

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญ

มันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทย ซึ่งไทยส่งออกผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังเป็นอันดับต้น ๆ ของโลก ในปี 2558 ไทยส่งออกมันสำปะหลังถึง 11.2 ล้านตัน มีมูลค่าทั้งสิ้น 115,888.8 ล้านบาท และใน 2 เดือนแรกของปี 2559 มีการส่งออกรวม 1.9 ล้านตัน คิดเป็นมูลค่า 18,822.9 ล้านบาท (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2559) โดยมันสำปะหลังที่ขายได้ราคาดี จะต้องมีการแปรรูปในหัวมันสำปะหลังสูง โดยกระบวนการสังเคราะห์แสงที่มีประสิทธิภาพเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้มันสำปะหลังมีเปอร์เซ็นต์แป้งสูง เปอร์เซ็นต์แป้งที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง ซึ่งในความหมายก็คือ หากมันสำปะหลังมีการสังเคราะห์แสงที่มีประสิทธิภาพแล้ว จะทำให้มีการเติบโตที่ดีและมีการเคลื่อนย้ายแป้งไปสะสมในส่วนราก (หัว) เพิ่มขึ้น ทำให้ผลผลิตโดยรวมสูงขึ้น โดยในการสังเคราะห์แสงเพื่อสร้างแป้งและน้ำตาลของมันสำปะหลังนั้น จุลธาตุที่มีบทบาทสำคัญ ได้แก่ ธาตุเหล็ก (Fe) โดยการศึกษาพบว่าพืชที่อยู่ในภาวะขาดธาตุเหล็ก จะเกิดภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ เนื่องจากเหล็กมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์และส่วนประกอบต่างๆของคลอโรพลาสต์ ช่วยในการแบ่งเซลล์ของพืชเพื่อการเติบโต นอกจากนี้เหล็กยังเป็นองค์ประกอบของสารเฟอร์ริดอกซิน ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ในธรรมชาติ ธาตุเหล็กในดินจะอยู่ในรูป Fe^{2+} และ Fe^{3+} ซึ่งหากอยู่ในดินในรูป Fe^{3+} พืชจะไม่สามารถนำไปใช้ได้ทันที เนื่องจากบ่อยครั้งที่ Fe^{3+} มักอยู่ในรูปที่จับกับสารประกอบ oxides หรือ hydroxides ที่พืชไม่สามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ (Gamit และ Tank, 2014) ดังนั้นแม้ว่าในดินจะพบธาตุเหล็กมาก แต่ก็ยังเป็นธาตุเหล็กที่ไม่ได้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช การขาดธาตุเหล็กของพืช จึงไม่เกี่ยวกับปริมาณธาตุเหล็กในดิน แต่เกิดจากความสามารถในการละลายของธาตุเหล็กให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ดังนั้นหากพืชสามารถดูดใช้ธาตุเหล็กได้ดี ผลผลิตของพืชก็จะเพิ่มมากขึ้น โดยในปี 2015 Freitas และคณะ ได้ทำการศึกษาการเพิ่มธาตุเหล็กในมันสำปะหลังโดยใช้แบคทีเรีย *Bacillus subtilis* (GBO3) เพื่อให้ได้หัวมันสำปะหลังที่มีธาตุเหล็กสูง จากการศึกษาของ Freitas และคณะพบว่า ที่สภาวะเดียวกัน มันสำปะหลังที่มีการสะสมของธาตุเหล็ก มีอัตราการสังเคราะห์แสงและปริมาณคลอโรฟิลล์สะสมที่แผ่นใบ มากกว่ามันสำปะหลังที่ไม่มีการสะสมของธาตุเหล็ก และมีการเติบโตดีกว่ามันสำปะหลังที่ไม่มีการสะสมธาตุเหล็ก โดยแสดงออกทางด้านความสูงของต้น การแตกทรงพุ่ม และมวลของลำต้น ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลผลิตที่เพิ่มขึ้นด้วย ที่ผ่านมา มีการค้นพบว่ามีแบคทีเรียและราบางชนิดสามารถผลิตสารที่เป็นสารคีเลตที่มีความจำเพาะต่อเฟอร์ริกไอออน ช่วยในการละลายเหล็กในดินให้อยู่ในรูปที่พืชดูดใช้ได้ ซึ่งสารคีเลตที่จับธาตุเหล็ก ซึ่งแบคทีเรียผลิตขึ้นนี้คือ “สารไซเดอร์โรฟอร์” ในปี 2005 Sayyed และคณะ ได้นำแบคทีเรีย *Pseudomonas fluorescens* ที่สามารถผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์มาใช้กับต้นข้าวสาลี พบว่าแบคทีเรียสายพันธุ์ที่ผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์นี้ ช่วยส่งเสริมการงอกของเมล็ด การยึดตัวของปลายราก และการเพิ่มความยาวของยอดพืช สอดคล้องกับการศึกษาของ Radzki และคณะ (2013) ซึ่งได้ทดลองนำแบคทีเรียที่ผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์ 2 สายพันธุ์ ได้แก่ *Chryseobacterium* spp. และ *Pseudomonas fluorescens* N21.4 มาใช้กับมะเขือเทศไฮโดรโปนิคส์ พบว่า มะเขือเทศกลุ่มที่ได้รับแบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ให้ผลผลิตสูงกว่ามะเขือเทศกลุ่มที่ไม่ได้รับแบคทีเรีย ทั้งนี้ยังพบอีกว่า เพียง

แคสสารไซเดอร์โรฟอร์ที่แบคทีเรียผลิตขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีเซลล์แบคทีเรีย ก็ทำให้มะเขือเทศมีผลผลิตที่สูงขึ้น แตกต่างจากกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับแบคทีเรียหรือสารไซเดอร์โรฟอร์อย่างมีนัยสำคัญ

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะนำสารไซเดอร์โรฟอร์มาประยุกต์ใช้ เพื่อเพิ่มปริมาณการดูดใช้ธาตุเหล็กในดินของมันสำปะหลัง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและผลผลิตของมันสำปะหลังเพิ่มสูงขึ้น ทั้งในเชิงปริมาณและคุณภาพ โดยเฉพาะเปอร์เซ็นต์ของแป้งในหัวมันสำปะหลัง โดยจะคัดเลือกแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช (Plant Growth - Promoting Bacteria ; PGPR) ที่มีความสามารถในการผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์ ซึ่งเป็นสารคีเลทที่มีคุณสมบัติในการจับกับไอออนของธาตุเหล็ก ทำให้เกิดการละลายและขนส่งธาตุเหล็กเข้าสู่พืชได้ดีขึ้น แล้วพัฒนาให้อยู่ในรูปชีวภัณฑ์ที่นำไปใช้ในแปลงมันสำปะหลังในภาคสนามได้ โดยวิธีการฝังกลบในดินรอบโคนต้น ซึ่งการใช้จุลินทรีย์นี้ ไม่ก่อให้เกิดผลกระทบจากเหล็กเป็นพิษต่อพืชและสิ่งแวดล้อม เนื่องจากจุลินทรีย์มีกลไกในการปรับความเป็นพิษจากไอออนเหล็ก และการใช้แบคทีเรีย PGPR ที่ผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์ ยังช่วยฟื้นฟูบำรุงดินและปรับสมดุลของธาตุอาหารต่าง ๆ ในดิน ให้รากพืชสามารถดูดไปใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นการศึกษานี้ จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่เป็นไปได้ในการช่วยเพิ่มผลผลิตของมันสำปะหลัง จากการใช้ประโยชน์ทรัพยากรทางชีวภาพ อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยจุลธาตุคีเลทที่มีราคาแพงมาใส่ เพื่อแก้ปัญหาการขาดจุลธาตุอาหารของมันสำปะหลัง ทำให้ต้นทุนในส่วนของปัจจัยการผลิตมันสำปะหลังลดลง รายได้ของเกษตรกรผู้ปลูกมันสำปะหลังจึงมีส่วนต่างของกำไรเพิ่มมากขึ้น ส่งผลต่อความยั่งยืนของผลผลิตมันสำปะหลังและความมั่นคงของเกษตรกรของประเทศไทยได้อย่างเป็นรูปธรรมมากขึ้น

วัตถุประสงค์

1. เพื่อแยกและคัดเลือกแบคทีเรีย PGPR ที่มีความสามารถในการผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์จากดินบริเวณรอบรากมันสำปะหลัง ที่มีศักยภาพสูงสุดในการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและผลผลิตของมันสำปะหลัง
2. ทดสอบประสิทธิภาพของแบคทีเรีย PGPR ที่มีความสามารถในการผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์ที่คัดแยกได้

ขอบเขตของโครงการวิจัย

เพื่อให้บรรลุความสำเร็จในการวิจัยในครั้งนี้ ผู้วิจัยจึงกำหนดขอบเขตของโครงการวิจัยดังต่อไปนี้

1. แบคทีเรีย PGPR ที่มีความสามารถในการผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์ ที่มีศักยภาพในการละลายธาตุเหล็กจากดินเพื่อให้ได้เหล็กที่เป็นประโยชน์ จะแยกจากดินบริเวณรอบรากมันสำปะหลัง
2. การศึกษาประสิทธิภาพของแบคทีเรีย PGPR ที่มีความสามารถในการผลิตสารไซเดอร์โรฟอร์ จะทำการศึกษาในพื้นที่แปลงมันสำปะหลัง ในเขตจังหวัดนครราชสีมา
3. พันธุ์มันสำปะหลังที่ศึกษา ได้แก่ หัวยบง 80
4. ชุดดินที่ศึกษา ได้แก่ ชุดดินโคราช

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงและผลผลิตมันสำปะหลัง โดยแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชที่สามารถผลิตสารไซโตไคน์โรฟอริน เพื่อ

1. ผลิตเป็นชีวภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มปริมาณการดูดใช้ธาตุหลักในดินของมันสำปะหลัง เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และทำการถ่ายทอดเทคโนโลยีในระดับชุมชนที่ง่ายต่อการทำความเข้าใจและปฏิบัติ

2. สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาการขาดจุลธาตุอาหารของมันสำปะหลัง ลดค่าใช้จ่ายในการซื้อปุ๋ยคีเลตที่มีราคาแพง

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มันสำปะหลัง

ลักษณะพฤกษศาสตร์ของมันสำปะหลัง

มันสำปะหลังมีชื่อเรียกทั่วไปในภาษาอังกฤษว่า แคสซาวา (Cassava) หรือทาพิโอคา (Tapioca) ประเทศแถบทวีปอเมริกาใต้ใช้ภาษาสเปนเรียกว่า ยูคา (Yuca) ภาษาโปรตุเกสในประเทศบราซิล เรียกว่า แมนดิโอคา (Mandioca) แถบประเทศในทวีปแอฟริกาที่พูดภาษาฝรั่งเศส เรียกว่า แมนิออก (Manioc) และมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า แมนนิฮอท เอสคูเลินตา แครนทซ์ (*Manihot esculenta* Crantz)

การจัดลำดับทางพฤกษศาสตร์ของมันสำปะหลัง มีดังนี้

วงศ์ (Family) Euphorbiaceae (ซึ่งรวมถึงยางพาราและละหุ่ง)

สกุล (Genus) *Manihot*

ชนิด (Species) *Esculenta*

ลำต้นมีลักษณะคล้ายข้อ เพราะจากก้านใบซึ่งแก่ร่วงหล่นไป สีของลำต้นบริเวณใกล้ยอดจะมีสีเขียว ส่วนที่ต่ำลงมาจะมีสีแตกต่างกันไปตามลักษณะพันธุ์เช่น สีเงิน สีเหลือง สีน้ำตาล ใบมีก้านใบยาวติดกับลำต้น แผ่นใบเว้าเป็นแฉกมี 3 - 9 แฉก มันสำปะหลังมีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียอยู่ในช่อเดียวกัน แต่อยู่แยกคนละดอก ดอกตัวผู้มีขนาดเล็กอยู่บริเวณส่วนปลายของช่อดอก ส่วนดอกตัวเมียมีขนาดใหญ่กว่าอยู่บริเวณส่วนโคนของช่อดอก ดอกตัวเมียจะบานก่อนดอกตัวผู้ประมาณ 1 อาทิตย์ การผสมเกสรจึงเป็นการผสมข้ามระหว่างต้น

หลังจากปลูกแล้วประมาณ 2 เดือนรากจะเริ่มสะสมแป้งและมีขนาดใหญ่ขึ้นตามอายุ เรียกว่า หัว จำนวนหัว รูปร่าง ขนาด และน้ำหนัก แตกต่างกันไปตามพันธุ์ พันธุ์พื้นเมืองที่ใช้ปลูกในประเทศไทย เมื่ออายุประมาณ 1 ปี ยาวประมาณ 27.7 - 43.3 เซนติเมตร และกว้างประมาณ 4.6 - 7.8 เซนติเมตร ได้ดินมีความอุดมสมบูรณ์ดี และมันสำปะหลังมีอายุมากกว่า 1 ปี บางพันธุ์อาจให้หัวหนักหลายสิบกิโลกรัม ส่วนต่าง ๆ ของมันสำปะหลังมีกรดไฮโดรไซยานิก (HCN) ซึ่งเป็นสารที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสัตว์ประกอบอยู่ด้วย ใบและเปลือกมีสารนี้มากกว่าเนื้อสด และพันธุ์ต่าง ๆ ก็มีปริมาณสารนี้แตกต่างกันออกไป ดังนั้นเวลาจะใช้เป็นอาหาร ควรใช้พันธุ์ห่าเนาที่เพราะมีกรดไฮโดรไซยานิกต่ำกว่า และก่อนจะบริโภคควรจะนำมันสำปะหลังมาปอกเปลือก หมัก เคี้ยว ย่าง ปิ้ง ต้ม ปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกจะลดลงจนถึงปริมาณซึ่งร่างกายมนุษย์สามารถเปลี่ยนกรดไฮโดรไซยานิกนี้เป็นสารอื่นที่ไม่เป็นอันตรายได้ หัวมันสำปะหลังสดส่วนใหญ่ประกอบด้วยน้ำ 60-80 เปอร์เซ็นต์ แป้ง 20-40 เปอร์เซ็นต์ และมีโปรตีนไม่ถึง 2 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นหัวมันสำปะหลังจึงเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรต ให้พลังงานต่อร่างกายมนุษย์และสัตว์ที่ดี (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน, 2558)

แหล่งปลูก

มันสำปะหลังสามารถเจริญเติบโตได้ดีในดินเกือบทุกชนิด แต่สามารถเจริญเติบโตได้ดีใน ดินร่วน ดินร่วนปนทราย และมีการระบายน้ำดี มีความเป็นกรดต่างระหว่าง 4.5 - 8.0 มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง ระดับหน้าดินลึกไม่น้อยกว่า 30 เซนติเมตร อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตช่วง 25-37 องศาเซลเซียส ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย 1,200-1,500 มิลลิเมตรต่อปี สภาพพื้นที่ปลูกราบสม่ำเสมอ ไม่เป็นที่ลุ่มหรือน้ำท่วมขัง มีความลาดเอียงไม่เกิน 5 % และใกล้แหล่งรับซื้อผลผลิตโรงงานแป้งหรือลานมัน

ฤดูกาลปลูก

เกษตรกรสามารถเลือกช่วงเวลาเริ่มต้นของการปลูกเพื่อเพิ่มผลผลิตและปริมาณแป้งได้ 2 ช่วงดังนี้
ปลูกปลายฤดูฝน ตั้งแต่เดือน พฤศจิกายน - มกราคม

ปลูกต้นฤดูฝน ตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ - เมษายน

การปลูกมันสำปะหลังในช่วงปลายฤดูฝน ความสม่ำเสมอในการเจริญเติบโตของมันสำปะหลังจะต่ำกว่าการปลูกในช่วงฤดูฝน เนื่องจากการปลูกในฤดูฝนมันสำปะหลังจะติดแล้งในช่วงระยะแรกของการเจริญเติบโต ดังนั้นการปลูกในช่วงฤดูฝนจึงควรปลูกในพื้นที่ดินเป็นทรายจัดดินร่วนปนทราย ไม่ควรปลูกในพื้นที่ดินค่อนข้างเหนียว ซึ่งเมื่อกระทบแล้ง มันสำปะหลังจะตายมาก

การเตรียมดิน

เพื่อเพิ่มผลผลิตมันสำปะหลังควรเตรียมดินให้ลึก ร่วนซุยและทำลายวัชพืชให้พืชให้หมดสิ้น เนื่องจากการเตรียมดินให้ลึก ร่วนซุย มีผลทำให้มันสำปะหลังที่ปลูกสัมผัสกับดินมากที่สุด เมื่องอกเป็นต้นอ่อนแล้วสามารถเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว มีวัชพืชขึ้นน้อย การไถด้วยผาน 3 ครั้งแรกและตามด้วยผาน 7 เป็นวิธีการที่เหมาะสม ไถพรวนภายหลังฝนตกแล้ว 2 - 3 วัน เพื่อจัดเก็บความชื้นไว้ในดิน เมื่อจะทำปลูกมันสำปะหลังโดยวิธีชิงเชือกจึงไถแปรดินด้วยจานพรวนหรือผาน 7 อีกครั้งหนึ่ง มันสำปะหลังจะงอกและสามารถเจริญเติบโตข้ามฤดูแล้งโดยอาศัยความชื้นในดินที่มีอยู่

การเตรียมท่อนพันธุ์

ใช้ท่อนพันธุ์มันที่สด อายุ 8 - 12 เดือน ตัดทิ้งไว้นานไม่เกิน 15 วัน ตัดท่อนพันธุ์ยาวประมาณ 20 เซนติเมตร สำหรับปลูกในฤดูฝน และความยาว 25 เซนติเมตร สำหรับปลูกในช่วงฤดูฝน มีตาไม่น้อยกว่า 5 ตาต่อท่อนพันธุ์ ท่อนพันธุ์จากลำต้นจะเจริญเติบโตได้ดีกว่าท่อนพันธุ์จากกิ่งพันธุ์ ต้นพันธุ์ใหม่ สด ไม่บอบช้ำ ไม่มีโรคมาทำลาย

ระยะปลูกและวิธีปลูก

การปลูกมันสำปะหลังสามารถกระทำได้โดยการใช้ระยะปลูกให้เหมาะสมกับชนิดของพันธุ์ที่ใช้และความอุดมสมบูรณ์ของดิน ระยะมาตรฐานที่แนะนำกับมันสำปะหลังทุกพันธุ์และทุกสภาพดินคือ 1.0 x 1.0 เมตร อย่างไรก็ตามสามารถเพิ่มหรือลดระยะปลูกได้ ถ้าดินมีความอุดมสมบูรณ์สูงควรใช้ระยะ 1.0 x 1.20 หรือ 1.20 x 1.20 เมตร เพื่อป้องกันการเหี่ยวใบเจริญเติบโตทางลำต้นมากกว่าลงหัว ในทางตรงข้ามถ้าดินมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ดินทรายจัด ควรใช้ระยะปลูกถี่ขึ้น 1.0 x 0.8 เมตรหรือ 0.8 x 0.8 หรือ 0.6 x 0.6 เมตร ทั้งนี้เพื่อให้มันสำปะหลังคลุมพื้นที่ได้เร็ว ลดปัญหาวัชพืช เป็นที่น่าสังเกตว่าการปลูกถี่ทำให้จำนวนต้นต่อไร่สูงขึ้น จำนวนหัวต่อไร่ก็เพิ่มมากขึ้นแต่หัวมันสำปะหลังมีขนาดเล็กลง ในเรื่องของกร

จัดระยะปลูกจะมีค่ากล่าววว่า “ดินเลวปลูกถี่ ดินดีปลูกห่าง” เกษตรกรจึงควรจัดระยะปลูกให้มีความเหมาะสมกับพื้นที่ของตนเอง

การกำจัดวัชพืช

วัชพืชหรือ “ร่น” เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ผลผลิตมันสำปะหลังลดลงตลอดฤดู การกำจัดวัชพืชในมันสำปะหลังเป็นสิ่งจำเป็น จึงทำให้ค่าใช้จ่ายส่วนใหญ่ในการปลูกและดูแลรักษาเกิดจากการป้องกันกำจัดวัชพืช โดยเฉพาะในระยะ 1 - 4 เดือนแรกของการปลูก ต้องหมั่นตรวจแปลงปลูกทุก 15 วัน เพื่อแก้ปัญหาวัชพืชโดยใช้หลักป้องกันไว้ก่อน การปล่อยให้วัชพืชแข็งแรงเจริญเติบโต จนกระทั่งออกดอกจะกำจัดทำลายยากและยึดเชื้อ ใช้ต้นทุนสูง ทำให้มันสำปะหลังและกระแสรุ่นผลผลิตต่ำ มีรายงานว่าหากปล่อยให้วัชพืชขึ้นแข่งกับมันสำปะหลังกับมันสำปะหลังโดยที่ไม่มีการกำจัดเลย จะทำให้ผลผลิตลดลงประมาณ 20 - 50 % ในการปลูกมันสำปะหลังมีการใช้สารกำจัดวัชพืชมาก โดยเฉพาะพาราควอท (กรรมมีออกซอน) และไกลโฟเสท การกำจัดวัชพืชควรทำอย่างน้อย 2 ครั้ง คือช่วงที่มันสำปะหลังมีอายุประมาณ 30 วัน และประมาณ 60 วัน และควรมีการกำจัดวัชพืชเพิ่มเติม หากยังมีวัชพืชขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น นอกจากนี้อาจมีการใช้สารเคมีป้องกันกำจัดวัชพืช โดยการกำจัดวัชพืชครั้งที่ 2 ภายหลังจากการใช้จอบให้ใช้สารเคมีพาราควอทชนิดพ่นในอัตรา 90 ซีซี. ต่อน้ำ 1 ถังฉีด (17 ลิตร) โดยผสมสารจับใบโดยการฉีดให้ระวางอย่าให้ถูกต้นมันสำปะหลัง เพราะสารพาราควอทจะทำให้ต้นเสียหายจนถึงตายได้ จึงควรฉีดต่างๆ เริ่มฉีดเมื่อมันสำปะหลังมีอายุประมาณ 2 เดือน และฉีดพ่นสารเคมีไกลโฟเสท ชนิด 48 % ในอัตรา 70-80 ซีซี. ต่อน้ำ 1 ถัง ฉีดอีกครั้งหนึ่งเมื่อมันสำปะหลังอายุ 3 เดือน ความเหมาะสมในการกำจัดวัชพืชในแปลงมันสำปะหลังประมาณ 3 ครั้งต่อรอบการผลิต โดยใช้จอบร่วมกับสารเคมีดังกล่าว สำหรับระยะเวลาการกำจัด อาจยืดระยะเวลาห่างออกไปได้เล็กน้อยสำหรับมันสำปะหลังที่ปลูกช่วงปลายฤดูฝน (ศานิต, 2557)

การใช้ปุ๋ยในมันสำปะหลัง

1. ดิน พันธุ์และการปลูก

1.1 ดินและพันธุ์มันสำปะหลัง

มันสำปะหลังพันธุ์ดีที่ได้รับการส่งเสริมให้ปลูกคือ ระยะเวลา 60 ระยะเวลา 90 ระยะเวลา 5 เกษตรศาสตร์ 50 หัวยบง 60 และหัวยบง 80 ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ตอบสนองต่อการใช้ปุ๋ยดีมาก ต่างจากพันธุ์พื้นเมืองซึ่งเจริญได้ดีพอประมาณในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ แต่เมื่อบำรุงด้วยปุ๋ยให้มีความอุดมสมบูรณ์สูง จะเจริญทางลำต้นและใบมากแต่ให้ผลผลิตหัวมันน้อย (ปิยะและคณะ, 2542)

มันสำปะหลังปลูกได้ในดินทุกชนิด แต่ชอบดินร่วนปนทรายเพราะลงหว่านง่ายและเก็บเกี่ยวสะดวก เจริญเติบโตได้ในดินที่มี pH 5.5 - 7.5 ทนต่อดินกรดจัดมาก (pH 4.5) ได้ แต่ไม่ทนต่อสภาพต่าง จึงไม่อาจเจริญในดินที่มี pH สูงถึง 8 เป็นพืชที่มีรากลึกถึง 2.6 เมตร จึงทนแล้งได้ดีมาก ต้องการน้ำฝนเฉลี่ย 1,000 - 3,000 มม./ปี แต่ไม่ชอบสภาพน้ำขังเนื่องจากทำให้หัวเน่า

1.2 ความเสื่อมของทรัพยากรดินในการปลูกมันสำปะหลัง ทรัพยากรดินที่ปลูกมันสำปะหลังมักมีความเสื่อมโทรมลง เนื่องจากสาเหตุ 5 ประการคือ 1) ลักษณะทั่วไปของดินที่ใช้ปลูกมันสำปะหลัง เป็นดินเนื้อหยาบที่มีความอุดมสมบูรณ์ค่อนข้างต่ำถึงต่ำ อยู่ในภูมิภาคซึ่งเป็นลูกคลื่นและมีความลาดชัน จึงมี

การก่อนดินเนื่องจากน้ำสูง บางแห่งสูญเสียดินมากกว่าปีละ 2 ตัน/ไร่ 2) การปลูกใช้ระยะเวลาระหว่าง 0.8 – 1.0 เมตร ในสภาพพื้นดินที่ลาดชันนั้น แถงพีชและทรงพุ่มไม่อาจชะลอความรุนแรงของการก่อนดินได้ 3) โดยทั่วไปเกษตรกรปลูกมันสำปะหลังเป็นพืชเดี่ยวต่อเนื่องกันเป็นเวลานานสิบปี ความเสื่อมโทรมของทรัพยากรดินจึงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง 4) มันสำปะหลังเจริญและให้ผลผลิตพอประมาณในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ แม้ว่าจำนวนหัวจะน้อยและขนาดของหัวจะเล็ก ประกอบกับพื้นที่เพาะปลูกอยู่ในเขตเขตร้อนน้ำฝนทั้งหมด จึงมีความเสี่ยงด้านความแห้งแล้งแทบทุกปี เป็นสภาพที่ไม่จูงใจให้เกษตรกรลงทุนด้านการบำรุงดิน และ 5) ในการเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังนั้น หัวทั้งหมดกับต้นและใบส่วนมากถูกนำออกไปจากพื้นที่เพื่อการใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันจึงมีเพียงส่วนน้อยที่กลับคืนสู่ผืนดิน ธาตุอาหารปริมาณมากจึงถูกนำออกจากพื้นที่ทุกปีเช่นเดียวกัน (กรมวิชาการเกษตร, 2544ก) หากนำผลผลิตหัวมันสดออกไปไร่ละ 2 ตัน ปริมาณธาตุอาหารต่างๆที่ติดไปด้วย มีดังนี้คือ 3.4 กก. N, 1.0 กก. P, 5.0 กก. K, 0.8 กก. Ca, 0.4 กก. Mg และ 0.4 กก. S (Fageria และคณะ, 1997)

1.3 การปรับปรุงระบบการปลูก การปรับปรุงระบบการปลูกมันสำปะหลังเพื่อป้องกันการเสื่อมโทรม

ของดิน ได้ผลผลิตและเปอร์เซ็นต์แป้งสูง ขณะเดียวกันก็บำรุงดินได้ดียังยืน ควรปฏิบัติดังนี้

- 1) เตรียมดินโดยไถ พรวนและยกร่องตามแนวระดับและขวางความลาดเทของพื้นที่
- 2) ใช้ระยะปลูกให้เหมาะสมกับพันธุ์ เช่น พันธุ์ระยะของ 1 ใช้ระยะ 100 x 100 ซม. พันธุ์ระยะของ 90 ใช้ระยะ 80 x 100 ซม. พันธุ์ระยะของ 60 ใช้ระยะ 66 x 100 ซม. พันธุ์หัวยวบ 80 ใช้ระยะ 90 x 100 ซม. สำหรับพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 และพันธุ์หัวยวบ 60 ใช้ระยะ 100 x 100 ซม. แต่ที่ปรับระยะได้ เช่นในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูง ควรใช้ระยะ 100 x 120 ซม. เพื่อป้องกันการเหี่ยวใบ แต่ในดินทรายจัดซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ควรใช้ระยะ 80 x 100 ซม. หรือ 80 x 80 ซม. เพื่อให้ทรงพุ่มมันคลุมพื้นดินได้เร็ว นอกจากนี้ ยังควรปลูกแฝก 2 แถวแทรกในแถวมันทุกๆระยะ 20 เมตร เพื่ออนุรักษ์ดินและน้ำ นอกจากนี้ การปลูกมันสำปะหลังระยะชิดคือระหว่างต้น 30 – 60 ซม. และระหว่างแถว 80 – 100 ซม. ก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยลดการกร่อนดินลงได้มาก

- 3) เลือกช่วงเวลาปลูกมันสำปะหลังสองช่วงคือ ปลายฤดูฝน (เดือนพฤศจิกายน – มกราคม) ในดินที่เป็นทรายจัดและร่วนปนทราย แต่ไม่แนะนำให้ปลูกในดินเนื้อละเอียด การปลูกในช่วงนี้จะลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดวัชพืช ให้หัวขนาดใหญ่ ป้อม แต่ไม่ค่อยดก หรือปลูกต้นฤดูฝน (ปลายเดือนเมษายน – พฤษภาคม) ซึ่งจะได้หัวมันมีขนาดเล็กกว่า เรียวยาวแต่จำนวนหัวมากกว่าและมันออกหัวเป็นชั้นๆ ปลูกไว้ 12 เดือนจึงเก็บเกี่ยว (ปิยะและคณะ, 2542; ปิยะวุฒิและคณะ, 2542)

- 4) บำรุงดินด้วยปุ๋ยอินทรีย์และปุ๋ยเคมีในอัตราที่เหมาะสม ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

2. ความต้องการธาตุอาหาร

ความเข้มข้นของธาตุอาหารในมันสำปะหลัง แตกต่างกันตามอวัยวะ (organs) ของพืชที่วิเคราะห์ ระยะการเจริญเติบโตและความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ปลูก สำหรับความเข้มข้นของธาตุหลัก ธาตุรองและจุลธาตุในใบ ก้านใบ ลำต้นและราก ของมันสำปะหลังอายุระหว่าง 2 – 4 เดือนซึ่งปลูกโดยใช้ปุ๋ย แสดงไว้ในตารางที่ 2.1 ส่วนความเข้มข้นของธาตุอาหารในใบที่จัดว่าเพียงพออยู่ในตารางที่ 2.2

การสะสมธาตุอาหาร (ความเข้มข้น x มวลแห้ง) ของมันสำปะหลัง ในแต่ละระยะของการเจริญเติบโตมีลักษณะต่างกัน กล่าวคือธาตุอาหารที่รากดูดได้จากดินก่อนลงหัวจะสะสมในใบและลำต้น

ต่อมาธาตุเหล่านี้จึงเคลื่อนย้ายลงมายังรากเพื่อการพัฒนาหัว ทั้งนี้ยกเว้นแคลเซียม แมกนีเซียมและแมงกานีสที่ส่วนมากยังสะสมไว้ในส่วนเหนือดิน ปริมาณเชิงเปรียบเทียบของธาตุอาหารต่างๆ ที่สะสมในส่วนเหนือดิน และราก (กรัม/พืช) ของมันสำปะหลังอายุ 12 เดือน มีลำดับ ดังนี้ $N > K > Ca > P > Mg > S > Fe > Mn > Zn > Cu > B$ ส่วนการเก็บเกี่ยวหัวมันสำปะหลัง 1 ตันจะมีธาตุติดไปด้วย ดังนี้ 1.7 – 2.3 กก.N, 0.5 – 0.6 กก.P, 2.5 – 4.1 กก.K, 0.4 – 0.6 กก.Ca, 0.2 – 0.3 กก.Mg และ 0.20 – 0.25 กก.S

แม้ว่ามันสำปะหลังจะเจริญได้ดีในดินซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ แต่ก็ตอบสนองอย่างมากต่อการใส่ปุ๋ย ดังนั้นการปลูกและใส่ปุ๋ยอย่างเหมาะสมจึงจะให้ผลผลิตสูง สำหรับวิกฤตของธาตุอาหารในดิน (พืชให้ผลผลิตสัมพัทธ์ร้อยละ 80) คือ 7 – 9 มก.Mn / กก. และ 8 มก.S/กก.

3. การใช้ปุ๋ยธาตุหลัก

อัตราปุ๋ยที่ควรใช้กับมันสำปะหลังที่ปลูกในกลุ่มดินที่มีเนื้อดินร่วนปนทราย หรือดินร่วนเหนียวปนทราย ในท้องที่จังหวัดระยอง ชลบุรี นครราชสีมา ชัยภูมิ ขอนแก่น นครพนม สกลนคร อุบลราชธานี ฯลฯ ได้แก่ ชุดดินโคราช ห้วยโป่ง วาริน สดึก สูงเนิน ห้างฉัตร ศรีราชา โชคชัย เลย์ ปากช่อง คือ ปุ๋ยไนโตรเจนอัตรา 12 กก.N/ไร่ สำหรับวิธีการกำหนดอัตราปุ๋ยโดยพิจารณาผลการวิเคราะห์ดินและลักษณะเนื้อดินเป็นเกณฑ์ แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 และ 2.4

ตารางที่ 2.1 ความเข้มข้นของธาตุอาหารในส่วนต่างๆของมันสำปะหลังอายุระหว่าง 2 – 4 เดือน ซึ่งปลูกโดยใช้ปุ๋ย 16 กก N, 21 กก P, 13.3 กก K, 3.2 กก S, 1.6 กก Zn, 160 มก B ต่อไร่

ส่วน		ธาตุหลักและธาตุรอง (ก./กก.)					
		N	P	K	Ca	Mg	S
ใบ	บน	57.4	4.2	19.8	7.2	3.4	3.0
	กลาง	51.8	2.7	18.0	10.1	3.8	2.8
	ล่าง	44.0	2.0	15.8	13.4	4.9	2.2
ก้านใบ	บน	22.5	2.2	29.3	9.0	3.9	0.6
	กลาง	14.1	1.4	23.5	11.3	3.9	0.2
	ล่าง	13.5	1.2	22.3	15.4	4.8	0.1
ลำต้น	บน	27.3	3.0	31.5	8.2	3.7	1.8
	กลาง	22.1	2.7	22.1	10.2	3.8	1.6
	ล่าง	12.8	2.2	11.4	6.5	3.1	0.9
ราก		15.2	1.8	15.6	2.4	1.4	0.5
		จุลธาตุ (มก./กก.)					
		C	Cu	Fe	Mn	Zn	
ใบ	บน	15.0	11.9	202	256	128	
	กลาง	16.6	12.1	251	610	149	
	ล่าง	16.5	12.3	288	775	195	
ก้านใบ	บน	13.0	7.9	59	604	106	
	กลาง	12.7	6.9	57	824	146	
	ล่าง	14.5	8.2	93	1456	237	
ต้น	บน	12.7	15.6	104	368	102	
	กลาง	10.5	20.6	108	408	146	
	ล่าง	6.9	19.3	207	186	141	
ราก		6.1	9.2	423	147	64	

ที่มา: Fageria และคณะ, (1997)

ในกรณีที่ดินมีอินทรีย์วัตถุ ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์และโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ต่ำ อัตราปุ๋ยที่เหมาะสมคือ 16 – 8 – 16 กก.N – P₂O₅ – K₂O/ไร่ แต่ถ้าผลการวิเคราะห์ทั้ง 3 รายอยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ก็แนะนำให้ใช้อัตรา 8 – 4 – 8 กก.N – P₂O₅ – K₂O/ไร่ หากกำหนดอัตราปุ๋ยโดยพิจารณาจาก

ลักษณะเนื้อดินอาจถือเกณฑ์ว่าดินทรายและดินร่วนทรายมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ จึงแนะนำให้ใช้อัตรา 16 - 8 - 16 กก. N - P₂O₅ - K₂O/ไร่ ส่วนดินร่วนเหนียวที่มีความอุดมสมบูรณ์ปานกลาง จึงสมควรใช้อัตรา 8 - 4 - 8 กก. N - P₂O₅ - K₂O/ไร่ สำหรับมันสำปะหลังที่ปลูกในดินประเภทนี้

ตารางที่ 2.2 ความเข้มข้นของธาตุอาหารไนโบมันสำปะหลังจากต้นอายุ 3 - 4 เดือนที่จัดว่าเพียงพอ ใบดัชนี (index leaf) ที่ใช้ในการวิเคราะห์คือ แผ่นใบบนสุดที่เจริญเต็มที่

ธาตุ	ระดับที่เพียงพอ	ธาตุ	ระดับที่เพียงพอ
N (ก./กก.)	51 - 58	Cu (มก./กก.)	6 - 10
P (ก./กก.)	3.6 - 5.0	Zn (มก./กก.)	30 - 60
K (ก./กก.)	13 - 20	Mn (มก./กก.)	50 - 120
Ca (ก./กก.)	7.5 - 8.5	Fe (มก./กก.)	120 - 140
Mg (ก./กก.)	2.9 - 3.1	B (มก./กก.)	30 - 60
S (ก./กก.)	2.6 - 3.0		

ที่มา: Reuter (1997)

ตารางที่ 2.3 อัตราปุ๋ยธาตุหลักสำหรับมันสำปะหลังที่สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ดิน

ไนโตรเจน		ฟอสฟอรัส		โพแทสเซียม	
อินทรีย์วัตถุ ในดิน (%)	อัตราปุ๋ย (กก. N/ไร่)	P ที่เป็นประโยชน์ (มก./กก.)	อัตราปุ๋ย (กก. P ₂ O ₅ / ไร่)	K ที่แลกเปลี่ยนได้ (มก./กก.)	อัตราปุ๋ย (กก. K ₂ O/ไร่)
< 1	16	< 7	8	< 30	16
1 - 2	8	8 - 30	4	30 - 60	7
> 2	4	> 30	0	> 60	4

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2548)

ตารางที่ 2.4 อัตราปุ๋ยธาตุหลักสำหรับมันสำปะหลังที่ปลูกในดินซึ่งมีเนื้อดินต่างกัน

เนื้อดิน	อัตราปุ๋ย	เทียบเท่ากับสูตรปุ๋ยและอัตราปุ๋ยที่ควรใส่	
	(กก. N - P ₂ O ₅ - K ₂ O/ไร่)	สูตรปุ๋ย	อัตรา (กก./ไร่)
ดินทราย	16 - 8 - 6	15 - 7 - 18	100
ดินร่วนทราย	16 - 8 - 6	15 - 7 - 18	100
ดินร่วนเหนียว	8 - 4 - 8	15 - 7 - 18	50
ดินเหนียวปนกรด	4 - 4 - 8	15 - 15 - 15	30

ที่มา: กรมวิชาการเกษตร (2548)

ส่วนมันสำปะหลังที่ปลูกในกลุ่มดินที่มีเนื้อดินเป็นทรายจัด หรือดินทรายปนดินร่วนในท้องที่จังหวัดระยอง ชลบุรี และขอนแก่น ได้แก่ ชุดดินระยอง พัทยา สัตหีบ น้ำพอง และบ้านบึง ควรใช้ปุ๋ยอัตรา 16 - 8 - 16 กิโลกรัม N - P₂O₅ - K₂O ต่อไร่ โดยใส่ปุ๋ยในหลุมข้างต้นแล้วกลบดินหลังจากปลูก 1 - 3 เดือน อย่างไรก็ตามเนื่องจากดินดังกล่าวมีเนื้อดินหยาบมากและอินทรีย์วัตถุในดินต่ำ จึงอาจใส่ปุ๋ยไนโตรเจนเพิ่มเติมอีก 6 - 8 กิโลกรัม N ต่อไร่ เป็นการใส่ครั้งที่สอง (ปิยะและคณะ, 2542ข)

ความสำคัญของจุลธาตุเหล็กต่อมันสำปะหลัง

เหล็ก (Fe) เป็นจุลธาตุที่มีปริมาณมากที่สุดในดิน มีความสำคัญในการเจริญเติบโตของพืชไม่แพ้ธาตุอื่น ๆ เนื่องจากเหล็กมีบทบาทสำคัญในขบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์ เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ เช่น คตะเลส เพอร์ออกซิเดส (catalase Peroxidase) และมีความสำคัญต่อขบวนการเปลี่ยนแปลง RNA ของคลอโรพลาสต์ (chloroplasts) โดยที่เหล็กในดินส่วนใหญ่จะอยู่ในสภาพของแร่ชนิดต่าง ๆ ดังนี้ ฮีมาไทต์ (Fe₂O₃) ไพไรต์ (FeS₂) จาโรไซต์ [K Fe₂ (OH)₆ (SO₄)₄] โอลิวีน (Mg, Fe) SiO₄ และ ฮอร์นเบลนด์ [(Na, Ca)₂(Mg, Fe, Al)₅ (Si, Al)₈ O₂ (OH)₂] เมื่อแร่เหล็กชนิดต่างๆ ผุพังสลายโดยขบวนการต่างๆ ก็จะปลดปล่อยเหล็กออกมา เหล็กในดินที่อยู่ในรูปของอินทรีย์ที่ละลายได้ เช่น เฟอร์ริก (Fe³⁺) และเฟอร์รัสไฮดรอกไซด์ [Fe(OH)₂] พืชสามารถนำเหล็กไปใช้ประโยชน์ได้จะอยู่ในรูปเฟอร์รัส (Fe²⁺) เหล็กเป็นตัวกระตุ้นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างคลอโรฟิลล์และเอนไซม์เพอร์ออกซิเดสซ์ เป็นส่วนประกอบของไซโตโครมซึ่งเป็นสารตัวกลางในการถ่ายทอดอิเล็กตรอน ทั้งในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง และการหายใจ เป็นส่วนประกอบของเฟอรดอกซินที่อยู่ในคลอโรพลาสต์ ซึ่งเป็นสารสำคัญในการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนของกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช นอกจากนี้ธาตุเหล็กยังเป็นองค์ประกอบสำคัญของโครงสร้างคลอโรพลาสต์ โดย 75 เปอร์เซ็นต์ของคลอโรพลาสต์จะมีธาตุเหล็กเป็นองค์ประกอบ (Havlin และคณะ, 2005) ปริมาณของคลอโรฟิลล์ในพืชมีความสัมพันธ์อยู่กับปริมาณของธาตุเหล็กที่พืชได้รับ เมื่อพืชได้รับธาตุเหล็กในปริมาณที่เพียงพอจะทำให้กระบวนการสังเคราะห์คลอโรฟิลล์เกิดได้ดีขึ้น และเมื่อพืชเกิดการขาดเหล็กใบของพืชจะหยุดสร้างคลอโรฟิลล์ทันที อาการผิดปกติดังกล่าวนี้เรียกว่าคลอโรซิส คือใบมีสีเหลืองซีดหรือขาวซีด พืชทั่วไปมีระดับขาดแคลนวิกฤติของเหล็กในใบระหว่าง 50-150 มก./กก. (น้ำหนักแห้ง) ซึ่งถือว่าเป็นความเข้มข้นที่ค่อนข้างต่ำ และหากต่ำกว่านี้จะแสดงอาการขาดเหล็ก ธาตุเหล็กเป็นธาตุที่ไม่เคลื่อนย้ายภายในพืช พืชไม่สามารถดึงเอาเหล็กจากส่วนที่สะสมอยู่ที่ใบเก่าเพื่อนำไปใช้ในใบอ่อนได้ จึงแสดงออกที่ส่วนยอดอ่อนหรือใบอ่อน อาการขาดธาตุเหล็กของพืชมีลักษณะแตกต่างกันไปบ้างตามชนิดของพืช ลักษณะอาการคลอโรซิสมักพบกับพืชหลายชนิด โดยเฉพาะที่ปลูกในสภาพภูมิอากาศแบบกึ่งแห้งแล้ง และพืชที่ปลูกบนดินคัลคาเรียส เช่น แอปเปิ้ล อโวคาโด ข้าวบาร์เลย์ ส้ม ถั่วลิสง มันสำปะหลัง ถั่วเหลือง และพืชจำพวกไม้ดอกอีกหลายชนิด (Chen และ Barak, 1982)

เหล็กที่พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จะอยู่ในรูปเฟอร์รัส (Fe²⁺) ดินไรที่เป็นกรดเมื่อถูกน้ำขังหรือน้ำท่วม ดินจะเกิดอยู่ในสภาพรีดักชัน (reduction) เฟอร์ริกจะถูกเปลี่ยนไปอยู่ในรูปเฟอร์รัส ถ้าละลายออกมามากก็อาจทำให้เป็นพิษได้ ดินที่เป็นดินกรดหรือดินเปรี้ยว ทำให้เกิดปัญหามีเฟอร์รัสละลายออกมา เกิดเป็นพิษต่อพืชได้ ส่วนดินไรที่มีอากาศถ่ายเทได้ดี และดินประเภท ดินต่างจัด (calcarous soil) เหล็กจะอยู่ในสภาพที่ละลายยากทำให้ดินเกิดอาการขาดธาตุเหล็กได้ อาการของพืชที่ขาดธาตุเหล็ก ใบจะเป็นสีเหลืองอ่อน และสีขาว จะพบทั้งต้น ใบล่างจะมีจุดสีน้ำตาล เริ่มจากจุดยอดและกระจายไปทั่ว

วิธีแก้ไขปัญหามันสำปะหลังขาดธาตุเหล็ก โดยใส่เกลือของเหล็ก เช่น ไอร์ออนซัลเฟต (FeSO_4) ลงไปในดิน หรือละลายน้ำฉีดสเปรย์ลงไปที่พืช หรือใช้สารประกอบเหล็กคีเลต (iron chelates) ซึ่งสามารถละลายน้ำ และฉีดให้แก่พืชโดยตรงได้แก่ ไอร์ออนอีดีทีเอ (Fe EDTA) และไอร์ออนดีทีพีเอ (Fe DTPA) ในกรณีที่พืชรับธาตุเหล็กมากเกินไป มักจะเกิดในข้างที่ปลูกในดินกรด ในส่วนใบแก่จะแสดงอาการเป็นสีเงิน (bronze)

อาการขาดเหล็กในมันสำปะหลัง

อาการที่สำคัญของมันสำปะหลังที่ขาดธาตุเหล็ก คือ ใบอ่อนหรือใบที่อยู่ด้านบนของลำต้น บริเวณยอดมีสีเหลืองส้ม หรือสีเขียวซีดอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งใบ การขาดธาตุเหล็กเกิดกับดินที่ใช้ปลูกมันสำปะหลังที่มีปัญหาบางประการ เช่น ดินต่าง ดินทราย หรือดินกรวด สำหรับแมงกานีสเป็นอีกธาตุหนึ่งที่มีมันสำปะหลังแสดงอาการขาดธาตุโดยแสดงอาการผิดปกติบนใบเช่นเดียวกันกับการขาดธาตุเหล็ก แต่มีข้อแตกต่างกันตรงที่การขาดธาตุแมงกานีสจะแสดงอาการขาดธาตุไม่ชัดเจน โดยใบมีสีเหลืองเริ่มจากขอบแล้วลุกลามเข้าสู่บริเวณกลางใบ ในขณะที่การขาดธาตุเหล็กใบของมันสำปะหลังที่แสดงอาการผิดปกติจะมีอาการสีเหลืองทั่วใบพร้อมกัน ส่วนมันสำปะหลังที่ขาดธาตุสังกะสี แสดงอาการผิดปกติอยู่ 2 ลักษณะ คือ ลำต้นและใบ ลำต้นมีลักษณะเตี้ย แคระแกร็น ส่วนใบอ่อนมีสีเหลืองหรือสีขาวสลับเขียว โดยอาการที่สังเกตได้อย่างชัดเจน คืออาการใบสีเหลืองของใบอ่อน อาการใบเหลืองเกิดจากปลายใบก่อนลุกลามเข้าสู่โคนใบ และตำแหน่งที่อาการใบสีเหลืองเกิดตรงใบลำดับที่ 2 - 3 นับจากส่วนยอดลงมา ใบอ่อนของมันสำปะหลังที่ขาดสังกะสีมีอาการใบเหลืองแต่มีความแตกต่างจากการขาดแมงกานีส คือ ใบมันสำปะหลังที่ขาดสังกะสีเริ่มแสดงอาการใบเหลืองที่ปลายใบก่อนลุกลามเข้าสู่โคนใบ ในขณะที่มันสำปะหลังที่ขาดแมงกานีส ใบอ่อนแสดงอาการใบเหลืองพร้อมกันทั่วทั้งใบ (ยงยุทธ, 2558)



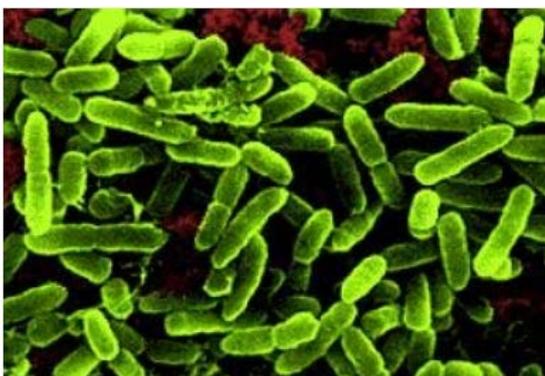
ภาพที่ 2.1 มันสำปะหลังที่ขาดธาตุเหล็ก
ที่มา ศูนย์วิจัยพืชไร่นครสวรรค์, 2551

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

Plant Growth Promoting Rhizobacteria หรือ PGPR เป็นกลุ่มของแบคทีเรียหลากหลาย species และหลากหลายสายพันธุ์ ซึ่งกลุ่มของ PGPR ส่วนใหญ่จะอยู่ในสกุล *Pseudomonas*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bacillus*, *Burkholderia*, *Gluconacter* และ *Serratia* เป็นต้น (ตัวอย่างเซลล์ของ PGPR ดังแสดงในรูปที่ 2 - 4) โดย PGPR จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ

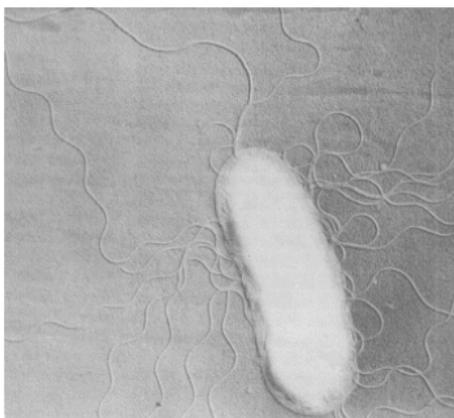
1. พวกที่มีความสัมพันธ์แบบพึ่งพาวอาศัยกันกับพืช หรือที่เรียกว่าความสัมพันธ์แบบ Symbiosis คือแบคทีเรียจำพวกที่สามารถเข้าสู่รากพืชแล้วเกิดกระบวนการต่างๆ ที่จะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชได้

2. พวกที่อาศัยแบบอิสระในดิน (Free-living form) และจะพบอยู่ใกล้ ๆ บริเวณรากพืช โดยแบคทีเรียจำพวก PGPR จะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช ช่วยให้ผลการผลิตของพืชสูงขึ้น



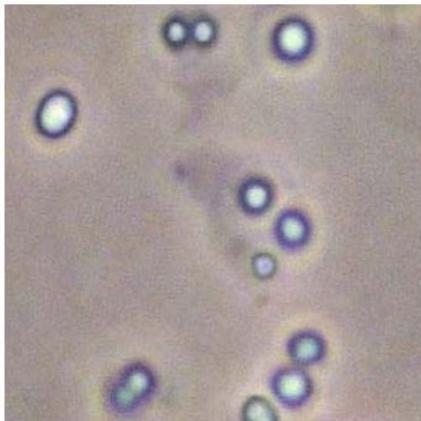
ภาพที่ 2.2 *Pseudomonas* spp.

ที่มา : <http://www.astrosurf.com/lombry/bioastrocontamin-alh84001.html>



ภาพที่ 2.3 *Azospirillum* spp.

ที่มา : <http://www.cnpab.embrapa.br/servicos/baby/azospiri.html>



ภาพที่ 2.4 *Azotobacter* spp.

ที่มา : <http://www-micro.msb.le.ac.uk/video/Azotobacter.html>

กระบวนการในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชมีได้ 2 ทางคือ โดยทางตรงและทางอ้อม ดังนี้

กระบวนการในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชโดยทางตรง ได้แก่

- ช่วยย่อยธาตุฟอสฟอรัสในดินให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นประโยชน์ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ได้มากขึ้น
- สร้างปุ๋ยไนโตรเจนให้กับพืช
- ผลิตสาร phytohormones เช่น Auxin, Cytokinin, Gibberelin เป็นต้น
- ช่วยลดความเข้มข้นของเอทิลีนในพืช
- สามารถผลิตไซเดอร์โรเฟอร์ (Siderophores) ช่วยนำธาตุเหล็กไปให้พืชใช้ประโยชน์ได้ง่ายขึ้น

กระบวนการในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชโดยทางอ้อม ได้แก่

- ช่วยในการควบคุมโรคพืช ทั้งโรคพืชที่เกิดจากเชื้อราสาเหตุโรคพืช (ดังตารางที่ 6) และเชื้อแบคทีเรียสาเหตุโรคพืช
- ผลิตสารปฏิชีวนะ (Antibiotic) ที่ใช้ในการควบคุมโรคพืชได้
- ผลิตเอนไซม์ที่สามารถย่อยผนังเซลล์ของเชื้อราสาเหตุโรคพืชได้
- ผลิตสาร Antifungal Metabolites
- จำกัดปริมาณธาตุเหล็กที่เป็นประโยชน์ของเชื้อโรคพืช ทำให้สามารถป้องกันการแพร่พันธุ์ และขยายจำนวนของเชื้อโรคพืชได้ โดยการผลิตไซเดอร์โรเฟอร์

ตัวอย่างของแบคทีเรียที่เป็น PGPR ดังสรุปในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ตัวอย่าง Plant Growth Promoting Rhizobacteria

<i>Azorhizobium caulinodans</i>	<i>Citrobacter freundii</i>
<i>Azospirillum amazonense</i>	<i>Curtobacterium flaccumfaciens</i>
<i>Azospirillum halopraeferens</i>	<i>Enterobacter agglomerans</i>
<i>Azospirillum irakense</i>	<i>Enterobacter cloacae</i>
<i>Azospirillum lipoferum</i>	<i>Erwinia herbicola</i>
<i>Azospirillum brasilense</i>	<i>Flavomans ovyzihabitans</i>
<i>Azotobacter Chroococcum</i>	<i>Hydrogenophaga pseudoflava</i>
<i>Bacillus cereus</i>	<i>Klebsiella planticola</i>
<i>Bacillus coagulans</i>	<i>Klebsiella ascorbata</i>
<i>Bacillus laterosporus</i>	<i>Klebsiella cryovcrescens</i>
<i>Bacillus licheniformis</i>	<i>Phyllobacterium rubiacearum</i>
<i>Bacillus macerans</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
<i>Bacillus megaterium</i>	<i>Pseudomonas aureofaciens</i>
<i>Bacillus mycoides</i>	<i>Pseudomonas corrugate</i>
<i>Bacillus pasteurii</i>	<i>Pseudomonas fluorescens</i>
<i>Bacillus polymyxa</i>	<i>Pseudomonas marginalis</i>
<i>Bacillus pumilus</i>	<i>Pseudomonas putida</i>
<i>Bacillus sphaericus</i>	<i>Pseudomonas rubrilineans</i>
<i>Bacillus subtilis</i>	<i>Rathyibacter rathayi</i>
<i>Burkholderia cepacia</i>	<i>Serratia marcescens</i>
<i>Burkholderia gladioli</i>	<i>Stenotrophominas sp.</i>
<i>Burkholderia graminis</i>	<i>Streptomyces griseoviridis</i>
<i>Burkholderia vietnamensis</i>	

ที่มา : Glick, B. R., Patten, C. L., Holguin, G. & Penrose D. M. (1999)

ตารางที่ 2.6 ตัวอย่าง PGPR ที่ช่วยในการควบคุมเชื้อราที่เป็นสาเหตุของโรคพืช

PGPR	เชื้อราสาเหตุโรคพืช	ชนิดพืช
<i>Actinoplanes</i> spp.	<i>Pythium ultimum</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	Table beet Table beet
<i>Bacillus</i> spp.	<i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i>	ข้าวสาลี
<i>B. subtilis</i> GB03	<i>Fusarium oxysporum</i> sp. <i>Ciceris</i>	ถั่วเขียว
<i>B. subtilis</i> BACT-D	<i>Pythium oxysporum</i> sp. <i>Ciceris</i>	มะเขือเทศ
<i>Burkholderia cepacia</i> A3R	<i>Fusarium graminearum</i> <i>Fusarium</i> spp.	ข้าวสาลี ข้าวสาลี
<i>Burkholderia cepacia</i> PHQM 100	<i>Phythium</i> spp.	ข้าวโพด
<i>Comamonas acidovorans</i> HF42	<i>Magnaporthe poae</i>	Kentucky bluegrass
<i>Enterobacter</i> sp. BF14	<i>Magnaporthe poae</i>	Kentucky bluegrass
<i>Pseudomonas chloroaphis</i> MA342	<i>Drehslera graminea</i> <i>D. avenea</i> <i>Ustilago avenea</i>	ข้าวบาเลย์ ข้าวโอ๊ต ข้าวโอ๊ต
<i>P. chloroaphis</i> PCL1391	<i>Fusarium oxysporum</i> sp. <i>Radici-</i> <i>lycopersici</i>	มะเขือเทศ
<i>P. fluorescens</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> sp. <i>Raphanin</i>	หัวผักกาด
<i>P. fluorescens</i> Q8rl-96	<i>Gaeumannomyces graminis</i>	ข้าวสาลี
<i>P. fluorescens</i> VO61	<i>Pythium ultimum</i> <i>Rhizoctonia solani</i>	ข้าว
<i>P. putida</i>	<i>Fusarium oxysporum</i> sp. <i>Raphani</i>	หัวผักกาด
<i>Stenotrophomonas</i> <i>maltophilia</i> C3	<i>Rhizoctonia solani</i>	Tall fescue

ที่มา : Glick, B. R., Patten, C. L., Holguin, G. และ Penrose, D. M. (1999)

กลไกการให้ธาตุอาหารและการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช

แบคทีเรีย PGPR จะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชได้ 2 ทาง คือ โดยทางตรงและทางอ้อม ดังต่อไปนี้

กลไกทางตรง

ไซเดอร์โรฟอรัส (Siderophores)

ไซเดอร์โรฟอรัสช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของพืชในทางตรง (ช่วยในการนำเอาธาตุเหล็กเข้าสู่พืช) และกลไกการนำธาตุเหล็กเข้าสู่เซลล์ โดยโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัส

กลไกทั่วไปของการนำธาตุเหล็กเข้าสู่เซลล์ โดยโมเลกุลไซเดอร์โรฟอรัสนั้นประกอบไปด้วยขั้นตอนหลัก 3 ขั้นตอน คือ

1. เริ่มการสังเคราะห์โมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัส จากนั้นจึงแพร่ผ่านผนังเซลล์ออกไปสู่สิ่งแวดล้อม
2. ไซเดอร์โรฟอรัสจับกับธาตุเหล็ก แล้วถูกดึงกลับเข้าสู่เซลล์ โดยกระบวนการ active transport

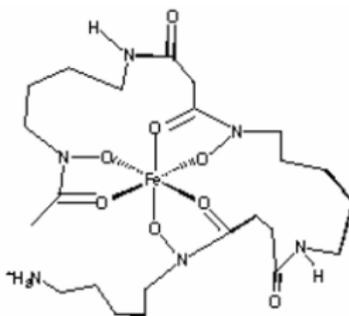
3. ปลดปล่อยโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัสที่ดึงธาตุเหล็กออกแล้วคืนสู่ภายนอกเซลล์

เมื่อโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัสเข้าจับกับธาตุเหล็กแล้วนั้น โมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัสจะจับกับโปรตีนที่ผนังเซลล์ซึ่งทำหน้าที่เป็น receptor protein จากนั้นจะถูกขนย้ายผ่านเข้ามายังผนังเซลล์ โดยกระบวนการ active transport กล่าวคือ สาร ATP ที่ผนังเซลล์จะเป็นตัวกระตุ้นให้โปรตีนอีกชนิดหนึ่งที่มี ATP เกาะอยู่แล้ว โดยการส่งผ่านพลังงานทำให้ธาตุเหล็กเข้าสู่ภายในส่วนของ cytoplasm ได้ ทั้งนี้แต่และชนิดของไซเดอร์โรฟอรัสเองจะมีความจำเพาะเจาะจงต่างกันไปกับโปรตีนต่างๆ ที่ผนังเซลล์ด้วย เมื่อโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัสที่จับธาตุเหล็กถูกนำผ่านเข้ามายังผนังเซลล์แล้ว ธาตุเหล็กก็จะปลดปล่อยออกจากโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัส โดยอาศัยกลไกสำคัญ 3 ขั้นตอนแรก เมื่อโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัสที่มีธาตุเหล็กจับอยู่ก่อนที่จะเข้ามายัง cytoplasm นั้น บริเวณโมเลกุลที่เป็น ligand ที่เชื่อมกับธาตุเหล็กจะถูกสลาย เช่น เอนไซม์ esterase จะเข้าทำปฏิกิริยากับไซเดอร์โรฟอรัสกลุ่ม entorebactin หรือธาตุเหล็ก อาจถูกปลดปล่อยโดยปฏิกิริยาเคมีแบบ reduction เมื่อธาตุเหล็กถูกปลดปล่อยออกจากโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัสแล้ว ส่วนที่เป็นโมเลกุลของไซเดอร์โรฟอรัสเอง อาจถูกเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไปจากเดิมหรือไม่ก็ได้ แล้วจึงถูกปลดปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อจับกับธาตุเหล็กต่อไป

ตัวอย่างกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างไซเดอร์โรฟอรัส

Streptomyces sp.

แบคทีเรียกลุ่มนี้จะสร้างไซเดอร์โรฟอรัสจำพวกที่เรียกว่า Ferrioxamine ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของ diamines และ carboxylic acid ปัจจุบันพบว่า Ferrioxamine มีด้วยกันทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ Ferrioxamine **A₁**, **A₂**, B, **D₁**, **D₂**, E, G และ I นอกจากนี้ Ferrioxamine จะพบในสกุลอื่นๆ ด้วย เช่น *Arthrobacter*, *Chromobacterium*, *Pseudomonads* และ *Erwinia herbicola* เป็นต้น (Teaumroong & Boonkerd, 1996)



Ferrioxamine B = $\text{Fe}(\text{HDFB})^+$

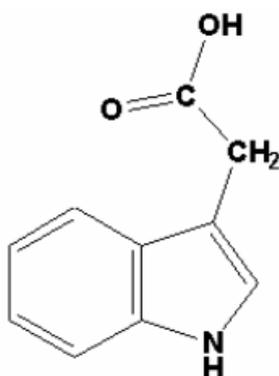
ภาพที่ 2.5 โครงสร้าง ferrioxamine B

Bacillus sp.

แบคทีเรียในกลุ่มที่นิยมศึกษา ได้แก่ *Bacillus megaterium* ซึ่งสร้างไซเดอร์โรฟอร์ที่ชื่อ Schizokinen ส่วน *B. subtilis* นั้นสร้างไซเดอร์โรฟอร์ชื่อ DHB-glycine การนำธาตุเหล็กเข้าสู่เซลล์ด้วย Schizokinen พบว่ามีบทบาทร่วมกับไซเดอร์โรฟอร์กลุ่มอื่นด้วยเช่น Ferrioxamine และในขณะเดียวกัน DHB-glycine ก็มีบทบาทร่วมกับสารประกอบที่มีกลุ่มของ phenol ด้วย (Teaumroog และ Boonkerd, 1996)

ฮอร์โมนพืช (phytohormones)

การผลิต phytohormones โดย PGPR เป็นกลไกที่สำคัญในการช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ ในการเจริญเติบโตของพืช โดยรายงานเกี่ยวกับการผลิต phytohormones จาก PGPR ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่ บทบาทของ phytohormones กลุ่มที่เรียกว่า Auxins ซึ่ง phytohormones ในกลุ่มของ Auxins ก็ได้แก่ indole-3-acetic acid (IAA) ซึ่งจะช่วยกระตุ้นการยืดตัวของเซลล์ (cell elongation), การแบ่งเซลล์ (cell division) และการเปลี่ยนสภาพของเซลล์ (cell differentiation)

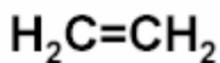


Indole-3-acetic Acid (Auxin)

ภาพที่ 2.6 โครงสร้าง indole-3-acetic acid (IAA)

เอทิลีน (Ethylene)

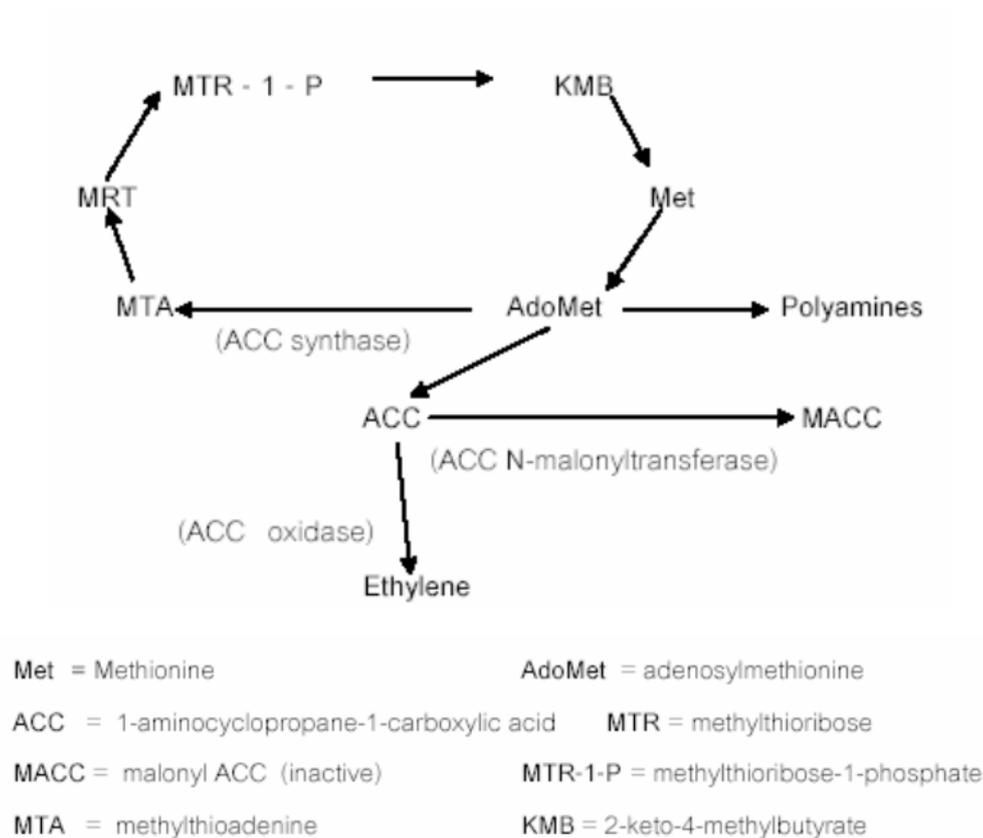
เอทิลีน (Ethylene) เป็นฮอร์โมนพืชเพียงตัวเดียวที่อยู่ในรูปแก๊ส โดยพืชสร้างขึ้นเพื่อใช้ควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาการต่างๆ เช่น การออกดอก การสุกของผล และมีผลต่อการเหี่ยวและการร่วงของใบด้วย



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างของเอทิลีน

วิถีการสังเคราะห์เอทิลีนเริ่มจากกรดอะมิโนเมไทโอนีน (Methionine) ทำปฏิกิริยากับ ATP เกิด S-adenosylmethionine (SAM) ต่อมา SAM จะเปลี่ยนเป็น 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) และ ACC จะสลายตัวเป็นเอทิลีน โดยกิจกรรมของเอนไซม์ที่ฝังตัวอยู่ในเยื่อหุ้มแวคิวโอลคือ EFE (ethylene forming enzyme) จากการศึกษาพบว่าขั้นตอนที่จำกัดอัตราการสังเคราะห์เอทิลีน คือขั้นตอนการสร้าง ACC จาก SAM ซึ่ง CATALYSE โดยเอนไซม์ ACC synthase ซึ่งถูกกระตุ้นโดยปัจจัยภายนอก เช่น การเกิดแผล การขาดน้ำ เป็นต้น และปัจจัยภายใน เช่น ปริมาณออกซิเจนสูง กระบวนการสุกของผล เป็นต้น

นอกจากนี้ PGPR บางชนิดยังสามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืชผ่านกลไกของเอนไซม์ 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase ได้อีกทางหนึ่งด้วย และยังพบว่าเมื่อ PGPR สังเคราะห์ออกซิน ได้ในปริมาณสูง ก็จะมีการสังเคราะห์ เอนไซม์ ACC synthase สูงด้วยซึ่งทราบผลมาจากการที่พบปริมาณ ACC สูงขึ้นในพืชนั่นเอง หลังจากนั้น แบคทีเรียจะย่อย ACC โดยเอนไซม์ 1-amino-cyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase แล้วเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย และ alphaketobutyrate และถ้าระดับของเอทิลีนมีปริมาณที่สูงเกินไปก็จะสามารถยับยั้งการงอกและสามารถยับยั้งการยืดยาวของรากพืชได้ และจากการที่แบคทีเรียสามารถย่อย ACC ได้ ดังนั้นระดับ ACC ก็จะทำให้รากงอกได้ในระดับที่ไม่สามารถจะยับยั้งการเจริญของรากและการงอกได้นั่นเอง



ภาพที่ 2.8 วิธีการสังเคราะห์เอทิลีน

กลไกทางอ้อม

ไซเดอร์โรฟออร์ (Siderophores)

ธาตุเหล็กจัดเป็นธาตุอาหารมีปริมาณมากบนพื้นผิวโลก แต่โดยทั่วไปธาตุเหล็กอยู่ในรูปของสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยาก หรือไม่สามารละลายน้ำได้เลย ความสามารถในการละลายน้ำของเหล็กมีประมาณ 10 ที่ pH 7.4 ซึ่งปริมาณของการละลายได้เท่านี้ไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ดังนั้นจากความต้องการเพื่อการอยู่รอด จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในดินจึงต้องผลิตสารที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อธาตุเหล็กสูง ซึ่งเป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (0.5 - 1.5 กิโลดาลตัน) ที่เรียกว่า ไซเดอร์โรฟออร์ขึ้นมา

PGPR สามารถป้องกันการแพร่พันธุ์หรือป้องกันการขยายจำนวนของเชื้อโรคพืชได้โดยการผลิตไซเดอร์โรฟออร์ขึ้นมา โดยไซเดอร์โรฟออร์จะไปจับกับธาตุเหล็กที่อยู่บริเวณรอบๆ รากพืช ดังนั้นผลจากการขาดธาตุเหล็กจะสามารถป้องกันเชื้อราสาเหตุโรคพืชได้คือ ทำให้เชื้อราสาเหตุโรคพืชไม่สามารถแพร่พันธุ์ได้นั่นเอง แต่พืชจะไม่ได้รับผลกระทบจากการลดลงของธาตุเหล็กในบริเวณนั้นเพราะว่า พืชสามารถเจริญเติบโตได้ที่ความเข้มข้นของธาตุเหล็กต่ำๆ น้อยกว่า (ประมาณ 1,000 เท่า) ของจุลินทรีย์ โดยนักวิทยาศาสตร์พบว่าในสภาพแวดล้อมที่ขาดธาตุเหล็ก หรือมีธาตุเหล็กในปริมาณน้อย จะกระตุ้นให้

จุลินทรีย์เกือบทุกชนิดมีการสร้างไซเดอร์โรฟอร์มากขึ้น และในทางกลับกัน การสร้างจะถูกยับยั้งเมื่อในสภาพแวดล้อมมีปริมาณของธาตุเหล็กมากขึ้น ยกเว้นในกลุ่มของแบคทีเรียพวก *Lactobacillus* ซึ่งสามารถเจริญได้ในสภาพที่ไม่มีธาตุเหล็กอยู่เลย ใน *Pseudomonas putida* นั้นสามารถผลิตไซเดอร์โรฟอร์ได้ในปริมาณมากและมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมเชื้อราสาเหตุโรครากเน่า *Fusarium oxysporum* ซึ่งเป็นเชื้อราที่ทำให้โรคนิมะเชื้อเทศ ในบางรายงานกล่าวว่า mutant ของแบคทีเรียสายพันธุ์ *P. aeruginosa* ซึ่งเป็นแบคทีเรียที่สร้างไซเดอร์โรฟอร์ได้น้อยนั้นจะไม่สามารถป้องกัน โรค damping off จากเชื้อรา *Phythium* ได้

เอนไซม์ (Enzymes)

PGPR บางชนิดสามารถผลิตเอนไซม์ที่ช่วยป้องกันเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าได้ โดยไปย่อยผนังเซลล์ของเชื้อราเหล่านั้น มีรายงานว่า Plant Growth Promoting Rhizobacteria บางสายพันธุ์เช่น *Pseudomonas stutzeri* สามารถผลิตเอนไซม์ extracellular chitinase และเอนไซม์ laminarinase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยเส้นสายของเชื้อรา *Fusarium solani* ซึ่งเป็นสาเหตุของโรครากเน่าได้ (Lim และคณะ, 1991) และได้มีรายงานว่า PGPR สายพันธุ์ *P. cepacia* สามารถผลิตเอนไซม์ B-1, 3-glucanase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยเส้นสายของเชื้อราสาเหตุโรครากเน่า *Rhizoctinia solani*, *Sclerotium rolfsii* และ *Phythium ultimum* ได้ (Fridlender และคณะ, 1993)

สารปฏิชีวนะ (antibiotics)

หนึ่งในกลไกที่สำคัญในการที่ PGPR จะป้องกันการแพร่พันธุ์ หรือขยายจำนวนของเชื้อโรครากเน่าก็คือความสามารถในการผลิตสารปฏิชีวนะ (antibiotics) ตัวอย่างของสารปฏิชีวนะที่ผลิตโดย PGPR ได้แก่ agrocin 84, agrocin 434, 2, 4 - diacetylphloroglucinol, herbicolin, oomycin, phenazines, pyoluteorin, pyrrolnitrin เป็นต้น

สารต้านเชื้อรา (Antifungal Metabolites)

นอกจาก PGPR จะสามารถผลิตไซเดอร์โรฟอร์ และสารปฏิชีวนะซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการต้านทานเชื้อโรครากเน่าแล้ว PGPR บางชนิด ยังสามารถผลิตสารต้านทานเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าได้ด้วย เช่น *Pseudomonas fluorescens* สามารถสังเคราะห์ hydrogen cyanide ซึ่งทำให้ *Pseudomonas* สายพันธุ์นี้มีความสามารถในการเจริญเติบโตของเชื้อราสาเหตุโรครากเน่าบางชนิดได้ ตัวอย่างเช่น สามารถยับยั้ง *Thielabiopsis basicola* ซึ่งเป็นเชื้อราสาเหตุโรค black root rot ในยาสูบได้ (Ramette และคณะ, 2003)

ในบางรายงานกล่าวว่า จุลินทรีย์หลากหลายสายพันธุ์รวมทั้ง *Cladosporium weneckii*, *Pseudomonas cepacia* และ *P. solanacearum* สามารถย่อยสลายสารประกอบ fusaric acid ได้ซึ่งสารประกอบ fusaric acid ตัวนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายในพืชหลังจากที่พืชถูกเข้าทำลายโดย *Fusarium* (Ramamoorthy และคณะ, 2001)

ไซเดอโรฟออร์ (siderophore)

การสังเคราะห์หรือออกซิเจนมีหลายกลไกที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช (Glick และคณะ, 1999) ได้แก่ การสังเคราะห์และปลดปล่อย ไซเดอโรฟออร์ ซึ่งเป็นธาตุเหล็กที่สำคัญสำหรับเซลล์สิ่งมีชีวิตต่างๆ โดยเชื้อจุลินทรีย์จะปลดปล่อยออกมา เมื่ออยู่ในสภาวะที่ไม่มีธาตุเหล็กหรือมีในปริมาณที่ต่ำมาก และในดินธาตุเหล็กมักอยู่ในรูปที่เซลล์นำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ส่วนใหญ่แบคทีเรียที่ใช้ออกซิเจนและใช้ออกซิเจนได้บ้าง สามารถสังเคราะห์และปลดปล่อยสารที่เรียกว่า ไซเดอโรฟออร์ ซึ่งมีสมบัติจำเพาะในการจับกับธาตุเหล็ก (Fe^{3+}) แล้วนำเข้าสู่เซลล์เพื่อใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆ ของเซลล์จุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่กับพืช คุณสมบัติดังกล่าวจึงช่วยปกป้องพืชจากจุลินทรีย์ก่อโรคพืชได้เนื่องจากจุลินทรีย์ก่อโรคพืชมีความสามารถในการแข่งขันและนำธาตุเหล็กไปใช้ประโยชน์ได้น้อยกว่าจุลินทรีย์ที่สามารถปลดปล่อยสาร ไซเดอโรฟออร์

ความสำคัญของธาตุเหล็ก

ธาตุเหล็กมีความสำคัญทางด้านเป็นแหล่งให้พลังงาน และมีความจำเป็นต่อกระบวนการทางชีวภาพของจุลินทรีย์แทบทุกชนิด ยกเว้นพวกแลคโตบาซิลลัสบางสายพันธุ์ที่ไม่จำเป็นต้องใช้ธาตุเหล็กในการดำรงชีวิต ธาตุเหล็กพบมากเป็นอันดับที่ 4 ของธาตุทั้งหมดบนโลก มีค่า oxidation state เปลี่ยนแปลงในช่วง -2 ถึง +6 พบว่า ค่า oxidation state ช่วง +2 ถึง +3 มีบทบาทสำคัญต่อระบบทางชีวภาพ เช่นขนส่งอิเล็กตรอน องค์ประกอบสำคัญของเลือด เป็นต้น

ความสัมพันธ์ระหว่างไซเดอโรฟออร์กับเหล็ก

สภาวะที่มีออกซิเจนและมีค่าความเป็นกรด - ต่างเป็นกลาง เหล็กมีความสามารถในการละลายต่ำมาก คือ มีความเข้มข้นน้อยกว่า 10 - 17 โมลาร์ เนื่องจากสามารถรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ซิลิเกต และฟอสเฟต เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายน้ำได้น้อยมาก ดังนั้นสภาวะเช่นนี้จุลินทรีย์จะผลิตไซเดอโรฟออร์ออกมานอกเซลล์ ทำให้เกิดการละลาย การเข้าจับและลำเลียงเหล็กจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่เซลล์ เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

การจัดจำแนกไซเดอโรฟออร์

ไซเดอโรฟออร์จำแนกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. Cathecolamides หรือ Cathecolate siderophores (CS) พบได้เฉพาะในแบคทีเรีย เช่น *Bacillus* ได้แก่ *Bacillus megaterium* และ *B. subtilis* สร้างไซเดอโรฟออร์ที่ชื่อ Schizokinen และ DHB glycine ตามลำดับ

2. Hydroxamates หรือ Hydroxamate siderophores (HS) พบในสิ่งมีชีวิตที่เป็นแบคทีเรียและเชื้อรา เช่นแบคทีเรียในกลุ่ม *Streptomyces* จะสร้างไซเดอโรฟออร์ที่เรียกว่า Ferrioxamine ซึ่งประกอบด้วยโมเลกุลของ diamines และ carboxylic acid ปัจจุบันพบว่า Ferrioxamine มีด้วยกันทั้งหมด 9 ชนิด ได้แก่ Ferrioxamine A1, A2, B, D1, D2, E, G, H และ I (หนึ่งเดียวอำรุง และนันทกร บุญเกิด, 2539) โดยเชื้อจุลินทรีย์ปฏิปักษ์ที่ผลิตสารไซเดอโรฟออร์ สามารถจับยึดธาตุเหล็กในธรรมชาติมาใช้ได้ดีกว่าเชื้อสาเหตุโรคพืช ทำให้เชื้อโรคไม่สามารถเข้าทำลายพืชได้

กระบวนการแยกไซเตอร์โรเฟอร์

การนำไซเตอร์โรเฟอร์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ไปใช้ประโยชน์ ต้องผ่านกระบวนการแยกทางเคมีต่าง ๆ โดยใช้เทคนิคทางวิทยาศาสตร์ดังต่อไปนี้ ได้แก่ liquid phase extraction หรือ solid phase extraction หรือ chromatography (ion-exchange ทั้ง cation และ anion รวมทั้ง gel permeation)

การประยุกต์ใช้ไซเตอร์โรเฟอร์

ด้านการแพทย์

กรณีผู้ป่วยมีธาตุเหล็กในร่างกายมากเกินไป (ในส่วนของฮีโมโกลบิน) โดยเฉพาะผู้ที่ป่วยโรค b-thalassaemia นั้น ปัจจุบันวงการแพทย์สมัยใหม่ได้ทำการรักษาโรคนี้ด้วยการฉีดยาชนิดหนึ่งที่มีชื่อว่า Desferral ซึ่งเป็น trihydroxamates siderophore desferrioxamine-B แทนการถ่ายเลือดแต่ยังมีปัญหาและมีผลข้างเคียงอยู่บ้าง ปัจจุบันพยายามหาไซเตอร์โรเฟอร์ตัวใหม่มาใช้ทดแทน Desferral

ด้านการเกษตร

ไซเตอร์โรเฟอร์มีบทบาทในดิน ทำให้เกิดการละลายและการขนส่งเหล็กเข้าสู่พืชได้ ไซเตอร์โรเฟอร์จากจุลินทรีย์ที่ก่อโรคพืช ใช้ในการคาดคะเนปริมาณเหล็กในแหล่งที่อยู่อาศัยและปริมาณจุลินทรีย์ก่อโรคพืชที่ต้องการธาตุเหล็ก ไซเตอร์โรเฟอร์สามารถทำงานร่วมกับ antibiotic ฮอริโมน และ lytic activities บริเวณรากพืชทำให้มีการเร่งหรือยับยั้งการเจริญเติบโตของพืชได้

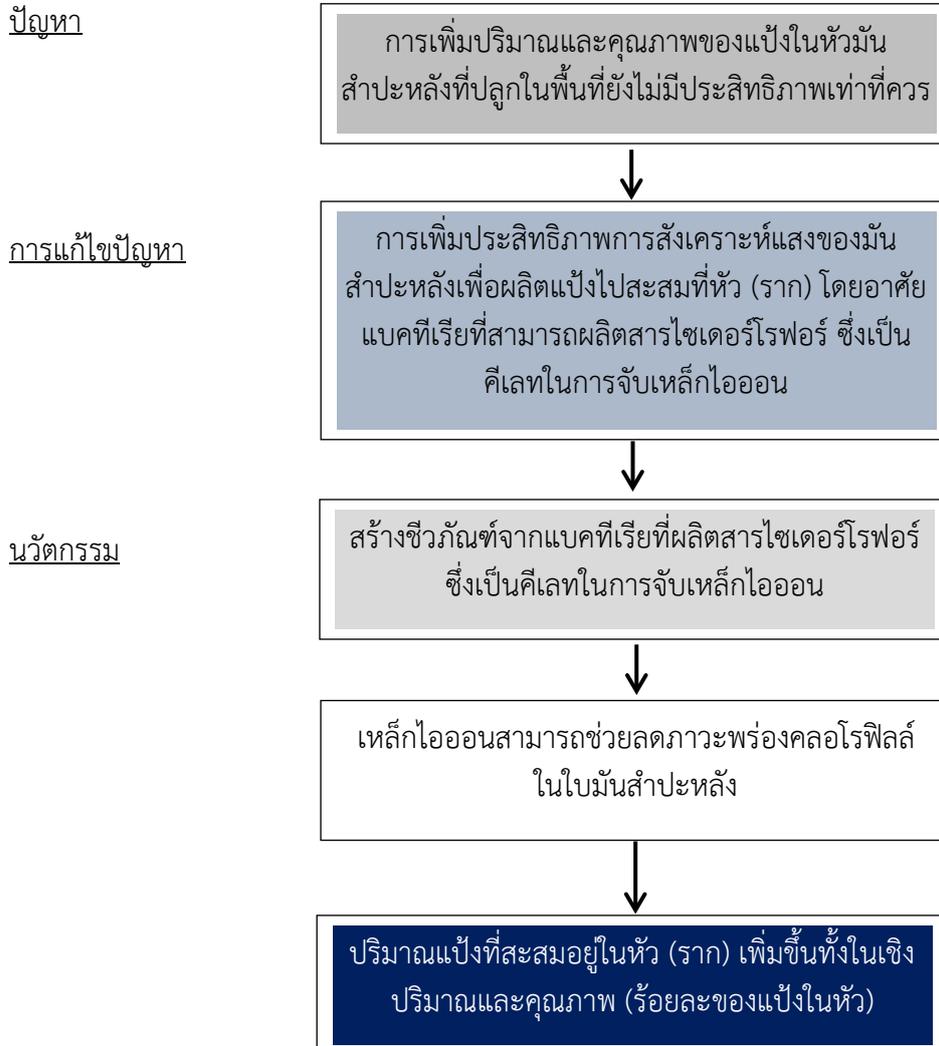
ด้านสิ่งแวดล้อม

นอกจากไซเตอร์โรเฟอร์จะจับกับเหล็กได้ดีแล้ว (Kf ประมาณ 1018 - 1051) ยังมีความสามารถในการจับกับโลหะหนักอื่น ๆ ได้ดีอีกด้วยเช่น นิกเกิล (Ni) สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) อะลูมิเนียม (Al) โครเมียม (Cr) แกลเลียม (Ga) แมงกานีส (Mn) วานาเดียม (V) และโมลิบดีนัม (Mo) เป็นต้น ดังนั้นจึงอาศัยคุณสมบัติในข้อนี้นำมาใช้ในการลดความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิดที่ปนเปื้อนทั้งในน้ำและในดิน

สมมติฐานการวิจัย

การใช้แบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืชที่สามารถผลิตสารไซเตอร์โรเฟอร์ ซึ่งเป็นคีเลทในการจับไอออนของเหล็กในแปลงปลูกมันสำปะหลัง จะช่วยนำธาตุเหล็กไปให้พืชใช้ประโยชน์ได้ ทำให้มันสำปะหลังลดภาวะพร่องคลอโรฟิลล์ ซึ่งทำให้สามารถสังเคราะห์แสงเพื่อผลิตแป้งไปสะสมที่หัว (ราก) ของมันสำปะหลังขึ้น โดยเป็นการเพิ่มขึ้นทั้งเชิงปริมาณและคุณภาพของแป้ง

กรอบแนวคิดในการวิจัย



ภาพที่ 2.9 กรอบแนวคิดในการวิจัย

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sayed, R. Z. และคณะ (2005) ศึกษาการผลิต iron chelators (siderophores) จากแบคทีเรียสกุล *Pseudomonas* ซึ่งสร้างสาร fluorescent 2 ชนิด ได้แก่ *Pseudomonas fluorescens* NCIM 5096 และ *P. putida* NCIM 2847 ที่ผลิตสาร siderophore ชนิด hydroxamate ได้สูงสุด ได้แก่ 87 และ 83% units ตามลำดับ ในอาหารเลี้ยงเชื้อ modified succinic acid medium และจากการศึกษาพบว่า inoculum ของเชื้อ *P. fluorescens* NCIM 5096 ที่สร้างสาร siderophore ช่วยส่งเสริมการเจริญของต้นข้าสาลี (*Triticum aestivum*) โดยสามารถเร่งการงอกของเมล็ด ความยาวของราก และความยาวของลำต้นภายใต้การทดลองในโรงเรือนทดลอง

Zhang, H. และคณะ (2009) ศึกษาแบคทีเรียส่งเสริมการเจริญของพืช *Bacillus subtilis* GBO3 ที่สามารถสร้างสาร siderophore โดยได้ทำการทดลองในพืชตระกูล Arabidopsis เป็นพืชตระกูลมัสตาร์ด มีพืชไทยที่ใกล้เคียงกัน เช่น ต้นคะน้ากับบรอกโคลี จากการศึกษาพบว่า *B. subtilis* GBO3 ช่วยกระตุ้นให้พืชเกิดการสะสมธาตุเหล็ก ส่งเสริมการนำเข้าของจุลธาตุ (รวมถึงธาตุเหล็ก) โดยมีกลไกที่เกิดขึ้นในเซลล์แบคทีเรียในกระบวนการถอดรหัส (Transcription) ได้แก่ การชักนำให้เกิดการสังเคราะห์ Fe-deficiency-induced transcription factor 1 (*FIT1*) ซึ่งเป็นยีนที่เหนี่ยวนำให้เกิดการนำธาตุเหล็กเข้าสู่เซลล์พืช และยีนนี้มีความเกี่ยวข้องกับการสร้างเอนไซม์ ferric reductase FRO2 และ iron transporter IRT1 โดย FRO2 มีส่วนประกอบที่จับกับ FAD และ NADPH ในไซโตซอล และมีหมู่เหล็กที่ช่วยขนส่งอิเล็กตรอนจาก cytosolic pyridine nucleotide ไปยัง ferric chelates ที่อยู่นอกเซลล์ ส่วน IRT1 ทำหน้าที่กระตุ้นการขนส่งธาตุเหล็ก (เพิ่มความสามารถการขนส่งธาตุเหล็ก)

Radzki, W. และคณะ (2013) ศึกษาแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ ที่สามารถสร้างสาร siderophore ได้แก่ *Chryseobacterium* spp. C138 ซึ่งแยกจากรากข้าว (*Oryza sativa*) และ *P. fluorescens* N21.4 ซึ่งแยกจากรากยาสูบ (*Nicotiana glauca*) ทำการศึกษาการส่งเสริมการดูดซึมธาตุเหล็ก โดยแบคทีเรีย 2 สายพันธุ์ในมะเขือเทศที่ขาดธาตุเหล็ก ในสภาวะที่ปลูกแบบ hydroponics โดยแบ่งการทดลองเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 อาหารเลี้ยงเชื้อที่แยกเซลล์แบคทีเรียออก (มีแต่สาร siderophores)+ธาตุเหล็ก กลุ่มที่ 2 อาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเซลล์แบคทีเรีย+ธาตุเหล็ก โดยมีกลุ่มควบคุมคือกลุ่มที่ 3-5 โดยกลุ่มที่ 3 Hogland solution (ปุ๋ยน้ำ) ที่มีธาตุเหล็ก กลุ่มที่ 4 Hogland solution ที่ปราศจากธาตุเหล็ก กลุ่มที่ 5 น้ำ จากการศึกษาพบว่า แบคทีเรียทั้ง 2 สายพันธุ์ ช่วยเพิ่มผลผลิตของมะเขือเทศ และโดยมะเขือเทศที่ได้รับแบคทีเรียจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์และธาตุเหล็กสูงกว่ากลุ่ม positive control กลุ่มที่ 3 Hogland solution ที่มีธาตุเหล็ก แสดงว่า สารไซโตโครโครมช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุเหล็กในพืช และแม้จะเป็นกลุ่มที่มีแต่สาร siderophores (กลุ่มที่ 1) ก็ยังให้ผลเช่นเดียวกับกลุ่มที่มีเซลล์แบคทีเรีย (กลุ่มที่ 2)

Buensanteai, N. และคณะ (2013) ศึกษา plant growth promoting rhizobacteria *Bacillus* sp. strain CaSUT 007 ซึ่งแยกได้จากแปลงมันสำปะหลัง สามารถหลั่งสารที่กระตุ้นการเติบโตของพืช โดยพบว่า สารที่หลั่งออกมาจากแบคทีเรีย ได้แก่ ฮอโรโมนพืชและ extracellular protein เมื่อนำสารที่

แยกได้นี้มาแช่ท่อนพันธุ์ พบว่า ช่วยเพิ่มความยาวของรากและยอดให้เพิ่มขึ้นมากกว่า 30% และเพิ่มน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งขึ้นมากกว่า 25% เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่แช่ท่อนพันธุ์ด้วยน้ำกลั่น

Gamit, D. A. และ Tank, S. K. (2014) ศึกษาผลของแบคทีเรียที่สามารถสร้างสาร siderophore ต่อการเติบโตของถั่วแระ (Pigeon pea *Cajanus cajan*) โดยแยกแบคทีเรียจากดินรอบรากพืชและจัดจำแนกด้วย 16s rDNA พบว่า เชื้อที่แยกได้คือ *Pseudomonas pseudoalcaligenes* เมื่อนำเมล็ดไปจุ่มในสารแขวนลอยแบคทีเรีย พบว่า *P. pseudoalcaligenes* มีประสิทธิภาพในการเร่งการงอกของเมล็ดและส่งเสริมการเติบโตของพืช จากการศึกษาสรุปได้ว่า สารไซเคอร์โรฟอร์ช่วยให้เกิดการสะสมและการละลายของธาตุอาหารเช่น Fe และธาตุอื่น ๆ

Freitas, M. A. และคณะ (2015) ศึกษาการเพิ่มการสะสมธาตุเหล็กในมันสำปะหลัง โดยใช้แบคทีเรียดิน *B. subtilis* GBO3 จากการศึกษาทางชีวเคมี พบว่ายอดของต้นมันสำปะหลังอายุ 140 วัน ที่ได้รับการปลูกเชื้อแบคทีเรีย มีปริมาณธาตุเหล็กสะสมเพิ่มขึ้นกว่ากลุ่มทดลองอื่น โดยตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธี X-ray microanalysis และ Total foliar analysis การศึกษาการส่งเสริมการเติบโตและการเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของ *B. subtilis* GBO3 ทำในกระถางในโรงเรือนทดลอง พบว่าแบคทีเรียสามารถส่งเสริมการเติบโตและเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงของมันสำปะหลัง

Na, Wu Y. และคณะ (2016) ศึกษา *B. subtilis* GBO3 ที่สามารถส่งเสริมการเติบโตและการสังเคราะห์แสงในพืชตระกูล Arabidopsis โดยนำมาศึกษาการกระตุ้นการงอกของเมล็ด การเติบโต และการสังเคราะห์แสงของพืชสมุนไพรจีนชื่อ ตังเซียมหรือตังเซิน (*Codonopsis pilosula*) พบว่า เมล็ดพืชที่จุ่มด้วยซัสเพนชันของ *B. subtilis* GBO3 มีการงอกของเมล็ดเร็วขึ้น กระตุ้นให้เกิดการยืดยาวของรากและยอดพืช การแตกกิ่งและ biomass ของพืช (ทั้งน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้ง) ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของใบ ปริมาณคลอโรฟิลล์และอัตราการสังเคราะห์แสงสุทธิ