บทที่ 1
เรื่อง จุลินทรีย์ในกระบวนการทางชีวภาพ

1.1 ลักษณะการดำรงอยู่ของจุลินทรีย์

1.1.1 การแบ่งประเภทของจุลินทรีย์ตามแหล่งพลังงาน และแหล่งคาร์บอนที่ใช้ จะได้

1.1.1.1 โฟโตโทรฟ (Phototrophs) เป็นจุลินทรีย์ที่ใช้พลังงานจากแสงแดด เพื่อมาใช้ในการสร้างอาหาร จุลินทรีย์ประเภทนี้จะมีคลอโรฟิลล์ เป็นรงควัตถุในการสังเคราะห์แสง แบ่งได้ 2 ชนิด ตามแหล่งคาร์บอน

1.1.1.1.1 โฟโตลิโทโทรฟ (Photolithotrophs) เป็นการใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอนและใช้พลังงานจากแสงทำให้น้ำแตกตัวเป็นไฮโดรเจนกับออกซิเจน หรือทำให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์แตกตัวเป็นไฮโดรเจนกับกำมะถัน โดยไฮโดรเจนจะรวมตัวกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นสารประกอบอินทรีย์คาร์โบไฮเดรท ในกระบวนการนี้จะมีน้ำและสารประกอบซัลเฟอร์ในรูปรีดิวซ์เป็นตัวให้อิเลคตรอน จุลินทรีย์ประเภทนี้ เช่น แบคทีเรียประเภท Purple sulfur green sulfur bacteria และ Green sulfur bacteria เช่น *Chromatium okenii* ที่สามารถใช้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นสารอนินทรีย์ที่ทำหน้าที่ให้อิเลคตรอน

$$H_2S \longrightarrow S + 2e^- + 2H^+$$

1.1.1.1.2. โฟโตออร์แกโนโทรฟ (Photoorganotrophs) สามารถใช้พลังงานโดยมีแหล่งคาร์บอนเป็นสารอินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเลคตรอน กับไฮโดรเจนและสารอินทรีย์โดยไฮโดรเจนจะไปรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรท เช่น แบคทีเรียประเภท Non sulfur purple bacteria

1.1.1.2 เคโมโทรฟ (Chemotrophs) เป็นจุลินทรีย์ที่สามารถใช้พลังงานจากการออกซิเดชัน และรีดักชันของสารต่างๆไปใช้สร้างสารอาหารต่างๆ ซึ่งแบ่งได้ตามแหล่งคาร์บอนดังนี้

1.1.1.2.1 เคโมลิโทโทรฟ (Chemolithotrophs) จุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน โดยอนินทรีย์สารที่เข้าสู่เซลล์จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนได้เป็นพลังงาน ที่จะนำไปทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน โดยไฮโดรเจนจะไปรวมตัวกับคาร์บอนไดออกไซด์ได้เป็นอนินทรีย์ของคาร์โบไฮเดรท ในกรณีที่อนินทรีย์สารที่เข้าสู่เซลล์เป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จะได้ กำมะถัน แต่ถ้าเป็นกำมะถัน (S) จะได้ซัลเฟตเกิดขึ้นตามลำดับ

1.1.1.2.2 เคโมออร์กาโนทรอฟ (Chemoorganotrophs) จุลินทรีย์จะใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอน ซึ่งจะถูกย่อยสลายด้วยปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันได้เป็นพลังงานที่จะถูกนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ รวมถึงสารตัวกลางที่จำเป็นต่อการสร้างสารต่างๆของเซลล์ด้วย

1.1.2 การแบ่งประเภทของจุลินทรีย์ตามความสามารถในการสังเคราะห์อาหาร จะได้

1.1.2.1 ออโตโทรฟ (Autotrophs) จุลินทรีย์ที่สามารถสังเคราะห์อาหารได้เอง โดยการใช้อนินทรีย์สารเป็นวัตถุดิบ และมีแหล่งพลังงานจากแสงหรือปฏิกิริยาทางเคมีในกระบวนการออกซิเดชันรีดักชัน เช่น โฟโตออโตโทรฟ หรือ เคโมออโตโทรฟ ตามลำดับ

1.1.2.2 เฮเทอโรโทรฟ (Heterotrophs) เป็นจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถสังเคราะห์อาหารเองได้ จำเป็นต้องการสารอาหารต่างๆจากภายนอก เช่น โฟโตเฮเทอโรโทรฟ และ เคโมเฮเทอโรโทรฟ

1.2. การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับคาร์บอนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

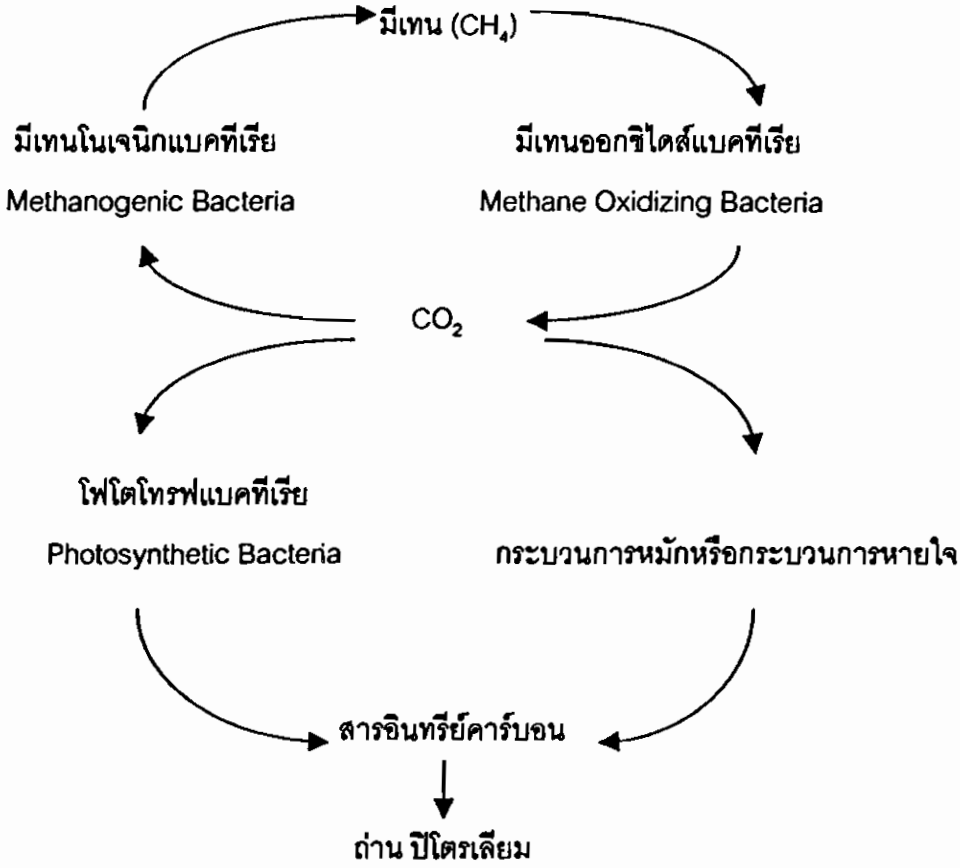
1.2.1 การเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นอินทรีย์สาร โดยกระบวนการสังเคราะห์แสง

พืชและแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงได้หลายชนิดที่สามารถเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ให้เป็นอินทรีย์สารได้โดยกระบวนการสังเคราะห์แสง

1.2.2 การเปลี่ยนอินทรีย์สารโดยกระบวนการทางชีวภาพ

จุลินทรีย์และแบคทีเรียสามารถย่อยและสลายอินทรีย์สารหรือสิ่งมีชีวิตที่ตายแล้วให้เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศได้ ในขณะที่กลูโคสที่ได้จากการสังเคราะห์แสง จะเป็นสารเริ่มต้นในการเปลี่ยนแปลงเป็นอินทรีย์สารชนิดอื่นๆ ตลอดจนการสร้างพลังงานในกระบวน

การทางชีวภาพ ถ้าเป็นการย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน จะให้แก๊สมีเทน



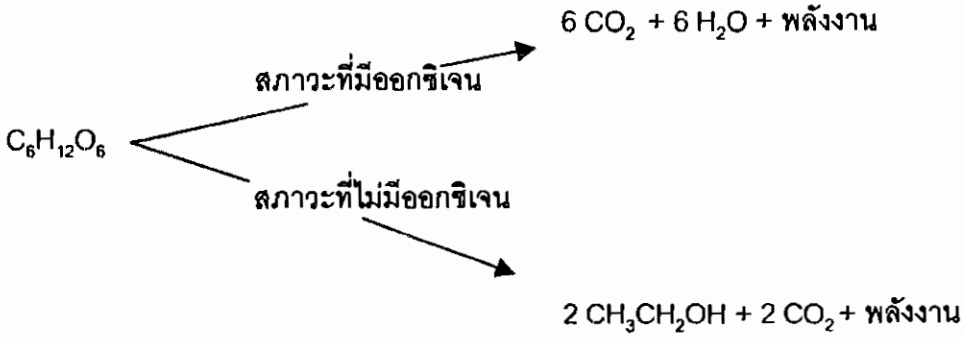
รูปที่ 1.1 แสดงวัฏจักรของคาร์บอน

1.2.3 การย่อยสลายเซลลูโลส

เซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่มีปริมาณมากที่สุดในธรรมชาติ ซึ่งประกอบด้วยการเรียงตัวต่อกันของกลูโคสเป็นสายตรงด้วยพันธะ β(1-4) ไกลโคซิดิก (glycosidic bond) เนื่องจากเซลลูโลสเป็นสารที่เป็นโมเลกุลที่ใหญ่และต่อกันเป็นสายยาวที่ไม่มีแขนง จึงทำให้ไม่ละลายน้ำ

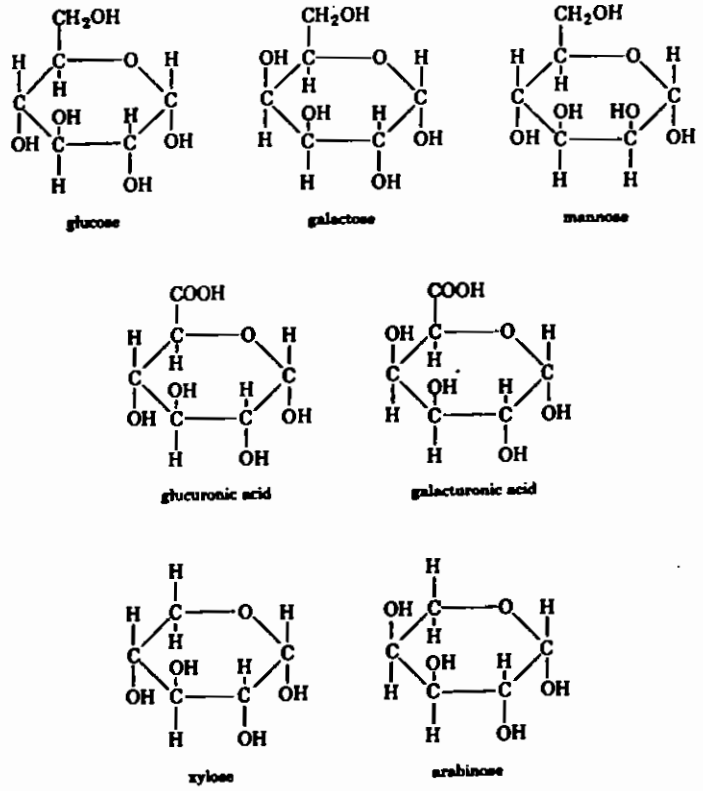
เซลลูโลส $\xrightarrow{\text{cellulase}}$ เซลโลไบโอส $\xrightarrow{\beta\text{-glucosidase}}$ กลูโคส

ในสภาพที่มีออกซิเจน ผลจากการย่อยสลายเซลลูโลสจะทำให้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนการย่อยสลายเซลลูโลสในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน จะให้ผลผลิตที่แตกต่างกันไปขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์แต่ละชนิด เช่น *Clostridium cellobioparum* จะให้ผลผลิตที่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไฮโดรเจน เอทิลแอลกอฮอล์ กรดอะซิติก กรดแลคติก และกรดฟอร์มิก โดยเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลลูโลส คือ เอนไซม์เซลลูเลสสามารถผลิตโดยเชื้อ *Aspergillus niger*, *Trichoderma viride* เป็นต้น และผลที่ได้จากการย่อยสลาย คือ เซลโลทิโตส (cellotetrose) เซลโลตริโอส (cellotriose) และเซลโลไบโอส (cellobiose) ตามลำดับ



1.2.4 การย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส

เฮมิเซลลูโลสเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ (Heterogeneous polymer) ที่ประกอบด้วยน้ำตาลมอนอแซคคาไรด์หลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลคโตส แมนโนส อะราบิโนส ไซโลส กรดกลูคูโรนิก และกรดกาแลคทูโรนิก ซึ่งเป็นอินทรีย์สารที่พบได้ในเนื้อเยื่อของพืชทั้งไม้เนื้ออ่อนและไม้เนื้อแข็ง การย่อยเฮมิเซลลูโลสจำเป็นต้องใช้การทำงานของเอนไซม์หลายชนิดร่วมกัน เช่น *Fusarium oxysporum* เป็นจุลินทรีย์ที่มีทั้งเอนไซม์ arabanase xylanase galactanase เป็นต้น

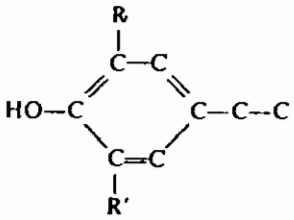


รูปที่ 1.2 แสดงสารที่เป็นองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา Alexander, M., 1977

1.2.5 การย่อยสลายลิกนิน

ลิกนินเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่พบในผนังเซลล์เนื้อเยื่อ และมักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส มีโครงสร้างที่เป็นอะโรมาติก โดยมีหน่วยย่อยที่มีโครงสร้างเป็นฟีนิลโพรเพน (phenyl-propane,C_6-C_3) และมีหมู่ของเมททอกซิล (methoxyl group) ที่ C_6 ของวงเบนซีนที่เชื่อมกับ C_3 ของโพรพิล นอกจากนั้นยังมีหมู่อื่นที่มาเกาะบนตำแหน่งของเบนซีน เช่น ไฮดรอกซิล โดยมีจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถย่อยสลายลิกนินได้ โดยเฉพาะเห็ดจะมีเอนไซม์ ligninase หรือ lignase เช่น *Agricus* spp นอกจากนั้นยังมีเชื้อ *Cladosporium* spp, *Aspergillus* spp เป็นต้น



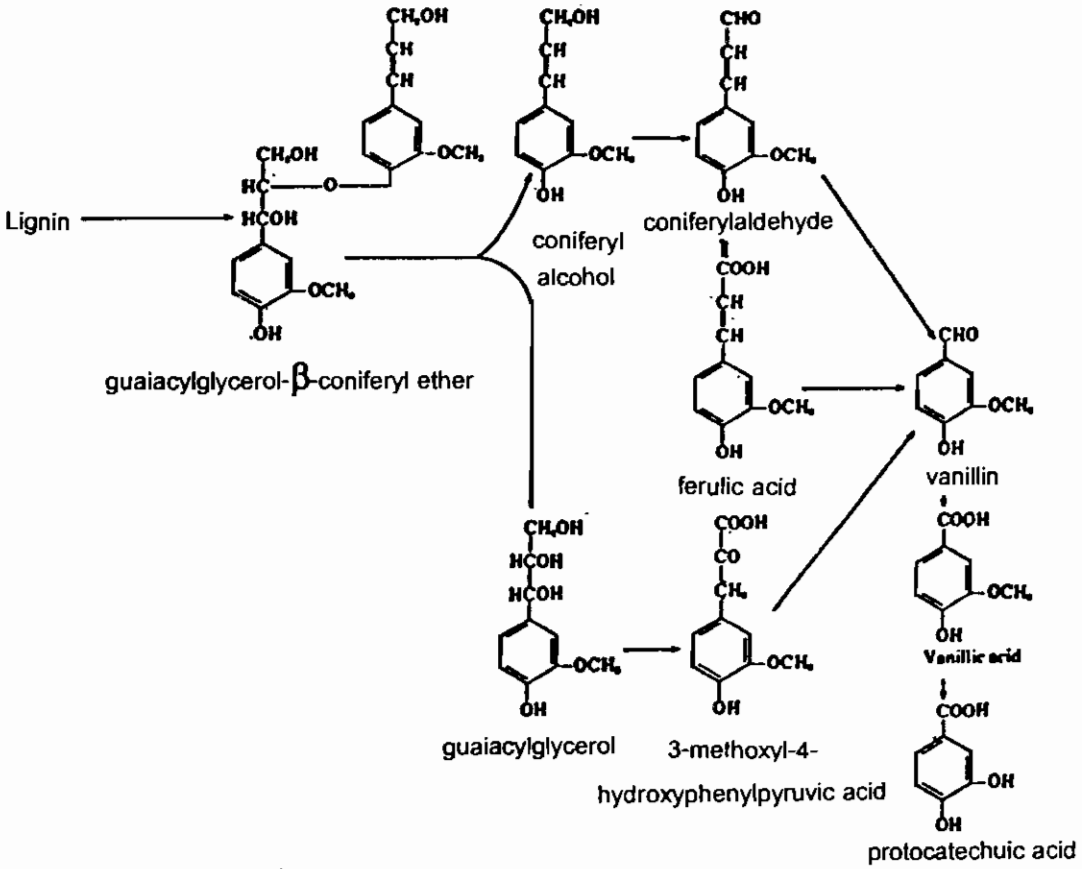
โดยที่ R และ R' เป็น H

R เป็น H และ R' เป็น OCH_3

R และ R' เป็น OCH_3

รูปที่ 1.3 แสดงโครงสร้างของลิกนิน

ที่มา Ken,K., 1994

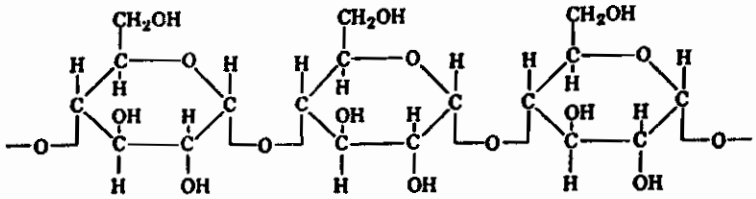


รูปที่ 1.4 แสดงการย่อยสลายของลิกนินโดยจุลินทรีย์ ring opening

ที่มา Alexander, M., 1977

1.2.6 การย่อยสลายแป้ง

แป้งเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ อะมิโลส (amylose) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α-(1-4) ในขณะที่อะมิโลเพคติน (amylopectin) จะต่อกันด้วยพันธะ α-(1-4) เช่นกัน แต่มีแขนงแยกออกไปประมาณ 25-30 หน่วยของกลูโคสด้วยพันธะ α -(1- 6) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์อะไมเลสที่ผลิตได้จากเชื้อ *Bacillus subtilis* *Aspergillus oryzae* เป็นต้น

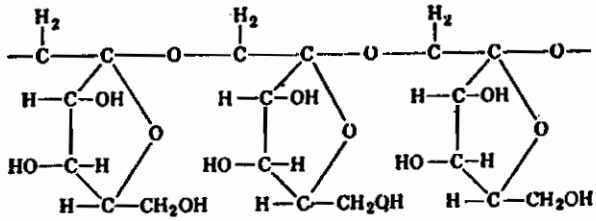


รูปที่ 1.5 แสดงโครงสร้างของแป้ง

ที่มา Alexander, M., 1977

1.2.7 การย่อยสลายอินนูลิน

อินนูลินเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลฟรุกโตส ซึ่งพบได้ในส่วนของใบ ลำต้น รากของพืช โดยอินนูลินสามารถถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์อินนูลิเนส (inulinase) หรือ 1,2-fructosanase และ 2,6-fructosanase

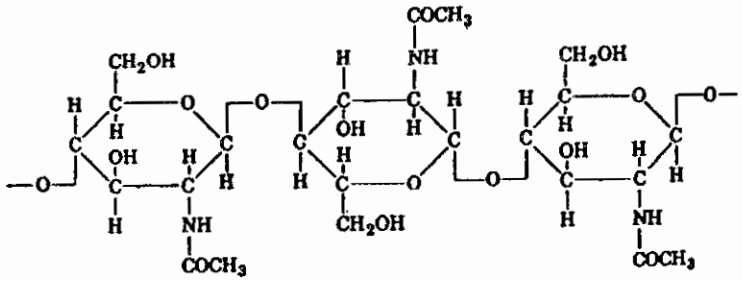


รูปที่ 1.6 แสดงโครงสร้างของอินนูลิน

ที่มา Alexander, M., 1977

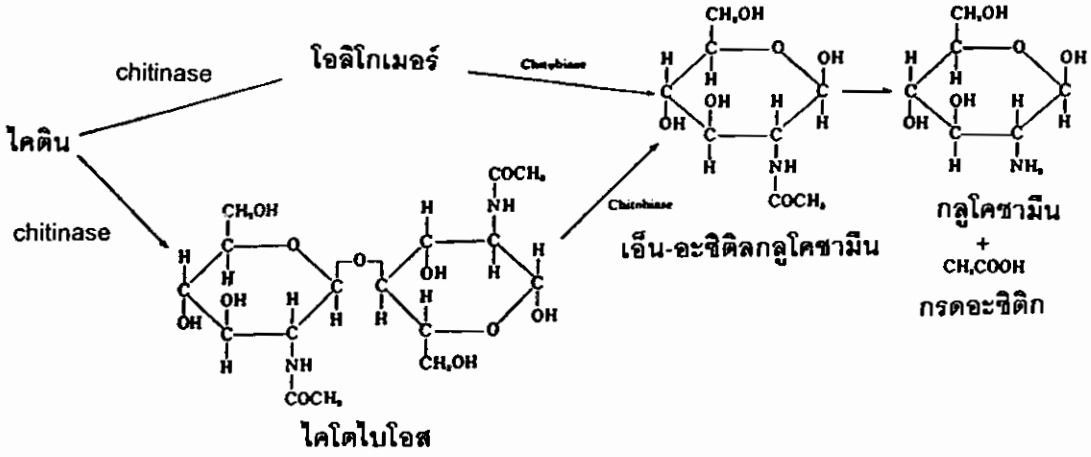
1.2.8 การย่อยสลายไคติน

ไคติน (chitin) พบในโครงสร้างของเปลือกนอกของสัตว์จำพวก กุ้ง ปูและแมลงต่างๆ นอกจากนั้นยังพบได้ในผนังเซลล์ของเห็ดรา และสาหร่ายบางสายพันธุ์ด้วย ไคตินเป็นสารพอลิเมอร์ของน้ำตาลอะมิโน (amino sugar) ที่เรียกว่า N-acetyl-D-glucosamine โดยมีการเรียงตัวต่อกันด้วยพันธะ β-(1-4) ไคตินไม่ละลายในน้ำ แต่สามารถละลายได้ในสารอินทรีย์ต่างๆ และสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ chitinase ไคตินเป็นพอลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรงที่มีโครงสร้างทางเคมีคล้ายกับเซลลูโลส แต่ต่างกันตรงที่หน่วยย่อยของเซลลูโลส คือ กลูโคส ส่วนหน่วยย่อยของไคติน คือ N-acetyl-D-glucosamine หรือ 2-acetamido-2-deoxy-D-glucose ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกลูโคส ที่เรียงต่อกันด้วยพันธะ β- (1- 4) และสามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ โดยมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง คือ เอนไซม์ Chitinase (EC 3.2.1.14) ซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายสายตรงของไคตินแบบสุ่มตรงตำแหน่งพันธะ β-(1-4) ทำให้ได้ N-acetyl-chitooligosaccharide เอนไซม์ Chitosanase (EC 3.2.1.132) ซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายสายของไคโตซานแบบสุ่มตรงตำแหน่ง β -(1- 4) ทำให้ได้ chitooligasaccharide เอนไซม์ Lysozyme (EC 3.2.1.17) เป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่คล้ายกับเอนไซม์ chitinase เอนไซม์ N-acetyl glucosaminidase (EC 3.2.1.30) และ N-aceylhexosaminidase (EC 3.2.1.52) ทำหน้าที่ย่อยสลาย N-acetylchitooligosaccharides เป็น N-acetyl-glucosamine โดยเริ่มจากปลายของสายโมเลกุล



รูปที่ 1.7 แสดงโครงสร้างของไคติน

ที่มา Alexander, M., 1977

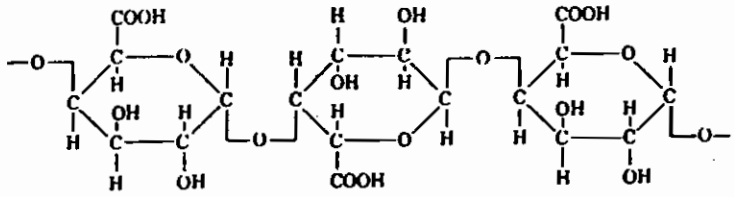


รูปที่ 1.8 แสดงการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายของไคติน

ที่มา Alexander, M., 1977

1.2.9 การย่อยสลายเพคติน

เพคติน (pectic) เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช ที่ประกอบด้วยกรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) และอนุพันธ์ ที่เรียงต่อกันด้วยพันธะเมทิลเอสเทอร์ ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์เพคเตท ไลเอส (pectate lyase) ซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายพันธะไกลโคซิลในเพคตินหรือกรดเพคติน เอนไซม์เพคตินเอสเทอเรส (pectinesterase) จะย่อยสลายหมู่เมทิลจากสารประกอบเพคติน เอนไซม์พอลิกาแลคทูโรเนส (polygalacturonase) จะย่อยสลายพันธะไกลโคซิลในสารประกอบเพคติน



รูปที่ 1.9 แสดงโครงสร้างของเพคติน

ที่มา Alexander, M., 1977

1.3. การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับไนโตรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของโปรตีนและกรดนิวคลิอิก ทั้งในจุลินทรีย์ สัตว์ และเซลล์พืช

1.3.1 การเปลี่ยนสภาพของโปรตีนเป็นอนินทรีย์ไนโตรเจน

โปรตีนเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยกรดอะมิโน ที่สามารถถูกย่อยสลาย (proteolysis) โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์โปรติเอส (protease) เป็นเอนไซม์ประเภท exopeptidase ซึ่งย่อยพันธะเปปไทด์ของกรดอะมิโนที่อยู่ปลายข้างใดข้างหนึ่ง หรือที่ปลายทั้งสองของโปรตีน ส่วนเอนไซม์ประเภท Endopeptidase จะย่อยพันธะเปปไทด์อย่างอิสระภายในโปรตีน

$$\text{โปรตีน} \xrightarrow{\text{proteinase}} \text{เปปไทด์} \xrightarrow{\text{peptidase}} \text{กรดอะมิโน}$$

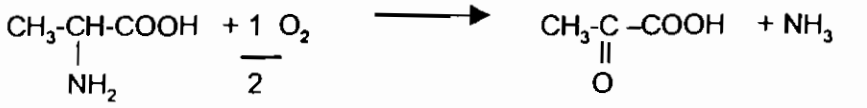
ผลสุดท้ายของการย่อยสลายโปรตีนและกรดอะมิโน จะขึ้นกับชนิดของเชื้อและสภาวะ ถ้าสภาวะของการย่อยสลายนั้นมีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ จะทำให้ได้ผลผลิตเป็นแอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์และซัลเฟต แต่ถ้าเป็นสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนจะทำให้ได้แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) อินโดล (indole) เมอร์แคปแทน (mercaptan) เอมีน (amine) เป็นต้น ซึ่งเป็นสารที่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นเน่า

1.3.2 กระบวนการไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน

กระบวนการไนโตรเจนมิเนอรัลไลเซชัน (Nitrogen Mineralization) เป็นกระบวนการที่ไนโตรเจนในรูปของสารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน ถูกย่อยสลายและเปลี่ยนเป็นสารอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น แอมโมเนียม โดยกรดอะมิโนที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีนแล้วสามารถเปลี่ยนสภาพต่อไป โดยกระบวนการดึงหมู่อะมิโนออกจากโมเลกุลของกรดอะมิโน (Deamination) ทำให้ได้แอมโมเนีย (NH_3) ด้วยกระบวนการออกซิเดชันและรีดักชัน หรือเรียกว่าปฏิกิริยาแอมมอนิฟิเคชัน (Ammonification)

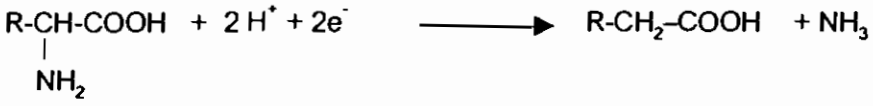
ปฏิกิริยาการออกซิเดชัน เพื่อดึงหมู่อะมิโน (Oxidative deamination)

$$\underset{\text{กรดอะมิโน}}{R\text{-}\underset{\displaystyle NH_2}{\underset{|}{C}}H\text{-}COOH} + \frac{1}{2}O_2 \longrightarrow \underset{\text{กรดคีโต}}{R\text{-}\overset{\displaystyle O}{\overset{\|}{C}}\text{-}COOH} + \underset{\text{แอมโมเนีย}}{NH_3}$$



อะลานีน กรดไพรูวิก แอมโมเนีย

ปฏิกิริยารีดักชัน เพื่อการดึงหมู่อะมิโน (Reductive deamination)



โดยปริมาณแอมโมเนียที่เกิดขึ้นนี้จะถูกจุลินทรีย์หรือพืชนำไปใช้ต่อในการเจริญ หรือการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นสารประกอบไนเตรตต่อไป นอกจากนี้ยังมีกระบวนการเปลี่ยนกรดอะมิโนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการดีคาร์บอซีเลชัน (Decarboxylation) ซึ่งแสดงได้ดังนี้

1.3.3 การเปลี่ยนกรดนิวคลิอิกในรูปของอนินทรีย์ไนโตรเจน

กรดนิวคลิอิกทั้งกรดไรโบนิวคลิอิก (RNA) และกรดดีออกซีนิวคลินิก (DNA) จะมีองค์ประกอบเป็นนิวคลิโอไทด์ ที่ประกอบด้วย น้ำตาล ไรโบส ฟอสเฟต และไนโตรเจนเบส โดย DNA และ RNA สามารถถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ ribonuclease (Rnase) เช่น *Bacillus* spp. *Pseudomonas* spp และ *Mycobacterium* spp และเอนไซม์ deoxyribonuclease (Dnase) เช่น *Arthrobacter* spp. *Clostridium* spp. *Fusarium* spp. เป็นต้น ส่วนไนโตรเจนที่ได้ คือ เบสพิวรีน (purine) และไพริมิดีน (pyrimidine) สามารถถูกสลายต่อได้แอมโมเนียและยูเรีย โดย *Psudomonas* spp. *Micrococcus* spp. *Clostridium* spp. เป็นต้น

1.3.4 กระบวนการย่อยสลายยูเรีย

ยูเรียที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายของโปรตีนหรือกรดนิวคลิอิก หรือปุ๋ยเคมี จะถูกย่อยสลายต่อเป็นแอมโมเนียได้ด้วยเอนไซม์ยูรีเอส (urease) ซึ่งได้จากเชื้อแบคทีเรีย เช่น *Bacillus* spp. *Psudomonas* spp. และ *Mycobacterrium* spp เป็นต้น โดยการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น จะมีผลต่อความเป็นด่างที่เพิ่มขึ้น เมื่อมีการเกิดแอมโมเนียเพิ่มขึ้น

$$CO(NH_2)_2 + H_2O \xrightarrow{\text{urease}} H_2NCOONH_4 \longrightarrow 2\,NH_3 + CO_2$$

ยูเรีย แอมโมเนียมคาร์บาเมท

เนื่องจากแอมโมเนียที่เกิดขึ้นมักถูกเปลี่ยนเป็นเกลือของแอมโมเนียม (NH_4^+) ในสภาวะที่เป็นกลางหรือเป็นกรด โดยที่

$$NH_3 + H^+ \rightleftharpoons NH_4^+$$

1.3.5 กระบวนการไนตริฟิเคชัน

กระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เป็นการเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนเตรต โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ใน 2 ขั้นตอน

1.3.5.1 การเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นสารประกอบไนไตรต์ ในกระบวนการไนเตรติฟิเคชัน (Nitratification) โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ประเภท *Nitrosomonas* spp เช่น *N. europaea* *N.oligocarbogenes* สามารถได้พลังงานจากกระบวนการออกซิเดชันแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ ซึ่งเป็นสารที่อันตรายต่อพืชและจุลินทรีย์ ถ้ามีการสะสมในดินเป็นเวลานานๆ จะมีผลทำให้พืชหยุดการเจริญได้

$$2\,NH_4^+ + O_2 \longrightarrow 2\,NH_2OH + 2\,H^+$$

$$NH_4^+ + 1.5\,O_2 \longrightarrow NO_2^- + 2\,H^+ + H_2O + 275 \text{ กิโลกรัม}$$

1.3.5.2 การเปลี่ยนไนไตรต์เป็นไนเตรต ในกระบวนการไนไตรติฟิเคชัน (Nitritification) โดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ประเภท *Nitrobacter* spp เช่น *N. agilis* *N. winogradski*

$$NO_2^- + 0.5\ O_2 \longrightarrow NO_3^- + 75 \text{ กิโลกรัม}$$

จากกระบวนการทั้ง 2 ขั้นตอน จะพบว่ากระบวนการไนตริฟิเคชันนี้จะเกิดได้ดี ในสภาพที่มีออกซิเจน และจะได้ไนเตรต ซึ่งเป็นสารอาหารของพืชและจุลินทรีย์ที่สามารถนำไปใช้ต่อไปได้

เมื่อพิจารณาจลนพลศาสตร์ของกระบวนการไนตริฟิเคชัน จะพบว่าอัตราการเจริญของ *Nitrobacter* spp สูงกว่า *Nitrosomonas* spp ดังนั้นขั้นตอนที่จำกัดในกระบวนการไนตริฟิเคชัน คือ การเปลี่ยนแอมโมเนียเป็นไนไตรต์ โดยเชื้อ *Nitrosomonas* spp ซึ่งแสดงอัตราการเจริญจำเพาะในลักษณะของสมการโมนอดได้ โดย

$$\mu = \frac{\mu_m\ [NH_4^+]}{K_s + [NH_4^+]}$$

โดยที่ μ เป็นอัตราการเจริญจำเพาะของ *Nitrosomonas* spp (ต่อวัน)

μ_m เป็นอัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด (ต่อวัน)

$[NH_4^+]$ เป็นความเข้มข้นของแอมโมเนียม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

K_s เป็นค่าคงที่ของแอมโมเนียกับ *Nitrosomonas* spp (มิลลิกรัมต่อลิตร)

อัตราการออกซิเดชันของแอมโมเนียม (q) จะเกี่ยวข้องกับอัตราการเจริญจำเพาะของเชื้อ โดยที่

$$q = \frac{\mu}{\text{Yield}}$$

เมื่อ Yield เป็นผลได้ของการเจริญ

เมื่อพิจารณาในระบบบำบัดน้ำทิ้ง จะพบว่าปริมาณออกซิเจนจะเป็นพารามิเตอร์ที่จำกัดในการควบคุมการเจริญของเชื้อประเภทไนตริไฟเออร์ (Nitrifier Microorganism) ดังนั้นจึงสามารถดัดแปลงสมการได้ ดังนี้

$$\mu = \frac{\mu_m [NH_4^+]}{K_S + [NH_4^+]} \frac{[DO]}{K_0 + [DO]}$$

เมื่อ [DO] เป็นความเข้มข้นของออกซิเจนที่ละลายได้ (mg/l)

K_0 เป็นค่าคงที่ของออกซิเจน โดยมีค่าประมาณ 0.15 – 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ขึ้นกับอุณหภูมิ

ในกรณีที่พิจารณาว่ามีปัจจัยอื่นๆที่มีความสำคัญต่อจลนพลศาสตร์ด้วย เช่น อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง เป็นต้น สามารถแสดงสมการที่เกิดขึ้นได้ ดังนี้

$$\mu_n = \mu_m \left(\frac{[NH_4^+] - [N]}{0.4\, e^{0.118\,(T-15)} + [NH_4^+]} \right) \left(\frac{[DO]\, e^{0.095\,(T-15)}}{1 + [DO]} \right) (1.83)\,(pH_{opt} - pH)$$

เมื่อ μ_n เป็นอัตราการเจริญจำเพาะของจุลินทรีย์ประเภทไนตริไฟเออร์ ที่สามารถเปลี่ยนรูปแอมโมเนียมไปเป็นไนไตรต์และไนเตรตเทียบต่อเวลาและน้ำหนักของจุลินทรีย์ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมของ NO_3^--N ต่อกรัมเอ็มวีเอสเอสต่อชั่วโมง

T เป็นอุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

pH_{opt} เป็นพีเอชที่เหมาะสม เท่ากับ 7.2

μ_m เป็น 0.3 ต่อวัน

ส่วนปัจจัยที่มีต่อกระบวนการไนตริฟิเคชัน ได้แก่ สัดส่วนของแอมโมเนียต่อไนเตรต ปริมาณออกซิเจน ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ สัดส่วนของ BOD_5 ต่อ TKN (total kjeldahl nitrogen) และปริมาณสารพิษ โดยการเจริญของเชื้อ *Nitrosomonas* spp และ *Nitrobacter* spp จะขึ้นกับปริมาณแอมโมเนียและปริมาณไนเตรตที่มีตามลำดับ ส่วนปริมาณออกซิเจนจะมีความสำคัญต่อการควบคุมกระบวนการไนตริฟิเคชัน เช่น กระบวนการให้อากาศในระบบแอคติเวทเตดสลัดจ์ ควรให้มีปริมาณออกซิเจนไม่น้อยกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยกระบวนการออกซิไดส์แอมโมเนีย 1 มิลลิกรัม จะใช้ออกซิเจน 4.6 มิลลิกรัม

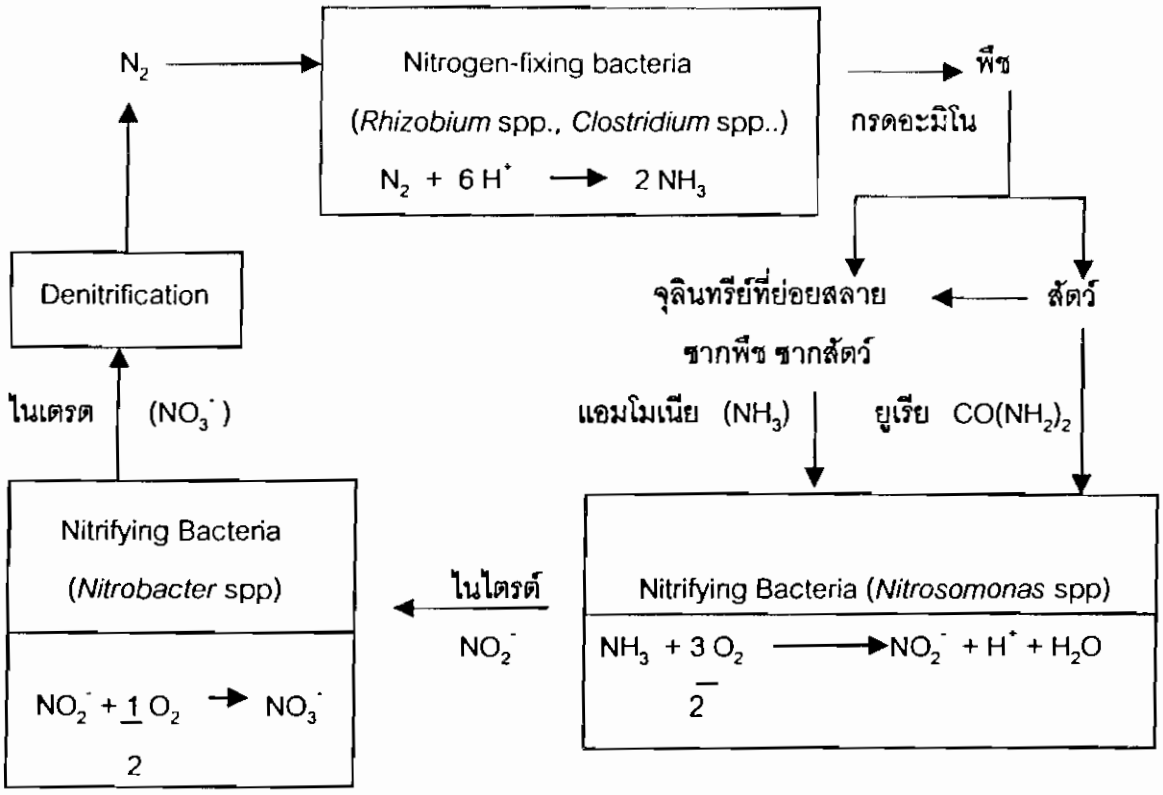
$$NH_3 + 2\,O_2 \longrightarrow NO_3^- + H^+ + H_2O$$

ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมจะประมาณ 30 องศาเซลเซียส ในขณะที่ความเป็นกรดด่างจะพบว่าในกรณีของเชื้อ *Nitrosomonas* spp และ *Nitrobacter* spp จะมีพีเอชที่เหมาะสมเป็น 7.5-8.5 และกระบวนการไนตริฟิเคชัน จะหยุดเมื่อมีความเป็นกรดเท่ากับ 6

1.3.6 กระบวนการรีดักชันของไนเตรตเป็นแอมโมเนีย

กระบวนการเปลี่ยนไนเตรตเป็นไนไตรต์และแอมโมเนียนั้น อาจกล่าวได้ว่าเป็นปฏิกิริยากลับกันกับกระบวนการไนตริฟิเคชัน กระบวนการนี้จะเกิดในสภาพที่ไม่มีออกซิเจน โดยมีไนเตรตทำหน้าที่รับอิเลคตรอนและไฮโดรเจนแทน และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้อง เช่น *Agrobacterium* spp. *Azotobacter* spp. *Miceococcus* spp. *Penicilium* spp. เป็นต้น

$$2\,HNO_3 \longrightarrow 2\,HNO_2 \longrightarrow 2\,NH_2OH \longrightarrow 2\,NH_3$$



รูปที่ 1.10 แสดงวัฏจักรของไนโตรเจน

1.3.7 กระบวนการดีไนตริฟิเคชัน

กระบวนการแปรสภาพของไนเตรตให้อยู่ในรูปของแก๊สไนโตรเจน โดยอาศัยแบคทีเรียประเภทเฮเทอโรโทรฟิก เช่น *Micrococcus denitrificans* เป็นต้น

nitrate reductase	nitrite reductase	nitric oxide reductase	nitrouse oxide reductase	
$2 NO_3^- \rightarrow$	$2 NO_2^- \rightarrow$	$2 NO \rightarrow$	$N_2O \rightarrow$	N_2
ไนเตรต	ไนไตรต์	ไนตริกออกไซด์	ไนตรัสออกไซด์	ไนโตรเจน
(+5)	(+4)	(+2)	(+1)	(0)

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของไนเตรต โดยไม่คำนึงถึงการนำไปใช้สร้างเซลล์

$$2\,NO_3^- + 2\,H^+ + 2.5\,C \longrightarrow N_2 + 2.5\,CO_2 + H_2O$$

$$5\,S + 6\,KNO_3 + 2\,H_2O \longrightarrow 3\,N_2 + K_2SO_4 + 4\,KHSO_4$$

หรือ $$5\,K_2S_2O_3 + 8\,KNO_3 + H_2O \longrightarrow 4\,N_2 + 9\,K_2SO_4 + H_2SO_4$$

1.3.8 การตรึงไนโตรเจน

ถ้าแบ่งตามประเภทของการตรึงไนโตรเจน (Nitrogen Fixation) ได้เป็น

1.3.8.1 การตรึงไนโตรเจนแบบอิสระ (Nonsymbiotic Nitrogen Fixation) โดยแบคทีเรียประเภทเฮเทอโรโทรฟ เช่น *Aerobacter* spp. *Pseudomonas* spp. แบคทีเรียประเภทเคโมออโตทรอฟ เช่น *Methanobacillus* spp. สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน เช่น *Anabaena* spp. *Nostoc* spp. จะสามารถตรึงไนโตรเจนได้ดีเมื่อมีแสงสว่าง โดยเฉพาะแบคทีเรีย *Azotobecter* spp. พบว่ามีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนได้สูง นอกจากนั้นยังสามารถใช้ไนโตรเจนในรูปอื่นๆได้ด้วย เช่น แอมโมเนีย ไนเตรต ไนไตรท์ ยูเรีย เป็นต้น

สภาวะที่มีผลต่อการตรึงไนโตรเจน จะพบว่า ปริมาณแอมโมเนีย ไนเตรต และสารประกอบไนโตรเจนอื่นๆที่มี ถ้ามีอยู่ปริมาณมาก จะทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศ เนื่องจากการใช้สารประกอบเหล่านี้สามารถใช้ได้ง่ายกว่า

1.3.8.2 การตรึงไนโตรเจนแบบอยู่ร่วมกัน (Symbiotic Nitrogen Fixation) การตรึงไนโตรเจนที่มีสิ่งมีชีวิตอย่างน้อยสองชนิดที่อาศัยอยู่ร่วมกันในลักษณะที่ให้ประโยชน์กัน เช่น การอยู่ร่วมกันของสาหร่ายกับเชื้อรา ที่เรียกว่าไลเคนส์ (Lichens) หรือแบคทีเรียประเภทไรโซเบียม (Rhizobium) กับพืชตระกูลถั่ว โดยไรโซเบียมจะได้รับคาร์บอนจากพืชตระกูลถั่ว ส่วนพืชตระกูลถั่วได้สารประกอบไนโตรเจนที่ไรโซเบียมสังเคราะห์ขึ้นจากแก๊สไนโตรเจน โดยไรโซเบียมที่เจริญอยู่โดยรอบรากของถั่ว จะเปลี่ยนทริปโทเฟนที่รากพืชปล่อยออกมาเป็นกรดอินโดลอะซิติก (indoleacetic acid, IAA) ซึ่ง IAA เป็นฮอร์โมนพืชที่ทำให้รากขนอ่อนม้วนตัวโดยรอบแบคทีเรีย เมื่อแบคทีเรียแทรกตัวผ่านเข้าไปยังผนังเซลล์เข้าไปอยู่ระหว่างผนังเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์แล้ว และมีการสร้างท่อเชื่อมที่เรียกว่า อินเฟคชันเทรด (infection thread) ซึ่งเป็นทางผ่านของแบคทีเรีย

ไปยังไซโตพลาสซึม นอกจากนั้นยังมีการสร้างฮอร์โมน kinetin ที่ทำให้เซลล์คอร์เทกซ์ของรากมีการแบ่งเซลล์ที่ผิดปกติจนเกิดเป็นปมขึ้น

$$N_2 + 6e^- + 12H_2O + 12ATP \xrightarrow[\text{reductase}]{\text{nitrogenase}} 2NH_3 + 12ADP + 12Pi + 4H^+$$

เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการตรึงไนโตรเจน คือ เอนไซม์ไนโตรจีเนส (nitrogenase) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแก๊สไนโตรเจนเป็นแอมโมเนีย โดยอาศัย Mg^{2+} และพลังงานในรูปของ ATP โดยการเปลี่ยนแก๊สไนโตรเจน 1 โมล จะใช้ ATP ประมาณ 15-20 ATP ซึ่งกระบวนการดังกล่าวจะถูกควบคุมด้วยการทำงานของยีนที่เรียกว่า nif เนื่องจากเอนไซม์ชนิดนี้มีความไวต่อปริมาณออกซิเจน ในกรณีของเชื้อ *Azotobacter* spp พบว่ามีการผลิตสารประเภทพอลิแซคคาไรด์ ทำให้ลดการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ตัวเซลล์ จึงทำให้กระบวนการเปลี่ยนแก๊สไนโตรเจนดำเนินได้ด้วยดี นอกจากนี้เอนไซม์ไนโตรจีเนส ยังต้องการโมลิปดินัม แคลเซียม เหล็ก และฟอสฟอรัส ในกระบวนการตรึงไนโตรเจนด้วย

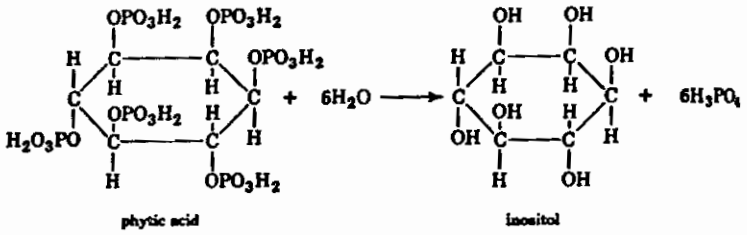
$$N \equiv N \longrightarrow \underset{\text{diimide}}{HN = NH} \longrightarrow \underset{\text{hydrazine}}{H_2N\text{-}NH_2} \longrightarrow 2NH_3$$

1.4. การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

ฟอสเฟตเป็นธาตุที่จำเป็นและมีความสำคัญสำหรับการสร้างกรดนิวคลีอิกและเยื่อเมนเบรนของเซลล์ ตลอดจนแหล่งพลังงาน ATP ด้วย ฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในพืชหรือเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไฟติน (phytic) ซึ่งเป็นเกลือแคลเซียมหรือมักเนเซียมของกรดไฟติก ฟอสฟอลิปิด (phospholipid) เป็นสารประกอบของฟอสฟอรัสกับลิปิด เช่น เลคซิทิน (lecithin) หรือนิวคลีโอโปรตีน (nucleoprotein) เป็นสารประกอบของโปรตีนกับกรดนิวคลีอิก ซึ่งมีหมู่ฟอสเฟตรวมอยู่ด้วย

1.4.1 กระบวนการเปลี่ยนอินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัสทางชีวภาพ

กระบวนการเปลี่ยนอินทรีย์ฟอสฟอรัสเป็นอนินทรีย์ฟอสฟอรัสทางชีวภาพหรือฟอสฟอรัสมิเนอรัลไลเซชัน (P-mineralization) ที่อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์นั้น จะพบว่าอินทรีย์ฟอสเฟตที่อยู่ในรูปของกรดนิวคลีอิกจะสามารถแปรสภาพได้ง่ายกว่าไฟติน โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ phosphatase ในการย่อยสลายกรดนิวคลีอิกให้ได้นิวคลีโอไทด์และฟอสเฟต แต่ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพการทำงานด้วย เช่น ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น ส่วนการเปลี่ยนสภาพของไฟตินจะอาศัยการทำงานของเอนไซม์ phytase ซึ่งพบได้ในจุลินทรีย์หลายชนิด เช่น *Aspergillus* spp. *Rhizopus* spp. เป็นต้น ซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายฟอสเฟตเอสเทอร์เกลือของกรดไฟติก (phytic acid) ทำให้ได้ inositol และ orthophosphate



phytic acid $\longrightarrow$ inositol + 6 $H_3PO_4^-$

รูปที่ 1.11 แสดงโครงสร้างของกรดไฟติก

ที่มา Alexander, M., 1977

1.4.2 การเปลี่ยนสภาพอนินทรีย์ฟอสฟอรัส

อนินทรีย์ฟอสฟอรัสส่วนใหญ่มักอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เกลือของอะลูมินัม แคลเซียม เหล็ก เป็นต้น เช่น ไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) วิเวียนไนต์ (vivianite, $Fe_3(PO_4)_2 \cdot 8\ H_2O$) วาริสไซต์ (variscite, $AlPO_4 \cdot 2\ H_2O$) เพื่อทำให้ได้สภาพฟอสฟอรัสที่ละลายได้ จุลินทรีย์จะผลิตกรดอินทรีย์ เช่น กรดแลคติก กรดซิตริก หรือกรดอนินทรีย์ เช่น กรดซัลฟูริก กรดไนตริก ขึ้นมา เพื่อทำปฏิกิริยากับสารอนินทรีย์ฟอสเฟต ให้ได้ฟอสฟอรัสในรูปที่ละลายน้ำได้ เช่น การใช้จุลินทรีย์ประเภท *Thiobacillus* spp. เปลี่ยนกำมะถัน

ให้เป็นกรดซัลฟูริก เพื่อเปลี่ยนสารอนินทรีย์ของแคลเซียมฟอสเฟตเป็นฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้ ซึ่งอยู่ในสภาพที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ง่าย หรือการใช้จุลินทรีย์ประเภท *Nitrosomonas* spp. ที่สามารถผลิตกรดไนตรัส *Nitrobacter* spp. ที่ผลิตกรดไนตริก เป็นต้น ซึ่งแสดงได้ด้วยปฏิกิริยาดังนี้

$$Ca_3(PO_4)_2 + 2\,HNO_3 \longrightarrow 2\,CaHPO_4 + Ca(NO_3)_2$$

$$Ca_3(PO_4)_2 + 2\,HNO_3 \longrightarrow Ca(H_2PO_4)_2 + 2\,Ca(NO_3)_2$$

$$Ca_3(PO_4)_3 + H_2SO_4 \longrightarrow 2CaHPO_4 + CaSO_4$$

1.4.3 การเปลี่ยนสภาพออกซิเดชันและรีดักชันของสารอนินทรีย์ฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสที่พบมีสภาพออกซิเดชันได้หลายสภาพ เช่น –3 (phosphine, PH_3) หรือ +5 (orthophosphate, H_3PO_4) โดยการเปลี่ยนสภาพออกซิเดชันของฟอสฟอรัสจะทำให้ฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ดียิ่งขึ้น โดยแบคทีเรียประเภท *Clostridium butyricum* *E.coli* เป็นต้น

H_3PO_4	$\longrightarrow$	H_3PO_3	$\longrightarrow$	H_3PO_2	$\longrightarrow$	PH_3
		phosphite		hypophosphite		phosphine
(+5)		(+3)		(+1)		(-3)

การเปลี่ยนแปลงสภาพของฟอสเฟตจะไม่เกิดขึ้น ถ้าในสภาพดังกล่าวมีไนเตรตหรือซัลเฟตอยู่ ทั้งนี้เพราะไนเตรตและซัลเฟตสามารถเป็นตัวรับอิเลคตรอนได้ดีกว่า เนื่องจากมีสภาพออกซิเดชันที่สูงกว่า

1.5. การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับกำมะถันด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

1.5.1 กระบวนการเปลี่ยนอินทรีย์กำมะถันเป็นอนินทรีย์กำมะถันทางชีวภาพ

การแปลงสภาพของอินทรีย์กำมะถันเป็นอนินทรีย์ หรือซัลเฟอร์มิเนอรัลไลเซชัน (S-mineralization) โดยจุลินทรีย์นั้น จะมีลักษณะและขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับปริมาณออกซิเจนที่มี ในกรณีที่มีปริมาณออกซิเจนที่เพียงพอ กระบวนการเปลี่ยนอินทรีย์กำมะถัน โดย

อาศัยเอมไซม์ sulfatase สามารถสลายพันธะซัลเฟตเอสเทอร์ ได้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และกำมะถันในรูปของซัลเฟต ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$R\text{-}O\text{-}SO_3^- + H_2O \xrightarrow{\text{sulfatase}} ROH + H^+ + SO_4^{2-}$$

ในกรณีที่มีปริมาณอากาศไม่เพียงพอ จะพบว่าเกิดกำมะถันในรูปของซัลไฟด์หรือสารประกอบเมอร์เคปแทน (mercaptan) ดังนี้

อินทรีย์กำมะถัน $\longrightarrow$ H_2S $\longrightarrow$ S^{-2}, เมอร์แคปแทน

การย่อยสลายของกรดอะมิโน เช่น เมทิโอนีน ซีสทีน ซีสเทอีน ซึ่งจะทำให้ได้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยที่

$$HSCH_2CHNH_2COOH + H_2O \xrightarrow[\text{desulfurase}]{\text{cysteine}} CH_3COCOOH + H_2S + NH_3$$

ซีสเทอีน กรดไพรูวิก

1.5.2 การเปลี่ยนสภาพออกซิเดชันของกำมะถัน

การเปลี่ยนสภาพออกซิเดชันของกำมะถัน หรือสารประกอบกำมะถันเพื่อให้ได้สารประกอบซัลเฟตหรือกรดซัลฟูริกด้วยเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้สภาพที่มีออกซิเจน เช่น *Thiobacillus* spp. *Chromatium* spp. *Sulfolobus* spp. เป็นต้น

$$S \longrightarrow S_2O_3^{2-} \longrightarrow S_4O_6^{2-} \longrightarrow S_3O_6^{2-} \longrightarrow SO_3^{2-} \longrightarrow SO_4^{2-}$$

sulfate sulfite tetrathionate trithionate sulfite sulfate

$$2\,S + 2\,H_2O + 3\,O_2 \xrightarrow[\textit{thiooxidans}]{\textit{Thiobacillus}} 2\,H_2SO_4$$

$$6\,Na_2S_2O_3 + 5\,O_2 \longrightarrow 4\,Na_2SO_4 + 2\,Na_2S_4O_6$$

$$2\,Na_2S_4O_6 + 6\,H_2O + 7\,O_2 \longrightarrow 2\,Na_2SO_4 + 6\,H_2SO_4$$

การออกซิไดซ์ซัลไฟต์หรือไธโอซัลเฟตเป็นซัลเฟต โดยการทำงานของเชื้อ *Thiobacillus* spp

APS-reductase

$$2\ SO_3^{-2} + 2\ AMP \longrightarrow 2\ APS + 4\ e^-$$

ADP-sulfurylase

$$2\ APS + 2\ Pi \longrightarrow 2\ ADP + 2\ SO_4^{-2}$$

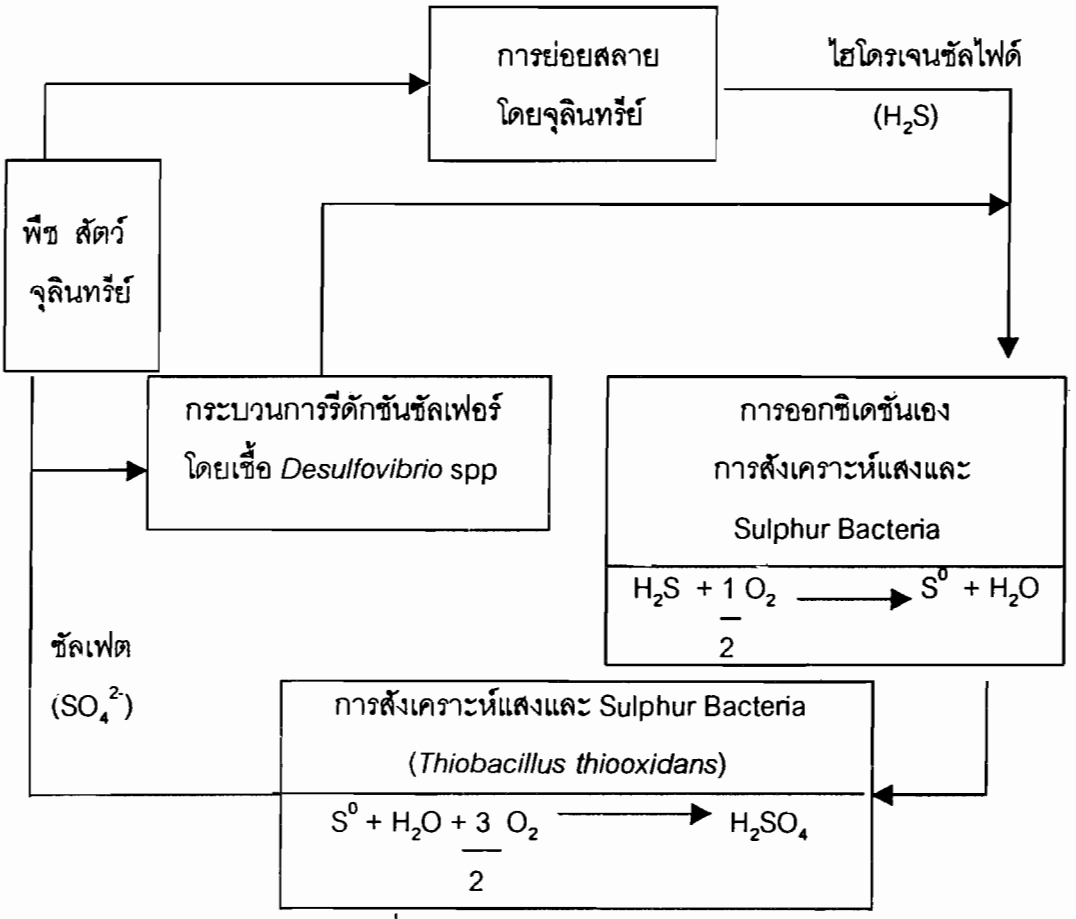
T. thiooxidans

$$Na_2S_2O_3 + 2O_2 + H_2O \longrightarrow 2\ NaHSO_4$$

T. thioparus

$$5\ Na_2S_2O_3 + 4\ O_2 + H_2S \longrightarrow 5\ Na_2SO_4 + H_2SO_4 + 4\ S$$

เมื่อ APS เป็น adenosine-5-phosphosulfate



รูปที่ 1.12 แสดงวัฏจักรของกำมะถัน

1.5.3 การรีดิวซ์ซัลเฟต

การรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นไฮโดรเจนซัลไฟด์ โดยซัลเฟตรีดิวซิงแบคทีเรียหรือเอสอาร์บี (sulfate reducing bacteria, SRB) เช่น *Desulfovibrio* spp, *Desulfomonas* spp *Desulfococcus* spp. ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จึงใช้ซัลเฟตทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเลคตรอนสุดท้าย

$$4\,H_2 + CaSO_4 \longrightarrow H_2S + Ca(OH)_2 + 2\,H_2O$$

ไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นสารที่เป็นพิษต่อเซลล์ที่มีชีวิต และมีความเป็นกรดที่สามารถทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก เช่น เหล็ก สังกะสี เป็นต้น ทำให้ได้เกลือของโลหะซัลไฟด์ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เหล็กซัลไฟด์ สังกะสีซัลไฟด์ ที่จะตกตะกอนในดิน

1.5.4 การรีดิวซ์ซัลไฟด์

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ได้จากการรีดิวซ์ซัลเฟตและจากการย่อยสลายของกรดอะมิโนจะถูกออกซิไดซ์ต่อเป็นธาตุกำมะถันได้ โดยอาศัยแบคทีเรียที่สังเคราะห์แสงได้ เช่น *Chromatium* spp. และ *Chlorabium* spp. เป็นต้น

$$CO_2 + 2\,H_2S \xrightarrow{\text{แสง}} (CH_2O)_x + H_2O + S$$

ถ้าเป็นการเปลี่ยนที่เกิดขึ้นในสภาวะที่มีออกซิเจน โดยเชื้อ *Thiobacillus* spp. จะได้

$$H_2S + \frac{1}{2}\,O_2 \longrightarrow S + H_2O$$

$$5\,Na_2S_2O_3 + 4\,O_2 + H_2S \longrightarrow 5\,Na_2SO_4 + H_2SO_4 + 4\,S$$

1.6 การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับสารประกอบของเหล็ก ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ

1.6.1 การออกซิเดชันเฟอร์รัส

การออกซิเดชันเฟอร์รัสโดยการเปลี่ยนเฟอร์รัสเป็นเฟอริกในสภาพที่มีออกซิเจน เช่น การออกซิไดส์เหล็กในรูปไพไรต์โดยเชื้อ *Thiobacillus ferrooxidans* ที่พีเอชในช่วง 2.0-4.5

$$4\ FeSO_4 + O_2 + 2\ H_2SO_4 \longrightarrow 2\ Fe_2(SO_4)_3 + 2\ H_2O$$

$$2\ FeS_2 + 7\ O_2 + 2\ H_2O \longrightarrow 2\ FeSO_4 + 2\ H_2SO_4$$

1.6.2 การเปลี่ยนสภาพของเหล็กเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำ

แบคทีเรียประเภทเฮเทอโรโทรฟ เช่น *Aerobacter* spp. สามารถใช้สารเฟอริกแอมโมเนียมซิเตรต (ferric ammonium citrate) เป็นแหล่งพลังงาน โดยการย่อยสลายของสารดังกล่าว ทำให้ได้เฟอริกไฮดรอกไซด์ (ferric hydroxide) ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ

$$2\ FeS_2 + 7\ O_2 + 2\ H_2O \longrightarrow 2\ FeSO_4 + 2\ H_2SO_4$$

$$4\ FeSO_4 + O_2 + 2\ H_2SO_4 \longrightarrow 2\ Fe_2(SO_4)_3 + 2\ H_2O$$

$$14\ Fe_2(SO_4)_3 + FeS_2 + 8\ H_2O \longrightarrow 15\ FeSO_4 + 2\ H_2SO_4 + 16\ H_2O$$