

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ข้าวโพดหวานราชินีทับทิมสยาม (Siam Ruby Queen)

ข้าวโพดหวาน (Sweet corn) จัดอยู่ในวงศ์ Poaceae มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays* L. ข้าวโพดหวานเป็นที่นิยมทั้งในการบริโภคฝักสดและนำไปแปรรูป เช่น บรรจุกระป๋อง แช่แข็ง และทำเป็นครีมข้าวโพด (สิริภักดิ์ ธกุลสวัสดิ์ และคณะ, 2561) ในปัจจุบันข้าวโพดหวานพันธุ์ราชินีทับทิมสยามเป็นข้าวโพดหวานสีแดงพันธุ์แรกของโลกที่มีในประเทศไทยแห่งเดียว และจัดว่าเป็นราชินีแห่งข้าวโพดหวาน เนื่องจากมีรสชาติหวาน เมล็ดนุ่ม มีกลิ่นหอม และยังมีสารสีแดงที่อยู่ในข้าวโพดข้าวเหนียว จัดเป็นกลุ่มแอนโทไซยานิน (Anthocyanin) เป็นรงควัตถุ เป็นสารที่ดูดแสง (Visible light) ชนิดเดียวกันกับที่พบในองุ่น ดอกอัญชัน และพืชที่มีสีม่วงกับสีแดงชนิดอื่น และมีผลงานวิจัยออกมามากมายระบุว่า สารแอนโทไซยานิน จะมีปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant) สูง ซึ่งมีผลดีต่อสุขภาพผู้บริโภค ซึ่งมีผลดีต่อสุขภาพผู้บริโภค ดร.ทวีศักดิ์ ภูหล้า กล่าวถึงข้อดีของสารสีแดงที่พบในข้าวโพดจากนั้นทีมงานวิจัยจึงได้เริ่มจากการแยกยีนสร้างสารสีแดงออกมาจากข้าวโพดข้าวเหนียว และนำไปผสมกับข้าวโพดหวานพิเศษด้วยวิธีการปรับปรุงพันธุ์โดยธรรมชาติ ไม่มีการตัดต่อยีนใด ๆ ทั้งสิ้นแล้วจึงคัดเลือกสายพันธุ์พ่อแม่นำไปสร้างลูกผสมใหม่ ซึ่งต้องใช้เวลา 3 ปีกว่า เพื่อคัดเลือกและพัฒนาสายพันธุ์ให้กลายเป็นพ่อแม่พันธุ์ที่มีความหวานกรอบ กลิ่นหอม เป็นเอกลักษณ์ และยังมีสีแดงเข้มสวยงามเหมือนสีทับทิมและทำการคัดเลือกพันธุ์มาเรื่อย ๆ จนกระทั่งปี 2558 ถึงได้พันธุ์ที่นิ่งแล้ว เป็นข้าวโพดหวานสีแดงสายพันธุ์แรกของโลก เพราะได้ทำหนังสือไปสอบถามผู้เชี่ยวชาญของมหาวิทยาลัยมิสซูรี ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งเป็นแหล่งรวบรวมพันธุ์ทั่วโลก ปรากฏว่า ยังไม่เคยพบข้าวโพดหวานสีแดงแบบนี้มาก่อน ดร. ทวีศักดิ์ ภูหล้า จึงได้ตั้งชื่อข้าวโพดหวานพันธุ์นี้ว่า Siam Ruby Queen หรือราชินีทับทิมสยาม (ไทยรัฐ, 2559)

1.1 การปลูกและการดูแลรักษา

การเตรียมดินก่อนปลูก ไถด้วยพาน 3 ลึก 20-30 เซนติเมตร ไถแปลงด้วยพาน 7 ถ้าให้น้ำตามร่องซังร่องรองพื้นด้วยปุ๋ย 15-15-15 (25-50 กิโลกรัม/ไร่) หรือ 8-24-24 (20-30 กิโลกรัม/ไร่) เมื่อปลูกควรคลุกเมล็ดด้วยสารเคมี (ที่บรรจุในซอง) ให้ทั่วถึงหยอดเพียงหลุมละ 1 เมล็ดลึกไม่เกิน 2.5-5 เซนติเมตร กลบดินให้แน่นแถวเดียวระหว่างร่อง 75 เซนติเมตร และระหว่างต้น 25 เซนติเมตร แถวคู่ระหว่างต้น 120 เซนติเมตร และระหว่างต้น 30 เซนติเมตร ให้น้ำหลังปลูกทันทีที่พ่นสารกำจัดวัชพืช (กำจัดหรือควบคุม) ขณะดินเปียกก่อนเมล็ดงอก อายุ 5-7 วันหลังเมล็ดงอกพ่นดิน (มีใบ 1-2 ใบ) ให้น้ำครั้งที่ 2 และหลังจากนี้ควรให้น้ำเมื่อข้าวโพดแสดงอาการขาดน้ำจนเก็บเกี่ยว อายุ 20-25 วัน ให้ปุ๋ย 46-0-0 (10 กิโลกรัม/ไร่) ดินทรายจัดมักขาดธาตุเหล็กหรือสังกะสีให้พ่นด้วยธาตุเหล็ก+สังกะสี+

ทองแดง อายุ 25-35 วันระยะเริ่มเกิดและพัฒนาฝักข้าวโพดผลการรองพื้นด้วยปุ๋ย N P K จะต่อผลดีในการพัฒนาฝักควรตรวจโรคและแมลงให้ดี อายุ 40-45 วันให้ปุ๋ย 46-0-0 (10-20 กิโลกรัม/ไร่) อายุ 48-52 วันตรวจสอบแปลงและนับวันออกใหม่ 50% เริ่มนับเป็นวันที่ 1 อายุ 68 วันขึ้นไปตรวจความแก่อ่อนของฝัก 18-20 วันเพื่อกำหนดวันเก็บเกี่ยว หลังเก็บเกี่ยวไถกลบต้นลงดินเพื่อเพิ่มอินทรีย์วัตถุและปุ๋ยในดินสำหรับการเพาะปลูกในครั้งต่อไป (กรมวิชาการเกษตรกระทรวงเกษตรและสหกรณ์, 2548)

1.2 การเก็บเกี่ยว

ระยะเก็บเกี่ยวข้าวโพดหวานถือเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะหากเก็บเกี่ยวเร็วเกินไปข้าวโพดจะหวานน้อย หากเก็บเกี่ยวช้าเกินไป ข้าวโพดหวานจะมีความหวานลดลงเช่นกัน ระยะการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม คือ หลังข้าวโพดออกใหม่ 18-20 วัน หรือ พบว่าไหมข้าวโพดเปลี่ยนเป็นสีดำ หรือเมล็ดสีน้ำตาลของฝักเปลี่ยนเป็นสีเหลือง หากเมล็ดสีขาวแสดงว่าข้าวโพดอ่อนเกินไป หากเมล็ดสีเหลือง และเมล็ดเริ่มเหี่ยวแสดงว่าแก่จัดเกินไป (พืชเกษตรไทย, 2561)

2. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน

การที่พืชจะเจริญเติบโตได้ดี ต้องประกอบไปด้วยปัจจัยที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโต ได้แก่ แสง น้ำ ธาตุอาหารพืช อุณหภูมิ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ออกซิเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งที่รากและส่วนเหนือดิน (ราเชนทร์ วิสุทธิแพทย์ และคณะ, 2548) การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน จากคำว่า Hydroponics เป็นการปลูกพืชที่ไม่ใช้วัสดุปลูก (Non substrate หรือ Water culture) กล่าวคือ จะทำการปลูกพืชลงบนสารละลายธาตุอาหารพืช โดยให้รากพืชสัมผัสกับสารอาหารโดยตรงนั่นเอง ทั้งนี้จะต้องควบคุมอุณหภูมิ ความเข้มข้นของธาตุอาหารและปริมาณอากาศที่ละลายในสารละลายธาตุอาหารพืชให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของพืช (อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2551) เป็นเทคนิคที่มีมานานหลายปีในแถบ Mediterranean สำหรับการผลิต Floriculture (Maloupa, et al. 1992) และเป็นเทคนิคที่เพิ่มขยายตัวอย่างกว้างขวางในช่วงไม่กี่ 10 ปีที่ผ่านมา (Jensen, 1999) โดยทั่วไปแล้วระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินเพื่อปกป้องพืชจาก Soil-borne pathogens ซึ่งเป็นระบบปลูกที่เหมาะสมต่อการควบคุมโรคราก (Runia, 1995)

การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน เป็นการปลูกพืชที่ใช้หลักการในแบบวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ ด้วยการเลียนแบบการปลูกพืชบนดิน แต่ไม่นำดินมาใช้เป็นวัสดุปลูกในการปลูก หลักการพื้นฐานในการทำให้พืชเจริญงอกงามเติบโตก็เพียงใช้น้ำที่มีการเติมธาตุอาหารต่าง ๆ เป็นการทดแทนธาตุอาหารที่มีอยู่เดิม ต้นพืชก็สามารถเจริญเติบโตได้เช่นกัน ปัจจุบันประชาชนในหลายประเทศทั่วโลก ต่างได้นิยมหันมาปลูกพืชด้วยวิธีนี้กันมากขึ้น เพื่อเป็นการช่วยเพิ่มผลผลิต (ถวัลย์ พัฒนเสถียรพงศ์, 2534)

2.1 สภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน

สภาพแวดล้อมเป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งการตอบสนองต่อปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ไม่ได้แตกต่างกันไม่ว่าจะปลูกพืชด้วยวิธีดั้งเดิมหรือด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์ ปัจจัยที่เป็นตัวควบคุมการเจริญเติบโตและพัฒนาการของพืชมีอยู่หลายปัจจัย แต่มีปัจจัยที่สำคัญดังต่อไปนี้

2.1.1 อุณหภูมิ อุณหภูมิควบคุมอัตราการเจริญเติบโตของพืช โดยมีผลโดยตรงต่อการสังเคราะห์แสง การหายใจ การดูดธาตุอาหาร การคายน้ำ และกิจกรรมของเอนไซม์ต่าง ๆ โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นมีผลในการเร่งขบวนการทางเคมีต่าง ๆ ในพืช ขบวนการเหล่านี้ควบคุมโดยเอนไซม์ ซึ่งจะทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิแคบ ๆ อุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสมจะทำให้เอนไซม์ทำงานลดลง มีผลให้ปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ในพืชลดลงหรือหยุดไปด้วย เมื่อถึงจุดนี้พืชจะอยู่ในภาวะเครียด หยุดเจริญเติบโต และอาจตายได้ในที่สุด การควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชจึงเป็นเรื่องสำคัญ สำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์

2.1.2 ความชื้นสัมพัทธ์ มีผลโดยตรงต่อการคายน้ำของพืช เมื่อความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศสูงจะทำให้พืชคายน้ำน้อยลง ส่งผลให้การลำเลียงแร่ธาตุอาหารต่าง ๆ จากรากไปสู่ใบลดลง และยังทำให้อุณหภูมิที่ใบสูงขึ้น นอกจากนี้ความชื้นสัมพัทธ์สูงยังเป็นสาเหตุทำให้เกิดโรคบางโรคได้ง่ายอีกด้วย

2.1.3 แสง เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโต และพัฒนาการของพืช เพราะแสงเป็นปัจจัยสำคัญในการสร้างอาหารหรือการสังเคราะห์แสงของพืช โดยมีคลอโรฟิลล์เป็นตัวรับแสงไปใช้เป็นพลังงานในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำเป็นคาร์โบไฮเดรต และออกซิเจน แสงมีคุณสมบัติ 3 ประการที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืช ได้แก่ ความยาวคลื่น ความเข้มแสง และระยะเวลาที่พืชได้รับแสง คุณสมบัติที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์ที่สุด คือ ความเข้มแสง ความเข้มแสงที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไป จะมีผลในการลดการสังเคราะห์แสงของพืช ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตน้อยลง สำหรับการปลูกพืชในประเทศไทย ซึ่งอยู่ในเขตร้อนได้รับแสงที่มีความเข้มสูง การปลูกพืชในที่โล่งจึงต้องมีการให้ร่มเงาเพื่อลดความเข้มแสง นอกจากนี้แสงยังสัมพันธ์กับอุณหภูมิ คือ เมื่อแสงมีความเข้มมากขึ้นอุณหภูมิก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งในการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์จะมองข้ามความสัมพันธ์นี้ไม่ได้ เนื่องจากอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ปลูกพืชมีบทบาทอย่างมากต่อกิจกรรมของราก

2.1.4 องค์ประกอบของบรรยากาศ พืชต้องใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์แสง ในอากาศโดยปกติมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 0.03 ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการของพืช นอกจากนี้ในบริเวณที่มีพืชหนาแน่น คาร์บอนไดออกไซด์อาจเป็นตัวจำกัดการเจริญเติบโตของพืช ได้ในเวลากลางวัน เนื่องจากมีการสังเคราะห์แสงเกิดขึ้นมาก นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์แล้ว พืชต้องการออกซิเจนใช้ในการหายใจ เพื่อเปลี่ยนพลังงานเคมีที่สะสมไว้ในรูป

คาร์โบไฮเดรตเป็นพลังงานใช้ในปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ในการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์นั้นส่วนที่อยู่ในเนื้อดินมักไม่มีปัญหาการขาดออกซิเจน เนื่องจากในอากาศมีออกซิเจนอยู่ถึงร้อยละ 20 แต่ในส่วนของรากที่อยู่ในสารละลายมักเกิดปัญหา เนื่องจากปริมาณออกซิเจนที่ละลายอยู่ในน้ำ ไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จึงต้องมีการเติมออกซิเจนในสารละลายซึ่งอาจทำได้โดยใช้ปั๊มหรือเครื่องสูบลม หรืออาจใช้ระบบหมุนเวียนสารละลาย โดยปกติควรรักษาระดับออกซิเจนในสารละลายให้อยู่ที่ 8 ppm

2.1.5 คุณภาพน้ำ คุณภาพน้ำมีความสำคัญมากในการปลูกพืชด้วยวิธีไฮโดรโปนิคส์ เนื่องจากพืชที่ปลูกได้รับธาตุอาหารต่าง ๆ จากสารละลายธาตุอาหารซึ่งต้องใช้น้ำเป็นองค์ประกอบสำคัญ ถ้าน้ำมีการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของโรคต่าง ๆ โรคจะแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว จำเป็นต้องมีการฆ่าเชื้อก่อนนำไปใช้ ซึ่งอาจใช้คลอรีน หรือโซเดียม ไฮโปคลอไรด์ หรือแคลเซียม ไฮโปคลอไรด์ก็ได้ ถ้าน้ำขุ่นเนื่องจากมีสารแขวนลอยจะต้องกรองเอาตะกอนออก

2.1.6 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำมีผลทางอ้อมต่อการเจริญเติบโตของพืช เกี่ยวข้องกับความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหาร กล่าวคือ ค่า pH ของสารละลายโดยทั่วไปควรอยู่ในช่วง 5.5-6.5 หรือให้ดีที่สุดอยู่ในช่วง 5.8-6.2 ซึ่งเป็นช่วงที่พืชสามารถดูดใช้ธาตุอาหารทุกตัวได้ดี แต่หากค่า pH ของสารละลายต่ำกว่า 4 จะเป็นอันตรายต่อรากพืช ในทางตรงข้ามถ้า pH สูงกว่า 7 ติดต่อกันนาน 2-3 วัน จะทำให้การดูดใช้ ฟอสฟอรัส เหล็ก และแมงกานีส ผิดปกติไป ทำให้พืชขาดธาตุอาหารดังกล่าวจนแสดงอาการ ทั้งนี้ในระบบมีธาตุอาหารดังกล่าวอยู่ (อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2553)

2.2 ระบบวัสดุปลูก

วัสดุปลูกหรือเครื่องปลูกมีหน้าที่ให้รากเกาะยึดเพื่อให้ลำต้นตั้งตรง ไมโอนเอนหรือล้ม วัสดุปลูกยังทำหน้าที่สำหรับเก็บความชื้นและธาตุอาหารเพื่อให้รากดูดไปใช้ ขณะเดียวกันวัสดุปลูกก็มีส่วนเกี่ยวข้องกับการระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศรอบ ๆ ระบบราก การพิจารณาเลือกวัสดุปลูกโดยใช้วัสดุปลูกแทนดินนั้นต้องคำนึงถึงคุณสมบัติทางกายภาพ เคมี และชีวภาพของวัสดุปลูก (สุชาติ ภาตระกูล, 2525)

สำหรับข้อควรระมัดระวังของการปลูกด้วยวัสดุ ซึ่งผู้ปลูกควรต้องดูแลไม่ปล่อยให้วัสดุปลูกแห้งจนไม่มีความชื้นอยู่ เพราะถ้าแห้งถึงในระดับหนึ่งรากก็อาจจะไม่สามารถกลับคืนสู่สภาพที่ดีดั้งเดิมได้ อันจะเป็นการก่อให้เกิดความเสียหายต่อแปลงเพาะปลูกนั้นได้ นอกจากนี้ ยังมีปัญหาสำคัญอีกประการหนึ่งในการจะเก็บเศษซากพืชที่เหลือออกจากวัสดุปลูก ให้หมดไปเมื่อต้องการเริ่มปลูกพืชครั้งใหม่ (ดิเรก ทองอร่าม, 2553)

Criley & Watanabe (1974) รายงานถึงคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของวัสดุปลูกดังต่อไปนี้ คือ ความจุในการดูดยึดน้ำไว้ได้ อัตราการซึมน้ำ ช่องว่างอากาศ และความหนาแน่นรวม

ส่วนสมบัติทางเคมี และชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง ความจุในการแลกเปลี่ยนประจุ ปราศจากสารพิษและศัตรูพืช

3. ธาตุอาหารพืช

ธาตุอาหารพืชจำแนกได้เป็น 2 พวก ตามปริมาณที่พืชต้องการ คือ ธาตุอาหารมหัพภาค (Macronutrient elements) ธาตุอาหารจุลภาค (Micronutrient elements) (Epstein, 1972; Gauch, 1972)

3.1 ธาตุอาหารมหัพภาคหรือธาตุอาหารหลัก (Macronutrient elements)

ธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณมาก ความเข้มข้นของธาตุ โดยน้ำหนักแห้งเมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่สูงกว่า 500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน ธาตุเหล่านี้ สามารถเพิ่มเติมให้กับดินในรูปของปุ๋ยได้ ส่วนคาร์บอน และออกซิเจน พืชสามารถรับจากอากาศในรูปของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซออกซิเจน ส่วนไฮโดรเจน พืชสามารถรับได้จากโมเลกุลของน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถแบ่งย่อยตามอาการขาดธาตุในดินเป็น 2 ประเภท คือ

ธาตุอาหารหลัก (Primary nutrient elements) ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เนื่องจากพืชต้องการในปริมาณมากแต่ในดินไม่ค่อยเพียงพอ จึงมีการใช้ปุ๋ยที่มีส่วนประกอบของธาตุทั้งสาม

ธาตุอาหารรอง (Secondary nutrient elements) ได้แก่ แคลเซียม แมกนีเซียม และกำมะถัน ในดินทั่วไปจะพบการขาดธาตุอาหารนี้บ่อย (ราเชนทร์ วิสุทธิแพทย์ และคณะ, 2548)

3.2 ธาตุอาหารจุลภาคหรือจุลธาตุ (Micronutrient elements)

คือ ธาตุอาหารที่พืชต้องการในปริมาณน้อย ความเข้มข้นของธาตุ โดยน้ำหนักแห้งเมื่อพืชเจริญเติบโตเต็มที่ต่ำกว่า 100 มิลลิกรัม ต่อกิโลกรัม ได้แก่ โบรอน คลอรีน ทองแดง เหล็ก แมงกานีส โมลิบดีนัม สังกะสี และนิกเกิล (Stocking & Ongum, 1962)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

3.3 สารละลายธาตุอาหาร

สารละลายธาตุอาหาร เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน เพราะเป็นแหล่งที่ให้ธาตุอาหารแก่พืช สารละลายธาตุอาหารที่มีชนิดและปริมาณธาตุอาหารที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช จะไม่เป็นพิษต่อพืช การที่มีสัดส่วนระหว่างธาตุอาหารที่เหมาะสมจะทำให้ไม่เกิดการแข่งขันในการดูดใช้ธาตุอาหารประจุกเดียวกันในพืช เพื่อให้พืชสามารถเจริญเติบโตอย่างต่อเนื่องจนถึง

กระบวนการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ยังต้องควบคุม pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช (ดิเรก ทองอร่าม, 2547 และ อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2553)

3.4 คีเลต

คีเลต (Chelate) เป็นคำที่ได้มาจากภาษากรีกซึ่งมีความหมายว่า “กรงเล็บ” (Claw) ดังนั้น ถ้าพิจารณาจากรากศัพท์จะเห็นได้ว่าสารคีเลตชนิดต่าง ๆ น่าจะเป็นสารที่มีแนวโน้มที่จะยึดแคตไอออนบางอย่างซึ่งโอกาสอยู่ด้วยกันอย่างเหนียวแน่น และไม่ยอมให้พวกแคตไอออนเหล่านั้นไปทำปฏิกิริยากับสารอื่น ๆ ซึ่งมักทำให้พวกแคตไอออนเหล่านั้นตกตะกอน เช่น การทำปฏิกิริยาของธาตุอาหารที่เป็นบวกกับไฮดรอกซิล หรือฟอสเฟตไอออน กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ พวกจุลธาตุอาหารที่เป็นบวก ซึ่งมักจะตกตะกอนได้ง่ายเมื่อ pH สูงขึ้น และเมื่อมีฟอสเฟต หรือ ซัลไฟด์มากขึ้น แต่จะไม่ตกตะกอนเมื่อไปรวมตัวเป็นโลหะคีเลตที่เหมาะสมบางตัว ภายใต้สภาวะเดียวกันกับที่กล่าวไว้แล้ว ดังนั้น ความเป็นประโยชน์ของจุลธาตุอาหารเมื่อเกิดขบวนการคีเลชัน (Chelation) จึงมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น สารคีเลต (Chelation agent) คือ สารอินทรีย์เคมี ซึ่งสามารถจะรวมและค้ำกันไม่ให้มีการตกตะกอนของพวกแคตไอออนบางชนิด รวมทั้งพวกจุลธาตุอาหารที่เป็นบวกทั้งสิ้น คือ เหล็ก แมงกานีส ทองแดง และสังกะสี ปฏิกิริยาการรวมนี้เรียกว่า Chelation และผลที่ได้จากปฏิกิริยา คือ คีเลต (Chelate) โดยสารคีเลตจะห้อมล้อมแคตไอออนของธาตุที่เป็นโลหะ (Metallic cation) เข้าไว้ จนไม่เปิดโอกาสให้อนุมูลอื่น ๆ ยื่นมือ (Bond) เข้าไปเกาะกับโลหะธาตุที่เป็นประจุบวกนั้นได้ และทำให้โลหะธาตุที่เป็นองค์ประกอบของคีเลตอยู่ในสารละลายที่มี pH สูงกว่า เมื่อโลหะธาตุเหล่านั้น เป็นแคตไอออนอยู่ในสภาพของสารละลายธรรมดา กล่าวง่าย ๆ ก็คือ โลหะธาตุในโครงสร้างคีเลตได้รับการคุ้มครองจึงเกิดการตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะได้ยากขึ้น จึงเป็นประโยชน์ต่อพืชได้มากขึ้น

สารคีเลตมี 2 ประเภท ดังนี้

3.4.1 สารสังเคราะห์ ได้แก่ EDTA, DTPA, HEDTA, NTA และ EDDHA ซึ่งเป็นคำย่อที่มาจากอักษรตัวแรกของชื่อสารประกอบ ดังนี้

EDTA ย่อมาจาก Ethylenediamine tetraacetic acid

CDTA ย่อมาจาก Cyclohexanediamine tetraacetic acid

DTPA ย่อมาจาก Diethylenetriamine tetraacetic acid

EDDHA ย่อมาจาก Ethylenediamine di (o) hydroxyphenylacetic acid

HEDTA ย่อมาจาก Hydroxyethylene diaminetetraacetic acid

3.4.2 อินทรีย์สารจากธรรมชาติ เช่น กรดอะมิโน กรดฮิวมิก สารประกอบเชิงซ้อนบางชนิด และกรดฟีนอลิก เป็นต้น

คีเลตแต่ละชนิดมีเสถียรภาพต่างกันเมื่ออยู่ในค่า pH ที่แตกต่างกัน Fe-EDTA และ Fe-DTPA จะมีเสถียรภาพจนถึง pH 6.5 และ 7.5 ตามลำดับ และ Fe-EDDHA สามารถมีเสถียรภาพใน pH ที่สูงกว่า 7.5 โดยเสถียรภาพของคีเลตในสารละลายธาตุอาหารยังขึ้นอยู่กับชนิด และความเข้มข้นของไอออนอื่นในสารละลายด้วย (ยงยุทธ โอสดสภา, 2547 ; Halvorson & Lindsay, 1972)

3.5 ธาตุเหล็ก

เหล็กในพืชส่วนมากอยู่ภายในคลอโรพลาสต์ผลการวิเคราะห์ใบชูการ์บิตที่กำลังเจริญเติบโตรวดเร็วพบว่า หากแบ่งเหล็กทั้งหมดในใบออกเป็น 5 ส่วน มี 3 ส่วนอยู่ในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ (Thylakoid) หนึ่งส่วนอยู่ในสโตรมา (Stoma) ของคลอโรพลาสต์ อีกหนึ่งส่วนอยู่นอกคลอโรพลาสต์ เมื่อหยุดให้ธาตุเหล็กแก่พืชนี้ปริมาณเหล็กในใบจะลดลงอย่างมาก โดยส่วนที่อยู่ในสโตรมาลดลงเกือบหมด สำหรับในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ และนอกคลอโรพลาสต์ลดลงร้อยละ 51 และ 62 ของที่เคยมีตามลำดับ เหล็กในสโตรมาซึ่งลดลงนี้ คือ ส่วนที่มาจากไฟโตรเฟอร์ริทิน (Phytoferritin) อันเป็นเหล็กสำรองอยู่ในรูปสารประกอบเหล็ก-ฟอสโฟโปรตีน (Fe-phosphoprotein) ประมาณว่า 10-30% ของเหล็กในใบพืชอยู่ในไฟโตรเฟอร์ริทิน ปริมาณและสัดส่วนของเหล็กในรูปนี้เป็นดัชนีอาจบ่งชี้ถึง 1) ความเพียงพอของเหล็กในพืชที่จะใช้ใน เมแทบอลิซึม และ 2) ระดับความเป็นประโยชน์ของเหล็กในเครื่องปลูกสำหรับการใช้เหล็กที่ดูมาได้เพื่อพัฒนาใบนั้น ใบที่กำลังเจริญจะใช้ธาตุนี้เพื่อสร้างเยื่อหุ้มคลอโรพลาสต์มากและเก็บไว้ใน สโตรมาน้อย (ยงยุทธ โอสดสภา, 2547)

4. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity : EC) ในสารละลายธาตุอาหารพืช

ในการเตรียมสารละลายพืชสำหรับการปลูกพืชต่าง ๆ นั้น นอกจากชนิด และปริมาณของธาตุอาหารพืชแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอีกประการ คือ ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารนี้ สามารถดูได้จากค่าการนำไฟฟ้า (EC) เนื่องจากค่า EC คือ ค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นของเกลือทั้งหมดที่ละลายอยู่ในน้ำ เป็นค่าวัดโดยรวม ไม่สามารถแยกบอกความเข้มข้นของเกลือแต่ละตัวได้ ซึ่งค่าการนำไฟฟ้านี้มีหน่วยเป็น มิลลิโมลต่อเซนติเมตร (mmol/cm) หรือ มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร (mS/cm) ค่าการนำไฟฟ้าสำหรับพืชส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 1.5-3.0 mS/cm ถ้าค่าการนำไฟฟ้าสูง หรือต่ำกว่าในช่วงนี้ จะส่งผลกระทบต่อในด้านลบต่อพืช ซึ่งอาจแก้ไขได้โดยการเจือจางสารละลายให้มีความเข้มข้นน้อยลงเมื่อค่าการนำไฟฟ้าสูงเกินไป และถ้าค่าการนำไฟฟ้าต่ำเกินไป สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2553)

ค่าการนำไฟฟ้าที่เหมาะสมแตกต่างกันตามระยะการเจริญเติบโต ความแข็งแรงและชนิดของต้นพืช เช่น ในต้นมะเขือเทศค่าการนำไฟฟ้าที่สูงจะยับยั้งการเจริญเติบโตของต้นพืช แต่จะเหมาะสมกับพืชที่อยู่ในช่วงให้ผลผลิต (Reproductive growth) ค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ จะเหมาะสมต่อ

การเจริญเติบโตทางลำต้นก่อนการให้ผล (Vegetative growth) เมื่อเพิ่มค่าการนำไฟฟ้าให้สูงขึ้น จะมีผลทำให้พืชมีความแข็งแรงมากขึ้น มีการเจริญเติบโตเร็วขึ้น เพิ่มน้ำหนักใบ ผล และดอก ทำให้คุณภาพผลผลิตดีขึ้น เช่น มะเขือเทศจะมีปริมาณน้ำตาลที่สูงขึ้น ปริมาณธาตุอาหาร และกรดในผลเพิ่มขึ้น อายุการเก็บเกี่ยวยาวนานขึ้น อย่างไรก็ตาม การควบคุมให้ค่าการนำไฟฟ้าสูงจะยุ่งยาก และหากค่าการนำไฟฟ้าสูงเกินไปจะทำให้ผลเสีย เช่น ในผักสลัด อาจเกิดอาการยอดไหม้ (Tip burn) (อิทธิสุนทร นันทกิจ, 2553) ค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำนั้น (<1.0 mS/cm) จะทำให้คุณภาพของผลผลิตที่ได้อ่อนนุ่ม ซึ่งจะดีในการปลูกผักสลัด แต่ในมะเขือเทศ และพืชผักชนิดอื่นที่เก็บผลสด พบว่า คุณภาพของผลจะไม่ได้ดี เนื่องจากผลนุ่มเกินไป และรสชาติไม่ดี นอกจากนี้อายุหลังการเก็บเกี่ยว ทั้งผัก ไม้ดอก และไม้ประดับ จะสั้นลง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Lucena, et al. (1990) ทำการทดลองปลูกสโตเบอร์รี่ในระบบไฮโดรโปนิคส์ที่ให้เหล็กคีเลตต่างกัน คือ Fe-EDDHA, Fe-EDTA และ Fe-polyflavonoid พบว่า Fe-EDDHA ให้ผลผลิต และความเข้มข้นของธาตุเหล็กในใบสูงที่สุด รองลงมาคือ Fe-EDTA ในระบบไฮโดรโปนิคส์นั้นส่วนใหญ่จะใช้เหล็กคีเลต อธิบายโดย Halvorson & Lindsay (1972) ความเป็นประโยชน์ของธาตุเหล็กนั้นมีความสัมพันธ์กับค่า pH ในสารละลาย ซึ่งในช่วง pH 6.8-8.0 และเหล็กสามารถถูกย้ายออกจากคีเลต EDTA ได้โดยแคลเซียมไอออน จึงทำให้เหล็กมีประสิทธิภาพลดลง

ณัฐกร อินทรวิชะ, ไพรัตน์ พิมพ์ศิริกุล และอิทธิสุนทร นันทกิจ (2548) ศึกษาผลของระดับความเข้มข้นธาตุอาหารพืช (EC) 3 ระดับ คือ EC 1.0, 1.4 และ 1.8 mS/cm ที่มีผลต่อผลผลิตของผักสลัด 5 ชนิด (Red coral, Red oak, Butterhead, Green oak, Cos) ที่ปลูกในระบบ Nutrient Film Technique (NFT) ภายในโรงเรือนเปิด 2 ช่วงฤดูปลูก (คือ ฤดูฝน และฤดูหนาว) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของธาตุอาหาร (EC) ไม่มีผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักสลัดที่ปลูกในทั้ง 2 ช่วงฤดู แต่ผักที่ปลูกในฤดูฝนจะมีน้ำหนักแห้ง และปริมาณไนเตรทมากกว่าผักที่ปลูกในฤดูหนาวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาแยกตามชนิดของผักสลัดพบว่าค่า EC ไม่มีผลต่อน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของผักสลัดทั้ง 5 ชนิด แต่จะมีผลต่อปริมาณไนเตรท กล่าวคือความเข้มข้นของผักสลัดที่ปลูกในทั้ง 2 ช่วงฤดูกลานั้นมีค่าสูงขึ้นตามระดับของค่า EC ที่เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ในผักสลัด red coral ที่ปลูกในช่วงฤดูฝน ที่ EC 1.8 mS/cm มีความเข้มข้นไนเตรทสูงสุดคือ 3,642 mg NO₃⁻/kg FW รองลงมาคือ ที่ EC 1.4 mS/cm พบว่ามีค่าเท่ากับ 3,544 mg NO₃⁻/kg FW ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ของค่าสูงสุดที่ยอมให้มีได้ตามข้อกำหนดของสหภาพยุโรปของ EC (European commission Regulation No. 194/97)

ปรีชาติ ดิษฐกิจ และธรรมศักดิ์ ทองเกตู (2548) ศึกษาความเข้มข้น และระดับ pH ของ สารละลายธาตุอาหารต่อการเจริญเติบโต ปริมาณไนเตรท และวิตามินซี ของผักกาดหอมคอสที่ปลูกใน โรงเรือนปิดที่มีระบบลดอุณหภูมิ ณ ศูนย์วิจัยพืชผักเขตร้อน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต กำแพงแสน นครปฐม ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2547 ถึง มกราคม 2548 แบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ช่วงอายุการเจริญเติบโต คือ ช่วงที่ 1 (อายุ 1 – 2 สัปดาห์) และช่วงที่ 2 (อายุ 3 – 4 สัปดาห์) พบว่า การใช้ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร (EC) ที่ 1.5 mS/cm ร่วมกับ pH ที่ 5.8 ให้การ เจริญเติบโตที่ดีที่สุด ปริมาณไนเตรทสะสมในผักกาดหอมคอสมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของ สารละลายธาตุอาหาร (EC) สูงขึ้น อย่างไรก็ตามทุกความเข้มข้นที่ใช้ไม่ทำให้ไม่มีการสะสมเกินกว่า ปริมาณไนเตรทสูงสุดที่ยอมรับได้ และพบแนวโน้มว่าปริมาณวิตามินซีในผักกาดหอมมีแนวโน้มสูงเมื่อ ใช้ความเข้มข้นต่ำและผกผันกับปริมาณ NO_3^- นอกจากนี้พบอาการ Tip burn ในผักกาดหอมเกิด รุนแรงมากขึ้นเมื่อปลูกในสารละลายที่มีความเข้มข้น และค่า pH สูงขึ้น

กฤษฎา หงษ์ทอง และศิวาพร ธรรมดี (2553) ศึกษาผลของระดับความเข้มข้นของสารละลาย ธาตุอาหารต่อ การเจริญเติบโต และผลผลิตของแตงกวาญี่ปุ่นในวัสดุปลูกไร้ดิน วางแผนการทดลอง แบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ Randomized Completely Block Design (RCBD) ประกอบด้วย 4 กรรมวิธี 4 ซ้ำ (26 ต้น/ซ้ำ) โดยให้ความเข้มข้นของ สารละลายธาตุอาหารเทียบเป็นค่า Electro-Conductivity (EC) เมื่อเข้าสู่ระยะติดผลเป็น 4 ระดับ คือ 1.0, 2.0, 2.5 และ 3.0 mS/cm พบว่า การให้สารละลาย อาหารที่ EC=3.0 mS/cm มีค่าเฉลี่ยของผลผลิตแตงกวาที่ขายได้ และผลผลิตเกรด 1 ไม่แตกต่างจาก ที่ EC=2.5 และ 2.0 mS/cm แต่มากกว่าที่ EC=1.0 mS/cm ส่วนของการเจริญเติบโตนั้น ความยาว ของใบ แตงกวาญี่ปุ่นที่ได้รับสารละลายธาตุอาหารที่ EC=2.5 mS/cm มีค่ามากกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ

กัญญา แซ่เตียว, อธิสุสุนทร นันทกิจ และวนิดา ดวงกัสน (2555) ได้ทำการศึกษาอิทธิพล ของชนิดเหล็กคีเลต และระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่มีผลต่อปทุมมา ที่ได้จากการ เพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อในระบบปลูก NFT โดยวางแผนการทดลองแบบ 3x3 Factorial in Completely Randomized Design มี 2 ปัจจัยคือ 1) เหล็กคีเลต 3 ชนิด ได้แก่ Fe-EDTA, Fe-DTPA และ Fe-EDDHA 2) ระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร 3 ระดับ คือ EC 1.0, 2.0 และ 3.0 mS/cm ทำการทดลอง 4 ซ้ำ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปลูกปทุมมา ถ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อ ผลิตดอกการใช้ Fe-EDTA ที่ระดับ EC 2.0 จะให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางดอกและน้ำหนักดอกดีที่สุด แต่ไม่แตกต่างกับ Fe-EDDHA ที่ระดับ EC 3.0 ดังนั้นควรเลือกใช้ Fe-EDTA เนื่องจากมีราคาถูกกว่า และจากการผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า การปลูกปทุมมา ถ้ามีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตหัว สามารถ เลือกใช้ Fe- EDTA หรือ Fe-DTPA ที่ระดับ EC 3.0 จะให้น้ำหนักหัวที่มากที่สุด

กาญจนา นฤทัย และอิทธิสุนทร นันทกิจ (2556) ได้ศึกษาชนิดของเหล็กคีเลตและความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเยอบีร่า วางแผนการทดลองแบบ 3x3 Factorial in Complete Randomized Design (CRD) มี 9 ตำรับการทดลอง ตำรับการทดลองละ 8 ซ้ำ ซ้ำละ 1 ต้น ปัจจัยที่ 1 คือ ชนิดเหล็กคีเลต 3 ชนิด (Fe-EDTA, Fe-DTPA และ Fe-EDDHA) ปัจจัยที่ 2 คือ ระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร 3 ระดับ (EC=1.2 mS/cm, 2.0 mS/cm และ 2.8 mS/cm) จากผลการทดลอง พบว่า การใช้ Fe-EDDHA (21.60 เซนติเมตร) และ Fe-EDTA (20.88 เซนติเมตร) มีผลทำให้ก้านดอกมีความยาวมากกว่าการใช้ Fe-DTPA และเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่ ระดับ 2.8 mS/cm ให้ผลผลิตมากที่สุด คือ 9.46 ดอก/ต้น และใบมีค่าความเขียวมากที่สุด คือ 48.73 ดังนั้น การปลูกเยอบีร่าเป็นไม้กระถางควรใช้ขุยมะพร้าวเป็นวัสดุปลูก และใช้เหล็ก EDTA ที่ระดับความเข้มข้นสารละลาย EC=2.8 mS/cm เนื่องจากเป็นสารละลายที่มีราคาถูก และพืชมีการเจริญเติบโตดี

เกวลิน กลสิทธิ์, ปัญญา สมบัติมาก และสกานต์ กรานโต (2563) ศึกษาชนิดของวัสดุปลูกและระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของต้นแพนซีในระบบไม่ใช้ดิน วางแผนการทดลองแบบ 3x3 Factorial in Completely Randomized Design มี 9 ตำรับการทดลอง ตำรับละ 3 ซ้ำ ซ้ำละ 2 ต้น ปัจจัย A คือ ชนิดของวัสดุปลูก 3 ชนิด (ขุยมะพร้าว เพอร์ไลท์ และเม็ดดินเผา) และปัจจัย B คือ ระดับความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร 3 ระดับ (EC=1.5 mS/cm, EC=2.0 mS/cm และ EC=2.5 mS/cm) จากการทดลอง พบว่า ต้นแพนซีที่ปลูกในวัสดุปลูกขุยมะพร้าวร่วมกับ EC=2.5 mS/cm มีการเจริญเติบโตและผลผลิตดีที่สุด โดยมีความยาวดอก 23.57 มิลลิเมตร ในขณะที่ต้นแพนซีที่ปลูกในวัสดุปลูกเพอร์ไลท์ร่วมกับ EC=2.5 mS/cm มีความยาวดอกต่ำที่สุด 18.84 มิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบทางสถิติ พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ส่วนจำนวนดอก พบว่า ต้นแพนซีที่ปลูกในขุยมะพร้าวร่วมกับ EC=2.0 mS/cm มีจำนวนดอกมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น ๆ เท่ากับ 28 ดอก แต่ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งการปลูกต้นแพนซีเพื่อตัดดอกในระบบปลูกพืชไม่ใช้ดิน ควรใช้วัสดุปลูกที่มีราคาถูกซึ่งวัสดุปลูกขุยมะพร้าวเป็นวัสดุที่หาได้ง่ายในประเทศไทย ราคาถูก สามารถใช้ทดแทนวัสดุปลูกที่นำเข้ามาจากต่างประเทศได้