

การปลูกผักไร้ดิน

รศ.นิพนธ์ ไชยมงคล

การปลูกพืชไร้ดิน (hydroponic culture, Greek: hudor = water, ponos = work, หรือ water working หรือ soil-less plant cultivation.) หรือการปลูกพืชในวัสดุอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ดินเช่น กรวด (gravel culture) ทราย (sand culture) เปลือกไม้ (bark culture) จี้เลื่อย (saw - dust culture) เส้นใยสังเคราะห์ (rock wool) ปุ๋ยหมัก (Compost culture) ไยมะพร้าว (coconut fiber culture) สารละลาย (water culture) เป็นต้น

การปลูกพืชไร้ดินเริ่มเมื่อสงครามโลกครั้งที่ 2 โดยทหารอเมริกันที่อยู่ตามเกาะต่าง ๆ จำเป็นต้องมีผักสดบริโภค แต่มีปัญหาการขาดแคลนน้ำจืด ตลอดจนสภาพดินไม่เหมาะสมสำหรับการเพาะปลูก ทางสหรัฐอเมริกาจึงได้หาแนวทางการปลูกพืชผักโดยไม่ใช้ดิน โดยทำกระบอกคอนกรีตและใช้กรวดเป็นวัสดุปลูก และให้ปุ๋ยในรูปสารละลาย

ในยุโรป เริ่มจากการปลูกในดินพีท (peat) โดยใส่ลงไปในกระถางและใช้ถาดรองบรรจุปุ๋ยในรูปสารละลาย นิยมใช้ในการปลูกไม้ดอก ต่อมาในปี ค.ศ.1967 ได้พัฒนาใช้ดินพีทบรรจุถุงเป็นวัสดุปลูก (peat bag or gro bag) มะเขือเทศและให้ปุ๋ยในระบบน้ำหยดหรือให้น้ำไหลผ่านกันดูบาง ๆ จำนวน 20 ไร่ ต่อมาในปี ค.ศ.1974 ได้ขยายพื้นที่ปลูกเป็น 1000 ไร่ ในปี ค.ศ.1973 เดนมาร์กได้ศึกษาการปลูกผักโดยใช้วัสดุสังเคราะห์ (rock wool) เป็นวัสดุปลูกซึ่งต่อมานิยมใช้อย่างแพร่หลายในยุโรปตอนใต้ วิธีการปลูกพืชไร้ดินอีกวิธีหนึ่งที่นิยมใช้กันมากคือ nutrient film technique (NFT) ซึ่งค้นพบโดย Dr.Cooper จาก Glasshouse Crops Research Institute, Littlehamton, England. อาศัยหลักการปล่อยสารละลายให้ไหลหมุนเวียนผ่านรากพืชเป็นชั้นบาง ๆ

ในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยเฉพาะแถบอริโซนา เริ่มทำงานวิจัยและปลูกผักในสารละลายเป็นการค้า ในต้นปี ค.ศ.1970 แต่ส่วนใหญ่จะไม่ประสบความสำเร็จ เนื่องจากขาดความรู้ทางวิชาการ ประสบการณ์ การจัดการ และทางด้านวิศวกรรม

เมื่อเร็ว ๆ นี้จากการมุ่งค้นคว้าวิจัยอย่างจริงจัง ทั้งทางอเมริกา ยุโรป โดยเฉพาะประเทศฮอลแลนด์ สามารถนำมาประยุกต์ได้อย่างได้ผล ในแถบตะวันตกเฉียงใต้ของสหรัฐอเมริกา จึงทำให้มีการขยายพื้นที่ปลูกอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังได้ทำการศึกษาวิจัยด้าน Aeroponics เพื่อใช้ปลูกผักบนสถานีอวกาศในอนาคต

ตารางที่ 1 ประมาณการพื้นที่ปลูกพืชไร้ดินในปี ค.ศ. 1996 (Kao,1997)

COUNTRY	PRODUCTION AREA (ha)	COUNTRY	PRODUCTION AREA(ha)
Holland	3,700	Italy	60
Israel	650	USA	65
France	620	Portugal	45
Spain	510	Taiwan	50
United Kingdom	510	Bulgaria	32
Belgium	420	Ireland	30
Japan	550	Switzerland	25
South Africa	440	Finland	17
Germany	260	Greece	20
Australia	220	Poland	20
Canada	220	China	40
Russia	170	Singapore	3
Armenia	22	Thailand	1
New Zealand	110	Hongkong	1
Sweden	110		

ตารางที่ 2 ผลผลิต ต้นทุนการผลิต และกำไรในการผลิตพืชไร้ดิน(Kao,1997)

TREATMENT	YIELD (kg./plant)	COST US\$ /100kg.	NET PROFIT US\$/100 kg.
BEEF TOMATO			
CONVENTIONAL	2.8	32.3	40.1
HYDROPONICS	4.1	82.4	106.7
ROCKWOOL	4.8	89.3	97.2
ORGANIC SUBSTRATE	4.3	77.3	104.4
CUCUMBER			
CONVENTIONAL	1.4	35.3	52.5
HYDROPONICS	3.1	88.4	112.6
ROCKWOOL	4.5	87.4	102.5
ORGANIC SUBSTRATE	4.1	73.5	97.5
CHINESE LEEFY VEGETATBLE			
CONVENTIONAL	0.45	57.6	29.5
HYDROPONICS	0.52	105.7	41.6

วัตถุประสงค์ในการปลูกพืชไร้ดิน

การปลูกพืชไร้ดินเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ ๆ มีปัญหาในด้านสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมเช่น สภาพอากาศ ดิน น้ำ แรงงาน และการสะสมของโรคในดิน เป็นต้น

- สภาพดินบางแห่งอาจจะไม่เหมาะสมในการผลิตเช่นดินลูกรัง ดินเปรี้ยว ดินเค็ม
- เพื่อเป็นการใช้ปัจจัยในการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพเช่น น้ำ ปุ๋ย
- ตลอดจนเพื่อป้องกันการสะสมของโรคในดิน
- ลดปัญหาเรื่องแรงงานในการพรวนดินและกำจัดวัชพืช
- เพื่อใช้พื้นที่ให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยการเพิ่มผลผลิตและคุณภาพต่อพื้นที่

การปลูกพืชไร้ดิน จะให้ผักสดที่มีคุณภาพสูง เนื่องจากได้รับน้ำและสารอาหารอย่างพอเพียงและสม่ำเสมอ ทำให้ปริมาณเส้นใยต่ำ สามารถวางแผนการผลิต การเก็บเกี่ยวและการตลาดได้ค่อนข้างแน่นอน

รูปแบบของการปลูกพืชไร้ดิน

AGGREGATE SYSTEM

Organic/ Inorganic Substrate Culture ใช้วัสดุปลูกที่เป็นอินทรีย์วัตถุ นอกจากดิน ให้ปุ๋ยในรูปสารละลาย และใช้ภาชนะปลูกแตกต่างกัน เช่น

Pot Culture ใช้วัสดุปลูกใส่ในถุงหรือกระถาง และให้สารละลายผ่านด้านล่างหรือใช้ระบบน้ำหยด

Bag Culture ใช้วัสดุปลูกใส่ในถุงเจาะหลุมปลูก 4 หลุม และใช้สารละลายในรูปน้ำหยดซึ่งสามารถใช้ปลูกได้ 4 ครั้ง(พืชต่างตระกูล)

Tray Culture ทำกระบะกว้างประมาณ 1.00-1.20 เมตร ยาวตามความสะดวกในการปฏิบัติงาน วัสดุที่ใช้ทำ ขึ้นอยู่กับท้องถิ่นและต้นทุนการผลิต เช่น อิฐบดอัด ไม้ อะลูมิเนียม เป็นต้นและใส่วัสดุปลูกอื่นที่ไม่ใช่ดิน ให้ปุ๋ยในรูปสารละลาย

Rock wool /Coconut fiber Culture ใช้ rock wool (วัสดุสังเคราะห์) หรือ ใช้ใยมะพร้าวอัดเป็นแท่งปลูก เพื่อยึดรากและปล่อยสารละลายหมุนเวียนไหลผ่านหรืออาจจะให้แบบหยด

NON-AGGREGATE SYSTEM

Water Culture การปลูกในสารละลาย มีหลายแบบ เช่น

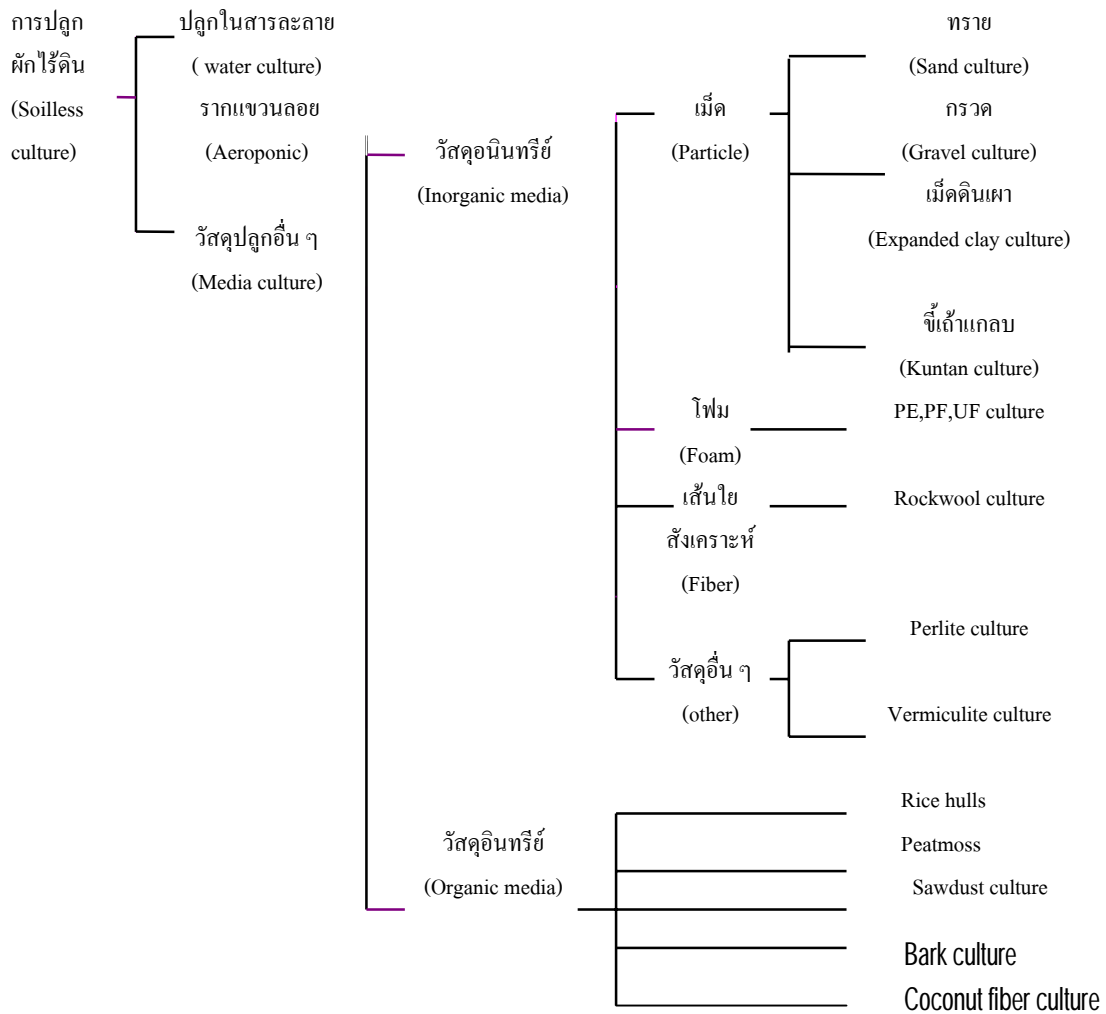
Nutrient Film Technique (NFT) ปลูกพืชบนสารละลาย โดยปล่อยสารละลายให้ไหลหมุนเวียนผ่านรากเป็นฟิล์มบาง ๆ (1-2 ซม.).

Deep Floating Technique (DFT) ปลูกพืชในสารละลายลึก 10 ซม. ใช้ระบบน้ำหมุนเวียนหรือใช้ปั๊มลมเพื่อเพิ่มออกซิเจน

Dynamic Root Floating (DRF) ปลูกพืชในสารละลาย โดยใช้ระบบการหมุนเวียนของสารละลาย แต่ให้มีช่องว่างระหว่างโคนต้นและระดับน้ำที่ไหลผ่านราก เพื่อเพิ่มออกซิเจนและลดอุณหภูมิน้ำ

Aeroponic Technique (ART) ปลูกพืชในสถานะที่ปิดสนิท ให้รากแขวนลอยและให้สารละลายในรูปของฟองหมอกหรือฟองฝอยบริเวณราก

ระบบและวัสดุปลูกสำหรับการปลูกแบบไร้ดิน



อุปกรณ์และเครื่องมือ

โรงเรือน

การปลูกพืชในระบบการปลูกผักไร้ดิน จำเป็นที่จะต้องปลูกในเรือนโรง เพื่อป้องกันฝนลดความเข้มของแสงและลดอุณหภูมิ

การปลูกในโรงเรือน จะต้องตรวจสอบพืชทุกวัน เพื่อให้สามารถแก้ปัญหาได้ทันที่ เช่นการปลูกมะเขือเทศ ในกรณีที่มีอุณหภูมิสูง จะทำให้ผลแตก หรือฟ้าม

การปลูกในโรงเรือน จะต้องหาแนวทางการป้องกันโรค แมลง เนื่องจากสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการเจริญของพืช จะเหมาะสมสำหรับการระบาดของโรค แมลง ควรตรวจสอบพืชและหาแนวทางป้องกัน กำจัด โรคและแมลงตามความจำเป็น ในสภาพความชื้นสัมพัทธ์สูง การถ่ายเทอากาศไม่ดี จะทำให้เกิดการระบาดของโรคได้

ควรให้น้ำอย่างพอเพียง เนื่องจากเมื่อพืชขาดน้ำ จะเหี่ยวและชะงักการเจริญ นอกจากนี้การให้น้ำจะช่วยชะล้างเกลือที่เกิดจากการใส่ปุ๋ย ซึ่งในกรณีที่มีความเข้มข้นสูง จะทำอันตรายต่อพืชและจำกัดการนำธาตุอาหารบางชนิดมาใช้ประโยชน์

ควรมีเครื่องวัดความเป็นกรด ค่าของดิน (pH) ความเข้มข้นของเกลือ (EC) เพื่อตรวจสอบสภาพความเป็นกรดค่าและความเข้มข้นของปุ๋ยเคมีในสารละลายและวัสดุปลูก

บันทึกขั้นตอนทำงาน โดยละเอียด เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนปลูกในฤดูต่อไป

การควบคุมสภาพแวดล้อมในโรงเรือน

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ควรศึกษาความต้องการของแต่ละพืช เช่น มะเขือเทศ กลางวัน 21.1-27.8 °ซ กลางคืน 16.7-17.8 °ซ อุณหภูมิต่ำกว่า 14.4 °ซ พืชจะแสดงอาการขาดธาตุอาหาร เนื่องจากพืชไม่สามารถนำธาตุอาหารบางชนิดขึ้นมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ฟอสฟอรัส ทำให้ใบพืชเปลี่ยนเป็นสีม่วง

อุณหภูมิสูงกว่า 30.0 °ซ ผลไม่สามารถสร้างเม็ดสีแดง (lycopene) ได้

อุณหภูมิสูงกว่า 32.2 °ซ ผลจะมีคุณภาพต่ำ ผลแตก เนื่องจากอุณหภูมิที่ผิว จะสูงกว่าในผล ทำให้เซลล์ผิวแตก

การปลูกในโรงเรือน เมื่อพืชได้รับแสงผ่านหลังคาพลาสติก อุณหภูมิที่ผิวใบสูงกว่าอุณหภูมิอากาศ 30 ° พืชจะมีอัตราการคายน้ำสูง รากจะดูดน้ำขึ้นมาทดแทน ในกรณีที่มีความชื้นพอเพียง พืชจะสามารถเจริญเติบโตได้ แต่ในกรณีที่ขาดน้ำ ส่วนยอดจะเหี่ยว เพื่อลดการคายน้ำหลังจากนั้นจะเหี่ยวทั้งต้น และตาย

ในกรณีที่อุณหภูมิสูงกว่า 32 °ซ พืชมีอัตราการคายน้ำสูง รากพืชไม่สามารถดูดน้ำขึ้นไปทดแทนส่วนที่พืชสูญเสียไป ถึงแม้จะมีความชื้นอย่างพอเพียง จะทำให้ใบไหม้ คล้ายน้ำร้อนลวก

ในสภาพที่มีความเข้มของแสงสูงหลังจากมีเมฆหมอกปกคลุมเป็นเวลานาน พืชจะแสดงอาการเหี่ยว จำเป็นต้องให้น้ำอย่างพอเพียง

ความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 60-70 %

การควบคุมอุณหภูมิในโรงเรือน

Evaporative Cooling ใช้วัสดุเพื่อรับน้ำติดตั้งด้านหนึ่ง และติดตั้งพัดลมด้านตรงกันข้าม เพื่อดูดอากาศและไอน้ำจากวัสดุรับน้ำออกไป วัสดุรับน้ำ เช่น cool pads หรือกระดาษรังผึ้ง ซึ่ง

เป็น Cellulose หรือ synthetic fiber หรืออาจจะใช้ ซาแรน(saran) ที่ใช้สำหรับพลาสติกใสด้านหนึ่ง และให้น้ำระบบน้ำหยดด้านบน ด้านล่างประกอบด้วยกระเบื้องรอง และท่อเพื่อให้น้ำไหลกลับไปลง ถังเก็บน้ำ ซึ่งประกอบด้วยปั้มน้ำเพื่อหมุนเวียนน้ำขึ้นไปด้านบน เมื่อวัสดุดังกล่าวมีความชื้น ในขณะที่พัดลมดูดอากาศเข้ามาจากด้านบน ผ่านวัสดุรับน้ำ จะทำให้อากาศมีความ ชื้นสูง ผ่านเข้ามา ในเรือนโรง อากาศที่มีความชื้นจะดูดความร้อนในโรงเรือนออกไป และหมุนเวียนอากาศใหม่เข้ามา จะช่วยลดอุณหภูมิในโรงเรือนได้

A Shade cloth ใช้วัสดุพลาสติก เช่น saran, poly-propylene, polyethylene, polyester หรือ ผ้า เพื่อลดความเข้มของ แสงและลดอุณหภูมิ

การพลาสติกอาจจะพลาสติกด้านบนหรือด้านในโรงเรือน การใส่ด้านใน จะสามารถทำ ระบบปิดเปิดได้ เมื่อความเข้มของแสงต่ำหรือสูง ควรใช้วัสดุที่มีด้านบนสีเงิน เพื่อการสะท้อนแสง ออกไป ด้านล่างสีดำหรือขาว ไม่ควรใช้วัสดุสีดำ เนื่องจากสีดำจะดูดและสะสมความร้อน ทำให้ อุณหภูมิในโรงเรือนสูง

แต่การใช้วัสดุพลาสติกในโรงเรือนจะมีข้อเสียคือ พลังงานแสงจะเปลี่ยนเป็นพลังงาน ความร้อนในโรงเรือน ถึงแม้ความเข้มของแสงจะลดลง แต่ อุณหภูมิจะไม่ลดลงตามไปด้วย การ พลาสติกด้านบนโรงเรือน พลังงานแสงจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนนอกโรงเรือน

วัสดุพลาสติก จะสามารถกรองแสงได้แตกต่างกัน โรงเรือนปลูกมะเขือเทศนิยมใช้วัสดุที่ กรองแสงได้ 30-50 % การทดลองที่ North Carolina State University พบว่า การใช้ poly-propylene ชนิด 30 % ไม่สามารถลดอุณหภูมิในโรงเรือนได้

การพลาสติกด้านบนโรงเรือนจะเหมาะสำหรับพื้นที่ ภูมิกระแสมพัดผ่านตลอดเวลา จะ ช่วยกระจายความร้อนออกไปก่อนถึงโรงเรือน

Shade compounds การพลาสติกโดยใช้วัสดุ เช่น ปูนขาวผสมน้ำ นีดฟันด้านบนหลังคา เพื่อพลาสติกในฤดูร้อนหรือช่วงที่มีความเข้มของแสงสูง

วิธีการอื่น ๆ

ใช้วัสดุสีขาวในโรงเรือน เช่น พื้น กระสอบ เชือก หรือ ถัง เป็นต้น สีขาวจะช่วยให้การ สะท้อนแสง วัสดุสีดำจะดูดแสงและเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน

โรงเรือนที่ต่ำ จะเหมาะสำหรับการปลูกพืชในพื้นที่ ภูมิอุณหภูมิต่ำ แต่จะมีอุณหภูมิสูงใน ฤดูร้อน นอกจากนี้ควรมีทางระบายอากาศด้านบนของโรงเรือน เพื่อให้อากาศที่ร้อนลอยตัวออกไป และอากาศเย็นเข้ามาแทนที่

การใช้น้ำเย็น อุณหภูมิ 5-10 ° ซ ในรูปพ่นหมอกในหรือนอกโรงเรือน ละอองหรือไอน้ำ สามารถดูดพลังงานความร้อน เพื่อลดอุณหภูมิในโรงเรือนได้

ใช้พัดลม เพื่อการระบายอากาศหรือให้อากาศหมุนเวียน การหมุนเวียนของอากาศใน แนวราบโดยใช้ความเร็วของลม 1 เมตรต่อวินาที จะทำให้ใบเคลื่อนไหวเพียงเล็กน้อย ช่วยลดอุณหภูมิ

ในโรงเรือน เมื่ออากาศเคลื่อนย้ายจากด้านล่างขึ้นด้านบน จะเคลื่อนย้ายความชื้นจากด้านล่างไปยังส่วนต่าง ๆ ของเรือนโรง เคลื่อนย้ายคาร์บอนไดออกไซด์จากส่วนอื่น ๆ ของเรือนโรงไปยังใบ ช่วยในการผสมเกสร ความเร็วของลมในอัตราที่สม่ำเสมอ ช่วยให้ใบแห้ง ลดการระบาดของโรค นอกจากนี้จะช่วยเพิ่มอัตราการคายน้ำ ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับอัตราการดูดน้ำและแร่ธาตุอาหารขึ้นไปทดแทน โดยเฉพาะแคลเซียมซึ่งรากจะส่งขึ้นไปยังส่วนที่กำลังเจริญเติบโต

ถังบรรจุสารละลาย

วัสดุที่ใช้จะต้องทนทานต่อความเป็นเกลือและความเป็นกรดของสารละลาย โดยทั่วไปจะใช้ถังพลาสติก

ขนาดของถังขึ้นอยู่กับพื้นที่ปลูก ชนิดของพืช ซึ่งการปลูกแบบ water culture จะใช้ปริมาณน้ำหมุนเวียน 9/10 ที่เหลือ 1/10 ให้คงค้างสำรองในถัง

จากการศึกษาของ Glasshouse Crops Research Institute Little-hampton (An.1979) พบว่ามะเขือเทศจะดูดสารละลายขึ้นไปประมาณ 0.8 ลิตรต่อต้นต่อวันและ 0.08 ลิตรต่อวันสำหรับสลัด

การปลูกมะเขือเทศ 2,500 ต้นในพื้นที่ 1,000 ตารางเมตร จะใช้น้ำหมุนเวียน 1,800 ลิตรและสำรองในถัง 200 ลิตร

การไหลกลับของสารละลายลงไปในถังเก็บสารละลายสำรอง จะต้องให้สารละลายไหลกลับลงไปในถังให้ลึกที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้เกิดฟองอากาศและเพิ่มออกซิเจน

ภาชนะปลูก

การปลูกพืชในสารละลาย สามารถเลือกภาชนะปลูกได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการปลูกและพืชที่จะใช้ปลูก

หลักการโดยทั่วไป ภาชนะปลูกควรจะต้องทนทานต่อสภาพความเป็นกรด ด่างหรือความเค็มของปุ๋ยเคมีในรูปสารละลาย ควรวางให้มีความลาดเอียงเพื่อให้มีการหมุนเวียนของสารละลาย (ไม่ต่ำกว่า 1 %) ซึ่งจะช่วยลดอุณหภูมิของน้ำและเพิ่มออกซิเจน พื้นของภาชนะปลูกควรเรียบ เพื่อการระบายน้ำ ในกรณีที่มีน้ำขังรากจะเน่า

การปลูกพืชผักกินใบอายุสั้น เช่น สลัดใบ ปวยเล้ง ดั่งโอ้ ขึ้นช่ายจีน สามารถปลูกแบบ substrate culture หรือ NFT ในประเทศญี่ปุ่นใช้ภาชนะคล้ายกระเบื้องลอนเล็ก คลุมด้วยพลาสติกสีดำ ปิดด้วยแผ่นโฟม เจาะรูปลูก ปล่อยน้ำไหลผ่านรากบาง ๆ โดยวางให้มีความลาดเอียง เพื่อให้มีการไหลเวียนของสารละลายและรักษาระดับให้รากบางส่วนให้มีความชุ่มชื้นตลอดเวลา และบางส่วนจะอยู่สูงกว่าระดับน้ำ มีปริมาณออกซิเจนอย่างพอเพียง ให้มีการหมุนเวียนน้ำผ่านรากอย่างสม่ำเสมอ

พืชบางชนิด เช่น สลัดปลี พริกหวาน มะเขือเทศ แตงกวา อาจจะปลูกใน substrate culture หรือ ระบบ DFT หรือ DRF โดยใช้ภาชนะมีลักษณะคล้ายรางน้ำ สามารถให้ปุ๋ยในรูปสารละลาย

แบบหยด หรือปล่อยให้น้ำหมุนเวียนได้หรือปลูกในกว้าง 25-60 ซม. ลึก 10 ซม. ใช้แผ่นโฟมปิด และปล่อยน้ำไหลผ่านราก เช่น ระบบ DRF, หรือใช้ปั๊มลมช่วยเพิ่มฟองอากาศเช่นระบบ DFT

บางพืช เช่น สตรอเบอร์รี่ มะเขือเทศ แดงกวา แคนตาลูป พริกหวาน อาจจะใช้ถังขุยมะพร้าวอัด หรือใช้กระถางพลาสติก บรรจุกรวด เพื่อยึดรากใช้พลาสติกสีดำหุ้ม วางบนราง ให้น้ำระบบน้ำหยดหรือปล่อยน้ำไหลผ่านก้นกระถางบาง ๆ

การปลูกมะเขือเทศพันธุ์เลื้อย แดงกวา แคนตาลูปเพื่อการค้าขนาดใหญ่ อาจจะใช้กระบะลังกะติ หรือใช้อิฐบล็อกเป็นภาชนะปลูก ใช้พลาสติกสีดำหนารอง เพื่อป้องกันการรั่วของ สารละลาย มีความกว้างความยาวตามความเหมาะสม ลึก 10-15 ซม. ประกอบด้วยแท่งก้นน้ำบรรจุปุ๋ยในรูปสารละลายมีประจุบวกควบคุมระดับน้ำโดยอัตโนมัติ และให้น้ำหมุนเวียน หรืออาจใช้ปั๊มลมเล็ก ๆ เพื่อดูดอากาศและส่งผ่านท่อซึ่งวางไว้ต่ำกว่าระดับน้ำ ทำให้เกิดฟองอากาศ เพิ่มออกซิเจนตลอดเวลา หรือหมุนเวียนน้ำทุก 30 นาที

ปั้มน้ำ

ขนาดของปั้มน้ำขึ้นอยู่กับรูปแบบของภาชนะปลูก ขนาดตลอดจนชนิดพืช โดยทั่วไปใช้ปั้มน้ำที่มีแรงดูดสารละลายปริมาณ 1 ลิตร ต่อพื้นที่ต่อพื้นที่ปลูก ซึ่งจะรักษาระดับน้ำสูง 1-2 มิลลิเมตร ผ่านรากพืชในระบบ NFT

วัสดุที่ใช้จะต้องทนทานต่อความเป็นเกลือและความเป็นกรดของสารละลาย

วิธีการปลูก

การเพาะกล้า

ใช้เมล็ดที่มีความงอกสูง คัดเมล็ดให้มีขนาดสม่ำเสมอ และ จัดการเมล็ดก่อนเพาะ เช่นเมล็ดบางพืชจะต้องแช่น้ำ 1-2 ชั่วโมงหรือในกรณีที่ใช้ปั้มน้ำเพื่อเพิ่มฟองอากาศ หรือปล่อยน้ำไหลผ่านตลอดเวลา ประมาณ 8-12 ชั่วโมง นำมาฝังให้แห้งหมาด ๆ และนำไปเพาะ เพื่อให้มีการงอกและการเจริญเติบโตสม่ำเสมอ

พืชตระกูลแตง มะเขือ เพาะกล้าในทราย และย้ายมาปลูกในสารละลาย เมื่อมีใบจริง 2 ใบ

พืชอื่น ๆ อาจเพาะเมล็ดในฟองน้ำขนาด 1x1x1 นิ้ว โดยหยอดเมล็ดในแวนอนลึกหนึ่งถึงสองมิลลิเมตร วางฟองน้ำในถาดและใส่สารละลายให้มีระดับสูงหนึ่งในสามหรือปล่อยสารละลายไหลผ่านหรือใช้ปั๊มลมช่วยเพิ่มฟองอากาศ เมื่อเมล็ดงอกมีใบจริง 2-3 ใบ สามารถย้ายลงปลูก

การจัดการสารละลาย

น้ำควรเป็นน้ำที่สะอาด ผ่านการกรอง ก่อนจะเตรียมสารละลาย ควรวิเคราะห์น้ำ เพื่อหาปริมาณธาตุอาหารในน้ำ ในกรณีที่มีธาตุเหล็ก ก็จะสามารถลดปริมาณที่จะใส่เพิ่มเติมลงไปได้ เพื่อการประหยัดและลดต้นทุนการผลิต ส่วนประกอบและความเข้มข้นของสารละลาย จะเปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา ปริมาณน้ำที่พืชดูดขึ้นไปใช้ การระเหยของน้ำและปริมาณธาตุอาหารที่พืชดูดขึ้นไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นจึงต้องเพิ่มน้ำตาม อัตราส่วนที่หายไปและเพิ่มปุ๋ยตามผลการวิเคราะห์น้ำ โดยปกติจะตรวจสอบและวิเคราะห์ปริมาณ N, P, K ทุก 1-2 อาทิตย์ ธาตุรองทุก 2-3 อาทิตย์

ปฏิกิริยาของสารละลาย: pH

ปฏิกิริยาหรือสภาพความเป็นกรดต่างของสารละลาย จะมีอิทธิพลต่อความสามารถในการละลายของธาตุอาหารและความสามารถในการที่พืชจะนำขึ้นไปใช้ประโยชน์ ควรตรวจสอบทุกวัน และบันทึกข้อมูล

สภาพความเป็นกรด ต่าง (pH) ของสารละลายที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5.6-5.8 ในกรณีที่ pH สูง ควรใช้สารเคมี เช่น กรด ซัลฟูริก (H_2SO_4) กรดไนตริก (HNO_3) กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) เพื่อลด pH ให้ต่ำลง การใช้กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) จะช่วยเพิ่มฟอสฟอรัส ส่วนกรดไนตริก (HNO_3) จะเพิ่มไนโตรเจนในสารละลาย กรด ซัลฟูริก (H_2SO_4)จะมีอันตรายต่อผู้ใช้สูง ควรใช้ด้วยความระมัดระวัง กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ก่อนข้างแพงแต่จะลด pH ได้ดีกว่ากรดชนิดอื่น ๆ ในปริมาณที่เท่ากัน

วิธีการลด pH เตรียมสารละลาย 1 ลิตร และเพิ่มกรดครั้งละ 1 ml จนกระทั่งได้ pH ตามต้องการ หลังจากนั้นนำมาคำนวณปริมาณสารละลายทั้งหมดและปริมาณกรดที่จะใช้ การใส่กรดต้องทดสอบจนกระทั่งได้ pH ตามต้องการ ไม่สามารถประมาณการหรือคำนวณ เช่น 10 ml ลด pH ลง จาก 10 = 5 ส่วน 15 ml ไม่สามารถลด pH ลงเหลือ 2.5 ได้ อาจจะใช้เพียง 11 ml ก็ได้ ในกรณีที่ pH ต่ำเกินไป จะเป็นอันตรายต่อพืช ควรตรวจสอบ pH ในสารละลายหลาย ๆ ครั้ง เพื่อความแน่นอน

ในสารละลายที่มี pH ต่ำเกินไป (< 5.5) ควรเพิ่ม pH ด้วยใช้ โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) คอสดิกโซดา (Caustic soda) โพแทสเซียมคาร์บอเนต (Potassium bicarbonate) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide) และ คอสดิก โพแทสเซียม (caustic potash) สารที่นิยมใช้คือ โซเดียมคาร์บอเนต (sodium carbonate) ซึ่งมี pH 8.2 และช่วยเพิ่มโพแทสเซียมในสารละลายได้ ไม่ควรใช้ในรูปแบบของเกลือโซเดียม เนื่องจากพืชไม่ต้องการธาตุนี้

พืชสามารถเจริญได้ในสารละลายที่มี pH 5.5-7.0 ถ้าหากมีธาตุอาหารพอเพียง เนื่องจาก pH มีอิทธิพลต่อการเจริญของรากต่ำ แต่ pH ต่ำ หรือ สูงเกินไป จะทำให้ธาตุอาหารบางชนิดอยู่ในรูปที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ในการปลูกพืชไร่นาควรจะรักษา pH ในระดับ 5.5-5.8 เนื่องจาก

ธาตุอาหารส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ในสารละลายที่ค่อนข้างเป็นกรด ธาตุอาหารบางชนิดเช่น Mn, Cu, Zn และ Fe เมื่อ pH สูงความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ได้จะลดลง แต่ใน pH ต่ำ P, K, Ca, และ Mg ความสามารถในการนำไปใช้ประโยชน์ของพืชจะลดลงเพียงเล็กน้อย

Calcium bicarbonate จะทำให้น้ำเป็นด่างจัด จะต้องใส่กรดไนตริก เป็นจำนวนมากเพื่อแก้ไข ในสภาพวัสดุปลูกมี ไบคาร์บอเนต (bicarbonate: HCO_3^-) มาก จะทำให้พืชดูดสารละลายอาหารได้น้อย จากการทดลองปลูกข้าววิท พบว่าถ้าหาก pH ต่ำกว่า 4 รากจะหยุดชะงักการเจริญ เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและตาย

การควบคุม pH ของสารละลายให้อยู่ในระดับ 4-7 ค่อนข้างจะยาก นอกจากใช้เครื่องควบคุม pH อัตโนมัติ การใช้ ฟอสฟอรัส (H_2PO_4 to HPO_4) เพื่อควบคุมระดับ pH จำเป็นต้องคงระดับความเข้มข้นของฟอสฟอรัสให้อยู่ระหว่าง 1-10 mM แต่จะเป็นพิษต่อพืช ดังนั้นควรจะใช้ระบบหมุนเวียนน้ำและคงระดับฟอสฟอรัสในความเข้มข้น 0.05 mM

การนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC)

การเติมปุ๋ยหลังปลูกควรวิเคราะห์ปริมาณสารเคมีในน้ำหรือค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มความเข้มข้นของธาตุอาหาร ค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย สารละลายที่มีความเข้มข้นสูง จะมีค่าการนำไฟฟ้าสูง หน่วยนับของการนำไฟฟ้าคือ mho (ออกเสียง MO) ในกรณีที่มีหลายหน่วยเรียก mhos (ออกเสียง MOZE)

หน่วยวัดของ mhos ที่นิยมใช้คือ micro m-hos (μmhos ; ออกเสียง micro-MOZE) และ millimhos (mmhos; ออกเสียง milli-MOZE) micro mho มีค่าเท่ากับ หนึ่งในส่วนของ mho และ millimho มีค่าเท่ากับ 1000 ส่วนของ mho ดังนั้น 1 millimho เท่ากับ 1000 micromho เมื่ออ่านค่าของสารละลายเท่ากับ 0.30-0.25 millimhos จะเท่ากับ 300 ถึง 2500 millimhos ในปัจจุบันนิยมใช้หน่วยวัดเป็น millimhos มากกว่า micromhos

เครื่องวัด EC ขนาดเล็กเคลื่อนที่ได้ สำหรับใช้ในโรงเรือน จะมีค่าหน่วยวัดระหว่าง 0-30 หน่วยนับนี้มีค่าเป็น microsemens (μs) หรือมีค่าสูงกว่า millimhos 10 เท่า เช่น เมื่ออ่านค่าสารละลาย 18 μs จะเท่ากับ 1.8 mmhos หรือเมื่อค่าสารละลายเท่ากับ 9 μs จะเท่ากับ 0.9 mmhos

ค่า EC ซึ่งมีหน่วยวัดเป็น Siemens/cm (S/cm) หรือ ต่อล้านส่วน; micro-Siemens (10^{-6} : $\mu\text{S/cm}$) หรือต่อพันส่วน ; milli-siemens (10^{-3} : mS/cm) ค่า Conductivity ของ สารละลาย จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่ละลายน้ำได้ ถ้าหากมีความเข้มข้นสูงจะมีค่า conductivity สูง

ค่า conductivity

1.4 $\mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ หรือ $2 \mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ ppm}$ ($\text{CaCO}_3 = 1 \text{ ppm}$)

2000 $\mu\text{S}/\text{cm} = 1 \text{ กรัม/น้ำ } 1 \text{ ลิตร}$

ค่าความเข้มข้นของธาตุอาหารในสารละลายอาจวัดได้จาก total dissolved solids หรือ TDS ซึ่งมีหน่วยวัดเป็น ต่อล้านส่วน (ppm) โดยเป็นผลรวมความเข้มข้น (ppm) ของธาตุอาหารทุกชนิดในสารละลาย

ความเข้มข้นของธาตุอาหารแต่ละชนิดในสารละลาย จะใช้หน่วยวัดเป็น ต่อล้านส่วน (Part per million; ppm) เช่นระยะที่มะเขือเทศเจริญเติบโตและติดผล จะต้องการไนโตรเจน 150-200 ppm (N) ซึ่งจะไม่มีความเกี่ยวพันโดยตรงกับค่า EC หรือ Total dissolved solids (TDS) ในสารละลาย เนื่องจากค่าของ EC และ TDS จะเป็นค่ารวมความเข้มข้นของธาตุอาหารในสารละลายทั้งหมด ไม่ใช่ค่าเฉพาะของไนโตรเจน

ตารางที่ 3 การตอบสนองพืชต่อเกลือ

Salinity (Ece, mmho/cm at 25°C)	Crop Responses
0-2	Salinity effects mostly negligible
2-4	Yields of very sensitive crops may be restricted
4-8	Yields of many crop restricted
8-16	only tolerant crops yield satisfactorily
above 16	only a few very tolerant crop yield satisfactorily

ที่มา: Bernstien, L. 1970, Salts tolerance of plants, USDA Agricultural Information Bulletin 283.

ตารางที่ 4 การจัดการปุ๋ยในมะเขือเทศ

ระยะการเจริญ	ไนโตรเจน(ppm)	TDS(ppm)	EC (mmhos)
เริ่มงอก – ใบจริงสองใบกางออกเต็มที่	50	450-550	0.6-0.7
ใบจริงสองใบ-ใบจริง3ใบกางออกเต็มที่	50-75	550-600	0.6-0.7
ใบจริง 3 ใบ - ก่อนย้ายปลูก	75-100	600-800	0.7-0.9
หลังย้ายปลูก-ดอกช่อที่สองบาน	100-150	800-1,350	0.9-1.8
ดอกช่อที่สองบาน-เต็มยอด	150-200	1,650-1,600	1.8-2.2

การปลูกควรใช้วัสดุ เช่น โฟมปิดภาชนะปลูกเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ ป้องกันแสง การใช้พลาสติกสีเงินปิดทับโฟม จะช่วยลดอุณหภูมิและการเข้าทำลายของแมลงปากดูด

อุณหภูมิของน้ำ

จากการทดลองหลายแห่งพบว่า สารละลายที่มีอุณหภูมิ 28 °ซ จะให้การเจริญเติบโต และการดูดสารละลายขึ้นไปใช้ได้สูงที่สุด

รากพืชที่ปลูกในสารละลายอุณหภูมิ 14 °ซ จะให้รากแขนงที่สั้นและหนากว่าการปลูกในอุณหภูมิ 22 °ซ ซึ่งจะมีรากสีขาว และมีรากฝอยและรากขนอ่อน จำนวนมาก นอกจากนี้ การปลูกใน 14 °ซ จะทำให้พืชแสดงอาการขาด ธาตุเหล็ก แคลเซียมและแมงกานีส

ผลผลิตของมะเขือเทศที่ปลูกในสารละลายอุณหภูมิ 28 °ซ จะสูงถึง 190 % ของ 14 °ซ และ 70 % ของพืชที่ปลูกในอุณหภูมิ 18 °ซ โดยจะให้จำนวนผลมากและมีขนาดใหญ่

รักษาอุณหภูมิน้ำให้อยู่ระดับ 20-25°ซ จากการทดลองของ Parkและคณะ(1995) ซึ่งปลูกพืชในสารละลาย โดยใช้ผักกาดกวางตุ้ง สลัดบัตเตอร์ และศึกษาความสามารถในการดูดน้ำ ธาตุอาหาร ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมงกานีส ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 15/20 และ 25 °ซ พบว่าอัตราการดูดน้ำของพืชจะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของอุณหภูมิ ส่วนอัตราการดูดธาตุอาหารขึ้นไปใช้จะต่ำสุดในอุณหภูมิ 25 °ซ สำหรับในอุณหภูมิ 15 °ซ พืชไม่สามารถดูดน้ำขึ้นไปใช้ในปริมาณที่พอเพียงสำหรับการเจริญเติบโต สรุปผลการทดลอง พบว่าอุณหภูมิ 20 °ซ จะเหมาะสมสำหรับการปลูกพืชใบในสารละลาย การทดลองที่ประเทศอังกฤษ(An.1978) รายงานว่าการรักษาอุณหภูมิในสารละลายสูงกว่า 22 °ซ รากจะมีสีขาว มีรากฝอยมาก อุณหภูมิ 28 °ซ จะให้ผลผลิตสูงกว่า 18 °ซ และ 14 °ซ (70 %และ 190 % ตามลำดับ)

ออกซิเจนที่ละลายน้ำได้

การปลูกพืชผักในสารละลาย (water culture) ปัจจัยสำคัญอีกปัจจัยหนึ่งก็คือออกซิเจนที่ละลายในน้ำ(dissolved oxygen) รากพืชต้องการออกซิเจน สำหรับการหายใจ และการดูดอาหารขึ้นไปใช้ ถ้าหากออกซิเจนไม่พอเพียงรากจะเกิดการเจริญ อ่อนแอต่อการเข้าทำลายของโรคและเน่าตาย การปลูกพืชในสารละลาย ที่มีอัตราการหมุนเวียนของน้ำต่ำ จะทำให้รากพืชขาดออกซิเจน ออกซิเจนที่ละลายน้ำได้จะอยู่ในรูปของ micro-nutrient และอัตราการเคลื่อนย้ายในพืชจะเร็วกว่าธาตุอื่น ๆ การปลูกพืชในระบบ NFT หรือการให้สารละลายไหลผ่านรากบาง ๆ จะช่วยเพิ่มออกซิเจนในสารละลายได้ แต่ในกรณีที่อัตราการหมุนเวียนของน้ำต่ำ และรากมีขนาดใหญ่ จะทำให้รากพืชขาดออกซิเจนได้ ซึ่งจะเป็นสาเหตุให้อัตราการหายใจของรากลดลง ลดความสามารถในการดูดแร่ธาตุอาหาร เพิ่มปริมาณการสูญเสียไนโตรเจน และรากอ่อนแอต่อโรค Douglas,(1976) และ Resh (1987) รายงานว่าปริมาณออกซิเจนในน้ำ จะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นผลให้อัตราการหายใจของรากลดลง Kao (1988) กล่าวว่า การเพิ่มปริมาณออกซิเจนในน้ำ สามารถกระทำได้โดยการ เพิ่มเวลาที่ใช้ในการหมุนเวียนของน้ำ หรือให้น้ำหมุนเวียนตลอดเวลา แต่จะมีปัญหาในด้านต้นทุนการผลิต เนื่องจากจำเป็นต้องใช้กระแสไฟฟ้า อาจจะใช้เครื่องมือพิเศษ (aspirator) ที่ทำให้เกิดฟองอากาศในขณะที่ให้สารละลาย ซึ่งจะสามารถเพิ่มออกซิเจนในสารละลาย เมื่อปั้มน้ำเข้า

ไปในขณะปลูกอัตรา 7.5-8.0 ลิตร/นาถิ หรืออาจจะใช้ aspirator จำนวน 19-20 ตัวต่อเครื่องปั้มน้ำ 1 แรงม้า

การปลูกพืชในระบบ NFT โดยให้น้ำไหลผ่านรากบาง ๆ ตลอดเวลา ปริมาณออกซิเจนในน้ำจะมีประมาณ 45-50 % แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 37 °ซ ปริมาณออกซิเจนในน้ำจะเหลือเพียง 30-40 % ซึ่งจะเป็นผลให้พืชชะงักการเจริญ

ในระบบ DFT การเพิ่มออกซิเจนสามารถกระทำได้โดยการให้น้ำหมุนเวียนเป็นเวลา 6 นาถิ แต่จะลดลงเหลือเพียง 30 % หลังจากหยุดเป็นเวลา 13 นาถิ ดังนั้นควรจะให้น้ำหมุนเวียนแต่ละครั้งเป็นเวลา 6 นาถิและทุก 10 นาถิ ส่วนระบบ DRF สามารถให้มีการหมุนเวียนน้ำทุก 25 นาถิ

Yoshida และคณะ (1996) ทดสอบการปลูกแตงกวา ในสารละลายที่มีปริมาณออกซิเจนเข้มข้นแตกต่างกันคือ 0.01, 0.10, และ 0.20 มิลลิโมล โดยให้อุณหภูมิในเรือนโรงและอุณหภูมิน้ำอยู่ในระดับ 25 ° ซ และความชื้นสัมพัทธ์ 75 % ช่วงแสง 12 ชั่วโมงต่อวัน พบว่าการปลูกพืชที่ในออกซิเจนความเข้มข้นต่ำ การเจริญของรากและใบจะถูกจำกัด ออกซิเจนในระดับความเข้มข้น 0.01 มิลลิโมล จะจำกัดการเปิดของใบและลดปริมาณน้ำในใบ

การปลูกพืชในระบบ NFT ซึ่งให้น้ำไหลผ่านรากบาง ๆ ตลอดเวลา ปริมาณออกซิเจนในน้ำจะมีประมาณ 45-50 % แต่เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 37 °ซ ปริมาณออกซิเจนในน้ำจะเหลือเพียง 30-40 % ซึ่งจะเป็นผลให้พืชชะงักการเจริญ

ในระบบ DFT การเพิ่มออกซิเจนสามารถกระทำได้โดยการให้น้ำหมุนเวียนเป็นเวลา 6 นาถิ แต่จะลดลงเหลือเพียง 30 % หลังจากหยุดเป็นเวลา 13 นาถิ ดังนั้นควรจะให้น้ำหมุนเวียนแต่ละครั้งเป็นเวลา 6 นาถิและทุก 10 นาถิ ส่วนระบบ DRF สามารถให้มีการหมุนเวียนน้ำทุก 25 นาถิ

ปริมาณออกซิเจนในน้ำ 0.7 มิลลิลิตร มีความเข้มข้นเท่ากับ 1 ppm

การจัดการธาตุอาหาร

ชนิดและปริมาณปุ๋ยเคมีที่จะใช้ควรมีการศึกษา เพื่อให้เหมาะสมสำหรับพืชและผลตอบแทนในแง่เศรษฐกิจการปลูกแบบ substrate อาจจะใช้แม่ปุ๋ยเกรดดีที่มีขายตามท้องตลาด ส่วนใน water culture ควรใช้ industrial grade ชนิดและความเข้มข้นขึ้นอยู่กับชนิดและความต้องการของพืช

เมื่อ inorganic salt มีปริมาณเพียงเล็กน้อย เช่น soluble mineral of soil หรือ ปุ๋ยเคมี ที่ใส่ลงไป ในน้ำ จะเปลี่ยนรูปเป็น electrically charge units เรียก ion ส่วนของ ion ที่เป็นขั้วบวกเรียก cation เช่น H^+ , K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , NH_4^+ , Fe^{++} , Mn^{++} , Zn^{++} ส่วนแร่ธาตุอาหารที่มีขั้วลบเรียก anion เช่น NO_3^- , HPO_4^{--} , SO_4^{--} , และ Cl^- จะพบในสารละลายของดินในปริมาณสูง ซึ่งจะสูญหายไปตามการไหลของน้ำได้ง่าย เมื่อสารละลายอาหารไหลผ่านราก พืชสามารถดูดสารละลายไปใช้

พืชจะดูดธาตุอาหารในรูป ions โดยการแลกเปลี่ยนกับ ions อื่น ๆ เช่น K^+ , NH_4^+ , H^+ ion จะละลายในน้ำในดิน หรือดูดยึดโดยเม็ดดินหรือการนำ Ca^{++} , Mg^{++} ไปใช้ประโยชน์ รากพืชจะปล่อยอะตอม H^+ สองอะตอมออกมา เมื่อพืชดูดสารละลายที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโต จะทำให้สารละลายในดินและผิวของเม็ดดินมีปริมาณ H^+ เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อพืชนำ cation เช่น ammonium nitrogen ขึ้นไปใช้ในปริมาณที่สูงขึ้น จะทำให้ดินมีสภาพเป็นกรด ในทางตรงกันข้ามเมื่อพืชดูด anions เช่น ไนเตรท และ ฟอสเฟต ขึ้นไปใช้มาก จะทำให้ดินมีกลุ่มไฮดรอกซิล(OH^-) และ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) สูง ทำให้ดินเป็นด่าง

ตารางที่ 5 ธาตุอาหารที่พืชต้องการ

Element	Atomic weight	Available from
Organic elements(from air and water)		
Hydrogen	1.00	H_2O
Carbon	12.00	CO_2
Oxygen	16.00	O_2, H_2O
Macronutrients (need in large quantities)		
Nitrogen	14.00	NO_3^- , NH_4^+
Potassium	39.10	K^+
Calcium	40.08	Ca^{++}
Magnesium	24.32	Mg^{++}
Phosphorus	30.92	$H_2PO_4^-$, HPO_4^-
Sulfur	32.07	SO_4^{--}
Micronutrients (need in small quantities)		
Iron	55.85	Fe^{+++} , Fe^{++}
Manganese	54.94	Mn^{++}
Copper	63.54	Cu^{++} , Cu^+
Boron	10.82	BO_3^{--} , $B_4O_7^{--}$
Zinc	65.38	Zn^{++}
Molybdenum	95.95	MoM_4^{++}

ตัวอย่างปริมาณสารอาหารแต่ละชนิดในปุ๋ยชนิดต่าง ๆ

Fertilizer	Element Composition (%)
1. Calcium nitrate	15.5 % N, 19 % Ca
2. Potassium nitrate	13.75% N, 44.5 % K_2O
3. Ammonium nitrate	34% N
4. Urea	46% N
5. Phosphoric acid	75% P_2O_5
6. Magnesium sulphate	9.7 % Mg

7. Potassium sulphate	50% K ₂ O
8. Ammonium sulphate	21% N, 24 % S
9. Potassium chloride	60% K ₂ O
10. Monoammonium phosphate(MAP)	12% N, 61% P ₂ O ₅
11. Diammonium phosphate(DAP)	16% N, 48% P ₂ O ₅
12. Monopotassium phosphate(MKP)	52% P ₂ O ₅ 34% K ₂ O
13. Calcium chloride	36% Ca

ตารางที่ 6 สูตรสารละลายของ Hoagland

Salt	Stock Solution(g/l)	Final Solution(ml/l)
Solution 1		
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236.2	5
KNO ₃	101.1	5
KH ₂ PO ₄	136.1	1
MgSO ₄ ·7H ₂ O	246.5	2
Solution 2		
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236.2	5
KNO ₃	101.1	5
NH ₄ H ₂ PO ₄	115.0	1
MgSO ₄ ·7H ₂ O	246.5	2

Micronutrient Solution

Compound	Amount(g) Dissolved in 1 liter of water
H ₃ BO ₃	2.86
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.81
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.22
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.08
H ₂ MoO ₄ ·H ₂ O	0.02

Iron Solution

การใช้ Iron chelate เช่น Sequestrene 330 เพื่อเตรียม stock solution ซึ่งต้องการให้มีความเข้มข้นของ actual iron 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

Sequestrene 330 ประกอบด้วย Fe 10% ดังนั้นจะต้องใช้สาร 10 กรัม ต่อน้ำ 1 ลิตร การใช้ Fe ในรูปอื่น ๆ จำเป็นจะต้องปรับตามความปริมาณ Fe ในสารนั้น ๆ

Bailey ทำการทดลองเป็นเวลา 6 ปี พบว่า iron chelates เป็นอันตรายต่อพืช ดังนั้น จะแนะนำให้ใช้ Fe EDDHA แต่จะทำให้พืชขาด Mg และ Zn การใช้ Fe EDTA ควรใช้ในความเข้มข้นต่ำ

การเตรียมสารละลายจาก solution 1 (ปริมาณที่ต้องการเท่ากับ 1 ลิตร)

Compounds	Amount per 1 liter (ml)
Ca(NO ₃) ₂ ·2.4H ₂ O	5
KNO ₃	5
KH ₂ PO ₄	1
MgSO ₄ ·7H ₂ O	2
Iron	1
Distilled water	800

ที่มา; D.R. Hoagland and D.I. Arnon, The water - culture method for growing plants without soil , California Experiment Station Circular 347(1950)

Modified Half-Strength Hoagland Solution

เตรียม stock solution สองสูตรและแยกภาชนะบรรจุ

Stock Concentration No. 1

Compounds	Amount per 50 gal of water
KNO ₃	21 lb
KH ₂ PO ₄	12 lb
MgSO ₄ ·7H ₂ O	21 lb
Micronutrient concentration*	5 gal

- mix thoroughly to dissolve salts.

Stock Concentration No. 2

Compounds	Amount per 50 gal of water
Ca(NO ₃) ₂ commercial grade	38 lb
Sequestrene 330 Fe	2 lb

*** mix the iron chelate thoroughly before adding to dissolved Ca(NO₃)₂

Micronutrient concentration*	Amount(g) per 5 gal of water
H ₃ BO ₃	54
MnSO ₄ ·H ₂ O	28
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	4
CuSO ₄ ·5H ₂ O	1
MoO ₃ ·2H ₂ O	0.5

Dissolve H₃BO₃ in boiling water. Add other salts to containers and mix in 3 gal of water. Add dissolve H₃BO₃ and make 5 gal.

Dilutions

Stock concentrate	To make final nutrient solution		
	50 gal	100 gal	1000 gal
No. 1	1 qt	2 qt	5 gal
No.2	1 qt	2 qt	5 gal

ที่มา ; H. Johnson, Hydroponics: A guide to soilless culture systems. University of California, Division of Agricultural Science Leaflet 2947(1977).

ตารางที่ 7 สูตรสารละลายที่นิยมใช้ในประเทศญี่ปุ่น

ชนิดของปุ๋ย (นน.ปุ๋ย/น้ำ)	แดงเทศ	แดงร้าน	มะเขือเทศ	พริกหวาน	สลัด	สตอเบอรี่	***
ซีซีต่อน้ำ 1 ลิตร							
1/2M-MgSO ₄ .7H ₂ O (123 g/l)	3.0	4.0	2.0	1.5	1.0	1.0-1.5	252
1M-Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O (236g/l)	3.5	3.5	1.5	1.5	1.0	1.0-1.5	1.270
1M-KNO ₃ (101 g/l)	6.0	6.0	4.0	6.0	4.0	3.0-4.5	
1/3M-NH ₄ H ₂ PO ₄ (38g/l)	4.0	3.0	2.0	2.5	1.5	1.5-2.3	368
EC me x 0.1 m.mho	2.0	2.0	1.1	1.3	0.85	0.75	

** ความสามารถในการละลายน้ำได้ กรัม/ลิตร

ตัวอย่างการเตรียมสารละลาย

1. เตรียมปุ๋ยความเข้มข้นสูง เพื่อสะดวกต่อการใช้เช่น โปแทสเซียมไนเตรทใช้ปุ๋ย 101 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร
2. เมื่อต้องการสารละลายเพื่อปลูกแดงเทศ ใช้ปุ๋ยเข้มข้นที่เตรียมไว้ 6 ซีซีต่อน้ำ 1 ลิตร
3. ปุ๋ยแคลเซียมเมื่อมีความเข้มข้นสูงจะทำให้ธาตุอื่น ๆ ตกตะกอน ควรแยกใส่เฉพาะ
4. ควรเพิ่มปุ๋ยที่มีธาตุรองเช่น โบรอน แมกนีเซียม เหล็ก สังกะสี และโมลิบดีนัมเป็นต้น โดยใช้อัตรา 1 กรัมหรือ 1 ซีซีต่อน้ำ 1 ลิตร

ตารางที่ 8 สูตรปุ๋ยที่ใช้ในยุโรป Winsor (1980) รายงานว่า ปุ๋ยน้ำที่เหมาะสมสำหรับมะเขือเทศคือ

สารอาหาร	มิลลิกรัม/น้ำ 1 ลิตร
ไนโตรเจน	150-200
ฟอสฟอรัส	50
โปแทสเซียม	300-400
แมงกานีส	40-50
แคลเซียม	150-300
เหล็ก	3-5
แมกนีเซียม	0.5-1.0
โบรอน	0.3
ทองแดง	0.1
สังกะสี	0.1

โมลิบดินัม	0.05
------------	------

Table 9 Composition of starting solution : quantity of salts, diluted in 10 liter of distilled water and sufficient for 1,000 liters nutrient solution.

สารอาหาร	มะเขือเทศ/สลัดบีตเตอร์ *		แตงร้าน**	
	gram	ppm	gram	ppm
สูตรที่ 1				
Calcium Nitrate:Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	988	168 Ca/117N	637	108Ca/76N
Potassium Nitrate:KNO ₃	658.1	254K/ 91N	250	97K/ 35N
Ammonium Nitrate:NH ₄ NO ₃	-	-	40	14N
Sequestrenel 138-Fe(50 % Fe-EDDHA)	84	5,3 Fe	5.6	0,4 Fe
สูตรที่ 2				
Potassium Phosphate : KH ₂ PO ₄	272	78K/ 62P	125	36K/ 28P
Potassium Sulphate : K ₂ SO ₄	-	-	261	117K
Magnesium Sulphate: MgSO ₄ .7H ₂ O	496.1	49Mg	128	13Mg
Manganese Sulphate : MnSO ₄ .H ₂ O	6.145	2Mn	1.6	0.5 Mn
Copper Sulphate : CuSO ₄ .5H ₂ O	0.275	0.07Cu	0.12	0.03Cu
Zinc Sulphate : ZnSO ₄ .7H ₂ O	0.308	0.07Zn	1.1	0.25Zn
Ammonium Molybdate: (NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	0.092	0.05Mo	-	-
Sodium Molybdate : Na ₂ MO O ₂ .2H ₂ O	-	-	0.12	0.047Mo
Boric acid H ₃ BO ₃	1.714	0.3 B	1.7	0,3 B

Table 10 Composition refill solution : quantity for 1,000 liters nutrient solution.

สารอาหาร	มะเขือเทศ/สลัดบีตเตอร์ *		แตงร้าน**	
	gram	ppm	gram	ppm
สูตรที่ 1				
Calcium Nitrate:Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	395.5	67 Ca/47N	787	133Ca/93N
Potassium Nitrate:KNO ₃	360.0	147K/ 51N	360.0	147K/ 51N
Sequestrenel 138-Fe(50 % Fe-EDDHA)	23.774	1.5 Fe	47.547	3 Fe
สูตรที่ 2				
Potassium Phosphate : KH ₂ PO ₄				
Magnesium Sulphate: MgSO ₄ .7H ₂ O	329	32Mg	329	32Mg
Manganese Sulphate : MnSO ₄ .H ₂ O	1.539	0.5Mn	3.078	1 Mn
Copper Sulphate : CuSO ₄ .5H ₂ O	0.275	0.07Cu	0.275	0.07Cu
Zinc Sulphate : ZnSO ₄ .7H ₂ O	0.308	0.07Zn	0.308	0.07Zn
Ammonium Molybdate: (NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	0.092	0.05Mo	0.092	0.05Mo
Boric acid H ₃ BO ₃	1.714	0,3 B	1.714	0,3 B

* Cooper,A. 1976"Nutrient Film Technique of Growing Crops" Grower Books, London, 33pp.

** Anonymous. 1978 " Commercial Application of NFT" Grower Books, London, 98 pp.

ตารางที่ 11 สูตรสารละลายที่แนะนำใช้ใน ระบบ hydroponic ที่ได้หวั่น(Kao,1997)

Macroelement	me/liter	Microelement	ppm
NO ₃ -N	6.0	Fe EDTA	2.5
NH ₄ -N	0.5	B	0.2
PO ₄ -P	3.0	Mn	0.2
SO ₄ -S	1.5	Zn	0.01
K	4.0	Cu	0.01
Mg	2.0	Mo	0.01
Ca	4.0		
EC(mmho/cm,25°C)	1.0	P ^H	6.0

การเพิ่ม silicon ในสารละลาย

จากข้อมูลทางวิชาการจะไม่พบว่า Si มีความสำคัญต่อพืชชั้นสูง แต่จะมีประโยชน์ต่อพืชหลายชนิด ปกติจะมีพอเพียงในแปลงปลูกทั่วไป แต่การปลูกพืชในสารละลายจะขาดธาตุนี้ Si พบว่ามีความสำคัญต่อการผสมเกสรของข้าว(Ma et al. 1989) จะเป็นประโยชน์ต่อพืช 2 ทางคือ

1. ช่วยป้องกันการเข้าทำลายของโรคและแมลง (Cherif et al.1994; Winslow, 1992; Samuels, 1991)
2. ช่วยลดความเป็นพิษของโลหะ (Vlamis and Williams, 1967; Baylis et al. 1994

ดังนั้นจึงควรใส่ silicon เข้มข้น 0.1 mM ในสารละลาย

การป้องกัน Phythium ในสารละลาย

Phythium sp. เป็นเชื้อสาเหตุของโรคเน่าที่สำคัญที่สุดในการปลูกพืชในสารละลาย จากการทดลองพบว่า พืชที่ขาด Mn จะอ่อนแอต่อโรคนี้ นอกจากนี้ copper จะจำกัดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ แต่ในความเข้มข้นสูงจะทำอันตรายต่อพืช manganese และ zinc สามารถควบคุมการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์และมีความเป็นพิษต่อพืชต่ำ ดังนั้นควรเพิ่มปริมาณของ manganese, zinc, และ copper ให้สูงกว่าปริมาณขั้นต่ำที่พืชต้องการ เพียงเล็กน้อย

การจัดการธาตุอาหารในรูปสารละลาย

Dr. Pieter Scippers(1991 H S A proceedings) กล่าวว่าปัญหาของการปลูกพืชใน สารละลาย คือการขาดข้อมูลในด้านการจัดการปุ๋ยในสารละลาย

การจัดการธาตุอาหารแบบ mass balance

“mass balance” หมายถึง อาหารพืชที่มีอยู่ในสารละลายหรือในพืช โดยการให้ธาตุอาหารในรูปสารละลาย เท่าที่ต้องการให้พืชดูดขึ้นไปใช้

พืชสามารถดูดธาตุอาหารบางธาตุในสารละลายไปใช้ประจำวันอย่างรวดเร็ว แต่บางธาตุจะคงค้างและสะสมอยู่ในสารละลาย ดังนั้นความเข้มข้นของไนโตรเจน ฟอสฟอรัสและโพแทสเซียม อาจจะต่ำถึง 0.1 mM หรือ 2-3 ppm เนื่องจากธาตุเหล่านี้จะอยู่ในพืช การให้ธาตุดังกล่าวในความเข้มข้นสูง จะเป็นสาเหตุให้พืชดูดขึ้นไปใช้มากเกินไป ทำให้เกิดความไม่สมดุลในพืช ตัวอย่างเช่น เมื่อพืชคายน้ำจะมีการดูดจากสารละลายขึ้นมาแทนที่ ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องให้ฟอสฟอรัสเข้มข้น 0.5 mM ในรูปสารละลายเพิ่มลงไป เมื่อเติมฟอสฟอรัสในรูปสารละลายวันละหนึ่งครั้ง พืชจะดูดขึ้นไปใช้ภายในเวลา 2-3 ชั่วโมง ทำให้ความเข้มข้นฟอสฟอรัสในสารละลายหมดไป ซึ่งจะช่วยให้พืชแข็งแรง สมบูรณ์และดูดสารอาหารไปใช้ได้เร็ว ในกรณีที่รักษาระดับฟอสฟอรัสในสารละลายให้อยู่ในความเข้มข้น 0.5 mM จะทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในพืชเพิ่มขึ้นถึง 1% ของน้ำหนักแห้งหรือสูงเกินกว่าที่พืชต้องการประมาณ 3 เท่า และจะทำให้พืชแสดงอาการขาด Fe และ Zn ได้ (Chaney and Coulombe, 1982)

ความสามารถในการดูดธาตุอาหารของพืช

ธาตุอาหารในสารละลายแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1	พืชสามารถนำไปใช้ได้ง่ายและรวดเร็ว (Active uptake, fast removal; a few hours)	NO ₃ , NH ₄ , P, K, Mn
กลุ่มที่ 2	ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ปานกลาง (Intermediate uptake)	Mg, S, Fe, Zn, Cu, Mo, C
กลุ่มที่ 3.	พืชนำไปใช้ได้น้อยและจะตกค้างสะสมอยู่ในสารละลาย	Ca, B

การจัดการธาตุอาหารในกลุ่มที่หนึ่ง (N,P,K,Mn) จะต้องรักษาระดับความเข้มข้นในสารละลายให้ต่ำ เพื่อป้องกันการสะสมในเนื้อเยื่อพืช ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายกับพืชได้ แต่การให้ธาตุดังกล่าวในความเข้มข้นต่ำจะควบคุมและตรวจสอบได้ยาก ในตารางที่ 1. แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนของการตรวจสอบธาตุอาหารในสารละลายโดย ICP emission spectrophotometry เนื่องจากบางธาตุเช่นไนโตรเจน ไม่สามารถตรวจสอบได้โดย ICP-ES แต่จะตรวจสอบปริมาณธาตุหลักอื่นๆ ได้ดี นอกจากนี้ ความเชื่อถือได้ของผลการวิเคราะห์ B, Cu, Mo, โดย ICP-ES จะต่ำ ดังนั้นในตารางที่ 12 จะแสดงวิธีการคำนวณปริมาณธาตุอาหารที่จะใส่เติมลงไป

Table 12 Typical measurement error associated with the use of Inductively Coupled

Plasma Emission Spectrophotometry for analysis of nutrient concentrations in hydroponic solution.

Element	Nutrient Solution Concentration(mM)	ICP Accuracy(mM)	Typical Measurement Error(%)
K	3.5	0.1	3.0
Ca	1.0	0.002	0.2
S	0.75	0.01	1.0
P	0.5	0.01	2.0
Mg	0.25	0.002	1.0
micro-nutrients	(m M)	(m M)	(%)
Fe	5.0	0.15	3.0
Mn	3.0	0.3	10.0
Zn	1.0	0.15	15.0
B	1.0	3.0	300.0
Cu	0.1	0.2	200.0
Mo	0.03	1.0	3300.0

การตรวจสอบธาตุอาหารในสารละลายสามารถใช้เครื่องมือ electrical conductivity ซึ่งจะสะดวกและเชื่อถือได้ แต่เนื่องจากความแตกต่างในด้านความสามารถในการนำธาตุอาหารขึ้นไปใช้ประโยชน์ของพืช การใช้เครื่องมือดังกล่าวส่วนใหญ่มักจะใช้ตรวจสอบ Ca, Mg, และ S ที่ตกค้างอยู่ในสารละลาย ธาตุรองในสารละลายจะมีระดับต่ำกว่า 0.1 % EC

การพัฒนาสูตรสารละลายเพื่อใส่เพิ่มเติม

วัตถุประสงค์เพื่อกำหนดสูตรมาตรฐาน สำหรับธาตุอาหารในรูปสารละลายที่จะใส่เพิ่มเติมลงในสารละลาย เพื่อทดแทนธาตุอาหารและน้ำที่พืชใช้หรือสูญหายไปในการใส่ครั้งแรก โดยทั่วไปพืชค่อนข้างจะทนทานต่อสภาพของพื้นที่ ๆ มีปริมาณปุ๋ยไม่สมดุล แต่การปลูกพืชในสารละลายที่ต้องการการหมุนเวียนของสารละลายผ่านราก เมื่อใส่ธาตุอาหารบางชนิดมากเกินไป จะทำให้เกิดการสะสมมีปริมาณที่สูงขึ้น นอกจากนี้จะทำให้ต้นทุนการผลิตสูง

สูตรอาหารทั่วไปที่นิยมใช้เช่น Hoagland solution สามารถใช้ใส่เพิ่มเติมในสารละลายโดยการเพิ่มน้ำเพื่อลดความเข้มข้นลง 1/3 เพื่อให้ค่า EC คงที่ แต่ Hoagland solution ในระยะแรกพัฒนาขึ้นมาใช้สำหรับปลูกมะเขือเทศ อาจจะไม่เหมาะสำหรับบางพืช

ปัจจัยที่สำคัญสำหรับการเตรียมสารละลายที่ใส่เพิ่มเติมคือ

1. ส่วนผสมของธาตุอาหาร (Solution Composition)
2. ความเข้มข้นของธาตุอาหาร(Solution Concentration)

ส่วนประกอบของสารละลาย

อัตราส่วนของธาตุอาหารที่ใช้ผสมในสารละลาย ขึ้นอยู่กับปริมาณธาตุอาหารแต่ละชนิดที่พืชต้องการ ซึ่งจะต้องศึกษาความต้องการของพืชและวิเคราะห์ใบพืชหลังจากให้ธาตุอาหารครั้งแรก โดยอาศัยข้อมูลจากเอกสารหรือหนังสือทางวิชาการเช่น

1. Plant analysis : An interpretation Manual . 1986. D. Reuter & Robinson,(eds). Inkata Press, Melbourne.
2. Plant Analysis Handbook. 1991. Benton Jones, B. Wolf, H. Mills. Micro-Macro Publishing, Inc. Athens,GA.
3. Plant Analysis. 1987. Martin-Prevel and J. Gagnard. Lavoisier Publishing, Inc. NewYork.
4. Diagnosis Criteria for Plants and Soils. 1966. Homer Chapman. University of California. Riverside,CA.

การวิเคราะห์เพื่อหาปริมาณธาตุอาหารในเนื้อเยื่อใบจะนิยมใช้มากที่สุด เนื่องจากใบจะเป็นส่วนของพืชที่สำคัญในการสังเคราะห์แสง ซึ่งจะทำให้เป็นส่วนที่มีปริมาณ enzyme สูงที่สุดในพืช ความเข้มข้นเฉลี่ยของธาตุอาหารในส่วนต่าง ๆ ของพืชจะต่ำกว่าใบ ดังนั้นการให้ธาตุอาหารตามผลการวิเคราะห์ใบอาจจะทำให้ธาตุอาหารในส่วนอื่น ๆ เช่น ลำต้น ผล เมล็ด มีปริมาณที่สูง ดังนั้นควรจะปรับให้เหมาะสมในแต่ละพืชเช่น การวิเคราะห์ข้าววิท (wheat) ในตารางที่ 13

Table 13 Approximate optimum nutrient concentrations in different parts of wheat plant.

Element(%)	Leaves	Stem	Seeds	Roots
N	5.0	2.0	3.0	3.0
P	0.3	0.2	0.5	0.2
K	2.5	2.3	0.7	2.0
Ca	1.2	0.3	0.1	0.2
Mg	0.5	0.05	0.2	0.05
S	0.5	0.3	0.2	0.2
mg/kg	Leaves	Stem	Seeds	Roots
Fe	100.0	40.0	100.0	800.0*
Mn	75.0	20.0	50.0	25.0
B	5.0	3.0	0.5	5.0
Zn	50.0	20.0	50.0	30.0
Cu	10.0	1.0	5.0	10.0
Mo	2.0	1.0	1.0	1.0
Cl	1.0	1.0	1.0	1.0

* Fe ตกค้างสะสมอยู่บริเวณผิวของราก

ต้นอ่อนของพืชจะแสดงอาการขาดธาตุอาหารได้ง่ายกว่าการเป็นอันตรายจากความเข้มข้นของธาตุอาหารที่สูงเกินไป ดังนั้นการให้ธาตุอาหารในระยะเริ่มแรก(starter solution)ก่อนข้างจะมี

ความเข้มข้นสูง ส่วนการให้ธาตุอาหารเพิ่มเติม จะขึ้นอยู่กับระยะการเจริญเติบโตของพืช เพื่อป้องกันการตกค้างและสะสมของธาตุอาหารในสารละลาย

การเจริญของพืชแบ่งออกเป็น 3 ระยะคือ

1. ระยะแรกของการเจริญ(ส่วนใหญ่เป็นการเจริญทางด้านใบ) ใช้ starter solution
 2. ระยะที่สองของการเจริญ(การเจริญทั้งด้านใบและลำต้น) ใช้ vegetative refill solution
 3. ระยะที่สามเป็นระยะการเจริญทางด้านดอกและผล ใช้ seed refill solution
- รากส่วนใหญ่จะเจริญในระยะแรกของการเจริญ และจะลดลงในระยะที่สองและจะหยุดชะงักการเจริญ

Table 14 Approximate normal tissue composition of hydroponically grown greenhouse vegetables

Element	Tomatoes	Cucumbers
K	5-8%	8-15 %
Ca	2-3%	1-3 %
Mg	0.4-1.0%	0.3-0.7 %
NO ₃ -N	14,000-20,000 ppm	10,000-20,000 ppm
PO ₄ -P	6,000-8,000 ppm	8,000-10,000 ppm
Fe	40-100 ppm	90-120 ppm
Zn	15-25 ppm	40-50 ppm
Cu	4-6 ppm	5-10 ppm
Mn	25-50 ppm	50-150 ppm
Mo	1-3 ppm	1-3 ppm
B	20-60 ppm	40-60 ppm

ที่มา ; H. Johnson, Hydroponics: A guide to soilless culture systems. University of California, Division of Agricultural Science Leaflet 2947(1977).

Table 15 Comparison of half -strength Hoagland Solution with Utha Wheat Solutions. The System is initially filled with the starter solution. Vegetative refill solution is used during leaf and stem growth. The seed fill solution is used after the leaves stop growing and the grain is filling.

Element(mM)	Hoagland Solution	Starter Solution	Vegetative Refill	Seed Refill
N	7.5	3.0	6.0	3.0
P	0.5	0.5	0.5	0.5
K	3.0	1.5	4.5	2.5
Ca	2.0	1.0	1.0	0.5
Mg	1.0	0.5	0.3	0.3
S	1.0	0.5	0.3	0.3
mM				
Fe	44.6	10.0	2.5	2.5

Fe-HEDTA	0	25.0	5.0	5.0
Mn	4.5	3.0	6.0	3.0
B	23.0	2.0	1.0	0.2
Zn	0.4	3.0	1.0	1.0
Cu	0.15	0.3	0.3	0.2
Mo	0.05	0.09	0.03	0.03
Cl	9.0	6.0	12.0	6.0
Si	0	100	100	0

ไนโตรเจน เมื่อใช้ nitric acid เพื่อควบคุม pH ปริมาณไนโตรเจนในสารละลายจะมีประมาณ 50 % ของความเข้มข้นที่ต้องการ ดังนั้นใน refill solution สามารถลดอัตราไนโตรเจนลงต่ำกว่าสูตร Hoagland's solution แอมโมเนียมไนเตรท (NH_4NO_3) สามารถใช้ควบคุม pH ในกรณีที่ต้องการรักษาปริมาณไนโตรเจนในพืชในระดับสูง แต่แอมโมเนียม จะจำกัดการนำ cation อื่น ๆ เช่น K, Ca, Mg, and micronutrients ขึ้นไปใช้ของพืช ดังนั้นจะใช้แอมโมเนียมเมื่อจำเป็นเท่านั้น การใช้ HNO_3 ปริมาณ 1 ml ต่อสารละลาย 250 ลิตร จะสามารถลด pH ลง 0.1 หน่วย

ฟอสฟอรัส จะถูกพืชดูดขึ้นไปใช้อย่างรวดเร็ว ทำให้ความเข้มข้นในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็ว

โพแทสเซียม รักษาในระดับของโพแทสเซียมใน starter solution ให้ต่ำและคงที่ และใช้ความเข้มข้นสูงใน refill solution

แคลเซียม พืชใบเลี้ยงคู่จะต้องการปริมาณแคลเซียมสูงกว่าใบเลี้ยงเดี่ยวถึงสามเท่า แคลเซียมจะไม่ทำอันตรายต่อพืช แต่ถ้าใส่ในปริมาณที่สูงจะตกค้างสะสมในสารละลาย แคลเซียมคาร์โบเนตในน้ำกระด้างจะเพิ่ม pH ในสารละลาย

แมกนีเซียมและซัลเฟต (MgSO_4) เคลื่อนย้ายในพืชอย่างรวดเร็ว แมกนีเซียม เข้มข้น 1 mM ไม่มีผลต่อการเจริญของพืช ถ้ามีปริมาณสูงจะทำให้เกิดอันตรายต่อใบที่อยู่ส่วนบนของลำต้น

การสะสมของโซเดียมในน้ำเกินกว่า 30 ppm จะเป็นอันตรายต่อพืช

เหล็ก การใช้ Fe ในรูป Chelating agents จะช่วยให้สารละลายคงระดับ Fe ในความเข้มข้นต่ำ การปลูกพืชในระบบ NFT ที่ประเทศอังกฤษ(An.1978) พบว่า Fe-EDDHA มีความเป็นพิษต่อพืชต่ำกว่า Fe-EDTA และ Fe-chelates อาจจะทำให้พืชไม่สามารถนำ Mn และ Zn ไปใช้ได้ อาจจะใช้ Fe sulphate แทน แต่จะต้องแยกใส่เฉพาะสารนี้ เนื่องจากจะทำให้เกิดการสะสมของ phosphate ในกรณีที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 7 ppm จะเป็นอันตรายต่อพืช

โบรอน ธัญพืชต้องการโบรอนในปริมาณต่ำกว่าพืชใบเลี้ยงคู่

สังกะสีและทองแดง Zn, Cu พบสะสมอยู่ในสภาพธรรมชาติทั่วไปและเป็นส่วนประกอบของท่อหรือภาชนะปลูก สูตรสารละลายของ Hoagland & Arnon (1940's and 1950's) พบธาตุดัง

กล่าวสะสมอยู่ในสารละลาย นอกจากนี้ การใช้ plastic หรือท่อ PVC สามารถเพิ่มความเข้มข้นจากการตกค้างของธาตุอาหารทั้งสองได้ ปริมาณสังกะสีเกินกว่า 7 ppm จะเป็นอันตรายต่อพืช

ซิลิกอน Si เป็นธาตุอาหารที่สำคัญ ปริมาณคลอรีนในน้ำไม่ควรเกิน 50 ppm

ในสลัด butterhead ซึ่งมีใบที่มีลักษณะผิดปกติ โดยมีใบเป็นฝอย เนื่องจากได้รับ Mn สูง จากการวิเคราะห์พืชพบว่า มี Mn 40 ppm ในขณะที่ดินทั่วไปมี 15 ppm Mn ซึ่งควรใช้ Mn ในอัตราที่ต่ำที่สุด

ความเข้มข้นของสารละลาย

ความเข้มข้นของ Fe ใน refill solution ขึ้นอยู่กับอัตราการคายน้ำและการเจริญของพืช เนื่องจากการคายน้ำแสดงให้เห็นถึงอัตราการสูญเสียน้ำของพืช ส่วนการเจริญเติบโตชี้ให้เห็นถึงการนำธาตุอาหารขึ้นไปใช้ของพืช การคาดคะเนอัตราการคายน้ำและการเจริญเติบโตของพืชที่ปลูกในสารละลายเท่ากับ อัตราการคายน้ำ 300-400 ลิตรต่อ น้ำหนักแห้งของพืช 1 กิโลกรัม อัตราที่แน่นอนขึ้นอยู่กับ ความชื้นสัมพัทธ์ ในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ อัตราการคายน้ำจะสูงแต่อัตราการเจริญจะไม่เพิ่ม นอกจากนี้การเพิ่มอัตราของ CO₂ ทำให้ปากใบปิด เพิ่มอัตราการสังเคราะห์แสง ดังนั้นจะเป็นผลให้อัตราการคายน้ำและการเจริญลดลงประมาณ 200: 1

ข้อมูลอัตราส่วนระหว่างการคายน้ำและการเจริญ จะเป็นแนวทางสำหรับการใช้ความเข้มข้นของ refill solution ตัวอย่างเช่น ในสภาพอากาศปกติ อาจจะใช้ refill solution สูตร Hoagland เข้มข้นเศษหนึ่งส่วนสี่ แต่ในกรณีที่ปริมาณ CO₂ ในอากาศสูงขึ้นใช้สูตร Hoagland เข้มข้นเศษหนึ่งส่วนสามเป็นต้น ความเข้มข้นของธาตุอาหารรวม สามารถควบคุมได้โดย EC (electrical conductivity) เมื่อค่า EC สูงขึ้นความเข้มข้นของ refill solution จะต้องลดลง แต่จำนวนธาตุอาหารจะคงที่ โดยทั่วไปค่า EC จะเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ควรตรวจสอบ 1-2 ครั้งต่ออาทิตย์

ตัวอย่างการคำนวณความเข้มข้นของสารละลายที่ใส่เพิ่มเติม.

การใช้ผลการวิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียม เพื่อเป็นแนวทางในการเพิ่มธาตุอาหารในสารละลาย

1. ตั้งสมมติฐานอัตราการคายน้ำต่ออัตราการเจริญของพืช(น้ำหนักแห้ง 1 กก.)เท่ากับ 300:1 และความต้องการโพแทสเซียม (K) ของพืชเท่ากับ 4% (40 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร) ดังนั้นทุก 1 กิโลกรัมของน้ำหนักแห้งจะใช้สารละลาย 300 ลิตร และจะต้องมี K ปริมาณ 40 กรัม ในสารละลาย 300 ลิตรหรือ 0.133 กรัมต่อสารละลาย 1 ลิตร น้ำหนักอะตอมของ K เท่ากับ 39 g mol⁻¹ หรือ refill solution จะประกอบด้วย K ปริมาณ $0.133/39 = 0.0034 \text{ mole L}^{-1}$ หรือ 3.4 mM K

2. ในสภาพความเข้มข้นสัมพัทธ์ต่ำ อัตราการคายน้ำและการเจริญเท่ากับ 400/1 ดังนั้น refill solution จะลดความเข้มข้นลงประมาณ 300/400 หรือ 40 กรัมต่อน้ำ 400 ลิตร = 0.1 กรัมต่อลิตรหาร โดย 39 เท่ากับ 2.6 mM K
3. ในระยะที่พืชมีการเจริญเติบโตทางผลและเมล็ด พืชต้องการ K ในสารละลายเท่ากับ 2 % (20 กรัม/น้ำ 1 ลิตร) เมื่ออัตราการคายน้ำ และการเจริญเท่ากับ 300: 1 ดังนั้นความเข้มข้นของ K ในสารละลายเท่ากับ 20 กรัม /300 ลิตร = 0.067 g/l หาร โดย 39= 1.7 mM K.

ธาตุอาหารที่พืชดูดขึ้นไปสะสมในต้น

สมมุติฐานของธาตุอาหารที่ใช้ในการปลูกพืชแบบไร้ดิน คือปริมาณธาตุอาหารที่พืชดูดขึ้นไปใช้และปริมาณธาตุอาหารที่ค้างอยู่ในสารละลาย จากการศึกษารายชื่อของ Dr. Wade Berry ที่ UCLA พบว่า พืชสามารถดูดธาตุอาหารหลักได้ต่ำกว่า 100 % ส่วนธาตุอาหารรองได้ 100 % จากตารางที่ 14 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการนำธาตุอาหารขึ้นไปใช้ของพืช โดยทำการทดลองปลูกพืชในสารละลายที่หมุนเวียน จำนวน 6 ชั่วโมง เป็นเวลา 22 วัน พบว่าพืชสามารถดูดธาตุหลักขึ้นไปใช้ได้ 50-85 % ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเพิ่มธาตุหลักใน refill solution และลดปริมาณธาตุรองที่ตกค้างสะสมในสารละลาย

ตารางที่ 16 ธาตุอาหารที่พืชดูดขึ้นไปใช้

Element	Recovery(%)
N	70
P	75
K	85
Ca	50
Mg	70
S	50
Fe	50
Mn	280
B	60
Zn	400
Cu	600
Mo	1000

ค่าเฉลี่ยของธาตุอาหารที่พืชดูดขึ้นไปใช้ จากผลการทดลอง 6 ชั่วโมง เป็นเวลา 22 วัน พบว่าธาตุหลัก Fe และ B พืชสามารถนำไปใช้ได้ 50-85 % ส่วน Mn, Zn, Cu, และ Mo พืชสามารถนำไปใช้ได้มากกว่า 100 % เนื่องจากธาตุเหล่านี้จะมีที่มาจากแหล่งอื่น ๆ เช่น plastics หรือ magnetic drive pumps.

จำนวนครั้งในการใส่สารละลายเพิ่มเติม

ธาตุอาหารที่พืชสามารถนำขึ้นไปใช้ได้เร็ว ความเข้มข้นในสารละลายอาจจะหมดไปภายในเวลาหนึ่งชั่วโมง ดังนั้นการให้ธาตุอาหารแบบอัตโนมัติ จะสามารถป้องกันการขาดธาตุอาหารดังกล่าวได้ แต่ธาตุอาหารที่พืชนำขึ้นไปใช้ได้เร็วจะเป็นธาตุที่สามารถเคลื่อนย้ายในพืชได้ ดังนั้นพืชอาจจะเก็บสะสมธาตุดังกล่าวที่ ราก ลำต้น หรือใบและส่งไปยังส่วนต่าง ๆ ที่จำเป็นได้ จากการทดลองให้ไนโตรเจนทุก ๆ สองวันและรอนกระทั่งความเข้มข้นของไนโตรเจนในสารละลายคงเหลือต่ำที่สุด (ใช้ระยะเวลาประมาณ 12 ชั่วโมง) นอกจากนี้การทดลองใช้ในโตรเจนในอัตราสูงสำหรับ starter solution พบว่าพืชสามารถนำขึ้นไปได้อย่างรวดเร็ว จนกระทั่งความเข้มข้นลดลงเหลือ 20 *mm* ในเวลา 16 วันหลังจากออก ปริมาณไนโตรเจนในใบหลังออก 23 วันจะมีระดับปานกลาง แต่การสะสมไนโตรเจน และการเพิ่มของน้ำหนักแห้งจะต่ำกว่าพืชที่ได้รับไนโตรเจนสม่ำเสมอ

การควบคุมระดับน้ำ จะช่วยเพิ่มธาตุอาหารได้ในปริมาณที่น้อยและบ่อยครั้ง แต่อาจจะไม่สามารถช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีเท่ากับการเติมสารละลายทุกวัน ในทางปฏิบัติจำนวนครั้งในการเติมสารละลายขึ้นอยู่กับ ปริมาตรของสารละลายและอัตราการเจริญของพืช

การจัดการธาตุอาหารในแตงกวา

ความสำเร็จของการปลูกพืชกินผลขึ้นอยู่กับ ความสามารถของผู้ปลูกที่จะให้อาหารพืชอย่างสมดุลระหว่างการเจริญทางลำต้น ใบ และดอกผล ในกรณีที่มีความสมดุลในการเจริญเติบโตและผลผลิต สามารถสังเกตจาก ขนาดของลำต้น ขนาดและสีของใบ จำนวนและการเจริญของดอก ผล ขนาดของลำต้นแตงกวาที่เหมาะสมจะหนาประมาณ 1.5 เซนติเมตร เถาแขนงจะหนา 1 เซนติเมตร และมีผลทุกข้อและเจริญอย่างรวดเร็ว (ประมาณ 7 วันหลังการผสมเกสร) ในกรณีที่มีเถาหรือลำต้นขนาดใหญ่กว่า 1.5 เซนติเมตร แสดงให้เห็นถึงอัตราการเจริญด้านลำต้น ใบสูงเกินไปซึ่งจะทำให้เกิดผลหลายผลต่อข้อ ทำให้อาหารสำรองไม่พอเพียงสำหรับการเจริญของผล การเจริญของลำต้น ราก จะหยุดชะงัก ผลร่วง ถ้าหากลำต้นมีขนาดเล็กแสดงว่าพืชขาดอาหาร ผลผลิตหรือระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวผลผลิต จะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและการจัดการน้ำตลอดจนปุ๋ยเคมี เช่นชนิด ปริมาณและระยะเวลา

ถึงแม้ว่าสารอนินทรีย์อาจจะเป็นส่วนประกอบอยู่ในพืชในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำ(ร้อยละ 1) แต่ชนิด ปริมาณและเวลาที่ใส่ปุ๋ยเคมี จะมีอิทธิพลต่อการเจริญและผลผลิตของแตงกวาอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปลูกในเรือนโรง แตงกวาเป็นพืชที่ต้องการธาตุอาหารมาก แต่การใส่มากเกินไปอาจจะทำอันตรายต่อราก เนื่องจากเป็นพืชที่ค่อนข้างอ่อนแอต่อความเค็มของสารละลาย โดยการเจริญและผลผลิตจะลดลงเมื่อค่า electrical conductivity (EC) ของสารละลายสูงขึ้น ดังนั้นควรตรวจสอบสม่ำเสมอ

Table 17 content of nutrients in dry matter of leaves from healthy cucumber plants with deficiency or toxicity symptoms; dry matter ranges from 80-110 g/kg. With 98 g/kg as an average for fresh leaves.

Nutrient element	Healthy		Deficiency	Toxicity
	Range	Mean		
Nitrogen(mol/kg)				
total N	1.8-3.6	2.69		
nitrate N	0.07-1.0	0.24		25
Copper(mmol/kg)	0.03-0.30	0.20		10
Molybdenum(mmol/kg)	0.01-0.06	0.032		10

ที่มา: Roorda van Eysinga, J.P.N.L.; Smilde, K. W. 1981. "Nutritional disorders in grasshouse tomatoes, cucumbers, and lettuce". Cent. Agric. Publ. and Docum., Wageningen, The Netherlands. 130 pp.

ธาตุหลัก(Macronutrients)

แสดงความต้องการธาตุอาหารในปริมาณสูงโดยเฉพาะ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม และซัลเฟอร์

ไนโตรเจน(Nitrogen: N)

ไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการเจริญด้านลำต้น ใบ มากกว่าผล การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนมากเกินไป จะทำให้การเจริญทางลำต้น ใบ มากเกินไป ซึ่งจะทำให้ผลและรากชะงักการเจริญไนโตรเจนที่อยู่ในรูปแอมโมเนียมจะช่วยในการเจริญของลำต้น ใบ แอมโมเนียมในเตรท ยูเรีย เมื่อใส่ในความเข้มข้นและระยะเวลาที่เหมาะสม จะช่วยในการเจริญเติบโตได้ แต่จะเป็นอันตรายต่อพืชได้ง่าย เช่น ทำให้ใบไหม้ ดังนั้นควรศึกษาข้อมูลก่อนใส่ปุ๋ยดังกล่าวและใช้อย่างระมัดระวัง

ลักษณะที่พืชเป็นอันตรายสาเหตุจากการใช้แอมโมเนียมในอัตราสูง ในระยะแรกจะเกิดแผลเป็นจุดเล็ก ๆ ที่ใบ ระยะต่อมาจะขยายตัวหรือรวมกันเป็นแผลใหญ่เหลือเฉพาะเส้นใบเป็นสีเขียว

ส่วนพืชที่ขาดไนโตรเจน จะมีลำต้นขนาดเล็ก แข็ง ใบขนาดเล็ก เนื้อใบบาง สีซีด ไนโตรเจนสามารถเคลื่อนย้ายในพืชได้ดี ดังนั้นใบแก่จะแสดงอาการก่อน โดยจะมีสีเขียวปนเหลือง หลังจากนั้นจะขยายไปทั้งต้น ใบอ่อนจะหยุดชะงักการเจริญ ผลจะมีลักษณะสั้น หนา สีเขียวอ่อน บิดงอ ขั้วจะสั้นและเหี่ยว

ในกรณีที่ได้รับไนโตรเจนมากเกินไป จะทำให้มีลำต้นขนาดใหญ่ ใบสีเขียวเข้ม เป็นคลื่น ช่วงข้อสั้น มือเกาะจะติดกัน เถาแขนงจะสั้น ในกรณีที่รุนแรง การเจริญเติบโตจะหยุดชะงัก

ใบส่วนล่างจนถึงส่วนกลางของลำต้นจะหึงงอและร่วง แผลระหว่างเส้นใบจะโปร่งแสง หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและน้ำตาล เมื่อขอบใบ และระหว่างเส้นใบเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ทำให้ต้นพืชตาย ในกรณีที่พืชยังไม่เหี่ยว การแก้ไขอาจทำได้โดยการให้น้ำ ควบคุมอุณหภูมิและความเข้มแสงต่ำ เพื่อป้องกันการคายน้ำ

พืชที่เจริญปกติ ใบที่สามนับจากยอด(ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) จะมีปริมาณไนโตรเจน 5-6 % ของน้ำหนักแห้ง หรือ มี NO_3 0.5-1.5 % ในใบอ่อนที่คลี่ออกเต็มที่ หรือ 2-3 % N (0.6-1.2% NO_3) ใน sap ของใบยอดที่คลี่ออกเต็มที่

พืชที่ขาดไนโตรเจน จะมีปริมาณไนโตรเจนในใบอ่อนและใบแก่ต่ำกว่า 3 และ 2 % ของน้ำหนักแห้งตามลำดับ การแก้ไขควรฉีดพ่นด้วยปุ๋ยยูเรียเข้มข้น 2-5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เพื่อป้องกันอันตรายต่อพืช ควรฉีดพ่นในระยะที่มีอุณหภูมิและความเข้มแสงต่ำ และให้น้ำหลังฉีดพ่น หลังฉีดพ่นควรเพิ่มปุ๋ยไนโตรเจนทางดินในอัตราและระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อป้องกันการขาดธาตุดังกล่าว

ฟอสฟอรัส(Phosphorus : P)

ถึงแม้พืชจะต้องการฟอสฟอรัสในปริมาณที่น้อยกว่าไนโตรเจน แต่พืชจะต้องการอย่างสม่ำเสมอ ในระยะแรกฟอสฟอรัสจะจำเป็นสำหรับการเจริญของราก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิในดินต่ำ นอกจากนี้จะช่วยในการเจริญเติบโตทั้งทางลำต้น ใบ ดอก ผล ตลอดจนฤดูกาลปลูก เมื่อดินจะจับยึดฟอสฟอรัสได้ดี แต่จะถูกชะล้างหรือสูญเสียโดยง่ายในดิน peat และ soilless media ดังนั้นการปลูกพืชไร้ดิน จะต้องใส่ฟอสฟอรัสอย่างสม่ำเสมอ

พืชที่ขาดฟอสฟอรัส ในขั้นแรกจะแสดงอาการหยุดชะงักการเจริญเติบโต ในกรณีที่รุนแรงพืชจะชะงักการเจริญ ใบอ่อนจะเล็ก หนา สีเทาปนเขียว ใบแก่จะเกิดแผลซ้ำที่เส้นใบและระหว่างเส้นใบ หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีซีด เที่ยว ต่อมาจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและร่วง ปกติฟอสฟอรัสจะไม่เป็นอันตรายต่อพืช ใบปกติจะมีปริมาณฟอสฟอรัสในเนื้อเยื่อ 0.6-1.3 %P ของน้ำหนักแห้งใบที่อยู่บนเถาใหญ่ แต่ในใบอ่อนจะมีปริมาณสูงกว่า ใบที่สามจากยอด(ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร) จะเป็นใบมาตรฐานสำหรับใช้วิเคราะห์ ส่วนในพืชที่ขาดฟอสฟอรัสจะมีปริมาณฟอสฟอรัสต่ำกว่า 0.3% หรือ 0.2% ของน้ำหนักแห้งของใบแก่และใบอ่อนตามลำดับ

การแก้ไข ควรใส่ปุ๋ย triple superphosphate อัตรา 20 กรัมต่อตารางเมตร หรือใช้ปุ๋ย mono potassium phosphate ละลายน้ำ 30-50 ppm P

โพแทสเซียม (Potassium: K)

โพแทสเซียมเป็นธาตุอาหารที่เคลื่อนย้ายในพืชได้ดี พืชต้องการในปริมาณที่สูง จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและผลผลิต เนื่องจากเป็นธาตุหลักและมีขั้วบวก (cation) ทำหน้าที่สร้าง

ความสัมพันธ์กับกรดอินทรีย์ที่อยู่ในเซลล์ซึ่งมีขั้วลบ และ anion อื่น ๆ เช่น sulfate, chloride, และ nitrates. นอกจากนี้จะช่วยกระตุ้นการทำงานของ enzyme ควบคุมการคายน้ำ โดยการควบคุมการเปิด ปิดของปากใบ ประสิทธิภาพของโปแตสเซียมจะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ระหว่างแร่ธาตุต่าง ๆ เช่น ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส จะมีอิทธิพลต่อการนำโปแตสเซียมไปใช้ประโยชน์ของพืช ทำให้พืชขาดโปแตสเซียม แคลเซียม ช่วยในการนำโปแตสเซียมขึ้นไปใช้ของพืช

ในกรณีที่ขาดแคลเซียม พืชจะแสดงอาการขาดโปแตสเซียม แอมโมเนียมจำกัดการนำโปแตสเซียมไปใช้ประโยชน์อย่างมาก การขาดโปแตสเซียมมีแนวโน้มจะทำให้พืชขาดธาตุเหล็ก

ในกรณีที่พืชขาดโปแตสเซียม ระยะเริ่มแรกจะแสดงอาการที่ใบแก่ก่อนและขยายจากใบล่างไปยังใบบนสุด พืชจะหยุดชะงักการเจริญ ช่วงข้อสั้น ใบขนาดเล็ก ขอบใบแก่จะแห้ง งาม้วนลง หลังจากนั้นแผลจะขยายไปยังเนื้อเยื่อที่อยู่ระหว่างเส้นใบ และเข้าสู่ส่วนกลางของใบ ผลจะมีส่วนปลายขยายใหญ่ส่วนที่ติดกับขั้วจะไม่ขยายตัว

ในดินทั่วไปจะมีปริมาณโปแตสเซียมค่อนข้างจะพอเพียง สำหรับการเจริญของพืช นอกจากในดินทราย แต่ในการปลูกพืชไร่ดินพืชจะแสดงอาการขาดทันที เมื่อได้รับธาตุดังกล่าวไม่เพียงพอ การใส่โปแตสเซียมสูงจะไม่เป็นอันตรายต่อพืช แต่จะเป็นสาเหตุให้พืชขาดธาตุอื่น ๆ เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก เป็นต้น

ใบพืชที่สมบูรณ์จะมีปริมาณโปแตสเซียม 4.1% K ของน้ำหนักแห้งของใบอ่อนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร (ยอดอ่อนจะมีปริมาณโปแตสเซียมสูง 8-15%K) และปริมาณโปแตสเซียมใน petiole sap จะมีประมาณ 3,500 - 5,000 ppm K พืชจะแสดงอาการขาดธาตุนี้เมื่อมีปริมาณโปแตสเซียมในใบอ่อนต่ำกว่า 3.5% K ของน้ำหนักแห้งและต่ำกว่า 3,000 ppm K ใน petiole sap.

การแก้ไข ใส่ปุ๋ยโปแตสเซียมก่อนปลูกอัตรา 80 กรัมต่อตารางเมตร หรือให้ในรูปสารละลาย เข้มข้น 300-500 ppm K หรือนิดพ่นในอัตรา 20 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ข้อควรระวังคือพืชไม่สามารถนำโปแตสเซียมที่ให้โดยการฉีดพ่นไปใช้ได้ทั้งหมด

แคลเซียม(Calcium: Ca)

แคลเซียมจะเคลื่อนย้ายในพืชทางท่อน้ำ และบางส่วนจะเคลื่อนย้ายจากใบแก่ ไปยังใบอ่อน แต่จะมีปริมาณที่น้อยมาก ดังนั้นเมื่อพืชได้รับแคลเซียมต่ำ จะแสดงอาการขาดธาตุอาหารที่ยอดอ่อน แคลเซียมมีความสำคัญต่อโครงสร้างและความแข็งแรงของ cell membranes และความสมบูรณ์แข็งแรงของ cell wall โดยทั่วไปแตงกวาจะไม่แสดงอาการขาดธาตุแคลเซียม นอกจากการปลูกในเรือนโรงที่ปิดสนิท เพื่อประหยัดพลังงานและมีความชื้นสัมพัทธ์สูง

อาการขาดธาตุนี้ จะสังเกตได้จากในขั้นแรกจะปรากฏเป็นจุดสีขาวโปร่งแสงที่ขอบใบและระหว่างเส้นใบของใบอ่อน ทำให้เกิดอาการใบด่าง โดยที่เส้นใบจะมีสีเขียว พืชจะชะงักการเจริญ ช่วงข้อในส่วนยอดจะสั้น ใบอ่อนจะมีขนาดเล็ก ปลายใบม้วนขึ้น ในใบแก่ปลายใบจะม้วนลง ใน

กรณีที่รุนแรงใบอ่อนจะกรอบและร่วง ดอกร่วง ยอดอ่อนแห้งตาย รากไม่สมบูรณ์ สั้นและใหญ่กว่าปกติ รากจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลและมีรากฝอยน้อย ผลจะมีขนาดเล็ก ไม่มีรสชาติ ส่วนปลายของผลไม่สมบูรณ์ ในดินที่มีการพังทลายจะขาดแคลเซียม นอกจากนี้ในดิน peat ที่ไม่ใส่ปูนขาวและในการปลูกพืชไร่ดินที่มีแคลเซียมไม่พอเพียงพืชจะแสดงอาการขาดธาตุนี้

ใบพืชที่สมบูรณ์จะประกอบด้วยแคลเซียม 1.5 % Ca ของน้ำหนักแห้งใบอ่อนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร แต่จะมีปริมาณสูงในใบแก่หรือ 5.0 % ของน้ำหนักแห้งใบอ่อนที่คลี่ออกเต็มที่ พืชจะเริ่มแสดงอาการขาดแคลเซียมเมื่อมีปริมาณแคลเซียมต่ำกว่า 0.5 % Ca ของน้ำหนักแห้งใบอ่อนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

การแก้ไขควรฉีดพ่นด้วยแคลเซียมไนเตรท อัตรา 10 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

ข้อควรระวัง จะต้องฉีดพ่นในขณะที่มีอุณหภูมิและความชื้นของแสงต่ำ

แมกนีเซียม (Magnesium: Mg)

อาการขาดธาตุแมกนีเซียม ใบพืชจะหงิกเป็นคลื่น ใบด่าง และจุดสีน้ำตาลที่ใบล่าง ในระยะแรกจะพบจุดสีเหลืองระหว่างเส้นใบ โดยเส้นใบจะมีสีเขียว ถึงแม้จะแสดงอาการรุนแรงโดยผลสีเหลืองระหว่างเส้นใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลอ่อน แต่ขอบใบจะคงมีสีเขียว การปลูกในดินสาเหตุของการขาดแมกนีเซียมจะเกิดจากพืชไม่ได้เกิดจากดิน ซึ่งอาจจะเนื่องมาจาก การใส่ธาตุอาหารบางชนิดหลังปลูกในอัตราที่สูงเกินไปเช่น ใส่โพแทสเซียม แคลเซียม (จากการใส่ปูนขาวมากเกินไป) แอมโมเนียม หรือดินเป็นกรด ในสภาพดังกล่าวพืชจะไม่สามารถดูดแมกนีเซียมขึ้นไปใช้ประโยชน์ได้เพียงพอ ดังนั้นพืชจะเคลื่อนย้ายแมกนีเซียมจากใบแก่ไปยังใบอ่อน ในการปลูกพืชไร่ดินพืชจะแสดงอาการขาดธาตุดังกล่าวเมื่อมีระดับความเข้มข้นลดลงจากระดับความเข้มข้นที่เหมาะสม หรือขาดความสมดุลระหว่าง K^+ , Ca^{++} , NH_4^{++} , H^+ ,

พืชที่ได้รับแมกนีเซียมมากเกินไปจะแสดงอาการใบด่าง ส่วนที่มีสีเขียวจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้ม ส่วนใหญ่จะเกิดในการปลูกพืชในสารละลายที่มีแมกนีเซียมในปริมาณที่สูงมาก

พืชที่ปกติจะมีปริมาณแมกนีเซียม 0.5-0.7 %Mg ของน้ำหนักแห้งใบอ่อนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร แต่ในใบแก่จะมีปริมาณสูงกว่า(0.5-0.9% ในใบอ่อนและ 1.5-2.0 % ในใบแก่ที่สมบูรณ์) พืชจะเริ่มแสดงอาการขาดแมกนีเซียม เมื่อมีปริมาณต่ำกว่า 0.35 % Mg ของ น้ำหนักแห้งใบอ่อนที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร

การแก้ไข ฉีดพ่นด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต อัตรา 20 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ข้อควรระวัง จะต้องฉีดพ่นในขณะที่มีอุณหภูมิและความชื้นของแสงต่ำ วิธีปฏิบัติที่ดีที่สุดคือให้ทางดิน

ซัลเฟอร์(Sulfur: S)

พืชจะได้รับธาตุนี้เพียงพอบนดิน เนื่องจากประกอบอยู่ในปุ๋ยเคมีหลายชนิด และอยู่ในอากาศที่เกิดมลภาวะ แต่กรณีที่มีมากเกินไปจะจำกัดการนำโมลิบดีนัมไปใช้ประโยชน์ของพืช

ธาตุรอง (Micronutrients)

แสดงความต้องการธาตุรองดังต่อไปนี้ในปริมาณที่ต่ำ คือ iron, manganese, copper, boron, zinc, molybdenum, and chloride.

เหล็ก(Iron: Fe)

พืชต้องการธาตุเหล็กเพื่อช่วยในการสร้างเม็ดสีเขียว (chlorophyll) ธาตุนี้จะไม่เคลื่อนย้ายในพืช ลักษณะการขาดธาตุอาหารของพืชจะคล้ายกับอาการการขาดแมกนีเซียม แต่จะเกิดขึ้นกับใบอ่อนโดยการขาดเม็ดสีเขียวและคลอโรฟิลล์อย่างรวดเร็ว อาการในขั้นแรกจะสังเกตจากใบอ่อนจะมีสีเหลืองปนเขียวหรือสีเหลือง แต่เส้นใบจะมีสีเขียว เมื่อถึงขั้นรุนแรงจะเริ่มจากเส้นใบขนาดเล็กเปลี่ยนเป็นมีสีเหลืองหรือขาว หน่อจะหยุดชะงักการเจริญ ใบจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองสาเหตุของการขาดธาตุนี้เนื่องจากวัสดุปลูกมี pH สูง มีปริมาณแมงกานีสสูง ออกซิเจนไม่พอ รากไม่สมบูรณ์ รากตายหรือน้ำขัง ควรเพิ่มปริมาณออกซิเจนบริเวณราก โดยปรับอัตราส่วนผสมของวัสดุปลูก ให้น้ำในปริมาณที่เหมาะสม เพิ่มปริมาณออกซิเจนในสารละลาย ควบคุมให้พืชมีอัตราการคายน้ำที่เหมาะสม การใส่ธาตุนี้มากเกินไป พืชจะแสดงอาการคล้ายกับอาการขาดแมกนีเซียม

พืชที่สมบูรณ์จะมีปริมาณ Fe ในเนื้อเยื่อพืชประมาณ 100-300 ppm ของน้ำหนักแห้งของใบที่ 5 จากยอดและคลอโรฟิลล์ที่ ในกรณีที่มีปริมาณต่ำกว่า 50 ppm หรือในบางกรณีถึงแม้ในใบจะมีปริมาณมากกว่า 100 ppm แต่พืชจะแสดงอาการขาด เนื่องจากอาจจะอยู่ในรูปที่ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ควรใส่ปุ๋ย Fe ในรูปของ iron salt หรือ iron chelates ทางดิน (Fe-EDDHA อัตรา 5-10 กรัมต่อตารางเมตร หรือ Fe-DPTA อัตรา 12-20 กรัมต่อตารางเมตร) หรือฉีดพ่นทางใบโดยใช้ Fe-EDTA เข้มข้น 0.2 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร iron chelates เมื่อใช้ในความเข้มข้นสูงจะเป็นอันตรายต่อพืช ไม่ควรใช้สูงกว่าคำแนะนำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการฉีดพ่นทางใบ ข้อควรระวัง จะต้องฉีดพ่นในขณะที่มีอุณหภูมิและความชื้นของแสงต่ำ และฉีดพ่นทางใบอย่าให้โดนบริเวณโคนต้นเนื่องจากอาจจะทำให้เกิดอาการโคนเน่าได้

แมงกานีส(Manganese: Mn)

พืชต้องการแมงกานีสในปริมาณที่น้อยมาก เพื่อช่วยในการทำงานของ enzymes ช่วยในการสังเคราะห์แสง ช่วยสร้างออกซิเจนในพืช ในกรณีที่ขาดแมงกานีส hydrogen peroxide จะสะสมในใบพืชเมื่อมีความเข้มข้นสูงจะเป็นอันตรายต่อพืช ธาตุนี้จะไม่เคลื่อนย้ายในพืช ปกติจะสะสมในใบ

ล่าง ลักษณะอาการขาดธาตุอาหารจะคล้ายกับอาการขาด Fe โดยจะแสดงออกในใบหรือหน่อใหม่ถึงแม้เนื้อเยื่อขอบใบและระหว่างเส้นใบจะเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อน เป็นสีเขียวปนเหลืองและเป็นสีเหลืองเช่นเดียวกับการขาด Fe แต่ที่แตกต่างกันคือเส้นใบพืชที่ขาด Fe จะยังคงเป็นสีเขียว แต่ที่ขาดแมงกานีสเส้นใบจะมีแผลจุดเล็กสีขาว ในระยะที่รุนแรงใบจะเปลี่ยนเป็น สีเหลืองและมีแผลจุดสีขาวระหว่างเส้นใบ จะเกิดขึ้นมากใน calcareous soils, ดิน peat ที่ใส่ปุ๋ยขาวมาก หรือในสารละลายที่ขาดแมงกานีส

อาการที่พืชแสดงเมื่อได้รับแมงกานีสสูงเกินไป บริเวณระหว่างเส้นใบเปลี่ยนเป็นสีเขียวอ่อนหรือเหลือง โดยแสดงในใบแก่ก่อน หลังจากนั้นเส้นใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลแดง และมีแผลจุดสีม่วงบริเวณลำต้น ยอดอ่อนและเส้นใบด้านล่างของใบ พบมากในพืชที่ปลูกในวัสดุปลูกที่อบด้วยไอน้ำในอุณหภูมิสูง ใช้ระยะเวลาสั้น และไม่สามารถระบายน้ำที่อยู่ในดินออกได้อย่างดี โดยเฉพาะในดินที่เป็นกรด

ปริมาณที่เหมาะสมในใบอ่อนประมาณ 30-60 ppm และในใบแก่ 100-250 ppm เมื่อปริมาณในพืชลดต่ำกว่า 50 ppm ผลผลิตจะลดลง เมื่อต่ำกว่า 12-15 ppm พืชจะแสดงอาการขาดธาตุอาหารอาการที่ได้รับ Mn ในปริมาณสูงเกินไปหรือสูงกว่า 500 และ 800 ppm ในใบอ่อนและใบแก่ตามลำดับ และผลผลิตจะลดลงเมื่อมีปริมาณสูงถึง 2,000 และ 5,000 ppm ในใบอ่อนและใบแก่ตามลำดับ

การแก้ไขชนิดพืชมด้วยแมงกานีสซัลเฟต เข้มข้น 1.5-10 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ในเครื่องพ่นสารละลายที่มีแรงดันสูงและต่ำตามลำดับ ในสารละลายที่ใช้ปลูกพืชควรมีความเข้มข้น 0.05 ppm การปลูกโดยใช้ดินควรใส่ แมงกานีสซัลเฟต อัตรา 50 กรัมต่อตารางเมตรและปรับ pHให้เป็นกลาง

ทองแดง(Copper: Cu)

Cu ช่วยในการทำงานของ enzymes หลายชนิด ตลอดจน enzyme ที่เกี่ยวข้องในการสังเคราะห์แสงและการหายใจ ถึงแม้Cu จะสามารถเคลื่อนย้ายในพืชที่ได้รับในปริมาณที่เพียงพอ แต่ความสามารถในการเคลื่อนย้ายในพืชจะลดลงเมื่อพืชได้รับในปริมาณที่ไม่เพียงพอ ดังนั้นปริมาณ Cu ในเนื้อเยื่อที่กำลังเจริญจะขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของพืช การวิเคราะห์ดินจะให้ผลที่ดีกว่าการวิเคราะห์ส่วนของพืช ในกรณีที่พืชขาดจะพบอาการชะงักการเจริญ ช่วงข้อสั้น ใบมีขนาดเล็กกว่าปกติ ในระยะแรกเนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบ จะเปลี่ยนสี ผิวใบขุ่น ซึ่งจะเกิดกับใบแก่ก่อน หลังจากนั้นจะขยายไปทั้งต้น ในระยะรุนแรงใบจะเปลี่ยนเป็นสีเขียวปนเทาหรือสีเงิน ขอบใบม้วนลง ชะงักการเจริญ จำนวนดอกลดลง ติดผลน้อย ผลขนาดเล็ก มีแผลจุดเล็กสี น้ำตาลทั่วผล

ปกติพืชจะไม่ขาด Cu เนื่องจากมีการใช้ทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรมและในสารเคมีป้องกันและกำจัดเชื้อรา แต่บางครั้งจะขาดในดิน peat และการปลูกในสารละลาย ที่ใช้พลาสติกเป็น

ภาชนะปลูก และในสารละลายที่มีปริมาณ Cu ในความเข้มข้นต่ำ หรือการใช้วัสดุปลูกมี pH สูง ในกรณีที่ได้ Cu ในปริมาณมากเกินไป ถึงแม้ไม่เป็นอันตรายต่อพืชโดยตรงแต่จะให้ผลลบทางอ้อม เนื่องจากจะจำกัดการนำ Fe ไปใช้ของพืช ทำให้พืชขาด Fe ซึ่งจะพบในพื้นที่ใกล้ โรงงานอุตสาหกรรมหรือใช้สารเคมีป้องกัน และกำจัดโรคมก หรือพื้นที่ ไร่ ปุ๋ยขาวมาก การปลูกพืชในสารละลายการใช้ Cu ในอัตราสูงจะทำให้เกิดการสะสม

ในพืชที่สมบูรณ์จะมีปริมาณ Cu 8-20 ppm ของน้ำหนักแห้งของใบที่ 5 ที่คลี่ออกเต็มที่ พืชที่ขาดจะเริ่มแสดงอาการเมื่อมีปริมาณ Cu ต่ำกว่า 7 ppm และจะรุนแรงเมื่อมีปริมาณต่ำกว่า 0.8-2.0 ppm การขาด Cu สามารถทำให้ผลผลิตลดลง 20-90 %

การแก้ไข ใ้ Copper sulfate อัตรา 10 กรัมต่อตารางเมตร และในสารละลายปกติจะมีปริมาณ 0.03 % Cu อาจจะฉีดพ่นทางใบโดยใช้ Copper sulfate เข้มข้น 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร ผสมกับ Calcium hydroxide 0.5 %

โบรอน(Boron: B)

เชื่อว่า B มีหน้าที่ช่วยในการแบ่งเซลล์ และการเจริญของเนื้อเยื่อเจริญ B ไม่เคลื่อนย้ายในพืช ดังนั้นควรมีปริมาณพอเพียงและสม่ำเสมอในบริเวณราก ในดินทรายที่มี pH สูงจะขาด B นอกจากนี้ปริมาณ B ในพืชจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำ เมื่อพืชขาด B จะแสดงอาการที่เนื้อเยื่อเจริญและดอก ผล

อาการที่พบในพืชที่ขาด B จะพบในระยะหลังการเก็บเกี่ยวครั้งแรก โดยใบที่อยู่ส่วนกลางและด้านล่างของลำต้น จะเริ่มเหลืองและกรอบ เนื้อเยื่อเจริญจะตายแตกแฉกแขนงมาก ใบอ่อนเจริญผิดปกติ ใบแก่จะมีเส้นใบเด่นชัด ขอบใบม้วน ใบขนาดเล็ก กรอบ ใบล่างจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ขอบใบจะเปลี่ยนเป็นสีครีม หลังจากนั้นใบจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ขอบใบม้วนลงด้านใน ผลจะสั้น และมีรอยแผลแตกตามยาวของผล รากจะเปลี่ยนเป็นสีดำและปลายนรากวม พืชที่ขาด B จะทำให้ผลผลิตลดลงถึง 90 % และคุณภาพของผลลดลง การใช้ สารละลายที่มีความเข้มข้น B สูง (> 1 ppm) จะเป็นอันตรายต่อแฉกกว่าได้ง่าย เนื่องจาก B ไม่เคลื่อนย้ายในพืช

อาการที่ได้รับ B สูงเกินไปในขั้นแรกแสดงในใบแก่ก่อน อาการที่แสดงในระยะแรก ขอบใบแก่จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวเข้มเป็นสีเขียวปนเหลือง ขอบใบม้วนลง หน่อข้างเจริญได้ดี หลังจากนั้นจะขยายขึ้นไปทางด้านบนของลำต้น มีแผลจุดสีเหลืองระหว่างเส้นใบ ในขั้นที่รุนแรงพืชจะชะงักการเจริญ ใบบนมีขนาดเล็ก ดอกตัวเมีย น้อย ดอกร่วง ดังนั้นควรใช้ด้วยความระมัดระวัง

พืชที่สมบูรณ์จะมีปริมาณ B เข้มข้น 6-8 ppm B ของน้ำหนักแห้งของใบยอด

การแก้ไขสามารถทำได้โดยการใส่ Sodium borate ลงไปในดินอัตรา 2 กรัมต่อ 1 ตารางเมตร หรือนิพ่นด้วย sodium borate อัตรา 2 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร การใส่ปุ๋ยขาวจะช่วยลดปัญหาการใส่ B ในอัตราสูง

สังกะสี(Zinc: Zn)

Zn เป็นส่วนประกอบของ enzymes หลายชนิด มีอิทธิพลต่อการสังเคราะห์แสงมากที่สุด ในจำนวนธาตุรอง ปกติพืชจะไม่ขาดธาตุนี้

การขาดธาตุอาหารสำหรับการปลูกในสารละลาย จะเกิดขึ้นเมื่อไม่ใส่ Zn ลงไป ส่วนในดินปกติจะมีปริมาณระหว่าง 10-300 ppm Zn เมื่อ pH ดินสูงขึ้นและมี calcium carbonate จะจำกัดการนำ Zn มาใช้ประโยชน์ การใส่ปุ๋ยฟอสฟอรัสมาก จะทำให้พืชขาด Zn เนื่องจากจะรวมกับฟอสฟอรัสและเปลี่ยนรูปเป็น Zinc phosphate ซึ่งอยู่ในรูปที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ นอกจากนี้ Cu, Fe, Mg, และ Ca จะจำกัดการนำ Zn ไปใช้ประโยชน์ ในกรณีที่ขาดธาตุอาหารเนื้อเยื่อใบระหว่างเส้นใบแก่ด้านล่างจะเป็นด่าง ต่อจากนั้นจะขยายขึ้นไปยังใบส่วนยอด ช่วงข้อด้านยอดจะสั้น ใบมีขนาดเล็ก ในกรณีที่รุนแรง ช่วงข้อส่วนยอดจะหยุดสั้นทำให้ต้นมีลักษณะทรงพุ่ม การเจริญจะหยุดชะงัก ใบเปลี่ยนเป็นสีเขียวปนเหลืองและสีเหลือง แต่เส้นใบจะมีสีเขียวเข้ม ส่วนในกรณีที่พืชได้รับ Zn มากเกินไป ใบและเส้นใบจะมีสีเขียวเข้มจนถึงดำ เมื่อถึงขั้นรุนแรงอาการจะคล้ายกับการขาด Fe

ในพืชที่สมบูรณ์จะมีปริมาณ Zn 40-100 ppm ของน้ำหนักแห้งของใบที่ 5 ที่คลี่ออกเต็มที่ พืชที่ขาดจะเริ่มแสดงอาการเมื่อมีปริมาณ Zn ต่ำกว่า 20-25 ppm และในปริมาณสูงกว่า 150-180 ppm ของใบแก่หรือ 900 ppm ของใบอ่อนส่วนยอดจะเป็นอันตรายต่อพืช

การแก้ไข ฉีดพ่นทางใบโดยใช้ Zinc sulfate เข้มข้น 5 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร การใส่ปุ๋ยขาวและฟอสฟอรัสจะช่วยลดอันตรายจากการใส่ Zn มากเกินไป

โมลิบดีนัม(Molybdenum: Mo)

เป็นส่วนประกอบของ enzyme หลายชนิด และมีความสำคัญใน nitrogen metabolism พืชต้องการ Mo ในปริมาณที่น้อยมาก เพียง 0.2 ppm ในดินจะพอเพียงสำหรับการเจริญเติบโต จะอยู่ในดินในรูปของ anion ซึ่งแตกต่างจากธาตุรองส่วนใหญ่ ซึ่งจะอยู่ในรูป cation มีปฏิกิริยาเช่นเดียวกับ phosphate พืชจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ดีในดินที่เป็นด่าง และจะลดลงในดินที่เป็นกรด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในดินทราย ซึ่งจำเป็นต้องใส่ปุ๋ยขาว

ลักษณะอาการขาดธาตุอาหาร เนื้อเยื่อระหว่างเส้นใบจะมีสีเขียวปนเหลือง หลังจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองและตาย ในบางกรณีใบแก่อาจยังคงสีเขียว แต่จะมีแผลจุดขรุขระ โดยในระยะแรกจะพบในใบล่างก่อน ต่อจากนั้นจะขยายไปยังใบส่วนบนของต้น แต่ใบอ่อนจะยังคงมีสีเขียว ดอกจะมีขนาดเล็ก ในกรณีที่รุนแรงจะทำให้ผลผลิตลดลงถึง 84 % การปรับ pH ให้อยู่ในระดับ 6.7 โดยการใส่ปุ๋ยขาวจะช่วยให้ผลผลิตสูงขึ้น Mo จะไม่เป็นอันตรายต่อพืช

ในพืชที่สมบูรณ์จะมีปริมาณ Mo 0.8-5.0 ppm ของน้ำหนักแห้งของใบพืชที่ขาดจะเริ่มแสดงอาการเมื่อมีปริมาณ Mo ต่ำกว่า 0.3 ppm การป้องกันใส่ sodium molybdate อัตรา เข้มข้น 5

กรัมต่อ 1 ตารางเมตรหรือการแก้ไข ใส่ sodium molybdate อัตรา 150 มิลลิกรัมต่อ 1 ตารางเมตร หรือนิพ่นด้วย sodium molybdate เข้มข้น 1 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

คลอไรด์(Chloride: Cl)

ปกติพืชจะไม่ขาด Cl เนื่องจากมีอยู่ในสภาพแวดล้อมทั่วไปและเป็นส่วนประกอบของปุ๋ยเคมีหลายชนิด แต่เมื่อพืชได้รับในอัตราสูงจะเกิดอันตรายได้ โดยเฉพาะการปลูกพืชในสารละลายโดยใช้ระบบหมุนเวียน พืชต้องการ Cl ในปริมาณที่ต่ำ (ต่ำกว่า Fe) การปลูกโดยใช้ rock wool ควรให้สารละลายมีปริมาณ Cl เข้มข้น 35 ppm และสูงที่สุดไม่เกิน 70 ppm

Nonessential elements ซึ่งจะให้ประโยชน์หรือทำอันตรายต่อพืชเช่น silicon และ sodium

ซิลิกอน(Silicon: Si)

ธาตุนี้จะมีปริมาณที่สูงในดิน แต่ส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดย quartz Si ที่เป็นประโยชน์จะอยู่ในรูป monosilicic acid $[Si(OH)_4]$ และในสภาพวัสดุปลูกที่มี pH สูงปริมาณที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้จะลดลง การใส่ SiO_2 (soluble silica) ในสารละลายเข้มข้น 75-100 ppm จะช่วยเพิ่มผลผลิตได้ นอกจากนี้จะช่วยให้พืชทนทานต่อโรคราแป้งและรากเน่าที่เกิดจากเชื้อ Pythium ควรใส่ปุ๋ยเคมีเช่น potassium หรือ sodium silicate อย่างสม่ำเสมอ

โซเดียม(Sodium: Na)

ธาตุนี้อาจจะไม่สำคัญสำหรับขบวนการเจริญเติบโตของพืช แต่จะมีประโยชน์ในกรณีที่พืชขาด potassium เนื่องจากในบางขบวนการ Na สามารถทดแทน potassium ได้ การปลูกโดยใช้ rock wool ควรให้สารละลายมีปริมาณ Na เข้มข้น 23 ppm และสูงที่สุดไม่เกิน 46 ppm

Table 18 Stock solution required for the preparation of complete nutrient solution for cucumber transplants in soil and soilless mixes

Fertilizer	Salt in stock(kg/1000 L)
Stock A	
Calcium nitrate	67.0
Potassium nitrate	74.0
Stock B	
Potassium sulphate	13.5
Stock C	
Monopotassium phosphate	22.5
Magnesium sulphate	50.0
Micronutrient mix*	2.0

- Plant Product Chelated Micronutrient Mix ; contains 7% Fe, 2% Mn, 0.4% Zn, 0.1% Cu, 1.3% B, and 0.06% Mo.

Table 19 Amount of each stock solution required to prepare 1000 L of final nutrient solution with various conductivities for raising cucumber transplants in soil or soilless media, and corresponding nutrient concentrations.

Target EC in final nutrient solution(*S/cm)					
	1000	1500	2000	2500	3000
Volume of each stock to be added(L/1000 L of final solution)					
Stock A	3.8	5.8	7.5	9.0	12.0
Stock B	3.8	5.8	7.5	9.0	12.0
Stock C	3.8	5.8	7.5	9.0	12.0
Anticipated nutrient concentrations in final solution(ppm)					
Nitrogen(NO ₃ ⁻)	73	112	145	174	232
Nitrogen(NH ₄ ⁺)	3	4	5	6	8
Phosphorus	19	29	37	45	60
Potassium	152	232	300	360	480
Calcium	48	74	95	114	152
Magnesium	19	29	37	45	60
Iron	0.53	0.81	1.05	1.26	1.68
Manganese	0.15	0.23	0.30	0.36	0.48
Zinc	0.030	0.046	0.060	0.072	0.096
Copper	0.008	0.012	0.015	0.018	0.024
Boron	0.099	0.151	0.195	0.234	0.321
Molybdenum	0.004	0.007	0.009	0.011	0.144

The EC of the water has not been included ; to obtain the final EC of the final nutrient solution add to ECs listed the EC of your water sources (e.g., if your water has an EC of 400 S /cm and you add 7.5L of each stock to 1000 L of water then your final nutrient solution will have an EC of 2400 S/cm

การปลูกกระบวย Rock- wool

วัสดุปลูกจะมีขนาด 3.6 x3.6x4.0 และมีปฏิกริยาเป็นด่าง ก่อนใช้ควรแช่ในสารละลายที่มี EC 1500 S/cm pH 5.0-5.5 หลังจากเมล็ดงอกควรใช้สารละลายที่มี EC 1500-1800 S/cm pH 5.5 และรักษา EC ให้ต่ำกว่า 2500 S/cm และpH 6.0 การเพิ่มสารละลายใหม่ควรล้างด้วยน้ำก่อน เพื่อป้องกันการสะสมของธาตุอาหารซึ่งทำให้ EC สูง

Table 20 Stock solutions required for preparation of complete nutrient solution for cucumber transplants in rock wool

Fertilizer	Salt in stock(kg/1000 L)
Stock A*	
Calcium nitrate	100
Potassium nitrate	45
Stock B*	
Monopotassium phosphate	22
Magnesium sulphate	33
Micronutrient mix**	2

Table 21 Amount of each stock solution required to prepare 1000 L of final nutrient solution with various conductivities for raising cucumber transplants in rock wool, and corresponding nutrient concentrations.

Target EC in final nutrient solution(*S/cm)					
	1000	1500	2000	2500	3000
Volume of each stock to be added(L/1000 L of final solution)					
Stock A	5.0	8.5	12.0	16.0	19.0
Stock B	5.0	8.5	12.0	16.0	19.0

Anticipated nutrient concentrations in final solution(ppm)

Nitrogen(NO ₃ ⁻)	101	172	244	325	386
Nitrogen(NH ₄ ⁺)	5	8	12	16	19
Phosphorus	25	42	60	80	95
Potassium	117	200	282	376	446
Calcium	95	161	228	304	361
Magnesium	16	28	40	53	63
Iron	0.7	1.2	1.68	2.24	2.66
Manganese	0.2	0.34	0.48	0.64	0.76
Zinc	0.04	0.068	0.096	0.128	0.152
Copper	0.01	0.017	0.024	0.032	0.038
Boron	0.13	0.221	0.312	0.416	0.494
Molybdenum	0.006	0.010	0.014	0.019	0.023

The EC of the water has not been included ; to obtain the final EC of the final nutrient solution add to ECs listed the EC of your water sources (e.g., if your water has an EC of 400 S /cm and you add 7.5L of each stock to 1000 L of water then your final)

Table 22 content of nutrients in dry matter of leaves from healthy tomato plants with deficiency or toxicity symptoms; dry matter ranges from 90-120 g/kg. With 116 g/kg as an average for fresh leaves.

Nutrient element	Healthy		Deficiency	Toxicity
	Range	Mean		
Nitrogen(mol/kg)				
total N	2.0-3.5	2.64	<1.7	
nitrate N	0.20-0.07	0.24	<0.07	
Phosphorus(mol/kg)	0.13-0.21	0.15	<0.07	
Potassium(mol/kg)	0.7-1.5	0.97	<0.3	
Magnesium(mol/kg)	0.15-0.35	0.28	<0.12-0.15	
Calcium(mol/kg)	0.6-1.8	0.92	<0.17	
Sulphur(mol/kg)				
total S	0.3-1.0	0.55	<0.15	
sulphate S	0.2-0.8	0.45		
Boron (mmol/kg)	3-9	6.9	<2.7	>15
Copper(mol/kg)				
Molybdenum(mmol/kg)				

ที่มา: Roorda van Eysinga, J.P.N.L.; Smilde, K. W. 1981. "Nutritional disorders in grasshouse tomatoes, cucumbers, and lettuce". Cent. Agric. Publ. and Docum., Wageningen, The Netherlands. 130 pp.

การนำมาใช้ประโยชน์

การส่งเสริมเกษตรกร ควรใช้การปลูกแบบ Substrate Culture หรือใช้วัสดุอื่นที่ไม่ใช่ดินเป็นวัสดุปลูก ซึ่งเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการปลูกโดยทั่วไปในประเทศไทย ก่อนข้างนำมาปฏิบัติได้ง่าย ไม่ใช่เทคโนโลยีสูง ลงทุนต่ำ อาจจะใช้เรือนไม้ไผ่ หลังคาพลาสติก ปลูกพืชในภาชนะปลูก เช่น กระบะ กระถาง ถุง หรือกระสอบ เป็นต้น วัสดุปลูกใช้วัสดุที่หาได้ง่ายในท้องถิ่น และให้น้ำแบบหยดผสมปุ๋ยในรูปสารละลาย โดยตั้งภาชนะบรรจุสารละลายให้สูง ปล่อยให้สารละลายไหลตามแรงโน้มถ่วงของโลก เพื่อลดต้นทุนการผลิตและประหยัดพลังงาน

การปลูกใน water culture ทุกแบบจะใช้เทคโนโลยีและต้นทุนสูง เช่น ภาชนะซึ่งต้องออกแบบพิเศษ เพื่อให้ทนต่อความเป็นกรด ค่าของสารเคมี สามารถให้หรือเพิ่มออกซิเจนได้สม่ำเสมอ ต้องใช้ปุ๋ยเกรดสูงซึ่งค่อนข้างแพง ตรวจสอบความเป็นกรด/ด่าง ตรวจ EC ต้องใช้ระบบไฟฟ้า เพื่อให้ให้น้ำหมุนเวียนและการเพิ่มออกซิเจนในน้ำ เป็นต้น

ประโยชน์ของ NFT

1. ผลผลิตสูง เนื่องจากได้รับสารอาหารและน้ำอย่างพอเพียงและสม่ำเสมอ
2. เก็บเกี่ยวเร็ว สามารถเพาะกล้าเตรียมปลูก ก่อนเก็บเกี่ยว เมื่อเก็บเกี่ยวเสร็จสามารถย้ายปลูกได้ทันที
3. คุณภาพสูง เนื่องจากได้รับสารอาหารและน้ำอย่างพอเพียงและสม่ำเสมอ ทำให้พืชเจริญอย่างต่อเนื่องปริมาณเส้นใยน้อย
4. สามารถควบคุมชนิดและปริมาณธาตุอาหารตามที่พืชต้องการ ซึ่งทำให้ประหยัดและใช้ปัจจัยการผลิตอย่างมีประสิทธิภาพ
5. ประหยัดค่าแรงงานในการดูแลรักษา เช่น การให้น้ำ เตรียมดิน กำจัดวัชพืช เป็นต้น
6. สามารถเพิ่มผลผลิตต่อพื้นที่ และใช้พื้นที่ ที่มีปัญหาในด้าน ชนิดและคุณภาพของดิน เช่น ดุกร้าง ดินทราย ดินเปรี้ยว ดินเค็ม เป็นต้น
7. หลีกเลี่ยงการสะสมของโรคในดินที่เกิดจากการปลูกพืชชนิดเดียวกัน ซ้ำในพื้นที่เดิม เป็นระยะเวลานาน

ข้อเสีย

1. ต้นทุนโรงเรือนและภาชนะปลูกสูง จำเป็นต้องศึกษารูปแบบที่สามารถลดต้นทุนการผลิตได้
2. การจัดการสารอาหาร ขาด/ สูงเกินไป จำต้องวิเคราะห์พืช วิเคราะห์น้ำ เพื่อหาชนิดและปริมาณสารอาหารที่พืชต้องการ ตลอดจนคุณภาพของปุ๋ยเคมี เพื่อลดต้นทุนการผลิต
3. การปลูกพืชผักใบ อาจจะมีในตรรกศาสตร์ในใบสูง ควรลดปุ๋ยและให้เฉพาะน้ำ 3-4 วัน ก่อนเก็บเกี่ยว
4. โรครากเน่าระบาดเร็ว ควรมีการป้องกัน
5. การจัดการ ต้องมีความรู้ในด้านการจัดการพืช การเพิ่มออกซิเจนในน้ำ การตรวจสอบและแก้ไขความเป็นกรดด่างของสารละลาย และการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย

งานทดลองระบบ NFT ณ สาขาพืชผัก ภาควิชาพืชสวน คณะผลิตกรรมการเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

1. ธาตุอาหาร

ปุ๋ยเคมีที่ใช้มีจำนวน 10 ชนิด ประกอบด้วยธาตุอาหารหลัก คือ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส
โปแตสเซียม แคลเซียมและ แมกนีเซียม และธาตุอาหารรองคือ เหล็ก แมงกานีส โบรอน ทองแดง
โมลิบดีนัม และสังกะสี

ตารางที่ 33 ราคาปุ๋ยเคมีที่ใช้เตรียมสารละลาย

Chemicals	Cost (Baht/kilogram)	
	Laboratory Grade	Commercial Grade
Calcium nitrate	2,600.00	8.00
Potassium nitrate	2,400.00	16.00
Mono potassium phosphate	5,500.00	30.00
Magnesium sulfate	3,500.00	7.00
Fe EDTA	7,180.00	-
Manganese sulfate	2,450.00	-
Boric acid	3,780.00	-
Copper sulfate	6,600.00	-
Ammonium molybdate	9,800.00	-
Zinc sulfate	5,440.00	-

ตารางที่ 34 ต้นทุนสารละลาย

Chemicals	Quantity (gram/1000 lit.)	Cost (Baht/1000lit.)	
		Commercial	Laboratory
Calcium nitrate	1,300	10.40	3,380.00
Potassium nitrate	760	12.60	1,824.00
Mono potassium phosphate	300	9.00	1,650.00
Magnesium sulfate	650	4.56	2,275.00
Fe EDTA	20	143.60	143.60
Manganese sulfate	6.2	15.20	15.20
Boric acid	1.7	6.43	6.43
Copper sulfate	0.39	2.60	2.60
Ammonium molybdate	0.32	3.15	3.15
Zinc sulfate	0.44	2.40	2.40

Total	209.50	9,302.38
Average (Baht/Liter)	0.2095	9.302

ต้นทุนสารละลายต่อลิตรจากแม่ปุ๋ยที่ขายตามท้องตลาดจะต่ำกว่าการใช้แม่ปุ๋ยที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ โดยมีราคาประมาณ 0.21 บาทและ 9.30 บาท ต่อลิตรตามลำดับ

จากการทดลอง การปลูกพืชผักใบในพื้นที่ 20 ตารางเมตร สารละลายที่ใช้ 2,250 ลิตร ต้นทุนสารละลายต่อน้ำ 1 ลิตรคือ 0.21 บาท ต้นทุนการผลิตต่อตารางเมตร 23.60 บาท

ตารางที่ 35 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำและความเข้มข้นของสารละลาย

Chemicals	Water Quality (ppm)	Solution (Standard) ppm	Solution VT#01 ppm
PH	6.5	6.0	6.9
EC(mS/cm)	0.2	1.4	1.3
NO ₃ ⁻ N	Trace	98.0	-
NH ₄ ⁺ N	Trace	9.3	-
PO ₄ ⁻ P	-	41.2	1,388.0 **
K	-	234.0	606.0**
Ca	23.44	33.3	56.38**
Mg	1.56	48.6	31.11*
SO ₄ ⁻ S	-	64.0	-
Fe	0.28	3.25	3.81
B	-	0.36	-
Zn	0.08	0.02	0.05
Cu	-	0.01	0.14**
Mn	0.41	0.28	2.59**
Mo	-	0.005	-

จากการวิเคราะห์คุณภาพน้ำที่นำมาเตรียมสารละลาย และวิเคราะห์สารละลาย พบว่าธาตุอาหารบางชนิด เช่น ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม และแมงกานีส สูงกว่ามาตรฐานค่อนข้างมาก(**) นอกจากนี้ น้ำที่นำมาเตรียมสารละลาย มี แคลเซียม และแมงกานีส ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะแมงกานีส มีสูงกว่ามาตรฐาน

ส่วนแมกนีเซียมต่ำกว่ามาตรฐาน(*)

ตารางที่ 37 ระยะเวลาในการปลูกพืชแบบ hydroponics ที่ได้หวั่น(Kao,1997)

ชนิดพืช	การเจริญเติบโต		
	การงอก(วัน)	ต้นกล้า(วัน)	เก็บเกี่ยว(วัน)
ฮ่องเต้	1-2	7-10	24
กะน้ำ	2-3	10-16	24
กวางตุ้ง	1-2	7-14	24
ผักโขมจีน	2-3	10-16	24
ผักบุ้งจีน	2-3	7-14	24
ปวยเล้ง	3-4	10-16	24
ตั้งโอ้	3-4	10-16	24
สลัดใบ	1-3	10-16	24
สลัดบัตเตอร์	3-4	16-20	35
สลัดปลี	3-4	16-20	45
ซีเลอรี่	7-10	15-20	40
มะเขือเทศ	5-7	20-25	90
แตงเทศ	3-5	15-20	80
กระเทียมต้นจีน	30-40	20-30	20
แตงร้าน	3-5	15-20	90

เอกสารอ้างอิง

- Agrorex, 1991, "Agrofoam : Growthmedium" Industriespark, Kerkhoven , 3900 Lommel- Belgium .
- Baylis,A., C.Gragopoulou, and K. Davidson. 1994." Effects of Silicon on the Toxicity of Aluminum to Soybean." Comm.Soil Sci. Plant Anal. 25 : 537 - 546.
- Benoit,F.,Ceustermans,N.,1995," Basic Principles of Nutrient Film Techniques(NFT) For Greenhouse Vegetables" Vegetable Research Station,B-2580 Sinnnt-Katelijne - Waver,Belgium.
- Bugbee, Bruce., 1998. " Nutrient Management in recirculation hydroponic culture." Crop Physiology Laboratory, Utah State University, Logan, UT.
- Chaney,R. and B. Coulombe. 1982. " Effect of phosphate on regulation of Fe-stress in soybean and peanut." J.Plant Nutr.5:469-478.
- Cherif,M.,J. Meziez,D. Ehret,C. Boganoff, and R. Belanger. 1994." Yield of Cucumber Infected with Phythium aphanidermatum when Grown in Soluble Silicon." Hort. Science 29:896-97.

- Cooper, Allen, 1982 “ Nutrient-film Technique; NFT” Grower Books, London, pp 93 .
- Douglass,J.S.,1976,”Advance Guide to Hydroponics” Pelham Books,London.
- Ikeda, Hideo, 1995 “Soilless Culture in Japan” College of Agriculture, University of
Osaka Prefecture, p 9.
- Kao,Te Chen,1988,”The efficiency of DRF hydroponic system in tropical area- A
comparison with shinwa equivalent exchange system.” International symposium on high
Technology in protected cultivation,Hamamatsu,Japan.
- ,1997,”Introduction to World and R.O.C.(Taiwan)Water Culture” Seminar on
Hydroponic at The Royal Project ,Chiangmai,Thailand,August,15,1997.
- Ma,J., K. Nishimura, and E. Takahashi. 1989. “ Effect of Silicon on the growth of the Rice
Plant at Different Growth Stages “ Soil Sci. Plant Nutr. 35:347-356.
- Park,K.W.,H.M.Chiang,H.J.Won,H.K.Jiang. 1995. “ The effect of nutrient solution
temperature on the absorption of water and minerals in leaf vegetables”
Journal of Korean Society for Horticultural Science,1995,36(3)309-316.
- Resh,H.,M.,1987,”Hydroponic Food Production” Woodbridge Press Publishing
Company.
- Samuels,A.A., D.M. Glass, D.Ehret, and J.menzies.1991. “ Molybdenum and Deposition of
Silicon in Cucumber Plants” . Plant, Cell, and Environment 14: 485-492.
- Valamis,J. and D. williams. 1967. “ Manganese and Silicon Interaction in the
Graminae”. Plant and Soil 80:381-390.
- Winslow,M. 1992. ” Silicon, Disease resistance, and Yield of Rice Genotypes under
Upland Cultural Conditions”. Crop Sci.32:1208-1213.
- Winsor,W.G.,1980,"Progress in nutrient film culture" Glass house Crop Research
Institute,Littlehampton, UK.

