

การลำเลียงน้ำเข้าออกและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำของผลมะเขือเทศในรอบวัน

Diurnal Water Inflow, Outflow and Change in Water Content of Tomato Fruit

สุขโฉม ณ นคร^{1,2} และ สุนทรี ยิ่งชีพวาลัย^{1,2,3*}
Sukchom Na Nakorn^{1,2} and Suntaree Yingjajaval^{1,2,3*}

Abstract

The expansion of fruit size results from the change in water content, which is the net difference in the amount of inflow and outflow. The study acquired data in this limited field employing tomato fruit as the example. The inflow was measured with the sap flow gauge wrapped around the peduncle. The outflow was measured as fruit transpiration using the gas exchange chamber (LI6200). The change in water content was estimated from the change in fruit diameter measured with the dendrometer. Each process was determined on a different fruit as the size of the fruit could accommodate only one piece of equipment at a time. The diurnal water fluxes were followed on two days. On 17 August 2009, three set of fruits aging 14, 21 and 28 days after flowering were measured concurrently, while another three set of fruits aging 35, 42 and 49 days were measured on 14 September 2009. As the fluxes were from different fruits, the water balance for the flow could not be determined directly. Only the pattern of change in the amount of water flow was evaluated based on normalization with the initial fresh fruit mass.

Environmental conditions were similar on both days, having strong sun with maximum air vapor pressure of 3.0-3.3kPa. 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 the expansion appeared during the rest of the time. The largest change in diameter (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.

Keyword : sap flow, fruit transpiration, fruit diameter, fruit water content

¹ ศูนย์เทคโนโลยีชีวภาพเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

Center for Agricultural Biotechnology, KasetsartUniversity, KamphaengSaen, NakhonPathom 73140, Thailand

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านเทคโนโลยีชีวภาพเกษตร สำนักพัฒนานวัตกรรมการศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กรุงเทพฯ 10900

Center of Excellence on Agricultural Biotechnology (AG-BIO/PERDO-CHE), Bangkok 10900, Thailand

³ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน นครปฐม 73140

Faculty of Liberal Arts and Science, KasetsartUniversity, KamphaengSaen, NakhonPathom 73140, Thailand

รับเรื่อง : พฤษภาคม 2554

* Corresponding author: suntaree.y@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การขยายขนาดของผลไม้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำในระหว่างการพัฒนาการของผล ซึ่งเป็นผลต่างสุทธิระหว่างปริมาณที่ไหลเข้าผลและที่ไหลออกจากผล การศึกษาในแนวนี้ยังมีน้อย จึงได้ใช้ผลมะเขือเทศเป็นตัวอย่างในการศึกษาการลำเลียงของน้ำเข้าสู่ผล โดยวัด 3 กระบวนการ คือ ศึกษาอัตราการน้ำไหลเข้าผลในรอบวันด้วยอุปกรณ์วัดอัตราไหล (sap flow gage) ที่หุ้มรอบก้านช่อผลมะเขือเทศ อัตราน้ำไหลออกจากผลวัดเป็นอัตราการคายน้ำด้วยเครื่องวัดการแลกเปลี่ยนแก๊ส(LI6200) และประเมินปริมาณน้ำของผลจากการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลด้วยอุปกรณ์ dendrometerแบ่งการวัดเป็น 2 วัน ในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 วัดกระบวนการละ 3 ผล พร้อมกันเป็นผลอายุ 14, 21 และ 28 วัน วัดครั้งที่สองในวันที่ 14 กันยายน 2552 วัดอีกกระบวนการละ 3 ผลพร้อมกันเป็นผลอายุ 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน ในการนี้เนื่องจากอุปกรณ์มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถวัดทั้งสามกระบวนการในมะเขือเทศผลเดียวกันได้ ปริมาณน้ำที่วัดได้จึงเป็นเชิงเปรียบเทียบลักษณะการเปลี่ยนแปลงในผลมะเขือเทศแต่ละอายุ และถ่วงน้ำหนักโดยคิดเป็นร้อยละของมวลสดเริ่มต้นของผลมะเขือเทศ

สภาพอากาศทั้งสองวันมีแสงแดดดี และแรงดึงระเหยน้ำของอากาศมีค่าใกล้เคียงกันโดยค่าสูงสุดอยู่ที่ 3.0-3.3kPa ในผลอ่อนช่วงอายุ 14-21 วัน ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลเกิดในช่วงกลางคืนมากกว่าช่วงกลางวัน หลังจากนั้นการไหลเข้าก็เพิ่มขึ้นมากในช่วงกลางวัน จนผลมีอายุ 35 วัน ซึ่งเป็นช่วงที่ผลมะเขือเทศเริ่มเกิดสีชมพูในชั้นตอนของกระบวนการสุก ปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลมีค่าสูงสุดคิดเป็น 12.8% ของมวลผลสดเริ่มต้น ผลที่อายุมากกว่านี้มีปริมาณน้ำไหลเข้าลดลงจนเหลือเพียง 1.3% ขณะผลมีอายุ 49 วัน อัตราคายน้ำของผลถูกควบคุมโดยแรงดึงคายน้ำ ($VPD_{fruit-air}$) โดยตรง ในขณะที่ค่าน้ำไหลของผิวผลมีค่าค่อนข้างคงที่ตลอดทั้งวัน ผลมะเขือเทศอ่อนในช่วงอายุ 14-21 วัน มีอัตราการคายน้ำที่สูงกว่าเพราะเป็นช่วงที่ค่าน้ำไหลผิวผลมีระดับสูงกว่าของผลที่มีอายุมากกว่าอย่างชัดเจน ปริมาณน้ำที่สูญเสียจากผลในช่วงผลอ่อนมีระดับสูงอยู่ที่ 16-18% ของมวลผล แล้วลดลงเหลือคงที่อยู่ที่ 6% ในผลอายุมากขึ้น ผลมะเขือเทศมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางลดลงในช่วงกลางวัน 8-15 น. และมีการเพิ่มขนาดในช่วงเวลาอื่นนอกจากนี้ ผลอายุ 14 วัน มีการเพิ่มขนาดของผลหรือเพิ่มปริมาณน้ำในผลมากที่สุดอยู่ที่ 6.2% ของมวลผล ในขณะที่ผลมะเขือเทศอายุ 42-49 วัน มีปริมาณน้ำในผลลดลงในรอบวัน โดยสรุป ผลมะเขือเทศมีการขยายขนาดเพิ่มขึ้นสุทธิจนถึงอายุผล 35 วัน ซึ่งสะท้อนว่าปริมาณน้ำไหลเข้ามีมากกว่าปริมาณน้ำไหลออก หลังจากนั้นผลมีขนาดลดลงเนื่องจากในช่วงหลังปริมาณน้ำไหลเข้าผลลดลงจนต่ำกว่าปริมาณน้ำไหลออกจากผล

คำนำ

จังหวะของการเปลี่ยนขนาดของผลไม้ในรอบวันจะเกิดขึ้นในผลไม้ชนิดต่างๆ อาทิ อะโวคาโด ส้ม และแอปเปิล (Tromo, 1984) เพราะมีน้ำไหลเข้าและออกจากผลในอัตราที่ไม่เท่ากัน ช่วงเวลากลางวันเป็นช่วงที่ผลมีอัตราการสูญเสียน้ำสูงกว่า ทำให้ผลหดขนาด แต่เวลากลางคืนซึ่งเป็นช่วงที่ได้รับน้ำมาชดเชย ผลจะมีการขยายขนาด การเคลื่อนที่ของน้ำเข้าออกผลจึงมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการขยายขนาดของผล

การเปลี่ยนขนาดสุทธิของผลในรอบวัน เป็นผลต่างของปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผ่านก้านผล กับปริมาณน้ำที่ไหล

ออกจากผลโดยการคายน้ำที่ผิวผล น้ำไหลผ่านทางก้านผลในทิศทางจากใบไปหาผลด้วยแรงขับเคลื่อน ที่เท่ากับความแตกต่างของค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของใบติดผล (Ψ_{leaf}) กับค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของก้านผล (Ψ_{fruit}) โดยอัตราไหลของน้ำผ่านก้านผลจะผันตามระดับของแรงขับเคลื่อน (Matthews *et al.*, 2005; Higuchi and Sakuratani, 2006; Lee *et al.*, 1989)

น้ำไหลออกจากผลผ่านการคายน้ำที่ผิวผลออกสู่อากาศ ตามค่าแรงดึงคายน้ำจากผลสู่อากาศ ($VPD_{fruit-air}$) นอกจากนี้ยังสามารถไหลออกจากผล (back-flow) ไปยังใบได้ในกรณีที่ค่าพลังงานศักย์รวมของน้ำของผลสูงกว่าใบ (Johnson *et al.*, 1992) ผลมะเขือเทศมีการคายน้ำ

ประมาณ 10-25% ของน้ำที่ส่งเข้าไปยังผล ภายใต้สภาพแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) ในช่วง 1.5-2.4 kPa (Leonardiet al., 2000) โดยช่องทางการไหลจะเป็นการคายน้ำจากส่วนของผิวเคลือบ(cuticle)เนื่องจากผลมะเขือเทศไม่มีปากใบ (stomata) บนผิวผล (Ehret and Ho, 1986; Ben-Yehoshua, 1987; Czarnowski and Starwecki, 1991 และจากการส่องดูผิวผล) อัตราคายน้ำของผลมีระดับขึ้นอยู่กับช่วงการเจริญเติบโตของผลและสภาพอากาศ (Ehret and Ho, 1986; Lee, 1990)

ผลมะเขือเทศขณะสุก(ripe) มีน้ำเป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 90 เชิงมวล (Ho et al., 1987) ดังนั้น การเคลื่อนที่ของน้ำเข้าและออกจากผลจึงเป็นขั้นตอนแรกที่กำหนดการเจริญเติบโต และคุณภาพของผล หากเกิดการขาดน้ำ ต้นมะเขือเทศจะมีผลขนาดเล็กและมีผลผลิตต่ำในทางกลับกันหากต้นได้รับน้ำมากเกินไปผลมะเขือเทศจะมีคุณภาพต่ำ (Guichardet al., 2001) ดังนั้นเพื่อความเข้าใจลักษณะการลำเลียงน้ำเข้าและออกจากผลมะเขือเทศตลอดช่วงพัฒนาการตั้งแต่ผลอ่อนถึงผลสุก จึงได้ศึกษาอัตราไหลของน้ำเข้าผลและอัตราคายน้ำของผล ควบคู่กับการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลภายใต้สภาพอากาศในรอบวัน

อุปกรณ์และวิธีการ

การศึกษาเพื่อให้เข้าใจ การลำเลียงน้ำเข้าสู่ผลมะเขือเทศ เก็บข้อมูลโดยใช้ตัวอย่างแบบสุ่มใช้มะเขือเทศลูกผสมพันธุ์PT4225 เพาะเมล็ดมะเขือเทศใน peat moss จนเป็นกล้าอายุ 25 วัน ย้ายลงแปลงปลูก ขนาด 5 x 1 m² จำนวน 20 แปลง แปลงละ 1 แถว แถวละ 10 ต้น ระยะปลูก 1 x 0.5 m² ใส่ปุ๋ยสูตร 15-15-15 ทุก 2 สัปดาห์ ให้น้ำแบบปล่อยตามร่อง และฉีดพ่นยากำจัดศัตรูพืชเมื่อมีเชื้อโรคหรือแมลงเข้าทำลาย พันธุ์มะเขือเทศและแปลงทดลองเป็นของศูนย์วิจัยและพัฒนาพืชผักเขตร้อน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

การศึกษาใช้แนวคิดเรื่องดุลบัญชีของน้ำ (water balance) ที่พิจารณาปริมาณน้ำไหลเข้าผลและออกจากผล โดยผลต่างของน้ำสองปริมาณนี้คือปริมาณน้ำในผลที่

เปลี่ยนแปลงไป วัดอัตราไหลของน้ำเข้าผลโดยติดตั้งเครื่องวัดอัตราไหล (sap flow) ที่ก้านของข้อผล วัดอัตราไหลของน้ำออกจากผลโดยวัดอัตราการคายน้ำของผลด้วยเครื่องวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊ส (LI6200) และประเมินการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำของผล ซึ่งสะท้อนออกด้วยการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผล ที่วัดด้วยเครื่องวัดขนาด (dendrometer) (ภาพที่ 1) รวมทั้งบันทึกข้อมูลสภาพอากาศที่กำหนดแรงดึงระเหยน้ำ ในการศึกษานี้มีข้อจำกัดสำคัญที่อุปกรณ์มีขนาดใหญ่ ทำให้ไม่สามารถวัดทุกกระบวนการภายในลูกเดียวกันได้ จึงได้ใช้ผลมะเขือเทศคนละผลในการวัดปริมาณน้ำ แต่ละกระบวนการเตรียมการล่วงหน้า โดยตัดแต่งข้อผลมะเขือเทศตั้งแต่เริ่มติดผลให้เหลือเฉพาะผลแรกเพียงผลเดียว ช่วงอายุผลที่ศึกษาคือ ผลอายุ 14, 21, 28, 35, 42 และ 49 วันหลังดอกบาน (2-7 สัปดาห์) แบ่งการวัดผลมะเขือเทศเป็น 2 ครั้ง ครั้งแรกในวันที่ 17 สิงหาคม 2552 วัดผลอ่อนที่มีอายุ 14, 21 และ 28 วัน ครั้งที่สองในวันที่ 14 กันยายน 2552 วัดผลสุกที่อายุ 35, 42 และ 49 วัน (ผลมะเขือเทศเริ่มเกิดสีชมพูที่ผิวที่อายุ 35 วัน)

สภาพอากาศและสภาวะน้ำในดิน

วัดสภาพอากาศในรอบวันของแปลง โดยติดตั้งสถานีอากาศที่ระดับความสูง 2 m จากผิวดิน มีหัววัดอุณหภูมิ (T, C) ความชื้นสัมพัทธ์ (RH, %) และความเข้มแสงในช่วงสังเคราะห์แสงของพืช (photosynthetic photon flux, PPF, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (datalogger รุ่น Watchdog 2475 ของบริษัท Spectrum Technologies, U.S.A) บันทึกค่าทุก 5 นาที คำนวณค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (VPD_{air} , kPa) ซึ่งสะท้อนระดับความแห้งของอากาศ โดยใช้ความสัมพันธ์ $VPD_{air} = e^{\circ} \times \{1 - (RH/100)\}$ เมื่อ e° (kPa) เป็นค่าแรงดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของอากาศขณะนั้น ซึ่งเท่ากับ $e^{\circ} = 0.61083 \times 10^{[(7.6448 \times T)/(242.2 + T)]}$ (Licor, 1990) ฟังเครื่องวัดแรงดึงน้ำของดิน (tensiometer ของบริษัท SoilMoisture Equipment, U.S.A) ในแปลงปลูกให้ห่างจากโคนต้นมะเขือเทศที่เลือกเป็นตัวแทนประมาณ 10 cm ที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm จากผิวดิน ควบคุมการให้น้ำโดยรักษาให้ค่าพลังงานกำกับกับดิน (soil matric

potential) อยู่ในช่วง -20 ถึง -40 kPa เพื่อให้มะเขือเทศสามารถดึงน้ำไปใช้ประโยชน์ได้ง่าย

อัตราไหลของน้ำเข้าผลมะเขือเทศ

เลือกผลมะเขือเทศที่มีอายุ 14-28 วันหลังดอกบาน อายุละ 1 ผล วัดพร้อมกัน 3 ผล ในการวัดครั้งที่หนึ่ง และผลมะเขือเทศที่มีอายุ 35-49 วันหลังดอกบาน อายุละ 1 ผล รวม 3 ผล ในการวัดครั้งที่สอง โดยเป็นผลเดิมที่วัดทั้งวัน ก้านข้อผลมะเขือเทศ (peduncle) แต่ละอายุมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5-7 mm ติดตั้งหัววัด (Microflow gages รุ่น SGA5-ws ของบริษัท Dynamax, U.S.A) หุ้มรอบก้าน และให้ระดับความร้อนเท่ากับ 0.08 W บันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (data logger รุ่น CR 10X ของบริษัท Campbell, U.S.A) บันทึกค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที จนครบ 24 ชั่วโมง ช่วงก่อนจะบันทึกค่า ต้องวัดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (K_{sh}) ของฉนวนของหัววัด โดยการตั้งค่า K_{sh} เท่ากับ 0 แล้วเก็บข้อมูลวันแรก ในช่วงเวลาที่มีการไหลต่ำที่สุดที่ประมาณ 5 น. เครื่องจะให้ข้อมูลค่า K_{sh} สำหรับการคำนวณการนำความร้อนแนวรัศมีของหัววัด การคำนวณอัตราไหลของชุดอุปกรณ์ใช้หลักการติดดูความร้อน (heat balance method) (van Bavel, 1994) ปริมาณน้ำทั้งหมดที่ไหลเข้าสู่ผลในรอบวัน คำนวณเป็นผลรวมของอัตราไหลในช่วง 24 ชั่วโมง

อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศ

วัดอัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศอายุละ 1 ผล เป็นผลเดิมที่วัดทุกๆ ชั่วโมง ตั้งแต่เวลา 8 น. จนถึง 18 น. แบ่งการวัดผลมะเขือเทศออกเป็นสองครั้ง เช่นเดียวกับที่อธิบายในการวัดอัตราไหล แต่เป็นคนละผลกับที่ใช้วัดอัตราไหล ใช้เครื่องวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สระบบปิด (model LI-6200 ของบริษัท Licor, U.S.A) ต่อกับกล่องบรรจุผลแบบใส่ที่ดัดแปลงทำขึ้น ซึ่งแสงอาทิตย์สามารถส่องผ่านได้ ปรับอัตราเร็วของอากาศที่ไหลผ่านผล (flow rate) เท่ากับ 400 $\mu\text{mol s}^{-1}$ และควบคุมให้ K_{abs} (absorption coefficient) ไม่เกิน 1.5 วัดอุณหภูมิที่ผิวผลมะเขือเทศด้วยหัววัด thermocouple โดยให้สัมผัสกับผิวผล วัดอัตราการคายน้ำของ

ผลมะเขือเทศเฉพาะช่วงเวลากลางวัน อัตราคายน้ำในช่วงกลางคืนจะประเมินจากอัตราการคายน้ำในช่วงเย็นและค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (VPD_{air})

อัตราการคายน้ำ (E) เป็นผลคูณของค่านำไหลรวมของไอน้ำ (g_t^w) และแรงดึงคายน้ำ ($VPD_{fruit-air}$) โดยที่ g_t^w เป็นค่านำไหลรวมของไอน้ำ ผ่านช่องทางการไหลของผิวผล (cuticular conductance, g_c) และค่านำไหลผ่านชั้นบางติดผิวผล (boundary layer conductance, g_b) ในขณะที่แรงดึงคายน้ำของผล ($VPD_{fruit-air}$) เป็นผลต่างของค่าความดันไอน้ำระหว่างของอากาศภายในช่องว่างระหว่างเซลล์ของผล (fruit vapor pressure, e_f) ซึ่งเท่ากับค่าความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิของผิวผล กับของอากาศภายนอก (air vapor pressure, e_a)

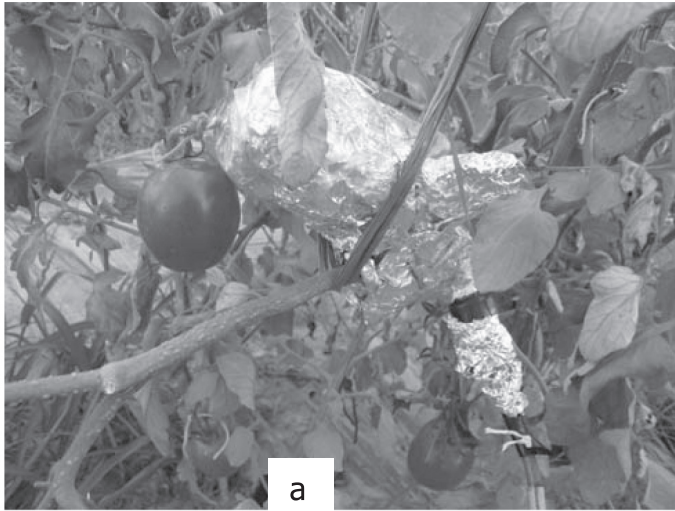
การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศ

ติดตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของผลมะเขือเทศในแต่ละอายุในรอบวัน โดยเลือกผลมะเขือเทศอายุละ 1 ผล เป็นผลเดิมที่วัดทั้งวัน แบ่งการวัดออกเป็นสองครั้งเช่นข้างต้น (เป็นคนละผลกับที่ใช้วัดอัตราไหลและอัตราการคายน้ำ) วัดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของผลในแนวระนาบ ด้วยเครื่อง dendrometer (บริษัท Dynamax, U.S.A) บันทึกข้อมูลแบบอัตโนมัติ (data logger รุ่น CR10X ของบริษัท Campbell, U.S.A) โดยบันทึกค่าเฉลี่ยทุกๆ 15 นาที ต่อเนื่องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

สร้างความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในผลกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผล ในการศึกษาก่อนหน้านี้ ใช้ฟังก์ชันคำนวณปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงของผลจากการเปลี่ยนแปลง ดังสมการ

$$W = 0.5541 \times D^{2.989}$$

เมื่อ W คือปริมาณน้ำในผล (g) และ D คือเส้นผ่านศูนย์กลางผลในแนวนอน (cm)



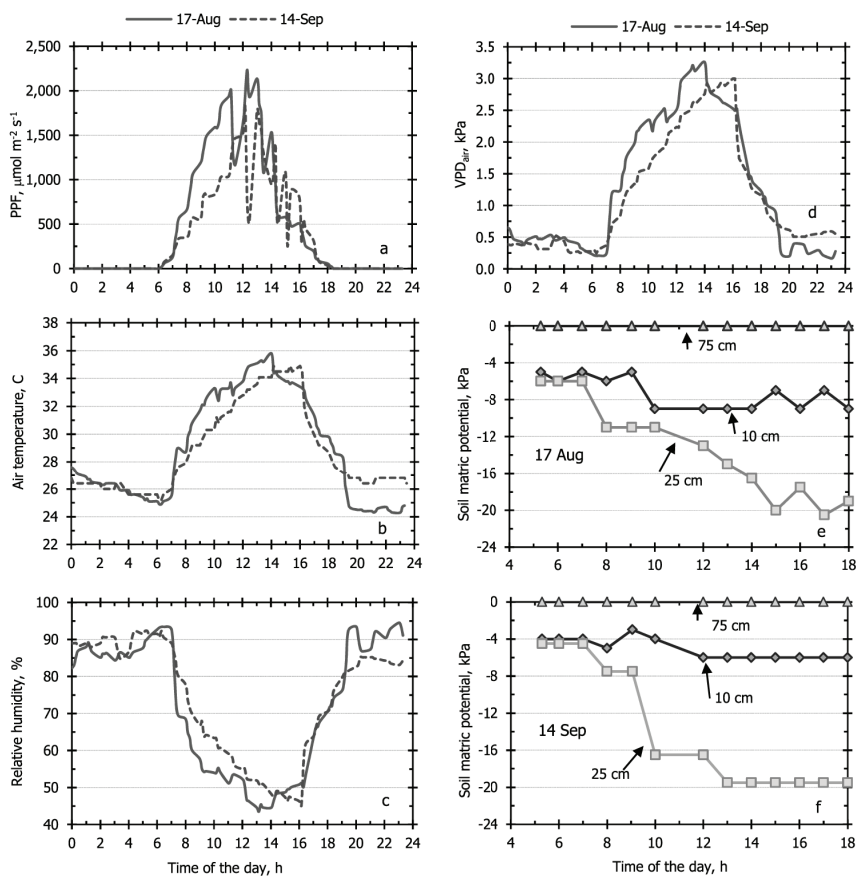
ภาพที่ 1 อุปกรณ์วัดการไหลของน้ำของผลมะเขือเทศ a) หัววัดอัตราของน้ำไหลเข้า (sap flow) โดยหุ้มรอบก้านช่อผล (peduncle) และปิดด้วยฉนวนกันความร้อน b) อุปกรณ์วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (dendrometer) c) และ d) อุปกรณ์วัดอัตราการคายน้ำ (LI6200) และกล่องบรรจุตัวอย่างที่ดัดแปลงทำขึ้น

ผลและวิจารณ์

สภาพอากาศและสภาวะน้ำในดิน

สภาพอากาศของแปลงในการวัดทั้งสองครั้ง (17 สิงหาคม และ 14 กันยายน 2552) แสดงในภาพที่ 2 ความเข้มแสงขึ้นสูงสุดในช่วงเที่ยง มีเมฆบังแสงแดดเป็นระยะ ความเข้มแสงสูงสุดมีค่าประมาณ 2,235 $\mu\text{molPPF m}^{-2} \text{s}^{-1}$ แสงแดดหมดเมื่อเวลาประมาณ 18 น. (ภาพที่ 2a) อุณหภูมิของอากาศเพิ่มสูงขึ้นตามความเข้มแสงในรอบวัน (ภาพที่ 2b) ในขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศลดลง (ภาพที่ 2c) ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) (ภาพที่ 2d) มีค่าอยู่สูงสุดที่ 3.0-3.3 kPa กล่าวโดยรวมได้ว่าทั้งสองวันสภาพอากาศมีลักษณะคล้ายคลึงกัน โดยในวันแรกมีระดับความแห้ง

รุนแรงกว่าวันที่สอง สภาวะน้ำในดินที่ความลึก 3 ระดับ (ภาพที่ 2e) พบว่าที่ความลึก 75 cm น้ำมีค่าพลังงานก่อกับก่อนดินสูงสุดใกล้เคียง 0 kPa แสดงว่าน้ำในดินชั้นนี้มีระดับปริมาณน้ำอิ่มตัวตลอดทั้งวันไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งแสดงถึงตำแหน่งของระดับน้ำใต้ดินในแปลง ในขณะที่น้ำที่ความลึก 25 cm แม้มีค่าพลังงานเปลี่ยนแปลงลดต่ำลง แต่ยังมีระดับสูงอยู่ที่ -20 kPa และที่ความลึก 10 cm น้ำมีค่าพลังงานก่อกับก่อนดินอยู่ในช่วงไม่ต่ำกว่า -10 kPa ทั้งหมดนี้แสดงว่า ชั้นรากมะเขือเทศอยู่ในสภาพที่น้ำมีระดับพลังงานก่อกับก่อนดินสูงตลอดทั้งวัน และรากที่ความลึก 25 cm มีการดูดใช้น้ำมากอย่างชัดเจน ค่าสรุปของสภาพแวดล้อมแสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 2 สภาพอากาศและน้ำในดินของวันที่ 17 สิงหาคม และ 14 กันยายน 2552 ที่ศึกษามะเขือเทศ a) ความเข้มแสง b) อุณหภูมิ c) ความชื้นสัมพัทธ์ d) แรงดึงระเหยน้ำของอากาศ e) พลังงานก่อกับก่อนดินที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm ของวันที่ 17 สิงหาคม f) พลังงานก่อกับก่อนดินที่ระดับความลึก 10, 25 และ 75 cm ของวันที่ 14 กันยายน 2552

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุด/ต่ำสุดในรอบวันของสภาพอากาศและพลังงานกำกับกอนดิน (μm) ที่ความลึกสามระดับของวันที่ 17 สิงหาคม และ 14 กันยายน 2552

	17 Aug 2009			14 Sep 2009		
	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average
PPF ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	2,235	0	932*	1,819	0	737*
Air temperature (C)	35.8	24.3	28.9	34.9	25.2	28.8
VPD _{air} (kPa)	3.3	0.2	1.3	3.0	0.3	1.2
Air RH (%)	95	44	73	92	45	74
μm at 10 cm (kPa)	-3	-6	-5	-5	-9	-7
μm at 25 cm (kPa)	-5	-20	-14	-6	-21	-13
μm at 75 cm (kPa)	0	0	0	0	0	0

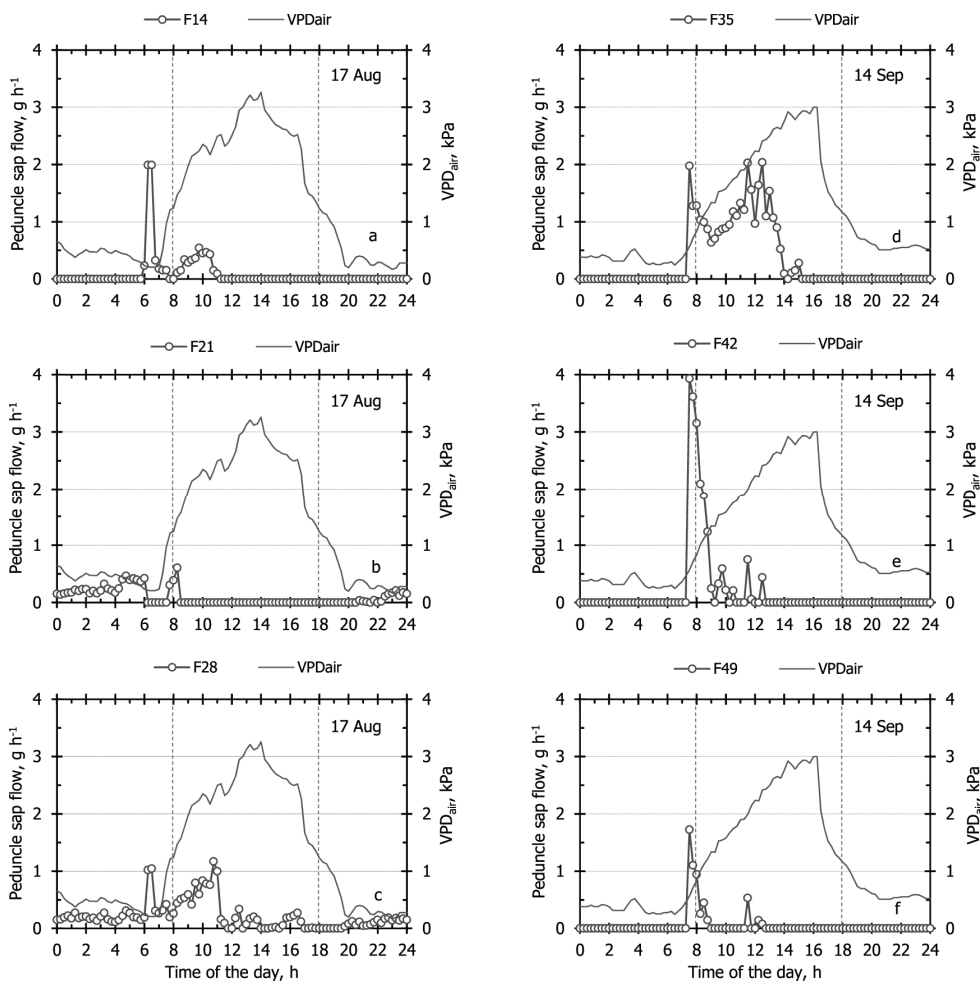
* daytime average (เฉพาะช่วงมีแสงแดด)

อัตราไหลของน้ำเข้าผลมะเขือเทศ

อัตราไหลของน้ำเข้าผลมะเขือเทศ(ภาพที่ 3) เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วแบบกระชาก (surge) จนมีระดับสูงสุดในช่วงเช้า 7-8 น. ก่อนหน้าที่ค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) มีค่าค่อยๆเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเริ่มมีแสง หลังจากช่วงนี้แล้ว อัตราไหลของน้ำเข้าผลมีระดับต่ำจนเหลือประมาณศูนย์ อัตราไหลสูงสุดเกิดในผลอายุ 42 วัน อยู่ที่ 4 g h^{-1}

ปริมาณน้ำรวมที่ไหลเข้าผลมะเขือเทศเป็นผลคูณของอัตราไหลแต่ละชั่วโมงกับช่วงเวลา แสดงค่าในตารางที่ 2 โดยแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วง 0-8 น. เป็นช่วงกลางคืนที่สภาพอากาศมีความชื้นสูง ช่วง 8-18 น. เป็นช่วงกลางวัน

มีสภาพอากาศแห้งรุนแรง และช่วง 18-24 น. เป็นช่วงเย็นหลังสภาพอากาศคลายความแห้งรุนแรงลง เห็นได้ว่าในผลอ่อนในช่วงอายุ 14-28 วัน ปรากฏมีน้ำไหลเข้าผลมากชัดเจนในช่วงเวลากลางคืนมากกว่ากลางวัน ขณะผลอายุ 28 วัน มีปริมาณน้ำเข้าผลใกล้เคียงกันระหว่างช่วงกลางวันกับกลางคืน ผลรวมของปริมาณน้ำในช่วงเวลา 24 ชม. พบว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลมะเขือเทศมีค่าเพิ่มขึ้นตามอายุ จนมีปริมาณมากที่สุดเมื่อผลมีอายุ 35 วัน เป็นปริมาณน้ำที่ไหลเข้าช่วงกลางวันจำนวนมาก รวมทั้งหมดคิดเป็น 12.8% ของมวลผลสดเริ่มต้น ปริมาณน้ำไหลเข้าผลมะเขือเทศลดลงเหลือต่ำสุดขณะที่ผลมีอายุมากที่สุดที่ 49 วัน



ภาพที่ 3 อัตราไหลของน้ำเข้าก้านช่อผลมะเขือเทศในรอบวันของผลอายุต่างๆ 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 2 ปริมาณน้ำรวมที่ไหลเข้าผ่านก้านช่อผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง เทียบเป็นร้อยละของมวลผลสดเริ่มต้น (initial fruit mass)

Fruit age, days	Diurnal water inflow in peduncle, g			Sum	% of initial fruit mass	Initial fruit mass, g
	0-8	8-18	18-24			
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

อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศ

วัดอัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศทุกชั่วโมง ระหว่าง 8-18 น. (ภาพที่ 4 และตารางที่ 3) อัตราคายน้ำในรอบวันของผลมะเขือเทศมีลักษณะคล้ายคลึงกันทั้ง 6 ช่วงอายุผล คือ อัตราคายน้ำเพิ่มสูงขึ้นในช่วงเช้า (ภาพที่ 4b) ตามการเพิ่มขึ้นของค่าแรงดึงคายน้ำ เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (ภาพที่ 4d) ส่วนค่าน้ำไหลของผิวผลมีค่าค่อนข้างคงที่ทั้งวัน ไม่ผันแปรตามสภาพอากาศ (ภาพที่ 4c) ช่วงเช้าจึงเป็นช่วงที่ผลมะเขือเทศมีทั้งช่องทางการไหล และแรงขับเคลื่อนที่เอื้อต่อการคายน้ำ หลังจากนั้นในช่วงบ่าย อัตราคายน้ำจะค่อยๆ ลดต่ำลงตามแรงดึงคายน้ำที่ลดต่ำลง โดยผลมะเขือเทศอายุน้อย (14 และ 21 วัน) มีอัตราการคายน้ำที่สูงกว่าผลที่มีอายุมากขึ้น เนื่องจากมีค่าน้ำไหลผิวผลที่สูงกว่าอย่างชัดเจน (ภาพที่ 4c)

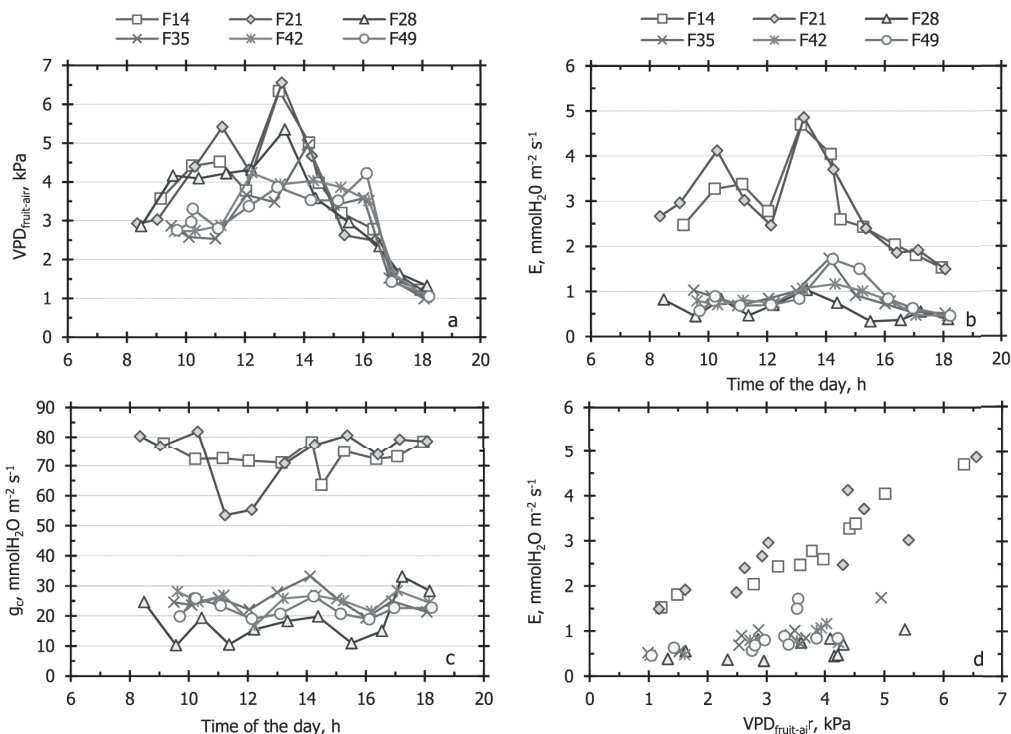
อัตราการคายน้ำของผลมะเขือเทศที่เปลี่ยนแปลงในรอบวัน ถูกกำหนดโดยค่าแรงดึงคายน้ำโดยตรง ส่วนค่าน้ำไหลผิวผลนั้น จะเห็นได้ว่าเมื่อผลยังมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ผิว (surface area) น้อยค่าน้ำไหลผิวผลมีค่าที่สูง และเมื่อผลมีขนาดใหญ่ขึ้น พื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น แต่ค่าน้ำไหลผิวผลกลับมีค่าลดลง แสดงว่าช่องทางการไหลของน้ำที่ผิวผลน่าจะมีจำนวนที่คงที่ ขณะที่ผลมีพื้นที่ผิวน้อยทำให้จำนวนช่องทางการไหลต่อพื้นที่ผิว (ความหนาแน่นของช่องทาง) มีค่าสูงกว่า เมื่อ

ผลเข้าสู่ระยะสุก ช่องทางการไหลมักถูกเคลือบไปด้วย wax ที่มากขึ้น (Mapelliet al., 1978) ซึ่งน่าจะทำให้ค่าน้ำไหลลดลง ดังนั้นผลมะเขือเทศที่มีอายุมากขึ้นจึงมีค่าน้ำไหลของช่องทางการไหลและอัตราการคายน้ำลดลง

เนื่องจากการวัดอัตราการคายน้ำครอบคลุมเฉพาะช่วงเวลากลางวัน 8-18 น. (10 ชม.) จึงต้องประมาณการอัตราการคายน้ำในช่วงเวลากลางคืน 18-8 น. (14 ชม.) ซึ่งทำได้โดยใช้อัตราการคายน้ำที่เวลา 18 น. ที่เกิดในขณะที่แรงดึงระเหยน้ำของอากาศ (VPD_{air}) มีค่าประมาณ 1.0 kPa เป็นระดับพื้นฐาน แล้วพิจารณาว่าแรงดึงระเหยน้ำในช่วงเวลากลางคืนมีค่าอยู่ที่ประมาณ 0.2 kPa (ภาพที่ 2d) ดังนั้นหากประมาณการขั้นต้นว่าแรงดึงคายน้ำ ($VPD_{fruit-air}$) เปลี่ยนแปลงในลักษณะเดียวกันกับแรงดึงระเหยน้ำ จะได้อัตราคายน้ำในช่วงกลางคืนเป็นประมาณ 20% ของอัตราการคายน้ำที่ 18 น. ตามสัดส่วนการลดลงของค่า VPD_{air} ผลการคำนวณปริมาณน้ำที่ผลมะเขือเทศคายออก แบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา แสดงดังในตารางที่ 3 พบว่า ผลมะเขือเทศมีการสูญเสียน้ำรวมในช่วงเวลา 24 ชม. เป็นปริมาณมากในช่วงของผลอายุ 14-21 วัน โดยมีค่าประมาณ 16-18% ของมวลผลสดเริ่มต้น ส่วนผลในช่วงอายุ 28-49 วัน มีปริมาณน้ำที่ไหลออกใกล้เคียงกันและเป็นสัดส่วนของมวลผลที่ลดลง คือ อยู่ที่ประมาณ 5.5-6.2% ของมวลผลสดเริ่มต้น

ตารางที่ 3 ปริมาณน้ำที่คายออกจากผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง เทียบเป็นร้อยละของมวลผลสดเริ่มต้น ข้อมูลช่วงเวลา 8-18 น. เป็นข้อมูลที่วัดได้จริง ข้อมูลเวลาอื่นได้จากการประมาณการ

Fruit age, days	Diurnal water outflow, g			Sum	% of initial fruit mass	Initial fruit mass, g
	Time of the day, h					
	0-8 (est.)	8-18 (actual)	18-24 (est.)			
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



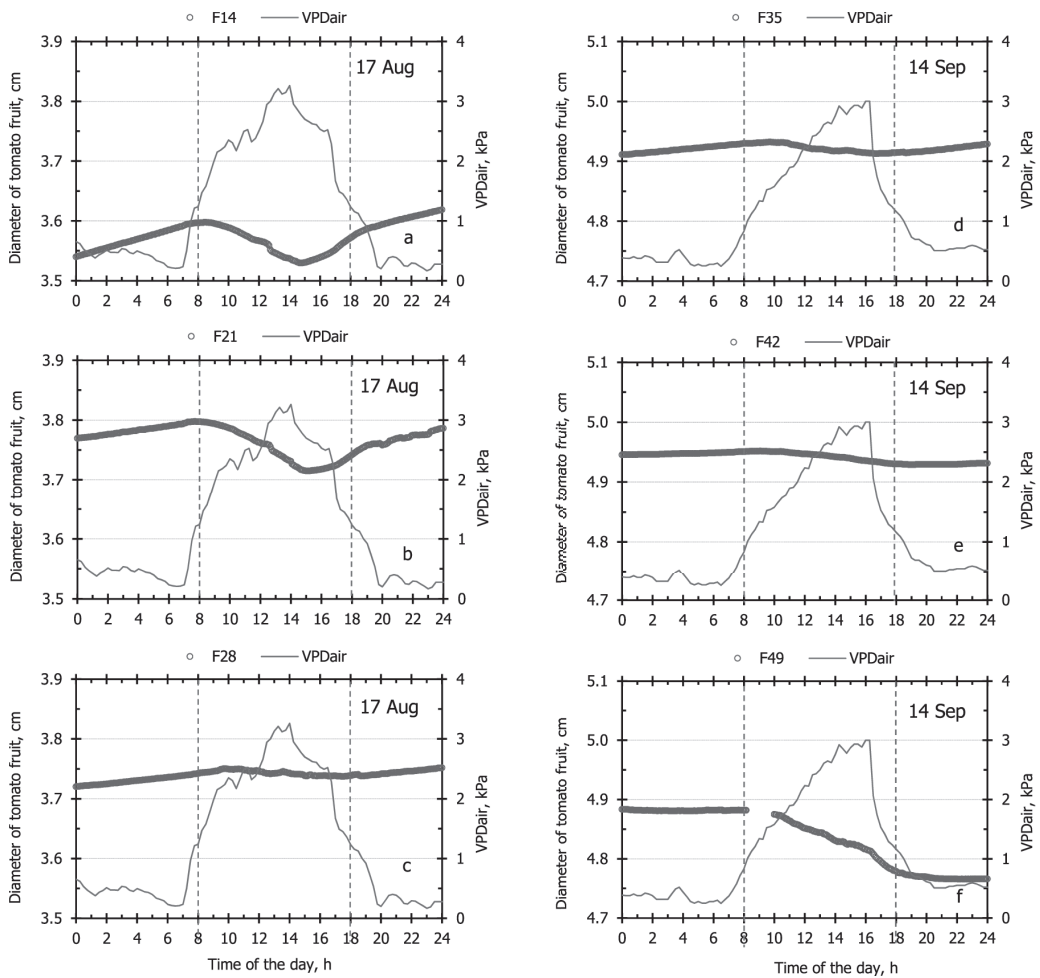
ภาพที่ 4 พารามิเตอร์จากการวัดอัตราแลกเปลี่ยนแก๊สในรอบวันของผลมะเขือเทศแต่ละอายุ a) แรงดึงคายน้ำ b) อัตราคายน้ำ c) ค่านำไหลของผิวผล และ d) ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราคายน้ำกับค่าแรงดึงคายน้ำ (F คือ ผล, 14-49 คือ อายุผลเป็นวัน ผลอายุ 14-28 วัน เป็นข้อมูลวันที่ 17 สิงหาคม 2552 และผลอายุ 35-49 วัน เป็นข้อมูลวันที่ 14 กันยายน 2552)

การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลมะเขือเทศ

การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในรอบวันของผลมะเขือเทศ แสดงในภาพที่ 5 พบว่าผลมะเขือเทศอายุ 14-21 วัน มีการเปลี่ยนแปลงขนาดมากที่สุด ผลมีการขยายขนาดในช่วงเที่ยงคืนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 8 น. แล้วจึงมีขนาดลดลงจนถึง 15 น. การหดขนาดในช่วงกลางวันตรงกับช่วงที่ค่าแรงดึงระเหยน้ำของอากาศ มีระดับสูงในช่วงเย็นผลมะเขือเทศเริ่มขยายขนาดเพิ่มขึ้นใหม่อย่างต่อเนื่องไปตลอดทั้งคืน การขยายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของผลอายุน้อยตรงกับที่เกิดอัตราไหลเข้าของน้ำสู่ผลในช่วงกลางคืน (ตารางที่ 2) เมื่อผลมะเขือเทศมีอายุ 28-35 วัน แม้จะมีการเปลี่ยนแปลงขนาดในรอบวันน้อย แต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเมื่อสิ้นสุดรอบวันมีค่าสูงกว่าเมื่อเริ่มต้น

ส่วนผลอายุ 49 วัน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางลดลงกว่าค่าเริ่มต้นอย่างชัดเจน

คำนวณปริมาณน้ำในผลโดยใช้สมการที่ 1 ได้ค่าปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในตารางที่ 4 โดยแบ่งเป็น 3 ช่วงเวลา คือ ช่วง 0-8 น. เป็นช่วงที่สภาพอากาศยังไม่แห้ง ช่วง 8-15 น. เป็นช่วงที่มีสภาพอากาศแห้งรุนแรง และช่วง 15-24 น. เป็นช่วงหลังสภาพอากาศคลายความแห้งรุนแรงลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนขึ้นว่า ช่วงกลางวันเวลา 8-15 น. เป็นช่วงที่ผลมีปริมาณน้ำลดลงในทุกช่วงอายุ แต่เมื่อรวมเวลาเป็น 24 ชม. ผลอายุ 14 วัน มีการเพิ่มขึ้นของน้ำในผลมากที่สุดคิดเป็น 6.2% ของมวลผลสดเริ่มต้น ในขณะที่ผลอายุ 49 วัน มีน้ำในผลลดลงมากที่สุดคิดเป็น 6.1% ของมวลผลสดเริ่มต้น



ภาพที่ 5 การเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในแนวระนาบของผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชม. ที่อายุ ผลต่างๆ แสดงควบคู่กับค่าแรงดึงระเหยน้ำ (VPD_{air}) (F หมายถึง ผล, และ 14-49 หมายถึงอายุผลเป็นวัน ภาพ a-c เป็นข้อมูลวันที่ 17 สิงหาคม และภาพที่ d-f เป็นข้อมูลวันที่ 14 กันยายน 2552)

ตารางที่ 4 ปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงในผลมะเขือเทศ 3 ช่วงเวลาในรอบ 24 ชั่วโมง เทียบเป็นร้อยละของมวลผลสดเริ่มต้น

Fruit age, days	Change in fruit water content, g			Sum	% of initial fruit mass	Initial fruit mass, g
	Time of the day, h					
	0-8	8-15	15-24	0-24		
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

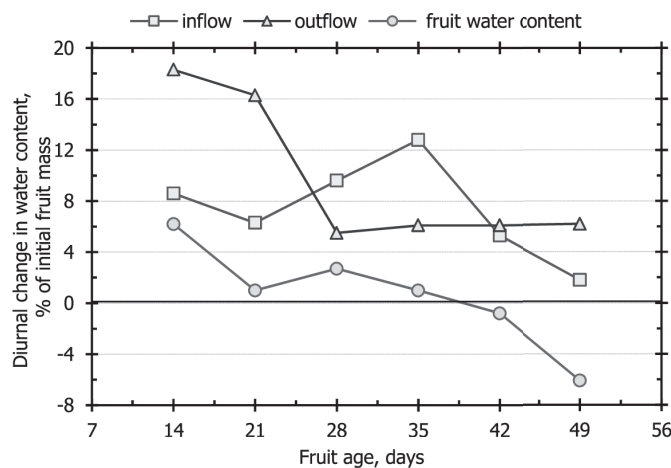
ปริมาณน้ำสุทธิของผลมะเขือเทศในรอบ 24 ชั่วโมง

หลักการคำนวณดุลบัญชีน้ำของผล คือ วัดปริมาณน้ำไหลเข้าผลเทียบกับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผล โดยที่ผลต่างเท่ากับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำสุทธิของผล แต่การทำดุลบัญชีน้ำในการศึกษานี้ ไม่สามารถทำได้โดยตรง เพราะปริมาณน้ำทั้ง 3 ค่าที่วัดได้ ไม่ใช่ของผลเดียวกัน เนื่องจากถูกจำกัดด้วยขนาดและการทำงานของเครื่องวัด ที่ทำให้ไม่สามารถติดตั้งให้วัดผลเดียวกันได้

ข้อมูลสรุปในที่นี้ จึงเป็นการศึกษารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำ และถ่วงค่าด้วยมวลผลสดเริ่มต้น คือ แสดงเป็นเปอร์เซ็นต์ของมวลสดของผลนั้น ดังแสดงในภาพที่ 6 พบว่าปริมาณน้ำที่ไหลเข้าผลมะเขือเทศมีค่าในช่วง 8-12% ของมวลผลสด โดยมีระดับเพิ่มสูงขึ้นตามอายุ จนถึงเมื่อผลเริ่มเข้าระยะสุกที่ 35 วัน หลังจากนั้นปริมาณน้ำเข้าผลจะลดลงอย่างรวดเร็วจนอยู่ในระดับต่ำ

เพียงประมาณ 2% ของมวลผลสด สำหรับปริมาณน้ำที่ไหลออกจากผลมะเขือเทศโดยการคายน้ำ แสดงระดับสูงชัดเจนในช่วงเป็นผลอายุน้อย(14-21 วัน) หลังจากนั้นปริมาณน้ำไหลออกจากผลลดลงอย่างรวดเร็วและค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 6% ของมวลผลสด

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



ภาพที่ 6 สัดส่วนปริมาณน้ำเทียบกับมวลผลสดเริ่มต้นที่ไหลเข้า (inflow) ไหลออก (outflow) และปริมาณน้ำของผลมะเขือเทศ (fruit water content) ที่เปลี่ยนแปลงในรอบ 24 ชั่วโมง โดยแต่ละจุดเป็นค่าของคณะผล

เอกสารอ้างอิง

- 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. **FoliaHortic.**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 andEnv.** 10: 947 – 953.
- 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.
- Leonardi, C., S. Guichard and N. Bertin. 2000. High vapour pressure deficit influences growth, transpiration and quality of tomato fruits. **Sci. Hort.** 84: 285 – 296.
- 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.
- 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.