

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในพืชโดยใช้เทคนิคพัลส์ความร้อน  
Sap Flow Meter by Using Heat Pulse Technique

ธนโชติ จรรย์วัน  
พฤทธิ์ แดนโพธิ์  
อมรชัย ตั้งผจงวิวัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2559

เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในพืชโดยใช้เทคนิคพัลส์ความร้อน

Sap Flow Meter by Using Heat Pulse Technique

ธนโชติ

จรรย์วัน

พฤทธิ

แดนโพธิ์

อมรชัย

ตั้งผจงวิวัฒน์

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

# Sap Flow Meter by Using Heat Pulse Technique

Thanachot Charanwan

Parit Danpo

Amornchai Tangpajongwiwat

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN AGRICULTURAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2016

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2559

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญาานิพนธ์

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในพืชโดยใช้เทคนิคพัลส์ความร้อน

Sap Flow Meter by Using Heat Pulse Technique

นักศึกษาผู้จัดทำ นายธนโชติ จรรย์วัน รหัสประจำตัว 56010510

นายพฤทธิ แคนโพธิ์ รหัสประจำตัว 56010818


นายอมรชัย ตั้งผจงวิวัฒน์ รหัสประจำตัว 56011418

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

หลักสูตร วิศวกรรมเกษตร

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2559

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาานิพนธ์	ลายมือชื่อ
ผศ.ดร. ทรงวุฒิ แสงจันทร์	

หัวข้อปริญญานิพนธ์	เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชโดยใช้เทคนิคพัลส์ความร้อน		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายธนโชติ	จรรย์วัน	56010510
	นายพฤทธิ	แดนโพธิ์	56010818
	นายอมรชัย	ตั้งผจงวิวัฒน์	56011418
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ทรงวุฒิ แสงจันทร์		
ปีการศึกษา	2559		

### บทคัดย่อ

โครงการนี้มีจุดประสงค์เพื่อทำการพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยวิธีพัลส์ความร้อน ทำการวัดอัตราการไหลของน้ำโดยหาค่าความเร็วของพัลส์ความร้อนช่วงสั้นๆ ในการพาความร้อนของการคายน้ำของพืชซึ่งควบคุมด้วย Micro-controller Arduino Mega 2560 R3 ทำการทดลองวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ มะม่วงเขียวเสวย มะม่วงน้ำดอกไม้ มะฮอกกานี สะเดา ชงโค และมะขามเทศ ในระหว่างเวลา 09.00 น. ถึง 17.00 น. จากการทดลองพบว่าอัตราการไหลของน้ำสูงสุดของพืชทั้ง 6 ชนิด อยู่ในช่วงเวลาประมาณ 12.00 น. ถึง 13.00 น. ทำการเปรียบเทียบอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชโดยใช้เทคนิคพัลส์ความร้อนกับค่าการคำนวณการใช้น้ำโดยวิธีของ Penman

**Thesis Title** Sap flow meter by using heat pulse technique

**Authors** Mr. Thanachot Charanwan 56010510

Mr. Parit Danpo 56010818

Mr. Amornchai Tangpajongwiwat 56011418

**Thesis Advisor** Asst. Prof. Dr. Songvoot Sangchan

**Year** 2016

### **Abstract**

The objective of this project was to develop sap flow meter by using heat pulse technique. Sap flow was measured by determining the velocity of a short pulse of heat carried by convection in the transpirational stream by used microcontroller Arduino type Mega 2560 R3. Six kinds of crops such as *Mangifera indica*, *Swietenia macrophylla*, *azadirachta indica* and *Bauhinia purpurea* were selected for experiment during 09:00 am. to 05:00 pm. From results of the experiment, maximum flow rate will be shown during the 12:00 am. to 01:00 pm. Determination of sap flow by using heat pulse technique was compared with evapotranspiration which calculated my Penman method.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีนั้น ทางคณะผู้จัดทำโครงการขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการรวมถึงอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการให้คำปรึกษา ให้ข้อมูลต่างๆที่จำเป็นสำหรับการทำโครงการ และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชาทุกท่านที่คอยช่วยเหลือในเรื่องการให้คำแนะนำไม่ว่าจะเป็นเรื่องการเงิน เรื่องสถานที่ตลอดจนการให้ยืมอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ

ทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณสาขาครุศาสตร์เกษตร คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อนุญาตให้ต่อแหล่งจ่ายไฟและใช้สถานที่ในการทำการทดลอง

สุดท้ายนี้ทางคณะผู้จัดทำ ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ได้ให้ทั้งทุนทรัพย์ที่ขาดเหลือจากงบประมาณและกำลังใจ ในการทำโครงการให้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ซึ่งทางคณะผู้จัดทำรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่ง จึงขอกราบขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

คณะผู้จัดทำ

นาย ธนโชติ จรรย์วัน

นาย พฤทธิ์ แดนโพธิ์

นาย อมรชัย ตั้งผจงวิวัฒน์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ii
กิตติกรรมประกาศ	iii
สารบัญ	iv
สารบัญตาราง	vii
สารบัญรูปภาพ	ix
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 กายวิภาค สรีรวิทยาของไม้ยืนต้น	4
2.2 การลำเลียงน้ำของพืช	5
2.3 วิธีการสำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช (Method for measuring sap flow)	8
2.4 วิธีการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง	10
2.5 หลักการของวิธีพัลส์ความร้อน	15
2.6 การหาความชื้นของเนื้อไม้สดและความหนาแน่นของเนื้อไม้ส่วนกระพี้	17
2.7 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)	18

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.8 อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์	19
2.9 ฮีตเตอร์ (Heater)	20
<b>บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินงาน</b>	<b>23</b>
3.1 วัสดุอุปกรณ์	24
3.2 การทดสอบวัดค่าอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช	24
3.3 การทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของหัวพัลส์ความร้อน	25
3.4 การทดสอบหาค่าความชื้นเนื้อไม้สดและความหนาแน่นกระพี้ไม้	25
3.5 การทดสอบหาค่าพื้นที่ต่อลำเสียงของต้นไม้	25
3.6 การทดสอบวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยเทคนิคพัลส์ความร้อน	26
3.7 การออกแบบระบบการทำงาน	26
3.8 การออกแบบวงจรสำหรับหัวให้ความร้อน	29
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	<b>30</b>
4.1 การทดสอบวัดค่าอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช	30
4.2 การทดสอบวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยเทคนิคพัลส์ความร้อน	31
4.2.1 ต้นมะม่วงน้ำดอกไม้	31
4.2.2 ต้นมะม่วงเขียวเสวย	32
4.2.3 ต้นมะขามเทศ	33
4.2.4 ต้นสะเดา	34
4.2.5 ต้นขงโค	35

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.2.6 ต้นมะฮอกกานี	36
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	<b>39</b>
5.1 สรุปผลการศึกษา	39
5.2 ข้อเสนอแนะ	39
5.3 ปัญหาที่พบ	40
5.4 แนวทางการพัฒนา	40
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>41</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>43</b>
ภาคผนวก ก. Codeที่ใช้ในการสั่งงาน	44
ภาคผนวก ข. ตาราง	47
ภาคผนวก ค. รูปภาพ	58

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมมติฐาน ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบ ของวิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช	9
2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะม่วง ( $K_c$ )	13
2.3 แสดงค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธี Penman-Monteith ( $ET_p$ ) รายเดือนของ กรุงเทพมหานครและสมุทรปราการ	14
2.4 แสดงค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธี Modified Penman ( $ET_p$ ) รายเดือน ของภาคกลางและตะวันตก	14
2.5 แสดงคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานชนิดต่างๆ	19
2.6 ข้อมูลจำเพาะเชิงเทคนิค	20
<b>ตารางภาคผนวก ข.</b>	
1. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (6 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)	48
2. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (7 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)	48
3. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (8 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)	49
4. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (9 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)	49
5. ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (10 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)	50
6. ผลการทดสอบหัวฟิลส์ความร้อน	50
7. ผลการหาค่าความชื้นในเนื้อไม้สด และความหนาแน่นเนื้อไม้ส่วนกระพี้ (6 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)	50
8. ค่าพื้นที่ต่อลำเลียงของต้นพืช (*ค่าตัวแปรในการคำนวณอ้างอิงจากเว็บไซต์กรมชลประทาน)	51
9. ค่าอัตราการไหลที่วัดได้จากเครื่องที่ได้ทำการปรับปรุง (กระพี้59)	51
10. ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นมะม่วงน้ำดอกไม้	52
11. ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นมะม่วงเขียวเสวย	53

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
12. ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการใช้ของต้นมะขามเทศ	54
13. ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการใช้ของต้นสะเดา	55
14. ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการใช้ของต้นชงโค	56
15. ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการใช้ของต้นมะฮอกกานี	57

## สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกายวิภาคของไม้	4
2.2 แสดงถึงการลำเลียงน้ำตามแนวรัศมี	6
2.3 การวัดอัตราการไหลของน้ำโดยใช้นานอิมิตอร์	7
2.4 ไซเล็ม	7
2.5 การไหลของน้ำในหลอดคาปิลารี	7
2.6 น้ำที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในดินเพราะความต่างศักย์ของน้ำ	8
2.7 การติดตั้งหัวให้ความร้อน และหัววัดอุณหภูมิ	15
2.8 รัศมีแก่นไม้และเปลือกไม้ดำนใน	16
2.9 อุณหภูมิของหัววัดอุณหภูมิทั้งสอง	17
2.10 กราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิ และการหา $t_0$	17
2.11 เทอร์โมคัปเปิล Type K ชนิดแห้ง	19
2.12 Arduino Mega 2560 R3	20
2.13 ส่วนประกอบของฮีตเตอร์แห้งแบบHD (ความร้อนสูง)	21
2.14 หลักการทำงานของ ฮีตเตอร์แห้งแบบHD (ความร้อนสูง)	22
3.1 เทอร์โมคัปเปิล Type K	24
3.2 การวัดอุณหภูมิภายในต้นพืช	24
3.3 Microcontroller Arduino MEGA 2560	24
3.4 อ่านค่าอุณหภูมิในคอมพิวเตอร์	24
3.5 (ก),(ข),(ค),(ง),(จ),(ฉ) แสดงการทดสอบหาค่าพื้นที่ท่อลำเลียงของต้นพืช	26
3.6 การออกแบบระบบการทำงานของเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช	28
3.7 การออกแบบวงจรสำหรับหัวให้ความร้อน	29

## สารบัญรูปภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.1	คุณสมบัติภายในต้นพีช	30
4.2	เปรียบเทียบคุณสมบัติภายนอกกับภายในต้นพีช	30
4.3	แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะม่วงน้ำดอกไม้	31
4.4	แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะม่วงเขียวเสวย	32
4.5	แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะขามเทศ	33
4.6	แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นสะเดา	34
4.7	แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นชงโค	35
4.8	แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะฮอกกานี	36
<b>รูปภาพภาคผนวก ค.</b>		
1.	เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีช	59
2.	การออกแบบวงจร	59
3.	การทดสอบหัวพัลส์ความร้อน	60
4.	การวัดความลึกของกระพี้ไม้	60
5.	การทดลองวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพีช	61
6.	เก็บตัวอย่างไม้สดมาอบแห้งเพื่อหาความหนาแน่นและความชื้น	61

## บทที่ 1

### บทนำ

ป่าไม้เป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นมนุษย์หรือสัตว์อื่นๆ เพราะป่าไม้มีประโยชน์ทั้งการเป็นแหล่งวัตถุดิบของปัจจัยสี่ และยังมีประโยชน์ในการรักษาสมดุลของสิ่งแวดล้อม ถ้าป่าไม้ถูกทำลายลงไปมากๆ ย่อมส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมที่เกี่ยวข้องอื่นๆ โดยจะส่งผลไปถึงดินและแหล่งน้ำด้วย เพราะเมื่อเผาหรือถางป่าไปแล้ว พื้นดินจะโล่งขาดพืชปกคลุม เมื่อฝนตกลงมาก็จะชะล้างหน้าดินและความอุดมสมบูรณ์ของดินไป นอกจากนี้เมื่อขาดต้นไม้คอยดูดซับน้ำไว้ น้ำก็จะไหลบ่าท่วมบ้านเรือน และที่ลุ่มในฤดูน้ำหลากพอถึงฤดูแล้งก็ไม่มีน้ำซึมใต้ดินไว้หล่อเลี้ยงต้นน้ำลำธารทำให้แม่น้ำมีน้ำน้อยส่งผลกระทบต่อมาถึงระบบเศรษฐกิจและสังคม เช่น การขาดแคลนน้ำในการชลประทานทำให้ทำเกษตรกรรมไม่ได้ จากเหตุผลข้างต้นจึงมีความคิดที่จะพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชเพื่อนำไปใช้คำนวณปริมาณการใช้น้ำของต้นพืช อย่างไรก็ตามเครื่องมือวัดชนิดนี้มีขายในต่างประเทศแต่มีราคาที่สูงเมื่อสั่งซื้อเข้ามาจึงยังไม่มีนำมาประยุกต์ใช้ในการเกษตร สำหรับประเทศไทยใช้วิธีการคำนวณปริมาณน้ำที่ให้แก่พืชโดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมนิเวศวิทยา คือ นำค่าการระเหยของน้ำที่ได้จากการวัดด้วยมาตรระเหย มาคำนวณเป็นปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช (crop coefficient,  $k_c$ ) นับว่าเป็นวิธีการที่สะดวกแต่มีจะประสบปัญหาว่าค่าที่ได้จากการคำนวณมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง ทั้งนี้เพราะค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้ในการคำนวณมีค่ามาตรฐานที่มีความแตกต่างจากการนำไปใช้คำนวณในพื้นที่ปลูกจริง ซึ่งขึ้นอยู่กับ อายุ ระยะปลูก ระบบปลูก และ สภาพแวดล้อม นอกจากนี้ ยังพบว่าข้อมูลที่ได้จากสถานีตรวจวัดอากาศอยู่ห่างไกลจากพื้นที่ปลูกพืช ทำให้มีความแตกต่างของค่าการระเหยของน้ำ มีผลให้เกิดความผิดพลาดในการคำนวณ และเครื่องมือรุ่นก่อนหน้านี้ยังไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงประกอบกับเทคโนโลยี ณ ตอนนั้นมีความล่าช้า จากเหตุผลข้างต้นคณะผู้จัดทำจึงมีแนวคิดที่จะสร้างเครื่องมือที่ใช้วัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช ซึ่งจะพัฒนาเครื่องมือขึ้นมาจากรุ่นก่อน และจะลองทดลองใช้จริงกับพื้นที่ตัวอย่างโดยให้สอดคล้องกับหลักชลศาสตร์เพื่อที่จะศึกษาปริมาณการใช้น้ำในของต้นพืช ณ พื้นที่นั้นๆและเป็นแนวทางในการอนุรักษ์พื้นที่ป่าเพื่อวิเคราะห์ปัญหาการขาดแคลนน้ำและปัญหาสิ่งแวดล้อมต่างๆในปัจจุบัน

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยใช้เทคนิคของพัลส์ความร้อน
2. เพื่อพัฒนาเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยใช้ Microcontroller

## ขอบเขตการศึกษา

1. ทำการพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในพืชโดยใช้microcontroller
2. เลือกพืชทำการทดลอง6ชนิดได้แก่ มะม่วงเขียวเสวย มะม่วงน้ำดอกไม้ มะฮอกกานี สะเดา ขงโค และ มะขามเทศ
3. เปรียบเทียบค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชโดยวิธีพัลส์ความร้อนกับค่าการใช้น้ำของพืชที่คำนวณโดยวิธี Penman

## ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยใช้เทคนิคของพัลส์ความร้อนควบคุมด้วย Microcontroller
2. เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยใช้เทคนิคอื่นต่อไป

## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร ทฤษฎีและหลักการ

Smith และ Allen (1996) ได้แนะนำวิธีการวัดการใช้น้ำของพืช (water use) ด้วยวิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชโดยตรง ซึ่งสามารถวัดได้ 4 วิธี คือ

1. วิธีสมดุลความร้อนในต้น (stem heat balance method)
2. วิธีสมดุลความร้อนในส่วนของลำต้น (trunk sector heat balance method)
3. วิธีพัลส์ความร้อน (heat pulse method)
4. วิธีการกระจายความร้อน (thermal dissipation method)

แต่ละวิธีมีข้อเสียที่แตกต่างกัน สำหรับวิธีพัลส์ความร้อนมีข้อดีสำหรับการติดตั้งกับไม้ยืนต้นที่มีผิวขรุขระได้ แต่ขนาดที่เหมาะสมต้องมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 30 มิลลิเมตรขึ้นไป วิธีพัลส์ความร้อนจึงเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมในการวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นไม้ป่าและไม้ผลหลายชนิด

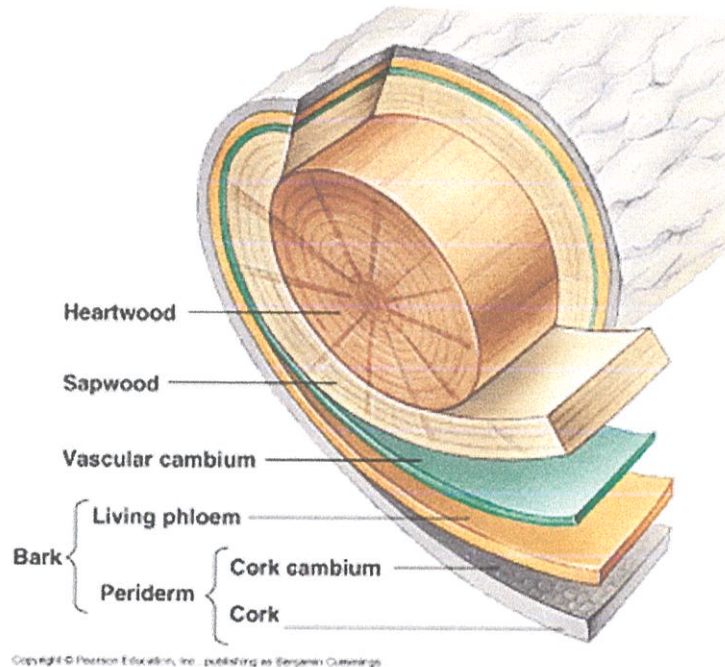
ชูศักดิ์ ลิ่มสกุล และคณะ (1996) ได้พัฒนาเครื่องต้นแบบเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยใช้เทคนิคพัลส์ความร้อนโดยการทำงานของตัวเครื่องจะถูกควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ หัววัดจะประกอบด้วยหัววัดอุณหภูมิ 2 อัน และหัวให้ความร้อน ที่มีขนาด 3 มิลลิเมตร หัววัดอุณหภูมิจะถูกติดตั้งให้อยู่ด้านบนและด้านล่างของหัวให้ความร้อนเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ตัวเครื่องจะมีชุดของหัววัดเพียงชุดเดียว หัววัดจะถูกปักบนต้นพืชให้อยู่ในส่วนของกระพี้ของลำต้น หลังจากนั้นเครื่องจะจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวให้ความร้อนเป็นเวลาสั้นๆ พร้อมกับทำการวัดช่วงเวลา ( $t_0$ ) ที่เริ่มให้กระแสไฟฟ้า จนกระทั่งหัววัดอุณหภูมิทั้งสองหัว วัดอุณหภูมิได้เท่ากัน ค่าช่วงเวลาที่วัดได้นี้ จะถูกนำไปคำนวณหาอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช จากการทดสอบเครื่องต้นแบบในห้องปฏิบัติการ พบว่าเครื่องสามารถวัดค่า  $t_0$  ได้ถูกต้อง จากนั้นนำเครื่องไปประยุกต์ใช้งาน โดยการวัดการใช้น้ำของต้นลองกองอายุ 8 ปี จำนวน 2 ต้น และต้นมังคุดอายุ 12 ปี จำนวน 2 ต้น เปรียบเทียบกับเครื่องของบริษัทกรีนสแปน มีค่า 16.85 และ 16.53 ลิตร ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณการใช้น้ำเฉลี่ยของต้นมังคุดมีค่า 25.78 และ 29.32 ลิตร ตามลำดับ

Green และ Clothier (1988) ได้ทำการศึกษาการใช้น้ำของต้น kiwifruit vines และต้น apple โดยนำเทคนิคของพัลส์ความร้อนไปใช้ในการวัดค่าความเร็วการไหลของน้ำภายในลำต้น kiwifruit vines และต้น apple แต่เนื่องจากน้ำภายในลำต้นของ kiwifruit vines มีอัตราการไหลที่สูงทำให้ไม่สามารถวัดความเร็วของพัลส์ความร้อนได้ ด้วยชุดของหัววัดที่มีระยะห่างมาตรฐาน จึงได้มีการเพิ่มระยะห่างระหว่างหัววัดอุณหภูมิด้านบนเป็น 20 มิลลิเมตร จากเดิม 10 มิลลิเมตร แต่ระยะห่างของหัววัดอุณหภูมิด้านล่าง 5 มิลลิเมตรยังคงระยะห่างไว้เท่าเดิมจากหัวให้ความร้อน โดยขนาดของหัวให้ความร้อนและหัววัดอุณหภูมิมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 มิลลิเมตรเท่ากัน ส่วนวิธีในการวัดและการคำนวณความเร็วการไหลของน้ำจะใช้วิธีเดียวกันกับวิธีของ Swanson และ Whitfield (1981)

จากผลการวัดค่าความเร็วในการไหลของน้ำภายในลำต้น Green และ Clothier (1988) ได้คำนวณค่าของ Volume flux (Q) ที่ผ่านลำต้น จากความเร็วของพัลส์ความร้อน (V) ที่เกิดจากการใช้เทคนิคพัลส์ความร้อน หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบกันระหว่างอัตราการไหลของน้ำภายในลำต้น apple และ kiwifruit

vines กับค่าทางทฤษฎีที่คำนวณได้จากห้องทดลอง พบว่าในต้น apple ค่าที่วัดได้จากวิธีพัลส์ความร้อนให้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากห้องทดลอง ส่วนต้น kiwifruit vines นั้น ค่าที่วัดได้ให้ค่าของ Volume flux (Q) น้อยกว่าค่าที่คำนวณได้จากห้องทดลองถึง 1.6 เท่า เหตุผลที่เป็นเช่นนี้ เพราะ ภายในเนื้อไม้ของลำต้น kiwifruit vines มีปริมาณของช่องว่างอากาศแทรกอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เนื้อไม้ของต้น kiwifruit vines จริงๆแล้วไม่ได้เป็นเนื้อไม้เดียวกันหมด (Homogenous) ซึ่งไม่เป็นตามค่าทางทฤษฎีที่สมมติให้เนื้อไม้ที่ใช้ในการคำนวณ Volume flux (Q) มีความเป็นเนื้อเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ จึงส่งผลให้ค่าที่วัดได้กับค่าที่คำนวณจากห้องทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมาก และอีกเหตุผลหนึ่ง คือ เกิดจากบาดแผลของเนื้อไม้ที่เกิดจากการใช้ดอกสว่านที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เกินไป ในการเจาะเนื้อไม้เพื่อติดตั้งชุดของหัววัด

## 2.1 กายวิภาค สรีรวิทยาของไม้ยืนต้น



รูปที่ 2.1 แสดงกายวิภาคของไม้

ไซเล็ม (Xylem) หรือท่อลำเลียงน้ำ เป็นเนื้อเยื่อถาวรเชิงซ้อน ที่พบมากในเนื้อไม้ส่วนกระพี้ ทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุที่รากดูดขึ้นมาจากดินส่งไปยังลำต้นและใบ เพื่อสังเคราะห์แสง ไซเล็มที่เกิดระยะแรกเรียกว่า primary Xylem กำเนิดมาจาก procambium Xylem เมื่อเกิดการเจริญขึ้นที่สอง เกิดมาจาก vascular cambium เรียกว่า secondary Xylem สำหรับเนื้อเยื่อพวก fiber และ parenchyma บางตัวที่ลำเลียงน้ำออกทางด้านข้างซึ่งเซลล์จะเรียงตัวออกมาในแนวรัศมี เรียกว่า ray parenchyma หรือ Xylem ray

ในพืชใบเลี้ยงคู่ เมื่อมีอายุมากขึ้นจะเกิดการเจริญเติบโตขึ้นสอง vascular cambium ที่อยู่ระหว่าง primary Xylem เกิดการแบ่งตัวเข้าด้านในให้ secondary Xylem จำนวนมากและดันกลุ่มของ primary Xylem เข้าไปในส่วนลำต้น secondary Xylem ที่เกิดขึ้นเรียกว่า เนื้อไม้ ถ้าในปีหนึ่งมีปริมาณน้ำไม่เท่ากัน เช่น ถ้าปีไหนฝนตกชุก มีปริมาณน้ำลำเลียงมาก เซลล์จะมีขนาดใหญ่ ผนังบาง ไม่ค่อยแข็งแรงและเนื้อไม้จะมีสีจาง แต่ถ้าปีไหนแห้งแล้ง มีปริมาณน้ำลำเลียงน้อย เซลล์จะมีขนาดเล็ก ผนังหนาและเนื้อไม้จะมีสีเข้ม ซึ่ง

ลักษณะที่แสดงออกมาเรียกว่า วงปี โดยที่วงปีแต่ละวงจะมี ความหนาของวงที่ไม่เท่ากัน สำหรับเนื้อไม้ที่อยู่ตรงกลางมีสีเข้มเรียกว่า แก่นไม้ (Heartwood) เป็นเนื้อไม้ที่เกิดขึ้นมานาน เลิกลำเลียงน้ำและแร่ธาตุแล้วและเป็นเซลล์ที่ไม่มีชีวิต ส่วนเนื้อไม้ที่อยู่รอบนอกมีสีจาง เป็นเนื้อไม้ที่เกิดขึ้นมาใหม่ ยังทำหน้าที่ลำเลียงน้ำและแร่ธาตุอยู่จะเรียกเนื้อไม้ส่วนนี้ว่า กระพี้ (Sapwood)

เปลือกไม้ (Bark) คือ ส่วนที่อยู่ถัดจาก vascular cambium ออกไปข้างนอก ในลำต้นที่มีอายุน้อยเปลือกไม้ประกอบด้วย เอพิเดอร์มิส (Epidermis) คอร์เทกซ์ (Cortex) และโฟลเอ็ม (Phloem) ส่วนลำต้นที่มีอายุมากเอพิเดอร์มิสหลุดสลายไปเหลือแต่เนื้อเยื่อคอร์ก (cork) และคอร์กแคมเบียม (cork cambium) และอาจมีเนื้อเยื่อที่ parenchyma เกิดจากการแบ่งตัวของคอร์กแคมเบียม รวมทั้งโฟลเอ็มครั้งที่สองที่สร้างขึ้นใหม่ ซึ่งทำหน้าที่ลำเลียงอาหารแทนโฟลเอ็มชั้นแรกที่ถูกเบียดสลายไป Epidermis ส่วนใหญ่จะพบเพียง 1 ชั้น มีสารพวกคิวทิน หรือ wax เคลือบอยู่ด้านนอก เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำออกจากเนื้อเยื่อพืช Cortex ส่วนใหญ่เป็นเซลล์ parenchyma ภายในอาจมี chloroplast เซลล์เรียงตัวค่อนข้างหลวม เห็นช่องว่างระหว่างเซลล์

## 2.2 การลำเลียงน้ำของพืช

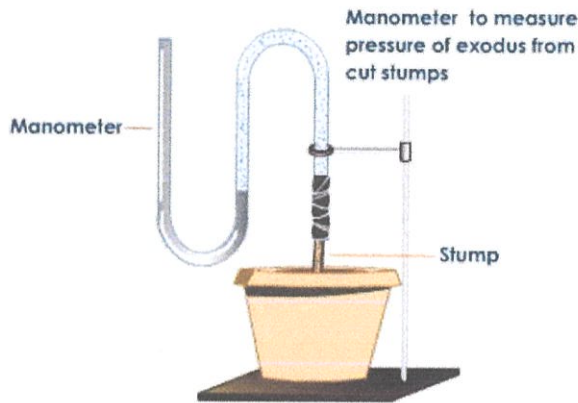
ความสำคัญของน้ำต่อพืช

1. น้ำเป็นส่วนประกอบที่สำคัญภายในเซลล์พืช ใบพืชล้มลุกจะมีน้ำเป็นส่วนประกอบอยู่มากกว่าพืชยืนต้น คือมีถึงร้อยละ 80-90 ของน้ำหนักสด ส่วนพืชยืนต้นมีประมาณร้อยละ 30-50 นอกจากนี้ยังมีปริมาณน้ำในพืชยังขึ้นอยู่กับชนิดของพืช อายุชนิดของเนื้อเยื่อและอวัยวะของพืชด้วย เนื้อเยื่อที่อ่อนจะมีน้ำมากกว่าเนื้อเยื่อที่แก่ เป็นต้น
2. น้ำช่วยให้เซลล์พืชเต่ง ทำให้เซลล์มีรูปร่างคงตัว เมื่อพืชขาดน้ำทำให้เหี่ยวเฉา น้ำในพืชยังช่วยให้เกิดการเปิดปิดของปากใบและการเคลื่อนไหวของพืชด้วย
3. น้ำเป็นตัวทำละลาย เช่น ละลายแร่ธาตุต่างๆ ทำให้การลำเลียงแร่ธาตุของพืช ละลายสารอาหาร เช่น กลูโคส ซูโครส ทำให้เกิดการลำเลียงสารอาหารในพืช
4. น้ำเป็นตัวร่วมในปฏิกิริยาเคมีในเซลล์ ซึ่งมีความสำคัญในกระบวนการเมตาบอลิซึม เช่น การย่อยแป้งเป็นน้ำตาล การสังเคราะห์ด้วยแสง ซึ่งต้องใช้น้ำเป็นวัตถุดิบร่วมกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์
5. น้ำทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิของเซลล์ และลำต้นพืช พืชโดยทั่วไปอยู่กลางแจ้งตลอดเวลา ดังนั้นจึงได้รับความร้อนจากแสงอาทิตย์เป็นจำนวนมาก การคายน้ำของพืชช่วยในการระบายความร้อนให้พืช เนื่องจากน้ำมีความร้อนจำเพาะสูง การระเหยของน้ำออกจากพืชต้องมีการเปลี่ยนสถานะจากน้ำในรูปของเหลวให้เป็นไอซึ่งต้องใช้ปริมาณความร้อนถึง 540 แคลอรีต่อกรัม จึงทำให้อุณหภูมิภายในต้นพืชไม่เปลี่ยนแปลงมากนักไม่ว่าอุณหภูมิภายนอกจะร้อนหรือเย็น



## 2.1 แรงดันราก(Root pressure)

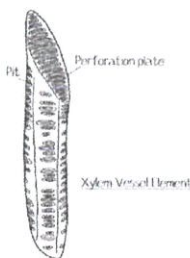
การหาค่าแรงดันรากสามารถทำได้โดยตัดต้นไม้ให้เหลือแต่ตอ ใช้พวกไม้เนื้ออ่อนที่ปลูกในกระถางที่ได้รับการรดน้ำอย่างดี ถ้ามีแรงดันรากเกิดขึ้น จะพบว่ามิของเหลวพุ่งขึ้นจากตอต่อเนื่องกัน ซึ่งเมื่อต่อสายยางและต่อไปหลอดแก้วภายในบรรจุปรอท(manometer tube) แรงดันที่เกิดขึ้นจะดันให้น้ำเคลื่อนขึ้นไปดันปรอทซึ่งเดิมสูงระดับเดียวกันให้เคลื่อนสูงขึ้นจนต่างระดับกัน และสูงขึ้นอย่างช้าๆ ในเวลา 2-3 ชั่วโมง ค่าแรงดันรากคำนวณได้จากความแตกต่างของระดับความสูงปรอท 2 ระดับในมาโนมิเตอร์



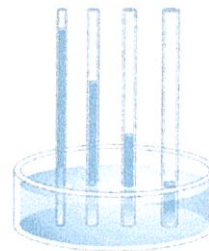
รูปที่ 2.3 การวัดอัตราการไหลของน้ำโดยใช้มาโนมิเตอร์

## 2.2 การซึมตามรูเล็ก(Capillarity)

เมื่อจุ่มหลอดแก้วเล็กๆ ลงไปในน้ำ น้ำจะเคลื่อนที่เข้าไปในหลอดแก้วได้เอง ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า การซึมตามรูเล็ก(capillarity) ยิ่งหลอดมีขนาดรูเล็กน้ำจะยิ่งขึ้นได้สูง เพราะแรงที่ดึงน้ำขึ้นไปในหลอดเกิดจากน้ำมีแรงตึงผิว(surface tension) สูงมาก และจากคุณสมบัติของน้ำที่สามารถยึดเหนี่ยวกับพื้นผิวใดๆ ที่เปียกน้ำได้(adhesion)และการยึดเหนี่ยวโมเลกุลของน้ำด้วยกัน(cohesion) เมื่อรวมกันมีค่ามากกว่าแรงโน้มถ่วงของโลก น้ำจะเคลื่อนขึ้นไปจนกระทั่งน้ำหนักของน้ำในหลอดสมดุลกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างน้ำและผนังหลอด เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางเวสเซล(vessel) มีขนาดเล็กมาก น้ำจึงถูกดูดขึ้นไปตามท่อไซเล็ม



รูปที่ 2.4 ไซเล็ม

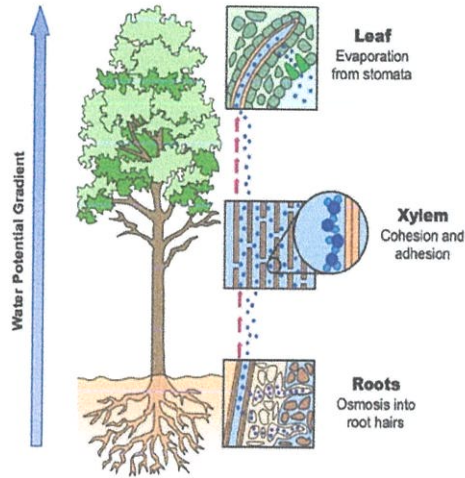


รูปที่ 2.5 การไหลของน้ำในหลอดคาปิลารี

## 2.3 ทรานสปิเรชันพูล (Transpiration pull)

ทรานสปิเรชันพูล (transpiration pull) เป็นแรงดึงที่เกิดจากการคายน้ำออกจากปากใบของพืช เนื่องจาก โมเลกุลของน้ำในเซลล์ใบ ได้รับความร้อนจากแสงแดด จึงระเหยออกไปทางปากใบ แต่เนื่องจาก โมเลกุลน้ำมีแรงยึดเหนี่ยวซึ่งกันและกัน คือแรง cohesive force และมีแรงยึดแน่นกับผนังเซลล์ของเวสเซล

(adhesive force) จึงทำให้เกิดแรงดึงอย่างแรง (tension) ดึงโมเลกุลของน้ำจากส่วนที่อยู่ต่ำลงไปให้ขึ้นแทน ประกอบกับเมื่อเซลล์มีไซโทพลาซึมในใบเสียน้ำไป ก็จะทำให้ความเข้มข้นภายในเซลล์เข้มข้นขึ้น จึงมีการออสโมซิส เกิดขึ้นอีกด้วย แรงต่างๆ ที่ประกอบกันนี้ ทำให้เกิดเป็นแรงมหาศาลที่จะดึงน้ำจำนวนมากให้ลำเลียงขึ้นสู่ยอด ต้นไม้ และแรงดึงนี้ก็ยังดึงไปถึงโมเลกุลน้ำที่อยู่นอกกรากให้เคลื่อนที่เข้าสู่รากอีกด้วย



รูปที่ 2.6 น้ำที่เคลื่อนที่ผ่านช่องว่างในดินเพราะความต่างศักย์ของน้ำ

### 2.3 วิธีการสำหรับวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช (Method for measuring sap flow)

ทุกวิธีการจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการพาความร้อนของน้ำว่ามีความสามารถมากขนาดไหน และจริงๆ แล้วขณะที่น้ำเคลื่อนที่ไปก็จะพาเอาความร้อนที่ได้รับเข้ามาเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน

#### 1 วิธีสมดุลความร้อนในต้น (Stem heat balance method)

เป็นวิธีที่ใช้วัดปริมาณของพลังงานความร้อนที่ถูกทำให้เคลื่อนที่ไปโดยน้ำ ในขบวนการคายน้ำของพืช ซึ่งปริมาณพลังงานความร้อนที่เคลื่อนที่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการไหลของน้ำหลังจากที่ได้มีการปรับค่าให้ถูกต้อง สำหรับการสูญเสียความร้อนเนื่องจากธรรมชาติแล้ว ซึ่งโดยทั่วไปการสูญเสียความร้อนเนื่องจากธรรมชาติจะเกิดขึ้นในเวลาากลางคืน หรือในกลางวันที่มีฝนตกในช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

#### 2 วิธีสมดุลความร้อนในส่วนของลำต้น (Trunk sector heat balance method)

วิธีการนี้จะเหมือนกับวิธีสมดุลความร้อนในต้น ยกเว้น ปริมาณความร้อนที่ได้รับเข้ามาเป็นความร้อนที่เกิดจากการแผ่ไฟฟ้าสลับ (AC) ที่จ่ายให้กับแผ่นความร้อนที่ปักเข้าไปในเนื้อไม้ส่วนที่เป็นกระพี้ (sapwood)

#### 3 วิธีพัลส์ความร้อน (Heat pulse method)

เป็นวิธีการวัดความเร็วในการไหลของน้ำในขบวนการคายน้ำของพืช โดยทำการจับเวลาการกระจายของความร้อนที่เคลื่อนที่จากหัวให้ความร้อนถึงหัววัดอุณหภูมิที่เป็นเทอร์มิสเตอร์ (thermistors) หรือเทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) ที่อยู่ด้านล่าง (upstream) และด้านบน (downstream) ของหัวให้ความร้อน

โดยจะมีการป้อนกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน ที่อยู่ภายในหัวให้ความร้อนเป็นเวลาสั้นๆเพื่อให้เกิดพัลส์ความร้อนขึ้น

4 วิธีการกระจายความร้อนหรือวิธีการกราเนียร์ (Thermal dissipation method or Granier method)

หลักการของวิธีนี้จะคล้ายกับ การวัดอัตราการไหลเชิงมวล โดยประมาณว่าอัตราการไหลวัดได้จากการวัดอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกัน ระหว่างหัวให้ความร้อนที่ติดตั้งหัววัดอุณหภูมิที่เป็นเทอร์โมคัปเปิล (downstream) กับหัววัดอุณหภูมิธรรมดาที่เป็นเทอร์โมคัปเปิล (upstream) ที่ไม่มีการติดตั้งหัวให้ความร้อน

ตารางที่ 2.1 สมมติฐาน ข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบ ของวิธีการวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช

วิธีการวัด	สมมติฐาน	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
วิธีสมดุลความร้อนในต้น (Stem heat balance method)	<p>1) การสูญเสียความร้อนในแนวรัศมีของต้น มีค่าเท่ากันตลอดทั้งวัน ในวันที่มีแสงแดดการสูญเสียนี้ก็ให้ประมาณค่าใกล้เคียงกับค่าการสูญเสียที่เป็นมาตรฐาน</p> <p>2) ปริมาณความร้อนที่ได้รับเข้ามาไม่มี การเปลี่ยนแปลง</p> <p>3) อุณหภูมิของความร้อนที่ให้กับเนื้อไม้ส่วนกระพี้มีค่าเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ</p>	<p>1) ทางทฤษฎี ไม่มีความจำเป็นที่ต้องปรับเทียบค่า</p> <p>2) ทำงานได้ดีกับต้นไม้ที่มีขนาดเล็ก</p> <p>3) สามารถแยกชุดของหัววัด (sensor) ออกจากชุดของ data logger ได้</p>	<p>1) ใช้พลังงานสูง 1-1.5 W/sensor</p> <p>2) ยากต่อการติดตั้งชุดของหัววัดที่เป็นเทอร์โมคัปเปิลเข้ากับต้นไม้ซึ่งต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง</p> <p>3) ไม่สามารถใช้งานได้กับต้นไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง &gt; 3-5 cm</p> <p>4) การติดตั้งเพื่อทำการวัดสามารถทำความเสียหายกับต้นไม้ได้ ถ้าทำการติดตั้งเป็นช่วงเวลานาน</p> <p>5) ใช้เวลาในการติดตั้งประมาณ 2 hr./gage</p> <p>6) ต้องมีแผ่นฉนวนป้องกันความร้อนจากภายนอก (เช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์) ให้กับจุดที่จะทำการวัด</p> <p>7) ค่าใช้จ่ายของระบบค่อนข้างสูง ประมาณการได้ยาก</p>

วิธีการวัด	สมมติฐาน	ข้อได้เปรียบ	ข้อเสียเปรียบ
วิธีพัลส์ความร้อน (Heat pulse method)	1) ผลกระทบจากจำนวนของบาดแผลบนผิวหรือเปลือกของต้นไม้ไม่ทำให้เวลาที่ได้จากการวัดเปลี่ยนไป 2) Profile ของความเร็วที่ความลึกต่างๆของเนื้อไม้ส่วนที่เป็นกระพี้ไม่ได้เปลี่ยนค่าไปตามความกลมของต้นไม้	1) ติดตั้งกับไม้ยืนต้นที่มีผิวขรุขระได้ โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เหมาะสมต้องมากกว่า 30 มิลลิเมตรขึ้นไป 2) ใช้พลังงานต่ำ 0.1 W/sensor 3) สามารถใช้หาค่า Profile ความเร็วในแนวรัศมี ได้ดีเยี่ยม 4) ไม่จำเป็นต้องมีแผ่นฉนวนป้องกันความร้อนจากภายนอกให้กับจุดที่จะทำการวัด 5) ทำการติดตั้งได้ง่าย ใช้เวลาน้อยกว่า 1 hr/gage	1) ต้องการชุดหัววัดหลายชุด สำหรับวิธีการที่จะวัดต้นไม้ต้นอื่นด้วย เพราะว่ามีบริเวณตัวอย่างที่จะทำการวัดมีพื้นที่น้อย 2) ผลจากบาดแผลบนผิวของต้นไม้ ยากที่จะรู้ว่ามีจำนวนมากน้อยแค่ไหน จึงจำเป็นต้องทำการเปรียบเทียบค่า 3) มีราคาแพงมาก โดยเฉพาะชุดของหัววัด รวมถึงตัว data logger
วิธีการกระจายความร้อนหรือวิธีการกราเนียร์ (Thermal dissipation method or Granier method)	1) ใช้การเปรียบเทียบตามมาตรฐาน 2) Gradient ของอุณหภูมิจากธรรมชาติมีค่าน้อยมาก และสามารถชดเชยอุณหภูมิได้ หากว่า gradient ของอุณหภูมินี้เกิดขึ้น	1) ติดตั้งได้ง่ายใช้เวลาประมาณ 2 hr./gage ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งถูก 2) สามารถติดตั้งได้กับต้นไม้ในสภาพทั่วไป 3) สามารถใช้ชุดของหัววัดกับ data logger ที่เป็นมาตรฐานทั่วไป	1) ใช้พลังงานสูง 1-1.5 W/sensor 2) ชุดของหัววัดมีราคาแพง 3) ต้องมีแผ่นฉนวนป้องกันความร้อนจากภายนอกให้กับจุดที่จะทำการวัด

## 2.4 วิธีการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง

การคำนวณหาปริมาตรการใช้น้ำของพืชอ้างอิง โดยอาศัยข้อมูลภูมิอากาศนั้นทำได้หลายวิธี สำหรับการเลือกใช้วิธีใดนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะงาน ความละเอียดของงานที่ต้องการ ส่วนวิธีการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชที่จะกล่าวถึงมีดังนี้

### 2.4.1 วิธีของ Thornthwaite

เป็นวิธีการหาปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิเฉลี่ยประจำเดือนกับการใช้น้ำของพืชเมื่อดินมีความชื้นสูงพอกับความต้องการของพืชอยู่ตลอดเวลา และพื้นที่เพาะปลูกนั้นกว้างใหญ่

พอกที่จะไม่ทำให้การระเหยและการคายน้ำนั้นมีผลกระทบจากแรงภายนอก เช่น การพัดผ่านของลมที่แห้งและร้อน หรือสาเหตุอื่นๆ

#### 2.4.2 วิธีของ Blaney – Criddle

วิธีนี้ใช้การคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืช โดยใช้อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ และความยาวของชั่วโมงกลางวันเป็นข้อมูลที่ต้องการ

#### 2.4.3 วิธีของ Makkink

วิธีของ Makkink นั้นจะต่างกับวิธีอื่น คือ ได้นำเอารังสีของดวงอาทิตย์เข้ามาใช้ในการคำนวณ

#### 2.4.4 วิธีของ Jensen – Haise

วิธีนี้ใช้ในความสัมพันธ์ระหว่างการใช้น้ำของพืชกับรังสีอาทิตย์ โดยใช้ข้อมูลที่ได้จากการวัด

#### 2.4.5 วิธีของ Penman

สำหรับวิธีการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงของ Penman นั้นได้รวมเอาพลังงานที่ก่อให้เกิดการระเหยของน้ำทุกอย่างไว้ด้วยกัน พลังงานดังกล่าวนี้ ได้แก่ พลังงานที่ได้รับจากรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ พลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของลมและความชื้นของอากาศ

ดังนั้นปริมาณการใช้น้ำของพืชจึงขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ 4 อย่าง คือ สภาพภูมิอากาศรอบๆ ต้นพืช ชนิดและอายุของพืชเอง จำนวนความชื้นและคุณสมบัติของดิน และองค์ประกอบอื่นๆ สำหรับการวัดการใช้น้ำของพืชแต่ละชนิดในทุกสภาพภูมิอากาศ ดิน ฯลฯ เป็นสิ่งที่ทำได้ยาก จึงได้เลือกวิธีที่ง่ายกว่าการวัดโดยตรง โดยเลือกเอาวิธีการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงของ Penman เนื่องจากว่าได้รวมเอาพลังงานที่ก่อให้เกิดการระเหยทุกอย่างไว้ด้วยกัน คือ พลังงานความร้อนที่ได้รับจากดวงอาทิตย์ พลังงานที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของลมและความชื้นของอากาศ

ซึ่งมีสูตรดังนี้

$$ET_p = \frac{\Delta Q_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

$ET_p$  = การใช้น้ำของพืชอ้างอิง มีหน่วยเป็น มม./วัน

$\Delta$  = ความลาดเทของกราฟความดันไอน้ำอิ่มตัวกับอุณหภูมิที่จุดซึ่งมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ย

= Psychrometric constant

$Q_n$  = รังสีสุทธิจากดวงอาทิตย์ เทียบให้เป็นอัตราการระเหยของน้ำเป็น มม./วัน ในกรณีที่ไม่มี การวัดรังสีสุทธิจากดวงอาทิตย์ไว้ ค่าอาจจะหาได้จากสูตร

$$Q_n = Q_A(1-r)(0.26+0.5n/N)-T^4(0.56-0.0797\sqrt{e_d})(0.10+0.90n/N)$$

$Q_A$  = รังสีจากดวงอาทิตย์ที่จะได้รับบนโลกเมื่อไม่มีบรรยากาศปกคลุมเทียบเป็นการระเหยเป็น มม./วัน

$r$  = สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน มีค่าเท่ากับ 2 สำหรับพืชที่เขียวและสด

$n$  = ระยะเวลาที่ได้รับแสงแดด

$N$  = ระยะเวลาที่มีแสงแดดนานที่สุดที่เกิดในช่วงเวลานั้น

อัตราส่วน  $n/N$  คำนวณได้โดยใช้ค่าขีดความครึ้มของเมฆจากหนังสือสถิติภูมิอากาศของประเทศไทย

$T^4$  = รังสีสะท้อนจากวัตถุผิวดำเทียบเป็นอัตราการระเหยของน้ำ มม./วัน

$e_a$  = ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ยของบรรยากาศ เป็น มิลลิบาร์

$e_d$  = ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ยของจุดน้ำค้าง เป็น มิลลิบาร์ ถ้าไม่มีการวัดอุณหภูมิ คำนวณจากสูตรได้

$$e_d = (\text{ความชื้นสัมพัทธ์}) * e_a$$

$E_a$  = ปริมาณการระเหยของน้ำเนื่องจากการเคลื่อนไหวของลม และความชื้นของอากาศ

$U_2$  = ความเร็วเฉลี่ยของลม เป็น กิโลเมตร/วัน

$$E_a = 0.262(e_a - e_d)(1+0.0062U_2)$$

ดังนั้นจึงสามารถหาปริมาณการใช้น้ำของพืช (ET) ได้ โดยการคูณสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชที่ปลูก ( $K_c$ ) กับการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_p$ ) ของพืชที่เพาะปลูกในช่วงนั้นๆ ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$ET = K_c \times ET_p \quad (2)$$

และข้อมูลข้างล่างดังที่ได้แสดงในตารางนี้ ได้ทำการวิเคราะห์หาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ( $ET_p$ ) จากการคำนวณโดยวิธีของ Penman โดยใช้ข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาในคาบ 25 ปี รวม 49 แห่ง และรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืช ( $K_c$ ) เพื่อให้สามารถใช้ประโยชน์ได้กว้างขวางทั่วประเทศ ดังนั้นเพื่อจะทำการหาค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชก็จะใช้ค่า ( $ET_p$ ) และค่า ( $K_c$ ) จากตารางข้างล่างนี้ เมื่อได้ค่าปริมาณการ

ใช้น้ำของพืชแล้ว นำค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชมาคูณกับขนาดพื้นที่ (A) ของท่อลำเลียงน้ำ (Sap wood) ซึ่งได้จากการตัดกิ่งไม้มาทดสอบ

ดังนั้นจึงได้สมการสำหรับอัตราการใช้น้ำ (Q) ในหน่วยของ (มม.<sup>3</sup>/วัน) คือ

$$Q = ET \times A \quad (3)$$

## ตารางที่ 2.2 ค่าสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของมะม่วง ( $K_c$ )

เดือน	ค่าสัมประสิทธิ์พืช(Crop Coefficient ; $K_c$ )						
	Modified Penman	Blaney-Cridle	Pan Method	Thornthwaite	Hargreaves	Radiation	Penman-Monteith
มิ.ย.	1.84	2.35	2.21	1.63	1.51	2.35	2.10
ก.ค.	2.06	2.62	2.28	1.76	1.70	2.62	2.46
ส.ค.	2.33	3.13	3.10	2.28	2.00	2.95	2.53
ก.ย.	2.07	2.78	2.64	2.35	2.07	2.46	2.28
ต.ค.	2.12	2.75	2.85	2.48	2.21	2.42	2.29
พ.ย.	2.29	2.54	2.63	2.68	2.13	2.35	2.50
ธ.ค.	1.54	1.63	1.76	1.79	1.32	1.58	1.90
ม.ค.	1.44	1.60	1.89	1.65	1.37	1.48	1.69
ก.พ.	1.29	1.52	1.55	1.52	1.37	1.34	1.61
มี.ค.	1.04	1.32	1.44	1.20	1.23	1.14	1.27
เม.ย.	1.06	1.35	1.36	1.23	1.25	1.23	1.24
พ.ค.	1.04	1.34	1.27	1.22	1.24	1.24	1.19
เฉลี่ย	1.60	1.98	1.99	1.74	1.59	1.82	1.92

ที่มา: <http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/CWRdata/Kc/>

ตารางที่ 2.3 ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธี Penman-Monteith ( $ET_p$ ) รายเดือนของ กรุงเทพมหานครและสมุทรปราการ

(หน่วย : มม./วัน)

จังหวัด	เดือน											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
กรุงเทพฯ	3.52	4.17	4.78	4.69	4.10	4.07	3.98	3.46	3.07	3.23	3.62	3.49
-ท่าเรือ คลองเตย	4.51	4.57	5.18	5.04	4.56	4.61	4.47	4.46	4.27	3.97	4.96	4.77
-ท่าอากาศยาน ดอนเมือง	4.14	4.80	5.37	5.54	4.94	4.63	4.60	4.43	3.95	3.87	4.11	4.04
สมุทรปราการ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-สถานีเกษตร บางนา	1.14	2.03	3.25	3.75	3.74	3.96	3.74	3.36	2.60	1.79	1.46	0.99

ที่มา: <http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/CWRdata/Kc/>

ตารางที่ 2.4 ค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธี Modified Penman ( $ET_p$ ) รายเดือนของภาค กลางและตะวันตก

(หน่วย : มม./วัน)

จังหวัด	เดือน											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
นครสวรรค์	3.89	4.65	5.21	5.69	5.13	4.48	4.26	4.07	3.94	4.06	3.86	3.61
สุพรรณบุรี	4.67	5.38	6.35	6.75	5.91	5.51	5.22	4.94	4.56	4.65	4.74	4.58
ลพบุรี	5.02	5.66	6.50	6.64	5.61	5.07	4.77	4.51	4.35	4.68	4.95	5.01
-บัวชุม	4.53	5.23	6.05	6.30	5.26	4.57	4.42	4.05	3.97	4.39	4.46	4.26
กาญจนบุรี	4.48	5.35	6.24	6.56	5.62	4.94	4.84	4.68	4.45	4.30	4.37	4.30
ทองผาภูมิ	3.66	4.25	5.18	5.63	4.92	3.68	3.56	3.23	3.57	3.88	3.76	3.32

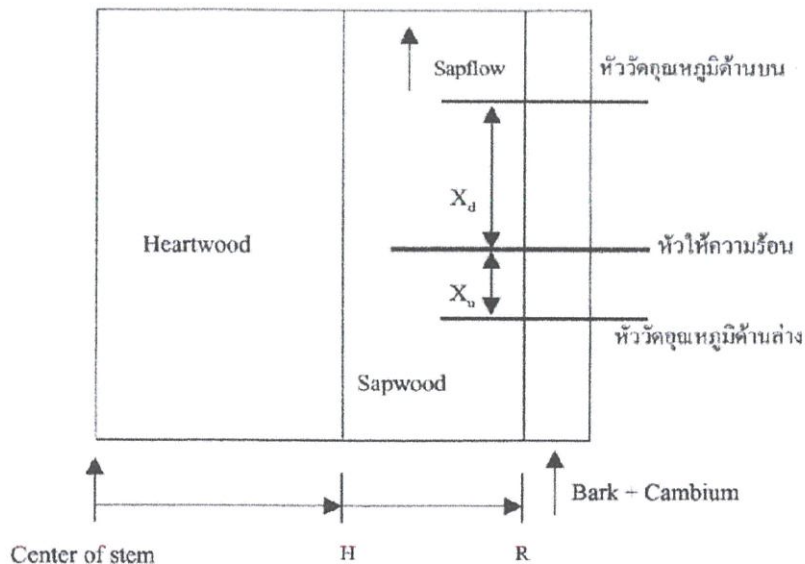
ที่มา: <http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/CWRdata/Kc/>

## 2.5 หลักการของวิธีพัลส์ความร้อน

หลักการของวิธีพัลส์ความร้อน คือ การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนที่อยู่ภายในหัวให้ความร้อนเป็นเวลาสั้นๆ หลักการวัดทำได้โดยการติดตั้งชุดของหัววัดเข้ากับต้นไม้ ซึ่งประกอบด้วยหัววัดอุณหภูมิ 2 อัน อยู่ด้านบนและด้านล่างของหัวให้ความร้อนเป็นระยะ 10 มิลลิเมตร และ 5 มิลลิเมตร ตามลำดับ เมื่อป้อนข้อมูลเกี่ยวกับพีชให้กับคอมพิวเตอร์ ซึ่งทำงานตามโปรแกรมที่เขียนขึ้นด้วย Microcontroller ทำการสั่งให้วงจรกำเนิดความร้อนจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวให้ความร้อนเป็นเวลาสั้นๆ เพื่อให้เกิดพัลส์ความร้อน พร้อมทั้งเริ่มจับเวลาจนกระทั่งสัญญาณที่ได้รับจากหัววัดอุณหภูมิถูกส่งค่ามาให้กับคอมพิวเตอร์มีอุณหภูมิเท่ากัน ช่วงเวลานี้เรียกว่า เวลาหน่วง ( $t_0$ ) ซึ่งจะถูกนำไปคำนวณเพื่อหาอัตราการไหลของน้ำในต้นพีช โดยใช้สูตรตามวิธีของ Green และ Clothier (1998) เพื่อหาค่าต่างๆ คือ ค่าความเร็วของพัลส์ความร้อน (heat pulse velocity,  $V$ ) โดยใช้สูตร

$$V = \frac{(X_u + X_d)}{2 t_0} \quad (4)$$

- เมื่อ  $V$  = อัตราการเคลื่อนที่ของน้ำต่อหนึ่งหน่วยเวลา(มิลลิเมตร/วินาที)
- $X_u$  = ระยะระหว่างหัวให้ความร้อนกับหัววัดอุณหภูมิด้านล่าง(มิลลิเมตร)
- $X_d$  = ระยะระหว่างหัวให้ความร้อนกับหัววัดอุณหภูมิด้านบน(มิลลิเมตร)
- $t_0$  = ระยะเวลาที่อุปกรณ์วัดอุณหภูมิด้านล่างสามารถวัดอุณหภูมิได้ถึงเวลาที่อุณหภูมิของอุปกรณ์วัดอุณหภูมิทั้งสองมีค่าเท่ากัน (วินาที)



รูปที่ 2.7 การติดตั้งหัวให้ความร้อน และหัววัดอุณหภูมิ

จากนั้นคำนวณค่า sap flux density ( $J$ ) โดยใช้สูตร

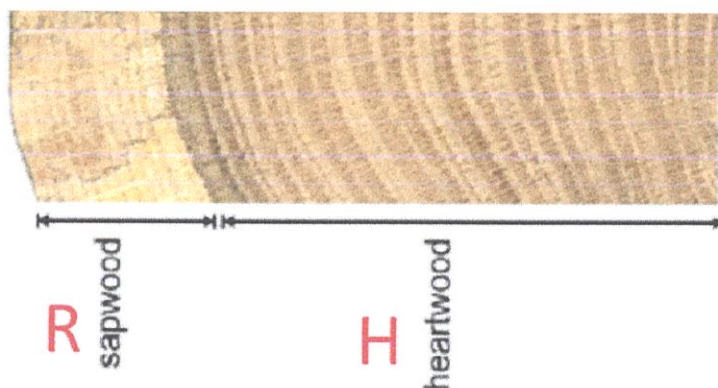
$$J = P(0.33 + M) V \quad (5)$$

- เมื่อ  $J$  = ปริมาณความหนาแน่นของน้ำในท่อน้ำ  
(กิโลกรัม/ตารางเมตร/ชั่วโมง)
- $P$  = ความหนาแน่นเนื้อไม้ส่วนกระพี้ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)
- $M$  = ความชื้นของเนื้อไม้สดส่วนกระพี้ (มาตรฐานแห้ง)

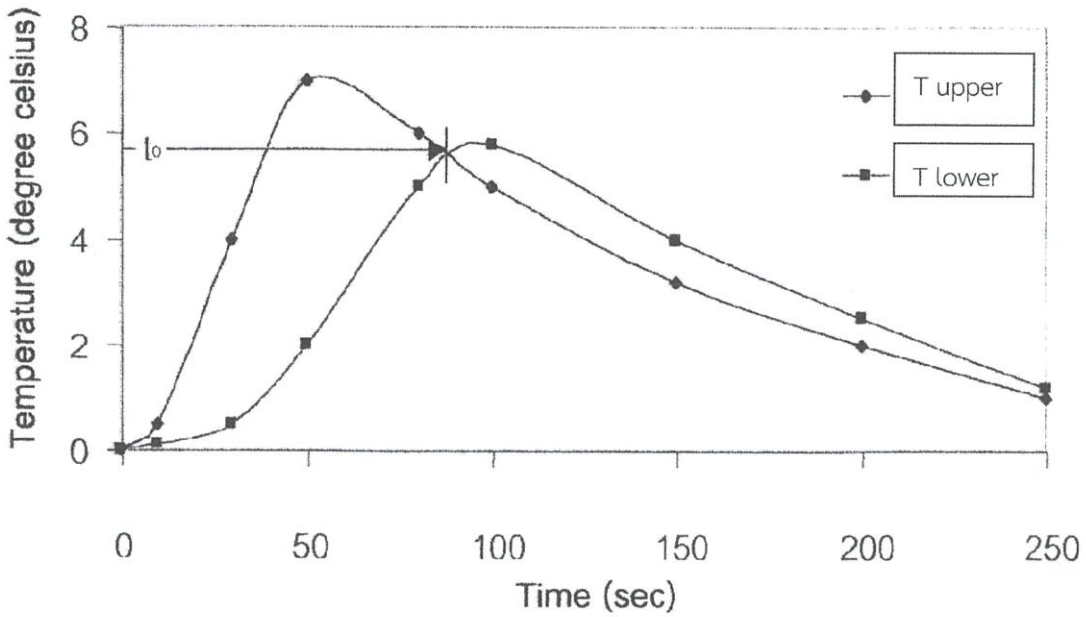
ขั้นตอนสุดท้ายทำการคำนวณค่า Volume flux ( $Q$ ) เพื่อหาอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยใช้สูตร

$$Q = \int_H^R 2\pi r J(r) dr \quad (6)$$

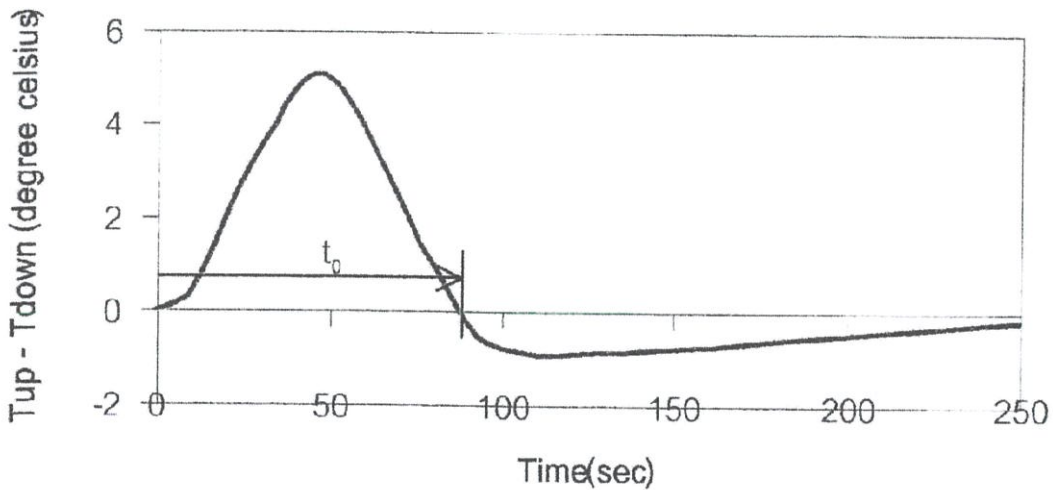
- เมื่อ  $Q$  = อัตราการใช้น้ำของพืช (ลิตร/ชั่วโมง)
- $r$  = รัศมีรัศมีส่วนกระพี้ หรือส่วนเนื้อไม้ระหว่างแก่นไม้ และเปลือก (เมตร)
- $J(r)$  = ปริมาณน้ำที่ระดับความลึกของรัศมีลำต้นเท่ากับ  $r$  (ลิตร/ตารางเมตร/ชั่วโมง)
- $H$  = รัศมีของแก่นไม้ (heartwood radius) (มิลลิเมตร)
- $R$  = ระยะจากจุดศูนย์กลางลำต้นถึงชั้นนอกสุดของกระพี้ (มิลลิเมตร)



รูปที่ 2.8 รัศมีแก่นไม้และเปลือกไม้ด้านใน



รูปที่ 2.9 อุณหภูมิของหัววัดด้านบนและด้านล่าง



รูปที่ 2.10 กราฟแสดงความแตกต่างของอุณหภูมิ และการหา  $t_0$

## 2.6 การหาความชื้นของเนื้อไม้สดและความหนาแน่นของเนื้อไม้ส่วนกระพี้

ความชื้นของเนื้อไม้สด (Moisture Content of the Sapwood),  $M$  คือ อัตราส่วนน้ำหนักของน้ำในเนื้อไม้สด ต่อน้ำหนักของเนื้อไม้  $\times 100\%$

การหาค่าความชื้น,  $M$  ทดสอบได้โดยนำตัวอย่างเนื้อไม้ปริมาณพอเหมาะตามขนาดเนื้อไม้ที่ทดสอบใส่ภาชนะเข้าอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง ซึ่งเนื้อไม้จะแห้ง

ผลต่างของน้ำหนักเนื้อไม้ก่อนและหลังอบ คือ น้ำหนักของน้ำที่ระเหยไป ( $W_w$ ) และ น้ำหนักเนื้อไม้ที่ซังได้ ( $W_s$ )

$$M = \frac{\text{น้ำหนักเนื้อไม้ก่อนอบแห้ง}-\text{น้ำหนักเนื้อไม้ที่อบแห้งแล้ว}}{\text{น้ำหนักเนื้อไม้ที่อบแห้งแล้ว}} \times 100\% \quad (7)$$

หรือ

$$M = (W_w/W_s) \times 100\% \quad (8)$$

เมื่อ  $W_w$  = น้ำหนักของน้ำ

$W_s$  = น้ำหนักของเนื้อไม้ที่อบแห้งแล้ว

หน่วยความชื้น, M - ทำรายงานแสดงค่าเป็น %

- ในสูตรการคำนวณใช้ทศนิยม

ความหนาแน่นเนื้อไม้ (Wood density of the Sapwood), P คือ อัตราส่วนของน้ำหนักแห้งของเนื้อไม้ ( $W_s$ ) ต่อปริมาตรทั้งหมด ( $V$ )

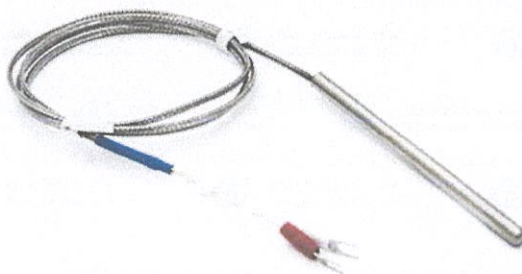
$$P = \frac{\text{น้ำหนักเนื้อไม้ที่อบแห้งแล้ว}}{\text{ปริมาตรเนื้อไม้ก่อนอบ}} = W_s / V \quad (9)$$

ปริมาตรเนื้อไม้สดก่อนอบ หรือปริมาตรทั้งหมด ( $V$ ) ของเนื้อไม้สดที่ทดสอบ สามารถหาค่าปริมาตรได้ โดยการแทนที่น้ำ และใช้วิธีการวัดโดยตรง

## 2.7 อุปกรณ์ตรวจวัดอุณหภูมิ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

อุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำกระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง โดยเรียกอุณหภูมิคงที่ที่ใช้อ้างอิงนี้ว่า Reference Junction และได้มีการกำหนด Reference Junction ให้เป็น  $0^\circ\text{C}$  คือโลหะ 2 ชนิดต่างกันที่นำมาเชื่อมต่อปลายเข้าด้วยกันที่ด้านหนึ่งซึ่งเป็นด้านที่ใช้วัดอุณหภูมิ ส่วนอีกด้านหนึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ใช้งาน เช่น เครื่องควบคุมอุณหภูมิ, เครื่องบันทึกอุณหภูมิ เป็นต้น

เทอร์โมคัปเปิล Thermocouple ถูกแบ่งออกเป็น Type ต่างๆ ตามการจับคู่ของโลหะที่แตกต่างกัน ทำให้มีคุณสมบัติในการใช้งานเทอร์โมคัปเปิลเลือกใช้ให้ถูกต้องและเหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยสิ่งที่ควรพิจารณามีหลายข้อ เช่น ค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้งาน, ราคา, ความกักร้อนของสารที่เทอร์โมคัปเปิลสัมผัส ให้เหมาะสมของงานแต่ละประเภท



รูปที่ 2.11 เทอร์โมคัปเปิล Type K ชนิดแห้ง

เทอร์โมคัปเปิล Type K ชนิดแห้งเป็นหัววัดอุณหภูมิ ที่ใช้ต่อเข้ากับเครื่องวัดควบคุมอุณหภูมิ แสดงค่าอุณหภูมิจริงที่วัดได้ แสดงผลเป็นตัวเลข

ลักษณะการใช้งาน : ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิอากาศ และของเหลวชนิดของหัววัด : Type K, J, PT100

ชนิดของปลอกป้องกัน : สแตนเลส 304, 316

อุณหภูมิการใช้งาน : -50~1000°C, PT100 Ohm 400°C, แบบออกสาย

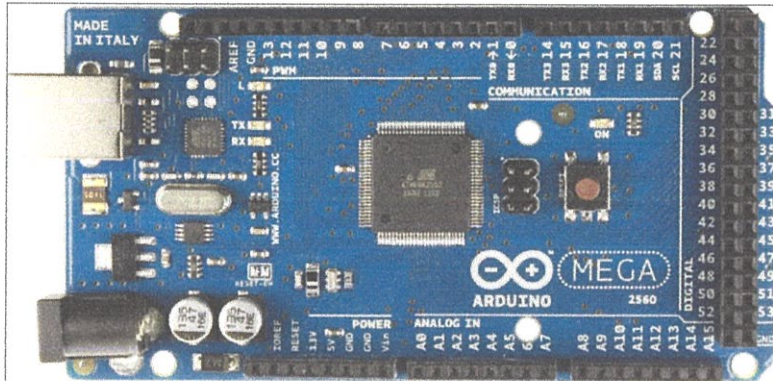
ตารางที่ 2.5 แสดงคุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐานชนิดต่างๆ

แบบ	ส่วนผสม	อ่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงดันไฟฟ้า mV.
		°C	°F	
B	พลาทินัม - 30% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
	พลาทินัม - 6% โรเดียม			0 ถึง 13.814
R	พลาทินัม - 13% โรเดียม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.26 ถึง 21.108
	พลาทินัม			
S	พลาทินัม - 10% โรเดียม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.236 ถึง 18.698
	พลาทินัม			
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-210 ถึง 760	-350 ถึง 1400	-8.096 ถึง 42.922
K	โครเมิล/อลูเมิล	-210 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 400	-450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.869
E	โครเมิล/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	-450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358
แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ				

## 2.8 อุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

Arduino Mega 2560 บอร์ดรุ่นใหญ่ในของตระกูล Arduino มีคุณสมบัติต่างๆ เพิ่มขึ้นจาก Arduino Uno R3 ใช้ชิพ ATmega2560 ที่มีหน่วยความจำแฟลช 256 KB แรม 8 KB ใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 V แรงดันของระบบอยู่ที่ 5 V มี Digital Input / Output มากถึง 54 ขา (เป็น PWM ได้ 14 ขา) มี Analog Input 16 ขา Serial UART 4 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบน Arduino IDE และโปรแกรมผ่าน USB เหมาะ

สำหรับผู้สนใจเริ่มต้นเรียนรู้การพัฒนาไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ต้องการบอร์ด Arduino ที่มีหน่วยความจำและขาสัญญาณต่างๆ ให้ต่อใช้งานมากขึ้น



รูปที่ 2.12 Arduino Mega 2560 R3

## ตารางที่ 2.6 ข้อมูลจำเพาะเชิงเทคนิค

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limits)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 14 provide PWM output , 4 UART TTL)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	40 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz

## 2.9 ฮีตเตอร์ (Heater)

เป็นอุปกรณ์ทำความร้อนในอุตสาหกรรม ที่มีหลักการพื้นฐานคือ เมื่อมีกระแสไหลผ่านลวดตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ลวดตัวนำจะร้อน ดังนั้นลวดที่ใช้ผลิตฮีตเตอร์จะต้องมีคุณสมบัติเหนียวและทนอุณหภูมิได้สูง

### 1. ฮีตเตอร์แท่ง (Cartridge Heater)

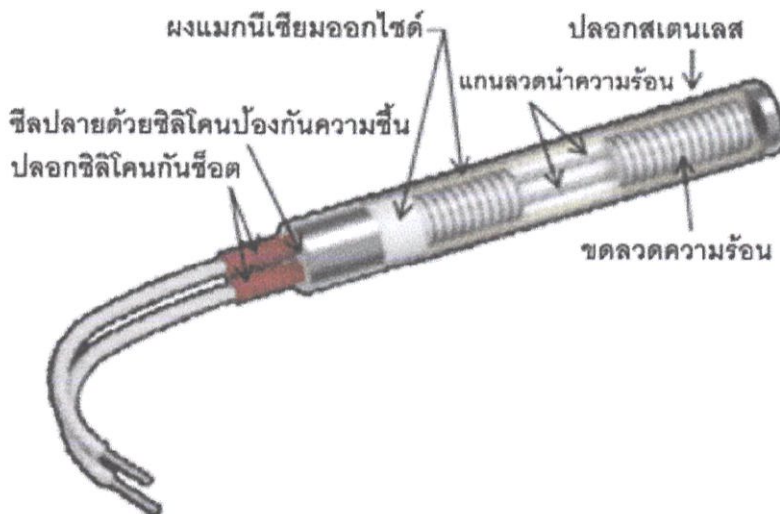
ลักษณะการใช้งานทั่วไปของ ฮีตเตอร์แท่ง Cartridge Heater คือ ใส่ไว้ในช่องบนวัตถุความร้อนจะถูกส่งผ่านจากฮีตเตอร์ไปยังวัตถุที่ต้องการให้ความร้อน ตัวอย่างงาน เช่น ให้ความร้อนแม่พิมพ์ของเครื่องบรรจุหีบ

ท่อ Cartridge Heater แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ High Density และ Low Density (บางครั้งเรียกว่า High Temperature และ Low Temperature)

ตัวอย่างการนำไปใช้ในงานให้ความร้อน เช่น แม่พิมพ์ หัวพ่นกาว แผ่นเพลท เครื่องพิมพ์ทอง หัวปั๊ม ชิ้นงานเหล็ก เครื่องรีดถุงพลาสติก เครื่องท่อของพลาสติกใสอาหาร และขนม นอกจากนี้ยังสามารถนำมาใส่เกลียวเพื่อตม่น้ำยาเคมีกาวในท่อ หรือ ถาดได้อีกด้วย

## 2. ฮีตเตอร์แท่งแบบHD (ความร้อนสูง)

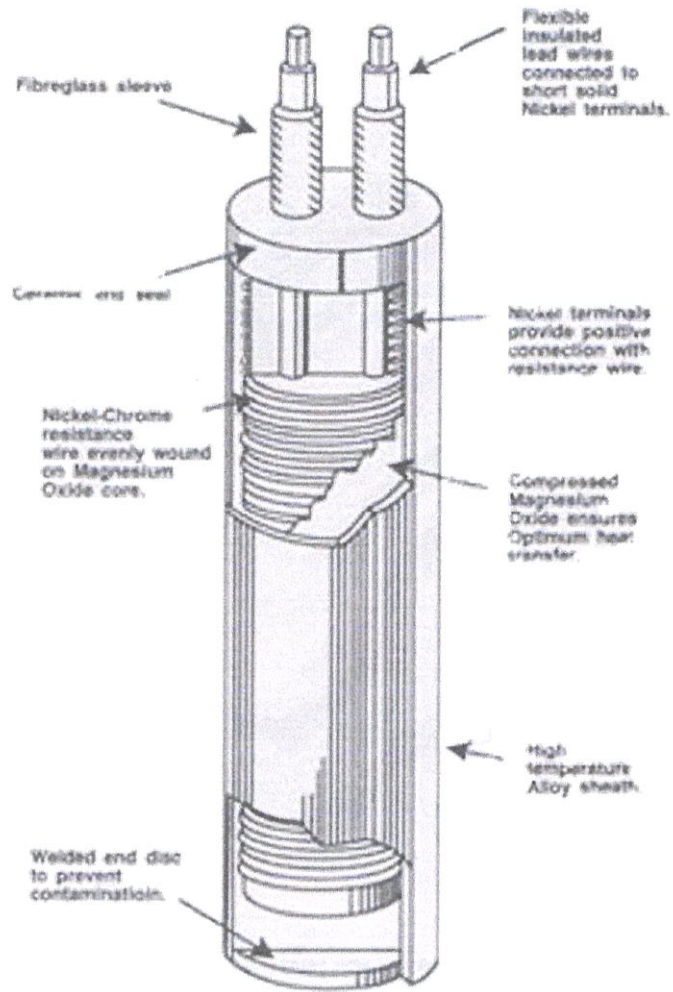
คาร์ทริดจ์ฮีตเตอร์หรือฮีตเตอร์แท่ง เป็นฮีตเตอร์ที่ทำงานได้ที่อุณหภูมิสูง ตัวฮีตเตอร์ประกอบด้วยปลอกสเตนเลสคุณภาพดี แกนพันขดลวดทำจากแมกนีเซียมออกไซด์อัดขึ้นรูปเป็นแท่ง ขดลวดความร้อน Ni-Cr ที่พันรอบแกนพันลวด และเทผงแมกนีเซียมออกไซด์อัดแน่นอยู่รอบนอกอีกที ฮีตเตอร์กับตัวปลอกจะวางห่างกันเล็กน้อย ทำให้การส่งผ่านความร้อนทำได้ดี และยังช่วยให้อายุการใช้งานยาวนานขึ้น



รูปที่ 2.13 ส่วนประกอบของฮีตเตอร์แท่งแบบHD (ความร้อนสูง)

### High Density

หลักการทำ Cartridge Heater ชนิด High Density มีขั้นตอนที่ต้องรีดท่อโลหะที่มีตัวนำและฉนวนแมกนีเซียมออกไซด์ภายในลง ฉนวนภายในจะถูกอัดแน่น ทำให้ทนอุณหภูมิได้สูง และมีกำลังวัตต์ต่อพื้นที่ ( $\text{Watt/cm}^2$ ) สูงขึ้น



รูปที่ 2.14 หลักการทำงานของ ฮีตเตอร์แห่งแบบHD (ความร้อนสูง)

## บทที่3

### อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงาน

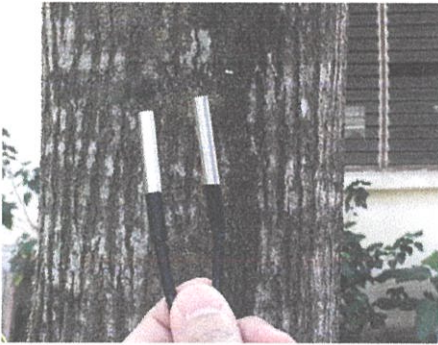
#### 3.1 อุปกรณ์

1. Solid state relay
2. Cartridge Heater (High Density)
3. เทอร์โมคัปเปิล Type K
4. Microcontroller Arduino Mega 2560 R3
5. โน้ตบุ๊ก
6. สว่านไฟฟ้า
7. หัวพัลส์ความร้อนที่มีความต้านทาน 322 โอห์ม
8. มัลติมิเตอร์
9. แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์
10. นาฬิกาจับเวลา
11. สายไฟเชื่อมต่อ
12. อุปกรณ์จับยึด
13. トラッキングแบบ DIGITAL
14. ปีกเกอร์ตวง
15. ตุ้บ
16. มีด
17. เวอร์เนียร์คาร์ลิปเปอร์
18. ตลับเมตร
19. ต้นพืชทดลอง เช่น มะม่วงน้ำดอกไม้ มะม่วงเขียวเสวย มะขามเทศ สะเดา ชงโค และมะฮอกกานี

### 3.2 การทดสอบวัดค่าอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช

เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิของหัวใจให้ความร้อนและหาช่วงเวลาที่เหมาะสมของการพัลส์ความร้อนให้กับต้นได้ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

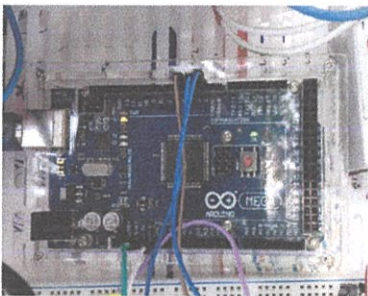
1. เลือกต้นพืชที่ทดสอบ (มะม่วงน้ำดอกไม้ , มะม่วงเขียวเสวย , มะขามเทศ , สะเดา , ชงโค , มะฮอกกานี)
2. ใช้สว่านไฟฟ้าเจาะต้นไม้เข้าไปจนถึงส่วนของกระพี้
3. นำเทอร์โมคัปเปิล Type K เสียบเข้าไปในรูที่ใช้สว่านไฟฟ้าเจาะ อ่านเครื่องวัดอุณหภูมิจากคอมพิวเตอร์ และบันทึกข้อมูล
4. นำเทอร์โมคัปเปิล Type K วัดอุณหภูมิอากาศบริเวณรอบต้นพืช อ่านค่าและบันทึกผล



รูปที่ 3.1 เทอร์โมคัปเปิล Type K



รูปที่ 3.2 การวัดอุณหภูมิภายในต้นพืช



รูปที่ 3.3 Microcontroller Arduino MEGA

2560



รูปที่ 3.4 อ่านค่าอุณหภูมิในคอมพิวเตอร์

### 3.3 การทดลองหาอุณหภูมิที่เหมาะสมของหัวปลีส์ความร้อน

ทำการทดสอบวัดค่าอุณหภูมิที่ต้องการและวิเคราะห์หาช่วงเวลาที่เหมาะสมสำหรับการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับหัวปลีส์ความร้อน เพื่อเป็นข้อมูลในการเขียนโปรแกรมที่จะใช้ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ โดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ทำการเตรียมอุปกรณ์ทดสอบทุกอย่าง
2. ทำการทดสอบ ณ อุณหภูมิห้อง โดยทำการทดลองดังนี้
  - 2.1 ติดตั้งหัวปลีส์ความร้อนเข้ากับอุปกรณ์จับยึด
  - 2.2 ต่อสายไฟเข้ากับหัวปลีส์ความร้อนโดยเสียบเข้ากับปลั๊กที่มีสวิตช์
  - 2.3 ทำการกดสวิตช์พร้อมทั้งจับเวลา และดูอุณหภูมิของหัวปลีส์ความร้อน
  - 2.4 ทำการบันทึกผลการทดลอง

### 3.4 การทดสอบหาค่าความชื้นเนื้อไม้สดและความหนาแน่นกระพีไม้

เพื่อนำค่าที่ได้ไปเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยมีขั้นตอนการทดสอบดังนี้

1. ทำการตัดเอาชิ้นส่วนของต้นไม้ตัวอย่าง
2. ทำการชั่งน้ำหนักของเนื้อไม้ตัวอย่าง ก่อนทำการอบด้วยตราชั่งแบบ DIGITAL
3. นำเนื้อไม้ตัวอย่างไปหาค่าปริมาตรของเนื้อไม้โดยใช้หลักการแทนที่น้ำเพื่อนำมาหาค่าความหนาแน่นเนื้อไม้ส่วนกระพี
4. นำเนื้อไม้ตัวอย่างเข้าตู้อบ อบด้วยอุณหภูมิ 80 – 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
5. ทำการเก็บตัวอย่างนำมาคำนวณค่าที่ต้องการ

### 3.5 การทดสอบหาค่าพื้นที่ท่อลำเลียงของต้นไม้

เพื่อหาพื้นที่หน้าตัดของท่อลำเลียง เพื่อคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชโดยมีขั้นตอนการทดลองดังนี้

1. ใช้มีดกรีดเอาส่วนเปลือกของต้นไม้พืชที่ลอกได้ (Cork) ที่ระดับความสูง 1 เมตร เพื่อทำการวัดขนาดความหนาของเปลือกส่วนนี้
2. แกะเอาเปลือกไม้ส่วนนี้มาวัดความหนาด้วยเวอร์เนียคาร์ลิปเปอร์
3. วัดเส้นรอบวงของต้นไม้แต่ละต้นแล้วคำนวณหาค่าขนาดพื้นที่ของท่อลำเลียง



ก. ต้นมะม่วงน้ำดอกไม้



ข. ต้นมะม่วงเขียวเสวย



ค. ต้นมะขามเทศ



ง. ต้นสะเดา



จ. ต้นขงโค



ฉ. ต้นมะฮอกกานี

รูปที่ 3.5 (ก)-(ฉ) การทดสอบหาค่าพื้นที่ท่อลำเลียงน้ำของต้นพืช

### 3.6 การทดสอบวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยเทคนิคพัลส์ความร้อน

ทำการวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชทั้ง6ชนิดโดยใช้เครื่องที่ได้ทำการออกแบบและพัฒนาพร้อมกับทำการบันทึกข้อมูล เวลาที่ทำการวัดและค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช มีหน่วยเป็นลิตรต่อชั่วโมง

### 3.7 การออกแบบระบบการทำงาน

1. กำหนดขนาด Thermocouple Type K และ Cartridge Heater (High Density) ให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6มิลลิเมตร และ Cartridge Heater (High Density) มีความยาว10เซนติเมตร และ Thermocouple Type K มีความยาว4 เซนติเมตร สายที่นำมาต่อกับ Microcontroller Arduino Mega 2560 R3 ยาว 1 เมตร เท่ากันทุกอุปกรณ์ ซึ่ง Thermocouple Type K จะใช้ทั้งหมด 2 หัว

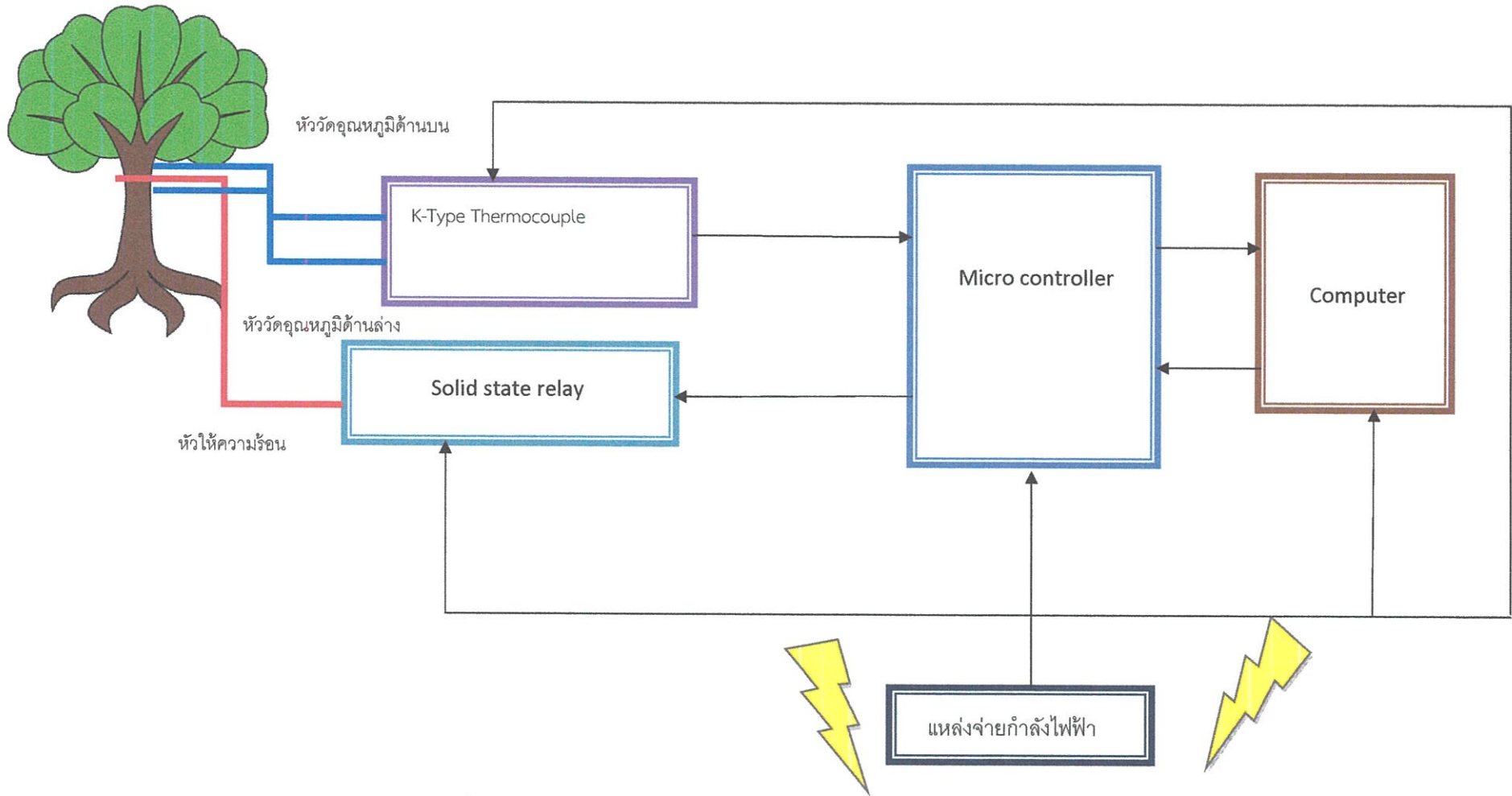
2. กำหนดแรงดันและกำลังวัตต์ของ Cartridge Heater (High Density) โดยให้แรงดันเป็นแบบไฟกระแสสลับ มีค่าระหว่างช่วง 24-380โวลต์ และกำลังวัตต์จะมีค่าเท่ากับ 150 วัตต์

3. กำหนดค่าความต้องการใช้งานให้กับ solid state relay มีค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุดได้

25แอมแปร์ ใช้ไฟฟ้า 1 เฟส,ค่าอินพุตเป็นไฟฟ้ากระแสตรง มีค่าอยู่ระหว่าง 4-32 โวลต์ และค่าเอาต์พุต มีค่าอยู่ระหว่าง 24-380โวลต์เพื่อให้สามารถจ่ายไฟให้กับฮีตเตอร์ได้และอินพุตก็จ่ายไฟมาจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

4. เลือกไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้ Arduino Mega 2560 R3 เนื่องจากมีขาอินพุตและเอาต์พุตมาก เพื่อว่าจะสามารถประยุกต์ต่ออุปกรณ์เพิ่มได้ในอนาคต

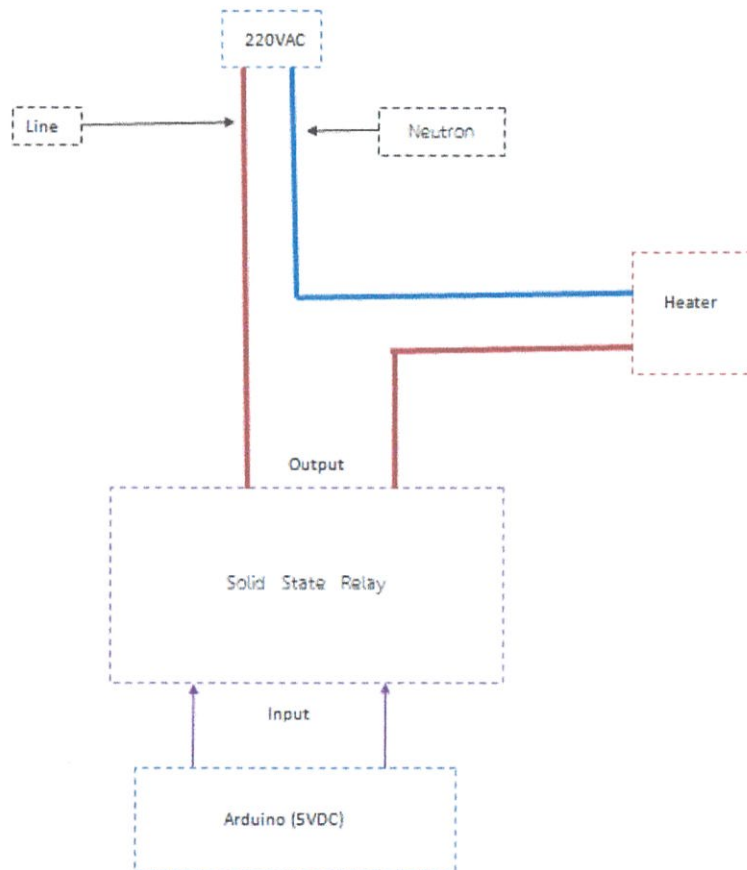
5. ทำการหาแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์ทั้งหลาย โดยใช้เป็นไฟฟ้ากระแสสลับขนาด 220 โวลต์ เพื่อจ่ายไฟฟ้าให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์และฮีตเตอร์ และให้ไมโครคอนโทรลเลอร์จ่ายไฟไปยังอุปกรณ์ตัวอื่นอีกที่



รูปที่ 3.6 การออกแบบระบบการทำงานของเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช

### 3.8 การออกแบบวงจรสำหรับหัวให้ความร้อน

1. ต่อด้านอินพุตเข้าด้วยไฟจากarduino
2. ต่อด้านเอาต์พุตขาหนึ่งเข้ากับสายไฟฟ้าที่เป็นสายไลน์ และอีกขาหนึ่งต่อกับขาของฮีตเตอร์ที่เป็นสายไลน์เหมือนกัน
3. ต่อสายที่เป็นนิวตรอนหรือสายดินเข้ากับอีกสายของฮีตเตอร์ที่เป็นสายนิวตรอนเหมือนกัน

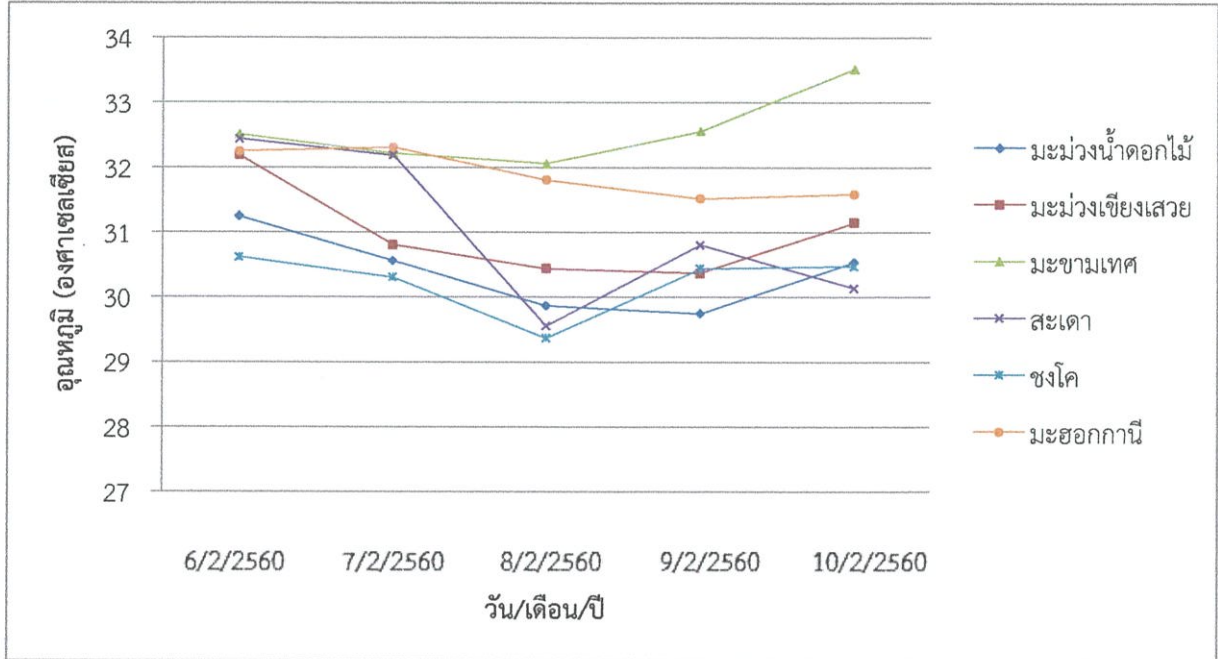


รูปที่ 3.7 การออกแบบวงจรสำหรับหัวให้ความร้อน

## บทที่ 4

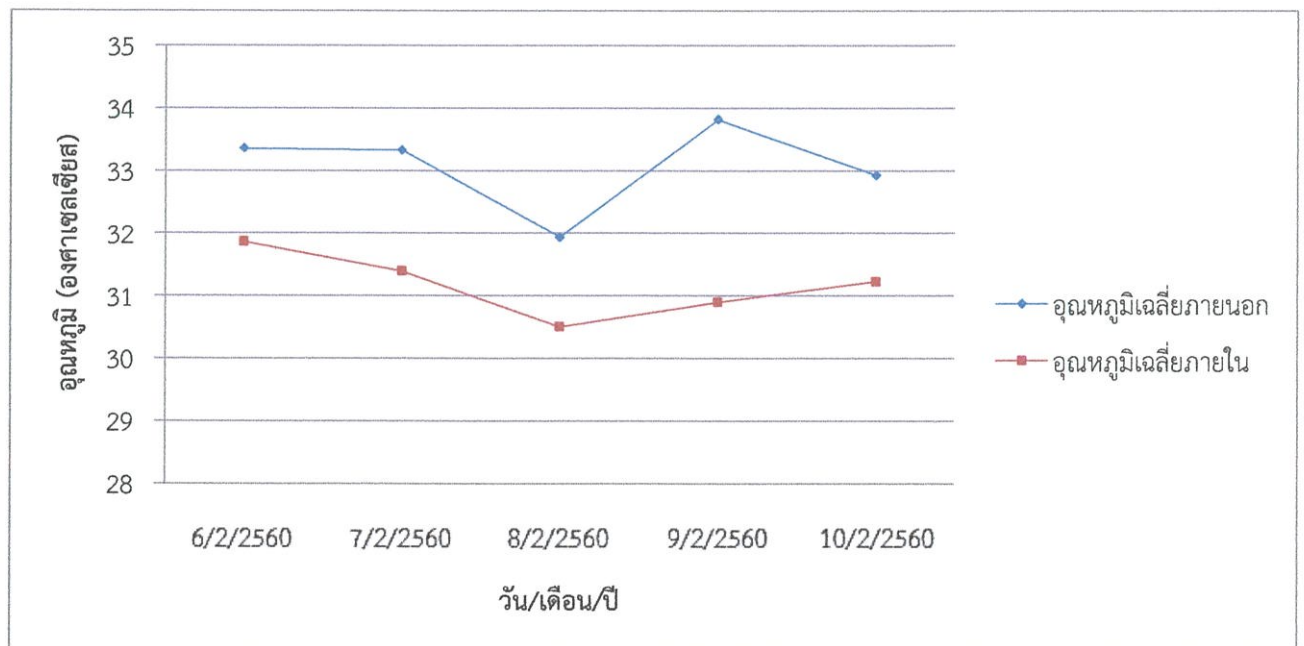
### ผลการทดลอง

#### 4.1 การทดสอบวัดค่าอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช



รูปที่ 4.1 อุณหภูมิภายในต้นพืช

จากรูปที่ 4.1 พบว่า ต้นมะขามเทศ มีค่าอุณหภูมิที่สูงกว่าพืชชนิดอื่นๆ และมีค่าที่สูงกว่าค่าอุณหภูมิรอบต้นพืช เนื่องจากเป็นต้นพืชที่อยู่กลางแจ้งและกำลังผลัดใบ



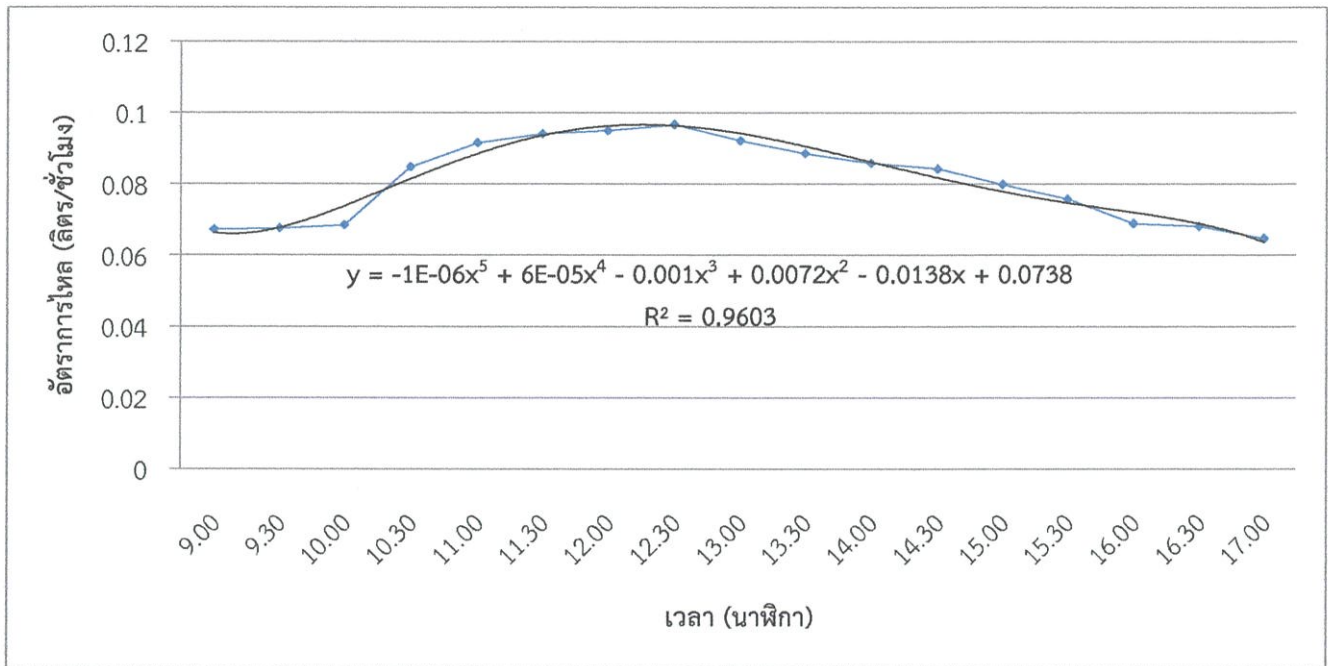
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบอุณหภูมิภายนอกกับภายในต้นพืช

จากรูปที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภายในต้นพืชมีค่าค่อนข้างคงที่เมื่อเทียบกับอุณหภูมิภายนอกต้นพืชที่มีค่าสูงบ้างต่ำบ้าง

#### 4.2 การทดสอบวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยเทคนิคพัลส์ความร้อน

##### 4.2.1 ต้นมะม่วงน้ำดอกไม้

ทดลองวันที่ 12 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ท้องฟ้าโปร่ง มีเมฆเล็กน้อย

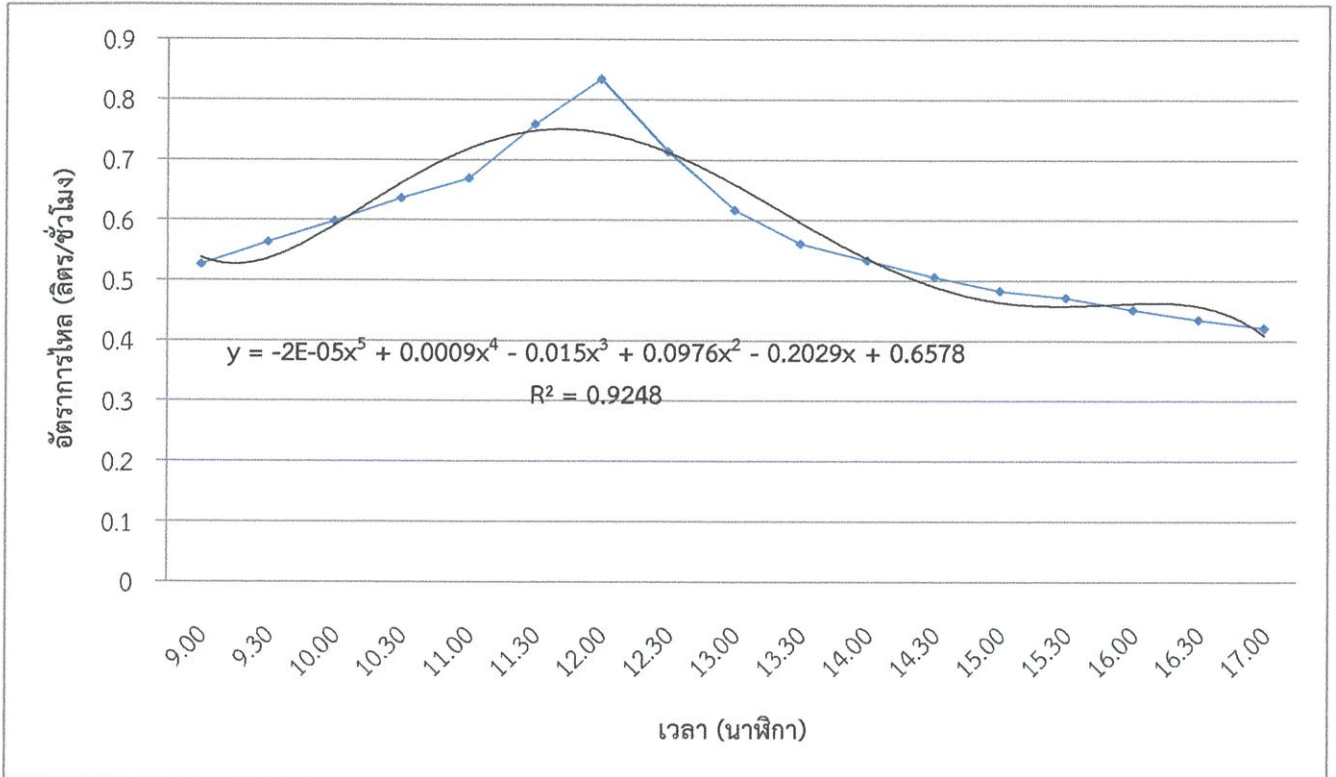


##### รูปที่ 4.3 แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะม่วงน้ำดอกไม้

จากรูปที่ 4.3 พบว่าอัตราการไหลของน้ำในต้นมะม่วงน้ำดอกไม้ มีการใช้น้ำสูงสุดที่เวลา 12.30 น. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.0967 ลิตร/ชม. และหลังจาก 12.30 น. ก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ

#### 4.2.2 ต้นมะม่วงเขียวเสวย

ทดลองวันที่ 13 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ท้องฟ้าโปร่งตลอดทั้งวัน

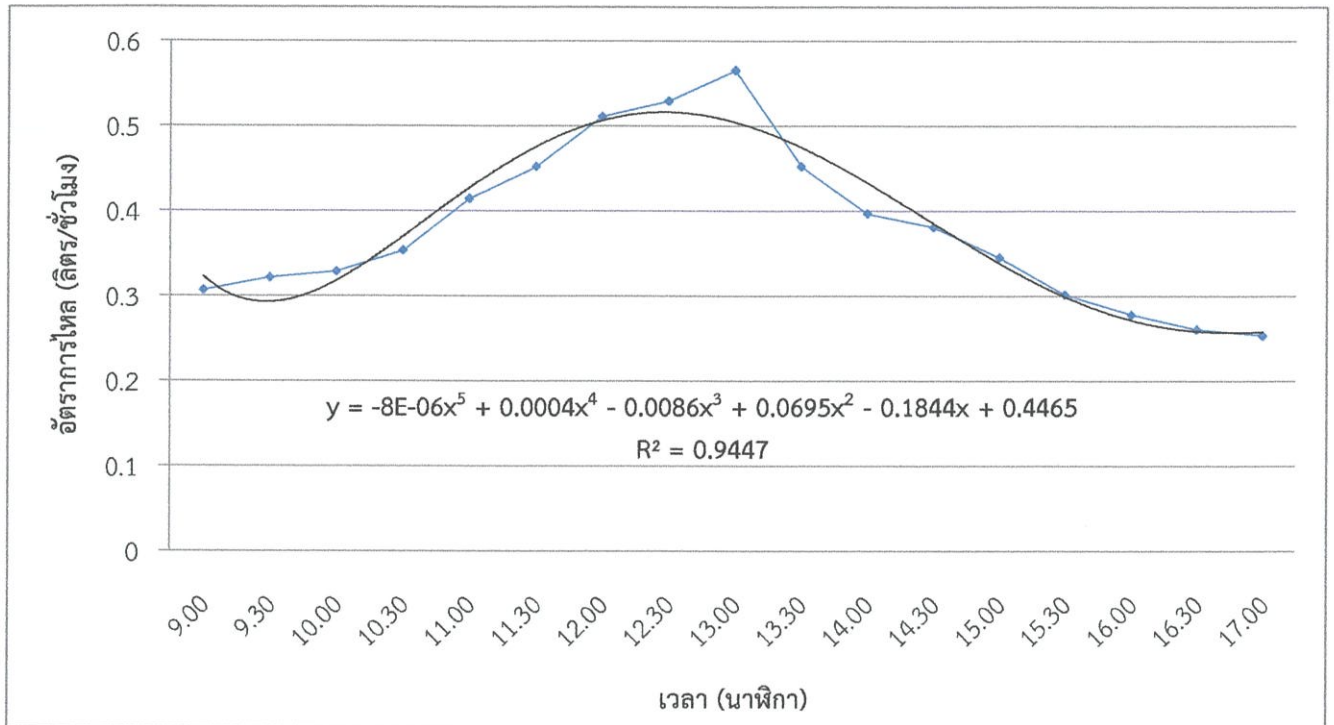


รูปที่ 4.4 แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะม่วงเขียวเสวย

จากรูปที่ 4.4 พบว่าอัตราการไหลของน้ำในต้นมะม่วงเขียวเสวย มีการใช้น้ำสูงสุดที่เวลา 12.00 น. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.8343 ลิตร/ชม. และหลังจาก 12.00 น. ก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ

### 4.2.3 ต้นมะขามเทศ

ทดลองวันที่ 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ท้องฟ้าโปร่งตลอดทั้งวัน

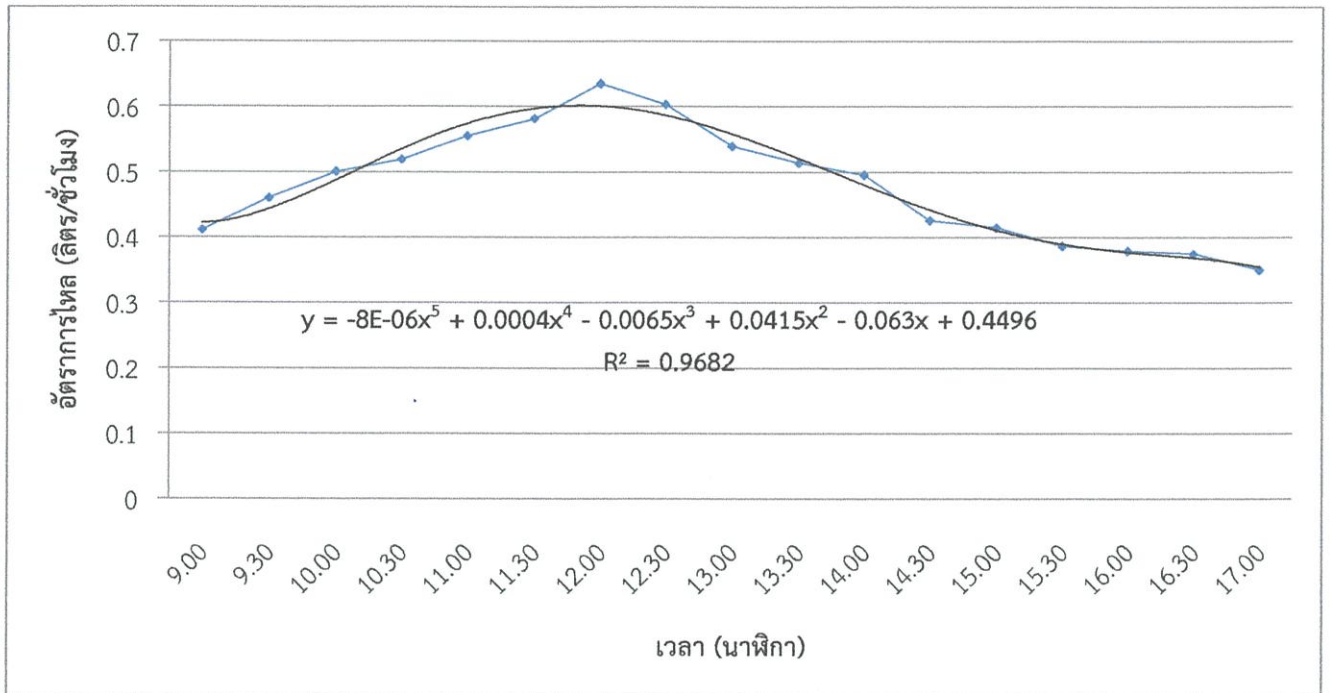


รูปที่ 4.5 แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะขามเทศ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าอัตราการไหลของน้ำในต้นมะขามเทศมีการใช้น้ำสูงสุดที่เวลา 13.00 น. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5656 ลิตร/ชม. และหลังจาก 13.00 น. ก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ

#### 4.2.4 ต้นสะเดา

ทดลองวันที่ 16 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ท้องฟ้าโปร่งตลอดทั้งวัน

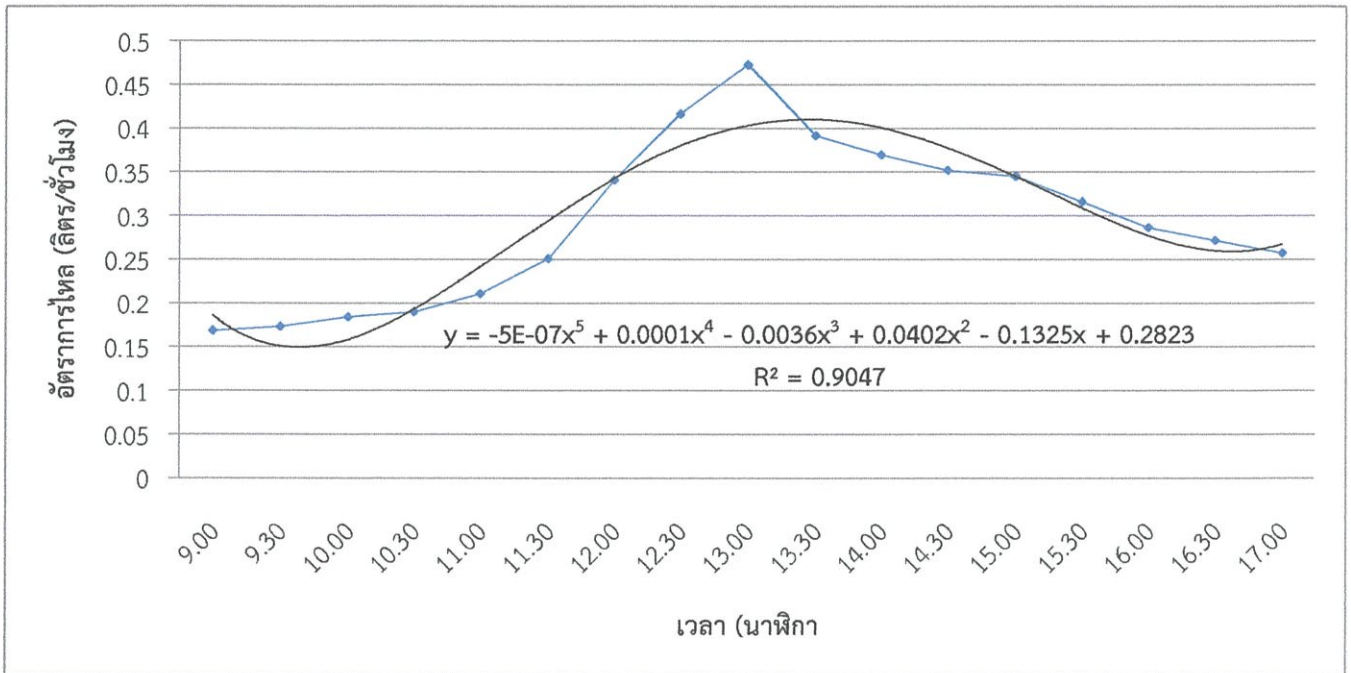


รูปที่ 4.6 แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นสะเดา

จากรูปที่ 4.6 พบว่าอัตราการไหลของน้ำในต้นสะเดามีการใช้น้ำสูงสุดที่เวลา 12.00 น. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.6351 ลิตร/ชม. และหลังจาก 12.00 น. ก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ

#### 4.2.5 ต้นชงโค

ทดลองวันที่ 18 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ท้องฟ้าโปร่ง ช่วงบ่ายมีเมฆเล็กน้อย

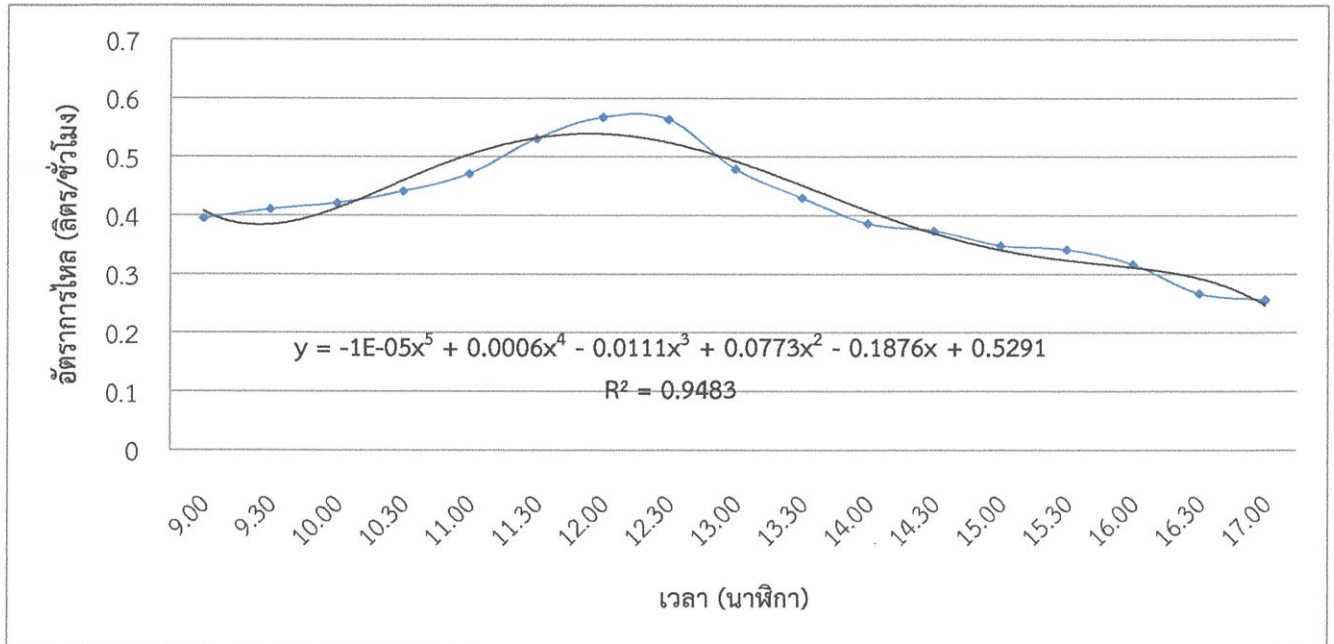


รูปที่ 4.7 แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นชงโค

จากรูปที่ 4.7 พบว่าอัตราการไหลของน้ำในต้นชงโค มีการใช้น้ำสูงสุดที่เวลา 13.00 น. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.4728 ลิตร/ชม. และหลังจาก 13.00 น. ก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ

#### 4.2.6 ต้นมะฮอกกานี

ทดลองวันที่ 19 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560 ท้องฟ้าโปร่ง ช่วงบ่ายมีเมฆเล็กน้อย



รูปที่ 4.8 แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นมะฮอกกานี

จากรูปที่ 4.8 พบว่าอัตราการไหลของน้ำในต้นมะฮอกกานี มีการใช้น้ำสูงสุดที่เวลา 12.00 น. ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5675 ลิตร/ชม. และหลังจาก 12.00 น. ก็มีค่าลดลงเรื่อยๆ

## สรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.3 ถึงภาพที่ 4.8 ได้แสดงอัตราการไหลของน้ำในต้นพีช 6 ชนิด คือ มะม่วงน้ำดอกไม้ มะม่วงเขียวเสวย มะขามเทศ สะเดา ชงโค มะฮอกกานี แต่ละชนิดมีอายุใกล้เคียงกัน 8-10 ปี ซึ่งต้นไม้แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันทางกายภาพและสภาพแวดล้อม คือ มีขนาดทรงพุ่มที่แตกต่างกัน ขนาดลำต้นแตกต่างกัน สภาพของดิน คลองชลประทาน จึงทำให้แต่ละต้นมีอัตราการใช้น้ำในปริมาณที่ต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น

ต้นมะม่วงเขียวเสวย มีแนวโน้มของการใช้น้ำเป็นไปตามสมการ  $y = -2E-05x^5 + 0.0009x^4 - 0.015x^3 + 0.0976x^2 - 0.2029x + 0.6578$  ซึ่งมีอัตราการใช้น้ำต่ำสุด 0.4216 ลิตร/ชั่วโมง และสูงสุด 0.8343 ลิตร/ชั่วโมง ที่เวลา 12.00 น. ซึ่งในการทดลองต้นมะม่วงเขียวเสวยเป็นต้นที่มีอัตราการไหลของน้ำสูงที่สุด เพราะว่าสภาพแวดล้อมติดกับคลองชลประทาน และสภาพดินที่ดี

สำหรับต้นมะขามเทศ มีแนวโน้มของการใช้น้ำเป็นไปตามสมการ  $y = -8E-06x^5 + 0.0004x^4 - 0.0086x^3 + 0.0695x^2 - 0.1844x + 0.4465$  มีอัตราการใช้น้ำตั้งแต่ 0.2539 - 0.5656 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ

สำหรับต้นสะเดา มีแนวโน้มของการใช้น้ำเป็นไปตามสมการ  $y = -8E-06x^5 + 0.0004x^4 - 0.0065x^3 + 0.0415x^2 - 0.063x + 0.4496$  มีอัตราการใช้น้ำตั้งแต่ 0.3502 - 0.6351 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ

สำหรับต้นชงโค มีแนวโน้มของการใช้น้ำเป็นไปตามสมการ  $y = -5E-07x^5 + 0.0001x^4 - 0.0036x^3 + 0.0402x^2 - 0.1325x + 0.2823$  มีอัตราการใช้น้ำตั้งแต่ 0.1687 - 0.4728 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ

สำหรับต้นมะฮอกกานี มีแนวโน้มของการใช้น้ำเป็นไปตามสมการ  $y = -1E-05x^5 + 0.0006x^4 - 0.0111x^3 + 0.0773x^2 - 0.1876x + 0.5291$  มีอัตราการใช้น้ำตั้งแต่ 0.2567 - 0.5675 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ

และต้นมะม่วงน้ำดอกไม้ มีแนวโน้มของการใช้น้ำเป็นไปตามสมการ  $y = -1E-06x^5 + 6E-05x^4 - 0.001x^3 + 0.0072x^2 - 0.0138x + 0.0738$  มีอัตราการใช้น้ำตั้งแต่ 0.0648 - 0.0967 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งในการทดลองต้นมะม่วงน้ำดอกไม้เป็นต้นที่มีอัตราการไหลของน้ำต่ำที่สุด เพราะว่าขาดการรดน้ำ สภาพดินเป็นดินแข็ง และอยู่ในเขตอาคารที่เป็นพื้นดินผสมปูน

ผลจากการนำเครื่องที่ได้ทำการปรับปรุง(กระพี้59) มาทำการทดลองวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีช นั้น พบว่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้น้ำของพีช คือ ช่วงเวลาเที่ยงถึงบ่ายสองโมง เป็นช่วงเวลาที่มีอากาศร้อนมากที่สุด ทำให้พีชมีความต้องการใช้น้ำเพื่อกิจกรรมต่างๆ ที่พีชต้องการ ปริมาณการใช้น้ำของพีชจึงมีค่าเพิ่มขึ้น หลังจากเที่ยงวันนั้นพีชจะมีการใช้น้ำที่น้อยลงเรื่อยๆ เนื่องจากแสงแดดมีน้อยกว่าช่วงกลางวันส่งผลให้การระเหยของน้ำของพีชลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากพีช

สามารถคายน้ำได้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลากลางวัน และค่า  $R^2$  เฉลี่ยของต้นพืชแต่ละชนิดเท่ากับ 0.9418 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองใช้เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช โดยเทคนิคพัลส์ความร้อนในครั้งนี้ พบว่าพืชที่ทำการทดลองทุกต้นมีการนำน้ำไปใช้ในอัตราที่สูงกว่าปริมาณการใช้น้ำของพืชที่แท้จริง จึงทำให้พืชไม่แสดงอาการว่าจะขาดน้ำ

## บทที่ 5

### สรุปผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผล

จากการศึกษาปริมาณการใช้น้ำของไม้ยืนต้นใบเลี้ยงคู่ซึ่งเลือกใช้วิธีพัลส์ความร้อน(heat pulse method) ในการทำการทดลอง ที่เลือกใช้วิธีนี้เพราะเหมาะสมต่อการวัดไม้ยืนต้นที่มีผิวขรุขระ และต้นไม้ที่เหมาะสมในการวัดควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ไม่น้อยเกินไป วิธีพัลส์ความร้อนจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมในการวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นไม้ป่าและไม้ผลหลายชนิด สำหรับในการทดลองวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชได้มีการเปรียบเทียบค่าจากเครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชกับค่าการใช้น้ำของพีชอ้างอิงที่ได้จากสูตรคำนวณของ Penman เพื่อแสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าของเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชที่วัดได้มีค่าน้อยกว่าการใช้น้ำของพีชอ้างอิงแสดงว่าพีชมีการขาดน้ำ แต่ถ้าค่าของเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชที่วัดได้มีค่ามากกว่าการใช้น้ำของพีชอ้างอิงแสดงว่าพีชมีการใช้น้ำที่ปกติ สำหรับการเปรียบเทียบกับค่าการใช้น้ำของพีชอ้างอิงที่ได้จากสูตรคำนวณของ Penman คณะผู้จัดทำได้ทำการเปรียบเทียบกับต้นมะม่วงได้เพียงชนิดเดียวเนื่องจากข้อจำกัดของค่าสัมประสิทธิ์พีชหรือค่า  $K_c$  (Crop Coefficient) ที่ทางกรมชลประทานได้ทำไว้มีเพียงค่าสัมประสิทธิ์พีชของต้นมะม่วงเพียงชนิดเดียว

จากการทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชโดยวิธีพัลส์ความร้อนกับไม้ยืนต้นใบเลี้ยงคู่ซึ่งได้ลองทำการทดลองกับไม้ยืนต้นใบเลี้ยงคู่จำนวน 6 ชนิด คือ ต้นมะม่วงน้ำดอกไม้ ต้นมะม่วงเขียวเสวย ต้นมะขามมัน ต้นดอกสะเดา ต้นชงโค และต้นมะฮอกกานี พบว่า ค่าที่ได้มีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการใช้น้ำของพีชคือ ในช่วงที่มีแสงแดดมากโดยเฉพาะช่วงกลางวันพีชจะมีการใช้น้ำมากที่สุดโดยเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชจะแสดงค่าอัตราการไหลออกมามากที่สุด แต่ถ้าในช่วงเช้าหรือช่วงบ่ายที่มีแสงแดดน้อยกว่าช่วงกลางวัน พีชจะมีการใช้น้ำน้อยโดยเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชจะแสดงค่าอัตราการไหลออกมาน้อยกว่าค่าอัตราการไหลของช่วงเวลากลางวัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชสามารถนำไปวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชได้ตามที่ออกแบบไว้

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ต้นไม้ที่ใช้ในการทดลองควรเป็นต้นไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เล็กจนเกินไป
2. สายไฟที่เชื่อมจากแหล่งจ่ายไฟควรมีความยาวที่มากพอสำหรับการนำเครื่องมือไปใช้ในการวัด
3. ควรเลือกช่วงที่สภาพอากาศที่ใกล้เคียงกันในการทดลอง
4. อยากให้มาเทียบค่าจากเครื่องมือของต่างประเทศ
5. ไม่ควรนำเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพีชมาใช้วัดค่าในวันที่มีสภาพอากาศแปรปรวน เพราะจะทำให้ค่าที่ได้อาจผิดเพี้ยนไปต่อความเป็นจริง

### 5.3 ปัญหาที่พบ

1. ช่วงทดลองเกิดปัญหาในการหาแหล่งจ่ายไฟใช้ในการทดลอง
2. บางต้นที่เจาะไปมีน้ำยางไหลออกมาเพื่อซ่อมแซมรูที่โดนเจาะอาจทำให้ค่าคาดเคลื่อนไปบ้าง
3. ช่วงทดลองบางวันมีสภาพอากาศแปรปรวน

### 5.4 แนวทางการพัฒนา

อยากให้ใช้แหล่งจ่ายไฟที่เป็นแบตเตอรี่ก้อนขนาด 12 โวลท์และอยากให้สั่งงานได้จากแอปพลิเคชันในมือถือระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ได้ แล้วก็อยากให้อุปกรณ์มีความคงทนมากกว่านี้ ในส่วนของการวัดนั้นวัดได้แค่ช่วงเวลากลางวัน ค่าอัตราการใช้น้ำจะเพิ่มขึ้นไปเรื่อยๆจนถึงเวลาๆหนึ่งจะเป็นเวลาที่ใช้อัตราการใช้น้ำของพืชและหลังจากนั้นพืชจะมีการใช้น้ำที่น้อยลงเรื่อยๆ เนื่องจากแสงแดดมีน้อยกว่าช่วงกลางวันส่งผลให้การระเหยของน้ำของพืชลดลงเรื่อยๆ ซึ่งเป็นผลมาจากพืชสามารถคายน้ำได้น้อยลงเมื่อเปรียบเทียบกับช่วงเวลากลางวัน

## เอกสารอ้างอิง

1) การลำเลียงน้ำของไซเล็ม[ออนไลน์].

เข้าถึงได้จาก: <http://www.tutorvista.com/content/biology/biology-iv/plant-water-relations/ascent-sap-theories.php>. (วันที่สืบค้นข้อมูล 29/08/59)

2) ข้อมูลการใช้น้ำชลประทาน[ออนไลน์].

เข้าถึงได้จาก: [http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/iwmd/index\\_th.htm](http://water.rid.go.th/hwm/cropwater/iwmd/index_th.htm) (วันที่สืบค้นข้อมูล 10/02/59)

3) ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล มณฑาทิพย์ เกียรติวีระสกุล และสายัณห์ สดุดี. 2539. วิจัยและพัฒนาเซนเซอร์เพื่อวัดการใช้น้ำของผลไม้. รายงานวิจัยเสนอต่อศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 38 หน้า (วันที่สืบค้นข้อมูล 23/08/59)

4) ชูศักดิ์ ลิ้มสกุล สายัณห์ สดุดี วิชฌีย์ ออมทรัพย์สิน และมณฑาทิพย์ เกียรติวีระสกุล. 2543. การพัฒนาเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชและการประยุกต์ใช้งาน. การประชุมวิชาการประจำปี 2543 สมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 10 หน้า. (วันที่สืบค้นข้อมูล 23/08/59)

5) ทรงศักดิ์ ผาจันทร์ดา ศุภวัฒน์ คำภาบุตร และสุรียนต์ โพธิ์ศรี. 2546. การพัฒนาและทดสอบเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชโดยเทคนิคพัลส์ความร้อน. ปรินท์งานปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.

6) พรจิต ประทุมสุวรรณ. เครื่องมือวัดอุตสาหกรรม: เซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์, 2536. (วันที่สืบค้นข้อมูล 19/08/59)

7) ภูวดล บุตรรัตน์. โครงสร้างภายในของพืช. ไทยวัฒนาพานิช. พิมพ์ครั้งที่ 5. 2541., หน้า 1-46. (วันที่สืบค้นข้อมูล 31/08/59)

8) วิทยา ตั้งต่อสกุล. 2542. การเลือกใช้ระบบให้น้ำที่เหมาะสมและการใช้น้ำอย่างมีประสิทธิภาพ. คู่มือซื้อขายเครื่องจักรกลและอุปกรณ์การเกษตร กองเกษตรวิศวกรรม กรมวิชาการเกษตร. 9 หน้า. (วันที่สืบค้นข้อมูล 20/08/59)

9) สุนทรี ยิ่งชัชวาลย์. ชลศาสตร์ในระบบดิน-พืช. ภาควิชาปฐพีวิทยา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์กำแพงแสน. 2535., หน้า 88-108. (วันที่สืบค้นข้อมูล 19/08/59)

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- 10)สมบูรณ์ โสadbง และอภิเชษฐ์ พลศักดิ์. 2544. เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืชโดยใช้เทคนิคของพัลส์ความร้อน. ปรินญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ.
- 11)Anonymous. 1992. Sapflow Sensors(version 2), User Manual. Greenspan Technology Pty Ltd., Australia.
- 12)Green, S.R. and Clothier, B.E. 1988. Water use of kiwifruit vines and apple trees by the heat pulse technique. J. Exp. Botany. 39: 115-123
- 13)Smith, D.M. and Allen, S.J. 1966. Measurement of sap flow in plant stems. J. Exp.Botany. 47(305):1833-1844.
- 14)Tad. W. Patzek and Dmitriy Silin. 2000;"Numerical simulation of a line heat pulse used as a tracer in the sapflow of oak trees." University of California Homepage, location <http://www.lamar.colostate.edu/~mryan/sapflow.htm>, California, U.S.A

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

Codeที่ใช้ในการสั่งงาน

```
#include <OneWire.h>

#include <DallasTemperature.h>

#define ONE_WIRE_BUS_1 2

#define ONE_WIRE_BUS_2 3

int heater = 4;

OneWire oneWire_in(ONE_WIRE_BUS_1);

OneWire oneWire_out(ONE_WIRE_BUS_2);

DallasTemperature sensor_Temp1(&oneWire_in);

DallasTemperature sensor_Temp2(&oneWire_out);

void setup()

{

    Serial.begin(9600);

    Serial.println("Temperature of Probe using measure sapflow");

    sensor_Temp1.begin();

    sensor_Temp2.begin();

    pinMode(heater,OUTPUT);

}

void loop()

{

    Serial.print("Requesting temperatures...");

    sensor_Temp1.requestTemperatures();

    sensor_Temp2.requestTemperatures();

    Serial.println(" done");
```

```
Serial.print("Temp1: ");  
  
Serial.println(sensor_Temp1.getTempCByIndex(0));  
  
Serial.print("Temp2: ");  
  
Serial.println(sensor_Temp2.getTempCByIndex(0));  
  
delay(500);  
  
if (digitalRead(heater)==LOW)  
{  
  
    digitalWrite(heater , HIGH);  
  
    delay(500);  
  
    digitalWrite(heater , LOW);  
  
}  
  
delay(1000);  
  
}
```

ภาคผนวก ข.

ตาราง

ตารางที่ 1 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช(6 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)

วันที่ทำการวัด 06/02/60	ชนิดต้นพืช	อุณหภูมิรอบ ต้นพืช (°C)	อุณหภูมิภายใน ต้นพืช (°C)
เวลาทำการ 12.00 น.	มะม่วงน้ำดอกไม้	33.31	31.25
	มะม่วงเขียวเสวย	33.94	32.19
	มะขามเทศ	33.44	32.51
	สะเดา	34.38	32.44
สภาพอากาศ ท้องฟ้าโปร่ง	ชงโค	31.52	30.62
	มะฮอกกานี	33.56	32.25
	เงลิย	33.36	31.87

ตารางที่ 2 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช(7 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)

วันที่ทำการวัด 07/02/60	ชนิดต้นพืช	อุณหภูมิรอบ ต้นพืช (°C)	อุณหภูมิภายใน ต้นพืช (°C)
เวลาทำการ 12.00 น.	มะม่วงน้ำดอกไม้	33.38	30.56
	มะม่วงเขียวเสวย	34.31	30.81
	มะขามเทศ	33.06	32.22
	สะเดา	34.44	32.19
สภาพอากาศ ท้องฟ้าโปร่ง มีแดดมาก	ชงโค	31.06	30.31
	มะฮอกกานี	33.75	32.31
	เงลิย	33.33	31.40

ตารางที่ 3 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (8 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)

วันที่ทำการวัด 08/02/60	ชนิดต้นพืช	อุณหภูมิรอบ ต้นพืช (°C)	อุณหภูมิภายใน ต้นพืช (°C)
เวลาทำการ 12.00 น.  สภาพอากาศ ท้องฟ้าโปร่ง มีเมฆ เล็กน้อย	มะม่วงน้ำดอกไม้	31.37	29.87
	มะม่วงเขียวเสวย	31.87	30.44
	มะขามเทศ	33.31	32.06
	สะเดา	31.87	29.56
	ขงโค	30.19	29.37
	มะฮอกกานี	33.06	31.81
	เฉลี่ย	31.94	30.51

ตารางที่ 4 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (9 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)

วันที่ทำการวัด 09/02/60	ชนิดต้นพืช	อุณหภูมิรอบ ต้นพืช (°C)	อุณหภูมิภายใน ต้นพืช (°C)
เวลาทำการ 12.00 น.  สภาพอากาศ ท้องฟ้าโปร่ง	มะม่วงน้ำดอกไม้	33.83	29.75
	มะม่วงเขียวเสวย	33.31	30.37
	มะขามเทศ	34.63	32.56
	สะเดา	33.31	30.81
	ขงโค	33.25	30.44
	มะฮอกกานี	34.56	31.50
	เฉลี่ย	33.82	30.90

ตารางที่ 5 ผลการทดลองวัดอุณหภูมิรอบต้นและภายในต้นพืช (10 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2560)

วันที่ทำการวัด 10/02/60	ชนิดต้นพืช	อุณหภูมิรอบต้นพืช (°C)	อุณหภูมิภายในต้น พืช (°C)
เวลาทำการ 12.00 น.  สภาพอากาศ ท้องฟ้าโปร่ง มีเมฆ เล็กน้อย	มะม่วงน้ำดอกไม้	32.60	30.54
	มะม่วงเขียวเสวย	33.02	31.15
	มะขามเทศ	34.14	33.52
	สะเดา	32.25	30.14
	ขงโค	32.14	30.48
	มะฮอกกานี	33.48	31.59
	เฉลี่ย	32.93	31.23

ตารางที่ 6 ผลการทดสอบหัวพัลส์ความร้อน

ครั้งที่	อุณหภูมิที่ได้(องศาเซลเซียส)			
	ที่เวลา 2 นาที	ที่เวลา 3 นาที	ที่เวลา 4 นาที	ที่เวลา 5 นาที
1	37.12	38.65	40.22	43.42
2	37.45	38.87	40.13	44.03
3	38.12	38.16	40.51	43.58
เฉลี่ย	37.56	38.56	40.29	43.68

ตารางที่ 7 ผลการหาค่าความชื้นในเนื้อไม้สด และความหนาแน่นเนื้อไม้ส่วนกระพี้ (6 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2560)

ชนิดพืช	น้ำหนักก่อนอบ (g)	น้ำหนักหลังอบ (g)	ปริมาตรไม้สด ก่อนอบ (ml)	% ความชื้น	ความหนาแน่น เนื้อไม้ (g/ml)
มะม่วงน้ำดอกไม้	2.5272	0.8882	3.0	1.8453	0.2960
มะม่วงเขียวเสวย	6.1615	2.096	6.5	1.9628	0.3199
มะขามเทศ	4.0177	1.7633	4.0	1.2785	0.4408
สะเดา	4.3468	1.5204	4.5	1.8589	0.3378
ขงโค	4.0733	1.4107	4.0	1.8870	0.3526
มะฮอกกานี	1.5765	0.6503	2.0	1.4242	0.3251

ตารางที่ 8 ค่าพื้นที่ท่อลำเลียงของต้นพีช (\*ค่าตัวแปรในการคำนวณอ้างอิงจากเว็บไซต์กรมชลประทาน)

ชนิด	ความหนา เปลือก (mm)	เส้นรอบวง (mm)	เส้นผ่าน ศูนย์กลาง (mm)	พื้นที่หน้าตัด A (mm <sup>2</sup> )	อัตราการใช้น้ำ จริง (Q = ET*A) ลิตร/ชม.
มะม่วงน้ำดอกไม้	1.6	490	170	22,698	0.0594
มะม่วงเขียวเสวย	3	597	210	34,636	0.0907
มะขามเทศ	2	889	305	73,061	-
สะเดา	3	790	280	61,575	-
ชงโค	2.5	572	175	24,052	-
มะฮอกกานี	2	610	214	35,968	-

ตารางที่ 9 ค่าอัตราการไหลที่วัดได้จากเครื่องที่ได้ทำการปรับปรุง (กระพี้59)

เวลา (นาฬิกา)	ค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพีช (ลิตร/ชั่วโมง)					
	มะม่วง น้ำดอกไม้	มะม่วง เขียวเสวย	มะขามเทศ	สะเดา	ชงโค	มะฮอกกานี
9.00	0.0673	0.5265	0.3072	0.4117	0.1687	0.3954
9.30	0.0676	0.5641	0.3218	0.4605	0.1732	0.4109
10.00	0.0685	0.5983	0.3289	0.5008	0.1841	0.4213
10.30	0.0849	0.6369	0.3538	0.5196	0.1901	0.4414
11.00	0.0916	0.6693	0.4147	0.5552	0.2107	0.4713
11.30	0.0941	0.7594	0.4524	0.5818	0.2511	0.5314
12.00	0.0951	0.8343	0.5113	0.6351	0.3408	0.5675
12.30	0.0967	0.7137	0.5295	0.6035	0.4165	0.5637
13.00	0.0922	0.6170	0.5656	0.5398	0.4728	0.4794
13.30	0.0886	0.5615	0.4525	0.5141	0.3917	0.4300
14.00	0.0859	0.5336	0.3971	0.4957	0.3696	0.3862
14.30	0.0844	0.5063	0.3809	0.4262	0.3522	0.3741
15.00	0.0799	0.4836	0.3456	0.4152	0.3453	0.3490
15.30	0.0758	0.4719	0.3023	0.3871	0.3161	0.3419
16.00	0.0690	0.4522	0.2785	0.3796	0.2868	0.3172
16.30	0.0682	0.4356	0.2610	0.3752	0.2719	0.2674
17.00	0.0648	0.4216	0.2539	0.3508	0.2572	0.2567

ตารางที่ 10 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นมะม่วงน้ำดอกไม้

เวลา	ระยะบน (mm)	ระยะล่าง (mm)	Delay Time (sec)	ความชื้น	ความ หนาแน่น	R	H	V	J	Q (g/sec)	Q(L/hr.)
9.00	20	10	411	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0036	0.0022	0.0185	0.0673
9.30	20	10	409	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0037	0.0023	0.0187	0.0676
10.00	20	10	404	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0037	0.0024	0.0190	0.0685
10.30	20	10	326	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0046	0.0029	0.0235	0.0849
11.00	20	10	302	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0050	0.0031	0.0254	0.0916
11.30	20	10	294	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0051	0.0032	0.0261	0.0941
12.00	20	10	291	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0052	0.0033	0.0264	0.0951
12.30	20	10	286	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0052	0.0034	0.0268	0.0967
13.00	20	10	300	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0053	0.0032	0.0256	0.0922
13.30	20	10	312	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0048	0.0030	0.0246	0.0886
14.00	20	10	322	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0046	0.0029	0.0238	0.0859
14.30	20	10	328	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0045	0.0029	0.0234	0.0844
15.00	20	10	346	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0043	0.0027	0.0222	0.0799
15.30	20	10	365	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0041	0.0026	0.0210	0.0758
16.00	20	10	401	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0037	0.0024	0.0191	0.0690
16.30	20	10	406	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0036	0.0023	0.0189	0.0682
17.00	20	10	427	1.8453	0.296	1.6	0.16	0.0035	0.0022	0.0180	0.0648

ตารางที่ 11 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นมะม่วงเขียวเสวย

เวลา	ระยะบน (mm)	ระยะล่าง (mm)	Delay Time (sec)	ความชื้น	ความ หนาแน่น	R	H	V	J	Q (g/sec)	Q(L/hr.)
9.00	20	10	225	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0067	0.0049	0.0950	0.5265
09.30	20	10	210	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0071	0.0052	0.1018	0.5641
10.00	20	10	198	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0076	0.0056	0.1079	0.5983
10.30	20	10	186	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0081	0.0059	0.1149	0.6369
11.00	20	10	177	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0085	0.0062	0.1208	0.6693
11.30	20	10	156	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0096	0.0071	0.1370	0.7594
12.00	20	10	142	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0106	0.0077	0.1505	0.8343
12.30	20	10	166	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0090	0.0066	0.1287	0.7137
13.00	20	10	192	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0078	0.0057	0.1113	0.6170
13.30	20	10	211	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0071	0.0052	0.1013	0.5615
14.00	20	10	222	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0067	0.0049	0.0963	0.5336
14.30	20	10	234	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0064	0.0047	0.0913	0.5063
15.00	20	10	245	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0061	0.0045	0.0872	0.4836
15.30	20	10	251	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0059	0.0044	0.0851	0.4719
16.00	20	10	262	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0057	0.0042	0.0816	0.4522
16.30	20	10	272	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0055	0.0040	0.0786	0.4356
17.00	20	10	281	1.9628	0.3199	3.1	0.29	0.0053	0.0039	0.0761	0.4216

ตารางที่ 12 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นมะขามเทศ

เวลา	ระยะบน (mm)	ระยะล่าง (mm)	Delay Time (sec)	ความชื้น	ความ หนาแน่น	R	H	V	J	Q (g/sec)	Q(L/hr.)
9.00	20	10	243	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0062	0.0043	0.0853	0.3072
09.30	20	10	232	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0064	0.0045	0.0893	0.3218
10.00	20	10	227	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0066	0.0046	0.0913	0.3289
10.30	20	10	211	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0071	0.0050	0.0983	0.3538
11.00	20	10	180	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0083	0.0059	0.1152	0.4147
11.30	20	10	165	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0091	0.0064	0.1257	0.4524
12.00	20	10	146	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0103	0.0073	0.1420	0.5113
12.30	20	10	141	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0106	0.0075	0.1471	0.5295
13.00	20	10	132	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0114	0.0080	0.1571	0.5656
13.30	20	10	165	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0091	0.0064	0.1257	0.4525
14.00	20	10	188	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0079	0.0056	0.1103	0.3971
14.30	20	10	196	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0076	0.0054	0.1058	0.3809
15.00	20	10	216	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0069	0.0049	0.0960	0.3456
15.30	20	10	247	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0061	0.0043	0.0839	0.3023
16.00	20	10	268	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0056	0.0039	0.0774	0.2785
16.30	20	10	286	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0052	0.0037	0.0725	0.2610
17.00	20	10	294	1.2785	0.4408	2.5	0.2	0.0051	0.0036	0.0705	0.2539

ตารางที่ 13 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นสะเดา

เวลา	ระยะบน (mm)	ระยะล่าง (mm)	Delay Time (sec)	ความชื้น	ความหนาแน่น	R	H	V	J	Q (g/sec)	Q(L/hr.)
9.00	20	10	236	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0064	0.0047	0.1144	0.4117
09.30	20	10	211	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0071	0.0052	0.1279	0.4605
10.00	20	10	194	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0077	0.0057	0.1391	0.5008
10.30	20	10	187	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0080	0.0059	0.1443	0.5196
11.00	20	10	175	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0085	0.0063	0.1542	0.5552
11.30	20	10	167	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0089	0.0066	0.1616	0.5818
12.00	20	10	153	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0098	0.0072	0.1764	0.6351
12.30	20	10	161	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0093	0.0068	0.1676	0.6035
13.00	20	10	180	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0083	0.0062	0.1499	0.5398
13.30	20	10	189	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0079	0.0058	0.1428	0.5141
14.00	20	10	196	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0076	0.0056	0.1377	0.4957
14.30	20	10	228	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0066	0.0048	0.1183	0.4262
15.00	20	10	234	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0064	0.0047	0.1153	0.4152
15.30	20	10	251	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0059	0.0044	0.1075	0.3871
16.00	20	10	256	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0058	0.0043	0.1054	0.3796
16.30	20	10	259	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0057	0.0042	0.1042	0.3752
17.00	20	10	277	1.8589	0.3378	2.8	0.3	0.0054	0.0040	0.0974	0.3508

ตารางที่ 14 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นชงโค

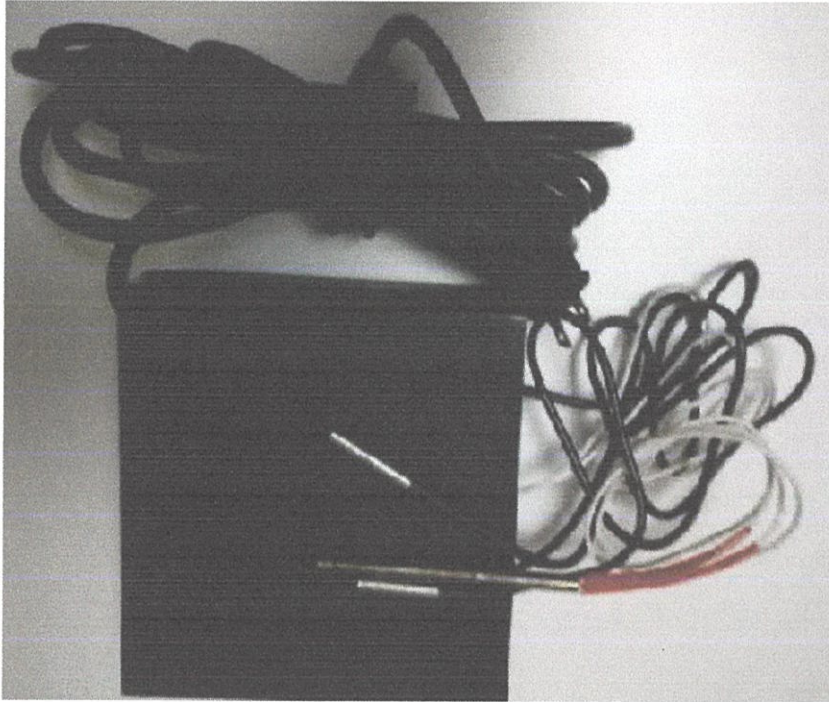
เวลา	ระยะบน (mm)	ระยะล่าง (mm)	Delay Time (sec)	ความชื้น	ความ หนาแน่น	R	H	V	J	Q (g/sec)	Q(L/hr)
9.00	20	10	311	1.887	0.3526	2	0.2	0.0048	0.0038	0.0468	0.1687
9.30	20	10	303	1.887	0.3526	2	0.2	0.0049	0.0039	0.0481	0.1732
10.00	20	10	285	1.887	0.3526	2	0.2	0.0052	0.0041	0.0511	0.1841
10.30	20	10	276	1.887	0.3526	2	0.2	0.0054	0.0042	0.0528	0.1901
11.00	20	10	249	1.887	0.3526	2	0.2	0.0060	0.0047	0.0585	0.2107
11.30	20	10	209	1.887	0.3526	2	0.2	0.0071	0.0056	0.0697	0.2511
12.00	20	10	154	1.887	0.3526	2	0.2	0.0097	0.0076	0.0946	0.3408
12.30	20	10	126	1.887	0.3526	2	0.2	0.0119	0.0093	0.1157	0.4165
13.00	20	10	111	1.887	0.3526	2	0.2	0.0135	0.0106	0.1313	0.4728
13.30	20	10	134	1.887	0.3526	2	0.2	0.0112	0.0088	0.1088	0.3917
14.00	20	10	142	1.887	0.3526	2	0.2	0.0105	0.0082	0.1026	0.3696
14.30	20	10	149	1.887	0.3526	2	0.2	0.0101	0.0078	0.0978	0.3522
15.00	20	10	152	1.887	0.3526	2	0.2	0.0098	0.0077	0.0959	0.3453
15.30	20	10	166	1.887	0.3526	2	0.2	0.0090	0.0071	0.0878	0.3161
16.00	20	10	183	1.887	0.3526	2	0.2	0.0082	0.0064	0.0796	0.2868
16.30	20	10	193	1.887	0.3526	2	0.2	0.0077	0.0061	0.0755	0.2719
17.00	20	10	204	1.887	0.3526	2	0.2	0.0074	0.0057	0.0714	0.2572

ตารางที่ 15 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณอัตราการไหลของต้นมะฮอกกาณี

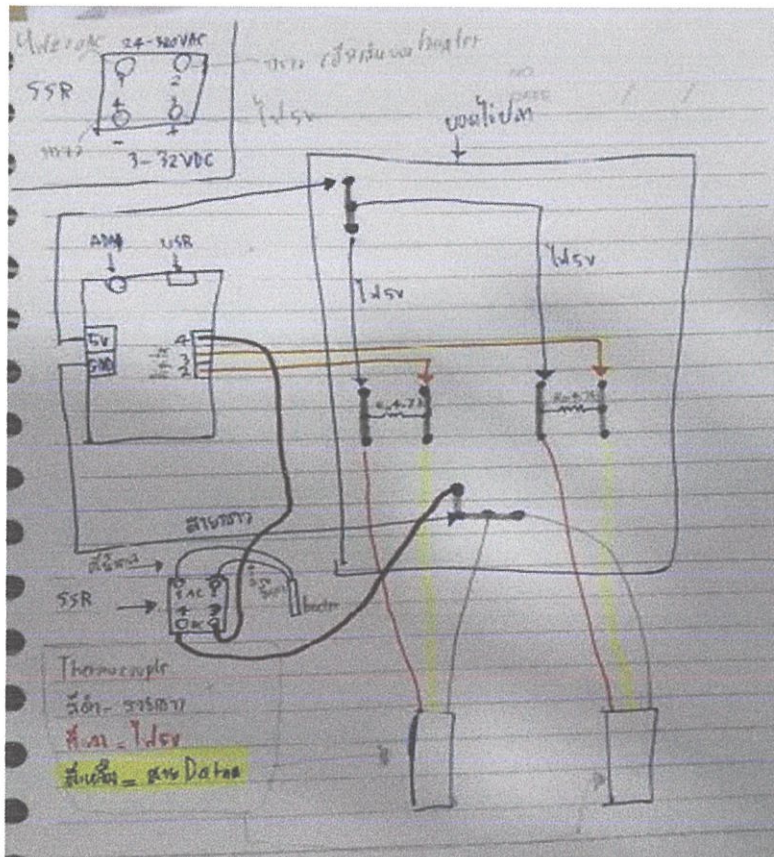
เวลา	ระยะบน (mm)	ระยะล่าง (mm)	Delay Time (sec)	ความชื้น	ความ หนาแน่น	R	H	V	J	Q (g/sec)	Q(L/hr.)
9.00	20	10	211	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0071	0.0041	0.1098	0.3954
9.30	20	10	203	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0073	0.0043	0.1141	0.4109
10.00	20	10	198	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0075	0.0044	0.1170	0.4213
10.30	20	10	189	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0079	0.0046	0.1226	0.4414
11.00	20	10	177	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0084	0.0049	0.1309	0.4713
11.30	20	10	157	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0096	0.0056	0.1476	0.5314
12.00	20	10	147	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0102	0.0061	0.1576	0.5675
12.30	20	10	148	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0101	0.0059	0.1566	0.5637
13.00	20	10	174	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0086	0.0050	0.1331	0.4794
13.30	20	10	194	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0077	0.0045	0.1194	0.4300
14.00	20	10	216	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0069	0.0041	0.1073	0.3862
14.30	20	10	223	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0067	0.0039	0.1039	0.3741
15.00	20	10	239	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0063	0.0036	0.0969	0.3490
15.30	20	10	244	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0061	0.0036	0.0949	0.3419
16.00	20	10	263	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0057	0.0033	0.0881	0.3172
16.30	20	10	312	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0048	0.0028	0.0742	0.2674
17.00	20	10	325	1.4242	0.3351	2.9	0.2	0.0046	0.0027	0.0713	0.2567

ภาคผนวก ค.

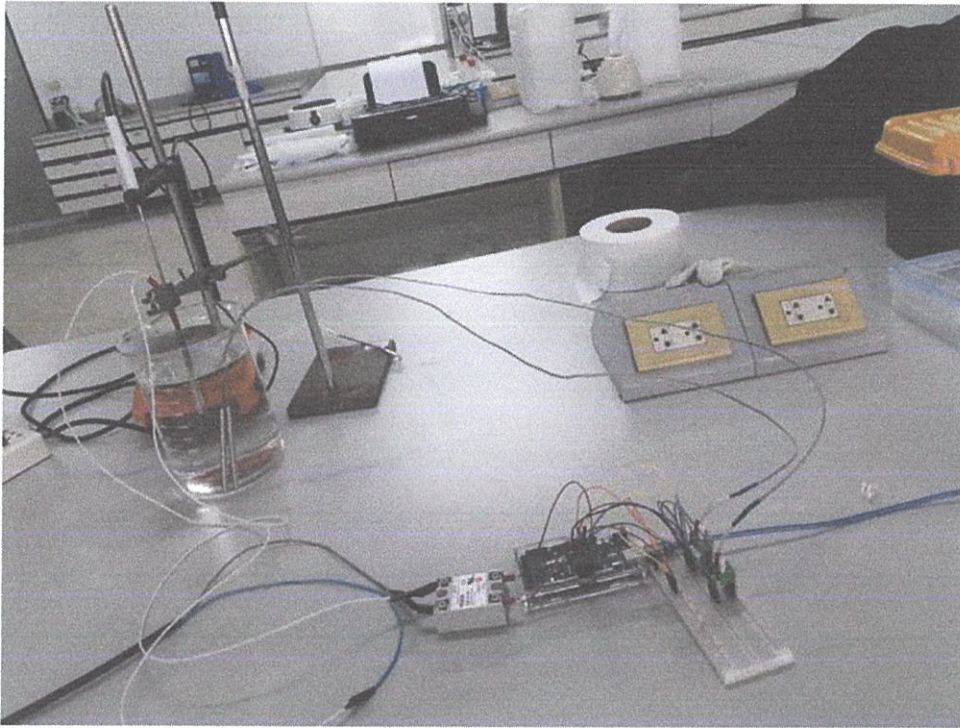
รูปภาพ



รูปที่1 เครื่องมือวัดอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช



รูปที่2 การออกแบบวงจร



รูปที่3 การทดสอบหัวพัลส์ความร้อน



รูปที่4 การวัดความลึกของกระพี้ไม้



รูปที่5 การทดลองวัดค่าอัตราการไหลของน้ำในต้นพืช



รูปที่6 เก็บตัวอย่างไม้สดมาอบแห้งเพื่อหาความหนาแน่นและความชื้น