



รายงานผลการฝึกอบรม

หลักสูตร Summer School Greenhouse Horticulture

นางพัชราวดี เอ็นมาก นักวิชาการส่งเสริมการเกษตรชำนาญการ
สังกัด สำนักงานเกษตรจังหวัดสมุทรปราการ กรมส่งเสริมการเกษตร
กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ระหว่างวันที่ 29 สิงหาคม – 13 กันยายน 2569
(16 วัน รวมวันเดินทาง)

ณ Wageningen University & Research เมือง Wageningen
ประเทศเนเธอร์แลนด์

หน่วยงานให้ทุน : สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน)

คำนำ

รายงานผลการฝึกอบรมฉบับนี้ จัดทำขึ้นหลังจากการเข้าร่วมฝึกอบรมหลักสูตร Summer School Greenhouse Horticulture ประจำปี 2569 ระหว่างวันที่ 29 สิงหาคม – 13 กันยายน 2569 (16 วัน รวมวันเดินทาง) ณ Wageningen University & Research เมือง Wageningen ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยมี สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) เป็นหน่วยงานให้ทุน การจัดทำรายงาน มีวัตถุประสงค์เพื่อสรุปสาระสำคัญความรู้ และประสบการณ์ที่ได้รับจากการฟังบรรยายและศึกษาดูงาน นำมาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานจริงให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ตลอดจนเป็นหลักฐานประกอบการพัฒนาตนเอง ตามเกณฑ์ที่กำหนด

การอบรมในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ผู้จัดทำขอขอบคุณวิทยากรผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความรู้ ตลอดจนผู้บริหาร หน่วยงานต้นสังกัด และหน่วยงานให้ทุนที่ให้การสนับสนุน ส่งเสริมโอกาสในการพัฒนาศักยภาพ หวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจและหน่วยงานนำไปปรับใช้ต่อไป

พัชรวดี เอ็นมาก

ตุลาคม 2569

สารบัญ

หัวข้อ	หน้า
สารบัญภาพ	ก
แนวคิดหลักโครงการ	1
ส่วนที่ 1 อุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์ ความยั่งยืน และการออกแบบระดับโลก	2
ส่วนที่ 2 ฟิสิกส์ของแสงและความร้อนในโรงเรือน	5
ส่วนที่ 3 วัสดุคลุมโรงเรือนและการจัดการแสง	8
ส่วนที่ 4 การจัดการความชื้นและสมดุลพลังงานโรงเรือน	11
ส่วนที่ 5 เกษตรแม่นยำและการปลูกพืชด้วยข้อมูล	14
ส่วนที่ 6 ศึกษาโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเบลเยียม	17
ส่วนที่ 7 แสง สรีรวิทยาพืช และผลผลิต	18
ส่วนที่ 8 ธาตุอาหารพืช การจัดการ ค่า EC/pH และระบบไร้ดิน	22
ส่วนที่ 9 เคมีธาตุอาหาร การคำนวณสูตรปุ๋ย และความเป็นไปได้ของโรงเรือนไฮเทค	27
ส่วนที่ 10 ศัตรูพืชและการควบคุมศัตรูพืชด้วยวิธีผสมผสาน	30
ส่วนที่ 11 ศึกษาโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเนเธอร์แลนด์	36
ส่วนที่ 12 สรีรวิทยาการเจริญเติบโตและการจัดการภูมิอากาศโรงเรือน	37
ส่วนที่ 13 คุณภาพผลผลิต เศรษฐศาสตร์ และความยั่งยืนหลังการเก็บเกี่ยว	40
เอกสารอ้างอิง	45
ภาคผนวก	47

สารบัญภาพ

หัวข้อ	หน้า
ภาพที่ 1 ตัวเลขสำคัญของอุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์: การจ้างงาน มูลค่าเพิ่ม พื้นที่ปลูก และสัดส่วนการส่งออก	2
ภาพที่ 2 การใช้น้ำต่อกิโลกรัมมะเขือเทศ จากแปลงเปิด (60 ลิตร/กก.) สูโรงเรือนปิดสนิท (4 ลิตร/กก.) ลดลง 15 เท่า	3
ภาพที่ 3 เปรียบเทียบรังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิของปักกิ่ง เนเธอร์แลนด์ และอัลเมเรีย กับความต้องการให้ความร้อน ความเย็น และแสงเสริม	4
ภาพที่ 4 ศักยภาพผลผลิตมะเขือเทศตามระดับเทคโนโลยีโรงเรือน จากแปลงเปิด (4 กก./ตร.ม.) ถึงโรงเรือนกระจกพร้อมไฟเสริม (75 กก./ตร.ม.) ต่างกัน 19 เท่า	4
ภาพที่ 5 หน่วยวัดพลังงานแสง 3 ระบบ: พลังงานฟลักซ์ ($J, W, W/m^2$), โฟตอนสำหรับพืช ($\mu mol, PPFD, DLI$) และความสว่างตามการมองเห็นของมนุษย์ (lumen, lux)	6
ภาพที่ 6 กฎสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ($R = \epsilon \sigma T^4$) และค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ของวัสดุต่าง ๆ เช่น พลาสติก ใบพืช น้ำ และอะลูมิเนียม	7
ภาพที่ 7 ที่มาของ "เลขมหัศจรรย์ 6": ความชันของกราฟ $y = \sigma x^4$ ที่จุดอุณหภูมิ 300 เคลวิน ใช้เป็นตัวคูณประมาณรังสีความร้อนแบบเชิงเส้น	7
ภาพที่ 8 คุณสมบัติทางรังสีของวัสดุโรงเรือนทั้ง 5 ด้าน ที่ร่วมกันกำหนดสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนกระจกหรือพลาสติก	9
ภาพที่ 9 การแลกเปลี่ยนระหว่างค่าการกระจายแสงกับการส่องผ่านแสงรวม — แม้แสงรวมลดลงเล็กน้อย แต่ผลผลิตสุทธิเพิ่มขึ้นถึง 6.5%	10
ภาพที่ 10 ผลการประหยัดพลังงานของโครงการ VenLowEnergykas: กระจกสองชั้นเคลือบ Low-E ร่วมกับฉนวนลดการสะท้อน ประหยัดพลังงานทำความร้อนได้ถึง 50%	11
ภาพที่ 11 ผลจำลอง KASSIM: ปิดสกรีนและหน้าต่างระบายอากาศสนิท ความชื้นในโรงเรือนพุ่งถึง 93%	12
ภาพที่ 12 ภาพถ่ายความร้อนเปรียบเทียบ: กระจก ($T \approx 0.05$) กั้นความร้อนได้ดีกว่าฟิล์มพลาสติก ($T \approx 0.36-0.41$) อย่างชัดเจน	13
ภาพที่ 13 ข้อมูลสรุปความต้องการพลังงานทำความร้อน: กระจก/พลาสติก $\times$ มีสกรีน/ไม่มีสกรีน แสดงว่าสกรีนมีผลมากกว่าวัสดุคลุม	14
ภาพที่ 14 หน้าจอผลลัพธ์ของ KASSIM แสดงอุณหภูมิ ความชื้น สมดุลพลังงาน และตัวชี้วัดการเจริญเติบโตของพืชแบบเรียลไทม์	15

สารบัญภาพ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
ภาพที่ 15 กรอบคิด 5 ขั้นตอนของการปลูกพืชด้วยข้อมูล: SENSING → UNDERSTANDING → PREDICTING → DECIDING → EXECUTING	16
ภาพที่ 16 ภาพศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเบลเยียม	17
ภาพที่ 17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไฟโตโครมสองสถานะ Pr (ดูดกลืนแสงแดง) และ Pfr (ดูดกลืนแสงแดงไกล) ซึ่งเป็นสวิตช์ที่พืชใช้อ่านอัตราส่วนแสงแดงต่อแดงไกลในสิ่งแวดล้อม	18
ภาพที่ 18 กลไก "เสียที่บน ได้ที่ล่าง" ของหลังคากระจกกระจายแสง: การสังเคราะห์แสงของใบด้านบนลดลงเล็กน้อย แต่ของใบด้านล่างในทรงพุ่มเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ผลผลิตรวมสูงขึ้นราว 9%	20
ภาพที่ 19 ผลผลิตมะเขือเทศในเนเธอร์แลนด์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าในรอบ 30 ปี ขณะที่ประสิทธิภาพการใช้ก๊าซซี ₂ ขึ้นจาก 55 เหลือ 30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร	20
ภาพที่ 20 หลักการไฟโตพีเรียดิซึม: รูปแบบช่วงแสง/มืดของพืชวันสั้น พืชวันยาว และเทคนิคขัดจังหวะกลางคืน (night break) พร้อมการจำแนกชนิดพืชตามกลุ่มการตอบสนอง	21
ภาพที่ 21 การจำแนกธาตุอาหารตามความสามารถเคลื่อนย้ายในโพลีเอม คู่กับตำแหน่งอาการขาดธาตุบนต้นพืช (ใบแก่ vs ใบอ่อน)	22
ภาพที่ 22 แสดงกราฟความพร้อมใช้ของธาตุอาหารตามค่า pH — ธาตุหลักและธาตุรองส่วนใหญ่พร้อมใช้สูงสุดใกล้ pH เป็นกลาง ยกเว้นโมลิบดีนัม	23
ภาพที่ 23 ความต่างศักย์น้ำจากดินสู่บรรยากาศที่ขับเคลื่อนการลำเลียงแคลเซียมผ่านไซเลม — โพลีเอมไม่มีการลำเลียงแคลเซียมเลย	24
ภาพที่ 24 เส้นโค้งการกักเก็บน้ำของทราย พีทมอส ขุยมะพร้าว และร็อควูล เทียบปริมาณน้ำที่พืชใช้ได้กับช่องว่างรวม	25
ภาพที่ 25 แบบจำลอง Maas-Hoffman: ค่า EC เกณฑ์เริ่มลดผลผลิตเทียบกับอัตราการลดผลผลิตของพืชผักแต่ละชนิด	26
ภาพที่ 26 แสดงตารางแปลงหน่วยจากเกลือปุ๋ยสู่อิออนและมิลลิอีควิวาเลนต์ แสดงผลรวมประจุบวกและลบที่ต้องเท่ากันพอดี	27
ภาพที่ 27 หลักการแบ่งปุ๋ยลงถัง A และ B ตามการป้องกันการตกตะกอน พร้อมปรับน้ำหนักให้ใกล้เคียงกันด้วยการแบ่งโพแทสเซียมไนเตรต	28
ภาพที่ 28 แสดงตารางเปรียบเทียบระบบการผลิตทางการเกษตร 6 ระดับ ตั้งแต่แปลงเปิดถึงฟาร์มแนวตั้งในอาคาร ครอบคลุมผลผลิต เงินลงทุน และต้นทุนดำเนินงาน	29

สารบัญภาพ (ต่อ)

หัวข้อ	หน้า
ภาพที่ 29 กลุ่มแมลงดูดท่อน้ำเลี้ยง (Hemiptera) ที่พบบ่อยในโรงเรือน ได้แก่ เพลี้ยแป้ง แมลงหริ่งขาว เพลี้ยหอยเกราะ และเพลี้ยอ่อน	31
ภาพที่ 30 วิวัฒนาการ 3 ยุคของการจัดการศัตรูพืช จากพ่นสารเคมีตามปฏิทินสู่ IPM บนฐานนิเวศวิทยาที่สำรวจทั้งศัตรูพืชและศัตรูธรรมชาติ	32
ภาพที่ 31 ศัตรูธรรมชาติประเภทเจาะจง (กินเหยื่อชนิดเดียว) เทียบกับประเภททั่วไป (กินเหยื่อได้หลากหลายชนิด)	33
ภาพที่ 32 แสดงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของแมลงหริ่งขาวกับแตนเบียน <i>Encarsia formosa</i> ไม่ตรงกัน ทำให้การควบคุมอุณหภูมิมีผลต่อสมดุลการควบคุมทางชีวภาพ	34
ภาพที่ 33 ศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเนเธอร์แลนด์	36
ภาพที่ 34 อัตราการเติบโตศักยภาพของผลเมื่อไม่มีคู่แข่งแย่งสารอาหาร คือตัวชี้วัดแรงดึง สารอาหารที่แท้จริง - กราฟรูปภูเขา เพิ่มขึ้นหลังดอกบาน สูงสุดช่วงกลาง แล้วลดลงเมื่อผลใกล้สุก	37
ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CO ₂ กับการสังเคราะห์แสง เป็นกราฟโค้งอิมตัว — ที่ 1,000 ppm ให้ผลผลิตเพิ่มราว 30% เมื่อเทียบกับ 400 ppm	38
ภาพที่ 36 แสดงอัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในโรงเรือนลดลงเข้าใกล้ภายนอก แบบโค้งลาดลง จุดที่กราฟราบคือ ชีตความสามารถสูงสุดที่ต้องออกแบบให้เพียงพอ	39
ภาพที่ 37 ระดับออกซิเจนที่พอเหมาะช่วยลดการหายใจได้มากที่สุด โดยไม่ตกเข้าสู่ โซนการหมักที่ทำลายคุณภาพ	41
ภาพที่ 38 อายุการเก็บรักษาของผักสลัดสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณวิตามินซีและ คาร์โบไฮเดรตที่สะสมจากแสงจัดในสัปดาห์สุดท้าย	42
ภาพที่ 39 แสดง CO ₂ 1 กิโลกรัมที่พืชดูดซับ แปลงเป็นรายได้ได้ต่างกันไป ขึ้นอยู่กับว่านำไปเลี้ยงผลผลิตหรือต้นกล้า	43

รายงานผลการฝึกอบรม
หลักสูตร Summer School Greenhouse Horticulture
นางพัชรารัตน์ เอ็นมาก นักวิชาการส่งเสริมการเกษตรชำนาญการ
สังกัด สำนักงานเกษตรจังหวัดสมุทรปราการ กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
ระหว่างวันที่ 29 สิงหาคม – 13 กันยายน 2569 (16 วัน รวมวันเดินทาง)
ณ Wageningen University & Research เมือง Wageningen ประเทศเนเธอร์แลนด์

เนื้อหาในรายงานมีทั้งหมด 13 ส่วน (เรียงตามลำดับวันฝึกอบรม)

- ส่วนที่ 1 อุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์ ความยั่งยืน และการออกแบบระดับโลก (31 สิงหาคม 2569)
- ส่วนที่ 2 ฟิสิกส์ของแสงและความร้อนในโรงเรือน (31 สิงหาคม 2569)
- ส่วนที่ 3 วัสดุคลุมโรงเรือนและการจัดการแสง (1 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 4 การจัดการความชื้นและสมดุลพลังงานโรงเรือน (1 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 5 เกษตรแม่นยำและการปลูกพืชด้วยข้อมูล (1 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 6 ศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเบลเยียม
- ส่วนที่ 7 แสง สรีรวิทยาพืช และผลผลิต (3 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 8 ธาตุอาหารพืช การจัดการ ค่า EC/pH และระบบไรดิ้น (4 กันยายน 2569 และ 7 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 9 เคมีธาตุอาหาร การคำนวณสูตรปุ๋ย และความเป็นไปได้ของโรงเรือนไฮโดร (7 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 10 ศัตรูพืชและการควบคุมศัตรูพืชด้วยวิธีผสมผสาน (8 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 11 ศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเนเธอร์แลนด์ (9 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 12 สรีรวิทยาการเจริญเติบโตและการจัดการภูมิอากาศโรงเรือน (10 กันยายน 2569)
- ส่วนที่ 13 คุณภาพผลผลิต เศรษฐศาสตร์ และความยั่งยืนหลังการเก็บเกี่ยว (11 กันยายน 2569)

แนวคิดหลักโครงการ : "จากหลักฟิสิกส์พื้นฐาน สู่อการตัดสินใจบริหารจัดการโรงเรือนที่แม่นยำ"

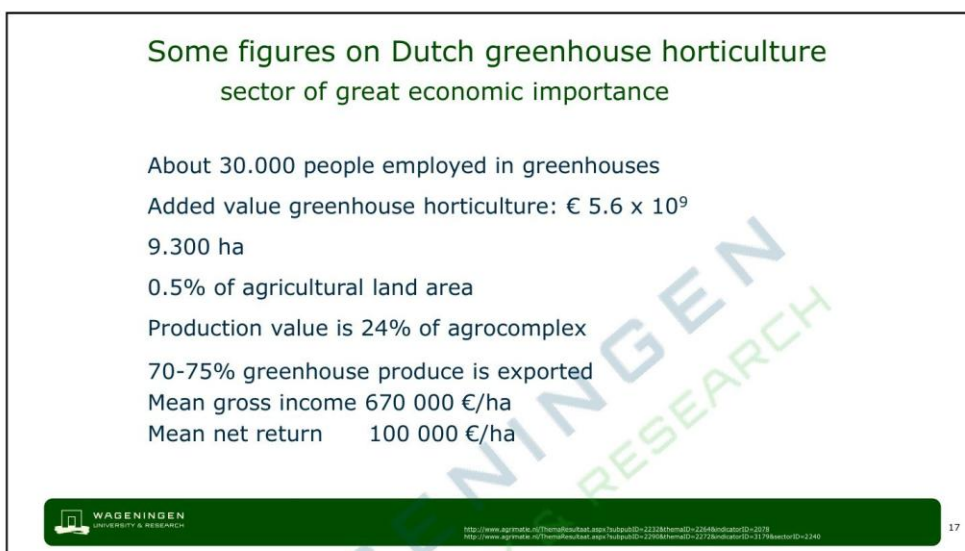
ทุกการตัดสินใจในโรงเรือน ไม่ว่าจะเป็นการเลือกวัสดุ การให้แสงเสริม การควบคุมความชื้น หรือ การให้ธาตุอาหาร ล้วนตั้งอยู่บนหลักฟิสิกส์และสรีรวิทยาพืชที่คำนวณและวางแผนล่วงหน้าได้ ไม่ใช่เพียง ประสบการณ์หรือความเชื่อความสำเร็จของอุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์มาจากการผสมผสานหลายปัจจัย เข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ ทั้งภูมิอากาศ เทคโนโลยี การศึกษา และความยั่งยืน ไม่ใช่ปัจจัยใดปัจจัยหนึ่ง เพียงลำพังไม่มีการออกแบบหรือการจัดการโรงเรือนแบบสากลที่ดีที่สุดสำหรับทุกพื้นที่ ทุกหัวข้อหลักการ เดียวกันคือต้องปรับให้เหมาะกับพืช ภูมิอากาศ ตลาด และทรัพยากรในแต่ละบริบทเสมอ เส้นทางความรู้ ทั้งหมดนี้นำไปประยุกต์ใช้ได้โดยตรงกับการพัฒนาโรงเรือนในประเทศเนเธอร์แลนด์ ทั้งในมิติฟิสิกส์ เทคนิคการจัดการ และกลยุทธ์ความยั่งยืนระยะยาว

ส่วนที่ 1 อุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์ ความยั่งยืน และการออกแบบระดับโลก

วิทยากร: Prof. dr. Leo Marcelis และ Dr. Ep Heuvelink — Wageningen University & Research

1.1 อุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์ : เล็กแต่ทรงพลัง

การปลูกพืชในโรงเรือนให้ประโยชน์เหนือแปลงเปิดหลายด้าน ทั้งควบคุมสภาพแวดล้อมได้ดีขึ้น ผลผลิตและคุณภาพสูงขึ้น ฤดูเก็บเกี่ยวยาวนาน ป้องกันฝน ลูกเห็บ ลมแรง และแมลงศัตรูพืช ประหยัดน้ำด้วยระบบปิด และควบคุมธาตุอาหารแม่นยำผ่านการปลูกด้วยวัสดุปลูก แนวโน้มโลกที่ผลักดันอุตสาหกรรมนี้มีทั้งด้านสิ่งแวดล้อม (ต้องรักษา "ไบโออนุญาตผลิต") ด้านผู้บริโภค (ต้องรักษา "ไบโออนุญาตส่งมอบ") และด้านประชากรที่กำลังเพิ่มจาก 7,000 ล้านสู่ 9,500 ล้านคน ซึ่งจะดันความต้องการอาหารขึ้นถึง 60% ภายในปี 2050 ขณะที่น้ำ พลังงาน และแร่ธาตุมีจำกัดลงแม้พื้นที่โรงเรือนของเนเธอร์แลนด์คิดเป็นเพียง 0.5% ของพื้นที่เกษตรทั้งประเทศ แต่สร้างมูลค่าถึง 24% ของมูลค่าการเกษตรทั้งหมด พื้นที่รวมประมาณ 9,300-10,152 เฮกตาร์จ้างงาน 30,000 คน สร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจ 5.6 พันล้านยูโร/ปี ส่งออก 70-75% ของผลผลิตรายได้เฉลี่ย 670,000 ยูโร/เฮกตาร์ และกำไรสุทธิเฉลี่ย 100,000 ยูโร/เฮกตาร์



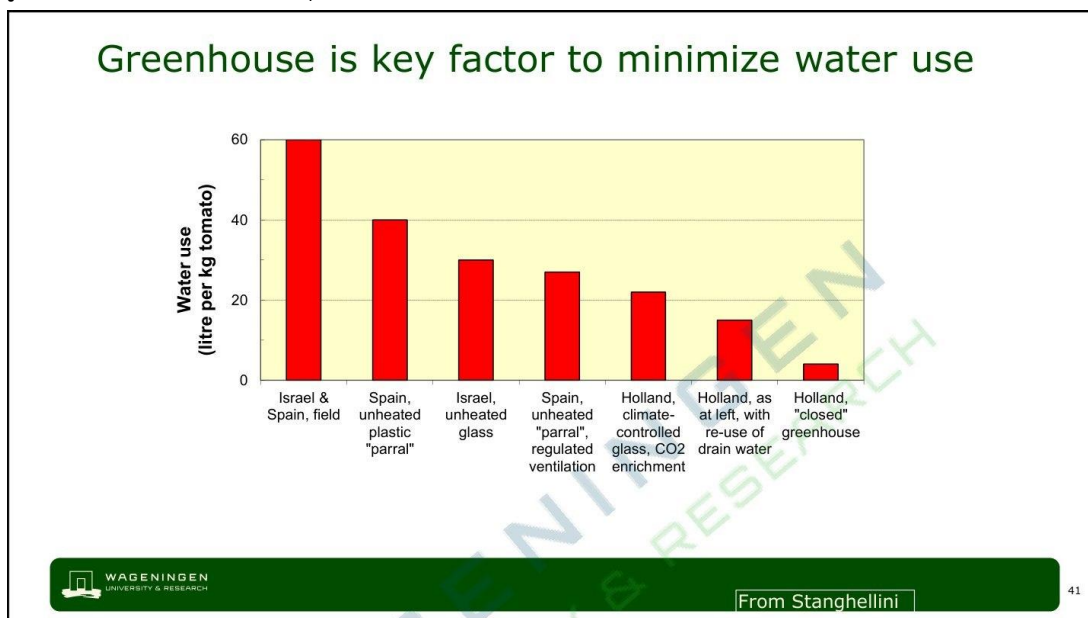
ภาพที่ 1 ตัวเลขสำคัญของอุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์: การจ้างงาน มูลค่าเพิ่ม พื้นที่ปลูก และสัดส่วนการส่งออก

พื้นที่ปลูกแบ่งเป็นไม้ดอกไม้ประดับ (4,365 ha) และพืชอาหาร (5,561 ha) ใกล้เคียงกัน กระจุกตัวหนาแน่นที่ภูมิภาคเวสต์แลนด์ (52°N) พืชหลักในกลุ่มผักคือ มะเขือเทศ พริกหวาน และแตงกวา รวมกันเกือบ 70% ของพื้นที่ผัก ด้านต้นทุนผลิตมะเขือเทศพวงพร้อมไฟเสริม (รวม 104 ยูโร/ตร.ม./ปี) พบว่าต้นทุนทุน (30%) สูงกว่าต้นทุนพลังงาน (22%) เสียอีก สะท้อนว่าการลงทุนโครงสร้างมีผลต่อโครงสร้างต้นทุนมากกว่าค่าพลังงานเพียงอย่างเดียว ปัจจัยที่ทำให้เนเธอร์แลนด์เป็นผู้นำโลกมาจากหลายเรื่องผสมกัน ได้แก่ ระยะเวลาใกล้ตลาดผู้บริโภคยุโรป ภูมิอากาศปานกลางที่ควบคุมง่าย วัฒนธรรมนวัตกรรมที่ธุรกิจและสถาบันวิจัยอย่าง WUR ร่วมมือใกล้ชิด ระบบการศึกษา 4 ระดับที่ผลิตบุคลากรเฉพาะทางต่อเนื่อง และการรวมกลุ่มเกษตรกรที่แบ่งปันแนวปฏิบัติที่ดีระหว่างกัน ผลผลิตในช่วง 40 ปีที่ผ่านมาเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง เช่น มะเขือเทศที่ใช้ไฟเสริมเพิ่มขึ้นถึง 271% แต่การปรับปรุงพันธุ์มีส่วนเพียง 0.9%/ปี (27% ตลอด 30 ปี) ส่วนที่เหลือมาจากเทคโนโลยีการจัดการสภาพแวดล้อมและแสงเสริม ส่วนฟาร์มแนวตั้งและโรงงานปลูกพืชยังเหมาะสม

เฉพาะพืชมูลค่าสูงหรือพืชขนาดเล็ก ไม่ใช่คำตอบสำหรับพืชอาหารหลักเพราะต้นทุนไฟฟ้า LED ยังสูงกว่าแสงอาทิตย์มาก

1.2 ความยั่งยืนและเทคโนโลยีประหยัดพลังงาน

ด้านการใช้น้ำ ข้อมูลเปรียบเทียบ (Stanghellini) แสดงว่าแปลงเปิดใช้น้ำประมาณ 60 ลิตร/กก. มะเขือเทศ ขณะที่โรงเรือนปิดสนิทของเนเธอร์แลนด์ใช้เพียง 4 ลิตร/กก. ลดลงถึง 15 เท่า ด้วยระบบควบคุมภูมิอากาศและการให้น้ำ-ธาตุอาหาร (Fertigation) แบบวงจรปิดที่นำน้ำระบายกลับมาฆ่าเชื้อและใช้ใหม่

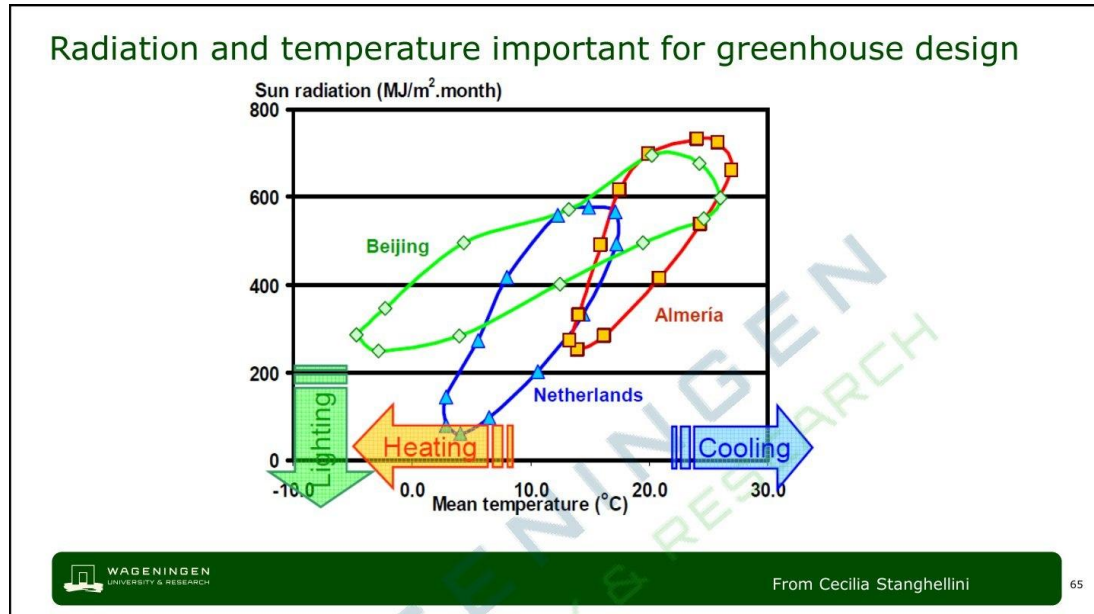


ภาพที่ 2 การใช้น้ำต่อกิโลกรัมมะเขือเทศ จากแปลงเปิด (60 ลิตร/กก.) สูโรงเรือนปิดสนิท (4 ลิตร/กก.) ลดลง 15 เท่า

ด้านการจัดการศัตรูพืช เนเธอร์แลนด์เปลี่ยนจากสารเคมีสู่การควบคุมทางชีวภาพและ IPM จนครอบคลุมพื้นที่ปลูกพริกหวานเกือบทั้งหมดภายในปี 1995 สะท้อนกรอบคิดใหม่ที่มองพืชเป็นระบบมีภูมิคุ้มกันที่ต้องสนับสนุน ไม่ใช่กำจัดศัตรูพืชเมื่อเกิดปัญหา ด้านพลังงาน การใช้พลังงานจริงลดลงเหลือ 45% ของระดับปี 1990 จากเทคโนโลยีความร้อนร่วม (CHP) ซึ่งปัจจุบันผลิตไฟฟ้าถึง 10% ของทั้งประเทศ อุตสาหกรรมตั้งเป้าสู่ความเป็นกลางทางคาร์บอนภายในปี 2040 โดยมีแหล่ง CO₂ หลากหลาย ตั้งแต่ CHP โครงการขั้วท่อ OCAP และการดักจับคาร์บอนจากอากาศ แนวคิดโรงเรือนปิดสนิทรวมกับการกักเก็บความร้อนใต้ดินตามฤดูกาล (ATES) ลดพลังงานได้ถึง 30% และแนวคิด "การเพาะปลูกยุคใหม่" ที่ผสานฉนวนที่ตีขึ้นและเก็บเกี่ยวความร้อนจากระบบทำความเย็น ประหยัดพลังงานรวมได้ถึง 40-50% นอกจากนี้วัสดุปลูกที่กระจายแสง (Diffuse Light) ช่วยเพิ่มผลผลิต 5-10% เพราะแสงส่องถึงใบระดับล่างได้ดีกว่า ควบคู่กับการพัฒนาไฟ LED เสริมแสงที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น ระบบอัตโนมัติและหุ่นยนต์เริ่มเข้ามาช่วยคัดแยกผลผลิต แต่อุตสาหกรรมยังยึดหลัก "คุณภาพมากกว่าปริมาณ" ทั้งรสชาติ รูปทรง และอายุการเก็บรักษา แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circularity) มองโรงเรือนเป็นระบบที่รับปัจจัยนำเข้าที่ยั่งยืน เช่น น้ำฝน ไฟฟ้าสีเขียว ความร้อนเหลือทิ้ง และศัตรูธรรมชาติ แล้วส่งผลผลิตที่ยั่งยืนกลับสู่ชุมชน เช่น ไฟฟ้าส่วนเกินและความร้อนส่วนเกิน ทั้งนี้ความยั่งยืนของวัสดุปลูกไม่ควรตัดสินแบบชั่วคราวข้าม แต่ต้องพิจารณาสามมิติคือสิ่งแวดล้อม เศรษฐกิจ และสังคมร่วมกัน ด้านการชลประทาน งานวิจัยปัจจุบันให้ความสำคัญกับความยั่งยืนของน้ำ ภายใต้เป้าหมาย EU ที่ต้องการลดการปล่อยไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากภาคเกษตรโรงเรือนให้เป็นศูนย์ภายในปี 2027

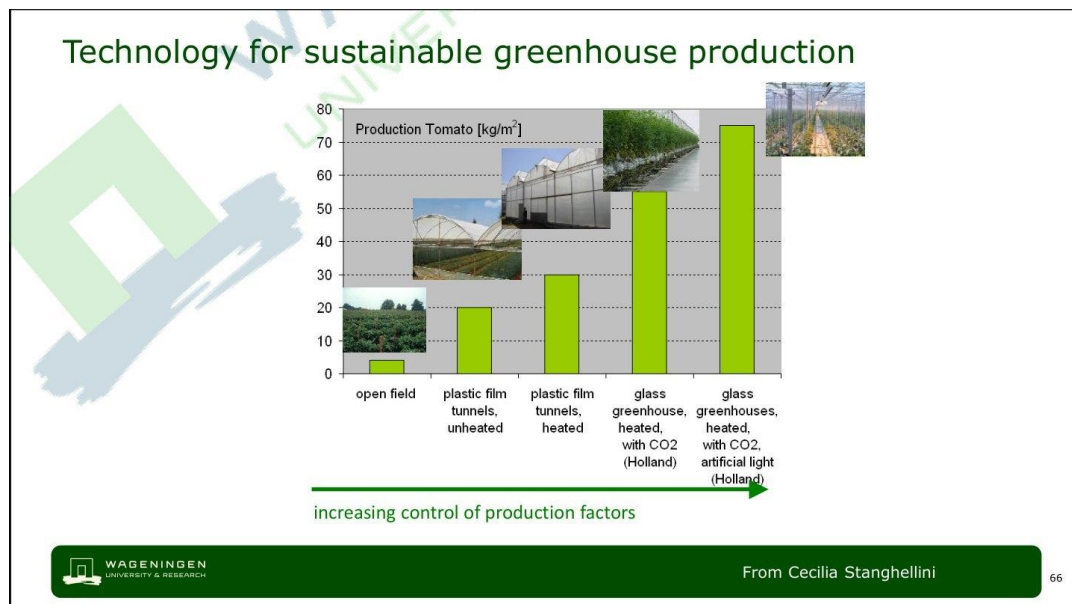
1.3 การออกแบบโรงเรือนรอบโลก : จากอัลเมเรียสู่จีน

ภูมิอากาศเป็นตัวกำหนดการออกแบบโรงเรือนเสมอ การเปรียบเทียบปักกิ่ง เนเธอร์แลนด์ และอัลเมเรีย (สเปน) แสดงว่าแต่ละพื้นที่ที่ต้องการโรงเรือนต่างกันสิ้นเชิง เนเธอร์แลนด์เน้นให้ความร้อนและแสงเสริมในฤดูหนาว อัลเมเรียเน้นป้องกันความร้อนและระบายความร้อน ส่วนปักกิ่งต้องรับมือทั้งฤดูหนาวจัดและร้อนจัดในพื้นที่เดียว ข้อสรุปสำคัญคือไม่มีแบบโรงเรือนสากลที่ดีที่สุดสำหรับทุกที่ ต้องเริ่มจากข้อมูลภูมิอากาศเฉพาะพื้นที่เสมอ



ภาพที่ 3 เปรียบเทียบรังสีดวงอาทิตย์และอุณหภูมิของปักกิ่ง เนเธอร์แลนด์ และอัลเมเรีย กับความต้องการให้ความร้อน ความเย็น และแสงเสริม

ศักยภาพผลผลิตมะเขือเทศต่างกันได้ถึง 19 เท่าตามระดับเทคโนโลยี ตั้งแต่แปลงเปิด (4 กก./ตร.ม.) อุโมงค์พลาสติก (20-30 กก./ตร.ม.) จนถึงโรงเรือนกระจกเนเธอร์แลนด์ที่มีทำความร้อน เสริม CO₂ และไฟเสริม (75 กก./ตร.ม.) ตัวเลขนี้อธิบายว่าทำไมการลงทุนเทคโนโลยีโรงเรือนจึงคุ้มค่าในระยะยาว



ภาพที่ 4 ศักยภาพผลผลิตมะเขือเทศตามระดับเทคโนโลยีโรงเรือน จากแปลงเปิด (4 กก./ตร.ม.) ถึงโรงเรือนกระจกพร้อมไฟเสริม (75 กก./ตร.ม.) ต่างกัน 19 เท่า

กรณีศึกษาอัลเมเรียแสดงการขยายตัวของโรงเรือนพลาสติกจนได้ฉายา "ทะเลพลาสติก" ปัจจัยออกแบบสำคัญคือฝุ่นที่บังแสง (ต้องทำความสะอาดวัสดุผนังบ่อย) การพร่างแสงและหาสีขาวบนหลังคา ระบบทำความเย็นแบบระบายความร้อนด้วยน้ำ โครงสร้างทนลม และการจัดการน้ำอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในพื้นที่แห้งแล้ง ส่วนโรงเรือนพลังงานแสงอาทิตย์แบบจีน ใช้โครงสร้างพังกาแพงดิน/อิฐหนาเก็บความร้อนกลางวัน และปลดปล่อยกลางคืน ไม่มีระบบทำความร้อนเลย และใช้สื่อพรางคลุมหลังคาเป็นฉนวนตอนกลางคืน เป็นภูมิปัญญาท้องถิ่นราคาถูก ที่ได้ผลดีในภูมิอากาศหนาวเย็น แต่มีข้อจำกัดคือใช้ที่ดินไม่คุ้มค่า ต้องตั้งห่างกันมาก เพื่อไม่บังแสงกัน และปลูกพืชได้ไม่ตลอดปี บทสรุปของหัวข้อนี้คือกรอบคิด Adaptive Greenhouse Design ที่รวมปัจจัยสามกลุ่มเพื่อออกแบบโรงเรือนที่เหมาะสมกับบริบทเฉพาะ ได้แก่ ทรัพยากร (น้ำ ที่ดิน พลังงาน ทุน แรงงาน ธาตุอาหาร) ภูมิอากาศ (อุณหภูมิ ความชื้น รังสี ลม) และตลาด (ราคา คุณภาพ กฎหมาย) เป้าหมายคือผสานประสิทธิภาพการผลิตเข้ากับปัจจัยนำเข้าที่น้อยที่สุดสำหรับแต่ละภูมิภาค

ส่วนที่ 2 ฟิสิกส์ของแสงและความร้อนในโรงเรือน

วิทยากร: Dr. David Katzin (Wageningen University & Research)

2.1 แสงอาทิตย์ไม่ใช่แค่ "แหล่งพลังงานสำหรับพืช"

ตัวอย่างจากโปรแกรมจำลองโรงเรือน KASSIM แสดงให้เห็นว่า แม้ระบบทำความร้อนต้องจ่ายพลังงานถึง 153.2 วัตต์/ตร.ม. เพื่อชดเชยความร้อนที่สูญเสียไป แต่เมื่อรวมผลของรังสีดวงอาทิตย์ การพาความร้อน และการแผ่รังสีเข้าด้วยกัน ผลรวมสุทธิกลับใกล้ศูนย์ (ประมาณ 12 วัตต์/ตร.ม.) นั่นคือโรงเรือนอยู่ในสภาวะสมดุลพลังงานโดยประมาณ สะท้อนว่ารังสีดวงอาทิตย์เป็นหนึ่งในตัวแปรหลักของสมดุลพลังงานทั้งระบบ ไม่ใช่เพียงแสงสำหรับการสังเคราะห์แสง

2.2 สเปกตรัมแสงอาทิตย์ : ไม่ใช่ทุกช่วงคลื่นมีประโยชน์เท่ากัน

แสงอาทิตย์ประกอบด้วยสามช่วงคลื่นหลัก ได้แก่ UV (200-400 นาโนเมตร) พลังงานสูง แต่สัดส่วนน้อย PAR (400-700 นาโนเมตร) ซึ่งพืชใช้สังเคราะห์แสงได้โดยตรง และ NIR (700-2,500 นาโนเมตร) ที่มีพลังงานรวมสูงถึงราว 50% ของแสงอาทิตย์ทั้งหมด แต่พืชใช้ไม่ได้ กลับกลายเป็นภาระความร้อนแทน บรรยากาศ ยังดูดกลืนรังสีบางช่วงผ่าน O_3 , O_2 , H_2O และ CO_2 ทำให้สเปกตรัมที่มาถึงพื้นโลกไม่เรียบเสมอกัน ปริมาณและสัดส่วนรังสีตรง (วัดด้วย Pyrheliometer) ต่อรังสีกระจาย (วัดรวมกันด้วย Pyranometer) ขึ้นกับภูมิศาสตร์อย่างมาก เช่น ริยาด (ฟ้าใสเกือบตลอดปี) ได้รังสีรวมสูงสุดราว 8,000 MJ/ตร.ม./ปี โดยมีรังสีกระจายเพียง 33% ขณะที่เนเธอร์แลนด์ได้รังสีรวมน้อยที่สุดในกลุ่มเพียง 3,500-3,600 MJ/ตร.ม./ปี แต่รังสีกระจายสูงถึง 57% ข้อสังเกตสำคัญคือ เมฆมากไม่ได้แปลว่าไม่มีแสง เพียงแต่แสงเปลี่ยนจากรังสีตรงเป็นรังสีกระจายมากขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการกระจายแสงในทรงพุ่มพืชต่างกัน ความแตกต่างของแสงตามฤดูกาลในละติจูดสูงอย่างยุโรปนี้เองเป็นสาเหตุหลักที่โรงเรือนต้องพึ่งพาไฟเสริมในฤดูหนาว

2.3 หน่วยวัดแสงที่ถูกต้อง: ห้ามใช้ "ลักซ์" กับพืช

บทเรียนสำคัญที่สุดคือมีระบบหน่วยวัดแสง 3 ระบบที่แยกจากกันโดยสิ้นเชิง: (1) ระบบพลังงานฟิสิกส์ (J, W, W/m^2) วัดพลังงานรวมทุกช่วงคลื่น (2) ระบบนับโฟตอนสำหรับพืช (μmol , PPF, PPFD, DLI) วัดเฉพาะโฟตอนช่วง PAR ที่พืชใช้สังเคราะห์แสงได้จริง และ (3) ระบบความสว่างตามการมองเห็นของมนุษย์

(lumen, candela, lux) ดวงตามนุษย์ไวต่อแสงสีเขียวที่สุดและแทบไม่ตอบสนองต่อแสงสีแดง-น้ำเงิน ซึ่งพืชใช้สังเคราะห์แสงได้ดีที่สุด ดังนั้น "ห้ามใช้ลักซ์หรือลูเมนวัดแสงสำหรับปลูกพืชโดยเด็ดขาด" ต้องใช้ PPFD หรือ DLI เท่านั้น

Units for measuring light			
	Energy	Light (photons PAR)	Light (human eye)
Base unit	J (Joule)	μmol	$\text{lm}\cdot\text{s}$
Flow through time	$W \text{ (watt)} = J/s = J \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol/s}$ (PPF – photosynthetic photon flux)	lm (lumen)
Flow through time (spherical)	$W/\text{sr} = J/(\text{s}\cdot\text{sr})$	$\mu\text{mol}/(\text{s}\cdot\text{sr})$	$\text{cd} = \text{lm}/\text{sr}$ (candela)
Flow through time and area	$W/\text{m}^2 = W \text{ m}^{-2} = J/(\text{m}^2\cdot\text{s}) = J \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (PPFD – photosynthetic photon flux density)	$\text{lux} = \text{lm}/\text{m}^2$
Flow over area (integrated over time)	J/m^2	$\mu\text{mol}/\text{m}^2$	$\text{lux}\cdot\text{s}$

25

ภาพที่ 5 หน่วยวัดพลังงานแสง 3 ระบบ: พลังงานฟิสิกส์ (J, W, W/m²), โฟตอนสำหรับพืช (μmol , PPFD, DLI) และความสว่างตามการมองเห็นของมนุษย์ (lumen, lux)

หน่วยพื้นฐานที่ควรจำ: 1 mol = 1,000,000 μmol | 1 MJ = 1,000,000 J | 1 Wh = 3,600 J | 1 kWh = 3.6 MJ

2.4 สูตรลัดของพลังค์และการแปลงหน่วยสู่หลอด LED

ความสัมพันธ์ของพลังค์ ($E = hc/\lambda$) อธิบายว่าพลังงานโฟตอนขึ้นกับความยาวคลื่น Dr. Katzin สรุปเป็นสูตรลัดที่ใช้งานได้จริงโดยไม่ต้องจำค่าคงที่ทางฟิสิกส์ คือ $E = n \times 120 / \lambda$ (E =จูล, n =ไมโครโมล, λ = นาโนเมตร) จัดรูปใหม่ได้เป็น $n = E \times \lambda / 120$ และ $n/E = \lambda / 120$ ตัวอย่าง: แสงสีเขียว 500 นาโนเมตร 1 ไมโครโมล มีพลังงาน 0.24 จูล ค่าคงที่แปลงหน่วยที่ใช้ได้จริง: แสงอาทิตย์รวม 1 W/m² $\approx$ PAR 2-2.3 $\mu\text{mol}/\text{จูล}$ และ PAR 1 W/m² $\approx$ 4-4.6 $\mu\text{mol}/\text{จูล}$ หลักการนี้ใช้ประเมินหลอด LED ได้ เช่น หลอดผสมแดง 662 นาโนเมตร (94%) กับน้ำเงิน 450 นาโนเมตร (6%) ให้ค่าประสิทธิภาพทางทฤษฎีเฉลี่ย 5.4 $\mu\text{mol}/\text{จูล}$ หากหลอดจริงวัดได้ PPE เพียง 3 $\mu\text{mol}/\text{จูล}$ แสดงว่าแปลงไฟฟ้าเป็นแสงใช้ประโยชน์ได้จริงแค่ 56% ส่วนที่เหลือ 44% สูญเสียเป็นความร้อนที่ต้องคิดรวมในการะความร้อนของโรงเรือน

2.5 กฎสเตฟาน-โบลต์ซมันน์และ "เลขมหัศจรรย์ 6"

วัตถุทุกชิ้นที่มีอุณหภูมิสูงกว่าศูนย์สัมบูรณ์แผ่รังสีความร้อนตามกฎ $R = \epsilon \sigma T^4$ ($\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$) ค่าการแผ่รังสี (Emissivity, ϵ) ของพลาสติกใบพืช และน้ำ สูงกว่า 0.9 ขณะที่อะลูมิเนียมมีค่าเพียง 0.03-0.2 จึงถูกใช้เป็นฉนวนสะท้อนความร้อน ตามกฎของเคอร์ชอฟฟ์ $\epsilon = \alpha$ (วัสดุที่แผ่รังสีก็ดูดกลืนรังสีดีเช่นกัน)

Thermal radiation (Law of Stefan-Boltzmann)

$$R = \varepsilon \sigma T^4$$

- W per m² surface area
- σ – Stefan-Boltzmann constant: $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
- ε – emissivity: a property of the body's surface, between 0 and 1
- Emissivity of plastic, leaves, and water is above 0.9
- Emissivity of aluminum about 0.03 to 0.2



50

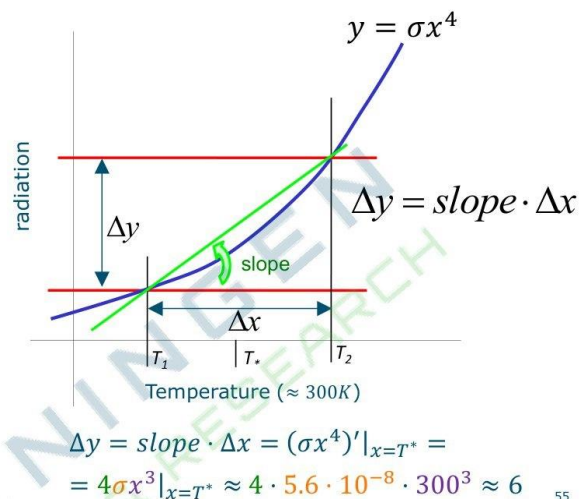
ภาพที่ 6 กฎสเตฟาน-โบลต์ซมันน์ ($R = \varepsilon \sigma T^4$) และค่าการแผ่รังสี (Emissivity) ของวัสดุต่าง ๆ เช่น พลาสติก ใบบัว น้ำ และอะลูมิเนียม

เนื่องจากสูตรนี้มีการยกกำลังสี่ คำนวณด้วยมือยุ่งยาก จึงมีการประมาณเชิงเส้นด้วย "เลขมหัศจรรย์ 6" ซึ่งมาจากความชันของกราฟ $y = \sigma x^4$ ที่จุดอุณหภูมิประมาณ 300 เคลวิน ทำให้ย่อสูตรเหลือ $6 \times \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times (T_1 - T_2)$ ตัวอย่างตรวจสอบ: หลังคา 15°C ฟ้า 25°C ($\varepsilon = 0.9$ ทั้งคู่) สูตรเต็มให้ 51 W/m² สูตรลัดให้ 54 W/m² ใกล้เคียงกันมากในช่วงอุณหภูมิที่โรงเรือนทำงานปกติ

Linearization

<https://brill.com/display/title/70187>

- Instead of using 4th power, we can linearize to get a good approximation
- See Stanghellini, Van 't Ooster, Heuvelink, Greenhouse Horticulture, Wageningen Academic Publishers
- $\sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 ((T_1)^4 - (T_2)^4)$ becomes $6 \varepsilon_1 \varepsilon_2 (T_1 - T_2)$
- As a bonus, we can now use °C since we look at temperature difference
- Works well if $T \approx 25^\circ\text{C}$



55

ภาพที่ 7 ที่มาของ "เลขมหัศจรรย์ 6": ความชันของกราฟ $y = \sigma x^4$ ที่จุดอุณหภูมิ 300 เคลวิน ใช้เป็นตัวคูณประมาณรังสีความร้อนแบบเชิงเส้น

2.6 ปัจจัยรูปและอุณหภูมิฟ้า : ความเสี่ยงคืนฟ้าใส

พืชไม่ได้แผ่รังสีไปทางหลังคาอย่างเดียว แต่กระจายตามปัจจัยรูป (View Factor) - ตัวอย่าง: ราว 50% สู่อากาศ 45% สู่มพื้นดิน และ 5% สู่อากาศข้างเคียง (หมุนเวียนความร้อนในทรงพุ่ม) ส่วนการแลกเปลี่ยนรังสีกับฟ้าต้องใช้ "อุณหภูมิฟ้าที่มีผล" ($T_{sky} = \sqrt[4]{(R/\sigma)}$) ไม่ใช่อุณหภูมิอากาศจริง ข้อค้นพบสำคัญ: คืนฟ้าใสอุณหภูมิฟ้าเย็นกว่าอากาศจริงได้ถึงราว 40°C (อากาศ 0°C ฟ้าอาจเหลือ -40°C) แต่คืนฟ้ามีเมฆเย็นกว่าอากาศเพียงราว 10°C เพราะเมฆแผ่รังสีกลับลงมาชดเชย นี่คือเหตุผลที่คืนฟ้าใสเสี่ยงน้ำค้างแข็งมากกว่าคืนฟ้ามีเมฆ แม้อุณหภูมิอากาศเท่ากัน

2.7 สรุปข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

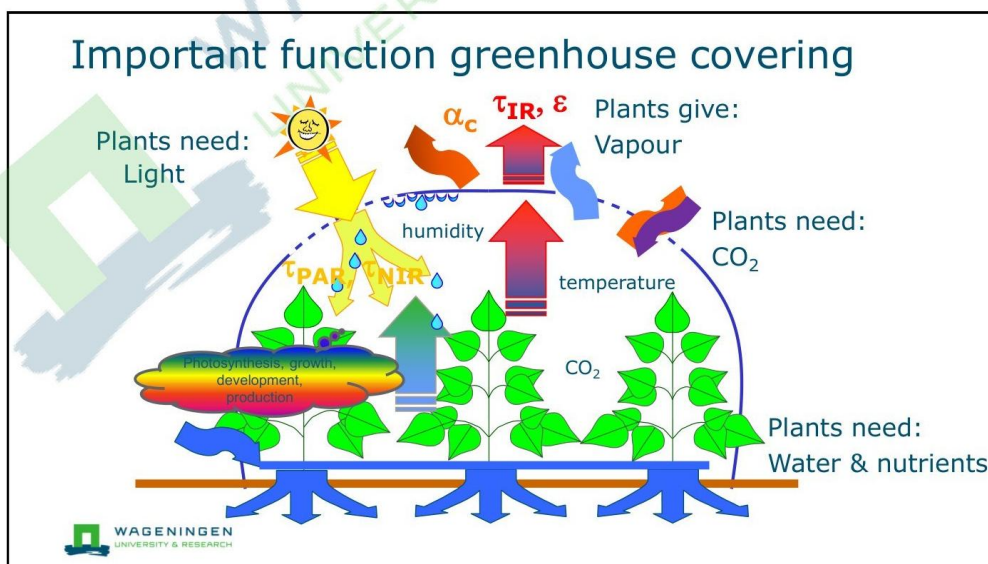
ใช้หน่วยวัดแสงให้ถูกระบบเสมอ : W/m^2 หรือ MJ/m^2 สำหรับพลังงานรวม และ PPFD/D สำหรับแสงที่พืชใช้สังเคราะห์แสงได้จริง ห้ามใช้ลักซ์หรือลูเมนกับงานปลูกพืชโดยเด็ดขาด ก่อนซื้อหลอด LED เสริมแสง ให้ขอค่าประสิทธิภาพ PPE ($\mu mol/J$) จากผู้ผลิต และเทียบกับค่าทฤษฎีของสเปกตรัมสีที่ใช้ เพื่อประเมินว่าพลังงานไฟฟ้าสูญเสียเป็นความร้อนเท่าใด สูตรลด $6 \times \epsilon_1 \times \epsilon_2 \times \Delta T$ ใช้ประมาณรังสีความร้อนในภาคนานาได้รวดเร็วและแม่นยำพอในช่วงอุณหภูมิปกติ แต่ต้องระวังเมื่อผลต่างอุณหภูมิสูงมาก เช่น คืนฟ้าใสหนาวจัด ฝ้าระวังความเสียหายจากน้ำค้างแข็งเป็นพิเศษในคืนฟ้าใสปลอดเมฆ เพราะอุณหภูมิฟ้าที่มีผลอาจเย็นกว่าอากาศจริงถึง 40°C ซึ่งเสี่ยงกว่าคืนที่มีเมฆมากกว่า

ส่วนที่ 3 วัสดุคลุมโรงเรือนและการจัดการแสง

วิทยากร: Dr. Silke Hemming (Wageningen University & Research)

3.1 วัสดุคลุมไม่ใช่แค่กันแดดกันฝน

วัสดุคลุมโรงเรือนเป็นตัวกำหนดสภาพแวดล้อมทั้งระบบ เพราะแสงสำหรับสังเคราะห์แสง ความร้อน และความชื้นที่พืชต้องการ ล้วนต้องผ่านวัสดุคลุมเข้ามาทั้งสิ้น วัสดุคลุมที่ดีจึงต้องสมดุลคุณสมบัติทางรังสี 5 ด้านไปพร้อมกัน ได้แก่ การส่องผ่านแสงสังเคราะห์แสง (T_{PAR}) การจัดการรังสีอินฟราเรดใกล้ (T_{NIR}) การดูดกลืนความร้อน (α_c) การส่องผ่านรังสีความร้อนคลื่นยาว (T_{IR}) และค่าการแผ่รังสี (emissivity, ϵ) การเลือกวัสดุคลุมจึงไม่ควรตัดสินจาก "ความใส" ของวัสดุเพียงอย่างเดียว



2

ภาพที่ 8 คุณสมบัติทางรังสีของวัสดุผนังโรงเรือนทั้ง 5 ด้าน ที่ร่วมกันกำหนดสภาพแวดล้อมภายในโรงเรือนกระจกหรือพลาสติก

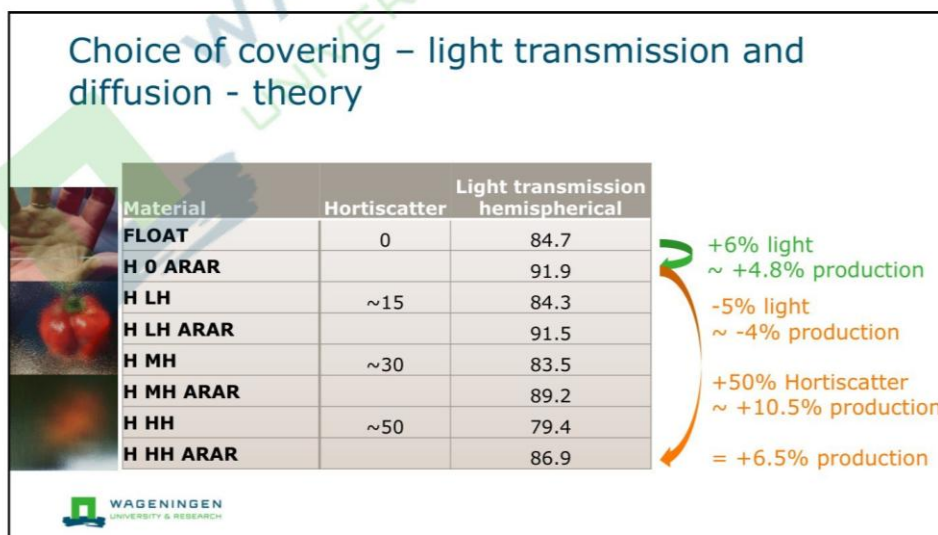
ทั่วโลกกว่า 95% ของโรงเรือนใช้ฟิล์มพลาสติก มีเพียงส่วนน้อยใช้กระจก และไม่มีชนิดใดดีกว่ากัน ในทุกสถานการณ์ กระจกลงทุนเริ่มต้นสูงกว่า แต่ใช้งานได้ 15-20 ปี เทียบกับฟิล์มพลาสติกทั่วไปที่ใช้ได้เพียง 5 - 6 ปี ทำให้ต้นทุนระยะยาวต่ำกว่า และกระจกยังกันรังสีความร้อนคลื่นยาวได้เกือบสมบูรณ์ ขณะที่พลาสติกธรรมดายอมให้ความร้อนทะลุออกไป เว้นแต่เติมสารแร่ธาตุพิเศษ กระจกมีหลายเกรด ได้แก่ กระจกธรรมดา (กัน UV ส่วนใหญ่) กระจกเหล็กต่ำ (โปร่งแสงขึ้น ยอมแสง PAR และ UV ผ่านมากขึ้น 1-2%) กระจกเคลือบลดการสะท้อน (AR) และกระจกผิวลายกระจายแสง ส่วนฟิล์มพลาสติกส่วนใหญ่เป็น PE ผสมสารเติมแต่งบางชนิดใช้ ETFE (F-CLEAN) ที่อายุใช้งานยาวแต่ราคาสูง แผ่นแข็งมีสองชนิดคุณสมบัติตรงข้ามกัน คือ Polycarbonate ทนแรงกระแทกดีแต่ส่องผ่านแสงน้อยกว่า และ Polyacrylic (PMMA) ส่องผ่านแสงสูง แต่เปราะกว่า สกรีนภายในและสารเคลือบตามฤดูกาลยังเป็นตัวช่วยเสริมควบคุมแสงและความชื้นได้ดีอีกชั้นหนึ่ง

3.2 วัดแสงให้ตรงกับความจริง

แสงอาทิตย์แทบไม่เคยตกกระทบตั้งฉากกับหลังคาตลอดวัน ยิ่งมุมเอียงมากเท่าไร การสะท้อนกลับ ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ค่าการส่องผ่านแสงที่วัดในแนวตั้งฉากเพียงอย่างเดียวจึงไม่สะท้อนสภาพใช้งานจริง จึงควรใช้ค่า Hemispherical Transmissivity ซึ่งเฉลี่ยการส่องผ่านแสงจากทุกทิศทางทุกมุมตลอดวัน (วัดตามมาตรฐาน ISO 13468) ตัวอย่างที่น่าสนใจคือ กระจกทั่วไปมีค่านี้ประมาณ 80% ขณะที่ฟิล์ม ETFE สองชนิดที่มีค่าการส่องผ่านตั้งฉากเท่ากันเป๊ะ กลับมีค่า Hemispherical ต่างกันได้ถึง 5% บทเรียนสำคัญคือ อย่าเลือกวัสดุคลุมจากสเปกตรัมแสงตั้งฉากเพียงอย่างเดียว หลักการนี้เชื่อมโยงตรงกับผลผลิต เพราะแสงที่มากขึ้นมักแปลผลเป็นผลผลิตที่สูงขึ้นตามไปด้วย

3.3 แสงกระจาย : คุ่มกว่าที่คิด

วัสดุโพลีเอทิลีนทำให้แสงตกกระทบเป็นลำตรง เกิดจุดแสงจัด (Hotspot) บนใบชั้นบนจนร้อนเกินไป ขณะที่ใบชั้นล่างอยู่ในเงามืดแทบไม่ได้รับแสง ส่วนวัสดุกระจายแสง (Diffuse) จะกระจายแสงให้สว่างสม่ำเสมอ ทั้งแนวราบและแนวตั้ง ทำให้แสงส่องถึงใบชั้นล่างและใจกลางทรงพุ่มได้ ผลคือการสังเคราะห์แสงโดยรวมของต้นดีขึ้นอย่างมาก ทั้งในมะเขือเทศและแตงกวา แม้วัสดุกระจายแสงสูงอาจลดค่าการส่องผ่านรวมลงเล็กน้อย แต่กรณีคำนวณจริงพบว่าผลผลิตสุทธิกลับเพิ่มขึ้นถึง 6.5%



38

ภาพที่ 9 การแลกเปลี่ยนระหว่างค่าการกระจายแสงกับการส่องผ่านแสงรวม — แม้แสงรวมลดลงเล็กน้อย แต่ผลผลิตสุทธิเพิ่มขึ้นถึง 6.5%

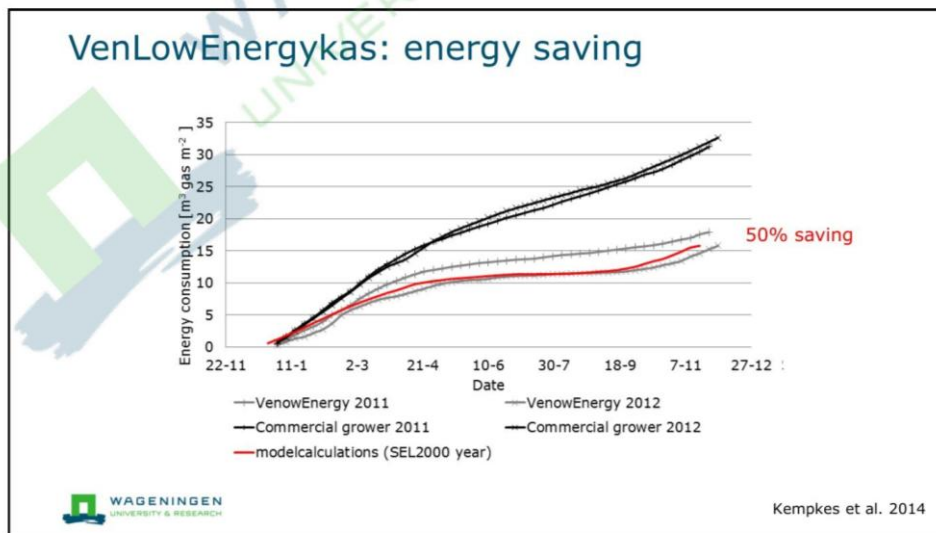
3.4 รังสี UV และ NIR : มากกว่าแค่ความสว่าง

UV ที่ผ่านวัสดุมาเข้ามาระตุ้นสารแอนโทไซยานิน ทำให้พืชมีสีแดงเข้มขึ้น (เช่น ผักสลัดเรดโอ๊ค กุหลาบขอบแดง) และยังมีผลต่อสารต้านอนุมูลอิสระและกลีโคไซด์ของพืชสมุนไพร กระเจ๊กธรรมชาติ UVB ส่วนใหญ่แต่ยอม UVA ผ่าน พลาสติก PE มาตรฐานกัน UV ไว้มาก เว้นแต่เลือกใช้ ETFE หรือ PMMA นอกจากนี้ UV ยังสำคัญต่อพฤติกรรมแมลง เพราะผึ้งและแมลงส่วนใหญ่ใช้ UV และแสงสีฟ้าทาง หากกรอง UV ออกทั้งหมด แมลงจะสับสนคิดว่าเป็นเวลากลางคืน ซึ่งเป็นดาบสองคม คือลดแมลงศัตรูพืชได้ แต่ก็กันไม่ให้แมลงศัตรูธรรมชาติและผึ้งผสมเกสรบินเข้ามาด้วยเช่นกัน ส่วนวัสดุสะท้อนรังสี NIR ที่หลายบริษัทพยายามพัฒนา เพื่อลดความร้อนสะสม กรณีศึกษาจริงที่ East-West Seed ประเทศอินโดนีเซีย กลับพบว่าฟิล์มสะท้อน NIR ลดอุณหภูมิภายในได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ปัจจัยที่ช่วยลดความร้อนได้ผลจริงคือการคายน้ำของพืช (Transpiration) ซึ่งทำหน้าที่เป็นระบบระบายความร้อนธรรมชาติ ช่วยให้อุณหภูมิภายในเท่ากับหรือเย็นกว่าภายนอกประมาณ 1-2 องศาเซลเซียส

3.5 กระเจ๊กประหยัดพลังงาน Low-E และการควบแน่นของน้ำ

กระเจ๊กกันรังสีความร้อนคลื่นยาวที่พืชแผ่กลับออกมาได้เกือบสมบูรณ์ ขณะที่ฟิล์ม PE ธรรมดายอมให้ทะลุผ่านออกไป เทคโนโลยีเคลือบลดการแผ่รังสี (Low-Emissivity หรือ Low-E) ยกระดับการประหยัดพลังงานไปอีกขั้น โครงการ VenLowEnergykas ที่ใช้กระเจ๊กสองชั้นร่วมกับ Low-E Coating ปลูกมะเขือเทศ

ประหยัดพลังงานทำความร้อนได้ถึง 50% โดยผลผลิตยังใกล้เคียงเดิม และกระจกชั้นเดียวเคลือบ Low-E รุ่นใหม่ (ลดค่า emissivity จาก 0.89 เหลือ 0.23 โดยคงค่าการส่องผ่านแสงไว้) ประหยัดพลังงานได้ประมาณ 20% ทั้งในการทดลองกับมะเขือเทศและมะเขือม่วง โดยผลผลิตไม่ลดลง



60

ภาพที่ 10 ผลการประหยัดพลังงานของโครงการ VenLowEnergykas: กระจกสองชั้นเคลือบ Low-E ร่วมกับฉนวนลดการสะท้อน ประหยัดพลังงานทำความร้อนได้ถึง 50%

อีกเรื่องที่ควรพิจารณาคือการควบแน่นของหยดน้ำบนผิวในของวัสดุคลุม พื้นผิวแบบ Hydrophilic รักษาฟิล์มน้ำบาง ๆ ไว้ ส่วนแบบ Hydrophobic ทำให้เกิดหยดน้ำเป็นเม็ดกลม ทั้งสองแบบให้ผลต่างกันทั้งด้านการส่องผ่านแสงและความเสี่ยงที่หยดน้ำจะตกใส่พืชโดยตรง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องพิจารณาเมื่อเลือกวัสดุคลุมสำหรับภูมิอากาศขึ้นอย่างประเทศไทย

3.6 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

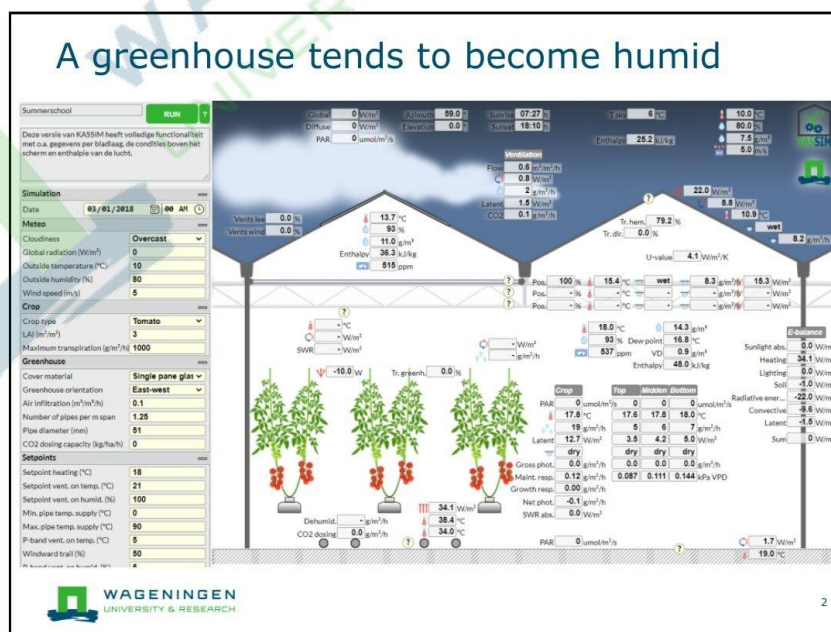
เลือกวัสดุคลุมโดยพิจารณาคุณสมบัติรังสีครบทั้ง 5 ด้าน (τ_{PAR} , τ_{NIR} , α_c , τ_{IR} , ϵ) ไม่ใช่ดูแค่ความใสของวัสดุ เมื่อเทียบวัสดุคลุมหลายยี่ห้อ ให้ขอค่า Hemispherical Transmissivity (ISO 13468) แทนค่าการส่องผ่านแสงตั้งฉากอย่างเดียว เพราะตรงกับการใช้งานจริงมากกว่า หากต้องการเพิ่มผลผลิตโดยไม่เปลี่ยนวัสดุคลุมทั้งหมด ให้พิจารณาเพิ่มค่าการกระจายแสง (Haze) ก่อน เพราะคุ้มกว่าการเพิ่มแสงตรงในสัดส่วนเดียวกัน ในภูมิอากาศร้อนขึ้นอย่างไทย ฟิล์มสะท้อน NIR เพียงอย่างเดียวช่วยลดความร้อนได้น้อย การส่งเสริมการคายน้ำของพืชให้เหมาะสมมักได้ผลดีกว่า

ส่วนที่ 4 การจัดการความชื้นและสมดุลพลังงานโรงเรือน

วิทยากร: Dr. Feije de Zwart

4.1 การระบายความชื้นอย่างประหยัดพลังงาน

โรงเรือนที่ปิดสกรีนสนิทมักเผชิญปัญหาความชื้นสัมพัทธ์ภายในสูงมาก แบบจำลองฟิสิกส์ KASSIM แสดงให้เห็นว่าเมื่อปิดสกรีนและปิดหน้าต่างระบายอากาศสนิท ความชื้นภายในอาจพุ่งถึง 93% ค่าสำคัญคือจะลดความชื้นนี้ด้วยวิธีที่ประหยัดพลังงานที่สุดได้อย่างไร



2

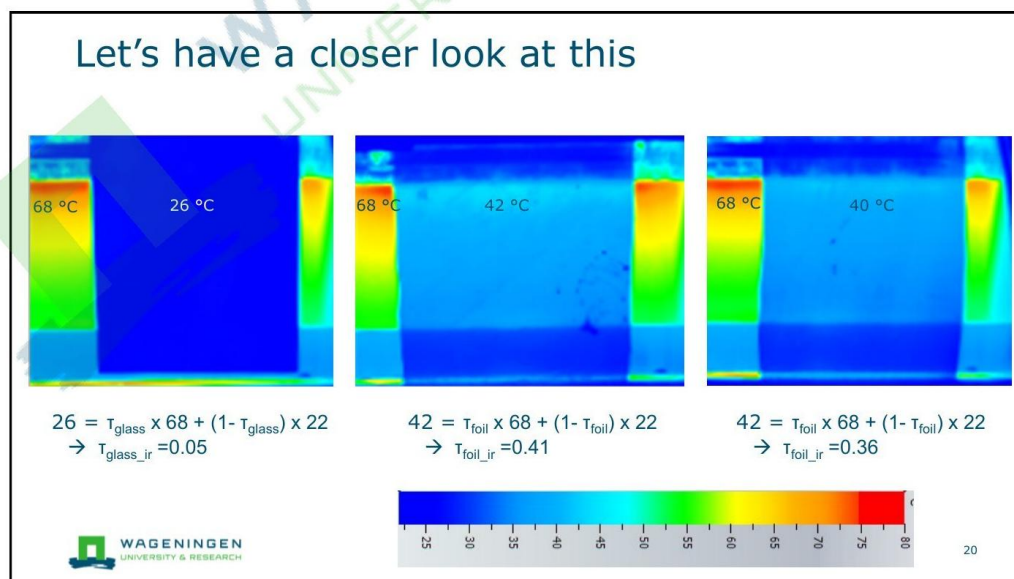
ภาพที่ 11 ผลจำลอง KASSIM: ปิดสกรีนและหน้าต่างระบายอากาศสนิท ความชื้นในโรงเรือนพุ่งถึง 93%

การทดลองเปรียบเทียบ 2 แนวทางให้คำตอบชัดเจน การเปิดหน้าต่างระบายอากาศบนหลังคาโดยปิดสกรีนสนิท ลดความชื้นได้ถึง 88% และใช้พลังงานขดเคย์เพียงราว 25 W/m² ขณะที่การผ่ายสกรีนออกเพียง 5% ลดความชื้นได้ใกล้เคียงกัน (86%) แต่ต้องใช้พลังงานขดเคย์สูงกว่าถึง 35 W/m² เพราะเกิดกระแสลมเย็นดิ่งลงปะทะพืชโดยตรง ซึ่งทั้งสิ้นเปลืองพลังงานและเสี่ยงต่อการช็อกอุณหภูมิของพืช ข้อสรุปจึงชัดเจนว่าควรปิดสกรีนให้สนิทแล้วเปิดหน้าต่างระบายอากาศเหนือชั้นสกรีนแทนการผ่ายสกรีน เสมอเมื่อต้องการลดความชื้น ความชื้นเป้าหมายที่ "เหมาะสม" ไม่มีตัวเลขตายตัว เกษตรกรทั่วไปมักควบคุมไว้ที่ราว 80% (หรือ 65% สำหรับกล้วยไม้ฟาแลนนอปซิส) แต่งานวิจัยพบว่าพืชผักอย่างมะเขือเทศและแตงกวาเจริญเติบโตได้ดีแม้ความชื้นสูงถึง 88-90% เพราะความเสี่ยง โรคพืชขึ้นกับ "คุณภาพการตัดแต่งของแรงงาน" เป็นหลัก หากคนงานตัดแต่งด้วยมีดคมและสะอาด รอยแผลจะแห้งไวและติดเชื้อน้อยลง ทำให้รักษาความชื้นสูงขึ้นได้อย่างปลอดภัย และประหยัดพลังงานกว่าในภูมิอากาศร้อนชื้นตลอดปีอย่างประเทศไทย ระบบโรงเรือนแบบพาสซีฟมีข้อจำกัดมาก เพราะดึงอากาศแห้งจากภายนอกมาลดความชื้นไม่ได้เหมือนเขตอบอุ่น กลยุทธ์ที่คุ้มค่าที่สุดในระยะยาวคือการออกแบบระบบกระจายอากาศบริสุทธิ์ให้สม่ำเสมอทั่วโรงเรือน หลีกเลี่ยงจุดอับชื้น ร่วมกับเทคโนโลยีเสริมอย่างเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (ประหยัดได้ 3 - 4%) หรือเครื่องควบแน่นความชื้นแบบ DryGair ซึ่งเหมาะกับผู้ผลิตที่เน้นมาตรฐานโรงเรือนปลอดก๊าซฟอสซิลมากกว่าการประหยัดต้นทุนล้วนๆ

4.2 สมดุลพลังงานโรงเรือน : กระจก พลาสติก และบทบาทของสกรีน (ฉากกันความร้อน หรือ ม่านควบคุมสภาพอากาศ หรือ ม่านกรองแสงชนิดพิเศษ)

อุณหภูมิภายในโรงเรือนเป็นผลรวมของกระแสพลังงานหลายทาง ทั้งแสงอาทิตย์ที่ผ่านหรือถูกดูดซับตามวัสดุคลุม การแผ่รังสีความร้อน การพาความร้อนที่ผิววัสดุคลุม และการคายน้ำของพืชซึ่งดูดซับพลังงานจำนวนมาก แบบจำลอง KASPRO ใช้คำนวณกระแสเหล่านี้ทั้งหมด ในเวลากลางคืน ดินในโรงเรือนทำหน้าที่เป็นแหล่งกักเก็บความร้อนตามธรรมชาติ คายความร้อนช่วยอุ่นอากาศ ขณะกลางวันจะดูดซับ

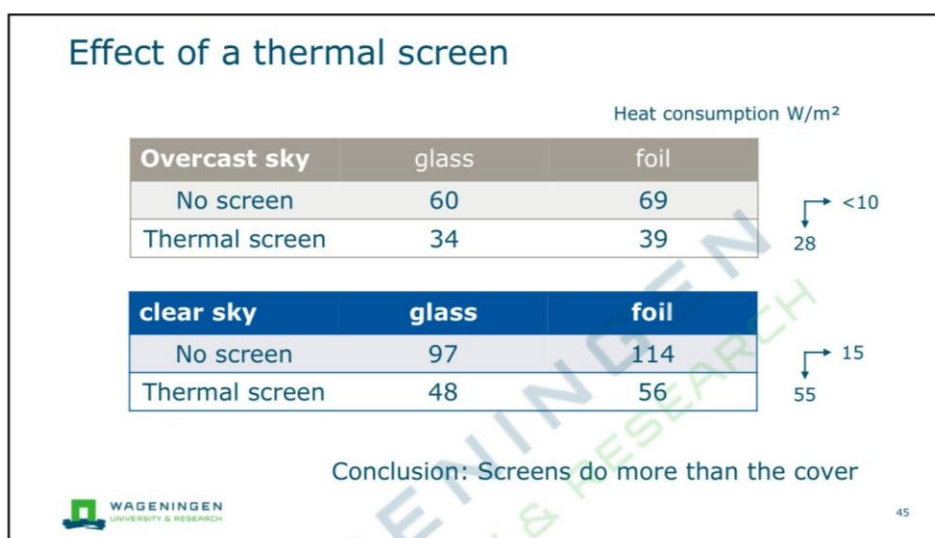
ความร้อนส่วนเกิน ปัจจัยสำคัญคือ "อุณหภูมิท้องฟ้า" ในคืนฟ้าแจ่มใสอุณหภูมิท้องฟ้าต่ำกว่าอากาศถึงราว 20°C ทำให้สูญเสียความร้อนแผ่ออกสู่อวกาศมาก ส่วนคืนฟ้าครึ้มต่างกันเพียง 5°C เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ กระเจก (ซึ่งกั้นรังสีความร้อนคลื่นยาวได้แทบสมบูรณ์) จึงสูญเสียความร้อนเพียง $\sim 100\text{ W/m}^2$ ในคืนฟ้าแจ่มใส ขณะที่ฟิล์มพลาสติกสูญเสียสูงถึง 220 W/m^2 (มากกว่า 65%)



ภาพที่ 12 ภาพถ่ายความร้อนเปรียบเทียบ: กระเจก ($T \approx 0.05$) กั้นความร้อนได้ดีกว่าฟิล์มพลาสติก ($T \approx 0.36-0.41$) อย่างชัดเจน

แต่เมื่อฟิล์มพลาสติกเปียกจากการควบแน่น ค่าการส่องผ่านรังสีความร้อนลดจาก $T_{\text{dry}} \approx 0.40$ เหลือ $T_{\text{wet}} \approx 0.18$ ทำให้พฤติกรรมใกล้เคียงกระเจกมากขึ้นในคืนที่ความชื้นสูง ส่วนกลางวันในเขตร้อน พลาสติกแห้งกลับระบายความร้อนออกได้ดีกว่ากระเจกเล็กน้อย ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบธรรมชาติสำหรับภูมิอากาศไทย ที่เน้นการระบายความร้อนมากกว่าเก็บกัก

ตัวแปรที่ทรงอิทธิพลที่สุดกลับไม่ใช่วัสดุคลุม แต่คือ "สกรีน" สกรีนชั้นแรกลดการสูญเสียความร้อน จาก 60 W เหลือราว 35 W หรือประหยัดถึง 28% ส่วนชั้นที่สองประหยัดเพิ่มเพียงราว 11 W เพราะโรงเรือนเริ่มเป็นฉนวนเกินไปจนความชื้นสะสม ระยะห่างระหว่างชั้นสกรีนเพียง 2-3 ซม. ก็เพียงพอ และระบบขับเคลื่อน มีให้เลือกระหว่าง Push-Pull (ทนทานแต่บัดบังแสง 4-5%) กับระบบสลิง (บัดบังแสงน้อยกว่า แต่เสี่ยงพันกันหากสายขาด)



ภาพที่ 13 ข้อมูลสรุปความต้องการพลังงานทำความร้อน: กระดาษ/พลาสติก × มีสกรีน/ไม่มีสกรีน แสดงว่าสกรีนมีผลมากกว่าวัสดุคลุม

สรุปคือ การเปลี่ยนวัสดุคลุมส่งผลต่อพลังงานสุทธิน้อยกว่า 10% ขณะที่ระบบสกรีนที่บริหารจัดการดีสามารถลดการใช้พลังงานได้ถึง 28% หรือมากกว่า ผู้บริหารโรงเรือนจึงควรให้ความสำคัญกับสกรีนก่อนการลงทุนเปลี่ยนวัสดุคลุมหลังคา

4.3 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

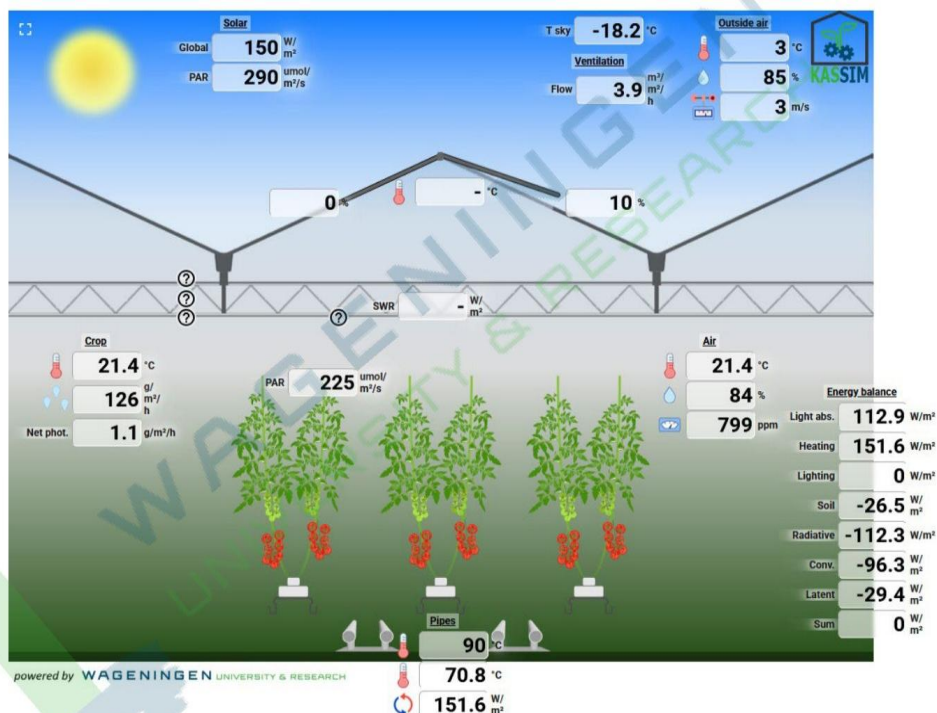
เมื่อต้องลดความชื้น ให้ปิดสกรีนสนิทแล้วเปิดหน้าต่างระบายอากาศเหนือสกรีนอย่าเผยสกรีน เพราะประหยัดพลังงานกว่าและไม่ทำให้พืชช็อก ไม่ต้องตั้งเป้าความชื้นต่ำเกินไปลงทุนฝึกแรงงานให้ตัดแต่งกิ่งด้วยมีดคมสะอาด จะช่วยปลูกที่ความชื้นสูงขึ้นได้อย่างปลอดภัยและประหยัดพลังงาน ในภูมิอากาศร้อนขึ้นอย่างไทย ให้ลงทุนกับระบบกระจายอากาศแห้งสม่ำเสมอและระบบสกรีนก่อน เพราะให้ผลตอบแทนด้านพลังงานสูงกว่าการเปลี่ยนวัสดุคลุมหลังคาเป็นกระดาษ (28% เทียบกับน้อยกว่า 10%) สกรีนชั้นแรกคุ้มค่าที่สุด ส่วนชั้นที่สองควรชั่งน้ำหนักกับความเสถียรความชื้นสะสม และเลือกระบบขับเคลื่อนสกรีนให้เหมาะกับชนิดพืชและงบบำรุงรักษา

ส่วนที่ 5 เกษตรแม่นยำและการปลูกพืชด้วยข้อมูล

วิทยากร: Dr. David Katzin, Pinglin Zhang, Dan Rustia

5.1 KASSIM : เมื่อฟิสิกส์โรงเรือนกลายเป็นเกมทดลองที่จับต้องได้

หลังเรียนทฤษฎีวัสดุคลุม ความชื้น และสมดุลพลังงานมาตลอดวัน ผู้เข้าอบรมได้ลงมือทดลองจริงผ่าน KASSIM (digigreenhouse.wur.nl) โปรแกรมจำลองโรงเรือนออนไลน์ของ Wageningen University ที่คำนวณผลลัพธ์แบบเรียลไทม์จากสมการฟิสิกส์เดียวกับที่เรียนมา ผู้ใช้ปรับตัวแปรนำเข้า 4 กลุ่ม ได้แก่ Greenhouse (วัสดุคลุม) Crop (ดัชนีพื้นที่ใบ) Setpoints (ค่าตั้งอุณหภูมิและระบายอากาศ) และ Screens (สกรีนฉนวน/พรางแสง) รวมถึงระบบไฟเสริม HPS/LED แล้วกด UPDATE เพื่อดูผลลัพธ์ทันที ผลลัพธ์แสดงสภาพภายนอก สภาพภายใน สมดุลพลังงาน (W/m²) และตัวชี้วัดพืช เช่น อัตราคายน้ำและอัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ (g/m²/h) ทำให้เห็นภาพชัดว่าการเลือกวัสดุคลุมหรือสกรีนส่งผลต่อผลผลิตและพลังงานอย่างไร

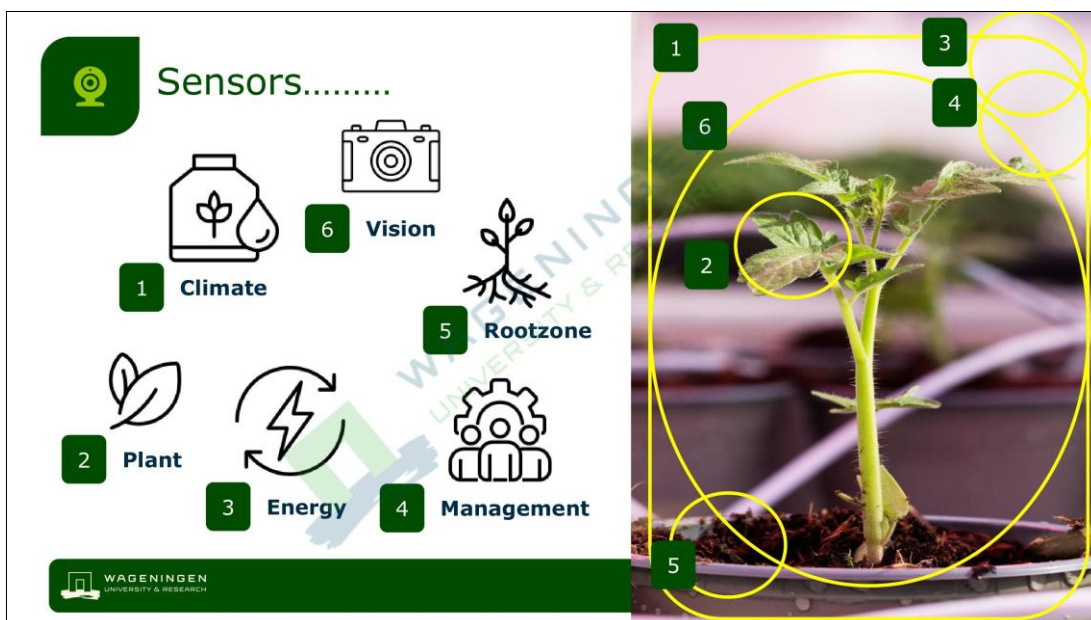


ภาพที่ 14 หน้าจอผลลัพธ์ของ KASSIM แสดงอุณหภูมิ ความชื้น สมดุลพลังงาน และตัวชี้วัดการเจริญเติบโตของพืชแบบเรียลไทม์

แบบฝึกหัดให้ทดลอง 3 สถานการณ์: (1) ฤดูหนาวในภูมิภาคอบอุ่น - หาคจุดสมดุลระหว่างผลผลิตสูงสุดกับประสิทธิภาพพลังงานสูงสุด โดยใช้สูตร ประสิทธิภาพพลังงาน = อัตราสังเคราะห์แสงสุทธิ ÷ (พลังงานทำความร้อน + พลังงานไฟเสริม) ซึ่งบังคับให้คิดแบบ "ผลตอบแทนต่อหน่วยพลังงาน" (2) คื่นฤดูหนาวแบบเมดิเตอร์เรเนียน - จัดการความเสี่ยงหยดน้ำจากสกรีนหรือวัสดุผนังข้างที่เปียก และ (3) ฤดูร้อนแบบเมดิเตอร์เรเนียน - ใช้การระบายอากาศบังคับ การพ่นหมอก และการทำสีขาวหลังคา เปรียบเทียบผลระหว่างอากาศแห้ง (20%RH) กับชื้น (90%RH) ซึ่งใกล้เคียงสภาพอากาศไทยมากที่สุด

5.2 กรอบคิด 5 ขั้นตอนของการปลูกพืชด้วยข้อมูล

หัวข้อนี้ยกระดับความรู้ทั้งวันให้กลายเป็นระบบที่ "คิดและตัดสินใจ" ได้เอง ผ่านกรอบ SENSING (ตรวจวัด) → UNDERSTANDING (ทำความเข้าใจ) → PREDICTING (ทำนาย) → DECIDING (ตัดสินใจ) → EXECUTING (ลงมือทำ) ซึ่งใช้ได้ทั้งโรงเรือนโลว์เทคและไฮเทค ไม่จำเป็นต้องลงทุนเทคโนโลยีราคาแพงเสมอไป



ภาพที่ 15 กรอบคิด 5 ขั้นตอนของการปลูกพืชด้วยข้อมูล: SENSING → UNDERSTANDING → PREDICTING → DECIDING → EXECUTING

Sensing & Understanding: เซนเซอร์แบ่งเป็น 6 กลุ่ม (สภาพอากาศ พืช พลังงาน ภาพ ราก และวัสดุปลูก และการบริหารจัดการ) แต่ข้อมูลดิบอย่างเดียวไม่พอ ต้องแปลงเป็นแดชบอร์ด (คล้าย Grafana) ที่แสดง KPI แบบดิจิทัลทวิน ติดตามผลผลิตเทียบประสิทธิภาพการใช้แสง (LUE) ตัวอย่างคือโครงการ AuFerti ที่ใช้แดชบอร์ดติดตามการให้ปุ๋ยทางน้ำแบบเรียลไทม์ ช่วยให้เห็นความสัมพันธ์ปุ๋ย-น้ำ-การเจริญเติบโตชัดเจนกว่าการจดมือ Predicting & Deciding: มีแบบจำลองทำนาย 5 ระดับความซับซ้อน ตั้งแต่สถิติง่ายไปจนถึงแบบจำลองฟิสิกส์เต็มรูปแบบอย่าง KasPro (แบบจำลองเดียวกับที่ใช้ใน KASSIM) ผลทำนายนำไปใช้ตัดสินใจ ทั้งแบบช่วยเกษตรกรตัดสินใจ หรือแบบอัตโนมัติเต็มตัว เช่น ระบบควบคุมไฟเสริมอัตโนมัติที่เปิด-ปิดตามแสง PAR และราคาค่าไฟตามช่วงเวลา และระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์คาดการณ์เวลาเก็บเกี่ยวผักสลัดเพื่อวางแผนแรงงานล่วงหน้า Executing: หุ่นยนต์เข้ามาช่วยงานจริง ตั้งแต่หุ่นยนต์ถ่ายภาพสำรวจพืชบนราง ไปจนถึงหุ่นยนต์เก็บเกี่ยว Sweeper ที่ใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ระบุพริกหวานที่สุกพอดีแล้วใช้แขนกลตัดเก็บอัตโนมัติ

5.3 กรณีศึกษา : ไหล่ระดับจาก Low-Tech สู่ High-Tech

ข้อความสำคัญที่สุดคือ ไม่ต้องกระโดดจาก Low-Tech ไป High-Tech ในคราวเดียว กรณีศึกษาข้อมูลเผื่อการวางศตวรรษ 3 ปี ครอบคลุม 7 ชนิดพืช แสดงเส้นทาง 4 ขั้นตอน จากบันทึกด้วยมือแบบง่ายไปจนถึงกล้องและ AI ตรวจจับศัตรูพืชอัตโนมัติ ให้เห็นทั้งความแม่นยำและต้นทุนที่เพิ่มขึ้นในแต่ละขั้น เป็นข้อมูลอ้างอิง มีประโยชน์สำหรับผู้วางแผนลงทุนแบบค่อยเป็นค่อยไป เป้าหมายสุดท้ายไม่ใช่แทนที่เกษตรกรด้วยเครื่องจักร แต่คือให้เครื่องมือและข้อมูลที่ถูกต้องเพื่อการตัดสินใจที่แม่นยำขึ้น และองค์ความรู้ที่กำลังถูกเผยแพร่ในโครงการความร่วมมือระหว่างประเทศทั่วโลก

5.4 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

ทดลองปรับตัวแปรในโปรแกรมจำลอง (เช่น KASSIM) ก่อนลงทุนปรับปรุงโรงเรือนจริง ช่วยประหยัดเวลาและต้นทุนลองผิดลองถูก ใช้สูตร "ผลผลิตต่อหน่วยพลังงาน" ประเมินความคุ้มค่าของไฟเสริม สกรีน หรือระบบทำความเย็น แทนการดูแค่ผลผลิตสูงสุด เริ่มเกษตรแม่นยำจากกรอบ SENSING →

UNDERSTANDING → PREDICTING → DECIDING → EXECUTING โดยไม่ต้องลงทุนทุกชั้นพร้อมกัน
 แดชบอร์ดอ่านข้อมูลที่มีอยู่แล้วมักคุ้มค่าเร็วกว่าหุ่นยนต์หรือระบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ ใช้แนวทางไล่ระดับ 4
 ขั้นตอนของกรณีศึกษาเฝ้าระวังศัตรูพืชเป็นต้นแบบ เริ่มจากบันทึกมีอยู่อย่างเป็นระบบก่อน แล้วค่อยพัฒนาสู่
 กล้องและ AI เมื่อข้อมูลพื้นฐานพร้อม

ส่วนที่ 6 ศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเบลเยียม ทั้งหมด 3 แห่ง
 เพื่อเป็นต้นแบบการพัฒนาและแนวทางผลิตพืชด้วย Greenhouse ที่ประสบความสำเร็จ



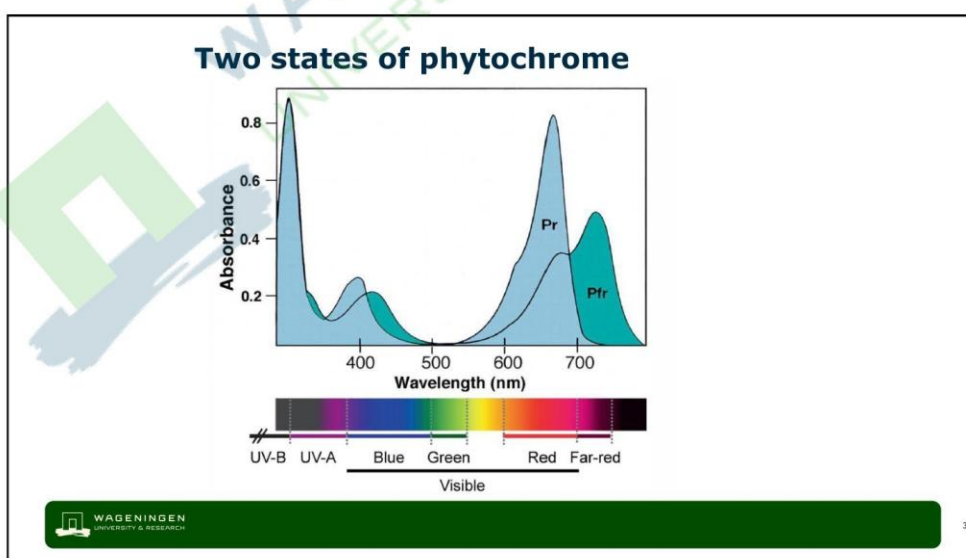
ภาพที่ 16 ภาพศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเบลเยียม

ส่วนที่ 7 แสง สรีรวิทยาพืช และผลผลิต

วิทยากร: Prof. dr. Leo Marcelis, Dr. Ep Heuvelink, Dr. Sharath Malleshaiah — Wageningen University & Research / Deliflor Chrysant B.V.

7.1 สเปกตรัมแสงและโฟตรีเซพเตอร์ในพืช

แสงที่พืชต้องการไม่เหมือนแสงที่ตามนุษย์มองเห็น หน่วยลักซ์/ลูเมนอ้างอิงความไวของตา จึงใช้ออกแบบระบบไฟสำหรับพืชไม่ได้ หน่วยที่ถูกต้องคือ PAR (400-700 นาโนเมตร) วัดเป็นไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที พืชมี "ดวงตา" ของตัวเองคือโฟตรีเซพเตอร์หลายชนิดที่รับรู้แสงแต่ละช่วงคลื่นต่างกัน เช่น UVR8 รับ UV-B คริปโตโครมรับแสงสีน้ำเงิน และไฟโตโครมรับแสงแดง/แดงไกล ไฟโตโครมทำงานเป็นสวิตช์สองสถานะ คือ Pr (ไม่ทำงาน ดูดกลืนแสงแดง) และ Pfr (ทำงาน ดูดกลืนแสงแดงไกล) สัดส่วน Pfr ต่อ Pr ที่สูงทำให้พืชเตี้ยลง แตกกิ่งมากขึ้น และดอก/ผลร่วงน้อยลง



30

ภาพที่ 17 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของไฟโตโครมสองสถานะ Pr (ดูดกลืนแสงแดง) และ Pfr (ดูดกลืนแสงแดงไกล) ซึ่งเป็นสวิตช์ที่พืชใช้อ่านอัตราส่วนแสงแดงต่อแดงไกลในสิ่งแวดล้อม

แสงสีน้ำเงินในแสงเสริมช่วยลดการยืดของลำต้นและเพิ่มผลผลิต สัดส่วนที่เหมาะสมในมะเขือเทศอยู่ราว 6-12% (ให้ผลผลิตสูงกว่าไม่ใช้แสงน้ำเงินเลยถึง 12%) แต่มากเกินไป (เช่น 24%) กลับลดผลผลิต ส่วนแสงสีแดงล้วนก็ไม่ใช่ว่าดี เพราะทำให้การสังเคราะห์แสงที่จุดอิมตัวลดลงในระยะยาว และการตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงยังขึ้นกับสายพันธุ์ด้วย จึงต้องทดสอบกับพันธุ์จริงก่อนนำสูตรแสงไปใช้งาน

7.2 การจัดวางหลอดไฟ ช่วงแสง และผลต่อโรคและคุณภาพ

นอกจากให้แสงจากด้านบนทรงพุ่ม (top lighting) การวางหลอดไฟไว้ภายในทรงพุ่ม (interlighting) ช่วยให้ใบชั้นล่างที่ปกติถูกบังแสงสังเคราะห์แสงได้มากขึ้นอย่างชัดเจน การทดลองเชิงพาณิชย์ในมะเขือเทศพบว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วนแสงภายในทรงพุ่มจาก 0% เป็น 34% น้ำหนักผลสดเพิ่มขึ้นถึง 14% ปริมาณแสงสะสมเท่ากันไม่ได้ให้ผลผลิตเท่ากันเสมอ การให้แสง 15 ชั่วโมงต่อวันกลับให้ผลผลิตสูงกว่าให้แสงต่อเนื่อง 18 ชั่วโมงถึง 20% สะท้อนว่าพืชต้องการช่วงมืดที่เหมาะสมด้วย ไม่ใช่แค่ปริมาณแสงสะสม นอกจากนี้สเปกตรัมแสงยังกระทบความไวต่อโรค เช่น แสงแดงไกลที่มากขึ้นทำให้แผลโรคราสีเทา (Botrytis)

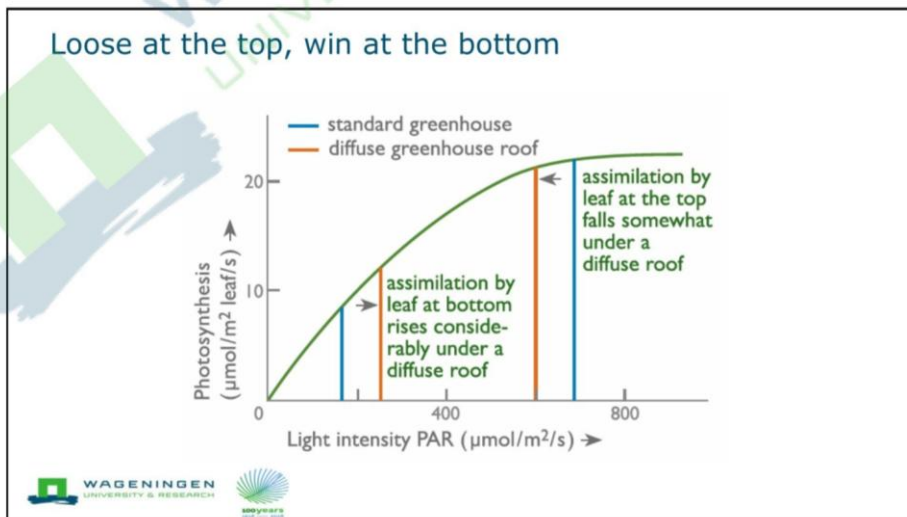
บนใบมะเขือเทศขยายใหญ่ขึ้นกว่าสองเท่าด้านคุณภาพผลผลิต ความเข้มแสงก่อนเก็บเกี่ยวมีผลต่ออายุการเก็บรักษา (shelf life) ของผักกาดหอมอย่างมาก เพราะสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณวิตามินซีและคาร์โบไฮเดรตในใบ (r^2 สูงถึง 0.87-0.90) ข้อเสนอแนะเชิงปฏิบัติคือให้แสงสีน้ำเงินสัดส่วนสูงเฉพาะไม่กี่วันสุดท้ายก่อนเก็บเกี่ยวเพื่อเพิ่มสีส้มและคุณภาพ โดยไม่เสียประสิทธิภาพพลังงานตลอดทั้งรอบการปลูก

7.3 การสกัดกันแสงสู่ผลผลิต

มีเพียงแสงที่พืชสกัดกันได้ (intercepted) เท่านั้นที่ใช้สังเคราะห์แสงได้จริง สัดส่วนนี้คำนวณจากดัชนีพื้นที่ใบ (LAI) ตามกฎ Lambert-Beer และนำไปสู่สมการผลผลิตหลักที่ใช้ได้กับพืชโรงเรือนทุกชนิด คือ ผลผลิต = (น้ำหนักรวม × ดัชนีการเก็บเกี่ยว) ÷ ปริมาณสารแห้งของผลผลิต โดยน้ำหนักรวมเกิดจากประสิทธิภาพการใช้แสง (LUE) คูณกับสัดส่วนแสงที่สกัดกันได้และปริมาณแสงที่ได้รับ ข้อควรระวังคือค่า LUE ไม่คงที่เสมอ มักสูงขึ้นเมื่อความเข้มแสงลดลงจากปรากฏการณ์อิ่มตัวของการสังเคราะห์แสง และหน่วยแสงต้องแปลงให้ถูกต้องเสมอ (รังสีรวม → PAR → PAR ภายในโรงเรือน) เพราะหากใช้หน่วยผิดจะทำให้ผลคำนวณผิดพลาดได้หลายเท่าตัว

7.4 กฎ 1% และแสงกระจาย : หลักการที่สำคัญที่สุดของแสงในโรงเรือน

กฎที่ใช้งานง่ายและได้รับการยืนยันกับพืชหลายชนิดคือ "แสงลดลง 1% ผลผลิตลดลงประมาณ 1%" ความไวต่อแสงต่างกันเล็กน้อยตามชนิดพืช เช่น ผักกาดหอมและกุหลาบราว 0.8-1%, แตงกวาและมะเขือเทศ 0.7 - 1%, เบญจมาศ 0.6% กฎนี้เป็นเครื่องมือประเมินผลของการบังแสง เช่น ตาข่ายพรางแสงหรือฉนวนความร้อนในโรงเรือน เหตุผลที่กฎนี้ทำงานได้คือหลักการที่ลึกกว่านั้น นั่นคือ "แสงในระดับทรงพุ่มแทบไม่เคยมากเกินไป" ใบเดี่ยวอิ่มตัวแสงเร็ว (ราว 500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) แต่ทรงพุ่มทั้งแปลงยังตอบสนองแบบใกล้เคียงตรงไปจนถึงความเข้มแสงแดดจัด (เกิน 2,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$) เพราะใบชั้นล่างที่ถูกบังแสงยังขาดแสงอยู่เสมอ แม้ใบชั้นบนจะอิ่มตัวแล้วก็ตาม การทดลองใช้ตาข่ายพรางแสงพบว่าเมื่อลดแสงสะสมจาก 100% เหลือ 80% ผลผลิตมะเขือเทศลดลงเพียง 7% เท่ากับอัตราส่วนเพียง 0.36% ยิลด์ต่อ 1% แสงที่ลด เพราะส่วนที่ถูกบังเป็นช่วงแสงจัดที่เกินกว่าพืชใช้ได้เต็มประสิทธิภาพอยู่แล้ว จากหลักการนี้แสงกระจาย (diffuse light) จึงมีประโยชน์มาก เพราะกระจายแสงในแนวนอนให้สม่ำเสมอ ไม่มีเงาทึบและแทรกลงไปในทรงพุ่มได้ลึกกว่า แสงตรง การทดลองเปรียบเทียบกระจากกระจายแสง 3 ระดับที่การส่องผ่านรวมเท่ากันพบว่าแสงกระจายเพิ่มผลผลิตมะเขือเทศได้ประมาณ 9% ด้วยกลไก "เสียที่บน ได้ที่ล่าง" คือการสังเคราะห์แสงของใบชั้นบนลดลงเล็กน้อย (ไม่มีจุดอิ่มตัวเฉพาะที่) แต่ใบชั้นล่าง/ใบในร่มกลับสังเคราะห์แสงได้มากขึ้นชัดเจน ทำให้ผลรวมทั้งทรงพุ่มสูงขึ้นในแอนทูเรียมและบรอมิเลียด ผลยิ่งน่าตื่นเต้นแสงกระจายช่วยให้พืชพร้อมขายได้ภายใน 16 สัปดาห์ เทียบกับ 22 สัปดาห์ของมาตรฐานเกษตรกร



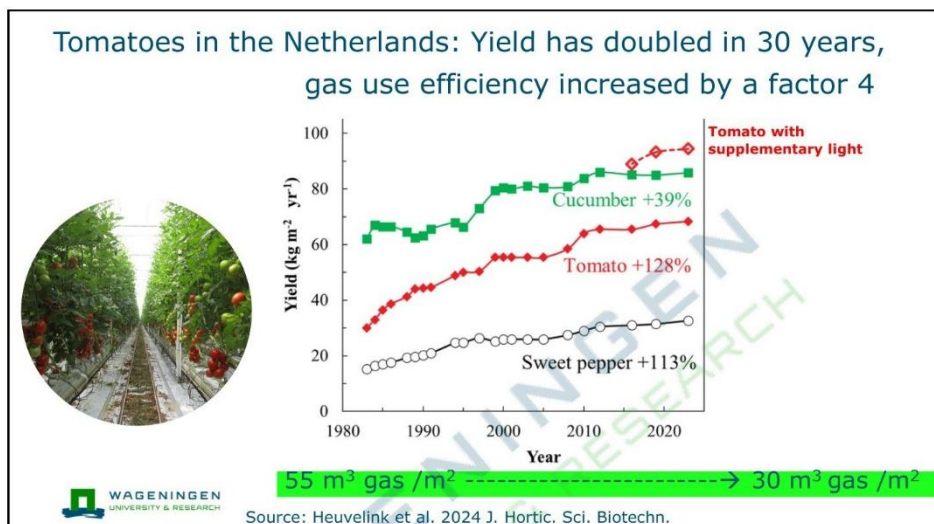
22

ภาพที่ 18 กลไก "เสียที่บน ได้ที่ล่าง" ของหลังคากระจกกระจายแสง: การสังเคราะห์แสงของใบด้านบนลดลงเล็กน้อย แต่ของใบด้านล่างในทรงพุ่มเพิ่มขึ้นมาก ทำให้ผลผลิตรวมสูงขึ้นราว 9%

ข้อคิดเชิงปฏิบัติ การลงทุนเพิ่มแสง (ธรรมชาติหรือแสงเสริม) มักคุ้มค่าเสมอ เพราะทรงพุ่มแทบไม่เคยได้รับแสงมากเกินไป ส่วนการบังแสงควรประเมินว่าช่วงที่บังเป็นช่วงพืชที่เกินความต้องการหรือไม่ เพราะผลกระทบจริงอาจต่ำกว่า 1% มาก และกระจก/วัสดุคลุมที่ให้แสงกระจายสามารถเพิ่มผลผลิตได้ 5 - 10% โดยไม่ต้องเพิ่มพลังงานหรือต้นทุนแสง

7.5 พันธุ์เก่าเทียบพันธุ์ใหม่ : อะไรขับเคลื่อนผลผลิตที่เพิ่มเป็นสองเท่า

ในรอบ 30 ปีที่ผ่านมา ผลผลิตมะเขือเทศโรงเรือนในเนเธอร์แลนด์เพิ่มขึ้นถึง 128% (เกือบสองเท่า) ขณะที่ประสิทธิภาพการใช้ก๊าซดีขึ้นเกือบ 4 เท่า



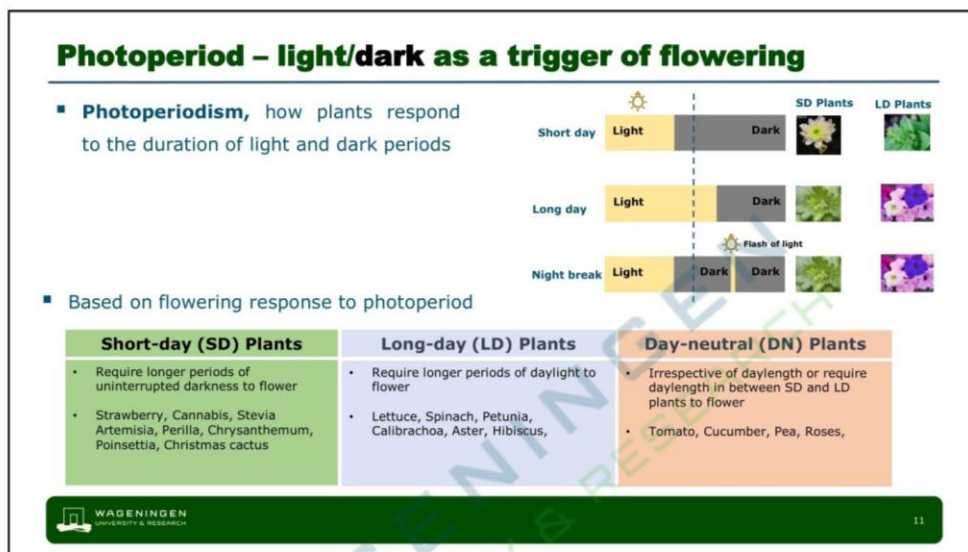
ภาพที่ 19 ผลผลิตมะเขือเทศในเนเธอร์แลนด์เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าในรอบ 30 ปี ขณะที่ประสิทธิภาพการใช้ก๊าซดีขึ้นจาก 55 เหลือ 30 ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตร

การวิเคราะห์องค์ประกอบผลผลิตเปรียบเทียบสายพันธุ์เก่า-ใหม่ (ปล่อยสู่ตลาดช่วงปี 1950-2013) ในสภาพโรงเรือนเดียวกันพบว่าผลผลิตสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นราว 0.7% ต่อปีของการปรับปรุงพันธุ์ ข้อค้นพบสำคัญคือสายพันธุ์สมัยใหม่ไม่ได้ส่งชีวมวลไปยังผลมากขึ้น (สัดส่วนคงที่) แต่ผลิตชีวมวลรวมได้มากขึ้น เพราะมีประสิทธิภาพการใช้แสง (LUE) สูงขึ้น ซึ่งมาจากทั้งอัตราสังเคราะห์แสงสูงสุดของใบที่สูงขึ้น

และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแสงที่ต่ำลง (แสงทะลุลึกเข้าทรงพุ่มได้ดีขึ้น หลักการเดียวกับแสงกระจายข้างต้น) โดยรวม การปรับปรุงพันธุ์มีส่วนสนับสนุนเพียง 20 - 25% ของผลผลิตที่เพิ่มเป็นสองเท่า ส่วนที่เหลือ 75 - 80% มาจากเทคโนโลยีโรงเรือนและการจัดการสภาพแวดล้อม

7.6 การควบคุมการออกดอกด้วยแสง

การควบคุมช่วงออกดอกสำคัญต่อความสม่ำเสมอของการเก็บเกี่ยว การจับเวลาให้ตรงตลาด และคุณภาพผลผลิต กลไกหลักคือโฟโตพีเรียดิซึม ซึ่งพืชตอบสนองต่อความยาว "ช่วงมืดต่อเนื่อง" ไม่ใช่ช่วงสว่างโดยตรง พืชแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือพืชวันสั้น (ต้องการมืดต่อเนื่องนานพอ เช่น เบญจมาศ สตรอว์เบอร์รี พอยน์เซตเตีย) พืชวันยาว (เช่น ผักกาดหอม พืชุนี) และพืชไม่สนใจความยาววัน (เช่น มะเขือเทศ แตงกวา กุหลาบ)



11

ภาพที่ 20 หลักการโฟโตพีเรียดิซึม: รูปแบบช่วงแสง/มืดของพืชวันสั้น พืชวันยาว และเทคนิคขัดจังหวะกลางคืน (night break) พร้อมการจำแนกชนิดพืชตามกลุ่มการตอบสนอง

กลยุทธ์ควบคุมดอกด้วยแสงมีหลายแบบ เช่น การขยายความยาววันด้วยแสงสีน้ำเงิน (daylength extension) ซึ่งในเบญจมาศทำให้เกิด "วันยาวเสมือน" ที่พืชยังออกดอกได้ตามปกติเหมือนอยู่ในวันสั้นจริง เพราะยีนกระตุ้นดอก CmFTL3 ยังทำงานได้ แต่หากเพิ่มแสงแดงไกลเข้าไปด้วย ยีนยับยั้งดอก CmAFT จะสูงค้างและพืชไม่ออกดอกเลย อย่างไรก็ตาม เทคนิคนี้ใช้ได้เฉพาะบางชนิด (เช่น เบญจมาศ พอยน์เซตเตีย) แต่ไม่ได้ผลกับ Kalanchoe หรือ Stevia จึงต้องทดสอบเฉพาะชนิดพืชก่อนนำไปใช้จริง อีกกลยุทธ์คือการขัดจังหวะกลางคืน (night interruption) ด้วยแสงแฟลชสั้น ๆ ซึ่งผลลัพธ์ก็ขึ้นกับชนิดพืชและสเปกตรัมเช่นกัน และแม้กำหนดความยาววันแน่นอนแล้ว สเปกตรัมแสงในช่วงที่ให้อาจกระทบความเร็วออกดอกและรูปทรงต้นได้ โดยมักมีการแลกเปลี่ยนระหว่างความเร็วออกดอกกับความกระชับของทรงต้น

7.7 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

ใช้หน่วย $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ (PAR) เสมอในการออกแบบระบบไฟสำหรับพืช ไม่ใช่ลักซ์/ลูเมน และผสมแสงสีน้ำเงินราว 6 - 12% ในแสงเสริมแทนแสงแดงล้วน จำกฎ "แสงลด 1% ผลผลิตลด 1%" ไว้ประเมินผลของการบังแสง แต่ให้พิจารณาด้วยว่าทรงพุ่มแทบไม่เคยได้แสงมากเกินไป เพราะใบชั้นล่างขาดแสงอยู่เสมอ การลงทุน เพิ่มแสงมักคุ้มค่า พิจารณาว่าสต็อคคลุมโรงเรือนที่ให้แสงกระจาย (diffuse light)

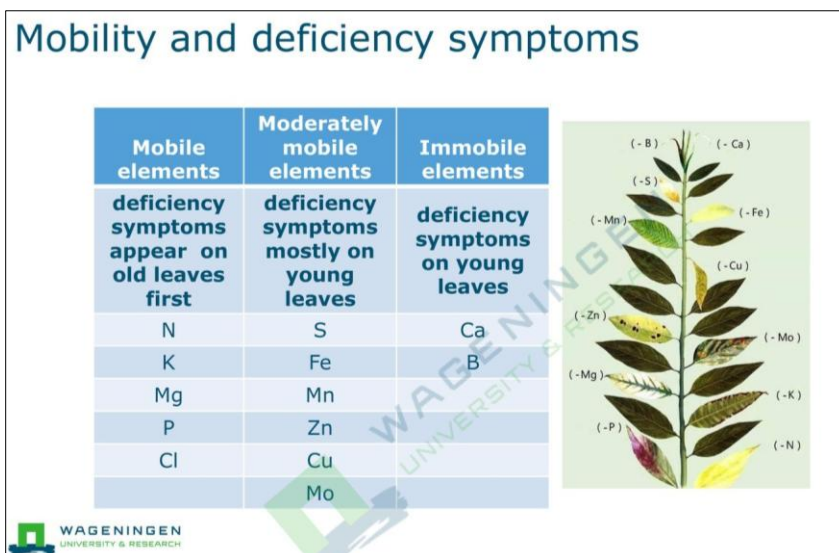
เพราะเพิ่มผลผลิตได้ 5 - 10% ที่ปริมาณแสงเท่ากัน ด้วยกลไก "เสียที่บน ได้ที่ล่าง" ก่อนออกแบบระบบไฟควบคุมการออกดอกให้จำแนกพืชตามกลุ่มโฟโตพีเรียดิซึม (วันสั้น/วันยาว/ไม่สนใจความยาววัน) ก่อนเพราะเทคนิคเดียวกันอาจให้ผลตรงข้ามกันในพืชต่างชนิด

ส่วนที่ 8 ธาตุอาหารพืช การจัดการ ค่า EC/pH และระบบไรดิโน

วิทยากร: Dr. Paul Kusuma, Dr. Van Nguyen, Tommaso Barbagli, Ep Heuvelink — Wageningen University & Research

8.1 ธาตุอาหารพืชและสรีรวิทยาของราก

พืชสดประกอบด้วยน้ำประมาณ 90% ของน้ำหนัก ส่วนมวลแห้งมีแร่ธาตุจากดิน/ปุ๋ยเพียง 4% ที่เหลือ 6% พืชสร้างขึ้นเองจากอากาศและน้ำผ่านการสังเคราะห์แสง ปุ๋ยจึงเป็น "ส่วนน้อยแต่จำเป็นอย่างยิ่ง" ธาตุอาหารที่จำเป็นต้องผ่านเกณฑ์ 3 ข้อ (ขาดแล้วพืชตายวงจรไม่ครบ ทดแทนด้วยธาตุอื่นไม่ได้ และมีบทบาทตรงในเมตาบอลิซึม) แบ่งเป็นธาตุหลัก 6 ชนิด (N-K-Ca-Mg-P-S) และธาตุรอง 8 ชนิด ซึ่งจำแนกตามความสามารถเคลื่อนย้ายในโฟลเอ็มได้เป็นเครื่องมือวินิจฉัยหน้างาน : ธาตุเคลื่อนย้ายดี (N, P, K, Mg, Cl) แสดงอาการขาดที่ใบแก่ก่อน ส่วนธาตุเคลื่อนย้ายไม่ได้ (Ca, B) แสดงอาการที่ยอดอ่อนแทนที่



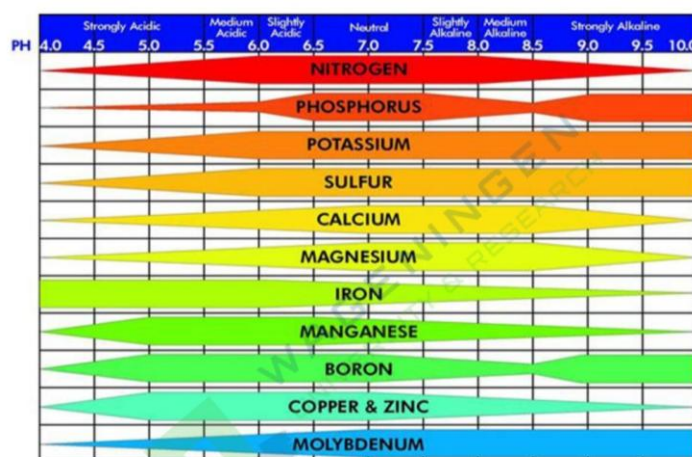
ภาพที่ 21 การจำแนกธาตุอาหารตามความสามารถเคลื่อนย้ายในโฟลเอ็ม คู่กับตำแหน่งอาการขาดธาตุบนต้นพืช (ใบแก่ vs ใบอ่อน)

ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณปุ๋ยกับการเจริญเติบโตไม่เป็นเส้นตรง แต่มี 3 ช่วง คือ ขาดแคลน - เพียงพอ (ดูดซึมส่วนเกินโดยไม่เพิ่มมวล) - เป็นพืช "ยิ่งให้มากยิ่งดี" จึงไม่จริง รากพืชดูดน้ำและธาตุอาหารหลักผ่านขนรากในโซนเจริญเต็มที่ โดยสารละลายต้องผ่านเส้นทางอพอพลาสต์หรือซิมพลาสต์ แต่ถูกคัดกรองที่แถบแคสพาเรียน (Casparian Strip) ในชั้นเอนโดเดอร์มิส ซึ่งบังคับให้ออนทุกตัวต้องผ่านโปรตีนขนส่งแบบเลือกสรรก่อนเข้าไซเลม นี่คือกลไกที่ทำให้รากสะสมธาตุอาหารสวนทางระดับความเข้มข้นได้สูงกว่าสารละลายภายนอกหลายสิบเท่า (เช่น โพแทสเซียมในน้ำเลี้ยงรากข้าวโพดสูงถึง 160 มิลลิโมลาร์ เทียบกับสารละลายเพียง 2 มิลลิโมลาร์) ด้วยพลังงานจาก ATP ผ่านการขนส่งแบบแอคทีฟ ดังนั้นสภาพรากที่ขาดออกซิเจนหรือเย็นเกินไปจะลดประสิทธิภาพการดูดซึมได้ แม้สารละลายจะสมบูรณ์แบบเพียงใด

8.2 การบริหาร EC และ pH

EC (ค่าการนำไฟฟ้า) บอกเพียง "ปริมาณไอออนรวม" ในสารละลาย ไม่ได้บอกชนิดหรือคุณภาพธาตุอาหาร สารละลายสอง EC เท่ากันอาจมีคุณค่าทางปุ๋ยต่างกันโดยสิ้นเชิง การเพิ่ม EC เท่ากับเพิ่มแรงดันออสโมซิสไปพร้อมกัน จึงไม่มีค่า EC ที่ "ดีที่สุด" ตายตัว ขึ้นกับเป้าหมายตลาด: ผู้ปลูกเน้นคุณภาพมักเพิ่ม EC ปานกลาง (เช่น มะเขือเทศ 2.5→3.5 dS/m) แลกกับผลผลิตลดลงเล็กน้อยแต่ได้ Brix และอายุเก็บรักษาดีขึ้น ขณะที่ผู้ปลูกตามสัญญาปริมาณเลือก EC ที่ปลอดภัยต่อผลผลิตมากกว่า ค่า EC เป้าหมายยังต้องปรับตามพืชและฤดู เช่น มะเขือเทศต้องการ EC สูงถึง 3.8 ในฤดูหนาวแสงน้อย แต่ลดเหลือ 2.5-2.8 ในฤดูร้อน ในระบบปิด ที่สำคัญคือปริมาณธาตุอาหารที่เข้าระบบต้องเท่ากับที่ออก (จากการดูดซึมของพืชและน้ำระบายส่วนเกิน) เสมอ ไม่เช่นนั้น EC เขตรากจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นโดยไม่รู้ตัว ด้าน pH ($-\log[H^+]$) ควบคุมทั้งความพร้อมใช้ของธาตุอาหารและสภาพเขตราก ธาตุหลักพร้อมใช้สูงสุดที่ pH 6.5-7.5 ส่วนธาตุรอง (Fe, Mn, B, Cu, Zn) พร้อมใช้ที่ pH ต่ำ และลดฮวบเมื่อเกิน 7 ยกเว้นโมลิบดีนัมที่ตรงกันข้าม สำหรับระบบไร้น้ำดินแนะนำช่วง 5.5 - 6.5

Effect of pH on nutrient availability



WAGENINGEN
UNIVERSITY & RESEARCH

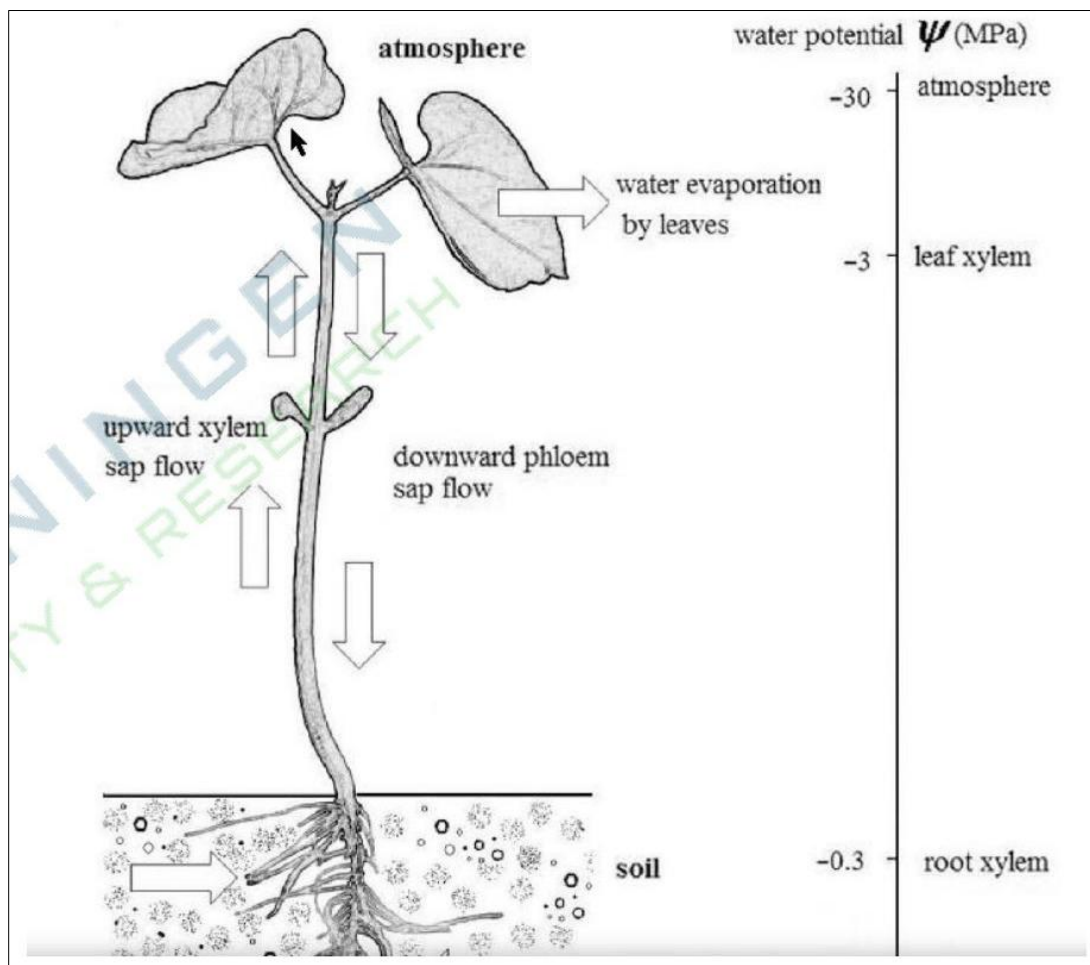
22

ภาพที่ 22 แสดงกราฟความพร้อมใช้ของธาตุอาหารตามค่า pH — ธาตุหลักและธาตุรองส่วนใหญ่พร้อมใช้สูงสุดใกล้ pH เป็นกลาง ยกเว้นโมลิบดีนัม

pH ยังกำหนดการตกตะกอน โดยเฉพาะฟอสเฟตกับแคลเซียม (มีเพียงรูป $H_2PO_4^-$ ที่ไม่ตกตะกอน) จึงต้องรักษา pH ให้เป็นกรดเล็กน้อยเสมอ pH ในเขตรากถูกกำหนดจาก 3 ตัวแปร คือ น้ำต้นทุน (ไบคาร์บอเนตดินให้ pH สูง แก่ด้วยกรดไนตริกซึ่งให้ไนเตรตเป็นปุ๋ยไปด้วย ควรเหลือไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ ~ 0.25 mmol/L) กิจกรรมของราก (ดูดไนเตรตแล้วปล่อย OH^- ทำให้ pH สูง ดูดแอมโมเนียมแล้วปล่อย H^+ ทำให้ pH ต่ำ - ปรับสัดส่วน $NH_4:NO_3$ จึงเป็นเครื่องมือควบคุม pH ภายในที่มีประสิทธิภาพ) และวัสดุปลูก (พีทบัฟเฟอร์สูงกว่าขุยมะพร้าวมาก) ในทางปฏิบัติ pH ใกล้เคียงจะต่ำกว่าบริเวณห่างออกไป เพราะแอมโมเนียมถูกดูดซึมเร็วใกล้จูดจ่าย การควบคุมวันต่อวันใช้เครื่องจ่ายปุ๋ยเติมกรด/ด่างที่จุดตั้งค่า 5.5 หากไม่แน่ใจขยับสัดส่วนแอมโมเนียมโดยอ้างอิงตารางตัดสินใจจาก pH น้ำระบาย ความเข้มข้นแอมโมเนียม และไบคาร์บอเนต ธาตุหลักซึ่งไวต่อ pH มาก ต้องจ่ายเป็นสารคีเลต โดย Fe-EDDHA เสถียรได้ถึง pH 10 กว้างกว่า Fe-EDTA (ถึง 6.0) และ Fe-DTPA (ถึง 7.0) จึงเหมาะกับพื้นที่น้ำด่างจัด

8.3 ความผิดปกติจากการขาดแคลเซียม

อาการกันผลเน่า ยอดไหม้ และใบห่อรูปถ้วย ล้วนมีกลไกเดียวกัน คือแคลเซียม (Ca^{2+}) เคลื่อนย้ายผ่านโพลีเอมโมไม่ได้เลย ต้องพึ่งไซเลมทางเดียวซึ่งขับเคลื่อนด้วยแรงคายน้ำกลางวันหรือแรงดันรากกลางคืน



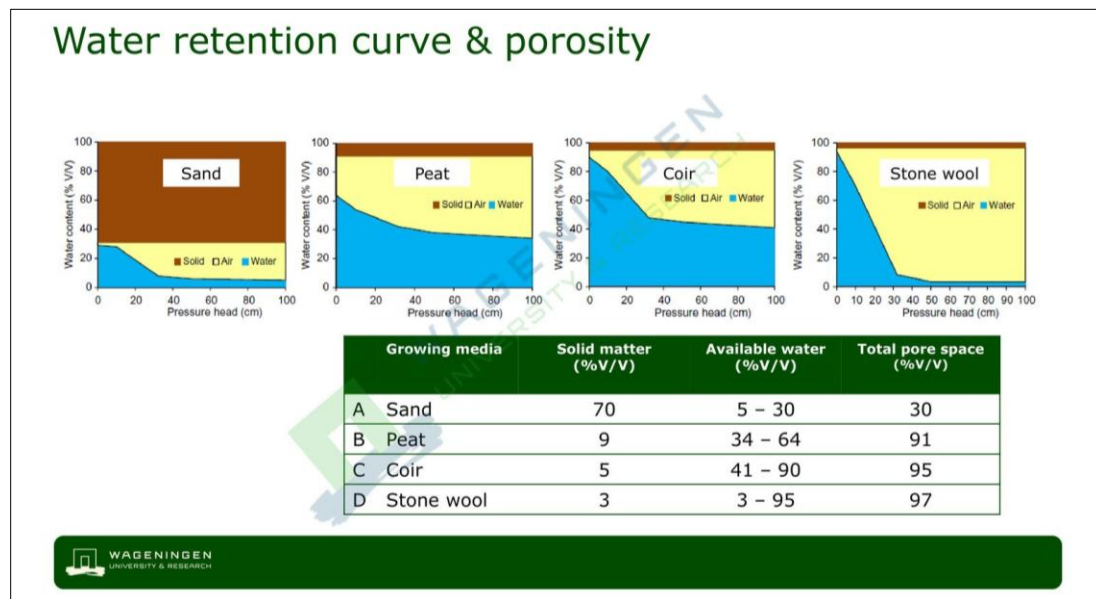
ภาพที่ 23 ความต่างศักย์น้ำจากดินสู่บรรยากาศที่ขับเคลื่อนการลำเลียงแคลเซียมผ่านไซเลม — โพลีเอมโมไม่มีการลำเลียงแคลเซียมเลย

อวัยวะที่คายน้ำน้อย เช่น ผล จุดเจริญ และใบชั้นในที่ถูกห่อหุ้ม จึงถูกตัดขาดจากแคลเซียมได้ง่าย งานวิจัยของ Barta & Tibbitts พิสูจน์ชัดว่าการปิดคลุมจุดเจริญผักสลัดจนจำกัดการคายน้ำทำให้สัดส่วนต้น แสดงอาการยอดไหม้พุ่งจาก 3% เป็น 53-100% ข้อสรุปสำคัญคือการเติมแคลเซียมในสารละลายเพิ่มมักไม่ช่วย เพราะปัญหาอยู่ที่ระบบลำเลียงไม่ใช่ปริมาณ ทางแก้ที่ตรงจุดคือเพิ่มการหมุนเวียนอากาศรอบจุดเจริญ ลด EC รวม และสัดส่วน K/Ca ลดแอมโมเนียม กระตุ้นแรงดันรากกลางคืน และฉีดพ่น CaCl_2 ทางใบเฉพาะกรณีฉุกเฉินเท่านั้น

8.4 ระบบปลูกพืชไร้ดินและวัสดุปลูก

ระบบปลูกแบ่งเป็นปลูกในดินกับไร้ดิน โดยไร้ดินแยกเป็นวัสดุปลูกชนิดแข็งที่ให้น้ำเป็นรอบ (ร็อควูล ขุยมะพร้าว) กับการปลูกในน้ำที่ให้สารไหลต่อเนื่อง (NFT ฟิล์มบางเสี่ยงโรคระบาดเร็ว, DFT น้ำลึก ต้องเติมอากาศ, แอโรโพนิคส์ให้ออกซิเจนสูงสุดแต่ไม่มีบัฟเฟอร์หากไฟดับ) ระบบไร้ดินประหยัดน้ำและปุ๋ยได้ 50 - 60% เทียบกับดิน แบ่งเป็นระบบเปิด (ปล่อยน้ำระบายทิ้ง) กับระบบปิด (หมุนเวียนน้ำระบาย) ซึ่งกฎระเบียบ EU ผลักดันให้ปล่อยน้ำทิ้งใกล้ศูนย์ภายในปี 2570 ทำให้ระบบปิดกำลังเป็นมาตรฐานใหม่

วัสดุปลูกทำหน้าที่ค้าจุต้น จัดสรรน้ำ-อากาศ-ธาตุอาหาร และสร้างเขตรากสะอาด มีความหนาแน่นเบาว่าดินราว 10 เท่า และช่องว่าง สูงกว่า 2 เท่า เส้นโค้งการกักเก็บน้ำคือหัวใจของการเลือกวัสดุ

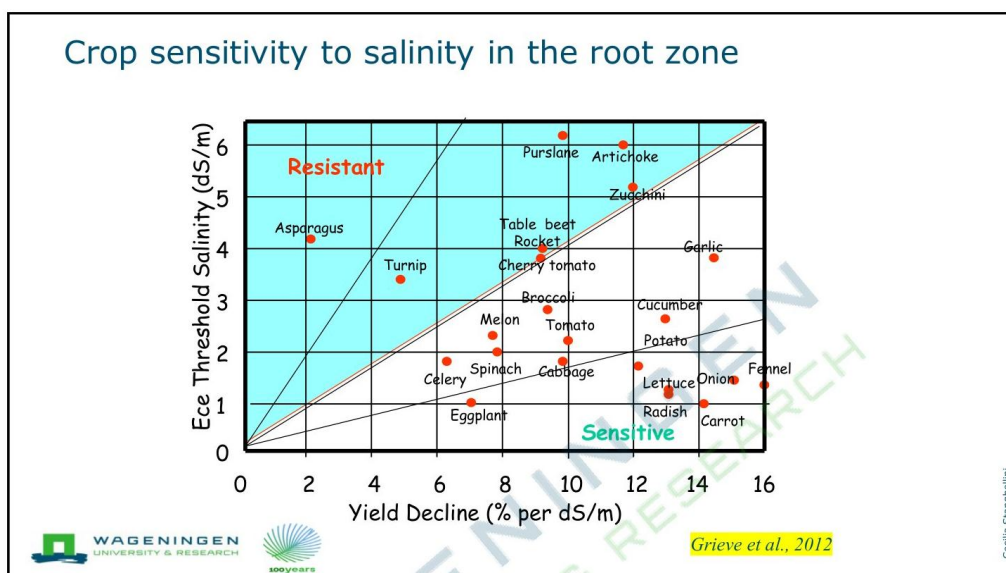


ภาพที่ 24 เส้นโค้งการกักเก็บน้ำของทราย พีทมอส ขุยมะพร้าว และรื้อคูล เทียบปริมาณน้ำที่พืชใช้ได้กับช่องว่างรวม

พีทมอสกักเก็บน้ำดีกว่าแต่เปื่อยน้ำยาก (hydrophobic) หากแห้งเกินไป ขุยมะพร้าวระบายน้ำเร็วกว่าแต่มีประจุลบสูงที่ยึดโซเดียม/โพแทสเซียมไว้แต่เดิม เมื่อให้ปุ๋ยแคลเซียม/แมกนีเซียม (ประจุ 2+) จะแทนที่ไอออนเดิมอย่างรุนแรงจนพืชขาดแคลเซียมชั่วคราว ผู้ผลิตชั้นนำจึงต้อง "บัฟเฟอร์" ขุยมะพร้าวด้วยแคลเซียมไนเตรดก่อนขาย มาตรฐานวัสดุปลูกที่ดีควรมีช่องว่างรวมกว่า 80% ความหนาแน่นต่ำกว่า 150 กก./ลบ.ม. และช่องว่างอากาศ 10 - 30%

8.5 น้ำ : การให้น้ำ แหล่งน้ำ คุณภาพ การบำบัด และผลของความแล้ง/ความเค็ม

จากน้ำที่พืชดูดเข้าไป มีเพียง ~10% ที่ใช้เติบโตจริง ส่วนที่เหลือคายออกสู่บรรยากาศ การให้น้ำในภาชนะเล็กจึงต้องแม่นยำกว่าการปลูกในดินมาก กฎปฏิบัติที่ใช้บ่อยคือ "3 เท่าของรังสี" (ปริมาณน้ำ มล./ตร.ม. $\approx 2-3 \times$ รังสีอาทิตย์ จุล/ตร.ม.) โดยเริ่มรอบแรกหลังพระอาทิตย์ขึ้น 1 - 2 ชั่วโมง และหยุดรอบสุดท้ายก่อนตก 1 - 2 ชั่วโมง เพื่อให้รากมีอากาศหายใจข้ามคืน พร้อมรักษาน้ำระเหยไว้ 20 - 30% เพื่อชะล้างเกลือสะสม การตรวจติดตามที่แม่นยำสุดคือวิธีชั่งน้ำหนัก (Load Cell) รองลงมาคือเซนเซอร์ FDR/TDR และ Tensiometer ซึ่งต้อง калиเบรตตามวัสดุปลูกแต่ละชนิด ในระบบปิด น้ำที่จ่ายให้พืชทั้งหมดราว 50 - 75% สูญเสียจากการคายน้ำ และ 20 - 40% กลายเป็นน้ำระเหยที่นำกลับมาหมุนเวียนได้ แรงผลักดันสำคัญคือ EU Water Framework Directive คุณภาพน้ำต้นทุนตัดสินใจจากค่า EC: สูงกว่า 1.5 mS/ซม. ไม่เหมาะกับไรดินเลย 1.0 - 1.5 ใช้ได้เฉพาะระบบเปิด ต่ำกว่า 0.5 ไม่มีข้อจำกัด ความทนทานต่อความเค็มต่างกันตามพืช เช่น สตรอว์เบอร์รี่ทนได้เพียง EC 1.0 dS/m ขณะมะเขือเทศทนได้ถึง 1.8



7

ภาพที่ 25 แบบจำลอง Maas-Hoffman: ค่า EC เกณฑ์เริ่มลดผลผลิตเทียบกับอัตราการลดผลผลิตของพืชผักแต่ละชนิด

ความแล้งและความเค็มทำร้ายพืชด้วยกลไกเดียวกันคือลดศักย์น้ำในเขตราก ทำให้ดูดยน้ำยากขึ้น งานวิจัยระบบรากแยกพบว่าหากฝั่งหนึ่งได้ EC ต่ำอีกฝั่งสูง (5.0/2.5) ผลผลิตลดเพียง 1% เทียบกับทั้งสองฝั่ง EC สูงเท่ากันที่ลดถึง 12% เพราะพืชดูดน้ำจากฝั่ง EC ต่ำและดูดธาตุอาหารจากฝั่ง EC สูง หลักการนี้ใช้เพิ่มคุณภาพผลได้โดยไม่เสียผลผลิต แบบจำลองทางสรีรวิทยายังชี้ว่าสาเหตุหลักที่ผลผลิตลดเมื่อความเค็มสูงคือพื้นที่ ใบจำเพาะ (SLA) ที่ลดลง (กระทบ 12 - 17% ต่อ dS/m) มากกว่ามวลแห้งผลหรือแรงต้านปากใบ (เพียง 2 - 3%) ทางแก้คือเพิ่มความหนาแน่นปลูก ชะลอการปลดใบ และเพิ่มความชื้นสัมพัทธ์ ส่วนโรคกันผลเน่ายังเกี่ยวพันกับจังหวะ EC: การคง EC สูงตลอดวันคืนขัดขวางแรงดันรากกลางคืนที่ส่งแคลเซียมไปเลี้ยงผล จึงควรลด EC ลงในเวลากลางคืน (3.5-4.5 dS/m) แต่ไม่ลดเร็วเกินไปจนผลแตก

ด้านการบำบัดน้ำแบ่งเป็นบำบัดเฉพาะจุด (UV, กรอง) กับบำบัดทั้งระบบ (ใส่สารเคมีลงน้ำ) เทคนิคกรองเลือกตามขนาดอนุภาคเป้าหมาย ตั้งแต่กรองทรายแบบช้า (ต้นทุนต่ำ ฆ่าเชื้อ Pythium ได้ดี) ไปจนถึง UV (โดส 100 มิลลิจูล/ตร.ซม.สำหรับแบคทีเรีย/เชื้อรา และ 250 สำหรับไวรัส แต่ต้องควบคุมค่า UVT) และสารออกซิไดซ์อย่างโอโซนกับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (5 ppm กำจัด Pythium, 50 ppm กำจัดไวรัส แต่พืชอ่อนแออย่างผักสลัดเสียหายได้ตั้งแต่ 4 ppm) ไม่มีเทคโนโลยีใดสมบูรณ์แบบ และออกซิเจนละลายน้ำที่เหมาะสม (5-10 มก./ลิตร) ก็สำคัญไม่น้อยไปกว่าการฆ่าเชื้อ เพราะรากที่ขาดออกซิเจนจะหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจนตายและเปิดช่องให้โรครากเน่า

8.6 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

อย่าตัดสินคุณภาพสารละลายจากค่า EC เพียงอย่างเดียว ควบคุม pH ไว้ที่ 5.5-6.5 และใช้สัดส่วน แอมโมเนียมไนเตรตเป็นเครื่องมือช่วยคุม pH ควบคู่กับกรดไนตริก เมื่อพบกันผลเน่าหรือยอดไหม้ให้ตรวจสอบสภาพแวดล้อม (ความชื้น การไหลเวียนอากาศ จังหวะ EC กลางวัน-กลางคืน) ก่อนเพิ่มแคลเซียมในสูตรปุ๋ย เพราะปัญหามักอยู่ที่การลำเลียงไม่ใช่ปริมาณ เลือกรั้วปลูกและรอบให้น้ำให้สอดคล้องกัน ยึดรังสีอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักในการให้น้ำ (ไม่ใช่นาฬิกา) และรักษาน้ำระบาย 20-30% เสมอเพื่อชะล้างเกลือสะสม หากต้องเพิ่ม

EC เพื่อคุณภาพผลผลิต ให้ทำอย่างมีกลยุทธ์ (เช่น ลด EC กลางคืน หรือใช้ระบบรากแยก) และรักษาพื้นที่ใบของพืชไว้ให้มากที่สุดเมื่อน้ำมีความเค็มสูง

ส่วนที่ 9 เคมีธาตุอาหาร การคำนวณสูตรปุ๋ย และความเป็นไปได้ของโรงเรือนไฮเทค

วิทยากร: Tommaso Barbagli (Wageningen University & Research), Jouke Campen (Wageningen University & Research)

9.1 เคมีพื้นฐานที่ต้องแม่นยำก่อนผสมปุ๋ยสักถัง

Tommaso Barbagli เปิดประเด็นว่าทุกเรื่องตั้งแต่การคำนวณสูตรปุ๋ยไปจนถึงการควบคุม EC และ pH ตั้งอยู่บนความเข้าใจเคมีพื้นฐานของปุ๋ยเพียงไม่กี่ข้อ ข้อแรกคือระบบปลูกไร้ดินต้องใช้ "ปุ๋ยแร่ธาตุ" ที่แตกตัวพร้อมให้พืชดูดซึมทันที ไม่ใช่ปุ๋ยอินทรีย์ที่ต้องพึ่งจุลินทรีย์ในดินย่อยสลายก่อน จุดที่ผู้ปลูกมักพลาดคือการอ่านฉลากปุ๋ย ตัวเลข N บนกระสอบคือไนโตรเจนบริสุทธิ์ แต่ตัวเลข P และ K ระบุในรูปออกไซด์ (P_2O_5 และ K_2O) ไม่ใช่ธาตุบริสุทธิ์ ต้องแปลงหน่วยก่อนคำนวณจริง หน่วยหลักที่ใช้คือมิลลิโมลต่อลิตร (mmol/L) เพราะแปลงเป็นน้ำหนักได้ง่ายด้วยมวลอะตอม/มวลโมเลกุล และช่วยตรวจ "สมดุลประจุไฟฟ้า" กฎเหล็กที่ว่าผลรวมประจุบวกต้องเท่ากับผลรวมประจุลบเสมอ หน่วยตรวจสอบคือมิลลิอีควิวาเลนต์ (me) คำนวณจากความเข้มข้นคูณขนาดประจุไอออน เช่น Ca^{2+} 1 mmol เท่ากับ 2 me และเมื่อรู้ค่า me/L รวม ยังประมาณค่า EC ได้ทันทีโดยหารผลรวมประจุด้วย 20 โดยไม่ต้องวัดจริง

Salts → Ions → mmol/L → me/L				
	cations		anions	
	mmol	me	mmol	me
▪ $NH_4NO_3 \rightarrow NH_4^+ + NO_3^-$	1	1	1	1
▪ $Ca(NO_3)_2 \rightarrow Ca^{2+} + 2NO_3^-$	1	2	2	2
▪ $AlCl_3 \rightarrow Al^{3+} + 3Cl^-$	1	3	3	3
▪ $Na_2SO_4 + K_2SO_4 + (NH_4)_2SO_4 \rightarrow 2Na^+ + 2K^+ + 2NH_4^+ + 3SO_4^{2-}$	6	6	3	6

Salts dissolved in water: sum of cations and anions in me will be always equal

ภาพที่ 26 แสดงตารางแปลงหน่วยจากเกลือปุ๋ยสู่ไอออนและมิลลิอีควิวาเลนต์ แสดงผลรวมประจุบวกและลบที่ต้องเท่ากันพอดี

9.2 จากสารละลายเป้าหมาย สู่ส่วนผสมปุ๋ยที่ต้องซังจริง

การให้ปุ๋ยในโรงเรือนมีสามแบบ คือ ปุ๋ยรองพื้น ปุ๋ยโรยหน้า และการให้ปุ๋ยพร้อมน้ำ (Fertigation) ซึ่งในช่วง 30 ปีที่ผ่านมาแทบแทนที่สองแบบแรกเพราะควบคุมแม่นยำกว่า วัสดุปลูกอินทรีย์อย่างโยหินใช้ Fertigation ได้เต็มร้อย ส่วนวัสดุปลูกอินทรีย์อย่างขุยมะพร้าวและเส้นใยไม้ต้อง "ปรับสภาพ"

ก่อนปลูกเสมอ เพราะขุยมะพร้าวแย่งแคลเซียมจากพืชไว้ที่อนุภาคของตัวเอง ต้องอัดแคลเซียมไนเตรตให้อิ่มตัวก่อน ส่วนเส้นใยไม่มีจุลินทรีย์ดีไนโตรเจนไปใช้เร็วจนต้องอัดไนโตรเจนสร้างบัฟเฟอร์ไว้ล่วงหน้าเช่นกัน

วิธีจ่ายปุ๋ยที่นิยมที่สุดคือเตรียมแม่ปุ๋ยเข้มข้น (ประมาณ 100 เท่า) ไว้สองถังคือถัง A และ B แยกกันเพื่อป้องกันการตกตะกอน เพราะแคลเซียมที่ความเข้มข้นสูงจะทำปฏิกิริยากับฟอสเฟตหรือซัลเฟตเกิดสารไม่ละลายน้ำจนอุดตันระบบ กฎคือปุ๋ยที่มีแคลเซียมใส่ถัง A ปุ๋ยที่มีฟอสเฟตและซัลเฟตใส่ถัง B ส่วนปุ๋ยที่ไม่ตกตะกอนอย่างโพแทสเซียมไนเตรตแบ่งใส่ทั้งสองถังให้น้ำหนักใกล้เคียงกัน

ขั้นตอนคำนวณมีลำดับตายตัว เริ่มจากแคลเซียมก่อนเสมอ (เพราะเป็น "คอขวด" ของสูตร) ตามด้วยธาตุที่ต้องการน้อยอย่างแอมโมเนียม ฟอสฟอรัส และแมกนีเซียม แล้วปิดท้ายด้วยซัลเฟตและโพแทสเซียม/ไนเตรตส่วนที่เหลือ จากนั้นแปลง mmol/L เป็นน้ำหนักจริงด้วยมวลโมเลกุล คุณค่าความเข้มข้นแม่ปุ๋ยและปริมาตรถัง ภาชนะอาหารเสริมก็ใช้หลักเดียวกัน เพียงต้องคิดจากเปอร์เซ็นต์เนื้อธาตุบริสุทธิ์ในสารเคมีเติมด้วย

Sum cations	Sum anions	NH ₄	K	Ca	Mg	NO ₃	SO ₄	H ₂ PO ₄	Cl
20.00 me/l	20.00 me/l	1.0	10	3	1.5	14.5	2.0	1.5	0.0
Ca(NO ₃) ₂	3			3		6			
NH ₄ NO ₃	1	1				1			
KH ₂ PO ₄	1.5		1.5					1.5	
MgSO ₄	1.5				1.5		1.5		
K ₂ SO ₄	0.5		1				0.5		
KNO ₃	7.5		7.5			7.5			
20.00	20.00	1.0	10	3	1.5	14.5	2.0	1.5	0.0

Step 2 convert to concentrated A B solution	Tank A					
	Ca(NO ₃) ₂	52.3	kg			
	NH ₄ NO ₃	30.5	kg	23.7	l	
	KNO ₃					
	sum	82.8				
	Tank B					
	KNO ₃	64.1	kg			
	KH ₂ PO ₄	22.7	kg			
	K ₂ SO ₄	13.7	kg			
	MgSO ₄	33.9	kg			
	sum	144.4				

19

ภาพที่ 27 หลักการแบ่งปุ๋ยลงถัง A และ B ตามการป้องกันการตกตะกอน พร้อมปรับน้ำหนักให้ใกล้เคียงกันด้วยการแบ่งโพแทสเซียมไนเตรต

9.3 บริหารธาตุอาหารให้ "วิ่งตามพืช" ไม่ใช่ยึดสูตรตายตัว

สูตรปุ๋ยเดียวใช้ไม่ได้ตลอดฤดู เพราะระบบไร้ดินมีปริมาณรากจำกัด เกิดการสะสมหรือขาดแคลนธาตุอาหารได้เร็ว ข้อสำคัญที่ต้องเข้าใจคือสารละลายที่ "จ่าย" กับสารละลายใน "เขตราก" ไม่ใช่สิ่งเดียวกัน พืชตอบสนองต่อค่าในเขตรากเป็นหลัก การทดลองในมะเขือเทศพบว่าโพแทสเซียมที่จ่าย 11 mmol/L ลดลงเหลือ 6 mmol/L ในเขตราก (ถูกดูดซึมเร็วเพราะพืชต้องการสูง) ขณะที่แคลเซียมซึ่งจ่ายเพียง 4.5 mmol/L กลับสะสมตัวสูง (เคลื่อนย้ายยาก) หากไม่มีคู่มืออ้างอิง ผู้ปลูกสามารถทดลองปรับความเข้มข้นที่จ่ายและวัดผลจริงในเขตรากเพื่อหาช่วงเหมาะสมของตนเองได้

กฎการปรับสูตรระหว่างฤดูมีสามข้อ หนึ่ง ปรับตามระยะการเจริญเติบโต เช่น โพแทสเซียมของมะเขือเทศต้องพุ่งสูงหลังช่อดอกที่ 5-6 จึงควรปรับเพิ่มล่วงหน้าพร้อมลดแคลเซียม/แมกนีเซียมลงตามสัดส่วน

เพื่อคุม EC รวม สอง หักลบธาตุอาหารที่มีอยู่แล้วในน้ำต้นทุนออกจากสูตรก่อนเติมปุ๋ย เพิ่ม สาม ในระบบ น้ำหมุนเวียนต้องลดการจ่ายแคลเซียมลงประมาณร้อยละ 50 เทียบกับระบบเปิด เพื่อป้องกันการสะสมเกินขนาด

9.4 โรงเรือนไฮเทคคุ้มค่าจริงหรือไม่

ปิดท้ายวันด้วยคำถามเชิงธุรกิจจาก Jouke Campen เนเธอร์แลนด์ส่งออกสินค้าเกษตรกว่า 128,900 ล้านยูโรต่อปีด้วยพื้นที่เพาะปลูกไม่ใหญ่ เพราะยกระดับเทคโนโลยีโรงเรือนต่อเนื่อง ผลผลิตต่อ น้ำ 1 ลูกบาศก์เมตร เพิ่มจาก 3 กก. ในแปลงเปิด เป็น 13 กก. ในโรงเรือนพลาสติก และ 43 กก. ในโรงเรือน กระจกควบคุมสภาพแวดล้อมเต็มรูปแบบ คำถามคือบทเรียนนี้ใช้ได้กับภูมิภาคอื่นหรือไม่ กรณีศึกษาที่รียาด ซึ่งอุณหภูมิ ฤดูร้อนพุ่งเกิน 45°C แต่อากาศแห้งมากจนระบบระเหยน้ำ (Pad and fan) ยังทำงานได้ดี ศูนย์วิจัย Estidamah เปรียบเทียบสามระดับเทคโนโลยี จาก Low Tech (อุโมงค์พลาสติก) Mid Tech (Pad and fan) ถึง High Tech (โรงเรือนปิดใช้แอร์ควบคุม ไม่แลกเปลี่ยนอากาศกับภายนอก) โรงเรือนปิด ใช้น้ำน้อยลงร้อยละ 95 และผลผลิตเพิ่มร้อยละ 100 จากการเสริม CO2 แลกกับพลังงานและเงินลงทุน ที่สูงกว่ามาก ผลผลิตมะเขือเทศในตะวันออกกลาง ที่ใช้ไฮเทคได้กว่า 100 กก./ตร.ม. สูงกว่าเนเธอร์แลนด์ ที่ไม่ใช้แสงเทียม (75 กก./ตร.ม.) เพราะได้แสงแดดมากกว่าถึงสองเท่า

น้ำคือทรัพยากรหายากที่สุดในตะวันออกกลาง โรงเรือนปิดที่อาบูดาบีซึ่งควบแน่นดักไอน้ำ จากการคายน้ำกลับมาใช้ใหม่ ใช้น้ำเพียง 2.1 ลิตรต่อกิโลกรัมผลผลิต ต่ำกว่า Pad and fan หลายสิบเท่า แต่ก็ต้องแลกด้วยเงินลงทุน การผลิตมะเขือเทศ 1 ล้านกิโลกรัมต่อปีด้วย Low Tech ใช้พื้นที่ 1.5 เฮกตาร์ ลงทุน 1.2 ล้านยูโร ส่วน High Tech ใช้พื้นที่เพียง 1.1 เฮกตาร์ แต่ลงทุนสูงถึง 3.3 ล้านยูโร Campen เตือนว่า แบบจำลองโรงเรือนเสมือนจริงคำนวณ "ศักยภาพสูงสุด" ได้ล่วงหน้า แต่ผลผลิตจริงขึ้นกับการปฏิบัติงาน เช่น การบำรุงรักษาโครงสร้างการผสมเกสร การป้องกันโรคและศัตรูพืช และคุณภาพเขตราก พื้นที่จริงหลายแห่ง มีโครงสร้างชำรุด ผักลุ่มฉีกขาด ระบบน้ำหยดไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งจุดผลผลิตให้ต่ำกว่าศักยภาพมาก เทคโนโลยีดีแค่ไหน ก็ช่วยไม่ได้ถ้าดูแลไม่ดี

Overview agricultural production systems						
	Open field	Net house	Tunnel greenhouse	Multi span greenhouse	Closed greenhouse	Indoor farming
 Production	1-5 kg/m ²	5-10 kg/m ²	10-30 kg/m ²	30-50 kg/m ²	50-100 kg/m ²	100-120 kg/m ²
 Investment costs	1-4 SAR/m ² Machinery: preparation, sowing, spraying, harvest	60-100 SAR/m ² Construction, irrigation system	260 SAR/m ² Greenhouse, fertigation unit, pad and fan	400-600 SAR/m ² Greenhouse, fertigation unit, pad and fan	1200-1500 SAR/m ² Air conditioning	4000-6000 SAR/m ² Air conditioning, LED lighting
 Operational costs	20 SAR/m ² Seeds, fertilizer, water, pesticides, labour	40 SAR/m ² Seeds, fertilizer, water, pesticides, labour	100 SAR/m ² Seeds, fertilizer, water, pesticides, electricity, labour	70 SAR/m ² Seeds, fertilizer, water, pesticides, electricity, labour	200 SAR/m ² Seeds, fertilizer, water, pesticides, electricity, labour	300 SAR/m ² Seeds, fertilizer, water, pesticides, electricity, labour
 Benefits	• Low investment	• Shading • Less pesticide use • Wind protection	• Year-round production	• Labour efficient • High production	• Independent of outside conditions • High water use efficiency	• Fully controlled growing conditions • Low pesticide use
 Disadvantages	• Seasonal production	• Seasonal production	• Moderate production • High water use for cooling	• Water use for cooling	• High operational costs • High investment costs • Complex technology	• High operational costs • High investment costs • Complex technology
 Typical crops	• Potato • Onion • Corn	• Figs • Melon • Fruits	• Egg plant • Cucumber • Beans	• Tomato • Capsicum • Cucumber	• Tomato • Capsicum • Strawberry	• Lettuce • Strawberry • Herbs

ภาพที่ 28 แสดงตารางเปรียบเทียบระบบการผลิตทางการเกษตร 6 ระดับ ตั้งแต่แปลงเปิดถึงฟาร์มแนวตั้งในอาคาร ครอบคลุม ผลผลิต เงินลงทุน และต้นทุนดำเนินงาน

เมื่อรวบรวมข้อมูล 6 ระดับเทคโนโลยีไว้ในตารางเดียว พบแนวโน้มชัดเจนว่ายิ่งเทคโนโลยีสูง ผลผลิตต่อพื้นที่ก็สูงขึ้นตาม (จาก 1-5 กก./ตร.ม. ในแปลงเปิด ถึง 100-120 กก./ตร.ม. ในฟาร์มแนวตั้ง) แต่เงินลงทุนและต้นทุนดำเนินงานก็เพิ่มตามไปด้วย คำตอบสุดท้ายของ Campen คือ "มันขึ้นอยู่กับสถานการณ์" ไม่มีคำตอบตายตัวที่ใช้ได้ทุกพื้นที่ ต้องชั่งน้ำหนักทรัพยากรที่มี (ที่ดิน น้ำ พลังงาน แรงงาน) สภาพภูมิอากาศ และตลาดเป้าหมาย แม้แต่การเลือกวัสดุคลุมโรงเรือนอย่างกระจกกับพลาสติกก็ยังคงเป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างทุนเริ่มต้นกับต้นทุนบำรุงรักษาระยะยาวเสมอ

9.5 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

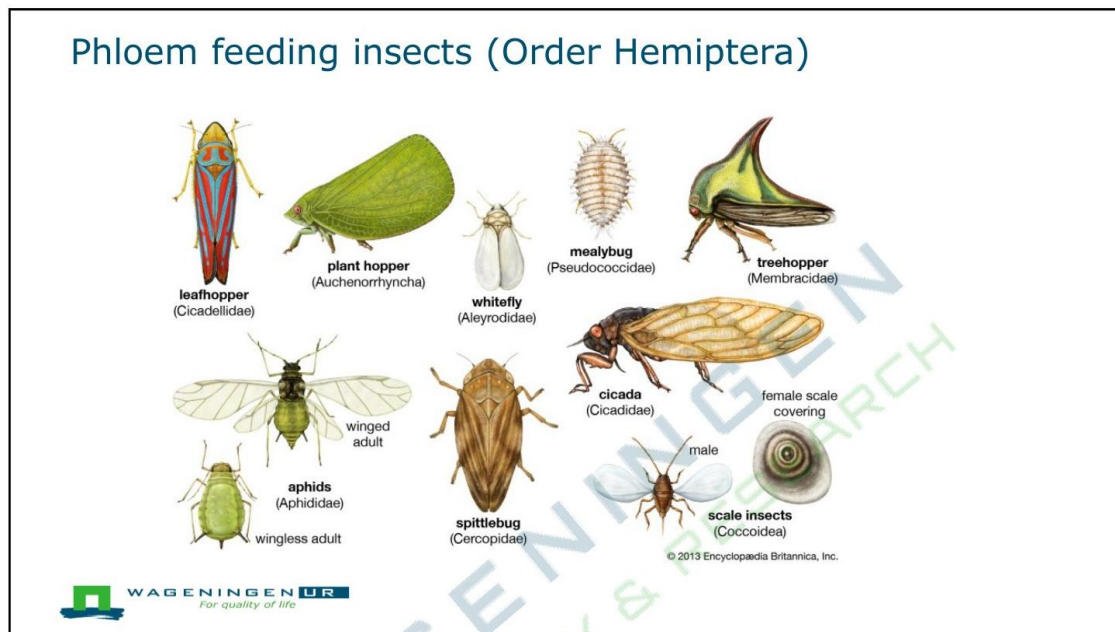
อ่านฉลากปุ๋ยให้เป็น ตัวเลข P และ K บนกระสอบคือรูปออกไซด์ ไม่ใช่ธาตุบริสุทธิ์ ต้องแปลงหน่วยก่อนคำนวณสูตรจริง คำนวณสูตรปุ๋ยตามลำดับตายตัว (แคลเซียมก่อน → ธาตุที่ต้องการน้อย → ปิดท้ายด้วยส่วนที่เหลือ) และตรวจสอบสมดุลประจุไฟฟ้าทุกครั้งก่อนนำไปใช้ วัดและปรับตามค่าจริงใน "เขตราก" ไม่ใช่แค่สารละลายที่ง่าย และปรับสูตรเชิงรุกล่วงหน้าตามระยะการติดผล (เช่น เพิ่มโพแทสเซียมหลังช่อดอกที่ 5 - 6) ก่อนลงทุนโรงเรือนไฮเทค ต้องชั่งน้ำหนักทรัพยากร ภูมิอากาศ และตลาดให้ครบ เพราะเทคโนโลยีสูงไม่สร้างผลตอบแทนเองหากไม่มีการบำรุงรักษาและการจัดการที่ตรงรับ

ส่วนที่ 10 ศัตรูพืชและการควบคุมศัตรูพืชด้วยวิธีผสมผสาน

วิทยากร: Gerben Messelink และ Marjolein Kruidhof

10.1 ภาพรวมศัตรูพืชและโรคสำคัญ

ก่อนจะควบคุมศัตรูพืชได้ ต้องรู้จัก "คู่ต่อสู้" ให้ดีก่อน ความเสียหายที่พบในโรงเรือน แบ่งเป็นสองแบบ คือความเสียหายทางตรงจากการกัดกินหรือดูดน้ำเลี้ยง และความเสียหายทางอ้อมที่มักร้ายแรงกว่า ได้แก่การเป็นพาหะไวรัสพืช เช่น ไวรัสใบหดเหลืองมะเขือเทศที่แมลงหวี่ขาวเป็นพาหะ และมูลหوانที่เป็นแหล่งอาหารของราดำจนบดบังแสง ศัตรูพืชหลักในโรงเรือนมีหลายกลุ่ม ได้แก่แมลงดูดน้ำเลี้ยง (Hemiptera) อย่างแมลงหวี่ขาว เพลี้ยอ่อน เพลี้ยแป้ง และเพลี้ยหอยเกราะ เพลี้ยไฟที่วางไข่ฝังในเนื้อเยื่อใบจนสารเคมีและชีวภัณฑ์เข้าไม่ถึงหนอนผีเสื้อกลางคืนอย่างหนอนขนใบมะเขือเทศ (Tuta absoluta) ไรแดงและไรสนิมมะเขือเทศ ตลอดจนโรคพืชอย่างราแป้ง ราน้ำค้าง ราเทา และไส้เดือนฝอยรากปม



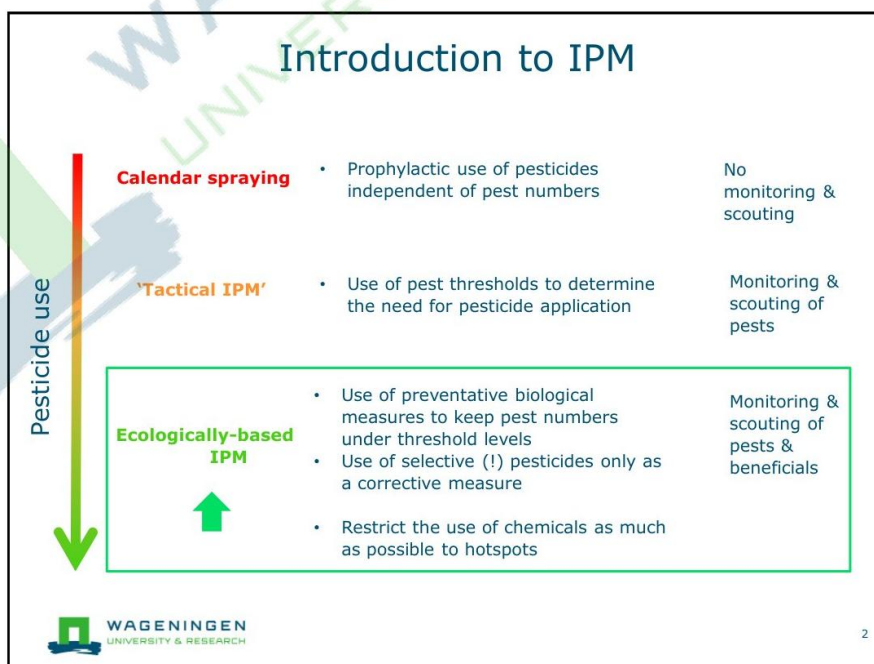
5

ภาพที่ 29 กลุ่มแมลงดูดท่อน้ำเลี้ยง (Hemiptera) ที่พบบ่อยในโรงเรือน ได้แก่ เพลี้ยแป้ง แมลงหวี่ขาว เพลี้ยหอยเกราะ และเพลี้ยอ่อน

ข้อมูลที่น่าสนใจคือ 80% ของศัตรูพืชในโรงเรือนเนเธอร์แลนด์เป็นสปีชีส์ต่างถิ่นที่ "ติดรถ" มากับการขนส่งดอกไม้หรือวัสดุปลูก แล้วปรับตัวอยู่รอดข้ามฤดูกาลได้ในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมอุณหภูมิตลอดปี แม้แต่โรงเรือนกลางทะเลทรายก็ยังพบการระบาดของ ผู้ปลูกจำนวนมากจึงตั้งพื้นที่กักกันพืชนำเข้าแยกต่างหาก และเริ่มขยับสู่การปลูกแบบไม่ใช้สารเคมีเลยเพื่อรับมือกฎระเบียบที่เข้มงวดขึ้น ข้อควรระวังอีกข้อคือสารสกัดชีวภาพ เช่น ฟริกป่นหรือกระเทียม ไม่ใช่ทางเลือกที่ปลอดภัยเสมอไป เพราะออกฤทธิ์แบบไม่เลือกทำลายเหมือนสารเคมี และ สารไล่แมลงความเข้มข้นต่ำอาจกระตุ้นให้แมลงสร้างปีกบินกระจายการระบาดออกไปทั่วโรงเรือนแทน

10.2 หลักการ IPM บนฐานนิเวศวิทยา

การจัดการศัตรูพืชพัฒนาผ่าน 3 ยุค จากยุคพ่นสารเคมีตามปฏิทินโดยไม่สำรวจเลย สู่ IPM เชิงยุทธวิธีที่พ่นเมื่อศัตรูพืชเกินเกณฑ์เศรษฐกิจ จนถึงยุคปัจจุบันคือ IPM บนฐานนิเวศวิทยา ที่ใช้การควบคุมทางชีวภาพป้องกันล่วงหน้าให้ศัตรูพืชอยู่ต่ำกว่าเกณฑ์ตลอดเวลา และสำรวจทั้ง "ผู้ร่าย" (ศัตรูพืช) และ "ผู้พิทักษ์" (ศัตรูธรรมชาติ) ไปพร้อมกัน สารเคมีถูกจัดเป็นทางเลือกสุดท้ายเท่านั้น



2

ภาพที่ 30 วิวัฒนาการ 3 ยุคของการจัดการศัตรูพืช จากหนังสือคู่มือตามปฏิทินสู่ IPM บนฐานนิเวศวิทยาที่สำรวจทั้งศัตรูพืชและศัตรูธรรมชาติ

หลักคิดทั้งหมดถูกจัดเป็น "พีระมิดไอพีเอ็ม": ฐานคือการสร้างระบบปลูกพืชที่ยืดหยุ่นและฟื้นตัวได้ดี (resilient cropping system) ซึ่งสมดุลระหว่างพืช สภาพแวดล้อม และศัตรูธรรมชาติ ชั้นกลางคือวิธีไม่ใช้สารเคมีอย่างการปล่อยชีวภัณฑ์และดักจับมวล ส่วนยอดพีระมิดคือสารเคมีที่ใช้เมื่อจำเป็นเท่านั้น และต้องสลับกลุ่มตามกลไกออกฤทธิ์ (ดูระบบ IRAC) เพื่อไม่ให้ดื้อยา ล้อมรอบพีระมิดด้วยการสำรวจและการประเมินผลซึ่งต้องทำควบคู่กันทุกชั้น แรงขับเคลื่อนสำคัญที่สุดที่ผลักดันการเปลี่ยนแปลงนี้คือการดื้อยาของศัตรูพืชเอง มากกว่ากฎระเบียบหรือความต้องการของตลาดเสียอีก เทคโนโลยีสำรวจก็ก้าวหน้าขึ้นมา จากแว่นขยายและกับดักขาว ไปจนถึงกล้อง AI ตรวจจบบรูปแบบการบินของแมลงกลางคืนเพื่อจับเวลาปล่อยศัตรูธรรมชาติให้พอดี ส่วนขั้นตอนประเมินผลหลังฤดูกาล แม้มักถูกมองข้าม แต่คือกุญแจพัฒนากลยุทธ์ให้ดีขึ้นในรอบถัดไป

10.3 การควบคุมทางชีวภาพ : ศัตรูธรรมชาติหลัก

การควบคุมทางชีวภาพคือการใช้ชีวภัณฑ์ควบคุมศัตรูพืช (BCAs) กดประชากรศัตรูพืช แบ่งเป็น 4 ประเภท ได้แก่ การเกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ การนำเข้าศัตรูธรรมชาติจากถิ่นกำเนิดศัตรูพืชต่างถิ่น การเพิ่มปริมาณซึ่งเป็นแนวทางหลักในโรงเรือน และการอนุรักษ์ศัตรูธรรมชาติท้องถิ่น กรอบคิดที่สำคัญที่สุดคือ การแยกศัตรูธรรมชาติประเภทเจาะจง (specialists) เช่น ไรตัวห้ำ *Phytoseiulus persimilis* ที่กินเฉพาะไรแดง ออกจากประเภททั่วไป (generalists) เช่น มวนตัวห้ำและแมลงช้างปีกใสที่กินเหยื่อได้หลากหลายหรือแม้แต่ละอองเกสร



7

ภาพที่ 31 ศัตรูธรรมชาติประเภทเจาะจง (กินเหยื่อชนิดเดียว) เทียบกับประเภททั่วไป (กินเหยื่อได้หลากหลายชนิด)

ความแตกต่างนี้กำหนดวิธีใช้งานตรงกันข้ามกัน ประเภทเจาะจงต้องปล่อยหลังพบศัตรูพืช และปล่อยช้าบ่อยเพราะอดอาหารตายหากไม่มีเหยื่อ ทำให้ประชากรศัตรูพืชและศัตรูธรรมชาติแกว่งขึ้นลงตามวงจรนักล่า - เหยื่อ ส่วนประเภททั่วไปต้องปล่อยล่วงหน้าตั้งแต่ต้นฤดูพร้อมอาหารเสริมหรือพืชธนาคารเพื่อสร้าง "กองทัพตั้งรับ" (standing army) ที่พร้อมสกัดศัตรูพืชตั้งแต่ความหนาแน่นยังต่ำมาก แนวโน้มปัจจุบันจึงเปลี่ยนจากการพึ่งพาตัวห้ำเฉพาะทางที่ต้นทุนสูง มาสู่การใช้ตัวห้ำทั่วไปเป็นฐานหลักของระบบ

10.4 กลยุทธ์เฉพาะพืช

สูตรควบคุมทางชีวภาพของพืชหนึ่งใช้กับพืชอื่นไม่ได้โดยตรง เพราะพืชแต่ละชนิดมีผลต่อศัตรูธรรมชาติผ่าน 5 กลไก คือการให้อาหาร (ละอองเกสร น้ำหวาน) สารระเหยเรียกแตนเบียนเมื่อถูกทำร้ายที่พื้กิ่งอย่างบ้านไรตัวห้ำ (acarodomatia) พื้นผิวสำหรับเดิน และพื้นผิวสำหรับวางไข่ พรักหวานเป็นตัวช่วยอย่างพืชที่เอื้อต่อกองทัพตั้งรับมากที่สุด เพราะออกดอกให้อาหารตลอดเวลา มีบ้านไรตัวห้ำ และไม่มีขนเหนียวกีดขวาง ทำให้ Orius และไรตัวห้ำตั้งรกรากได้ก่อนศัตรูพืชมาถึง ตรงข้ามกับมะเขือเทศที่แทบไม่มีอาหารให้ และมีขนต่อมเหนียวกีดขวางการเดิน จึงต้องพึ่งมวนมริดแบบกินทั้งพืชและสัตว์ที่ปรับตัวเดินบนพื้นผิวเหนียวได้ เครื่องมือเชิงปฏิบัติที่ช่วยสร้างกองทัพตั้งรับ ได้แก่พืชธนาคาร (เช่น ข้าวสาลีเลี้ยงเพลี้ยอ่อนธัญพืชเพื่อผลิตแตนเบียน) พืชให้ดอกอย่างบัวควี และอาหารเสริมอย่างไขอาร์ทีเมียหรือละอองเกสร ความสำเร็จของระบบยังมาจากความหลากหลายของหิมศัตรูธรรมชาติที่เกื้อกูลกันตามระยะศัตรูพืชและสภาพอากาศ ไม่ใช่การพึ่งพาชนิดเดียว

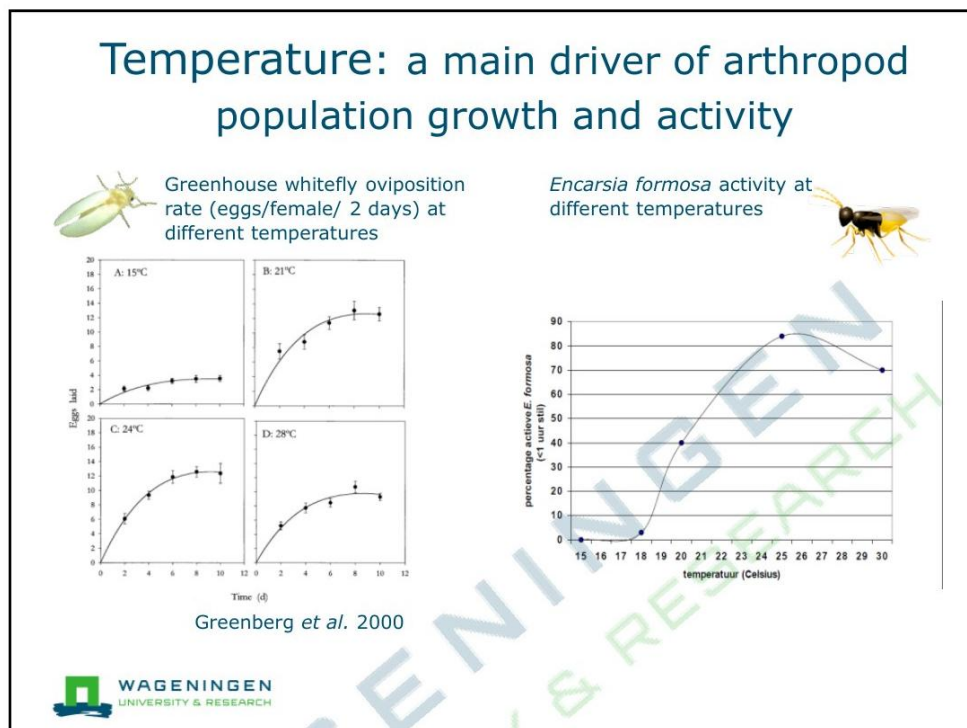
10.5 โยอาหารที่ซับซ้อน

การปล่อยศัตรูธรรมชาติหลายชนิดพร้อมกันไม่ได้ให้ผลบวกเสมอไป เพราะเกิดปฏิสัมพันธ์ซับซ้อนในโยอาหาร เช่น การแข่งขันแย่งทรัพยากร การแข่งขันทางอ้อม การกินทั้งพืชและสัตว์ และที่สำคัญที่สุดคือ "การล่าซ้อนชั้น" (intraguild predation) ซึ่งตัวห้ำชนิดหนึ่งกินตัวห้ำอีกชนิดหรือกินแตนเบียนที่อยู่

ตัวเหี่ยว ตัวอย่างจริงในพริกหวานพบว่าไรตัวห้ำ *Amblyseius swirskii* กินไข่ของแมลงวันหัวโตที่กำลังช่วยควบคุมเพลี้ยอ่อนอยู่ ทำให้ระบบเสียสมดุล ในทางกลับกัน ความหลากหลายของเหยื่อก็อาจให้ผลดี เพราะตัวห้ำทั่วไปที่กินเหยื่อผสมหลายชนิดมักแข็งแรงกว่าและควบคุมศัตรูพืชอื่นได้ดีกว่าด้วย งานวิจัยในมะเขือเทศยังพบว่า การผสมผสานตัวห้ำเข้ากับเชื้อราเอนโดไฟต์ในรากให้ผลควบคุมแมลงหัวขาวดีกว่าการใช้ อย่างใดอย่างหนึ่งเพียงลำพัง บทเรียนสำคัญคือต้องมองทุกการปล่อยศัตรูธรรมชาติด้วยมุมมองเชิงระบบนิเวศ ทั้งระบบไม่ใช่แก้ปัญหาทีละชนิดแบบแยกส่วน

10.6 มาตรการเขตกรรมและเครื่องมือ IPM แบบไม่ใช่สารเคมี

มาตรการเขตกรรมคือการปรับวิธีผลิตพืชเพื่อเอื้อต่อศัตรูธรรมชาติและความต้านทานของพืชเอง เริ่มจากการควบคุมภูมิอากาศ อุณหภูมิมีช่วงเหมาะสมไม่ตรงกันระหว่างศัตรูพืชกับศัตรูธรรมชาติเสมอ เช่น แมลงหัวขาววางไข่ได้ถึงอุณหภูมิเพียง 15°C แต่แตนเบียน *Encarsia* ต้องการอย่างน้อย 18°C จึงออกบินหาเหยื่อ หากโรงเรือนเย็นเกินไป ศัตรูธรรมชาติจะหยุดทำงานในขณะที่ศัตรูพืชยังขยายพันธุ์ต่อ



5

ภาพที่ 32 แสดงช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของแมลงหัวขาวกับแตนเบียน *Encarsia formosa* ไม่ตรงกัน ทำให้การควบคุมอุณหภูมิมีผลต่อสมดุลการควบคุมทางชีวภาพ

แสงก็สำคัญไม่น้อย วัสดุผนังหลังคาที่บล็อกรังสี UV-A ช่วยลดการบินเข้าของศัตรูพืชจากภายนอก ส่วนช่วงแสงสั้นในปลายฤดูร้อนอาจกระตุ้นให้ศัตรูธรรมชาติเข้าสู่การพักตัวก่อนศัตรูพืช ทำให้ระบบเสียสมดุล จึงต้องเลือกสายพันธุ์ที่ไม่พักตัวหรือให้แสงเสริม ด้านปุ๋ย ไนโตรเจนสูงเป็น "ของขวัญสองด้าน" เพราะเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการให้ทั้งพืชและศัตรูพืชไปพร้อมกัน จึงต้องให้ในระดับที่สมดุล การจัดการทรงพุ่มก็ต้องระมัดระวัง เช่น ไม่ปลิดใบมะเขือเทศทิ้งทันทีหากใบนั้นยังมีดักแด้แตนเบียนฝังอยู่ ควรรอให้พักตัวเต็มวัยก่อน มาตรการสุขภาพใบพื้นฐานที่ควรทำสม่ำเสมอได้แก่

- รักษาความสะอาดแปลงและเครื่องมือ ทำความสะอาดก่อนเข้า-ออกโรงเรือน
- ดัดมุ้งกันแมลงและกำจัดวัชพืชหรือเศษซากพืชเก่า
- จำกัดผู้เยี่ยมชมและให้สวมชุดป้องกันตามนัดหมาย
- ฆ่าเชื้อในดินด้วยไอน้ำร้อนหรือการอบด้วยแสงอาทิตย์เมื่อจำเป็น

ท้ายที่สุด การปลูกแปลงไม้ดอกหลากหลายชนิดรอบโรงเรือนช่วยเพิ่มศัตรูธรรมชาติที่แลกเปลี่ยนเข้าออกได้ แต่ก็มีความเสี่ยงเรื่องศัตรูพืชและไวรัสที่ต้องชั่งน้ำหนักเสมอ มาตรการเหล่านี้ทั้งหมดคือการนำหลักการ "ระบบปลูกพืชที่ยืดหยุ่น" อันเป็นฐานของพีระมิด IPM มาปฏิบัติจริงในรายละเอียด

10.7 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

ศัตรูพืชส่วนใหญ่ในโรงเรือนเป็นสปีชีส์ต่างถิ่นที่อยู่รอดได้ตลอดปี การกักกันต้นกล้านำเข้าจึงสำคัญกว่าการแก้ไขหลังระบาด และสารสกัดชีวภาพไม่ใช่ทางเลือกปลอดภัยเสมอไป สร้าง "กองทัพตั้งรับ" ด้วยการปล่อยศัตรูธรรมชาติประเภททั่วไปล่วงหน้า พร้อมพีชณาการและอาหารเสริม ดีกว่าพึ่งตัวห้ำฉะเฉพาะทางที่ต้องปล่อยซ้ำเรื่อยไป ปล่อยศัตรูธรรมชาติหลายชนิดด้วยความเข้าใจใยอาหาร ระวางการล่าซ้อนชั้นที่อาจทำลายสมดุลที่มีอยู่แล้วโดยไม่ตั้งใจ ควบคุมอุณหภูมิ แสง และปุ๋ยให้เอื้อต่อศัตรูธรรมชาติพอกๆ กับพืช และจัดการทรงพุ่ม-สุขภาพใบ อย่างเป็นระบบเพื่อปกป้ององค์ประกอบทั้งหมดของ IPM ไปพร้อมกัน

ส่วนที่ 11 ศึกษาฐานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเนเธอร์แลนด์ จำนวน 3 แห่ง
 เพื่อเป็นต้นแบบการพัฒนาและแนวทางผลิตพืชด้วย Greenhouse ที่ประสบความสำเร็จ
 (อนุญาตให้ถ่ายภาพบางส่วนเท่านั้น และไม่อนุญาตให้ถ่ายภาพส่วนที่ใช้ AI และ หุ่นยนต์ผลิตพืชเลย)



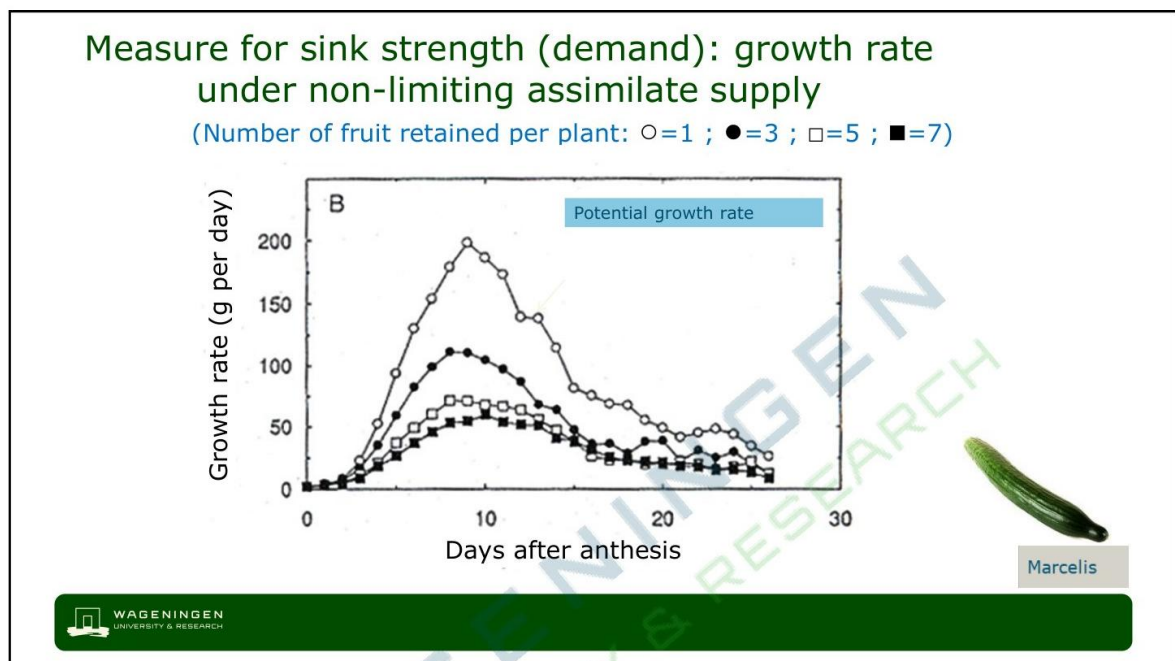
ภาพที่ 33 ศึกษาฐานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเนเธอร์แลนด์

ส่วนที่ 12 สรีรวิทยาการเจริญเติบโตและการจัดการภูมิอากาศโรงเรือน

วิทยากร: Prof. Dr. Ep Heuvelink, Jouke Campen, Cecilia Stanghellini (Wageningen University & Research)

12.1 การแบ่งปันสารอาหาร : ทำไมผลบางผลจึงโตกว่าผลอื่น

ต้นพืชผลิตน้ำตาลได้จำกัดต่อวัน แต่ใบ ยอด และผลจำนวนมาก "แย่ง" ส่วนแบ่งกันตลอดเวลา สัดส่วนที่ไปเลี้ยงผลคือตัวกำหนด Harvest Index หัวใจของผลผลิตเชิงพาณิชย์ นักวิจัย Wageningen พบคำตอบที่ชัดเจนคือความเข้าใจเดิมว่าอะไรกำหนดการจัดสรรนี้ ปริมาณสารอาหารที่มี (Source) ไม่ใช่ตัวกำหนดโดยตรง - ปลุกห่าง 40 - 80 ซม. ได้แสงต่อต้นต่างกันเท่าตัว แต่เมื่อควบคุมจำนวนผลต่อช่อเท่ากัน สัดส่วนที่ไปเลี้ยงผลยังคงที่ 55 - 65% เท่ากัน ระยะทางการลำเลียงก็ไม่ใช่ตัวแปรหลักอย่างที่เคยเชื่อ - ตัดช่อผลที่ 4 ออก ช่อข้างเคียงได้น้ำหนักเพิ่ม 10 - 12% แต่ช่อไกลไม่ได้ประโยชน์เลย สาเหตุจริงคือ "จังหวะพัฒนา": ช่อที่กำลังโตพอดีดึงสารอาหารส่วนเกินไปได้ ช่อที่สุกแล้วรับเพิ่มไม่ได้ สารอาหารทั้งต้นรวมอยู่ใน "คลังส่วนกลาง" เดียว ไม่สนใจระยะทางตัวแปรที่แท้จริงคือ แรงดึงสารอาหาร (Sink Strength) ของแต่ละอวัยวะ วัดจากอัตราการเติบโตเมื่อไม่มีคู่แข่ง สัดส่วนที่ได้รับเท่ากับแรงดึงของอาหารด้วยแรงดึงรวมทั้งต้น ในแตงกวา ผลที่ไม่มีคู่แข่งขยายได้ถึง 2 กก. (ปกติ 400-500 กรัม) ตัดคู่แข่งออกผลที่เหลือเร่งโตถึงอัตราศักยภาพภายใน 1 - 2 วัน สายพันธุ์ก็มีแรงดึงต่างกันเอง มะเขือเทศผลใหญ่ Komeett มีแรงดึงสูงกว่าผลเล็ก Sunstream หลายเท่า จึงให้ผลโตกว่าโดยธรรมชาติ



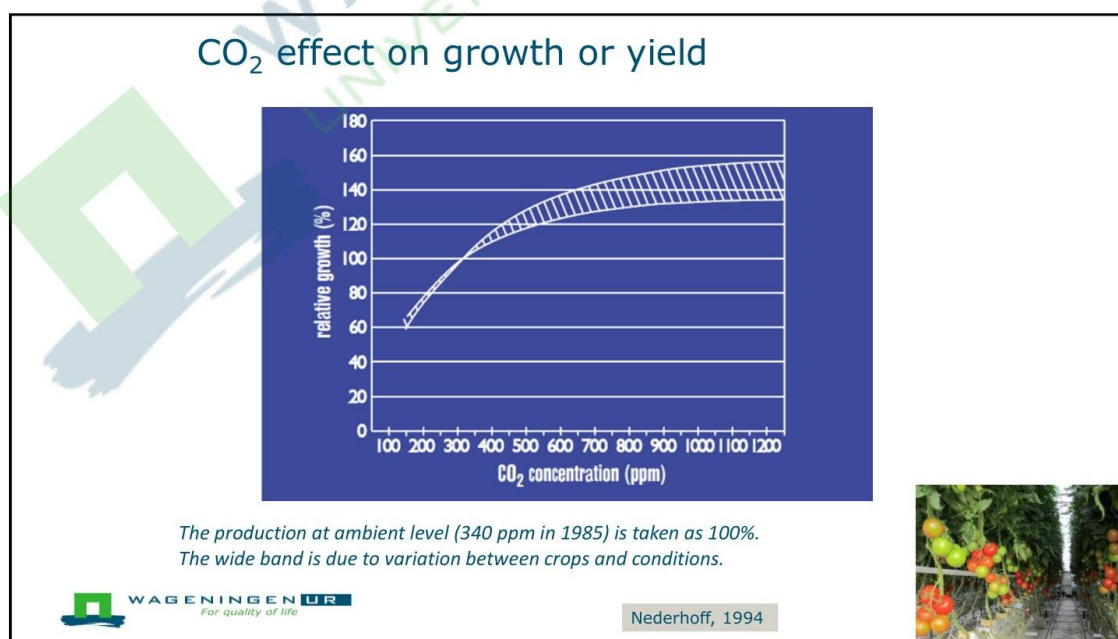
15

ภาพที่ 34 อัตราการเติบโตศักยภาพของผลเมื่อไม่มีคู่แข่งแย่งสารอาหาร คือตัวชี้วัดแรงดึงสารอาหารที่แท้จริง - กราฟรูปภูเขาเพิ่มขึ้นหลังดอกบาน สูงสุดช่วงกลาง แล้วลดลงเมื่อผลใกล้สุก

ในทางปฏิบัติ จำนวนผลต่อข้อ (ไม่ใช่ระยะปลูก) คือตัวแปรที่เกษตรกรควบคุมได้จริง การเปิดใบอ่อนที่ยอดเพื่อ "เร่ง" ผลกลับไม่เพิ่มผลผลิต เพราะ LAI ลดลงจนดักแสงน้อยลง แต่ผลิตเฉพาะใบแก่ด้านล่าง เมื่อ LAI เกิน 3.0 เพิ่มผลผลิตน้ำหนักแห้งได้ 6 - 7% โดยไม่ต้องลงทุนเพิ่ม แสงฟาร์เรดเสริมไฟ LED แดง - น้ำเงิน เพิ่มแรงดึงสารอาหารผลได้ถึง 40% ทำให้มวลแห้งผลรวมเพิ่ม 44.6%

12.2 คาร์บอนไดออกไซด์และความชื้น : อากาศที่มองไม่เห็นแต่กำหนดผลผลิต

ในวันแดดจัดของเนเธอร์แลนด์ โรงเรือนมะเขือเทศที่ไม่เสริม CO₂ แม้เปิดช่องระบายเต็มที่ ระดับ CO₂ ภายในอาจลดเหลือเพียง 200 ppm (จากปกติ 400 - 420 ppm) เพราะพืชดูดใช้เร็วกว่า อากาศไหลเข้าทดแทน การเพิ่ม CO₂ เป็น 800 - 1,000 ppm เพิ่มการเติบโตเฉลี่ย 30 - 35% แต่เป็นกราฟโค้งอ้อมตัว เกิน 1,200 ppm เสี่ยงสิ่งเจือปนเป็นพิษ



6

ภาพที่ 35 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้น CO₂ กับการสังเคราะห์แสง เป็นกราฟโค้งอ้อมตัว — ที่ 1,000 ppm ให้ผลผลิตเพิ่มราว 30% เมื่อเทียบกับ 400 ppm

สำคัญกว่าค่าเฉลี่ยคือเสถียรภาพ : CO₂ ที่ผันแปร 380 - 780 ppm (เฉลี่ย 580) ให้ผลผลิตต่ำกว่า กลุ่มที่คงที่ 580 ppm ตลอด เพราะกราฟตอบสนองไม่เป็นเส้นตรง การเสริม CO₂ คุ่มค่าที่สุดเมื่อได้ "ฟรี" จากไอเสียการเผาแก๊สทำความร้อนอยู่แล้ว (เพิ่มผลผลิต 12 - 22%) แต่ถ้าต้องซื้อ CO₂ เหลวมาเติม ต้องคำนวณต้นทุน - ผลตอบแทนให้รอบคอบเสมอ

ความชื้นสัมพัทธ์ส่งผลทางอ้อมผ่านการคายน้ำ ค่าเหมาะสมคือ VPD 0.2 - 1.0 kPa หรือความชื้น 60 - 80% ต่ำไปทำให้ปากใบปิด ลดการสังเคราะห์แสง และก่อโรคกันผลเน่า สูงเกิน 98% ทำให้สปอร์เชื้อรา Botrytis งอกได้เกือบ 100% การพ่นหมอกในพื้นที่ร้อนแห้งช่วยลดผลแตกและเพิ่มน้ำหนักผล แต่แลกด้วยมวลแห้งที่ลดลง สำหรับไม้ตัดดอก ความชื้นสูงเกิน 85% ต่อเนื่องทำให้เกิด "ปากใบเกียจคร้าน" ปิดไม่สนิทเมื่อตัดดอกไปตั้งแจกัน แก้ได้ด้วยการลดความชื้นเป็นครั้งคราว

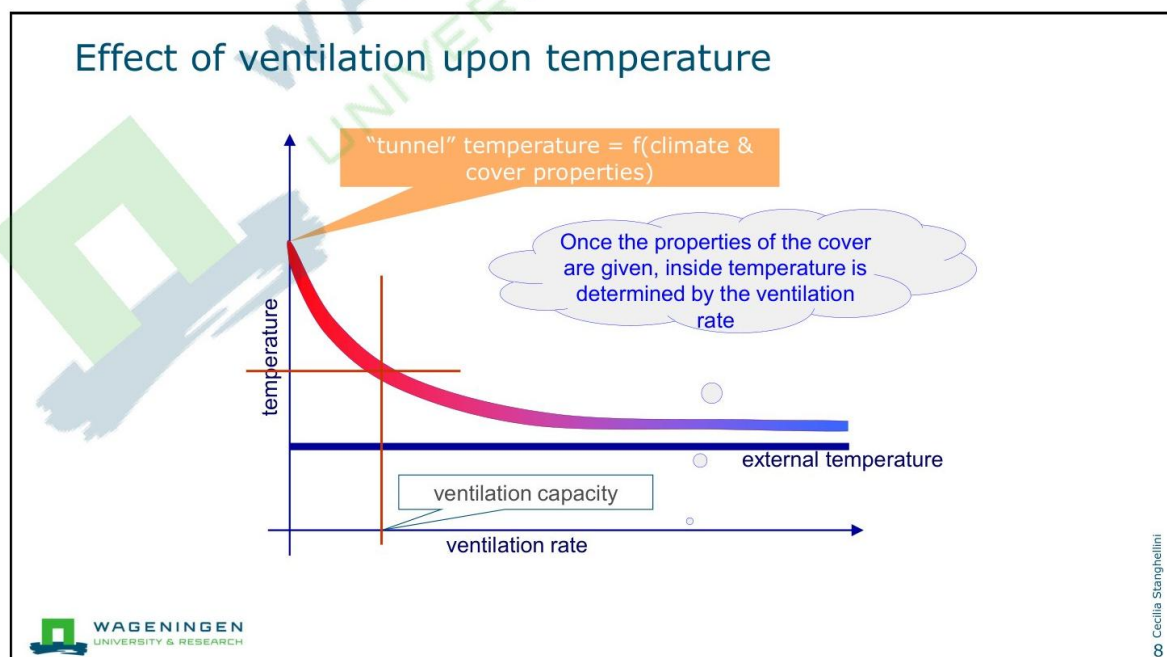
12.3 อุณหภูมิ : ตัวแปรที่ทรงพลังที่สุดของการเจริญเติบโต

แสงและ CO₂ ควบคุม "การเติบโต" (ขนาด/มวล) ส่วนอุณหภูมิควบคุม "การพัฒนา" (จังหวะเวลา เช่น การออกดอก การสุก) พืชใช้เวลาเป็นความร้อนสะสมหรือองศา-วัน ไม่ใช่วันปฏิทิน เช่น พริกหวานต้องการ 1,177 องศา-วัน (ฐาน 4.9°C) จึงสุก - ที่เฉลี่ย 18.3°C ใช้ 88 วัน แต่ที่ 23.3°C ใช้เพียง 64 วัน หากอุณหภูมิสูง แต่แสงน้อย พืชพัฒนาเร็วแต่สะสมมวลน้อย ได้ผลเล็กใบบาง ตรงข้ามกับอุณหภูมิต่ำ แสงจัดที่ได้ผลใหญ่หนักผู้ปลูกจึงต้องปรับอุณหภูมิให้สอดคล้องกับแสงจริงเสมอ

การลดอุณหภูมิกลางคืนเพื่อประหยัดพลังงาน (แม้ถึง 12°C) หากเริ่มตั้งแต่ปลูกจะทำให้เก็บเกี่ยวช้าลง แต่ถ้าเริ่มหลังเก็บเกี่ยวแล้วผลผลิตรวมไม่กระทบ เพียงต้องระวังหยดน้ำควบแน่นบนผลช่วงเช้า ที่นำไปสู่โรคเน่า อุณหภูมิสูงเกินไป (32°C วัน/26°C คืน) ไม่ลดมวลชีวภาพรวม แต่ทำลายละอองเกสร จนผลผลิตร่วงจาก 12 เหลือ 2 ผล DIF (ความต่างอุณหภูมิวัน-คืน) เป็นเครื่องมือคุมความสูงพืชแบบไม่ใช้สารเคมี: กลางคืนอุ่นกว่ากลางวัน (Negative DIF) ทำให้ข้อปล้องสั้นลงใช้มากในไม้ประดับ แต่แลกด้วยใบที่ดกแสงน้อยลง กลยุทธ์แม่นยำกว่าคือลดอุณหภูมิเฉพาะ 4 ชั่วโมงแรกของวัน ซึ่งยับยั้งการยืดตัวได้มากที่สุด โดยใช้พลังงานน้อยกว่า สำหรับพืชโตเต็มวัย อุณหภูมิเฉลี่ยระยะยาวสำคัญกว่าค่า ณ ขณะหนึ่ง เปิดทางบริหารพลังงานยืดหยุ่น และพืชทนความผันผวนแบบสลับรอบ $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ได้โดยผลผลิตไม่เปลี่ยน

12.4 การระบายอากาศและการควบคุมภูมิอากาศ : หัวใจของการออกแบบโรงเรือน

คำนวณทางฟิสิกส์ล้วนๆ จะได้อัตราการระบายอากาศที่ต้องการสูงเกินจริง เพราะมองข้ามความร้อนแฝงจากการคายน้ำของพืช (น้ำ 1 กรัมใช้พลังงาน 2,500 จูล) พืชจึงทำหน้าที่เหมือนเครื่องปรับอากาศธรรมชาติ บางสภาวะโรงเรือนเย็นกว่าภายนอกเสียอีก การบังแดดจึงมักเป็นการชดเชยระบบระบายอากาศที่ไม่พอ มากกว่าทางแก้ที่แท้จริง



ภาพที่ 36 แสดงอัตราการระบายอากาศเพิ่มขึ้น อุณหภูมิภายในโรงเรือนลดลงเข้าใกล้ภายนอกแบบโค้งลาดลง จุดที่กราฟราบ คือ ชีตความสามารถสูงสุดที่ต้องออกแบบให้เพียงพอ

การระบายอากาศตามธรรมชาติขับเคลื่อนด้วยแรงลอยตัว (ลมสงบ) และแรงลม (ลมเกิน 3 ม./วินาที) บล็อกโรงเรือนไม่ควรกว้างเกิน 30 เมตร และเว้นระยะระหว่างบล็อก 30 เมตร เพื่อไม่ให้อากาศร้อนขึ้น ไหลวนกลับ มุ้งกันแมลงลดอัตราแลกเปลี่ยนอากาศมาก ต้องชดเชยด้วยช่องเปิดกว้างขึ้นหรือพัดลมเสริม กรณีศึกษาจริงยืนยันผลตอบแทนสูง: การเพิ่มช่องระบายในโรงเรือน Parral ของสเปนเพิ่มผลผลิตกว่า 50% จากการระบายอากาศที่ดีขึ้นอย่างเดียว

อุณหภูมิที่เหมาะสมควรเพิ่มตามแสงที่มีอยู่เสมอ คอมพิวเตอร์ควบคุมภูมิอากาศจึงปรับเกณฑ์ อุณหภูมิขึ้นอัตโนมัติในวันแสงจัดเพื่อรักษาสมดุล Source-Sink โดยทำงานด้วยหลักแถบสัดส่วน เปิดวาล์ว ความร้อนหรือหน้าต่างแบบค่อยเป็นค่อยไป หลักคณิตศาสตร์เดียวกันนี้คำนวณทั้งไอน้ำและ CO₂ : อัตราการผลิต/ดูดใช้ = อัตราระบายอากาศ × ผลต่างความเข้มข้น กรณีลงทุนระบบลดความชื้นเชิงกล ในโรงเรือน ทิวลิป ไฟฟ้า ใช้เพิ่ม 43,000 kWh/ปี แต่แก๊สลดลง 33,000 ลบ.ม./ปี พร้อมคุณภาพดีขึ้น - ต้อง คำนวณต้นทุนพลังงานรวมกันก่อนตัดสินใจ เริ่มจากวิธีต้นทุนต่ำก่อนเสมอ

12.5 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

ควบคุมผลผลิตผ่านจำนวนผลต่อช่อ ไม่ใช่ระยะปลูกหรือการปลิดใบอ่อนที่ยอด - ปลิดเฉพาะ ใบแก่ด้านล่างเมื่อ LAI เกิน 3.0 เพื่อเพิ่มผลผลิตได้จริง 6-7% รักษาระดับ CO₂ ให้คงที่สม่ำเสมอดีกว่าปล่อย ผันแปร และเสริม CO₂ คุ่มค่าที่สุดเมื่อได้จากไอเสียความร้อนที่มีอยู่แล้ว ไม่ใช่ซื้อมาเติมโดยไม่คำนวณ ผลตอบแทนปรับเกณฑ์อุณหภูมิให้สอดคล้องกับแสงในแต่ละวัน และเลื่อนการลดอุณหภูมิกลางคืน เพื่อประหยัดพลังงานไปทำหลังเก็บเกี่ยวแล้วเท่านั้น ออกแบบระบบระบายอากาศให้มีขีดความสามารถ เพียงพอตั้งแต่แรกเพราะการคายน้ำของพืชช่วยลดความร้อนให้อยู่แล้ว การบังแดดควรเป็นแผนรอง ไม่ใช่แผนหลัก

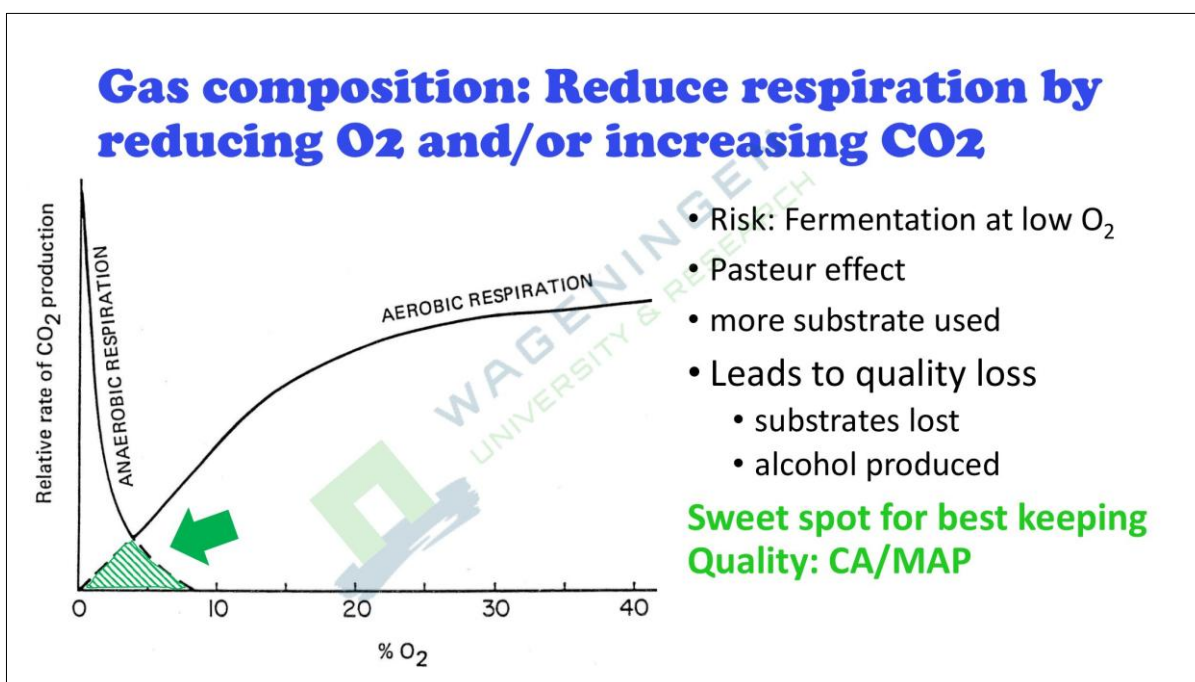
ส่วนที่ 13 คุณภาพผลผลิต เศรษฐศาสตร์ และความยั่งยืนหลังการเก็บเกี่ยว

วิทยากร: Julian Verdonk และ Dr. Silke Hemming (Wageningen University & Research)

13.1 ผักผลไม้ "ยังมีชีวิตอยู่" หลังเก็บเกี่ยว

วันสุดท้ายของการฝึกอบรมเปิดด้วยคำถามพื้นฐานว่า "คุณภาพคืออะไร" คำตอบคือผลรวม ของรสสัมผัส กลิ่น รสชาติ ความปลอดภัยอาหาร อายุการเก็บรักษา และความน่าดึงดูด ไม่ใช่แค่รูปทรงสวย การคัดทิ้งผลผลิตเพราะรูปร่างไม่สวยคือสาเหตุใหญ่ของขยะอาหารทั่วโลก ทั้งที่รสชาติและโภชนาการไม่ได้ด้อยลง

ใจความสำคัญที่สุดคือ ผัก ผลไม้ และดอกไม้หลังเก็บเกี่ยวยัง "มีชีวิตอยู่" ยังหายใจและคายน้ำ ต่อเนื่อง เป้าหมายการจัดการจึงไม่ใช่แค่ป้องกันการเน่าเสีย แต่คือการชะลอกระบวนการมีชีวิตให้ช้าลง อย่างพอเหมาะ การหายใจ (เผาผลาญน้ำตาล+ออกซิเจน → CO₂+น้ำ+พลังงาน) คือกลไกหลักที่ต้องควบคุม ด้วย 3 แนวทาง คือ ลดอุณหภูมิ ลดออกซิเจน/เพิ่ม CO₂ (ต้องระวังจุดวิกฤตที่พืชเปลี่ยนไปหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน) และเลือกบรรจุภัณฑ์ที่ระบายอากาศเหมาะสม เนเธอร์แลนด์ใช้หลักนี้เก็บแอปเปิ้ลได้นาน 9 – 12 เดือน ในห้องเย็นควบคุมบรรยากาศ



ภาพที่ 37 ระดับออกซิเจนที่พอเหมาะช่วยลดการหายใจได้มากที่สุด โดยไม่ตกเข้าสู่โซนการหมักที่ทำลายคุณภาพ

อวัยวะพืชต่างชนิดหายใจเร็วต่างกันมาก พืชหัว-พืชราก (มันฝรั่ง หัวหอม) หายใจช้า เก็บได้นานเป็นเดือน ส่วนผักใบและกลีบดอกหายใจเร็วมาก ต้องแช่เย็นทันที อีกศัตรูเงียบคือการสูญเสีย น้ำ ซึ่งไม่เคยถูกเติมคืน น้ำ 1 ลิตรที่หายไปเท่ากับน้ำหนักผลผลิต 1 กิโลกรัมที่สูญเสีย คลังเก็บผลไม้ขนาดใหญ่อาจเสียหายนับแสนยูโรต่อรอบจากการระเหยเพียง 1 – 2% ทางแก้คือลดอุณหภูมิเร็ว รักษาความชื้นสูง และใช้บรรจุภัณฑ์ช่วยกักความชื้น

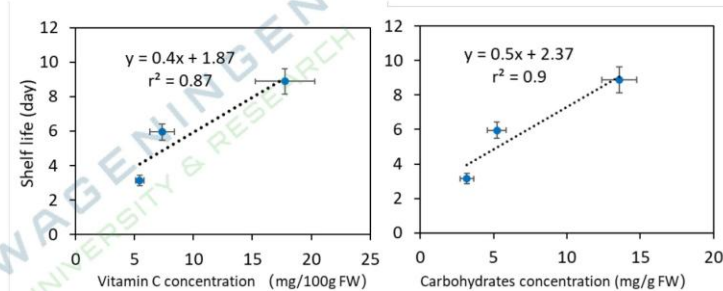
13.2 บรรจุภัณฑ์ การสุก และพลังของแสง

ผลไม้แบ่งเป็นกลุ่ม Climacteric (มะเขือเทศ กล้วยหอม) ที่สุกต่อได้ด้วยเอทิลินแม้เก็บเกี่ยวตอนยังไม่สุก กับกลุ่ม Non-climacteric (องุ่น สตรอว์เบอร์รี) ที่ต้องสุกคาต้นเท่านั้น การเก็บเกี่ยวก่อนสุกเต็มที่ช่วยเรื่องการขนส่งแต่แลกมาด้วยรสชาติที่ด้อยลง และความเสียหายทางกลแม้เพียงเล็กน้อย (เช่น แอปเปิลตกพื้น) ก็เร่งการเสื่อมคุณภาพได้รุนแรง มาตรการกักกันพืชด้วยความร้อนก่อนส่งออกก็เป็นความเครียดอีกรูปแบบที่ต้องบริหารอย่างสมดุล

งานวิจัยใหม่ชี้ว่าการปรับ "แสง" ช่วงสั้นๆ ก่อนเก็บเกี่ยวเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการได้โดยไม่ต้องลงทุนแสงตลอดฤดู เช่น สตรอว์เบอร์รีที่ขาดน้ำร่วมกับตัดดอกมีวิตามินซีสูงขึ้น และที่ชัดเจนที่สุดคือผักสลัดที่ได้รับแสงจัดเฉพาะสัปดาห์สุดท้ายก่อนเก็บเกี่ยว เก็บรักษาได้นานกว่าอย่างมีนัยสำคัญ เพราะสะสมวิตามินซีและคาร์โบไฮเดรตได้มากกว่า

Lettuce

- Longer shelf life is correlated with
- higher carbohydrates
- higher vitamin C



Leo Marcelis



Ernst Woltering



Qianxixi Min

From: Min, Q., Marcelis, L.F.M., Nicole, C.C.S., and Woltering, E.J. (2021). Front. Plant Sci. 12.

ภาพที่ 38 อายุการเก็บรักษาของผักสลัดสัมพันธ์เชิงเส้นกับปริมาณวิตามินซีและคาร์โบไฮเดรตที่สะสมจากแสงจัดในสัปดาห์สุดท้าย

ส่วนแสงสีน้ำเงินระหว่างเก็บรักษาช่วยควบคุมจังหวะเปลี่ยนสีผิวพริกหวาน และแสงฟาร์เรด ก่อนเก็บเกี่ยวช่วยลดอาการสะกดชิลลิ่งในมะเขือเทศได้ชัดเจน นอกจากนี้แคลเซียมคลอไรด์ช่วยลดเนื้อนุ่มและ สาร 1-MCP ช่วยชะลอการสุก และแสง UV ช่วยฆ่าเชื้อราในห้องเย็น

13.3 เศรษฐศาสตร์และความยั่งยืนของการจัดการโรงเรือน

Dr. Hemming เน้นว่า "การจัดการที่ดีที่สุด" ไม่มีสูตรตายตัว ขึ้นอยู่กับต้นทุน-ผลตอบแทนของแต่ละพื้นที่ ตามกฎปัจจัยจำกัด ปัจจัยการเจริญเติบโต (แสง CO₂ อุณหภูมิ น้ำ ธาตุอาหาร) ทดแทนกันไม่ได้ และห้ามลอกแบบโรงเรือนเนเธอร์แลนด์ไปใช้ที่อื่นโดยไม่พิจารณาภูมิอากาศท้องถิ่น เขตร้อนอย่างไทยมีปัจจัยจำกัดคือความร้อน ทางแก้ที่เหมาะสมคือการทำความเย็นแบบระเหยน้ำและการพรางแสงไม่ใช่ระบบทำความร้อน แบบยุโรป แบบจำลอง "Adaptive Greenhouse" ที่ทดสอบในโมร็อกโกพิสูจน์ว่าการปรับปรุงระบบระบายอากาศและเพิ่มฉนวนกันพลังงาน (ลงทุนต่ำ) เพิ่มผลผลิตมะเขือเทศจาก 23.8 เป็น 37.1 กก./ตร.ม. ได้โดยไม่ต้องลงทุนเทคโนโลยีแพงก่อน

การบริหาร CO₂ ต้องควบคุมอัตราการระบายอากาศไปพร้อมกัน ไม่เช่นนั้น CO₂ ที่เสริมจะรั่ว ออกเปล่าประโยชน์ และมูลค่าทางเศรษฐกิจของ CO₂ ขึ้นกับว่านำไปเลี้ยงอะไร

What is the value of assimilation?

Example: tomato

- 1 kg of assimilated CO₂:
 - x 0.68 (CO₂ → CH₂O)
 - x about 0.7 (fixation efficiency)
- → 500 g total crop dry matter
 - → 325 g fruit dry matter (harvest index)
 - → 5 kg fresh yield (d.m. 6%)
- ~ 5 € income per kg CO₂ assimilated
(1kg fresh yield tomato ~ €1)



31

ภาพที่ 39 แสดง CO₂ 1 กิโลกรัมที่พืชดูดซับ แปลงเป็นรายได้ได้ต่างกันมาก ขึ้นอยู่กับว่านำไปเลี้ยงผลผลิตหรือต้นกล้า

ตัวอย่างที่คาดไม่ถึง คือ CO₂ 1 กก. ที่เลี้ยงผลมะเขือเทศสร้างรายได้ราว 5 ยูโร แต่หากเลี้ยงต้นกล้าแทนจะได้ถึง 350 ยูโร สูงกว่าเกือบ 70 เท่า สะท้อนว่าการวิเคราะห์มูลค่าต่อหน่วยทรัพยากรสำคัญกว่าปริมาณผลผลิตเพียงอย่างเดียว เมื่อเปรียบเทียบระบบ CEA ทั้ง 4 ระดับ ตั้งแต่โรงเรือนทั่วไปถึงฟาร์มแนวตั้งไฮโดรโปนิกส์พบว่าเทคโนโลยีสูงประหยัดน้ำและสารเคมีมากกว่า แต่ใช้พลังงานและเงินลงทุนสูงกว่ามากเกณฑ์ตัดสินใจที่สำคัญคือระยะเวลาคืนทุน (ROI) ซึ่งไม่มีตัวเลขตายตัว นักลงทุนส่วนใหญ่คาดหวัง 3 – 10 ปี แม้เป้าหมาย 3 ปี มักขยายเป็น 5 – 6 ปีจริง

13.4 เทคโนโลยีตรวจสอบคุณภาพและบทเรียนปิดท้าย

เทคโนโลยีไม่ทำลายผลผลิตอย่าง Hyperspectral Imaging ตรวจจับความผิดปกติภายในได้โดยไม่ต้องผ่าผล ส่วนการวัดคลื่นเสียงสะท้อนช่วยคัดความแตงตึงได้รวดเร็ว และการวัดน้ำตาล-มวลแห้งสามารถทำนายอายุการเก็บรักษาล่วงหน้าได้ ประเด็นที่กระตุ้นความคิดคือ ความสูญเสียอาหารในประเทศพัฒนาแล้วมาจากพฤติกรรมผู้บริโภค ขณะที่ประเทศกำลังพัฒนามีปัญหาที่โครงสร้างพื้นฐานและห่วงโซ่ความเย็น ทั้งที่การลงทุนเกษตรโลกทุ่มไปกับการผลิตถึง 95% เหลือเพียง 5% สำหรับเทคโนโลยีหลังเก็บเกี่ยว ซึ่งถือเป็น "ผลไม้ที่ห้อยต่ำที่สุด" ที่ยังไม่ถูกใช้ประโยชน์ ด้านพลังงาน การใช้โซลาร์เซลล์ป้อนไฟเสริมทั้งหมดไม่คุ้มค่าพื้นที่ทางเลือกที่ดีกว่าคือดึงไฟจากสายส่งและบริหารต้นทุนผ่านการปรับเวลาใช้ไฟตามราคาไฟฟ้าแบบไดนามิก

เมื่อถึงช่วงปิดท้ายของการฝึกอบรมทั้งโครงการ บทเรียนจากทั้งสี่หัวข้อในวันนี้ตอกย้ำข้อความเดียวกัน คือ คุณภาพ เศรษฐศาสตร์ และความยั่งยืนล้วนเชื่อมโยงกันตลอดสายโซ่ ตั้งแต่แปลงปลูกจนถึงมือผู้บริโภค และไม่มีสูตรสำเร็จใดที่ใช้ได้กับทุกพื้นที่ - ผู้ปลูกต้องวิเคราะห์ตัวเลขจริงของตนเองเสมอ ก่อนตัดสินใจลงทุนหรือเปลี่ยนวิธีจัดการ นี่คือนิทรรศการของการเดินทางเรียนรู้ตลอดหลักสูตร Summer School Greenhouse Horticulture ที่ Wageningen University & Research

13.5 ข้อคิดสำคัญที่นำไปใช้ได้จริง

ผลผลิตหลังเก็บเกี่ยว "ยังมีชีวิต" การจัดการคือการชะลอการหายใจและการสูญเสียน้ำให้พอเหมาะ ไม่ใช่แค่ป้องกันการเน่าเสีย ปรับแสงเฉพาะช่วงสั้น ๆ ก่อนหรือหลังเก็บเกี่ยว (เช่น สับดาห้สุดท้ายของผักสลัด) คุ่มค่ากว่าการให้แสงเข้มตลอดฤดูปลูก ก่อนลงทุนเทคโนโลยีแพง ให้ปรับปรุงสิ่งที่ลงทุนน้อยที่สุดก่อน (ระบายอากาศ ฉากกันพลังงาน) และตัดสินใจด้วยระยะคืนทุนจริง ไม่ใช่ตามแบบจากประเทศอื่น การลงทุน ด้านเทคโนโลยีหลังการเก็บเกี่ยวและห่วงโซ่ความเย็นมักให้ผลตอบแทนสูงแต่ถูกมองข้าม ทั้งที่เป็น "ผลไม้ที่ห่วยต่ำที่สุด" ของอุตสาหกรรมเกษตร

เอกสารอ้างอิง

- Delphy B.V. (2020). Illuminated tomato cultivation trial - relative humidity and production quality.
- Esteban Baeza ภาพถ่ายดาวเทียมเปรียบเทียบการขยายตัวของโรงเรือนพลาสติกในอัลเมเรีย สเปน (1974-2000).
- Fanasca, S. et al. (2007). Changes in antioxidant content of tomato fruits in response to cultivar and nutrient solution composition.
- Grieve, C.M., Grattan, S.R., Maas, E.V. (2012). Plant salt tolerance. In: Agricultural Salinity Assessment and Management.
- Heuvelink, E., Hemming, S. & Marcelis, L.F.M. (2025). Circularity in greenhouse horticulture. Horticulture, Science & Biotechnology.
- Higashide, T. & Heuvelink, E. (2009). Physiological and morphological changes over the past 50 years in yield components in tomato. (ที่มาของข้อมูลสำหรับการปรับปรุงพันธุ์ต่อผลผลิต)
- ISO 13468 - International standard for measuring total luminous transmittance of transparent materials (Transvision instrument).
- Ji, Y. et al. (2020). Far-red light and fruit sink strength in tomato. New Phytologist. DOI: 10.1111/nph.16805
- KASSIM online greenhouse simulation tool - digigreenhouse.wur.nl, Wageningen University & Research.
- Katzin, D. et al. KASPRO greenhouse energy and crop growth simulation model, Wageningen University & Research.
- Kirkby, E. (2012). Introduction, definition and classification of nutrients, citing Epstein, E. KWIN 2026 - Kwantitatieve Informatie (ข้อมูลเชิงปริมาณ) ต้นทุนการผลิตพืชโรงเรือนเนเธอร์แลนด์.
- Li, T. et al. (2015). Differences in potential growth rate among tomato cultivars and implications for source-sink ratio during fruit development.
- Li, Y., Stanghellini, C. (2001). Analysis of the effect of EC and potential transpiration on vegetative growth of tomato.
- Marschner, H. Mineral Nutrition of Higher Plants — biochemical classification system of essential elements.
- Messelink, G.J. et al. (2011). Disruption of aphid control by lacewing larvae when two pest species co-occur. Biological Control.
- Messelink, G.J. et al. (2013). Effects of mixed diets and intraguild predation on natural enemies in combined biological control programmes. BioControl.

- Messelink, G.J. et al. (2014). Approaches to conserving natural enemy populations in greenhouse crops: current methods and future prospects. *BioControl* 59(4), 377-393.
- Messelink, G.J., Janssen, A. (2014). Increased control of thrips and aphids in greenhouses with two species of generalist predatory bugs involved in intraguild predation. *Biological Control*.
- Michel, J.C. et al. (2017). Wettability and preferential water flow in peat-based growing media. NEN 2625 - Dutch standard for measurement of light scatter (haze) of greenhouse covering materials.
- NEN 2675+C1:2018 - Dutch standard for greenhouse glass quality and light transmission requirements.
- Rivas, A., Kang, C. & Heuvelink, E. (2021). Interlighting effects in blackberry. *Frontiers in Plant Science*.
- Sonneveld, C. & Voogt, W. (2009). *Plant Nutrition of Greenhouse Crops*.
- Sonneveld, C. (2000). Effects of salinity on substrate grown vegetables and ornamentals in greenhouse horticulture.
- Stanghellini, C. ข้อมูลเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้น้ำและศักยภาพผลผลิตตามระดับเทคโนโลยีโรงเรือน, Wageningen University & Research.
- Van Delden, S.H. et al. (2020). Nutrient solution formulations for hydroponic crop production — mol-ratio comparison tables.
- Van der Velde, H. & Smit, P. (2020). ข้อมูลแนวโน้มการใช้พลังงานสัมพัทธ์ของอุตสาหกรรมโรงเรือนเนเธอร์แลนด์ ปี 1990-2019.
- Van Ieperen, W. Effects of day/night EC steering on blossom-end rot incidence and fruit quality in tomato.
- Van Ieperen, W.; SharathKumar, M. et al. (2021, 2024). Dynamic lighting and flowering control in chrysanthemum and other short-day species. *Frontiers in Plant Science; Scientia Horticulturae*.
- Velez-Ramirez, A.I. et al. (2014). A single locus confers tolerance to continuous light and allows substantial yield increase in tomato. *Nature Communications*.

ภาคผนวก

ภาพกิจกรรมการฝึกอบรมหลักสูตร Summer School Greenhouse Horticulture
ของนางพัชรวดี เอ็นมาก นักวิชาการส่งเสริมการเกษตรชำนาญการ

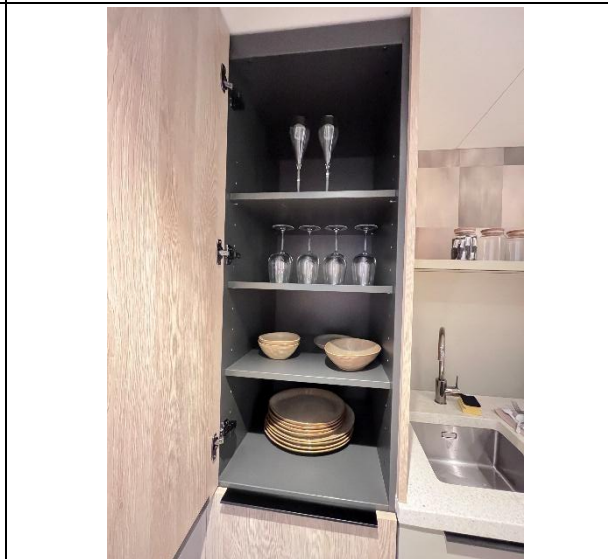
1. ภาพอาคารอบรม และภาพรวมวันแรก



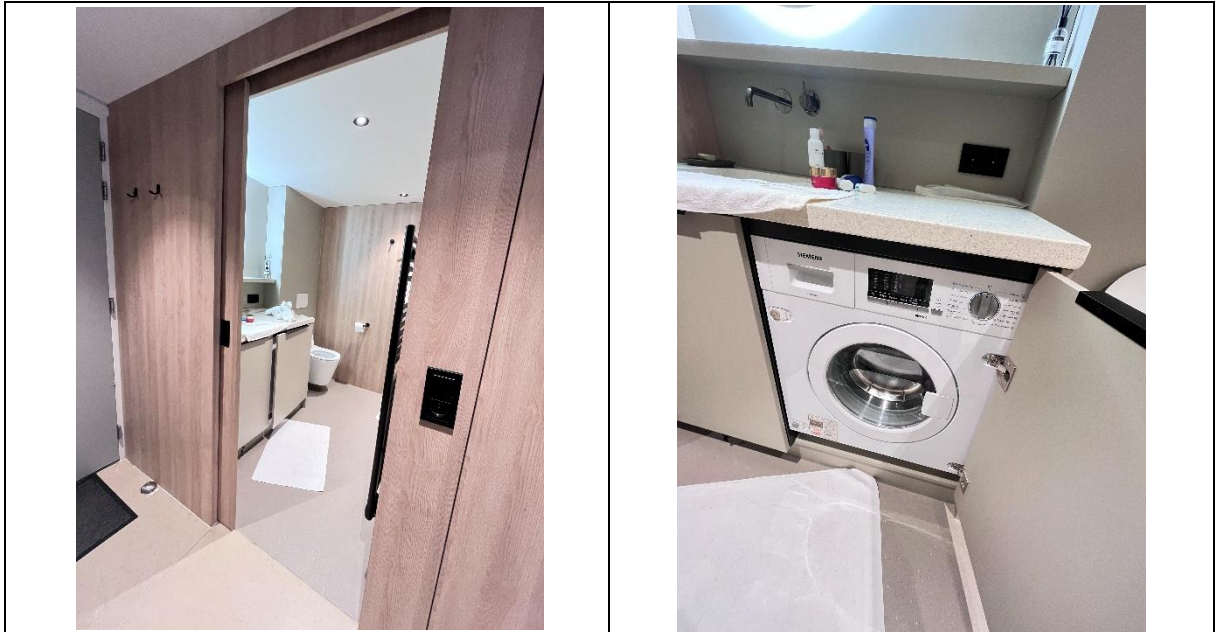
2. บรรยากาศภายในมหาวิทยาลัย Wageningen University & Research เมือง Wageningen



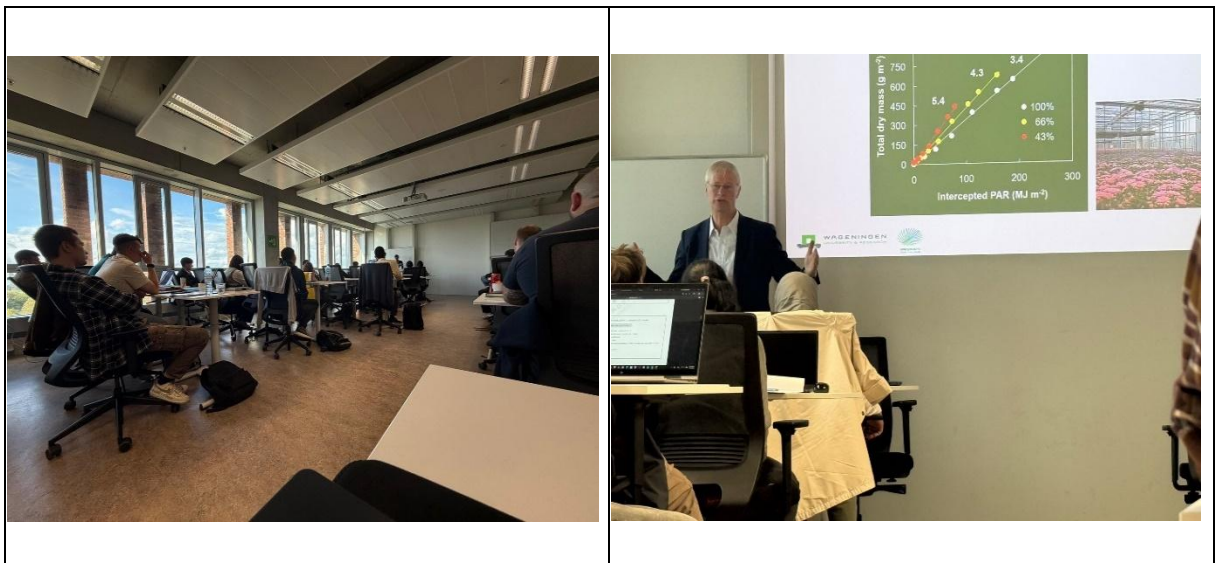
3. ภาพที่พัก เมือง Ede



3. ภาพที่พัก เมือง Ede (ต่อ)



4. ภาพอบรม

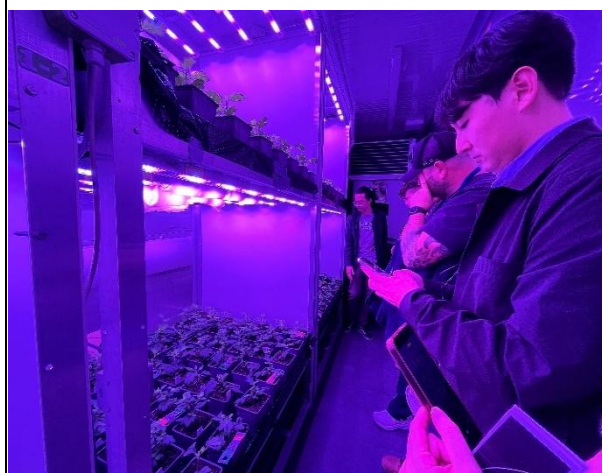


4. ภาพอบรม (ต่อ)

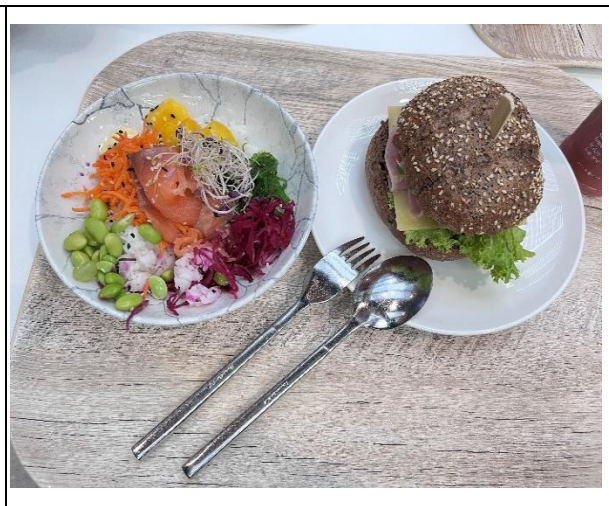
Net radiation: example

- Crop emits to cover:
 $\sigma \epsilon_1 \epsilon_2 T^4 = \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \cdot (293)^4$
- Cover emits to crop:
 $\sigma \epsilon_1 \epsilon_2 T^4 = \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \cdot (283)^4$
- Net radiation from crop to cover:
 $\sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \cdot (293)^4 - \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \cdot (283)^4 =$
 $= \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 (293^4 - 283^4) =$
 $\approx 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 0.9 \cdot 9.6 \cdot 10^8 =$
 $\approx 4.9 \cdot 10^2 \text{ W m}^{-2}$

10°C = 283 K
20°C = 293 K



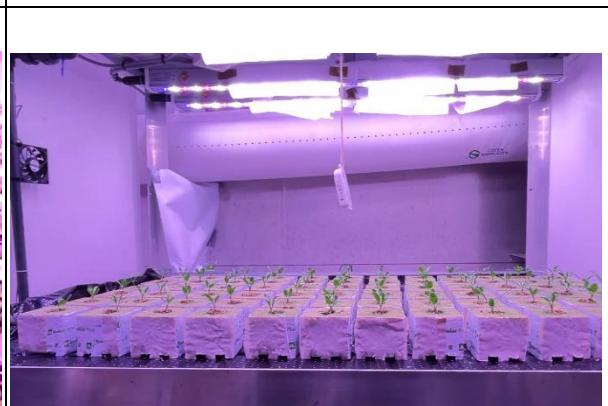
5. ภาพอาคารรับประทานอาหารกลางวัน



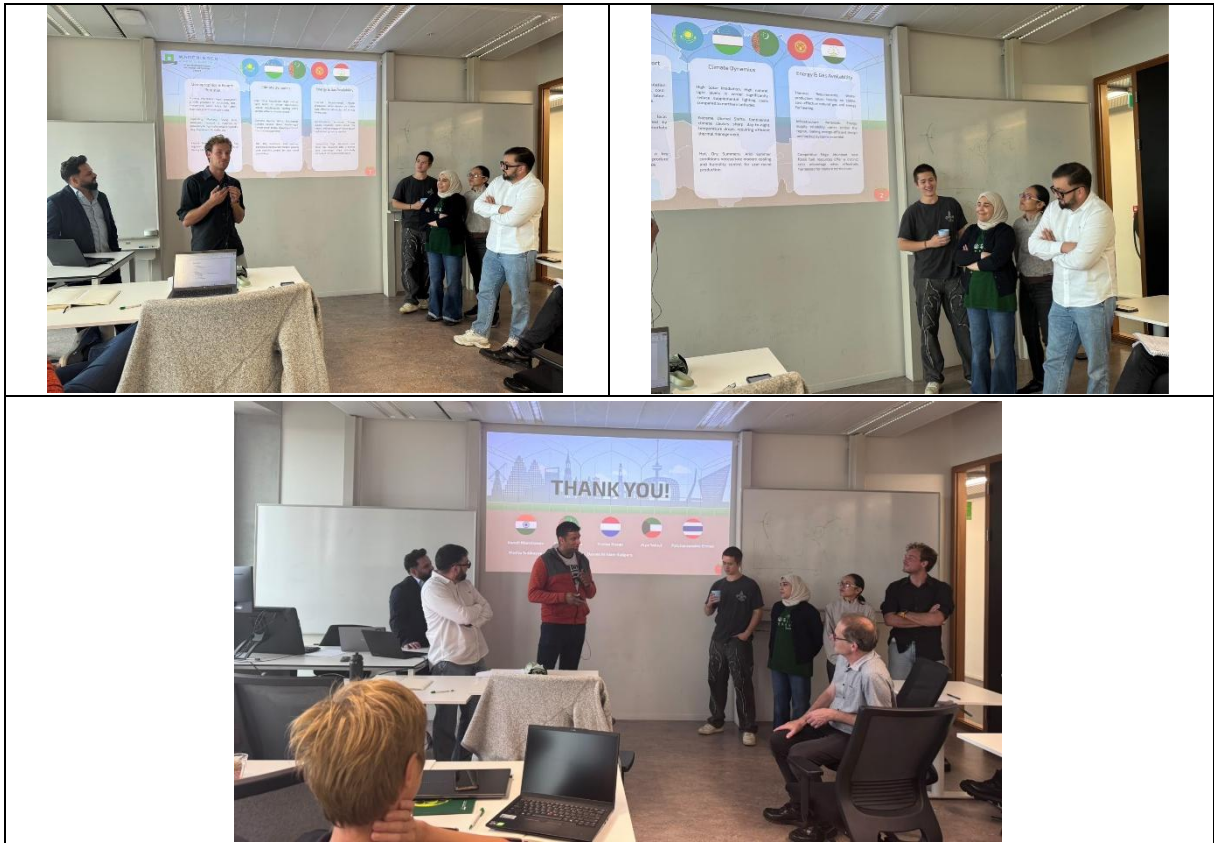
6. ภาพศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประเทศเบลเยียม ทั้งหมด 3 แห่ง



7. ศึกษาดูงานโรงงานผลิตพืชด้วย Greenhouse ประทศเนเธอร์แลนด์ จำนวน 3 แห่ง



8. ภาพนำเสนอผลงานกลุ่ม



9. ภาพรับใบประกาศ

