

บทที่ 5

การถ่ายทอดพลังงานและปฏิกิริยาเคมี

เค้าโครงเรื่อง

5.1 การถ่ายทอดพลังงานในระบบสุริยะ

5.1.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์

5.1.2 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์

5.2 เทอร์โมไดนามิกส์และปฏิกิริยาเคมี

5.3 การควบคุมปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์

5.3.1 เอนไซม์ : ชีวแคตาลิสต์

5.3.2 กลไกการทำงานของเอนไซม์

5.3.3 การควบคุมการทำงานของเอนไซม์

5.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

5.4 ผลกระทบของเอนไซม์ที่มีต่อวิวัฒนาการ

พลังงาน คือความสามารถในการก่อให้เกิดงาน กล่าวอีกนัยหนึ่งคือความสามารถในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะหรือการเคลื่อนที่ของมวล พลังงานที่เกี่ยวข้องในชีวิตวิทยาคือ ความสามารถในการทำให้สิ่งมีชีวิตดำเนินกลไกการมีชีวิต เช่นการอ่านหนังสือหนึ่งประโยคจำเป็นต้องใช้พลังงานเทียบเท่ากับการทำให้หลอดไฟกำลังส่องสว่าง 75 วัตต์ สว่างได้ ดังนั้นสิ่งมีชีวิตทุกชนิดจำเป็นต้องใช้พลังงานอยู่ตลอดเวลา มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับขนาดของร่างกาย อยู่ในระยะพักหรือระยะมีการก่อกอฤทธิ์ โดยเฉพาะมนุษย์จำเป็นต้องใช้พลังงานสูงมาก เพื่อช่วยให้การทำงานของอวัยวะและระบบต่าง ๆ ของร่างกายดำเนินไปตามปกติ

5.1 การถ่ายทอดพลังงานในระบบสุริยะ

พลังงานในระบบสุริยะมีหลายแบบ ได้แก่ พลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า พลังงานกล พลังงานเคมี พลังงานเสียง พลังงานการแผ่รังสี พลังงานดังกล่าวสามารถนำมา

จำแนกได้ 2 ประเภทคือ พลังงานศักย์ (potential energy) เป็นพลังงานที่สะสม และ พลังงานจลน์ (kinetics energy) เป็นพลังงานที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ แหล่งกำเนิดพลังงาน มหาศาล คือ ดวงอาทิตย์ ซึ่งผลิตพลังงานได้ทุกรูปแบบ กลไกการทำงานของทุกสิ่งในระบบสุริยะ นับตั้งแต่การก่อกำเนิดจนแตกดับของดวงดาว หรือการเกิดและการตายของเซลล์ถูกควบคุม โดยกฎสองข้อของพลังงานที่เรียกว่า กฎเทอร์โมไดนามิกส์ (law of thermodynamics)

5.1.1 กฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ รู้จักกันในชื่อ กฎของการอนุรักษ์พลังงาน มีหลักการว่า พลังงานไม่สามารถทำให้เพิ่มขึ้นหรือทำลายหายไป ในระหว่างการถ่ายทอดพลังงาน หรือในระหว่างการเปลี่ยนสถานะจากพลังงานรูปหนึ่ง ไปยังพลังงานรูปอื่น ซึ่งหมายความว่า พลังงานทั้งหมดของระบบปิดจะคงที่ จักรวาลเป็นระบบปิด โลกและระบบสุริยะเป็นระบบหนึ่งของจักรวาล พลังงานที่เกิดขึ้นในจักรวาลเมื่อประมาณ 20 พันล้านปีมาแล้ว ยังคงมีอยู่ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงปัจจุบัน ไม่สามารถทำให้มีพลังงานเพิ่มขึ้นหรือทำให้สูญหายออกไปจากระบบ

สิ่งมีชีวิตไม่สามารถสร้างพลังงานขึ้นมาได้เอง หรือทำลายพลังงานให้หมดไป แต่สิ่งมีชีวิตสามารถจับพลังงานจากสภาพแวดล้อมนำมาใช้ประโยชน์เท่าที่จำเป็น และยังสามารถเปลี่ยนพลังงานจากรูปหนึ่ง ไปยังรูปอื่นได้ ในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง พลาสติดในเซลล์ ลากรายและเซลล์พืช (สารสีพวกคลอโรฟิล และอื่น ๆ ในเซลล์ของพวกไซแอนโอแบคทีเรีย) ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงจากดวงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้าแล้วเป็นพลังงานเคมีเก็บไว้ที่ พันธะเคมี ลัดวักินพืชนำพลังงานมาเปลี่ยนให้เป็นพลังงานกล เช่น การหดตัวของกล้ามเนื้อเพื่อใช้เคลื่อนที่และพลังงานรูปแบบอื่นตามความจำเป็น ในช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปของพลังงาน จะมีพลังงานจำนวนหนึ่งถูกปล่อยออกจากสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในสภาพแวดล้อมในรูปของพลังงานความร้อน และสิ่งมีชีวิตไม่สามารถนำพลังงานดังกล่าวนี้กลับมาใช้ได้อีก แต่พลังงานก็ไม่ได้สูญหายไปจากระบบ ยังคงอยู่ในสภาพแวดล้อมกายภาพของสิ่งมีชีวิตนั่นเอง

5.1.2 กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ มีหลักการว่า พลังงานในระบบอิสระมีแนวโน้มที่จะถูกเปลี่ยนให้เป็นความร้อน กฎข้อที่สองรู้จักกันอีกชื่อว่า law of entropy ความหมายของคำว่า เอนโทรปี คือ พลังงานที่ไม่เป็นระเบียบและไม่สามารถทำให้เกิดงาน กฎข้อที่สองเกี่ยวข้องกับกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ในแง่ที่ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนรูปของพลังงานจะมีการสูญเสียพลังงาน ในรูปของความร้อนออกไปสู่สภาพแวดล้อมของแหล่งที่มีกระบวนการเปลี่ยน

พลังงานนั้น โดยความร้อนที่สูญเสียไปนั้น ไม่สามารถนำกลับมาใช้ได้

พลังงานความร้อนเป็นพลังงานการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลที่ไร้ระเบียบมากที่สุด สามารถนำมาใช้งานได้ในกรณีที่ความร้อนเคลื่อนไหวจากที่อุณหภูมิสูง ไปสู่ที่อุณหภูมิต่ำลง แต่เนื่องจากเซลล์มีอุณหภูมิเท่ากันตลอด พลังงานความร้อนจึงนำมาใช้ในกลไกการทำงานของสิ่งมีชีวิตไม่ได้

ถึงแม้ว่าพลังงานทั้งหมดของระบบจะคงที่ แต่พลังงานที่จะนำมาใช้ให้เกิดงานจะลดลงเรื่อย ๆ เนื่องจากสูญเสียออกสู่สภาพแวดล้อมในรูปของความร้อน ซึ่งนำมาใช้ให้เกิดงานไม่ได้ ความร้อนเหล่านี้จะสะสมมากขึ้น ในอีกนับพันล้านปีในอนาคตเมื่อพลังงานในรูปต่าง ๆ มีสัดส่วนทัดเทียมกับพลังงานที่จะใช้ประโยชน์ได้ลดลง ระบบจักรวาลก็จะเข้าสู่ระยะถดถอยแตกดับ

กฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์มีความสัมพันธ์ต่อเนื่องกับกฎข้อแรกที่พลังงานทั้งระบบ ไม่ได้สูญหายไปตามกาลเวลาที่ล่วงไป แต่พลังงานจะสูญเสียไปเพราะเป็นพลังงานความร้อนที่ทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่กระจัดกระจายอย่างไม่เป็นระเบียบเท่านั้น ไม่สามารถนำมาทำให้เกิดการเปลี่ยนรูปพลังงานในระบบของสิ่งมีชีวิตได้ จึงเห็นได้ว่า เซลล์ของสิ่งมีชีวิตเมื่อมีกระบวนการเปลี่ยนรูปพลังงาน ประสิทธิภาพของงานจะออกมาประมาณร้อยละ 55 ร้อยละ 45 ที่เหลือสูญเสียไปในรูปของความร้อน อย่างไรก็ตามสิ่งมีชีวิตก็ยิ่งดีกว่าเครื่องจักรกลที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้นมาใช้ เพราะเครื่องกลที่ใช้น้ำมันเบนซินมีประสิทธิภาพให้พลังงานได้เพียงร้อยละ 17 เท่านั้น เมื่อเปรียบเทียบสิ่งมีชีวิตกับเครื่องจักรกล สิ่งมีชีวิตดีกว่าที่จัดระเบียบกลไกการทำงาน ให้มีประสิทธิภาพสูง เพื่อฝ่ากฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ การมีชีวิตรอดของสิ่งมีชีวิตแต่ละตัวขึ้นมาจนถึงการดำรงอยู่ในสภาวะสมดุลของระบบนิเวศ จำเป็นต้องมีการไหลของพลังงานอย่างต่อเนื่อง เข้าสู่ตัวและเข้าสู่ระบบ นั่นคือ ต้องมีกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงโดยผู้ผลิตอย่างต่อเนื่อง และมีการกินโดยผู้บริโภค การย่อยสลายโดยผู้ย่อยสลาย เพื่อให้มีการถ่ายทอดพลังงานครบวงจร ซึ่งจะกล่าวถึงในเรื่องระบบนิเวศ

5.2 เทอร์โมไดนามิกส์และปฏิกิริยาเคมี

แรงที่ก่อให้เกิดกระบวนการต่าง ๆ ในสิ่งมีชีวิต และสิ่งไม่มีชีวิตเป็นระบบการทำงาน เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด พลังงานความร้อนบางส่วนถูกดูดซับเก็บไว้ในระบบเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุดดังกล่าว ปริมาณความร้อนทั้งหมดเรียก เอนทัลปี (enthalpy หรือ H)

ของระบบคือ พลังงานศักย์ของระบบนั้น ในปฏิกิริยาเคมี เอนทัลปีของตัวทำปฏิกิริยาหรือผลผลิต จะเท่ากับพันธะพลังงานทั้งหมดของปฏิกิริยานั้น เมื่อมีพันธะหรือหักพันธะ ก็มีการดูดซับเอนทัลปี หรือปล่อยเอนทัลปีโดยการทำงานของ พลังงานอิสระ (free energy) เขียนออกมาในรูปสมการคือ

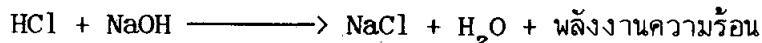
$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

G = พลังงานอิสระ, H = เอนทัลปี, T = อุณหภูมิสัมบูรณ์เป็นองศาเคลวิน

S = เอนโทรปี และ Δ = การเปลี่ยน

จากสมการจะเห็นได้ว่าพลังงานอิสระ ได้มาจากการทำงานของพลังงานทั้งหมดภายใต้สภาวะอุณหภูมิและแรงดันคงที่ กระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ดำเนินไปพร้อมกับการลดลงของพลังงานอิสระจนเข้าสู่สภาวะสมดุลเมื่อพลังงานอิสระลดลงต่ำสุด แต่เอนโทรปีสูงสุด

ปฏิกิริยาเคมี คือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โมเลกุลจากหนึ่งสารไปเป็นมากกว่าหนึ่งสาร นั่นคือเปลี่ยนจากสารที่มีคุณสมบัติอย่างหนึ่ง ไปเป็นสารที่มีคุณสมบัติต่างไปจากเดิม ในช่วงที่มีการทำปฏิกิริยา มีการปล่อยพลังงานหรือมีการดูดซับพลังงานเข้าไป เช่นการทำปฏิกิริยาของกรดและเบสได้เกลือและน้ำ และพลังงานความร้อนดังสมการ



ตัวอย่างของปฏิกิริยานี้เป็นไปตามกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ คือ อะตอมของสารทุกสารในระบบยังคงอยู่ แต่เปลี่ยนรูปไปจากเดิมรวมกันเป็นสารใหม่ และสัมพันธ์กับกฎข้อที่สอง คือมีพลังงานความร้อนออกมาซึ่งนำกลับไปใช้ประโยชน์ไม่ได้

ปฏิกิริยาเคมีที่เกี่ยวข้องกับเทอร์โมไดนามิกส์และสัมพันธ์กับชีววิทยาที่ควรทราบพอสังเขป คือ

(1) ปฏิกิริยาคายความร้อนและปฏิกิริยาดูดความร้อน ในทางเคมีและฟิสิกส์การไหลของความร้อนจากสูงไปต่ำ มีส่วนช่วยให้เกิดพลังงาน แต่ในทางชีววิทยาไม่เป็นเช่นนั้น การเพิ่มอุณหภูมิหรือลดอุณหภูมิ เพื่อให้ได้พลังงานเป็นการทำลายระบบการทำงานของเอนไซม์ที่ทำงานมีประสิทธิภาพในช่วงอุณหภูมิสม่ำเสมอและเหมาะสม ถือว่าปฏิกิริยาคายความร้อนและดูดความร้อนเกี่ยวข้องในการเปลี่ยนถ่ายพลังงานในทางชีววิทยาน้อย

(2) ปฏิกิริยาย้อนกลับ ดังได้กล่าวแล้วว่าการถ่ายโอนพลังงานอิสระมีการปล่อย

พลังงานความร้อนสูง ซึ่งเซลล์รับไว้ไม่ได้ต้องปล่อยออกสู่สภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นการบันทึกพลังงานของสิ่งมีชีวิต ดังนั้นจึงต้องมีการถ่ายโอนพลังงานอิสระชั้นเพียงเล็กน้อย เพื่อให้ได้ความร้อนเล็กน้อยไม่เป็นอันตรายต่อเซลล์ ปฏิกริยาชีวเคมีในสิ่งมีชีวิตจึงมีการย้อนกลับระหว่างตัวทำปฏิกริยากับผลผลิต เพื่อควบคุมไม่ให้เกิดความร้อนมาก และสามารถนำสารที่ใช้แล้วหมุนเวียนกลับไปตั้งต้นใช้ได้อีกตามความจำเป็น ในทางทฤษฎีปฏิกริยาสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมเป็นแบบปฏิกริยาย้อนกลับเกือบทั้งหมด

(3) **สภาวะสมดุล** เมื่อเริ่มต้นปฏิกริยาเคมี จะมีตัวตั้งปฏิกริยาอยู่เพียงอย่างเดียว โมเลกุลของตัวตั้งปฏิกริยาจะชนกันเคลื่อนที่อย่างอิสระ โดยมีพลังงานอย่างพอเพียง เมื่อปฏิกริยาดำเนินไปอีกระยะหนึ่ง โมเลกุลของผลผลิตเพิ่มขึ้น และโมเลกุลของตัวตั้งปฏิกริยาจะลดลง โมเลกุลของผลผลิตจะเคลื่อนที่ชนกันได้อย่างอิสระเช่นเดียวกัน และมีพลังงานมากพอที่จะทำให้ปฏิกริยาย้อนกลับได้ ปฏิกริยาสามารถดำเนินไปทั้งสองทิศทางด้วยตัวเองจนถึงจุดที่อัตราการเกิดปฏิกริยาทั้งสองทิศทางเท่ากัน คือเข้าสู่สภาวะสมดุล

แต่ละปฏิกริยามีค่าเทอร์โมไดนามิกส์ สมดุลคงที่ (equilibrium constant หรือ K) เฉพาะของตัวเอง คำนวณได้จากสูตร

$$\text{เทอร์โมไดนามิกส์สมดุลคงที่} = \frac{\text{ความเข้มข้นของผลผลิต 1} \times \text{ความเข้มข้นของผลผลิต 2}}{\text{ความเข้มข้นตัวทำปฏิกริยา 1} \times \text{ความเข้มข้นตัวทำปฏิกริยา 2}}$$

ถ้าค่าของเทอร์โมไดนามิกส์สมดุลคงที่ต่ำ เช่น 10^{-7} กล่าวได้ว่าแทบจะไม่เกิดปฏิกริยา ในทางตรงกันข้าม ถ้าค่าของ K สูง เช่น 10^7 ปฏิกริยาเกิดขึ้นเกือบสมบูรณ์

เมื่ออยู่ในสภาวะสมดุล ความแตกต่างของพลังงานอิสระระหว่างสารตั้งปฏิกริยาและผลผลิตเป็นศูนย์ ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและแรงดันจะทำให้สภาวะสมดุลเปลี่ยนไป ปฏิกริยาจะดำเนินไปในทิศทางที่ทำให้ความเข้มข้นของตัวทำปฏิกริยาและผลผลิตต่างกันอย่างน้อยที่สุด ถ้ามีการนำผลผลิตออกไปอย่างต่อเนื่อง ปฏิกริยาจะดำเนินไปอย่างสมบูรณ์ กล่าวคือ โมเลกุลของสารตั้งปฏิกริยาถูกใช้ไปจนหมด

(4) **ปฏิกริยาเกิดขึ้นเอง** เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจากการที่ตัวทำปฏิกริยามีพลังงานอิสระมากกว่าผลผลิต จึงที่ไม่จำเป็นต้องใช้พลังงานจากภายนอกไปกระตุ้นให้เกิดปฏิกริยาขึ้น โดยทั่วไปมักไม่เกิดขึ้นทันทีจะอยู่ในลักษณะ เชื่องช้าและใช้ระยะเวลาาน ปฏิกริยาเกิดขึ้นเอง

ปล่อยพลังงานและทำให้เกิดงานได้ จึงจัดอยู่ในประเภท **ปฏิกิริยาให้พลังงาน (exergonic reaction)** มีค่า K สูง และค่า ΔG เป็นลบ ในทางตรงกันข้ามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองไม่ได้ ต้องใช้พลังงานจากภายนอกเข้าไปกระตุ้น จัดอยู่ในประเภท **ปฏิกิริยาดูดซับพลังงาน (endergonic reaction)** มีค่า K ต่ำ และค่า ΔG เป็นบวก ปฏิกิริยาให้ความร้อนส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาให้พลังงาน และมักก่อให้เกิดปฏิกิริยาดูดซับความร้อนตามมา เช่น การละลายของน้ำแข็งเป็นน้ำ และการละลายของของแข็งบางอย่าง (เช่น โซเดียม) ในของเหลว (น้ำ)

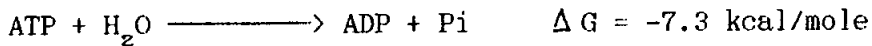
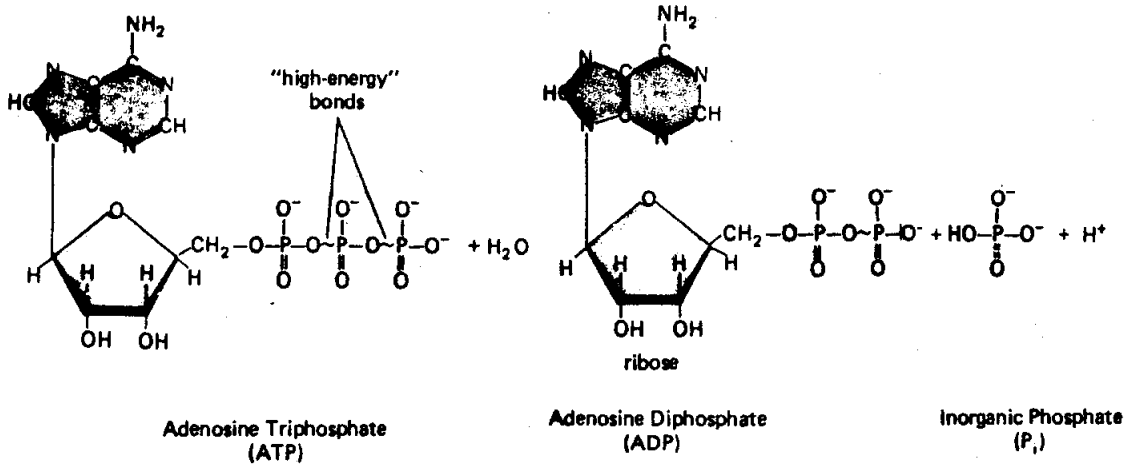
(5) **คัปปลิงรีแอกชัน (coupling reaction)** เป็นลักษณะปฏิกิริยาสองแบบที่เกิดควบคู่ต่อเนื่องกัน โดยเฉพาะในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต เช่น ปฏิกิริยาของกระบวนการเมแทบอลิซึมในกรณีของการสังเคราะห์โปรตีนซึ่งเป็นปฏิกิริยาดูดซับพลังงาน และได้พลังงานมาจาก ATP ถูกแยกตัวออกเป็น $ADP +$ หมู่ฟอสเฟต + พลังงาน และถือเป็นปฏิกิริยาให้พลังงาน

5.3 การควบคุมปฏิกิริยาเคมีภายในเซลล์

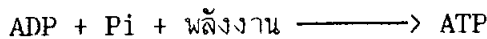
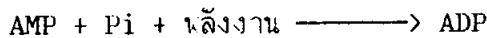
เซลล์ของสิ่งมีชีวิตก็เช่นเดียวกับกับสิ่งอื่นในโลกและจักรวาลที่ต้องการพลังงานเพื่อดำรงสภาพความมีชีวิต มีการสังเคราะห์โปรตีน สารอาหารอื่น และสารประกอบที่จำเป็นต่อการเจริญซ่อมแซมส่วนสึกหรอ จนสืบพันธุ์ถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมไปยังชั่วรุ่นถัดไปได้ กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้จำเป็นต้องใช้พลังงานทั้งสิ้น สิ่งมีชีวิตนับได้ว่าเป็นมีความสามารถพิเศษสูงในการใช้ประโยชน์ของพลังงานตามกฎของเทอร์โมไดนามิกส์ได้สูงสุด โดยเก็บพลังงานไว้ชั่วคราวในโมเลกุลของ ATP

ATP เป็นนิวคลีโอไซด์ไตรฟอสเฟต ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก (รูป 5-1) คือ (1) เบสที่มีธาตุไนโตรเจน คือ แอดีนีน (เบสชนิดหนึ่งที่พบใน DNA ด้วย) (2) น้ำตาลไรโบส และ (3) หมู่ฟอสเฟต 3 หมู่ แต่ละหมู่มียอกซิเจน 4 อะตอมพันธะล้อมรอบฟอสฟอรัส 1 อะตอม หมู่ฟอสเฟตเป็นสารอนินทรีย์จึงนิยมเขียนว่า P_i ฟังสังเกตว่าหมู่มุ่ฟอสเฟตมีพันธะต่อท้าย CH_2 ซึ่งเป็นกึ่งโมเลกุลของน้ำตาลไรโบส เทียบได้กับตู้ปลายของขบวนการไฟ พันธะเคมีที่ต่อหมู่มุ่ฟอสเฟตสองหมู่มุ่สุดท้ายจึงสามารถตัดออกหรือนำมาต่อเข้าโมเลกุลหลักได้ง่าย

รูป 5-1 โครงสร้างโมเลกุลของ ATP



ปฏิกิริยาการสลายหมู่ฟอสเฟตเป็นปฏิกิริยาให้พลังงานออกมา 7.3 กิโลแคลอรีต่อหนึ่งโมเลกุลของ ATP (ใช้สัญลักษณ์เป็นลมหมาขยถึงให้พลังงาน) ถ้าหมู่ฟอสเฟตถูกตัดออกอีกหนึ่งหมู่เรียกว่า หมู่ไพโรฟอสเฟต (pyrophosphate group) โมเลกุลที่เหลือคือ แอดิโนซีนโมโนฟอสเฟต (AMP) พลังงานจากปฏิกิริยาให้พลังงานนี้ถูกนำมาควบคุมใช้ในปฏิกิริยาดูดซับพลังงานโดยการเติมหมู่ฟอสเฟตเข้าไปในโมเลกุลของสารอื่น โดยเขียนสัญลักษณ์หมู่ฟอสเฟตที่มีพันธะพลังงานสูงนี้ว่า ~P เรียกปฏิกิริยาการเติมฟอสเฟตว่า ฟอสฟอริเลชัน (phosphorylation) AMP ถูกนำกลับมาใช้สร้าง ATP ขึ้นใหม่ได้ด้วยการเติมหมู่ฟอสเฟตเข้าไปพร้อมพลังงานดังสมการ



จะเห็นได้ว่าในกระบวนการชีวิตเคมีของเซลล์ มีปฏิกิริยาเคมีหลายรูปแบบเกิดขึ้นต่อเนื่องกันตลอดเวลา

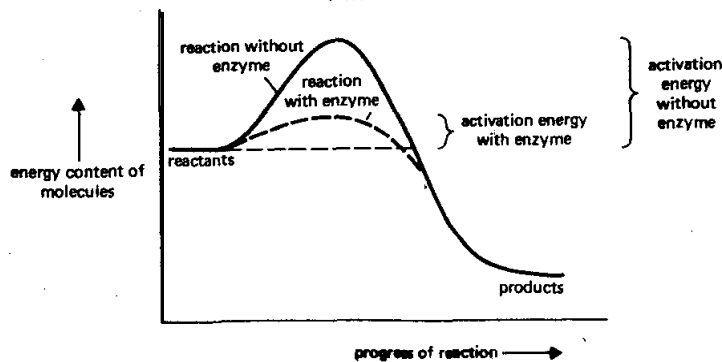
5.3.1 เอนไซม์ : ชีวแคตาลีสต์ หลักการของเทอร์โมไดนามิกส์ ช่วยให้อนุมานได้ว่าจะมีปฏิกิริยาแบบใดเกิดขึ้นได้หรือไม่ แต่ไม่สามารถทราบถึงความเร็วของปฏิกิริยา ในทางเคมี การทำปฏิกิริยาของสารอาจต้องใช้เวลาานพอควร เช่น ถ้าเก็บกลูโคสไว้ในขวดปราศจาก

จุลชีพ โมเลกุลของกลูโคสไม่มีการเปลี่ยนแปลง ต้องนำกลูโคสมาสัมผัสกับความร้อนสูง กรด หรือเบสแก่ โมเลกุลของกลูโคสจึงจะถูกเปลี่ยนเป็นโมเลกุลของสารอื่นและต้องใช้เวลาพอสมควร แต่เซลล์ของสิ่งมีชีวิตไม่สามารถทนต่อความร้อนแรงเช่นนั้นได้ และมีความจำเป็นต้องใช้กลูโคส อย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (catalyst) ให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในเซลล์สิ่งมีชีวิตเรียกว่า เอนไซม์ ซึ่งเป็นสารประเภทโปรตีน สารที่เป็นเอนไซม์ ควรมีคุณสมบัติดังนี้คือ

(1) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ดี กล่าวคือ ใช้พลังงานเพื่อปลุกฤทธิ์น้อยลงแต่ให้มีการเปลี่ยนแปลงอัตราความเร็วของปฏิกิริยาได้ โดยทั่วไป ก่อนมีพันธะเคมีเกิดขึ้นใหม่ต้องมีการหัก หรือสลายพันธะเดิมที่มีอยู่ในโมเลกุลของสาร พลังงานที่ใช้เพื่อการเริ่มต้นให้มีการหักพันธะแล้ว เริ่มต้นมีพันธะใหม่นี้เรียกว่า พลังงานเพื่อการปลุกฤทธิ์ (activation energy) เอนไซม์เป็นตัวช่วยให้การใช้พลังงานเพื่อการปลุกฤทธิ์น้อยลง (รูป 5-2)

รูป 5-2 กราฟแสดงคุณสมบัติเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์โดยการลดพลังงานเพื่อการปลุกฤทธิ์เปรียบเทียบกับปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์ เส้นโค้งเส้นบนแสดงการใช้พลังงานในปฏิกิริยาที่ไม่มีเอนไซม์ เส้นโค้งเส้นล่างแสดงการใช้พลังงานในปฏิกิริยาที่มีเอนไซม์

จาก Audesirk, G. & Teresa Audesirk 1986



กลุ่มโมเลกุลของสารถึงแม้จะเป็นชนิดเดียวกัน แต่มีพลังงานมากน้อยต่างกัน สามารถนำมาสร้างเส้นโค้งเป็นรูปประฆังของเส้นโค้งปกติ โมเลกุลที่มีพลังงานมาก สามารถมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นเป็นผลผลิตได้เร็วกว่าโมเลกุลที่มีพลังงานน้อย เพื่อเป็นการเร่งปฏิกิริยาให้ดำเนินไปอย่างรวดเร็วพร้อมกันทุกโมเลกุล เอนไซม์จึงเข้ามาทำหน้าที่ลดพลังงานปลุกฤทธิ์ด้วยการจับกับซับสเตรท (substrate) หรือสารต้นปฏิกิริยา เป็นโมเลกุลเชิงซ้อนที่ไม่เสถียรก่อนที่จะปล่อย

ให้เป็นผลผลิต เมื่อเป็นอิสระแล้วก็จะมาจับกับซับสเตรทโมเลกุลใหม่ ทำเช่นนั้นต่อไปเรื่อย ๆ จนสู่สภาวะสมดุล

พิจารณาลักษณะของ เอนไซม์ทำหน้าที่เร่งให้เกิดปฏิกิริยาเคมี ทั้งเอนไซม์และตัวเร่งปฏิกิริยาอื่น ไม่มีบทบาทเปลี่ยนแปลงกฎข้อที่สองของเทอร์โมไดนามิกส์ กล่าวคือไม่สามารถมีอิทธิพลต่อทิศทางของการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือความเข้มข้นของโมเลกุลของผลผลิต

(2) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพสูง ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือเอนไซม์แคทาเลส (catalase) ที่มีเหล็กเป็นองค์ประกอบ 1 โมเลกุล สามารถเร่งให้เกิดปฏิกิริยาย่อยสลาย H_2O_2 ได้ถึง 5 ล้านโมเลกุลในเวลา 1 นาทีที่ 0 องศาเซลเซียส ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นสารพิษที่เกิดจากระบวนการชีวเคมีของเซลล์ แคทาเลสจึงทำหน้าที่ป้องกันอันตรายให้เซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

(3) มีความเฉพาะ เอนไซม์เกือบทุกชนิดมีความเฉพาะต่อปฏิกิริยาของสารเพียงชนิดเดียว เช่น เอนไซม์ ยูรีเอส เร่งปฏิกิริยาการสลายยูเรียให้เป็นแอมโมเนีย และคาร์บอนไดออกไซด์ เอนไซม์ ซูเครส เร่งปฏิกิริยาการสลายน้ำตาลซูโครส แต่ไม่เร่งปฏิกิริยาการสลายมัลโทส หรือแลกโทส (ซึ่งเป็นไดแซกคาไรด์เช่นเดียวกัน)

ความเฉพาะอาจเฉพาะเป็นกลุ่มของปฏิกิริยาก็ได้ เช่น เอนไซม์เพอรอกซิเดสสลายสารเปอร์ออกไซด์หลายชนิดรวมทั้งไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ด้วย

มีเอนไซม์น้อยชนิดที่เฉพาะกับซับสเตรทที่มีพันธะเคมีแบบเดียวกัน เช่น เอนไซม์ไลเปส (ผลิตจากตับอ่อน) สามารถหักพันธะเอสเทอร์ของไขมันได้มากชนิด ได้เป็นกลีเซอรอลและกรดไขมัน

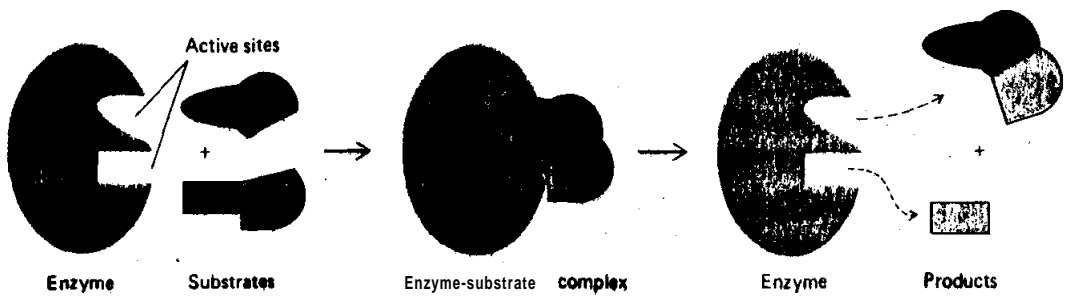
(4) มีการทำงานเป็นคณะ ซึ่งเป็นลักษณะปกติพบได้เป็นประจำในการทำงานของเอนไซม์ในสิ่งมีชีวิต กล่าวคือผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาที่ควบคุมโดยเอนไซม์ชนิดหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นซับสเตรทของปฏิกิริยาที่ควบคุมโดยเอนไซม์อีกชนิดหนึ่งต่อไปเรื่อย ๆ จนถึงขั้นสุดท้าย เช่น จากเม็ดข้าวบาร์เลย์กำลังงอก มีเอนไซม์ 2 ชนิดเปลี่ยนแป้งให้เป็นข้าวมอลต์และน้ำตาลกลูโคส กลูโคสถูกเปลี่ยนต่อเนื้อให้เป็นกรดแลกติก ด้วยเอนไซม์ 11 ชนิด ปฏิกิริยาต่อเนื่อง โดยมีเอนไซม์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น ทำนองเดียวกันในเซลล์ของแบคทีเรีย พืช รวมทั้งมนุษย์ด้วย

การเรียกชื่อเอนไซม์นิยมเติมคำว่า **-ase** ลงท้ายชื่อสารที่เอนไซม์นั้นทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา เช่น sucrose → sucrase, lactose → lactase, maltose → maltase

อาจตั้งชื่อเป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาประเภทเดียวกัน เช่น proteinase เร่งปฏิกิริยาการหักพันธะเพปไทด์ของโปรตีน dehydrogenase เร่งปฏิกิริยาการถ่ายโอนไฮโดรเจนจากสารหนึ่งไปยังอีกสารหนึ่ง

5.3.2 กลไกการทำงานของเอนไซม์ เมื่อเอนไซม์จับกับซับสเตรทเป็นโมเลกุลเชิงซ้อนที่ไม่เสถียร แล้วจึงมีการหักพันธะในโมเลกุลของซับสเตรทเกิดเป็นผลผลิต ปล่อยเอนไซม์เป็นอิสระนำกลับมาใช้ได้อีก นักวิทยาศาสตร์ตั้งทฤษฎีกลไกการทำงานของเอนไซม์ไว้โดยยึดหลักคุณสมบัติของเอนไซม์ที่เป็นโปรตีน ประจุที่อยู่บนส่วนต่าง ๆ ของโมเลกุลมีไม่เท่ากัน เอนไซม์จึงมี ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ (**active site**) อยู่บนโมเลกุลมากกว่าหนึ่งตำแหน่งขึ้นไป (รูป 5-3) โมเลกุลของซับสเตรทเข้าไปจับกับตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายประจุในโมเลกุลของซับสเตรท มีผลให้พันธะบางส่วนถูกหักออกเกิดเป็นผลผลิตขึ้น เรียกกลไกการทำงานนี้ว่า กลไกการทำงานของแม่กุญแจ-ลูกกุญแจ (**lock and key mechanism**)

รูป 5-3 ภาพจำลองกลไกการทำงานแบบแม่กุญแจ-ลูกกุญแจของเอนไซม์

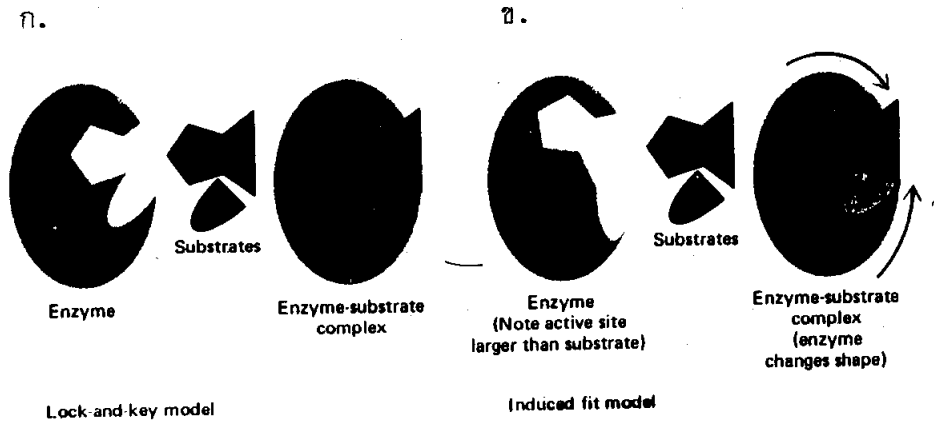


จาก Villee, Claude A., et al. 1989

แต่เอนไซม์ทุกชนิดมิได้มีโครงสร้างที่เหมาะสมแบบแม่กุญแจ-ลูกกุญแจสำหรับซับสเตรท จึงมีทฤษฎีใหม่เกี่ยวกับปฏิกิริยาการทำงานของเอนไซม์เรียก อินดิฟิตโมเดล (**induced-fit model**) (รูป 5-4 ข) โดยอธิบายว่าเมื่อซับสเตรทเข้าไปจับกับเอนไซม์ที่ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ ซับสเตรทเหนี่ยวนำให้เอนไซม์เปลี่ยนรูปโมเลกุลให้กระชับกับซับสเตรทเป็นผลให้พันธะใน

โมเลกุลของซับสเตรตหัก เกิดปฏิกิริยาได้ผลผลิต

รูป 5-4 ภาพจำลองเปรียบเทียบกลไกการทำงานของเอนไซม์ แบบ ก. แม่กุญแจ-ลูกกุญแจ ข. อินดิวิชั่นลิต ให้สังเกตตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ว่าใหญ่กว่าโมเลกุลของซับสเตรต

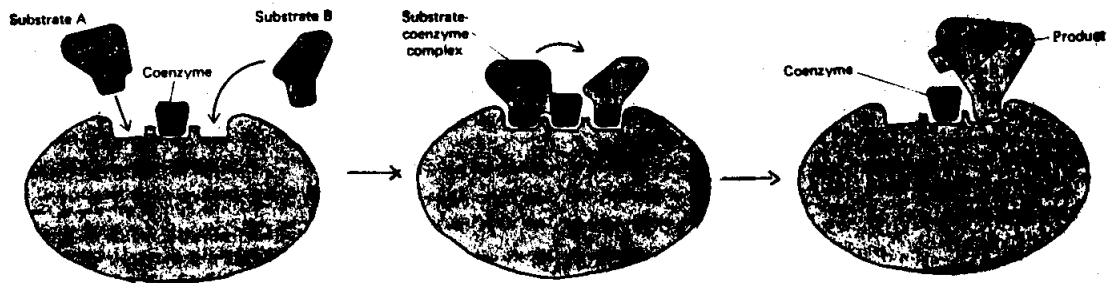


จาก Vilee, Claude A., et al. 1989

เอนไซม์บางชนิดเมื่ออยู่ในสภาพปกติไม่มีฤทธิ์ คือ ไม่สามารถทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยา แต่เมื่อเติมสารบางอย่างเข้าไป จะสามารถทำให้เอนไซม์มีฤทธิ์ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาได้ ส่วนที่เป็นโปรตีนของเอนไซม์ที่ไม่มีฤทธิ์เรียกว่า อะโปเอนไซม์ (apoenzyme) สารเคมีที่ช่วยทำให้เอนไซม์มีฤทธิ์เรียกว่า โคแฟกเตอร์ (cofactor) ซึ่งได้แก่ไอออนของโลหะพวกที่สิ่งมีชีวิตต้องการน้อย (trace element) เช่น Fe Cu Zn และ Mn ในกรณีที่โคแฟกเตอร์เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ใช่โปรตีนเรียกว่า โคเอนไซม์ (coenzyme) วิตามินและอนุพันธ์ของวิตามินทำหน้าที่

รูป 5-5 ภาพจำลองกลไกการทำงานของเอนไซม์ที่ต้องมีโคเอนไซม์ ให้สังเกตโคเอนไซม์ทำหน้าที่ปรับให้เหมาะ (adaptor) ให้ซับสเตรตมากกว่าหนึ่ง โมเลกุลเข้ามาจับที่ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ของ เอนไซม์

จาก Vilee, Claude A., et al. 1989



ที่เป็นโคเอนไซม์ ตัวอย่างของเอนไซม์ประเภทนี้ คือ เพปซิน ซึ่งเป็นโปรตีนเอนไซม์ผลิตจากต่อมน้ำย่อยในกระเพาะอาหาร ถ้าไม่มีกรดไฮโดรคลอริกทำหน้าที่เป็นโคแฟกเตอร์ เพปซินจะไม่ทำงาน ลักษณะกลไกการทำงานของเอนไซม์ที่ต้องมีโคเอนไซม์แสดงไว้ในรูป 5-5

5.3.3 การควบคุมการทำงานของเอนไซม์ การทำงานของสิ่งมีชีวิตมีระบบการควบคุมอยู่ตลอดเวลาตามลำดับขั้นตอน การทำงานของเอนไซม์ก็เช่นเดียวกัน ผลผลิตที่เกิดจากการเร่งปฏิกิริยาจะเป็นตัวควบคุมการทำงานของเอนไซม์ สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิดมีจำนวนชนิดของเอนไซม์คล้ายกันบ้างต่างกันบ้างตามสายวิวัฒนาการ โดยมียื่นเฉพาะทำหน้าที่ควบคุมการผลิตชนิดของเอนไซม์ และในทางกลับกันยีนจะเริ่มทำงานด้วยการกระตุ้นของฮอร์โมนหรือผลผลิตอื่นจากเซลล์ เมื่อยีนเริ่มทำงาน ก็มีการสังเคราะห์เอนไซม์ตามมา ปริมาณของเอนไซม์ที่ผลิตขึ้นมาจะเป็นตัวควบคุมอัตราความเร็วของการเกิดปฏิกิริยา กล่าวคือ เมื่อปริมาณของเอนไซม์เพิ่มขึ้นจะทำให้ปฏิกิริยาเร็วขึ้นจนถึงระดับเหมาะสม (optimum)

ถ้าควบคุม pH และอุณหภูมิให้คงที่ แล้วเพิ่มปริมาณซับสเตรทเข้าไป อัตราความเร็วของปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของเอนไซม์ และถ้าควบคุม pH อุณหภูมิและปริมาณของเอนไซม์ให้คงที่ อัตราความเร็วเริ่มต้นของปฏิกิริยาจะแปรผันตรงกับความเข้มข้นของซับสเตรทจนถึงระดับความเหมาะสม

ผลผลิตที่เกิดจากปฏิกิริยาที่แคตาไลส์ด้วยเอนไซม์ชนิดหนึ่งอาจควบคุมปฏิกิริยาการแคตาไลส์ของเอนไซม์อีกชนิดหนึ่งแล้วต่อเนื่องเป็นลำดับดังนี้

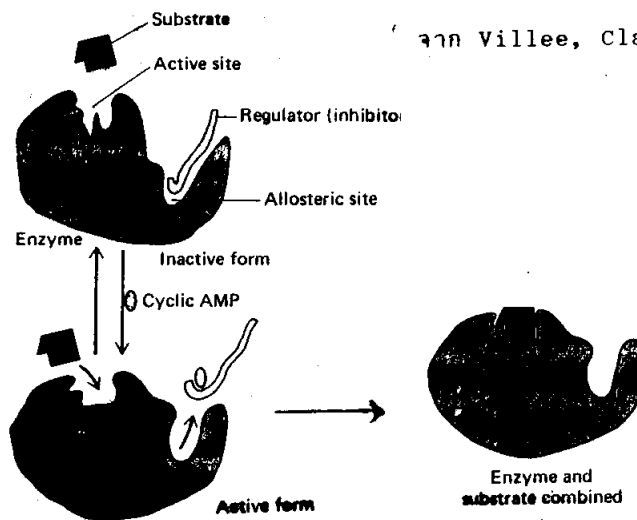
เอนไซม์ 1 เอนไซม์ 2 เอนไซม์ 3 เอนไซม์ 4
ซับสเตรท A —> ผลผลิต B —> ผลผลิต C —> ผลผลิต D —>
ซับสเตรท E ผลผลิตขั้นสุดท้าย E อาจไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ 1 ถ้าความเข้มข้นของผลผลิต E ต่ำ จะทำให้ลำดับการเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องเกิดเร็วขึ้น แต่ถ้าผลผลิตสุดท้าย E มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จะมีผลให้อัตราการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ (เริ่มต้น) ช้าลงจนถึงขั้นหยุดชงัก เรียกลักษณะการควบคุมการทำงานของเอนไซม์แบบนี้ว่า การควบคุมย้อนกลับ (feedback control)

การควบคุมการทำงานของเอนไซม์อีกแบบหนึ่งขึ้นอยู่กับการปลุกฤทธิ์โมเลกุลของเอนไซม์ที่อยู่ในรูปของสภาวะไม่มีฤทธิ์ (inactive form) ภายในไซโทพลาซึม ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์

ของเอนไซม์จะไม่เหมาะสมพอดีกับโมเลกุลของซับสเตรท ปัจจัยที่จะช่วยปลุกฤทธิ์เอนไซม์ให้มีการเปลี่ยนตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ภายในโมเลกุลให้เหมาะสมพอดีกับโมเลกุลของซับสเตรทได้คือความเป็นกรด-เป็นเบส และความเข้มข้นของเกลือบางชนิด เรียกเอนไซม์ประเภทนี้ว่า **อัลโลสเทริก เอนไซม์ (allosteric enzyme)** มีกลไกควบคุมการทำงานดังนี้คือ

อัลโลสเทริก เอนไซม์ มีตำแหน่งพิเศษเพิ่มขึ้นจากตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ภายในโมเลกุลเรียกว่า **ตำแหน่งอัลโลสเทริก (allosteric site)** ปกติอัลโลสเทริกเอนไซม์ประกอบด้วยเส้นพอลิเพปไทด์มากกว่าหนึ่งเส้น แต่ละเส้นมีตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ของตนเอง ตำแหน่งอัลโลสเทริกเทริกมักเป็นบริเวณที่แต่ละเส้นของพอลิเพปไทด์มาเชื่อมต่อกับซับสเตรทสามารถมีพันธะโคเวเลนต์กับตำแหน่งที่ไม่ใช่ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ และกระตุ้นหรืออาจยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา สารที่สามารถมีพันธะที่ตำแหน่งอัลโลสเทริกของเอนไซม์ได้เรียก **เรกิวเลเตอร์ หรือ มอดิวเลเตอร์ (regulator หรือ modulator)** (รูป 5-6)

รูป 5-6 แผนภาพการควบคุมการทำงานของอัลโลสเทริกเอนไซม์ ให้สังเกตการเปลี่ยนรูปร่างของตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ในโมเลกุลของเอนไซม์ในสภาวะไม่มีฤทธิ์กับในสภาวะมีฤทธิ์



จาก Villet, Claude A., et al. 1989

ตัวอย่างของอัลโลสเทริกเอนไซม์ คือ โปรตีนไคเนส (protein kinase) ซึ่งเป็นพอลิเพปไทด์เส้นเดียว ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์และตำแหน่งอัลโลสเทริกอยู่บนเส้นเดียวกันมีโปรตีนชนิดหนึ่งทำหน้าที่เป็นเรกิวเลเตอร์ยับยั้งให้เอนไซม์อยู่ในรูปของสภาวะไม่มีฤทธิ์ อันเป็นสภาวะปกติเมื่อเอนไซม์อยู่ในเซลล์ของร่างกาย เมื่อมีการคัดหลั่งเพื่อการทำงาน cyclic AMP

เข้าไปดึงเรกิวเลเตอร์ออกไป เป็นการปลุกฤทธิ์เอนไซม์ให้ทำงานได้

เอนไซม์ + เรกิวเลเตอร์ \longrightarrow เอนไซม์ - เรกิวเลเตอร์ คอมเพลกซ์

เอนไซม์ - เรกิวเลเตอร์คอมเพลกซ์ + cAMP \longrightarrow เอนไซม์ซึ่งมีฤทธิ์ +

เรกิวเลเตอร์ - cAMP

กล่าวโดยสรุปว่า การควบคุมการทำงานของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับชนิดของเอนไซม์และ มีกลไกการควบคุมหลัก 2 แบบคือ (1) ควบคุมย้อนกลับ และ (2) ควบคุมโดยเรกิวเลเตอร์

5.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ การทำงานของเอนไซม์ได้ผลดีใน สภาวะที่จำกัด เรียกสภาวะดังกล่าวนี้ว่า สภาวะที่เหมาะสม (optimum) กล่าวคือต้องมีอุณหภูมิ pH และความเข้มข้นของเกลือที่เหมาะสม จึงจะทำให้การทำงานของเอนไซม์เป็นปกติและอยู่ ในสภาวะที่เหมาะสมได้

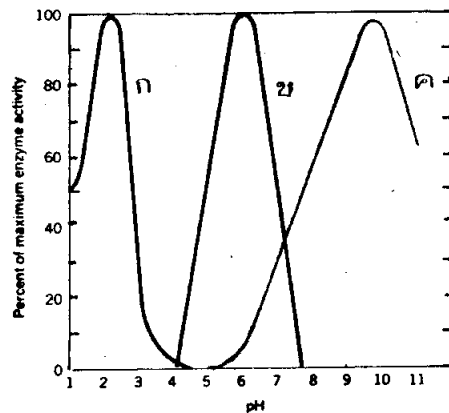
(1) อุณหภูมิ เมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำเกินไป มีผลให้อัตราการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ ลดลง เพราะเอนไซม์เป็นโปรตีน การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้โปรตีนถูกดีเนเจอร์ คลายพันธะโมเลกุลเปลี่ยนแปลงไป จนมีผลต่อการเปลี่ยนรูปร่างของตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ด้วยและ ไม่สามารถทำให้กลับคืนมาได้ อีก อุณหภูมิที่ทำลายเอนไซม์โดยไม่สามารถกลับคืนมาใช้ได้อีก เริ่ม ตั้งแต่ 55 องศาเซลเซียสขึ้นไป แต่ถ้าอุณหภูมิตั้ง 40 องศาเซลเซียสก็สามารถยับยั้งการทำงาน ของเอนไซม์ได้ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 25-35 องศาเซลเซียสหรือใกล้เคียง กับอุณหภูมิที่เป็นสภาพแวดล้อมปกติของเซลล์สิ่งมีชีวิตแต่ละชนิด สัตว์เลือดเย็นมักมีการทำ งานของเอนไซม์ในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่าสัตว์เลือดอุ่นและบางครั้งต้องอุ่นตัวเองเพื่อให้ร่างกายมี อุณหภูมิที่พอเหมาะ เช่นการผิงแดดของสัตว์เลื้อยคลานบางชนิด

(2) pH การทำงานของเอนไซม์แต่ละชนิดต้องการประจุลบหรือประจุบวกที่มีความ เฉพาะ การเปลี่ยนแปลงค่าของ pH ไม่ว่าจะเป็นการเพิ่มไฮโดรเจนไอออนเข้าไปในมีเดียที่มี เอนไซม์นั้นอยู่ หรือลดไฮโดรเจนไอออนลง มีผลกระทบโดยตรงต่อประจุที่มีอยู่บนเอนไซม์ ทำให้ เกิดสภาวะไม่มีฤทธิ์ เช่นเอนไซม์ของระบบย่อยอาหารเพปซินที่ผลิตจากกระเพาะอาหารทำหน้าที่ เร่งปฏิกิริยาการย่อยโปรตีนมีค่า pH เหมาะสมที่ 2.0 แต่เอนไซม์ที่ผลิตจากตับอ่อนคือ ทริปซิน ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาการย่อยโปรตีนมีค่า pH เหมาะสมที่ 9.5 (ตาราง 5-1) ถ้าช่วงค่าของ pH เปลี่ยนไปจากค่าเหมาะสมปฏิกิริยาจะลดลง (รูป 5-7 ก)

ตาราง 5-1 ค่า pH เหมาะสมของเอนไซม์บางชนิดที่ทำงานในสภาวะเป็นกรด เป็นกลาง และเป็นเบส

เอนไซม์	ค่า pH เหมาะสม
เพปซิน	2.0
กลูทามิกแอซิด ดีคาร์บอกซิเลส	5.9
ยูรีเอส	6.7
ชาไลวารี่ อะมิเลส	6.8
แพนครีเอทิกไลเปส	7.0
ทริปซิน	9.5
อาร์จีเนส	10.0

รูป 5-7 กราฟเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ (ก) เพปซิน (ข) กลูทามิกแอซิด ดีคาร์บอกซิเลส และ (ค) อาร์จีเนส ให้สังเกตช่วงความแตกต่างของค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับเอนไซม์ทั้ง 3 ชนิด



(3) การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ เอนไซม์เกือบทุกชนิดถูกทำให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลงจนถึงขั้นหยุดทำงานได้ด้วยสารเคมี การยับยั้งอาจย้อนกลับ หรือไม่ย้อนกลับ กล่าวคือหยุดการทำงานโดยสิ้นเชิง ซึ่งมีกลไกการทำงานดังนี้

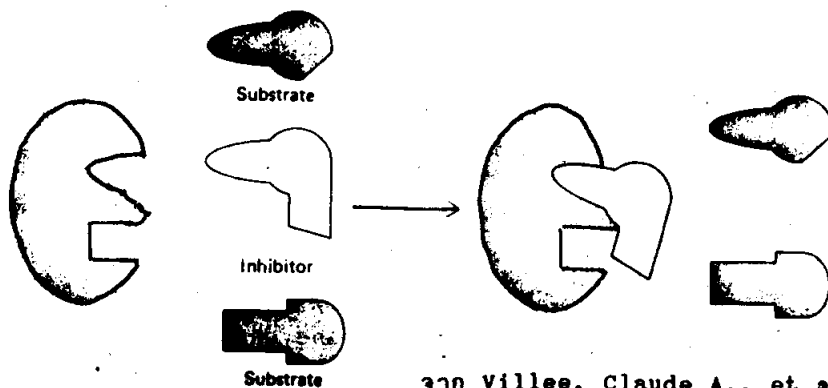
ก. การยับยั้งแบบแข่งขัน (competitive inhibition) สารที่ทำหน้าที่ยับยั้งมีโครงสร้างโมเลกุลคล้ายคลึงกับซับสเตรตจึงเข้าไปแย่งจับหรือขวางทางเข้าที่ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ของเอนไซม์ ซับสเตรตจึงเข้าไปจับกับเอนไซม์ไม่ได้ (รูป 5-8 ก) การยับยั้งแบบนี้สามารถย้อนกลับให้มีปฏิกิริยาได้โดยการตั้งสารที่เป็นตัวยับยั้งออก หรือเพิ่มความเข้มข้นของซับสเตรตให้มากขึ้น

ข. การยับยั้งแบบไม่แข่งขัน (noncompetitive inhibition) สารยับยั้งเข้าไปจับกับโมเลกุลของเอนไซม์ที่ใดที่หนึ่งซึ่งไม่ใช่ตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ อาจเข้าไปในตำแหน่งอัลโลสเทริก เป็นผลให้โมเลกุลของเอนไซม์เปลี่ยนรูปร่างตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ไปจากเดิม ไม่เหมาะสมกับซับสเตรต (รูป 5-8 ข) สารที่เป็นผลผลิตของเอนไซม์โดยเฉพาะจากปฏิกิริยาของกระบวนการเมแทบอลิซึมมักมีกลไกการทำงานในลักษณะนี้ ปฏิกิริยาย้อนกลับได้ถ้ามีการนำผลผลิตออกไป หรือมีเอนไซม์ชุดอื่นมาเร่งปฏิกิริยาเปลี่ยนผลผลิตให้เป็นสารอื่นต่อไป

ค. การยับยั้งแบบถาวร (irreversible inhibition) สารที่ทำหน้าที่ยับยั้งเอนไซม์อย่างถาวร คือสารที่เข้ามาพันธะกับหมู่ปฏิกิริยาจึงเป็นการทำลายเอนไซม์ให้หมดหน้าที่ ได้แก่สารพิษชนิดต่าง ๆ เช่น แก๊สทำลายประสาท ทำลายเอนไซม์อะเซทิลโคลิเนสเทอเรส ไชยาไนต์ ทำลายเอนไซม์ไซโทโครมออกซิเดส ยาฆ่าแมลง เพนิซิลลิน และยาปฏิชีวนะอื่นทำลายเอนไซม์ทรานส์เพปทิเดส เป็นต้น

รูป 5-8 ภาพจำลองกลไกการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์

ก. การยับยั้งแบบแข่งขัน ให้สังเกตสารยับยั้งเข้าไปจับและขวางตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์

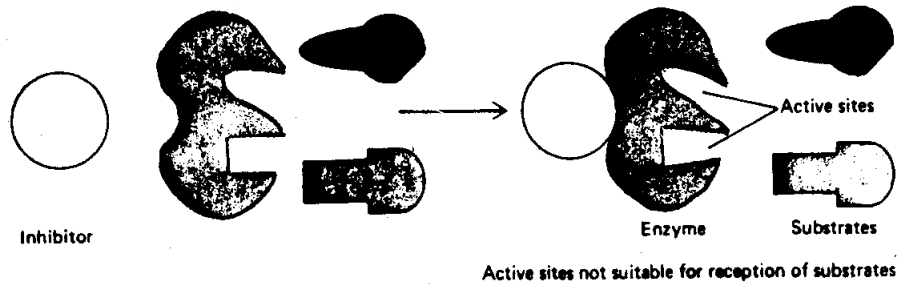


จาก Villed, Claude A., et al. 1989

ข. การยับยั้งแบบไม่แข่งขัน ให้สังเกตตำแหน่งซึ่งมีฤทธิ์ของ เอนไซม์ที่ไม่เหมาะสมกับ

ซับสเตรท

จาก Villed, Claude A., et al. 1989



5.4 ผลกระทบของเอนไซม์ที่มีต่อวิวัฒนาการ

เนื่องจากเอนไซม์มีบทบาทสำคัญต่อการควบคุมปฏิกิริยาชีวเคมีต่าง ๆ ของสิ่งมีชีวิตให้ดำเนินไปตามปกติ โดยเฉพาะในสัตว์ชั้นสูงจะมีเอนไซม์มากชนิดทำงานผสมควบคุมกันเองอย่างต่อเนื่อง เอนไซม์เป็นโปรตีนและโปรตีนสังเคราะห์ขึ้นด้วยความควบคุมของยีน (ดูบทที่ 10) ลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์ของเอนไซม์ที่เหมือนกัน สามารถทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาแบบเดียวกันได้ในสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันนับตั้งแต่แบคทีเรีย ฟังไจ ขึ้นมาจนถึงพืชและสัตว์

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในยีน มีผลให้ลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโนในเส้นพอลิเพปไทด์ของเอนไซม์เปลี่ยนไปด้วย ทำให้เอนไซม์เปลี่ยนหน้าที่ไปจากเดิมหรือหมดหน้าที่แล้วแต่กรณี เป็นผลให้มีการทำงานในหน้าที่ใหม่เพิ่มขึ้น ในสิ่งมีชีวิต หรือสิ่งมีชีวิตชนิดนั้นต้องตายไป ซึ่งเป็นที่มาของการปรับกลไกการทำงานภายในตัวสิ่งมีชีวิตให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม นำไปสู่วิวัฒนาการ

ปัจจุบันความรู้ด้านเอนไซม์พัฒนาขึ้นมากสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านอนุกรมวิธานได้ สิ่งมีชีวิตที่มีเอนไซม์เหมือนกันมากที่สุดจะมีสายวิวัฒนาการใกล้กันที่สุด สิ่งมีชีวิตชนิดเดียวกันจะต้องมีเอนไซม์เหมือนกันจึงใช้เอนไซม์พิสูจน์เอกลักษณ์สิ่งมีชีวิตที่สำรวจพบใหม่ได้