากนี้ยังส่งผลให้สาย mRNA เคลื่อนที่ออกจากนิวเคลียสไปสู่ไซโตพลาสซึมได้ง่ายขึ้น ดังนั้น pre-mRNA จึงถูกเรียกชื่อใหม่ว่า mRNA และพร้อมที่จะออกนอกนิวเคลียสโดยผ่านทางนิวเคลียร์ พอร์ (nuclear pore) เพื่อออกไปสู่ไซโตพลาสซึม จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการแปลรหัสโปรตีน

หลังเกิดกระบวนการทรานสคริปชัน rRNA, tRNA และ snRNA จะเกิดเป็นโมเลกุลขนาดเล็กที่มีหน้าที่แตกต่างกัน นอกจากนี้โมเลกุลทั้งสามจะไม่ถูกแปลรหัสพันธุกรรมไปเป็นสายโปรตีนในกระบวนการทรานสเลชัน ในขณะที่ mRNA ถูกแปลรหัสพันธุกรรมในกระบวนการทรานสเลชัน นอกจากนี้ยังพบว่า mRNA มักเป็นโมเลกุลสายเดี่ยวที่ไม่ถาวร และมีอายุสั้นกว่า RNA ชนิดอื่นๆ เนื่องจากจะสลายตัวไปเมื่อหมดหน้าที่บ่งการการสังเคราะห์โปรตีน

กลุ่มเบส 3 ตัวที่เรียงตัวกันตามลำดับ (triplet) ในสาย mRNA มีความหมายเป็นสูตรรหัส 1 สูตร เรียกว่า โคดอน (codon) แต่ละโคดอนสื่อความหมายสำหรับกรดอะมิโน 1 ชนิด โคดอนที่มีรหัส AUG จะสื่อความหมายเริ่มต้นการแปลรหัสพันธุกรรม เพื่อสังเคราะห์สายโพลีเปปไทด์ สำหรับโคดอนที่มีรหัส UAA หรือ UAG หรือ UGA จะสื่อความหมายสิ้นสุดการสังเคราะห์สายโพลีเปปไทด์

การแปลรหัสพันธุกรรม (translation): ตัวอย่างของ *E. coli* (prokaryote) กระบวนการสังเคราะห์โปรตีน ใช้สารเคมีชนิดต่างๆ (แสดงดังภาพที่ 9.4) ดังนี้

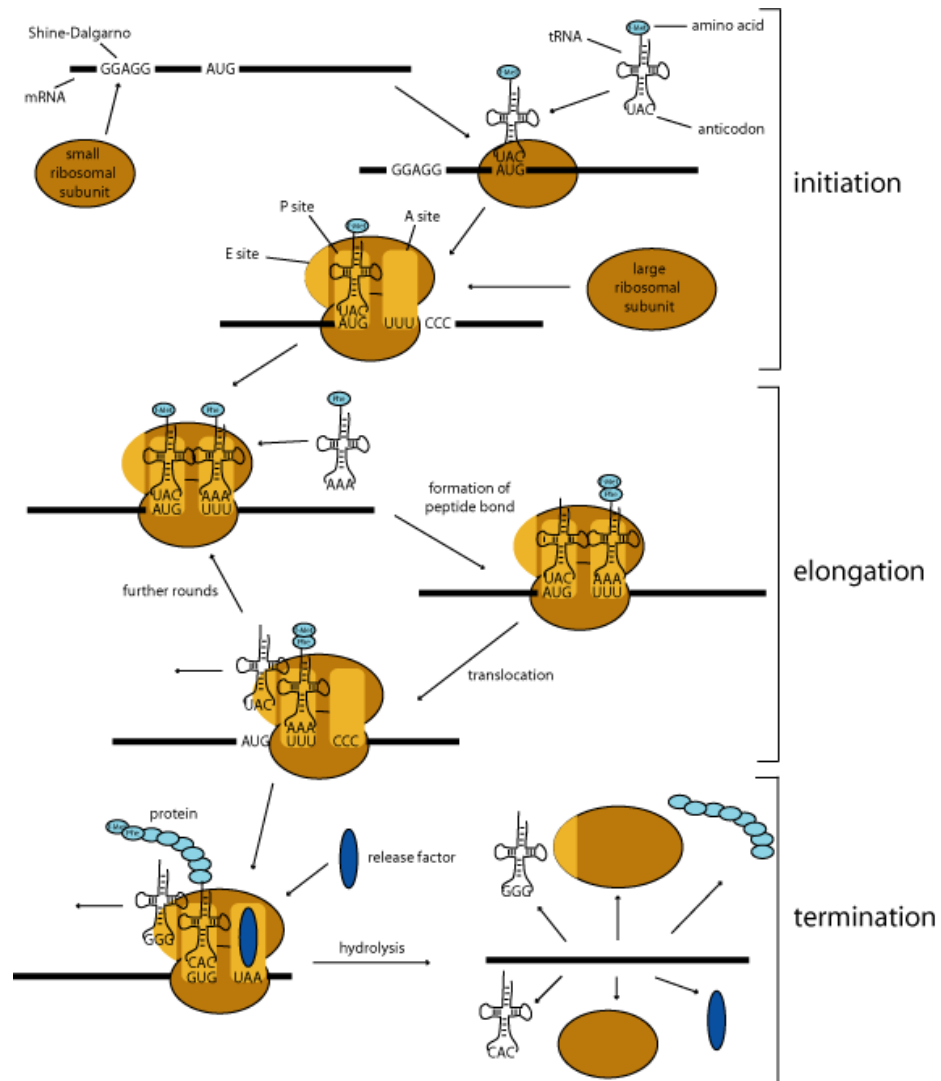
1. mRNA: นำสื่อความหมายทางพันธุกรรมจากโมเลกุล DNA เพื่อกำหนดลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนในสายโพลีเปปไทด์ที่จะสังเคราะห์ขึ้น
2. tRNA: เป็นตัวกระตุ้น และนำพากรดอะมิโนชนิดต่างๆ ไปเรียงตัวบนไรโบโซม หน่วยย่อยขนาดใหญ่
3. rRNA: เป็นโมเลกุลที่มีขนาดแตกต่างกัน และเป็นองค์ประกอบร่วมกับโปรตีนใน ไรโบโซม (ribosome) โดยไรโบโซมมีโครงสร้างประกอบด้วยหน่วยย่อย 2 หน่วย คือ ไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดเล็ก (small ribosome) ทำหน้าที่เป็นฐานรองรับสาย mRNA และไรโบโซมหน่วยย่อยขนาดใหญ่ (large ribosome) ทำหน้าที่รองรับ tRNA ครั้งละไม่เกิน 2 ตัวที่ตำแหน่งต่างกัน คือ ตำแหน่ง aminoacyl-tRNA site (A site) และ peptidyl-tRNA (P site)
4. กรดอะมิโน 20 ชนิด พลังงาน และเอนไซม์ชนิดต่างๆ เพื่อช่วยทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดอะมิโน และพลังงาน
5. Mg^{2+} , NH_4^+ , K^+ และปัจจัยเริ่มต้นซึ่งเป็นโปรตีน ได้แก่ IF-1, IF-2 และ IF-3

กระบวนการแปลรหัสโปรตีนประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักดังนี้

กระบวนการเริ่มต้น (initiation)

1.1 รหัสพันธุกรรมเริ่มต้น (start codon) ที่อยู่บน mRNA คือ AUG จะส่งผลให้ tRNA ที่มีรหัสแอนติโคดอน (anticodon) UAC เข้าไปจับกรดอะมิโน methionine ซึ่งกรดอะมิโนจะเข้าไปจับที่บริเวณปลาย 3' ของ tRNA ซึ่งมีลำดับเบส 3'-A-C-C ได้เป็น methionyltRNA (Met-tRNA^{Met})

1.2 มีการเพิ่มหมู่ฟอร์มิล (formyl group) เข้าที่กรดอะมิโน met กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า N-formylmethionyl-tRNA fMet (fmet-tRNA) ซึ่งจะเป็นตัวแรกที่เข้าสู่ตำแหน่งรหัสเริ่มต้น AUG ของสาย mRNA



ภาพที่ 9.4 กระบวนการ translation

ทั้งนี้ tRNA-Met ที่เป็นตัวต่อสายยาวของกรดอะมิโนจะไม่มี การเพิ่มหมู่ฟอร์มิล เหมือน tRNAMet ที่เป็นตัวเริ่มต้นกระบวนการแปลรหัส

1.3 IF-2.GTP เข้าไปรวมกับ fmet-tRNA กลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อน fmet-tRNA. IF-2.GTP

1.4 IF-3 รวมตัวชั่วคราวกับ mRNA และไรโบโซมชนิด 30S ทำให้ได้สารประกอบเชิงซ้อน IF-3.mRNA.30S ซึ่งสารประกอบเชิงซ้อนตัวนี้จะเข้าทำปฏิกิริยาร่วมกับสารประกอบ

เชิงซ้อนของ fmet-tRNA, IF-2.GTP และ IF-1 จนได้สารประกอบเชิงซ้อนขนาดใหญ่ที่เรียกว่า 30S initiation complex

ทั้งนี้ IF-1 IF-2 และ IF-3 มีหน้าที่ในการนำเอาสาร fmet-tRNA, mRNA และ 30S เข้ามาอยู่ด้วยกันในสภาพที่ค่อนข้างมันคง

1.5 ไรโบโซมชนิด 50S เข้ามารวมกับ 30S initiation complex ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เรียกว่า 70S initiation complex พร้อมทั้งมีการปล่อยพลังงานจาก GTP เป็น GDP และ IF ทั้ง 3 ชนิดก็หลุดออกด้วย

ทั้งนี้ ไรโบโซมชนิด 50S จะนำตำแหน่ง P Site มาที่บริเวณ fmet-tRNA, IF- 2.GTP เพื่อเป็นการป้องกันกรดอะมิโนตัวอื่นเข้ามาจับที่บริเวณปลายของกรดอะมิโน met ที่ เป็นตัวเริ่มต้น

กระบวนการต่อสายยาว (elongation):

กรดอะมิโนตัวอื่นจะเข้ามาต่อที่ละตัวตามรหัสโคดอน ที่แปลได้จากสาย mRNA ในทิศทาง $5' \rightarrow 3'$

2.1 หลังจากเกิด 70S initiation complex ซึ่งมี tRNA อยู่ที่ตำแหน่ง P site จากนั้น tRNA ตัวต่อไปจะนำกรดอะมิโนเข้ามาต่อที่ละตัว โดยเรียงตามรหัสโคดอนที่แปลได้จากสาย mRNA ในทิศทาง $5' \rightarrow 3'$ โดย tRNA จะเข้าทำปฏิกิริยาเคมีกับกรดอะมิโนเฉพาะตัว เกิด เป็น aminoacyl-tRNA (aa-tRNA) พร้อมกับมีพลังงาน GTP และสารปัจจัยยึดยาว EF-T เพื่อ ต่อสายโพลีเพปไทด์ จนทำให้เกิด tRNA ที่มีกรดอะมิโน เรียก charge tRNA เข้า สู่วัยไรโบโซมชนิด 50S ที่ตำแหน่ง A site

จากนั้นกรดอะมิโนตัวที่ 2 จะทำปฏิกิริยา peptidyl transferase กับกรดอะมิโนตัว แรก ที่อยู่บน tRNA ในตำแหน่ง P site เพื่อสร้างพันธะเพปไทด์ (CO-NH) จากนั้น tRNA ตัวที่ 1 จะหลุดออกจาก large ribosome ที่ตำแหน่ง P site ไรโบโซมจะเคลื่อนตัวไป ข้างหน้า ทำให้ tRNA ตัวที่ 2 ที่เคยอยู่ที่ตำแหน่ง A site ย้ายมาอยู่ที่ P site แทน โดยการทำงานของ EF-G และ GTP จากนั้นกรดอะมิโนตัวอื่นจะเข้ามาต่อที่ละตัวตาม รหัสโคดอนที่แปลได้จากสาย mRNA ในทิศทาง $5' \rightarrow 3'$ จนกว่าจะพบรหัสหยุด (stop codon) ที่อยู่บนสาย mRNA

กระบวนการสิ้นสุดการสังเคราะห์ (termination):

สายโพลีเพปไทด์จะสิ้นสุดการสังเคราะห์เมื่อเจอรหัสหยุด UAA หรือ UGA หรือ UAG ที่อยู่บนสาย mRNA เมื่อเจอรหัสดังกล่าวจะมีสารปัจจัยปลดปล่อย RF-1 RF-2 RF-3 เข้ามาที่ ไรโบโซม ณ ตำแหน่ง A site จากนั้นมีการตัดกลุ่ม -C-O ของกรดอะมิโนตัวสุดท้าย ออกจาก

tRNA ตัวสุดท้ายที่อยู่ตำแหน่ง P site ส่งผลให้สายโพลีเพปไทด์หลุดออกจากไรโบโซม พร้อมกับ tRNA ปกติ (uncharged tRNA) หลังจากนั้นไรโบโซมขนาดเล็ก และใหญ่ก็จะแยกตัวออกจากกัน เพื่อกลับไปทำหน้าที่เริ่มต้นการแปลรหัสใหม่

การสลายโปรตีนที่เซลล์กล้ามเนื้อ

การย่อยสลายโปรตีนที่เซลล์กล้ามเนื้อจะอาศัยการทำงานของ proteinases เป็นหลัก ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนการย่อยสลายของโปรตีนในกล้ามเนื้อพบว่าจะมีค่าต่ำกว่าการสลายที่เซลล์ตับ ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากในเซลล์ตับจะมีสัดส่วนของเอนไซม์ proteinases สูงกว่า

เอนไซม์ proteinases จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายโปรตีนต่างชนิดกัน โดยพบว่า sarcoplasmic protein หรือ โปรตีนที่เป็นเยื่อใยโครงร่าง ส่วนมากจะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ proteinases ชนิดที่เป็นกรด (acidic proteinases) ที่เป็นเอนไซม์ lysosomes เช่น cathepsin D ที่พบในเซลล์ตับ แต่อย่างไรก็ตามอาจจะพบเอนไซม์ชนิดนี้ใน microphages ของเซลล์กล้ามเนื้อได้ ในขณะที่ myofibrillar protein จะถูกสลายโดยเอนไซม์ alkaline proteinases เช่น Ca^{2+} -activated proteinase or -factor (CAF) ที่พบใน sarcoplasm แต่ไม่พบใน lysosomes หรือ microsomal อื่น อัตราการย่อยสลายโปรตีนที่กล้ามเนื้อจะลดลงตามสัดส่วนการลดลงของการสังเคราะห์โปรตีน ทั้งนี้อาจขึ้นกับปัจจัยด้านการได้รับอาหารโปรตีนหรือปริมาณพลังงาน ทั้งนี้การอยู่ในสภาวะเครียดหรือมีการได้รับ glucocorticoid อาจจะทำให้อัตราการสลายโปรตีนเพิ่มขึ้นเพื่อรักษาสสมดุลโปรตีนในกล้ามเนื้อให้ปกติ โดยปัจจัยดังกล่าวอาจมีผลต่อการควบคุมการทำงานของ proteinases อีกทีหนึ่ง

เมแทบอลิซึมของไขมันในเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue)

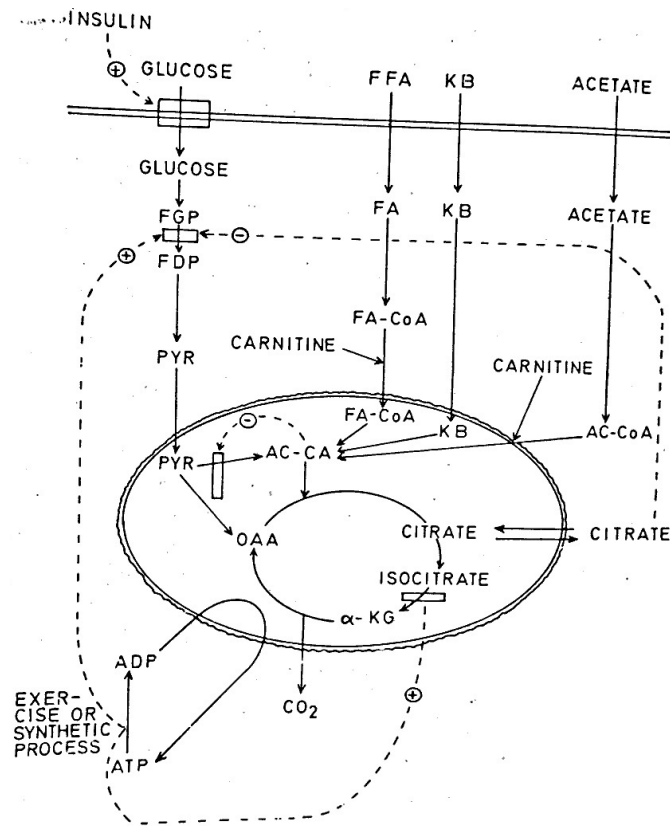
เนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissues) ประกอบด้วยเซลล์ที่เรียกว่า อดิพไซต์ (adipocyte) เป็นแหล่งสะสมพลังงานของร่างกายในขณะที่ร่างกายได้รับพลังงานเกินความต้องการ และนำมาใช้ในขณะร่างกายได้รับพลังงานจากอาหารไม่เพียงพอ เนื้อเยื่อไขมันมีความเกี่ยวข้องกับการรักษาระดับ triacylglyceride และกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ในกระแสเลือด เกี่ยวข้องกับการควบคุมเมแทบอลิซึมของร่างกาย เป็นแหล่งที่ผลิตสารต่างๆ หลายชนิด เรียกโดยรวมว่าออดิพไคน์ (adipokine) หรือออดิพไซโตไคน์ (adipocytokine) บรรดาสารต่างๆ เหล่านี้บางชนิดสามารถจัดเป็นฮอร์โมน ปัจจุบันพบว่าความผิดปกติของระดับฮอร์โมนต่างๆ ที่สร้างจากเนื้อเยื่อไขมันมีความเกี่ยวข้องกับพยาธิสภาพต่างๆ ของร่างกายจำนวนมากเซลล์ไขมันในสัตว์

เลี้ยงลูกด้วยนม เป็นเซลล์ที่มีการพัฒนาเพื่อเก็บไขมันไว้ในเซลล์โดยมีเอนไซม์ต่างๆ สำหรับกระบวนการสร้างไขมันและสลายไขมัน (lipogenesis และ lipolysis) โดยมีระบบอื่นๆ ของร่างกายที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าวทั้งในทางตรงและทางอ้อมได้แก่ ระบบประสาทส่วนกลาง มีส่วนร่วมทางอ้อมโดยผ่านทางความหิวและความอยากอาหาร ระบบทางเดินอาหารเกี่ยวข้องกับการย่อยและดูดซึมสารอาหาร ระบบต่อมไร้ท่อที่มีฮอร์โมนหลายชนิดที่มีผลต่อการใช้หรือเก็บสะสมพลังงานหรือเกี่ยวข้องกับการเมแทบอลิซึม ฮอร์โมนเหล่านี้จึงมีส่วนเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์หรือการสลายไขมันตามความต้องการของร่างกายในแต่ละชนิดด้วย

เนื้อเยื่อไขมันแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ ได้แก่เนื้อเยื่อไขมันสีน้ำตาล (brown adipose tissue, BAT) และเนื้อเยื่อไขมันขาว (white adipose tissue, WAT) เนื้อเยื่อไขมันสีน้ำตาลเป็นเนื้อเยื่อไขมันที่มีบทบาทในการสร้างความร้อน เซลล์มีขนาดเล็กกว่าเนื้อเยื่อไขมันขาวและมีไขมันสะสมภายในไซโทพลาสซึม (cytoplasm) ในลักษณะเป็นหยดเล็กๆ จำนวนมาก ส่วนเนื้อเยื่อไขมันขาวจะมีเซลล์ไขมันที่มีขนาดใหญ่กว่า และสะสมไขมันไว้ในไซโทพลาสซึมเป็นหยดใหญ่เพียงหยดเดียว พบกระจายอยู่ทั่วไปในร่างกายในลักษณะต่างๆ ทำหน้าที่สำคัญในการป้องกันเชิงกล (mechanical protection) เช่นลดแรงกระแทกจากภายนอก เป็นฉนวนการสะสมพลังงานและมีความสามารถในการปลดปล่อยพลังงานมาใช้เมื่อร่างกายต้องการ จึงจัดเป็นเนื้อเยื่อสำคัญสำหรับการปรับสมดุลของพลังงานของร่างกาย

เนื้อเยื่อไขมันเป็นที่เก็บสะสม triacylglyceride เพื่อใช้เป็นพลังงานสำรองในระยะ fasting หรือ starvation triacylglyceride ได้จากพลังงานส่วนเกินที่ได้รับจากอาหาร ถ้าร่างกายได้รับมากกว่าพลังงานที่ใช้เป็นเวลานานจะทำให้เกิดการสะสมไขมันมากกว่าปกติ เนื้อเยื่อไขมันได้รับ triacylglyceride จาก chylomicron และ VLDL triacylglyceride จากกระแสเลือดไม่ได้เข้าสู่เซลล์โดยตรง แต่จะถูกสลายเป็นกรดไขมันก่อนโดยเอนไซม์ lipoprotein lipase ในหลอดเลือดฝอย เอนไซม์ lipoprotein lipase สังเคราะห์ในเนื้อเยื่อไขมัน และ parenchymal cell ถูกกระตุ้นด้วยอินซูลิน ให้หลังจากเซลล์มาอยู่ที่ endothelium เพื่อทำหน้าที่

กรดไขมันจากการย่อยลิโปโปรตีนเข้าสู่เซลล์และถูกสังเคราะห์กลับเป็น triacylglyceride ใหม่เพื่อเก็บสะสม สลายเป็นพลังงาน หรือทำหน้าที่อย่างอื่น การสังเคราะห์ triacylglyceride ในเนื้อเยื่อไขมันใช้วิธี glycerol phosphate pathway โดยได้ glycerol-3-phosphate จากไกลโคไลซิสเป็นสารตั้งต้น เนื้อเยื่อไขมันไม่ใช้ glycerol ในการสังเคราะห์ไขมัน เพราะไม่มีเอนไซม์ glycerokinase สำหรับเปลี่ยนกลีเซอรอลไปเป็น glycerol-3-PO₄



ภาพที่ 9.5 เมแทบอลิซึมหลักของกรดไขมันที่เกิดขึ้นในเซลล์เนื้อเยื่อไขมัน
ที่มา: Riis (1983)

ไขมันที่ได้จากอาหารและไขมันที่เก็บสะสมไว้ในร่างกายที่เนื้อเยื่อไขมัน สามารถถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานแก่ร่างกายได้ เมื่อร่างกายได้รับคาร์โบไฮเดรตไม่เพียงพอสำหรับการสร้างพลังงาน ไขมันสามารถให้พลังงานแก่สัตว์ได้ โดยไขมันหรือ triacylglyceride จะต้องถูกย่อยโดยเอนไซม์ไลเปสให้เป็นกลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระก่อน การเมแทบอลิซึมของไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้องจะคล้ายคลึงกับในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง มีข้อแตกต่างกันบ้างคือ ในสัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถสังเคราะห์ไขมันที่มีสายยาวๆ และสายสั้นๆ ได้มากกว่าสัตว์เคี้ยวไม่เอื้อง และในส่วนของเซลล์ตับการสังเคราะห์ไขมันจะมีน้อยกว่าในเนื้อเยื่อของไขมันตามส่วนต่างๆ ของร่างกาย การสังเคราะห์กรดไขมันสายยาว (C₁₈) จะเกิดขึ้นที่เซลล์ของเนื้อเยื่อไขมัน แต่การสังเคราะห์กรดไขมันในนม (C₄-C₁₆) จะเกิดขึ้นที่เซลล์ของต่อมน้ำนม สำหรับในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง แหล่งของสารที่ใช้ในการสังเคราะห์กรดไขมันคือ acetyl-Co A ที่ได้จากกลูโคส แต่ในสัตว์เคี้ยวเอื้องแหล่งของสารตั้งต้นที่จะใช้ในการสังเคราะห์กรดไขมันในร่างกายคือ acetate และ

β -hydroxybutyrate จากภาพที่ 9.5 แสดงสารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไขมันและเมแทบอลิซึมที่เกิดขึ้น ที่เนื้อเยื่อไขมัน

การสลาย triacylglyceride ในเนื้อเยื่อไขมัน

โดยปกติการสะสมไขมันหรือ triacylglyceride ในเซลล์เนื้อเยื่อไขมัน (adipocyte) จะเกิดขึ้นได้อย่างไม่จำกัด เราจึงพบคนที่มีรูปร่างอ้วนมากๆ ได้ ส่วนการสลาย triacylglyceride จากเซลล์เนื้อเยื่อไขมันจะมีระบบฮอร์โมนในการควบคุมการย่อยสลาย ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นกรดไขมันอิสระและกลีเซอรอล พลังงานที่ได้จากการย่อยสลายกรดไขมันต่อด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันจะคิดเป็น 95% ส่วนอีก 5% เป็นพลังงานที่ได้จากกลีเซอรอลซึ่งเปลี่ยนเป็นสารตัวกลางที่สามารถเข้าสู่วิถีไกลโคไลซิสได้ การสลาย triacylglyceride จากเซลล์เนื้อเยื่อไขมันจะเกิดขึ้นเมื่อกลิโคไลซิสซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหลักของร่างกายลดลง ซึ่งดูได้จากระดับกลูโคสในเลือดที่ลดลงนั่นเอง ในการสลาย triacylglyceride จากเซลล์เนื้อเยื่อไขมันจะมีลักษณะคล้ายกับการสลายไกลโคเจน (glycogen) ที่สะสมในตับ กล่าวคือปฏิกิริยาแรกของการสลายจะมีการควบคุมด้วยระบบฮอร์โมนเช่นเดียวกัน ซึ่งฮอร์โมน Glucagon หรือ Epinephrine หรือ β -corticotropin จะจับกับตัวรับฮอร์โมน (Hormone receptor) ที่เยื่อหุ้มเซลล์ของ adipocyte แล้วกระตุ้นให้เอนไซม์ adenylate cyclase ทำงานโดยสังเคราะห์ cAMP จาก ATP จากนั้น cAMP จะไปกระตุ้นให้เอนไซม์ cAMP-dependent protein kinase ทำหน้าที่เติมหมู่ฟอสเฟตให้กับเอนไซม์ triacylglycerol lipase เพื่อให้เอนไซม์สามารถทำงานได้ จึงเรียก triacylglycerol lipase ว่าเป็น “Hormone-sensitive lipase”

ฮอร์โมนที่ทำหน้าที่กระตุ้นในระบบนี้ คือ norepinephrine, epinephrine และ theophylline จะทำให้เกิด lipolysis เพิ่มขึ้นอีก 3-4 เท่าในสัตว์เคี้ยวเอื้อง ในขณะที่ glucagon, อินซูลิน และกลูโคสมีผลกระตุ้นน้อยมาก Epinephrine จะมีผลในหนู สุนัข และคน แต่ไม่มีผลในสุกร สัตว์ปีก และหนูตะเภา เคยมีผู้รายงานว่าอินซูลินมีผลให้ fat mobilization ลดลง แต่ยังไม่มีความชัดเจนที่แน่นอน ส่วน Growth hormone นั้นมีผู้รายงานว่ามีส่วนช่วยกระตุ้นให้เกิด fat mobilization เพิ่มขึ้น

การควบคุม fat mobilization และ fat deposition ในเนื้อเยื่อไขมัน เป็นหน้าที่สำคัญของสัตว์เคี้ยวเอื้องเพื่อทำให้ metabolic energy และ dietary energy มีความสมดุลย์กัน การกระตุ้นการทำงานของ hormone sensitive lipase จะส่งเสริมให้เกิด lipolysis มากขึ้น และทำให้การเคลื่อนตัวของกรดไขมันและกลีเซอรอลผ่านผนังเซลล์เพิ่มขึ้น ที่

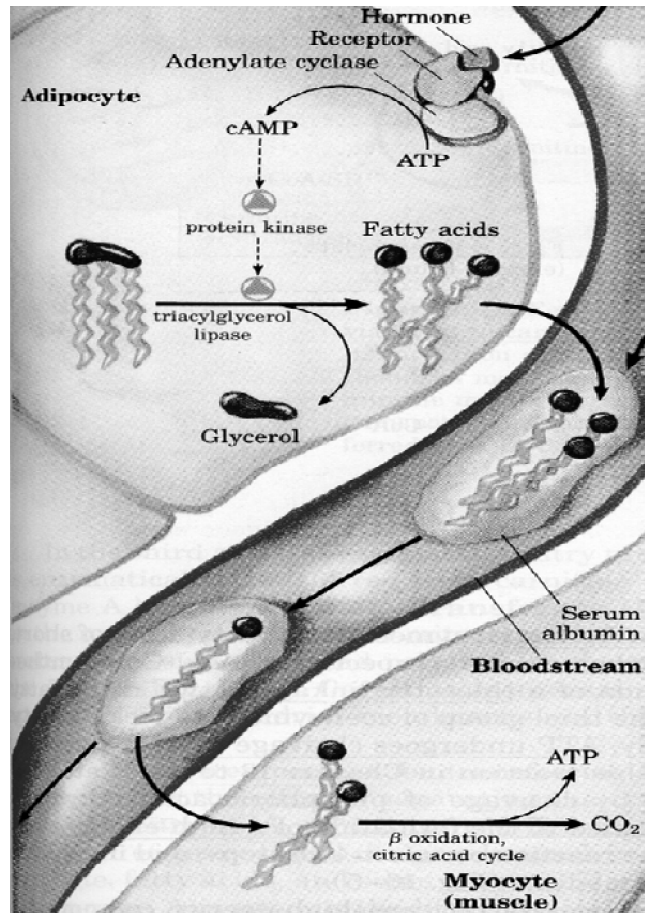
เยื่อไขมัน (adipose tissue) จะเป็นแหล่งหลักของการสังเคราะห์ กรดไขมัน และ acetate flow โดยผ่านเข้าไปยังอะดิโพไซต์ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการสังเคราะห์กรดไขมันมากขึ้น

การประพัตตัวของสัตว์เคี้ยวเอื้องในช่วงการให้นม จะแสดงบ่งบอกถึงกลไกควบคุม fat mobilization และการลดสภาวะการนี้ลง โดยเฉพาะการตอบสนองของไขมันน้ำนมต่ออาหารที่โคที่ได้รับ ซึ่งจะแสดงถึงความสลับซับซ้อนที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เช่น fat mobilization จะมีผลตอบสนองต่อการลดระดับอาหารทันที คือ จะมีผลทำให้ไขมันในนมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะ 2-3 วัน และจะลดลงหลังจากนั้น เพราะฉะนั้นจึงจำเป็นต้องเอาใจใส่อย่างละเอียดและสม่ำเสมอต่อสภาวะการนี้ที่เกิดขึ้น (Van Soest, 1982)

เอนไซม์ triacylglycerol lipase จะทำหน้าที่ย่อยสลาย triacylglyceride ที่สะสมในเนื้อเยื่อไขมัน โดยการสลายพันธะเอสเทอร์ตรงคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 หรือ 3 ของกลีเซอรอล ได้กรดไขมันอิสระและ diacylglycerol อย่างละ 1 โมเลกุล ซึ่ง diacylglycerol จะถูกย่อยสลายต่อด้วย diacylglycerol lipase ได้กรดไขมันอิสระและ monoacylglycerol จากนั้น monoacylglycerol จะถูกย่อยสลายต่อด้วย monoacylglycerol lipase ได้กรดไขมันอิสระ 1 โมเลกุล และกลีเซอรอล

กรดไขมันอิสระที่ได้จะถูกส่งออกนอกเซลล์เข้าสู่กระแสเลือดเพื่อไปยังเนื้อเยื่อที่ต้องการพลังงานต่อไป โดยมีโปรตีนอัลบูมิน (albumin) เป็นตัวพากรดไขมันอิสระไปในกระแสเลือด ซึ่งอัลบูมิน 1 โมเลกุล สามารถเป็นตัวพากรดไขมันอิสระได้มากถึง 10 โมเลกุล

การสลายนี้เกิดในระยะ fasting starvation หรือ ระหว่างการออกกำลัง โดยเอนไซม์ adipose triacylglycerol lipase ซึ่งเป็น hormone-sensitive lipase ร่วมกับ tri-, di- และ monoacyl hydrolases โดยเฉพาะเอนไซม์ hormone-sensitive lipase จะถูกกระตุ้นได้ด้วย กลูคากอน และ adrenaline แต่จะถูกยับยั้งด้วยอินซูลิน

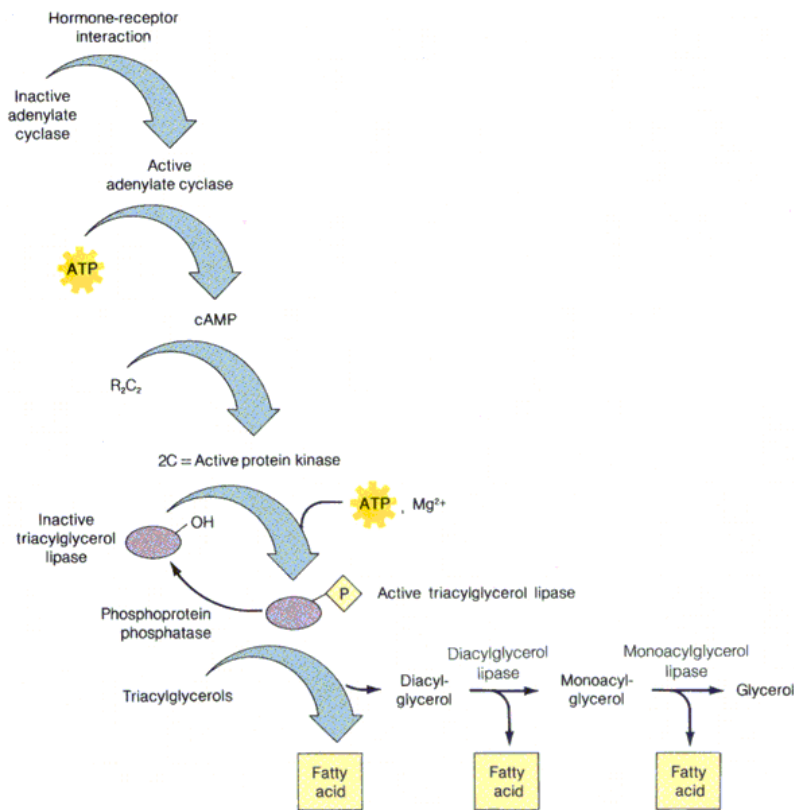


ภาพที่ 9.6 การสลาย triacylglyceride ในเซลล์เนื้อเยื่อไขมัน (adipocyte)

ที่มา: Nelson and Cox (2000)

การควบคุมการสังเคราะห์และการสลาย triacylglyceride ในเนื้อเยื่อไขมัน (ภาพที่ 9.7)

1. ในระยะ fed state เนื้อเยื่อไขมันจะทำหน้าที่เก็บไขมันโดยได้รับกรดไขมันจากการสลาย triacylglyceride ในอนุของ chylomicron ที่ดูดซึมจากทางเดินอาหาร โดยใช้เอนไซม์ lipoprotein lipase ซึ่งหลังจากเนื้อเยื่อไขมันเองโดยการกระตุ้นของอินซูลิน ส่วน glycerol-3-phosphate สำหรับการสังเคราะห์ triacylglyceride ได้จากไกลโคไลซิสซึ่งมีการกระตุ้นด้วยอินซูลินเช่นกัน



ภาพที่ 9.7 การควบคุมการสลาย triacylglycerol อย่างเป็นลำดับขั้นในเซลล์เนื้อเยื่อไขมัน
ที่มา: Nelson and Cox (2000)

2. ในระยะ fasting ระดับอินซูลินในเนื้อเยื่อจะต่ำ เนื้อเยื่อไขมันจะทำหน้าที่สลายไขมันให้เนื้อเยื่ออื่นได้ใช้ โดยฤทธิ์กระตุ้นของกลูคากอนซึ่งจะทำให้ cAMP เพิ่มขึ้น มีผลทำให้เอนไซม์ hormone-sensitive lipase ซึ่งอยู่ในเซลล์ถูกกระตุ้น เกิดการย่อยไขมันได้เป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล กรดไขมันจะถูกพาไปในกระแสเลือดด้วยแอลบูมิน และนำไปใช้ในเซลล์อื่นๆได้ ส่วนกลีเซอรอล เปลี่ยนเป็นกลูโคสได้ในตับ

3. ในเวลาออกกำลังกาย adrenaline มีฤทธิ์กระตุ้นการสลายไขมันผ่าน cAMP เช่นเดียวกับกลูคากอน

การเก็บสะสม triacylglyceride ในเนื้อเยื่อไขมัน

ภายหลังรับประทานอาหาร การเก็บสะสม triacylglyceride จะเพิ่มขึ้น เซลล์ไขมันจะสังเคราะห์ LPL และหลั่งออกมาในเส้นเลือดฝอยของเนื้อเยื่อไขมันเมื่ออัตราส่วนของอินซูลิน/

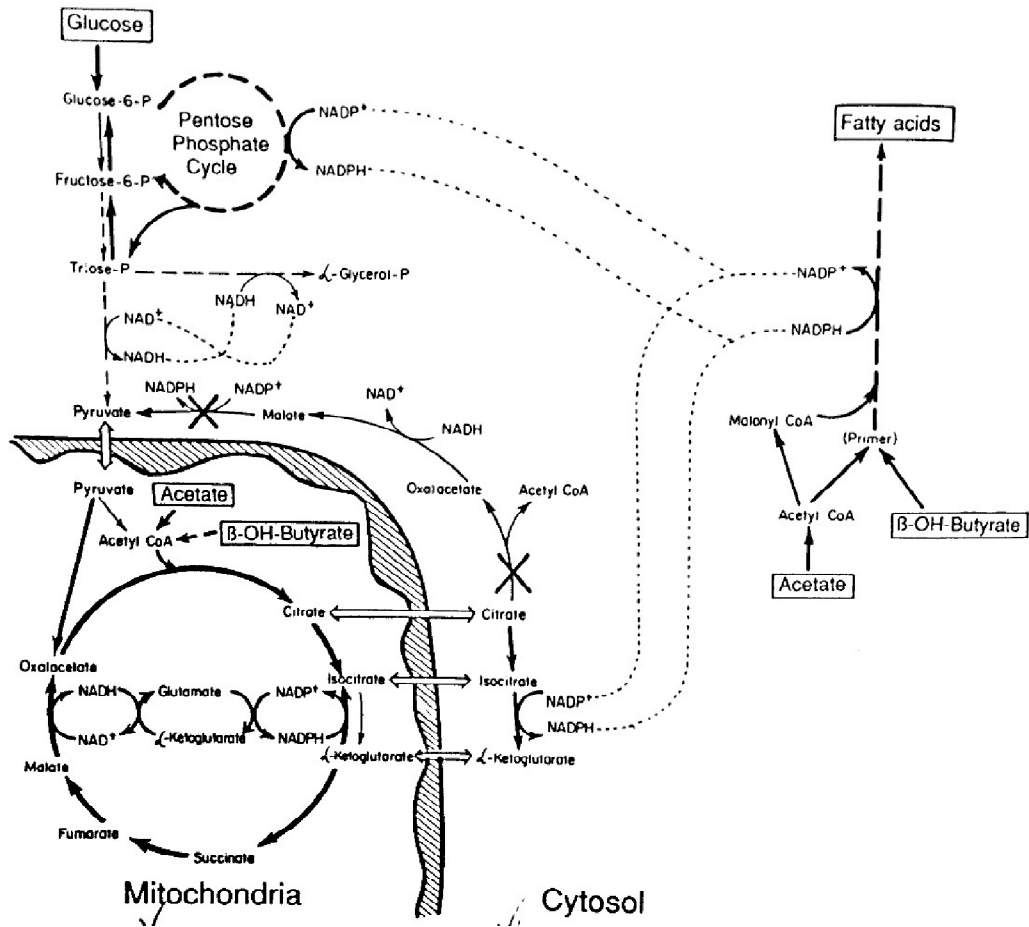
กลูคากอนเพิ่มขึ้น เอนไซม์นี้จะไปทำการย่อย triacylglyceride ที่อยู่ในสภาพโคไลไมครอน และ VLDL กรดไขมันที่ได้จะเข้าสู่เซลล์ตรงเนื้อเยื่อไขมันแล้วเปลี่ยนไปเป็น fatty acyl CoA ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ glycerol-3-phosphate แล้วเปลี่ยนไปเป็น triacylglycerol โดย pathway เดียวกับที่เกิดขึ้นที่ตับ เนื่องจากในเนื้อเยื่อไขมันไม่มี glycerol kinase และไม่สามารถใช้กลีเซอรอลที่ได้มาจาก LPL กลีเซอรอลจะผ่านจากเลือดเข้าสู่ตับ ซึ่งจะใช้ไปสังเคราะห์ triacylglyceride ในเนื้อเยื่อไขมัน glycerol-3-phosphate ได้มาจาก กลูโคส

ในการกระตุ้นให้มีการสังเคราะห์ และหลัง LPL ให้เพิ่มขึ้นอินซูลินจะไปกระตุ้นเมแทบอลิซึมของ กลูโคส ในเนื้อเยื่อไขมัน และจะไปกระตุ้น glycolytic enzyme phosphofructokinase-1 โดยทำให้ระดับของ fructose 2,6-bisphosphate เพิ่มขึ้น และในขณะเดียวกันก็จะไปกระตุ้น dephosphorylation ของ pyruvate dehydrogenase ดังนั้น ไขมันที่ได้จากไกลโคไลซิส สามารถถูกออกซิไดส์ใน TCA cycle นอกจากนี้ insulin ยังกระตุ้นการเปลี่ยนกลูโคสไปเป็นกรดไขมันในเซลล์ไขมัน แม้ว่าตับจะเป็นอวัยวะสำคัญในการสังเคราะห์กรดไขมันในมนุษย์ก็ตาม

การสังเคราะห์ไขมัน (lipogenesis)

ในสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้นเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) จะทำหน้าที่ในการสังเคราะห์กรดไขมัน ประมาณ 92% และอีก 5-6% เกิดขึ้นที่ตับ ส่วนในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตับ (เมธา, 2533) ส่วนการสังเคราะห์ไขมันขึ้นมาใหม่ (de novo synthesis) เกิดมากในตับ ที่สำคัญรองลงมาคือ เนื้อเยื่อไขมัน และต่อมไขมัน นอกจากนี้ การสังเคราะห์กรดไขมันสายยาว (C₁₈) จะเกิดขึ้นที่เซลล์ของเนื้อเยื่อไขมัน แต่การสังเคราะห์กรดไขมันในนม (C₄-C₁₆) จะเกิดขึ้นที่เซลล์ของต่อมไขมัน โดยหลักการในการสังเคราะห์ในเนื้อเยื่อไขมัน มีหลักการเช่นเดียวกันกับการสังเคราะห์ในตับ และได้อธิบายไว้แล้วในบทที่ 8

ในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง กลูโคสจะถูกใช้เป็นแหล่งหลักในการสังเคราะห์เป็นกรดไขมัน แต่ในสัตว์เคี้ยวเอื้องใช้อะซิเตท ไฮโดรเจน และพลังงานจาก nicotinamide adenine dinucleotide



ภาพที่ 9.8 วิธีการสังเคราะห์กรดไขมันในเนื้อเยื่อไขมันของสัตว์เคี้ยวเอื้อง

ที่มา: Van Soest (1982)

phosphate (NADPH) และ adenosine 5'-triphosphate (ATP) (Riis, 1986) ซึ่ง NADPH และ ATP ถูกสร้างขึ้นมาจากกระบวนการออกกซิเดชันของกลูโคส และอะซิเตต ความแตกต่างในการใช้ primer ต่างกัน ทำให้เกิดสภาวะความสมดุลของ ATP ที่ได้ต่างกัน เนื่องจากการสังเคราะห์ไขมัน การผลิต ATP ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์กับความต้องการของเซลล์นั้น จะยังผลไปควบคุมการสังเคราะห์กรดไขมัน กล่าวคือ ถ้ามี ATP มากจะทำให้การสังเคราะห์กรดไขมันเพิ่มขึ้น ในสัตว์เคี้ยวเอื้องโดย TCA cycle จะมีการผลิต ATP มากเกินพอ แต่ในการเมแทบอลิซึมของกลูโคสผ่านขบวนการ pentose pathway จะได้รับ ATP ไม่เพียงพอ ภายใน TCA cycle มีกลไกหนึ่งเกิดขึ้น โดยการผลิต reducing power โดยไม่มีการผลิต ATP คือ

ระหว่าง isocitrate กับ oxaloacetate ซึ่งอยู่ภายในไมโทคอนเดรีย ปัญหาของการสังเคราะห์กรดไขมันที่เกิดขึ้นคือ ความสมดุลระหว่างผลผลิต ATP กับผลผลิตของ NADPH ซึ่ง NADPH มีความจำเป็นในขบวนการสังเคราะห์กรดไขมัน ส่วนในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องนั้น NADPH ได้จากขบวนการ pentose shunt และจากการทำงานของเอนไซม์ malate dehydrogenase ซึ่งน้ำย่อยนี้ไม่มีในระบบของสัตว์เคี้ยวเอื้อง ในระบบของสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องนั้นจะอาศัยการสังเคราะห์กรดไขมันจากกลูโคส และจากขบวนการเกิดโดยสมบูรณ์ของ Pyruvate \rightarrow citrate \rightarrow oxaloacetate \rightarrow pyruvate cycle ในสัตว์เคี้ยวเอื้องที่ระบบการย่อยทำหน้าที่ได้สมบูรณ์แล้วนั้น จะไม่มีวัฏจักรนี้เกิดขึ้น ทั้งนี้เป็นเพราะไม่สามารถเปลี่ยน glucose \rightarrow acetyl CoA \rightarrow กรดไขมัน เพราะไม่มีน้ำย่อย citrate cleavage (ภาพที่ 9.8) (เมธา, 2533)

การควบคุมการสังเคราะห์กรดไขมัน (control of fatty acid synthesis)

การสังเคราะห์กรดไขมัน โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่เซลล์เนื้อเยื่อไขมัน ซึ่งเป็นบริเวณที่มีการสะสม triacylglyceride เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำรองของร่างกาย นอกจากนี้ยังมีการสังเคราะห์กรดไขมันได้ที่เซลล์ตับ โดยกลไกการควบคุมการสังเคราะห์กรดไขมันจะเป็นการควบคุมโดยระบบฮอร์โมน (เมธา, 2533)

ฮอร์โมนอินซูลิน มีบทบาทในการกระตุ้นการสังเคราะห์กรดไขมันโดย (1) กระตุ้นการนำกลูโคสเข้าสู่เซลล์ ซึ่งจะทำให้เกิดไกลโคไลซิสเพิ่มขึ้น และได้ไพรูเวท (pyruvate) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ acetyl-CoA เพิ่มมากขึ้น และ (2) กระตุ้นเอนไซม์ pyruvate dehydrogenase ให้อยู่ในรูปที่ทำงาน เพื่อให้มีการสังเคราะห์ acetyl-CoA ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กรดไขมันอย่างเพียงพอ

สำหรับเอนไซม์ acetyl-CoA carboxylase ซึ่งเป็นเอนไซม์ตัวแรกในวิถีการสังเคราะห์กรดไขมัน จะถูกกระตุ้นให้อยู่ในรูปที่ทำงานได้ด้วย citrate และกระตุ้นให้อยู่ในรูปที่ไม่ทำงานโดย Long-chain fatty acyl-CoA นอกจากนี้ปริมาณ NADPH ในเซลล์ ก็มีบทบาทสำคัญในการสังเคราะห์กรดไขมัน เช่นกัน โดย NADPH ได้มาจากวิถีการขนส่ง citrate ออกจากไมโทคอนเดรีย และ วิถีเพนโทสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway) โดย NADPH ที่ใช้สำหรับสังเคราะห์กรดไขมันส่วนใหญ่ได้มาจากวิถีเพนโทสฟอสเฟต และถ้าเซลล์มีความต้องการ NADPH สำหรับสังเคราะห์กรดไขมันเพิ่มขึ้น พบว่าปฏิกิริยาในวิถีเพนโทสฟอสเฟตก็จะเกิดมากขึ้นเพื่อผลิต NADPH เช่นกัน

สรุป

กระบวนการเมแทบอลิซึมของไขมันที่เกิดขึ้นที่เซลล์กล้ามเนื้อและเนื้อเยื่อไขมัน ที่สำคัญได้แก่ โปรตีนและไขมัน แต่อย่างไรก็ตามยังมีสารตัวกลางอื่นๆ ที่สามารถเกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมที่อวัยวะส่วนนี้ได้ เช่น กลูโคส แลคเตต คีโตนบอดี และกรดอะซิเตต เป็นต้น ซึ่งวิธีการเกิดกระบวนการเหล่านี้ ได้อธิบายไว้ในบทที่ผ่านมาแล้ว สำหรับเซลล์กล้ามเนื้อ มีหน้าที่สำคัญที่สุดคือเก็บสะสมโปรตีนเพื่อใช้ประโยชน์ ส่วนหน้าที่รองลงมาคือการปลดปล่อยกรดอะมิโน เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเซลล์อื่นๆ ในส่วนของเซลล์เนื้อเยื่อไขมัน ทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมพลังงานของร่างกายในรูปของ triacylglyceride ไว้ภายในเซลล์โดยมีเอนไซม์ต่างๆ ในการสังเคราะห์โปรตีนจะเริ่มจาก การถอดรหัสพันธุกรรม (transcription) ไปเป็นสาย mRNA เพื่อเป็นตัวสื่อความหมายทางพันธุกรรมจาก DNA จากนั้นสาย mRNA จะ แปลรหัสพันธุกรรม (translation) เพื่อสังเคราะห์สายโปรตีน โดยกระบวนการต่างๆ ที่เกิดขึ้นจะมีปัจจัยต่างเข้ามาเกี่ยวข้องมากมาย ซึ่งกระบวนการนี้นอกจากจะเกิดในเซลล์กล้ามเนื้อแล้ว ที่เซลล์ต่อมน้ำนม (mammary gland) จะมีกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนในน้ำนมเช่นเดียวกันนี้ ส่วนการสลายโปรตีนในเซลล์กล้ามเนื้อ จะอาศัยการทำงานของ proteinases เป็นหลัก เช่น cathepsin D, Ca^{2+} -activated proteinase or -factor (CAF) เป็นต้น

อัตราการสะสมโปรตีนและการปลดปล่อยกรดอะมิโนในกล้ามเนื้อจะสามารถวัดได้จากอัตราการสังเคราะห์โปรตีน ส่วนการเปลี่ยนแปลงอัตราการย่อยสลายโปรตีน ส่วนมากจะขึ้นกับอัตราการสังเคราะห์การสังเคราะห์โปรตีนเป็นหลัก ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของการสะสมและกรดปลดปล่อยของกรดอะมิโนจะมีผลน้อยกว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนการสังเคราะห์โปรตีน ทั้งนี้ ทั้งอัตราการสังเคราะห์และอัตราการย่อยสลายโปรตีนจะมีความสัมพันธ์แบบผันตรงกันกับสถานะของโภชนาการในสัตว์ และสัดส่วนทั้งสองจะมีค่าลดลงตามจำนวนอายุที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ การหมุนเวียนของโปรตีนจะลดลงเมื่อสัตว์อยู่ในสภาพที่ได้รับโภชนาการต่ำหรืออยู่ในระยะของการอดอาหาร ในการสะสมโปรตีนที่สูงขึ้นจำเป็นต้องมีสัดส่วนการสังเคราะห์และการย่อยสลายโปรตีนที่สูงเช่นเดียวกัน สัดส่วนของการสังเคราะห์โปรตีนวัดได้จากปริมาณของ ribosomal RNA ซึ่งเป็นผลมาจากการทำงานของเอนไซม์ RNA polymerase และมีความสัมพันธ์กับปริมาณ DNA ในเนื้อเยื่อด้วย

ไขมันที่ได้จากอาหารและไขมันที่เก็บสะสมไว้ในร่างกายที่เนื้อเยื่อไขมัน สามารถถูกนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานแก่ร่างกายได้ เมื่อร่างกายได้รับคาร์โบไฮเดรตไม่เพียงพอสำหรับการ

สร้างพลังงาน โดยพบว่ากรดไขมันจากการย่อยลิโปโปรตีนเข้าสู่เซลล์จะถูกสังเคราะห์กลับเป็น triacylglyceride ใหม่เพื่อเก็บสะสม สลายเป็นพลังงาน หรือทำหน้าที่อย่างอื่น การสลาย triacylglyceride จากเซลล์เนื้อเยื่อไขมันจะมีลักษณะคล้ายกับการสลายไกลโคเจน (glycogen) ที่สะสมในตับ กล่าวคือปฏิกิริยาแรกของการสลายจะมีการควบคุมด้วยระบบฮอร์โมน เช่นเดียวกัน ส่วนเอนไซม์ triacylglycerol lipase จะทำหน้าที่ย่อยสลาย triacylglyceride ที่สะสมในเนื้อเยื่อไขมัน และกรดไขมันอิสระที่ได้จะถูกส่งออกนอกเซลล์เข้าสู่กระแสเลือดเพื่อไปยังเนื้อเยื่อที่ต้องการพลังงานต่อไป ส่วนการสังเคราะห์ไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้องเกิดที่เนื้อเยื่อไขมันเป็นหลัก ส่วนในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องส่วนใหญ่เกิดขึ้นในตับ การสังเคราะห์กรดไขมันสายยาว (C_{18}) จะเกิดขึ้นที่เซลล์ของเนื้อเยื่อไขมัน แต่การสังเคราะห์กรดไขมันในนม (C_4 - C_{16}) จะเกิดขึ้นที่เซลล์ของต่อมน้ำนม โดยหลักการในการสังเคราะห์ในเนื้อเยื่อไขมัน มีหลักการเช่นเดียวกันกับการสังเคราะห์ในตับ ซึ่งแหล่งของคาร์บอนหลักที่ใช้สังเคราะห์ไขมันคือ อะซิเตทไฮโดรเจน และพลังงานจาก nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH) และ adenosine 5'-triphosphate (ATP) สำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง ส่วนในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องจะใช้กลูโคสเป็นหลัก ส่วนกลไกการควบคุมการสังเคราะห์กรดไขมันจะเป็นการควบคุมโดยระบบฮอร์โมน

คำถามท้ายบท

1. อธิบายกระบวนการสังเคราะห์และการสลายโปรตีนในกล้ามเนื้อ
2. อธิบายกระบวนการสังเคราะห์และการสลายไขมันในเนื้อเยื่อไขมัน
3. จงอธิบายความแตกต่างของกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เกิดขึ้นในเซลล์กล้ามเนื้อและเซลล์เนื้อเยื่อไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้องแล้วสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง

เอกสารอ้างอิง

- เมธา วรณพัฒน์. 2533. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. กรุงเทพฯ: ฟลิชชิ่ง จำกัด.
- Klaus, U. 1994. Comparative Animal Biochemistry. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Germany. 782 pp.
- McDonald, P., R. A. Edwards, J. F. D. Greenhalgh, C. A. Morgan, L. A. Sinclair, R. G. Wilkinson. 2011. Animal Nutrition (7th ed). Pearson, Harlow, England. 692 pp

- Nelson, D.L., and M.M. Cox. 2000. Lehninger Principles of Biochemistry, 3rd edition; Worth Publishers: NY.
- Riis, P.M. 1983. Dynamic biochemistry of animal production. Elsevier Science Publisher B.V., The Netherlands. 501 pp.
- Van Soest, P.J. 1982. Nutritional Ecology of the Ruminant. O&B Books, Inc., Corvallis, Oregon, U.S.A.