

บทที่ 6

พลังงานที่ใช้ภายในเซลล์

เค้าโครงเรื่อง

6.1 การจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ : กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

6.1.1 คลอโรพลาสต์ : แหล่งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

6.1.2 การเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี : ปฏิกริยาต้องใช้แสง

6.1.3 การตรึงพลังงานเคมีให้เป็นกลูโคส : ปฏิกริยาไม่ต้องการแสง

6.2 การสักตพลังงาน

6.2.1 แอโรบิกและแอนแอโรบิกนอกแคแทบอลิซึม

6.2.2 ขั้นตอนกระบวนการหายใจระดับเซลล์

6.2.3 ไกลโคไลซิส

6.2.4 การหมัก

6.2.5 การสร้างอะเซทิลโคเอนไซม์เอ

6.2.6 วัฏจักรของเครบส์

6.2.7 ระบบขนส่งอิเล็กตรอนและเคมีโอออสโมติกฟอสฟอรีเลชัน

6.2.8 แคแทบอลิซึมของสารอาหารประเภทอื่น

พลังงานที่ใช้ภายในเซลล์ได้มาจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของสารอาหารโดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีที่มีอยู่ในสารอาหารมาเก็บไว้ชั่วคราวที่พันธะฟอสเฟตของ ATP การทำโมเลกุลใหญ่ของสารอาหารให้เป็นโมเลกุลเล็กเพื่อให้ได้พลังงานเป็นขั้นตอนหนึ่งของกระบวนการเมแทบอลิซึมที่เรียกว่า แคแทบอลิซึม (catabolism) เซลล์สามารถดึงพลังงานออกจากสารอาหารได้ 3 วิธีคือ (1) ผ่านทางกระบวนการหายใจในระดับเซลล์โดยมีออกซิเจนและ (2) โดยไม่มีออกซิเจนซึ่งรวมถึง (3) กระบวนการหมักด้วย สิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารเองไม่ได้จำเป็นต้องใช้กระบวนการแคแทบอลิซึม เมื่อได้พลังงานในรูปของพลังงานเคมีแล้วจึงนำพลังงานไปใช้สร้างสารอาหารขึ้นมาใหม่เพื่อเก็บไว้ใช้ในการดำรงชีวิตและสามารถส่งต่อผ่านทางห่วง

ใช้อาหารและสลายอาหารได้ต่อไป กระบวนการใช้พลังงานเพื่อสร้างสารอาหารและชีวโมเลกุลอื่นเรียกว่า **แอนาบอลิซึม (anabolism)** สิ่งมีชีวิตพวกที่สร้างอาหารได้เองมีกระบวนการเมแทบอลิซึมเช่นเดียวกัน การได้มาซึ่งพลังงานผ่านกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

6.1 การจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ : กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

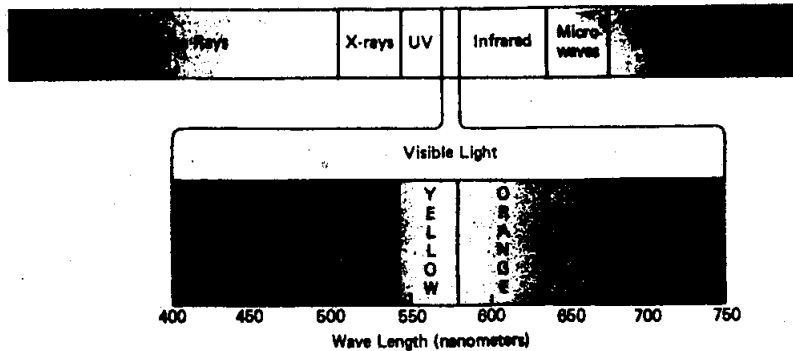
แหล่งพลังงานมหาศาลของระบบสุริยะมาจากดวงอาทิตย์ สิ่งมีชีวิตที่สร้างอาหารได้เองจับพลังงานอิสระที่แผ่จากดวงอาทิตย์ไว้เป็นบางส่วน โดยผ่านทางกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงแล้วนำพลังงานที่จับไว้นั้นมาสร้างสารอาหารและสารอื่นที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตเก็บไว้ในเซลล์ สิ่งมีชีวิตพวกนี้ได้แก่ ไซแอนโอแบคทีเรีย ลำห่วย และพืช แบคทีเรียบางชนิดสร้างอาหารได้เองจากการออกซิเดชันสารอนินทรีย์อย่างง่าย เช่น ซัลเฟอร์และแอมโมเนียนำมาสร้างเป็นสารอาหารได้โดยไม่ต้องจับพลังงานจากแสง เรียกแบคทีเรียพวกนี้ว่า **chemosynthetic autotroph** ในบทนี้จะกล่าวถึงการจับพลังงานจากแสงอาทิตย์ด้วยคลอโรพลาสต์เป็นหลัก

แสงอาทิตย์เป็นพลังงานที่เรียกว่า **พลังงานการแผ่รังสี (radiant energy หรือ electromagnetic energy)** พลังงานควมแน่นมาในรูปของโฟตอน (photon) คลื่นแสงที่อยู่ในช่วงต่าง ๆ (รูป 6-1 ก) มีพลังงานโฟตอนต่างกันตามลักษณะของช่วงคลื่น ถ้าช่วงคลื่นสั้นเป็นรังสีแกมมามีพลังงานโฟตอนสูง ถ้าช่วงคลื่นยาวเช่นรังสีอินฟราเรดและคลื่นวิทยุมีพลังงานโฟตอนต่ำกว่า คลื่นที่สิ่งมีชีวิตสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์ด้วยแสงได้คือ ช่วงคลื่นแสงปกติ (**visible light**) ซึ่งเริ่มจากช่วงคลื่นแสงสีน้ำเงิน (400 นาโนเมตร) มาจนถึงช่วงคลื่นแสงสีแดง (750 นาโนเมตร) คลอโรฟิลล์ดูดกลืนช่วงคลื่นสีม่วงน้ำเงินและสีแดงได้ดีที่สุด (รูป 6-1 ข และ 6-2 ก) สารสีอื่นที่ดูดกลืนพลังงานโฟตอนเพื่อการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ เช่น แคโรทีนอยด์ ไฟโคไซยานิน ดูดกลืนพลังงานแสงในช่วงคลื่นต่างจากคลอโรฟิลล์ กล่าวคือ แคโรทีนอยด์ ดูดกลืนช่วงคลื่นสีน้ำเงิน-เขียว (ประมาณ 500 นาโนเมตร) และไฟโคไซยานิน ดูดกลืนช่วงคลื่นสีส้ม (ประมาณ 600 นาโนเมตร) ได้ดีที่สุดตามลำดับ (รูป 6-2 ก) การที่คลอโรฟิลล์สามารถดูดกลืนพลังงานโฟตอนได้มากกว่าสารสีชนิดอื่นจึงเป็นเหตุผลที่ว่า ลำห่วยและพืชต้องมีสารสีคลอโรฟิลล์หรือมีคลอโรพลาสต์เพื่อให้อัตราการ

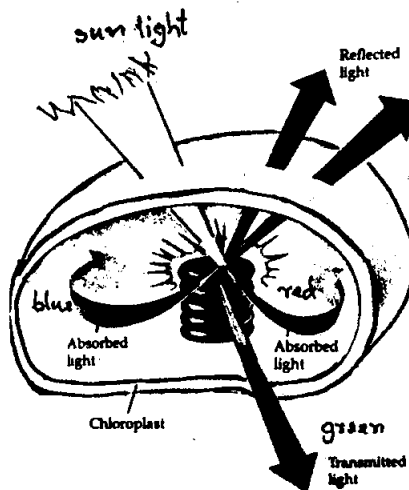
สังเคราะห์ด้วยแสงเกิดขึ้นได้มากที่สุด (รูป 6-2 ข)

รูป 6-1 แผนภาพแสดงพลังงานโฟตอนของแสงที่สามารถดูดกลืนโดยคลอโรพลาสต์ เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ก. ช่วงคลื่นของแสงปกติ ข. ช่วงคลื่นที่ถูกดูดกลืนโดยคลอโรพลาสต์ ให้สังเกตว่าช่วงคลื่นสีเขียวไม่ถูกดูดกลืน

ก.



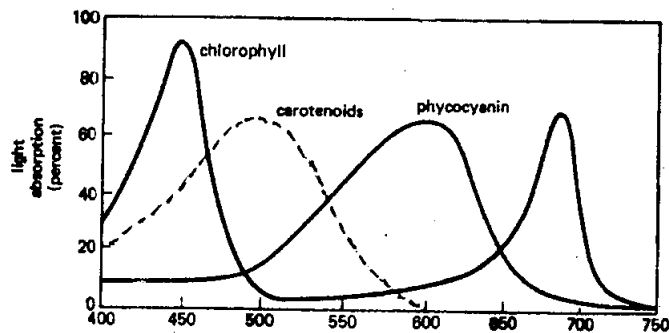
ข.



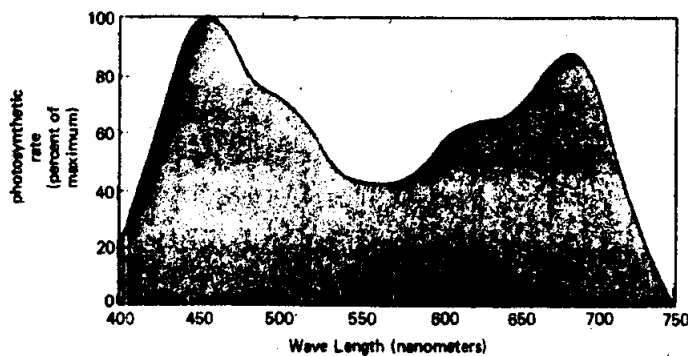
จาก Campbell, Neil A. 1990

รูป 6-2 กราฟเปรียบเทียบการดูดกลืนพลังงานโฟตอนโดยสารสีและอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสงในช่วงคลื่นต่าง ๆ ก. การดูดกลืนพลังงานโฟตอนในช่วงคลื่นต่างกันของสารสีคลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และไฟโคไซยานิน ข. อัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ให้สังเกตว่าช่วงคลื่น 450 และ 700 นาโนเมตรมีการสังเคราะห์ด้วยแสงมากกว่าช่วงคลื่นอื่น

ก.



ข.



จาก Audesirk, G. & Teresa Audesirk 1986

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ประกอบด้วยกระบวนการหลักสองกระบวนการ คือ (1) กระบวนการเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้จำเป็นต้องใช้พลังงานจากแสงเรียกว่า **light-dependent reaction** เมื่อได้พลังงานในรูปของพลังงานเคมีแล้ว จึงนำพลังงาน ไปใช้เพื่อสร้างสารอาหารต่าง ๆ เช่น กลูโคส ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไม่

จำเป็นต้องใช้พลังงานจากแสง เรียก **light-independent reaction** ขั้นตอนทั้งหมดของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงดูจากตาราง 6-1

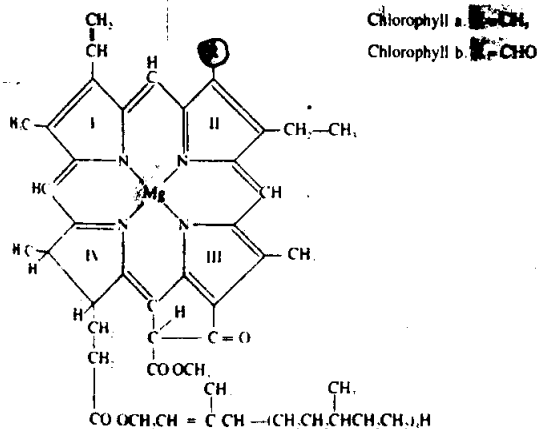
ตาราง 6-1 ลำดับปฏิกิริยา วัตถุดิบ และผลผลิตของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

ลำดับปฏิกิริยา	วัตถุดิบที่ใช้ในปฏิกิริยา	ผลผลิต
ปฏิกิริยาที่ต้องใช้แสง		
ปฏิกิริยาโฟโตเคมีคัล	พลังงานโฟตอน	อิเล็กตรอน
	สารสี	
การขนส่งอิเล็กตรอน	อิเล็กตรอน	NADPH
	NADP ⁺	
โฟโตไลซิส	H ₂ O	H ⁺ สะสม และ O ₂
การสังเคราะห์เคมีโอออสโมติก	H ⁺ สะสม	ATP
ATP	ADP + P _i	
ปฏิกิริยาที่ไม่ต้องใช้แสง		
การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์	ไรบูโลสไบฟอสเฟต	น้ำตาล
	CO ₂	ADP + P _i
	ATP	NADP ⁺
	NADPH	

6.1.1 คลอโรพลาสต์ : แหล่งกระบวนการสังเคราะห์แสง สารสีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง คือ คลอโรฟิลล์ เอ คลอโรฟิลล์ บี (รูป 6-3) แคโรทีนอยด์และสารสีอื่น รวมกันเป็นกระจุกอยู่บนเยื่อบางไทลาคอยด์ในกรานาของคลอโรพลาสต์ ในพืชชั้นสูงคลอโรพลาสต์มีอยู่เป็นจำนวนมาก (80 ~ 100 อัน) ภายในเซลล์ของใบที่เรียก เมโซฟิลล์ (mesophyll) วัตถุดิบเข้าสู่เมโซฟิลล์โดยผ่านทาง รูบิ แล้วเข้าสู่คลอโรพลาสต์ผ่านทางเยื่อหุ้มเซลล์ และเยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์ตามลำดับ แสงสามารถส่องถึงคลอโรพลาสต์ได้ง่าย เนื่องจาก

จากเนื้อเยื่อที่คลุมใบพืชมีลักษณะโปร่งแสง

รูป 6-3 โครงสร้างโมเลกุลของคลอโรฟิลล์เอและบี ประกอบด้วยวงพอร์ไฟริน (porphyrin) ที่มีแมกนีเซียมอะตอมเป็นแกนกลาง ส่วนท้ายเป็นเส้นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ชอบน้ำ ปลายเส้นจะไปพันธะกับเยื่อบางไทลาคอยด์ ให้สังเกตหมู่ปฏิกิริยาคลอโรฟิลล์เอ คือ CH_3 และของคลอโรฟิลล์บี คือ CHO

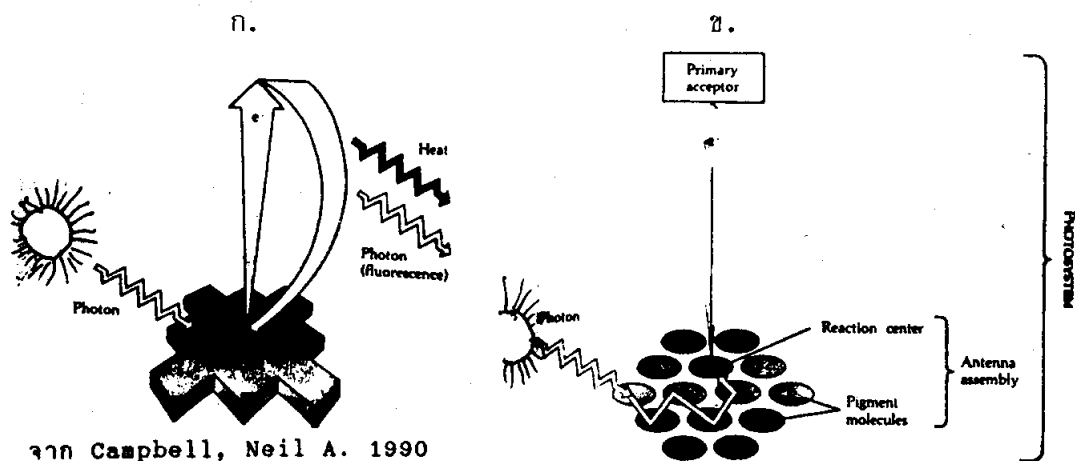


6.1.2 การเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานเคมี: ปฏิกิริยาต้องให้แสง ขั้นตอนกลไกการทำงานมี 4 ลำดับ คือ (1) โฟโตเคมีคัล(photochemical) คือโฟโตออกซิเดชัน(photo-oxidation) ของคลอโรฟิลล์ (2) การไหลหรือการขนส่งอิเล็กตรอนซึ่งอาจเป็นแบบครบวงจรหรือไม่ครบวงจร (3) โฟโตไลซิส(photolysis) และ (4) เคมีโอออสโมซิส(chemiosmosis)

(1) โฟโตเคมีคัล อิเล็กตรอนในแต่ละวงของอะตอมที่ประกอบกันเป็นโมเลกุลของสารสีเมื่อยังไม่ถูกกระตุ้นอยู่ในสภาวะปกติ เรียก กราว์สสเตต(ground state) เมื่อโมเลกุลดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงทำให้อิเล็กตรอนถูกดันออกมาสู่วงที่พลังงานมากกว่า ในสภาวะนี้เรียก เอกไซท์สเตต(excite state) โฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับความแตกต่างระหว่างพลังงานของกราว์สสเตตและเอกไซท์สเตตเท่านั้นจึงจะถูกดูดกลืนไว้ด้วยโมเลกุลของสารสีซึ่งเป็นเหตุผลอธิบายว่า สารสีแต่ละชนิด มีการดูดกลืนพลังงานในช่วงคลื่นเฉพาะของตัวเอง พลังงานที่ถูกดูดกลืนเข้าไปยังผลให้พลังงานศักย์ของโม-เลกุลมากขึ้น อิเล็กตรอนอยู่ในสภาวะเอกไซท์สเตตซึ่งขณะหนึ่งค่านวออกมาได้ประมาณเศษหนึ่งส่วนพันล้านของวินาที แล้วตกลงไปอยู่ในสภาวะกราว์สสเตตอย่างเดิม แล้วปล่อยพลังงานความร้อนและโฟตอนออกมา ทำให้เกิดการเรืองแสง(fluorescence)ขึ้น (รูป 6-4 ก)

ในกรณีที่มีสารมาทำหน้าที่รับ (acceptor) และนำ (carrier) อิเล็กตรอนแรกเริ่มซึ่งเป็นสภาวะปกติของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง อิเล็กตรอนในสภาวะเอกซ์ไซท์จึงถูกกันไม่ให้กลับไปอยู่ในสภาวะกราวด์สเตต ในโมเลกุลของสารสี (คลอโรฟิลล์เอ) มีตำแหน่งที่เรียกว่า รีแอคชันเซ็นเตอร์ (reaction center) ทำหน้าที่รับพลังงานโฟตอนที่ส่งผ่านโมเลกุลของสารสีโมเลกุลอื่นและชนิดอื่น เรียกชุดรับโฟตอนนี้ว่า แอนเทนนาแอสเซมบลี ซึ่งอยู่ใกล้กับตัวรับอิเล็กตรอน (รูป 6-4 ข) รวมเรียกทั้งระบบว่า โฟโตซิสเทม (photosystem) พลังงานที่มีการถ่ายโอนเป็นทอด ๆ นี้ส่วนหนึ่งเสียไปในรูปของความร้อน ส่วนหนึ่งใช้ดัน H^+ (ซึ่งได้จากโฟโตไลซิส) เข้าไปสะสมไว้ในเยื่อบางไทลาคอยด์เพื่อเก็บไว้สร้าง ATP ต่อไป

รูป 6-4 การจับพลังงานโฟตอนของแสงโดยโฟโตซิสเทม ก. เมื่อพลังงานแสงถูกปล่อยออกมาในรูปของการเรืองแสง ข. อิเล็กตรอนแรกเริ่มถูกจับไว้ด้วยตัวรับอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ใกล้เคียงกับรีแอคชันเซ็นเตอร์ในโมเลกุลของคลอโรฟิลล์เอ



โฟโตซิสเทม มี 2 แบบ คือ โฟโตซิสเทมวัน และโฟโตซิสเทมทู ตั้งชื่อเรียงลำดับการค้นพบ

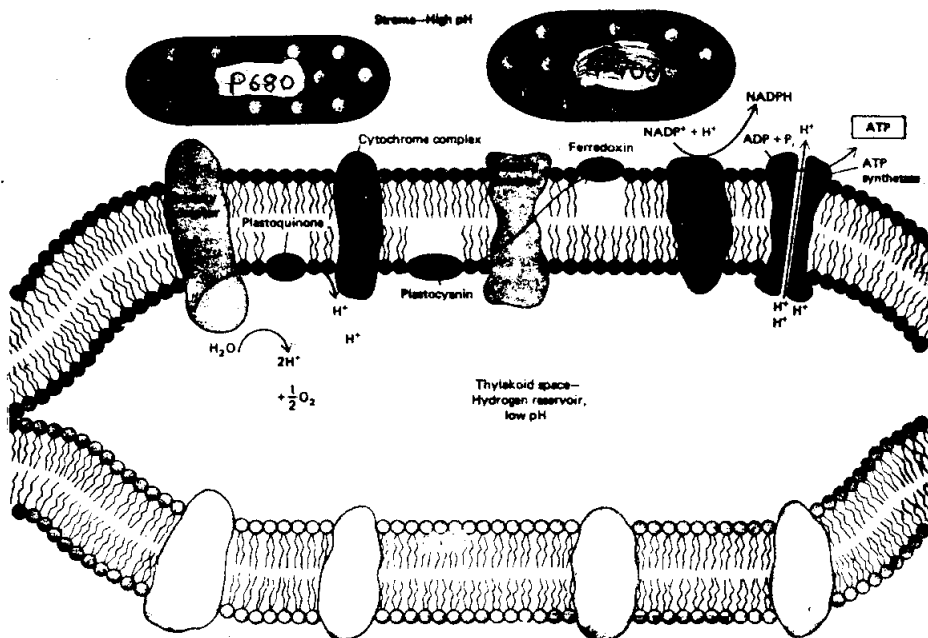
โฟโตซิสเทมวัน เป็นโมเลกุลของคลอโรฟิลล์เอ ที่มีรีแอคชันเซ็นเตอร์สำหรับดูดกลืนโฟตอนที่ช่วงคลื่น 700 นาโนเมตรจึงเรียกโมเลกุลนี้ว่า P 700 ในทำนองเดียวกันโฟโตซิสเทมทูก็เรียกว่า P 680 เพราะการดูดกลืนโฟตอนได้ดีที่สุดในช่วงคลื่น 680 นาโนเมตร ทั้ง P 700 และ P 680 ต่างก็มีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน แต่ไปรวมกับโมเลกุลของโปรตีนต่างชนิดกันจึงทำให้การดูดกลืนโฟตอนต่างกันเล็กน้อย

(2) การขนส่งอิเล็กตรอน เรียกอีกชื่อว่า โฟโตฟอสฟอริเลชัน (photophosphorylation) เนื่องจากอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานมาจากโฟตอนถ่ายโอนพลังงานให้ ADP สร้าง ATP โดยการเติมหมู่ฟอสเฟตเข้าไป การไหลหรือขนส่งอิเล็กตรอนเพื่อถ่ายโอนพลังงานเกิดขึ้น 2 แบบ คือ

ก. โฟโตฟอสฟอริเลชันแบบক্রบวงจร เป็นแบบที่ง่ายที่สุดมีเพียงโฟโตซิสเทมวันเท่านั้นที่เข้ามาเกี่ยวข้อง อิเล็กตรอนที่ถูกเอกซัยต์ด้วยโฟตอนออกไปจาก P 700 ณ จุดรีแอักชันเซนเตอร์แล้วกลับมาที่เดิม (รูป 6-5) เริ่มด้วยเอกซัยต์อิเล็กตรอนถูกรับไว้ด้วยตัวรับอิเล็กตรอนแรกเริ่ม (ซึ่งยังไม่ทราบชนิดแน่ชัด) แล้วถูกส่งต่อไปยังสารทำหน้าที่ถ่ายโอนซึ่งอยู่บนเยื่อบางไทลาคอยด์ ได้แก่เฟอรัรีดอกซิน (ferredoxin) ไซโทโครม คอมเพลกซ์ พลาสโทไซยานิน (plastocyanin) แล้วกลับเข้าสู่ P 700 การถ่ายโอนอิเล็กตรอนทำให้มีพลังงานส่วนหนึ่งหลุดออกมาช่วยดัน H^+ ผ่านเยื่อบางไทลาคอยด์เข้าไปสะสมอยู่ในช่องระหว่างชั้นเยื่อบางนี้ เป็นผลให้มีอัตราการเพิ่มโปรตอน (proton gradient) ขึ้นมากพอที่จะทำให้ $ADP + P_i$ ได้เป็น ATP

รูป 6-5 แผนภาพโฟโตฟอสฟอริเลชันครบวงจร

จาก Villee, Claude A., et al. 1989



การเกิดโฟโตฟอสฟอรีเลชันแบบক্রบวงจรจะเกิดขึ้นในกรณีที่เซลล์พืชมีปริมาณของ NADP น้อยไม่พอที่จะมารับอิเล็กตรอนจากเฟอร์รีดอกซิน นักชีววิทยาเชื่อว่าเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในพวกไซแอนแบคทีเรียยุคแรกเริ่ม

ข. โฟโตฟอสฟอรีเลชันแบบไม่ক্রบวงจร เป็นกระบวนการที่ใช้โฟโตซิสเทมทั้งสองแบบ เป็นการไหลทางเดียวของอิเล็กตรอนออกไปจากน้ำ ทุก 2 อิเล็กตรอนจะให้พลังงานสำหรับสร้าง ATP ได้ 2 โมเลกุลและ NADPH หนึ่งโมเลกุล สำหรับพืช รวมทั้งไซแอนแบคทีเรียยุคปัจจุบันใช้กระบวนการนี้สำหรับสร้างพลังงาน

กระบวนการเริ่มจากทั้งสองโฟโตซิสเทม (รูป 6-6) อิเล็กตรอนพลังงานสูงออกจาก P 700 จนถึงเฟอร์รีดอกซินเช่นเดียวกันกับแบบক্রบวงจร แล้วมี NADP^+ (รูป 6-7) ซึ่งเป็นโคเอนไซม์ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนแล้วรวมกับโปรตอนได้ H^+ ขณะเดียวกันก็ถูกรีดิวส์ให้เป็น NADPH อิเล็กตรอนไม่กลับมาสู่ P 700 จึงทำให้โฟโตซิสเทมวันมีประจุบวกมากขึ้นไม่สามารถให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงออกไปอีก จึงต้องชดเชยอิเล็กตรอนโดยนำมาจาก P 680

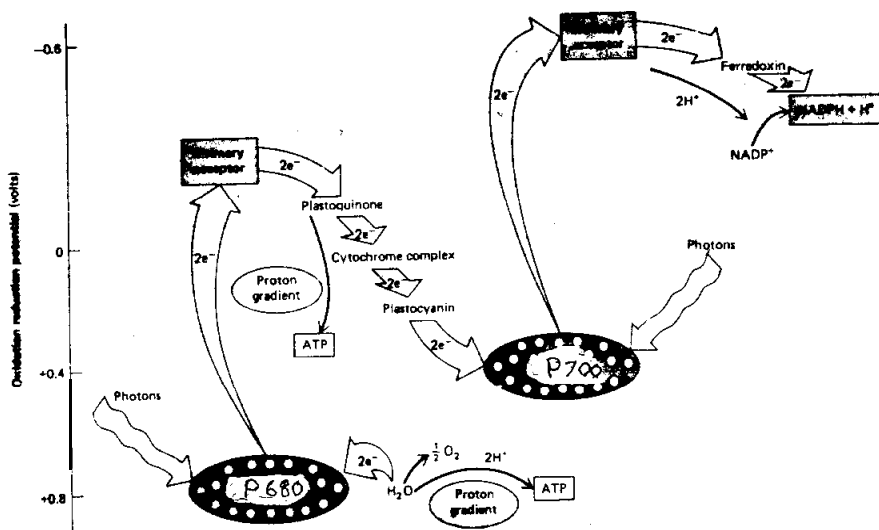
โฟโตซิสเทมถูกเอกไซท์โดยโฟตอนให้ 2 อิเล็กตรอนพลังงานสูงและรับไว้ด้วยตัวรับแรกเริ่มเช่นเดียวกับโฟโตซิสเทมวัน อิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนผ่านตัวรับอิเล็กตรอน คือ พลาสโทควิโนน (plastoquinone) ไซโทโครมคอมเพลกซ์ และพลาสโทไซยานิน มาตามลำดับ พลังงานลดลงเรื่อย ๆ จนอิเล็กตรอนเข้าสู่ P 700 พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาทำหน้าที่เพิ่มโปรตอนเกรเดียนท์ให้มากขึ้นในช่องระหว่างเยื่อบางไทลาคอยด์ (เช่นเดียวกับแบบ ก) เพื่อใช้สำหรับการสร้าง ATP ต่อไป

(3) โฟโตไลซิส ปกติ H_2O แตกตัวเป็น H^+ และ OH^- ได้เล็กน้อย เมื่อมีพลังงานจากแสงจะทำให้น้ำแตกตัวได้ดีขึ้น อิเล็กตรอนจากน้ำเข้าแทนที่อิเล็กตรอนที่ออกไปจาก P680 ทำให้หมู่ OH^- รวมกันปล่อย O_2 ออกมา (รูป 6-6)

(4) เคมิโอออสโมซิส คลอโรพลาสต์สังเคราะห์ ATP ด้วยกระบวนการเคมีโอออสโมซิสเช่นเดียวกับไมโทคอนเดรีย โดยมีโฟโตซิสเทมและตัวรับอิเล็กตรอนฝังอยู่ในเยื่อบางไทลาคอยด์ พลังงานที่ได้จากการถ่ายโอนอิเล็กตรอน นำมาใช้สำหรับดันให้โปรตอน (H^+) จากสโตรมา ผ่านเยื่อบางไทลาคอยด์เข้ามาอยู่ในช่องระหว่างเยื่อบางไทลาคอยด์ เมื่อมีการสะสม H^+ มากขึ้น pH ในช่องระหว่างเยื่อบางต่ำลง (ประมาณ 4 ในช่วงความเข้มแสงสูง)

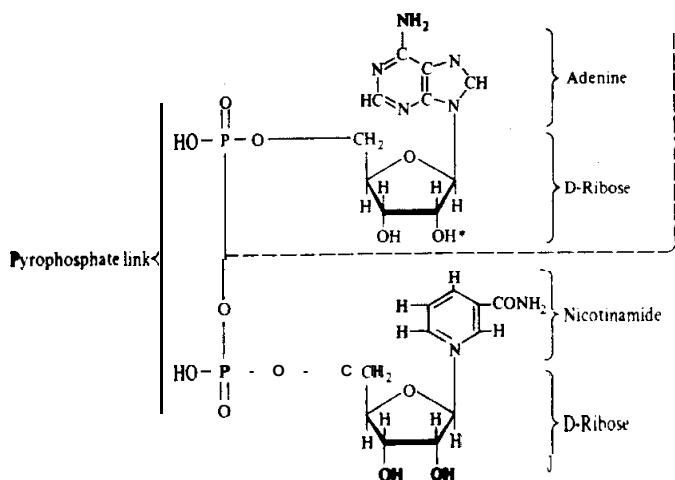
ทำให้ค่า pH ภายในช่องระหว่างเยื่อบางกับในสโตรมาต่างกันประมาณ 3.5 ยังผลให้ความเข้มข้นของ H^+ ภายในช่องเพิ่มขึ้นถึง 1000 เท่า (รูป 6-8)

รูป 6-6 แผนภาพโฟโตฟอสฟอริเลชันแบบไม่ครบวงจร ให้สังเกต 2 อิเล็กตรอนที่เข้าสู่ P680 มาจากกระบวนการโฟโตไลซิส

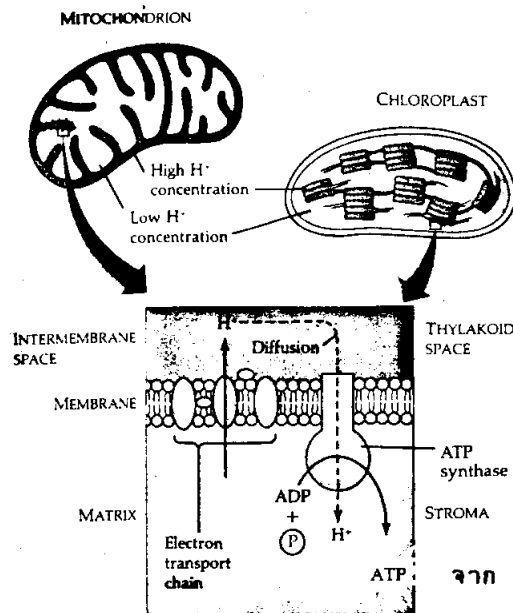


จาก Campbell, Neil A. 1990

รูป 6-7 สูตรโครงสร้างของ NAD (nicotinamide adenine dinucleotide) ให้สังเกตตำแหน่ง OH^+ ซึ่งจะถูกแทนที่ด้วยหมู่ฟอสเฟตเป็น NADP หมู่ไนโคตินาไมด์ ทำหน้าที่ถ่ายโอนอิเล็กตรอน



รูป 6-8 แผนภาพเปรียบเทียบเคมีโอออสโมซิสที่เกิดขึ้นในไมโทคอนเดรีย และ คลอโรพลาสต์ ในไมโทคอนเดรียโปรตอน (H^+) ถูกถ่ายโอนจากเมทริกซ์เข้าไปอยู่ในระหว่างชั้นเยื่อบางของคริสตี ATP สร้างในเมทริกซ์ ในคลอโรพลาสต์ โปรตอนถูกดันจากสโตรมาเข้าไปอยู่ระหว่างช่องไทลาคอยด์ ATP สร้างในสโตรมา

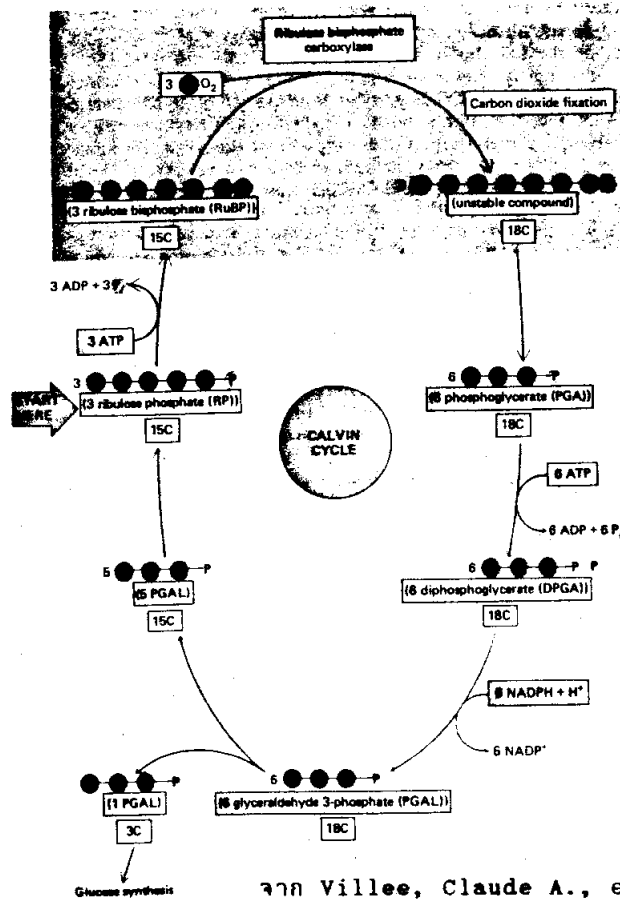


จาก Campbell, Neil A. 1990

ตามหลักการแพร่ของสาร H^+ มีความเข้มข้นสูงอยู่ภายในช่องระหว่างเยื่อบางไทลาคอยด์ จะต้องแพร่ออกไปสู่สโตรมา แต่เยื่อบางไทลาคอยด์มีสภาพขั้วผ่านได้เฉพาะบางแห่ง โดยมีช่องเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของโปรตีน และมีเอนไซม์ ATP ซินเทเทสควบคุม เรียกโครงสร้างนี้ว่า $CF_0 - CF_1$ complex เมื่อ H^+ ผ่านช่องนี้ออกไปจะมีการปล่อยพลังงานและมีเอนไซม์มาเร่งปฏิกิริยาการสังเคราะห์ $ADP + P_i$ ให้เป็น ATP

6.1.3 การตรึงพลังงานเคมีให้เป็นกลูโคส : ปฏิกิริยาไม่ต้องใช้แสง พลังงานที่จับจากโฟตอนของแสงอาทิตย์เปลี่ยนมาเก็บไว้ในโมเลกุลของ ATP จากกระบวนการปฏิกิริยาต้องใช้แสงแล้วนำมาใช้ตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็น PGAL (phosphoglyceraldehyde) ซึ่งเป็นสารต้นสำหรับการสังเคราะห์กลูโคส และสารอาหารชนิดอื่น ปฏิกิริยานี้เรียกว่า การตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 fixation) หรือ C_3 plants เนื่องจากสารแรกที่มาจาก CO_2 3 โมเลกุลคือ PGA (phosphoglycerate) หนึ่งโมเลกุลมี 3 คาร์บอนอะตอมนอกจากนี้ยังเรียกว่า Calvin cycle ตามชื่อของผู้ค้นพบ

ปฏิกิริยาเริ่มต้นจาก 3 โมเลกุลของน้ำตาลเพนโทสนิด ไรบูโลส ฟอสเฟต (RP) รับหมู่ฟอสเฟตจาก ATP 3 โมเลกุลจะได้เป็นไรรูโลสไบฟอสเฟต (RuBP) 3 โมเลกุล แล้วมี เอนไซม์ไรรูโลสไบฟอสเฟต คาร์บอกซิเลสมาช่วยเร่งปฏิกิริยาตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ 3 โมเลกุลเข้ากับ RuBP ได้เป็นสารประกอบคาร์บอน 6 อะตอมที่ไม่เสถียรจึงถูกเปลี่ยนเป็น ฟอสโฟกลีเซเรต (PGA) 6 โมเลกุล ซึ่งจะถูกฟอสโฟรีเลชันอีกครั้งหนึ่งได้ไดฟอสฟอกลิเซเรต (DPGA) 6 โมเลกุล วิตามินอีของ NADP ($\text{NADPH} + \text{H}^+$) จะเข้ามาทำหน้าที่ดึงหมู่ฟอสเฟตออกไปโมเลกุลละหนึ่งหมู่ เปลี่ยนตัวเองเป็น NADP^+ (ออกซิไดร์ฟอร์ม) ได้เป็นกลีเซรัลดีไฮด์ รูป 6-9 วัฏจักรคัลวิน คาร์บอนไดออกไซด์ 3 โมเลกุลถูกตรึงให้เป็น PGAL หนึ่งโมเลกุล (มี 3 คาร์บอนอะตอม) ในแผนภาพแสดงไว้เฉพาะปฏิกิริยาที่สำคัญเท่านั้น



จาก Villee, Claude A., et al. 1989

3 ฟอสเฟต (PGAL) 6 โมเลกุล 5 โมเลกุลของ PGAL จะถูกเปลี่ยนให้เป็น 3 โมเลกุลของ RP เข้าสู่จุดเริ่มต้นใหม่ (รูป 6-9) PGAL อีกหนึ่ง โมเลกุลจะใช้เป็นสารต้นปฏิกิริยาการสังเคราะห์กลูโคส กรดอะมิโน หรือกรดไขมันต่อไป

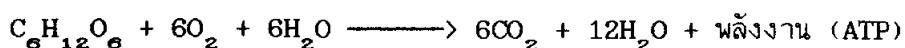
6.2 การสกัดพลังงาน

สิ่งมีชีวิตพวกที่สร้างอาหารเองไม่ได้โดยเฉพาะพวกสัตว์จำเป็นต้องกินอาหารซึ่งเป็นแหล่งสะสมพลังงาน เพื่อจะได้นำไปใช้สำหรับการเจริญซ่อมแซมส่วนสึกหรอและสกัดหรือเก็บเกี่ยวพลังงานออกมาจากสารอาหารที่กินเข้าไป

สารอาหารโมเลกุลใหญ่มีพลังงานศักย์อยู่มาก โมเลกุลเหล่านี้ถูกทำให้เล็กลงโดยปฏิกิริยาชีวเคมีด้วยความช่วยเหลือของเอนไซม์ จนเป็นโมเลกุลอย่างง่ายหรือของเสียซึ่งมีพลังงานน้อย พลังงานที่ถูกสกัดออกมาแต่ละขั้นตอนจะมีโคเอนไซม์มารับไว้เพื่อนำไปสร้างพลังงานสะสมในโมเลกุลของ ATP การแยกโมเลกุลสารอาหารเพื่อสกัดเอาพลังงานเรียกกระบวนการแคแทบอลิซึม ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของกระบวนการเมแทบอลิซึม

6.2.1 แอโรบิกและแอนแอโรบิกแคแทบอลิซึม กระบวนการแคแทบอลิซึมที่เซลล์ใช้เพื่อสลายสารอาหารขึ้นอยู่กับลักษณะของสภาพแวดล้อม ถ้ามีออกซิเจนอุดมสมบูรณ์ เซลล์ก็ใช้ออกซิเจนให้ปฏิกิริยาแคแทบอลิซึมมีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ถ้าสภาพแวดล้อมมีออกซิเจนน้อย เช่นเซลล์อยู่ในดินหรือน้ำโสโครก เซลล์ก็สามารถมีวิวัฒนาการปรับเปลี่ยนใช้ปฏิกิริยาเคมีที่ไม่ใช้ออกซิเจนประยุกต์ในกระบวนการแคแทบอลิซึมได้ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพการได้พลังงานจะน้อยกว่าก็ตาม

การหายใจระดับเซลล์ (cellular respiration) เป็นกระบวนการปฏิกิริยาที่ต้องใช้เอนไซม์เพื่อการสกัดเอาพลังงานออกมาจาก กลูโคส และสารอาหารอื่น ดังนั้นจึงเป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้ออกซิเจน การหายใจด้วยอากาศที่สมบูรณ์ สารอาหารต้องถูกนำมาสลายได้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ กระบวนการแคแทบอลิซึมแบบการหายใจระดับเซลล์ที่ต้องใช้ออกซิเจนในการสลายสารอาหาร ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีคือ แอนแอโรบิกแคแทบอลิซึมของกลูโคส ซึ่งผลลัพธ์ออกมาดังปฏิกิริยา



แบคทีเรียในดินบางชนิดเช่นสกุล *Clostridium* สามารถดำรงชีวิตอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีออกซิเจนน้อยได้ โดยปรับเปลี่ยนการสักรัดเอาพลังงานจากสารอินทรีย์ด้วยปฏิกิริยาแอนแอโรบิกแคแทบอลิซึม สารที่นำมาใช้ทดแทนออกซิเจน คือ สารอินทรีย์ เช่น ซัลเฟต หรือไฮโดรเจน ผลลัพธ์ของปฏิกิริยาคือสารอินทรีย์และพลังงานซึ่งน้อยกว่าแอโรบิกแคแทบอลิซึม

จุลินทรีย์บางชนิด เช่น ยีสต์ ปรับเปลี่ยนกระบวนการแคแทบอลิซึมให้เหมาะสมกับสภาพที่มีออกซิเจนน้อย ด้วยการไม่ใช้ออกซิเจนอีกแบบหนึ่งเรียกว่า การหมัก (fermentation) ผลผลิตขั้นสุดท้ายที่ได้คือสารอินทรีย์และพลังงานเล็กน้อย เซลล์ของสัตว์และมนุษย์เช่นเซลล์กล้ามเนื้อถ้าขาดออกซิเจนชั่วคราวก็เกิดปฏิกิริยาแบบการหมักได้

6.2.2 ขั้นตอนกระบวนการหายใจระดับเซลล์ มี 4 ขั้นตอน (รูป 6-10) คือ

(1) ไกลโคไลซิส เกิดขึ้นในไซโทพลาสซึม เป็นการเปลี่ยนโมเลกุลของกลูโคสที่มี 6 คาร์บอนอะตอมให้เป็นกรดไพรูวิกที่มี 3 คาร์บอนอะตอม 2 โมเลกุลและ 2 ATP

(2) การสร้างอะเซทิลโคเอนไซม์เอ กรดไพรูวิก เข้าสู่เมทริกซ์ของไมโทคอนเดรียถูกตัดคาร์บอนอะตอมออกพร้อมพันธะกับโคเอนไซม์เอ ได้อะเซทิลโคเอนไซม์เอ และคาร์บอนไดออกไซด์

(3) วัฏจักรของเครบส์ หรือ citric acid cycle เป็นการเปลี่ยนอะเซทิลโคเอนไซม์เอให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ พร้อมกับดึงอิเล็กตรอนพลังงานสูงและไฮโดรเจนออกมา โดยมีตัวรับ คือ ADP P_i NAD และ FAD (flavin adenine dinucleotide)

(4) ระบบขนส่งอิเล็กตรอน และ เคมีโอออสโมติก ฟอสฟอริเลชัน ตัวรับอิเล็กตรอนและไฮโดรเจนเข้าสู่ช่องเยื่อบางชั้นในของไมโทคอนเดรียเพื่อการสร้าง ATP

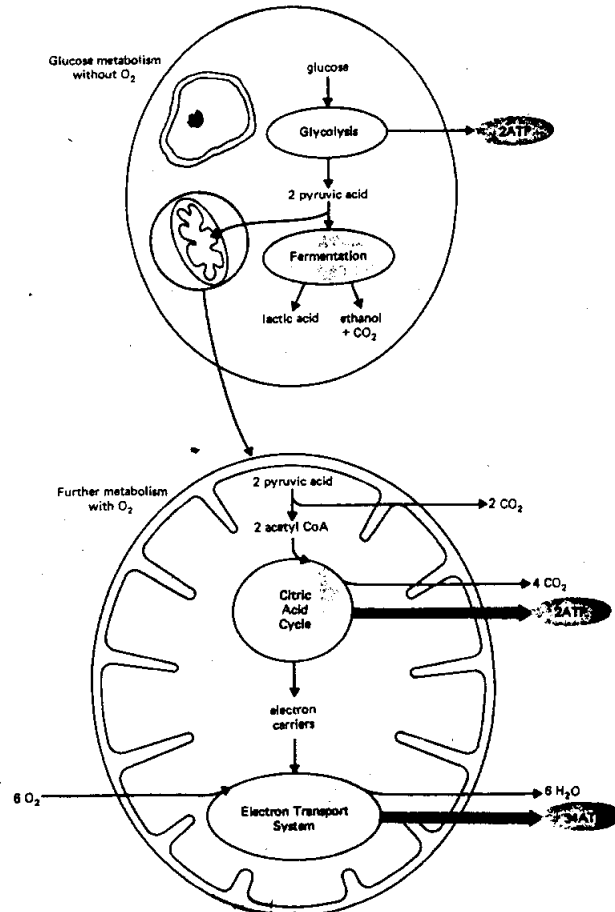
ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการหายใจระดับเซลล์มี 3 ประเภท คือ

(1) ดีไฮโดรจีเนชัน คือไฮโดรเจน (2 อิเล็กตรอนและ 2 โปรตอน) 2 อะตอม ถูกดึงออกจากซับสเตรตแล้วถ่ายโอนไปที่โคเอนไซม์ NAD^+ หรือ FAD ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวรับแรกเริ่ม

(2) ดีคาร์บอกซิเลชัน คือดึงคาร์บอนออกจากหมู่คาร์บอกซิลให้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ขจัดออกจากร่างกายโดยขับออกมาพร้อมกับลมหายใจออก

(3) ปฏิกิริยาที่ไม่เอนไซม์พร้อมสำหรับการเข้าสู่ปฏิกิริยาแบบอื่น หรือทั้งสองแบบแรก

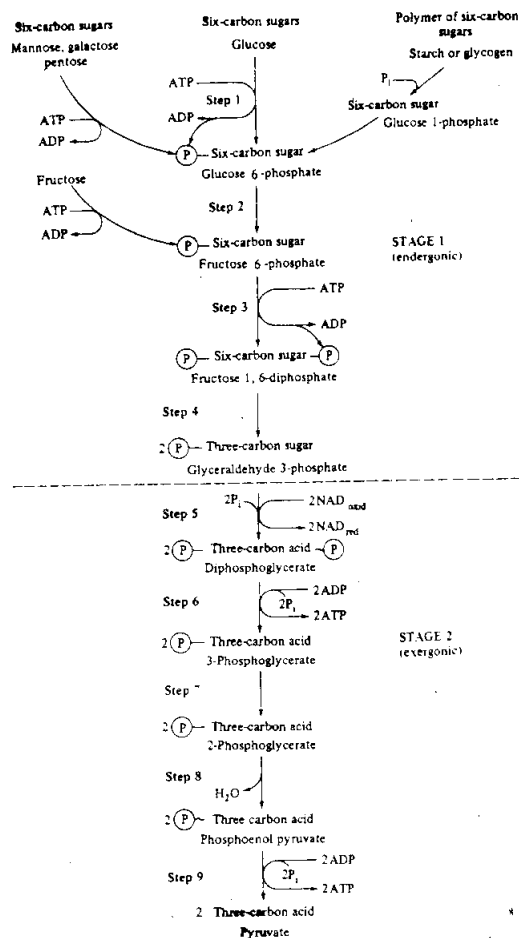
รูป 6-10 แผนภาพแสดงขั้นตอนกระบวนการหายใจระดับเซลล์ของกลูโคส ให้สังเกต
กรณีที่ไม่มีออกซิเจน จากไกลโคไลซิสจะเข้าสู่การหมัก



จาก Audesirk, G. & Teresa Audesirk 1998

6.2.3 ไกลโคไลซิส มีความหมายว่า แบ่งหรือแยกน้ำตาล เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยน 1 โมเลกุลของกลูโคส(6 คาร์บอนอะตอม)ให้เป็น 2 โมเลกุลของกรดไพรูวิก(3 คาร์บอนอะตอม) พร้อมทั้งมีการผลิต ATP (รูป 6-11) แต่ละขั้นตอนของปฏิกิริยา มีเอนไซม์เฉพาะ มีการใช้ ATP ในปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชัน เพื่อหักโมเลกุลของกลูโคสให้เป็น PGAL ก่อนที่จะได้ผลผลิตสุดท้าย คือ กรดไพรูวิก และยังมี NAD^+ มาทำหน้าที่รับ H^+ เพื่อส่งเข้าสู่ขั้นตอนการขนส่งอิเล็กตรอนต่อไป พลังงาน ATP ที่ได้กำไรออกมามี 2 โมเลกุล ปฏิกิริยาทั้งหมดเกิดขึ้นในไซโทซอล

รูป 6-11 แผนภาพแสดงลำดับการเปลี่ยนโมเลกุลของกลูโคสให้เป็นกรดไพรูวิก (ไพรูเวท) ในกระบวนการไกลโคไลซิส ได้สังเกตว่าช่วงแรก (stage 1) เป็นปฏิกิริยาเอนเตอร์โกนิค นำพลังงาน ATP 2 โมเลกุลเข้าสู่ระบบเป็นปฏิกิริยาฟอสโฟรีเลชัน ช่วงที่สอง (stage 2) เป็นปฏิกิริยาเอกเซอร์โกนิค ได้พลังงาน ATP ออกมาจากระบบ



จาก Barret, James M., et al. 1986

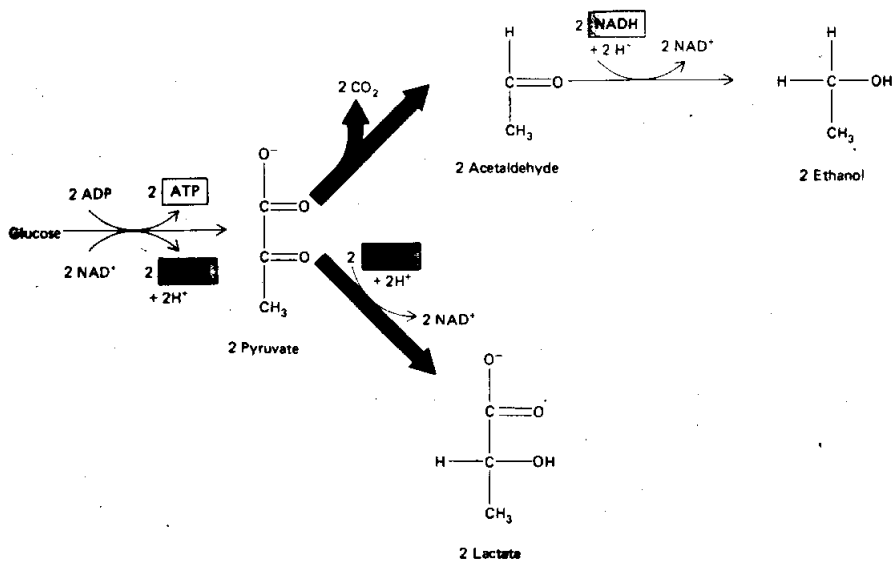
6.2.4 การหมัก ปฏิกิริยาของการหมักต่างจากปฏิกิริยาแอนแอโรบิกแคแทบอลิซึมเล็กน้อย สารสุดท้ายที่ทำหน้าที่รีดิวซ์อิเล็กตรอนจากตัวรีดิวซ์อิเล็กตรอนแรกเริ่ม (NAD) คือสารอินทรีย์ (ในกรณีของแอนแอโรบิกแบคทีเรียคือสารอินทรีย์ เช่น ไนโตรเจนและซัลเฟต) ปฏิกิริยาการหมักที่ควรทราบคือการหมักแอลกอฮอล์โดยยีสต์ และการหมักโดยแบคทีเรียบางชนิดและฟังไจ (รวมทั้งเซลล์กล้ามเนื้อด้วย) ได้กรดแลคติก

เมื่อไม่มีออกซิเจน ยีสต์ก็จะมีเอนไซม์ช่วยเร่งปฏิกิริยาดีคาร์บอกซิเลชันกรดไพรูวิก ให้ได้คาร์บอนไดออกไซด์และอะเซตัลดีไฮด์ อะเซตัลดีไฮด์ก็คือสารอินทรีย์ตัวสุดท้ายที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจาก $\text{NADH} + \text{H}^+$ (NAD รีดิวส์ฟอร์ม) ซึ่งได้มาจากไกลโคไลซิส (step 5 รูป 6-11) ผลผลิตขั้นสุดท้ายคือ เอทานอล (รูป 6-12)

ในกรณีของแบคทีเรีย (พวกแล็กโทบาซิลลัส) ฟังไจและเซลล์กล้ามเนื้อที่ขาดออกซิเจน (กล้ามเนื้อเปลี่ยน) สารอินทรีย์ตัวสุดท้ายที่ทำหน้าที่รับ $\text{NADH} + \text{H}^+$ คือกรดไพรูวิก ผลผลิตขั้นสุดท้ายคือ กรดแล็กติก (แลกเตต) (รูป 6-12)

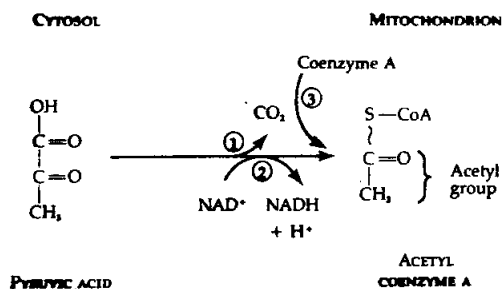
รูป 6-12 การหมักที่เกิดขึ้นในยีสต์ ผลผลิตขั้นสุดท้ายคือแอลกอฮอล์ (เอทานอล) สำหรับในแบคทีเรียบางชนิด ฟังไจ และเซลล์กล้ามเนื้อเมื่อขาดออกซิเจน ผลผลิตขั้นสุดท้ายคือ กรดแล็กติก (แลกเตต)

จาก Vilee, Claude A., et al. 1989



6.2.5 การสร้างอะเซทิลโคเอนไซม์เอ กรดไพรูวิก แพร่เข้าสู่เมทริกซ์ของไมโทคอนเดรีย แล้วมีกลุ่มของเอนไซม์และโคเอนไซม์ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 30 นาโนเมตรมาช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิ-รีดอกซ์ ดึงคาร์บอนไดออกไซด์ออกไป NAD ถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปรีดิวส์ฟอร์ม ($\text{NADH} + \text{H}^+$) (รูป 6-13) พร้อมทั้งจะถูกออกซิไดส์ต่อไปในวัฏจักรของเครบส์ $\text{NADH} + \text{H}^+$ จะเข้าสู่ขั้นตอนการขนส่งอิเล็กตรอน

รูป 6-13 การเปลี่ยนกรดไพรูวิกให้เป็นอะเซทิลโคเอนไซม์เอ คาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะแพร่ออกจากเซลล์ สู่กระแสโลหิตแล้วออกไปจากร่างกายพร้อมกับลมหายใจออก



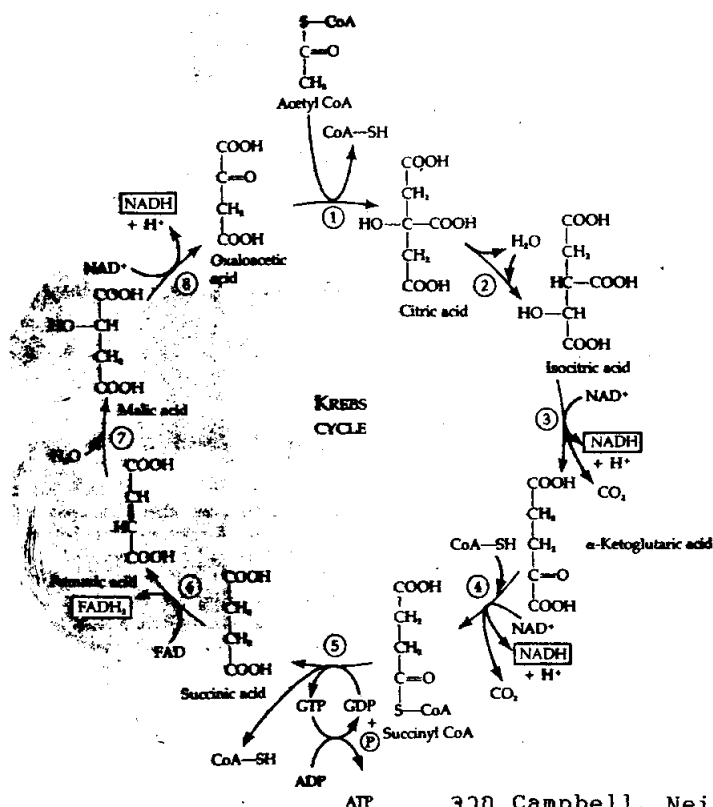
6.2.6 วัฏจักรของเครบส์ ตั้งชื่อตามนักวิทยาศาสตร์สัญชาติเยอรมัน-บริติช ซึ่งเป็นผู้ค้นพบ ชื่ออื่นที่ใช้เรียกคือ citric acid cycle หรือ tricarboxylic acid cycle (TCA cycle) ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในเมทริกซ์ของไมโทคอนเดรีย 8 ขั้นตอน แต่ละขั้นตอนมีเอนไซม์เฉพาะช่วยเร่งปฏิกิริยา

อะเซทิลโคเอนไซม์เอ มีคาร์บอน 2 อะตอม เข้าไปจับกับการตอออกซาโลอะซีติกได้กรดไซตริก (6 คาร์บอนอะตอม) (รูป 6-14) พลังงานส่วนใหญ่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชัน อิเล็กตรอนพลังงานสูงที่หลุดออกมามีตัวรับคือ NAD^+ และ FAD ให้อยู่ในรูปของรีดิวส์ฟอร์ม ($\text{NADH} + \text{H}^+$ และ FADH_2) ซึ่งจะถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนการขนส่งอิเล็กตรอน คาร์บอนไดออกไซด์ถูกดึงออกครึ่งละหนึ่งโมเลกุลในขั้นที่ 3 และ 4 ได้สารที่มี 4 คาร์บอนอะตอม แล้ววนกลับไปยังการตอออกซาโลอะซีติกดังเดิม พลังงานที่ได้จากวัฏจักรโดยตรงอยู่ในรูปของ GTP (guanosine triphosphate) ซึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็น ATP ภายหลัง (ขั้นที่ 5)

6.2.7 ระบบขนส่งอิเล็กตรอนและเคมีโอออสโมติกฟอสฟอริเลชัน นับจากไกลโคไลซิสมาจนถึงวัฏจักรเครบส์ ออกซิเจนยังไม่มีส่วนเข้าไปเกี่ยวข้อง เอนไซม์และโคเอนไซม์ที่ทำหน้าที่รับและถ่ายโอนอิเล็กตรอนพลังงานสูงฝังตัวอยู่ที่เยื่อบางชั้นในของไมโทคอนเดรีย ตัวรับอิเล็กตรอนแรกเริ่มคือ NAD ซึ่งรับอิเล็กตรอนมาจากกระบวนการไกลโคไลซิส และจากการสร้างอะเซทิลโคเอนไซม์เอ และวัฏจักรเครบส์ (อยู่ในรูปของ $\text{NADH} + \text{H}^+$) รวมถึง FAD ที่รับอิเล็กตรอนมาจากวัฏจักรเครบส์ (อยู่ในรูปของ FADH_2) ด้วยแล้วจะถ่ายโอนอิเล็กตรอนให้ตัวรับชุดใหม่ที่ฝังตัวอยู่ในเยื่อบางชั้นในของไมโทคอนเดรียต่อไป (รูป 6-15) ตัวรับอิเล็กตรอนชุดใหม่

นี้ประกอบด้วย FMN (flavin mononucleotide) Q (ubiquinone) และกลุ่ม Cyt (cytochrome ซึ่งเป็นโปรตีนเกาะอยู่กับหมู่ฮีม) เมื่ออิเล็กตรอนถูกถ่ายโอนมาจนถึง Cyt a_3 พลังงานลดลงจนเกือบหมด ออกซิเจนจึงเข้าไปรับอิเล็กตรอนและไฮโดรเจน ผลิตขั้นสุดท้าย คือ น้ำซึ่งมาจาก NADH 2 โมเลกุลและ O_2 หนึ่งโมเลกุลถูกรีดิวส์ได้น้ำ 2 โมเลกุล

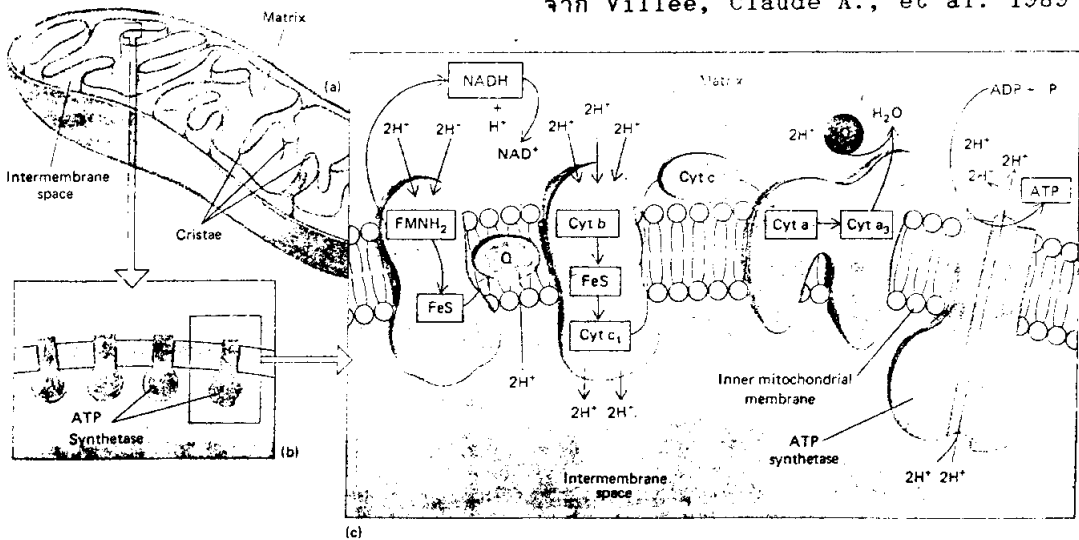
รูป 6-14 วัฏจักรของเครบส์ ให้สังเกต 2 คาร์บอนอะตอมของอะเซทิลโคเอนไซม์ มาจากหมู่ $-COOH$ 2 หมู่เดิมที่มีอยู่ในกรดออกซาโลอะซีติก



พลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากการถ่ายโอนจากตัวรับหนึ่งไปยังตัวรับถัดไปจะใช้ดัน H^+ จากเมทริกซ์เข้าสู่ช่องระหว่างเยื่อบางชั้นในของไมโทคอนเดรีย ทำให้มีการสะสมของ H^+ มากขึ้น โปรตอนเกรเดียนท์จะกันไม่ให้ H^+ แพร่กลับออกไปสู่เมทริกซ์ ATP ซินเทเทสที่ช่องพิเศษของเยื่อบางจะเป็นตัวช่วยให้ H^+ (โปรตอน) ไหลกลับออกไปสู่เมทริกซ์ การไหลครั้งนั้นมีการปล่อยพลังงานออกมาเพื่อให้ $ADP + P_i$ ได้ ATP ตามกระบวนการเคมีโอออสโมติกฟอสฟอริเลชันเช่นเดียวกับที่เกิดขึ้นที่ไทลาคอยด์ของคลอโรพลาสต์ (ดู 6.1.5 (4))

รูป 6-15 การขนส่งอิเล็กตรอน และเคมีโอออสโมซิส อิเล็กตรอนจะถูกถ่ายโอนจาก NADH ไปยัง FMN จนถึง $\text{Cyt } a_3$ ให้สังเกตการเขียน $1/2 \text{ O}_2$ (ในวงกลม) หมายถึงออกซิเจนโมเลกุล (ไม่ใช่เขียนแสดงความหมายว่าเป็นธาตุ) และช่องพิเศษที่ควบคุมโดยเอนไซม์ ATP ซินเทเทส

จาก Villee, Claude A., et al. 1989



FADH_2 จากวัฏจักรเครบส์เข้าสู่ระบบขนส่งอิเล็กตรอนที่ FMN ไม่ได้เพราะพลังงานต่ำกว่า NADH จึงเข้าที่ Q ซึ่งระดับพลังงานใกล้เคียงกัน พลังงานที่นำมาถ่ายโอนโดย FAD จึงใช้สร้าง ATP ได้เพียง 2 โมเลกุล

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการหายใจระดับเซลล์ กลูโคส 1 โมเลกุลสามารถสร้างพลังงานได้ 36 โมเลกุล มากกว่าการหมักที่ได้เพียง 2 โมเลกุลเท่านั้น (ดูตาราง 6-2)

6.2.8 แคนแทบอลิซึมของสารอาหารประเภทอื่น ๆ ลิพิดและโปรตีนเป็นแหล่งสะสมพลังงานเช่นเดียวกับคาร์โบไฮเดรต สามารถถูกสักร์เพื่อเอาพลังงานมาใช้ประโยชน์ได้ในกรณีที่พลังงานจากคาร์โบไฮเดรตไม่เพียงพอ เช่น การอดอาหารหรือการใช้พลังงานมากกว่าปกติ

(1) แคนแทบอลิซึมของลิพิด อาหารประเภทไขมันถือเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูงสุดเมื่อเทียบหน่วยน้ำหนักเดียวกับคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน เพราะโมเลกุลของไขมันมีไฮโดรเจนจำนวนมาก (อิเล็กตรอนของไฮโดรเจนในสารอินทรีย์มีพลังงานศักย์สูง) กรดไขมันที่มี 6 คาร์บอนอะตอม 1 โมเลกุล สามารถให้พลังงานถึง 44 ATP มากกว่ากลูโคสที่มี 6 คาร์บอนอะตอม 1 โมเลกุลได้พลังงานเพียง 36 ATP ถ้านับรวมส่วนของกลีเซอรอลเข้าด้วยก็จะได้พลัง

งานมากขึ้น

ตาราง 6-2 เปรียบเทียบพลังงาน ATP ที่ได้จากการหายใจระดับเซลล์ของยูแคริโอตกับเซลล์ เทียบจากกลูโคส 1 โมเลกุล

แอนแอโรบิกแคแทบอลิซึม

แอโรบิกแคแทบอลิซึม

ไกลโคไลซิส

ไกลโคไลซิส

ใส่เข้าไป 2 ATP

ใส่เข้าไป 2 ATP

ได้ออกมา 4 ATP

ได้ออกมา 4ATP

ผลผลิตจริง 2 ATP

ผลผลิตจริง 2 ATP

การหมัก ไม่ได้พลังงาน

วัฏจักรเครบส์ 2 ATP

10 NADH 30 ATP

2 $FADH_2$ 4 ATP

รวมผลผลิตจริงทั้งหมด 2 ATP

รวมผลผลิตจริงทั้งหมด 36 ATP

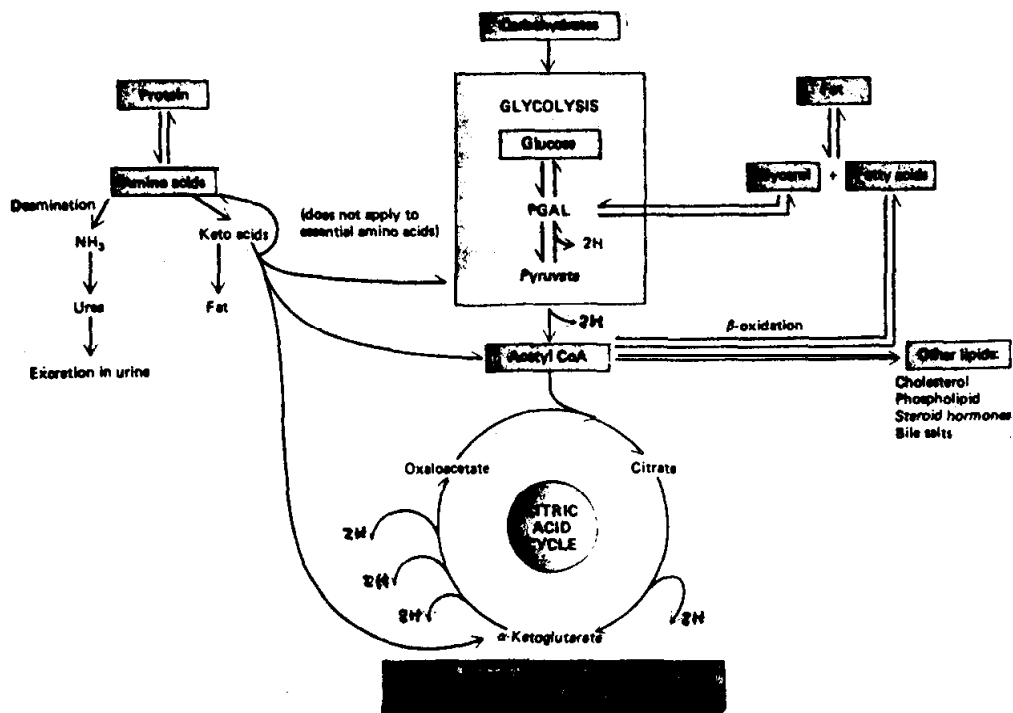
เมื่อกินอาหารประเภทไขมัน เอนไซม์ของระบบย่อยอาหารจะสลายโมเลกุลของไตรกลีเซไรด์ได้กลีเซอรอลและกรดไขมัน กลีเซอรอลถูกออกซิไดส์ด้วยปฏิกิริยาออกซิเดทีฟฟอสฟอริเลชันได้ฟอสfogลิเซรัลดีไฮด์ (PGAL) เข้าสู่กระบวนการไกลโคไลซิสได้ กรดไขมันถูกออกซิไดส์ด้วยปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์ช่วยได้สารประกอบที่มีหมู่อะเซทิล (2 คาร์บอนอะตอม) และมีพันธะกับโคเอนไซม์เอ ได้ อะเซทิลโคเอนไซม์เอ เข้าสู่วัฏจักรเครบส์ได้ (รูป 6-16) ถ้ากรดไขมันมีจำนวนคาร์บอนอะตอมมากก็จะได้หมู่อะเซทิลมาก เมื่อทั้ง 2 ส่วนประกอบของไตรกลีเซไรด์เชื่อมต่อกับกระบวนการแคแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตแล้ว กลไกการสร้าง ATP ก็เหมือนกัน

(2) แคแทบอลิซึมของโปรตีน อาหารประเภทโปรตีนถูกย่อยเป็นกรดอะมิโนด้วยเอนไซม์ของระบบทางเดินอาหาร เมื่อเข้าสู่เซลล์จะมีปฏิกิริยา deamination ตัดเอาหมู่ $-NH_2$ ออกไปได้ NH_3 หรือยูเรียแล้วขับออกไปพร้อมกับปัสสาวะ คาร์บอนอะตอมที่เหลือจะถูกเมแทบอลิส์ต่อไปขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโน ปฏิกิริยาจะเชื่อมต่อกับแคแทบอลิซึมของคาร์โบ

ไฮเดรตได้ 3 ทาง คือ (ก) ยูคิตแอมิเนชันได้กรดไพรูวิก เช่น อะลานีน กรดไพรูวิกเป็นสารสุดท้ายของกระบวนการไกลโคไลซิส (ข) กรดอะมิโนที่อยู่ในกลุ่มกรดอะมิโนที่จำเป็นต้องกินเข้าไปไม่สามารถเชื่อมต่อเข้ากับไกลโคไลซิส เช่น กรดกลูตามิก เมื่อทุกตัวแอมิเนชันแล้วถูกเปลี่ยนเป็นกรดแอลฟาคีโตนาริกเข้าวัฏจักรเครบส์ได้ หรือกรดแอสพาทิกจะถูกเปลี่ยนเป็นกรดออกซาโลอะซิติกเข้าวัฏจักรเครบส์ได้เช่นเดียวกัน (ค) กรดอะมิโนที่มีจำนวนคาร์บอนอะตอมและโครงสร้างที่ไม่สัมพันธ์กับสารในกระบวนการแคแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตจะต้องมีเอนไซม์หลายชนิดมาช่วยเปลี่ยนให้เป็นสารที่มีอยู่ในวัฏจักรเครบส์ หรือเปลี่ยนให้เป็น อะเซทิลโคเอนไซม์เอ เพื่อให้เข้าสู่วัฏจักรเครบส์ได้ (รูป 6-16)

จะเห็นได้ว่ากรดอะมิโนที่จะเข้าสู่กระบวนการแคแทบอลิซึมเพื่อสกัดพลังงานออกมา นั้นเข้าได้แค่ช่วงปลายของกระบวนการไกลโคไลซิส คือ ที่กรดไพรูวิก พลังงานที่จะถูกสกัดออกมาจึงน้อยกว่ากลูโคส

รูป 6-16 ความสัมพันธ์ของกระบวนการแคแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ลิพิด และ โปรตีน ให้สังเกตตำแหน่งที่มีลูกศร 2 ทิศทาง เพื่อแสดงว่าสารเหล่านั้นถูกสังเคราะห์กลับได้



จาก Villee, Claude A., et al. 1989