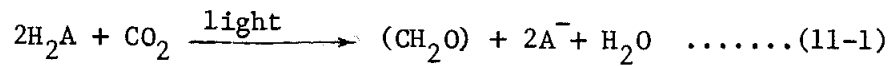


## บทที่ 11 แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสง (Photosynthetic Bacteria)

แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสง เป็นแบคทีเรียซึ่งได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากแสง ด้วยการเปลี่ยนพลังงานจากแสงให้เป็นพลังงานเคมีซึ่งเก็บไว้ในรูป ATP โดยกระบวนการโฟโตฟอสโฟริเลชัน ต่อมนำ ATP ที่เกิดขึ้นไปใช้ในการสังเคราะห์สารต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน เมื่อเจริญแบบโฟโตออโตโทรฟและใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนเมื่อเจริญแบบโฟโตเฮเทโรโทรฟ ในการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรคลาวินและวัฏจักร TCA ซึ่งมีปฏิกิริยาย้อนกลับ ส่วนในการใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้สารประกอบอินทรีย์บางชนิดเปลี่ยนแปลงโดยมีวิถีในการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันตามชนิดของสารประกอบอินทรีย์

กระบวนการสังเคราะห์แสงเป็นกระบวนการเมตาบอลิซึมซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะในสภาวะแอนแอโรบและพบในแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทุกชนิด กระบวนการนี้แบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนใหญ่ ๆ คือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นปฏิกิริยาที่ต้องใช้แสง (light reaction) และขั้นตอนที่ 2 เป็นปฏิกิริยาที่ไม่ต้องใช้แสง (dark reaction) ในปฏิกิริยาที่ต้องใช้แสง แบคทีเรียใช้สารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ น้ำ เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน ทำให้เกิด ATP และโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ ส่วนในปฏิกิริยาที่ไม่ต้องใช้แสงแบคทีเรียนำ ATP และโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาที่ต้องใช้แสงมาใช้ในการสังเคราะห์สารต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ ด้วยการนำคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนโดยทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรคลาวินและวัฏจักร TCA ซึ่งมีปฏิกิริยาย้อนกลับ ผลจากกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยแบคทีเรียไม่ได้ออกซิเจน ในขณะที่พืชใช้น้ำเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการ

การสังเคราะห์แสงได้ออกซิเจนจากน้ำ Van Niel เสนอสมการสำหรับกระบวนการสังเคราะห์แสง ดังสมการที่ 11-1 สำหรับพืช  $H_2A$  และ  $A$  เป็นโมเลกุลของน้ำและออกซิเจนอะตอมตามลำดับ



สำหรับแบคทีเรีย  $H_2A$  เป็นสารประกอบอินทรีย์หรือสารประกอบอนินทรีย์ชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ น้ำ เช่น สารประกอบอนินทรีย์กำมะถันและไฮโดรเจนโมเลกุล ในกรณีที่แบคทีเรียเป็นสารประกอบอนินทรีย์กำมะถัน เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์  $A$  เป็นอะตอมของกำมะถัน

กลุ่มของแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสง

แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

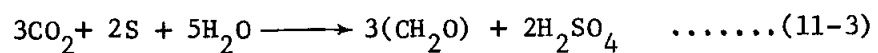
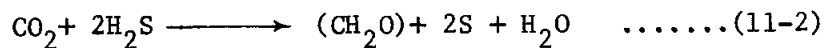
1. แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถัน ปัจจุบันได้จัดแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันซึ่งอยู่ในแฟ้มมีลีสโคลอโรแบคทีเรียซื่อให้อยู่ในแฟ้มมีลีสโคลอโรเบียซีอี (Chlorobiaceae) แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีหลายชนิด เช่น *Chlorobium* sp., *Chloropseudomonas* sp., *Pelodictyon* sp., *Clastrochloris* sp., *Chlorobacterium* sp., *Chlorochromatium* sp., *Cylindrogloea* sp. และ *Chloroflexus* sp. ในระหว่างแบคทีเรียจีนัสต่าง ๆ แบคทีเรียที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ *Chlorobium* sp., *Chloropseudomonas* sp. และ *Chloroflexus* sp.

แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันโดยส่วนใหญ่มีคุณสมบัติ เป็นพวกอ้อพลิ เกดแอนแอโรบและอ้อพลิ เกดโฟโตโทรฟ คือ ไม่สามารถเจริญในที่ที่มีออกซิเจนและได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากแสงเท่านั้น แต่มีแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันบางชนิดสามารถเจริญในที่ที่มีออกซิเจนได้ เช่น *Chloroflexus aurantiacus* ซึ่งเป็นพวกแฟคคิลเดติบแอนแอโรบ สามารถเจริญในที่ที่มีออกซิเจนซึ่งมีแสงหรือไม่มีแสงโดยได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากกระบวนการหายใจ เซลล์ของแบคทีเรียที่เจริญในที่ที่มีออกซิเจนไม่มีโครมาโทพอร์ เนื่องจากออกซิเจนที่มีอยู่ยับยั้งการสังเคราะห์แบคทีเรีย-

โกลโคโรฟิลของเซลล์ *Chlorobium limicola* และ *Chloropseudomonas ethylicum* ซึ่งไม่สามารถเจริญในที่มืดออกซิเจนจะสามารถเจริญในที่มืดออกซิเจน เมื่อสภาวะแวดล้อมมีอะซิเตด และซัลฟิเดตามลำดับ

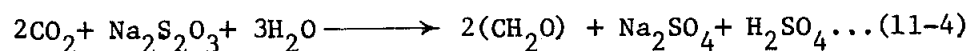
โดยทั่วไปแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันใช้สารประกอบอนินทรีย์เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง แต่จากการศึกษาโดยใช้ *Chlorobium thiosulfatophilum* และ *Chlorobium limicola* พบว่า ในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดสามารถใช้สารประกอบอนินทรีย์เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ สำหรับสารประกอบอนินทรีย์ที่แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดใช้เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนมีดังนี้

1.1 ซัลไฟด์ *Chlorobium thiosulfatophilum* ใช้ซัลไฟด์เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน โดยทำให้ซัลไฟด์กลายเป็นซัลเฟตดังสมการที่ 11-2 และ 11-3 ในการเปลี่ยนซัลไฟด์ไปเป็นซัลเฟตนี้พบว่า เมื่อปริมาณซัลไฟด์ที่มีอยู่ในสภาวะแวดล้อมถูกเปลี่ยนไปเป็น

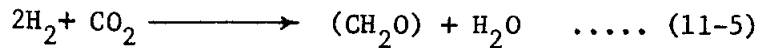


กำมะถันหมดและกำมะถันเริ่มถูกเปลี่ยนไปเป็นซัลเฟต อัตราการนำคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสงเพื่อสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ลดลง สำหรับ *Chlorobium limicola* ใช้ซัลไฟด์เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน โดยทำให้ซัลไฟด์กลายเป็นกำมะถันแล้วสะสมกำมะถันที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์

1.2 โซโอซัลเฟต *Chlorobium thiosulfatophilum* ใช้โซโอซัลเฟตเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน โดยทำให้โซโอซัลเฟตกลายเป็นซัลเฟตดังสมการที่ 11-4



1.3 ไฮโครเจน *Chlorobium thiosulfatophilum* และ *Chlorobium limicola* ใช้ไฮโครเจนโมเลกุลเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนแล้วทำให้ไฮโครเจนโมเลกุลเปลี่ยนแปลงดังสมการที่ 11-5



2. แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถัน ปัจจุบันได้จัดแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันซึ่งอยู่ในแฟมิลีไทโอโรดาซีอีให้อยู่ในแฟมิลีโครมาเทียซีอี (Chromatiaceae) แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีหลายชนิด เช่น *Chromatium* sp., *Thiospirillum* sp., *Thiocystis* sp., *Thiocapsa* sp., *Thiosarcina* sp., *Lamprocystis* sp. และ *Ectothiorhodospira* sp. ในระหว่างแบคทีเรียจีสต่าง ๆ แบคทีเรียที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาได้แก่ *Chromatium* sp. และ *Thiospirillum* sp.

แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันมีคุณสมบัติเหมือนกับแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันคือ โดยส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นพวกอ้อฟิลิแกตแอนแอโรบและอ้อฟิลิแกตโฟโตโทรฟซึ่งใช้สารประกอบอนินทรีย์กำมะถันและไฮโครเจนโมเลกุลเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง ในกรณีที่ เป็นสารประกอบอนินทรีย์กำมะถันจะได้ซัลเฟตหรือกำมะถันแล้วทำให้มีเม็ดกำมะถันกระจุกกระจายทั่วไปภายในเซลล์ เม็ดกำมะถันที่กระจุกกระจายภายในเซลล์นี้มีเยื่อหุ้มและมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1.0 ไมโครมิเตอร์ สำหรับ *Ectothiorhodospira* sp. เป็นแบคทีเรียจีสเดียวในกลุ่มนี้ที่มีเม็ดกำมะถันสะสมอยู่ภายนอกเซลล์ นอกจากนี้ในสภาวะแวดล้อมบางสภาวะแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันสามารถใช้สารประกอบอินทรีย์บางชนิดเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้

ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่มีแสงและมีออกซิเจนเล็กน้อยพบว่า แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันบางชนิด เช่น *Thiocapsa roseopersicina* สามารถเจริญโดยใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากปฏิกิริยาเคมี แต่เมื่อสภาวะแวดล้อม

ล้อมนั้นมีปริมาณออกซิเจนมาก แบคทีเรียเจริญได้ชั่วคราวระยะ เวลาหนึ่งแล้วต่อมาจะหยุดการเจริญ

แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ามะถันบางสปีชีส์ซึ่งอยู่ในจีนัส *Chromatium* sp., *Thiocapsa* sp., *Thiocystis* sp. และ *Thiosarcina* sp. สามารถใช้สารประกอบอินทรีย์หลายชนิดเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์โดยใช้พลังงานจากแสงได้ ในขณะที่มีหรือไม่มีกระบวนการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นภายในเซลล์

๓. แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ามะถัน ปัจจุบันได้จัดแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ามะถันซึ่งอยู่ในแฟมิลีเอโทโอโรคาซิอีให้อยู่ในแฟมิลีโรโดสปิริลลาซิอี (*Rhodospirillaceae*) แบคทีเรียในกลุ่มนี้มีหลายชนิด เช่น *Rhodopseudomonas* sp., *Rhodospirillum* sp., *Rhodomicrobium* sp. และ *Vannielia* sp. ในระหว่างแบคทีเรียจีนัสต่าง ๆ แบคทีเรียที่นิยมนำมาใช้ในการศึกษาได้แก่ *Rhodopseudomonas* sp., *Rhodospirillum* sp. และ *Rhodomicrobium* sp.

แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ามะถันโดยส่วนใหญ่มีคุณสมบัติ เป็นพวกแพคคิล เดคิบแอนแอโรบ ซึ่งใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง และใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์โดยอาศัยพลังงานจากแสงและจากปฏิกิริยาเคมีได้ดี สำหรับสารประกอบอินทรีย์ แบคทีเรียในกลุ่มนี้โดยส่วนใหญ่ใช้ไฮโดรเจนโมเลกุล แต่ไม่สามารถใช้สารประกอบอินทรีย์ก้ามะถันเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ ยกเว้นแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ามะถันบางชนิดใช้สารประกอบอินทรีย์ก้ามะถัน เช่น ซัลไฟด์และไฮโอซัลเฟตเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง แล้วทำให้ซัลไฟด์และไฮโอซัลเฟต เปลี่ยนไปเป็นซัลเฟต โดยไม่มีก้ามะถันเป็นอินเทอร์มีเดียต เช่น *Rhodomicrobium vannielii* เจริญบนอาหารเพาะเชื้อซึ่งมีเฉพาะไฮโดรเจนซัลไฟด์แล้วทำให้ซัลไฟด์กลายเป็นซัลเฟต

*Rhodomicrobium vannielii* มีคุณสมบัติ เป็นโฟโตออโตโทรฟ เหมือนแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถัน แต่ *Rhodomicrobium vannielii* ไม่ต้องการวิตามินเป็นปัจจัยสำหรับการเจริญ ในขณะที่แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันต้องการวิตามินบี<sub>12</sub> (vitamin B<sub>12</sub>) เป็นปัจจัยสำหรับการเจริญ ส่วนแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันชนิดอื่น ๆ ต้องการไบโอติน กรดพาราอะมิโนเบนโซอิก ไออะซีน และกรดนิโคตินิก (nicotinic acid) เป็นปัจจัยสำหรับการเจริญ

เมื่อแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันเจริญในสภาวะแอโรบที่ไม่มีแสง แบคทีเรียมีรงควัตถุซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงน้อย ทั้งนี้เนื่องจากออกซิเจนยับยั้งการสังเคราะห์รงควัตถุ ในสภาวะดังกล่าวแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากกระบวนการหายใจ จากการศึกษาโดยใช้ *Rhodopseudomonas capsulata*, *Rhodopseudomonas acidophila* และ *Rhodopseudomonas spheroides* พบว่า เมื่อเจริญในสภาวะแอโรบที่ไม่มีแสง ภายในเซลล์แบคทีเรียมีโครมาโทฟอร์น้อยแต่มีโพลีเบต้าไฮดรอกซีนิวทายเรตแตรบูลมาก นอกจากนี้จากการศึกษาโดยใช้แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันชนิดต่าง ๆ พบว่า แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันโดยส่วนใหญ่เจริญได้ดีในสภาวะแอโรบที่ไม่มีแสง และมีบางชนิดเจริญได้เฉพาะในที่ที่มีออกซิเจนเพียงเล็กน้อย เช่น *Rhodospirillum fulvum*, *Rhodospirillum molischiannum* และ *Rhodospirillum rubrum*

องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง

องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงซึ่งพบภายในเซลล์แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสง คือ แบคทีอริโอคลอโรฟิล คาโรทีนอยด์ ไฮโดโครม ควิโนนและเฟร์รีดอกซิน (ferredoxin) ซึ่งเป็นโปรตีนที่ประกอบด้วยธาตุเหล็กซึ่งไม่อยู่ในรูปของฮีม องค์ประกอบต่าง ๆ ดังกล่าวแบ่งออกได้เป็น 2 พวกตามหน้าที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง คือ พวกแรกทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงซึ่งได้แก่ แบคทีอริโอคลอโรฟิลและคาโรทีนอยด์ ส่วนพวก

ที่ 2 ทำหน้าที่เกี่ยวข้องในการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงาน เคมีซึ่งประกอบด้วยแบคทีเรียโอค-  
คลอโรฟิลล์ ไฮโดโครม คิวโนนและเฟร์รีดอกซิน ตำแหน่งซึ่งประกอบด้วยองค์ประกอบพวกที่ 2  
นี้เรียกว่า จุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงาน เคมี

แบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันมีจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมีอยู่  
ตรงส่วนเยื่อเซลล์ ส่วนแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำมะถันมีจุด  
ศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมีอยู่ตรงส่วนเยื่อโครมาทโดพอร์

แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงแต่ละกลุ่มมีชนิดของแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ซึ่งทำหน้าที่รับ  
พลังงานจากแสงและทำหน้าที่เกี่ยวข้องในการเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงาน เคมีแตกต่างกัน  
แบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันมีแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ซีหรือแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ดีซึ่งเป็นส่วนประกอบ  
ของโครมาทโดพอร์ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสง มีแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์เอซึ่งอยู่ตรงส่วนเยื่อเซลล์  
หรืออยู่ระหว่างโครมาทโดพอร์กับเยื่อเซลล์ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงซึ่งส่งมาจากแบคทีเรียโอคโล-  
โรฟิลล์ซีหรือแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ดี ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงโดยตรงและทำหน้าที่ส่งพลังงาน  
จากแสงที่รับไว้ไปยังแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงาน  
แสงไปเป็นพลังงานเคมีซึ่งเรียกว่า P-840 แบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ซีหรือแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ดีมี  
อยู่เป็นจำนวนมากและพบเฉพาะภายในเซลล์แบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันเท่านั้น ส่วนแบคทีเรียโอ-  
คโลโรฟิลล์เอมีอยู่น้อย คือ มีอยู่ประมาณ 5-10% ของแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ทั้งหมด สำหรับ  
แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำมะถันมีแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์เอหรือแบคทีเรีย-  
โอคโลโรฟิลล์ดีซึ่งเป็นส่วนประกอบของโครมาทโดพอร์เป็นจำนวนมาก ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสง  
มีแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงาน  
เคมีหลายชนิดและมีชื่อเรียกแตกต่างกันตามชนิดของแบคทีเรีย เช่น *Chromatium* sp.,  
*Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas spheroides* มีแบคทีเรียโอคโลโรฟิลล์  
ซึ่งเป็นองค์ประกอบของจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมีซึ่งเรียกว่า P-890

P-890 และ P-870 ตามลำดับ

แสงที่แบคทีเรียโคลิกโลโรฟิลล์รับพลังงานได้มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตาเรามองเห็นได้ และมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตาเรามองไม่เห็น เช่น แบคทีเรียโคลิกโลโรฟิลล์ของแบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันบางชนิดรับพลังงานจากแสงซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตาเรามองเห็นได้ คือ 590 นาโนเมตรและรับพลังงานจากแสงซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตาเรามองไม่เห็น คือ 810 และ 850 นาโนเมตร แบคทีเรียโคลิกโลโรฟิลล์ของแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันบางชนิดรับพลังงานจากแสงซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตาเรามองเห็นได้ คือ 375 และ 590 นาโนเมตรและรับพลังงานจากแสงซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตาเรามองไม่เห็น คือ 800 850 และ 890 นาโนเมตร เป็นต้น ในการรับพลังงานจากแสงดังกล่าว แบคทีเรียโคลิกโลโรฟิลล์รับพลังงานจากแสงซึ่งมีความยาวคลื่นแตกต่างกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียโคลิกโลโรฟิลล์และชนิดของแบคทีเรีย ดังตารางที่ 11-1

คาโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานจากแสง แล้วส่งพลังงานจากแสงที่รับไว้ประมาณ 30-50% ไปยังแบคทีเรียโคลิกโลโรฟิลล์ซึ่งเป็นองค์ประกอบของจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมี และทำหน้าที่ป้องกันแบคทีเรียโคลิกโลโรฟิลล์ไม่ให้ได้รับอันตรายจากปฏิกิริยาโฟโตออกซิเดชัน (photooxidation) แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงมีคาโรทีนอยด์ประมาณ 78 ชนิดซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 พวก คือ อะลิฟาติกคาโรทีนอยด์กับอะโรมาติกคาโรทีนอยด์ แบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันมีคาโรทีนอยด์น้อย คาโรทีนอยด์อยู่ตรงส่วนเยื่อเซลล์และเป็นพวกอะโรมาติกคาโรทีนอยด์ที่เรียกว่า คลอโรแบคทีน (chlorobactene) ส่วนแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำมะถันมีคาโรทีนอยด์มาก คาโรทีนอยด์อยู่ตรงส่วนเยื่อโครมาทอโซมและเป็นพวกอะลิฟาติกคาโรทีนอยด์



ตารางที่ 11-1 การรับพลังงานจากแสงซึ่งอยู่ในกลีโอสโตรมา เรดของแบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล

แบคทีเรีย	ชนิดของแบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)
แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถัน		
<i>Chlorobium thiosulphatophilum</i> สายพันธุ์แอล(L)	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล	730
	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล เอ	809
<i>Chlorobium thiosulphatophilum</i> สายพันธุ์พี.เอ็ม.(P.M.)	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิลดี	747
	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล เอ	809
<i>Chloropseudomonas ethylicum</i> สายพันธุ์ 2 เค(K)	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิลดี	750
	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล เอ	809
แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถัน		
<i>Chromatium</i> sp. สายพันธุ์ดี(D)	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล เอ	800, 807, 823, 850, 891
<i>Thiocapsa floridana</i>	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล เอ	797, 853, 889
แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถัน		
<i>Rhodospirillum rubrum</i>	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล เอ	805, 883
<i>Rhodopseudomonas spheroides</i>	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิล เอ	801, 852, 870
<i>Rhodopseudomonas viridis</i>	แบคทีเรียไอคอลลอไรฟิลบี	830, 1014

แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันมีไซโตโครม คิวโนนและเพอร์รีดอกซินทำหน้าที่ในการขนส่งอิเล็กตรอนตรงส่วนเยื่อเซลล์ ส่วนแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันมีสารต่าง ๆ ดังกล่าวตรงส่วนเยื่อโครมาทอโฟร์และเยื่อเซลล์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงแต่ละชนิดมีชนิดไซโตโครมซีซึ่งทำหน้าที่ขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงแตกต่างกัน เช่น *Chlorobium limicola* และ *Chlorobium thiosulfatophilum* มีไซโตโครมซี-551 ไซโตโครมซี-553 และไซโตโครมซี-555 *Rhodospseudomonas spheroides* และ *Rhodospseudomonas capsulata* มีไซโตโครมซี<sub>2</sub> (cytochrome C<sub>2</sub>) และไซโตโครมซี' (cytochrome C') *Chromatium vinosum* และ *Thiocapsa floridana* มีไซโตโครมซี-556 และไซโตโครมซี-552 *Rhodomicrobium* sp. บางสปีชีมีไซโตโครมซี<sub>2</sub> และไซโตโครมซี-554 *Rhodospseudomonas viridis* มีไซโตโครมซี-553 และไซโตโครมซี-558 เป็นต้น การสังเคราะห์ไซโตโครมซีของแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงขึ้นอยู่กับอายุของแบคทีเรียและส่วนประกอบของสับสเตรต สำหรับคิวโนนแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงแต่ละกลุ่มมีชนิดของคิวโนนแตกต่างกัน คิวโนนที่มีอยู่ภายในเซลล์แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันคือ มีนาคิวโนน (menaquinone) ส่วนคิวโนนที่มีอยู่ภายในเซลล์แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันคือ ยูบิควิโนน (ubiquinone)

### โฟโตฟอสโฟริเลชัน

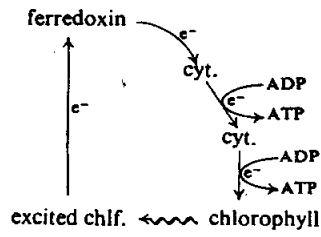
โฟโตฟอสโฟริเลชันเป็นกระบวนการสังเคราะห์ ATP จาก ADP กับอนินทรีย์ฟอสเฟต โดยอาศัยพลังงานจากแสง แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงสังเคราะห์ ATP โดยกระบวนการโฟโตฟอสโฟริเลชันได้ 2 แบบ คือ ไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชัน (cyclic photophosphorylation) กับนินไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชัน (noncyclic photophosphorylation) การสังเคราะห์ ATP ทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นพร้อมกันและมีรายละเอียดแตกต่างกันในแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงแต่ละชนิด เช่น *Rhodospirillum rubrum* มีไซโตโครมซี<sub>2</sub> และไซโตโครมซี-428 ทำหน้าที่ขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชันและนินไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชันตามลำดับ

ส่วน *Rhodospseudomonas viridis* มีไซโตโครมซี-558 และไซโตโครมซี-553 ทำหน้าที่ขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชันและนั่นไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชันตามลำดับ

แผนผังโฟโตฟอสโฟรีเลชัน แผนผังโฟโตฟอสโฟรีเลชัน เป็นแผนผังที่แสดงถึงการสังเคราะห์ ATP ที่ง่ายกว่าความเป็นจริง ทั้งนี้เพื่อให้เข้าใจและเห็นถึงความแตกต่างระหว่างไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชันกับนั่นไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชัน

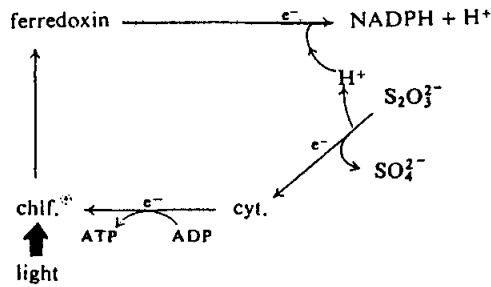
การสังเคราะห์ ATP แบบไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชันพบในพืชเป็นส่วนใหญ่แต่พบในแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงเป็นส่วนน้อย ในการสังเคราะห์ ATP แบบนี้ไม่ต้องอาศัยสับสเตรตภายนอกเซลล์ อิเล็กตรอนถูกขนส่งเป็นวัฏจักรและได้เฉพาะ ATP โดยเริ่มด้วยรงควัตถุซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานจากแสง เช่น คลอโรฟิลล์ รับพลังงานจากแสงที่มีความยาวคลื่นเหมาะสมแล้วกลายเป็นเอ็กซิตีเด็คคลอโรฟิลล์ (excited chlorophyll) ซึ่งอิเล็กตรอนในโมเลกุลมีพลังงานสูงขึ้น เรียกอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงขึ้นนี้ว่า เอ็กซิตีเด็คอิเล็กตรอน (excited electron) ต่อมาเอ็กซิตีเด็คอิเล็กตรอนถูกขนส่งออกจากโมเลกุลเอ็กซิตีเด็คคลอโรฟิลล์ไปรีดิวซ์เฟอริดอกซินและไซโตโครมซึ่งทำให้พลังงานของอิเล็กตรอนสูญเสียไป พืชและแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงนำพลังงานที่สูญเสียไปนี้ไปใช้ในการสังเคราะห์ ATP ส่วนอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานถูกขนส่งกลับไปยังโมเลกุลคลอโรฟิลล์เพื่อรับพลังงานจากแสงแล้วถูกขนส่งเป็นวัฏจักรตามที่ได้กล่าวมาแล้วใหม่ได้อีก ดังรูปที่ 11-1 อิเล็กตรอน 1 คู่ ซึ่งถูกขนส่งเป็นวัฏจักรแบบนี้ทำให้สังเคราะห์ ATP ได้ 2 โมเลกุล

สำหรับการสังเคราะห์ ATP แบบนั่นไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชันพบในแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่ ในการสังเคราะห์ ATP แบบนี้อิเล็กตรอนถูกขนส่งไม่เป็นวัฏจักรและต้องมีสับสเตรตภายนอกเซลล์ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน พืชใช้น้ำเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน ส่วนแบคทีเรียใช้สารประกอบอินทรีย์ สารประกอบอนินทรีย์กำมะถันและไฮโดรเจนโมเลกุลเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอน ผลจากการสังเคราะห์ ATP แบบนี้นอกจากได้ ATP แล้วยังได้โคเอ็นไซม์

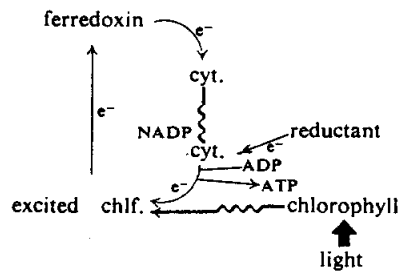


รูปที่ 11-1 แผนผังไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชัน (chl. = chlorophyll, cyt. = cytochrome)

รูปรีดิวซ์ด้วย ดังรูปที่ 11-2 และรูปที่ 11-3 สับสเตรคภายนอกเซลล์ เช่น ไฮโอซิลเฟตให้อิเล็กตรอนและโปรตอน อิเล็กตรอนที่ออกจากไฮโอซิลเฟตหรือสับสเตรคถูกขนส่งผ่านไซโตโครม



รูปที่ 11-2 แผนผังการสังเคราะห์ NADPH+H<sup>+</sup> จากไฮโอซิลเฟตของแบคทีเรียที่มีกำมะถัน (chl. = chlorophyll, cyt. = cytochrome)



รูปที่ 11-3 แผนผังนันทรงคลิกไฟโตฟอสไฟรีเลชัน (chl.f. = chlorophyll, cyt. = cytochrome)

เพื่อไปรับพลังงานจากแสงตรงส่วนเอ็กซ์เซ็คคลอโรฟิล แล้วกลายเป็นเอ็กซ์เซ็คอิเล็กตรอน ซึ่งถูกขนส่งต่อไปยังเฟร์รีดอกซินและ  $\text{NADP}^+$  ตามลำดับ ขณะเดียวกันโปรตอนที่อยู่จากไมเลกุลสับสเตรตถูกขนส่งไปยัง  $\text{NADP}^+$  ทำให้  $\text{NADP}^+$  ถูกรีดิวซ์กลายเป็น  $\text{NADPH} + \text{H}^+$  อิเล็กตรอน 1 คู่ จากสับสเตรตที่ถูกขนส่งโดยวิธีนี้ทำให้ได้ ATP และ  $\text{NADPH} + \text{H}^+$  อย่างละ 1 โมเลกุล

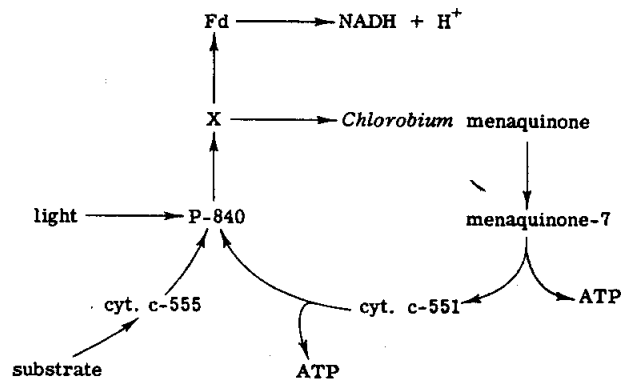
ไฟโตฟอสไฟรีเลชันของแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสง แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงแต่ละกลุ่มสังเคราะห์ ATP โดยกระบวนการไซคลิกไฟโตฟอสไฟรีเลชันและนันทรงคลิกไฟโตฟอสไฟรีเลชัน ด้วยการอาศัยพลังงานจากแสงทำให้อิเล็กตรอนถูกขนส่งดังนี้

1. แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถัน จากการศึกษาโดยใช้ *Chlorobium thiosulfatophilum* และ *Chlorobium limicola* พบว่าแบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดมีแบคทีเรียไอคลอโรฟิลหรือแบคทีเรียไอคลอโรฟิลโดยตรงส่วนโครมาโทฟอร์ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงส่วนใหญ่แล้วส่งพลังงานจากแสงที่รับไว้ประมาณ 80% ไปยังแบคทีเรียไอคลอโรฟิลเอ นอกจากนี้แบคทีเรียทั้ง 2 ชนิดยังมีเฟร์รีดอกซินทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์  $\text{NADH} + \text{H}^+$  ซึ่งแบคทีเรียต้องการใช้ในการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ มีไซโตโครมซี-551 และไซโตโครมซี-553 ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากไฮโอซิลเฟตและซัลไฟด์ตามลำดับ หลังจากไซโตโครมซี-551 และไซโตโครมซี-553

รับอิเล็กตรอนแล้วจะส่งอิเล็กตรอนที่รับไว้ไปยังไซโตโครมซี-555 ต่อมาอิเล็กตรอนถูกส่งออกจากโมเลกุลไซโตโครมซี-555ไปยัง P-840 เพื่อรับพลังงานจากแสง

สมมุติฐานในการขนส่งอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถัน มีการขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักรอยู่ที่เดียวกัน โดยเริ่มด้วยแบคทีเรียโอคโลโรฟิลเอสส่งพลังงานจากแสงที่รับไว้ไปยัง P-840 แล้วทำให้อิเล็กตรอนภายในโมเลกุล P-840 มีพลังงานสูงขึ้นกลายเป็นเอ็คไซเต็คอิเล็กตรอน ขณะเดียวกันอิเล็กตรอนจากสับสเตรตที่ส่งมายัง P-840 จะรับพลังงานจากแสงแล้วกลายเป็นเอ็คไซเต็คอิเล็กตรอนด้วย หลังจากนั้นเอ็คไซเต็คอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นถูกขนส่งไปยังอินเตอร์มีเดียตร่วม (X) ระหว่างไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชันกับนั้นไซคลิกโฟโตฟอสโฟรีเลชัน อินเตอร์มีเดียตร่วมนี้เป็นสารประกอบที่ยังไม่ทราบว่าเป็นอะไร ต่อมาเอ็คไซเต็คอิเล็กตรอนซึ่งมีแหล่งอิเล็กตรอนจากโมเลกุล P-840 ถูกขนส่งเป็นวัฏจักร โดยถูกขนส่งออกจากโมเลกุลอินเตอร์มีเดียตร่วมไปยังคลอโรเบียมินาควิโนน (chlorobium menaquinone) มินาควิโนน-7 ไซโตโครมซี-551 และ P-840 ตามลำดับ (รูปที่ 11-4) ส่วนเอ็คไซเต็คอิเล็กตรอนซึ่งมีแหล่งอิเล็กตรอนจากสับสเตรตถูกขนส่งออกจากโมเลกุลอินเตอร์มีเดียตร่วมผ่านเฟร์รีดอกซินไปยัง  $\text{NAD}^+$  ทำให้  $\text{NAD}^+$  ถูกรีดิวซ์กลายเป็น  $\text{NADH}+\text{H}^+$  ดังรูปที่ 11-4 ปฏิกิริยารีดักชันของ  $\text{NAD}^+$  นี้มีเอนไซม์เฟร์รีดอกซิน-NAD รีดักเตส (ferredoxin - NAD reductase) เป็นตัวเร่ง

แบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันไม่มีไซโตโครมบี และเมื่อสภาวะแวดล้อมที่แบคทีเรียเจริญอยู่มีออกซิเจน การขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักรโดยอาศัยพลังงานจากแสงจะหยุดด้วยเหตุนี้เมื่อนำแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันส่วนใหญ่ไปทำการเพาะเลี้ยงในสภาวะแอโรบจะมีชีวิตอยู่ได้ไม่นาน สำหรับแบคทีเรียสีเขียวที่มีกำมะถันส่วนน้อยซึ่งมีคุณสมบัติ เป็นพวกแฟคคัลเต็คแบคทีเรียแอโรบ เจริญในสภาวะแอโรบได้โดยได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากกระบวนการหายใจ



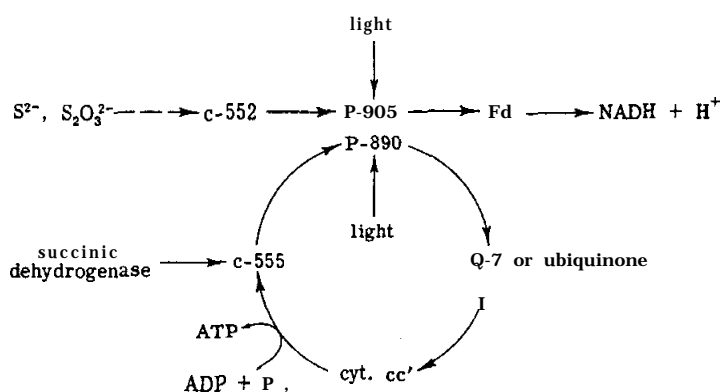
รูปที่ 11-4 สมมุติฐานในการขนส่งอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสีเขียว

ที่มีกำมะถัน (Fd = ferredoxin, cyt. = cytochrome)

2. แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถัน จากการศึกษาค้นคว้าโดย *Chromatium* sp. พบว่า แบคทีเรียมีแบคทีเรียโอคลอโรฟิลล์ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงส่วนใหญ่และความเข้มของแสงในสภาวะแวดล้อมมีผลต่อวิถีสำหรับการขนส่งอิเล็กตรอน คือ เมื่อแสงมีความเข้มสูง อิเล็กตรอนถูกขนส่งไม่เป็นวัฏจักรและมีไซโตโครมซี-552 ทำหน้าที่ขนส่งอิเล็กตรอน แต่เมื่อแสงมีความเข้มต่ำ อิเล็กตรอนถูกขนส่งเป็นวัฏจักรโดยมีไซโตโครมซี-555 และไซโตโครมซีซี' (cytochrome-cc') ทำหน้าที่ขนส่งอิเล็กตรอน นอกจากนี้ยังพบว่า แบคทีเรียนี้มี ADP และเอ็นไซม์ PPI-ซินทีเอส (PPI-synthetase) จับกับเยื่อโครมาโทฟอร์ มีเอ็นไซม์ ATP-ซินทีเอส (ATP-synthetase) ในโครมาโทฟอร์ เอ็นไซม์ PPI-ซินทีเอสและเอ็นไซม์ ATP-ซินทีเอสต้องการ Mg<sup>2+</sup> มาร่วมด้วยในการทำงาน และแบคทีเรียสังเคราะห์ PPI เมื่อไม่มี ADP แต่มีอนินทรีย์ฟอสเฟตภายในเซลล์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันมิให้พลังงานสูญเสียไป PPI ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นนี้ทำหน้าที่

เป็นแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์ ATP จาก ADP กับอนินทรีย์ฟอสเฟตเมื่อแบคทีเรียเจริญในที่  
ไม่มีแสง

สมมุติฐานในการขนส่งอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถัน มีการ  
ขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักรอยู่คนละที่ การขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักร เกิด  
ขึ้นเมื่อแสงมีความเข้มต่ำ แบคทีเรียมี P-890 ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงที่ส่งมาจากแบคทีเรีย-  
โอคโลโรฟิลเอและคาโรทีนอยด์ ในการขนส่งอิเล็กตรอน เริ่มด้วยไซโตโครมซี-555 ทำหน้าที่  
จับอิเล็กตรอนจากสารประกอบอนินทรีย์ เช่น ซัลไฟด์ หลังจากนั้นอิเล็กตรอนถูกขนส่งออกจาก  
ไซโตโครมซี-555 ไปยัง P-890 เพื่อรับพลังงานจากแสง อิเล็กตรอนที่รับพลังงานจากแสงแล้ว  
ถูกขนส่งออกจาก P-890 ต่อไปเป็นวัฏจักร ดังรูปที่ 11-5 ส่วนการขนส่งอิเล็กตรอนไม่เป็นวัฏจักร



รูปที่ 11-5 สมมุติฐานในการขนส่งอิเล็กตรอนของแบคทีเรียสีม่วง  
และสีแดงที่มีกำมะถัน



เกิดขึ้นเมื่อแสงมีความเข้มสูง แบคทีเรียมี P-905 ทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงที่ส่งมาจาก แบคทีเรียโคลอโรฟิลเอและคาโรทีนอยด์ ในการขนส่งอิเล็กตรอน เริ่มด้วยไซโตโครมซี-552 ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนจากสารประกอบอินทรีย์ เช่น ซัลไฟด์และไฮโดรซัลเฟต หลังจากนั้น อิเล็กตรอนถูกขนส่งออกจากไซโตโครมซี-552 ไปยัง P-905 เพื่อรับพลังงานจากแสง อิเล็กตรอนที่รับพลังงานจากแสงแล้วถูกขนส่งออกจาก P-905 ค่อยไปไม่เป็นวัฏจักร (รูปที่ 11-5) ซึ่ง ทำให้ได้  $\text{NADH}+\text{H}^+$

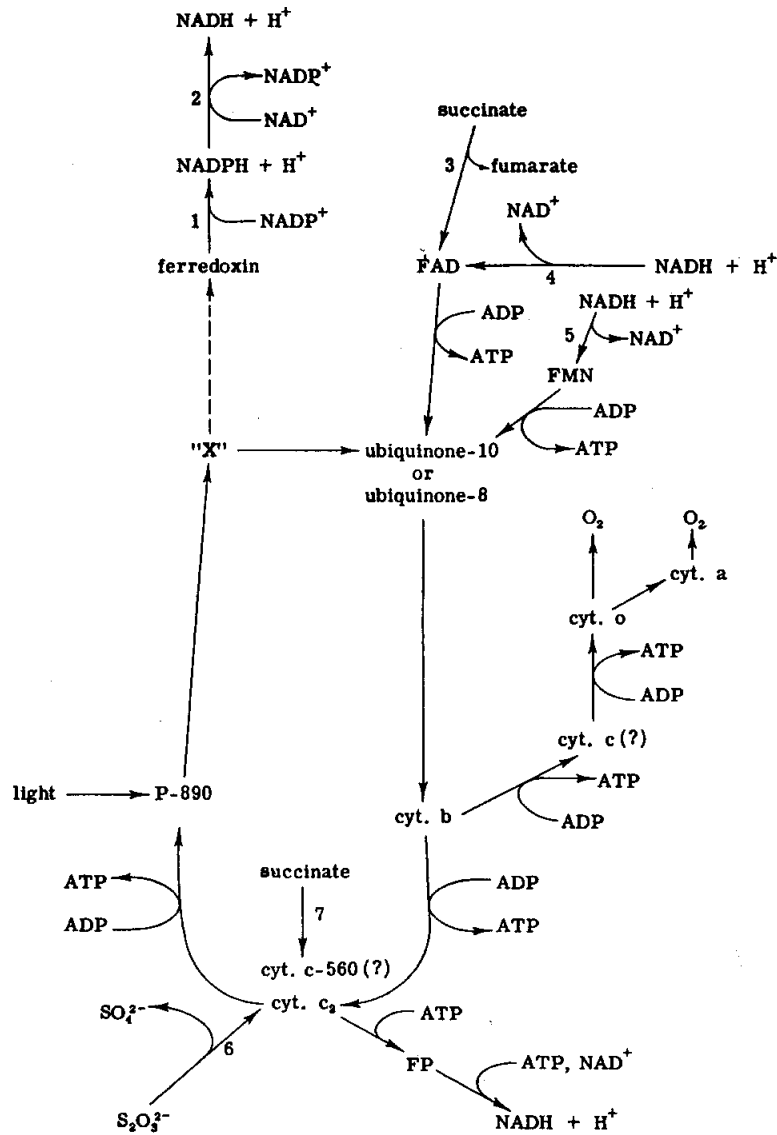
แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ามะถันบางชนิดซึ่งสามารถเจริญในสภาวะแอโรบ เมื่อเจริญในสภาวะแอโรบที่ไม่มีแสงได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากกระบวนการหายใจ แต่เมื่อเจริญในสภาวะแอโรบที่มีแสง แสงยังยั้งไม่ให้แบคทีเรียนำออกซิเจนไปใช้ในกระบวนการหายใจ ทั้งนี้เนื่องกระบวนการหายใจและกระบวนการโฟโตฟอสโฟริเลชันมีองค์ประกอบซึ่งทำหน้าที่ขนส่ง อิเล็กตรอนร่วมกัน และ ATP ที่เกิดขึ้นทำให้ไม่มีนินทรีย์ฟอสเฟตภายในเซลล์ นอกจากนี้เมื่อ แบคทีเรียดังกล่าวเจริญในสภาวะแอโรบซึ่งมีแสงหรือไม่มีแสง แบคทีเรียไม่สังเคราะห์เอ็นไซม์ สำคัญของวัฏจักรคลาวิน คือ คาร์บอกซิคลิสมิวเลส ทำให้ไม่มีวัฏจักรคลาวินเกิดขึ้น

3. แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ามะถัน จากการศึกษโดยใช้ *Rhodospseudomonas capsulata*, *Rhodospseudomonas spheroides*, *Rhodospseudomonas palustris* และ *Rhodospirillum rubrum* พบว่า แบคทีเรียมีแบคทีเรียโคลอโรฟิลเอหรือแบคทีเรียโคลอโรฟิลบีรับพลังงานจากแสงส่วนใหญ่และมีคุณสมบัติ เป็นพวกแฟคคัล เดคคิบแอนแอโรบ ในสภาวะแอโรบที่ไม่มีแสง แบคทีเรียได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากกระบวนการหายใจ โดยขนส่ง อิเล็กตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันของสับสเตรตผ่านลูกโซ่การขนส่งอิเล็กตรอนไปยังออกซิเจน องค์ประกอบของลูกโซ่การขนส่งอิเล็กตรอนแตกต่างกันในแบคทีเรียแต่ละชนิด เช่น *Rhodospirillum rubrum* มีไซโตโครมโอ (cytochrome o) ส่วน *Rhodospseudomonas spheroides* มีไซโตโครมโอกับไซโตโครมเอ สำหรับ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  ได้จากการขนส่งอิเล็กตรอนในลูกโซ่การขนส่ง

อิเล็กตรอนย้อนกลับ ในสภาวะแอนแอโรบที่มีแสง แบคทีเรียมีกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยใช้พลังงานจากแสงทำให้อิเล็กตรอนถูกขนส่งเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักร ในการขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักรได้ ATP ส่วนในการขนส่งอิเล็กตรอนไม่เป็นวัฏจักรได้ผลแตกต่างกันในแบคทีเรียแต่ละชนิด เช่น *Rhodospirillum rubrum* ได้เฉพาะ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  ในขณะที่ *Rhodopseudomonas* sp. ได้ ATP และ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  นอกจากนี้เมื่อแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกัมมะถันเจริญในสภาวะแอนแอโรบที่มีแสง แสงยับยั้งกระบวนการหายใจและออกซิเจนยับยั้งการสังเคราะห์เอ็นไซม์สำคัญของวัฏจักรคลาวินเช่นเดียวกับแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกัมมะถัน

แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกัมมะถันมีตำแหน่งที่ ADP เอ็นไซม์ P<sub>i</sub>-ซินทีเอสและเอ็นไซม์ATP-ซินทีเอสอยู่ รวมทั้งการสังเคราะห์ ATP และ P<sub>i</sub>เหมือนกับแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกัมมะถัน การสังเคราะห์ ATP ของแบคทีเรียกลุ่มนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาโดยใช้ *Rhodospirillum rubrum* พบว่า แบคทีเรียนี้สามารถสังเคราะห์ ATP โดยกระบวนการไซคลิกโฟสโฟสไฟรีเลชั่นในเวลา 0.2 วินาที ณ อุณหภูมิ 0°ซ ในการสังเคราะห์ ATP นี้มียูบิควิโนน ไฮโดโรควิโนน และไฮโดโรควิโนนที่ทำหน้าที่ขนส่งอิเล็กตรอน

แผนผังการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงและกระบวนการหายใจของแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกัมมะถัน (รูปที่ 11-6) แสดงให้เห็นถึงการขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักร การขนส่งอิเล็กตรอนไม่เป็นวัฏจักรและการขนส่งอิเล็กตรอนในลูกโซ่การขนส่งอิเล็กตรอนย้อนกลับในสภาวะแอนแอโรบที่มีแสง แบคทีเรียขนส่งอิเล็กตรอนจากสับสเตรตซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์แบบไม่เป็นวัฏจักรแล้วได้ ATP และ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  โดยมี P-890 เป็นแปคเทอริโอคลอโรฟิลซึ่งเป็นองค์ประกอบของจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมี และมีสารประกอบพวกโปรตีนซึ่งมีเหล็กและกัมมะถันเป็นองค์ประกอบ (X) ทำหน้าที่เป็นอินเตอร์มีเดียตร่วมระหว่างการขนส่งอิเล็กตรอนที่เป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักร ในขณะที่เดียวกันเฮ็คไซเตดอิเล็กตรอนที่มีแหล่งจากโมเลกุล P-890 ถูกขนส่งเป็นวัฏจักรแล้วได้ ATP ส่วนในสภาวะแอนแอโรบที่



รูปที่ 11-6 แผนผังการขนส่งอิเล็กตรอนในสภาวะแอโรบและแอนแอโรบของแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถัน (1=ferredoxin-NADP reductase, 2=NADPH transhydrogenase, 3=succinic dehydrogenase, 4=NADH:heme protein oxidoreductase, 5=NADH:ubiquinone oxidoreductase, 6=thiosulfate:cytochrome c reductase, 7=succinate:cytochrome c reductase)

ไม่มีแสง แมคทีเรียขนส่งอิเล็กตรอนจากสารประกอบอินทรีย์และสารประกอบอนินทรีย์ไปยังออกซิเจน และในขณะที่เดียวกันขนส่งอิเล็กตรอนบางส่วนที่ขนส่งไปยังออกซิเจนนี้ย้อนกลับแล้วทำให้ได้  $\text{NADH}+\text{H}^+$  ดังรูปที่ 11-6  $\text{NADH}+\text{H}^+$  ที่ได้ในสภาวะแอโรบที่ไม่มีแสงน้อยกว่าในสภาวะแอน-แอโรบที่มีแสง

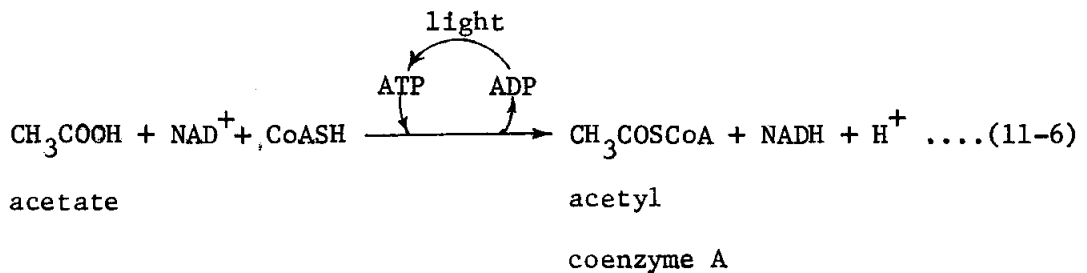
### โฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์

แมคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้เกิดกระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์ ด้วยการอาศัยพลังงานจากแสงทำให้อิเล็กตรอนถูกขนส่งเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักร การขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักรได้ ATP ส่วนการขนส่งอิเล็กตรอนไม่เป็นวัฏจักรได้ ATP และโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ซึ่งส่วนใหญ่เป็น  $\text{NADH}+\text{H}^+$  ทั้งนี้เนื่องจากแมคทีเรียที่สังเคราะห์แสงใช้  $\text{NAD}^+$  เป็นตัวรับอิเล็กตรอนมากกว่าโคเอ็นไซม์ชนิดอื่น ๆ ต่อมาแมคทีเรียนำ ATP และโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นไปใช้เพื่อทำให้สารประกอบอินทรีย์เปลี่ยนแปลงในกระบวนการเมตาบอลิซึม แล้วกลายเป็นสารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์

ในกระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์ แมคทีเรียที่สังเคราะห์แสงใช้สารประกอบอินทรีย์บางชนิดเป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งไนโตรเจนสำหรับสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ การใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์นี้ ทำให้แมคทีเรียตรึงคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในวัฏจักรคลาวิลคลดลง ทั้งนี้เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ในวัฏจักรคลาวิล นอกรีตของผลิตภัณฑ์ได้จากกระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนขึ้นอยู่กับชนิดของสารประกอบอินทรีย์และสภาวะแวดล้อมที่แมคทีเรียเจริญอยู่ เช่น การมีแหล่งไนโตรเจนในสภาวะแวดล้อมทำให้แมคทีเรียสังเคราะห์กรดอะมิโนเป็นส่วนใหญ่และสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตลดลง การมี  $\text{NADH}+\text{H}^+$  มากทำให้แมคทีเรียสังเคราะห์สารประกอบรีดิวซ์ เช่น ลิพิดและโพลีเบต้าไฮดรอกซีบีวทายเรด การมีคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะแวดล้อมทำให้ชนิด

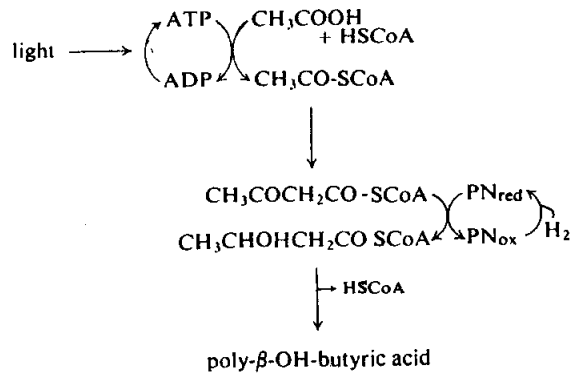
ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนแปลง ทั้งนี้เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันของอินเตอร์มีเดียตที่ได้จากกระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมหรือผลิตภัณฑ์จากกระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์และผลิตภัณฑ์จากกระบวนการสังเคราะห์แสงทำปฏิกิริยาเคมีกัน

โฟโตเมตาบอลิซึมของอะซิเตต แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงบางชนิด เช่น *Rhodospirillum rubrum*, *Rhodopseudomonas palustris*, *Rhodospirillum rubrum*, *Rhodopseudomonas spheroides*, *Chromatium* sp., *Chlorobium limicola* และ *Chloropseudomonas ethylicum* สามารถใช้อะซิเตต เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ โดยอาศัยพลังงานจากแสงทำให้อะซิเตตเปลี่ยนไปเป็นอะเซทิลโคเอ็นไซม์เอ ดังสมการที่ 11-6 หลังจากนั้นอะเซทิลโคเอ็นไซม์เอที่



เกิดขึ้นถูกทำให้เปลี่ยนแปลงต่อไปได้หลายวิถี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อมที่แบคทีเรียเจริญอยู่ ดังนี้

1. ในสภาวะแวดล้อมที่มี  $\text{NADH} + \text{H}^+$  พอเพียงและไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้อะเซทิลโคเอ็นไซม์เอ เปลี่ยนแปลงไปเป็นโพลีเมต้าไฮดรอกซีบิวทายเรด (รูปที่ 11-7) แล้วสะสมไว้ในเซลล์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA ที่สมบูรณ์ได้รับ  $\text{NADH} + \text{H}^+$  ซึ่งนำมาใช้ในกระบวนการนี้ โดยอาศัยพลังงานจากแสงและจากการทำให้อะเซทิลโคเอ็นไซม์เอบางส่วนเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร TCA เช่น *Rhodospirillum rubrum*, *Rhodopseudomonas palustris*, *Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas*



รูปที่ 11-7 โฟโตเมตาบอลิซึมของอะซิเตตในที่ไม่มีคาร์บอน-ไดออกไซด์โดย *Rhodospirillum rubrum* และ *Chromatium* sp.

*spheroides* ส่วนแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากไม่มีเอ็นไซม์ระบบอัลฟาคีโตกลูตาเรตดีไฮโดรจีเนสและเอ็นไซม์มาเลตดีไฮโดรจีเนส ได้รับ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  ซึ่งนำมาใช้ในกระบวนการนี้ เมื่อมีสารภายนอกเซลล์ทำหน้าที่เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนและอาศัยพลังงานจากแสงเท่านั้น เช่น *Chromatium* sp., *Chlorobium limicola* และ *Chloropseudomonas ethylicum*

2. ในสภาวะแวดล้อมที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้อะเซทิลโคเอ็นไซม์เอเปลี่ยนแปลงไปเป็นโพลิแซคคาไรด์ ปริมาณโพลิแซคคาไรด์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ ในการสังเคราะห์โพลิแซคคาไรด์ มีเอ็นไซม์ไพรูเวตซินทีเอส (pyruvate synthetase) เป็นตัวเร่งให้อะเซทิลโคเอ็นไซม์เอรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์แล้วกลายเป็นไพรูเวต ต่อมาเอ็นไซม์ฟอสโฟอินอลไพรูเวตซินทีเอส (phosphoenolpyruvate

synthetase) เป็นตัวเร่งให้ไพรูเวตเปลี่ยนไปเป็นฟอสโฟอินอลไพรูเวต ปฏิกริยานี้มี ATP มาช่วยด้วย หลังจากนั้นเอนไซม์ฟอสโฟอินอลไพรูเวตคาร์บอกซิเลส (phosphoenolpyruvate carboxylase) เป็นตัวเร่งให้ฟอสโฟอินอลไพรูเวตรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์แล้วกลายเป็น ออกซะโลอะซิเตต แยกที่เรียกที่สังเคราะห์แสงทำให้ออกซะโลอะซิเตตที่เกิดขึ้นรวมตัวกับอะเซทิลโคเอนไซม์เออีกหนึ่งโมเลกุลแล้ว เปลี่ยนแปลงต่อไปตามวัฏจักรไกลออกซิเลตและวัฏจักร TCA ผลจากการเปลี่ยนแปลงได้ฟรีเคอร์เซอร์สำหรับการสังเคราะห์โพลีแซคคาไรด์ เช่น มาเลต ซักซิเนตและอัลฟาดีไฮดรูตาเรต นอกจากนี้แยกที่เรียกที่สังเคราะห์แสงยังสังเคราะห์โพลีแซคคาไรด์ได้ ด้วยการทำให้ฟอสโฟอินอลไพรูเวตที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงไปเป็น 3-ฟอสโฟกลีเซอเรตซึ่งถูกเปลี่ยนแปลงต่อไปตามวัฏจักรกลาวินเพื่อสังเคราะห์โพลีแซคคาไรด์ (รูปที่ 11-8)

3. ในสภาวะแวดล้อมที่มีแหล่งไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แยกที่เรียกที่สังเคราะห์แสงใช้อะเซทิลโคเอนไซม์เอเป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์กรดอะมิโน โดยทำให้อะเซทิลโคเอนไซม์เอเปลี่ยนแปลงไปเป็นออกซะโลอะซิเตตซึ่งถูกเปลี่ยนแปลงต่อไปตามวัฏจักรไกลออกซิเลตและวัฏจักร TCA ดังได้กล่าวมาแล้ว และทำให้อะเซทิลโคเอนไซม์เอเปลี่ยนแปลงไปเป็นอิตาโคนเนต (itaconate) ดังรูปที่ 11-8 แยกที่เรียกที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA สมบูรณ์และไม่สมบูรณ์ใช้อิตาโคนเนต ไพรูเวต ออกซะโลอะซิเตต อัลฟาดีไฮดรูตาเรต มาเลต ไกลออกซิเลตและซักซิเนตไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์กรดอะมิโน เช่น ใช้ไพรูเวต ออกซะโลอะซิเตต ไกลออกซิเลตและอัลฟาดีไฮดรูตาเรตเป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์อะลานีน แอสปาร์เตต ไกลซีนและกลูตาเมตตามลำดับ

แยกที่เรียกที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA สมบูรณ์ยังทำให้ออกซะโลอะซิเตตที่เกิดขึ้นเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร TCA ซึ่งมีปฏิกริยาย้อนกลับ โดยทำให้ออกซะโลอะซิเตตเปลี่ยนแปลงไปเป็นมาเลต ฟูมาเรต ซักซิเนตและซักซินิลโคเอนไซม์เอตามลำดับ เอนไซม์ซึ่งเป็นตัวเร่งในปฏิกริยาต่าง ๆ นี้เป็นเอนไซม์ชนิดเดียวกันกับเอนไซม์ในวัฏจักร TCA ส่วนแยกที่เรียกที่สังเคราะห์





แล้วกลายเป็นอัลฟาดีไฮดรอกลูตาเรต ต่อมาแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงนำอัลฟาดีไฮดรอกลูตาเรตที่เกิดขึ้นไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์กลูตาเมต

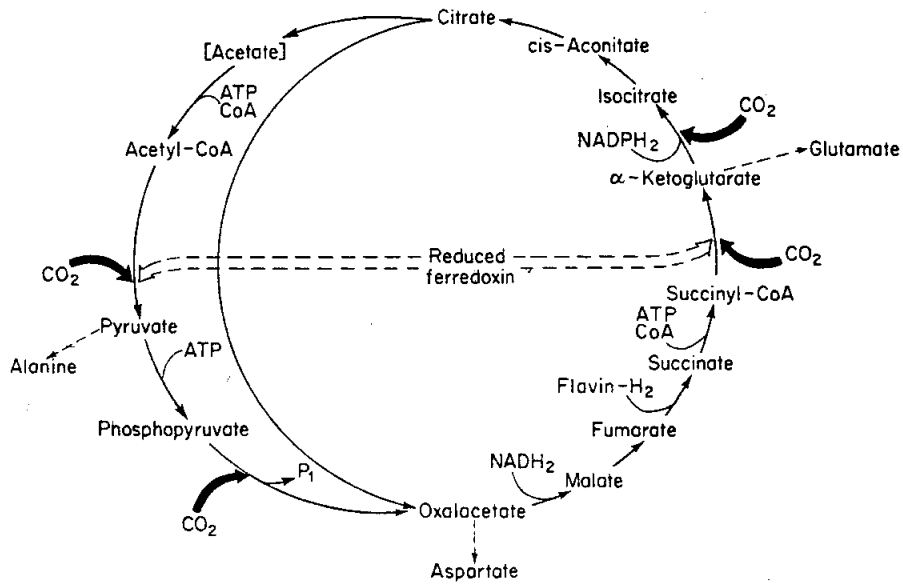
โฟโตเมตาบอลิซึมของโทรฟิโอบีแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงบางชนิด เช่น *Rhodospirillum rubrum*, *Rhodopseudomonas capsulata* และ *Chromatium* sp. สามารถใช้โทรฟิโอบีแบคทีเรียเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์เมื่อเจริญในที่ซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์ โดยเริ่มด้วยเอนไซม์โทรฟิโอนิลโคเอ็นไซม์เอซินทีเอส (propionyl-CoA synthetase) เป็นตัวเร่งให้โทรฟิโอบีแบคทีเรียเปลี่ยนไปเป็นโทรฟิโอนิลโคเอ็นไซม์เอ ต่อมาโทรฟิโอนิลโคเอ็นไซม์เอรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์แล้วกลายเป็นเมธิลมาโลนิลโคเอ็นไซม์เอซึ่งถูกเปลี่ยนแปลงไปเป็นซักซิเนต พูมาเรตและมาเลตตามลำดับ

ในการสังเคราะห์กลูตาเมต *Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas capsulata* ทำให้ซักซิเนตเปลี่ยนไปเป็นอัลฟาดีไฮดรอกลูตาเรต โดยอาศัยพลังงานจากแสงทำให้เกิด ATP และ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  เพื่อนำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ต่อมาแบคทีเรียนำอัลฟาดีไฮดรอกลูตาเรตไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์กลูตาเมต ส่วน *Chromatium* sp. ทำให้ซักซิเนตเปลี่ยนไปเป็นอัลฟาดีไฮดรอกลูตาเรตซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์กลูตาเมต โดยมีเฟอร์ริดอกซินมาเกี่ยวข้องและมีวิถีในการเปลี่ยนแปลงเฉพาะ

โฟโตเมตาบอลิซึมของไพรูเวต แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้ไพรูเวตเปลี่ยนแปลงได้หลายวิถีทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรียและสภาวะแวดล้อมที่แบคทีเรียเจริญอยู่ดังนี้

1. แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงบางชนิด เช่น *Rhodospirillum rubrum*, *Rhodopseudomonas spheroides*, *Chromatium* sp. และ *Chlorobium thiosulphatophilum* เมื่อเจริญในสภาวะที่เหมาะสมสำหรับสะสมสารประกอบภายในเซลล์ เช่น สภาวะแอนแอโรบที่แสงมีความเข้มสูงและมีไพรูเวตมาก แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงเหล่านี้ทำให้ไพรูเวต





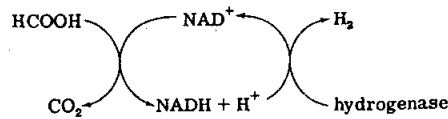
รูปที่ 11-9 วงจรการตรึงคาร์บอนแบบ C4

2. แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงบางชนิด เช่น *Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas spheroides* เมื่อเจริญในสภาวะแอนแอโรบที่มีแสง ทำให้ไพรูเวตเปลี่ยนไปเป็นอะเซทิลโคเอ็นไซม์เอ ต่อมาทำให้อะเซทิลโคเอ็นไซม์เอที่เกิดขึ้นเปลี่ยนไปเป็นโพลีเบต้าไฮดรอกซีมีวทายเรตและเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร TCA ผลจากการเปลี่ยนแปลงอะเซทิลโคเอ็นไซม์เอตามวัฏจักร TCA ได้คาร์บอนไดออกไซด์และโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ แต่เมื่อแบคทีเรียดังกล่าวเจริญในสภาวะแอนแอโรบที่ไม่มีแสง ไพรูเวตถูกเปลี่ยนโดยกระบวนการหมักแล้วได้โพลีเบต้าไฮดรอกซีมีวทายเรตหรือไดอะซิเตด ไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงสังเคราะห์โพลีเบต้าไฮดรอกซีมีวทายเรตในที่มีแสงได้ดีมากกว่าในที่ไม่มีแสงมาก

3. แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงบางชนิด เช่น *Rhodopseudomonas palustris*, *Rhodopseudomonas capsulata*, *Rhodopseudomonas gelatinosa* และ *Rhodospirillum molischianum* เมื่อเจริญในสภาวะแวกซ์ลูมที่มีไฮโดรเจนโพโรฟอสเฟต ทำให้ไพรูเวตเปลี่ยน-

แปลงโดยมีเอ็นไซม์ไพรูเวตดีคาร์บอกซิเลสเป็นตัวเร่ง ผลจากการเปลี่ยนแปลงได้คาร์บอนไดออกไซด์  
อะเซทิลโคเอนไซม์และอะเซทิลเมทิลคาร์บีนอล เอ็นไซม์ไพรูเวตดีคาร์บอกซิเลสนี้ไม่พบใน  
*Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas spheroides*

โฟโตเมตาบอลิซึมของฟอร์เมต ในสถานะแอนแอโรบที่มีแสง *Rhodopseudomonas palustris* ใช้ฟอร์เมตเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ โดยมีเอ็นไซม์ฟอร์มิกดีไฮโดรจีเนส (formic dehydrogenase) ซึ่งมี  $NAD^+$  เป็นโคเอ็นไซม์และมี เอ็นไซม์ไฮโดรจีเนสเป็นตัวเร่ง ไม่มีเฟอร์รีดอกซินมาร่วมด้วย ผลของการเปลี่ยนแปลงทำให้ฟอร์-  
เมตกลายเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน ดังรูปที่ 11-10 หลังจากนั้นคาร์บอนไดออกไซด์  
ที่เกิดขึ้นถูกนำไปใช้ในการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ โดยอาศัยพลังงานจากแสง



รูปที่ 11-10 โฟโตเมตาบอลิซึมของฟอร์เมต โดย

*Rhodopseudomonas palustris*

โฟโตเมตาบอลิซึมของซัลไฟด์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงบางชนิด เช่น  
*Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas spheroides* ใช้ซัลไฟด์เป็นแหล่ง  
คาร์บอนในการสังเคราะห์โพลีแซคคาไรด์ โพลีเบต้าไฮดรอกซีบิวทายเรตและกรดอะมิโน

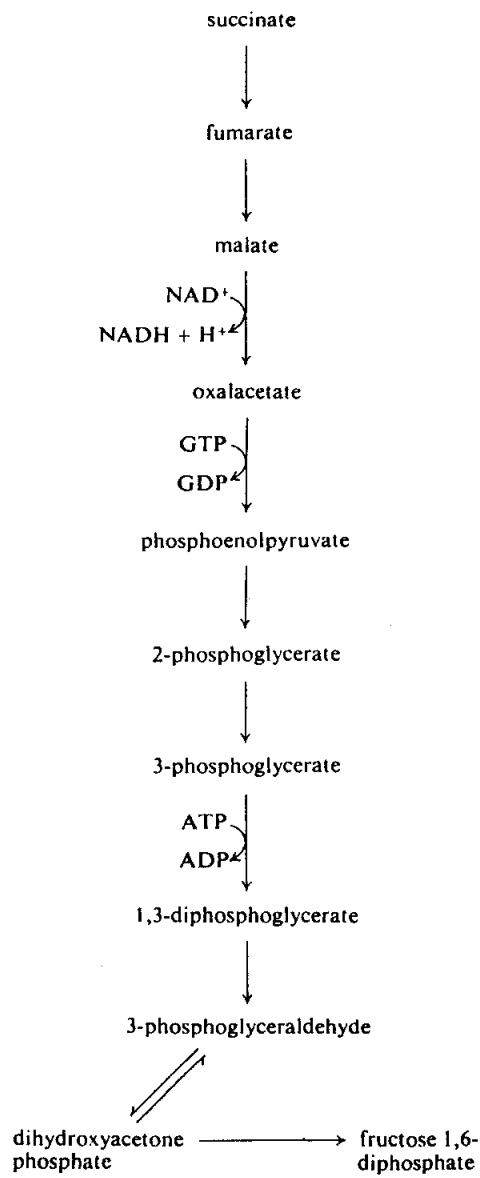
ในการสังเคราะห์โพลีแซคคาไรด์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้ซัลไฟด์เปลี่ยน  
ไปเป็นฟูมาเรต โดยใช้ซัลไฟด์เป็นตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการนั้นไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชัน

แล้วได้  $\text{NADH}+\text{H}^+$  หลังจากนั้นฟูมาเรตโดยส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนไปเป็นฟรุกโตส-1, 6-ไดฟอสเฟต ดังรูปที่ 11-11 สำหรับเอ็นไซม์ที่เร่งให้ซัคซิเนตเปลี่ยนไปเป็นฟรุกโตส-1, 6-ไดฟอสเฟต คือ ซัคซิเนตดีไฮโดรจีเนส ฟูมาเรตไฮดราเตส มาเลตดีไฮโดรจีเนส ฟอสโฟอินอลไพรูเวตคาร์บอกซีไคเนส (phosphoenolpyruvate carboxykinase) อีโนเลส ฟอสโฟกลีเซอเรตฟอสโฟมิวเตส (phosphoglycerate phosphomutase) ฟอสโฟกลีเซอเรตไคเนส ไทรโอสฟอสเฟตดีไฮโดรจีเนส ไทรโอสฟอสเฟตไอโซเมอเรสและฟรุกโตสไบฟอสเฟตอัลโดเลส (fructose-biphosphate aldolase) ตามลำดับ ฟรุกโตส-1, 6-ไดฟอสเฟตที่เกิดขึ้นถูกทำให้เปลี่ยนแปลงต่อไปตามวัฏจักรกลาวิน เพื่อสังเคราะห์โพลีแซคคาไรด์ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ฟูมาเรตบางส่วนถูกเปลี่ยนไปเป็นมาเลต ต่อมาเอ็นไซม์มาเลตดีไฮโดรจีเนสเป็นตัวเร่งให้มาเลตเปลี่ยนไปเป็นไพรูเวต และเอ็นไซม์ไพรูเวตไคเนสเป็นตัวเร่งให้ไพรูเวตเปลี่ยนไปเป็นฟอสโฟอินอลไพรูเวต หลังจากนั้นฟอสโฟอินอลไพรูเวตถูกทำให้เปลี่ยนแปลงต่อไปตามวิถี EMP ซึ่งมีปฏิกิริยาย้อนกลับ

ในการสังเคราะห์โพลีเบต้าไฮดรอกซีบีวทายเรต แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้ซัคซิเนตเปลี่ยนไปเป็นอะเซทิลโคเอ็นไซม์เอ ต่อมาอะเซทิลโคเอ็นไซม์เอส่วนใหญ่ถูกเปลี่ยนไปเป็นโพลีเบต้าไฮดรอกซีบีวทายเรต

ในการสังเคราะห์กรดอะมิโนโดยใช้ซัคซิเนตเป็นแหล่งคาร์บอน ไม่พบปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันของซัคซินิลโคเอ็นไซม์เอใน *Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas spheroides* ด้วยเหตุนี้แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทั้ง 2 ชนิดทำให้ซัคซิเนตเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร TCA เพื่อนำอินเตอมีเดียตของวัฏจักรมาใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในการสังเคราะห์กรดอะมิโน

โฟโตเมตาบอลิซึมของกรดอะมิโน แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีกำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีกำมะถันหลายชนิด สามารถใช้กรดอะมิโนเป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการเจริญในที่มืดและไม่มีการสังเคราะห์แสง แบคทีเรียดังกล่าวทำให้กรดอะมิโนเปลี่ยนแปลงได้ตีมากกว่าในที่ที่ไม่มีแสง



รูปที่ 11-11 โฟโตเมตาบอลิซึมของซัคซิเนตโดย *Rhodospirillum rubrum* และ *Rhodopseudomonas spheroides*

โดยนำกรดอะมิโนไปทำปฏิกิริยากับอินเตอร์มีเดียของวัฏจักร TCA เพื่อสังเคราะห์กรดอะมิโนชนิดใหม่ แล้วนำกรดอะมิโนที่เกิดขึ้นไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีน การสังเคราะห์โปรตีนนี้เกิดได้ดียิ่งขึ้นเมื่อมีคาร์บอนไดออกไซด์ในสภาวะแวดล้อม ทั้งนี้เนื่องจากคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน ด้วยการทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอกซิเลชันของอินเตอร์มีเดียในกระบวนการเมตาบอลิซึมกรดอะมิโน ส่วนในที่ไม่มีแสงแบคทีเรียดังกล่าวทำให้กรดอะมิโน เช่น กลูตาเมตเปลี่ยนแปลงไปเป็นแอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนแอมโมเนียที่เกิดขึ้นยับยั้งไม่ให้แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนจากอากาศมาใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับการสังเคราะห์กรดอะมิโน

โฟโตเมตาบอลิซึมของโมโนแซคคาไรด์ ในสภาวะแอนแอโรบิกที่มีแสงและในสภาวะแอนแอโรบิกที่ไม่มีแสง แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำกัสนำมาใช้โมโนแซคคาไรด์บางชนิดเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ เช่น *Rhodospseudomonas capsulata* ใช้กลูโคสและฟรุคโตสเป็นแหล่งคาร์บอน *Rhodospseudomonas spheroides* ใช้กลูโคสและแมนโนสเป็นแหล่งคาร์บอน *Rhodospirillum rubrum* ใช้ฟรุคโตสเป็นแหล่งคาร์บอนแต่ไม่สามารถใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน *Rhodospseudomonas gelatinosa* ใช้กลูโคส ฟรุคโตสและแมนโนสเป็นแหล่งคาร์บอน

การใช้โมโนแซคคาไรด์เป็นแหล่งคาร์บอนในสภาวะแอนแอโรบิกที่มีแสงเกิดขึ้นได้ในอัตราสูงพอควร จากการศึกษาโดยใช้ *Rhodospseudomonas spheroides* พบว่า คาร์บอนของสารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นในสภาวะดังกล่าวเป็นคาร์บอนจากกลูโคสมากกว่า 50% สำหรับวิถีในการเปลี่ยนแปลงโมโนแซคคาไรด์ แบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำกัสนำทำให้โมโนแซคคาไรด์เปลี่ยนแปลงโดยมีวิถีในการเปลี่ยนแปลงเฉพาะ การเปลี่ยนแปลงตามวิธีดังกล่าวมีการด 2-คีโต-3-ดีออกซีกลูโคนิก (2-keto-3-deoxygluconic acid) เป็นอินเตอร์มีเดียและผลของการเปลี่ยนแปลงได้กลีเซอรอลดีไฮด์ฟอสเฟตและไพรูเวต ส่วนฟรุคโตสถูกทำให้

เปลี่ยนแปลงแตกต่างจากโมโนแซคคาไรด์ชนิดอื่น ๆ คือ ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงตามวิถี EMP



## สรุปเนื้อหาสำคัญ

1. แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้เกิดกระบวนการสังเคราะห์แสงเฉพาะในสภาวะแอนแอโรบิกที่มีแสง โดยอาศัยพลังงานจากแสงทำให้เกิด ATP และโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ ต่อมนำ ATP และโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นไปใช้ในการสังเคราะห์สารต่าง ๆ ซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ ด้วยการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน โดยทำให้คาร์บอนไดออกไซด์เปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรคัลวินและวัฏจักร TCA ซึ่งมีปฏิกิริยาย้อนกลับ
2. แบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันโดยส่วนใหญ่ มีคุณสมบัติเป็นพวกอ้อพลิเกดแอนแอโรบและอ้อพลิเกดไฟโคโทรฟที่ใช้สารประกอบอนินทรีย์ก้ำมะถันและไฮโดรเจนโมเลกุลเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง แบคทีเรียใน 2 กลุ่มนี้บางชนิดเจริญในที่มืดออกซิเจนโดยได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากปฏิกิริยาเคมี บางชนิดใช้สารประกอบอนินทรีย์เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงและบางชนิดใช้สารประกอบอนินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์โดยอาศัยพลังงานแสงได้ สำหรับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำมะถันโดยส่วนใหญ่มีคุณสมบัติเป็นพวกแฟคคัลเดติบแอนแอโรบซึ่งใช้ไฮโดรเจนโมเลกุลและสารประกอบอนินทรีย์เป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสง ใช้สารประกอบอนินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์โดยอาศัยพลังงานจากแสงและเจริญได้ดีในสภาวะแอนแอโรบที่ไม่มีแสง ยกเว้นแบคทีเรียบางชนิดในกลุ่มนี้ที่ใช้สารประกอบอนินทรีย์ก้ำมะถันเป็นตัวรีดิวซ์หรือตัวให้อิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงได้
3. องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงประกอบด้วยรงควัตถุซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงและจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมี รงควัตถุซึ่งทำหน้าที่รับพลังงานจากแสงได้แก่ แบคทีอริโอคลอโรฟิลและคาโรทีนอยด์ ส่วนจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมีประกอบด้วย แบคทีอริโอคลอโรฟิล ไฮโดรโครมคริโนนและเฟอร์รีดอกซิน แบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันมีจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไป

เป็นพลังงานเคมีอยู่ตรงส่วนเยื่อเซลล์ ในขณะที่แบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันกับแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำมะถันมีจุดศูนย์กลางที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานเคมีอยู่ตรงส่วนเยื่อโครมาทอโฟล

4. แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงแต่ละกลุ่มมีชนิดของรงควัตถุที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสงแตกต่างกัน การสังเคราะห์รงควัตถุดังกล่าวนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงและปริมาณออกซิเจน (ดูหัวข้อ องค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์แสง)
5. แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้เกิดกระบวนการโฟโตฟอสโฟริเลชันได้ 2 แบบ คือ ไซคลิก-โฟโตฟอสโฟริเลชันกับนั้น ไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชัน ไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชันเกิดขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยสับสเตรตภายนอกเซลล์และผลของกระบวนการนี้ได้ ATP ส่วนนั้น ไซคลิกโฟโตฟอสโฟริเลชันเกิดขึ้นโดยอาศัยสับสเตรตภายนอกเซลล์และผลของกระบวนการนี้ได้ ATP กับโคเอ็นไซม์รูปรีดิวซ์ซึ่งส่วนใหญ่เป็น  $\text{NADH}+\text{H}^+$
6. สมมุติฐานการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการโฟโตฟอสโฟริเลชันของแบคทีเรียสีเขียวที่มีก้ำมะถันมีการขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักรอยู่ที่เดียวกัน ส่วนสมมุติฐานการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการโฟโตฟอสโฟริเลชันของแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถัน มีการขนส่งอิเล็กตรอนเป็นวัฏจักรและไม่เป็นวัฏจักรอยู่คนละที่ นอกจากนี้ความเข้มของแสงยังมีผลต่อการขนส่งอิเล็กตรอนในกระบวนการโฟโตฟอสโฟริเลชันของแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันด้วย (ดูหัวข้อ โฟโตฟอสโฟริเลชันของแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสง)
7. เมื่อแบคทีเรียสีม่วงและสีแดงที่มีก้ำมะถันบางชนิดและแบคทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำมะถันเจริญในสภาวะแอโรบิกที่ไม่มีแสง แบคทีเรียได้รับพลังงานสำหรับการเจริญจากกระบวนการหายใจ แต่เมื่อแบคทีเรียดังกล่าวเจริญในสภาวะแอโรบิกที่มีแสง แสงยับยั้งกระบวนการหายใจและออกซิเจนยับยั้งการสังเคราะห์เอ็นไซม์ที่สำคัญของวัฏจักรคลอวิน

8. กระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์เกิดขึ้นในที่มืดหรือไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับวิถีในกระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์ขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย ชนิดของสารประกอบอินทรีย์และสภาวะแวดล้อมที่แบคทีเรียเจริญอยู่
9. แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA สมบูรณ์และมีวัฏจักร TCA ไม่สมบูรณ์อาศัยพลังงานจากแสงทำให้เกิด ATP และ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์ นอกจากนี้แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA สมบูรณ์ยังได้รับ ATP และ  $\text{NADH}+\text{H}^+$  เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของสารประกอบอินทรีย์จากการทำให้สารประกอบอินทรีย์เปลี่ยนแปลงตามวัฏจักร TCA ด้วย
10. กระบวนการโฟโตเมตาบอลิซึมสารประกอบอินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้สารประกอบอินทรีย์นั้นเปลี่ยนแปลงไปเป็นโพลิเบต้าไฮดรอกซีบิวทายเรต โพลีแซคคาไรด์หรือคาร์บอนของกรดอะมิโน ในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโพลิเบต้าไฮดรอกซีบิวทายเรต แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้สารประกอบอินทรีย์เปลี่ยนแปลงไปเป็นอะเซทิลโคเอ็นไซม์เอ หลังจากนั้นทำให้อะเซทิลโคเอ็นไซม์เอเปลี่ยนแปลงต่อไปเป็นโพลิเบต้าไฮดรอกซีบิวทายเรต ในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นโพลีแซคคาไรด์ โดยส่วนใหญ่แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้สารประกอบอินทรีย์เปลี่ยนแปลงไปเป็นอินเตอมีเดียตของวิถี EMP วัฏจักรกลาวิน วัฏจักร TCA และวัฏจักรไกลออกซิเลต หลังจากนั้นทำให้เปลี่ยนแปลงต่อไปตามวิถีและวัฏจักรดังกล่าว เพื่อให้ได้พรีเคอร์เซอร์สำหรับการสังเคราะห์โพลีแซคคาไรด์ ส่วนในการเปลี่ยนแปลงไปเป็นคาร์บอนของกรดอะมิโน โดยส่วนใหญ่แบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงทำให้สารประกอบอินทรีย์เปลี่ยนแปลงไปเป็นอินเตอมีเดียตของวัฏจักรกรดรีดักติบคาร์บอกซิลิก วัฏจักร TCA และวัฏจักรไกลออกซิเลต หลังจากนั้นทำให้เปลี่ยนแปลงต่อไปตามวัฏจักรดังกล่าว เพื่อให้ได้พรีเคอร์เซอร์สำหรับการสังเคราะห์กรดอะมิโน

11. วัฏจักรกรดรีดักตีบคาร์บอกซิลิก คือ วัฏจักร TCA ซึ่งมีปฏิกิริยาย้อนกลับที่ขยายออกไป แคมทีเรียที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA สมบูรณ์ ทำให้สารประกอบอินทรีย์ซึ่งเป็นแหล่งคาร์บอนเปลี่ยนแปลงตามวัฏจักรกรดรีดักตีบคาร์บอกซิลิกได้ ส่วนแคมทีเรียที่สังเคราะห์แสงซึ่งมีวัฏจักร TCA ไม่สมบูรณ์ ไม่สามารถทำให้สารประกอบอินทรีย์เปลี่ยนแปลงดังกล่าวได้ เนื่องจากไม่มีเอ็นไซม์มาเลตไฮโดรจีเนสและเอ็นไซม์อัลฟาคีโตกลูตาเรตซินทีเอส
12. แคมทีเรียที่สังเคราะห์แสงซึ่งสามารถใช้กรดอะมิโนเป็นแหล่งไนโตรเจน ทำให้กรดอะมิโนเปลี่ยนแปลงในที่มีแสงได้ดีมากกว่าในที่ไม่มีแสง โดยนำกรดอะมิโนไปทำปฏิกิริยากับอินเตอร์มีเดียของวัฏจักร TCA เพื่อสังเคราะห์กรดอะมิโนชนิดใหม่หรือทำให้กรดอะมิโนเปลี่ยนแปลงแล้วได้แอมโมเนีย ค่อยนำมาแอมโมเนียที่เกิดขึ้นไปใช้ เป็นแหล่งไนโตรเจนในการสังเคราะห์กรดอะมิโนชนิดใหม่ต่อไป
13. ในสภาวะแอนแอโรบที่มีแสงและในสภาวะแอโรบที่ไม่มีแสง แคมทีเรียสีม่วงที่ไม่มีก้ำมะถันสามารถใช้โมโนแซคคาไรด์บางชนิดเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์สารซึ่งเป็นส่วนประกอบของเซลล์ โดยมีวิถีในการเปลี่ยนแปลงเฉพาะ ยกเว้นฟรุคโตสที่ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงแตกต่างจากโมโนแซคคาไรด์ชนิดอื่น ๆ คือ ถูกทำให้เปลี่ยนแปลงตามวิถี EMP