



การพัฒนาศูนย์ภาวะวิกฤติการขาดน้ำ และการควบคุมการให้น้ำอัตโนมัติโดย
เซ็นเซอร์

วันวิสาข จันทิกา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาปฐพีศาสตร์

ชื่อเรื่อง
การพัฒนาดัชนีภาวะวิกฤติการขาดน้ำ และการควบคุมการให้น้ำอัตโนมัติโดย
เซ็นเซอร์

โดย
วันวิสาข์ จันทิกา

พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ อินทสาร)

วันที่ 15 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555

กรรมการที่ปรึกษา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร)

วันที่ 15 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555

กรรมการที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์สมชาย องค์กรประเสริฐ)

วันที่ 15 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555

ประธานกรรมการประจำหลักสูตร

(อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ อินทสาร)

วันที่ 15 เดือน ตุลาคม พ.ศ. 2555

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จาดุพงศ์ วาฤทธิ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 15 เดือน ต.ค. พ.ศ. 55

ชื่อเรื่อง	การพัฒนาดัชนีภาวะวิกฤติการขาดน้ำ และการควบคุมการให้น้ำอัตโนมัติโดยเซ็นซิโอมิเตอร์
ชื่อผู้เขียน	นายวันวิสาข์ จันทิกา
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาปฐพีศาสตร์
ประธานกรรมการที่ปรึกษา	อาจารย์ ดร.จิราภรณ์ อินทสาร

บทคัดย่อ

การเกษตรที่ใช้ปัจจัยต่างๆ รวมถึงน้ำตามความต้องการที่แท้จริงอย่างแม่นยำ (precision agriculture) จะทำให้ต้นทุนการผลิตและผลกระทบต่อภาวะแวดล้อมลดลง การใช้น้ำอย่างแม่นยำย่อมทำให้ประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงขึ้น การกำหนดเวลาการให้น้ำชลประทานอย่างเหมาะสมเป็นองค์ประกอบสำคัญอย่างหนึ่งของการใช้น้ำชลประทานอย่างแม่นยำ เมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีการวัดอุณหภูมิ โดยการวัดรังสี Infrared ที่แผ่ออกจากวัตถุได้อย่างแม่นยำ ทำให้มีแนวคิดที่จะใช้อุณหภูมิของใบหรือเรือนยอดของพืชเป็นดัชนีความเครียดการขาดน้ำของพืช และกำหนดเวลาให้น้ำจากดัชนีความเครียดการขาดน้ำของพืชนี้ ขณะเดียวกันมีการพัฒนาหน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit) ที่สามารถเปิดหรือปิดระบบการให้น้ำอัตโนมัติโดยใช้แรงดันน้ำในท่อระดับต่ำคือ 0.05 – 0.2 MPa โดยไม่ต้องใช้ไฟฟ้าซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่การเกษตรที่ห่างไกลได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาดัชนีภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำของพืชโดยกล้องภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (infrared thermal images) 2 รุ่น และประเมินประสิทธิภาพของ หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ที่สามารถเปิดระบบการให้น้ำอัตโนมัติโดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า จากผลการทดลองสรุปได้ว่ากล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl (Infratec, Germany) สามารถใช้วัดอุณหภูมิเรือนยอดของพืช เพื่อหาค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชคำนวณตามวิธีการที่พัฒนาโดย Jones (1999) ได้ อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่าความนำของปากใบที่วัดโดย porometer รุ่น SC-1 แต่ไม่มีประสิทธิภาพเท่ากล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden) ซึ่งมีราคาถูกกว่ามาก อาจจะเนื่องจากพื้นที่ในการศึกษานี้เล็กกว่าที่ Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl จะวัดอุณหภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit, TCU) ยังมีปัญหาอยู่บ้าง แต่เมื่อแก้ปัญหาแล้ว การควบคุมการให้น้ำก็ทำได้ดี

Title	Development of Stress Index and Automatic Irrigation Control by Tensiometer
Author	Mr. Wanwisa Jantika
Degree of	Master of Science in Soil Science
Advisory Committee Chairperson	Dr. Jiraporn Inthasan

ABSTRACT

Precision agriculture – agriculture with accurately use production factors based on physiological needs of plants, would result in minimized production cost and environmental effects. Precision water usage will increase water usage efficiency. Optimum irrigation scheduling is one important factor in precision irrigation water usage especially when there is development of infrared thermal camera technology for measuring temperature, by precision measuring of crop water stress index (CWSI) in leaves or canopies including the time scheduling of providing water. At the same time, the development of alternative tensiometer control unit (TCU), was able to provide automatic opening and closing of watering system through low water pressure in the pipe system of about 0.05-0.2 MPa which could be operated without electricity, thus could be used in remote areas. This study was aimed at investigating CWSI of controlled plan measures with 2 versions of infrared thermocameras and evaluating the efficiency of non-electric TCU in controlling irrigation scheduling. It was revealed that canopy temperature of the studied plants measured by an infrared thermo-camera, VarioCAMHiRes 384 sl (Infratec, Germany), could be efficiently used for the calculation of CWSI by using the method developed by Jones (1999). The CWSI was more efficient than stomatal conductance measurement by porometer SC-1 in indicating crop water stress. But the above mentioned thermo-camera was considered less efficient than the much cheaper thermocamera, InfraCAM SD (FLIR, Sweden). The probable explanation might be that the studied area in this study was too small for the VarioCAMHiRes 384 sl camera to measure temperature. Although the newly developed non-electric TCU had some problems, however, after the fixing of the problems, it worked well as expected.

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.จิราภรณ์ อินทสาร ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา และแนะนำ ตลอดจนการตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สมชาย องค์กรประเสริฐ เป็นอย่างยิ่งที่ได้ให้ความรู้ คำปรึกษาและแนะนำมาโดยตลอดตั้งแต่เริ่มต้นทำวิทยานิพนธ์ จนวิทยานิพนธ์เล่มนี้เสร็จสมบูรณ์ และ ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปฏิภาณ สุทธิกุลบุตร กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษาและเสนอแนวความคิดที่เป็นประโยชน์ในการเขียนเล่มวิทยานิพนธ์ให้เสร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ และบุคลากรสาขาวิชาทรัพยากรดินและสิ่งแวดล้อมทุกท่านที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ Dr. Wolfram Speer และโครงการอพแลนค์ โปรแกรม ที่ให้ความรู้คำแนะนำทางด้านภาพถ่ายรังสีอินฟราเรด และการแปลข้อมูลของอุณหภูมิใบพืช และงบประมาณสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ วินัย วิริยะอลงกรณ์ ที่ให้ความรู้และความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลต่างๆในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อคุณแม่ ที่สนับสนุนด้านค่าใช้จ่ายในการศึกษา และให้กำลังใจมาโดยตลอดที่ผ่านมา

วันวิสาข จันติกา

ตุลาคม 2555

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
ABSTRACT	(4)
กิตติกรรมประกาศ	(5)
สารบัญ	(6)
สารบัญตาราง	(8)
สารบัญภาพ	(10)
สารบัญตารางผนวก	(13)
บทที่ 1 บทนำ	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร	3
ความเครียดจากการขาดน้ำของพืช	3
วิธีวัดความเครียดจากการขาดน้ำของพืช	3
การถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด	6
ทฤษฎีการกำหนดค่าวิกฤติของน้ำในพืชจากอุณหภูมิใบ	6
การวิจัยในการใช้ดัชนีความเครียดน้ำของพืชในการให้น้ำกับพืชต่างๆ	10
การวัดความชื้นดินโดยใช้ tensiometer	11
ชลประทานอัตโนมัติ (Irrigation Automation)	11
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการ	13
การจัดเตรียมอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการทดลองทุกการทดลอง	13
การวางแผนการทดลองที่ 1 การศึกษาดัชนีภาวะวิกฤติจากการขาดน้ำของ	
ผักนึ่งโดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden)	19
การวางแผนการทดลองที่ 2 การศึกษาดัชนีภาวะวิกฤติจากการขาดน้ำ	
ของผักนึ่งโดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAM HiRes 384 sl	
(Infratec, Germany)	22
การวางแผนการทดลองที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของ Tensiometer	
Control Unit (TCU) ในการควบคุมการให้น้ำ	24

	(7)
	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิจารณ์	26
ผลการทดลองที่ 1 การศึกษาดัชนีความเครียดน้ำของพืชของผักนึ่ง	
โดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden)	26
ผลการทดลองที่ 2 การศึกษาดัชนีความเครียดน้ำของพืชของผักนึ่ง	
โดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAM HiRes 384 sl	
(Infratec, Germany)	47
ผลการทดลองที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของ Tensiometer	
Control Unit (TCU)	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	75
การทดลองที่ 1 การศึกษาดัชนีความเครียดน้ำของพืชของผักนึ่ง	
ใช้กล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden)	75
การทดลองที่ 2 การศึกษาดัชนีความเครียดของน้ำในพืชของผักนึ่งโดยใช้กล้อง	
Thermocamera รุ่น VarioCAM HiRes 384 sl (Infratec, Germany)	76
การทดลองที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของ Tensiometer	
Control Unit (TCU)	77
บรรณานุกรม	78
ภาคผนวก	81
ภาคผนวก ก ตารางผนวก	82
ภาคผนวก ข ประวัติผู้วิจัย	101

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
1	การจำแนกดิน สถานที่เก็บตัวอย่างดิน และประวัติการใช้พื้นที่	13
2	คุณสมบัติทางเคมีของดิน	14
3	คุณสมบัติทางกายภาพที่ความลึก 0-20 ซม.	15
4	ข้อมูลจำเพาะของกล้อง	21
5	สภาพภูมิอากาศในโรงเรือน ระหว่างการทดลองที่ 1	26
6	อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินน้ำพอง	30
7	อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินน้ำพาเชิงซ้อน	31
8	อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินคอปุย	32
9	ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 1	33
10	ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 1	34
11	ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 1	34
12	ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1	35
13	ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 1	37
14	ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 1	37
15	ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 1	38
16	ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) วันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1	38
17	ความเครียดเมทริก (metric suction) ของความขึ้นดินเป็นรายวันในแปลง ที่ถ่วงค้ำน้ำ	42
18	สภาพภูมิอากาศระหว่างการทดลองที่ 2	47
19	อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินน้ำพอง	50
20	อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกใน ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	51

ตาราง		หน้า
21	อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินคอกขุยมุ่ย	52
22	ค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI) วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2	53
23	ค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI) วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2	53
24	ค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI) วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2	54
25	ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2	56
26	ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2	56
27	ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol/m}^2\text{s}$) วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2	57
28	ความเครียดเมทริก (metric suction) ก่อนให้น้ำ จากแปลงควบคุมและแปลงวิกฤติ	61
29	ปริมาณน้ำที่ให้ต่อกระบะทดลอง	71
30	น้ำหนักสดของกะหล่ำ	73

สารบัญภาพ

ภาพ		หน้า
1	ภาพแผนผังแปลงทดลองด้านบนของแปลงทดลอง	15
2	ภาพด้านข้างแปลงทดลอง แสดงการบรรจุดินเรียงเป็นชั้น ตามธรรมชาติ	15
3	แผนผังการติดระบบน้ำ	17
4	ภาพองค์ประกอบหลักของ TCU	17
5	การควบคุมการให้น้ำด้วย TCU	18
6	ภาพถ่ายกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนทั้ง 2 ชนิด	21
7	การปลูกผักบุ้งจีนเป็นพืชทดลองของการทดลองที่ 1 และ 2 (พร้อมด้วยชุดเครื่องมือตรวจอากาศ weather station)	23
8	การปลูกกะหล่ำทดลอง	25
9	การออกแบบการทดลองระบบให้น้ำกระบะทดลอง	25
10	ภาพถ่ายของแปลงผักบุ้งในชุดดินน้ำพอง เมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2554 เวลา 12.00 น.	27
11	ภาพถ่ายของแปลงผักบุ้งในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน เมื่อวันที่ 12 มีนาคม 2554 เวลา 12.00 น.	28
12	ภาพถ่ายของแปลงผักบุ้งใน ชุดดินคอกปุ๋ยเมื่อวันที่ 11 มีนาคม 2554 เวลา 12.00 น.	29
13	แนวโน้มของค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืชของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำรายวันเฉลี่ย 3 दिन	36
14	ความนำของปากใบ พืช (Stomata Conductance) ของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำรายวันเฉลี่ย 3 दिन	39
15	ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบ ในชุดดินน้ำพอง	40
16	ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบ ในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	40
17	ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบ ในชุดดินคอกปุ๋ย	41

ภาพ		หน้า
18	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความเครียดเมทริก ของดินแต่ละชุดดินจากแปลงวิกฤติของ ชุดดินน้ำพอง	43
19	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความเครียดเมทริก ของดินแต่ละชุดดินจากแปลงวิกฤติของ ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	43
20	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความเครียดเมทริก ของดินแต่ละชุดดินจากแปลงวิกฤติของ ชุดดินคอกปุ๋ย	44
21	ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบของพืช กับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินน้ำพอง	45
22	ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบของพืช กับ ความเครียดเมทริก ในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	45
23	ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบของพืช กับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินคอกปุ๋ย	46
24	ภาพถ่ายจากกล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAM HiRes 384 sl	48
25	แนวโน้มของค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืชของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่ เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำเฉลี่ย 3 ดินรายวัน	55
26	ความนำของปากใบ (Stomata Conductance) ของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่ เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำรายวันเฉลี่ย 3 ดิน	58
27	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความนำปากใบของพืช วิกฤติ ในชุดดินน้ำพอง	59
28	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความนำปากใบของพืช ในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	59
29	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความนำปากใบของพืช ในชุดดินคอกปุ๋ย	60
30	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียด เมทริกจากแปลงวิกฤติในชุดดินน้ำพอง	62
31	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียด เมทริกจากแปลงวิกฤติในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	62
32	ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียด เมทริกจากแปลงวิกฤติในชุดดินคอกปุ๋ย	63

ภาพ		หน้า
33	ความสัมพันธ์ ความน่าเชื่อถือของปากใบกับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินน้ำพอง	64
34	ความสัมพันธ์ ความน่าเชื่อถือของปากใบกับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินน้ำพองดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	64
35	ความสัมพันธ์ ความน่าเชื่อถือของปากใบกับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินน้ำพองชุดดินคอกปุ๋ย	65
36	ความเครียดของความชื้นดินและการปิดเปิดประตุน้ำของกระบะคอกปุ๋ย ระหว่าง 12 -17 มีนาคม 2553	66
37	ความเครียดของความชื้นดินและการปิดเปิดประตุน้ำของกระบะคอกปุ๋ย ระหว่าง 17 -30 มีนาคม 2553	67
38	ความเครียดของความชื้นดินและการปิดเปิดประตุน้ำของกระบะดินคอกปุ๋ย ระหว่าง 30 มีนาคม – 8 เมษายน 2553	68
39	ความเครียดของความชื้นดินและการปิดเปิดประตุน้ำของกระบะชุดดินน้ำพอง ระหว่าง 17 -30 มีนาคม 2553	69
40	ความเครียดของความชื้นดินและการปิดเปิดประตุน้ำของกระบะชุดดินน้ำพอง ระหว่าง 30 มีนาคม – 8 เมษายน 2553	69
41	ปริมาณการใช้น้ำสะสม ระหว่างวันที่ 13 กรกฎาคม – 4 สิงหาคม 2553	72
42	ความเครียดของความชื้นดิน จากการให้น้ำทั้ง 2 ระบบ	74

สารบัญตารางผนวก

ตารางผนวก		หน้า
1	ค่าความชื้นดินที่วัดได้จาก Tensiometer ก่อนให้น้ำ ช่วงก่อนเกิดวิกฤติ และหลังวิกฤติ ของการทดลองที่ 1	83
2	ค่าความชื้นดินที่วัดได้จาก Tensiometer (เซ็นติบาร์) ก่อนให้น้ำ ของการทดลองที่ 2	85
3	ข้อมูลภูมิอากาศรายวันจาก data logger ที่ติดตั้งไว้ ของการทดลองที่ 1	87
4	ข้อมูลน้ำระเหยจากถาดวัดการคายระเหยรายวันของการทดลองที่ 1	90
5	ข้อมูลภูมิอากาศรายวันจาก data logger ที่ติดตั้งไว้ของการทดลองที่ 2	91
6	ข้อมูลน้ำระเหยจากถาดวัดการคายระเหยรายวันของการทดลองที่ 2	93
7	Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ย ของวันที่ 1-3ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B	94
8	Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ย ของวันที่ 4-6ของการทดลอง โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B	94
9	Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ย ของวันที่ 7-9ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B	95
10	Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ย ของวันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B	95

- 11 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ย
ของวันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A
และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน
และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B 96
- 12 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ย
ของวันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A
และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน
และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B 96
- 13 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ย
ของวันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A
และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน
และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B 97
- 14 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ย
ของวันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A
และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน
และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B 97
- 15 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ย
ของวันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A
และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน
และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B 98
- 16 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ย
ของวันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A
และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน
และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B 98
- 17 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ย
ของวันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A
และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน
และชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B 99

ตารางผนวก

หน้า

18	Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ย ของวันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และชุดดินคอปุย) เป็นปัจจัย B	99
19	Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ย ของวันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และชุดดินคอปุย) เป็นปัจจัย B	100
20	Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ย ของวันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และชุดดินคอปุย) เป็นปัจจัย B	100

บทที่ 1

บทนำ

ความต้องการใช้น้ำเพื่อกิจกรรมแต่ละสาขามีมากขึ้นเรื่อยตามปริมาณประชากร และระดับการพัฒนาที่เพิ่มขึ้น ปัจจุบันสาขาการเกษตรเป็นกิจกรรมทางเศรษฐกิจที่ใช้ทรัพยากรน้ำมากที่สุดโดยคิดเป็นประมาณร้อยละ 70 ของความต้องการน้ำทั้งหมดทำให้มีแนวคิดถึงการเกษตรที่มีการใช้ปัจจัยต่างๆ รวมถึงน้ำตามความต้องการแท้จริงอย่างแม่นยำ (precision agriculture) การใช้น้ำอย่างแม่นยำจะทำให้ประสิทธิภาพการใช้น้ำสูงขึ้น มีผลให้สามารถขยายพื้นที่ชลประทานได้มากขึ้นด้วยต้นทุนน้ำเท่าเดิม การกำหนดเวลาการให้น้ำชลประทานที่เหมาะสมเป็นองค์ประกอบสำคัญหนึ่งของการให้น้ำชลประทานอย่างแม่นยำ การกำหนดเวลาการให้น้ำแก่พืชอย่างเหมาะสมที่ได้รับการพัฒนาและใช้กันแล้วในไร่นาเป็นวิธีกำหนดโดยอ้อมผ่านข้อมูลภูมิอากาศและความชื้นดินการกำหนดเวลาการให้น้ำจากข้อมูลภูมิอากาศใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical models) เป็นการประเมินความสมดุลของน้ำ (water balance) ระหว่างค่าการคายระเหยจริงของพืช (Actual crop evapotranspiration) กับความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ที่ (Available moisture capacity) ในเขตรากพืช เมื่อพบว่าการคายระเหยจริงของพืชมากกว่าความจุความชื้นที่เป็นประโยชน์ที่ ในเขตรากพืช ก็ต้องให้น้ำครั้งใหม่แก่พืช

การวัดสถานะความชื้นดินในเขตรากเป็นอีกวิธีหนึ่งในการกำหนดเวลาการให้น้ำแก่พืช การวัดสถานะความชื้นดินมีทั้งการวัดเป็นปริมาณความชื้นดิน (soil moisture content) และการวัดความเครียดของความชื้น (soil moisture tension) ด้วยเครื่องมือต่างๆ เช่น neutron moisture meter, time domain reflectometer และ tensiometer เป็นต้น เมื่อพบว่าระดับความชื้นดินต่ำกว่าหรือระดับความเครียดของความชื้นสูงกว่าระดับหนึ่งที่เหมาะสมกับชนิดพืชที่ปลูกในดินชนิดหนึ่ง ก็ต้องให้น้ำแก่พืชก็จะให้น้ำแก่พืช ซึ่งการประเมินความต้องการน้ำโดยอ้อมผ่านข้อมูลภูมิอากาศและความชื้นดิน อาจจะยังไม่เป็นการกำหนดเวลาให้น้ำอย่างแม่นยำตามแนวทางของ precision agriculture

มีความพยายามที่จะกำหนดเวลาให้น้ำอย่างแม่นยำโดยการประเมินระดับความเครียดของน้ำในพืช (crop water stress) โดยตรง การวัดระดับความเครียดของน้ำในพืชโดยตรง โดยใช้เครื่องมือ เช่น pressure chamber ซึ่งวิธีที่ต้องทำลายตัวอย่างพืช (intrusive method) ที่ละตัวอย่าง และทำได้ช้ากว่าที่จะใช้จริงในไร่นาการวัดอัตราการคายน้ำของพืชผ่านปากใบ ที่เรียก leaf water conductance ด้วยเครื่องมือ leaf porometer สามารถทำได้เร็วขึ้น แต่ก็ยังต้องวัดที่ละใบ และ leaf water conductance ผันแปรตามตำแหน่งของใบที่ได้รับแสงอาทิตย์ต่างกันอย่างยิ่ง เมื่อมี

การพัฒนาเทคโนโลยีการวัดอุณหภูมิของวัตถุต่างๆ โดยการวัดรังสี Infrared ที่แผ่ออกจาก วัตถุได้อย่างแม่นยำ ทำให้มีแนวคิดที่จะใช้อุณหภูมิของใบหรือเรือนยอดของพืชเป็นดัชนีที่แสดงถึงภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำของพืช โดยมีสมมุติฐานว่าเมื่อพืชมีภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำ การคายน้ำผ่านปากใบของพืชจะลดลง ทำให้อุณหภูมิใบหรือเรือนยอดโดยเฉลี่ยสูงขึ้นจากภาวะปกติ

Tensiometer ก็เป็นเครื่องมือวัดความเครียดของน้ำในดินชนิดหนึ่ง ที่สามารถพัฒนาให้เป็นอุปกรณ์ควบคุมการให้น้ำอัตโนมัติ ตามแนวคิด precision agriculture ได้ กำหนดเวลาการให้น้ำจะแตกต่างกันออกไปตามชนิดของพืช พืชที่ไวต่อการขาดน้ำก็จะต้องให้น้ำที่ความเครียดต่ำกว่าพืชที่ไม่ไวต่อการขาดน้ำ TCU ที่มีการพัฒนาจนสามารถใช้ในไร่นาแล้วเป็น TCU ที่ต้องใช้ไฟฟ้าเป็นพลังงานเพื่อเปิดหรือปิดระบบการให้น้ำอัตโนมัติ ซึ่งสามารถใช้ได้ดีในพื้นที่การเกษตรใกล้เมืองที่มีไฟฟ้า สถาบันวิศวกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยโฮเซน ฮาร์ม ประเทศเยอรมัน ได้พัฒนาเครื่องต้นแบบของหน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit, TCU) ที่สามารถเปิดหรือปิดระบบการให้น้ำอัตโนมัติโดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่การเกษตรห่างไกลได้

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาดัชนีภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำของพืชโดยภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (infrared thermal images)
2. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของหน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit, TCU) ที่สามารถเปิดระบบการให้น้ำอัตโนมัติโดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า

บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ความเครียดจากการขาดน้ำของพืช (Crop water stress)

ความเครียดจากการขาดน้ำของพืชเกิดขึ้นเนื่องจากความต้องการการคายระเหยน้ำของอากาศมากกว่าอัตราการควบแน่นของรากพืช ส่งผลให้การคายระเหยน้ำของเรือนยอดของพืชลดลง เพราะว่าการเคลื่อนที่ของน้ำทางกายภาพใน xylem ถูกจำกัด (Giuliani et al., 2001) อีกนัยหนึ่งการขาดน้ำหมายถึงภาวะที่ศักย์ของน้ำ (water potential) ของเซลล์ เนื้อเยื่อ หรืออวัยวะของพืชลดลงต่ำกว่าค่าอ้างอิง (reference value) ของศักย์เท่ากับศูนย์ (zero potential) ที่ศักย์ของน้ำในพืชเท่ากับศูนย์ เซลล์แต่ละเซลล์จะเต่งเต็มที่ (Slatyer, 1969) การขาดน้ำทำให้ปากใบพืชเปิดแคบลงหรือปิด เพื่อลดการคายน้ำ ขณะเดียวกันก็ทำให้กระบวนการสังเคราะห์แสงลดลง การขาดน้ำของพืชจึงส่งผลให้การเผาผลาญและสรีรวิทยาของพืชถูกรบกวนทำให้การเจริญเติบโต (growth) และพัฒนาการ (development) ของพืชลดลง ความเครียดน้ำของพืชมีผลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช ถ้าพืชขาดน้ำในช่วงออกดอกจะทำให้ผลผลิตพืชลดลงเนื่องจากพืชออกดอกได้น้อยลง และพืชบางส่วนอาจจะเหี่ยวจึงส่งผลให้ผลผลิตลดลง (Metin et al., 2005) ถ้าหากพืชเกิดการขาดน้ำในช่วงที่พืชมีการพัฒนาของหวั่นจะทำให้ผลผลิตของพืชลดลง 50 % (Theodore et al., 2005)

วิธีวัดความเครียดจากการขาดน้ำของพืช

วิธีวัดหรือแสดงความเครียดจากการขาดน้ำของพืช มีหลายวิธี เช่น วัดศักย์ของน้ำในพืชโดยตรง วัดสัมประสิทธิ์การเปิดปิดปากใบของพืช และวัดอุณหภูมิใบหรือเรือนยอดของพืช เป็นต้น

การวัดศักย์ของน้ำในพืชโดยตรง

วัดศักย์ของน้ำในพืชโดยตรงโดย Pressure chamber เป็นวิธีมาตรฐานในการวัดความเครียดน้ำของพืชบางครั้งถูกใช้ในการกำหนดการให้น้ำแก่พืช แต่วิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องทำลายตัวอย่างพืชที่ทดสอบ และใช้เวลานาน (Smart et al., 2004 Cited by Grant et al., 2006) แต่วิธีที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือวิธีใช้ท่อความดัน (Pressure chamber) ซึ่งไม่จำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิขณะ

ทำการวัด จึงใช้ได้ดีในสภาพแปลงทดลอง เทคนิคของวิธีนี้คือ นำขอดหรือใบพืชจะถูกใส่ในท่อความดันและปลายก้านใบจะโผล่ขึ้นมาเหนือลูกยางที่อุดฝาท่อความดันความดันในท่อความดันจะถูกเพิ่มขึ้นช้าๆ โดยใช้ก๊าซไนโตรเจนซึ่งบรรจุในท่อจนกระทั่งน้ำในพืช (sap) ถูกดันออกมาจากก้านใบวิธีนี้จะทำการวัดได้เร็วคือประมาณ 20-30 ตัวอย่างต่อชั่วโมงการสังเกตน้ำที่ถูกขับออกจากก้านใบนิยมใช้กล้องจุลทรรศน์หรือเลนส์ขยายส่องดู และการใช้ท่อความดันนั้นต้องการความพิถีพิถันในการวัดดังต่อไปนี้คือป้องกันการสูญเสียจากใบพืชทางการคายน้ำโดยคลุมใบพืชด้วยแผ่นพลาสติกบางๆป้องกันการรั่วของก๊าซออกจากท่อความดันซึ่งมักจะพบในการใช้ท่อความดันที่เก่าควรตัดใบหรือก้านใบเพียงครั้งเดียวเพื่อไม่ทำให้เกิดรอยตัดซ้ำและเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการวัดไม่ควรใช้ก้านใบหรือใบที่ยาวเกินไปการเพิ่มความดันในท่อความดันควรทำอย่างช้าๆเนื่องจากการใช้ความดันที่เร็วเกินไปจะทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ถูกต้องดังนั้นเพื่อความถูกต้องอัตราความดันที่ใช้ควรควบคุมให้อยู่ระหว่าง 0.003 ถึง 0.005 MPa ต่อวินาที (สายัณห์, 2537)

การวัดความนำปากใบ

การวัดความนำปากใบของพืชโดย Leaf diffusion porometers เป็นการตรวจสอบการเปิดปิดปากใบของพืชสามารถแสดงถึงความเครียดน้ำของพืชได้คือเมื่อพืชเครียดค่าสัมประสิทธิ์การเปิดปิดปากใบก็จะน้อย แต่ถ้าไม่เครียดเรือนยอดของพืชก็จะเปิดปากใบมากค่าความนำของปากใบก็จะสูง (Fuchs, 1990) ในบางครั้งวัดความนำของปากใบของพืชถูกใช้ในการควบคุมระยะเวลาการให้น้ำของพืชในการผลิตพืชที่มีคุณภาพสูงเช่น องุ่น แต่อย่างไรก็ตามวิธีแบบเดิมในวัดความนำของปากใบนี้ต้องใช้เวลาและแรงงานมากในการวัดแต่ละครั้ง (Dry et al., 2001)

การวัดอุณหภูมิพืชด้วย Thermal infrared thermometer

อุณหภูมิใบหรืออุณหภูมิเรือนยอดของพืชโดยรวมสามารถใช้เป็นดัชนีแสดงความเครียดของน้ำในพืช โดยสมมุติฐานที่ว่า การคายน้ำของใบพืชมีผลให้อุณหภูมิใบลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ แต่เมื่อพืชมีความเครียดจากการขาดแคลนน้ำ การคายน้ำของพืชลดลง อุณหภูมิใบหรือเรือนยอดของพืชโดยรวมจะสูงขึ้นกว่าพืชที่ไม่มีความเครียดจากการขาดแคลนน้ำแนะนำการใช้ Thermo camera ในการวัดอุณหภูมิบริเวณทรงพุ่ม หรืออุณหภูมิใบ ซึ่งในสภาวะขาดน้ำของพืช อุณหภูมิของใบ หรือทรงพุ่มจะสูงขึ้น และอุณหภูมิที่สูงขึ้นนี้จะสัมพันธ์กับค่า ศักย์ของน้ำในใบที่ลดลงด้วย ดังนั้นจึงสามารถใช้เครื่องมือนี้ในการวัดอุณหภูมิของใบพืชเพื่อคำนวณค่า CWSI ของ

พืชที่ขาดน้ำในช่วงฤดูปลูกเพื่อที่จะกำหนดการให้น้ำแก่พืชได้เมื่อค่า CWSI ถึงค่าวิกฤตของการขาดน้ำของพืช และเครื่องมือนี้เป็นเครื่องมือที่ใช้ได้สะดวกและวัดได้รวดเร็วในสภาพแปลงปลูก

การปิดของปากใบภายใต้การขาดน้ำทำให้การคายน้ำน้อยลง อุณหภูมิใบพืชจึงสูงขึ้นดังนั้นอุณหภูมิใบพืช หรืออุณหภูมิเรือนยอดของพืชจึงสามารถใช้เป็นดัชนีชี้ความเครียดน้ำของพืชและการปิดเปิดปากใบของพืช นอกจากนี้ภาพถ่ายความร้อนทำให้เก็บข้อมูลอุณหภูมิใบหรือเรือนยอดของพืชได้รวดเร็วและทั่วพื้นที่ (Grant et al., 2006) วิธีนี้จึงมีความน่าเชื่อถือและได้รับการยอมรับมานานแล้วเนื่องจากไม่มีการตัดหรือรบกวนพืชในการวัดเหมือนการวัดศักย์ของน้ำในพืชและเป็นการวัดในพื้นที่เพียงไม่กี่จุดจากการถ่ายภาพข้อต่อของวิธีนี้คือในพื้นที่ใหญ่ๆจะมีความแปรปรวนของน้ำในดินและความหนาแน่นของพืชสูงในการวัดในพื้นที่แค่นี้ปัจจุบันข้อจำกัดเหล่านี้ได้รับการแก้ไขเพื่อให้สามารถใช้ในพื้นที่การเกษตรได้อย่างง่ายดายและได้รับการยอมรับมากขึ้น (Evans et al., 2000 Cited by Alchanatis et al., 2010) ภาพถ่ายความร้อนได้ถูกพัฒนาโดยนักวิจัยที่เชี่ยวชาญทำให้แยกอุณหภูมิใบพืชได้แม่นยำ อย่างไรก็ตามการทดสอบภาพถ่ายความร้อนกับวิธีทางสรีรวิทยาแบบเดิมภายใต้สภาพพื้นที่ยังคงต้องจำเป็นสำหรับชนิดพืชที่แตกต่างกัน ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิใบหรืออุณหภูมิเรือนยอดต่ออุณหภูมิพื้นที่ผิวอ้างอิงจะมีความแปรปรวนของอุณหภูมิอากาศ การแผ่รังสี และความเร็วลม ดังนั้นความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมจึงส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของการเปิดปิดปากใบ (Jones, 1999)

มีความพยายามที่วัดอุณหภูมิใบพืชด้วยวิธีการต่างๆ เช่น ใช้ Thermocouple Psychrometer มากกว่าหนึ่งศตวรรษแล้ว แต่ด้วยข้อจำกัดของวิธีที่วัดต้องแยกเป็นใบๆ ทำให้ไม่สามารถใช้วิธีวัดอุณหภูมิใบเป็นวิธีแสดงภาวะขาดน้ำของพืชได้ เมื่อมีการพัฒนาวิธีวัดอุณหภูมิจากการแผ่รังสีอินฟราเรด ซึ่งสามารถวัดอุณหภูมิเรือนยอด จึงสามารถพัฒนาวิธีแสดงภาวะการขาดน้ำของพืชจากอุณหภูมิของใบหรือเรือนยอดของพืช (Tanner, 1963)

การถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared thermo-image)

การถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด (Infrared thermo-image) เป็นเครื่องมือที่สามารถใช้วัดอุณหภูมิใบหรืออุณหภูมิเรือนยอดของพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่าเทอร์โมมิเตอร์ต่างๆ โดยสามารถวัดอุณหภูมิใบแต่ละใบหรือเรือนยอดของพืชโดยรวม โดยไม่ต้องสัมผัสโดยตรง หรือวัดได้จากระยะไกล (remote sensing) กล้องถ่ายภาพความร้อนรังสีอินฟราเรดวัดปริมาณรังสีที่แผ่จากพื้นผิววัตถุต่างๆ ซึ่งปริมาณรังสีมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของผิววัตถุ ตามกฎ the Stefan-Boltzmann blackbody law (Jackson, 1982)

$$R = \sigma T^4$$

เมื่อ R คือ ปริมาณรังสีที่แผ่จากพื้นผิว ($W m^{-2}$)

σ คือ emissivity ของพื้นผิว หรือ Stefan-Boltzmann constant ($5.674 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$)

T คือ อุณหภูมิของพื้นผิว ($^{\circ}K$)

วัตถุต่างๆ ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า $0^{\circ}K$ ต่างมีการแผ่รังสีในย่านความยาวคลื่น 8 ถึง $13 \mu m$ ซึ่งเป็นย่านของรังสีอินฟราเรด (infrared radiation) ปริมาณรังสีที่วัตถุแผ่ร่อนออกแผ่แปรตามอุณหภูมิ เมื่อแปลงภาพที่ถ่ายด้วยรังสีอินฟราเรดเป็นภาพของรังสีที่มองเห็น (visible spectrum) โดยทั่วไปมักทำเป็นภาพสีเดียว (monochrome) แต่ปัจจุบันนิยมทำเป็นภาพสีเทียม (pseudo-color) โดยส่วนที่อุณหภูมิสูงของภาพแสดงเป็นสีขาว ส่วนที่อุณหภูมิต่ำแสดงเป็นสีเหลือง และส่วนที่อุณหภูมิต่ำแสดงเป็นสีฟ้า

ทฤษฎีของการกำหนดค่าวิกฤติของน้ำในพืชจากอุณหภูมิใบ

Idso et al. (1981) และ Jackson et al. (1981) ได้ตั้งสูตรสำหรับคำนวณกำหนดค่าวิกฤติของน้ำในพืชจากอุณหภูมิใบพืช ซึ่งสูตรประเภท empirical formular ไว้ดังนี้

$$CWSI = \frac{(T_s - T_{base})}{(T_{max} - T_{base})}$$

เมื่อกำหนดให้

- T_s คือค่าอุณหภูมิเรือนยอดพืชที่วัดได้ตามสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ
- T_{max} คือค่าอ้างอิงอุณหภูมิสูงสุดของเรือนยอดที่เป็นไปได้ตามสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ เมื่อใบพืชไม่คายน้ำได้เลย
- T_{base} คือค่าอุณหภูมิอ้างอิงต่ำสุดของเรือนยอดที่เป็นไปได้ตามสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ เมื่อใบพืชคายน้ำได้เต็มที่ คือปากใบเปิดมากที่สุดและไม่มีภาวะความเครียดของน้ำในพืช

Jones (1999) ได้พัฒนาสูตรคำนวณแบบ empirical formular ข้างต้นต่อโดยเสริมทฤษฎีสมมูลพลังงานและ aerodynamics ของการเคลื่อนที่ของไอน้ำในอากาศ โดยถ่วงน้ำหนักอุณหภูมิอ้างอิงของพืชที่ได้รับน้ำดี ใช้เป็นพื้นผิวที่เปียก นำมาสร้างสมการสมมูลพลังงานพื้นฐานเพื่อคำนวณความต้านทานของทรงพุ่มต่อการคายน้ำ ค่าตามทฤษฎีของอุณหภูมิใบ หรืออุณหภูมิผิวอ้างอิงสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการปรับปรุงใหม่ของสมมูลพลังงานของใบ

$$T_l - T_a = \frac{r_{HR}(r_{aw} + r_{lw})YR_{ni}}{\rho C_p[Y(r_{aw} + r_{lw}) + S r_{HR}]} - \frac{r_{HR}\delta_e}{Y(r_{aw} + r_{lw}) + S r_{HR}} \quad (2)$$

เมื่อกำหนดให้

- $T_l - T_a$ คือ ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิใบกับอุณหภูมิอากาศ
- r_{lw} คือ ความต้านทานของใบต่อการคายน้ำ
- r_{aw} คือ ความต้านทานของ leaf boundary layer ต่อการคายน้ำ
- R_{ni} คือ net isothermal radiation
- δ_e คือ การขาดความชื้นไอของอากาศ
- r_{HR} คือ ความต้านทานในแนวนอน ต่อความร้อนและการถ่ายเทการแผ่รังสี
- γ คือ psychrometric constant
- ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ
- C_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของอากาศ
- S คือ ความชันของกราฟความสัมพันธ์ของความชื้นไอน้ำอิมิตัวกับอุณหภูมิ

สำหรับการวิเคราะห์ leaf boundary layer resistance ต่อการถ่ายโอนความร้อน (r_{aH}) เป็นการประมาณโดยใช้สมการ

$$r_{aH} = 100 \sqrt{\left(\frac{d}{U}\right)} \quad (3)$$

เมื่อความต้านทานแสดงในหน่วย s/m และ d คือความเร็วลม (m/s)

สำหรับผิวที่แห้งคุณสมบัติการแผ่รังสีและการไหลของอากาศจะเหมือนกับการสูญเสียความร้อนที่เหมาะสมซึ่งจะเท่ากับการดูดซึมรังสีสุทธิ ดังนั้นใช้หลักการของ net isothermal radiation สามารถประมาณ T_{dry} จากสมการ

$$T_{max} - T_a = \frac{r_{HR} R_{ni}}{\rho C_p} \quad (4)$$

อุณหภูมิของผิวเปียกก็เหมือนกัน (T_{wet}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2 โดยกำหนด r_{iw} เท่ากับ 0 จะช่วยให้

$$T_{wet} - T_a = \frac{r_{HR} r_{aw} \gamma R_{ni}}{\rho C_p [\gamma (r_{aw}) + S r_{HR}]} - \frac{r_{HR} \delta_e}{\gamma r_{aw} + S r_{HR}} \quad (5)$$

สมการ 4 ลบสมการ 5 และหารด้วยความแตกต่างระหว่างสมการ 2 และ 4 ได้สมการ

$$\frac{T_{dry} - T_{wet}}{T_{dry} - T_l} = \frac{r_{1w} + r_{aw} + \left(\frac{S}{\gamma}\right) r_{HR}}{r_{aw} + \left(\frac{S}{\gamma}\right) r_{HR}} \quad (6)$$

ซึ่งสามารถจัดสมการความต้านทานของใบใหม่เป็นสมการ

$$r_{1w} = (r_{aw} + \left(\frac{S}{\gamma}\right) r_{HR}) \frac{(T_l - T_{wet})}{(T_{dry} - T_l)} \quad (7)$$

คุณลักษณะที่สำคัญของสมการ 7 คือ r_{lw} สามารถพิจารณาได้จากการรวมกันของการวัดอุณหภูมิของใบและเทียบกับอุณหภูมิผิวที่เปียกและแห้ง และส่วนนั้นจะขึ้นอยู่กับความต้านทานต่อความร้อน และน้ำที่สูญเสียผ่าน leaf boundary layer เป็นที่น่าสังเกตว่าตัวคูณในสมการนี้เป็นอิสระจากการดูดซึมรังสีสุทธิหรือการขาดความชื้นไอของอากาศ และขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอย่างอ่อนๆ เพราะว่าส่วน $(T_{dry}-T_l)$ ในสมการนี้มีแนวโน้มค่อนข้างน้อย และเป็นความแตกต่างระหว่างสองปริมาณที่ค่อนข้างแปรปรวนในเขตข้อมูล ทำให้สมการนี้ค่อนข้างเสถียร ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้ในทั่วไป, leaf conductance (g_{lw})

$$g_{lw} = \frac{(T_{dry}-T_l)}{\{(T_l-T_{wet})(r_{aw}+\frac{s}{r})r_{HR}\}} \quad (8)$$

ส่วนมากเราจะใช้การชักนำมากกว่าความต้านทานเพราะว่าอัตรากระเหยสัมพันธ์กับการชักนำอย่างใกล้ชิด นอกจากดัชนีพื้นฐานที่กำหนดไว้ในสมการ 1 แล้วสามารถกำหนดโดยใช้สมการอื่น ความเป็นไปได้หนึ่งคือ ใช้ดัชนีที่คล้ายจาก CWSI แต่แทน T_{dry} ใน T_{max} และ T_{wet} สำหรับ T_{base}

$$CWSI = \frac{(T_l-T_{wet})}{(T_{dry}-T_{wet})} \quad (9)$$

สมการการคำนวณ CWSI ที่ 9 นี้จะเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำในการทดลองนี้ (Jackson et al., 1988)

โดย

- T_l คือค่าอุณหภูมิเรือนยอดพืชที่วัดได้ตามสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ
- T_{wet} คือค่าอุณหภูมิต่ำสุดของเรือนยอดที่เป็นไปได้ตามสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ เมื่อมีการระเหยน้ำอย่างเต็มที่บนเรือนยอดของพืช ในทางปฏิบัติคือมีการพ่นน้ำเป็นละอองให้เปียกเรือนยอดทั้งหมด
- T_{dry} คือค่าอุณหภูมิสูงสุดของเรือนยอดที่เป็นไปได้ตามสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ เมื่อใบพืชไม่คายน้ำได้เลยในทางปฏิบัติคือคือใบพืชถูกเคลือบด้วยวาสลีน ปิดกั้นการระเหยน้ำโดยสมบูรณ์

การวิจัยการใช้ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช(CWSI) ในการให้น้ำกับพืชต่างๆ

Pinter and Reginato (1982) พบความสัมพันธ์ที่ดียิ่งระหว่าง CWSI ที่คำนวณจากคำนวณจากอุณหภูมิใบพืช อุณหภูมิอากาศ และ vapor pressure deficit กับ ความเครียดของน้ำในไซเล็ม (xylem) ของใบฝ้ายที่ปลูกในรัฐออริโซนา สหรัฐอเมริกา อุณหภูมิเรือนยอดวัดโดยกล้องรังสีอินฟราเรดแบบมือถือ (10.5 – 12.5 μm band) ความเครียดของน้ำในไซเล็ม (xylem) ของใบฝ้ายวัดโดยเครื่องมือ pressure bomb จากความสัมพันธ์ที่ดีดังกล่าว Pinter and Reginato (1982) จึงเสนอให้ใช้ค่า CWSI เป็นดัชนีกำหนดเวลาให้น้ำแก่ฝ้ายที่ปลูกในพื้นที่ ซึ่งใช้วิธีกำหนดเวลาให้น้ำโดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศ

Yuan et al. (2004) พบว่าสูตรของ Idso et al. (1981) และ Jackson et al. (1981) ซึ่งสูตรประเภท empirical formular ไม่เหมาะที่จะใช้ชาวสาลีที่ปลูกในภาคเหนือของประเทศไทย เนื่องจากมีความผันแปรสูง จน CWSI ออกนอกช่วง 0.0-1.0

ข้อมูลจากการทดลองในไร่กับ Runner bean ที่ปลูกในดินร่วนปนทราย ในประเทศอังกฤษ Jones (1999) พบว่าการปรับปรุงสูตรให้ใช้ T_{wet} และ T_{dry} แทน T_{max} และ T_{base} ซึ่งนอกจากจะวัดได้ง่ายกว่า แล้วยังลดความคลาดเคลื่อนจากความผันแปรระยะสั้นของ T_{max} และ T_{base} ได้ด้วย

จากการทดลองในแปลงใหญ่กับฝ้ายในประเทศอิสราเอล Alchanatis (2010) ใช้สูตรการคำนวณ CWSI ของ Jones (1999) พบว่าช่วงเวลาใกล้ๆเที่ยงวันเป็นช่วงเวลาที่เหมาะกับการวัดอุณหภูมิใบพืชเพื่อการคำนวณ CWSI มากที่สุดและกล้องถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดที่มี resolution ต่ำสามารถใช้ทำแผนที่แสดงศักย์ของน้ำในพืช (leaf water potential) ได้ดีเท่ากับกล้องที่มี resolution สูง เมื่อมีวิธีกำหนด T_{wet} และ T_{dry} ที่เหมาะกับกล้องที่มี resolution ต่ำ

Zia et al. (2010) ทดลองในโรงเรือนที่สามารถควบคุมความเร็วลมและความเข้มของแสง โดยใช้ข้าวโพดเป็นพืชทดลอง พบว่าทั้งความเร็วลมและความเข้มของแสงต่างมีผลต่ออุณหภูมิใบพืช โดยแม้มีลมพัดอ่อนๆ ก็จะทำให้อุณหภูมิใบลดลง ทำให้ประเมินดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำได้ต่ำกว่าที่ควรจะเป็น ขณะที่แสงที่เข้มข้นจะทำให้อุณหภูมิใบสูงขึ้นจะประเมินดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำได้สูงกว่าที่ควรจะเป็น ดังนั้นการประเมินดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำโดยอุณหภูมิใบต้องมีค่าปรับผลกระทบของความเร็วลมและความเข้มของแสงด้วย

Alon et al. (2009) ทดลองการใช้ การประเมิน CWSI เพื่อกำหนดเวลาให้น้ำแก่มะกอกโอลิฟในอิสราเอล โดยใช้ภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดระยะไกลต้นมะกอกแต่ละต้น (Remote thermal images of individual trees) พบว่าวิธีการคำนวณ CWSI ทั้งวิธีของ Jones (1999) และวิธีที่เป็น empirical ต่างให้ค่า CWSI ที่มีสหสัมพันธ์ที่ดีกับวิธีกำหนดเวลาให้น้ำที่ใช้

ข้อมูลความชื้นดินและพืชที่เคยใช้อยู่ แสดงให้เห็นว่าการประเมิน CWSI ด้วยภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดระยะไกลจะสามารถใช้เป็นวิธีปรกติในการกำหนดเวลาให้น้ำแก่มะกอกโอลิฟในระดับสวนได้ โดยวิธีการคำนวณ CWSI ของ Jones (1999) มีข้อได้เปรียบบางประการเหนือกว่าวิธี empirical และแนะว่าควรมุ่งงานวิจัยต่อไปในสภาพภูมิอากาศที่หลากหลาย สำหรับการหาเวลาที่เหมาะสมกับการหาค่า CWSI พบว่าควรเป็นเวลาที่เกิดความเครียดของความชื้นในพืชมากที่สุดในรอบวันคือเวลาเริ่มจะบ่าย (early afternoon)

การวัดความชื้นดินโดยใช้ Tensiometer

Tensiometer เป็นเครื่องมือวัดความเครียดเมตริก (metric suction) ของความชื้นในดิน ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อกำหนดตารางและปริมาณการให้น้ำชลประทานแก่พืชและยังสามารถใช้ศึกษาทดลองเกี่ยวกับความชื้นในดินได้อย่างกว้างขวาง ความเครียดเมตริกของความชื้นในดินเกิดจากการที่อนุภาคของดินดูดยึดความชื้นไว้ที่ผิวของอนุภาคและในช่องว่างขนาดเล็กในดิน (Capillary pores) จึงทำให้ความชื้นในดิน (ขณะดินยังไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ) อยู่ในสถานะที่ไม่อิสระซึ่งจะมีผลถึงความยากง่ายในการที่รากพืชจะดูดน้ำไปใช้จากดินที่ระดับความชื้นหนึ่งๆ กล่าวคือพืชจะต้องใช้พลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของน้ำอย่างน้อยเท่ากับความเครียดของน้ำในดินจึงจะดูดน้ำไปใช้ได้ การบอกปริมาณน้ำในดินเพียงอย่างเดียวเป็นการไม่เพียงพอเพราะเราไม่ทราบว่าน้ำในดินขณะนั้นมีระดับความเป็นประโยชน์ต่อพืชมากน้อยแค่ไหน แต่ถ้าเราบอกเป็นระดับความเครียดของน้ำในดินก็เท่ากับบอกให้ทราบถึงระดับความเป็นประโยชน์ของน้ำในดินต่อพืชในขณะนั้นๆ ซึ่งระดับความเครียดเมตริกของน้ำในดินสามารถวัดโดย Tensiometer (อิทธิสุนทร, 2544)

ชลประทานอัตโนมัติ (Irrigation Automation)

การให้น้ำชลประทานอัตโนมัติ เป็นองค์ประกอบสำคัญประการหนึ่งของการเกษตรที่มีการใช้ปัจจัยต่างๆ อย่างแม่นยำ (precision agriculture) การให้น้ำชลประทานอัตโนมัติ จะมีประสิทธิภาพก็ต่อเมื่อมีเครื่องตรวจวัดสถานะของน้ำในพืชหรือในดินที่แม่นยำ เครื่องตรวจวัดสถานะของน้ำในพืชหรือในดินมีหลายชนิด ในด้านสถานะของน้ำในดิน มีเครื่องมือ เช่น gypsum resistance blocks (Shull and Dylla, 1980), Time domain reflectometer (TDR probe) และ tensiometer (Alharthi and Lanje, 1987) ในด้านสถานะของน้ำในพืช มีผู้พยายามพัฒนาวิธีการกำหนดเวลาให้น้ำอัตโนมัติโดยเครื่องวัดอุณหภูมิเรือนยอดของพืช (Wanjura et al., 1995)

Smajstrla and Locascio (1994) รายงานว่าการควบคุมการให้น้ำโดย switching tensiometer ที่ฝังในดินลึก 6 นิ้ว และตั้งค่าความเครียดของน้ำในดินที่ 10 -15 kPa ในดินทรายละเอียดของรัฐฟลอริดา สหรัฐอเมริกา สามารถลดการใช้น้ำของมะเขือเทศลงได้ 40-50 % โดยที่ผลผลิตพืชไม่ลดลง

Li et al. (1998) พบว่า tensiometer สามารถใช้ได้ประสบความสำเร็จในการกำหนดการให้น้ำมะเขือเทศด้วยตนเองในดิน calcarious gravelly soil จากการศึกษพบว่า การให้น้ำที่ดีที่สุดที่ความเครียดของดิน 10 kPa จะทำให้ผลผลิตเพิ่มขึ้น คุณภาพของผลดีขึ้น และ ลดการชะล้างธาตุอาหารในดิน

อย่างไรก็ตามเครื่องมือกำหนดวิธีการให้น้ำชลประทานอัตโนมัติ ที่กล่าวมาทั้งหมดต่างเป็นเครื่องมือที่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า และประกอบด้วยองค์ประกอบที่ละเอียดอ่อน ต้องการดูแลโดยผู้ชำนาญ สถาบันวิศวกรรมเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยไฮเซนฮาร์ม ประเทศเยอรมัน ได้พัฒนาเครื่องต้นแบบของ TCU ที่สามารถเปิดหรือปิดระบบการให้น้ำอัตโนมัติ โดยไม่ใช้พลังงานไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่การเกษตรห่างไกลได้ (Pinmanee et al., 2010)

บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการ

การจัดเตรียมอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการทดลองทุกการทดลอง

1. สถานที่

โรงเรียนพลาสติก สาขาวิชาไม้ผล คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ โรงเรียนเป็นโรงเรียนโครงเหล็ก กว้าง 5 เมตรยาว 23.5 เมตร สูง 4 เมตรหลังคาโค้งคลุมด้วยพลาสติกชนิด 150 ไมครอน ติดพัดลมระบายอากาศใต้หลังคา ด้านข้างเปิดโล่งสูงจากพื้น 2 เมตร ทั้ง 4 ด้าน

2. ดินและวิธีเก็บ

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินชุดน้ำพอง (Nam Pong Series) ดินชุดคอยปุย (Doi Pui Series) (Acrisol) และดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน (Alluvial complex) ซึ่งการจำแนกดิน สถานที่เก็บตัวอย่างดิน และประวัติการใช้พื้นที่ แสดงในตาราง 1

ตาราง 1 การจำแนกดิน สถานที่เก็บตัวอย่างดิน และประวัติการใช้พื้นที่

ดินชุด	ระบบการจำแนก		สถานที่	การใช้พื้นที่
	Soil Taxonomy	European	เก็บตัวอย่างดิน	
น้ำพอง	Isohyperthermic Ustoxic Quartzipsamments	Regosols	คณะสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ อำเภอ สันทราย จังหวัดเชียงใหม่	ไร่หญ้าอาหาร สัตว์
คอยปุย	Yperthermicisohyperthermic or thermic Kandic Palehumults	Acrisols	ศูนย์พัฒนาโครงการ หลวงแม่ตาใหม่ ตำบล โป่งแยง อำเภอแมริม จังหวัดเชียงใหม่	แปลงทดลอง ปลูกพืช (ข้าวโพด)
ตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน		Vertisols	แปลงผลิตมันฝรั่งนาบุญ ศรี ใจเป็ง อำเภอแม่อาว จังหวัดเชียงใหม่	แปลงผลิตมัน ฝรั่ง

เก็บตัวอย่างดินแยกเป็น 2 ชั้น คือชั้น 0-20 ซม. เก็บดินชุดดินละ 1.8 ม.³ และชั้น 20 – 90 ซม. เก็บดินชุดดินละ 5.4 ม.³ โดยเก็บใส่กระสอบๆ ละ 20 กก. เมื่อขนส่งถึงโรงเรียนได้ผึ่งตัวอย่างดินในร่ม ถ้าสำหรับดินเหนียวตะกอนน้ำพาเชิงซ้อนที่เก็บมาเป็นก้อนโต ได้ทุบตัวอย่างดินให้มีขนาดเล็กกว่า 1 ซม.

3. การสร้างแปลง (กระบะ) ทดลอง

สร้างกระบะปลูกให้สามารถบรรจุดินที่มีความลึกเลียนแบบหน้าตัดดินในธรรมชาติประมาณ 1 เมตร ขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 8 เมตร และสูง 1 เมตร 3 กระบะ ภายใต้โรงเรือนพลาสติก ด้วยอิฐบล็อก ฉาบปูน ที่ขอบด้านข้างติดกับพื้นเจาะระบายน้ำทุกระยะ 1 เมตร ที่กระบะใส่หินขนาด 1 ซม. เป็นชั้นหนา 5 ซม. เพื่อให้สะดวกในการระบายน้ำ บรรจุดินที่เก็บมาแต่ละชุดดินลงในแต่ละกระบะที่สร้างไว้โดยบรรจุดินชั้น 20-90 ซม. ก่อนพยายามอัดดินให้แน่นจนได้ความลึก 70 ซม. เท่ากับที่ขุดมา จากนั้นบรรจุดินชั้น 0-20 ซม. พยายามอัดดินให้แน่นจนได้ความลึก 20 ซม. เท่ากับที่ขุดมา เมื่อบรรจุดินเรียบร้อยแล้วมีดินอยู่ต่ำกว่าขอบกระบะประมาณ 5 ซม.

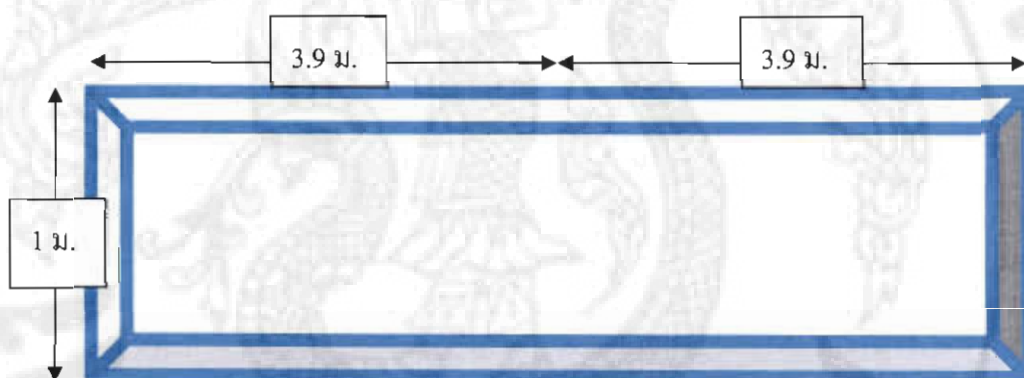
สมบัติทางเคมีและกายภาพของดินที่ความลึก 0-15 และ 15-30 ซม. ของแต่ละชุดดินที่บรรจุในกระบะทดลองแล้ว แสดงในตาราง 2 และตาราง 3 ตามลำดับ ภาพแผนผังและภาพด้านข้างแปลงทดลอง แสดงในภาพ 1 และ 2 ตามลำดับ

ตาราง 2 คุณสมบัติทางเคมีของดิน

สมบัติของดิน	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	ชุดดินคอยปุย
ความเป็นกรด-ด่าง	7.46	6.44	6.07
อินทรีย์วัตถุ, %	1.30	3.8	2.73
ฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์, (มก./กก.)	60	128	124
โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้, (มก./กก.)	59	338	96
แคลเซียมที่แลกเปลี่ยนได้, (มก./กก.)	1,924	3,936	2,056
แมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้, (มก./กก.)	161	332	107
สัดส่วนแคลเซียมต่อแมกนีเซียม	12	11.9	19.2

ตาราง 3 คุณสมบัติทางกายภาพที่ความลึก 0-20 ซม.

สมบัติของดิน	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน	ชุดดินคอยปุ๋ย
ความหนาแน่นรวม, (กรัม/ซม. ³)	1.18	1.09	1.00
ความชื้นเมื่ออิ่มตัวด้วยน้ำ, (% โดยน้ำหนัก)	31.1	52.0	51.0
ความชื้นที่ความจุสนาม, (% โดยน้ำหนัก)	17.1	38.1	26.1
ความชื้นที่จุดเหี่ยวถาวร, (% โดยน้ำหนัก)	10.2	20.3	17.5
อนุภาคทราย, (% โดยน้ำหนัก)	66	25	43
อนุภาคทรายแป้ง, (% โดยน้ำหนัก)	24	24	13
อนุภาคเหนียว, (% โดยน้ำหนัก)	10	51	44



ภาพ 1 ภาพแผนผังแปลงทดลองด้านบนของแปลงทดลอง



ภาพ 2 ภาพด้านข้างแปลงทดลอง แสดงการบรรจุดินเรียงเป็นชั้น ตามธรรมชาติ

4. การแบ่งแปลง แถวปลูกพืช และการวางระบบให้น้ำในแต่ละกระบะ

ในแต่ละกระบะแบ่งเป็นแปลงปลูกพืช 2 แปลง ขาวแปลงและ 3.9 เมตร โดยมีแนวกันชนระหว่างแปลง 0.2 เมตร ระหว่างแปลงทั้งสอง (ภาพ 1)

5. ระบบการให้น้ำ

ให้น้ำโดยระบบน้ำหยด ที่ประกอบด้วยท่อแขนง (lateral pipes) ขนาด 20 มม. ยาว 3.9 เมตร 3 ท่อ ที่ท่อแขนงแต่ละท่อติดหัวน้ำหยด (ยี่ห้อ Netafim รุ่น Patented) ซึ่งให้น้ำอัตรา 2 ลิตร/ชั่วโมง จำนวน 15 หัว โดยมีระยะระหว่างหัวเท่ากับ 12.5 ซม. ท่อแขนงทั้ง 3 ต่อกับท่อประธาน (main pipe) ขนาด 20 มม. ซึ่งต่อกับประตูน้ำ (valve) และมาตรวัดน้ำ (flow meter) ก่อนต่อกับแหล่งน้ำ

6. การควบคุมกำหนดเวลาให้น้ำ

ในระยะปลูกพืชเพื่อให้ต้นโตพร้อมสำหรับการทดลอง และการให้น้ำตามคำรับควบคุม คือให้น้ำเมื่อความเครียดของความชื้นดินที่ระดับความลึก 5 ซม. สูงขึ้นถึง 15 kPa (15 cbar หรือ 150 mbar)

7. การวัดความเครียดของความชื้นดิน

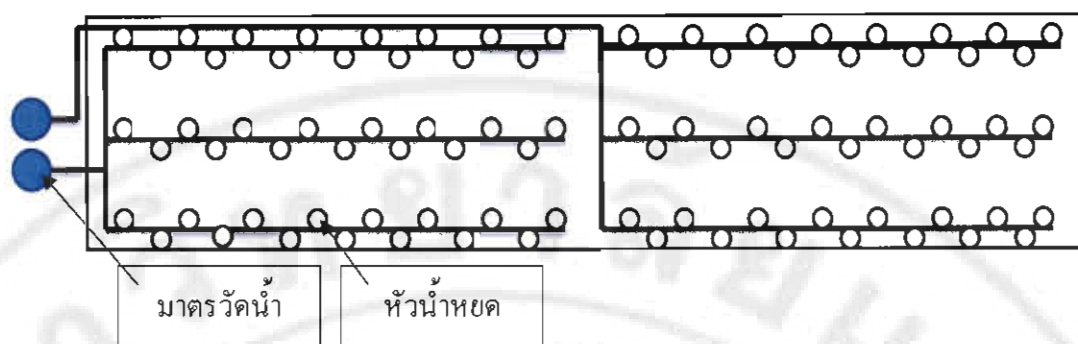
วัดความเครียดของความชื้นดิน โดยเซ็นเซอร์ (Tensiometers) ฝังไว้ในดินแต่ละแปลงทดลองที่ระดับความลึก 5 ซม. ติดตั้ง Tensiometer จำนวน 2 อันตำแหน่งกลางแปลงปลูก ระหว่างหัวน้ำหยดสองหัว ที่ระดับความลึก 5 ซม.

8. พืชทดลอง

พืชที่ใช้ทดลองทุกการทดลองได้แก่ผักบุ้งจีน (*Ipomoea aquatica* Forsk) เปรอร์เซ็นความงอก 85% อายุการเก็บเกี่ยว 28 วันถึง 40 วัน

9. การวัดข้อมูลสภาพอากาศในโรงเรือน

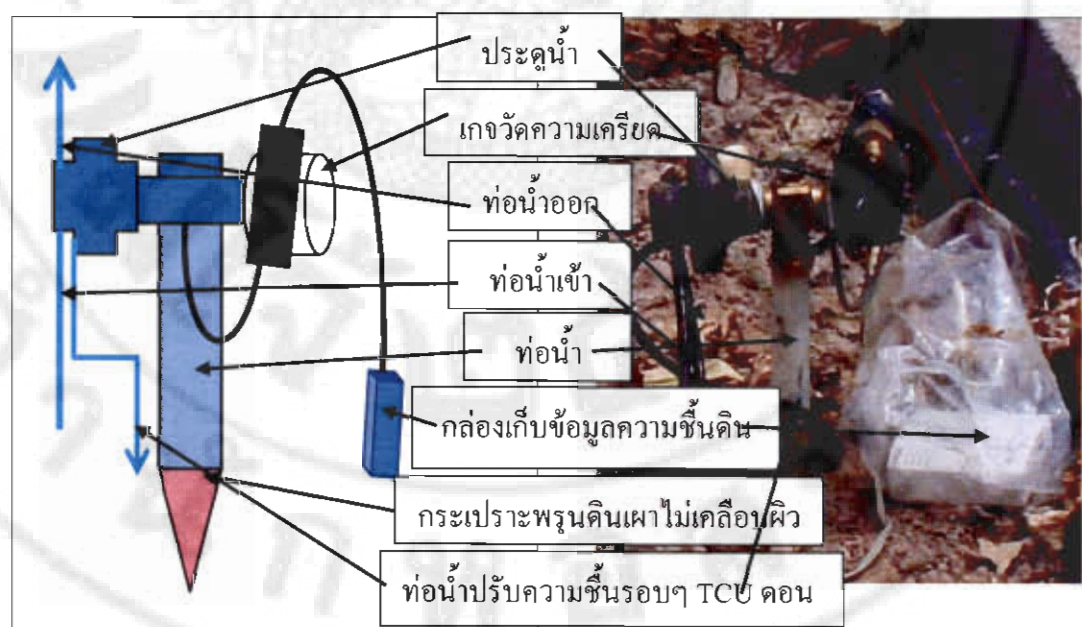
ได้ติดตั้ง Weather station ภายในโรงเรือน โดยจะเก็บข้อมูลสภาพอากาศภายในโรงเรือนได้แก่ อุณหภูมิ สูงสุด ต่ำสุด ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ และความเร็วลม ซึ่งข้อมูลจะถูกบันทึกไว้ใน Data logger และวัดการระเหยน้ำ โดย American Class A pan



ภาพ 3 แผนผังการติระบบน้ำ

10. หลักการทำงานและส่วนประกอบของ TCU

ส่วนประกอบหลักของ TCU แสดงในภาพ 4 ประกอบด้วย ceramic bulb ที่ไม่เคลือบผิว ทำหน้าที่ให้น้ำภายในเคลื่อนที่เข้าออกคู่กับความเครียดของความชื้นที่ภายนอก, tensiometer body เป็นที่บรรจุน้ำให้เต็มหรือเกือบเต็มตลอดเวลา และถ่ายทอดความเครียดสู่ membrane, membrane เป็นตัวรับแรงดึงจากน้ำใน tensiometer body ไปกระตุ้นให้ Valve เปิด



ภาพ 4 องค์ประกอบหลักของหน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ TCU

10.1 การควบคุมการให้น้ำด้วย TCU ประกอบด้วย

- ใช้ TCU เปิด ประตูน้ำเมื่อความเครียดของน้ำในดิน ณ จุดที่ TCU ปักอยู่ขึ้นถึง -150 mbar และปิดเมื่อเปิดแล้ว 30 นาที
- ประตูเปิดน้ำอัตโนมัติที่ควบคุมด้วย timer ให้เปิดน้ำได้วันละ 4 ช่วงเวลา ช่วงละ 30 นาที คือ 05.00-05.30 น., 11.00 – 11.30 น., 17.00 – 17.30 น. และ 23.00 – 23.30 น.

ด้วยระบบที่มีประตูน้ำ 2 ชั้นนี้ การให้น้ำจะเกิดขึ้นเมื่อเข้าเงื่อนไขของทั้ง 2 ประตูพร้อมกัน หากวันใดที่พืชใช้น้ำน้อย แม้ว่าประตูที่ควบคุมด้วย timer จะเปิดประตู แต่ประตู TCU ก็ไม่เปิด เพื่อให้สามารถบันทึกความเครียดของความชื้นดินที่ TCU ทำงาน จึงได้ต่อ sensor วัดความเครียดของน้ำใน TCU และบันทึกด้วย data logger ระบบควบคุมการเปิดเปิดน้ำจึงประกอบด้วย TCU, มาตรวัดน้ำ และ timer switch (ภาพ 5)



ภาพ 5 การควบคุมการให้น้ำด้วย TCU

11. การทดลองปลูกผักนึ่งจีน

หลังจากทดลองปลูกกะหล่ำเมื่อวันที่ 12 มกราคม และเก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่อวันที่ 20 เมษายน 2553 แล้ว ได้ปลูกกะหล่ำเพื่อทดลองซ้ำเป็นครั้งที่ 2 เมื่อวันที่ 7 พฤษภาคม 2553 พบว่าอุณหภูมิอากาศในโรงเรือนสูงมากจนกะหล่ำไม่โต แม้ว่าจะได้เปลี่ยนเป็นพันธุ์ทนร้อนแล้วก็ตาม จึงต้องเปลี่ยนเป็นใช้ผักนึ่งจีนเป็นพืชทดลองปลูกผักนึ่งจีนในวันที่ 4 กรกฎาคม 2553 และเก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่อวันที่ 6 สิงหาคม 2553 (ภาพ 8)

การวางแผนการทดลองที่ 1 การศึกษาดัชนีภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำของผักนึ่งโดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden)

แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ 2x3 factorial in CRD

Factor A วิธีการให้น้ำสองวิธี:

A1 ดำรับควบคุม ให้น้ำโดยเปิดให้น้ำเอง เมื่อความเครียดของความชื้นดินที่ระดับความลึก 5 ซม. สูงขึ้นถึง 10 kPa

A2 ดำรับเกิดวิกฤต งดการให้น้ำโดยสิ้นเชิงเพื่อชักนำให้เกิดภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำ หลังจากที่พักพืชโตเต็มที่แล้วเมื่อผักนึ่งมีอายุได้ 28 วัน นับจากวันออก

Factor B ชนิดของดินแตกต่างกันสามชนิด:

B1 ดินชุดน้ำพอง

B2 ดินชุดคอกปุ๋ย

B3 ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน (Clayey soil)

การปลูกพืชทดลอง

ปลูกผักนึ่งในแปลงทดลองทั้ง 6 แปลงโดยใช้เมล็ดพันธุ์ แปลงละ 200 กรัม เมื่อวันที่ 8 มกราคม 2554 พืชงอกเมื่อวันที่ 11 มกราคม 2554 ให้น้ำด้วยระบบน้ำหยดเมื่อความเครียดของความชื้นดินที่ระดับความลึก 5 ซม. สูงขึ้นถึง 10 kPa จำนวน 45 ลิตรต่อครั้ง

การวัดภาวะความเครียดของพืช

เมื่อหลังจากพืชในคำรับเกิดวิกฤติถูกคนน้ำ ได้วัดภาวะความเครียดของพืช โดยวัดอุณหภูมิของใบพืชการถ่ายภาพโดยโดยเครื่อง Thermocamera ช่วง 12.00 – 14.00 น.ทุกวันโดยกล้องรุ่น FLIR InfraCAM SD ข้อมูลจำเพาะของกล้องแสดงไว้ในตาราง 4 และวัดการเปิดปิดของปากใบด้วยเครื่อง Porometer รุ่น SC-1 leaf porometer ช่วง 12.00 – 14.00 น. ทุกวันโดยวัดกับใบผักบุ้งที่โดนแดดโดยตรง ที่ละใบ จำนวน 5 ใบในแต่ละเช้าของแต่ละวิธีการให้น้ำ ช่วง 12.00 – 14.00 น. ทุกวัน

การเก็บข้อมูลอื่นๆ

1. บันทึกการให้น้ำ และค่าความเครียดของชั้นดินเมื่อก่อนให้น้ำจาก Tensiometer ทุกวัน
2. เก็บข้อมูลภูมิอากาศรายวันจาก data logger ที่ติดตั้งไว้
3. เก็บข้อมูลน้ำระเหยจากถาดวัดการคายระเหยรายวัน

การคำนวณดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำ

คำนวณ ดัชนีความเครียดจากการขาดน้ำโดยสูตร

$$CWSI = \frac{(T_l - T_{wet})}{(T_{dry} - T_{wet})}$$

เมื่อ

- | | |
|-----------|--|
| T_l | คือค่าอุณหภูมิเรือนยอดพืชที่วัดได้ตามสภาพแวดล้อมหนึ่งๆ |
| T_{wet} | คือค่าอุณหภูมิต่ำสุดของเรือนยอดที่เป็นไปได้ เมื่อมีการพ่นน้ำเป็นละอองให้เปียกเรือนยอดทั้งหมด |
| T_{dry} | คือค่าอุณหภูมิสูงสุดของเรือนยอดที่เมื่อใบพืชไม่คายน้ำได้เลยคือคือใบพืชถูกเคลือบด้วยวาสลีน ปิดกั้นกระระเหยน้ำโดยสมบูรณ์ |

ตาราง 4 ข้อมูลจำเพาะของกล้อง

คุณสมบัติ	FLIR InfraCAM SD (การทดลองที่ 1)	InfratecVariocam 384sl (การทดลองที่ 2)
ความละเอียด (pixels)	120x120	384x288
Autofocus:	ไม่มี	มี
ภาพสีจริง	ไม่มี	มี
น้ำหนัก(กรัม)	550	1,300
ความละเอียดของอุณหภูมิ (องศาเควิน)	0.1	0.05
หน้าจอ(นิ้ว)	3.5	-
แบตเตอรี่(ชั่วโมง)	7	3
ราคาโดยประมาณ (ยูโร)	5,000	25,000

ก. FLIR InfraCAM SD



ข. InfratecVariocam 384sl



ภาพ 6 ภาพถ่ายกล้องถ่ายภาพรังสีความร้อนทั้ง 2 ชนิด

การวางแผนการทดลองที่ 2 การศึกษาดัชนีภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำของผักบุ้งโดยใช้กล้อง
Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl (Infratec, Germany)

แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบ 2x3 factorial in CRD

Factor A วิธีการให้น้ำสองวิธี:

A1 ดำรับควบคุม ให้น้ำโดยเปิดให้น้ำเอง เมื่อความเครียดของความชื้นดินที่ระดับความลึก 5 ซม. สูงขึ้นถึง 10 kPa

A2 ดำรับเกิดวิกฤต งดการให้น้ำโดยสิ้นเชิงเพื่อชักนำให้เกิดภาวะวิกฤตจากการขาดน้ำ หลังจากที่พักพืชโตเต็มที่แล้วเมื่อผักบุ้งมีอายุได้ 28 วัน นับจากวันออก

Factor B ชนิดของดินแตกต่างกันสามชนิด:

B1 ดินชุดน้ำพอง

B2 ดินชุดคอกปุ๋ย

B3 ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน (Clayey soil)

การปลูกพืชทดลอง

ปลูกผักบุ้งในแปลงทดลองทั้ง 6 แปลง โดยใช้เมล็ดพันธุ์แปลงละ 200 กรัม เมื่อวันที่ 28 มีนาคม 2554 พืชออกเมื่อวันที่ 1 เมษายน 2554 ให้น้ำด้วยระบบน้ำหยดเมื่อความเครียดของความชื้นดินที่ระดับความลึก 5 ซม. สูงขึ้นถึง 10 เซนติบาร์จำนวน 45 ลิตรต่อครั้ง

การวัดภาวะความเครียดของพืช

เมื่อหลังจากพืชในดำรับเกิดวิกฤตถึงจุดน้ำ ได้วัดภาวะความเครียดของพืชโดยวัดอุณหภูมิของใบพืชการถ่ายภาพโดยเครื่อง Thermocamera ช่วง 12.00 – 14.00 น. ทุกวันข้อมูลจำเพาะของกล้องแสดงไว้ในตาราง 4 และ วัดการเปิดปิดของปากใบด้วยเครื่อง Porometer รุ่น SC-leaf porometer ช่วง 12.00 – 14.00 น. ทุกวัน

การเก็บข้อมูลอื่นๆ

1. บันทึกการให้น้ำ และค่าความเครียดของชั้นดินเมื่อก่อนให้น้ำจาก Tensiometer ทุกวัน โดยฝังให้กระเปาะเซ็นซิโอมิเตอร์อยู่ในดินที่ความลึก 5 ซม.
2. เก็บข้อมูลภูมิอากาศรายวันจาก data logger ที่ติดตั้งไว้
3. เก็บข้อมูลน้ำระเหยจากถาดวัดการคายระเหยรายวัน



ภาพ 7 การปลูกผักบุ้งจีนเป็นพืชทดลองของการทดลองที่ 1 และ 3 (พร้อมด้วยชุดเครื่องมือตรวจอากาศ weather station)

หมายเหตุ อากาศในโรงเรือนเดือนพฤษภาคม-มิถุนายน ร้อนมากจนกะหล่ำไม่โต

การวางแผนการทดลองที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยควบคุมการให้น้ำโดย เทนซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit, TCU)

พืชทดลอง

1. กะหล่ำปลี

ปลูกกะหล่ำทดลองในกระบะทั้ง 3 เมื่อวันที่ 12 มกราคม 2553 โดยแต่ละกระบะ ปลูก 3 แถว แถวละ 16 ต้น ในระยะแรกให้น้ำแบบดัดกรด เก็บเกี่ยวเมื่อ 20 เมษายน 2553 (ภาพ 6)

2. ผักบุ้งจีน

ปลูกผักบุ้งในแปลงทดลองทั้ง 6 แปลง โดยใช้เมล็ดพันธุ์ แปลงละ 200 กรัม เมื่อวันที่ 6 กันยายน 2553 พืชออกเมื่อวันที่ 10 กันยายน 2553 ให้น้ำด้วยระบบน้ำหยดเมื่อความเครียดของผิวดินที่ระดับความลึก 5 ซม. สูงขึ้นถึง 10 kPa จำนวน 45 ลิตรต่อครั้ง

การออกแบบการทดลองระบบให้น้ำกระบะทดลอง

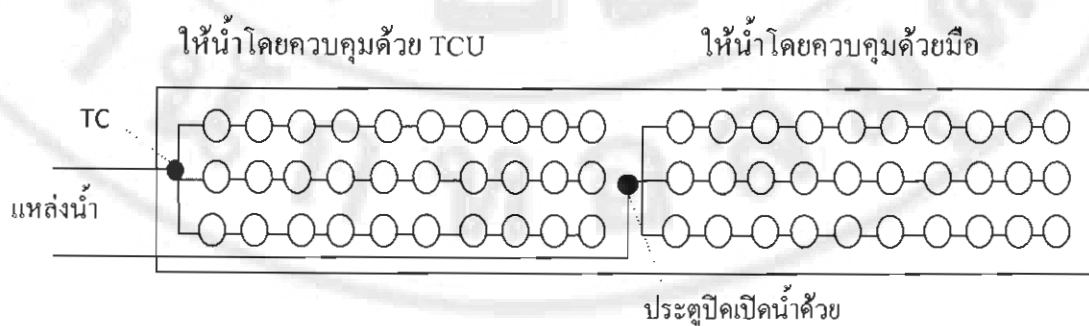
เพื่อให้ในแต่ละกระบะ ที่ใช้ดินต่างชนิดกันสามารถทดลองเปรียบเทียบการให้น้ำที่ควบคุมด้วย หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเทนซิโอมิเตอร์ (หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเทนซิโอมิเตอร์ Control) กับการควบคุมด้วยมือ (Manual Control) จึงแบ่งพื้นที่ในแต่ละกระบะเป็น 2 ส่วน เท่าๆ กันส่วนละ 4 เมตร ส่วนแรกให้น้ำโดยควบคุมโดย หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเทนซิโอมิเตอร์ ส่วนที่สองให้น้ำโดยควบคุมด้วยมือ แต่ละส่วนปลูกกะหล่ำ 3 แถวๆ ละ 8 ต้น ระยะปลูก 0.4 X 0.4 เมตร แต่ละส่วนต่อกับแหล่งน้ำแยกอิสระจากกัน แต่ละแถวมีท่อแขนงที่มีหัวน้ำหยดสำหรับกะหล่ำแต่ละต้น หัวน้ำหยดมีอัตราการให้น้ำ 2 ลิตร/ชั่วโมง ที่ความดันประมาณ 1 บาร์ ดังภาพ 7



ภาพ 8 การปลูกกะหล่ำทดลอง

การเก็บข้อมูล

1. ความเครียดของควมชื้นดินที่บันทึกอัตโนมัติโดย TCU และ data logger
2. ปริมาณการให้น้ำ
3. ความเครียดของควมชื้นดินที่วัดโดยเซ็นเซอร์
4. น้ำหนักสดของพืชเมื่อก่อนให้น้ำจาก Tensiometer ทุกวัน



ภาพ 9 การออกแบบการทดลองระบบให้น้ำกระบะทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ผลการทดลองที่ 1 การศึกษาดัชนีความเครียดของน้ำในพืชของผักบุ้ง

โดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD

(FLIR, Sweden)

ภูมิอากาศในโรงเรือนระหว่างการทดลอง

ภูมิอากาศในโรงเรือนระหว่างการทดลอง ได้แก่ ภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความเร็วลม และการระเหยน้ำ แสดงในตาราง 5 พบว่า

ตาราง 5 สภาพภูมิอากาศในโรงเรือนระหว่างการทดลองที่ 1

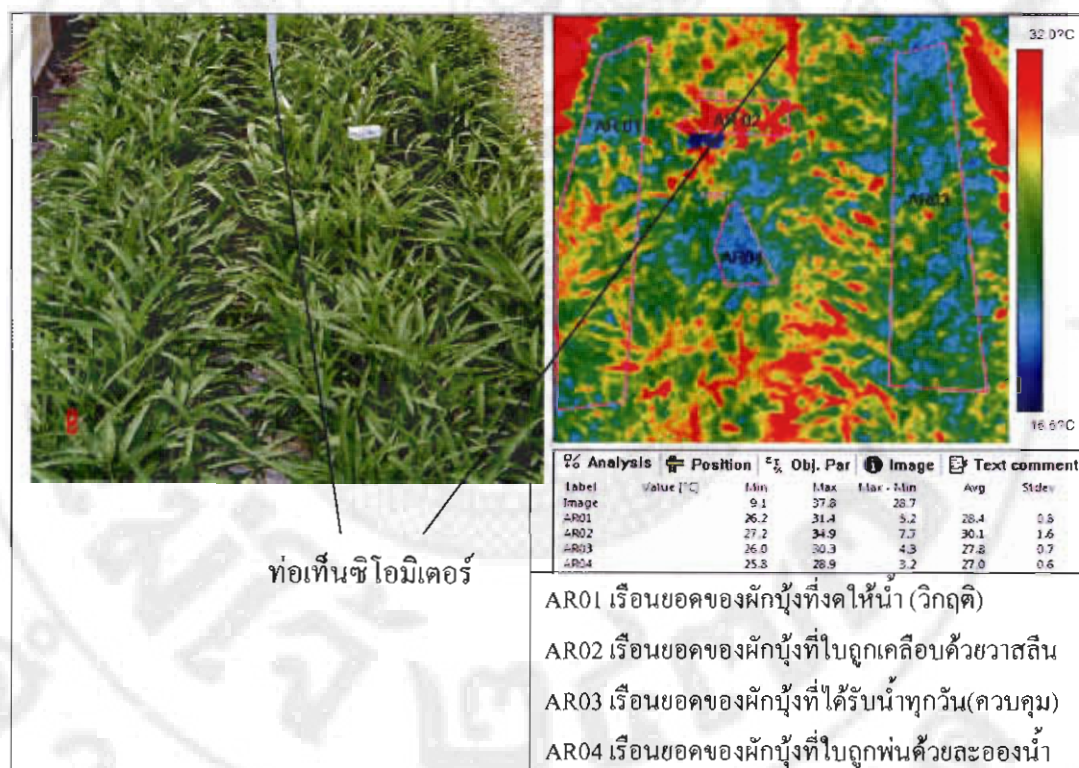
วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิ, (°ซ)			ความชื้นสัมพัทธ์, (%)			ความเร็วลม ¹ , (ม/วินาที)	การระเหย น้ำ ² , (มม/วัน)
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย		
1 (9/2/54)	36.20	14.70	23.29	89.00	24.00	63.29	0.03	3.72
2 (10/2/54)	38.90	15.00	24.10	87.00	28.00	63.79	0.00	3.18
3 (11/2/54)	36.30	16.90	24.25	82.00	34.00	66.00	0.01	4.59
4 (12/2/54)	38.00	16.50	25.28	90.00	34.00	64.63	0.00	4.58
5 (13/2/54)	37.80	15.80	25.15	83.00	36.00	62.13	0.03	3.93
6 (14/2/54)	35.40	17.50	24.43	83.00	36.00	65.96	0.07	3.37
7 (15/2/54)	36.70	15.00	24.13	86.00	32.00	61.92	0.05	4.86
8 (16/2/54)	38.80	14.50	24.42	85.00	29.00	61.33	0.00	4.48
9 (17/2/54)	38.60	16.90	24.96	81.00	32.00	63.33	0.00	4.83
10 (18/2/54)	32.00	19.60	24.27	92.00	52.00	75.08	0.00	4.23
11 (19/2/54)	39.70	18.70	26.58	93.00	32.00	66.67	0.01	4.16
12 (20/2/54)	41.70	17.90	27.20	80.00	27.00	58.50	0.00	4.09

หมายเหตุ ¹วัดจาก ชุดเครื่องมือตรวจอากาศ weather station

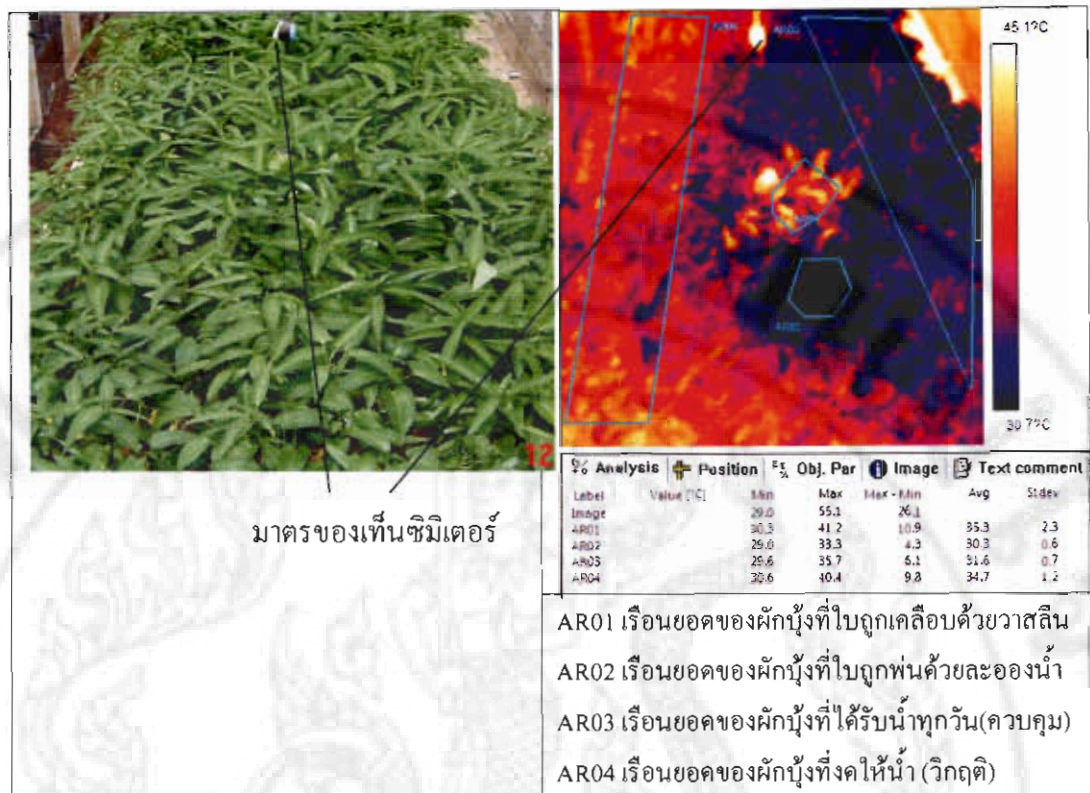
²วัดจาก American Class A pan

ถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

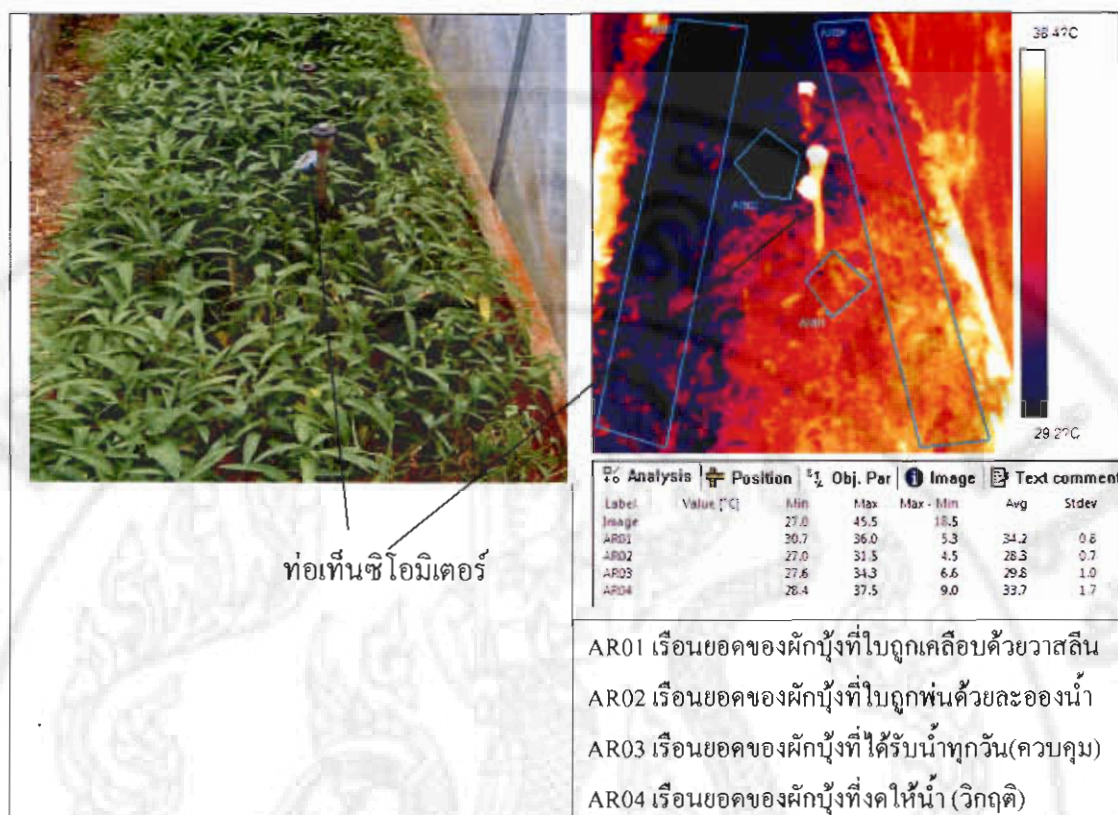
ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดของวันหนึ่งของการทดลอง ของแต่ละดินทั้ง 3 ชุดดินพร้อมกับภาพถ่ายสีปกติเมื่อเวลาเดียวกัน ของแปลงผักนึ่งที่แสดงในภาพ 10- 12 ในภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดแต่ละภาพมีพื้นที่ไป 4 พื้นที่ที่ได้รับการจัดการต่างกัน คือ เรือนยอดของผักนึ่งที่รดให้น้ำ (วิกฤติ) เรือนยอดของผักนึ่งที่ใบถูกเคลือบด้วยวาสลีนเรือนยอดของผักนึ่งที่ได้รับน้ำทุกวัน (ควบคุม) และ เรือนยอดของผักนึ่งที่ใบถูกพ่นด้วยละอองน้ำที่มีสีซึ่งแสดงระดับอุณหภูมิต่างกัน



ภาพ 10 ภาพถ่ายของแปลงผักนึ่งในชุดดินน้ำพอง เมื่อวันที่ 9 กุมภาพันธ์ 2554 เวลา 12.00 น.



ภาพ 11 ภาพถ่ายของแปลงผักบุ้งในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน เมื่อวันที่ 12 มี.ค.2554 12.00 น.



ภาพ 12 ภาพถ่ายของแปลงผักบุ้งใน ชุดดินคอยุ่เมื่อวันที่ 11 มี.ค. 2554 12.00 น.

อุณหภูมิใบและความนำของปากใบ

อุณหภูมิใบพืชที่ได้รับการจัดการต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ ใบที่รดน้ำ (วิกฤติ) ใบถูกเคลือบด้วยวาสลีน ใบพืชที่ได้รับน้ำทุกวัน (ควบคุม) และ ที่ใบถูกพ่นด้วยละอองน้ำและความนำของปากใบของใบที่รดน้ำ (วิกฤติ) และ ใบพืชที่ได้รับน้ำทุกวันเป็นรายวันของแต่ละดินที่ใช้ในการทดลองแสดงในตาราง 6 – 8

ตาราง 6 อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักบุ้งปลูกในชุดดินน้ำพอง

วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงต่ำสุด (°ซ)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงสูงสุด (°ซ)	อุณหภูมิพืชทดลอง (°ซ)		ความนำของปากใบ (mmolm ⁻² s ⁻¹)		ดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI)	
			ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ
1(9/2/54)	21.6	31.1	23.2	24.6	348	513	0.21	0.35
2 (10/2/54)	25.8	34.9	28.4	27.8	321	256	0.29	0.22
3(11/2/54)	25.4	34.1	26.7	28.3	350	506	0.15	0.33
4(12/2/54)	27.4	34.7	28.7	30.5	577	285	0.18	0.42
5 (13/2/54)	25.6	29.7	26.3	28.4	703	307	0.17	0.68
6 (14/2/54)	24.8	28.5	25.3	28.0	775	287	0.14	0.86
7 (15/2/54)	25.8	31.1	27.6	30.9	468	136	0.34	0.96
8(16/2/54)	24.6	29.8	26.0	29.3	219	148	0.27	0.90
9(17/2/54)	24.3	32.9	26.2	31.9	429	194	0.22	0.88
10 (18/2/54)	24.6	27.0	25.4	26.8	438	513	0.33	0.92
11 (19/2/54)	-	-	-	-	-	-	-	-

หมายเหตุ *ในชุดดินน้ำพองสามารถเก็บข้อมูลได้เพียง 10 วันเนื่องจากผักบุ้งเหี่ยวมากจนไม่สามารถเก็บข้อมูลได้แล้ว

ตาราง 7 อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินน้ำพาเชิงซ้อน

วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงต่ำสุด (°ซ)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงสูงสุด (°ซ)	อุณหภูมิพืชทดลอง (°ซ)		ความนำของปากใบ (mmol m ⁻² s ⁻¹)		ดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI)	
			ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ
1 (9/2/54)	23.6	28.5	25.3	25.6	689	742	0.35	0.41
2 (10/2/54)	23.4	27.5	25.1	25.6	543	523	0.41	0.54
3 (11/2/54)	24.0	28.5	25.9	27.0	556	441	0.42	0.67
4 (12/2/54)	26.1	29.3	27.2	28.1	411	351	0.34	0.63
5 (13/2/54)	23.0	25.8	24.5	24.7	285	252	0.54	0.61
6 (14/2/54)	26.4	29.6	28.6	27.7	575	878	0.69	0.41
7 (15/2/54)	25.6	30.0	27.6	28.7	711	710	0.45	0.70
8 (16/2/54)	24.6	27.5	26.5	27.0	487	288	0.66	0.83
9 (17/2/54)	26.0	30.1	28.2	28.6	381	258	0.56	0.63
10 (18/2/54)	26.5	30.8	29.0	30.4	622	370	0.58	0.91
11 (19/2/54)	28.0	32.2	30.4	32.2	564	307	0.57	1.00
12 (20/2/54)	28.0	34.1	30.9	34.1	649	220	0.48	1.00

ตาราง 8 อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินคอกขุยมะพร้าว

วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงต่ำสุด (°ซ)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงสูงสุด(°ซ)	อุณหภูมิพืชทดลอง (°ซ)		ความนำของปากใบ (mmolm ⁻² s ⁻¹)		ดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI)	
			ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ
1 (9/2/54)	28.4	32.3	29.2	29.5	618	435	0.21	0.28
2 (10/2/54)	27.3	33.8	30.8	30.7	472	407	0.53	0.52
3 (11/2/54)	26.5	29.7	28.3	28.3	678	661	0.56	0.56
4(12/2/54)	30.9	33.6	31.9	31.4	528	546	0.37	0.19
5 (13/2/54)	28.5	31.4	29.3	30.2	653	509	0.28	0.59
6 (14/2/54)	29.9	33.8	31.7	32.0	505	297	0.46	0.54
7 (15/2/54)	26.8	33.0	29.0	30.9	1096	521	0.35	0.66
8 (16/2/54)	28.0	33.8	30.4	33.3	454	293	0.41	0.91
9 (17/2/54)	29.4	34.1	30.7	33.8	872	653	0.28	0.94
10 (18/2/54)	30.1	35.1	31.3	34.6	717	383	0.21	0.80
11 (19/2/54)	28.3	34.2	29.8	33.7	462	309	0.25	0.92
12 (20/2/54)	30.4	37.6	32.4	36.8	509	285	0.28	0.89

ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (Crop Water Stress Index) จากอุณหภูมิใบเฉลี่ยราย 3 วัน

ค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชเมื่อวันที่ 1 - 3 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 9-11 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 1) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำและชนิดดินที่ปลูกพืชต่างมีผลต่อดัชนีความเครียดของน้ำในพืช โดยการรดให้น้ำทำให้ผักบุ้งมีความเครียดของน้ำเฉลี่ยใน 3 วันแรกสูงขึ้นกว่าที่ได้รับน้ำตามปกติ ขณะเดียวกันความเครียดของน้ำเฉลี่ยก็แตกต่างกันระหว่างชนิดดินที่ปลูกพืช โดยผักบุ้งที่ปลูกในดินตะกอนลำนํ้าความเครียดสูงสุด และผักบุ้งที่ปลูกในดินนํ้าพองความเครียดสูงสุด

ตาราง 9 ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 1

การให้น้ำ	ชนิดดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินนํ้าพอง	ดินตะกอนนํ้าพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ให้น้ำปกติ (ควบคุม)	0.25	0.42	0.42	0.36A
งดให้น้ำ (เกิดวิกฤติ)	0.29	0.56	0.42	0.42B
เฉลี่ย	0.27c	0.49a	0.42b	0.39

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแนวดังที่กำกับด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่เหมือนกัน แตกต่างกันทางสถิติที่ความน่าจะเป็น 0.05 เมื่อเทียบกับ Duncan's Multiple range Test

** ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยอักษรตัวพิมพ์เล็กเหมือนกัน แตกต่างกันทางสถิติที่ความน่าจะเป็น 0.05 เมื่อเทียบกับ Duncan's Multiple range Test

ค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชเมื่อวันที่ 4-6 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 12-14 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 10 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 6) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำและชนิดดินที่ปลูกพืชต่างไม่มีผลต่อดัชนีความเครียดของน้ำในผักบุ้งในช่วงวันที่ 4 - 6 หลังจากการรดให้น้ำ แต่ค่าความเครียดเมทริกของดินวัดได้จากเซ็นซิโอมิเตอร์จะสูงกว่าวันที่ 1-3 ซึ่งค่าความเครียดเมทริกที่วัดได้จากเซ็นซิโอมิเตอร์ของดินตะกอนนํ้าพา สูงกว่าชุดดินคอกปุ๋ย และชุดดินนํ้าพอง

ตาราง 10 ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 1

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอปุย	
ควบคุม	0.26	0.36	0.39	0.34
วิกฤติ	0.66	0.48	0.44	0.52
เฉลี่ย	0.46	0.42	0.41	0.43

ค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชเมื่อวันที่ 7-9 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 15-17 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 11 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ตารางผนวก 7) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำพืชมีผลต่อดัชนีความเครียดของน้ำในผักบุ้งโดยการรดให้น้ำให้ทำให้ผักบุ้งมีความเครียดของน้ำเฉลี่ยใน 3 วันแรกสูงขึ้นกว่าที่ได้รับน้ำทุกวันตามปกติ

ตาราง 11 ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 1

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอปุย	
ควบคุม	0.39	0.50	0.42	0.44B
วิกฤติ	0.78	0.69	0.70	0.73A
เฉลี่ย	0.59	0.60	0.56	0.58

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแนวตั้งที่กำกับด้วยอักษรตัวใหญ่ต่างกัน แตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.05 ด้วย Duncan's multiple range test

ค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชเมื่อวันที่ 10-12 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 12 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ตารางผนวก 8) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำพืชมีผลต่อดัชนีความเครียดของน้ำในผักบุ้งโดยการรดให้น้ำให้ทำให้ผักบุ้งมีความเครียดของน้ำเฉลี่ยใน 3 วันแรกสูงขึ้นกว่าที่ได้รับน้ำทุกวันตามปกติ

ตาราง 12 ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบ วันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1

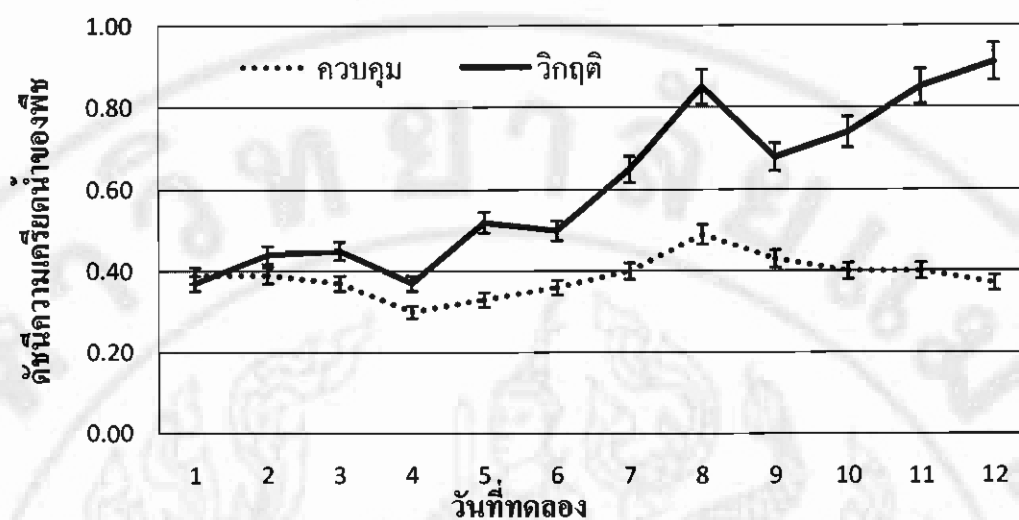
การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอปุย	
ควบคุม	0.53	0.47	0.35	0.45B
วิกฤติ	0.75	0.88	0.81	0.81A
เฉลี่ย	0.64	0.67	0.58	0.63

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแถวตั้งที่กำกับด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่เหมือนกัน แตกต่างกันทางสถิติที่ความน่าจะเป็น 0.05 เมื่อเทียบกับ Duncan's Multiple range Test

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยราย 3 วัน ของข้อมูลตลอดช่วงการทดลอง 12 วันพบว่าผักบุ้งที่อยู่ในภาวะวิกฤติ คือถูกงดให้น้ำ มีดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบที่วัดด้วยกล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden) มากกว่าผักบุ้งที่อยู่ได้รับน้ำตามปกติวันละครั้ง ตั้งแต่ระยะ 3 วันแรกของการงดน้ำ จนเสร็จสิ้นการทดลอง ยกเว้นเพียงช่วงวันที่ 4-6 ของการทดลอง ส่วนปัจจัยด้านชนิดที่ใช้ปลูกพืชไม่มีผลให้ ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) ต่างกัน ยกเว้นเพียงช่วงวันที่ 4-6 ของการทดลอง

ค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (Crop Water Stress Index)

แนวโน้มของค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในพืช จากการทดลองในทั้ง 3 ชุดดินแสดงในภาพ 13 เห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบผักบุ้งที่ได้รับน้ำทุกวันค่อนข้างคงที่อยู่ที่ประมาณ 0.40 ขณะที่ค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบผักบุ้งที่ถูกงดให้น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเกือบตลอดเวลาของการทดลอง 12 วัน ทำให้ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบพืชระหว่างพืชที่ให้น้ำทุกวันและที่ถูกงดให้น้ำแตกต่างกันมากขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่ากล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden) มีประสิทธิภาพสูงในระดับที่สามารถใช้วัดอุณหภูมิใบพืช เพื่อประเมินดัชนีความเครียดของน้ำในพืชได้ดี



ภาพ 13 แนวโน้มของค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืชของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำรายวัน (เฉลี่ย 3 दिन)

ความนำของปากใบ (Stomata Conductance) ค่าเฉลี่ยราย 3 วัน

ความนำของปากใบเมื่อวันที่ 1-3 หลังจากเริ่มงดให้น้ำ (วันที่ 9-11 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 13 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางภาคผนวกที่ 9) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำและชนิดดินที่ปลูกพืชต่างไม่มีผลต่อความนำของปากใบของผักบุ้งในช่วงวันที่ 1 – 3 หลังจากการงดให้น้ำ

ตาราง 13 ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 1

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	449.46	549.64	533.59	510.90
วิกฤติ	435.68	559.54	521.45	505.56
เฉลี่ย	442.57	554.59	527.52	508.23

ความนำของปากใบของพืช เมื่อวันที่ 4-6 หลังจากเริ่มงดให้น้ำ (วันที่ 12-14 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 14 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 10) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำและชนิดดินที่ปลูกพืชต่างไม่มีผลต่อความนำของปากใบของผักบุ้งในช่วงวันที่ 4 – 6 หลังจากการงดให้น้ำ

ตาราง 14 ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 1

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	585.45	425.19	546.33	518.99
วิกฤติ	372.31	424.27	507.66	434.75
เฉลี่ย	478.88	424.73	527.00	476.87

ความนำของปากใบของพืชเมื่อวันที่ 7-9 หลังจากเริ่มงดให้น้ำ (วันที่ 15-17 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 15 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 11) แสดงให้เห็นว่าชนิดดินที่ปลูกพืชมีผลต่อความนำของปากใบของ ผักบุ้งในช่วงวันที่ 7 – 9 หลังจากการงดให้น้ำ

ตาราง 15 ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 1

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงชัน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	410.74	530.20	813.61	584.85
วิกฤติ	317.49	459.55	565.70	447.58
เฉลี่ย	364.11b	494.88ab	689.66a	516.21

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยอักษรตัวพิมพ์เล็กเหมือนกัน แตกต่างกันทางสถิติที่ความน่าจะเป็น 0.05 เมื่อเทียบกับ Duncan's Multiple range Test

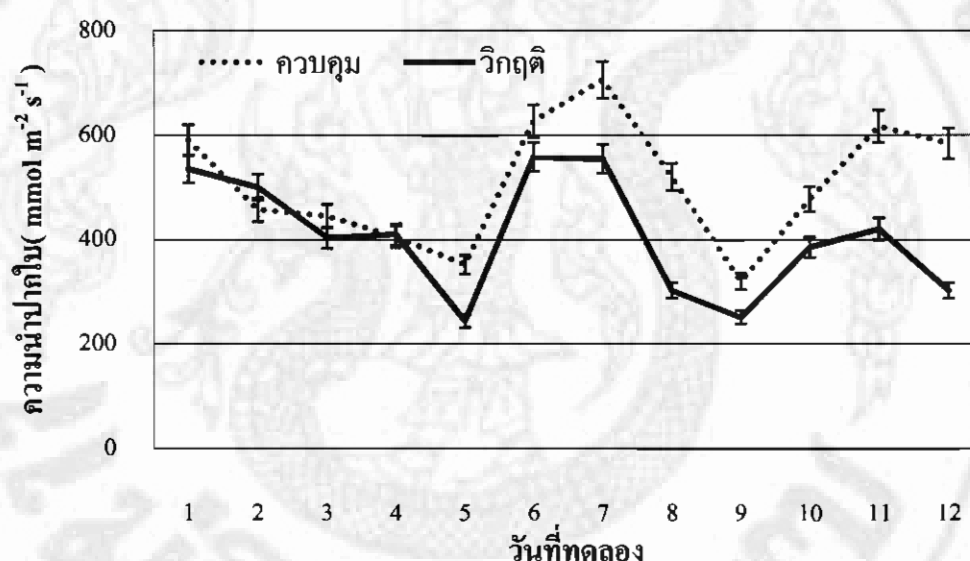
ความนำของปากใบของพืชเมื่อวันที่ 10-12 หลังจากเริ่มงดให้น้ำ (วันที่ 18-20 กุมภาพันธ์ 2554) แสดงในตาราง 16 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 12) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำพืช และชนิดของดินต่างไม่มีผลต่อความนำของปากใบของผักบุ้งในช่วงวันที่ 10 – 12 หลังจากการงดให้น้ำ

ตาราง 16 ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) วันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงชัน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	256.04	597.07	657.51	503.54
วิกฤติ	201.68	405.87	436.75	348.10
เฉลี่ย	228.86	501.47	547.13	425.82

ค่าเฉลี่ยรายวันความนำของปากใบ (Stomata Conductance)

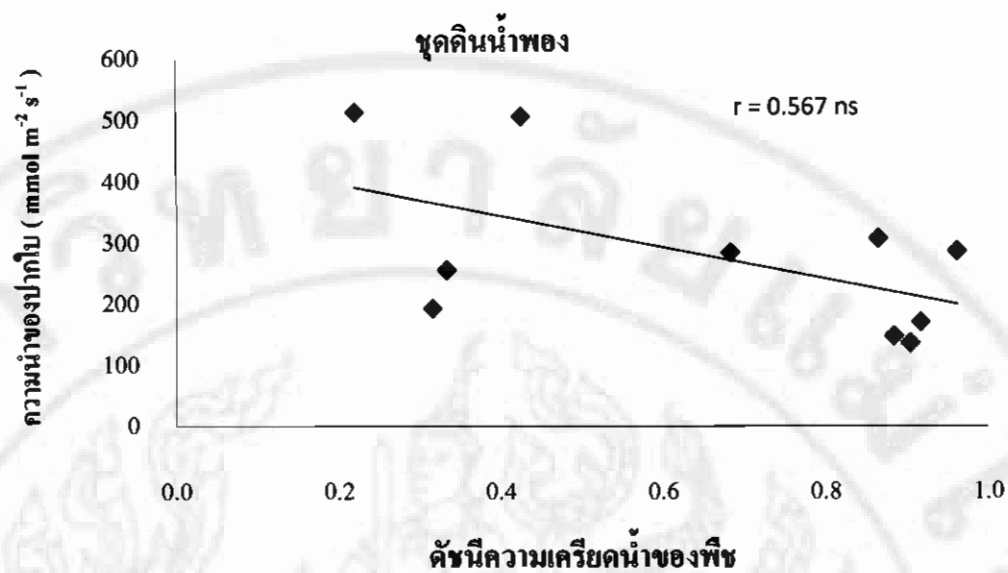
แนวโน้มของค่าเฉลี่ยรายวันของความนำของปากใบ จากการทดลองในทั้ง 3 ชุด ดินแสดงในภาพ 14 เห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยรายวันของความนำของปากใบของผักบุ้งที่ให้น้ำทุกวันและที่ถูกงดให้น้ำใกล้เคียงกันมากในช่วง 6 วันแรกของการทดลอง และเริ่มแตกต่างกันเล็กน้อย (อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ในช่วง 6 วันหลังของการทดลอง แต่ความแตกต่างนี้ยังน้อยกว่าความผันแปรของค่าเฉลี่ยรายวันที่ผันแปรระหว่างวันต่อวัน แสดงให้เห็นว่า ความนำของปากใบที่วัดโดย porometer รุ่น SC-1 กับใบผักบุ้งที่โดนแดดโดยตรง ที่ละใบ จำนวน 5 ใบในแต่ละซ้ำของแต่ละวิธีการให้น้ำนั้นผันแปรตาม microclimate ของอากาศในโรงเรือนแต่ละวันมากกว่าความเครียดของน้ำในพืช



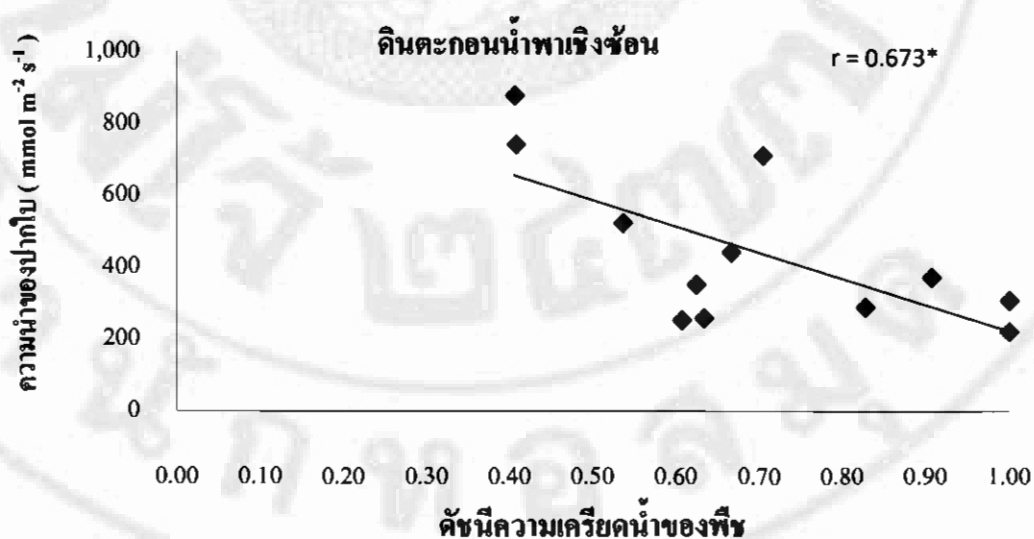
ภาพ 14 ความนำของปากใบ (Stomata Conductance) ของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำรายวัน (เฉลี่ย 3 दिन)

ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบ

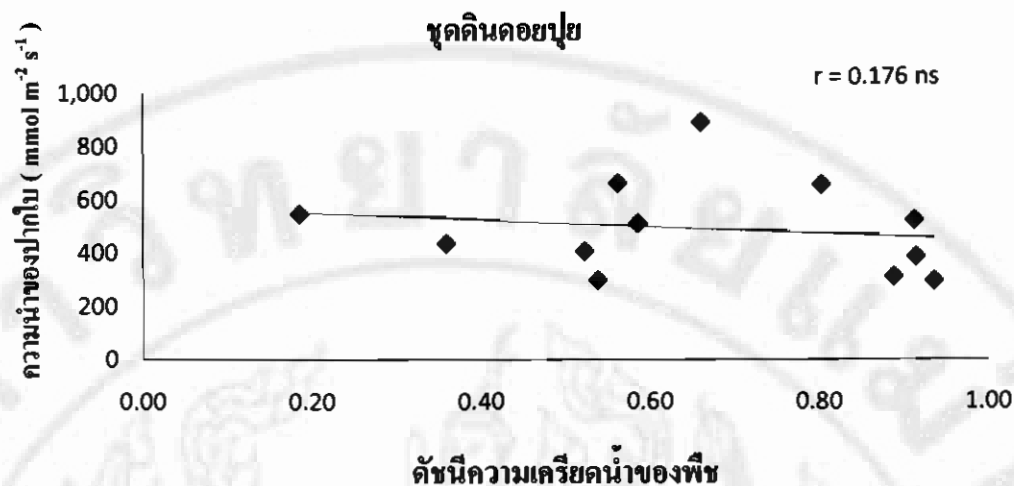
ภาพ 15– 17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความนำของปากใบของใบผักบุ้งในแต่ละชุดดิน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความนำของปากใบของใบผักบุ้งในดินทั้ง 3 ชุดดินไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเลย



ภาพ 15 ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบในชุดดินน้ำพอง (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพ 16 ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบในดินตะกอนน้ำพาแรงขึ้น (* = ความสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.95)



ภาพ 17 ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบในชุดดินคอยปุย (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)

ความเครียดเมทริกซ์ของความชื้นดินในแปลงถูกงดให้น้ำ

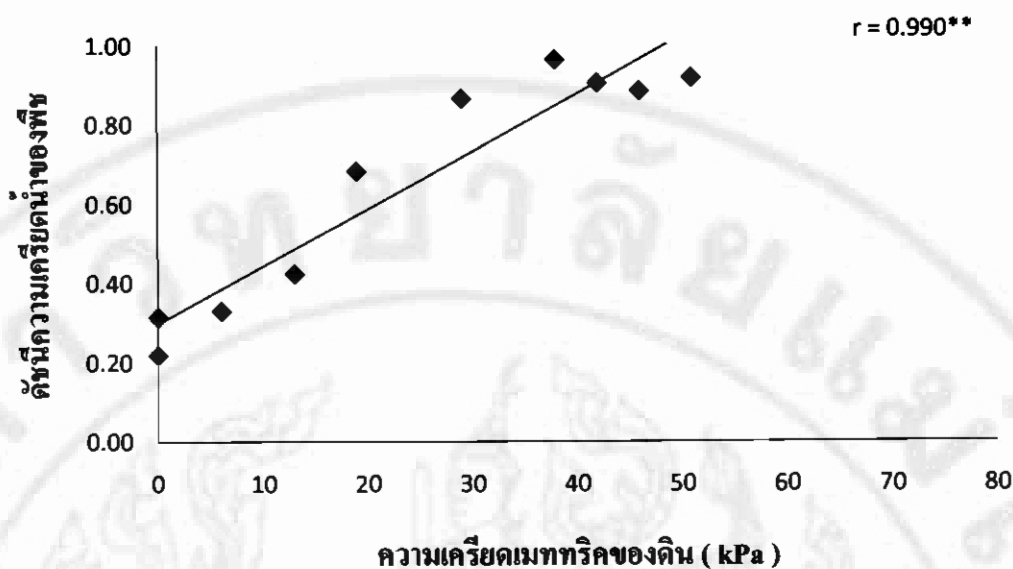
ความเครียดเมทริกซ์ของความชื้นดินในแปลงถูกงดให้น้ำ (วิกฤติ) ของดินทั้ง 3 ชุดดินแสดงเป็นรายวันในตาราง 17 และภาพ 13 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเมทริกซ์ของความชื้นดินของดินทั้ง 3 ชุดดิน เมื่อระยะเวลาการงดให้น้ำนานขึ้นความเครียดของความชื้นดินทั้ง 3 ชุดดินเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

ตาราง 17 ความเครียดเมทริกซ์ของความชื้นดินรายวันในแปลงถูงงดให้น้ำ (วิกฤติ) (kPa)

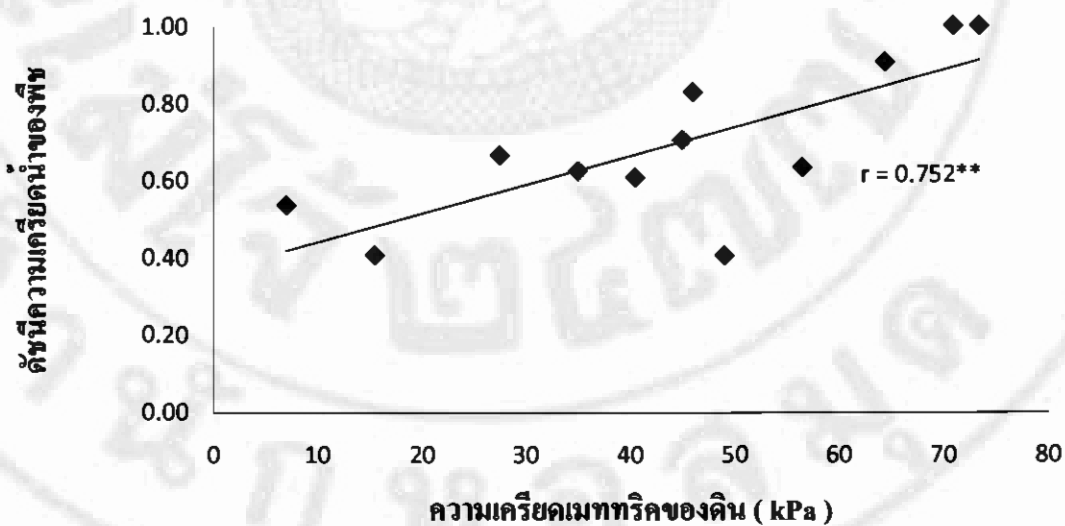
วันที่ทดลอง (วันที่)	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอบปุ๋ย
1(9/2/54)	0	10	5
2(10/2/54)	1	10	6
3(11/2/54)	7	15	11
4(12/2/54)	21	38	30
5(13/2/54)	34	51	43
6(14/2/54)	55	69	62
7(15/2/54)	64	76	70
8(16/2/54)	71	82	77
9(17/2/54)	72	83	78
10(18/2/54)	77	85	81
11(19/2/54)	79	85	82
12(20/2/54)	80	85	83

ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับ ความเครียดเมทริกซ์ (metric suction)

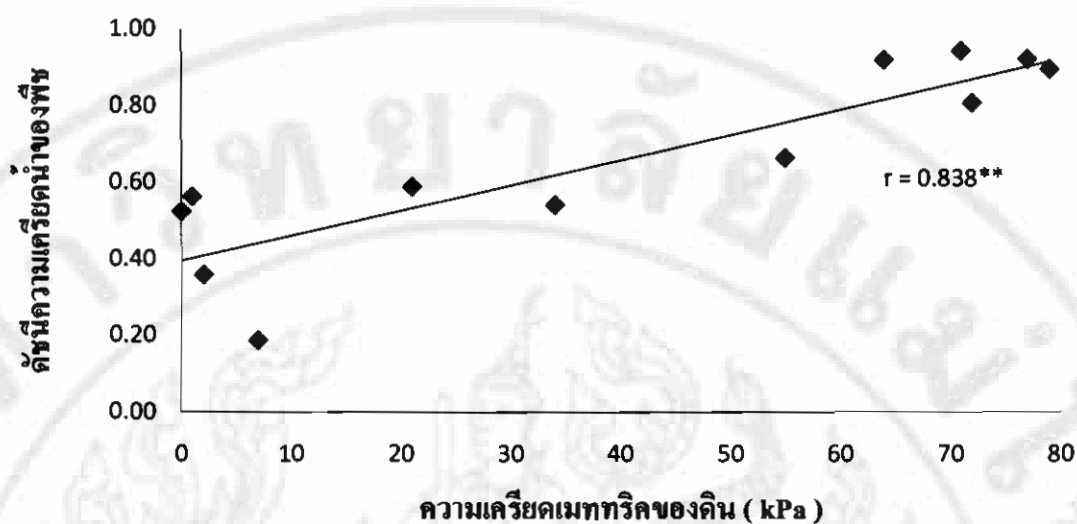
ภาพ 18-20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมทริกซ์ของดินในแต่ละชุดดิน พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมทริกซ์ของดินในดินทั้ง 3 ชุดดินมีนัยสำคัญทางสถิติเลย



ภาพ 18 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความอิ่มตัวของน้ำของพืช กับ ความเค้นเมทริกของดินจากแปลงวิกฤติของ ชุดดินน้ำพอง (** = ความสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.99)



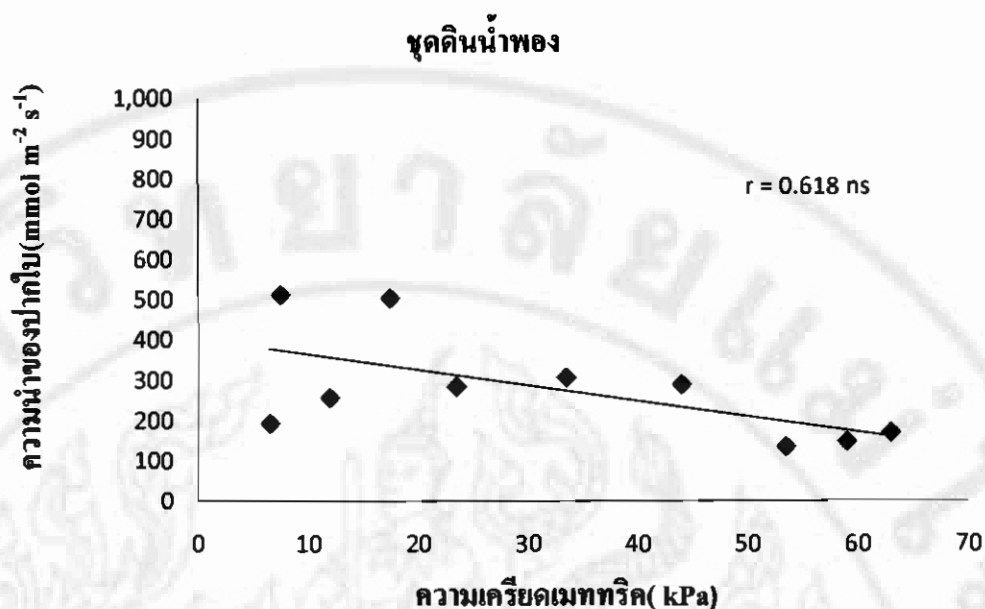
ภาพ 19 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความอิ่มตัวของน้ำของพืช กับ ความเค้นเมทริกของดินจากแปลงวิกฤติ ของชุดดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน (** = ความสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.99)



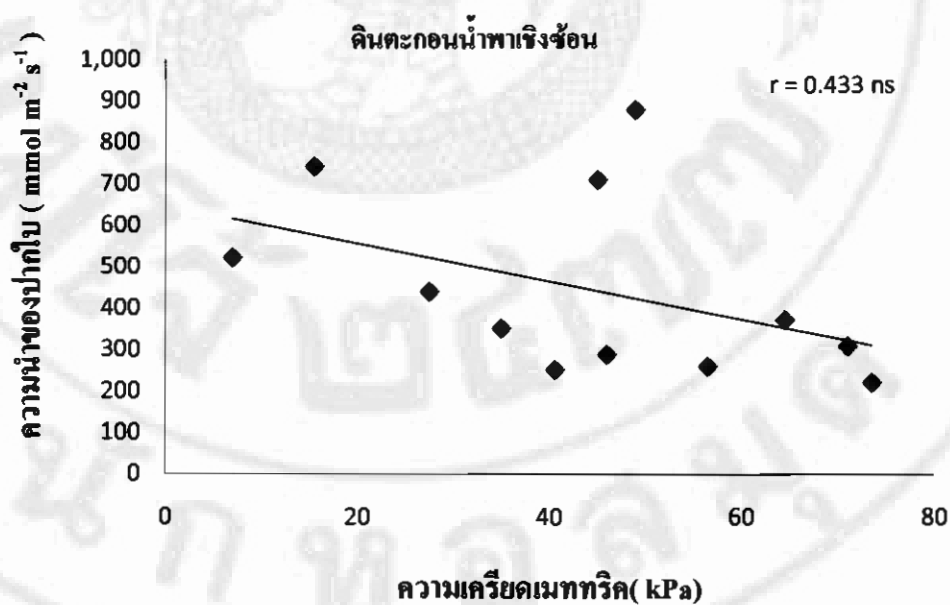
ภาพ 20 ความสัมพันธ์ระหว่าง อัตราส่วนความเคียดน้ำของพืช กับ ความเคียดเมทริกของดินจากแปลงวิกฤติ ของชุดดินตอขุข (** = ความสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.99)

ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบของพืชกับ ความเคียดเมทริก (metric suction)

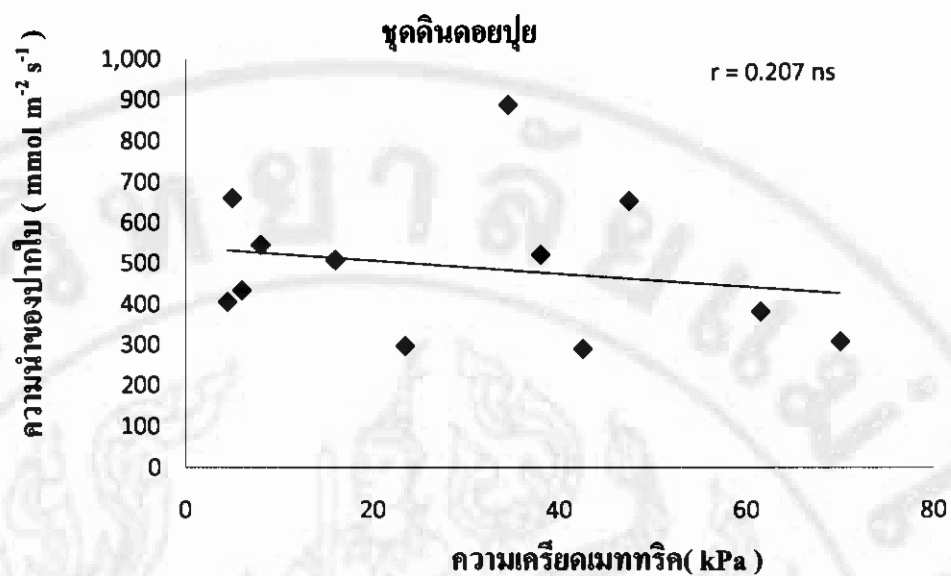
ภาพ 21-23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความนำของปากใบของพืชกับความเคียดเมทริกของดินในแต่ละชุดดิน พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความนำของปากใบของพืชกับความเคียดเมทริกของดินในดินทั้ง 3 ชุดดินไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเลย



ภาพ 21 ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบของพืชกับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินน้ำทอง (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพ 22 ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบของพืช กับ ความเครียดเมทริก ในดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพ 23 ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบของพืช กับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินคอยปุย (ns = ความสัมพันธ์ไม่นับสำคัญทางสถิติ)

ผลการทดลองที่ 2 การศึกษาดัชนีความเครียดของน้ำในพืชของ

ผักบุ้งโดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น

VarioCAMHiRes 384 sl

(Infratec, Germany)

ภูมิอากาศในโรงเรือนระหว่างการทดลอง

ภูมิอากาศในโรงเรือนระหว่างการทดลองได้แก่ ภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ ความเร็วลม และการระเหยน้ำ แสดงในตารางที่ 18 พบว่า อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยของอากาศ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ช่วง วันที่ 3 ของการทดลอง ที่อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย เพิ่มขึ้นจาก 19.81 °ซ เป็น 25.05°ซ ขณะที่ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของอากาศก็ไม่มีแนวโน้มลดลง แต่การระเหยน้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ตาราง 18 สภาพภูมิอากาศระหว่างการทดลองที่ 2

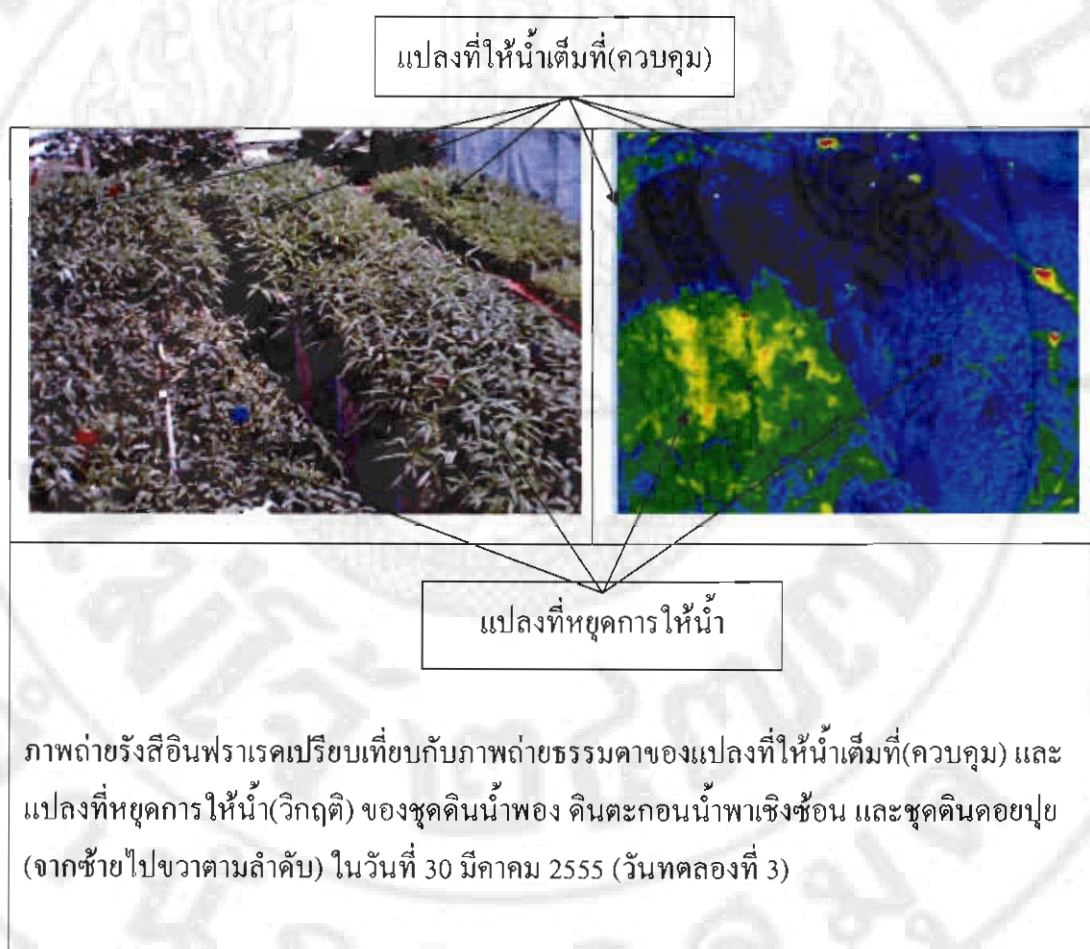
วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิ, (°ซ)			ความชื้นสัมพัทธ์, (%)			ความเร็ว ลม ¹ , (ม./ วินาที)	การ ระเหย น้ำ ² , (มม./วัน)
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย		
1 (28/3/54)	25.20	19.90	21.92	77.00	59.00	69.38	0.00	2.1
2 (29/3/54)	21.50	19.10	19.81	72.00	66.00	70.67	0.00	2.45
3 (30/3/54)	30.30	19.60	25.05	81.00	46.00	60.60	0.08	1.87
4(31/4/54)	33.80	16.30	24.30	90.00	41.00	67.71	0.14	2.54
5 (1/4/54)	36.50	18.90	26.93	91.00	35.00	67.21	0.03	5.42
6 (2/4/54)	38.20	21.80	28.61	87.00	34.00	65.79	0.01	4.1
7 (3/4/54)	38.30	20.30	27.89	89.00	34.00	66.63	0.07	4.23
8 (4/4/54)	41.10	20.00	28.24	87.00	27.00	62.21	0.03	4.77
9 (9/4/54)	36.50	22.50	27.75	92.00	55.00	76.67	0.05	5.3
10 (10/4/54)	34.70	22.30	28.32	90.00	55.00	74.46	0.05	3.6
11 (11/2/54)	38.90	23.20	28.65	93.00	47.00	72.67	0.04	1.5

หมายเหตุ ¹วัดจาก ชุดเครื่องมือตรวจอากาศ (weather station)

²วัดจาก American Class A pan

ถ่ายภาพความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรด

ตัวอย่างภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดของวันหนึ่งของการทดลอง ดินทั้ง 3 ชุดดินพร้อมกับภาพถ่ายสีปรกติเมื่อเวลาเดียวกัน ของแปลงผักบุ้งที่แสดงในภาพ 24 ในภาพถ่ายความร้อนด้วยรังสีอินฟราเรดแต่ละภาพมีพื้นที่ใบ ที่ได้รับการจัดการต่างกัน คือ เรือนยอดของผักบุ้งที่รดให้น้ำ (วิกฤติ) เรือนยอดของผักบุ้งที่ใบถูกเคลือบด้วยวาสลีนเรือนยอดของผักบุ้งที่ได้รับน้ำทุกวัน (ควบคุม) และ เรือนยอดของผักบุ้งที่ใบถูกพ่นด้วยละอองน้ำที่มีสีซึ่งแสดงระดับอุณหภูมิต่างกัน



ภาพ 24 ภาพถ่ายจากกล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl (Infratec, Germany)

อุณหภูมิและความนำปากใบของพืช

อุณหภูมิใบพืชที่ได้รับการจัดการต่างกัน 4 แบบ ได้แก่ ใบทิ้งคให้น้ำ (วิกฤติ) ใบถูกเคลือบด้วยวาสลินใบพืชที่ได้น้ำทุกวัน (ควบคุม) และ ที่ใบถูกพ่นด้วยละอองน้ำและความนำของปากใบของใบทิ้งคให้น้ำ (วิกฤติ) และใบพืชที่ได้น้ำทุกวันเป็นรายวันของแต่ละคืนที่ใช้ในการทดลองแสดงในตาราง 19-21

ตาราง 19 อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักบุ้งปลูกในชุดดินน้ำพอง

วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิใบ พืชอ้างอิง ต่ำสุด (°ซ)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงสูงสุด (°ซ)	อุณหภูมิพืชทดลอง (°ซ)		ความนำของปากใบ (mmol m ⁻² s ⁻¹)		ดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI)	
			ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ
1 (28/4/54)	25.6	27.1	26.0	26.3	242	263	0.33	0.47
2 (29/4/54)	29.8	31.4	30.3	30.4	174	365	0.30	0.40
3 (30/4/54)	30.4	34.9	31.3	33.6	1,000	878	0.21	0.71
4 (2/4/54)	30.1	32.1	31.3	31.0	458	510	0.63	0.49
5 (3/4/54)	32.9	38.8	34.0	36.7	313	197	0.21	0.72
6 (4/4/54)	27.9	31.1	28.6	30.6	783	576	0.21	0.84
7 (9/4/54)	28.3	30.4	28.7	30.4	168	476	0.2	0.98
8 (10/4/54)	26.9	28.6	27.4	28.4	193	157	0.26	0.85
9 (11/4/54)	32.0	41.3	33.5	41.3	416	304	0.15	0.99

ตาราง 20 อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในดินตะกอนน้ำฟ้าเชิงซ้อน

วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงต่ำสุด (°ซ)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงสูงสุด (°ซ)	อุณหภูมิพืชทดลอง (°ซ)		ความนำของปากใบ (mmol m ⁻² s ⁻¹)		ดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI)	
			ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ
1 (28/4/54)	25.5	27.9	25.9	26.1	239	202	0.16	0.25
2 (29/4/54)	28.0	33.1	28.7	29.5	143	266	0.14	0.30
3 (30/4/54)	32.2	35.5	32.9	32.8	596	620	0.23	0.19
4 (2/4/54)	32.2	35.2	33.1	31.5	504	413	0.66	0.60
5 (3/4/54)	32.9	41.1	33.7	38.5	287	308	0.10	0.66
6 (4/4/54)	27.3	29.5	28.1	29.1	858	786	0.36	0.80
7 (9/4/54)	28.6	29.5	29.1	29.4	136	299	0.56	0.87
8 (10/4/54)	27.3	28.4	27.4	28.1	233	143	0.10	0.72
9 (11/4/54)	31.8	41.2	33.0	39.3	251	241	0.13	0.79

ตาราง 21 อุณหภูมิใบและความนำของปากใบของผักนึ่งปลูกในชุดดินคอกปุ๋ย

วันที่ทดลอง (วันที่)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงต่ำสุด (°ซ)	อุณหภูมิใบพืช อ้างอิงสูงสุด (°ซ)	อุณหภูมิพืชทดลอง (°ซ)		ความนำของปากใบ (mmol m ⁻² s ⁻¹)		ดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI)	
			ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ	ควบคุม	เกิดวิกฤติ
1 (28/4/54)	27.1	28.6	27.7	27.5	208	202	0.40	02.6
2 (29/4/54)	28.6	33.7	29.9	31.3	172	185	0.35	0.45
3 (30/4/54)	33.0	36.8	34.7	34.4	623	479	0.36	0.44
4 (2/4/54)	31.9	33.3	32.5	33.1	346	344	0.40	0.88
5 (3/4/54)	30.1	41.7	31.6	40.1	218	189	0.13	0.86
6 (4/4/54)	28.0	31.3	29.0	31.0	577	503	0.31	0.92
7 (9/4/54)	28.8	29.7	28.9	29.4	122	141	0.15	0.64
8 (10/4/54)	26.8	28.7	27.5	28.4	231	198	0.40	8.86
9 (11/4/54)	32.2	39.9	24.6	38.2	128	210	0.32	0.78

ค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI)

ค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชเมื่อวันที่ 1-3 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 28 มีนาคม – 1 เมษายน 2554) แสดงในตาราง 22 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 15) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำและชนิดดินที่ปลูกพืชต่างไม่มีผลต่อค่าดัชนีความเครียดของน้ำในผักบุ้งในช่วงวันที่ 1 – 3 หลังจากการรดให้น้ำ

ตาราง 22 ค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI) วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงชัน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	0.38	0.35	0.53	0.42
วิกฤติ	0.41	0.30	0.36	0.36
เฉลี่ย	0.39	0.33	0.45	0.39

ค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชเมื่อวันที่ 4-6 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 2-4 เมษายน 2554) แสดงในตาราง 23 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 16) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำและชนิดดินที่ปลูกพืชต่างไม่มีผลต่อค่าดัชนีความเครียดของน้ำในผักบุ้งในช่วงวันที่ 4 – 6 หลังจากการรดให้น้ำ

ตาราง 23 ค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI) วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงชัน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	0.44	0.56	0.45	0.49
วิกฤติ	0.58	0.59	0.65	0.61
เฉลี่ย	0.51	0.58	0.55	0.55

ค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชเมื่อวันที่ 7-9 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 9-11 เมษายน 2554) แสดงในตาราง 24 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 17) แสดงให้เห็นว่าทั้งปัจจัยการให้น้ำและชนิดดินที่ปลูกพืชต่างมีผลต่อดัชนีความเครียดของน้ำในผักนึ่งในช่วงวันที่ 7-9 หลังจากการรดให้น้ำ

ตาราง 24 ค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืช (CWSI) วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงชัน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	0.59	0.72	0.66	0.66B
วิกฤติ	0.88	0.81	0.59	0.76A
เฉลี่ย	0.73a	0.77a	0.63b	0.71

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่กำกับด้วยอักษรตัวใหญ่ต่างกัน แยกต่างหากทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.05 ด้วย Duncan's multiple range test

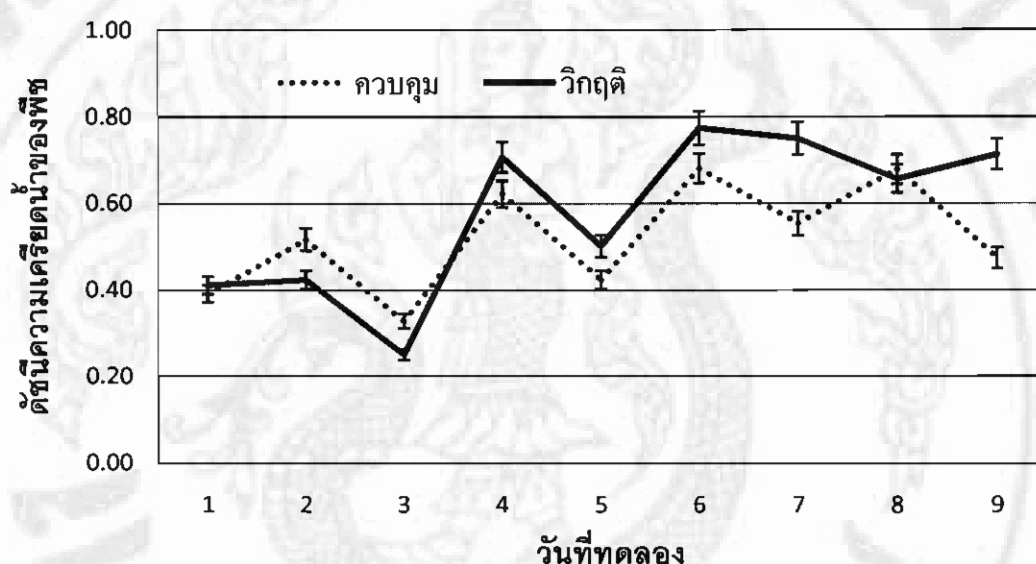
** ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยอักษรตัวเล็กต่างกัน แยกต่างหากทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.05 ด้วย Duncan's multiple range test

เมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยราย 3 วัน ของข้อมูลตลอดช่วงการทดลอง 12 วันพบว่าผักนึ่งที่อยู่ในภาวะวิกฤติ คือถูกงดให้น้ำ มีดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) จากอุณหภูมิใบที่วัดโดยกล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl (Infratec, Germany) มากกว่าผักนึ่งที่อยู่ได้รับน้ำตามปรกติวันละครั้ง ตั้งแต่ระยะ 3 วันแรกของการงดน้ำ จนเสร็จสิ้นการทดลอง ยกเว้นเพียงช่วงวันที่ 1-3 ของการทดลอง ส่วนปัจจัยด้านชนิดดินที่ใช้ปลูกพืชไม่มีผลให้ ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (CWSI) ต่างกัน ยกเว้นเพียงช่วงวันที่ 7-9 ของการทดลอง

ค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในพืช (Crop Water Stress Index)

แนวโน้มของค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในพืช จากการทดลองในทั้ง 3 ชุดดิน แสดงในภาพ 25 เห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบผักนึ่งที่ได้รับน้ำทุกวันอยู่ที่ประมาณ 0.25 - 0.68 ขณะที่ค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบ

ผักบุ้งที่ถูกงดให้น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเกือบตลอดเวลาของการทดลอง 9 วัน ทำให้ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบพืชระหว่างพืชที่ให้น้ำทุกวันและที่ถูกงดให้น้ำแตกต่างกันมากขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่ากล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl (Infratec, Germany) มีประสิทธิภาพในระดับที่สามารถใช้วัดอุณหภูมิใบพืชในระดับหนึ่ง เพื่อประเมินดัชนีความเครียดของน้ำในพืชได้ดี



ภาพ 25 แนวโน้มของค่าดัชนีความเครียดน้ำของพืชของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำเฉลี่ย 3 दिनรายวัน

ความนำของปากใบของพืช

ความนำของปากใบของพืชเมื่อวันที่ 1-3 หลังจากเริ่มงดให้น้ำ (วันที่ 28 มีนาคม -1 เมษายน 2554) แสดงในตาราง 25 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 18) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยชนิดดินที่ปลูกพืชมีผลต่อความนำของปากใบของผักบุ้งในช่วงวันที่ 1 – 3 หลังจากการงดให้น้ำ

ตาราง 25 ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) วันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอยบู่	
ควบคุม	471.96	325.95	333.98	377.29
วิกฤติ	501.76	362.5	288.82	384.36
เฉลี่ย	486.86a	344.22b	311.4b	380.83

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยอักษรตัวเล็กต่างกัน แตกต่างกันอย่างสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.05 ด้วย Duncan's multiple range test

ความนำของปากใบของพืชเมื่อวันที่ 4-6 หลังจากเริ่มดให้น้ำ (วันที่ 2-4 เมษายน 2554) แสดงในตาราง 26 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 19) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยชนิดดินที่ปลูกพืชมีผลต่อความนำของปากใบในผักบุ้งในช่วงวันที่ 4 – 6 หลังจากการดให้น้ำ

ตาราง 26 ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) วันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอยบู่	
ควบคุม	421.23	426.92	305.91	384.69
วิกฤติ	416.38	464.28	277.65	386.1
เฉลี่ย	418.8a	445.6a	291.78b	385.39

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแนวนอนที่กำกับด้วยอักษรตัวเล็กต่างกัน แตกต่างกันอย่างสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.05 ด้วย Duncan's multiple range test

ความนำของปากใบของพืชเมื่อวันที่ 7-9 หลังจากเริ่มรดให้น้ำ (วันที่ 9 -11 เมษายน 2554) แสดงในตาราง 27 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance, ตารางผนวก 20) แสดงให้เห็นว่าปัจจัยการให้น้ำพืชมีผลต่อความนำของปากใบในผักบุ้งในช่วงวันที่ 7- 9 หลังจากการรดให้น้ำ

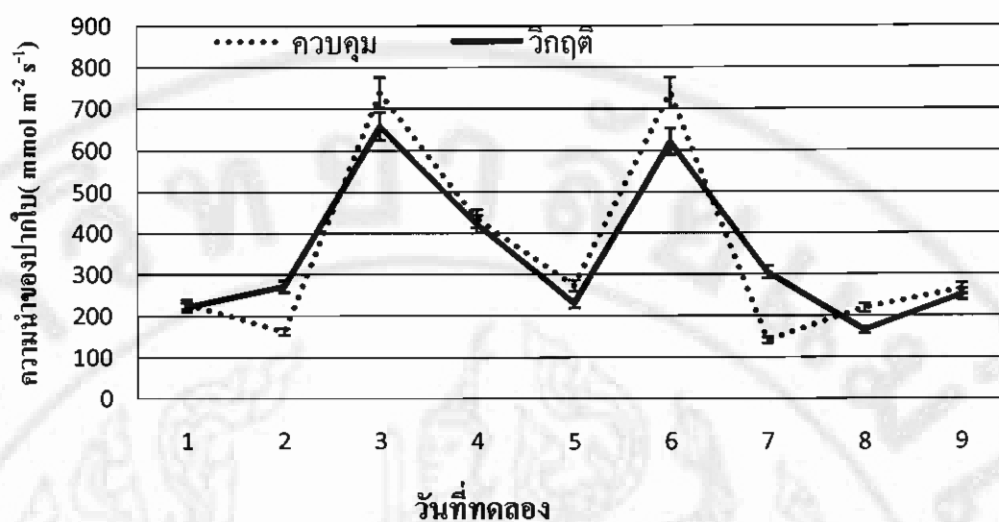
ตาราง 27 ความนำของปากใบของพืช ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) วันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2

การให้น้ำ	ดินที่ปลูกพืช			เฉลี่ย
	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอกปุ๋ย	
ควบคุม	472.15	377.35	321.1	390.2A
วิกฤติ	209.54	355.23	315.24	293.33B
เฉลี่ย	340.84	366.29	318.17	341.77

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยในแนวดิ่งที่กำกับด้วยอักษรตัวใหญ่ต่างกัน แยกต่างหากทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.05 ด้วย Duncan 's multiple range test

ความนำของปากใบ (Stomata Conductance) รายวัน

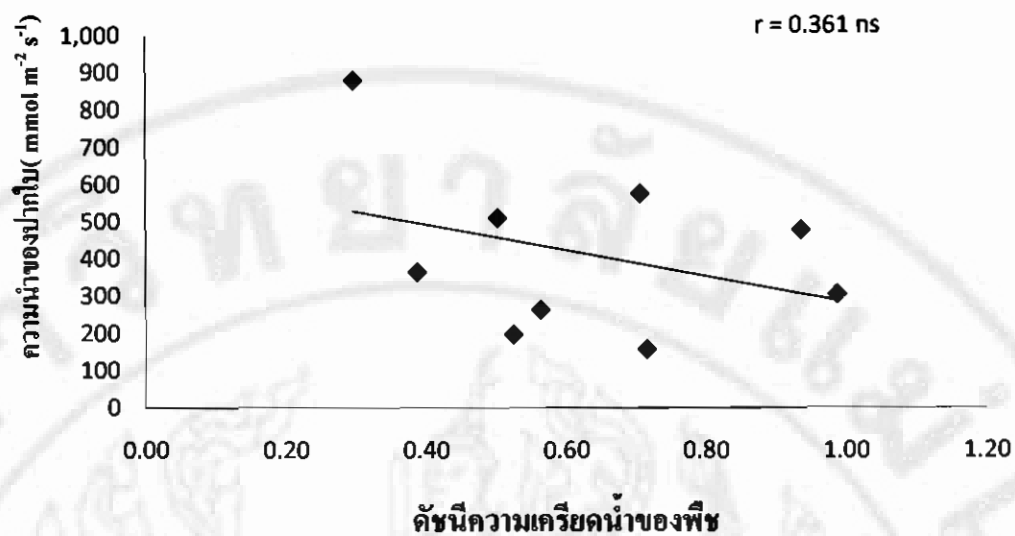
แนวโน้มของค่าเฉลี่ยรายวันของความนำของปากใบ จากการทดลองในทั้ง 3 ชุดดินแสดงในภาพที่ 26 เห็นได้ว่า ค่าเฉลี่ยรายวันของความนำของปากใบของผักบุ้งที่ให้น้ำทุกวันและที่ถูงดรดให้น้ำใกล้เคียงกันมากในช่วง 6 วันแรกของการทดลอง และเริ่มแตกต่างกันเล็กน้อย (อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ในช่วง 6 วันหลังของการทดลองแต่ความแตกต่างนี้ยังน้อยกว่าความผันแปรของค่าเฉลี่ยรายวันที่ผันแปรระหว่างวันต่อวัน แสดงให้เห็นว่า ความนำของปากใบที่วัดโดย porometer รุ่น SC-1 กับใบผักบุ้งที่โดนแดดโดยตรง ที่ละใบ จำนวน 5 ใบในแต่ละเช้าของแต่ละวิธีการให้น้ำนั้นผันแปรตาม microclimate ของอากาศในโรงเรือนแต่ละวันมากกว่าความเครียดของน้ำในพืช



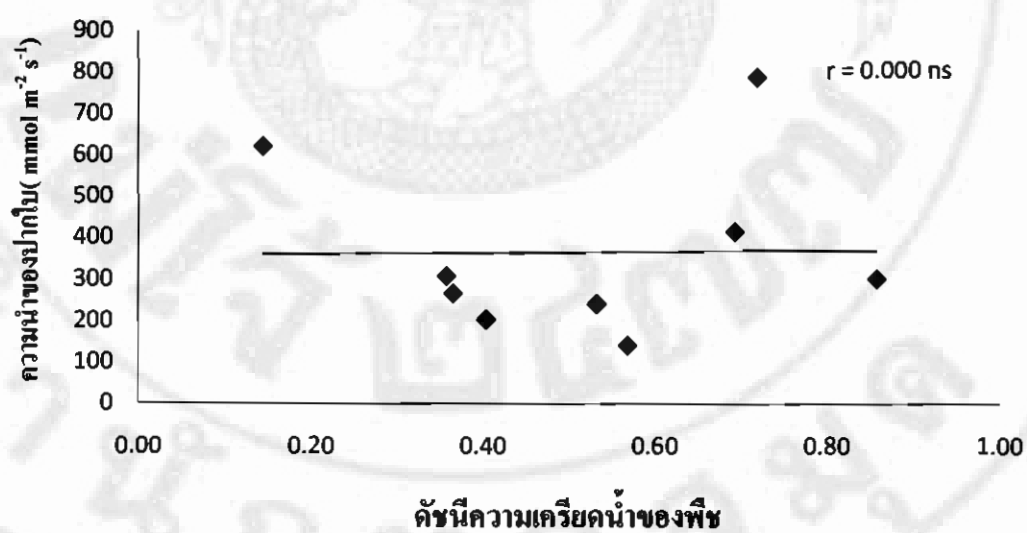
ภาพ 26 ความนำของปากใบ (Stomata Conductance) ของแปลงที่ให้น้ำเต็มที่เปรียบเทียบกับแปลงที่หยุดการให้น้ำ รายวันเฉลี่ย 3 दिन

ความสัมพันธ์ ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบ

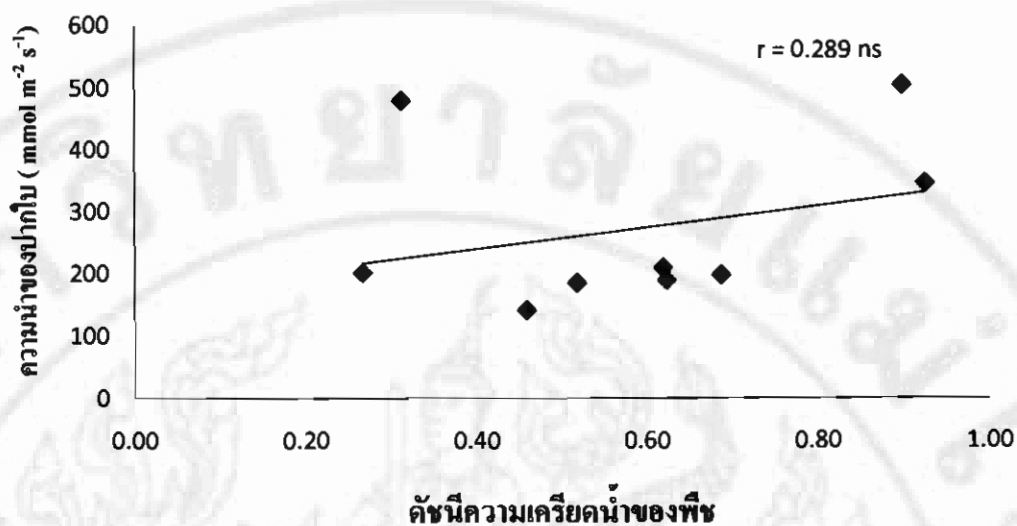
ภาพ 27–29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความนำของปากใบของใบผักบุ้งในแต่ละชุดดิน พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความนำของปากใบของใบผักบุ้งในดินทั้ง 3 ชุดดินไม่นับสำคัญทางสถิติเลย



ภาพ 27 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบของพืชในชุดดินน้ำพอง (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพ 28 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบของพืชในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพ 29 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืช กับ ความนำของปากใบของพืชใน ชุด ดินคอกขุยมุข (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)

ความเครียดเมแทบอลิซึมของความชื้นดินในแปลงที่ถูกงดน้ำ

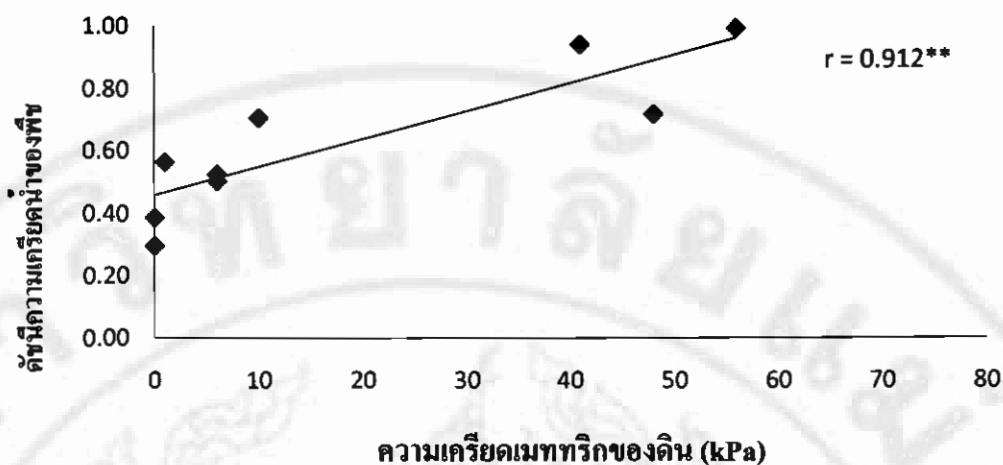
ความเครียดเมแทบอลิซึมของความชื้นดินในแปลงถูกงดน้ำ (วิกฤติ) ของดินทั้ง 3 ชุด ดินแสดงเป็นรายวันในตาราง 28 ภาพ 27 - 29 แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเมแทบอลิซึมของความชื้นดินของดินทั้ง 3 ชุดดิน เมื่อระยะเวลาการงดให้น้ำนานขึ้น ตาราง 28 และภาพ 27 - 29 แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลาการงดให้น้ำนานขึ้นความเครียดของความชื้นดินทั้ง 3 ชุดดิน เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

ตาราง 28 ความเครียดเมตทริก (metric suction) ก่อนให้น้ำ จากแปลงควบคุมและแปลงวิกฤติ (kPa)

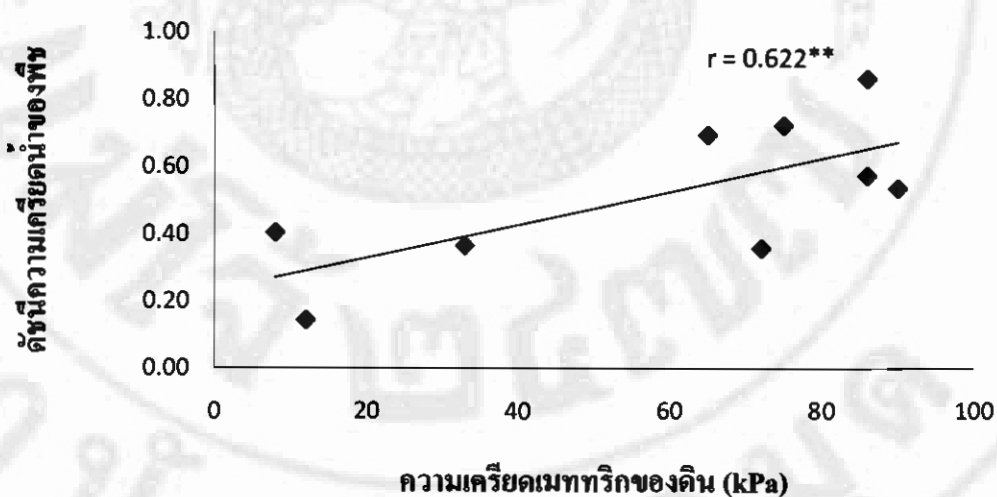
วันที่ทดลอง (วันที่)	ชุดดินน้ำพอง	ดินตะกอนน้ำพา เชิงซ้อน	ชุดดินคอกปุ๋ย
1 (28/4/54)	1	8	1
2 (29/4/54)	0	33	3
3 (30/4/54)	0	12	3
4 (2/4/54)	6	65	10
5 (3/4/54)	6	72	20
6 (4/4/54)	10	75	38
7 (9/4/54)	41	86	70
8 (10/4/54)	48	86	72
9 (11/4/54)	56	90	75

ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมตทริกของดิน (metric - suction)

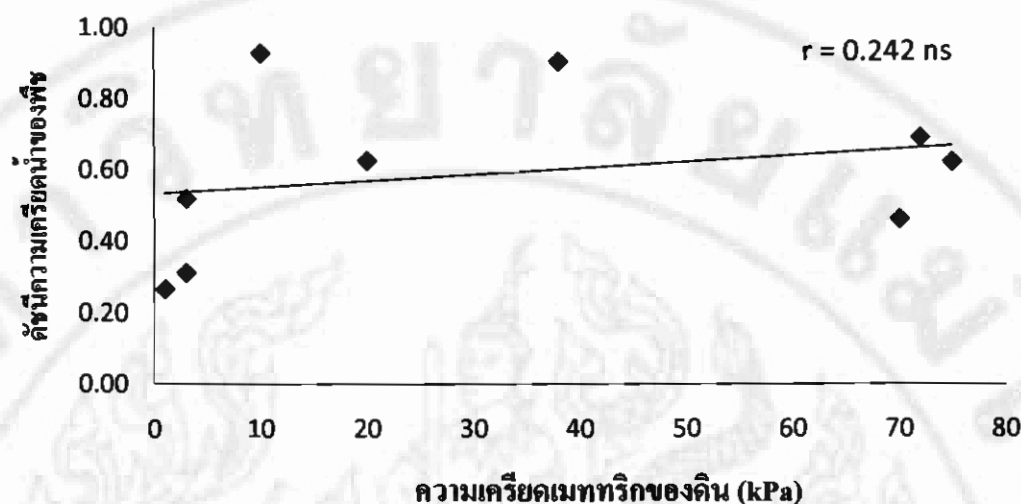
ภาพ 30-32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมตทริกของดินในแต่ละชุดดินพบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมตทริกของดินในดินทั้ง 3 ชุดดินมีนัยสำคัญทางสถิติ ยกเว้น ชุดดินคอกปุ๋ยไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพ 30 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมทริกจากแปลงวิกฤติ
ในชุดดินน้ำพอง (** = ความสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.99)



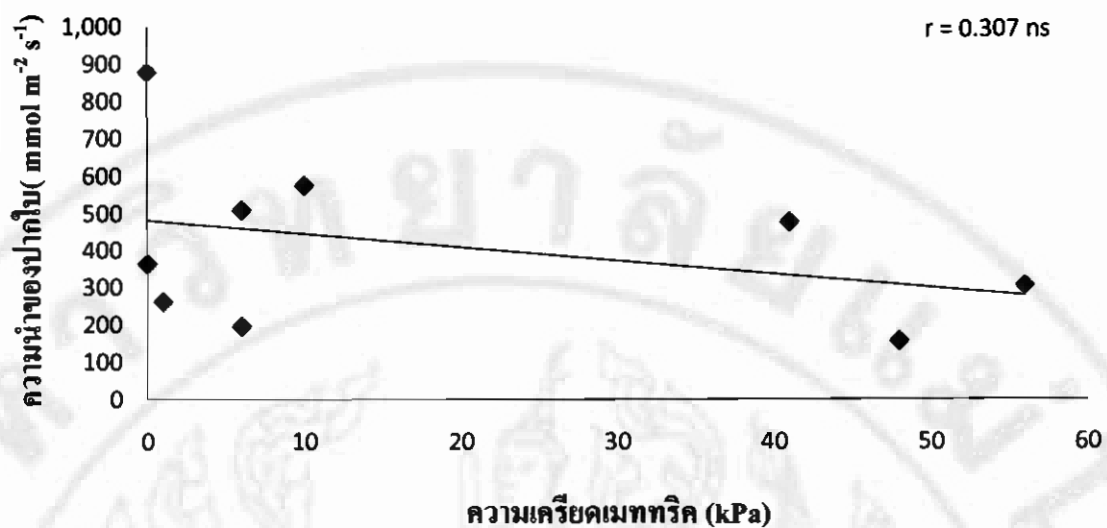
ภาพ 31 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมทริกจากแปลงวิกฤติ
ในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน (** = ความสัมพันธ์มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความน่าจะเป็น 0.99)



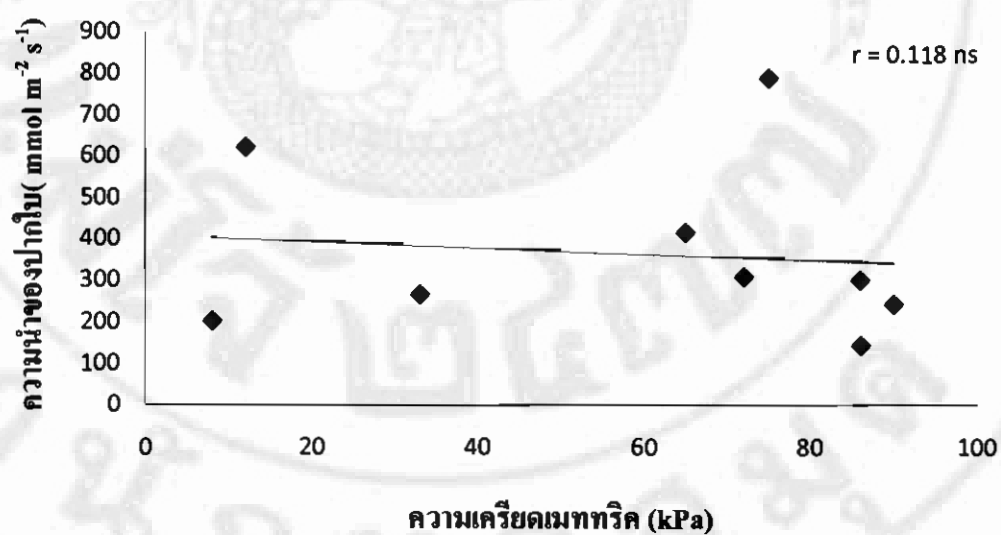
ภาพ 32 ความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมทริกจากแปลงวิกฤติ
ในชุดดินคอกปุ๋ย (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)

ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบกับ ความเครียดเมทริก (metric suction)

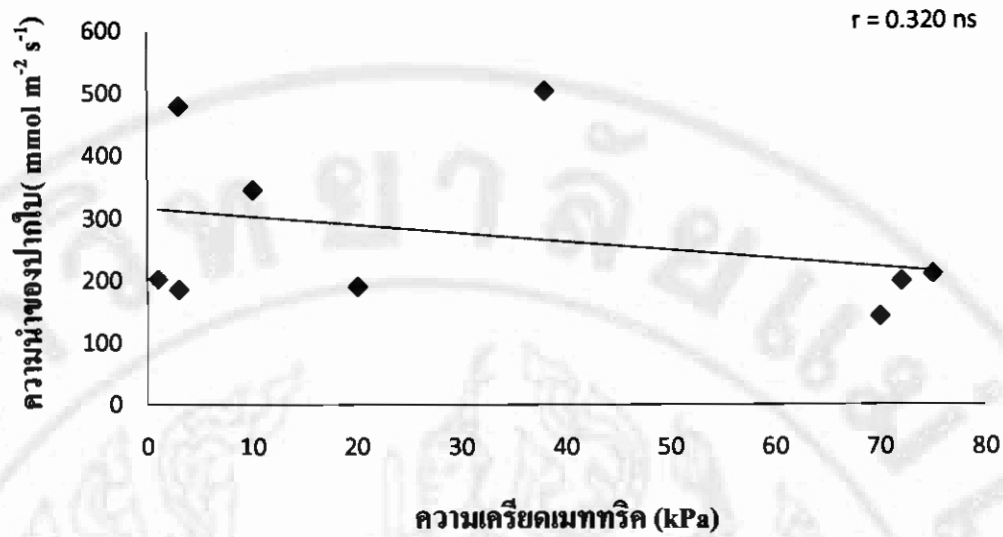
ภาพ 33 -35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความนำของปากใบของพืชกับ
ความเครียดเมทริกของดินในแต่ละชุดดิน พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความนำของปากใบของ
พืชกับความเครียดเมทริกของดินในดินทั้ง 3 ชุดดินไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเลย



ภาพ 33 ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบกับ ความเครียดเมทริก ในชุดดินน้ำพอง (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพ 34 ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบกับ ความเครียดเมทริก ในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)



ภาพ 35 ความสัมพันธ์ ความนำของปากใบกับ ความเคี้ยวเมทริก ในชุดดินคอยบุย (ns = ความสัมพันธ์ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ)

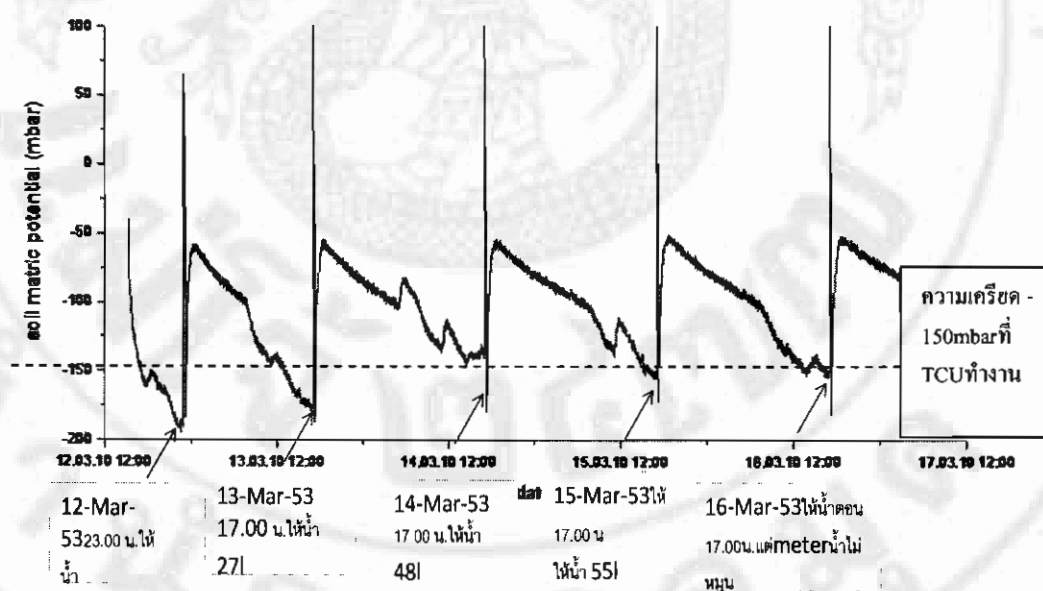
ผลการทดลองที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยควบคุมการให้น้ำ

โดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit, TCU)

การทดลองกับกะหล่ำปลี

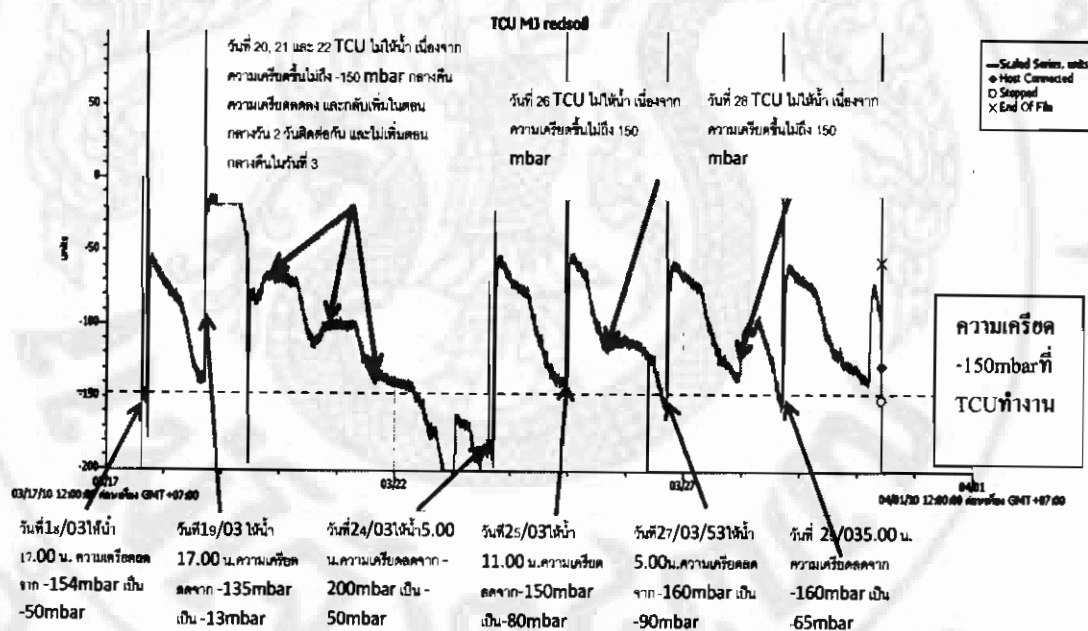
1. การทดลองในชุดดินคดยปูย

ผลการบันทึกความเครียดของความสัมพันธ์ดินและการปิดเปิดประตูน้ำของกระบอกคดยปูย 3 ช่วงเวลา คือ 12 -17 มีนาคม, 17 – 30 มีนาคม และ 30 มีนาคม– 8 เมษายน 2553 แสดงในภาพ 35-37 โดยภาพรวมหน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์สามารถควบคุมการเปิดน้ำเมื่อความเครียดที่วัดได้เกิน -15 kPa เล็กน้อยได้เป็นอย่างดี จะมีตลาดเคลื่อนบ้างเพียงเล็กน้อย ที่การเปิดน้ำเมื่อความเครียดไม่ถึง -15 kPa สำหรับการเปิดให้น้ำเมื่อความเครียดเกิน -15 kPa นั้น เนื่องจาก เมื่อถึงเวลา timer switch ครั้งหนึ่งนั้น ความเครียดไม่ถึง -15 kPa แต่พืชมีการใช้น้ำตลอด ดังนั้นเมื่อถึงเวลาครั้งต่อไป ความเครียดจึงเกิน 15 kPa หลังจากให้น้ำประมาณ 30 นาที ความเครียดของน้ำในดินลดลงอยู่ที่ประมาณ -50 ถึง -60 kPa

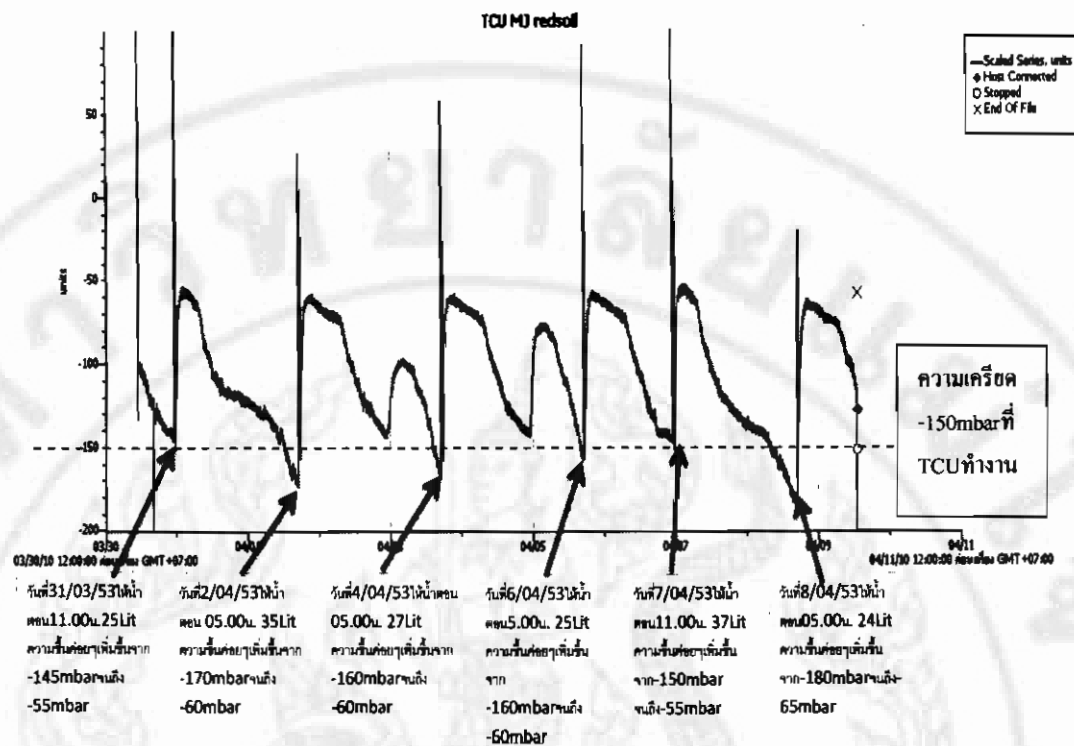


ภาพ 36 ความเครียดของความสัมพันธ์ดินและการปิดเปิดประตูน้ำของกระบอกคดยปูย ระหว่าง 12 -17 มีนาคม 2553

วันที่ 19 มีนาคม มีการให้น้ำเมื่อ 17.00 -17.30 น. และให้น้ำมากจนความเครียดลดลงอยู่ที่ -13 kPa ประกอบกับในช่วงวันที่ 21 – 22 มีนาคมมีฝนตกเล็กน้อย และฟ้าหลัว อากาศชื้นต่อเนื่อง (ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาของแม่สาใหม่ ทำให้พืชใช้น้ำน้อย ตลอด 3 วัน (20 – 20 มีนาคม) ความเครียดจึงขึ้นไม่ถึง -15 kPa ทำให้ หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นเซอร์ไฮโดรมิเตอร์ไม่เปิดประตุน้ำให้น้ำ (ภาพ 37) นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าในวันที่ 20 และ 21 มีนาคมที่ความเครียดจึงขึ้นไม่ถึง -15 kPa ไม่มีการให้น้ำนั้น พอถึงเวลากลางคืนที่พืชคายน้ำน้อย ความเครียดของน้ำก็ลดลง และกลับเพิ่มขึ้นในตอนกลางวัน แต่เมื่อถึงวันที่ 22 มีนาคม ความเครียดกลับไม่เพิ่มขึ้นในตอนกลางวัน น่าจะเนื่องจาก เหลือน้ำอยู่ในดินน้อย



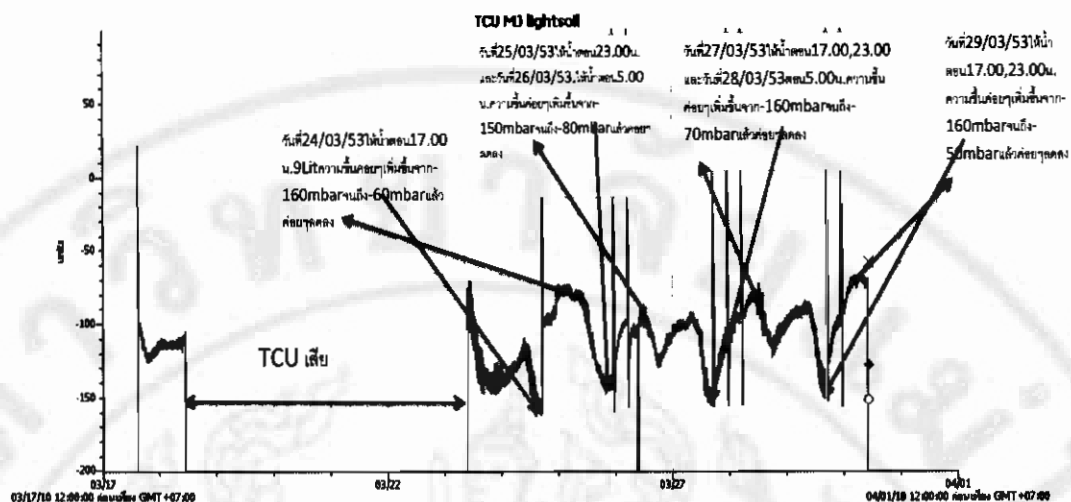
ภาพ 37 ความเครียดของความชื้นดินและการเปิดปิดประตุน้ำของกระบอกอุปยุ ระหว่าง 17-30 มีนาคม 2553



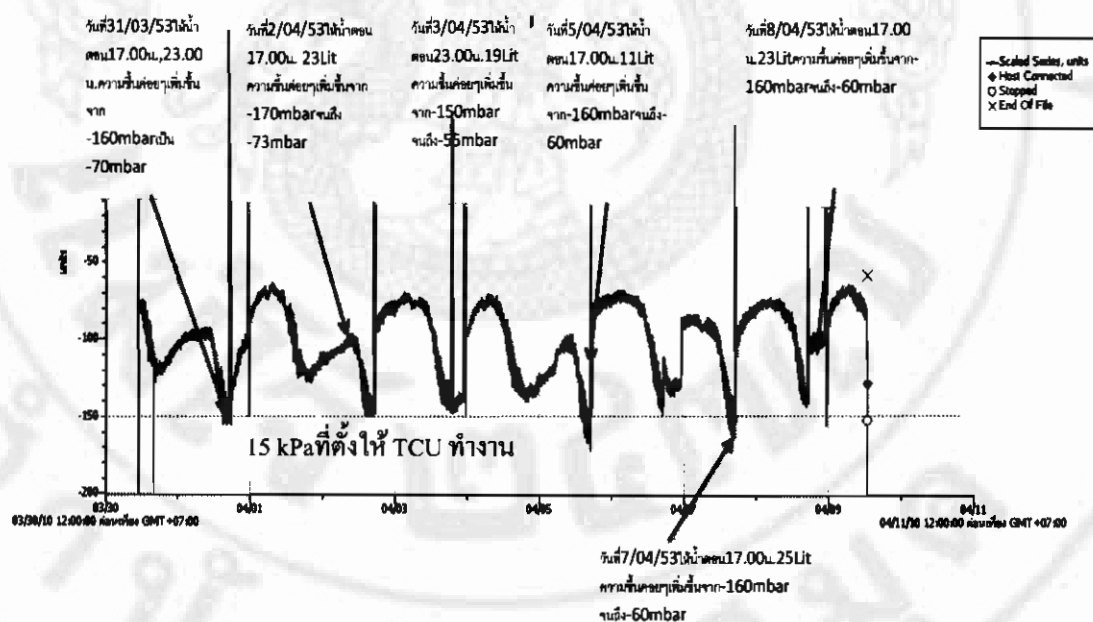
ภาพ 38 ความเครียดของความชื้นดินและการปิดเปิดประตูน้ำของกระบะดินคอกปู ระหว่าง 30 มีนาคม – 8 เมษายน 2553

2. การทดลองในชุดดินน้ำพอง

ผลการบันทึกความเครียดของความชื้นดินและการปิดเปิดประตูน้ำของกระบะดินชุดดินน้ำพอง 2 ช่วงเวลา 17 - 30 มีนาคม และ 30 มีนาคม – 8 เมษายน 2553 แสดงในภาพที่ 38-40 ในช่วงแรก หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นเซอร์ที่ใช้กับชุดดินน้ำพองขัดข้อง จึงไม่มีข้อมูลจนถึงวันที่ 25 มีนาคม 2553 หลังจากนั้นก็ทำงานได้ดี เปิดให้น้ำเมื่อความเครียดขึ้นถึง -15 kPa



ภาพ 39 ความเครียดของความสัมพันธ์ดินและการปิดเปิดประตูน้ำของกระเบาะชุดดินน้ำพองระหว่าง 17 - 30 มีนาคม 2553



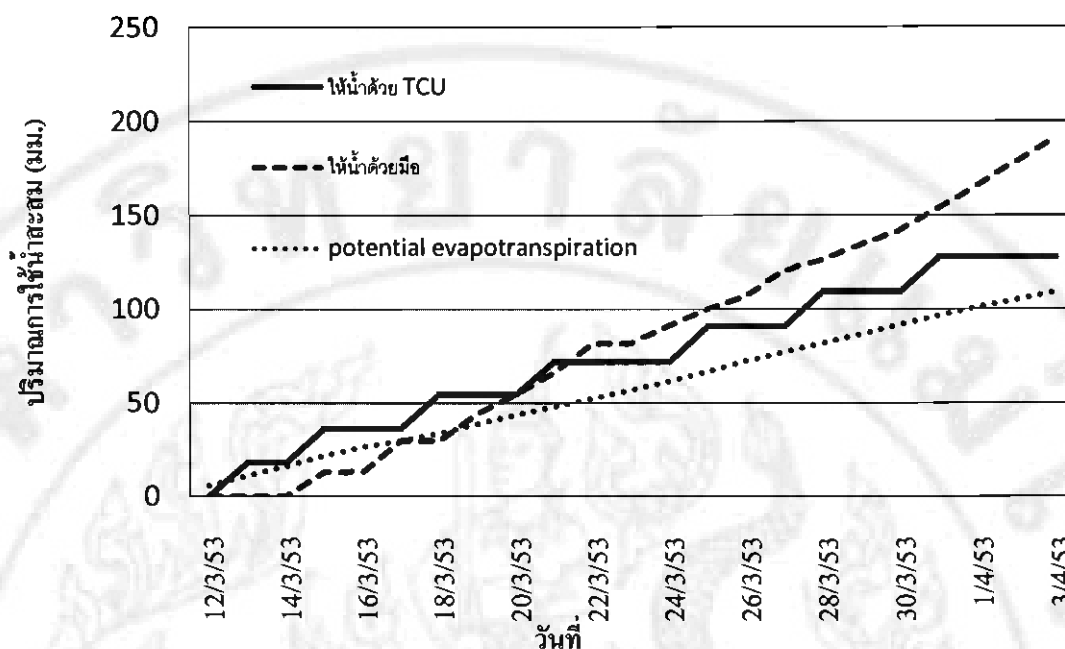
ภาพ 40 ความเครียดของความสัมพันธ์ดินและการปิดเปิดประตูน้ำของกระเบาะชุดดินน้ำพองระหว่าง 30 มีนาคม - 8 เมษายน 2553

ปริมาณน้ำที่หารายวันและปริมาณการให้น้ำสะสมของการทดลองในชุดดินคอยปุย

ปริมาณน้ำที่หารายวันคือกระบะทดลองระหว่างวันที่ 22 มีนาคม – 13 เมษายน 2553 แสดงในตาราง 26 และภาพ 41 มาตรฐานน้ำของกระบะให้น้ำด้วยมือของดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และกระบะให้น้ำด้วยหน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ของชุดดินน้ำพองไม่ค่อย หมุนทำให้ข้อมูลคลาดเคลื่อนมาก แต่จากข้อมูลที่เหลือในชุดดินคอยปุยพอเห็นแนวโน้มว่าการให้น้ำด้วย หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ ให้น้ำมากกว่าการให้น้ำด้วยมือและการให้น้ำทั้ง 2 แบบให้น้ำมากกว่า ค่า potential evapotranspiration (ET_o) ที่คำนวณได้จากข้อมูลภูมิอากาศในเรือนทดลองด้วยสมการของ Penman Monteith (Allen *et al.*, 1998) ในเรือนทดลอง

ตาราง 29 ปริมาณน้ำที่ให้ต่อกระบะทดลอง

วันที่	ชุดดินคอกขุ่ย		ดินตะกอนน้ำพา		ชุดดินน้ำพอง	
	ให้น้ำโดย	ให้น้ำ	ให้น้ำโดย	ให้น้ำ	ให้น้ำโดย	ให้น้ำด้วย
	TCU	ด้วยมือ	TCU	ด้วยมือ	TCU	มือ
ลิตร วัน ⁻¹ แปลง ¹						
22/3/53	0	17	0			28
23/3/53	24	20	0			10
24/3/53	65	20	75			10
25/3/53	57	14	74			6
26/3/53	47	6	4			6
27/3/53	32	12	17			11
28/3/53	68	12	19			10
29/3/53	31	12	23			10
30/3/53	46	13	13			12
31/3/53	25	28	24	มาตรวัดน้ำเสีย ข้อมูล คลาดเคลื่อนมาก		29
1/4/53	51	16	23			17
2/4/53	35	23	13			23
3/4/53	0	22	23			24
4/4/53	27	23	24			24
5/4/53	0	13	0			16
6/4/53	25	27	24			24
7/4/53	37	23	63			24
8/4/53	0	20	79			19
9/4/53	24	24	0			25
10/4/53	15	27	4			27
11/4/53	27	18	8.5			18
12/4/53	8	22	12			21
13/4/53	25	24	0			24
รวม	669	436	523			418



ภาพ 41 ปริมาณการใช้น้ำสะสม ระหว่างวันที่ 12 กรกฎาคม – 3 สิงหาคม 2553

น้ำหนักสดของกะหล่ำ

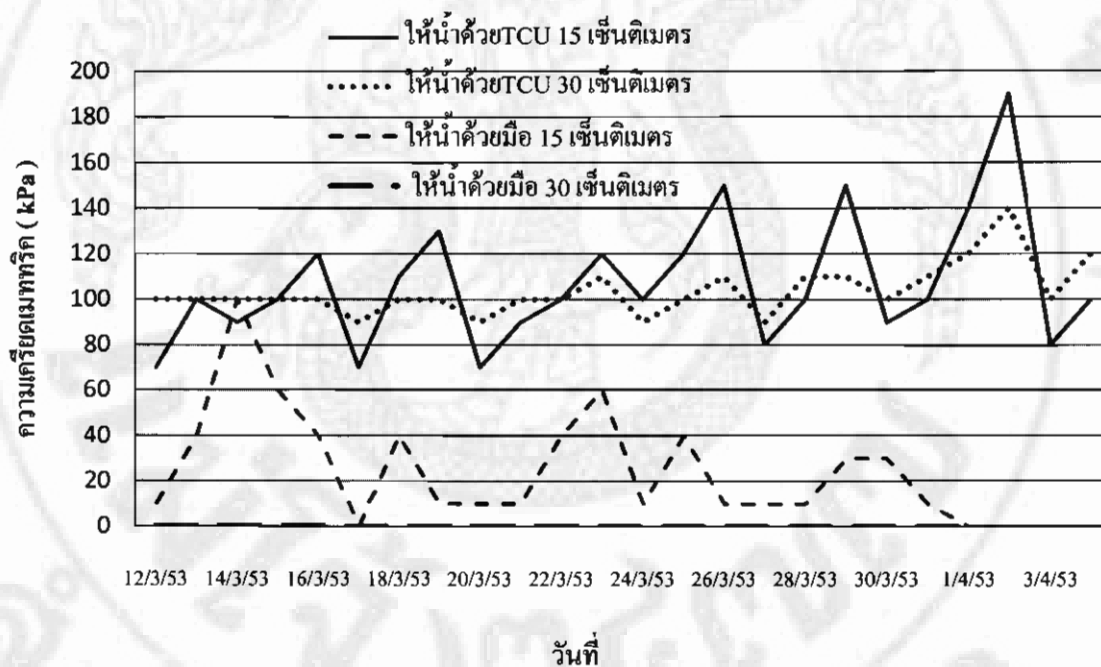
น้ำหนักสดของกะหล่ำที่เก็บเกี่ยวเมื่อวันที่ 20 เมษายน 2553 แสดงในตาราง 30 พบว่าในดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และดินน้ำพอง น้ำหนักของต้นกะหล่ำจากวิธีให้น้ำ ทั้ง 2 ระบบ ใกล้เคียงกัน แต่ในดินคอยุ่ย มีแนวโน้มว่าน้ำหนักของต้นกะหล่ำที่ให้น้ำโดย หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ให้น้ำหนักมากกว่า ทั้งๆ ที่ปริมาณการให้น้ำโดยระบบ หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ ใช้น้ำมากกว่า จึงต้องปรับปรุงวิธีให้น้ำโดย หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ต่อไป

ตาราง 30 น้ำหนักสดของกะหล่ำ

ต้นที่	ชุดดินคอบุบ		ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน (กรัม/ต้น)		ชุดดินน้ำพอง	
	TCU	Manual	TCU	Manual	TCU	Manual
1	777	400	685	890	690	825
2	244	310	1,080	915	690	570
3	527	361	940	625	430	735
4	544	402	810	715	1,050	600
5	512	456	1,030	960	1,190	770
6	403	441	1,070	810	710	590
7	409	401	975	915	515	400
8	653	410	785	925	930	510
9	570	489	1,260	800	935	985
10	635	301	755	720	1,110	1,025
11	405	416	520	1,030	800	760
12	570	490	265	335	650	775
13	659	396	1,110	1,140	1,185	1,000
14	495	388	840	310	935	710
15	536	445	1,290	670	790	1,055
16	510	450	505	950	1,010	440
17	625	457	410	840	1,450	800
18	506	432	750	940	620	860
19	511	322	670	970	710	980
20	650	282	1,035	1,000	810	915
21	191	291	710	1,220	690	760
22	440	388	950	420	625	1,070
23	621	297	1,140	920	800	860
24	-	377	1,150	890	715	815
เฉลี่ย	522	392	864	830	835	784

ความเครียดของความชื้นดินวัดโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (ธรรมชาติ)

ความเครียดของความชื้นดินที่ระดับความลึก 15 และ 30 ซม. ของการให้น้ำทั้ง 2 ระบบแสดงในภาพ 31 พบว่าการให้น้ำระบบ หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ ความเครียดของความชื้นที่ผันแปรอยู่ที่ประมาณ 10 kPa หรือประมาณระดับความจุในสนาม (field capacity) ของดิน โดยที่ระดับความลึก 30 ซม. ผันแปรแคบกว่าระดับความลึก 15 ซม. การให้น้ำด้วยมือ ที่ระดับความลึก 15 ซม. มีความเครียดของความชื้นดินผันแปรอยู่ที่ประมาณ 30 kPa และที่ระดับความลึก 30 ซม. ความเครียดของความชื้นดินเป็นศูนย์ตลอดเวลา แสดงให้เห็นว่า การให้น้ำด้วยมือ ความชื้นดินสูงกว่าระดับความจุในสนามอยู่ตลอดเวลา



ภาพ 42 ความเครียดของความชื้นดิน จากการให้น้ำทั้ง 2 ระบบ

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์

การทดลองที่ 1 การศึกษาดัชนีความเครียดของน้ำในพืชของผักบุ้ง

โดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD

(FLIR, Sweden)

จากการวัดอุณหภูมิเรือนยอด (ใบ) ของผักบุ้ง เพื่อคำนวณดัชนีความเครียดของน้ำในพืชตามวิธีการที่พัฒนาโดย Jones (1999) เฉลี่ยราย 3 วันของข้อมูลตลอดช่วงการทดลอง 12 วัน พบว่าผักบุ้งที่อยู่ในภาวะวิกฤติ คือถูกงดให้น้ำ มีดัชนีความเครียดของน้ำในพืช มากกว่าผักบุ้งที่อยู่ใต้น้ำตามปกติวันละครั้ง ตั้งแต่ระยะ 3 วันแรกของการงดน้ำ จนเสร็จสิ้นการทดลอง ยกเว้นเพียงช่วงวันที่ 4-6 ของการทดลอง ส่วนปัจจัยด้านชนิดที่ใช้ปลูกพืชไม่มีผลให้ ดัชนีความเครียดของน้ำในพืช ต่างกัน ยกเว้นเพียงช่วงวันที่ 4-6 ของการทดลอง โดยค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบผักบุ้งที่ได้รับน้ำทุกวันก่อนข้างคงที่อยู่ประมาณ 0.40 ขณะที่ค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบผักบุ้งที่ถูกงดให้น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเกือบตลอดเวลาของการทดลอง 12 วัน ทำให้ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบพืชระหว่างพืชที่ให้น้ำทุกวันและที่ถูกงดให้น้ำแตกต่างกันมากขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง ทั้งหมดแสดงให้เห็นว่ากล้องถ่ายภาพรังสีความร้อน Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden) มีประสิทธิภาพสูงในระดับที่สามารถใช้วัดอุณหภูมิใบพืช เพื่อประเมินดัชนีความเครียดของน้ำในพืชได้ดี

ค่าเฉลี่ยรายวันของความนำของปากใบของผักบุ้งที่ให้น้ำทุกวันและที่ถูกงดให้น้ำใกล้เคียงกันมากในช่วง 6 วันแรกของการทดลอง และเริ่มแตกต่างกันเล็กน้อย (อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ในช่วง 6 วันหลังของการทดลอง แต่ความแตกต่างนี้ยังน้อยกว่าความผันแปรของค่าเฉลี่ยรายวันที่ผันแปรระหว่างวันต่อวัน จึงพบว่าความนำของปากใบของผักบุ้งราย 3 วันสุดท้ายของการทดลอง 12 วันเท่านั้นที่ต่างกันทางสถิติ แสดงให้เห็นว่า ความนำของปากใบที่วัดโดย porometer รุ่น SC-1 กับใบผักบุ้งที่โดนแดดโดยตรง ที่ละใบ จำนวน 5 ใบในแต่ละซ้ำของแต่ละวิธีการให้น้ำนั้นผันแปรตาม micro-climate ของอากาศในโรงเรือนแต่ละวันมากกว่าความเครียดของน้ำในพืช ความนำของปากใบของใบผักบุ้งในดินทั้ง 3 ชุดดินไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับดัชนีความเครียดน้ำของพืชเลย

ความเครียดเมทริกซ์ของความชื้นดินในแปลงถูกงดให้น้ำในดินทั้ง 3 ชุดดินเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะเวลาการงดให้น้ำนาน และยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี

ความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมทริกซ์ของดินในดินทั้ง 3 จุดดินมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Pinter and Reginato (1982) พบความสัมพันธ์ที่ดียิ่งระหว่าง CWSI ที่คำนวณจากคำนวณจากอุณหภูมิใบพืช อุณหภูมิอากาศ และ vapor pressure deficit กับ ความเครียดของน้ำในไซเล็ม (xylem) ของใบฝ่ายแต่ความสัมพันธ์ระหว่างความนำของปากใบของพืชกับความเครียดเมทริกซ์ของดินในดินทั้ง 3 จุดดินไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเลย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ สรุปได้ว่ากล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden) สามารถใช้วัดอุณหภูมิเรือนยอดของพืช เพื่อหาค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชคำนวณตามวิธีการที่พัฒนาโดย Jones (1999) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะที่ค่าความนำของปากใบที่วัดโดย porometer รุ่น SC-1 ไม่สามารถระบุความเครียดของน้ำในพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพเท่ากล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden)

การทดลองที่ 2 การศึกษาดัชนีความเครียดของน้ำในพืชของผักบุ้ง

โดยใช้กล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl

(Infratec, Germany)

จากการวัดอุณหภูมิเรือนยอด (ใบ) ของผักบุ้ง เพื่อคำนวณดัชนีความเครียดของน้ำในพืช ตามวิธีการที่พัฒนาโดย Jones (1999) เฉลี่ยราย 3 วันของข้อมูลตลอดช่วงการทดลอง 12 วัน พบว่าผักบุ้งที่อยู่ในภาวะวิกฤติ คือถูกงดให้น้ำ มีดัชนีความเครียดของน้ำในพืชใกล้เคียงกับดัชนีความเครียดของน้ำในพืชของผักบุ้งที่อยู่ได้รับน้ำตามปรกติวันละครั้ง ตั้งแต่ระยะ 3 วันแรกของการงดน้ำ จนเสร็จสิ้นการทดลอง ยกเว้นเพียงช่วง 3 วันสุดท้าย คือระหว่างวันที่ 10-12 ของการทดลอง ที่ผักบุ้งที่อยู่ในภาวะวิกฤติ คือถูกงดให้น้ำ มีดัชนีความเครียดของน้ำในพืช มากกว่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชของผักบุ้งที่อยู่ได้รับน้ำตามปรกติวันละครั้ง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ส่วนปัจจัยด้านชนิดที่ใช้ปลูกพืชไม่มีผลให้ ดัชนีความเครียดของน้ำในพืชต่างกัน โดยค่าเฉลี่ยรายวันของดัชนีความเครียดของน้ำในใบผักบุ้งทั้งที่ได้รับน้ำทุกวันและที่ถูกงดให้น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จากประมาณ 0.40 เมื่อวันเริ่มต้นการทดลองเป็นประมาณ 0.60 ในช่วง 4 วันสุดท้ายของการทดลอง

ค่าเฉลี่ยรายวันของความนำของปากใบของผักบุ้งที่ให้น้ำทุกวันและที่ถูกงดให้น้ำ ใกล้เคียงกันมากตลอดช่วงการทดลอง 12 วัน และผันแปรระหว่างวันค่อนข้างมากกว่าความแตกต่างระหว่างการให้น้ำกับที่ถูกงดให้น้ำมาก แสดงให้เห็นว่าความนำของปากใบที่วัดโดย porometer รุ่น SC-1 กับใบผักบุ้งที่โดนแดดโดยตรง ที่ละใบ จำนวน 5 ใบในแต่ละซ้ำของแต่ละวิธีการให้น้ำนั้น

ผันแปรตาม microclimate ของอากาศในโรงเรือนแต่ละวันมากกว่าความเครียดของน้ำในพืชความนำของปากใบของใบผักบุ้งในดินทั้ง 3 ชุดดินไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับดัชนีความเครียดน้ำของพืชเลย

ความเครียดเมแทบอลิซึมของความชื้นดินในแปลงถูกคให้น้ำในดินทั้ง 3 ชุดดินเพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอเมื่อระยะเวลาการงคให้น้ำนาน และยังพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความเครียดน้ำของพืชกับความเครียดเมแทบอลิซึมของดินในชุดดินน้ำพองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติในชุดดินคอยปุ๋ยและคอกอนน้ำพาเชิงซ้อน แต่ความสัมพันธ์ระหว่างความนำของปากใบของพืชกับความเครียดเมแทบอลิซึมของดิน ในดินทั้ง 3 ชุดดินไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเลย

จากผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นนี้ สรุปได้ว่ากล้อง Thermocamera รุ่น VarioCAMHiRes 384 sl (Infratec, Germany) สามารถใช้วัดอุณหภูมิเรือนยอดของพืชเพื่อหาค่าดัชนีความเครียดของน้ำในพืชคำนวณตามวิธีการที่พัฒนาโดย Jones (1999) ได้อย่างมีประสิทธิภาพดีกว่าความนำของปากใบที่วัดโดยporometer รุ่น SC-1 แต่ไม่มีประสิทธิภาพเท่ากล้อง Thermocamera รุ่น InfraCAM SD (FLIR, Sweden) ซึ่งมีราคาถูกกว่ามาก

การทดลองที่ 3 การทดสอบประสิทธิภาพของหน่วยควบคุมการให้น้ำ

โดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit, TCU)

หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์ (Tensiometer Control Unit, TCU) ยังมีปัญหาอยู่บ้าง แต่โดยหลักการ เมื่อแก้ปัญหาลแล้ว การควบคุมการให้น้ำก็ทำได้ดี สามารถควบคุมการให้น้ำที่อิงหลักการทางวิชาการ สามารถใช้ได้กับระบบน้ำที่มีแรงดันต่ำ ไม่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าราคาถูก สามารถควบคุมการให้น้ำจากด้วยระบบท่อที่น้ำมีแรงดันต่ำ คือ 0.5 – 1.0 MPa ได้ตามต้องการ เมื่อทำงานร่วมกับ timer หน่วยควบคุมการให้น้ำโดยเซ็นซิโอมิเตอร์จะเปิดให้น้ำทันทีที่ความเครียดของความชื้นดินเกิน 15 kPa เป็นเวลา 10-30 นาที ซึ่งจะทำให้พืชที่ทดลอง ได้แก่มากะหล่ำปลีและผักบุ้งจีนได้น้ำจากระบบน้ำหยด 1 ลิตรต่อหัวน้ำหยด เมื่อความดันของน้ำในท่ออยู่ที่ประมาณ 0.05 – 0.20 MPa ทำให้พืชที่ปลูกในโรงเรือน 2 ชนิดคือกะหล่ำปลีและผักบุ้งจีน ได้รับน้ำเพียงอย่างเหมาะสม ใช้น้ำน้อยกว่าการให้น้ำด้วยมือ 49.29 % โดยที่มีผลผลิตไม่ต่างกัน แต่ในการทดลองที่โรงเรือนทดลองในสาขาไม้ผล ภาควิชาพืชสวน คณะผลิตกรรมการเกษตรมหาวิทยาลัยแม่โจ้มีปัญหาที่ความดันของน้ำในระบบประปาที่เป็นแหล่งน้ำต้นทุนของการทดลองไม่คงที่อย่างมาก เนื่องจากการใช้น้ำรดพืชต่างๆ ของสาขาไม้ผลมากในระหว่างการทดลอง จนแรงดันต่ำน้ำในท่อต่ำกว่า 0.05 MPa ซึ่งมีผลกระทบต่อการทำงานของ TCU เป็นระยะๆ

บรรณานุกรม

- วิบูลย์ บุญขจรโรกุล. 2526. **หลักการชลประทาน**. กรุงเทพฯ : ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 274 น.
- สาขันธ์ สดุดี. 2537. **สภาวะขาดน้ำในการผลิตพืช**. สงขลา: ภาควิชาพืชศาสตร์ คณะ
ทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่. 202 น.
- อิทธิสุนทร นันทกิจ. 2544. **เครื่องวัดความชื้นในดินแบบTensiometer**. [ระบบออนไลน์].
แหล่งที่มา <http://www.kmitl.ac.th/soilkmitl/SoilRes/Tensiometer.htm> (15
พฤษภาคม 2554).
- Alharthi, A. and J. Lanje. 1987. Soil water saturation: dielectric determination. **Water Resour.
Res.** 23 (4): 591-595.
- Alon, B.G., A. Nurit and D. Amon. 2009. Evaluating water stress in irrigated olives: correlation
of soil water status, tree water status, and thermal imagery. **Irrigation Science**
27: 367-376.
- Dry, P.R., B.R. Loveys and M. Stoll. 2001. Strategic irrigation management in Australian
vineyards. **Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin** 35: 129-
139.
- Evans, D.E., E.J. Sadler and J.A. Millen. 2000. Spatial canopy temperature measurements using
central pivot mounted IRTs. Cited by Alchanatis, V., Y. Cohan and E. Sela.
2010. Evaluation of different approaches for estimating and mapping crop water
status in cotton with thermal imaging. **Precision Agriculture** 11: 27-41.
- Fuchs, M. 1990. Infrared measurement of canopy temperature and detection of plant water stress.
Theoretical and Applied Climatology 42: 253-261.
- Giuliani, R., E. Magnanini and J.A. Flore. 2001. **Potential use of infrared thermometry for
the detection of water deficit in apple and peach orchards**. USA: Department
of Horticulture, Michigan State University, East Lansing. 557p.
- Grant, M. O., L. Tronina, H. G. Jones and M. M. Chaves. 2006. Exploring thermal imaging
variables for the detection of stress responses in grapevine under different
irrigation regimes. **Physiologia Plantarum** 127: 507-518.

- Idso, S.B., R.D. Jackson and J. L. Hatfield. 1981. Normalizing the stress-degree-day for environmental variability. **Agricultural Meteorology** 24: 45-55.
- Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. pp. 43-85. In D.I. Hillel. (ed.) **Advances in Irrigation**. USA: Academic Press.
- Jackson, R.D., S.B. Idso and R.J. Reginato. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. **Water Resources Research** 17: 1133-1138.
- Jackson, R. D., P. K. William and J. C. Bhaskar. 1988. A Reexamination of the Crop Water Stress Index. **Irrigation Science** 9: 309-317.
- Jones, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology** 95: 139-149.
- Li, Y., H. Bryan and T. Olczek. 1998. Optimized irrigation schedule to conserve water and reduce nutrient leaching for tomato grown on calcareous gravelly soil. **Proc. Fla. State Hort. Soc.** 111: 58-61.
- Metin, S. S., A. Yazar and S. Eker. 2005. Effect of drip irrigation regimes on yield and quality of field grown bell pepper. **Agricultural Water Management** 81(1-2): 115-131.
- Pinmanee, S., W. Spreer and J. Müller. 2010. Development of a low-cost tensiometer driven irrigation control unit and evaluation of its suitability for irrigation of lychee trees in the uplands of Northern Thailand in a participatory approach. **Journal of Horticulture and Forestry** 3(7): 226-230.
- Pinter, P.J. and R.J. Reginato. 1982. A thermal infrared technique for monitoring cotton water stress and scheduling irrigations. **Transaction of the ASAE** 25: 1651-1655.
- Shull, H. and A.S. Dylla. 1980. Irrigation automation with a soil moisture sensing system. **Transactions of the ASAE** 23(3): 649-652.
- Slatyer, R. O. 1969. Physiological Significance of Internal Water Relations to Crop Yield. **Agronomy Faculty Publications Paper** 186: 53-83.
- Smajstrla, A.G and S.J. Locascio. 1994. Irrigation cutback effects on drip-irrigated tomato yields. **Proc. Fla. State Hort. Soc.** 107: 113-118.

- Smart, D.R., L. Taryn and D.M. Eissenstat. 2004. Root survivorship under deficit and dryland farming conditions for 1103P and 101-14MGT rootstocks in the Oakville region of the Napa Valley. *Cited by* Grant, M. O., L. Tronina, H. G. Jones and M. M. Chaves. 2006. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grapevine under different irrigation regimes. **Physiologia Plantarum** 127: 507–518.
- Tanner, C B. 1963. Plant temperatures. **Agronomy Journal** 55: 210-219.
- Theodore, J.K. R., D. K. Matthew and E. L. Rachel. 2005. Triangle tests indicate that irrigation timing affects fresh cabbage sensory quality. **Food Quality and Preference** 15: 471–476.
- Wanjura, D.F., D.R. Upchurch and J.R. Mahan. 1995. Control of irrigation scheduling using temperature - time thresholds. **Trans. ASAE** 38(2): 403-409.
- Yuan, G., Y. Luo and D. Tang. 2004. Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the North China Plain. **Agricultural Water Management** 64: 29–40.
- Zia, S., K. Sopher and J. Muller. 2010. Effect of Wind and Radiation on the Crop Water Stress Index Derived by Infrared Thermography. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering** 4(3).





ภาคผนวก ก

ตารางผนวก

ตารางผนวก 1 ค่าความชื้นดินที่วัดได้จาก Tensiometer ก่อนให้น้ำ ช่วงก่อนเกิดวิกฤติ และ หลัง วิกฤติของการทดลองที่ 1

	ชุดดินน้ำทอง1	ชุดดินน้ำทอง2	ดินตะกอนน้ำพา เชิงชัน 1	ดินตะกอนน้ำ พาเชิงชัน 2	ชุดดินคอกปุ๋ย1	ชุดดินคอกปุ๋ย2
9/1/2011	1	18	60	62	24	30
10/1/2011	0	9	48	57	1	6
11/1/2011	0	11	3	1	4	12
12/1/2011	3	11	2	2	1	11
13/1/2011	5	9	3	2	2	12
14/1/2011	2	9	1	1	0	8
15/1/2011	4	9	3	3	3	6
16/1/2011	4	9	20	20	5	7
17/1/2011	5	9	4	4	4	5
18/1/2011	5	8	24	22	4	5
19/1/2011	6	9	5	5	7	6
20/1/2011	8	11	28	24	0	4
21/1/2011	6	9	3	5	0	7
22/1/2011	6	11	32	28	3	9
23/1/2011	4	9	11	8	1	6
24/1/2011	7	9	1	3	0	8
25/1/2011	8	11	1	2	0	14
26/1/2011	6	9	12	3	0	8
27/1/2011	0	9	0	0	0	8
28/1/2011	0	12	18	16	0	14
29/1/2011	0	11	16	14	0	12
30/1/2011	0	10	21	12	3	11
31/1/2011	0	12	62	64	5	16
1/2/2011	0	10	9	11	1	11
2/2/2011	0	9	1	7	0	9
3/2/2011	0	11	21	40	0	4
4/2/2011	0	9	2	8	1	4
5/2/2011	0	10	6	31	1	4
6/2/2011	0	9	4	12	1	4
7/2/2011	0	10	1	1	5	4
8/2/2011	0	9	13	48	11	57
9/2/2011	0	11	4	7	0	11
10/2/2011	0	19	1	21	0	9
11/2/2011	6	11	1	9	0	8

ตารางผนวก 1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	จุดคินน้ำทอง1	จุดคินน้ำทอง2	คินตะกอนน้ำพา แรงขึ้น 1	คินตะกอนน้ำ พาแรงขึ้น 2	จุดคินคอยปุย1	จุดคินคอยปุย2
12/2/2011	13	9	0	7	3	11
13/2/2011	19	11	0	9	0	8
14/2/2011	29	9	0	31	0	11
15/2/2011	38	11	14	12	0	9
16/2/2011	42	13	55	13	0	14
17/2/2011	46	17	70	10	0	7
18/2/2011	51	21	72	4	6	8
19/2/2011		26	76	22	11	23
20/2/2011		33	78	9	1	11
21/2/2011		47	71	5	0	9
22/2/2011		60	75	22	1	11
23/2/2011		69	78	5	0	9
24/2/2011		74	78	9	0	13
25/2/2011		77	68	8	0	8
26/2/2011		79		7	0	8
27/2/2011				2	2	10
28/2/2011				9	0	10
1/3/2011				32	1	10
2/3/2011				62	7	15
3/3/2011				70	21	38
4/3/2011				78	34	51
5/3/2011				80	55	69
6/3/2011				64	64	76
7/3/2011				71	71	82
8/3/2011				80	72	83
9/3/2011				83	77	85
10/3/2011				83	79	85
11/3/2011				85	80	85
12/3/2011				85	83	85

ตารางผนวก 2 ค่าความชื้นดินที่วัดได้จาก Tensiometer (เซ็นติบาร์) ก่อนให้น้ำของการทดลองที่ 2

วัน/เดือน/ปี	ชุดดินน้ำพอง		ดินตะกอนลำนน้ำแข็งซ้อน		ชุดดินคอกปุ๋ย	
	ควบคุม	วิกฤติ	ควบคุม	วิกฤติ	ควบคุม	วิกฤติ
29/3/2554	10	11	3	19	6	0
30/3/2554	12	10	8	18	8	3
31/3/2554	12	0	1	6	8	3
1/4/2554	11	0	1	3	8	3
2/4/2554	10	0	2	4	9	3
3/4/2554	11	0	2	3	9	3
4/4/2554	11	0	1	2	8	2
5/4/2554	11	0	2	3	8	2
6/4/2554	8	0	2	5	10	4
7/4/2554	10	0	0	2	7	0
8/4/2554	9	0	1	8	7	1
9/4/2554	12	0	7	27	9	2
10/4/2554	9	0	3	10	10	4
11/4/2554	8	0	5	26	11	6
12/4/2554	9	0	3	18	8	1
13/4/2554	11	0	34	29	11	6
14/4/2554	9	0	2	3	6	0
15/4/2554	10	0	6	9	11	4
16/4/2554	10	0	37	38	11	6
17/4/2554	11	0	19	29	9	1
18/4/2554	11	0	14	19	11	4
19/4/2554	9	0	20	30	11	14
20/4/2554	10	10	8	10	8	1
21/4/2554	9	0	12	12	9	1
22/4/2554	9	0	17	15	16	18
23/4/2554	11	0	24	19	12	1
24/4/2554	11	0	9	9	5	1
25/4/2554	13	0	34	26	8	4

ตารางผนวก 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	ชุดดินน้ำพอง		ดินตะกอนลำน้ําเชิงซ้อน		ชุดดินคอกขุ่ย	
	ควบคุม	วิกฤติ	ควบคุม	วิกฤติ	ควบคุม	วิกฤติ
26/4/2554	9	0	6	3	9	1
27/4/2554	10	0	34	28	8	4
28/4/2554	9	1	6	8	8	1
29/4/2554	14	0	25	33	9	3
30/4/2554	12	0	10	12	9	3
1/5/2554	11	0	5	48	6	5
2/5/2554	11	6	3	65	7	10
3/5/2554	11	6	4	72	9	20
4/5/2554	8	10	4	75	8	38
5/5/2554	8	12	4	79	7	41
6/5/2554	8	15	7	80	10	60
7/5/2554	11	22	8	80	9	65
8/5/2554	10	30	1	80	6	69
9/5/2554	12	41	18	86	12	70
10/5/2554	10	48	2	86	9	72
11/5/2554	10	56	3	90	9	75

ตารางผนวก 3 ข้อมูลภูมิอากาศรายวันจาก data logger ที่ติดตั้งไว้ของการทดลองที่ 1

วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์			อุณหภูมิ(°C)			ความเร็ว ลม(ม./วินาที)
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	
8/1/54	91.00	54.00	79.71	30.10	20.80	25.78	0.03
9/1/54	91.00	47.00	75.71	33.90	21.60	27.53	0.01
10/1/54	87.00	72.00	80.00	24.70	21.90	24.85	0.04
11/1/54	93.00	69.00	84.42	26.30	20.90	24.08	0.18
12/1/54	92.00	42.00	76.17	31.80	19.10	24.81	0.11
13/1/54	91.00	40.00	75.92	31.90	17.90	24.30	0.11
14/1/54	91.00	38.00	74.46	32.80	16.80	24.21	0.07
15/1/54	91.00	38.00	74.21	32.80	17.10	24.48	0.05
16/1/54	90.00	42.00	72.21	31.10	17.60	24.34	0.14
17/1/54	88.00	47.00	71.08	29.10	17.60	23.78	0.13
18/1/54	90.00	48.00	76.33	30.40	16.60	23.27	0.07
19/1/54	91.00	42.00	74.75	32.40	17.30	24.44	0.07
20/1/54	90.00	34.00	72.00	34.30	16.60	24.58	0.05
21/1/54	87.00	41.00	63.56	33.20	18.30	25.73	0.04
22/1/54	91.00	42.00	73.13	32.90	16.70	23.38	0.08
23/1/54	91.00	40.00	71.71	34.50	16.10	23.46	0.07
24/1/54	89.00	32.00	69.04	35.00	16.50	23.92	0.07
25/1/54	90.00	32.00	70.79	35.00	16.50	24.02	0.07
26/1/54	90.00	34.00	70.96	38.60	17.80	25.17	0.01
27/1/54	90.00	40.00	71.88	36.00	17.90	24.61	0.01
28/1/54	90.00	29.00	67.46	37.60	17.70	25.55	0.04
29/1/54	87.00	42.00	68.63	35.00	18.10	25.03	0.01
30/1/54	91.00	42.00	69.21	34.20	18.70	24.99	0.00
31/1/54	90.00	51.00	72.29	28.50	19.50	23.33	0.05
1/2/54	90.00	45.00	69.97	32.80	19.40	24.57	0.10
2/2/54	91.00	38.00	71.50	34.80	17.50	23.83	0.05
3/2/54	91.00	36.00	70.46	35.00	17.20	23.93	0.08
4/2/54	90.00	31.00	68.92	36.00	16.80	24.20	0.04
5/2/54	90.00	35.00	68.67	35.30	16.70	24.03	0.04

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์			อุณหภูมิ(°C)			ความเร็ว ลม(ม./ วินาที)
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	
7/2/54	88.00	29.00	64.75	35.00	15.10	23.00	0.08
8/2/54	87.00	30.00	65.04	34.80	14.90	22.97	0.07
9/2/54	89.00	24.00	63.29	36.20	14.70	23.29	0.03
10/2/54	87.00	28.00	63.79	38.90	15.00	24.10	0.00
11/2/54	82.00	34.00	66.00	36.30	16.90	24.25	0.01
12/2/54	90.00	34.00	64.63	38.00	16.50	25.28	0.00
13/2/54	83.00	36.00	62.13	37.80	15.80	25.15	0.03
14/2/54	83.00	36.00	65.96	35.40	17.50	24.43	0.07
15/2/54	86.00	32.00	61.92	36.70	15.00	24.13	0.05
16/2/54	85.00	29.00	61.33	38.80	14.50	24.42	0.00
17/2/54	81.00	32.00	63.33	38.60	16.90	24.96	0.00
18/2/54	92.00	52.00	75.08	32.00	19.60	24.27	0.00
19/2/54	93.00	32.00	66.67	39.70	18.70	26.58	0.01
20/2/54	80.00	27.00	58.50	41.70	17.90	27.20	0.00
21/2/54	80.00	27.00	59.50	38.10	18.10	26.20	0.00
22/2/54	83.00	27.00	61.75	38.60	18.80	26.51	0.10
23/2/54	84.00	28.00	60.75	38.00	17.20	26.13	0.03
24/2/54	83.00	31.00	60.75	37.70	17.70	26.11	0.04
25/2/54	83.00	29.00	60.71	38.60	17.80	26.36	0.03
26/2/54	80.00	32.00	61.96	38.10	21.00	27.36	0.01
27/2/54	85.00	43.00	68.42	37.90	21.70	27.93	0.08
28/2/54	89.00	38.00	68.63	37.10	22.10	28.13	0.01
1/3/54	83.00	28.00	60.08	40.90	20.40	29.43	0.01
2/3/54	84.00	44.00	65.92	35.80	22.60	28.59	0.09
3/3/54	90.00	39.00	68.96	38.00	21.90	28.04	0.12
4/3/54	91.00	46.00	69.46	36.70	20.60	28.13	0.08
5/3/54	90.00	32.00	67.21	38.80	22.10	29.03	0.05
6/3/54	88.00	28.00	61.88	40.00	21.40	28.85	0.05

ตารางผนวก 3 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์			อุณหภูมิ(°C)			ความเร็ว ลม(ม./ วินาที)
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	
7/3/54	80.00	24.00	58.88	40.10	21.20	28.65	0.00
8/3/54	82.00	27.00	58.38	39.40	20.90	29.40	0.08
9/3/54	87.00	39.00	66.00	37.40	20.90	28.05	0.03
10/3/54	89.00	39.00	69.79	37.70	23.00	27.83	0.08
11/3/54	93.00	61.00	82.46	31.60	22.20	25.21	0.00

ตารางผนวก 4 ข้อมูลน้ำระเหยจากถาดวัดการคายระเหยรายวันของการทดลองที่ 1

วัน/เดือน/ปี	การระเหย ของน้ำ(มม.)	ETo(ลิตร/ม ²)	วัน/เดือน/ปี	การระเหย ของน้ำ(มม.)	ETo(ลิตร/ม ²)
3/2/2011	3.37	4.89	22/2/2011	4.01	3.23
4/2/2011	3.66	5.05	23/2/2011	3.82	3.15
5/2/2011	3.18	4.95	24/2/2011	4.07	3.12
6/2/2011	3.9	4.87	25/2/2011	4.68	3.19
7/2/2011	4.04	4.97	26/2/2011	2.11	2.99
8/2/2011	3.83	4.96	27/2/2011	3.75	3.16
9/2/2011	4.2	5.13	28/2/2011	3.72	2.95
10/2/2011	3.92	5.58	1/3/2011	3.18	3.39
11/2/2011	3.35	5.04	2/3/2011	4.59	2.85
12/2/2011	3.9	5.40	3/3/2011	4.58	3.19
13/2/2011	3.94	5.42	4/3/2011	3.93	3.12
14/2/2011	4.73	2.95	5/3/2011	3.37	3.19
15/2/2011	4.01	3.13	6/3/2011	4.86	3.27
16/2/2011	4.24	3.31	7/3/2011	4.48	3.14
17/2/2011	4	3.22	8/3/2011	4.83	3.22
18/2/2011	1.96	2.54	9/3/2011	4.23	3.05
19/2/2011	4.57	3.39	10/3/2011	4.16	3.04
20/2/2011	4.71	3.50	11/3/2011	4.09	2.39
21/2/2011	4.92	3.05	12/3/2011	3.3	2.28

ตารางผนวก 5 ข้อมูลภูมิอากาศรายวันจาก data logger ที่ติดตั้งไว้ของการทดลองที่ 2

วัน/เดือน/ ปี	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์			อุณหภูมิ (°C)			ความเร็ว ลม (เมตร/ วินาที)
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	
28/3/54	77.00	59.00	69.38	25.20	19.90	21.92	0.00
29/3/54	72.00	66.00	70.67	21.50	19.10	19.81	0.00
30/3/54	81.00	46.00	60.60	30.30	19.60	25.05	0.08
31/3/54	90.00	41.00	67.71	33.80	16.30	24.30	0.14
1/4/54	91.00	35.00	67.21	36.50	18.90	26.93	0.03
2/4/54	87.00	34.00	65.79	38.20	21.80	28.61	0.01
3/4/54	89.00	34.00	66.63	38.30	20.30	27.89	0.07
4/4/54	87.00	27.00	62.21	41.10	20.00	28.24	0.03
5/4/54	83.00	40.00	60.92	39.10	21.00	29.42	0.08
6/4/54	90.00	42.00	71.63	38.60	22.90	28.15	0.10
7/4/54	94.00	44.00	72.46	38.30	22.40	29.16	0.04
8/4/54	91.00	43.00	68.13	39.60	23.90	30.55	0.14
9/4/54	92.00	55.00	76.67	36.50	22.50	27.75	0.05
10/4/54	90.00	55.00	74.46	34.70	22.30	28.32	0.05
11/4/54	93.00	47.00	72.67	38.90	23.20	28.65	0.04
12/4/54	91.00	48.00	73.92	36.60	21.80	28.04	0.01
13/4/54	93.00	72.00	85.38	27.90	21.50	24.03	0.04
14/4/54	96.00	56.00	82.63	34.60	20.90	25.73	0.08
15/4/54	94.00	53.00	74.38	37.20	22.10	28.22	0.05
16/4/54	92.00	40.00	69.58	39.70	21.80	29.51	0.04
17/4/54	92.00	47.00	71.08	38.20	23.20	28.58	0.06
18/4/54	90.00	35.00	67.46	41.50	21.50	30.00	0.01
19/4/54	93.00	64.00	81.54	34.40	23.00	26.69	0.04
20/4/54	95.00	51.00	77.58	35.80	22.00	27.90	0.03
21/4/54	87.00	48.00	72.00	37.30	22.50	28.56	0.05
22/4/54	83.00	44.00	62.27	38.90	27.20	33.24	0.02
23/4/54	89.00	54.00	75.13	36.20	23.60	28.43	0.04
24/4/54	94.00	51.00	77.46	36.70	22.40	27.79	0.03

ตารางผนวก 5 (ต่อ)

วัน/เดือน/ ปี	เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์			อุณหภูมิ (°C)			ความเร็ว ลม (เมตร/ วินาที)
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย	
25/4/54	93.00	66.00	81.00	31.70	21.90	26.05	0.03
26/4/54	94.00	53.00	82.29	36.90	22.00	26.37	0.03
27/4/54	96.00	56.00	80.25	36.10	23.20	27.38	0.01
28/4/54	94.00	64.00	83.58	34.30	23.10	26.75	0.00
29/4/54	95.00	52.00	79.08	36.10	23.50	28.14	0.05
30/4/54	96.00	49.00	79.25	38.90	23.40	28.20	0.06
1/5/54	97.00	59.00	83.33	35.50	23.30	27.63	0.00
2/5/54	97.00	61.00	83.42	38.00	23.90	27.92	0.01
3/5/54	97.00	53.00	83.25	39.50	23.60	28.12	0.03
4/5/54	98.00	55.00	82.79	39.30	23.20	28.44	0.01
5/5/54	97.00	54.00	84.38	37.80	22.90	27.30	0.00
6/5/54	97.00	57.00	84.21	36.60	23.10	27.30	0.03
7/5/54	98.00	52.00	82.08	39.60	23.20	28.50	0.01
8/5/54	97.00	54.00	78.58	37.40	22.90	28.94	0.04
9/5/54	96.00	71.00	86.42	32.20	25.00	27.48	0.00
10/5/54	98.00	69.00	88.33	35.00	23.30	26.84	0.01
11/5/54	98.00	51.00	76.92	38.60	22.80	29.39	0.04

ตารางผนวก 6 ข้อมูลน้ำระเหยจากถาดวัดการคายระเหยรายวันของการทดลองที่ 2

วัน/เดือน/ปี	evaporation(mm)	ETo(ลิตร/ม ²)	วัน/เดือน/ปี	evaporation(mm)	ETo(ลิตร/ม ²)
28/3/54	2.1	1.70	20/4/54	5.1	2.97
29/3/54	2.45	1.28	21/4/54	5.1	3.09
30/3/54	1.87	2.32	22/4/54	5.6	2.88
31/3/54	2.54	2.94	23/4/54	3.42	2.91
1/4/54	5.42	3.04	24/4/54	3.63	3.05
2/4/54	4.1	3.06	25/4/54	2.35	2.48
3/4/54	4.23	3.22	26/4/54	3.6	3.12
4/4/54	4.77	3.45	27/4/54	2.6	2.93
5/4/54	3.2	3.28	28/4/54	2.41	2.73
6/4/54	3.81	3.23	29/4/54	1.73	2.93
7/4/54	4	3.22	30/4/54	4.31	3.33
8/4/54	4.5	3.36	1/5/54	1.66	2.89
9/4/54	5.3	3.04	2/5/54	3.42	3.22
10/4/54	3.6	2.82	3/5/54	2.84	3.45
11/4/54	1.5	3.25	4/5/54	3.8	3.46
12/4/54	3.8	3.03	5/5/54	3.7	3.22
13/4/54	3.1	2.01	6/5/54	2.7	3.06
14/4/54	1.2	2.92	7/5/54	2.4	3.48
15/4/54	2.74	3.15	8/5/54	2.7	3.18
16/4/54	3.8	3.41	9/5/54	3.5	2.30
17/4/54	4.4	3.15	10/5/54	2.5	2.88
18/4/54	5.8	3.60	11/5/54	3.07	3.34
19/4/54	5.31	2.76			

ตารางผนวก 7 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ยของวันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	0.1285	0.0257	22.67	4.39	8.75
A	1	0.0096	0.0096	8.50	5.99	13.75
B	2	0.1086	0.0543	47.92	5.14	10.92
AXB	2	0.0102	0.0051	4.51	5.14	10.92
ERROR	6	0.0068	0.0011			
TOTAL	11	0.1353	0.0123			

Grand Mean = 0.3933 CV = 8.5589

ตารางผนวก 8 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ยของวันที่ 4-6 ของการทดลอง โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	0.1809	0.0362	1.67	4.39	8.75
A	1	0.1045	0.1045	4.81	5.99	13.75
B	2	0.0049	0.0024	0.11	5.14	10.92
AXB	2	0.0715	0.0357	1.65	5.14	10.92
ERROR	6	0.1303	0.0217			
TOTAL	11	0.3112	0.0283			

Grand Mean = 0.4317 CV = 34.1388

ตารางผนวก 9 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ยของวันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	0.2685	0.0537	2.82	4.39	8.75
A	1	0.2465	0.2465	12.94	5.99	13.75
B	2	0.0019	0.0009	0.05	5.14	10.92
AXB	2	0.0201	0.0100	0.53	5.14	10.92
ERROR	6	0.1143	0.0190			
TOTAL	11	0.3828	0.0348			

Grand Mean = 0.5817 CV = 23.7287

ตารางผนวก 10 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ยของวันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	0.4473	0.0895	9.20	4.39	8.75
A	1	0.3997	0.3997	41.10	5.99	13.75
B	2	0.0170	0.0085	0.87	5.14	10.92
AXB	2	0.0307	0.0153	1.58	5.14	10.92
ERROR	6	0.0584	0.0097			
TOTAL	11	0.5057	0.0460			

Grand Mean = 0.6308 CV = 15.6326

ตารางผนวก 11 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ยของวันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	27762.7000	5552.5400	0.76	4.39	8.75
A	1	85.3871	85.3871	0.01	5.99	13.75
B	2	27327.3456	13663.6728	1.88	5.14	10.92
AXB	2	349.9673	174.9837	0.02	5.14	10.92
ERROR	6	43622.4512	7270.4085			
TOTAL	11	71385.1512	6489.5592			

Grand Mean = 508.2275 CV = 16.7773

ตารางผนวก 12 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ยของวันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	67862.8273	13572.5655	1.65	4.39	8.75
A	1	21289.9737	21289.9737	2.60	5.99	13.75
B	2	20940.4576	10470.2288	1.28	5.14	10.92
AXB	2	25632.3960	12816.1980	1.56	5.14	10.92
ERROR	6	49208.7226	8201.4538			
TOTAL	11	117071.5500	10642.8682			

Grand Mean = 476.8692 CV = 18.9909

ตารางผนวก 13 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ยของวันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	289832.9737	57966.5947	3.88	4.39	8.75
A	1	56523.6704	56523.6704	3.79	5.99	13.75
B	2	214691.4445	107345.7222	7.19	5.14	10.92
AXB	2	18617.8588	9308.9294	0.62	5.14	10.92
ERROR	6	89533.9359	14922.3226			
TOTAL	11	379366.9095	34487.9009			

Grand Mean = 516.2150 CV = 23.6640

ตารางผนวก 14 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ยของวันที่ 10-12 ของการทดลองที่ 1 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และ ชุดดินคอยบุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	325166.4156	65033.2831	1.40	4.39	8.75
A	1	72477.0132	72477.0132	1.56	5.99	13.75
B	2	236926.6940	118463.3470	2.55	5.14	10.92
AXB	2	15762.7084	7881.3542	0.17	5.14	10.92
ERROR	6	278222.4765	46370.4127			
TOTAL	11	603388.8921	54853.5356			

Grand Mean = 425.8192 CV = 50.5703

ตารางผนวก 15 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ยของวันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอปุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	0.0570	0.0114	1.55	4.39	8.75
A	1	0.0091	0.0091	1.24	5.99	13.75
B	2	0.0278	0.0139	1.89	5.14	10.92
AXB	2	0.0202	0.0101	1.37	5.14	10.92
ERROR	6	0.0441	0.0073			
TOTAL	11	0.1011	0.0092			

Grand Mean = 0.3892 CV = 22.0172

ตารางผนวก 16 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ยของวันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอปุย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	0.0674	0.0135	1.16	4.39	8.75
A	1	0.0432	0.0432	3.72	5.99	13.75
B	2	0.0085	0.0043	0.37	5.14	10.92
AXB	2	0.0157	0.0078	0.67	5.14	10.92
ERROR	6	0.0697	0.0116			
TOTAL	11	0.1371	0.0125			

Grand Mean = 0.5467 CV = 19.7160

ตารางผนวก 17 Analysis Two Factors Factorial ของดัชนีความเครียดน้ำของพืชเฉลี่ยของวันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอยปุ๋ย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	0.1440	0.0288	12.00	4.39	8.75
A	1	0.0320	0.0320	13.35	5.99	13.75
B	2	0.0435	0.0217	9.06	5.14	10.92
AXB	2	0.0685	0.0342	14.26	5.14	10.92
ERROR	6	0.0144	0.0024			
TOTAL	11	0.1584	0.0144			

Grand Mean = 0.7083 CV = 6.9162

ตารางผนวก 18 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ยของวันที่ 1-3 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงซ้อน และ ชุดดินคอยปุ๋ย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	73879.7991	14775.9598	4.67	4.39	8.75
A	1	149.7426	149.7426	0.05	5.99	13.75
B	2	69616.1329	34808.0664	11.00	5.14	10.92
AXB	2	4113.9237	2056.9618	0.65	5.14	10.92
ERROR	6	18981.7742	3163.6290			
TOTAL	11	92861.5733	8441.9612			

Grand Mean = 380.8275 CV = 14.7695

ตารางผนวก 19 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ยของวันที่ 4-6 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และ ชุดดินคอยปุ๋ย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	56237.4238	11247.4848	2.58	4.39	8.75
A	1	6.0209	6.0209	0.00	5.99	13.75
B	2	54019.0828	27009.5414	6.20	5.14	10.92
AXB	2	2212.3201	1106.1601	0.25	5.14	10.92
ERROR	6	26143.0622	4357.1770			
TOTAL	11	82380.4860	7489.1351			

Grand Mean = 385.3950 CV = 17.1276

ตารางผนวก 20 Analysis Two Factors Factorial ของความนำของปากใบของพืชเฉลี่ยของวันที่ 7-9 ของการทดลองที่ 2 โดยมีการให้น้ำ (ควบคุม, วิกฤติ) เป็นปัจจัย A และมีความแตกต่างของชุดดิน (ชุดดินน้ำพอง ดินตะกอนน้ำพาเชิงชัน และ ชุดดินคอยปุ๋ย) เป็นปัจจัย B

SOURCE	df	SS	MS	F	F.05	F.01
Treatment	5	74125.8756	14825.1751	7.72	4.39	8.75
A	1	28149.4516	28149.4516	14.65	5.99	13.75
B	2	4635.7122	2317.8561	1.21	5.14	10.92
AXB	2	41340.7118	20670.3559	10.76	5.14	10.92
ERROR	6	11526.6954	1921.1159			
TOTAL	11	85652.5710	7786.5974			

Grand Mean = 341.7667 CV = 12.8247



ภาคผนวก ข
ประวัติผู้วิจัย

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล

นายวันวิสาข์ จันทิกา

เกิดเมื่อ

22 พฤษภาคม 2529

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2547 มัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนนวมินทราชูทิศ พายัพ จังหวัด
เชียงใหม่

พ.ศ. 2551 ปริญญาตรี สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร
มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่