

บทที่ 2 เมตาบอลิซึม

วัตถุประสงค์ เมื่อนักศึกษาเรียนจบบทนี้แล้ว ควรจะมีความสามารถในการ

1. จำแนกเฟสและขั้นตอนของกระบวนการเมตาบอลิซึม
2. บอกวิธีการควบคุมเมตาบอลิซึมของเซลล์
3. แสดงวิธีการคิดพลังงานอิสระ
4. อธิบายถึง ATP โมเลกุลสารประกอบฟอสเฟตพลังงานสูง
5. เขียนวัฏจักรพลังงานภายในเซลล์

บทนำ

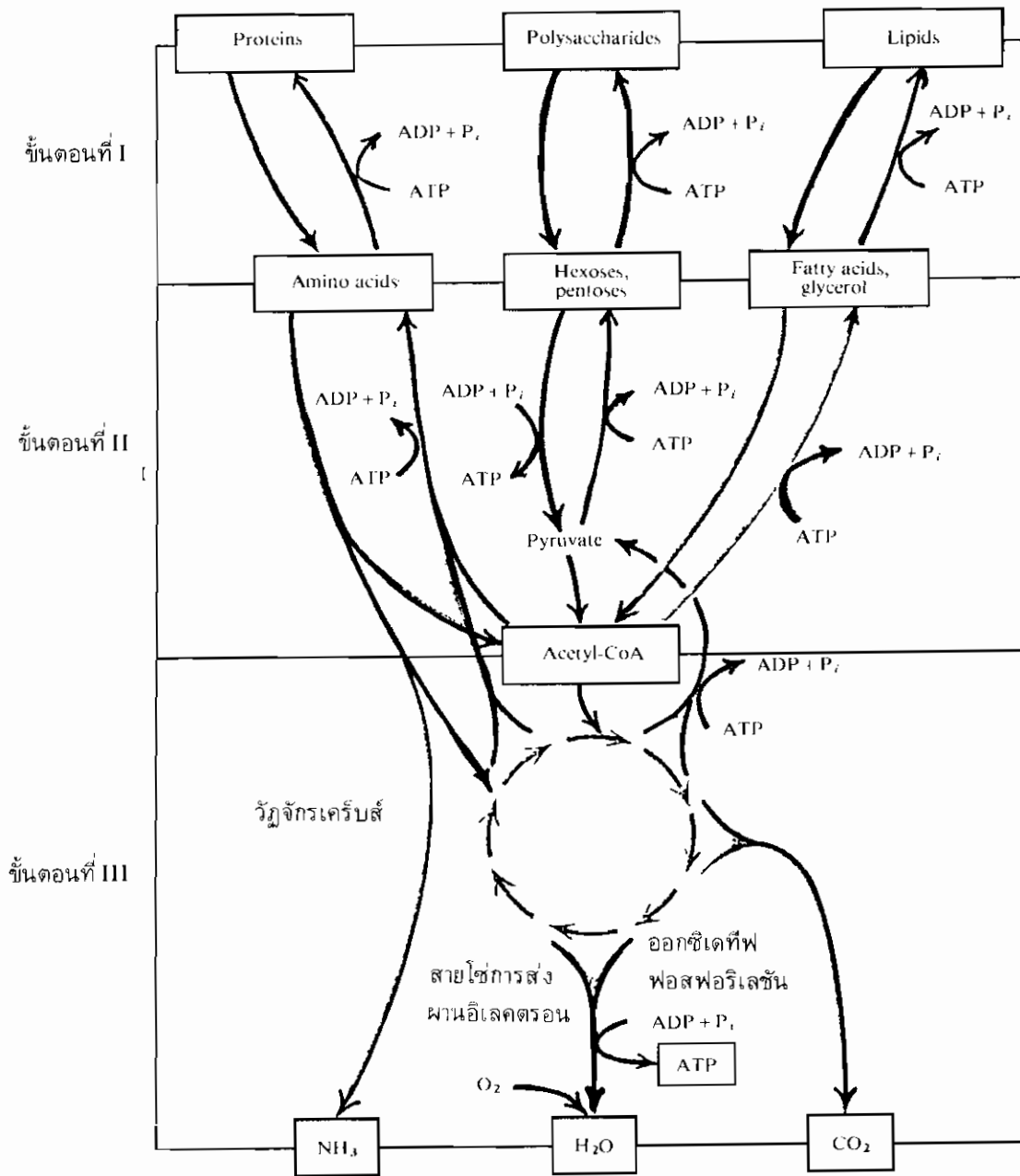
เมตาบอลิซึมเป็นผลรวมของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เอ็นไซม์ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งในแต่ละปฏิกิริยา ทั้งนี้เพื่อวัตถุประสงค์สองอย่างคือ เพื่อเปลี่ยนพลังงานจากสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในสภาพเหมาะสมที่เซลล์จะนำไปใช้ได้ และเพื่อเปลี่ยนแปลงโมเลกุลสารอินทรีย์ เช่น การนำสารเริ่มต้นโมเลกุลเล็ก ๆ ไปสังเคราะห์เป็นสารโมเลกุลใหญ่ หรือการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก เป็นต้น ปฏิกิริยาต่าง ๆ ในกระบวนการเมตาบอลิซึมต่อเนื่องกันไปเป็นวิถี (pathway) ผลผลิตของปฏิกิริยาแรกจะเป็นซับสเตรทของปฏิกิริยาที่สอง ผลผลิตของปฏิกิริยาที่สองจะเป็นซับสเตรทของปฏิกิริยาที่สาม ต่อกันไปเช่นนี้เรื่อย ๆ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในจุลินทรีย์เล็ก ๆ อย่าง E.Coli ก็ยังมีจำนวนเป็นพันแล้ว ถ้ายังเป็นสัตว์ชั้นสูงจำนวนปฏิกิริยาก็ยิ่งมากขึ้นตามลำดับ อย่างไรก็ตามประเภทของปฏิกิริยานั้นมีไม่มาก ส่วนมากเป็นปฏิกิริยาธรรมดาไม่สลับซับซ้อน เช่น ปฏิกิริยาดีไฮเดรชันที่มักทำให้เกิดพันธะคู่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ปฏิกิริยาการโยกย้ายหมู่บางหมู่ ปฏิกิริยาไอซอเมอไรเซชัน และอื่น ๆ เป็นต้น

2.1 เฟสและขั้นตอนของกระบวนการเมตาบอลิซึม

กระบวนการเมตาบอลิซึมแบ่งออกเป็น 2 เฟส คือ อะนาบอลิซึม (anabolism) และ คatabolism) แต่ละเฟสก็มี 3 ขั้นตอน ขั้นตอน I, II และ III ตามลำดับ (รูปที่ 2-1)

อะนาบอลิซึมเป็นเฟสที่มีการสังเคราะห์โมเลกุลต่าง ๆ ของเซลล์ เช่น กรดนิวคลีอิก โปรตีน ลิพิด โพลีแซคคาไรด์ จากโมเลกุลสารอินทรีย์เล็ก ๆ เป็นต้นว่า กรดอะมิโน น้ำตาล อะเซทิลโคเอ และอื่น ๆ การสังเคราะห์นี้อาศัยพลังงานจากเฟสคatabolism

คatabolism เป็นเฟสการย่อยสลายโมเลกุลสารอินทรีย์ใหญ่ ๆ เช่น คาร์โบไฮเดรต ลิพิด โปรตีน และอื่น ๆ ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก ๆ เช่น แลคเตท อะซิเตท คาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ แอมโมเนีย ยูเรีย เป็นต้น มีการคายพลังงานออกมา เซลล์จะเก็บรักษาพลังงานไว้ในรูป ATP พลังงานนี้จะถูกนำไปใช้ในเฟสอะนาบอลิซึมในขณะที่มีการสังเคราะห์ที่ต้องการพลังงานเกิดขึ้น ทั้งสองเฟสเกิดขึ้นพร้อมกัน (simultaneously) แต่ในที่ต่างกัน (different compartment)



รูปที่ 2-1 กระบวนการเมตาบอลิซึม แสดงให้เห็นเฟสอะนาบอลิซึม (ลูกศรชี้ขึ้น) เฟสคะตาบอลิซึม (ลูกศรชี้ลง) และขั้นตอนทั้งสาม

ถ้าพิจารณาแต่ละเฟสจะแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน (stages) สำหรับเฟสคะตาบอลิซึม ขั้นตอนที่ 1 โมเลกุลใหญ่คือโปรตีน โพลีแซคคาไรด์ ลิพิด ถูกย่อยสลายเป็นหน่วยย่อยเล็ก ๆ คือ

กรดอะมิโน โมโนแซคคาไรด์และกรดไขมันตามลำดับ ขั้นตอน II หน่วยย่อยเล็ก ๆ เหล่านี้ถูกเปลี่ยนไปเป็นอินเตอร่ามีเดียที่รวมคืออะเซทิลโคเอ คาร์บอนในโมเลกุลอะเซทิลโคเอจึงมาจากกรดอะมิโน โมโนแซคคาไรด์หรือกรดไขมัน ขั้นตอน III อะเซทิลโคเอเข้าวัฏจักรเคร็บส์ (Krebs cycle) ถูกออกซิไดซ์อย่างสมบูรณ์ให้ผลผลิตสุดท้าย คือ CO₂ กับ H₂O ขั้นตอนนี้เกี่ยวข้องกับลูกโซ่การหายใจ (respiratory chain) และกระบวนการออกซิเดทีฟฟอสฟอริเลชัน (oxidative phosphorylation) เป็นขั้นตอนที่ได้พลังงานออกมามากมาย

เฟสอะนาบอลิซึมก็แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนเช่นกัน โมเลกุลเล็ก ๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ II จะถูกเปลี่ยนกลับไปเป็นหน่วยย่อยในขั้นตอนที่ II และกลายเป็นโมเลกุลใหญ่ในขั้นตอนที่ I ยกตัวอย่างกรดคีโตที่อยู่ในขั้นตอนที่ III เมื่อเกิดปฏิกิริยาอะมิเนชัน (amination) เติมหู่อะมิโนในโมเลกุลกลายเป็นกรดอะมิโนในขั้นตอนที่ II จากนั้นกรดอะมิโนทั้งหลายมารวมกันกลายเป็นโพลีเปปไทด์หรือโปรตีนในขั้นตอนที่ I

2.2 การควบคุมเมตาบอลิซึมของเซลล์

กลไกสำคัญในการควบคุมเมตาบอลิซึม คือ

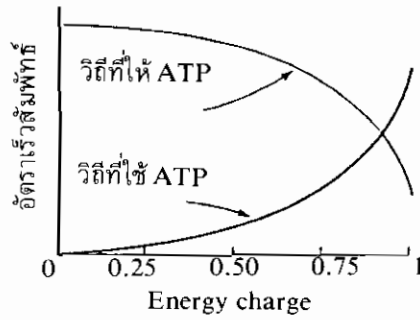
1. การควบคุมปริมาณเอ็นไซม์ ซึ่งขึ้นอยู่กับอัตราการสังเคราะห์และอัตราการย่อยสลายเอ็นไซม์

2. การควบคุมแอกติวิตีของเอ็นไซม์ โดยการเปลี่ยนแปลงพันธะโควาเลนต์ตรงตำแหน่งจำเพาะภายในโมเลกุลเอ็นไซม์ หรือการจับของโมดูเลเตอร์เข้าที่บริเวณควบคุมของอัลโลสตีเรียคเอ็นไซม์

3. การควบคุมโดยสถานะของพลังงาน (energy status) ภายในเซลล์ ดัชนี (index) ที่บ่งชี้ถึงสถานะของพลังงานภายในเซลล์ คือค่า energy charge ซึ่งคำนวณได้จาก

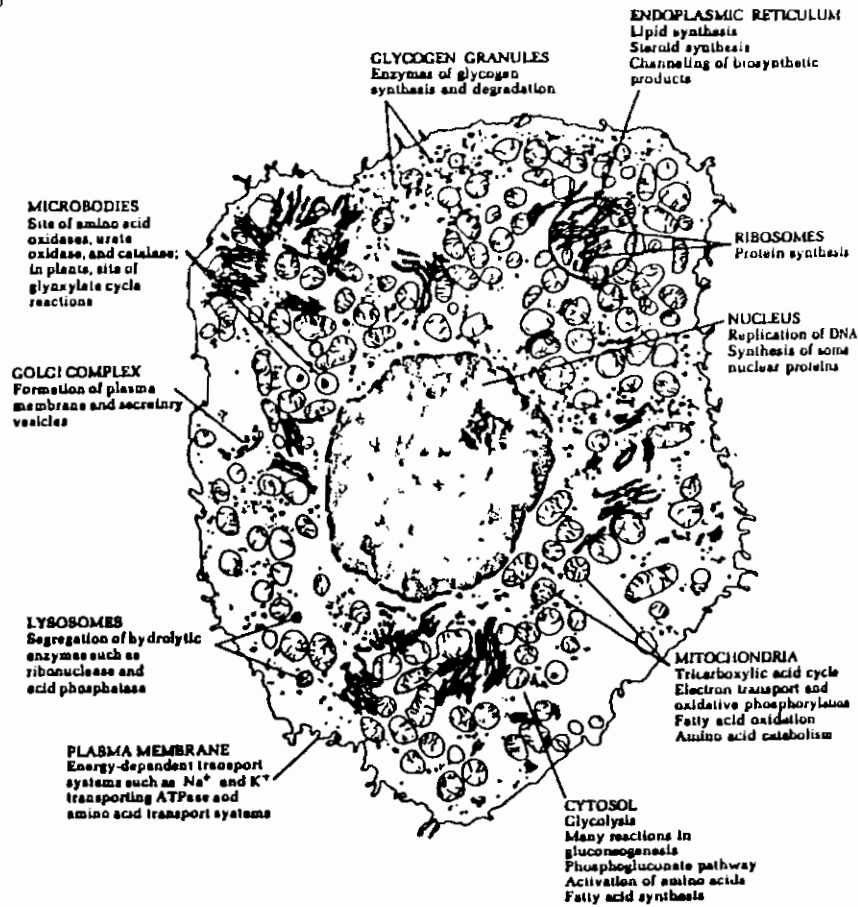
$$\text{Energy charge} = \frac{[\text{ATP}] + \frac{1}{2}[\text{ADP}]}{[\text{ATP}] + [\text{ADP}] + [\text{AMP}]}$$

Energy charge มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 ถ้าค่า energy charge เท่ากับศูนย์หมายถึงว่ามีแต่ AMP ถ้าค่า energy charge เท่ากับหนึ่งหมายถึงว่ามีแต่ ATP Daniel Atkinson ได้แสดงให้เห็นว่าวิถีอะนาบอลิซึมซึ่งให้พลังงานหรือ ATP จะถูกยับยั้งเมื่อค่า energy charge เพิ่มขึ้น ส่วนวิถีอะนาบอลิซึมซึ่งใช้พลังงานจะถูกกระตุ้นโดยค่า energy charge ที่สูงขึ้น (รูปที่ 2-2)



รูปที่ 2-2 ผลของenergy charge ต่ออัตราเร็วสัมพัทธ์ (relative rates) ของวิถีกระตาดอลิซิมที่ให้ ATP และ วิถีอะนาบอลิซิมที่ใช้ ATP

จากรูปจะเห็นว่าเส้นโค้งทั้งสองตัดกันตรงตำแหน่งที่ energy charge ประมาณ 0.9 energy charge ภายในเซลล์คล้ายกับ pH ภายในเซลล์ตรงที่ว่าจะถูกควบคุมไว้ตลอดเวลา มีการเปลี่ยนแปลงได้บ้างเล็กน้อยภายในช่วงแคบ ๆ energy charge ภายในเซลล์ส่วนใหญ่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.80-0.95



รูปที่ 2-3 กระบวนการเมตาบอลิซิมสำคัญที่เกิดขึ้นที่ต่างกันภายในเซลล์ตับของหนู

4. การที่วิถีการสังเคราะห์และวิถีการย่อยสลายดำเนินไปในที่ต่างกันนั้นมีส่วนช่วยในการควบคุมเมตาบอลิซึม เช่น การสังเคราะห์กรดไขมันเกิดในไซโตซอล แต่วัฏจักรเบต้าออกซิเดชันของกรดไขมันเกิดในไมโทคอนเดรีย (รูปที่ 2-3) เสมือนหนึ่งแยกวิถีเมตาบอลิซึมที่สวนทางกันให้เกิดในที่ต่างกัน

2.3 พลังงานอิสระ

ปี ค.ศ. 1878 Josiah Willard Gibbs เป็นผู้เริ่มใช้คำว่าพลังงานอิสระ (free energy) ใช้สัญลักษณ์เป็นอักษร G โดยนำกฎข้อที่หนึ่งและกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ (thermodynamics) มารวมเข้าด้วยกัน สมการพื้นฐานคือ

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \dots(1)$$

เมื่อ ΔG คือ พลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของระบบที่เกิดขึ้นที่ความดัน (P) และอุณหภูมิ (T) คงที่

ΔH คือ เอนทัลปี (enthalpy) ที่เปลี่ยนไป

ΔS คือ เอนโทรปี (entropy) ที่เปลี่ยนไป

$$H = \Delta E + P\Delta V \quad \dots(2)$$

ปฏิกิริยาทางชีวเคมี ΔV หรือปริมาตรที่เปลี่ยนไปมีค่าน้อยมาก ดังนั้น

$$\Delta H = \Delta E \quad \dots(3)$$

$$\text{มีผลให้ } \Delta G \cong \Delta E - T\Delta S \quad \dots(4)$$

นั่นคือพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปของปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานภายใน (internal energy, ΔE) และการเปลี่ยนแปลงของเอนโทรปี (ΔS) ของระบบนั้นๆ ค่าพลังงานอิสระที่เปลี่ยนไปจะบอกได้ว่าปฏิกิริยานั้นสามารถเกิดขึ้นได้เอง (spontaneously) หรือไม่

เมื่อ ΔG มีค่าเป็นลบปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เอง ΔG เป็นศูนย์แสดงว่าระบบนั้นอยู่ที่ภาวะสมดุล และถ้า ΔG มีค่าเป็นบวกหมายความว่าปฏิกิริยาไม่สามารถดำเนินไปได้เอง ต้องใช้พลังงานช่วยผลักดันในการเกิดปฏิกิริยา สิ่งที่สำคัญที่ควรรู้อีกคือ ค่า ΔG ขึ้นกับพลังงานอิสระของสารเริ่มต้นและพลังงานอิสระของผลิตภัณฑ์เท่านั้น ไม่ขึ้นกับกลไก (mechanism) หรือวิถี (path) ของปฏิกิริยาแต่อย่างใด เช่น ΔG ในการออกซิไดซ์กลูโคสไปเป็น CO_2 กับ H_2O จะมีค่าเท่ากัน ไม่ว่าจะเป็นการเผาไหม้ในหลอดทดลอง หรือการเร่งปฏิกิริยาภายในเซลล์โดยเอ็นไซม์หลายๆ ขั้นตอนก็ตาม ค่า ΔG ไม่ได้บอกอัตราเร็วปฏิกิริยา อย่างสัมพันธ์กับพลังงานอิสระการกระตุ้น (ΔG^\ddagger) ในเรื่องเอ็นไซม์ เพราะไม่เกี่ยวข้องกับ ΔG

จากสมการ $A + B \rightleftharpoons C + D$

$$\Delta G = \Delta G^\circ + RT \log_e \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad \dots(5)$$

เมื่อ ΔG° เป็นพลังงานอิสระมาตรฐาน หมายความว่าเมื่อ A, B, C, D มีความเข้มข้นเท่ากัน คือ 1.0 โมลาร์

R เป็นค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant)

T เป็นองศาสัมบูรณ์ (absolute temperature)

[A], [B], [C], [D] เป็นความเข้มข้นของสาร หน่วยเป็นโมลาร์

ดังนั้น ΔG ขึ้นกับธรรมชาติของสารเริ่มต้น (ΔG°) และความเข้มข้นของสาร A, B, C และ D เพราะ R และ T เป็นค่าคงที่

สัญลักษณ์ $\Delta G^\circ'$ ใช้ในทางชีวเคมี หมายถึง พลังงานอิสระมาตรฐานที่ pH 7.0 และเมื่ออยู่ที่ภาวะสมดุลค่า $\Delta G = 0$ ทำให้สมการ (5) กลายเป็นสมการ (6) เป็นผลให้ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานและค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) สัมพันธ์กัน

$$0 = \Delta G^\circ' + RT \log_e \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad \dots(6)$$

$$\Delta G^\circ' = -RT \log_e \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad \dots(7)$$

$$\text{ค่าคงที่สมดุลภายใต้สภาวะมาตรฐาน, } K'_{eq} = \frac{[C][D]}{[A][B]} \quad \dots(8)$$

นำ (8) ไปแทน (7)

$$\Delta G^\circ' = -RT \log_e K'_{eq} \quad \dots(9)$$

$$\Delta G^\circ' = -2.303 RT \log_{10} K'_{eq} \quad \dots(10)$$

$$K'_{eq} = 10^{-\Delta G^\circ' / (2.303 RT)} \quad \dots(11)$$

แทนค่า $R = 1.98 \times 10^{-3}$ กิโลแคลอรี/โมล \cdot องศา $^{-1}$ และ $T = 298^\circ K$ หรือ $25^\circ C$ จะได้ว่า

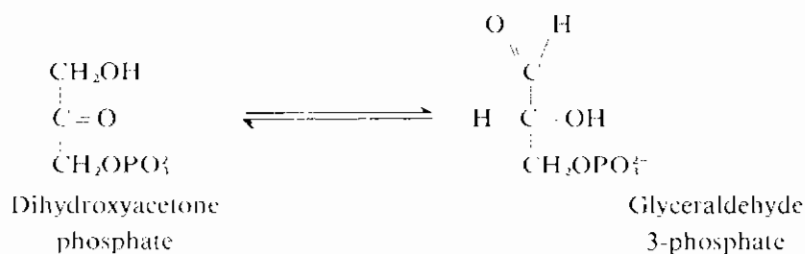
$$K'_{eq} = 10^{-\Delta G^\circ' / 1.36} \quad \dots(12)$$

เมื่อ $\Delta G^\circ'$ หน่วยเป็นกิโลแคลอรี/โมล สมการที่ (12) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานอิสระมาตรฐานและค่าคงที่สมดุล ตัวอย่างเช่น ค่าคงที่สมดุล = 10 ค่าพลังงานอิสระมาตรฐานเท่ากับ -1.36 กิโลแคลอรี/โมล ที่ $25^\circ C$ (ตารางที่ 2-1)

ตารางที่ 2-1 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\Delta G^{0'}$ กับ K'_{eq} ที่ 25°C

K'_{eq}	$\Delta G^{0'}$ (kcal/mol)
10^{-5}	6.82
10^{-4}	5.46
10^{-3}	4.09
10^{-2}	2.73
10^{-1}	1.36
1	0
10	-1.36
10^2	-2.73
10^3	-4.09
10^4	-5.46
10^5	-6.82

ตัวอย่างการคำนวณ $\Delta G^{0'}$ และ ΔG สำหรับปฏิกิริยาไอซอเมอไรเซชันของ DHAP เป็นกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟตในวิถีไกลโคไลซิส โดยกำหนดให้อัตราส่วนของกลีเซอรอลดีไฮด์ต่อ DHAP ที่ภาวะสมดุลเท่ากับ .0475 ที่ 25°C (298 K) และ pH 7.0 ดังนั้นค่า $K'_{eq} = .0475$ หาค่าพลังงานอิสระมาตรฐานของปฏิกิริยาได้จากสมการที่ 10



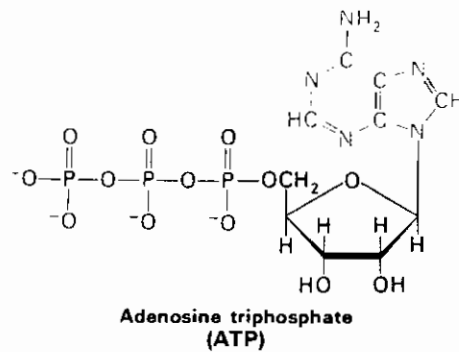
$$\begin{aligned}
 \Delta G^{0'} &= -2.303 RT \log_{10} K'_{eq} \\
 &= -2.303 \times 1.98 \times 10^{-3} \times 298 \times \log_{10}(.0475) \\
 \Delta G^{0'} &= +1.8 \text{ กิโลแคลอรี/โมล}
 \end{aligned}$$

จากค่า ΔG° ที่ได้ให้หาค่า ΔG ของปฏิกิริยา เมื่อกำหนดความเข้มข้นแรกเริ่มของ DHAP เท่ากับ 2×10^{-4} โมลาร์ และความเข้มข้นแรกเริ่มของกลีเซอรอลดีไฮด์-3-ฟอสเฟตเท่ากับ 3×10^{-6} โมลาร์ ใช้สมการที่ (5)

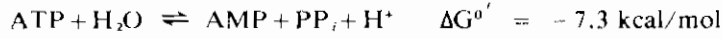
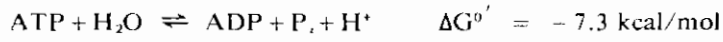
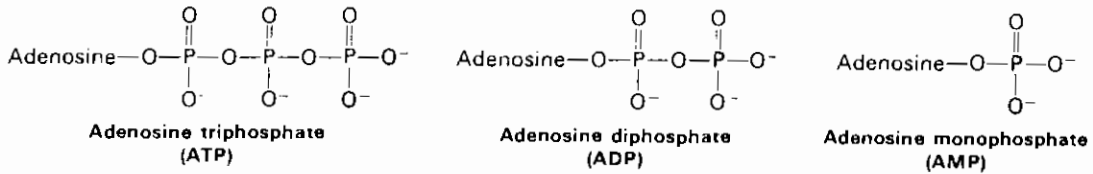
$$\begin{aligned} \Delta G &= 1.8 \text{ กิโลแคลอรี/โมล} + 2.303 RT \log_{10} \frac{3 \times 10^{-6} \text{ โมลาร์}}{2 \times 10^{-4} \text{ โมลาร์}} \\ &= 1.8 \text{ กิโลแคลอรี/โมล} - 2.5 \text{ กิโลแคลอรี/โมล} \\ &= -0.7 \text{ กิโลแคลอรี/โมล} \end{aligned}$$

แสดงว่าปฏิกิริยาไอโซมเมโรเซชันนี้เกิดขึ้นได้เอง ถ้าความเข้มข้นแรกเริ่มเป็นดังที่กำหนด ค่า ΔG เป็นลบถึงแม้ค่า ΔG° จะเป็นบวก ค่าที่จะบอกว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เองหรือไม่คือค่า ΔG ไม่ใช่ ΔG°

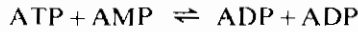
2.4 ATP โมเลกุลสารประกอบฟอสเฟตพลังงานสูง



สิ่งมีชีวิตต้องการพลังงานที่ได้จากการเผาผลาญอาหารไปใช้ในการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ การขนส่งโมเลกุลและไอออน และการสังเคราะห์สารชีวโมเลกุลต่าง ๆ จากสารเริ่มต้นโมเลกุลเล็ก ๆ ATP เป็นโมเลกุลที่เก็บพลังงานเหล่านั้นไว้ โมเลกุล ATP ประกอบด้วยเบสอะดีนีน น้ำตาลไรโบส และหมู่ไตรฟอสเฟต มักจะจับกับ Mg^{2+} หรือ Mn^{2+} เป็นคอมเพล็กซ์ หมู่ไตรฟอสเฟตมีพันธะฟอสโฟแอนไฮดราตสองแห่ง เมื่อ ATP ถูกไฮโดรไลซ์เป็น ADP + P_i หรือ AMP + PP_i จะได้พลังงานออกมามากมาย ใช้เป็นแรงผลักดันปฏิกิริยาอื่นได้ เช่น การหดตัวของกล้ามเนื้อ เป็นต้น

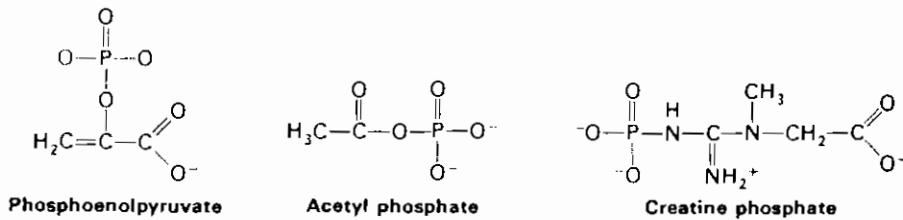


ATP, AMP และ ADP แปลงผันไปมาระหว่างกันได้โดยมีเอนไซม์ **adenylate kinase** (อีกชื่อว่าเป็น **myokinase**) เร่งปฏิกิริยา



บางปฏิกิริยาอาศัยแรงผลักดันจากนิวคลีโอไทด์อื่น เช่น GTP หรือกวานอซินไตรฟอสเฟต UTP หรือยูรีดีนไตรฟอสเฟต CTP หรือไซทิดีนไตรฟอสเฟต

ATP มักจะถูกเรียกเป็นสารประกอบฟอสเฟตพลังงานสูง (high-energy phosphate compound) และพันธะฟอสโฟแอนไฮดรายด์เป็นพันธะที่มีพลังงานสูง ลักษณะพันธะนี้ได้มีอะไรพิเศษเพียงแต่ว่าเมื่อถูกไฮโดรไลซ์จะให้พลังงานออกมามาก อาจมีการใช้สัญลักษณ์ ~P หมายถึงว่าสารนั้นมีศักยภาพการโยกย้ายหมู่ฟอสเฟตสูง (high phosphate group transfer potential) สารประกอบอื่นที่มีศักยภาพการโยกย้ายหมู่ฟอสเฟตสูงกว่า ATP เช่น ฟอสโฟอินอลไพรูเวท อะเซทิลฟอสเฟต ครีเอทีนฟอสเฟต (ตารางที่ 2-2) สารเหล่านี้จะยกหมู่ฟอสเฟตให้ ADP กลายเป็น ATP ได้



ในตารางฟอสโฟอินอลไพรูเวทมีศักยภาพการโยกย้ายหมู่ฟอสเฟตสูงที่สุด

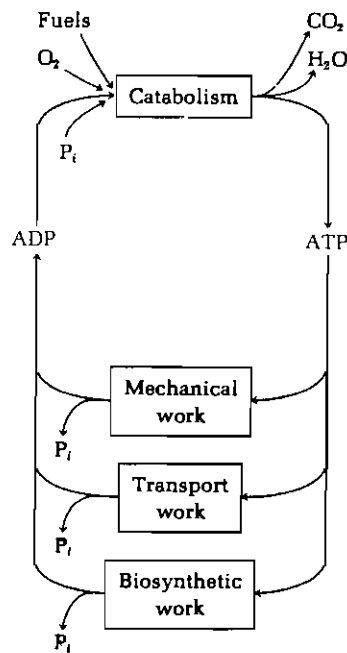
2.5 วัฏจักรพลังงานภายในเซลล์

การเผาผลาญสารอาหารต่าง ๆ ภายในร่างกาย เป็นการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่ำ ได้พลังงานออกมาเก็บรักษาไว้ในรูปพลังงานเคมีที่พันธะฟอสโฟแอนไฮดรายด์อันสุดท้ายในโมเลกุล ATP

เมื่อกระบวนการต่าง ๆ ภายในเซลล์ต้องการพลังงาน ก็จะได้จากการไฮโดรไลซ์ ATP เป็น ADP และ P_i ADP นั้นสามารถเกิดฟอสฟอริเลชันกลับไปเป็น ATP ได้ใหม่ ถ้าหากว่ามี P_i และพลังงานจากเฟสคatabอลิซึม (รูปที่ 2.4) ATP หรือพลังงานที่ได้ถูกนำไปใช้ทางใดบ้างนั้นได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.4

ตารางที่ 2-2 พลังงานอิสระมาตรฐานในการไฮโดรไลซ์สารประกอบฟอสเฟตบางชนิด

สารประกอบ	ΔG (กิโลแคลอรี/โมล)
ฟอสโฟอินอลไพรูเวท	-14.8
คาร์บาโมอิลฟอสเฟต	-12.3
อะเซทิลฟอสเฟต	-10.3
ครีเอทีนฟอสเฟต	-10.3
ไพโรฟอสเฟต	-8.0
ATP	-7.3
กลูโคส-1-ฟอสเฟต	-5.0
กลูโคส-6-ฟอสเฟต	-3.3
กลีเซอรอล-3-ฟอสเฟต	-2.2



รูปที่ 2-4 วัฏจักรพลังงานหรือวัฏจักร ATP-ADP ภายในเซลล์

บทสรุป

เมตาบอลิซึมเป็นผลรวมของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิตมีเอ็นไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา วัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนพลังงานจากสิ่งแวดล้อมให้อยู่ในสภาพเหมาะสมที่เซลล์จะนำไปใช้ได้ และเพื่อเปลี่ยนแปลงโมเลกุลสารอินทรีย์จากโมเลกุลใหญ่เป็นโมเลกุลเล็ก และจากโมเลกุลเล็กเป็นโมเลกุลใหญ่ แบ่งออกเป็น 2 เฟสคือ อะนาบอลิซึมซึ่งเป็นเฟสการสังเคราะห์และต้องการพลังงาน กับเฟสคะตาบอลิซึมเป็นเฟสการย่อยสลายและให้พลังงาน ทั้งสองเฟสเกิดขึ้นพร้อมกันในที่ต่างกัน แต่ละเฟสแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน การควบคุมเมตาบอลิซึมของเซลล์เป็นไปในลักษณะการควบคุมปริมาณเอ็นไซม์ การควบคุมแอกติวิตีของเอ็นไซม์ การควบคุมโดยสถานะของพลังงาน และเมตาบอลิซึมที่สวนทางกันเกิดในที่ต่างกัน ก็มีส่วนช่วยในการควบคุมเมตาบอลิซึม

ค่าพลังงานอิสระหรือ ΔG ของปฏิกิริยาขึ้นกับพลังงานอิสระของสารเริ่มต้นและพลังงานอิสระของผลิตภัณฑ์นั้น ไม่ขึ้นกับกลไกหรือวิธีของปฏิกิริยา ถ้าค่า ΔG เป็นลบ ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เอง ΔG เป็นศูนย์แสดงว่าระบบนั้นอยู่ที่ภาวะสมดุล ΔG เป็นบวกหมายความว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นเองไม่ได้ต้องอาศัยแรงผลักดันจากภายนอก ΔG° เป็นพลังงานอิสระมาตรฐานเมื่อสารทุกตัวมีความเข้มข้น 1.0 โมลาร์ $\Delta G^\circ'$ เป็นพลังงานอิสระมาตรฐานทางชีวเคมีที่ pH 7.0 $\Delta G^\circ'$ คำนวณได้จากสูตร $-2.303 RT \log_{10} K'_{eq}$ หน่วยเป็นกิโลแคลอรี/โมล ค่า ΔG เป็นค่าที่จะบอกว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เองหรือไม่ คำนวณจากสูตร $\Delta G^\circ' + 2.303 RT \log_{10} \frac{[C][D]}{[A][B]}$ หน่วยเป็นกิโลแคลอรี/โมลเช่นกัน

นิวคลีโอไทด์ไตรฟอสเฟต เช่น ATP GTP UTP และ CTP เมื่อถูกไฮโดรไลซ์พันธะฟอสโฟแอนไฮดรายด์ออกไป กลายเป็นนิวคลีโอไซด์ไตรฟอสเฟตและ P_i จะให้พลังงานซึ่งจะไปผลักดันให้เกิดการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ การขนส่งโมเลกุลและไอออน และการสังเคราะห์ชีวโมเลกุลต่าง ๆ สารประกอบฟอสเฟตอื่นที่มีศักยภาพโยกย้ายสูง ได้แก่ ฟอสโฟอินอลไพรูเวท อะเซทิลฟอสเฟต ครีเอทีนฟอสเฟตและอื่น ๆ วัฏจักร ATP-ADP เป็นวัฏจักรพลังงานที่สำคัญภายในเซลล์ แสดงถึงพลังงานที่ได้จากการเผาผลาญอาหารจะถูกเก็บไว้ในโมเลกุล ATP เมื่อเซลล์ต้องการนำพลังงานไปใช้จะไฮโดรไลซ์เป็น $ADP + P_i$ ADP จะกลับเป็น ATP ได้ใหม่ถ้ามี P_i และได้พลังงานจากเฟสคะตาบอลิซึม

คำถามท้ายบท

1. เมตาบอลิซึมแบ่งออกเป็นกี่เฟส อะไรบ้าง แต่ละเฟสแบ่งออกเป็นกี่ขั้นตอน
2. บอกกลไกการควบคุมเมตาบอลิซึมของเซลล์
3. ค่า Energy charge ภายในเซลล์เป็นตัวชี้ที่บ่งบอกถึงอะไร
4. ค่า ΔG ขึ้นอยู่กับอะไร การที่ค่านี้เป็นบวกหรือเป็นลบหรือมีค่าเท่ากับศูนย์ บอกให้ทราบถึง, อะไร
5. การหาค่าพลังงานอิสระมาตรฐานที่ pH 7.0 ($\Delta G^\circ'$) ใช้สูตรใดในการคำนวณ
6. การหาค่าพลังงานอิสระ (ΔG) ของปฏิกิริยา ใช้สูตรใดในการคำนวณ
7. ค่า ΔG หรือ $\Delta G^\circ'$ ที่จะบอกว่าปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เองหรือไม่
8. ให้บอกชื่อสารที่มีศักย์การโยกย้ายหมู่ฟอสเฟตสูงมา 2-3 ชื่อ
9. เขียนรูปวัฏจักร ATP-ADP