



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร)

ปริญญา

เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร

โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลมะเขือเทศ

Study of Water Transport to Tomato Fruit

นามผู้วิจัย นางสาวสุขโฉม ฉ นคร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์สุนทรีย์ ยิงษ์ชาลย์, Ph.D.)

ประธานสาขาวิชา

(รองศาสตราจารย์พงศ์เทพ อัครธนกุล, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สิงสิงห์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลมะเขือเทศ

Study of Water Transport to Tomato Fruit

โดย

นางสาวสุโขม ฉ นคร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร)

พ. ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สุข โฉม ฉ นคร 2554: การศึกษาการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลมะเขือเทศ
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร) สาขาเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร
โครงการสหวิทยาการระดับบัณฑิตศึกษา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ศาสตราจารย์สุนทรียังษ์ชวัลย์, Ph.D. 75 หน้า

ศึกษาการลำเลียงของน้ำเข้าสู่ผลมะเขือเทศในรอบวัน โดยวัดอัตราน้ำไหลเข้าก้านผล อัตราน้ำไหลออก
โดยวัดเป็นอัตราการคายน้ำ และการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผล วัดเป็น 2 วัน ครั้งแรกเป็นผลอายุ 14, 21
และ 28 วัน ครั้งที่สองเป็นผลอายุ 35, 42 และ 35 วันหลังดอกบาน

สภาพอากาศทั้ง 2 วันมีแสงแดดดี และแรงดึงระเหยน้ำของอากาศมีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าสูงสุดอยู่ที่
3.0-3.4 kPa ในผลอ่อนช่วงอายุ 14-21 วัน ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลเกิดในช่วงกลางคืนมากกว่าช่วงกลางวัน
หลังจากนั้นการไหลเข้าเกิดเพิ่มขึ้นมากในช่วงกลางวัน จนผลมีอายุ 35 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ผลมะเขือเทศเริ่มเกิดสี
ชมพูในขั้นตอนของกระบวนการสุก ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลมีค่าสูงสุดคิดเป็น 12.8% ของมวลผลสดเริ่มต้น ผลที่
อายุมากกว่านี้มีปริมาณน้ำไหลเข้าลดลงจนเหลือเพียง 1.3% ขณะผลมีอายุ 49 วัน อัตราคายน้ำของผลถูกควบคุม
โดยแรงดึงคายน้ำ ($VPD_{fruit-air}$) โดยตรง ในขณะที่ค่าน้ำไหลของผิวผลมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งวัน ผลมะเขือเทศ
อ่อนในช่วงอายุ 14-21 วัน มีอัตราคายน้ำที่สูงกว่าเพราะเป็นช่วงที่ค่าน้ำไหลของผิวผลมีระดับสูงกว่าของผลที่มีอายุ
มากกว่าอย่างชัดเจน ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากผลในช่วงผลอ่อนมีระดับสูงอยู่ที่ 16-18% ของมวลผล แล้วลดลง
เหลือคงที่อยู่ที่ 6% ในผลอายุมากขึ้น ผลมะเขือเทศมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลงในช่วงกลางวัน 8-15 น. และมี
การเพิ่มขนาดในช่วงเวลาออกเหนือจากนี้ ผลอายุ 14 วัน มีการเพิ่มขนาดของผลหรือเพิ่มปริมาณน้ำในผลมาก
ที่สุดอยู่ที่ 6.2% ของมวลผล ในขณะที่ผลมะเขือเทศอายุ 42-49 วัน มีปริมาณน้ำในผลลดลงในรอบวัน โดยสรุป
ผลมะเขือเทศมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้นสุทธิจนถึงอายุผล 35 วัน ซึ่งสะท้อนว่าปริมาณน้ำไหลเข้ามีมากกว่าปริมาณ
น้ำไหลออก หลังจากนั้นผลมีขนาดลดลงเนื่องจากในช่วงหลังปริมาณน้ำไหลเข้าผลลดลงจนต่ำกว่าปริมาณน้ำ
ไหลออกจากผล

ลายมือชื่อนิติ

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sukchom Na nakorn 2011: Study of Water Transport to Tomato Fruit.

Master of Science (Agricultural Biotechnology), Major Field: Agricultural Biotechnology,

Interdisciplinary Graduate Program. Thesis Advisor:

Professor Suntaree Yingjajaval, Ph.D. 75 pages.

Movement of water into and out of tomato fruit was studied. The diurnal inflow (sap flow), the outflow (transpiration) and the change in fruit diameter were followed on two days. Three set of fruit aging 14, 21 and 28 days were measured concurrently, then followed by another three set of fruits aging 35, 42 and 49 days.

Both days showed similar environmental conditions, having strong sun with maximum air vapor pressure of 3.0-3.4 kPa. Young fruit of 14-21 days old showed higher rate of water inflow during night time, after which the higher inflow rate occurred during daytime. At the age of 35 days (beginning of ripening as pink color appeared), the inflow reached the maximum accounting for 12.8% of the initial fruit mass. At the end of 49 days, the inflow reduced to 1.3%. Fruit transpiration was dictated by the fruit to air vapor pressure deficit as the cuticular conductance remained fairly constant. Young fruit (age 14-21 days) had higher transpiration rate due predominantly to the much higher level of cuticular conductance. The outflow was in the range of 16-18% of initial fruit mass and reduced to a stable 6% at older age. The shrinkage of fruit took place during 8-15 h., and having expansion during the rest of the time. The largest change in diameter, namely the largest increase in fruit water content occurred in 14 day-old tomato amounting to 6.2% of initial fruit mass. Ripening fruit aging 42-49 days had a net loss of water over one day period. Summarily, the tomato fruit expanded continuously and reached the maximum in size at the age of 35 days indicating a higher amount of water inflow than the outflow and the reverse was true at the older stage of fruit development, fruit took place during 8-15 h., and having expansion during the rest of the time. The largest change in diameter, namely the largest increase in fruit water content occurred in 14 day-old tomato amounting to 6.2% of initial fruit mass. Ripening fruit aging 42-49 days had a net loss of water over one day period. Summarily, the tomato fruit expanded continuously and reached the maximum in size at the age of 35 days indicating a higher amount of water inflow than the outflow and the reverse was true at the older stage of fruit development.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร. สุนทรีย ชัยชวัลย์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้โอกาสได้เข้าศึกษาเรียนรู้ในสิ่งใหม่ และกราบขอบพระคุณสำหรับความ
เมตตาสั่งสอน ให้ความแนะนำตักเตือน ชัดเจนจิตใจและให้แง่คิดต่างๆ ทั้งในการศึกษาวิจัยและ
การดำเนินชีวิต

ขอขอบคุณรุ่นพี่สำหรับความรู้ คำแนะนำ ขอบใจเพื่อนๆ และน้องห้องปฏิบัติการชีวฟิสิกส์
ของพี่ทุกคนที่ให้การช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้งประสบการณ์และความรู้สึกดีๆ ที่มี
ให้กันตลอดมา สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ พ่อ แม่และพี่ๆ ทั้งสามคน ที่ให้ความรัก ความห่วงใย
และกำลังใจเสมอมา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร
สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการ
การอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ

สุขโสม ณ นคร

ตุลาคม 2554

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	8
ผลและวิจารณ์	20
สรุป	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	70
ภาคผนวก	73
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	76

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ค่าเฉลี่ยหรือค่ารวมของข้อมูลอากาศสำหรับช่วงที่ทดลองระหว่างวันที่ 16 สิงหาคมถึง 30 กันยายน 2552 คือ เนื้อรวมเปลือกของผล (flesh)	21
2	ค่าเฉลี่ยสีผิวผลตามระบบ $L^* a^* b$ color space ของผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ เมื่อ L^* คือค่าความสว่าง a^* และ b^* คือค่าสัมประสิทธิ์ของสี จะบ่งบอกถึงทิศทางของสี คือหาก a^* มีค่าเป็นบวกหมายถึงอยู่ในทิศทางของสีแดง, a^* มีค่าเป็นลบ หมายถึงอยู่ในทิศทางของสีเขียว, b^* มีค่าเป็นบวกหมายถึงอยู่ในทิศทางของสีเหลือง และ b^* มีค่าเป็นลบหมายถึงอยู่ในทิศทางของสีน้ำเงิน และ ΔE_{ab}^* คือค่าความแตกต่างของค่าสีของผิวผลมะเขือเทศกับสีอ้างอิง คือสีดำ รหัส 202-A ของ R. H. S. colour chart	24
3	มวลสด (Fresh mass, M_f , g) และมวลแห้ง (Dry mass, M_d , g) ของผลมะเขือเทศ	31
4	ค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุด ต่ำสุดในรอบวันของสภาพอากาศและพลังงานกำกับก้อนดิน (Ψ_m) ที่ความลึกสามระดับของวันที่ 17 สิงหาคม และ 14 กันยายน 2552	35
5	การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศในช่วง 3 เวลา ในรอบ 24 ชั่วโมง ของผลมะเขือเทศ 6 ช่วงอายุ แต่ละช่วงอายุเป็นคนละผลกัน	38
6	ปริมาณน้ำที่เพิ่มในผลมะเขือเทศใน 3 ช่วงเวลา ในรอบ 24 ชั่วโมง ของผลมะเขือเทศ 6 ช่วงอายุ	39
7	พารามิเตอร์การแลกเปลี่ยนแก๊สของผลมะเขือเทศที่วัดได้ในรอบวัน ได้แก่ อัตราการตรึง CO_2 สุทธิ (A , $\mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$) อัตราคายน้ำ (E , $mmol H_2O m^{-2} s^{-1}$) ค่าน้ำไหลของผิวผล (g_c , $mmol H_2O m^{-2} s^{-1}$) อุณหภูมิผิวผล (T_{fruit} , C) อุณหภูมิอากาศ (T_{air}) แรงดึงคายน้ำ ($VPD_{fruit-air}$, kPa) ความเข้มแสง (PPF, $\mu mol m^{-2} s^{-1}$) และพื้นที่ผิวผล (surface area, cm^2) ผลแต่ละช่วงอายุเป็นคนละผลกัน	42
8	ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง เทียบเป็นร้อยละของมวลผลสดเริ่มต้น ข้อมูลช่วงเวลา 8-18 น. เป็นข้อมูลทั้งวันที่วัดได้จริง ข้อมูลเวลาอื่นได้จากการประมาณการ	46
9	ปริมาณน้ำรวมที่ไหลเข้าผ่านก้านผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง	49

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สภาพอากาศเฉลี่ย (average) ค่าสูงสุด (max) และต่ำสุด (min) ในช่วงเวลากลางวัน และกลางคืน และปริมาณน้ำฝนระหว่างวันที่ 12 สิงหาคม ถึง 30 กันยายน 2552 a) อุณหภูมิกลางวัน b) อุณหภูมิกลางคืน c) ความชื้นสัมพัทธ์กลางวัน d) ความชื้นสัมพัทธ์กลางคืน e) แรงดึงระเหยน้ำกลางวัน f) แรงดึงระเหยน้ำกลางคืน g) ความเข้มแสง (PPF) h) ปริมาณน้ำฝน	22
2	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ และค่าเฉลี่ยสีผิว *a ตามระบบ L*a*b color space ซึ่งอยู่ในทิศทางของสีเขียวเมื่อค่าเป็นลบ (-a*) และอยู่ในทิศทางของสีแดงเมื่อค่าเป็นบวก (+a*) โดย I, II และ III คือ ระยะการเจริญเติบโตของผลมะเขือเทศสามส่วน 1 และ 2 คือ ผลมะเขือเทศลูกที่หนึ่ง และลูกที่สอง	23
3	รูปร่างและสีของผลมะเขือเทศช่วงอายุ 7-49 วัน	24
4	ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่วัดได้จากสารละลายน้ำคั้นรวมของผลมะเขือเทศอายุ 7-49 วัน a) ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย b) ดรรชนีบรีกซ์ c) ความเป็นกรดต่าง d) ค่านำไฟฟ้า (แต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจาก 13 ผล) เส้นตั้ง I เป็นค่า standard deviation ในภาพแสดงค่าดรรชนีสีผิว a* เพื่อแสดงพัฒนาการของการสุกของผล (-a* เป็นสีเขียว, +a* เป็นสีแดง) และ e) ค่าความสัมพัทธ์ระหว่างดรรชนีบรีกซ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย	27
5	ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่วัดได้จากสารละลายน้ำคั้นของใบและผลมะเขือเทศอายุ 7-49 วัน a) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด b) ดรรชนีบรีกซ์ c) ความเป็นกรดต่าง d) ค่านำไฟฟ้า (แต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจาก 13 ผล) เส้นตั้ง I เป็นค่า standard deviation โดย SL คือ ใบติดผล (subtending leaf of fruit), P คือ ก้านผล (pedicel) และ F คือ เนื้อรวมเปลือกของผล (flesh)	29
6	ความสัมพัทธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาณน้ำในผลของมะเขือเทศ	30

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
7	สภาพแวดล้อมของวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และวันที่ 14 กันยายน 2552 ที่วัดรอบวันของผลมะเขือเทศ a) ความเข้มแสง (PPF) b) ความชื้นสัมพัทธ์ c) อุณหภูมิ d) ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) e) ค่าพลังงานกำกับก้อนดิน (matric potential) ที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm ของวันที่ 17 สิงหาคม 2552 f) พลังงานกำกับก้อนดิน (matric potential) ที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm ของวันที่ 14 กันยายน 2552	34
8	การขยายขนาดผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง ที่อายุผล 14-49 วัน แสดงควบคู่กับค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) ของการวัดผลมะเขือเทศ 2 ครั้ง ในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และ 14 กันยายน 2552 ซึ่งในแต่ละช่วงอายุเป็นคนละผลกัน (F หมายถึงผล และ 14-49 หมายถึงอายุผลเป็นวัน)	37
9	การเปลี่ยนแปลงของมวลน้ำในผลมะเขือเทศในช่วง 0-8, 8-15, 15-24 และรอบ 2 ชั่วโมง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของมวลผลเริ่มต้น	39
10	การแลกเปลี่ยนแก๊สในรอบวันของผลมะเขือเทศแต่ละอายุ a) แรงดึงการคายน้ำ b) อัตราคายน้ำ c) ค่าน้ำไหลปากใบของผิวผล และ d) อัตราการตรึง CO_2 สุทธิ (F หมายถึงผล และ 14-49 หมายถึงอายุผลเป็นวัน เป็นข้อมูลวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และ ผลอายุ 35-49 วัน เป็นข้อมูลวันที่ 14 กันยายน 2552	45
11	อัตราไหลเข้าก้านช่อผลมะเขือเทศในรอบวันของผลอายุต่างๆ แต่ละภาพเป็นการวัดคนละผลกัน แสดงควบคู่กับค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) เพื่อเป็นระดับอ้างอิงของสภาพความแห้งของอากาศ (F คือ ผล, 14-49 คือ อายุผลเป็นวัน ภาพ a-c เป็นข้อมูลวันที่ 17 สิงหาคม และ ภาพที่ d-f เป็นข้อมูลวันที่ 14 กันยายน 2552)	48

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	สัดส่วนปริมาณน้ำเทียบกับมวลผลสดเริ่มต้นที่ไหลเข้า (inflow) ไหลออก (outflow) และปริมาณน้ำของผลมะเขือเทศ (fruit water content) ที่เปลี่ยนแปลงในรอบ 24 ชั่วโมง โดยแต่ละจุดเป็นค่าของคนละผล	51
13	ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ (อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน วัดค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัดในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)	56
14	ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ (อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน วัดค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัดในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)	57
15	ค่าพลังงานความเข้มข้นของตัวถูกละลายของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ (อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน วัดค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัดในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)	58
16	ค่าพลังงานความเข้มข้นของตัวถูกละลายของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ (อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน วัดค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัดในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)	59

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	ค่าเฉลี่ยในรอบวันของ a) พลังงานศักย์รวมของน้ำ b) พลังงานความเข้มข้นของน้ำ c) พลังงานความดันของน้ำ และ d) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายรวม (ของใบติดผลและของผลมะเขือเทศ ใบที่ติดกับผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วันและเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุดและอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา โดย SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านผล F คือ เนื้อผล ผลอายุ 7-28 วันหลังดอกบาน วัดค่าในวันที่ 17 กันยายน 2552 และผลอายุ 35-49 วันหลังดอกบาน วัดค่าในวันที่ 14 สิงหาคม 2552 (I, II และ III หมายถึงระยะในการเจริญเติบโตของผล)	62
18	ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานศักย์รวม ค่าพลังงานความเข้มข้นและพลังงานความดันของน้ำของใบติดผลและเนื้อผลมะเขือเทศ	65
19	ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานศักย์ของน้ำระหว่างใบติดผลและเนื้อผลมะเขือเทศ โดย total คือ total water potential, osmotic คือ osmotic potential และ pressure คือ pressure potential	66
20	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราคายน้ำ (E) กับ a) ค่าแรงดึงคายน้ำ b) ค่าน้ำไหลปากใบของผิวผลมะเขือเทศ	67

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

	คำอธิบาย	หน่วย
+a*	ค่าที่อยู่ในทิศทางของสีแดง (+a* is the red direction)	
-a*	ค่าที่อยู่ในทิศทางของสีเขียว (-a* is the green direction)	
+b*	ค่าที่อยู่ในทิศทางของสีเหลือง (+b* is the yellow direction)	
-b*	ค่าที่อยู่ในทิศทางของสีน้ำเงิน (-b* is the blue direction)	
Cs	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายรวม (total solute concentration)	mmol kg ⁻¹
E	อัตราการคายน้ำ (transpiration rate)	mmolH ₂ O m ⁻² s ⁻¹
g _s	ค่านำไหลปากใบ (stomatal conductance)	mmolH ₂ O m ⁻² s ⁻¹
g _t	ค่านำไหลรวม (total conductance)	mmolH ₂ O m ⁻² s ⁻¹
PPF	ความเข้มแสงในช่วงคลื่นที่พืชใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthetic photon flux, 400-700 nm)	μmolPPF m ⁻² s ⁻¹
RH _{air}	ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (air relative humidity)	%
SL	ใบติดผล (subtending leaf of fruit)	
T _{air}	อุณหภูมิอากาศ (air temperature)	celsius (C)
T _{fruit}	อุณหภูมิผล (leaf temperature)	celsius (C)
VPD _{air}	แรงดึงระเหยน้ำ (air vapor pressure deficit)	kPa
VPD _{fruit-air}	แรงดึงคายน้ำจากผลสู่อากาศ (fruit to air vapor pressure deficit)	kPa
Ψ _t	พลังงานศักย์รวมของน้ำ (total water potential)	kPa
Ψ _π	พลังงานความเข้มข้นของน้ำ (osmotic potential)	kPa
Ψ _p	พลังงานความดันของน้ำ (pressure potential)	kPa

การศึกษาการลำเลียงน้ำสู่ผลมะเขือเทศ

Study of Water Transport to Tomato Fruit

คำนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและเป็นแหล่งผลิตอาหารที่สำคัญของโลก พืชหลายชนิดมีมูลค่าทางเศรษฐกิจซึ่งทำรายได้เป็นจำนวนมาก ทำให้มีผลงานวิจัยทางวิชาการออกมาในหลาย ๆ ด้าน โดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นในด้านการปรับปรุงพันธุ์พืช การเพิ่มปริมาณและพัฒนาคุณภาพของผลผลิต แต่ข้อมูลในเชิงวิชาการเกี่ยวกับการศึกษาด้านสรีรวิทยาที่เกี่ยวกับการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลพืชซึ่งมีความสำคัญต่อการขยายขนาดของผลกลับมีน้อยมาก จึงทำให้ขาดองค์ความรู้และความเข้าใจในด้านนี้

การศึกษาการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลในครั้งนี้ ใช้ผลมะเขือเทศเป็นตัวแทนในการศึกษา เนื่องจากมะเขือเทศเป็นพืชอายุสั้นและมีผลจำนวนมาก ผลมีองค์ประกอบของน้ำเป็นส่วนใหญ่ถึงร้อยละ 90 – 95 เจิงมวล (Davies and Hobson, 1981; Ho *et al.*, 1987) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของปริมาตรของผลเป็นผลมาจากการสะสมน้ำ การเติบโตของผลเป็นการทำงานประสานกันระหว่างการลำเลียงน้ำจากระยะทางไกลผ่านท่อลำเลียงน้ำ (xylem) และการขนส่งตัวถูกละลาย (solute) ผ่านท่อลำเลียงอาหาร (phloem) และการลำเลียงระยะสั้นในระดับของเซลล์ (Matthews *et al.*, 2005) โดยเป็นผลต่างของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลกับปริมาณน้ำที่ไหลออกไปจากผล (Matthews, 2005) เส้นทางที่น้ำเคลื่อนที่มี 2 เส้นทาง คือ น้ำไหลเข้าผลผ่านทางก้านผล (pedicel) และน้ำไหลออกจากผลโดยการคายน้ำที่ผิวผล แต่ละเส้นทางที่น้ำมีการเคลื่อนที่นั้นต้องมีเกรเดียนต์ (gradient) ของค่าพลังงานศักย์น้ำ (Higuchi and Sakuratani., 2006) เป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการไหล ดังนั้นเพื่อให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลมะเขือเทศตลอดการเจริญเติบโต ตั้งแต่ผลอ่อนถึงผลแก่ จึงใช้ผลที่มีอายุ 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน โดยศึกษาอัตราไหลของน้ำเข้าผลในก้านผลและอัตราการคายน้ำของผลซึ่งเป็นอัตราไหลของน้ำออกจากผล ควบคู่ไปกับการเจริญเติบโตในด้านขยายขนาดของผลในรอบวัน เพื่อให้เข้าใจอิทธิพลของสภาพอากาศต่อการขยายขนาดของผลพร้อมทั้งศึกษาความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานศักย์น้ำต่าง ๆ ระหว่างใบติดผลกับผล ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนต่ออัตราการไหลของน้ำเข้าผล เพื่อทำให้ทราบถึงการลำเลียงน้ำเข้าจากใบมายังผลว่ามีความต่อเนื่องตลอดช่วงอายุของการเจริญเติบโตของผลหรือไม่

วัตถุประสงค์

1. เพื่อสร้างข้อมูลพื้นฐาน การขยายขนาดผล อัตราน้ำไหลเข้าผล อัตราไหลของน้ำออกจากผล และแรงขับเคลื่อนในการไหลของน้ำเข้าผล
2. เพื่อให้ทราบถึงความต่อเนื่องในการลำเลียงน้ำเข้าผลจากใบมายังผลในแต่ละอายุผล



การตรวจเอกสาร

ผลมะเขือเทศเป็นแบบ berry สร้างเมล็ดใน fleshy mesocarp โดยเมล็ดจะเกิดขึ้นบน placenta อยู่ในโพรง (pocket or locule) ผลประกอบด้วยโพรง จำนวน 2 – 15 locules ผลมีลักษณะ อวบ สด มีรูปร่าง ขนาด และสี แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ผิวของมะเขือเทศจะไม่มีสีผิว ส่วน ผลสีชมพู หรือเหลือง เกิดจากสีของเนื้อ ลักษณะรูปร่างแตกต่างกัน เช่น กลม (globe) กลมแป้น (oblate) กลมยาว (pear shape) หรือเป็นเหลี่ยม (square or blocky shape)

การเจริญเติบโตของผลมะเขือเทศ

การเจริญเติบโตและขนาดของผลมะเขือเทศถูกควบคุมด้วย 3 ปัจจัย คือ สภาพการดูแล สายพันธุ์ และอัตราการไหลของน้ำและสารประกอบคาร์บอนที่ส่งไปยังผล โดยอัตราการไหลของ น้ำและสารประกอบคาร์บอนจะเป็นปัจจัยที่สำคัญในการเปลี่ยนแปลงขนาดและคุณภาพของผล มะเขือเทศ ซึ่งผลมะเขือเทศมีการเจริญเติบโตแบ่งเป็น 3 ระยะ คือ

ระยะที่ 1 เป็นระยะที่เซลล์เกิดการแบ่งตัว (cell divisions) ซึ่งเป็นระยะของการแบ่งจำนวน เซลล์ โดยเซลล์ที่แบ่งจะเป็นตัวกำหนดการเจริญเติบโตของผล

ระยะที่ 2 เป็นช่วงที่เซลล์มีการขยายขนาด (cell elongation) ผลมะเขือเทศสามารถ เจริญเติบโตในระดับที่หลากหลาย โดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ และสภาพแวดล้อม ได้แก่ ความเข้มแสง ความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิ ความชื้น (Coom, 1976)

ระยะที่ 3 เป็นระยะที่ผลมีการเจริญเติบโตเต็มที่ (maturation) ซึ่งเป็นระยะที่มีการ เปลี่ยนแปลงสภาพทางชีวเคมี (Biochemical transformations) ผลมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอัตราการขนส่งน้ำตาลเข้าสู่ผล ทำให้ผลมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความเข้มข้น ของตัวถูกละลาย (solute) เพิ่มขึ้น และเป็นช่วงที่มีการเปลี่ยนสีของผล (veraison) ถือได้ว่าเป็นระยะ เริ่มต้นของการสุก ในส่วนของคุณภาพของผลมะเขือเทศจะขึ้นกับ 2 ปัจจัย คือ การเก็บสะสมน้ำ และสารประกอบคาร์บอนตลอดการพัฒนาของผลและ สภาพแวดล้อมในระหว่างที่ผลสุก (Guichard, 2001)

การลำเลียงน้ำเข้าสู่ผล

การเจริญเติบโตของขนาดผลเป็นผลมาจากการสะสมน้ำและจะเป็นการทำงานร่วมกันระหว่างการลำเลียงน้ำระยะทางไกล ซึ่งผ่านท่อลำเลียงอาหารและท่อลำเลียงน้ำ กับระยะทางสั้นที่ระดับเซลล์ ซึ่งผ่านทั้งเส้นทางซิมพลาสต์และอโพลาสต์ โดยที่ตามทางอโพลาสต์น้ำไหลไปตามผนังเซลล์ ขณะที่ตามทางซิมพลาสต์น้ำไหลผ่านไซโทซอลและทางช่องพลาสโมเดสมาต้าแต่สัดส่วนการไหลไปในแต่ละเส้นทางอาจจะมากน้อยแตกต่างกัน (Matthews, 2005) การเจริญเติบโตสุทธิของผล เป็นผลต่างของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลกับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผล เส้นทางที่น้ำไหลของผลมี 2 เส้นทาง คือ ผ่านทางก้านผล (pedicel) และการคายน้ำที่ผิวผล ซึ่งในแต่ละเส้นทางที่น้ำไหลนั้น ต้องมีเกรเดียนต์ (gradient) ของค่าพลังงานศักย์น้ำ (Higuchi *et al.*, 2006) เพื่อให้เกิดแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหล

เส้นทางที่น้ำไหลเข้าสู่ผล ($Flow_{in}$) ผ่านทางก้านผล มีแรงขับเคลื่อนในการไหล ซึ่งแสดงด้วยค่าความแตกต่างของค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบติดผล (Ψ_{leaf}) กับค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของก้านผล (Ψ_{fruit}) เนื่องจากนอกจากผลจะเป็นแหล่งรับน้ำเพื่อใช้ในการขยายขนาดแล้ว ในส่วนของใบเองก็สามารถแข่งขันให้เป็นแหล่งรับน้ำได้ด้วยเช่นกันเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง จึงทำให้ความแตกต่างระหว่างค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของผลและของใบเป็นตัวกำหนดทิศทางการแลกเปลี่ยนน้ำของผล (Matthews, 2005) การเข้าไปของน้ำมีสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างในค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำแต่ละตรงกันข้ามกับแรงต้านทานการไหลของน้ำ (Li *et al.*, 2003) ผ่านท่อ xylem และ ท่อ phloem

น้ำไหลออกจากผลผ่านการคายน้ำที่ผิวผลออกสู่อากาศ ตามค่าแรงดึงคายน้ำจากผลสู่อากาศ ($VPD_{fruit-air}$) นอกจากนี้ น้ำยังสามารถไหลออกจากผล (back-flow) ไปยังใบได้ในกรณีที่ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของผลสูงกว่าใบ ผลมะเขือเทศมีการคายน้ำประมาณ 10-25% ของน้ำที่ส่งเข้าไปยังผลภายใต้สภาพแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) ในช่วง 1.5-2.4 kPa (Leonardi *et al.*, 2000) โดยช่องทางการไหลจะเป็นการคายน้ำจากส่วนของผิวเคลือบ (cuticle) เนื่องจากผลมะเขือเทศไม่มีปากใบ (stomata) บนผิวผล (Ehret and Ho, 1986; Ben-Yehoshua, 1987; Czarnowski and Starwecki, 1991) อัตราคายน้ำของผลมีระดับขึ้นอยู่กับช่วงการเจริญเติบโตของผลและสภาพอากาศ (Ehret and Ho, 1986) ซึ่งอัตราการคายน้ำ (E) ที่ผิวผลมะเขือเทศ เป็นผลคูณของค่านำไหลรวมของไอน้ำ (g^w) และแรงดึงคายน้ำ ($VPD_{fruit-air}$) โดยที่ g^w เป็นค่านำไหลรวมของไอน้ำที่ผ่านช่องทางการไหลของ

ผิวผล (cuticular conductance, g_c) และค่าน้ำไหลผ่านชั้นบางติดผิวผล (boundary-layer conductance, g_b) ในขณะที่แรงดึงคายน้ำเป็นผลต่างของค่าความดันไอน้ำระหว่างของอากาศภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ของผล (fruit vapor pressure, e_f) ซึ่งเท่ากับความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิของผิวผล กับของอากาศภายนอก (air vapor pressure, e_a)

Kramer, 1972 ระบุว่า เมื่อพืชได้รับน้ำไม่เพียงพอ ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ_t) ของใบในท่อน้ำลดลงมากขึ้นจนทำให้ค่าของแรงดันเต่ง (turgor) ของเซลล์กุ่ม (guard cell) สูญเสียไปทำให้ปากใบเปิดแคบ เพื่อจะลดการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ ในการกำหนดทิศทางการแลกเปลี่ยนน้ำระหว่างผลกับส่วนอื่นๆ ของพืชนั้น สามารถพิจารณาการได้รับน้ำของผล (sinks) และสามารถพิจารณาที่ความแตกต่างของพลังงานศักย์รวมของน้ำของผลและใบ การลำเลียงน้ำจากใบไปยังผล ซึ่งวัดค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำช่วงเวลากลางวันพบว่า ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ_t) ของใบมีค่าน้อยกว่า ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ_t) ของผล อาจจะทำให้เกิดการไหลกลับ (backflow) ได้ซึ่งพบในหลายพืช (Klepper, 1968; Tyvergyak and Richardson, 1979; Syvertsen and Albrigo, 1980; Yamamoto, 1983) และพบในองุ่น (van Zyl, 1987) เช่นเดียวกับ Greenspan *et al* (1996) ได้วิเคราะห์ความแตกต่างของพลังงานศักย์น้ำระหว่างผลกับลำต้น ในองุ่น พบว่าพลังงานศักย์รวมของน้ำที่ก้านขั้วผลจะต่ำกว่าพลังงานศักย์รวมของน้ำที่ลำต้นตลอดเวลาในช่วงเวลากลางวัน ภายใต้สภาพอากาศชื้นและดินแห้ง และ Guichard *et al.*, 1999 แสดงความสัมพันธ์ตรงกันระหว่างความลาดศักระยะ (gradient) ของพลังงานศักย์น้ำของผลกับลำต้น และอัตราการไหลของน้ำผ่านก้านขั้วผลของมะเขือเทศในช่วงเวลากลางวัน จะมีอัตราการไหลที่ต่ำสุดในการไหลผ่านก้านขั้วผล โดยที่ผลและลำต้นมีค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำเท่ากัน และในงานของ Johnson *et al.*, 1992 พบว่าผลมะเขือเทศมีการหดตัวเล็กน้อยในเวลากลางวัน เมื่อเปรียบเทียบกับผลไม้เช่น apple (Tromp, 1984) ซึ่ง Guichard *et al.*, 1999 พบว่ามีความแตกต่างเล็กน้อยของพลังงานศักย์รวมน้ำในผลมะเขือเทศกับส่วนอื่นของพืชในช่วงเวลากลางวัน

Li *et al.*, 2003 ศึกษาความสัมพันธ์ของน้ำกับพืชที่มีผลมาจากพลังงานศักย์ความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหาร และระดับการคายน้ำในมะเขือเทศ โดยมีสมมติฐานว่า การไหลของน้ำเข้าไปในผลมะเขือเทศเป็นผลมาจากทั้งพลังงานความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารและระดับแรงดึงการคายน้ำ ซึ่งมีผลต่อพลังงานศักย์รวมของน้ำในลำต้น ได้ทำการทดสอบผ่านการทดลองภายใน 2 โรงเรือนที่มีการควบคุมสภาพอากาศโดยจัดการระดับแรงดึงการคายน้ำ และควบคุมสภาพน้ำที่รากร่วมด้วยโดยให้ค่าพลังงานความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่ต่างกัน 2 ระดับ พบว่า น้ำเข้าไปใน

ผลเป็นผลมาจากทั้งระดับแรงดึงการคายน้ำและพลังงานความเข้มข้นสารละลายธาตุอาหาร และจะสัมพันธ์กับเกรเดียนท์ของพลังงานศักย์รวมของน้ำระหว่างลำต้นและผล เกรเดียนท์ของพลังงานศักย์รวมของน้ำภายในพืชมีผลโดยตรงต่อการขนส่งใน phloem พลังงานความเข้มข้นของผลมีความสัมพันธ์โดยตรงต่อความเข้มข้นของสารละลายธาตุอาหารที่ได้ พลังงานศักย์รวมของน้ำของลำต้นจะเป็นเครื่องชี้ถึงอัตราการเจริญเติบโตของผล

Fishman and Genard, 1999 ได้สร้างแบบจำลองการเติบโตของผลพืชในโรงเรือนพบว่า ความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่ 40% ค่า Ψ_p ในผลลดต่ำลงทำให้การนำน้ำและปริมาณน้ำตาลเข้าสู่ผลเกิดในอัตรามากกว่าผลที่อยู่ในสภาพความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่ 60% และ 80% ขณะที่มวลสดของผลมีค่าน้อยกว่าเนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศที่ต่ำกว่าทำให้ผลมีการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำที่มากกว่า

Slatyer, 1967 พบว่า พลังงานความเข้มข้นของน้ำ (Ψ_p) ของใบจะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามสภาวะการขาดน้ำของต้นพืช และการศึกษาของ Goode and Higgs (1973) พบว่า สภาพอากาศความชื้นในดิน จำนวนประชากรของพืชปลูก และความเข้มแสง สามารถส่งผลกระทบต่อพลังงานความเข้มข้นของน้ำ (Ψ_p) ในต้นพืชได้ ค่าความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานความเข้มข้นของน้ำ (Ψ_p) และค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ_r) ในต้นมะเขือเทศมีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูปพาราโบลาในแตงกวาและพริกไทย จากความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น ขณะที่ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ_r) ต้นมะเขือเทศลดลง ต้นมะเขือเทศยังคงสามารถรักษาระดับแรงต่งได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับแตงกวาและพริกไทย (Veenman and Zonen, 1977)

ธาดา, 2547 ศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบและผลแตงกวาในรอบวันที่อยู่ต่าง ๆ กัน สรุปผลการศึกษาได้ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ_r) และพลังงานความเข้มข้นของน้ำ (Ψ_p) ของทั้งใบและผลมีค่าเปลี่ยนแปลงตามรอบวัน คือ มีค่าสูงในช่วงเริ่มต้นของวัน มีค่าลดลงในช่วงกลางวัน และมีค่าเพิ่มขึ้นอีกเมื่อหมดแสงแดด ผลที่มีอายุน้อยมีค่าพลังงานทั้งสองเปลี่ยนแปลงในรอบวันมากกว่าผลที่มีอายุมาก ค่าพลังงานความดัน (Ψ_p) ของใบมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มากในรอบวัน ขณะที่ Ψ_p ของผลมีค่าสูงในช่วง 8 น. และลดต่ำลงจนมีค่าติดลบในช่วง 10 - 16 น. เนื่องจากช่วงเป็นช่วงที่มีสภาพอากาศรุนแรง ค่า Ψ_p ของผลในทุกอายุจะกลับมีค่ามากขึ้นอีกครั้งหลังจาก 18 น. เนื่องจากสภาพอากาศลดความรุนแรงลง ซึ่งทำให้ต้นมีโอกาสดึงน้ำจากดินกลับขึ้นมาชดเชยกับที่สูญเสียไป ค่าของ Ψ_p ของใบและผลมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่า Ψ_r

เมื่อต้นได้รับน้ำกลับขึ้นมาชดเชยทำให้ Ψ_t มีค่าสูงขึ้นซึ่งมีผลให้ Ψ_p ที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยค่า Ψ_t และ Ψ_{π} เฉลี่ยในรอบวันของผลที่อายุต่าง ๆ และของใบที่ติดผลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุผลที่มากขึ้น ซึ่งอาจเป็นเพราะผลที่มีอายุมากขึ้นมีขนาดของผลใหญ่ก็มีน้ำในผลปริมาณมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของตัวละลายในผลลดลง ค่า Ψ_t เฉลี่ยของใบมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของผลแสดงว่ามีความต่างศักย์ที่เป็นแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลจากใบเข้าสู่ผลได้ ค่า Ψ_{π} เฉลี่ยของใบมีค่าน้อยกว่าของผลแสดงว่าใบมีความเข้มข้นของตัวละลายมากกว่าในผล ค่า Ψ_p เฉลี่ยของใบมีค่าอยู่ในช่วงที่สูงกว่ามากเมื่อเทียบกับค่า Ψ_p เฉลี่ยของผล ข้อมูลที่ได้แสดงว่าใบมีแรงขับเคลื่อนทั้งด้านความเข้มข้นของตัวละลาย และแรงดันที่สูงที่สามารถทำให้สารอาหารเคลื่อนที่ไปสู่ผลได้อย่างรวดเร็วว่าการเคลื่อนย้ายสารอาหารและน้ำจากใบ (แหล่งให้) สู่อผล (แหล่งรับ) ในรอบวัน

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาเพื่อให้เข้าใจการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผล เก็บข้อมูลโดยใช้ตัวอย่างแบบสุ่ม และใช้มะเขือเทศลูกผสม PT4225 เป็นตัวแทนในการศึกษาซึ่งเก็บรวบรวมโดยศูนย์วิจัยและพัฒนาพืชผักเขตร้อน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน การศึกษาการลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลใช้หลักการการทำบัญชีของน้ำ (water balance) ที่พิจารณาปริมาณน้ำไหลเข้าผลและปริมาณน้ำไหลออกจากผล โดยผลต่างของสองปริมาณน้ำนี้คือ ปริมาณน้ำในผลที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งสัมพันธ์กับการขยายขนาดของผล ในศึกษานี้มีข้อจำกัดสำคัญที่อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถวัดทุกกระบวนการภายในลูกเดียวกันได้ จึงได้ใช้ผลมะเขือเทศคนละผลในการวัดปริมาณน้ำแต่ละกระบวนการ เตรียมการล่วงหน้าโดยตัดแต่งช่อผลมะเขือเทศตั้งแต่เริ่มติดผลให้เหลือเฉพาะผลแรกเพียงผลเดียว ช่วงอายุผลที่ศึกษาคือ ผลอายุ 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน (2-7 สัปดาห์) ศึกษาเรื่องอัตราไหลของน้ำเข้าสู่ผลในแต่ละอายุผลในก้านของผลมะเขือเทศโดยติดตั้งเครื่องวัดอัตราไหล (sap flow) เพื่อประเมินเป็นปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลแต่ละอายุในรอบวัน ศึกษาอัตราไหลของน้ำออกจากผลแต่ละอายุโดยการวัดอัตราการคายน้ำของผลด้วยหลักการแลกเปลี่ยนแก๊ส (LI6200) เพื่อประเมินปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผลในแต่ละอายุในรอบวัน และผลต่างของปริมาณน้ำที่ไหลเข้ากับปริมาณน้ำที่ไหลออก เป็นการเปลี่ยนแปลงของผลซึ่งประเมินด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลในแต่ละอายุ วัดการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลด้วยเครื่องวัดขนาด (Dendrometer) และวัดมวลสดและมวลแห้งของผลมะเขือเทศ รวมทั้งศึกษาแรงขับเคลื่อนการไหลระหว่างใบกับผล และผลสู่อากาศ โดยวัดค่าพลังงานศักย์ของน้ำในผลแต่ละอายุกับใบติดผลในรอบวันและสภาพอากาศต่อกระบวนการคายน้ำของผล

1. การเตรียมต้นมะเขือเทศ

เพาะเมล็ดมะเขือเทศลูกผสม PT4225 ในถาดเพาะด้วยพีทมอส (peat moss) เป็นเวลา 25 วัน แล้วย้ายลงแปลงปลูก เตรียมแปลงปลูกขนาด $5 \times 1 \text{ m}^2$ จำนวน 20 แปลง แปลงละ 1 แถว แถวละ 10 ต้น ระยะปลูก $1 \times 0.5 \text{ m}^2$ ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ทุก 2 สัปดาห์ ให้น้ำแบบปล่อยน้ำตามร่อง และฉีดพ่นยากำจัดศัตรูพืชเมื่อมีเชื้อโรคหรือแมลงเข้าทำลาย

2. สภาพอากาศและค่าพลังงานกำกับก้อนดิน

วัดสภาพอากาศในรอบวันของแปลง โดยติดตั้งสถานีอากาศที่ระดับความสูง 2 m จากผิวดิน มีหัววัดอุณหภูมิ (T, C) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH, %) และความเข้มแสงในช่วงสักระยะแสงของพืช (Photosynthetic photon flux, PPF, $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$) โดยติดตั้งอุปกรณ์ประกอบด้วยหัววัดความเข้มแสง (quantum light sensor ที่วัดความเข้มแสงในช่วง 400-700 nm) ต่อเข้ากับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีหัววัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์อากาศ (datalogger รุ่น watchdog 2475 ของบริษัท Spectrum Technologies, USA) บันทึกค่าทุก 5 นาที คำนวณค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (VPD_{air} , kPa) ซึ่งสะท้อนระดับความแห้งของอากาศ โดยใช้ความสัมพัทธ์ $\text{VPD}_{\text{air}} = e^{\circ} \times \{1 - (\text{RH}/100)\}$ เมื่อ e° (kPa) เป็นค่าแรงดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิของอากาศขณะนั้นซึ่งเท่ากับ $e^{\circ} = 0.61083 \times 10^{[(7.6448 \times T)/(242.2 + T)]}$ (LI-COR, 1990) ฟังเครื่องวัดแรงดึงน้ำของดิน (tensiometer บริษัท SoliMoisture Equipment, USA) ในแปลงปลูกให้ห่างจากโคนต้นมะเขือเทศที่เลือกเป็นตัวแทนประมาณ 10 cm ที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm จากระดับผิวดิน ควบคุมการให้น้ำโดยรักษาให้ค่าพลังงานกำกับก้อนดิน (soil matric potential) อยู่ในช่วง -20 ถึง -40 kPa เพื่อให้มะเขือเทศสามารถดึงน้ำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย วัดตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม ถึง 30 กันยายน 2552

3. การลำเลียงน้ำเข้าสู่ผล

การลำเลียงน้ำเข้าสู่ผล ประกอบด้วยข้อมูล 3 ด้าน คือ การวัดอัตราการขยายขนาดของผล อัตราน้ำไหลเข้าผล และอัตราการคายน้ำของผล กำหนดอายุผลโดยนับอายุผลว่า หลังดอกบาน 1 วัน ให้เป็นผลอายุ 1 วันหลังดอกบาน การวัดค่าที่อายุผลต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

3.1 การขยายขนาดของผลมะเขือเทศในรอบวัน และการประเมินการเจริญเติบโตในลักษณะภายนอก (ในด้านขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและสีผิว) และลักษณะภายใน (ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้และค่า pH)

3.1.1 การเจริญเติบโตของผล

ก. ลักษณะภายนอกของผลมะเขือเทศ

1. วัดการขยายขนาดของผล โดยติดตามรายระเอียดการขยายขนาดของผล ในทุกๆ วัน ตลอด 24 ชั่วโมง ต่อเนื่องไปตั้งแต่ผลอ่อนไปจนผลสุกแก่ โดยเลือกผลมะเขือเทศที่อายุ 14 วัน จำนวนหนึ่ง 1 ผล เพื่อติดตามการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางด้วยเครื่อง Dendrometer (บริษัท Dynamax, USA) (ชานา, 2547) หัววัดประกอบด้วยแผ่นโลหะบางมีหัวยึดปลาย 2 ด้าน รูปตัว c ด้านหนึ่งตรึงแน่น อีกด้านเป็นหัวต่อสกรูเกลียวที่หมุนให้หัวจับแน่นกับชิ้นส่วนที่วัด ส่วนกลางของแผ่นโลหะมีระบบลดความต้านทานซึ่งจะให้ศักย์ไฟฟ้าผันแปรตามระยะทาง เมื่อชิ้นส่วนที่จับมีขนาดขยายขึ้นปลายที่จับจะกางออก ทำให้แผ่นโลหะโค้งมากขึ้น ซึ่งมีผลต่อศักย์ไฟฟ้าที่อ่านได้ Dendrometer แต่ละตัวจะมีค่าคงที่สำหรับแปลงค่าศักย์ไฟฟ้าเป็นระยะทาง ก่อนติดตั้งวัดเส้นผ่านศูนย์กลางผลบริเวณที่ต้องการติดตั้งหัววัดด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (vernier callipers) บริเวณกึ่งกลางทางด้านกว้างของผลมะเขือเทศ ติดตั้งเครื่อง โดยปรับหัววัดให้พอดีกับผลมะเขือเทศ ค่าที่ได้จะถูกบันทึกไว้ในตัวเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (data logger รุ่น CR10X ของบริษัท Campbell, USA) โดยบันทึกค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที ตลอด 24 ชั่วโมง ต่อเนื่องไปจนผลมีอายุ 49 วัน

2. สีผิวของผลมะเขือเทศบ่งชี้ด้วยเครื่องอ่านสี (Color Reader รุ่น CR-10 บริษัท Konica Minolta ประเทศญี่ปุ่น) ที่อ่านค่าสีในระบบ $L^* a^* b^*$ color space (Konica Minolta, 2007) โดยกำหนดให้ค่า L^* คือค่าความสว่างมีค่าตั้งแต่ 0-100 (มืด-สว่าง) ค่า a^* และ b^* เป็นค่าสัมประสิทธิ์ของสีซึ่งจะบ่งบอกทิศทางของสีมีค่าตั้งแต่ -60 ถึง 60 หากมีค่า $-a^*$ แสดงว่า ค่าสีอยู่ในทิศทางของสีเขียว $+a^*$ คือ ค่าสีในทิศทางของสีแดง $-b^*$ คือ ทิศทางของสีน้ำเงิน $+b^*$ คือ ทิศทางของสีเหลือง วัดมะเขือเทศแต่ละอายุ อายุละ 7 ผล ผลละ 1 ตำแหน่ง ค่าที่ได้ใช้คำนวณหาค่าเฉลี่ยเชิงเลขคณิตและคำนวณความแตกต่างของค่าสีของผลมะเขือเทศที่วัดได้กับสีอ้างอิงมาตรฐาน (ΔE_{ab}^*) ดังสมการ

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

โดยสีอ้างอิงที่ใช้คือ สีดำ รหัส 202-A จากแถบเทียบสีมาตรฐาน The Royal Horticultural Society (R. H. S colour chart)

ข. คุณสมบัติของสารละลายน้ำคั้นของผล ก้านผลและใบติดผลมะเขือเทศ

วัตถุประสงค์ของตัวถูกละลายในสารละลายน้ำคั้นจากส่วนต่างๆ ของผล รวมทั้งก้านผลและใบติดผล ตัวอย่างสารละลายน้ำคั้นของผล ก้านผลและใบติดผลมะเขือเทศ ใช้ ตัวอย่างหลังจากวัดค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำแล้ว แยกผลมะเขือเทศเป็นส่วนๆ ดังนี้ คือ เปลือก รวมกับเนื้อผล (flesh) และก้านผล (pedicel) รวมทั้งใบติดผล (subtending leaf of fruit) แล้วแช่ใน ถังไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) ประมาณ 1-2 นาที เพื่อให้น้ำกลายเป็นน้ำแข็งซึ่งทำให้เซลล์ แตก บดคั้นตัวอย่างให้ได้สารละลายน้ำคั้นจากชิ้นส่วนของพืช พารามิเตอร์ที่วัดมีดังนี้

1. ความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด (Total solute concentration, C_s) เก็บตัวอย่างน้ำคั้น วัดค่าด้วยเครื่อง osmometer รุ่น Vapro 5520 (บริษัท Wescor Inc., USA) ค่า C_s สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำ Ψ_π ตามสมการของ van' t Hoff (Nobel, 1983) (สมการที่ 8)
2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Sap pH) ของสารละลายน้ำคั้นวัดด้วยเครื่อง Cardy Twin pH Meter (บริษัท Spectrum Technologies, USA) ตรวจสอบด้วยสารละลาย pH มาตรฐาน คือ pH 4 และ 7
3. ดรรชนีบริกซ์ (Brix) แสดงสัดส่วนของมวลของแข็งที่ละลายต่อมวลรวมของสารละลาย (หน่วย % เชนมวล) ดรรชนีบริกซ์จะสัมพันธ์กับปริมาณของน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ ซึ่งส่วนใหญ่ คือ น้ำตาล
4. ค่าการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity, EC) ของสารในรูปไอออน วัดด้วยเครื่อง Cardy Twin EC Meter (บริษัท Spectrum Technologies, USA) ตรวจสอบด้วย สารละลายมาตรฐาน คือ 1.41 mS cm^{-1} (0.01 M KCl)

3.1.2 ติดตามการขยายขนาดในรอบวัน

ติดตามการขยายขนาดของผลมะเขือเทศในแต่ละอายุในรอบวัน โดยเลือกผลมะเขือเทศที่ 6 ช่วงอายุ 14-49 วัน อายุละ 1 ผล เป็นผลเดิมที่วัดทั้งวัน โดยแบ่งการวัดการขยายขนาดของผลในรอบวันออกเป็นสองครั้ง คือ ครั้งที่หนึ่งใน วันที่ 17 สิงหาคม 2552 และครั้งที่สองวันที่ 14 กันยายน 2552 เพื่อให้เป็นวันเดียวกับการวัดค่าพลังงานศักย์รวม ครั้งที่หนึ่งเลือกผลมะเขือเทศที่มีอายุ 14, 21 และ 28 วันหลังดอกบาน เป็นตัวแทนช่วงอายุที่ผลยังอ่อน และวัดการขยายขนาดในรอบวันที่สอง โดยใช้ผลที่อายุ 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน ซึ่งเป็นช่วงอายุที่ผลสุกแก่เพื่อติดตามรายละเอียดการเพิ่มขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง ด้วยเครื่อง Dendrometer (บริษัท Dynamax, USA) ค่าที่ได้ถูกบันทึกไว้ในตัวเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (data logger รุ่น CR10X ของบริษัท Campbell, USA) โดยบันทึกค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที และบันทึกแต่ละผลอย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

เพื่อให้สามารถแปลงค่าเป็นปริมาณน้ำในผล จึงต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างมวลสด และมวลแห้งของผลกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางก่อน (ชาดา, 2547) วิธีการคือ สุ่มตัวอย่างของผลมะเขือเทศขนาดต่างๆ กัน วัดเส้นผ่านศูนย์กลางตรงกึ่งกลางของผล และวัดความยาวด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ ชั่งมวลสดของผล อบผลที่อุณหภูมิ 60-70 °C เป็นเวลา 36-48 ชั่วโมง บันทึกค่ามวลแห้งของผล ความแตกต่างระหว่างมวลสดกับมวลแห้ง คือปริมาณน้ำในผล คำนวณความสัมพันธ์ระหว่างขนาดผลกับปริมาณน้ำในผล คำนวณปริมาณของน้ำที่เพิ่มขึ้นในรอบ 24 ชั่วโมงจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางผลที่ได้จากเครื่อง dendrometer และคำนวณอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำในผลต่อชั่วโมงในช่วงเวลา 3 ช่วง คือ ช่วง 0-8 น. เป็นช่วงก่อนที่ผลเผชิญอากาศแห้งรุนแรง ช่วง 8-15 น. เป็นช่วงที่มีสภาพอากาศแห้งรุนแรง และช่วง 15-24 น. เป็นช่วงหลังที่สภาพอากาศคลายความแห้งรุนแรงลง

3.2 อัตราการคายน้ำและอัตราตรึงคาร์บอนไดออกไซด์

อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศเป็นอัตราไหลของน้ำที่ออกจากผล จะวัด 6 ช่วงอายุผล คือ 14-49 วัน อายุผล 1 ผล ตลอดทั้งช่วงกลางวัน

วัดอัตราการคายน้ำและอัตราตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของผลมะเขือเทศอายุละ 1 ผล เป็นผลเดิมที่วัดทุกๆ ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8 น. เข้าไปจนตอนเย็น 18 น. แต่เป็นคนละผลกับที่วัดการ

เปลี่ยนแปลงขนาดของผล แบ่งการวัดออกเป็นสองครั้ง ครั้งที่หนึ่งในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 ใช้ผลมะเขือเทศอายุ 14, 21 และ 28 วันหลังดอกบาน ครั้งที่สองในวันที่ 14 กันยายน 2552 ใช้ผลมะเขือเทศอายุ 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน ด้วยเครื่องวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สระบบปิด (model LI-6200, LICOR Inc, USA) ต่อกับกล่องบรรจุผลแบบใส ที่ให้แสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านได้ ปรับอัตราเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผล (flow rate) เท่ากับ $400 \mu\text{mol s}^{-1}$ และควบคุมให้ K_{abs} (Absorption coefficient) ไม่เกิน 1.5 ซึ่งเป็นค่าสะท้อนพื้นผิวที่ดูคล้าย ไม่ว่าจะป็นน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์ (ค่า K_{abs} ในกล่องบรรจุผลที่สะอาดและแห้งจะมีค่าประมาณ 1.1) วัดอุณหภูมิที่ผิวผลมะเขือเทศด้วย Thermocouple ที่อยู่ภายในกล่องบรรจุผล โดยตะไวที่ผิวผล

อัตราการคายน้ำ (E) เป็นผลคูณของค่านำไหลดรวมของไอน้ำ (g_t^w) และแรงดึงคายน้ำ ($\text{VPD}_{\text{fruit-air}}$) โดยที่ g_t^w เป็นค่านำไหลดรวมของไอน้ำผ่านช่องทางการไหลของผิวผล (cuticular conductance, g_c) และค่านำไหลดผ่านชั้นบางติดผิวผล (boundary layer conductance, g_b) ในขณะที่แรงดึงคายน้ำเป็นผลต่างของค่าความดันไอน้ำระหว่างอากาศ (vapor pressure) ระหว่างของอากาศภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ของผล (fruit vapor pressure, e_f) กับของอากาศภายนอก (air vapor pressure, e_a) อัตราการคายน้ำคำนวณได้ดังสมการ

$$E = g_t^w (e_f - e_a) = g_t^w (\text{VPD}_{\text{fruit-air}}) \quad (2)$$

เมื่อ	E	=	อัตราการคายน้ำ (transpiration rate, $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	g_t^w	=	ค่านำไหลดรวมของไอน้ำจากภายในผลสู่อากาศ (total conductance to water vapor, $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	e_f	=	ความดันไอน้ำภายในใบ (f vapor pressure, kPa)
	e_a	=	ความดันไอน้ำในอากาศ (air vapor pressure, kPa)
	$\text{VPD}_{\text{fruit-air}}$	=	แรงดึงคายน้ำของใบ (fruit to air vapor pressure deficit, kPa)
		=	$(e_{\text{Tfruit}}^{\circ}) - (e_{\text{Tair}}^{\circ} \times \text{RH}_{\text{air}})$

เมื่อ

$$e^{\circ}(T) = 0.61083 \times 10^{\left(\frac{7.6448T}{242.62+T}\right)}$$

T = อุณหภูมิ (temperature, C)

อัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ (A) เป็นผลคูณของค่านำไหลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ ($g_t^{CO_2}$) และความแตกต่างของความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศภายนอกผล (air CO₂ concentration, C_a, $\mu\text{molCO}_2 \text{ mol}^{-1}$) กับภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ของผล (intercellular CO₂ concentration, C_i) โดยมีรูปสมการดังนี้

$$A = g_t^{CO_2} (C_a - C_i) \quad (3)$$

เมื่อ A = อัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ ($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
 $g_t^{CO_2}$ = ค่านำไหลรวมของคาร์บอนไดออกไซด์ (total conductance to CO₂, $\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)

ผลคูณของอัตราการคายน้ำเฉลี่ยระหว่างการวัดสองครั้ง ($\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) กับช่วงเวลาการวัดสองครั้ง (s) เป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลออกจากผลในแต่ละรอบการวัด เมื่อรวมทั้งวันจะเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียจากผลมะเขือเทศในรอบวัน

$$G = \sum_{24h} (\bar{E} \times \Delta t) \quad (4)$$

เมื่อ G = ปริมาณน้ำทั้งหมดในรอบวัน (24 ชม.) ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวผล ($\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2}$)
 \bar{E} = อัตราการคายน้ำเฉลี่ยสองเวลาการวัด ($\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
t = เวลา (s) ระหว่างสองครั้งที่วัด

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลออกจากผล

$$W_{out} = G \times M \times A \quad (5)$$

เมื่อ W_{out} = ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลออกจากผล (g)
G = ปริมาณน้ำทั้งหมดในรอบวันต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ผิวผล ($\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2}$)
M = มวลโมเลกุลของน้ำ (น้ำ 1 mol จะมีมวล 18 g)
A = พื้นที่ของผิวผล (m^2)

เนื่องจากวัดอัตราการคายน้ำของผลเฉพาะช่วงเวลากลางวัน ได้ประเมินเบื้องต้นให้อัตราการคายน้ำที่เวลา 18 น. เป็นอัตราการคายน้ำตลอดช่วงเวลากลางคืน 19 ถึง 7 น. Araki *et al.*, 1998 พบว่า อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศจะคงที่ในช่วงกลางคืนไปจนถึงรุ่งเช้า (18-6 น.)

3.3 อัตราการไหลเข้าผล

อัตราไหลของน้ำที่จะเข้าสู่ผล วัดด้วยอัตราไหลในกิ่งมะเขือเทศที่ต่อกับก้านขั้วผล เลือกก้านมะเขือเทศที่มีผลอายุ 14, 21 และ 28 วันหลังดอกบาน อายุละ 1 ผล เป็นผลเดิมที่วัดทั้งวัน แต่เป็นคนละผลกับที่วัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สและการเปลี่ยนแปลงขนาด ในการวัดรอบวันครั้งที่หนึ่งในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และวัดรอบวันครั้งที่สองในวันที่ 14 กันยายน 2552 วัดมะเขือเทศที่มีอายุ 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน อายุละ 1 ผล อุปกรณ์วัดอัตราไหล (sap flow) ใช้หลักการคิดดุลความร้อน (heat balance method) (Trunk gage รุ่น Flow 32 ของบริษัท Dynamax, USA) และใช้หลักการให้ความร้อนแบบคงที่ (constant heat input) เลือกกิ่งที่มีลักษณะตรงและยาวพอให้ติดตั้งหัววัด ก้านมะเขือเทศแต่ละอายุมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 5-7 mm จึงใช้หัววัด (Micro Flow Gages) รุ่น SGA5-ws หุ้มรอบก้าน ภายในหัววัดประกอบด้วยหัววัดอุณหภูมิขนาดเล็ก และขดลวดไฟฟ้า ที่สามารถควบคุมพลังงานความร้อนแก่ลำน้ำในก้าน และขนาด heater input ให้ที่ 0.08 W พลังงานความร้อนถูกถ่ายเทใน 3 ทิศทาง คือ ขึ้นด้านบน ลงด้านล่าง และในแนวรัศมี การถ่ายเทความร้อนเป็นไปตามกระบวนการนำความร้อน (conduction) มีการถ่ายเทในทุกทิศทาง กระบวนการพาความร้อน (convection) ถ่ายเทในทิศทางขึ้นบน ซึ่งอัตราการพาความร้อนจะสัมพันธ์กับอัตราไหลสุทธิของน้ำในท่อลำเลียง ซึ่งวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้ด้วย Thermocouples ที่ติดตั้งที่ 3 จุด บันทึกข้อมูลด้วยตัวเก็บข้อมูลอัตโนมัติ (data logger รุ่น CR 10X ของบริษัท Campbell, USA) บันทึกค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที จนครบ 24 ชั่วโมง ช่วงก่อนจะบันทึกค่าจริง ต้องวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K_{sh}) ของก้านมะเขือเทศ โดยการตั้งค่า K_{sh} เท่ากับ 0 แล้วเก็บข้อมูลวันแรกในช่วงเวลาที่มีการไหลต่ำที่สุดที่ช่วง 5 น. นำค่า K_{sh} ที่คำนวณได้ในช่วงเวลานี้มาเฉลี่ยเป็นค่า K_{sh} สำหรับการวัดค่าในรอบวัน สมการที่ใช้คำนวณอัตราไหล (van Bavel, 1994) คือ

$$F = \left[\frac{P_{in} - Q_r - q_u - q_d}{C_p dT} \right] \quad (6)$$

เมื่อ	F	=	อัตราไหลของน้ำในก้าน ($g\ h^{-1}$)
	P_{in}	=	พลังงานความร้อนที่ใส่ให้ (W)
	Q_r	=	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการนำความร้อนในแนวรัศมี (W)
	q_u	=	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการพาความร้อนขึ้นด้านบน (W)
	q_d	=	พลังงานความร้อนที่ถ่ายเทด้วยการพาความร้อนลงด้านล่าง (W)
	C_p	=	ความจุความร้อนของของไหล (น้ำ) ในก้าน ($J\ g^{-1}\ C^{-1}$)
	dT	=	อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงหลังจากให้ความร้อน (C)

ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ผลในรอบวัน ด้วยการรวมอัตราไหลจากเวลาที่ 0 ไปจนครบ 24 ชั่วโมง

$$W_{in} = \sum_{24h} (\bar{F} \times \Delta t) \quad (7)$$

เมื่อ	W_{in}	=	ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ผล (g)
	\bar{F}	=	อัตราไหลเฉลี่ยระหว่างสองเวลา t_1 ถึง t_2 ($g\ h^{-1}$)
	Δt	=	ช่วงเวลาระหว่าง t_1 ถึง t_2 (h)

4. แรงขับเคลื่อนการไหลระหว่างใบกับผล

4.1 พลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ)

วัดพลังงานศักย์รวมของน้ำในส่วนอโปพลาสต์ (apoplast) โดยใช้หลักการของ Boyer (1995) ด้วยเครื่อง Pressure chamber (บริษัท SoilMoisture Equipment, USA) วัดก้านใบติดผลและก้านผลมะเขือเทศแต่ละอายุผล แบ่งการวัดออกเป็นสองครั้ง เพื่อให้สามารถวัดได้ทันเป็นช่วงๆ ช่วงละชั่วโมงในรอบวัน วัดครั้งแรกสำหรับมะเขือเทศอายุ 7, 14, 21 และ 28 วันหลังดอกบาน ซึ่งเป็นช่วงผลอ่อนและผลมีการเจริญเติบโตขยายขนาด ในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และวัดรอบวันครั้งที่สอง ในวันที่ 14 กันยายน 2552 โดยวัดผลมะเขือเทศอายุ 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน

ซึ่งเป็นช่วงผลสุก ใบติดผลที่เลือกจะมีอายุมากกว่าผลมะเขือเทศประมาณ 7-10 วัน และเริ่มวัดจากเวลา 4 น. จนถึง 18 น. การเก็บตัวอย่างเป็นแบบตัดจากต้น ในแต่ละครั้งที่วัดจึงเป็น คนละตัวอย่างกัน ใช้พลาสติกขาวใส (wrap) หุ้มใบติดผล หรือผลที่เลือกไว้ เพื่อกันการระเหยน้ำ ตัดที่ก้านใบหรือก้านผล นำมาเข้าเครื่องวัด โดยเลือกตัดและวัดค่าของใบก่อน อ่านค่าความดันที่หน้าปัดเมื่อเห็นผิวของน้ำปรากฏที่ปลายก้านใบนั้น บันทึกค่า (หน่วยเป็น kPa) หลังจากนั้นถอดก้านใบออกจากเครื่อง นำใบบรรจุลงในหลอดพลาสติกที่สะอาดเพื่อนำไปวัดพลังงานความเข้มข้นของน้ำต่อไป จากนั้นวัดผล โดยตัดที่ก้านผล เลือกตัดให้ก้านผลยาวพอที่จะเข้าเครื่องวัดได้ วัดและบันทึกค่าเช่นเดียวกับใบ โดยระวังไม่ให้ก้านหักหรือขาดระหว่างการวัด ค่าพลังงานศักย์รวมของก้านผลจะถือเป็นค่าพลังงานศักย์รวมของทั้งผลมะเขือเทศ หลังจากนั้นแบ่งชิ้นส่วนของผลออกโดยตัดตามความยาวของผลให้พอดีบรรจุในหลอดพลาสติก แช่ในไนโตรเจนเหลวแล้วเก็บในช่องแช่แข็งของผู้เย็นเพื่อรอการวัดค่าพลังงานความเข้มข้นน้ำต่อไป

4.2 พลังงานความเข้มข้นของน้ำ (Ψ_{π})

วัดค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำโดยหลักการ dew point hygrometry จากสารละลายที่คั่นได้จากตัวอย่างพืช (Boyer, 1995) เริ่มต้นทำเส้นตรวจเทียบ (calibration curve) โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์มาตรฐานที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด (โซเดียมและคลอไรด์ไอออน) 100, 290 และ 1,000 mmol kg⁻¹ ใช้เครื่อง Vapor pressure osmometer (รุ่น Vapro 5520 บริษัท Wescor, USA) (หน่วยเป็น mmol kg⁻¹) หลังจากนั้นจึงวัดตัวอย่างน้ำคั่นของใบติดผล และส่วนผลมะเขือเทศ ที่เก็บในหลอดพลาสติกแช่แข็ง โดยวางหลอดตัวอย่างให้ละลายก่อน บีบคั้นจนได้สารละลายที่ผสมกันทั่วถึงระหว่างส่วนที่มาจากโพลลาสต์ (apoplast) และซิมพลาสต์ (symplast) อ่านและบันทึกค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด คำนวณค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำในสารละลายตัวอย่างในใบและผล ตามสมการของ van't Hoff (Nobel, 1993)

$$\Psi_{\pi} = -RTC_s \quad (8)$$

เมื่อ	Ψ_{π}	=	พลังงานความเข้มข้นน้ำ (kPa)
	R	=	ค่าคงที่ของแก๊สเท่ากับ $8.3143 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \text{ kPa mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$$T = \text{อุณหภูมิสัมบูรณ์ของสารละลายในขณะนั้นๆ (K)}$$

$$C_s = \text{ความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด (mol m}^{-3}\text{)}$$

4.3 พลังงานความดันของน้ำ (Ψ_p)

ความแตกต่างของพลังงานความดันระหว่างสองจุด เป็นแรงขับเคลื่อนในการไหลของสารอาหาร คำนวณค่าพลังงานความดันน้ำเป็นผลต่างระหว่างพลังงานศักย์รวมกับพลังงานความเข้มข้นของน้ำ จากสมการ

$$\Psi_p = \Psi_t - \Psi_\pi \quad (9)$$

เมื่อ	Ψ_t	=	พลังงานศักย์รวมของน้ำ (kPa)
	Ψ_p	=	พลังงานความดันของน้ำ (kPa)
	Ψ_π	=	พลังงานความเข้มข้นของน้ำ (kPa)

ผลและวิจารณ์

1. ข้อมูลพื้นฐาน

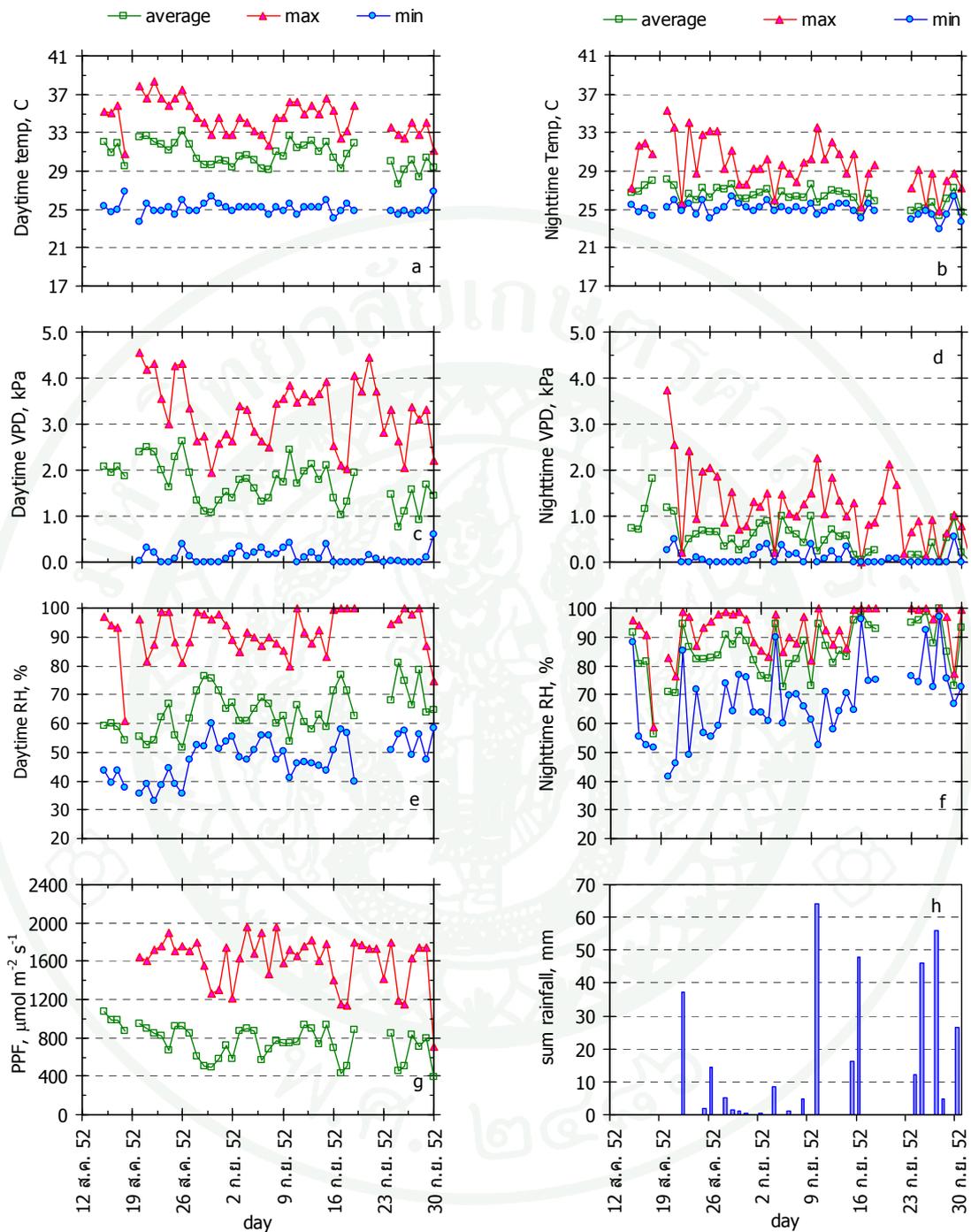
ข้อมูลเบื้องต้นของสภาพแวดล้อมและการเจริญเติบโตทางด้านการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

1.1 สภาพอากาศ และสภาวะน้ำในดินตลอดช่วงการทดลอง

ข้อมูลอากาศ ตั้งแต่วันที่ 16 สิงหาคม 2552 จนถึงวันที่ 30 กันยายน 2552 แสดงเป็นค่าเฉลี่ยตลอดช่วง ในตารางที่ 1 สำหรับค่าที่แยกเป็นช่วงกลางวัน เป็นช่วงระหว่าง 6-18 น. โดยใช้ค่าความเข้มแสงเป็นเกณฑ์กล่าว คือ ช่วงกลางวัน เป็นช่วงที่ความเข้มแสงแดดมีมากกว่า $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ และกลางคืน คือ ไม่มีแสงแดดในระหว่าง 18-6 น. สภาพอากาศในช่วงเวลากลางวันมีความผันแปรและแห้งรุนแรงกว่ากลางคืน สภาพอากาศทั้งหมด แสดงค่าเฉลี่ยรอบวัน ในภาพที่ 1

แสงแดดเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช แต่ความเข้มแสงแดดที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้น และทำให้ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศลดลง ดังนั้นเมื่อมีความเข้มแสงสูง ทำให้แรงดึงระเหยน้ำของอากาศเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสะท้อนระดับความแห้งของอากาศ พบว่าค่าความเข้มแสงสูงสุดในวันที่ 18 สิงหาคม 2552 ขึ้นสูงถึง $2,428 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ อุณหภูมิเฉลี่ยในเวลากลางวัน มีค่า 29.5 C และอุณหภูมิสูงสุดถึง 30.8 C ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยในรอบวัน 54.1 % ความชื้นสัมพัทธ์ต่ำสุดเฉลี่ยในช่วงกลางวัน 37.6 % และความชื้นสัมพัทธ์สูงสุดเฉลี่ยในช่วงกลางวัน 90.7 % แรงดึงระเหยน้ำของอากาศมีค่าสูงสุดเฉลี่ยในเวลากลางวัน 2.3 kPa ค่าแรงดึงระเหยน้ำค่าเฉลี่ยในเวลากลางวัน 1.9 kPa ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยหรือค่ารวมของข้อมูลอากาศตลอดช่วงการทดลอง ในตารางที่ 1

กล่าวได้ว่าตลอดช่วงการทดลอง ต้นมะเขือเทศได้รับแสงแดดจัด และสภาพอากาศมีความแห้งรุนแรงในช่วงเวลากลางวัน



ภาพที่ 1 สภาพอากาศเฉลี่ย (average) ค่าสูงสุด (max) และต่ำสุด (min) ในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน และปริมาณน้ำฝนระหว่างวันที่ 12 สิงหาคม ถึง 30 กันยายน 252 a) อุณหภูมิกลางวัน b) อุณหภูมิกลางคืน c) ความชื้นสัมพัทธ์กลางวัน d) ความชื้นสัมพัทธ์กลางคืน e) แรงดันระเหยน้ำกลางวัน f) แรงดันระเหยน้ำกลางคืน g) ความเข้มแสง (PPF) h) ปริมาณน้ำฝน

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยหรือค่ารวมของข้อมูลอากาศสำหรับช่วงที่ทดลองระหว่างวันที่ 16 สิงหาคม ถึง 30 กันยายน 2552

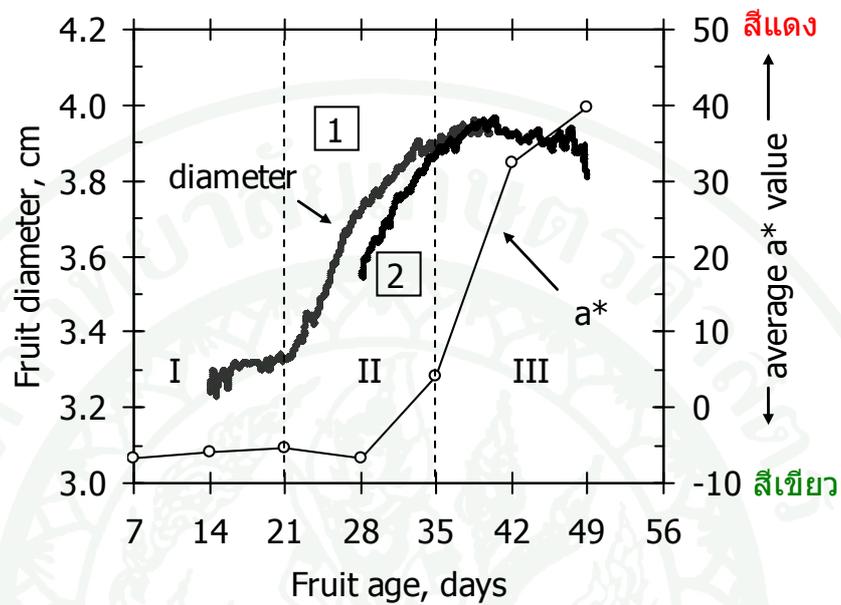
Parameter	Total	Max	Min	Aver
Daily rainfall, mm	350			
Rainfall day, day	19			
PPF, $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$		1757	0.0	757
Sunshine hour				12.1
Daytime air temp, C		34.6	25.1	30.7
Nighttime air temp, C		29.6	25.0	26.4
Daytime RH, %		91.4	47.8	64.4
Nighttime RH, %		92.4	68.2	85.4
Daytime VPD, kPa		2.9	0.3	1.7
Nighttime VPD, kPa		1.4	0.3	0.6

1.2 การเจริญเติบโตของผลมะเขือเทศตลอดช่วงอายุ

การศึกษาการเจริญเติบโตของผลมะเขือเทศ ประกอบด้วยการศึกษาการเปลี่ยนแปลง ทั้งลักษณะภายนอก และลักษณะเนื้อผล ดังนี้

ก. ลักษณะผลภายนอก

จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศแบบต่อเนื่องด้วย Dendrometer เริ่มเมื่อผลมะเขือเทศมีอายุ 14 วันหลังดอกบาน จนถึงอายุ 49 วัน ซึ่งได้วัดผลมะเขือเทศทั้งหมด 2 ผล เนื่องจากในผลที่หนึ่ง ผลมะเขือเทศได้หลุดร่วงจากต้นจึงต้องดำเนินการวัดในผลที่สอง พบว่ามีรูปแบบการเจริญเติบโตแบบซิกมอยด์ธรรมดา (simple sigmoid growth type) คือ มีการขยายขนาดต่ำในช่วงก่อน 21 วัน การขยายขนาดจะเพิ่มอย่างรวดเร็วในช่วง 21-35 วัน ผลมีขนาดใหญ่เต็มที่เมื่ออายุ 35 วัน ขนาดผลจะคงที่อยู่ที่ผลอายุ 49 วัน สีผิวผลมะเขือเทศแสดงด้วยครรชนีสีผิว a^* ในช่วงอายุ 7-28 วัน มีสีเขียวอ่อน ($-a^*$) หลังจากนั้นผลมีสีแดงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงสองสัปดาห์หลังจากนั้น ช่วงที่ผลเปลี่ยนเป็นสีแดงอย่างรวดเร็ว ตรงกับช่วงที่ผลมีการขยายขนาดเต็มที่อายุ 35 วัน (ภาพที่ 2, 3 และตารางที่ 2) ส่วนค่าสีผิวผลที่เป็นค่าความสว่าง (L^*) พบว่า ค่าความสว่างของผิวผลลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ค่าความสว่างต่ำสุดเกิดในช่วงอายุ 49 วันหลังดอกบาน ส่วนครรชนีสี b^* แสดงว่าผิวผลทุกอายุมีค่าในทิศทางของสีเหลือง (ตารางที่ 2) ในงานศึกษาของ Fraser *et al.*, 1994 กล่าวว่า การเปลี่ยนสีของผลมะเขือเทศจากสีเขียวเป็นสีแดง เกิดจากกระบวนการเปลี่ยน คลอโรพลาสต์ (chloroplast) เป็นโครโมพลาสต์ (chromoplast) ซึ่งเป็นรงควัตถุแคโรทีนอยด์ (carotenoid)



ภาพที่ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ และค่าเฉลี่ยสีผิว a^* ตามระบบ L^*a^*b color space ซึ่งอยู่ในทิศทางของสีเขียวเมื่อค่าเป็นลบ ($-a^*$) และอยู่ในทิศทางของสีแดงเมื่อค่าเป็นบวก ($+a^*$) โดย I, II และ III คือ ระยะการเจริญเติบโตของผลมะเขือเทศสามส่วน 1 และ 2 คือ ผลมะเขือเทศลูกที่หนึ่ง และลูกที่สอง

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยสีผิวผลตามระบบ $L^*a^*b^*$ color space ของผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ เมื่อ L^* คือ ค่าความสว่าง a^* และ b^* คือค่าสัมประสิทธิ์ของสี จะบ่งบอกถึงทิศทางของสี คือหาก a^* มีค่าเป็นบวกหมายถึงอยู่ในทิศทางของสีแดง a^* มีค่าเป็นลบหมายถึงอยู่ในทิศทางของสีเขียวค่า b^* เป็นบวกหมายถึงอยู่ในทิศทางของสีเหลือง และ b^* มีค่าเป็นลบหมายถึงอยู่ในทิศทางของสีน้ำเงิน และ ΔE_{ab}^* คือค่าความแตกต่างของค่าสีของผิวผลมะเขือเทศกับสีอ้างอิง คือสีดำ รหัส 202-A ของ R. H. S. colour chart

Fruit age days	ค่าสีตามระบบ ($L^* a^* b^*$ color space)			
	L^*	a^*	b^*	ΔE_{ab}^*
7	51.1	-6.7	30.4	47.1
14	44.0	-5.8	27.4	40.5
21	43.5	-5.3	25.2	38.3
28	39.7	-6.7	31.3	41.9
35	36.4	4.1	37.2	44.9
42	18.3	32.4	33.1	48.4
49	13.1	39.6	26.7	49.3
Key color Black	22.1	3.3	-5.4	



ภาพที่ 3 รูปร่างและสีของผลมะเขือเทศช่วงอายุ 7-49 วัน

ข. ลักษณะผลภายนอก

เก็บข้อมูลความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด (หน่วย mmol kg^{-1}) คาร์บอนไดร็อกไซด์ (หน่วย $\text{g}/100\text{g}$ หรือ % เชนิงมวล) pH และ EC (mS cm^{-1}) ของสารละลายน้ำคั้นที่ได้จากผลมะเขือเทศ ทั้งผลในช่วง 7-49 วัน (1-7 สัปดาห์) แสดงในภาพที่ 4 ควบคู่กับรูปแบบการเปลี่ยนสีของผลพบว่า ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของตัวถูกละลายของผลมะเขือเทศอายุ 7 วัน มีค่าประมาณ 333 mmol kg^{-1} และ ในช่วง 14-21 วัน มีค่าต่ำสุด แต่เพิ่มขึ้นรวดเร็วหลังจากนั้นจนถึงค่าสูงสุดที่ผลอายุ 35 วัน มีค่า C_s สูงสุดที่ 391 mmol kg^{-1} ซึ่งตรงกับช่วงที่ผลเปลี่ยนสีจากสีเขียวเป็นสีแดงหรือเป็นระยะเปลี่ยนสี (veraison) (ภาพที่ 4a) โดยในการศึกษานี้ พบว่าคาร์บอนไดร็อกไซด์จะมีค่าเพิ่มขึ้น คือ ในช่วงแรกที่อายุ ผล 14-21 วัน มีคาร์บอนไดร็อกไซด์น้อยที่สุดโดยเฉลี่ยอยู่ที่ 4.6% ผลช่วง 21-35 วัน มีคาร์บอนไดร็อกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงค่าสูงสุด ที่ผลอายุ 35 วัน อยู่ที่ระดับ 6.1% หลังจากนั้นเมื่อผลมะเขือเทศอายุ 42-49 วัน คาร์บอนไดร็อกไซด์ลดลงอย่างรวดเร็วเช่นกัน ซึ่งอาจจะเกิดจากผลมะเขือเทศใช้น้ำตาลเปลี่ยนเป็นสารตั้งต้นของการหายใจมากขึ้นเมื่อผลมะเขือเทศสุกเต็มที่ จึงทำให้คาร์บอนไดร็อกไซด์ลดลงและแสดงถึงการเข้าสู่ระยะที่ผลมะเขือเทศชรา (senescence) (ภาพที่ 4b) ในการศึกษาของ Miron และ Schaffer (1990) ได้ อธิบายว่าในช่วงที่ผลมะเขือเทศยังอ่อนและเขียวอยู่ ผลมะเขือเทศเก็บสะสมอาหารที่ได้มาจากการสังเคราะห์แสงของใบในรูปของแป้ง และเมื่อเริ่มใกล้ช่วงที่ผลเปลี่ยนสี จะเกิดกระบวนการทางชีวเคมีในการทำให้แป้งเปลี่ยนรูปเป็นน้ำตาล เนื่องจากพืชจะสร้าง enzyme polygalacturonase ซึ่งเป็นน้ำย่อยที่เปลี่ยนแป้งและ pectin ให้เป็นน้ำตาล จึงทำให้คาร์บอนไดร็อกไซด์และตัวถูกละลายสูงขึ้น ซึ่งจะแตกต่างกับผลอ่อนที่เป็นผลไม้ประเภท Non-climacteric ที่สะสมคาร์โบไฮเดรตต่ำ การสะสมจะเกิดจากการขนส่งน้ำตาลที่สร้างขึ้นที่ใบเข้าสู่ท่อลำเลียงอาหารเพื่อลำเลียงมายังผล (Watts, 1962)

ค่า pH ของสารละลายน้ำคั้นที่ได้จากผลมะเขือเทศ มีค่า pH เฉลี่ยสูงสุด ที่ผลอายุ 7 วัน ค่า pH สูงสุด คือ 5.3 จากนั้นค่า pH จะลดลงอย่างต่อเนื่อง จนถึงอายุ 35 วัน ที่ระดับ 4.1 (ภาพที่ 4c) ซึ่งเป็นช่วงเริ่มกระบวนการสุกและสอดคล้องกับการศึกษาของ Mutschler (2007) ที่ปริมาณกรด (acidity) จะสูงในระยะเริ่มกระบวนการสุก

ค่านำไฟฟ้า (Electrical conductivity, EC) สะท้อนถึงปริมาณไอออนในสารละลาย น้ำคั้นจากผลมะเขือเทศ มีค่า EC สูงสุดที่ผลอายุ 7 วัน ประมาณ 4.7 mS cm^{-1} และลดลงอย่างรวดเร็วเหลือ 1.7 mS cm^{-1} ในช่วงที่ผลอายุ 35 วัน และรักษาระดับค่อนข้างคงที่จนถึงอายุ 49 วัน (ภาพที่ 4d) แสดงว่าขณะที่ผลมีการเจริญเติบโตมากขึ้น ปริมาณไอออนในสารละลายที่ได้จากผลมะเขือเทศจะ

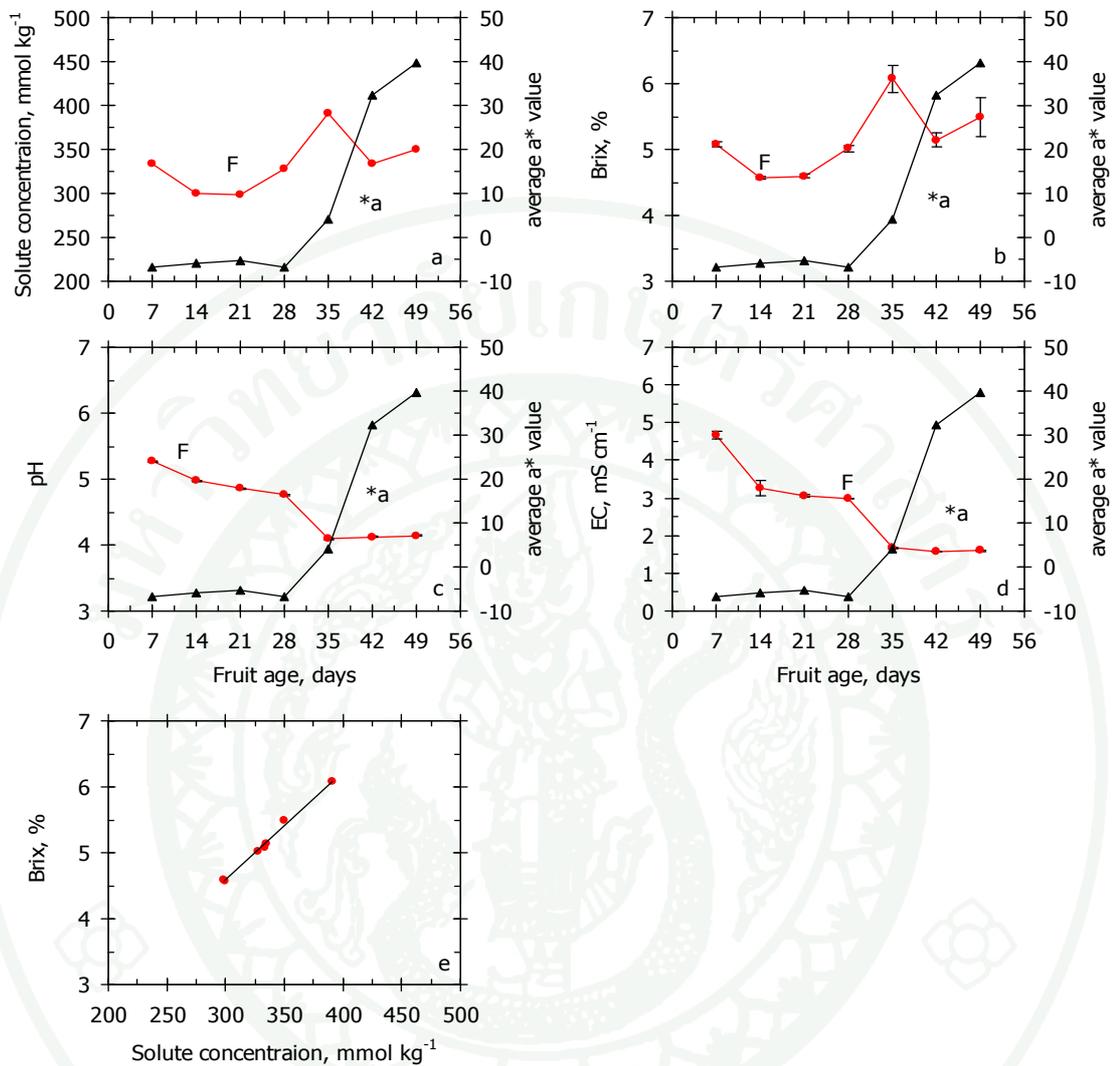
ลดลงเป็นลำดับ ความเข้มข้นของตัวถูกละลายและคลอโรฟิลล์ มีค่าเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงข้ามกับค่า pH และ EC ในขณะที่ค่า pH และ EC ผันแปรในลักษณะเดียวกัน ขณะที่ C_s และคลอโรฟิลล์ผันแปรในแนวเดียวกัน ซึ่งแสดงว่า C_s ส่วนใหญ่ในผลมะเขือเทศเป็นสารประกอบน้ำตาล

โดยสรุป กล่าวได้ว่ามะเขือเทศมีการเจริญเติบโตแบบซิกมอยด์ เป็นลักษณะเช่นเดียวกับการเจริญเติบโตของเซลล์เนื้อเยื่อหรือสิ่งมีชีวิตทั่วไป โดยมีอัตราการเติบโตต่ำในช่วงแรก แล้วมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล (exponential increment) ระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงมีอัตราการเจริญเติบโตที่ค่อยๆ ลดลง สำหรับผลมะเขือเทศ การเติบโตแบ่งได้เป็น 3 ระยะ (ภาพที่ 2) คือ

ระยะที่ I เป็นช่วงที่เกิดหลังติดผลใหม่ๆ ช่วงนี้จะเป็นการแบ่งเพิ่มจำนวนเซลล์ที่ยังไม่ขยาย ซึ่งอยู่ในช่วงที่ผลมีอายุ 14-21 วัน หรือประมาณ 2-3 สัปดาห์หลังดอกบาน

ระยะที่ II เป็นช่วงที่มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายขนาดของเซลล์และการเพิ่มช่องว่างระหว่างเซลล์ (intercellular space) มีการเพิ่มปริมาตรและเพิ่มมวลแห้งซึ่งเป็นช่วงที่ผลมะเขือเทศมีอายุ 21-35 วัน หรือประมาณ 3-5 สัปดาห์หลังดอกบาน ผลอายุ 28 วัน เป็นช่วงก่อนเกิดการเปลี่ยนสีของผลจากสีเขียวเป็นมีจุดสีแดงปรากฏขึ้น ก่อนที่ค่าคลอโรฟิลล์และระดับความเป็นกรดเพิ่มขึ้น และผลมีการขยายขนาดเต็มที่ในระยะนี้

ระยะที่ III ผลมีขนาดคงที่ ผลเริ่มเข้าสู่ระยะชราผลมีการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการชีวเคมี (biochemical transformations) การสุก (ripening) ระบุได้เมื่อมีสีแดงปรากฏขึ้น ค่าคลอโรฟิลล์และ C_s ที่เพิ่มขึ้น พร้อมทั้งการลดลงของค่า pH และ EC



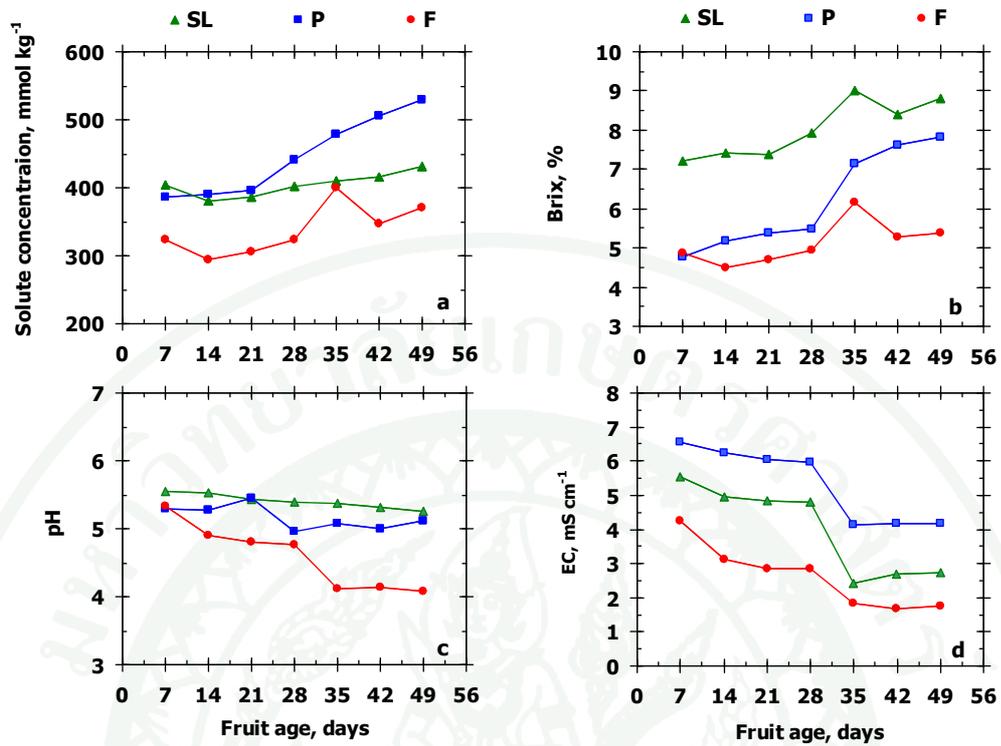
ภาพที่ 4 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่วัดได้จากสารละลายน้ำคั้นรวมของผลมะเขือเทศอายุ 7-49 วัน a) ความเข้มข้นของตัวถูกละลาย b) ธรรมชาติบริกซ์ c) ความเป็นกรดต่าง d) ค่านำไฟฟ้า (แต่ ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจาก 13 ผล) เส้นตั้ง I เป็นค่า standard deviation ในภาพแสดงค่าธรรมชาติ สีผิว a* เพื่อแสดงพัฒนาการของการสุกของผล (-a* เป็นสีเขียว, +a* เป็นสีแดง) และ e) ค่าความสัมพันธ์ระหว่างธรรมชาติบริกซ์กับความเข้มข้นของตัวถูกละลาย

นอกจากค่าเฉลี่ยของทั้งผลข้างต้นแล้ว ได้ศึกษารายละเอียดของพารามิเตอร์ของส่วนต่างๆ ของผล ได้แก่ เนื้อผลรวมเปลือก (flesh, F), ก้านผล (pedicel, P) และใบติดผล (subtending leaf of fruit, SL) โดยมีค่าต่างๆ ดังนี้

ความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด (C_s) ในสารละลายน้ำคั้นของใบและส่วนต่างๆ ของผลอายุ 7-49 วัน แสดงในภาพที่ 5 พบว่า C_s ของใบติดผลมีค่าประมาณคงที่ตลอดอายุผล ขณะที่ค่า C_s ของผล และก้านผลมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นตามอายุผล โดยมีค่า C_s ก้านผลมีค่าสูงที่สุด รองลงไปเป็นค่า C_s ของใบติดผล เมื่อผลอยู่ในช่วงเปลี่ยนสีที่ 35 วัน ค่า C_s ของเนื้อผลรวมเปลือก มีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุผลใกล้เคียงกับของใบ ในส่วนค่าครรชนีบริกซ์ ซึ่งสะท้อนถึงปริมาณน้ำตาลซูโครส พบว่า มีลักษณะเพิ่มขึ้นตามอายุคล้ายคลึงกับค่า C_s แต่ลำดับแตกต่างไป คือ ใบมีค่าบริกซ์สูงที่สุดเป็นการบ่งถึงปริมาณน้ำตาลซูโครสที่แหล่งผลิต (source) ยังคงมีระดับที่สูงกว่าแหล่งรับ (sink) และความเข้มข้นของตัวถูกละลายในก้านผลที่เพิ่มขึ้นส่วนหนึ่งไม่ใช่ น้ำตาลซูโครส

ระดับความเป็นกรด (pH) ของสารละลายน้ำคั้นของใบติดผลมีค่าประมาณคงที่ตลอดอายุผล แต่ในส่วนเนื้อผลเปลือกรวมค่า pH ลดลงชัดเจนเมื่อผลมีอายุมากขึ้น ในช่วงที่ผลเปลี่ยนสีที่อายุ 35 วัน ค่า pH อยู่ในช่วงกรดจัด ($\text{pH} > 4$) สะท้อนปริมาณ โปรตอน (H^+) ในกระบวนการขนส่งแบบใช้พลังงาน (proton motive force) สำหรับเคลื่อนย้ายซูโครสเข้าสู่เนื้อผล

ค่าการนำไฟฟ้า (EC) ของสารละลายของก้านผลมีค่าสูงสุด รองลงไปคือ ใบ สะท้อนว่าก้านผลและใบติดผลมีสารที่อยู่ในรูป active ion สูงซึ่งมักหมายถึง โพแทสเซียมไอออน สำหรับการขนส่งสารอาหาร และ EC ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงที่ผลเปลี่ยนสี ซึ่งน่าจะอธิบายได้ว่าเป็นช่วงที่การลำเลียงในท่ออาหารได้ชะลอลง และเปลี่ยนเป็นการขนส่งซูโครสแบบใช้พลังงาน (ATP) ซึ่งตรงกับช่วงที่ pH ลดลง



ภาพที่ 5 ค่าเฉลี่ยของพารามิเตอร์ที่วัดได้จากสารละลายน้ำคั้นของใบและผลมะเขือเทศอายุ 7-49 วัน a) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด b) ดรรชนีบริกซ์ c) ความเป็นกรดต่าง d) ค่านำไฟฟ้า (แต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจาก 13 ผล) เส้นตั้ง I เป็นค่า standard deviation โดย SL คือ ใบติดผล (subtending leaf of fruit), P คือ ก้านผล (pedicel) และ F คือ เนื้อรวมเปลือกของผล (flesh)

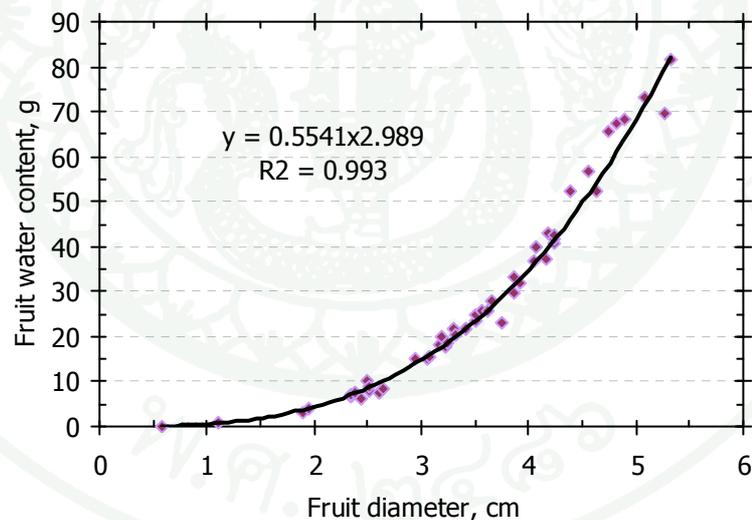
1.3 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาณน้ำในผล

ปริมาณน้ำในผลสัมพันธ์กับปริมาตรของผล ซึ่งเป็นฟังก์ชันของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผล สำหรับผลมะเขือเทศได้ความสัมพันธ์ว่า

$$W_c = 0.5541D^{2.989} \quad (10)$$

เมื่อ W_c = ปริมาณน้ำในผล (g)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางผล (cm)

ปริมาณน้ำเป็นฟังก์ชันของเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่ายกกำลังเกือบเท่ากับ 3 แสดงว่าผลมะเขือเทศมีรูปร่างใกล้เคียงกับทรงกลม ($V = \frac{1}{6}\pi d^3 = 0.524d^3$) และมีความหนาแน่นของผลประมาณ 1g cm^{-3}



ภาพที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาณน้ำในผลของมะเขือเทศ

1.4 มวลของผลมะเขือเทศ

มวลสดและมวลแห้งของผลมะเขือเทศที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่างๆ แสดงในตารางที่ 3 ผลมะเขือเทศมีมวลแห้งประมาณ 7% ของมวลสด ซึ่งค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Ho *et al.*, 1980 ที่รายงานค่ามวลแห้ง 5-10% ของมวลสด

ตารางที่ 3 มวลสด (Fresh mass, Mf, g) มวลแห้ง (Dry mass, Md, g) และสัดส่วนมวลแห้งต่อมวลสดของผลมะเขือเทศ

Diameter of tomato, cm	Fresh mass, g	Dry mass, g	Md / Mf, %
1.17	0.15	0.01	6.67
1.95	0.76	0.06	7.89
2.25	3.60	0.28	7.78
2.32	4.15	0.30	7.23
2.70	7.15	0.53	7.41
3.48	20.05	1.25	6.23
3.49	23.02	1.45	6.30
3.56	21.70	1.52	7.00
3.61	23.56	1.62	6.88
3.80	23.30	1.50	6.44
4.82	72.63	5.40	7.43
4.90	73.28	5.21	7.11
5.08	79.08	6.02	7.61
5.28	74.59	5.11	6.85
5.32	87.89	6.50	7.40
average			7.08

2. การวัดผลมะเขือเทศในรอบวัน

2.1 สภาพแวดล้อมในรอบวัน

สภาพอากาศในการวัดครั้งแรกเมื่อวันที่ 17 สิงหาคม 2552 ดังแสดงในภาพที่ 7 เป็นวันที่มีแสงแดดจัด (ภาพที่ 7a) ในช่วงเช้าความเข้มแสง (PPF) มีค่าค่อยๆเพิ่มขึ้น จนถึงช่วง 11:30-14:15 น. มีเมฆบังแสงแดดเป็นระยะทำให้ความเข้มแสงที่วัดได้มีค่าผันแปร ความเข้มแสงสูงสุดที่วัดได้ของวันมีค่าประมาณ $2,235 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ที่เวลา 12:30 น. และหลังจากเวลา 14:30 น. ความเข้มแสงลดลงอย่างสม่ำเสมอจนหมดแสงแดดเวลา 18:45 น. ค่าของอุณหภูมิจะแปรผันตามความเข้มแสงในรอบวัน ความเข้มแสงที่สูงขึ้นในช่วงเช้าจะส่งผลให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้น (ภาพที่ 7b) และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศมีค่าลดลง (ภาพที่ 7c) ในช่วงบ่ายเมื่อความเข้มแสงลดลง อุณหภูมิจะค่อยๆลดลงตามไปด้วย และความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศค่อยๆมีค่าเพิ่มขึ้น อุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 24.9-35.8 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ในช่วง 36-95 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) มีค่าอยู่ในช่วง 0.2-3.4 kPa

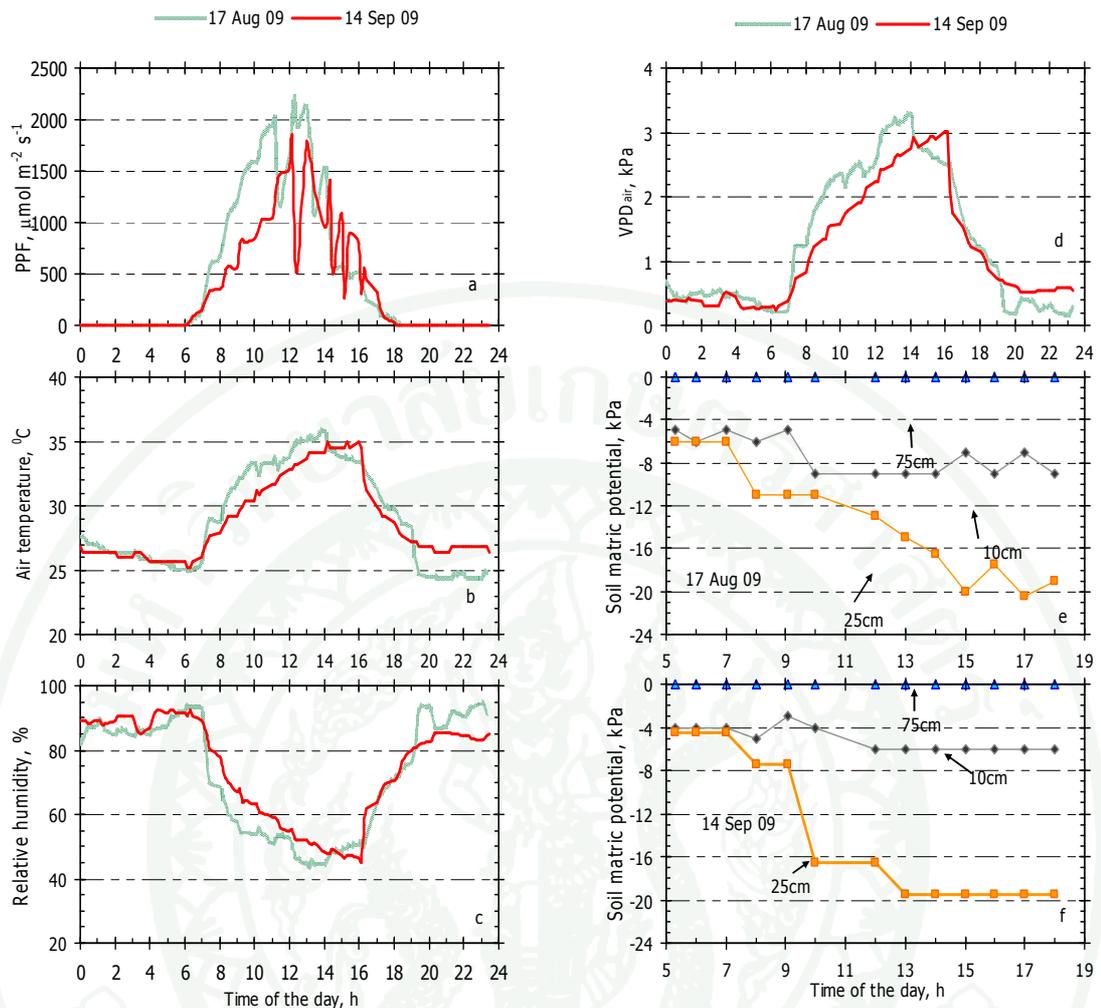
สภาวะน้ำในดินที่ความลึก 3 ระดับ (ภาพที่ 7e พบว่าที่ระดับ 75 cm มีค่าพลังงานก่อกับก่อนดินสูงสุดใกล้เคียง 0 kPa แสดงว่าน้ำในดินในชั้นนี้มีระดับประมาณอิ่มตัวตลอดทั้งวันไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งระดับน้ำใต้ดินในแปลง ในขณะที่ระดับ 25 cm แม้มีค่าพลังงานเปลี่ยนแปลงลดต่ำลง แต่ยังมีระดับสูงที่ -20 kPa และที่ระดับ 10 cm มีค่าพลังงานก่อกับก่อนดินอยู่ในช่วงไม่ต่ำกว่า -10 kPa ทั้งหมดนี้แสดงว่า ชั้นรากพืชอยู่ในสภาพที่น้ำมีระดับพลังงานก่อกับก่อนดินสูงตลอดทั้งวัน และรากพืชที่ความลึก 25 cm มีการดูดใช้น้ำมากอย่างชัดเจน

สภาพอากาศในการวัดครั้งที่สองในวันที่ 14 กันยายน 2552 ดังแสดงในภาพที่ 7 เป็นวันที่ลักษณะอากาศที่คล้ายคลึงกับการวัดครั้งแรก คือมีแสงแดดจัด (ภาพที่ 7a) และมีเมฆบังแสงแดดเป็นระยะ ความเข้มแสงสูงสุดที่วัดได้ของวันมีค่าประมาณ $1,819 \mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ที่เวลา 12 น. ความเข้มแสงลดลงจนหมดแสงแดดเวลา 18 น. อุณหภูมิอากาศเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง 25.2-34.9 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์อากาศอยู่ในช่วง 46-92 เปอร์เซ็นต์ ค่าแรงดึงระเหยน้ำ อยู่ในช่วง 0.3-3.0 kPa สภาวะน้ำในดินที่ความลึก 3 ระดับ (ภาพที่ 7f) มีลักษณะคล้ายคลึงเช่นเดียวกับสภาพในการวัดครั้งแรก โดยที่ระดับ 75 cm ยังเป็นดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ และน้ำมีพลังงานก่อกับก่อนดินสูงตลอดความลึกของชั้นรากพืช โดยมีค่าไม่ต่ำกว่า -20 kPa ตลอดทั้งวัน การลดลงของค่า

พลังงานกำกับก้อนดินที่ระดับความลึก 25 cm ในรอบวัน แสดงว่ารากมีการดูดน้ำจากดิน โดยเริ่มตั้งแต่เวลาประมาณ 7 น. ซึ่งตรงกับ ช่วงเวลาที่เริ่มมีแสงแดด และค่าแรงดึงระเหยน้ำเริ่มเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว

กล่าวโดยรวมได้ว่าสภาพทั้งสองวัน เป็นวันที่ต้นมะเขือเทศได้รับแสงแดดจัด ตั้งแต่เช้าถึงเย็น และพลังงานกำกับก้อนดินของน้ำในเขตรากตลอดชั้นลึกถึง 75 มีระดับสูง แต่สภาพอากาศวันแรกมีความแห้งรุนแรงกว่าวันที่สองในช่วงกลางวัน (6-14 น.)





ภาพที่ 7 สภาพแวดล้อมของวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และวันที่ 14 กันยายน 2552 ที่วัดรอบวันของผลมะเขือเทศ a) ความเข้มแสง (PPF) b) ความชื้นสัมพัทธ์ c) อุณหภูมิ d) ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) e) ค่าพลังงานกักเก็บกอนดิน(matric potential)ที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm ของวันที่ 17 สิงหาคม 2552 f) พลังงานกักเก็บกอนดิน(matric potential)ที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm ของวันที่ 14 กันยายน 2552

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุด ต่ำสุดในรอบวันของสภาพอากาศและพลังงานกำกับก้นดิน (Ψ_m) ที่ความลึกสามระดับของวันที่ 17 สิงหาคม และ 14 กันยายน 2552

	17 Aug 2009			14 Sep 2009		
	Max.	Min.	Avg.	Max.	Min.	Avg.
PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	2,235	0	932*	1,820	0	737*
Air temperature (C)	35.8	24.3	28.9	34.9	25.2	29.0
VPD _{air} (kPa)	3.4	0.2	1.3	3.0	0.3	1.0
Air RH (%)	94	44	73	92	45	74
Ψ_m at 10 cm (kPa)	-3	-6	-5	-5	-9	-7
Ψ_m at 25 cm (kPa)	-5	-20	-14	-6	-21	-13
Ψ_m at 75 cm (kPa)	0	0	0	0	0	0

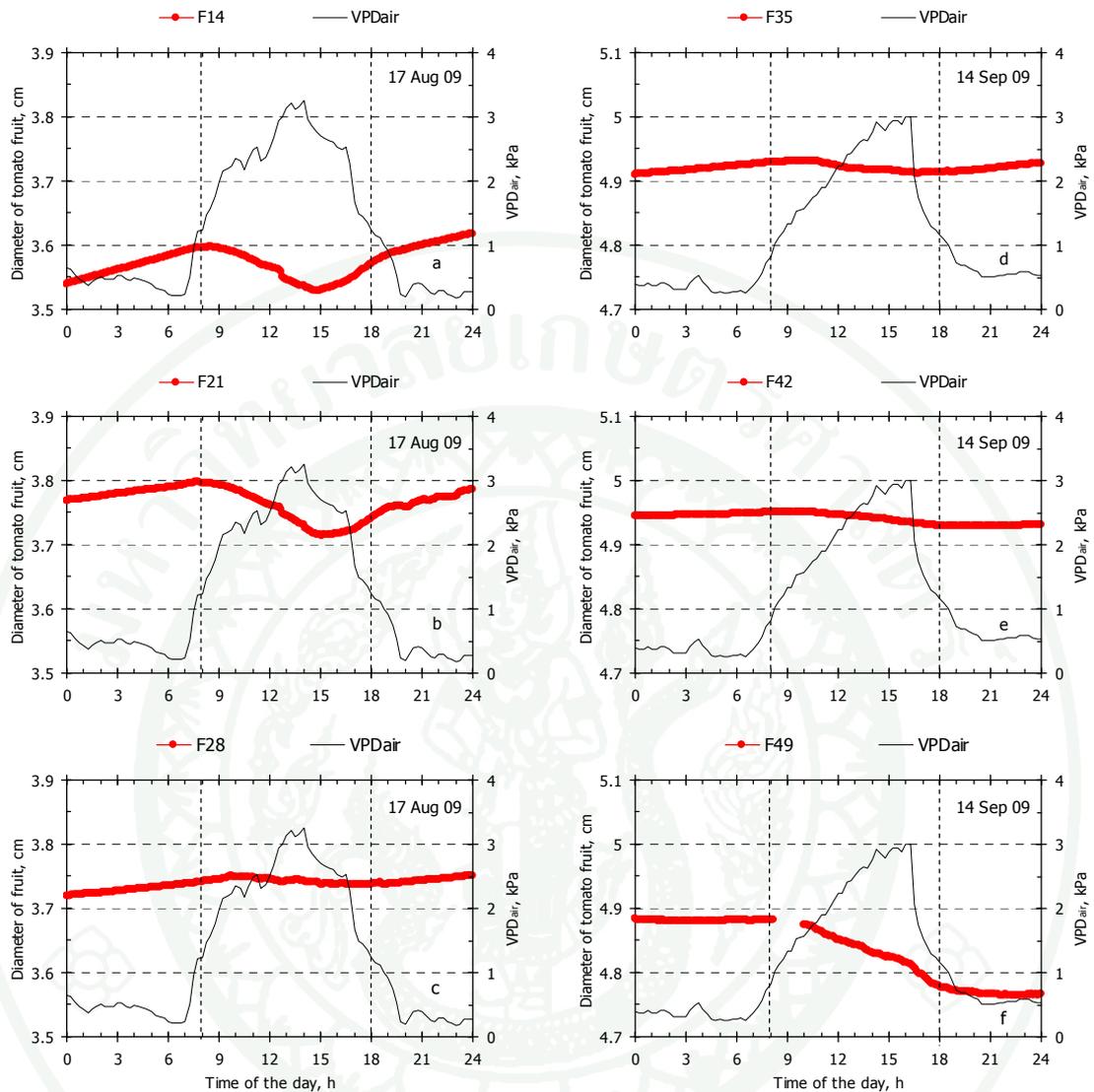
* daytime average (เฉพาะช่วงมีแสงแดด)

2.2 การเปลี่ยนแปลงขนาดและปริมาณน้ำในผลในรอบวัน

ติดตามการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางผลในรอบวันของผลมะเขือเทศใน 6 ช่วงอายุ (วัดด้วยเครื่อง Dendrometer) วัดสองครั้ง ครั้งที่หนึ่งในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 วัดผลอายุคือ 14, 21 และ 28 วันหลังดอกบาน ซึ่งเป็นช่วงที่ผลยังอ่อน และวัดครั้งที่สองในวันที่ 14 กันยายน 2552 วัดผลอายุคือ 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน ซึ่งเป็นช่วงที่ผลสุก

ภาพที่ 8 แสดงว่าผลมะเขือเทศแต่ละอายุมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดผลที่คล้ายกัน โดยผลจะหดขนาดลงในช่วงเวลาหลัง 8 น. ไปจนถึง 15 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศมีค่าสูง จากนั้นผลมะเขือเทศจะมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในช่วงเย็นไปตลอดทั้งคืน แสดงถึงการไหลเข้าของน้ำสู่ผลในช่วงกลางคืน ผลที่มีอายุช่วง 14 ถึง 35 วัน จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อสิ้นสุดรอบวันที่สูงกว่าเมื่อเริ่มต้น และในผลอายุน้อย (14-21 วัน) มีการหดขนาดในช่วงกลางวัน (8-15 น.) ที่มากกว่าผลอายุมากขึ้น (28-42 วัน) เนื่องจากในช่วงที่ผลอายุน้อย (14-21 วัน) จะมีอัตราการคายน้ำที่สูงกว่า (หัวข้อ 2.3) และพบว่าในช่วงที่ผลเปลี่ยนสีอายุ 28-42 วัน ผลจะหดขนาดเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้อาจจะเพราะในผลมะเขือเทศมีการรักษาค่าพลังงานความดันของน้ำให้อยู่ในระดับสูงในช่วงเวลากลาง (8-15 น.) (หัวข้อ 3.3) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Guichard *et al* (1990) ซึ่งพบการหดขนาดที่น้อยในผลมะเขือเทศที่อยู่ช่วงที่เปลี่ยนสี

เมื่อผลมีอายุมากขึ้นในช่วงอายุ 42 และ 49 วัน (ช่วงที่ผลสุกแก่) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าต่ำกว่าค่าเริ่มต้น แสดงว่าผลมีการลดขนาดลงในรอบวัน ผลอายุ 42 วัน ยังแสดงการเพิ่มขนาดเล็กน้อยในช่วงเช้า ส่วนผลอายุ 49 วัน ไม่แสดงการขยายขนาดเลย มีแต่ขนาดลดลงในช่วงเวลากลางวันที่มีแรงดึงระเหยน้ำสูง และไม่แสดงถึงการได้รับน้ำเข้าทดแทนสู่ผลในช่วงเย็น การเปลี่ยนแปลงขนาดของผลในรอบวัน แสดงค่าในตารางที่ 5



ภาพที่ 8 การขยายขนาดผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง ที่อายุผล 14-49 วัน แสดงควบคู่กับค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) ของการวัดผลมะเขือเทศ 2 ครั้ง ในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และ 14 กันยายน 2552 ซึ่งในแต่ละช่วงอายุเป็นคนละผลกัน (F หมายถึงผล และ 14-49 หมายถึงอายุผลเป็นวัน)

ตารางที่ 5 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศในช่วง 3 เวลา ในรอบ 24 ชั่วโมง ของผลมะเขือเทศ 6 ช่วงอายุ แต่ละช่วงอายุเป็นคนละผลกัน

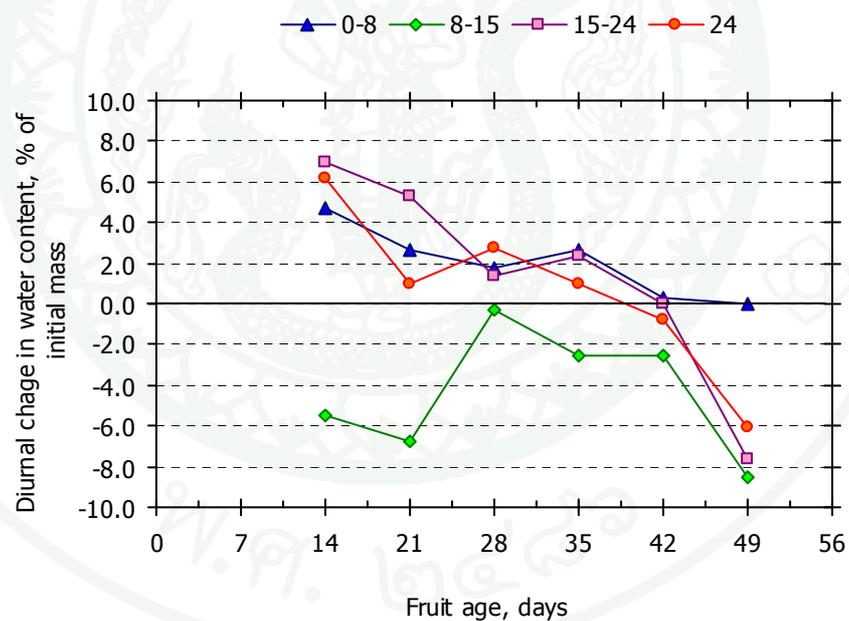
Fruit age, days	Change in fruit diameter, cm				% of initial fruit diameter	Initial fruit diameter, cm
	Time of the day, h			Sum		
	0-8	8-15	15-24			
14	0.057	-0.080	0.090	0.067	1.857	3.61
21	0.030	-0.080	0.060	0.010	0.270	3.69
28	0.020	-0.004	0.020	0.036	0.973	3.71
35	0.018	-0.017	0.020	0.021	0.429	4.89
42	0.003	-0.020	0	-0.017	-0.347	4.90
49	0	-0.060	-0.060	-0.120	-2.500	4.80

การเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางผลใน 3 ช่วงวัน เป็นค่าผลต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เวลาสุดท้ายกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ณ เวลาที่เริ่มต้น พบว่าในช่วงเวลา 15-24 น. จนถึง 8 น. วันรุ่งขึ้น คือ ช่วงเย็นถึงเช้าวันถัดไปเป็นช่วงเวลาที่ผลมะเขือเทศมีการเพิ่มขนาดผล แสดงว่าในช่วงดังกล่าว ผลมะเขือเทศจะได้รับน้ำเข้าสู่ผล ชดเชยส่วนที่สูญเสียเมื่ออยู่ภายใต้สภาพอากาศที่แห้งรุนแรงในช่วงกลางวันระหว่าง 8-15 น. ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ผลมะเขือเทศมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลง เมื่อผลมะเขือเทศอายุน้อย (14 และ 21 วัน) ผลจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงมากที่สุด แต่โดยรวม 24 ชม. ผลอายุน้อยแสดงขนาดที่เพิ่มมากที่สุด ผลอายุมาก (42-49 วัน) เมื่อเป็นผลสุก ผลมีขนาดลดลง

เมื่อใช้ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกับปริมาณน้ำในผล (สมการที่ 10) คำนวณปริมาณน้ำในรอบ 24 ชั่วโมง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 6 และภาพที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นว่า ช่วงกลางวัน 8-15 น. เป็นช่วงที่ผลมีปริมาณน้ำลดลงในทุกช่วงอายุ ผลอายุ 14 วัน มีการเพิ่มขึ้นของน้ำในผลมากที่สุดถึง 1.7 g (หรือมีมวลเพิ่มขึ้น 6.2 % ของมวลสดเริ่มต้น) โดยผลอายุ 49 วัน มีน้ำในผลลดลงมากที่สุดถึง 4.4 g คิดเป็น 6.1% ของมวลสดเริ่มต้น

ตารางที่ 6 ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงในผลมะเขือเทศ 3 ช่วงเวลาในรอบ 24 ชั่วโมง เทียบเป็นร้อยละของมวลผลสดเริ่มต้น

Fruit age, days	Change in fruit water content, g				% of initial fruit mass	Initial fruit mass, g
	Time of the day, h			Sum		
	0-8	8-15	15-24			
14	1.28	-1.47	1.89	1.68	6.2	27.0
21	0.72	-1.82	1.44	0.34	1.0	34.0
28	0.48	-0.07	0.36	0.77	2.7	28.5
35	0.72	-0.70	0.63	0.65	1.0	65.0
42	0.08	-0.70	0.00	-0.62	-0.8	77.5
49	0.00	-2.31	-2.07	-4.38	-6.1	71.8



ภาพที่ 9 การเปลี่ยนแปลงของมวลน้ำในผลมะเขือเทศในช่วง 0-8, 8-15, 15-24 และรอบ 24 ชั่วโมง คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของมวลผลสดเริ่มต้น

2.3 อัตราและปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผลในรอบวัน

อัตราไหลของน้ำออกจากผล แสดงด้วยอัตราการคายน้ำที่วัดทุกชั่วโมง ระหว่าง 8-18 น. (ภาพที่ 10 และตารางที่ 7)

อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศมีแนวโน้มเดียวกันทั้ง 6 ช่วงอายุผล คือ อัตราคายน้ำจะค่อยๆ เพิ่มสูงขึ้นในช่วงเช้าจนกระทั่งสูงสุดเมื่อเวลาประมาณ 12-13 น. (ภาพที่ 10b) ซึ่งเป็นไปตามการเปลี่ยนแปลงของค่าแรงดึงคายน้ำ (ภาพที่ 10a) ส่วนค่าน้ำไหลปากใบของผลมะเขือเทศมีค่าค่อนข้างคงที่ทั้งวัน ไม่ผันแปรตามสภาพอากาศ (ภาพที่ 10c) ช่วงเช้าจึงเป็นช่วงที่ผลมะเขือเทศมีทั้งช่องทางการไหล และแรงขับเคลื่อนที่เอื้อต่อการคายน้ำ หลังจากนั้นในช่วงบ่าย อัตราคายน้ำจะค่อยๆ ลดต่ำลงตามแรงดึงคายน้ำที่ลดต่ำลง โดยผลมะเขือเทศอายุน้อย (14 และ 21 วัน) มีอัตราการคายน้ำที่สูงกว่าช่วงอายุผลที่มีอายุมากขึ้น (21-49 วัน) เนื่องจากมีค่าน้ำไหลปากใบของผลที่สูงกว่าชัดเจน ผลมะเขือเทศทั้ง 6 ช่วงอายุ มีค่าอัตราการตรึง CO₂ สุทธิเป็นค่าติดลบ สะท้อนว่าผลมะเขือเทศมีอัตราการหายใจมากกว่าอัตราการสังเคราะห์แสง หรือกล่าวได้ว่าผลมะเขือเทศหายใจ (ภาพที่ 10e) โดยที่ผลมะเขือเทศอายุ 35 วัน 6 (ช่วงผลเปลี่ยนสี) มีอัตราหายใจต่ำกว่าช่วงอายุอื่นๆ และผลมะเขือเทศสุกชรา (42-49 วัน) มีอัตราหายใจสูงกว่าช่วงอายุอื่น

อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศที่เปลี่ยนแปลงในรอบวัน ถูกกำหนดโดยค่าแรงดึงคายน้ำโดยตรง ส่วนค่าน้ำไหลผิวผลนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อผลยังมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิว (surface area) น้อย ค่าน้ำไหลผิวผลมีค่าที่สูง และเมื่อผลมีขนาดใหญ่มากขึ้น พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ค่าน้ำไหลผิวผลกลับมีค่าลดลง แสดงว่าช่องทางการไหลของน้ำที่ผิวผลน่าจะมีจำนวนที่คงที่ ขณะที่ผลมีพื้นที่ผิวน้อยทำให้จำนวนช่องทางการไหลต่อพื้นที่ผิว (ความหนาแน่นของช่องทาง) มีค่าสูงกว่า เมื่อผลเข้าสู่ระยะสุก ช่องทางการไหลมักถูกเคลือบไปด้วย wax ที่มากขึ้น (Mapelli *et al.*, 1978) ซึ่งน่าจะทำให้ค่าน้ำไหลลดลง ดังนั้นผลมะเขือเทศที่มีอายุมากขึ้นจึงมีค่าน้ำไหลของช่องทางการไหลและอัตราการคายน้ำลดลง (ตารางที่ 7)

เนื่องจากการวัดอัตราการคายน้ำครอบคลุมเฉพาะช่วงเวลากลางวัน 8-18 น. (10 ชม.) จึงต้องประมาณการอัตราการคายน้ำในช่วงเวลากลางคืน 18-8 น. (14 ชม.) ซึ่งทำโดยใช้อัตราการคายน้ำที่เวลา 18 น. ที่เกิดในขณะที่ยังมีแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (VPD_{air}) มีค่าประมาณ 1.0 kPa (ภาพที่ 7d) เป็นระดับพื้นฐาน แล้วพิจารณาว่าแรงดึงระเหยน้ำในช่วงเวลากลางคืนมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.2 kPa (ภาพที่ 7d) ดังนั้น หากประมาณการขั้นต้นว่าแรงดึงคายน้ำ ($VPD_{fruit-air}$) เปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับแรงดึงระเหยน้ำ จะได้อัตราการคายน้ำในช่วงกลางคืนเป็นประมาณ 20% ของอัตราการคายน้ำที่ 18 น.

ตามสัดส่วนการลดลงของค่า VPD_{air} ปริมาณน้ำที่ผลมะเขือเทศคายออก แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา แสดงในตารางที่ 8 พบว่า ผลมะเขือเทศมีการสูญเสียน้ำรวม 24 ชม. เป็นปริมาณมากในช่วงของผลอายุ 14-21 วัน โดยมีค่าประมาณ 16-18% ของมวลผลสดเริ่มต้น ส่วนผลที่อายุ 28-49 วัน มีปริมาณน้ำที่ไหลออกใกล้เคียงกันและเป็นสัดส่วนของมวลผลที่ลดลง คืออยู่ที่ประมาณ 5.5-6.2% ของมวลผลสดเริ่มต้น



ตารางที่ 7 พารามิเตอร์การแลกเปลี่ยนแก๊สของผลมะเขือเทศที่วัดได้ในรอบวัน ได้แก่ อัตราการตรึง CO₂ สุทธิ (A, $\mu\text{molCO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$) อัตราคายน้ำ (E, $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) ค่าน้ำไหลของผิวผล ($g_c, \text{mmolH}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) อุณหภูมิผิวผล (T_{fruit} , °C) อุณหภูมิอากาศ (T_{air}) แร้งดึงคายน้ำ ($\text{VPD}_{\text{fruit-air}}$, kPa) ความเข้มแสง (PPF, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) และพื้นที่ผิวผล (surface area, cm^2) ผลแต่ละช่วงอายุเป็นคนละผลกัน

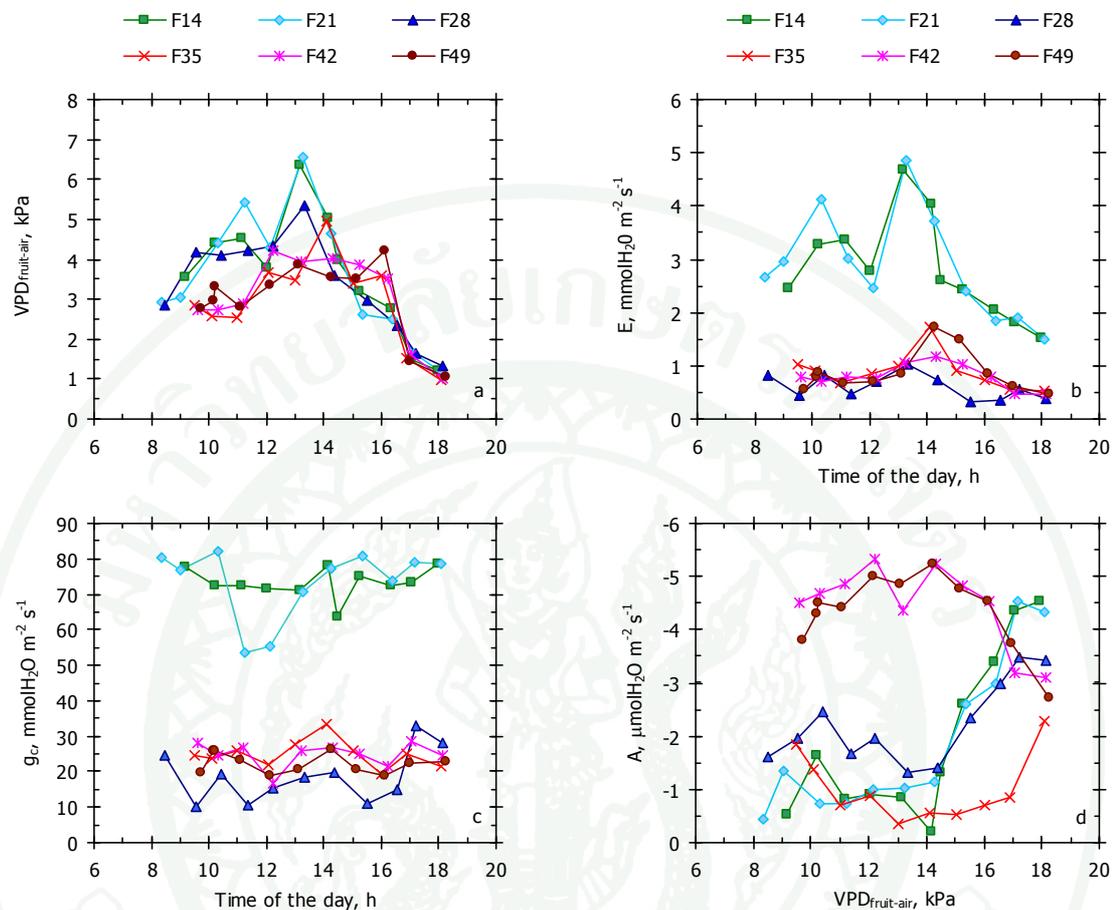
								Surface	
	Time	A	E	g_c	T_{air}	T_{fruit}	PPF	$\text{VPD}_{\text{fruit-air}}$	area
F14	9.2	-0.51	2.5	78	38	37	1187	3.6	
	10.2	-1.63	3.3	72	40	39	1308	4.4	
	11.2	-0.83	3.4	73	42	40	1927	4.5	
	12.0	-0.90	2.8	72	43	39	808	3.8	
	13.2	-0.84	4.7	71	46	42	1593	6.3	
	14.2	-0.21	4.0	78	43	41	1145	5.0	
	14.5	-1.31	2.6	64	39	38	549	4.0	
	15.3	-2.62	2.4	75	36	35	488	3.2	
	16.4	-3.41	2.0	72	34	34	314	2.8	
	17.1	-4.36	1.8	73	30	30	110	1.5	
18.0	-4.54	1.5	78	28	28	38	1.2		
	average	-1.92	2.8	73	38	37	861	3.7	24.2
F21	8.4	-0.44	2.7	80	34	33	825.5	2.9	
	9.0	-1.35	3.0	77	38	36	1201	3.0	
	10.3	-0.73	4.1	82	40	40	1430	4.4	
	11.2	-0.74	3.0	54	42	42	737	5.4	
	12.1	-0.99	2.5	55	42	39	1769	4.3	
	13.3	-1.02	4.9	71	43	43	1651	6.6	
	14.3	-1.15	3.7	77	42	40	1107	4.7	
	15.4	-2.62	2.4	81	35	34	320	2.6	
	16.4	-3.00	1.9	74	33	33	179	2.5	
	17.2	-4.55	1.9	79	30	29	104	1.6	
18.1	-4.32	1.5	79	28	28	27	1.2		
	average	-1.90	2.9	73	37	36	850	3.6	25.2

ตารางที่ 7 (ต่อ)

								Surface	
	Time	A	E	g_c	T_{air}	T_{fruit}	PPF	$VPD_{fruit-air}$	area
F28	8.5	-1.61	0.8	25	38	36	853	2.9	
	9.6	-1.91	0.4	10	39	38	938	4.2	
	10.4	-2.46	0.8	19	44	39	1297	4.1	
	11.4	-1.79	0.5	11	42	39	1225	4.2	
	12.2	-1.97	0.7	16	41	39	1869	4.3	
	13.4	-1.31	1.0	18	43	41	1728	5.4	
	14.4	-1.54	0.7	20	39	37	480	3.6	
	15.5	-2.35	0.3	11	35	34	367	3.0	
	16.6	-2.99	0.4	15	33	32	245	2.3	
	17.2	-3.47	0.6	33	30	29	102	1.6	
	18.2	-3.42	0.4	28	28	28	42	1.3	
		average	-2.26	0.6	19	37	36	831	3.3
F35	9.5	-1.83	1.0	25	35	34	1107	2.9	
	10.1	-1.37	0.9	24	34	33	1170	2.6	
	11.0	-0.72	0.7	26	35	34	1406	2.5	
	12.1	-0.87	0.8	22	39	37	1871	3.7	
	13.0	-0.34	1.0	28	38	37	1996	3.5	
	14.1	-0.54	1.7	33	40	40	1753	5.0	
	15.0	-0.51	0.9	26	36	36	1488	3.4	
	16.0	-0.69	0.7	19	36	36	1055	3.6	
	16.9	-0.85	0.5	25	30	29	408	1.5	
	18.1	-2.29	0.5	21	27	26	24	1.0	
	average	-1.00	0.9	25	35	34	1228	3.0	69.5

ตารางที่ 7 (ต่อ)

								Surface	
	Time	A	E	g_c	T_{air}	T_{fruit}	PPF	$VPD_{fruit-air}$	area
F42	9.6	-4.52	0.8	28	35	34	883	2.7	
	10.3	-4.69	0.7	25	36	35	883	2.7	
	11.2	-4.86	0.8	27	38	36	1352	2.9	
	12.2	-5.33	0.7	17	40	38	848	4.2	
	13.2	-4.36	1.1	26	40	38	2021	3.9	
	14.3	-5.24	1.2	27	41	39	1908	4.0	
	15.3	-4.82	1.0	25	38	37	1201	3.9	
	16.2	-4.53	0.8	22	37	36	325	3.5	
	17.1	-3.18	0.5	28	30	30	198	1.6	
	18.2	-3.11	0.5	24	27	26	11	1.0	
	average	-4.46	0.8	25	36	35	963	3.1	74.0
F49	9.7	-3.81	0.6	20	35	34	950	2.8	
	10.2	-4.29	0.8	26	34	35	1040	3.0	
	10.2	-4.51	0.9	26	34	36	1040	3.3	
	11.1	-4.43	0.7	23	35	35	1312	2.8	
	12.1	-5.00	0.7	19	38	37	2187	3.4	
	13.1	-4.86	0.8	21	38	38	2032	3.9	
	14.2	-5.25	1.7	27	40	38	1729	3.5	
	15.2	-4.78	1.5	21	42	37	1298	3.5	
	16.1	-4.52	0.8	19	38	37	880	4.2	
	17.0	-3.74	0.6	23	30	29	292	1.4	
18.2	-2.73	0.5	23	26	26	5	1.0		
	average	-4.36	0.9	22	35	34	1160	3.0	69.1



ภาพที่ 10 การแลกเปลี่ยนแก๊สในรอบวันของผลมะเขือเทศแต่ละอายุ a) แรงดึงการคายน้ำ b) อัตราคายน้ำ c) ค่านำไหลดปากใบของผิวผล และ d) อัตราการตรึง CO₂ สุทธิ (F หมายถึงผล และ 14-49 หมายถึงอายุผลเป็นวัน เป็นข้อมูลวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และ ผลอายุ 35-49 วัน เป็นข้อมูลวันที่ 14 กันยายน 2552

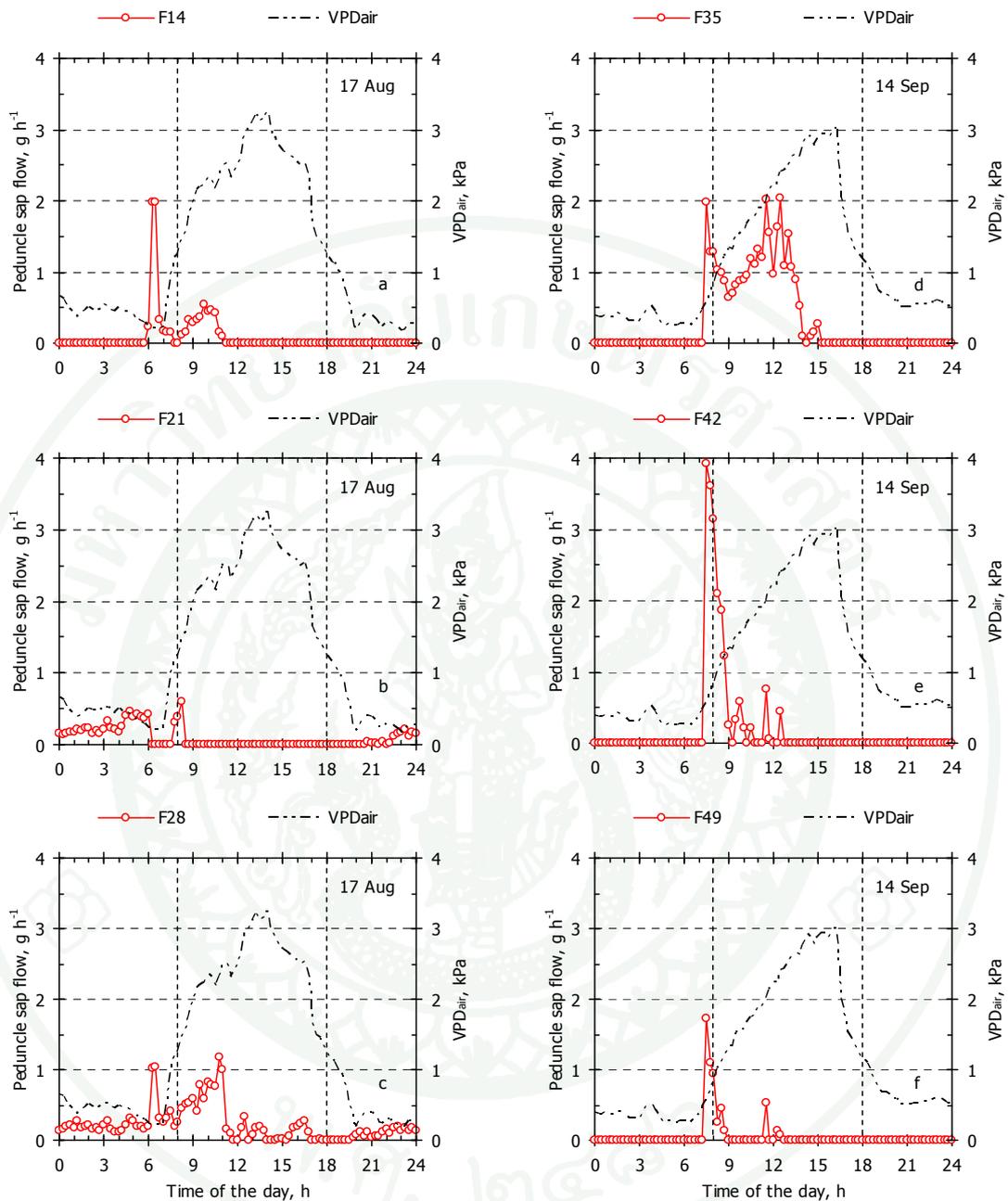
ตารางที่ 8 ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง เทียบเป็นร้อยละของมวลผลสดเริ่มต้น ข้อมูลช่วงเวลา 8-18 น. เป็นข้อมูลทั้งวันที่วัดได้จริง ข้อมูลเวลาอื่นได้จากการประมาณการ

Fruit age, days	Diurnal water outflow, g				% of initial fruit mass	Initial fruit mass, g
	Time of the day, h			Sum		
	0-8 (est.)	8-18 (actual)	18-24 (est.)	0-24		
14	0.62	4.19	0.23	5.04	18.3	27.5
21	0.68	4.40	0.04	5.12	16.3	31.5
28	0.91	2.96	0.14	4.01	5.5	73.1
35	0.64	3.59	0.17	4.40	6.1	72.6
42	0.69	3.49	0.22	4.40	6.1	73.3
49	0.33	3.86	0.20	4.39	6.2	71.2

2.4 อัตราและปริมาณน้ำไหลเข้าก้านของผลในรอบวัน

อัตราไหลของน้ำเข้าผลมะเขือเทศ (ภาพที่ 11) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบกระชาก (surge) จนมีระดับสูงสุดในช่วงเช้า 7-8 น. ขณะที่ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) ค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเริ่มมีแสง หลังจากการช่วงนี้แล้ว อัตราไหลของน้ำเข้าผลมีระดับต่ำจนเหลือประมาณศูนย์ อัตราไหลสูงสุดเกิดในผลอายุ 42 วัน อยู่ที่ 4 g h^{-1}

ปริมาณน้ำรวมที่ไหลเข้าผลมะเขือเทศเป็นผลคูณของอัตราไหลแต่ละชั่วโมง กับช่วงเวลา แสดงค่าในตารางที่ 9 โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง 0-8 น. เป็นช่วงกลางคืนที่สภาพอากาศมีความชื้นสูง ช่วง 8-18 น. เป็นช่วงกลางวันที่มีสภาพอากาศแห้งรุนแรง และช่วง 18-24 น. เป็นช่วงเย็นหลังสภาพอากาศคลายความแห้งรุนแรงลง เห็นได้ว่าในผลอ่อนในช่วงอายุ 14-28 วัน ปრაกฏมิน้ำไหลเข้าผลมากชัดเจนในช่วงเวลากลางคืนมากกว่ากลางวัน ผลอายุ 28 วัน มีปริมาณเข้าผลใกล้เคียงกันระหว่างช่วงกลางวันกับกลางคืน เมื่อรวมเวลาเป็น 24 ชม. ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลมะเขือเทศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุ จนมีปริมาณมากที่สุดเมื่อผลมีอายุ 35 วัน เป็นปริมาณน้ำที่ไหลเข้าช่วงกลางวันจำนวนมาก รวมทั้งหมดคิดเป็น 12.8% ของมวลผลสดเริ่มต้น ปริมาณน้ำไหลเข้าผลมะเขือเทศลดลงเหลือต่ำสุดขณะที่ผลมีอายุมากที่สุด



ภาพที่ 11 อัตราไหลเข้าก้านช่อผลมะเขือเทศในรอบวันของผลอายุต่างๆ แต่ละภาพเป็นการวัดคนละผลกัน แสดงควบคู่กับค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) เพื่อเป็นระดับอ้างอิงของสภาพความแห้งของอากาศ (F คือ ผล, 14-49 คือ อายุผลเป็นวัน ภาพ a-c เป็นข้อมูลวันที่ 17 สิงหาคม และ ภาพที่ d-f เป็นข้อมูลวันที่ 14 กันยายน 2552)

ตารางที่ 9 ปริมาณน้ำรวมที่ไหลเข้าผ่านก้านผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง เทียบเป็นร้อยละของมวลผลสดเริ่มต้น (initial fruit mass)

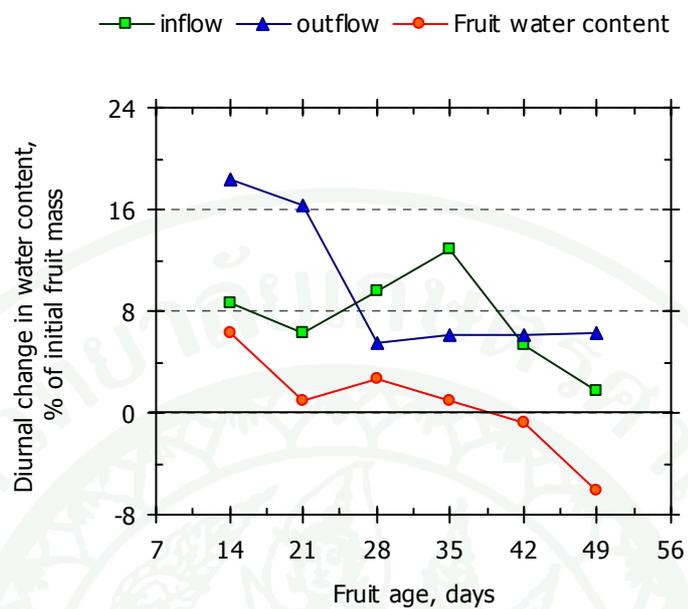
Fruit age, days	Diurnal water inflow in peduncle, g				% of initial fruit mass	Initial fruit mass, g
	Time of the day, h			Sum		
	0-8	8-18	18-24	0-24		
14	1.27	0.91	0	2.18	8.6	25.1
21	1.84	0.08	0.28	2.20	6.3	35.1
28	2.18	2.66	0.50	5.34	9.6	55.9
35	1.26	6.51	0	7.77	12.8	60.8
42	2.94	1.74	0	4.68	5.3	87.9
49	0.97	0.37	0	1.34	1.8	74.6

2.5 ปริมาณน้ำสุทธิของผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง

หลักการคำนวณบัญชีน้ำของผล คือ วัดปริมาณน้ำไหลเข้าผลกับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผล โดยที่ผลต่างเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำสุทธิของผล แต่การทำบัญชีในการศึกษานี้ ไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะปริมาณน้ำทั้ง 3 ค่า ที่วัดได้ ไม่ใช่ของผลเดียวกัน เนื่องจากถูกจำกัดด้วยขนาดและการทำงานของเครื่องวัด ที่ทำให้ไม่สามารถติดตั้งให้วัดผลเดียวกันได้

ข้อมูลสรุปในที่นี้ จึงเป็นการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ และถ่วงค่าด้วยมวลผลสดเริ่มต้น คือ แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของมวลสดของผลนั้น ดังในภาพที่ 12 ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลมะเขือเทศ มีค่าในช่วง 8-12% ของมวลผลสด โดยมีระดับเพิ่มสูงขึ้นตามอายุ จนถึงเมื่อผลเริ่มเข้าระยะสุกที่ 35 วัน หลังจากนั้นปริมาณน้ำเข้าผลจะลดลงอย่างรวดเร็วจนอยู่ในระดับต่ำเพียงประมาณ 2% ของมวลผลสด สำหรับปริมาณน้ำไหลออกจากผลมะเขือเทศ แสดงระดับสูงชัดเจนในช่วงเป็นผลอ่อน (14-21 วัน) หลังจากนั้นปริมาณน้ำไหลออกจากผลลดลงอย่างรวดเร็ว และค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 6% ของมวลผลสด

ปริมาณน้ำไหลเข้า และออกจากผลในช่วงเป็นผลอ่อน มีระดับที่สูงกว่าในช่วงเป็นผลแก่อย่างชัดเจน รูปแบบการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำนี้ สะท้อนออกที่การเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำสุทธิของผล หรือคือการเปลี่ยนแปลงขนาดของผล พบว่าในช่วงผลอ่อน (อายุ 14-28 วัน) ผลมะเขือเทศมีปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น ทำให้มีการขยายขนาดผลเพิ่มขึ้นในรอบวัน สัดส่วนของปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมากที่สุดเกิดในระยะผลอายุน้อยสุดที่ 14 วัน แล้วมีการเพิ่มขึ้นคงที่ในระดับต่ำในช่วงผลอายุ 21-35 วัน จนเมื่อเข้าสู่ระยะสุกที่อายุ 42 วัน ปริมาณน้ำในผลกลับลดลง



ภาพที่ 12 สัดส่วนปริมาณน้ำเทียบกับมวลผลสดเริ่มต้นที่ไหลเข้า (inflow) ไหลออก (outflow) และ ปริมาณน้ำของผลมะเขือเทศ (fruit water content) ที่เปลี่ยนแปลงในรอบ 24 ชั่วโมง โดย แต่ละจุดเป็นค่าของคนละผล

3. แรงขับเคลื่อนในการไหลของน้ำจากใบสู่ผล

แรงขับเคลื่อนในการไหลของน้ำจากใบติดผลเข้าผลมะเขือเทศ ผ่านก้านผล คือความแตกต่างของค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำระหว่างใบกับก้านผล แรงขับเคลื่อนในการไหลของสารอาหาร คือ ความแตกต่างของค่าพลังงานความดันระหว่างสองจุด ในที่นี้ความเข้มข้นของสารอาหารสะท้อนด้วยค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมด (C) ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าปริกซ์ โดยที่ค่าปริกซ์สะท้อนปริมาณซูโครสในสารอาหารอีกทีหนึ่ง

3.1 พลังงานศักย์รวมของน้ำในรอบวันของใบติดผลและผลมะเขือเทศ

พลังงานศักย์รวมของน้ำ (Ψ) ในใบที่อยู่ติดผลมะเขือเทศ (subtending leaf of fruit, SL) เทียบกับส่วนของผลซึ่งวัดจากส่วนของก้านผล (pedicel, P) แสดงในภาพที่ 13 ลักษณะโดยทั่วไปพบว่า ค่า Ψ ของใบในช่วงเช้าตรู่ซึ่งในช่วง -280 ถึง -70 kPa แสดงถึงระดับสูงสุดเมื่อใบได้รับน้ำมาทดแทนอย่างเต็มที่ตลอดทั้งคืน หลังจากความเข้มแสงเพิ่มขึ้นและค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศเพิ่มจนมีค่า 2 kPa ใบมะเขือเทศมีค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำลดลงค่อนข้างรวดเร็ว แสดงถึงการสูญเสียน้ำจากใบในอัตราที่เร็วกว่าที่ใบจะได้รับน้ำมาชดเชย ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบลดต่ำสุดในช่วงที่มีแรงดึงระเหยน้ำของอากาศอยู่ที่ประมาณ 2.3 kPa (เวลาประมาณ 10 น.) หลังจากนั้นค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบกลับเพิ่มขึ้นแม้ว่าค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศยังคงเพิ่มมากกว่า 2.3 kPa แสดงถึงการที่ใบมะเขือเทศมีอัตราได้น้ำชดเชยที่สูงกว่าอัตราการคายน้ำ ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ใบตอบสนองโดยการปิดปากใบให้แคบลง เช่นที่พบในกรณีของใบพริกในช่วงที่มีแรงดึงระเหยน้ำสูงกว่า 2.3 kPa ใบพริกจะตอบสนองโดยการปิดปากใบให้แคบลง (สุทิน, 2547) การปิดปากใบให้แคบจะช่วยเพิ่มค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบได้ในระยะหนึ่ง แต่ด้วยสภาพอากาศที่แห้งต่อเนื่องในรอบวัน จึงทำให้ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบลดต่ำลงอีกครั้งหลังเที่ยงวัน ลักษณะการเหี่ยยงขึ้นลงของค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำ แสดงถึงจังหวะการลดการสูญเสียน้ำด้วยกลไกปากใบ เมื่อใบได้รับน้ำชดเชย ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปากใบเปิดได้กว้างขึ้น และทำให้เกิดการสูญเสียน้ำของใบรอบใหม่ ในช่วงเย็นแรงดึงระเหยน้ำของอากาศที่ลดลง ช่วยลดการสูญเสียน้ำจากใบด้วย ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำจึงกลับเพิ่มขึ้นมาใหม่จนถึงระดับใกล้เคียงกับช่วงเช้า ซึ่งแสดงว่าการลดลงของพลังงานศักย์รวมของน้ำเป็นจังหวะชั่วคราวในรอบวันในช่วงที่อัตราสูญเสียน้ำสูงกว่าอัตราได้น้ำชดเชย

ใบมะเขือเทศที่อยู่ติดกับผลมะเขือเทศที่มีอายุ 7, 14, 21, 28 และ 35 วันหลังดอกบาน เป็นใบมีอายุ 20-40 วันหลังใบคลี่ มีค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำใบมะเขือเทศจะอยู่ในช่วง -600 ถึง -20 kPa แต่ใบที่อยู่ติดกับผลมะเขือเทศอายุ 42 และ 49 วันหลังดอกบาน ซึ่งเป็นใบมีอายุ 50-56 วันหลังใบคลี่ มีค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำอยู่ในช่วงสูงกว่า คือ -200 ถึง -20 kPa แสดงให้เห็นว่าใบมะเขือเทศที่มีอายุขึ้น มีระดับคูลของน้ำในใบได้ดีกว่า ซึ่งอาจจะเป็นผลจากค่าน้ำไหลจากใบที่ลดลง

พลังงานศักย์รวมของน้ำในผลมะเขือเทศอ่านค่าจากการวัดก้านผล พบว่า ค่าพลังงานศักย์รวมของผลอายุน้อยมีค่าที่เปลี่ยนแปลงมากกว่าใบ คือ ในช่วงเช้าก่อนมีแสงแดดผลมะเขือเทศที่มีอายุ 7-21 วัน (ภาพที่ 13a-c) มีค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำในช่วง -300 ถึง -100 kPa ซึ่งใกล้เคียงกับค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำในใบ หลังจากนั้นพลังงานศักย์รวมของน้ำในก้านผลมีค่าลดลงเล็กน้อยกับค่าของใบ โดยมีค่าลดลงจนต่ำกว่าใบ พบว่า ในช่วงเวลาเดียวกันค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำในผลมะเขือเทศมีค่าต่ำกว่าของใบติดผลเป็นส่วนใหญ่ แสดงว่ามีความต่างศักย์ของพลังงานของน้ำระหว่างใบกับผล ซึ่งเป็นลักษณะเช่นเดียวกับผลการศึกษาค้นคว้า (ซาคา, 2547) ที่พบว่า พลังงานศักย์รวมของน้ำในผลแดงกามีค่าต่ำกว่าของใบติดผล กล่าวคือมีแรงขับเคลื่อนของการไหลของน้ำจากใบไปสู่ขั้วผล แต่ก็มีในบางช่วงเวลาในรอบวันที่ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบมีค่าน้อยกว่าของผลมะเขือเทศซึ่งจะพบในช่วงเที่ยงวันเหมือนกับงานศึกษาค้นคว้าของ Kramer *et al.*, 1972 ซึ่งแสดงว่าแรงขับเคลื่อนของการไหลของน้ำเปลี่ยนทิศทางเป็นจากขั้วผลไปสู่ใบ

ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของผลอายุ 7 – 21 วัน มีระดับต่ำกว่าของใบและแสดงการเปลี่ยนแปลงในแนวทางเดียวกัน แต่เมื่อผลมีอายุ 28 วัน ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของผลเริ่มมีค่าสูงกว่าของใบและมีแนวทางการเปลี่ยนแปลงที่ไม่ตามกันของใบ โดยเฉพาะในจังหวะที่ใบมีค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำลดลงรวดเร็วสะท้อนว่าระบบท่อลำเลียงน้ำเริ่มไม่ต่อเนื่องกัน

3.2 พลังงานความเข้มข้นของน้ำในรอบวันของใบติดผลและของผลมะเขือเทศ

พลังงานความเข้มข้นของน้ำเป็นค่าที่ได้จากการคำนวณค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลาย การอธิบายในรูปของพลังงานจะสะท้อนถึงแรงขับเคลื่อนของน้ำ ส่วนในรูปของความเข้มข้นของตัวถูกละลายจะสะท้อนถึงความเข้มข้นของสารอาหาร (สุนทรวิ, 2536) ในส่วนของใบติด

ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำในรอบวัน (ภาพที่ 14) พบว่าในช่วงเช้าค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำของใบมีค่าสูงอยู่ในช่วง -810 ถึง -655 kPa และลดลงในช่วงเที่ยงวัน ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่ใบได้รับแสงจัดและเกิดการสังเคราะห์แสงมาแล้วระยะหนึ่ง ทำให้ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำที่ใบลดลงถึง -1200 kPa และมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายมีระดับเพิ่มขึ้นสูงสุด (ภาพที่ 15) คือเพิ่มขึ้นจากระดับ 266 – 354 mmol kg⁻¹ ในช่วงเช้านี้เป็น 406 – 526 mmol kg⁻¹ หลังจากนั้นค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำและตัวถูกละลายจะไม่เปลี่ยนแปลงไปมากจนถึงเวลา 16 น. ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มแสงเริ่มลดลง ส่งผลให้อัตราการสังเคราะห์แสงลดลงและความเข้มข้นของตัวถูกละลายลดลง ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำของใบกลับเพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ประมาณ -910-690 kPa

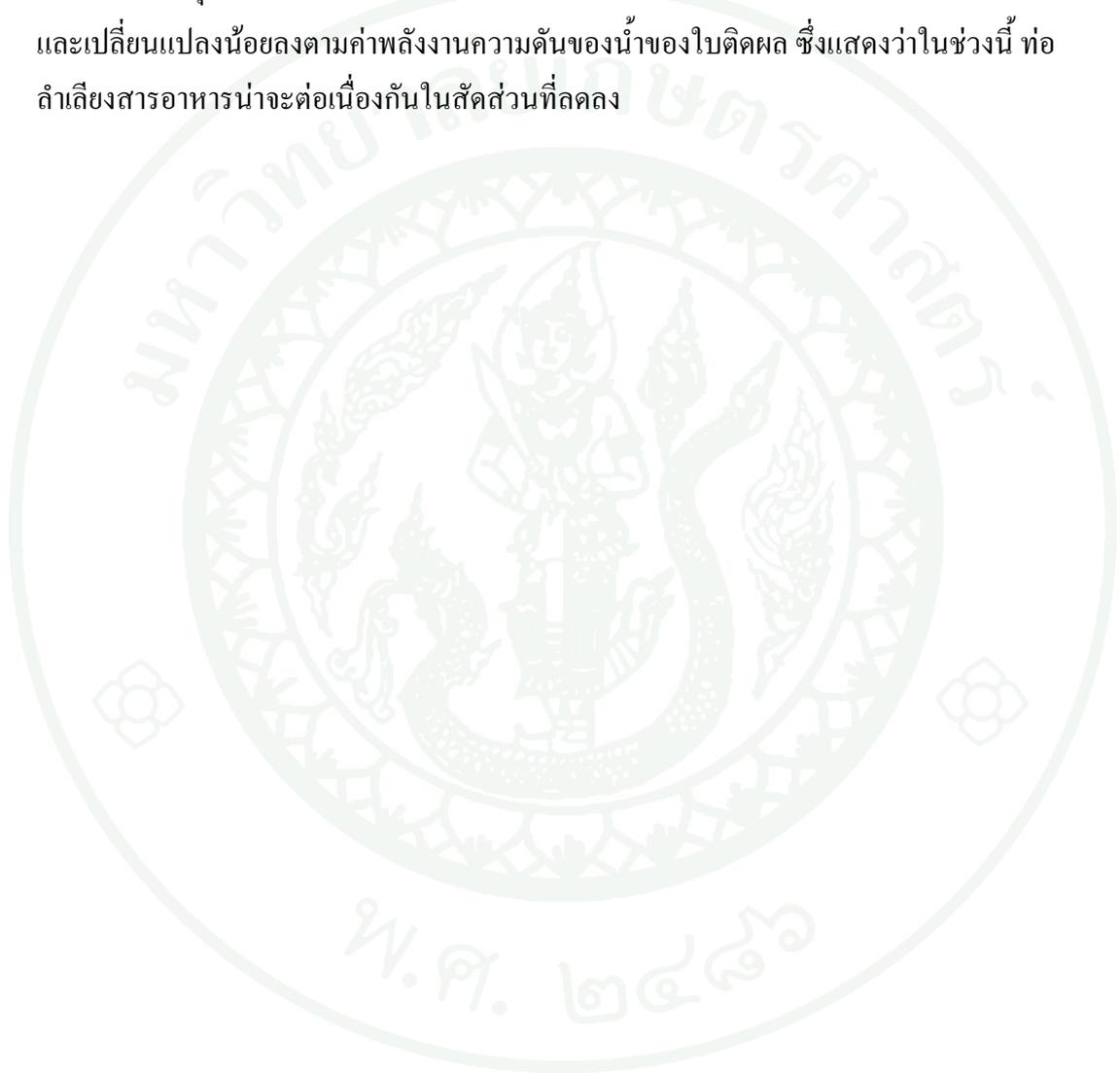
ในส่วนพลังงานความเข้มข้นของน้ำของทั้งผล (ภาพที่ 14) มีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดเกือบทั้งวัน และมีค่าที่สูงกว่าของใบ ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำของใบและผลในช่วงผลอ่อน แสดงการเปลี่ยนแปลงในรอบวันแบบแคบ ๆ แต่เมื่อผลเริ่มสุกอายุ 35 วัน ขึ้นไป ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำในรอบวันแสดงการลดลงมากชัดเจนจากช่วงเช้า

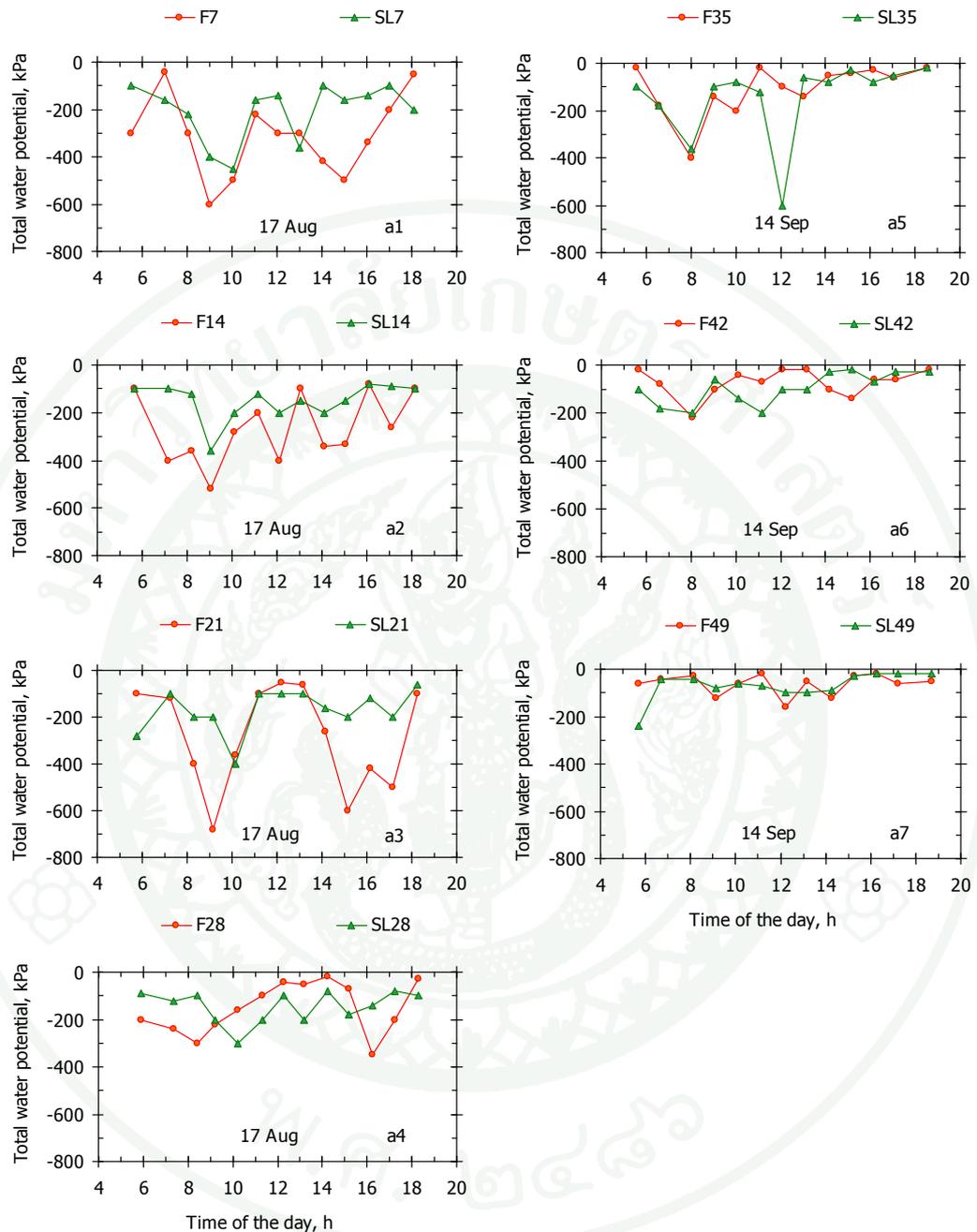
3.3 พลังงานความดัน (แรงเต่ง) ของน้ำ ในรอบวันของใบติดผลและของผลมะเขือเทศ

พลังงานความดันของน้ำเป็นผลต่างระหว่างพลังงานศักย์รวมกับพลังงานความเข้มข้นของน้ำ พลังงานความดันของน้ำของใบติดผลมีค่าในรอบวันดังแสดงในภาพที่ 16 มีค่าในช่วง 550 ถึง 1350 kPa โดยใบที่ติดกับผลอายุ 7-28 วัน มีค่าพลังงานความดันของน้ำในช่วงเช้าเวลา 5-8 น. ที่ค่อนข้างคงที่ แล้วจึงลดลงชัดเจนในช่วง 8-10 น. ซึ่งน่าจะเกิดจากการเสียน้ำตามแรงดึงระเหยน้ำของอากาศที่เพิ่มขึ้น จากนั้นจึงเพิ่มกลับขึ้นใหม่เป็นระยะสั้น ในช่วงเที่ยงวันเป็นค่าสูงสุดในรอบวัน ซึ่งน่าจะเป็นผลจากการที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงขึ้น ใบรักษาแรงเต่งให้สูงกว่าเนื้อผลมะเขือเทศได้เป็นส่วนใหญ่

เนื้อผลมะเขือเทศสามารถรักษาระดับพลังงานความดันของน้ำ (แรงเต่ง) ให้อยู่ในระดับสูงเกือบทั้งวัน (ภาพที่ 16) โดยมีรูปแบบการแกว่งของระดับพลังงาน ช่วงของผลอายุ 7-21 วัน ค่าพลังงานความดันของน้ำของเนื้อผลมะเขือเทศ ต่ำกว่าของใบ ค่าพลังงานความดันของน้ำของเนื้อผลมะเขือเทศจะสูงในช่วงเช้าและมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอยู่บ้างในช่วงกลางวัน (9-15 น.) ก่อนที่ค่าพลังงานความดันของน้ำของผลจะสูงกลับขึ้นไปเท่ากับระดับเริ่มต้นในตอนเช้า ซึ่ง

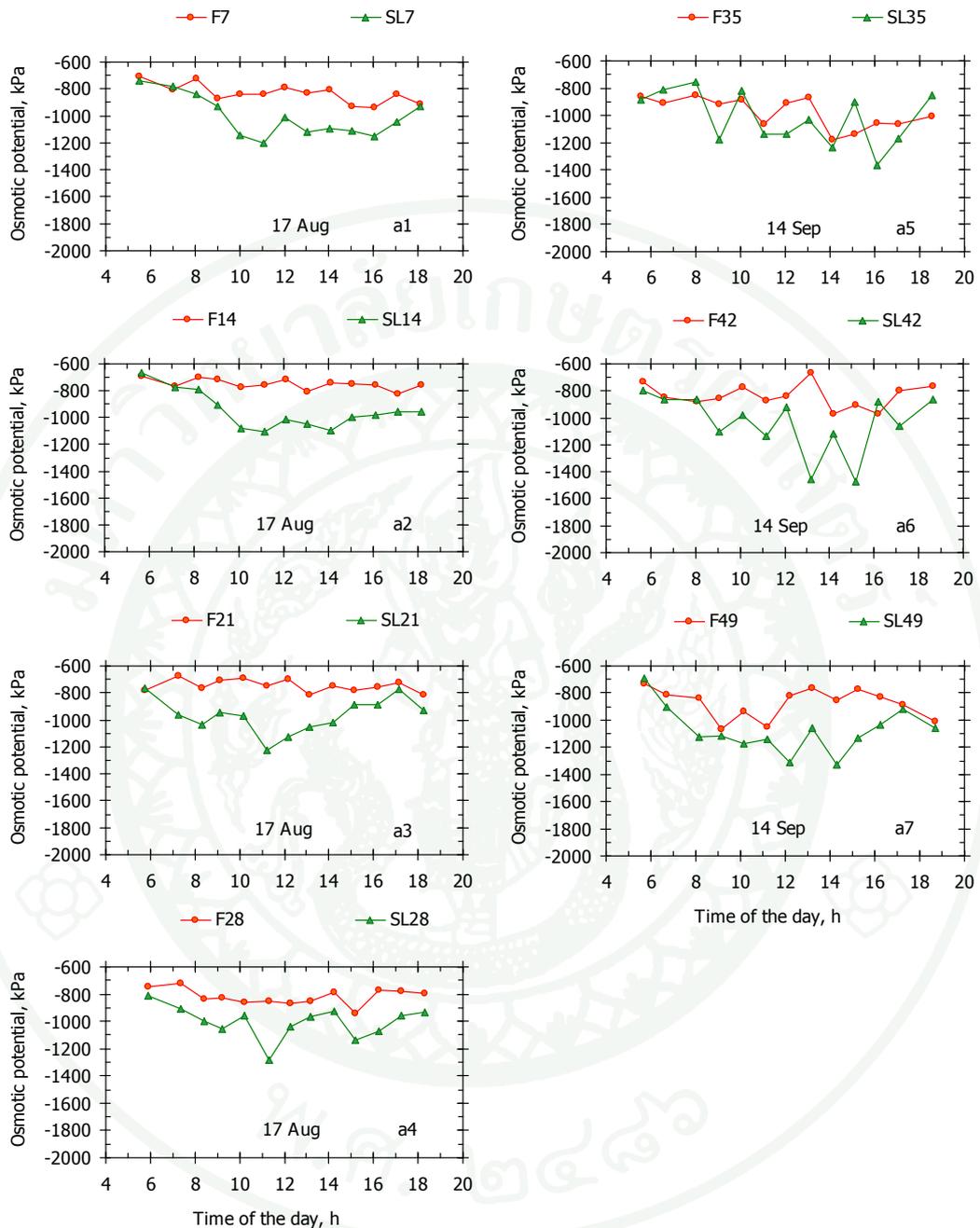
สอดคล้องกับลักษณะการหดลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงเวลากลางวัน ไปจนถึงบ่าย ก่อนจะขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางกลับขึ้นไปใหม่ในช่วง (หัวข้อ 2.2, ภาพที่ 8) ลักษณะเช่นนี้ส่งผลให้ผลมะเขือเทศมีการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง แต่สำหรับผลที่อายุ 28-35 วัน พลังงานความดันของน้ำของเนื้อผลยังแสดงรูปแบบการเปลี่ยนแปลงตามค่าของใบ แต่เมื่อผลเข้าสู่ระยะสุกชรา ในช่วงอายุ 42-49 วัน จึงเห็นได้ว่า พลังงานความดันของน้ำของเนื้อผล มีระดับค่อนข้างคงที่ และเปลี่ยนแปลงน้อยลงตามค่าพลังงานความดันของน้ำของใบคิดผล ซึ่งแสดงว่าในช่วงนี้ ท่อลำเลียงสารอาหารน่าจะต่อเนื่องกันในสัดส่วนที่ลดลง





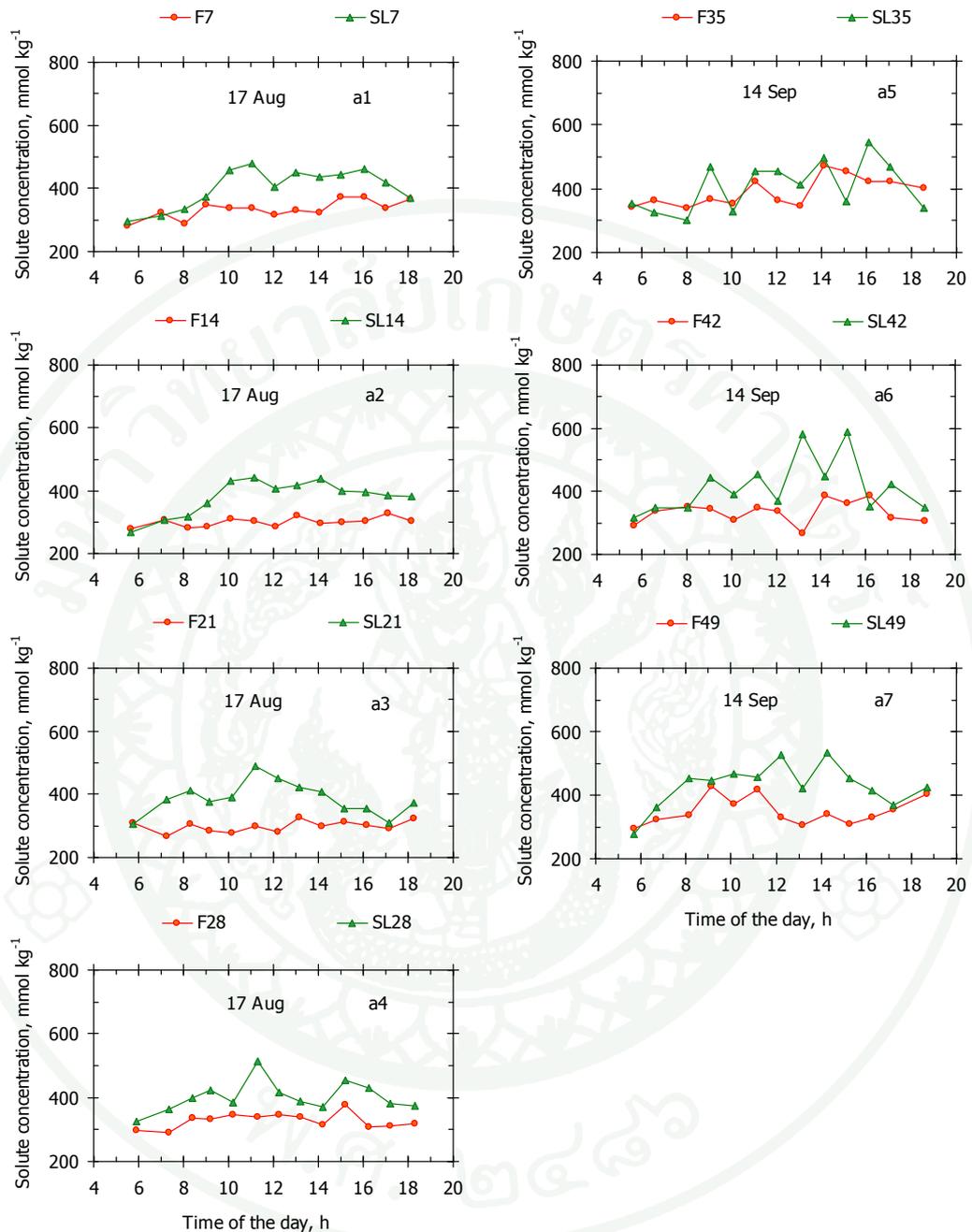
ภาพที่ 13 ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ

(อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน ค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัคในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)

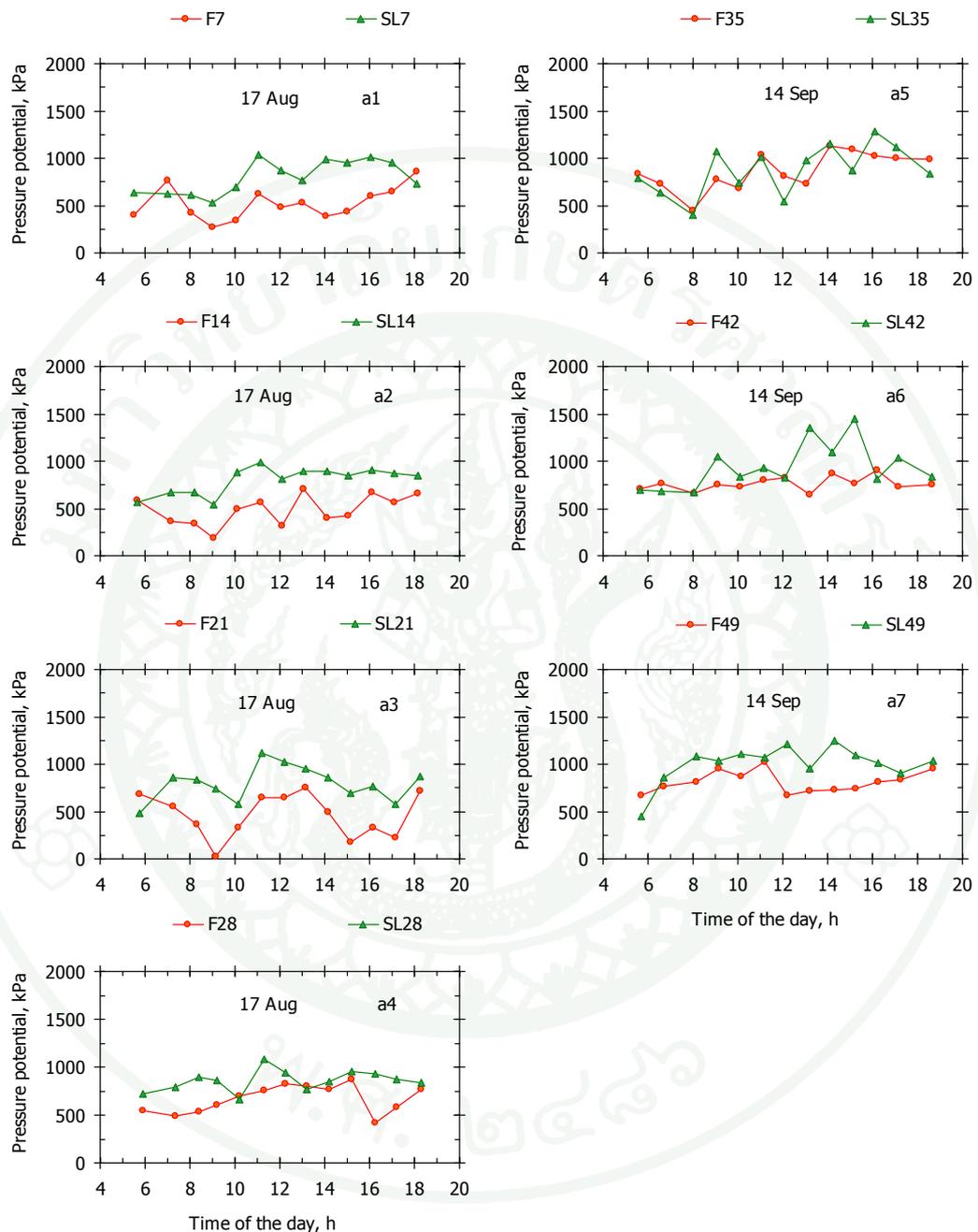


ภาพที่ 14 ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ

(อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน ค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัคในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)



ภาพที่ 15 ค่าพลังงานความเข้มข้นของตัวถูกละลายของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ (อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน วัดค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัดในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)



ภาพที่ 16 ค่าพลังงานความเข้มข้นของตัวถูกละลายของใบที่ติดผลและผลมะเขือเทศที่อายุต่างๆ (อายุที่แสดงเป็นของผล ใบที่ติดผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วัน และเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุด และอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา) ผล 7-28 วัน วัดค่าในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัดในวันที่ 14 กันยายน 2552 (SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านของผล)

3.4 ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรอบวันของค่าพลังงานศักย์ของน้ำระหว่างใบติดผลกับผลมะเขือเทศ

เพื่อให้เห็นความแตกต่างของระดับพลังงานศักย์ของน้ำของใบติดผล และเนื้อผลมะเขือเทศ จึงคำนวณค่าเฉลี่ยทั้งวัน ได้แสดงผลในภาพที่ 17 สำหรับพลังงานศักย์รวมของน้ำ พบว่ามีระดับเพิ่มขึ้นตามอายุผลและใบที่มากขึ้น (ภาพที่ 17a) ในช่วงที่ผลมีอายุน้อย (7-21 วัน) ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำระหว่างใบกับผลแตกต่างกันมาก บ่งถึงแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลในทิศทางจากใบไปยังผล เมื่อผลอยู่ในช่วงอายุ 28 วันหลังดอกบาน ซึ่งเป็นช่วงก่อนที่ผลจะเปลี่ยนสี พลังงานศักย์รวมของน้ำของใบติดผลมีค่าใกล้เคียงกับของผลที่วัดได้จากก้านผล และเมื่อเข้าระยะที่ผลเปลี่ยนสีออกแดงมากขึ้นที่อายุ 35-49 วัน ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของผลกลับมีค่าที่สูงกว่าใบ แสดงว่าหากท่อน้ำยังต่อเนื่องระหว่างใบกับผล จะมีแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลกลับในทิศทางจากผลสู่ใบ กล่าวคือ ผลมะเขือเทศกลายเป็นแหล่งน้ำ

พลังงานความเข้มข้นของน้ำของเนื้อผลมะเขือเทศมีค่าลดลงเมื่อผลมีอายุมากขึ้น (ภาพที่ 17b) หรือกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุผล (ภาพที่ 17d) ที่ใบมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูงกว่าเนื้อผลมะเขือเทศ แสดงถึงการเป็นแหล่งผลิต (source) ใบและเนื้อผลเป็นแหล่งรับ (sink) ตัวถูกละลายซึ่งสะท้อนว่าเป็นซูโครส

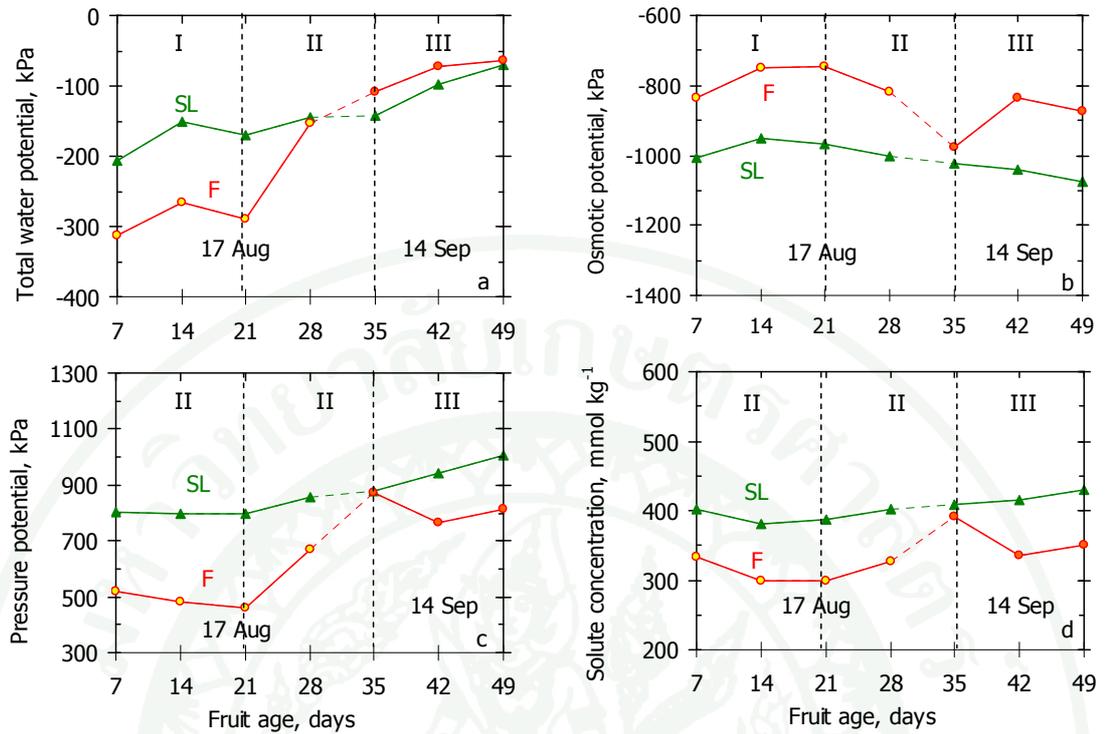
ภาพที่ 17c แสดงค่าพลังงานความดันของน้ำของใบและเนื้อผล จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ผลมีอายุ 7-21 วัน มีความแตกต่างของค่าพลังงานความดัน โดยที่พลังงานความดันของน้ำในใบจะสูงกว่าเนื้อผล คือ มีแรงขับเคลื่อนในการส่งสารอาหาร (ตัวถูกละลาย) ในท่ออาหารจากใบไปยังผล แต่เมื่อผลมีอายุ 28 วันหลังดอกบาน ค่าพลังงานความดันของน้ำของผลกลับมีค่าสูงขึ้น และเมื่อผลเข้าสู่ระยะเปลี่ยนสีตั้งแต่อายุ 35 วันหลังดอกบาน เป็นต้นไป ค่าพลังงานความดันของน้ำของผลมีค่าสูงใกล้เคียงกับของใบมาก และแม้ว่าพลังงานความดันของเนื้อผลมีค่าสูงขึ้นแต่ค่ายังคงน้อยกว่าใบ แสดงว่าการขนส่งสารอาหารไปยังผลปลายทางที่มะเขือเทศยังเป็นแบบไม่ใช้พลังงาน (passive unloading) และท่ออาหารจะยังคงต่อเนื่องกัน

แม้ว่าการวัดผลมะเขือเทศในช่วงอายุน้อย 7-28 วัน จะทำคนละวันกับผลช่วงอายุ 35-49 วัน แต่สภาพอากาศและสภาวะน้ำในดินใกล้เคียงกัน (หัวข้อที่ 2.1, ภาพที่ 7) รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงมากกว่าของค่าพลังงานต่างๆ เกิดขึ้นในผลอายุ 28 วันหลังดอกบาน ซึ่งวัดในวัน

เดียวกับผลอื่นในช่วงอายุน้อย ข้อมูลที่ได้จึงน่าจะสะท้อนการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในผลตามพัฒนาการผลตามธรรมชาติจริง

ข้อมูลที่ได้ตามภาพที่ 17 แสดงชัดเจนว่า น่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของท่อน้ำในก้านผลมะเขือเทศในเรื่องความไม่ต่อเนื่องของท่อน้ำระหว่างใบกับผล คือ ในช่วงผลอายุน้อย 7-21 วันหลังดอกบาน มีแรงขับเคลื่อนของน้ำ ($\Delta\Psi$) ให้ไหลในท่อน้ำ และของสารอาหาร ($\Delta\Psi_p$) ให้ไหลในท่ออาหารจากใบสู่ผล การเปลี่ยนแปลงเริ่มเมื่อผลอายุ 28 วันหลังดอกบาน ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากที่ผลเปลี่ยนสีเป็นต้นไป แรงขับเคลื่อนของน้ำเริ่มลดลงมากและกลายเป็นกลับทิศทาง หากท่อน้ำยังต่อเนื่อง น้ำจะไหลกลับจากผลเข้าสู่ใบ แต่ในส่วนของท่ออาหารนั้นจะยังคงมีแรงขับเคลื่อนให้ขนส่งสารอาหารที่สังเคราะห์ได้จากใบไปพร้อมกับน้ำโดยแบบไหลไปทั้งลำ (bulk flow) ซึ่งเป็นการไหลแบบไม่ต้องใช้พลังงาน ATP ข้อมูลส่วนนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในเรื่องอัตราและปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลมะเขือเทศ (หัวข้อ 2.4, ภาพที่ 11) ที่พบว่ายังคงมีการไหลสุทธิของน้ำสารละลายเข้าผล ซึ่งน่าจะเกิดจากการไหลในท่ออาหาร ในงานศึกษาของ Lang and Ryan (1994) ในผลแอปเปิล มะเขือเทศ และองุ่น ได้อธิบายว่าในช่วงก่อนที่ผลเปลี่ยนสี น้ำไหลเข้าผลผ่านทางท่อน้ำเป็นส่วนใหญ่ น้ำไหลในท่ออาหารจะน้อยกว่า 10 % เชิงมวลของน้ำทั้งหมดที่เข้าผล แต่เมื่อผลเปลี่ยนสีท่ออาหารจะกลายเป็นท่อแรกในการลำเลียงน้ำเข้าผลมากกว่า 80 % เชิงมวลของน้ำทั้งหมดที่เข้าผล ท่อน้ำจะมีแรงต้านทานการไหลที่มากขึ้น ซึ่งอาจจะเป็นผลจากการพัฒนาการของผลที่ชักนำให้ท่อน้ำแคบลงหรือเกิดการชำรุดของท่อน้ำ

สรุปได้ว่า ระบบท่อน้ำของส่วนเนื้อผลมะเขือเทศน่าจะมีการตัดตอนไม่ให้ความต่อเนื่องหรือต่อเนื่องในสัดส่วนที่น้อยลงมากกับใบติดผล ในช่วงอายุผล 28-35 วัน ซึ่งเป็นช่วงผลเริ่มเปลี่ยนสี แต่ในท่ออาหารยังคงต่อเนื่อง ความต่อเนื่องของท่ออาหารยังคงมีอยู่ ทำให้ท่ออาหารทำหน้าที่ในการขนส่งน้ำและสารอาหารเข้าสู่ผลมะเขือเทศ



ภาพที่ 17 ค่าเฉลี่ยในรอบวันของ a) พลังงานศักย์รวมของน้ำ b) พลังงานความเข้มข้นของน้ำ c) พลังงานความดันของน้ำ และ d) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายรวม (ของใบติดผลและของผลมะเขือเทศ ใบที่ติดกับผลมีอายุมากกว่าผลประมาณ 7-10 วันและเป็นใบที่อยู่ติดกับผลมากที่สุดและอยู่ตำแหน่งด้านล่างของผลนับจากยอดต้นลงมา โดย SL คือ ใบติดผล P คือ ก้านผล F คือ เนื้อผล ผลอายุ 7-28 วันหลังดอกบาน วัดค่าในวันที่ 17 กันยายน 2552 และผลอายุ 35-49 วันหลังดอกบาน วัดค่าในวันที่ 14 สิงหาคม 2552 (I, II และ III หมายถึงระยะในการเจริญเติบโตของผล)

4. ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานศักย์ย่อยของน้ำในใบติดผลและผลมะเขือเทศ

ภาพที่ 18a แสดงได้ว่าในช่วงที่ผลมะเขือเทศมีอายุ 7- 28 วันหลังดอกบาน ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำจะสัมพันธ์เชิงเส้นตรงกับค่าพลังงานความดันหรือแรงเต่งอย่างชัดเจน ทั้งของใบและของผล กล่าวคือ ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำที่ลดลงมีผลทำให้ค่าพลังงานความดันลดลงตามไปด้วย แสดงให้เห็นว่าถ้าต้นมะเขือเทศสูญเสียน้ำในอัตราสูงกว่าที่รากดูดชดเชยได้ทันแล้ว แรงเต่งของใบและผลมะเขือเทศจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดทันที แต่ในช่วงที่ผลมะเขือเทศอายุ 42-49 วัน ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำไม่สัมพันธ์กับพลังงานความดัน คือ ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำมีค่าสูงค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง -20 ถึง -200 kPa ในขณะที่ค่าพลังงานความดันมีค่าเพิ่มขึ้น

ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบและของผลไม่สัมพันธ์กับค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำ (ภาพที่ 18c และ 18d) กล่าวคือ ในช่วงที่ผลอายุ 7-28 วัน ไม่ว่าค่าของน้ำจะเปลี่ยนแปลงไปในช่วง 0 ถึง -700 kPa แต่พลังงานความเข้มข้นของน้ำจะค่าค่อนข้างคงที่อยู่ในช่วง -800 ถึง -1200 kPa เป็นส่วนใหญ่ แต่ผลอายุมากขึ้น 35-49 วัน ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำมีค่าสูงคงที่ในขณะที่ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำลดลงมาอย่างชัดเจน

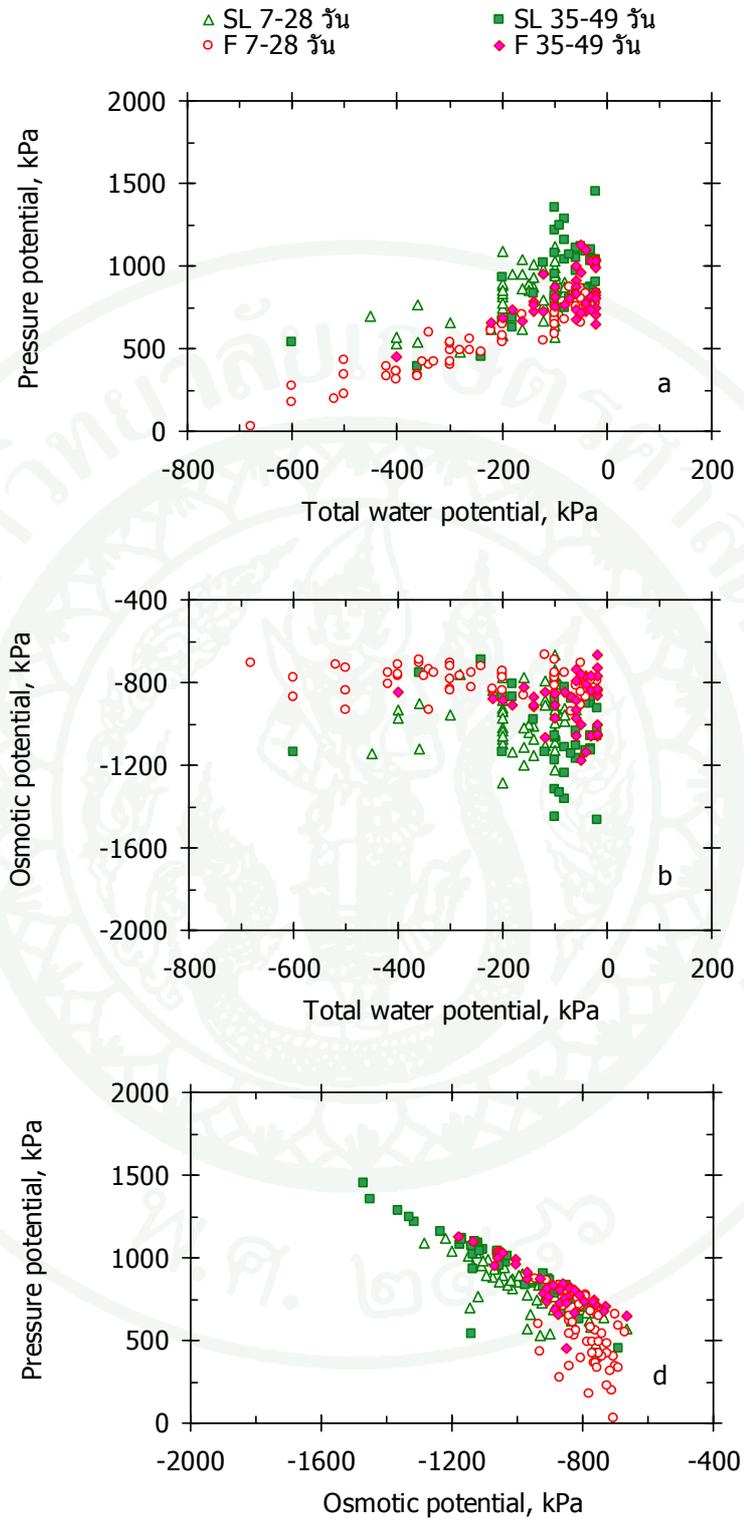
ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำมีความสัมพันธ์เชิงผกผันกับพลังงานความดันของน้ำในผลมะเขือเทศอย่างชัดเจนช่วง 35-49 วัน (ภาพที่ 18f) กล่าว คือ เมื่อพลังงานความเข้มข้นของน้ำลดต่ำลงพลังงานความดันของผลมะเขือเทศเพิ่มขึ้น แต่ในผลอายุน้อย 7-28 วัน ค่าพลังงานความเข้มข้นน้ำมีค่าคงที่ในขณะที่พลังงานความดันมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงว่าในผลอายุน้อยมีน้ำเข้าผลมากกว่าผลที่อายุมากจึงรักษาระดับพลังงานความเข้มข้นน้ำให้คงที่เพื่อทำให้ผลมีการขยายขนาดแต่ในผลอายุมากผลเริ่มหยุดการขยายขนาด ตัวถูกละลายของผลเพิ่มขึ้นพลังงานความเข้มข้นของน้ำน้อยลงเมื่อน้ำเข้าไปเพียงเล็กน้อยทำก็ทำให้แรงเต่งภายในของผลเพิ่มขึ้น

โดยสรุป กล่าวได้ว่าค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำซึ่งเกี่ยวข้องกับการลำเลียงน้ำในช่วงที่ผลมีอายุน้อยจะเป็นปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าพลังงานความดัน โดยที่พลังงานความดันเป็นแรงดันสำหรับการขยายขนาดของผล รวมทั้งเป็นแรงขับเคลื่อนสำหรับการเคลื่อนย้ายสารอาหาร

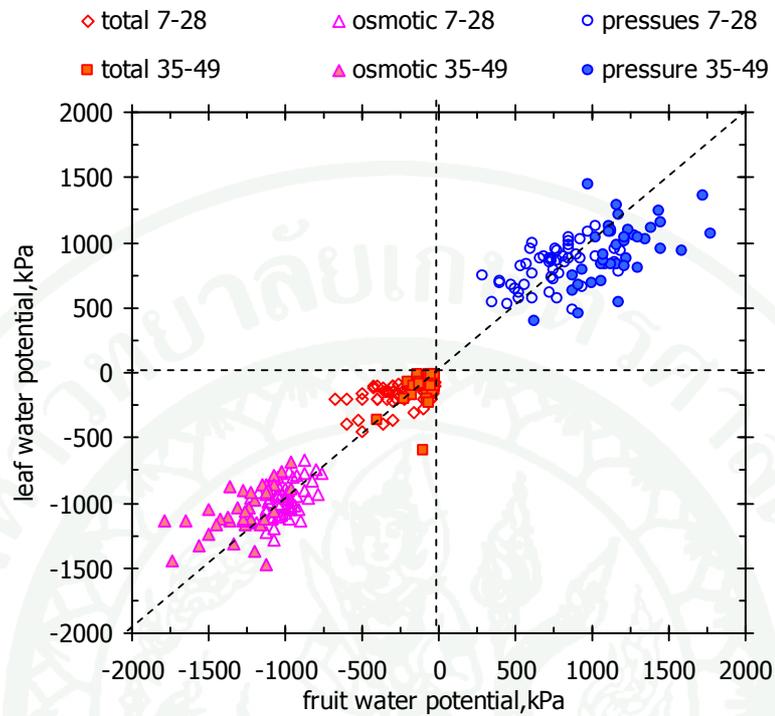
ภาพที่ 19 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานน้ำในรูปต่าง ๆ ระหว่างค่าที่ปรากฏในผลและในใบ พบว่าใบของผลมะเขือเทศจะมีค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบมากกว่าผลในช่วงผล

อายุน้อย 7-28 วันหลังดอกบาน ส่วนค่าพลังงานศักย์ความเข้มข้นของน้ำของผลจะมีค่ามากกว่าใน
ใบ และค่าพลังงานศักย์ความดันของใบมีค่ามากกว่าผล แสดงให้เห็นว่าสารอาหารจากใบสามารถ
เคลื่อนย้ายเข้าไปสู่ผลได้ตลอด แต่แรงขับเคลื่อนการลำเลียงน้ำเข้าผลจะถูกจำกัดในช่วงอายุ 35 วัน
ขึ้นไป





ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าพลังงานศักย์รวม ค่าพลังงานความเข้มข้นและพลังงานความดันของน้ำของใบติดผลและเนื้อผลมะเขือเทศ

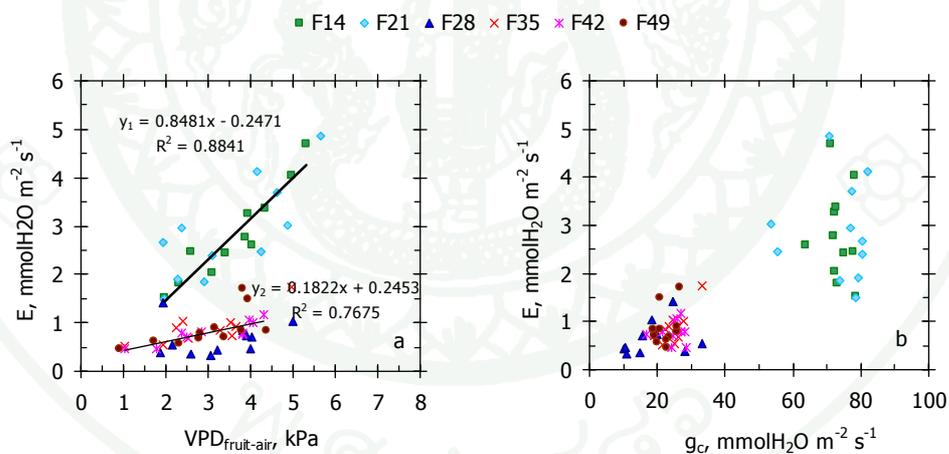


ภาพที่ 19 ความสัมพันธ์ของค่าพลังงานศักย์ของน้ำระหว่างใบติดผลและเนื้อผลมะเขือเทศ โดย total คือ total water potential, osmotic คือ osmotic potential และ pressure คือ pressure potential

5. ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของกระบวนการคายน้ำในรอบวัน

อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศทั้ง 6 ช่วงอายุผล เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เกือบเป็นลักษณะเส้นตรงตามค่าแรงดึงคายน้ำที่เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ดังแสดงในภาพที่ 20a โดยมีการแยกเป็น 2 ช่วง ระหว่างผลอายุ 14-21 วันหลังดอกบาน กับผลอายุ 28-49 วันหลังดอกบาน กล่าวคือที่ระดับแรงดึงคายน้ำเท่ากัน ผลมะเขือเทศช่วงอายุน้อยจะมีอัตราการคายน้ำสูงกว่าผลช่วงอายุมากกว่า ทั้งนี้เป็นเพราะค่าน้ำไหลปากใบของผิวผล (สะท้อนด้วยค่าความลาดชันของความสัมพันธ์) ของผลสองช่วงอายุมีค่าแตกต่างกันมาก ดังแสดงได้ในภาพที่ 20b ผลกลุ่มอายุน้อยมีค่าน้ำไหลปากใบในช่วง 60-80 $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ในขณะที่ผลกลุ่มอายุมากกว่า มีค่าในช่วง 10-30 $\text{mmolH}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$

สภาพแรงดึงคายน้ำที่สูงเพียงพอ จะทำให้อัตราคายน้ำผันแปรตามแรงขับเคลื่อน แต่อายุของผลที่มีบทบาทต่อระดับเปิดกว้างของปากใบของผิวผล เป็นตัวกำหนดระดับเริ่มต้นของอัตราการคายน้ำอีกชั้นหนึ่ง



ภาพที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการคายน้ำ (E) กับ a) ค่าแรงดึงคายน้ำ b) ค่าน้ำไหลปากใบของผิวผลมะเขือเทศ

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

ผลมะเขือเทศเป็นพืชที่มีการเจริญเติบโตแบบ simple sigmoid growth type มีระยะเติบโต 3 ช่วง ช่วงแรก (I) ผลขยายขนาดน้อยอยู่ระหว่างช่วงอายุ 7-21 วัน ช่วงที่สอง (II) ผลมีการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในอัตราที่เพิ่มรวดเร็วอยู่ในช่วงผลอายุ 21-35 วันหลังดอกบาน ช่วงที่สาม (III) ผลจะมีการขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในอัตราที่ลดลงอยู่ในช่วงอายุ 35-49 วัน ผลเริ่มเปลี่ยนสีชัดเจน เมื่อมีอายุ 35 วันหลังดอกบาน วัดค่าสีผิวผลอยู่ที่ศทางแดง มีค่า $a^* = 4.1$ ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักในผลมะเขือเทศ (W_c , g) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผล (D , cm) มีรูปแบบสมการว่า $W_c = 0.5541D^{2.989}$

ผลมะเขือเทศมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงในรอบวัน โดยมีการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำในช่วงเวลากลางวัน หลังจากนั้นผลมะเขือเทศจะได้น้ำมาชดเชยในช่วงเวลากลางคืน ซึ่งทำให้ผลขยายขนาด รูปแบบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำไหลเข้าและไหลออกจากผล สะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำในผล คือ การเปลี่ยนแปลงขนาดผล ซึ่งในช่วงที่ผลอ่อน (14-35 วัน) ผลมีปริมาณน้ำสุทธิเพิ่มขึ้น คือมีการเพิ่มขนาดผลในรอบวัน

ระดับของค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบติดผล และของผลจะเพิ่มขึ้นตามอายุผลและใบที่มากขึ้น ในช่วงเติบโตระยะ I ค่าของพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบสูงกว่าของก้านผลมาก บ่งถึงแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลในทิศทางจากใบสู่ก้านผลมีค่าสูง เมื่อผลอยู่ในช่วงการเติบโตระยะ II (อายุ 28 วันหลังดอกบาน) ค่าของพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบติดผลจะใกล้เคียงกับพลังงานศักย์รวมของก้านผล และเมื่อเข้าสู่ช่วงเติบโตระยะ III ในช่วงที่ผลเปลี่ยนสี (ผลอายุ 35-49 วัน) ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบกับก้านผลมีค่าใกล้เคียงกันแต่กลับทิศทางกัน คือ ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของก้านผลกลับมีค่าที่สูงกว่าใบ แสดงว่าหากท่อน้ำยังต่อเนื่องระหว่างใบกับผล จะมีแรงขับเคลื่อนให้น้ำไหลกลับจากผลสู่ใบ (ผลมะเขือเทศกลายเป็นแหล่งน้ำให้ใบ) ค่าพลังงานความเข้มข้นของน้ำจะมีค่าลดลงในผลที่มีอายุมากขึ้นขณะที่ใบมีการลดลงที่น้อยกว่า หรือกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายรวมในส่วนเนื้อผลมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุผล แต่ยังมีระดับต่ำกว่าของใบ แสดงว่ามีการเคลื่อนย้ายตัวถูกละลายจากใบมายังเนื้อผลเพิ่มขึ้นต่อเนื่อง และชัดเจนในช่วงผลสุก คือเมื่อผลเริ่มมีสีแดงเกิดขึ้น ส่วนพลังงานความดันของน้ำในใบและผล พบว่าในทุกช่วงอายุของผล พลังงานความ

ต้นของน้ำในใบสูงกว่าของผลเสมอ กล่าวได้ว่า มีแรงขับเคลื่อนและมีความเข้มข้นของตัวถูกละลายในใบที่สูงกว่า สำหรับกระบวนการขนส่งเข้าสู่เนื้อผล

ผลการทดลองทำให้เสนอข้อสรุปได้ว่า เมื่อผลมะเขือเทศมีพัฒนาการเริ่มเปลี่ยนสีที่อายุ 35 วันหลังดอกบาน ระบบท่อน้ำของผลมะเขือเทศน่าจะมีการตัดตอนไม่ให้ความต่อเนื่อง หรือความต่อเนื่องเหลือน้อยลงมากกับใบติดผล ส่วนระบบท่ออาหารยังคงมีแรงขับเคลื่อนและมีสารอาหารให้ขนส่งจากใบเข้าสู่ผลตลอดพัฒนาการผลจนถึงอายุ 49 วัน



เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ธาดา ชัยสีหา. 2547. การเปลี่ยนแปลงค่าพลังงานศักย์ของน้ำในรอบวันของใบและผลแตงกวา (*Cucumis sativas* L.) ที่อายุผลต่างๆ กัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พรรณี ชื่นนกร. 2550. ศักยภาพการสังเคราะห์แสงและอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สในรอบวันของใบกล้วยไม้สกุลหวายพันธุ์บอม โจ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุทิน หิรัญอ่อน. 2547. สรีรวิทยาการเจริญเติบโตของพริกชี้หนูสายพันธุ์พ่อแม่ (83-168 และ พริกช่อ มข.) ลูกผสมตรง และลูกผสมกลับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์ และ คัทลียา ฉัตรเที่ยง. 2547. รายงานสรุปโครงการพัฒนาวิชาการ: ข้อมูลพื้นฐานทางสรีรวิทยาเพื่อความเข้าใจปัญหาการเกิดอาการยอดตายของยูคาลิปตัสในเขตภาคตะวันตก. ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์, จินตนา บางจั่น และ ธาดา ชัยสีหา. 2543ก. ปริมาณคลอโรฟิลล์ของใบมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง. น. 57-62. ใน สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์, บรรณาธิการ. รายงานโครงการวิจัยการให้อากาศเพื่อกักชีวิตต้นมะม่วงที่ประสบอุทกภัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์, จินตนา บางจั่น และ ธาดา ชัยสีหา. 2543ข. จุดชดเชยคาร์บอนไดออกไซด์ของใบมะม่วงภายใต้สภาพน้ำขัง. น. 57-62. ใน สุนทรีย์ ยิ่งชัชวาลย์, บรรณาธิการ. รายงานโครงการวิจัยการให้อากาศเพื่อกักชีวิตต้นมะม่วงที่ประสบอุทกภัย. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

อรัญ หาญสืบมา. มปป. การสื่อสารสื่ออย่างแม่นยำ: การควบคุมสื่อจากการรับรู้ไปสู่อุปกรณ์วัดสี. มินอลต้า, กรุงเทพฯ. 59 น.

- Ben-Yehoshua, S. 1987. Transpiration, water stress and gas exchange. p. 113-170. *In*: J. Weichmann (ed.). *Postharvest Physiology of Vegetables*. Marcel Dekker, New York.
- Czarnowski, M. and W. Starwecki. 1991. Endogenous CO₂ concentration in tomato fruits. **Folia Hort.** 32: 17–28.
- Ehret, D.L and L.C. Ho. 1986. Effects of osmotic potential in nutrient solution on diurnal growth of tomato fruit. **J. Exp. Bot.** 37: 1294 – 1302.
- Guichard, S., N. Bertin, C. Leonardi and C. Gary. 2001. Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes. **Agronomie** 21: 385 – 392..
- Higuchi, H. and T. Sakuratani. 2006. The sap flow in the peduncle of the mango (*Mangifera indica* L.) inflorescence as measured by the stem heat balance method. **J. Japan. Soc. Hort. Sci.** 74: 109 – 114.
- Ho, L. C., R. I. Grange. and A. J. Picken. 1987. An analysis of the accumulation of water and dry matter in tomato fruit. **Can. J. Bot.** 10: 157 – 162.
- Johnson, R. W., M. A. Dixon and D. R. Lee. 1992. Water relations of the tomato fruit during growth. **Plant, Cell and Env.** 10: 947 – 953.
- Kramer, J.P. and J.S. Boyer. 1995. **Water Relation of Plants and Soils**. 2nd ed. **Academic Press**, Inc., California. U.S.A.
- Lee, D. R., M. A. Dixon and R. W. Johnson. 1989. Simultaneous measurements of tomato fruit and stem water potentials using *in situ* stem hygrometers. **Can. J. Bot.** 67: 2352–2355.
- Lee, D.R. 1990. A unidirectional water flux model on fruit growth. **Can. J. Bot.** 68: 1286–1290.

- LICOR, Inc. 1990. LI-6262 CO₂/H₂O Analysis: Instruction Manual. Publication No. 9003 – 59.
LICOR, Inc., Nebraska, U.S.A.
- Mapelli, S., C. Frova, G. Torti and M. B. G. Soressi. 1978. Relationship between set, development and activities of growth regulators in tomato fruits. **Plant and Cell Physio.** 19: 1281-1288..
- Matthews, M.A. and K.A. Shackle. 2005. Growth and water transport in fleshy fruit. p. 181 – 197. *In* : N. M. Holbrook and M. A. Zwieniecki (eds.). Vascular Transport in Plants. **Elsevier Inc.** USA.
- Murry J. R. and W. P. Hackett. 1991. Dihydroflavonol Reductase Activity in Relation to Differential Anthocyanin Accumulation in Juvenile and Mature Phase *Hedera helix* L. **Plant Physiol.** 93: 343-351.
- National Research Council. 1984. **Amaranth: Modern Prospects for an Ancient Crop.** National Academy Press, Washington, D.C. 63p.
- Neito, M. S., A. P. Barba de la Rosa and O. Paredes-Lo'pez. 1994. Biochemistry of Amaranth Proteins. *In* O. Paredes-Lo'pez, ed. **Amaranth: biology, chemistry, and technology.** CRC press, Inc., Florida.
- Nobel, P. S. 2005. **Physicochemical and environmental plant physiology.** Elsevier Academic Press, Burlington, USA. 567 p.
- Tromo, J. 1984. Diurnal fruit shrinkage in apple as affected by leaf water potential and vapor pressure deficit of the air. **Sci. Hort.** 22: 81–87.
- Van Bavel, M.G. 1994. Dynagage installation and operation manual. Dynamax, Inc., Texas, U.S.A.



ภาคผนวก
อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพผนวกที่ 1 อุปกรณ์วัดการไหลของน้ำของผลมะเขือเทศ a) หัววัดอัตราไหลเข้า (sap flow) โดยหุ้มรอบก้านช่อผล (peduncle) และปิดด้วยฉนวนกันความร้อน b) อุปกรณ์วัดอัตราคายน้ำ (LI6200) และ c) อุปกรณ์วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (dendrometer)

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวสุขโฉม ฅ นคร
วัน เดือน ปี ที่เกิด	23 เมษายน 2525
สถานที่เกิด	จังหวัดภูเก็ต
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร) มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-