



**ใบรับรองวิทยานิพนธ์**  
**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

**ปริญญา**

การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม

อนุรักษ์วิทยา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้  
ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาบางประการ ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

Estimation of Actual Evapotranspiration and Carbon Dioxide Emissions  
by Using Some Meteorological Data at Teak Plantation, Lampang Province

นามผู้วิจัย ว่าที่ร้อยตรีบรรจงศักดิ์ ฝึกสมบูรณ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

( อาจารย์ปิยพงษ์ ทองดินอก, ปร.ด. )

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

( อาจารย์สาพิศ ดิลกสัมพันธ์, Ph.D. )

หัวหน้าภาควิชา

( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.รชนี เอมพันธุ์, Ph.D. )

**บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว**

( รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr )

**คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย**

วันที่ ..... เดือน ..... พ.ศ. ....

**สิงสิงห์ มตาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์**

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาบางประการ ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

Estimation of Actual Evapotranspiration and Carbon Dioxide Emissions  
by Using Some Meteorological Data at Teak Plantation, Lampang Province

โดย

ว่าที่ร้อยตรีบรรจงศักดิ์ พิภพสมบูรณ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บรรจงศักดิ์ พิภพสมบูรณ์, ว่าที่ร้อยตรี 2554: การประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาบางประการ ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม) สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อาจารย์ปิยพงษ์ ทองดินอก, ปร.ค. 92 หน้า

การศึกษาการคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) โดยวิธี Bowen Ratio และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  emissions) โดยใช้เครื่องวัดความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  gas analyzer) ร่วมกับข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ในพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ระหว่างเดือนมกราคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2552 โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $ET_A$  และ  $CO_2$  emissions กับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาบางประการที่ตรวจวัดได้จริงในพื้นที่ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ โดยวิธีวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise multiple regression analysis) ทางด้านอุตุนิยมวิทยา เพื่อหาแบบจำลองการประเมินค่า  $ET_A$  และ  $CO_2$  emissions แล้วทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยนำค่า  $ET_A$  และ  $CO_2$  emissions ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่า  $ET_A$  จากวิธี Bowen Ratio และค่า  $CO_2$  emissions ที่วัดได้จริงจากเครื่องวัด  $CO_2$  gas analyzer ในช่วงที่ทำการตรวจวัดเดียวกัน

จากการศึกษา พบว่า  $ET_A$  มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 มิลลิเมตรต่อวัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 2.6 - 3.9 มิลลิเมตรต่อวัน โดยค่าสูงสุดปรากฏในเดือนเมษายน และต่ำสุดในเดือนธันวาคม ส่วน  $CO_2$  emissions พบว่ามีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.3 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยมีค่าเฉลี่ยรายวันต่อเดือนอยู่ระหว่าง 1.6 - 4.7 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าสูงสุดในเดือนกันยายน และต่ำสุดในเดือนธันวาคม ส่วนแบบจำลองประเมินค่า  $ET_A$  และ  $CO_2$  emissions พบว่าในช่วงรายปีมีรูปแบบสมการคือ  $ET_A = 0.761 + 0.095Ta + 0.005R$  ( $r = 0.56$ ) ขณะที่  $CO_2 = -1.272 + 0.007R + 0.161Ta$  ( $r = 0.91$ ) และในช่วงหลากฝนมีรูปแบบสมการคือ  $ET_A = 1.542 + 0.131Rs$  ( $r = 0.63$ ) โดยมีค่า  $CO_2 = 0.507 + 0.047RH$  ( $r = 0.95$ ) และช่วงแล้งฝน พบว่า  $ET_A$  ไม่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ส่วน  $CO_2 = -2.170 + 0.202Ta$  ( $r = 0.45$ ) โดยที่  $ET_A$ ,  $CO_2$ ,  $Ta$ ,  $Rs$ ,  $RH$  และ  $R$  คือ การคายระเหยน้ำจริง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อุณหภูมิอากาศ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ และปริมาณน้ำฝน ตามลำดับ

Banchongsak Faksomboon, Acting Sub Lt. 2011: Estimation of Actual Evapotranspiration and Carbon Dioxide Emissions by Using Some Meteorological Data at Teak Plantation, Lampang Province. Master of Science (Watershed and Environmental Management), Major Field: Watershed and Environmental Management, Department of Conservation. Thesis Advisor: Mr. Piyapong Tongdeenok, Ph.D. 92 pages.

The study of actual evapotranspiration ( $ET_A$ ) using Bowen Ratio technique and carbon dioxide emissions ( $CO_2$  emissions) using flux measurement at Teak plantation, Mae-Moh district, Lampang province during January 2007 to September 2009. The relationship between  $ET_A$  and  $CO_2$  emissions with some meteorological parameters that collected from automatic weather station (AWS) were used for applied mathematical model for prediction  $ET_A$  and  $CO_2$  emissions. Suitable meteorological parameters were selected by using stepwise multiple regression analysis method. The model were validated with measurement data and calibrated with nearby watershed.

The results shown that the average  $ET_A$  during January to December was 3.4 mm/day or ranged with 2.6 - 3.9 mm/day/month. The highest value was found in April and lowest in December. The daily average of  $CO_2$  emissions was 3.3  $mgCO_2/m^2/s$  or daily/monthly with ranged 1.6 - 4.7  $mgCO_2/m^2/s$ . The highest value was appeared in September and lowest in December. Mathematical model for estimating  $ET_A$  and  $CO_2$  emissions were found that annual model were  $ET_A = 0.761 + 0.095Ta + 0.005R$  ( $r = 0.56$ ) and  $CO_2 = -1.272 + 0.007R + 0.161Ta$  ( $r = 0.91$ ) while in wet period the suitable model were  $ET_A = 1.542 + 0.131Rs$  ( $r = 0.63$ ) and  $CO_2 = 0.507 + 0.047RH$  ( $r = 0.95$ ) and  $ET_A$  nonsignificance in dry period, on the other hand  $CO_2 = -2.170 + 0.202Ta$  ( $r = 0.45$ ) where  $ET_A$ ,  $CO_2$ ,  $Ta$ ,  $Rs$ ,  $RH$  and  $R$  are actual evapotranspiration (mm/day), carbon dioxide ( $mgCO_2/m^2/s$ ), air temperature ( $^{\circ}C$ ), solar radiation ( $MJ/m^2/day$ ), relative humidity (%) and rainfall amount (mm) respectively.

---

Student's signature

---

Thesis Advisor's signature

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำแนะนำชี้แนะงานวิจัย และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ตลอดจนกำลังใจจากท่านอาจารย์ ดร.ปิยพงษ์ ทองดีนอก กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก อาจารย์ ดร.สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนิมิตร พุกงาม และ ดร.พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชุตินกุล ที่ให้คำปรึกษา และคอยชี้แนะแนวทางการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ สาขาวิชาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านและให้กำลังใจตลอดมา และขอขอบคุณ Mr.Yasunori Igarashi จาก Faculty of Agriculture, The University of Tokyo, Japan ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องของข้อมูล รวมทั้งขอขอบคุณ การบริหารจัดการสวนป่าอย่างยั่งยืนงานสวนแม่เมะ ที่ดูแลสถานที่พัก และให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอบแต่ นายบรรจง พิกสมบูรณ์ นางนารีรัตน์ พิกสมบูรณ์ นางสาวบรรจงศรี พิกสมบูรณ์ และญาติพี่น้องในครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ที่ได้อบรมสั่งสอน ให้กำลังใจ และส่งเสริมในการศึกษามาโดยตลอด รวมทั้งครู และอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ความเข้าใจในวิชาการทุก ๆ ด้านแก่ข้าพเจ้า

บรรจงศักดิ์ พิกสมบูรณ์

พฤษภาคม 2554

## สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	36
ผลและวิจารณ์	43
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก สมดุลพลังงานของสวนสัก ปี พ.ศ. 2550-2552	78
ภาคผนวก ข การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และค่าการคายระเหยน้ำจริง	81
ภาคผนวก ค ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา	84
ภาคผนวก ง แบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ของสวนสัก	89
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	92

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ห้องบันทึกข้อมูล 32 ช่อง สำหรับบันทึกข้อมูลที่เป็นข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดโดย sensor ตรวจวัดลักษณะทางอุณหภูมิต่างกัน	38
2	สัญลักษณ์และความหมายของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา	41
3	การคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	44
4	สมมูลพลังงานรายเฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	46
5	แบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริง ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	60
6	แบบจำลองการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	62
7	การคายระเหยน้ำจริง การคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการคายระเหยน้ำจริงจากการสอบเทียบแบบจำลอง	65
8	การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จริง การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการสอบเทียบแบบจำลอง	67
<b>ตารางผนวกที่</b>		
ก1	ข้อมูลสมมูลพลังงาน เฉลี่ยรายเดือน บริเวณพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2552	79
ข1	ข้อมูลการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บริเวณพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ. 2550-2552	82

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ค1	ข้อมูลอุตุนิมวิทยา บริเวณพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ระหว่าง ปี พ.ศ. 2550-2552	85
ค2	ข้อมูลอุตุนิมวิทยาของสถานีตรวจอากาศ จังหวัดลำปาง ปี พ.ศ. 2515-2553 (ค่าเฉลี่ย 38 ปี)	87
ค3	ข้อมูลอุตุนิมวิทยาของสถานีตรวจอากาศ แม่มอก อำเภอเถิน จังหวัดลำปาง ปี พ.ศ. 2550-2552 (ค่าเฉลี่ย 3 ปี)	88
ง1	แบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน ในช่วงหลากฝน (wet period) บริเวณพื้นที่ สวนสัก จังหวัดลำปาง	90
ง2	แบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน ในช่วงแล้งฝน (dry period) บริเวณพื้นที่ สวนสัก จังหวัดลำปาง	91

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการระเหยน้ำจากพื้นผิวอิสระ	6
2	เครื่องมือวัดการคายระเหยน้ำแบบลมน้ำจำลอง	13
3	ขอบเขตพื้นที่สวนสักแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	29
4	ที่ตั้งพื้นที่ศึกษา พื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	30
5	เครื่องวัดข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่สวนสักแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	34
6	แผนผังการติดตั้งเครื่องวัดอากาศแบบอัตโนมัติ (automatic weather station: AWS)	36
7	ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาบางประการ	39
8	ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายเดือนในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	45
9	ความผันแปรเฉลี่ยรายเดือนของค่าสมมูลพลังงานในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	47
10	ความผันแปรของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือนในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	49
11	ความสัมพันธ์รายปีระหว่างการคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	51
12	ความสัมพันธ์ช่วงหลากฝนระหว่างการคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	52
13	ความสัมพันธ์ช่วงแล้งฝนระหว่างการคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	53
14	ความสัมพันธ์รายปีระหว่างการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ emissions) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	56
15	ความสัมพันธ์ช่วงหลากฝนระหว่างการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ emissions) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	57

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
16	ความสัมพันธ์ช่วงแล้งฝน ระหว่างการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> emissions) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	58
17	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำจากการตรวจวัดจริงกับค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	64
18	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการตรวจวัดจริงกับค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	66
<b>ภาพผนวกที่</b>		
ก1	ความผันแปรเฉลี่ยรายวันของค่าสมมูลพลังงานในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	80
ข1	ความผันแปรของการคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายวันในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	83
ข2	ความผันแปรของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายวันในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง	83
ค1	ช่วงหลากฝน (wet period) และช่วงแล้งฝน (dry period) ของพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง	86

การประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาบางประการ ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

Estimation of Actual Evapotranspiration and Carbon Dioxide Emissions  
by Using Some Meteorological Data at Teak Plantation, Lampang Province

คำนำ

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide; CO<sub>2</sub>) เป็นก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases) ชนิดหนึ่งที่มีปริมาณมากที่สุดในบรรยากาศ โดยก๊าซเรือนกระจกที่สำคัญ ประกอบด้วย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N<sub>2</sub>O) และก๊าซโอโซน (OEPP, 2000) เมื่อก๊าซเหล่านี้มีการสะสมมากขึ้นในชั้นบรรยากาศรอบผิวโลกจะทำหน้าที่คล้ายเรือนกระจกคือยอมให้รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้น (short-wave radiation) ผ่านเข้ามาในชั้นบรรยากาศได้ แต่เมื่อรังสีตกกระทบกับพื้นโลกแล้วมีการดูดซับและแผ่รังสีกลับเป็นรังสีคลื่นยาว (long-wave radiation) ไม่สามารถแผ่กระจายออกนอกชั้นบรรยากาศได้ ทำให้เกิดการสะสมของความร้อนบริเวณผิวโลก อุณหภูมิของโลกจึงเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้สภาพภูมิอากาศแปรปรวน เรียกว่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (global warming potentials; GWPs)

ป่าไม้มีบทบาทสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศ เนื่องจากป่าไม้ทำหน้าที่กักเก็บ (sink) และปลดปล่อย (source) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพืชทุกชนิดจะกักเก็บก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ซึ่งผลผลิตของกระบวนการดังกล่าว เป็นสารประกอบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ และเพิ่มผลผลิตมวลชีวภาพทั้งส่วนเหนือพื้นดินและใต้พื้นดิน เช่น ใบ เปลือก เนื้อไม้ กิ่ง และรากเป็นต้น ในขณะที่เดียวกันพืชก็ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำกลับออกสู่บรรยากาศผ่านทางปากใบพืช โดยกระบวนการหายใจ (Keeling and Whorf, 1998) ซึ่งจากการสำรวจปริมาณก๊าซเรือนกระจก ของประเทศไทยเมื่อปี พ.ศ. 2537 พบว่าป่าไม้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 16.5 ล้านตัน หรือคิดเป็นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 60.5 ล้านตัน (OEPP, 2000)

การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) เป็นกระบวนการหนึ่งในวัฏจักรของน้ำ ที่เกิดขึ้นร่วมกันระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ (evaporation) และกระบวนการคายน้ำของพืช (transpiration) จากกระบวนการที่น้ำเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ และการคายน้ำผ่านปากใบของพืช (stomata) อีกทั้งยังมีการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นในขณะเดียวกัน ซึ่งส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำและสมดุลของคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ลุ่มน้ำด้วย ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบันมีการรณรงค์ให้ปลูกต้นไม้ เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ป่าไม้ เนื่องจากป่าไม้สามารถช่วยลดการเกิดภาวะเรือนกระจก โดยการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถูกเก็บสะสมอยู่ในรูปของมวลชีวภาพ (biomass) โดยต้นสักเป็นชนิดพันธุ์พืชที่นิยมปลูกกันมาก เพราะสักเป็นไม้เศรษฐกิจหลักของประเทศที่มีราคาสูง เป็นไม้ที่ปลูกได้เฉพาะถิ่น เป็นที่นิยม เป็นที่ต้องการทั้งในและต่างประเทศ จึงมีการปลูกกันเป็นจำนวนมาก

การเปลี่ยนรูปแบบการใช้ที่ดินนอกจากจะเพิ่มการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศแล้วยังเพิ่มการคายระเหยน้ำจริงในพื้นที่อีกด้วย แต่การปลูกป่าเป็นการเพิ่มแหล่งดูดซับและลดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ตลอดจนลดการคายระเหยน้ำจริงเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อการเกษตร (สาพิศ และคณะ, 2548) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงผลของการปล่อยปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการคายระเหยน้ำจริงในพื้นที่สวนป่าปลูก เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญนำไปสู่การประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และการสูญเสียน้ำของระบบนิเวศสวนสัก เพื่อใช้เป็นแนวทางหรือหาวิธีลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และการคายระเหยน้ำจริง อีกทั้งยังสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานในการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดิน และการจัดการลุ่มน้ำอื่น ๆ ที่มีลักษณะใกล้เคียงกันให้มีประสิทธิภาพและความเหมาะสมต่อไป

## วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผันแปรของการคายระเหยน้ำจริง และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง
2. เพื่อประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริง และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยบางประการในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



## การตรวจเอกสาร

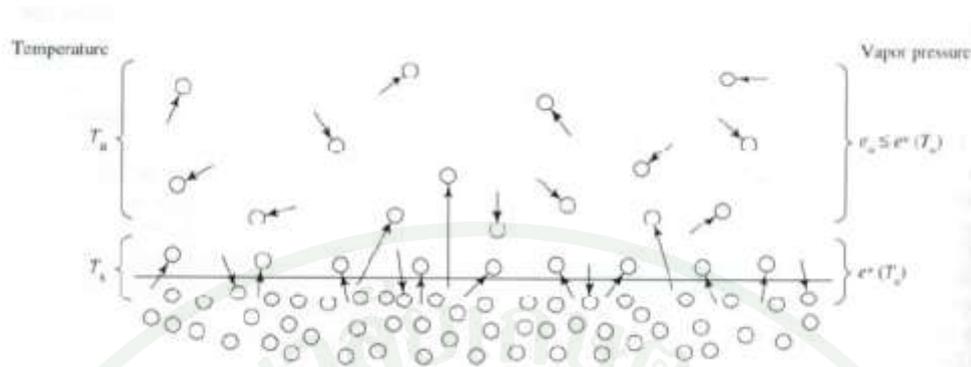
### 1. การคายระเหยน้ำ (Evapotranspiration)

#### 1.1 นิยามและความหมาย

การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวให้กลายเป็นไอ เป็นกระบวนการร่วมระหว่างการระเหยน้ำ (evaporation) หมายถึง การสูญเสียน้ำจากผิวน้ำ หรือจากผิวดิน โดยตรงกับกระบวนการคายน้ำของพืช (transpiration) ซึ่งการระเหยน้ำนี้มีบทบาทต่ออุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน (micrometeorology) เป็นอย่างมาก เนื่องจากปริมาณไอน้ำเหล่านี้มีส่วนทำให้เกิดการผันแปรสภาพอากาศจากร้อนให้เป็นเย็นเพราะว่าการคายระเหยน้ำเป็นกระบวนการดูดความร้อนเข้าไปเพื่อทำให้น้ำกลายเป็นไอ (เกษม, 2539) และ สมบูรณ์ (2547) กล่าวว่า การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่เป็นของเหลวให้กลายเป็นไอน้ำ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ (evaporation) กับกระบวนการคายน้ำของพืช (transpiration) ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำเข้าสู่บรรยากาศ ทำให้ปริมาณน้ำที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ได้ลดลง ส่วน วิชา (2535) ได้อธิบายว่า กระบวนการคายระเหยเป็นส่วนหนึ่งของการหมุนเวียนน้ำ (hydrologic cycle) หรือเรียกว่า วัฏจักรของน้ำ กล่าวคือ น้ำที่อยู่บนผิวโลกทั้งที่อยู่ในดิน พืช และแหล่งน้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ ทำให้เกิดเมฆและฝนตกลงมาสู่พื้นโลกเป็นไปตลอดกาลเวลา ทำให้มีน้ำหมุนเวียนจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำจากไอน้ำกลายเป็นหยดน้ำอีก โดยทางทฤษฎีน้ำจะระเหยไปได้ 1 กรัม ต้องใช้ปริมาณความร้อนประมาณ 583.2 แคลอรี ที่อุณหภูมิอากาศ 25 องศาเซลเซียส ส่วนการคายน้ำของพืช ตามการทดลองของนักวิทยาศาสตร์ พบว่าน้ำที่พืชดูดจากดินไปใช้ในกระบวนการต่าง ๆ พืชจะใช้น้ำเพื่อการคายน้ำกลับสู่บรรยากาศ ร้อยละ 95 และอีกร้อยละ 5 ของปริมาณน้ำที่พืชดูดขึ้นมาจากดินพืชจะใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่ง วิบูลย์ (2526) กล่าวว่า ในด้านการชลประทานจะใช้คำว่าปริมาณการใช้น้ำของพืช (consumptive use) ซึ่งเป็นปริมาณน้ำทั้งหมดที่สูญเสียจากพื้นที่เพาะปลูกสู่บรรยากาศในรูปของไอน้ำ และประคำแก้ว (2550) กล่าวว่า การคายระเหยน้ำ เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะของน้ำที่เป็นของเหลวให้กลายเป็นไอน้ำ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างกระบวนการระเหยน้ำ กับกระบวนการคายน้ำของพืช ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำเข้าสู่บรรยากาศ ทำให้ปริมาณน้ำที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ได้ลดลง

เกษม (2515) และวิชา (2535) กล่าวว่า การคายระเหยน้ำสามารถแยกอธิบายได้ 2 กระบวนการ คือ การระเหยน้ำ (evaporation) และการคายน้ำของพืช (transpiration) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เกษม (2539) กล่าวว่า การระเหยน้ำ (evaporation) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงสถานะจากน้ำ หรือของเหลวเป็นไอน้ำ โดยในการเปลี่ยนสภาพของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอจะต้องใช้ความร้อนเพื่อช่วยให้เกิดการแปรสภาพประมาณ 583 แคลลอรี่ต่อกรัม 1 กรัม ที่อุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส โดยที่ สิทธิพร (2530) พบว่าการระเหยของน้ำจากผิวพื้นดินขึ้นอยู่กับความชื้นในดิน ถ้าดินมีความชื้นมากก็มีการระเหยมาก ดินแห้งก็มีการระเหยน้อย นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับสภาพทางอุตุนิยมวิทยา คือ ความแรงของลม แสงแดด อุณหภูมิ และความชื้นของอากาศ และในบริเวณที่มีพืชปกคลุมน้ำจะระเหยไปได้มากกว่าในพื้นที่โล่ง ถึง 8.5 เท่า โดยที่ Dingman (2002) อธิบายว่า กระบวนการระเหยน้ำ (evaporation process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะจากของเหลวไปเป็นไอน้ำ เมื่อมีพลังงานความร้อนซึ่งส่วนใหญ่มาจากพลังงานจากแสงอาทิตย์ (solar radiation) เข้ามากระทำกับโมเลกุลน้ำ โมเลกุลน้ำจะเกิดการสั่นอย่างไม่มีทิศทาง เมื่อมีพลังงานความร้อนมากขึ้นประมาณ 580 แคลลอรี่ต่อกรัม บริเวณผิวหน้าโมเลกุลของน้ำที่เชื่อมต่อกันด้วย hydrogen bond จะหลุดออก และเคลื่อนที่ขึ้นสู่บรรยากาศบริเวณเหนือผิวน้ำ พลังงานที่ทำให้เกิดการระเหยนี้เรียกว่า ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization) ในระบบปิดเมื่อไอน้ำในบรรยากาศบริเวณเหนือผิวน้ำมีปริมาณมากขึ้น จนเกิดภาวะอิ่มตัว (saturated vapor pressure) เป็นภาวะที่อัตราการระเหยน้ำสุทธิยุติลง บรรยากาศไม่สามารถรับไอน้ำได้อีกต่อไป จากนั้นไอน้ำที่อิ่มตัวเหนือพื้นผิวน้ำเคลื่อนที่สูงขึ้นตามหลักการแพร่ จากความหนาแน่นสูงไปสู่ความหนาแน่นต่ำ (ภาพที่ 1) ในระบบเปิด เช่น ทะเลสาบ หรือนาข้าว เป็นต้น ปริมาณไอน้ำในอากาศจะเคลื่อนโดยการพัดพาของลม เคลื่อนย้ายไอน้ำบริเวณผิวน้ำการระเหย ทำให้สามารถระเหยน้ำได้ในปริมาณมาก



ภาพที่ 1 กระบวนการการระเหยน้ำจากพื้นที่ผิวอิสระ

ที่มา: Dingman (2002)

จากภาพที่ 1 แสดง ถึงทฤษฎีที่ตั้งขึ้นโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ชื่อ John Dalton เรียกว่า “Dalton’s law” ( $e_s - e_a$ ) ซึ่งเป็นพื้นฐานของหลักการเคลื่อนที่ของมวลสาร (mass transfer) จากบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงไปสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากความเข้มข้นของปริมาณไอน้ำในอากาศลดลงตามระดับความสูง จึงเรียกระบวนการนี้ว่า กระบวนการแพร่ (diffusion) ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงของไหล เช่น กระบวนการความจุความร้อน โมเมนต์ตัม และการแพร่เป็นการแพร่จากความหนาแน่นสูงไปสู่ความหนาแน่นต่ำในแนวตั้ง ซึ่งรวมเรียกหลักการนี้ว่า Fick’s first law of diffusion (เกษม, 2539; Dingman, 2002) ดังสมการที่ 1

$$F_z(X) = -D_x \frac{dC(X)}{dz} \quad (1)$$

เมื่อ  $F_z(X)$  คือ อัตราการเคลื่อนย้ายของสาร X ในแนวแกน Z ต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วย และต่อช่วงเวลา (เรียกว่าความเข้มข้นการไหลของสาร X, flux of X) โดยที่  $dC(X) / dz$  คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร X ระหว่างความสูงที่แตกต่างกัน 2 ระดับ ( $dz$ ) และ  $D_x$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยน (exchange coefficient) ได้แก่ ความหนาแน่นของอากาศ ความกดดันของอากาศ ความเสียดทาน (friction) เป็นต้น อันเป็นปัจจัยควบคุมความสามารถในการแพร่ของสาร X จากระดับต่ำสู่ระดับที่สูงกว่า จากสมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ของมวลสารใด ๆ ก็ตาม เช่น ไอน้ำ ความร้อน และโมเมนต์ตัม เป็นต้น เมื่อความต่างของไอน้ำหรือความดันไอน้ำ (vapor pressure) ในสองระดับความสูงจากผิวหน้าการ

ระเหยที่แตกต่างกัน ( $dZ$ ) โดยสมมติให้  $D_x$  คงที่ การระเหยนี้มีค่าผันแปรตามปริมาณความต่างของไอน้ำ โดยในขณะที่ฝนตก ความชื้นในอากาศใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ของชั้นบรรยากาศ ทำให้ค่า  $dC(X)$  มีค่าน้อย หรือเข้าใกล้ศูนย์ การระเหยนี้มีน้อยมาก หรือแทบไม่มีเลย แต่ในสภาวะจริงค่าการคายระเหยมิได้ถูกควบคุมเพียงค่า  $dC(X)$  เพียงอย่างเดียว ค่า  $D_x$  นับเป็นปัจจัยที่ควบคุมการระเหยมากที่สุดจึงมีความยุ่งยากที่ตรวจวัดค่านี้ กล่าวคือ มิใช่เพียงการวัดค่าของไอน้ำให้ถูกต้องเท่านั้น แต่รวมไป ถึงการวัดค่า  $D_x$  และสภาวะอากาศขณะนั้นด้วย

ดังนั้นกระบวนการระเหยน้ำ เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ เมื่อของเหลวได้รับความร้อนประมาณ 580 แคลลอรี่ต่อกรัม บริเวณผิวน้ำทำให้อนุภาคของไอน้ำหลุดออกจากของเหลว และเคลื่อนที่จากผิวน้ำขึ้นสู่ด้านบนตามหลักการ Dalton's law ในระบบปิด ไอน้ำเคลื่อนที่ในแนวตั้งแต่ในระบบเปิดไอน้ำจะได้รับอิทธิพลของลม เป็นตัวการพัดพาเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไป สังเกตได้จากพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำมีอากาศเย็นกว่าพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลแหล่งน้ำ

วิชา (2535) กล่าวว่า การคายน้ำของพืช (transpiration) เป็นกระบวนการทางชีวภาพซึ่งนำน้ำกลับสู่บรรยากาศผ่านลำต้น โดยผ่านช่องทางปากใบพืช (stomata) น้ำที่พืชดูดจากดินมาใช้เพื่อกระบวนการคายน้ำ พืชจะใช้น้ำเพื่อการคายน้ำกลับสู่บรรยากาศร้อยละ 95 และอีกร้อยละ 5 ของปริมาณน้ำที่พืชดูดมาจากดินพืชจะเอาไว้ใช้ในการเติบโต และ Dingman (2002) อธิบายว่ากระบวนการคายน้ำ (transpiration process) เป็นการระเหยของน้ำจากระบบเนื้อเยื่อพืชสู่ชั้นบรรยากาศ กระบวนการนี้เริ่มจากการดูดซับ (absorption) น้ำและความชื้นจากดินโดยรากพืชเข้าไปในระบบเนื้อเยื่อเคลื่อนย้ายลำเลียง (translocation) จากรากสู่ลำต้น และกิ่งก้าน ส่งผ่าน ถึงใบและเคลื่อนที่จากระบบเนื้อเยื่อใบพืชสู่โพรงปากใบ (stomatal cavities) จึงเกิดการระเหย และออกจากปากใบไปสู่บรรยากาศภายนอกในรูปของไอน้ำ ซึ่งกระบวนการคายน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เนื่องจากเมื่อพืชดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศเพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรต น้ำจะถูกใช้ในการละลายและลำเลียงสารอาหารไปสู่เซลล์พืช เพื่อใช้ในกระบวนการต่าง ๆ ของพืช การเคลื่อนย้ายของไอน้ำออกสู่บรรยากาศนั้นถูกควบคุมโดยการทำงานของเซลล์คุม (guard cells) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปิด - ปิดของเซลล์คุม คือ ปริมาณแสงที่พืชได้รับ ความชื้น และปริมาณน้ำที่มีในเซลล์ใบพืช ซึ่งสอดคล้องกับ Kramer and Koslowski (1979) and Bidwell (1980) อธิบายว่า การคายน้ำของพืชส่วนใหญ่เกิดขึ้นผ่านปากใบประมาณร้อยละ 80 - 97 ของน้ำที่พืชคายออกมาทั้งหมด ความจริงแล้วปริมาณน้ำที่พืชคายออกมาสู่บรรยากาศนั้น มิได้เกิดจากใบพืชเพียงอย่างเดียว ยังเกิดจาก cuticle, lenticels และ epidermis แต่ปริมาณน้ำมีค่าน้อย

มากเมื่อเทียบกับส่วนที่เกิดจากปากใบ ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่ไม่ค่อยคำนึง ถึง เมื่อพืชคายน้ำจึงมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอประมาณ 560 - 580 แคลลอรี่ต่อกรัม ส่วนของพืชที่มีการคายน้ำจึงมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศโดยรอบตามปกติพืชพยายามต่อต้านการคายน้ำด้วยวิธีปรับตัวเองให้คงทนอยู่กลางแจ้ง และพืชต้องเก็บน้ำและความร้อนไว้ใช้ในกระบวนการต่าง ๆ

## 1.2 ประเภทของการคายระเหยน้ำ

การจำแนกชนิดของการคายระเหยน้ำ ซึ่งนักอุตุนิยมวิทยา ได้แบ่งการคายระเหยน้ำออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ การคายระเหยน้ำสูงสุด (potential evapotranspiration) และ การคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration) (เกษม, 2526; Dingman, 2002)

### 1.2.1 การคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration)

การคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration) หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการคายน้ำของพืชและการระเหยน้ำสู่บรรยากาศได้จริงในสภาวะอากาศขณะนั้น ปริมาณน้ำที่สูญเสียไปขึ้นอยู่กับปัจจัยควบคุมหลายอย่าง เช่น ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ ความเร็วลม ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ชนิดพืช เป็นต้น หากไม่มีปริมาณความชื้นในดินให้พืชอย่างเต็มที่และตลอดเวลา ปริมาณน้ำในดินจะถูกดึงออกจากดินจนความชื้นลดลงเรื่อย ๆ ในกรณีนี้จะเป็นการคายระเหยจริง ซึ่งมีอัตราลดลงและต่ำกว่าการคายระเหยสูงสุด จนกระทั่ง ถึงจุดเหี่ยวถาวร การคายระเหยน้ำจริงจะยุติลง ดังนั้น เมื่อใดที่ปริมาณน้ำที่ใช้ในการคายระเหยไม่พอเพียงหรือความชื้นในดินลดลงต่ำกว่าความจุความชื้นสนาม (field capacity) เมื่อนั้นกระบวนการคายระเหยสูงสุดจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ (วีรพล, 2538; Change, 2003) โดยที่ปริมาณการคายระเหยจริงในทางการจัดการลุ่มน้ำถือว่าเป็นเรื่องที่สำคัญ เนื่องจากการคายระเหยน้ำจะขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่สะสมไว้ในดิน ถ้ามีปริมาณน้ำในดินน้อยจะทำให้การคายระเหยน้ำจริงน้อยตามลงไปด้วย ค่าการคายระเหยน้ำจริงในทางการจัดการลุ่มน้ำควรที่ควรทราบเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นส่วนที่เกิดขึ้นจริงในพื้นที่ ซึ่งสามารถสะท้อน ปริมาณน้ำในพื้นที่ รวมถึงบรรยากาศ และสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ลุ่มน้ำนั้นได้ เนื่องจากในทางการจัดการลุ่มน้ำจำเป็นที่ต้องลดการสูญเสียน้ำออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำให้มากที่สุด เพื่อให้มีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ

### 1.2.2 การคายระเหยน้ำสูงสุด (potential evapotranspiration)

การคายระเหยน้ำสูงสุด คือ การคายระเหยน้ำที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ที่พืชปกคลุม มีความสูงของต้นไม้ หรือพืชคลุมดิน และมีน้ำที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำตลอดเวลา หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นปริมาณการระเหยของน้ำที่เกิดขึ้นได้สูงสุดในสภาวะนั้นจากพื้นที่ที่ผิวน้ำ หรือเป็นปริมาณการระเหยของน้ำในขณะที่ดินอิ่มตัวไปด้วยน้ำ มีปริมาณน้ำในดินเหลืออยู่ตลอดเวลา ณ ช่วงเวลาขณะนั้น ซึ่งการระเหยน้ำสูงสุดนี้จะมีค่าสูงกว่า หรือเท่ากับปริมาณการคายระเหยน้ำจริงเสมอ

### 1.3 ปัจจัยควบคุมการคายระเหยน้ำ

ปริมาณการคายระเหยน้ำจะผันแปรไปตามลักษณะพื้นที่ ชนิดของพืชคลุมดิน ชนิดดิน ลักษณะอากาศ และปัจจัยทางสรีรวิทยาของพืช (เกษม, 2539) ซึ่งสอดคล้องกับ (วิชา, 2535) ได้แบ่งปัจจัยควบคุมการคายระเหยน้ำออกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

#### 1.3.1 ปัจจัยเกี่ยวกับสภาพอากาศ (climatic factors)

ปัจจัยทางด้านลักษณะอากาศนั้นมีหลายประการด้วยกัน ในกรณีที่มีน้ำให้แก่การคายระเหยอย่างไม่จำกัด อัตราการคายระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยลักษณะอากาศเหนือผิวน้ำเท่านั้น ซึ่งจำแนกออกได้ดังนี้

1) อุณหภูมิของอากาศ (air temperature) อุณหภูมิของอากาศแปรผันตรงกับปริมาณรังสีของดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ อุณหภูมิเพิ่มขึ้นในตอนเช้า และสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 14.00 น. แล้วค่อยลดลง โดยส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลมาจากดวงอาทิตย์ ถ้าอุณหภูมิสูง โอกาสที่น้ำกลายเป็นไอน้ำสูงขึ้น เนื่องจากสาเหตุสามประการ คือ ประการแรก อุณหภูมิมีบทบาทต่อการส่งเสริมการเคลื่อนที่ขึ้นของโมเลกุลให้ออกจากผิวน้ำการระเหยได้มากขึ้น ประการที่สอง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดช่องว่างของไอน้ำจากผิวน้ำการระเหยสู่บรรยากาศมากขึ้น และประการสุดท้ายอุณหภูมิมิมีผลทำให้กิจกรรมทางชีวเคมีเป็นไปด้วยดี การคายน้ำของพืชจึงมากขึ้นทำให้มีผลต่อการคายระเหยน้ำที่มากขึ้น (วิชา, 2535)

2) ความชื้นของอากาศ (air humidity) ความชื้นในอากาศมีค่าต่ำลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ช่วงเวลากลางวันสำหรับช่วงที่มีอากาศเย็นในช่วงตอนกลางคืนความชื้นมีค่าสูงขึ้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความชื้นในอากาศแปรผกผันกับอุณหภูมิของอากาศ และอัตราการระเหยน้ำจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อความชื้นมีค่าน้อยลง ความชื้นในบรรยากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว (vapor pressure deficit) ซึ่งเป็นความแตกต่างของความชื้นที่ผิวระเหย และบรรยากาศ ถ้ามีปริมาณมากการคายระเหยน้ำค่อนข้างมาก อันเป็นตัวการสำคัญในการควบคุมการเคลื่อนย้ายไอน้ำจากผิวหน้าการคายระเหยสู่บรรยากาศ สังเกตได้ว่าในพื้นที่ป่าดิบเขาซึ่งมีความชื้นมีค่ามาก การคายระเหยน้ำจะมีค่าน้อยกว่าป่าเต็งรัง และป่าสักธรรมชาติ ซึ่งมีความชื้นน้อยกว่าป่าดิบเขา (เกษม, 2539)

3) รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) ปริมาณรังสีของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงสู่พื้นผิวของโลก ขึ้นอยู่กับลักษณะสิ่งแวดล้อมของโลก เช่น ตำแหน่งของพื้นที่บนผิวโลกฤดูกาล ช่วงเวลาของวัน และสภาพของท้องฟ้า เป็นต้น รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก มีทั้งรังสีความร้อนคลื่นสั้น และคลื่นยาว ซึ่งช่วงคลื่นที่มีผลต่อการคายน้ำของพืชมากที่สุด คือ ช่วงคลื่นสีแดง และน้อยที่สุดคือช่วงคลื่นสีน้ำเงิน ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมายังพื้นผิวโลกมีประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของรังสีดวงอาทิตย์ทั้งหมด เนื่องจากถูกชั้นบรรยากาศดูดซับไว้ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมายังพื้นผิวโลกและเหลือจากการดูดซับและแผ่รังสีกลับ เรียกว่า รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (net radiation) ซึ่ง เกษม (2539) อธิบายว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิส่วนใหญ่ถูกใช้ เป็นความร้อนในการคายระเหยน้ำ (latent heat) ที่เหลือใช้ในการเผาผลาญอากาศ (sensible heat) และไหลลงสู่ดิน (soil heat flux) นอกจากนี้ยังใช้ในกระบวนการอื่น ๆ จึงกล่าวได้ว่ารังสีดวงอาทิตย์สุทธิมีบทบาทต่อการคายระเหยน้ำเป็นอย่างยิ่งเพราะเป็นพลังงานที่ทำให้ปัจจัยอื่น ๆ มีความผันแปรตาม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น เป็นต้น

4) การเคลื่อนที่ของลม (wind movement) ลมเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้อัตราการระเหยน้ำสูงขึ้น เพราะลมสามารถพัดพาไอน้ำจากบริเวณที่มีความชื้นสูงไปสู่บริเวณความชื้นต่ำ ทำให้บริเวณที่เคยมีความชื้นสูงมีไอน้ำลดลง โอกาสที่น้ำระเหยมีเพิ่มขึ้น อีกทั้งลมเป็นตัวพัดพาไอน้ำและสะสมความร้อนของอากาศให้กระจายไปทั่ว ๆ และลมพัดจากบริเวณที่มีอากาศเย็นไปสู่ที่มีอากาศร้อน ทำให้ไอน้ำในอากาศเย็นลอยตัวขึ้น ซึ่ง เกษม (2539) อธิบายว่าเมื่อความสามารถในการนำน้ำของบรรยากาศ (atmospheric conductance) มีค่ามากขึ้น การระเหยน้ำมีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณไอน้ำบริเวณผิวการคายระเหยอิสระลดต่ำลง เพราะถูกพัดพาโดยลม ทำให้การ

คายระเหยน้ำเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยการเคลื่อนที่ของลมในแนวนอนนำปริมาณไอน้ำที่ผิวการระเหยออกจากพื้นที่ นอกจากนี้ลมยังมีอิทธิพลต่อการนำพาความร้อนจากพื้นที่ข้างเคียง ซึ่งลมแนวนอนพัดพาอิทธิพลภายนอก เข้ามาสู่พื้นที่ ได้แก่ การนำความร้อนมาสู่ผิวหน้าการคายระเหย ทำให้การคายระเหยเพิ่มขึ้น หากนำความชุ่มชื้นเข้ามากการคายระเหยมีค่าลดลง

### 1.3.2 ธรรมชาติของผิวหน้าการระเหยน้ำ (nature of evaporating surface)

ธรรมชาติของผิวหน้าในการระเหยน้ำแตกต่างกันไปตามชนิดของสสารต่าง ๆ ซึ่งพอนำมากล่าวได้ดังนี้

1) พืชพรรณที่ปกคลุม (vegetative cover) พืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในการยึดน้ำเอาไว้ การคายน้ำออกสู่บรรยากาศ ซึ่งแต่ละสภาพป่าก็มีองค์ประกอบของพืชต่างกันไป เช่น ชนิดพืช (species) ความหนาแน่น (density) ระยะห่างระหว่างต้น (spacing) การกระจายของพืชพรรณ (distribution) เรือนยอดปกคลุมดิน (crown cover) ถ้าพืชพรรณใดสามารถยึดน้ำไว้ได้มาก โอกาสที่สูญเสียน้ำสู่บรรยากาศโดยการระเหยก็มีมากขึ้นด้วย และพืชพรรณใดมีอัตราการคายน้ำสูง การสูญเสียน้ำก็มากเช่นกัน (วิชา, 2535)

2) สรีรวิทยาของพืช (plant physiology) ปัจจัยเกี่ยวกับพืชพรรณนั้นมีผลต่อกระบวนการคายระเหย ในรูปของการคายน้ำจากปากของใบพืช พืชต้องคายน้ำเพื่อลดความร้อน และเพื่อดูดแร่ธาตุขึ้นมาใช้เป็นอาหารจึงต้องคายน้ำออกไปทางปากใบ สำหรับการคายน้ำของพืชเกิดจากการที่ปากใบเปิดขึ้นให้ไอน้ำซึ่งอยู่ในช่องว่างภายในปากใบของ guard cell เปิด ไอน้ำจะแพร่กระจาย (diffuse) ออกสู่บรรยากาศ (Ward and Elliot, 1995)

3) สิ่งก่อสร้างต่าง ๆ (infrastructure) ที่สัมผัสกับน้ำฝน สิ่งก่อสร้างที่ปลูกไว้ในที่โล่งฝนจึงมีโอกาสที่สัมผัส ซึ่งสิ่งก่อสร้างเหล่านี้ไม่เปิดโอกาสให้น้ำฝนซึมลงดินน้ำส่วนที่เป็นน้ำที่ถูกยึดไว้ก็สูญเสียไปสู่บรรยากาศ

4) การอิ่มตัวของผิวน้ำอิสระ (saturation of evaporating surface) ถ้าผิวน้ำของสสารใดอิ่มตัวไปด้วยน้ำ ก็เปรียบเสมือนว่าผิวน้ำนั้นเหมือนกับผิวน้ำ หรือผิวน้ำอิสระที่ใช้ในการระเหยน้ำ

5) ความราบเรียบหรือขรุขระของผิวหน้าการระเหย (roughness of evaporating surface) ผิวหน้าของสสารที่มีความขรุขระย่อมมีพื้นที่ผิวมาก อัตราการระเหยน้ำย่อมมีมากด้วย

#### 1.4 วิธีวัดค่าการคายระเหยน้ำ

การวัดการคายระเหยน้ำมีวัตถุประสงค์ เพื่อต้องการทราบปริมาณน้ำที่สูญเสียดังกล่าวไปจากพื้นที่ลุ่มน้ำ และนำผลที่ได้มาประเมินปริมาณน้ำสุทธิที่ได้จากลุ่มน้ำเพื่อการใช้ประโยชน์ (water yield) หรือหาวิธีลดการคายระเหยน้ำที่อาจมีมากเกินไป อีกทั้งยังสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการส่งน้ำให้กับพื้นที่ต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม ซึ่ง เกษม (2526) และ วิชา (2535) ได้จำแนกชนิดของการวัด และการประเมินการคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

##### 1.4.1 วิธีการวัดความสมดุลของน้ำบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (water balance)

วิธีการวัดความสมดุลของน้ำ เป็นวิธีการวัดการคายระเหยน้ำโดยศึกษาจากสมดุลของน้ำซึ่งเป็นการวัดค่าความแตกต่างระหว่างปริมาณน้ำฝนที่ตกลงมา วัดปริมาณน้ำไหลเข้าสู่พื้นที่ลุ่มน้ำกับผลรวมของน้ำไหลออก และผลบวกของน้ำที่ติดค้างหรือลดลงของน้ำในลุ่มน้ำ ดังสมการที่ 2

$$ET = P + I_s + I_g - O_g - R + \Delta S \quad (2)$$

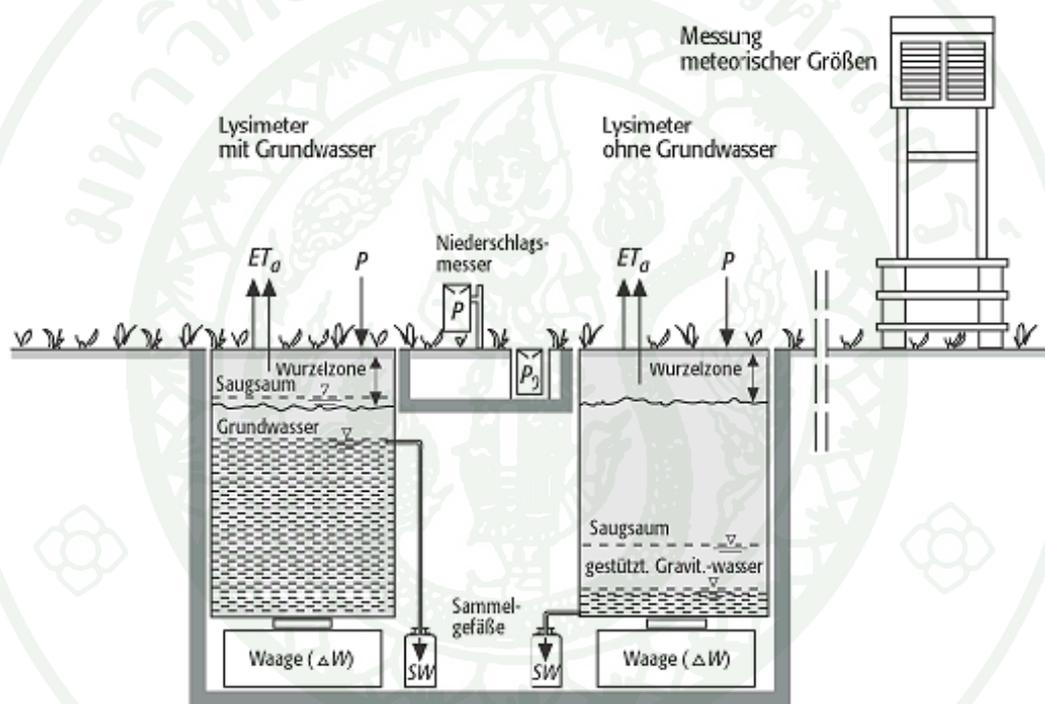
- เมื่อ
- ET = ปริมาณการคายระเหยน้ำจากพื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
  - P = ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่ตกในพื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
  - $I_s$  = ปริมาณน้ำผิวดินที่ไหลเข้าสู่พื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
  - $I_g$  = ปริมาณน้ำใต้ดินที่ไหลเข้าสู่พื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
  - $O_g$  = ปริมาณน้ำใต้ดินที่อาจไหลออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
  - R = น้ำผิวดินที่ไหลจากลุ่มน้ำวัดที่ outlet (มิลลิเมตร)
  - $\Delta S$  = ความแตกต่างของน้ำที่เก็บไว้ในดิน (มิลลิเมตร)

ถ้าความชื้นในดินที่วัดได้ครั้งหลังน้อยกว่าความชื้นของน้ำในดินครั้งก่อนแล้วค่า S มีค่าเป็นบวก ในทางตรงกันข้ามถ้ามากกว่าแล้ว S มีค่าเป็นลบ ซึ่งการวัดการคายระเหยน้ำด้วยวิธี

วัดความสมดุลของน้ำเป็นวิธีที่ง่ายตามทฤษฎี แต่การดำเนินการนั้นเป็นไปด้วยความยากลำบาก เนื่องจากอุปสรรคในการวัดค่าต่าง ๆ และระยะเวลาในการวัดนั้นต้องใช้เวลาานาน

#### 1.4.2 วิธีวัดโดยใช้ลุ่มน้ำจำลอง (lysimetric measurement)

ลุ่มน้ำจำลองเป็นเครื่องมือที่มีลักษณะเป็นถังขนาดใหญ่ ฝังอยู่ในดิน จัดเป็นเครื่องมือที่มีความเชื่อถือได้ และมีความแม่นยำสูงในการวัดอัตราการคายระเหยน้ำ (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 2 เครื่องมือวัดการคายระเหยน้ำแบบลุ่มน้ำจำลอง

ที่มา: <http://geodz.com/deu/d/Lysimeter.html>

Chang (1968) กล่าวว่า ลุ่มน้ำจำลองที่ดีต้องมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพแปลงปลูกธรรมชาติมากที่สุดคือต้องมีขนาดใหญ่และเพื่อขจัดปัญหาเรื่องผลกระทบเกี่ยวกับขอบเขต (boundary effect) และการเจริญเติบโตของราก คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่อยู่ภายในลุ่มน้ำจำลองต้อง ใกล้เคียงกับดินที่อยู่ภายนอกให้มากที่สุด นอกจากนี้จำนวนต้นพืชในลุ่มน้ำจำลองต้องมีความหนาแน่นเท่า ๆ กับพื้นที่โดยรอบ ซึ่งมีหลักในการหาการคายน้ำโดยใช้สมดุลของน้ำ

ลุ่มน้ำจำลองอาจเป็นแบบชั่ง (weighting) แบบลอย (floating) หรือเป็นแบบผสมผสานระหว่างชั่งกับลอยก็ได้ (weighting lysimeter) จัดเป็นเครื่องมือที่มีความแม่นยำมากที่สุดในการวัดการคายระเหยน้ำโดยตรง แต่เนื่องจากราคาแพง และเคลื่อนย้ายลำบากจึงไม่เป็นที่นิยม แต่ใช้เป็นมาตรฐานสำหรับสอบเทียบการวัดการคายระเหยน้ำด้วยวิธีการอื่น ส่วน floating lysimeter เป็นถังบรรจุดินถูกปล่อยให้ลอยใน buoyancy chamber ซึ่งมีของเหลวบรรจุอยู่ในระดับการเปลี่ยนแปลงของของเหลวเป็นตัวบอกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของน้ำในดินในลุ่มน้ำจำลอง เมื่อสูญเสียน้ำโดยการคายระเหยน้ำถึงบรรจุดินทำให้เบา และลอยตัวขึ้น แต่ถ้าได้รับความชื้นเพิ่มทำให้หนัก และจมตัวลง ซึ่งเครื่องมือชนิดนี้สามารถทำได้ง่าย และราคาถูกกว่าแบบ weighting lysimeter (เอ็จ, 2530)

#### 1.4.3 การประมาณการคายระเหยน้ำโดยอาศัยเทคนิคทางอุตุนิมวิทยา

การประมาณค่าการคายระเหยน้ำโดยใช้เทคนิคทางอุตุนิมวิทยา สามารถทำได้หลายวิธี แบ่งออกเป็น

1) Thornwaith's method เป็นวิธีการหาการคายระเหยน้ำสูงสุดที่นิยมในหมู่นักเกษตรชลประทานเป็นวิธีที่ง่ายกว่าวิธีอื่น ๆ และสามารถหาค่าการคายระเหยน้ำได้อย่างรวดเร็วเพื่อใช้ประมาณค่าการคายระเหยน้ำในพื้นที่ได้ เพราะใช้อุณหภูมิรายเดือนเฉลี่ยเท่านั้น แต่ความถูกต้องนั้นยังมีน้อย ซึ่งสามารถประมาณการคายระเหยน้ำ ดังสมการที่ 3

$$PET = 1.6 (10 TC / D)^a \quad (3)$$

ซึ่ง  $a = 0.49 + 0.0179 I - 0.0000771 I_2 + 0.000000675 I_3$

PET = การคายระเหยน้ำสูงสุดรายเดือน (มิลลิเมตร)

TC = อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน (องศาเซลเซียส)

I = ดัชนีความร้อน (ผลรวมของดัชนีความร้อนรายเดือน 12 เดือน)

$$I = i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + \dots + i_{12}$$

เมื่อ I = (TC / 5)1.514 (ดัชนีความร้อนรายเดือน)

2) Blaney-Criddle method เป็นวิธีการประเมินการคายระเหยน้ำที่นิยมมากทางภาคตะวันตกของสหรัฐอเมริกา ซึ่งวิธีของ Blaney-Criddle นี้คล้ายกับวิธีของ Thornwaith คือ การคายระเหยน้ำนอกจากจะขึ้นอยู่กับค่าของอุณหภูมิของอากาศแล้วยังมีค่าพารามิเตอร์หรือปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโตของพืชเข้ามาเพิ่มเพื่อให้สมการหรือแบบจำลองมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น (สมการที่ 4) แต่ก็ยังมีความถูกต้องน้อยเนื่องจากการคายระเหยน้ำจำขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายด้านร่วมกัน

$$PET = 25.4 * Kc * (DL / TDL) * (0.056052 TA^2 + 1.42776 * TA + 7.6672) \quad (4)$$

เมื่อ PET = การระเหยน้ำสูงสุดรายวัน (มิลลิเมตร)  
 TA = อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (องศาเซลเซียส)  
 DL = ความยาวของวัน (ชั่วโมง)  
 TDL = ผลรวมของทุก ๆ ความยาวของวันสำหรับทั้งปี = 4465.6 ชั่วโมง  
 Kc = สัมประสิทธิ์ระดับการเติบโตของพืชเกษตรในแต่ละชนิดที่ศึกษา

3) Turc method เป็นวิธีที่ใช้ปัจจัยพลังงานแสงอาทิตย์ และอุณหภูมิอากาศในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดรายวัน (สมการที่ 5) จุดเด่นของวิธีนี้คือ ง่าย สะดวกในการหาค่าการคายระเหยน้ำเนื่องจากมีค่าพารามิเตอร์น้อย แต่ความถูกต้องของสมการหรือแบบจำลองยังมีน้อยเนื่องจากการคายระเหยน้ำจะขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านพืชพรรณ และชนิดดินด้วย

$$PET = 0.4 * TC * (RI + 50) / TC + 15 \quad (5)$$

โดยที่ PET = การระเหยน้ำสูงสุดรายวัน (มิลลิเมตร)  
 TC = อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)  
 RI = รังสีดวงอาทิตย์ (แสงเลี้ยว)

4) Jensen-Haise method ใช้ปัจจัยพลังงานแสงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักในการศึกษาเนื่องจากพลังงานแสงอาทิตย์เป็นแหล่งของพลังงาน และทำให้เกิดการคายระเหยน้ำซึ่งคล้ายกับวิธี Turc method ซึ่ง Jensen and Haise (1963) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดมากกว่า 3,000 ครั้ง โดยการหาการคายระเหยน้ำจริงจากตัวอย่างดิน และวิธีการทางสถิติหา

ความสัมพันธ์ของรังสีดวงอาทิตย์ (สมการที่ 6) ซึ่งจุดเด่นของแบบจำลองวิธีนี้คือ ง่าย มีข้อมูลรังสีดวงอาทิตย์ และอุณหภูมิก็สามารถหาค่าการคายระเหยน้ำได้ การหาค่าการคายระเหยน้ำวิธีนี้อาจมีความถูกต้องน้อยเนื่องจากแบบจำลองหรือสมการไม่มีปัจจัยทางด้านพืชพรรณเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งอาจทำให้ค่าของการคายระเหยมีความคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้

$$PET = (0.078 + 0.0252 * TA) * RI * 0.017 \quad (6)$$

โดยที่ PET = การระเหยน้ำสูงสุดรายวัน (มิลลิเมตร)

TC = อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)

RI = รังสีดวงอาทิตย์ (แองเจล์)

ค่าคงที่ 0.017 เป็นการเปลี่ยนจากแองเจล์เป็นมิลลิบาร์ของการระเหยน้ำที่เท่ากัน

5) Penman method เป็นวิธีการหาการคายระเหยน้ำสูงสุด เพื่อทำการวัดน้ำที่อาจระเหยสูงสุดในพื้นที่ทำการเกษตรอันเป็นเครื่องมือช่วยประมาณค่าในการระบายน้ำเข้าพื้นที่ทำการเกษตรตามระบบชลประทานในปัจจุบัน โดยอาศัยหลักการพลังงานความร้อนทำให้เกิดการระเหยขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวระเหย และในอากาศรวมกับความเร็วลม (สมการที่ 7) จุดเด่นของวิธีนี้คือ มีพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณมาก ซึ่งอาจจะทำให้แบบจำลองมีความถูกต้อง แต่ยังขาดพารามิเตอร์ทางด้านพืชพรรณ ซึ่งกระบวนการคายระเหยน้ำขึ้นอยู่กับการคายระเหยด้วย

$$PET = \frac{(DH + G * Ea) / (D + G)}{[(D / G) H + Ea] / [(D + G) + 1]} \quad (7)$$

โดยที่ PET = การระเหยน้ำสูงสุดรายวัน (มิลลิเมตร)

D = ค่าความลาดชันของเส้นโค้งอุณหภูมิ และความดันไอน้ำที่อิ่มตัวที่อุณหภูมิอากาศเฉลี่ย

G = psychrometric constant = 0.27 สำหรับองศาฟาเรนไฮน์ และมิลลิเมตรปรอท

$$Ea = 0.35 (es - ea) (1 + u / 100) \quad (8)$$

- Ea = evaporation drying power  
 es และ ea = ความดันไอน้ำอิ่มตัวและความดันไอน้ำจริงของอากาศ  
 ในหน่วยมิลลิเมตรปรอท  
 u = ความเร็วลมที่ระดับความสูง 2 เมตร (กิโลเมตรต่อวัน)

ในกรณีที่วัดกระแสลมด้วย anemometer ซึ่งตั้งสูงเพียง 2 ฟุต จากผิวดินค่าของ u หาได้จาก

$$U = (\ln 200 / \ln 61) * W = 1.29 * W \quad (9)$$

- โดยที่ W = ความเร็วลมที่วัดที่ระดับความสูง 2 ฟุต  
 H = รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (แองเจล์)  
 = A - B  
 A = รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ลงมา  
 =  $RI (1 - al) / 59.06$   
 RI = รังสีดวงอาทิตย์ (แองเจล์)  
 Al = อัตราการสะท้อนแสง และการรับแสง (แองเจล์)  
 B = รังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาวที่สะท้อนกลับไป (แองเจล์)  
 =  $Sig * TK^4 (0.56 - 0.092 ea^{0.5}) (0.10 + 0.9 * S)$   
 Sig = ค่าคงที่ของ Stefan-Boltzman constant  
 =  $2.01 * 10^{-9}$   
 TK = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยในองศาเคลวิน  
 =  $273 + \text{องศาเซลเซียส}$   
 S = เปอร์เซ็นต์ของแสงอาทิตย์ที่ส่องลงมาจริงรายวันเฉลี่ย

6) Penman - Monteith method ในปี ค.ศ. 1965 Monteith ได้ตั้งข้อสมมติฐานที่มีต่อปัจจัยที่แพร่กระจายของ ความร้อนที่ถูกใช้เพื่อการคายน้ำ (latent heat) และความร้อนที่ใช้ในการเผาอากาศ (sensible heat) ซึ่งเป็นความแตกต่างกันระหว่างปัจจัยของโมเมนตัม และปริมาณความร้อนในอัตราได้อัตราหนึ่ง ซึ่งแบบจำลอง Penman - Monteith เป็นวิธีที่พัฒนามาจากการศึกษาของ Penman และ Monteith โดยที่ Jensen *et al.* (1990) พิจารณาว่าการเกิดการคายระเหยน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยของดัชนีความต้านทานของพืช และความต้านทานของอากาศด้วย โดยมีรูปแบบสมการในการคำนวณหาการคายระเหยน้ำที่นิยมใช้โดยทั่ว ๆ ไป (สมการที่ 10) แต่แบบจำลองวิธีนี้มี

ค่าพารามิเตอร์มาก ซึ่งการได้มาซึ่งข้อมูลทั้งหมดเป็นไปได้ยาก ในบางพื้นที่ไม่สามารถหาข้อมูลเพื่อใช้ในการหาค่าการคายระเหยน้ำได้ ซึ่งจะทำให้แบบจำลองไม่สมบูรณ์และมีความถูกต้องน้อยลง

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma (900 / T + 273) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34U_2)} \quad (10)$$

โดยที่ $ET_0$	=	การคายระเหยน้ำอ้างอิง (มิลลิเมตรต่อวัน)
$R_n$	=	รังสีสุทธิที่พื้นผิวพืช (เมกะจูลล์ต่อตารางเมตรต่อวัน)
$G$	=	ความหนาแน่นของความร้อนที่ไหลลงสู่ดิน (เมกะจูลล์ต่อตารางเมตรต่อวัน)
$T$	=	อุณหภูมิอากาศที่ความสูงระดับ 2 เมตร (องศาเซลเซียส)
$U_2$	=	ความเร็วลมที่ความสูงระดับ 2 เมตร (เมตรต่อวินาที)
$e_s$	=	ความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศ (กิโลปาสกาล)
$e_a$	=	ความดันไอน้ำจริงของอากาศ (กิโลปาสกาล)
$e_s - e_a$	=	ความดันไอน้ำอิ่มตัวของอากาศที่เหลือ (กิโลปาสกาล)
$\Delta$	=	ความลาดชันของเส้นโค้งความดันไอน้ำ (กิโลปาสกาลในหน่วยขององศาเซลเซียส)
$\gamma$	=	psychrometric constant (กิโลปาสกาลในหน่วยขององศาเซลเซียส)

#### 1.4.4 วิธีการวัดการคายระเหยน้ำโดยอาศัยสมดุลของพลังงาน

การวัดการคายระเหยน้ำโดยอาศัยหลักสมดุลพลังงานสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

1) วิธีอัตราส่วนโบเวน (Bowen Ratio method) เป็นวิธีการหาอัตราการคายระเหยน้ำจริงที่นิยมกันมากที่สุด เนื่องจากเป็นวิธีที่ได้รับการพิสูจน์ว่าถูกต้องดีที่สุดในแง่สัมประสิทธิ์การเคลื่อนย้าย (transfer coefficient; K) ของไอน้ำเท่ากับของความร้อน ( $K_w = K_h$ ) ในขณะที่เกิดการระเหยน้ำต้องไม่มีกระบวนการควบแน่นเกิดขึ้นเลย และการแผ่รังสีของวัตถุหรือของไอน้ำต้องไม่เกิดขึ้น ซึ่งมีวิธีการหาค่า ดังสมการที่ 11

$$\beta = H / \lambda E \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\rho C_p K_h (\Delta T / \Delta Z)}{(0.622 \rho \lambda K_w / P) (\Delta e / \Delta Z)} \quad (12)$$

เมื่อ  $\beta$  = อัตราส่วน โ Bowen (Bowen Ratio)  
 $H$  = ความร้อนที่ใช้ในการเผาอากาศ (วัตต์ต่อตารางเมตร)  
 $\lambda E$  = ความร้อนที่ถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำ (วัตต์ต่อตารางเมตร)  
 $\rho$  = ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)  
 $C_p$  = ความร้อนจำเพาะของอากาศ (จูลต่อองศาเซลเซียสต่อกรัม)  
 $\lambda$  = ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ (แคลอรีต่อกรัม)  
 $P$  = ความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์)  
 ค่า 0.622 = อัตราส่วนโมเลกุลระหว่างอากาศชื้นและอากาศแห้ง  
 $\Delta T / \Delta Z$  และ  $\Delta e / \Delta Z$  = ความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นจริงในบรรยากาศ

จากสมการที่ (11) จะได้สมการที่ 13

$$\beta = \frac{C_p P K_h \Delta T}{0.622 \lambda K_w \Delta e} \quad (13)$$

จากสมการความสมดุลของรังสีความร้อนที่ผิวดิน สมการที่ 14

$$R_n + H + \lambda E + G_s = 0 \quad (14)$$

$$H + \lambda E = - (R_n + G_s) \quad (15)$$

เมื่อ  $R_n$  = รังสีสุทธิ  
 $G_s$  = ความร้อนที่ไหลลงสู่ดิน (soil heat flux)  
 จากสมการที่ 11 แทนค่า  $H$  ในสมการที่ 15 จะได้สมการที่ 16

$$\lambda E = (R_n + G_s) / 1 + \beta \quad (16)$$

แทนค่า B ในสมการที่ 16 แล้วจะได้สมการที่ 17

$$\lambda E = \frac{(R_n + G_s)}{(C_p P K_h \Delta T) / (0.622 \lambda K_w \Delta e)} \quad (17)$$

เมื่อสมมติฐานให้

$K_w = K_h$  และในทำนองเดียวกันค่า  $C_p / 0.622 \lambda$  เป็น psychrometric constant ซึ่งมีค่าประมาณ 0.67 มิลลิบาร์ต่อองศาเซลเซียส

$$P = 1,000 \text{ มิลลิบาร์}$$

$$C_p = 0.24 \text{ แคลอรีต่อกรัมต่อองศาเซลเซียส}$$

$$\lambda = 583.2 \text{ แคลอรีต่อกรัม}$$

และถ้าให้ psychrometric constant คือ  $\gamma$  จะได้สมการที่ 18

$$\lambda E = \frac{(R_n + G_s)}{1 + \gamma (\Delta T / \Delta e)} \quad (18)$$

การประยุกต์ใช้สมการนั้นต้องหาค่ารังสีสุทธิให้ได้ก่อน ส่วนค่าความร้อนที่ไหลลงสู่ดินนั้นถ้าพิจารณาเป็นเรือนยอดของป่าไม้แล้วอาจให้ค่าความร้อนที่ไหลลงสู่ดินเป็นศูนย์ แต่ถ้าเป็นทุ่งหญ้าหรือที่ผิวดินโดยตรงแล้ว ต้องหาค่าความร้อนที่ไหลลงสู่ดินด้วย สิ่งที่ยากที่สุดสำหรับการประยุกต์ก็คือการวัดค่า  $\Delta T$  และ  $\Delta e$  สองระดับ เพราะการที่จะวัด  $T_1$  และ  $T_2$  หรือ  $e_1$  และ  $e_2$  ซึ่งวัดที่ความสูงตามแนวตั้งที่  $z_1$  และ  $z_2$  ซึ่งโดยทั่วไปแล้วค่าแตกต่างของ  $z_1$  และ  $z_2$  นั้น ถ้าเป็นพื้นที่ผิวดินที่เป็นป่าไม้นั้นต้องไม่เกิน 4 เมตร ทั้งนี้เพื่อให้สภาวะอากาศใกล้ธรรมชาติมากที่สุด ในการวัดนั้นต้องวัด  $T_1$  และ  $e_1$  ให้ใกล้ผิวดินมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ คือไม่สูงเกินไป หรือชิดเกินไป (เกษม, 2539)

2) วิธีการ Aerodynamic เป็นวิธีการคายระเหยน้ำจริงโดยใช้ความเร็วลมเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณการสูญเสีย น้ำ ปกติมักจะเกิดขึ้นในท้องที่ที่เป็นพื้นที่เปิดกว้าง และลักษณะที่เกิดต้องมีสภาวะเป็นธรรมชาติอย่างเต็มที่ ซึ่งสามารถหาค่าการคายระเหยน้ำได้จาก (สมการที่ 19) แต่เนื่องจากการหาค่าการคายระเหยน้ำวิธีนี้ใช้พารามิเตอร์ในการคำนวณน้อย อีกทั้งยังไม่มีปัจจัยทางด้านพืชพรรณเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งการคายระเหยน้ำจะขึ้นอยู่กับชนิดของพืชพรรณด้วย อาจทำให้การหาค่าการคายระเหยน้ำที่ได้มีความคลาดเคลื่อน

$$E = [(3.46 * 10^{-6}) / Ta] \frac{-(U_2 - U_1)(e_1 - e_2)}{\ln [(z_2 - d) / (z_1 - d)]^2} \quad (19)$$

- โดยที่ E = อัตราการคายระเหย (เซนติเมตรต่อวินาที)  
 $U_1, U_2$  = ความเร็วลมที่ความสูง 2 ระดับ (เซนติเมตรต่อวินาที)  
 Ta = อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)  
 $e_1$  และ  $e_2$  = ความดันไอน้ำ (มิลลิบาร์) ที่ความสูง 2 ระดับ  $z_1$  และ  $z_2$   
 d = zero-plane-displacement

สมการตามวิธี Aerodynamic สามารถประยุกต์ใช้ได้กับพื้นที่ผิวเกือบทุกชนิด โดยการวัดปริมาณไอน้ำ และอุณหภูมิที่สองระดับความสูง วัดความเร็วลมอย่างน้อย 4 ระดับ เพื่อเขียนกราฟหาค่า zero-plane-displacement ข้อควรระวังคือต้องมีสภาวะอากาศในลักษณะธรรมชาติ (neutral condition) ซึ่งเป็นสภาวะอากาศที่มีอัตราการลดของอุณหภูมิตามระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น (5.4 องศาฟาเรนไฮต์ / 1000 ฟุต) และในสภาวะอากาศเช่นนี้  $z_1$  และ  $z_2$  ต้องไม่เกิน 2 เมตร สำหรับพืชเกษตร สำหรับพืชป่าไม้ประมาณ 4 เมตร

## 2. การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide; CO<sub>2</sub>)

### 2.1 นิยามและความหมาย

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbon dioxide; CO<sub>2</sub>) เป็นก๊าซในบรรยากาศ ซึ่งประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) 1 อะตอม และ ออกซิเจน (O) 2 อะตอม ต่อหนึ่งโมเลกุล ธาตุคาร์บอนเป็นหนึ่งในสารประกอบทางเคมี ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซไม่มีสี ไม่มีกลิ่น สามารถทำให้อยู่ใน 3 สถานะ คือ ก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นก๊าซที่มีปริมาณมากเป็นอันดับ 4 ในชั้นบรรยากาศของโลก รองจากไนโตรเจน ออกซิเจน และ อาร์กอน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้นได้หลายลักษณะ เช่น ภูเขาไฟระเบิด การเผาไหม้ของสารประกอบอินทรีย์ หรือการหายใจของสิ่งมีชีวิต เป็นต้น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวัตถุดิบสำคัญในกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช พืชใช้คาร์บอนและออกซิเจนในการสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรต จากกระบวนการสังเคราะห์นี้ พืชปลดปล่อยก๊าซออกซิเจนออกมาสู่บรรยากาศ การที่พืชใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นการช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก (greenhouse gases) เนื่องจากก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซชนิดหนึ่ง ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจก หรือเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดภาวะโลกร้อน (global warming)

จากที่กล่าวมาข้างต้นก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์มีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดภาวะโลกร้อน อีกทั้งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีความสัมพันธ์ และเกี่ยวข้องโดยตรงกับป่าไม้ เพราะป่าไม้มีหน้าที่ทั้งในการเก็บกัก (sink) และการปลดปล่อย (source) ก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ การเก็บกักหรือการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของป่าไม้เกิดขึ้นโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง พืชทุกชนิดจะนำเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาใช้ในกระบวนการสร้างอาหาร และเพิ่มผลผลิตมวลชีวภาพ ซึ่งทำให้พืชเกิดการเจริญเติบโตของพืช ในขณะเดียวกันพืชก็ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กลับสู่บรรยากาศทางปากใบพืช ผ่านกระบวนการหายใจ การผุพัง การย่อยสลายของเศษซากพืช และการตายของพืช ซึ่ง การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์จากระบบนิเวศ สามารถแยกออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์จากดิน และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์จากพืช

## 2.2 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์จากดิน

การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน หรืออาจเรียกว่า การหายใจของดิน (soil respiration) เป็นผลรวมของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้มาจากกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน การหายใจของรากพืช และการหายใจของสัตว์ในดิน (Mielnick and Dugas, 1999) มีการประมาณว่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินของโลกมีค่าอยู่ระหว่าง 50 – 75 พันล้านตันคาร์บอนต่อปี (Rayment and Jarvis, 2000) นอกจากนี้ พงษ์ศักดิ์ (2538) กล่าวว่า การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน จะแตกต่างกันไปตามคุณสมบัติของดิน และพรรณพืชที่ปกคลุมสำหรับการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ นั้น จะทำให้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินผันแปรไปอย่างมาก โดยทั่วไปแล้วเมื่อในดินมีจำนวนจุลินทรีย์สูง จะเกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาสูงตามไปด้วย ในทำนองเดียวกันปริมาณของอินทรีย์วัตถุที่มีอยู่ ถ้ามีปริมาณมาก ดินมีอุณหภูมิที่เหมาะสม ความชื้นที่เหมาะสมและมีการถ่ายอากาศดี จะทำให้การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินสูงขึ้นด้วย

### 2.2.1 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน

1) อุณหภูมิดิน อุทิส (2542) กล่าวว่า อุณหภูมิมีความสำคัญต่อการเติบโตและการพัฒนาแตกต่างกันไปตามชนิดพันธุ์ ซึ่งพืชในเขตหนาวและเขตอบอุ่นต้องการอุณหภูมิในการเติบโตและการพัฒนาต่ำกว่าพืชในเขตร้อน อุณหภูมิดินเป็นคุณสมบัติที่บ่งบอก ถึงความร้อนของดินซึ่งส่วนใหญ่รับพลังงานมาจากดวงอาทิตย์ทั้งโดยตรงและโดยอ้อม ดินสะสมและเก็บพลังงานไว้ในรูปความร้อนในดิน ซึ่งจะวัดระดับได้โดยอุณหภูมิดิน จุลินทรีย์ในดินมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมในช่วงหนึ่ง ๆ เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของดินอาจทำให้ความเหมาะสมในการดำเนินกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินและกิจกรรมของรากพืชอาจแปรเปลี่ยนไป อีกทั้งการงอกของเมล็ดพืชและการเติบโตของพืชมีความสัมพันธ์อย่างมากกับอุณหภูมิดิน

2) ความชื้นในดิน จากการศึกษาความชื้นในดินต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินของ Raich and Potter (1995) พบว่าเมื่อดินมีความชื้นน้อยหรือค่อนข้างแห้ง กิจกรรมของจุลินทรีย์ในดินจะสัมพันธ์กับความชื้นที่เพิ่มขึ้น และเมื่อดินมีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 50-80 ของความชื้นที่มีได้ทั้งหมดในดิน จุลินทรีย์ในดินจะทำกิจกรรมได้ดี รวมทั้งเมื่อดินเปียกหรืออิ่มตัวไปด้วยน้ำ ปริมาณออกซิเจนที่ขาดแคลนจะเป็นตัวยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจน และการศึกษาของ Rochette *et al.* (1999) ยังพบว่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินจะเพิ่มขึ้น ถึง 9 เท่า เมื่อทำการวัดอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินภายหลังฝนตกลง 3 ชั่วโมง และดินนั้นผ่านช่วงฤดูแล้งมาแล้ว

3) อินทรีย์วัตถุ คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2541) กล่าวว่าอินทรีย์วัตถุในดินเป็นองค์ประกอบสำคัญของดินที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติต่าง ๆ ของดิน ทั้งทางเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพ อันส่งผลกระทบต่อเนื่องไป ถึงระดับความสมบูรณ์ของดิน ความสามารถในการให้ผลผลิตของดิน โดยทั่วไปอินทรีย์วัตถุในดินมีสีน้ำตาลเข้ม ไปจน ถึงดำ ดินที่มีอินทรีย์วัตถุสูงมักมีสีคล้ำ อินทรีย์วัตถุในดินยังมีความสามารถในการดูดน้ำไว้ได้ในปริมาณมากคือประมาณ 6-20 เท่าของน้ำหนัก ทั้งนี้เนื่องจากอินทรีย์วัตถุมีอนุภาคขนาดเล็ก จึงมีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้ำเอาไว้ได้มาก และอนุภาคของอินทรีย์วัตถุยังประกอบกันเป็น โครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายฟองน้ำ มีช่องว่างขนาดเล็กที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้เป็นจำนวนมาก การเติมอินทรีย์วัตถุให้กับดินทรายหรือดินที่มีเนื้อหยาบ จึงช่วยเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำของดินชนิดนี้ได้ นอกจากนี้อินทรีย์วัตถุในดินยังเป็นแหล่งอาหารและพลังงานสำคัญที่สุดสำหรับจุลินทรีย์ส่วนใหญ่ในดิน จากการศึกษาของ

Bazzaz and Williams (1991) พบว่าพื้นที่ที่มีอินทรีย์วัตถุมาก จะมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน จำนวนจุลินทรีย์ในดิน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน มากกว่าพื้นที่ที่มีอินทรีย์วัตถุน้อยกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา (2541) กล่าวว่าพื้นที่ดินแต่ละแห่งมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมากน้อยแตกต่างกัน เช่น ดินในเขตทุ่งหญ้ามักจะมีปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินมากกว่าในเขตป่าไม้ เพราะมีปริมาณเศษซากพืชคลุมเคล้าลงในดินมีปริมาณที่มากกว่า หรือดินที่ใช้ในการเกษตรเป็นเวลานาน ๆ มักมีระดับของอินทรีย์วัตถุอยู่ในระดับต่ำ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินในแต่ละพื้นที่ถูกกำหนดโดยปัจจัยต่าง ๆ หลายประการ ซึ่งประกอบไปด้วย ชนิดและปริมาณของพืชพันธุ์ที่ปกคลุมดิน สภาพภูมิอากาศ และสมบัติของดิน

4) จุลินทรีย์ในดิน สิ่งมีชีวิตที่มีบทบาทในการทำให้เกิดกระบวนการ หรือกิจกรรมที่มีอิทธิพลต่อการเติบโตของพืชมากที่สุด ได้แก่ จุลินทรีย์ในดิน ซึ่งเป็นสิ่งมีชีวิตเล็กมากที่อาศัยอยู่ทั่วทุกตารางนิ้วของชั้นดินที่รากพืชอาศัย หากจำแนกกลุ่มจุลินทรีย์ออกตามชนิดของสารอาหารแล้ว สิ่งมีชีวิตเหล่านี้อาจแบ่งออกได้เพียง 2 พวกคือ พวก heterotrophic กับพวก autotrophic (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) ซึ่งพวก heterotrophic เป็นกลุ่มที่ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งอาหาร เป็นพวกที่มีปริมาณมากที่สุดในดินและมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุในดินหรือกิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการใช้อินทรีย์วัตถุเป็นอาหารและปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา พวกที่สอง คือ autotrophic เป็นพวกที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งอาหารเพื่อสังเคราะห์สารอินทรีย์มาสร้างเป็นองค์ประกอบของเซลล์ จุลินทรีย์พวกนี้ส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้สารอินทรีย์เป็นอาหารและจะได้พลังงานจากแสงหรือจากการออกซิเดชัน (oxidation) สารอินทรีย์มาใช้ในการดำรงชีวิต จึงเป็นพวกที่มีบทบาทเกี่ยวข้องอยู่กับการเพิ่มอินทรีย์วัตถุให้กับดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

5) ความพรุนของดิน ความพรุนของดินเป็นสมบัติดินซึ่งถูกควบคุมโดยปริมาตรและขนาดของช่องในดิน โดยที่ดินเนื้อหยาบที่มีความพรุนรวมต่ำ จะระบายน้ำและอากาศได้ดีแต่จะอุ้มน้ำไว้ได้น้อย ส่วนดินเนื้อละเอียดที่มีความพรุนรวมสูงจะระบายน้ำและอากาศได้เร็ว แต่จะอุ้มน้ำไว้ได้มาก ความสามารถส่งผ่านหรือระบายน้ำและการถ่ายเทอากาศอาจรวมกันเรียกว่าสภาพการให้ซึมได้ (permeability) สภาพให้น้ำและอากาศซึมได้ของดินถูกควบคุมโดยตรงจากขนาดและความต่อเนื่องของช่องว่างในดิน (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541) และจากการศึกษาของ Bouma and Bryla (2000) พบว่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินจะลดลงหรือ

ถูกชะลอให้ช้าลงในดินเนื้อละเอียดมากกว่าดินเนื้อหยาบเมื่อมีการเพิ่มความชื้นเข้าไปในดินอย่างต่อเนื่อง

6) การหายใจของรากพืช และชนิดของพืชพันธุ์ การหายใจของรากพืชเป็นปัจจัยที่ถูกพิจารณาว่าเป็นแหล่งที่มาของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ถูกปลดปล่อยจากดิน จากข้อมูลที่มีการศึกษาและรายงาน ถึงอัตราส่วนระหว่างการหายใจของรากพืชกับปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินทั้งหมด พบว่าที่ระบบนิเวศแบบ tundra ในแถบอาร์กติกมีค่าอยู่ระหว่าง 50 - 93 เปอร์เซ็นต์ (Raich and Tufekcioglu, 2000) ในป่าเขตอบอุ่นของประเทศญี่ปุ่น มีค่าอยู่ระหว่าง 40 - 50 เปอร์เซ็นต์ ในทุ่งหญ้าเบอร์มิวดา มีค่าอยู่ระหว่าง 17-60 เปอร์เซ็นต์ (Dugas, *et al.*, 1999) นอกจากนี้ชนิดของพืชพันธุ์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน เนื่องจาก ความแตกต่างของผลผลิต อัตราการหายใจ ปริมาณการร่วนหล่น ปริมาณรากพืชและความหนาแน่นของรากพืช และปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ

## 2.3 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากพืช

การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ป่าไม้ นับเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงปริมาณก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ ทั้งในด้านการปลดปล่อย และการดูดซับคาร์บอนในบรรยากาศ

### 2.3.1 ปัจจัยที่ควบคุมการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากพืช

ปัจจัยควบคุมการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์จากพืช สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1) ปัจจัยเกี่ยวกับสรีรวิทยาของพืช (plant physiology) ปัจจัยเกี่ยวกับพืชพรรณมีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งอยู่ในรูปของกระบวนการหายใจของพืช ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง คือ ชนิดของพืชพรรณ (plant species) พืชพรรณแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางสรีรวิทยาที่มีความแตกต่างกันไปตามแต่ละชนิดพืช เช่น จำนวนใบ ชนิดของใบ ขนาดของใบ ลักษณะใบ และจำนวนปากใบ เป็นต้น ซึ่งปัจจัยดังกล่าว ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่แตกต่างกัน สมบูรณ์ (2547) กล่าวว่า การปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชเกิดขึ้นได้ทั้งทางปากใบ (stomatal transpiration) ทางผิวของลำต้น (cuticle transpiration) และทางรอยแตกตามลำต้น

(lenticel transpiration) แต่การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญและมีปริมาณมากที่สุดคือ ทางปากใบ

2) ปัจจัยที่เกี่ยวกับสภาพอากาศ (climate factors) สภาพภูมิอากาศก็เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถแยกได้ดังนี้

(1) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) เป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชโดยตรง เนื่องจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงสู่พืช มีผลต่อการเปิด-ปิดของปากใบพืช ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ นอกจากนี้ การศึกษาของ ลดาวัลย์ และคณะ (2540) พบว่าอัตราการสังเคราะห์แสงของพืชหรือความสามารถในการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชแปรผันตามความเข้มของแสง ความเข้มแสงปกติของไม้ยืนต้นมีค่าประมาณ 600 – 800 ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยที่สมบุญ (2538) อธิบายว่า หากปริมาณความเข้มแสงต่ำ พืชจะมีอัตราการสังเคราะห์แสงต่ำ แต่พืชไม่สามารถลดอัตราการหายใจให้ต่ำลงไปด้วยในสภาพที่มีอัตราการสังเคราะห์แสงเท่ากับอัตราการหายใจหรือจำนวนที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่พืชตรึงไว้เท่ากับจำนวนคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปล่อยออกมาที่จุดนี้การแลกเปลี่ยนก๊าซมีค่าเป็นศูนย์เรียกความเข้มแสงนี้ว่า light compensation point หากพืชได้รับแสงต่ำกว่านี้เป็นเวลานานจนไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ก็จะตายในที่สุด ซึ่งพืชใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และกระบวนการหายใจ จึงเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการเปิด-ปิดปากใบ การแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ระหว่างพืชกับบรรยากาศ ซึ่งสอดคล้องกับ การศึกษาของ Zeiger (1983) ได้ศึกษาอิทธิพล ของรังสีดวงอาทิตย์ต่อเซลล์คุม พบว่าเซลล์คุมที่ได้รับแสง จะทำการสังเคราะห์ด้วยแสง และเมื่อมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่เพิ่มมากขึ้น เซลล์คุมจะเต่ง ทำให้ปากใบพืชเปิด มีการแลกเปลี่ยนก๊าซใน ใบพืชกับบรรยากาศ เมื่อมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่สูงมาก ปากใบจะปิด

(2) อุณหภูมิอากาศ (air temperature) อุณหภูมิของอากาศแปรผันตรงกับปริมาณรังสีของดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ อุณหภูมิค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงตอนเช้า และมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงบ่าย แล้วค่อยลดลงเมื่อตอนเย็น ซึ่งมีผลต่อการเปิด-ปิดของปากใบพืช ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงฤดูกาล และสภาพอากาศด้วย (วิชา, 2535) และจากการศึกษาของ ลดาวัลย์ (2533) พบว่าปัจจัยที่ควบคุมอัตราการหายใจของต้นไม้ส่วนใหญ่จะเป็นปัจจัยของสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อุณหภูมิ โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการหายใจของต้นไม้จะ

อยู่ระหว่าง 25 - 30 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการหายใจจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ หากอุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส จะมีผลทำให้อัตราการหายใจลดลง เนื่องจากเอนไซม์ทำงานได้ไม่ดีในภาวะที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่ออุณหภูมิเข้าใกล้ 0 องศาเซลเซียส อัตราการหายใจจะต่ำมาก แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีผลทำให้การหายใจเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม สมบุญ (2544) กล่าวว่าหากอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส ( $^{\circ}\text{C}$ ) อัตราการหายใจจะลดลง และจากการศึกษาของ Zeiger (1983) พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการหายใจของพืช ประมาณ 35 - 45 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมของพืช ซึ่งจะทำให้การทำงานของ เอนไซม์ (enzyme) เป็นปกติ นอกจากนี้ อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อ ความดันในเซลล์คุม อัตราการหายใจของพืช รวมถึงกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงด้วย

(3) ความชื้น โดยปกติความชื้นในอากาศมีผลโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิต ปัจจัยสำคัญคือ ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศผสมผสานอยู่กับก๊าซชนิดอื่น ๆ เป็นแหล่งน้ำสำคัญที่ก่อให้เกิดฝนและน้ำจากฟ้าในรูปแบบอื่น ๆ เป็นแหล่งสะสมพลังงานสำคัญที่ก่อให้เกิดลมและความร้อนในโลก โดยทั่วไปการกระจายของสังคมพืชส่วนหนึ่งขึ้นกับความชื้นในอากาศ ปริมาณความชื้นในอากาศส่วนใหญ่ได้มาจากการระเหยของน้ำจากแหล่งน้ำและดิน และการคายน้ำของพืช โดยที่ความชื้นในอากาศมีการเปลี่ยนแปลงและเปลี่ยนรูปตลอดเวลา ปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในอากาศต่อหน่วยของอากาศคิดเป็นน้ำหนักของไอน้ำต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของอากาศ เช่น กรัมต่อลูกบาศก์เมตร เรียกว่า ความชื้นสัมพัทธ์ (อุทิส, 2542) ซึ่งการวัดปริมาณความชื้นอากาศโดยทั่วไปนิยมวัดออกมาในรูปของ ความชื้นสัมพัทธ์เป็นอัตราส่วนในรูปร้อยละของปริมาณความชื้นที่มีอยู่จริงในอากาศกับปริมาณความชื้นที่อากาศนั้นสามารถรับได้ในอุณหภูมิและความกดอากาศนั้น ปกติความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลงได้รวดเร็วมาก ทั้งนี้เนื่องจากค่าความชื้นสัมพัทธ์ขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิของอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงได้ตลอดเวลา ในสภาพที่อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ค่าความชื้นสัมพัทธ์จะลดน้อยลง (วิชา, 2535) อิทธิพลของความชื้นในอากาศต่อสิ่งมีชีวิตนับว่าสำคัญมาก และจากการศึกษาของ Schulze (1986) พบว่าในสภาพที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัวมีค่าสูง การชักนำของปากใบพืชจะมีค่าสูง ทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาก ในขณะที่เดียวกันหากมีความชื้นในบรรยากาศที่มาก ค่าการชักนำปากใบพืชจะต่ำ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชจะลดลงเช่นกัน สังคมของป่าหลายชนิดถูกควบคุมโดยความชื้นในอากาศเป็นสำคัญ เช่น ป่าผลัดใบของเขตร้อนจะผลัดทิ้งใบหมดเมื่อความชื้นในอากาศต่ำมาก ๆ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อในบรรยากาศมีไอน้ำอยู่น้อยจะทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างความชื้นในใบกับในอากาศอย่างมาก ทำให้เกิดการคายน้ำอย่างรุนแรงขึ้นได้

ฉะนั้น พืชหลายชนิดจึงผลัดใบในช่วงนี้ สำหรับพื้นที่ที่มีความชื้นสูงตลอดปี เช่น บนภูเขาสูงที่มีเมฆและหมอกปกคลุมเกือบตลอดเวลา พืชที่ชอบความชื้นมาก ๆ เช่น มอสส์ชนิดต่าง ๆ ก็จะปรากฏขึ้นปกคลุมอยู่ตามต้นไม้อย่างหนาแน่น โดยเฉพาะในป่าดงดิบเขาที่ระดับสูง หรือกล้วยไม้หลายชนิดพบอยู่ในเฉพาะป่าดิบชื้นที่มีความชื้นค่อนข้างสูงเท่านั้น (อุทิศ, 2542)

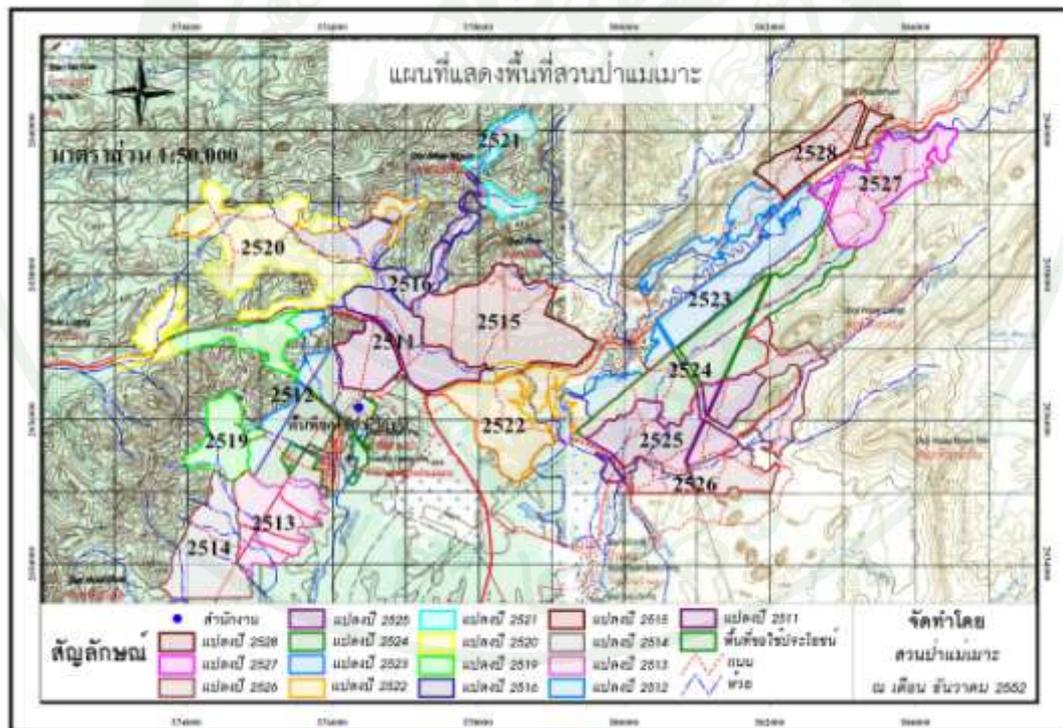


## พื้นที่ศึกษา

### 1. อาณาเขตติดต่อสวนสักแม่เมาะ

ทิศเหนือ	จรด	ป่าสงวนแห่งชาติแม่เมาะ - แม่ยาง
ทิศใต้	จรด	การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (แม่เมาะ)
ทิศตะวันออก	จรด	ป่าสงวนแห่งชาติแม่เมาะ - แม่ยาง
ทิศตะวันตก	จรด	ป่าสงวนแห่งชาติแม่เมาะ - แม่ยาง

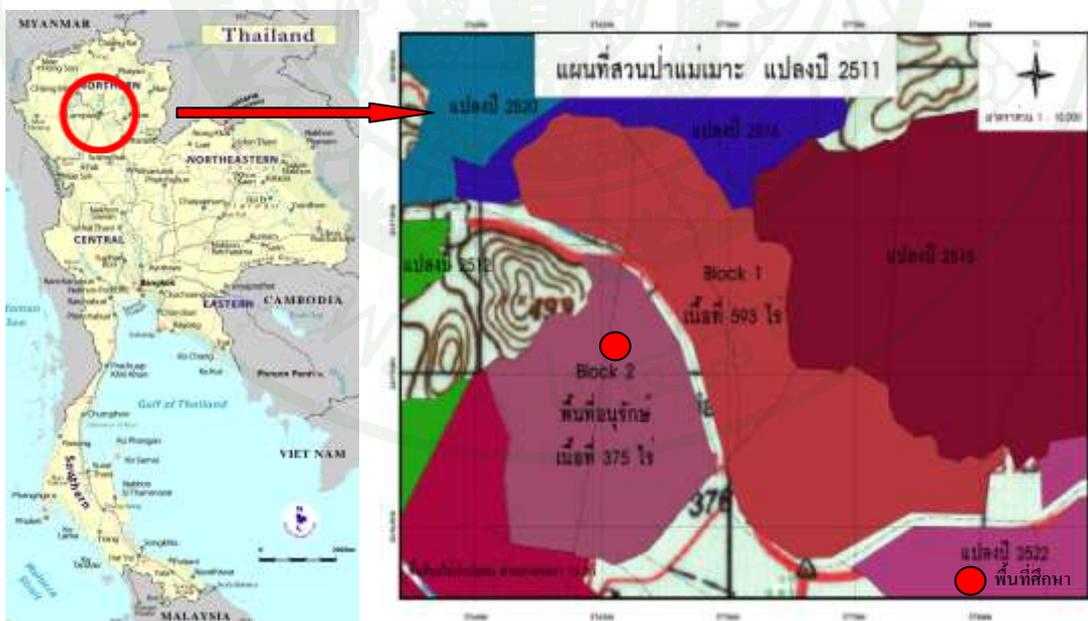
ซึ่งได้แสดงอาณาเขตของขอบเขตพื้นที่สวนสักแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง  
ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ขอบเขตพื้นที่สวนสักแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

## 2. ลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาที่ใช้ศึกษาการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คือ พื้นที่สวนสัก (teak plantation) อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยพื้นที่ดังกล่าวมีการติดตั้งสถานีตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติภายใต้โครงการ GEWEX asian monsoon experiment tropics (GAME-T) และ coordinated enhanced observational period (CEOP) สวนสักแม่เมาะ จังหวัดลำปาง สังกัดสำนักงานอนุรักษ์และพัฒนาสวนป่าภาคเหนือ องค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ (อ.อ.ป.) สวนสักแม่เมาะเป็นสวนป่าที่ปลูกตามแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ โดยใช้เงินลงทุนขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ทั้งหมด โดยมีการจัดตั้งหมู่บ้านป่าไม้ขึ้นเพื่อเป็นแรงงานในการปลูกสร้างสวนป่าพื้นที่ดำเนินการอยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติแม่อาจ - แม่ยาง และป่าสงวนแห่งชาติแม่เมาะ ที่ทำการสวนป่าแม่เมาะ ตั้งอยู่ในท้องที่ตำบลบ้านดง อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ห่างจากกรุงเทพมหานคร ประมาณ 635 กิโลเมตร พิกัดเส้นรุ้งที่ 18 องศา 25 ลิปดาเหนือ เส้นแวงที่ 99 องศา 44 ลิปดาตะวันออก หรือ UTM ที่ 203712 N, 576618 E อยู่ห่างจากจังหวัดลำปางประมาณ 32 กิโลเมตร โดยเริ่มทำการปลูกสร้างสวนป่า ตั้งแต่แปลงปลูกปี พ.ศ.2511 จนถึงแปลงปลูกปี พ.ศ. 2528 และแปลงปี พ.ศ.2536 ได้เนื้อที่รวมทั้งสิ้น 20,013 ไร่ (ภาพที่ 4)



ภาพที่ 4 ที่ตั้งพื้นที่ศึกษา สวนสักแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

โดยใช้ระบบหมูบ้านป่าไม้ ซึ่งไม้ที่ปลูกได้แก่ ไม้สักและยูคาลิปตัส ปัจจุบันคงเหลือพื้นที่ดำเนินการของงานสวนฯ 13,962 ไร่ เนื่องจาก การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยขอใช้พื้นที่เพื่อกิจการของการไฟฟ้า และส่งคืนให้กรมป่าไม้เพื่อออกเอกสารสิทธิ์ที่ทำกินให้กับสมาชิกหมูบ้านป่าไม้ ได้ดำเนินการทำไม้สักคัดสายขยายระยะออกจากแปลงปลูกสร้างสวนป่าแปลงปีต่างๆ ตามแผนการทำไม้ขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ นอกจากนี้สวนป่าแห่งนี้ยังเป็นสวนป่าที่ใช้เป็นพื้นที่ในการค้นคว้าทดลองทางวิชาการป่าไม้, วิทยาศาสตร์ และเศรษฐกิจสังคมของสถาบันต่าง ๆ ทั้งในและนอกประเทศอย่างมากมาย และยังเป็นศูนย์ผลิตกล้าสักและเหง้าสักเพื่อใช้ในการปลูกสร้างสวนป่าของ อ.อ.ป. ทั่วประเทศ ตลอดจนงานวิจัยและพัฒนาด้านวิชาการของ อ.อ.ป. ต่าง ๆ

### 3. ลักษณะสภาพอากาศ

พื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ อยู่ภายใต้อิทธิพลของแนวลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และแนวลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ โดยฤดูฝนเริ่มจากเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนตุลาคม มรสุมนี้มีผลทำให้ฝนตกมาก โดยเฉพาะในช่วงเดือนสิงหาคม ถึงเดือนกันยายน มักจะมีพายุดีเปรสชันเคลื่อนตัวจากทะเลจีนใต้เข้าประเทศไทยทางตอนเหนือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือของประเทศ และในช่วงปลายเดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนกุมภาพันธ์เป็นช่วงฤดูหนาว เพราะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้อากาศหนาวเย็นและช่วงฤดูร้อนเริ่มจากเดือนมีนาคมจนถึงเดือนมิถุนายน ลักษณะอากาศโดยทั่วไปของพื้นที่สวนสัก ตั้งแต่ ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2515 - 2553 (38 ปี) อุณหภูมิของอากาศเฉลี่ยตลอดปีเท่ากับ 26 องศาเซลเซียส โดยมีอุณหภูมิต่ำสุดในเดือนมกราคมเฉลี่ยเท่ากับ 11.2 องศาเซลเซียส และสูงสุดในเดือนเมษายน เฉลี่ยเท่ากับ 41.7 องศาเซลเซียส ปกติในตอนเช้าและเย็นมีหมอกปกคลุม โดยเฉพาะหลังจากฝนตกหนักในฤดูฝนและฤดูหนาวจะมีหมอกปกคลุม ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 74 และต่ำสุดในเดือนมีนาคม มีค่าเท่ากับร้อยละ 49 โดยมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยตลอดปีเท่ากับ 1,129.7 มิลลิเมตร โดยที่มีปริมาณน้ำฝนตกสูงที่สุดในเดือนกันยายน เท่ากับ 222.2 มิลลิเมตร และต่ำสุดในเดือนมกราคมเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตร จำนวนวันที่ฝนตกตลอดปีประมาณ 115 วัน ลักษณะของฝนที่ตกส่วนใหญ่เป็นแบบ orographic และ thunderstorm precipitation (กองภูมิอากาศ, 2553)

#### 4. ลักษณะดิน

จากการจำแนกดินบริเวณพื้นที่สวนป่าแม่เมาะ พบว่าจัดอยู่ในชุดดินแม่ทะ อยู่ในกลุ่ม low humid clay soils เกิดจากตะกอนลำนํ้าเก่า สภาพพื้นที่ที่พบมีลักษณะค่อนข้างราบ มีการระบายน้ำค่อนข้างเร็ว ดินมีความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้ช้า มีการไหลบ่าของน้ำผิวดินช้าตามปกติแล้วมีระดับน้ำผิวดินลึกกว่า 1.5 เมตร ดินบนลึกไม่เกิน 25 เซนติเมตร มีเนื้อดินเป็นดินร่วนเหนียวปนทรายแป้งหรือดินร่วนปนดินเหนียว สีพื้นเป็นสีน้ำตาลหรือน้ำตาลปนเทา มีจุดปะสีน้ำตาลแก่ ปฏิกิริยาดินเป็นกรดแก่ ถึงเป็นกรดปานกลาง ส่วนดินล่างมีเนื้อดินเป็นดินร่วนปนดินเหนียว สีพื้นเป็นสีอ่อนของสีน้ำตาลปนแดง ถึงสีชมพูมีจุดปะสีน้ำตาลแก่จำนวนเล็กน้อยปฏิกิริยาเป็นกรดแก่จัด จากผลการวิเคราะห์ทางเคมีของตัวแทนดินชุดนี้ปรากฏว่า ดินตอนบนหนาประมาณ 30 เซนติเมตร มีปริมาณอินทรีย์วัตถุปานกลาง มีปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำมาก และมีปริมาณธาตุโปแตสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชสูง ส่วนดินตอนล่างลึกตั้งแต่ 30 เซนติเมตรลงไป มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุบวกค่อนข้างสูง มีปริมาณธาตุฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ต่อพืชต่ำมาก และมีปริมาณธาตุโปแตสเซียมที่เป็นประโยชน์ต่อพืชสูง กล่าวโดยภาพรวมดินชุดนี้มีปริมาณธาตุอาหารตามธรรมชาติค่อนข้างต่ำ (กรมพัฒนาที่ดิน, 2527)

#### 5. ลักษณะสวนสักแม่เมาะ

สวนสักแม่เมาะ ขององค์การอุตสาหกรรมป่าไม้ ได้ปลูกขึ้นเมื่อ ปี พ.ศ. 2511 ด้วยระยะ 4X4 เมตร ผ่านการตัดสายขยายระยะมาแล้วครั้งหนึ่ง จากการตรวจวัดไม้สัก พบว่ามีความสูงโดยเฉลี่ย 17 เมตร ความโต (DBH) เฉลี่ยประมาณ 21.4 เซนติเมตร โดยทั่วไปแล้วต้นสักจะเริ่มผลัดใบในช่วงประมาณปลายเดือนพฤศจิกายน และผลิใบใหม่เมื่อมีฝนตกในปลายเดือนเมษายนของทุกปี

#### 6. ทรัพยากรป่าไม้

ทรัพยากรป่าไม้ประกอบด้วยพื้นที่ป่าเศรษฐกิจ เนื้อที่ 13,962 ไร่ สภาพป่าเดิมเป็นป่าเบญจพรรณที่ไม้สักผสมป่าเต็งรังและไผ่

## 7. ทรัพยากรสัตว์ป่า

- สัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เช่น กระต่ายป่า
- สัตว์เลื้อยคลาน เช่น งูต่าง ๆ กิ้งก่า แตน
- สัตว์สะเทินน้ำสะเทินบก เช่น กบ เขียด
- สัตว์ปีก เช่น ไก่ป่า และนกบางชนิด
- ปลา เช่น ปลานิล ปลาไน ปลาช่อน ปลาดุก



## อุปกรณ์และวิธีการ

### อุปกรณ์

#### 1. อุปกรณ์วิทยาศาสตร์

เครื่องวัดอากาศแบบอัตโนมัติ (automatic weather station: AWS) โดยติดตั้งเครื่องมือตรวจอากาศไว้ที่หอคอย (tower) ตรวจวัดอากาศสูงเหนือเรือนยอดสัก และบริเวณพื้นที่ใกล้เคียง โดยรอบสถานีตรวจวัดอากาศ บนพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง ซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือต่าง ๆ ดังภาพที่ 5



(ก) เครื่องวัดความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

(ข) เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน



(ค) เครื่องวัดอุณหภูมิอากาศ  
แบบ thermister

(ง) เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์แบบ  
แบบ hygrometer

ภาพที่ 5 เครื่องวัดข้อมูลอุตุนิยวิทยา ในพื้นที่สวนสักแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



(จ) เครื่องวัดอุณหภูมิกระแสเป่าเปือก และกะเปาะแห้ง (ฉ) เครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์  
แบบ pyrheliometer



(ซ) เครื่องวัดความเข้มแสงอาทิตย์ (ฅ) เครื่องวัดปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมไว้ในดิน



(ญ) เครื่องวัดความเร็วลม (ฎ) เครื่องวัดทิศทางลม  
แบบ three cup anemometer

ภาพที่ 5 (ต่อ)

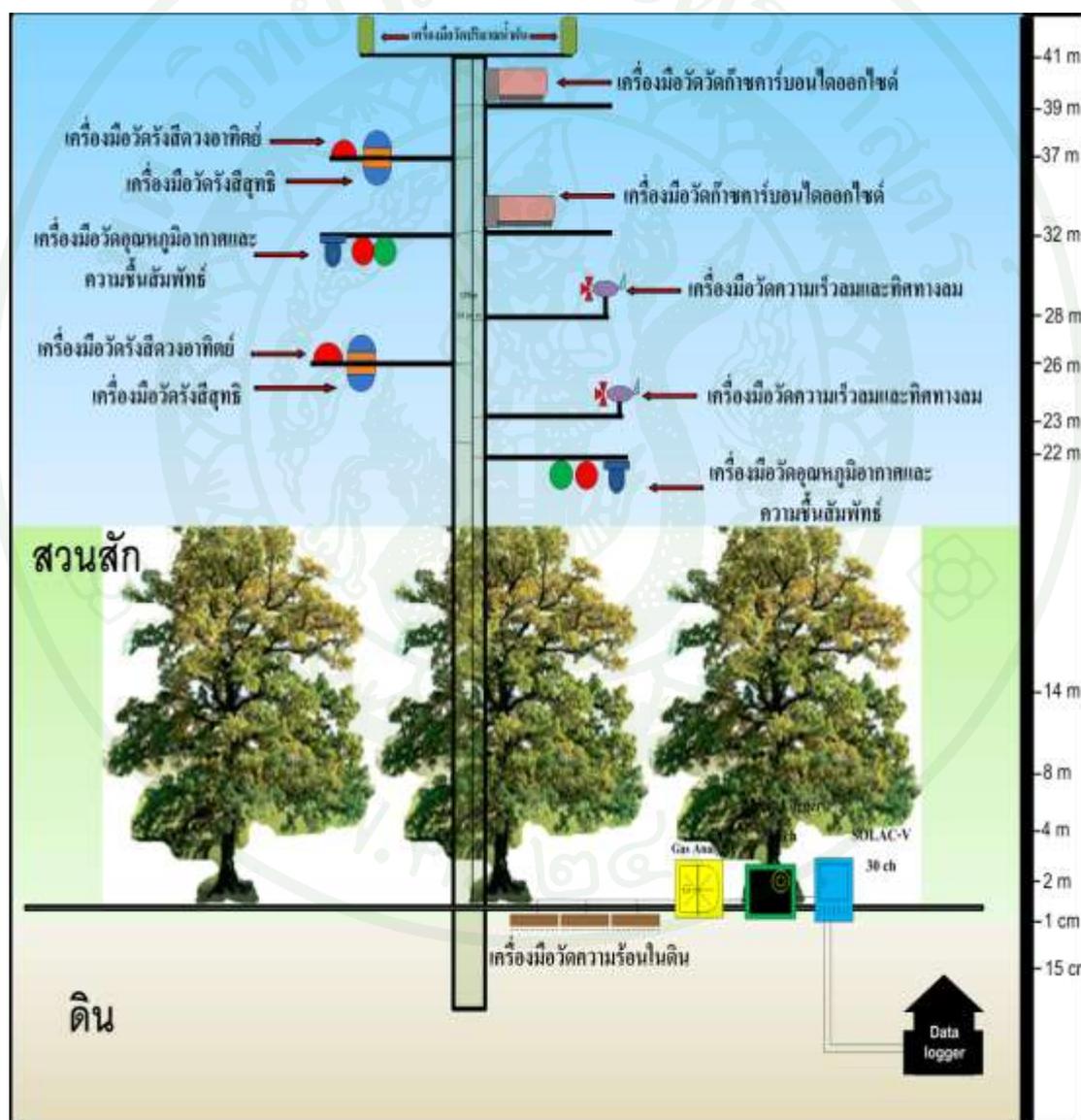
## 2. อุปกรณ์อื่น ๆ

อุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้และเกี่ยวข้องกับการศึกษางานวิจัยครั้งนี้ คือ คอมพิวเตอร์บุคคัล (notebook) ที่ใช้สำหรับคำนวณ และวิเคราะห์ข้อมูล

## วิธีการ

### 1. การติดตั้งสถานีตรวจอากาศแบบอัตโนมัติ

การติดตั้งเครื่องวัดต่าง ๆ ของสถานีตรวจวัดอากาศแบบอัตโนมัติ ซึ่งทำการเก็บข้อมูลแบบต่อเนื่องตลอดปีในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แผนผังรูปแบบการติดตั้งเครื่องวัดอากาศแบบอัตโนมัติ (automatic weather station: AWS) ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

1.1 เครื่องวัดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ชนิด LI-COR รุ่น LI-7500 ผลิตโดยบริษัท EIKO instruments Co., Ltd. ประเทศญี่ปุ่น โดยจุดเก็บตัวอย่างอากาศ (air sampling) เพื่อเป็นตัวแทนกลุ่มอากาศ ที่เกิดจากการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และกลุ่มอากาศในสภาพธรรมชาติ ซึ่งติดตั้งเครื่องที่ 2 ระดับความสูง คือ 32 และ 39 เมตร จากระดับผิวดิน

1.2 เครื่องวัดปริมาณน้ำฝน (8-Inch Rain Gage) โดยทำการติดตั้งเครื่องวัดที่ระดับความสูง 41 เมตร จากระดับผิวดิน

1.3 เครื่องวัดอุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ (thermister and hygrometer) รุ่น MH-020S ผลิตโดยบริษัท EIKO ประเทศญี่ปุ่น โดยทำการติดตั้งเครื่องวัดที่ระดับความสูง 22 และ 32 เมตร จากระดับผิวดิน

1.4 เครื่องวัดอุณหภูมิกระเปาะเปียก และกระเปาะแห้ง (dry and wet bulb thermometer) โดยทำการติดตั้งเครื่องวัดที่ระดับความสูง 22 และ 32 เมตร จากระดับผิวดิน

1.5 เครื่องวัดรังสีดวงอาทิตย์ และรังสีสุทธี (pyrheliometer และ quantum) ผลิตโดยบริษัท LI-COR ประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทำการติดตั้งเครื่องวัดที่ระดับความสูง 26 และ 37 เมตร จากระดับผิวดิน

1.6 เครื่องวัดปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมไว้ในดิน (soil heat flux plate) โดยทำการติดตั้งเครื่องวัดที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร จากระดับผิวดิน จำนวน 3 เครื่อง บริเวณใกล้หอคอย

1.7 เครื่องวัดความเร็ว และเครื่องวัดทิศทางลม (three cup anemometer and propeller anemometer) รุ่น AC750 ผลิตโดยบริษัท Makino anemo ประเทศญี่ปุ่น โดยทำการติดตั้งเครื่องวัดที่ระดับความสูง 23 และ 28 เมตร จากระดับผิวดิน

## 2. การเก็บรวบรวมข้อมูล

### 2.1 ข้อมูลการคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration)

ข้อมูลอุตุนิมวิทยาตรวจวัดแบบอัตโนมัติทุก ๆ 1 นาที และรวมผลทุก ๆ 10 นาที จากสถานีตรวจวัดอากาศ ซึ่งมี 11 ลักษณะอุตุนิมวิทยา (ตารางที่ 1) ข้อมูลดังกล่าวถูกบันทึกลงในเครื่องเก็บรวบรวมข้อมูลอัตโนมัติ (data logger) โดยทำการรวบรวมข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550-2552 และทำการเรียกข้อมูลเข้าสู่คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล เพื่อหาค่าเฉลี่ยทุก ๆ 30 นาที แล้วแปลงข้อมูลเป็นรายวัน โดยแสดงในรูปของกราฟ และตาราง เช่น ค่า Bowen Ratio, heat balance และข้อมูลลักษณะของอากาศอื่น ๆ โดยโปรแกรมสำเร็จรูป (microsoft excel)

ตารางที่ 1 ช่องบันทึกข้อมูล 10 ช่อง สำหรับบันทึกข้อมูลที่เป็นข้อมูลที่ได้ จากการตรวจวัดโดย sensor ตรวจวัดลักษณะอุตุนิมวิทยาที่ต่างกัน

ช่อง	ข้อมูลที่เก็บ	สัญลักษณ์
1	อุณหภูมิอากาศ	$T_{d_{up}}$
2	อุณหภูมิดินที่ระดับความลึก 1 เซนติเมตร	$T_s$
3	ความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศด้านบนกับด้านล่าง	$\Delta T$
4	ความแตกต่างของอุณหภูมิกะเปาะเปียกและกะเปาะแห้งด้านบน	$(T_d - T_w)_{up}$
5	ความแตกต่างของอุณหภูมิกะเปาะแห้งและกะเปาะแห้งด้านล่าง	$(T_d - T_w)_{low}$
6	รังสีสุทธิ	$R_n$
7	ปริมาณความร้อนที่เก็บสะสมในดิน	$G$
8	ทิศทางลม	$W_d$
9	ความเร็วลม	$W_s$
10	รังสีดวงอาทิตย์	$R_s$

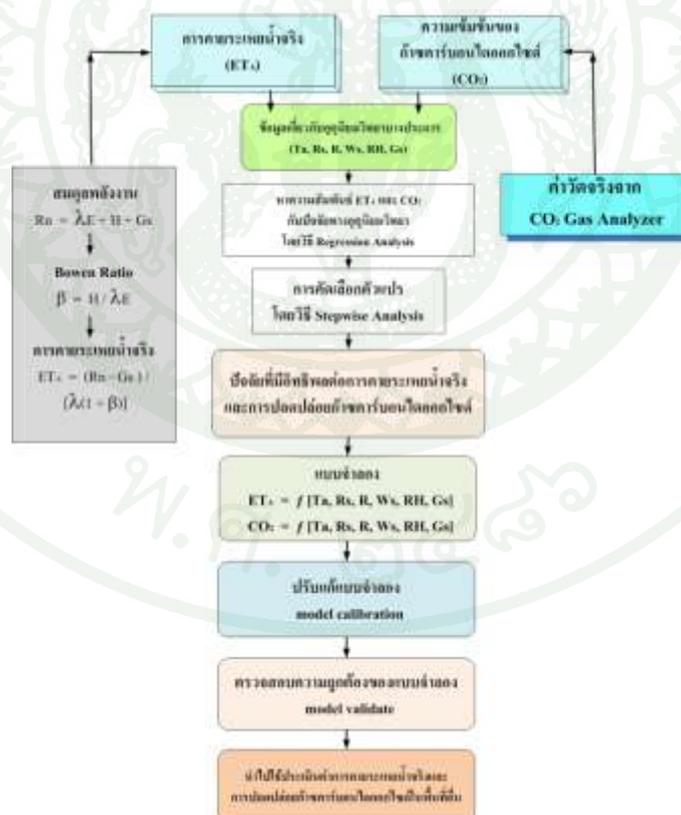
หมายเหตุ: ช่องที่เหลือเป็นช่องว่างเพื่อใช้สำรอง

## 2.2 ข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>)

เครื่องวัดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แบบอัตโนมัติ ติดตั้งที่ 2 ระดับความสูง คือ 32 และ 39 เมตร จากระดับพื้นดิน ซึ่งเครื่องจะทำการวัดการปลดปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ ทุก ๆ 1 นาที และผลรวมทุก 10 นาที ข้อมูลจะถูกบันทึกลงในเครื่องเก็บรวบรวมข้อมูลอัตโนมัติ (meteorological data logger) แล้วนำค่ามาวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แล้วแปลงข้อมูลเป็นรายวัน โดยแสดงในรูปของกราฟ และตาราง

## 3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาบางประการ มีรายละเอียดดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ขั้นตอนการวิเคราะห์ข้อมูลการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาบางประการ

3.1 หาค่าการคายระเหยน้ำจริง จากข้อมูลสถานีตรวจวัดอากาศอัตโนมัติ ด้วยวิธี Bowen Ratio จากสมการดังนี้

3.1.1 สมดุลของพลังงาน จากสมการที่ 20

$$R_n = H + G_s + \lambda E \quad (20)$$

3.1.2 Bowen Ratio จากสมการที่ 21

$$\beta = H / \lambda E = (C_p * P * \Delta T / \Delta z) / (0.622 * \lambda * \Delta e / \Delta z) \quad (21)$$

3.1.3 การคายระเหยน้ำจริง จากสมการที่ 22

$$ET = (R_n - G_s - G_w) / [\lambda (1 + \beta)] \quad (22)$$

โดยที่

$$\lambda = 2500.8 - 2.3668 T_a$$

$$R_n = \text{รังสีสุทธิ (เมกะจูลล์ต่อตารางเมตรต่อวัน)}$$

$$H = \text{ความร้อนในการเผาผลาญอากาศ (เมกะจูลล์ต่อตารางเมตรต่อวัน)}$$

$$G_s = \text{ความร้อนที่เก็บสะสมไว้ในดิน (เมกะจูลล์ต่อตารางเมตรต่อวัน)}$$

$$G_w = \text{ความร้อนที่เก็บสะสมไว้ในน้ำ (เมกะจูลล์ต่อตารางเมตรต่อวัน)}$$

$$\lambda E = \text{ความร้อนในการเผาผลาญน้ำ (เมกะจูลล์ต่อตารางเมตรต่อวัน)}$$

$$\beta = \text{Bowen Ratio}$$

$$C_p = \text{ความร้อนจำเพาะของอากาศ (จูลล์ต่อองศาเซลเซียสต่อกรัม)}$$

$$P = \text{ความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์)}$$

$$(\Delta T / \Delta z) / (\Delta e / \Delta z) = \text{ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันไอน้ำที่ความสูง 2 ระดับ}$$

$$L = \text{ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ (แคลลอรี่ต่อกรัม)}$$

$$T_a = \text{อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)}$$

สัญลักษณ์ต่าง ๆ และหน่วยที่ใช้วัด ได้แสดงรายละเอียดไว้ข้างตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สัญลักษณ์และความหมายของตัวแปรที่ใช้ในการศึกษา

สัญลักษณ์	ความหมาย	หน่วย
$ET_A$	การคายระเหยน้ำจริง	มิลลิเมตร
$R_n$	รังสีสุทธิ	เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน
$H$	ความร้อนในการเผาผลาญอากาศ	เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน
$LE$	ความร้อนในการเผาผลาญน้ำ	เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน
$G_s$	ความร้อนที่เก็บไว้ในดิน	เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน
$G_w$	ความร้อนที่เก็บไว้ในน้ำ	เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน
$B$	Bowen Ratio	-
$C_p$	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ	จูลต่อองศาเซลเซียสต่อกรัม
$P$	ความดันบรรยากาศ	มิลลิบาร์
$T$	อุณหภูมิอากาศ	องศาเซลเซียส
$\Delta T, \Delta e$	ความแตกต่างของอุณหภูมิและความดันไอน้ำที่ความสูง 2 ระดับ	องศาเซลเซียส, มิลลิบาร์
$R_s$	รังสีทั้งหมด	วัตต์ต่อตารางเมตร
$WS$	ความเร็วลม	เมตรต่อวินาที
$RH$	ความชื้นสัมพัทธ์	ร้อยละ
$PF$	ความเครียดน้ำในดิน	-

3.2 หาค่าปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากความแตกต่างของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ระหว่างความสูงที่ต่างกัน 2 ระดับ ซึ่งทำการรวบรวมข้อมูลต่อเนื่องตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 แล้วนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์หาค่าอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ดังวิธีการศึกษาของ (เกษม, 2539; Dingman, 2002) ดังสมการที่ 23

$$F_z(X) = -D_x [dC(X) / dZ] \quad (23)$$

โดยที่  $F_z(X)$  = อัตราการเคลื่อนย้ายของสาร (ความเข้มข้นไหลของสาร)  
 $dC(X) / dZ$  = ความแตกต่างของสาร  
 $D_x$  และ  $dZ$  = ค่าสัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยน ได้แก่ ความหนาแน่นของอากาศ ความกดดันของอากาศ ความเสียดทาน เป็นต้น

3.3 วิเคราะห์ความผันแปรของการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในแต่ละเดือน โดยศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ กับช่วงเวลาในแต่ละเดือน พร้อมทั้งหาความสัมพันธ์ (regression analysis) กับข้อมูลอุณหภูมิอากาศ ( $T_a$ ) รังสีดวงอาทิตย์ ( $R_s$ ) ปริมาณน้ำฝน ( $R$ ) ความเร็วลม ( $WS$ ) ความชื้นสัมพัทธ์ ( $RH$ ) และความร้อนที่สะสมไว้ในดิน ( $G_s$ )

3.4 นำค่าการคายระเหยน้ำจริงและอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยรายวันของแต่ละเดือน โดยมีการสร้างเส้นแนวโน้มของความสัมพันธ์ในรูปแบบต่าง ๆ เพื่อหาสมการความสัมพันธ์ โดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise multiple regression analysis) และพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ของตัวกำหนด ( $R^2$ ) ที่มีค่ามาก และแทนในสมการ โดยที่  $ET_A, CO_2 = f [T_a, R_s, R, W_s, RH, G_s]$  เพื่อหาแบบจำลองการประมาณค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

3.5 ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยนำค่าการคายระเหยน้ำจริงและค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแบบจำลองมาเปรียบเทียบกับค่าการคายระเหยน้ำจริงจากวิธี Bowen Ratio กับค่าที่วัดได้จริงจากเครื่องวัดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  gas analyzer) ในช่วงที่ทำการตรวจวัดเดียวกัน

## ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาการคายระเหยน้ำจริง โดย วิธี Bowen Ratio และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เครื่องวัด CO<sub>2</sub> gas analyzer รวมทั้งการตรวจวัดทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยบริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ.2550 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2552 รวมระยะเวลา 3 ปี แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยในแต่ละเดือนในรอบ 1 ปี ซึ่งสามารถอธิบายผลตามช่วงเวลาต่าง ๆ ได้ดังนี้

### 1. การคายระเหยน้ำจริงและสมดุลพลังงาน

#### 1.1 การคายระเหยน้ำจริง

จากการศึกษาการคายระเหยน้ำจริงโดยวิธี Bowen Ratio ของพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 (ตารางที่ 3) พบว่าการคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ย ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 มิลลิเมตรต่อวัน โดยที่เดือนธันวาคม มีค่าการคายระเหยน้ำจริงต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าการคายระเหยน้ำจริงสูงสุด เท่ากับ 3.9 มิลลิเมตรต่อวัน ในเดือนเมษายน (ภาพที่ 8) ซึ่งสาเหตุที่ค่าการคายระเหยน้ำจริงมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือนธันวาคม เนื่องจากสวนสักมีการทิ้งใบจนหมดจึงทำให้มีการคายน้ำจากใบลดลง และในช่วงนี้ไม่มีฝนเพิ่มปริมาณความชื้น ทำให้ปริมาณน้ำในดินต่ำ ดินแห้ง จึงมีน้ำเพื่อใช้ในการคายระเหยน้อย อีกทั้งยังมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ต่ำเท่ากับ 14.9 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวินาที ส่งผลทำให้อุณหภูมิค่าเท่ากับ 20.2 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำมีน้อย จึงทำให้ค่าการคายระเหยน้ำจริงต่ำ ส่วนค่าการคายระเหยน้ำจริงมีค่าสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน เนื่องจากเริ่มมีปริมาณการตกของฝนที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้มีน้ำเพื่อใช้ในการเติบโตของสักมาก และใบสักเริ่มมีขนาดใบใหญ่ มีการเติบโตของใบอย่างรวดเร็ว การคายน้ำจากใบสักผ่านทางปากใบมีเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือนสูงสุดเท่ากับ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน เมื่อมีความร้อนมากต้นสักจะลดอุณหภูมิที่เกิดจากความร้อนโดยการดูดน้ำจากทางรากผ่านทางลำต้นและคายน้ำออกจากปากใบเพื่อลดอุณหภูมิความร้อนในต้น จึงทำให้ค่าการคายระเหยน้ำจริงสูง ในขณะที่ปัจจัยทางอุตุนิยมหาวิทยาลัยอื่น ๆ คงที่ หากอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อฝนตกมาปะทะกับดินที่มีความร้อนสูง

ตารางที่ 3 การคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

เดือน / ช่วงเวลา	ET <sub>A</sub> (mm/day)	CO <sub>2</sub> (mgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /s)	Rs (MJ/m <sup>2</sup> /day)	Gs (MJ/m <sup>2</sup> /day)	Ta (°C)	RH (%)	WS (m/s)	Rainfall (mm)	
ช่วงแล้งฝน	พ.ย.	3.5	2.3	15.5	0.3	22.4	72.9	1.3	30.3
	ธ.ค.	2.6	1.6	14.9	0.6	20.2	68.5	1.2	0.0
	ม.ค.	3.1	1.8	16.2	0.6	19.2	58.8	1.4	0.0
	ก.พ.	2.9	2.9	16.1	0.7	22.5	45.3	1.4	3.8
	มี.ค.	3.1	2.5	17.2	0.7	24.4	43.8	1.4	26.8
เฉลี่ย	3.1	2.2	16.0	0.6	21.7	57.9	1.3	12.2	
ช่วงหลากฝน	เม.ย.	3.9	3.0	18.0	0.3	29.0	52.0	1.6	42.5
	พ.ค.	3.2	4.3	15.6	0.3	25.7	80.0	1.1	246.0
	มิ.ย.	3.4	4.0	17.5	0.4	27.2	76.1	1.0	163.0
	ก.ค.	3.7	4.5	14.7	0.1	25.3	81.6	1.0	113.5
	ส.ค.	3.8	4.1	15.7	0.2	24.6	81.7	0.9	251.8
	ก.ย.	3.8	4.7	16.0	0.3	24.6	82.7	0.9	275.8
	ต.ค.	3.8	4.3	14.9	0.3	24.7	81.2	1.0	190.0
	เฉลี่ย	3.6	4.1	16.0	0.3	25.9	76.5	1.1	183.2
รวม	-	40.1	-	-	-	-	-	-	
เฉลี่ยทั้งปี	3.4	3.3	16.0	0.4	24.1	68.7	1.2	1343.5	

หมายเหตุ : ET<sub>A</sub> = การคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (มิลลิเมตรต่อวันต่อเดือน)

CO<sub>2</sub> = อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายวันต่อเดือน  
(มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที)

Rs = ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน)

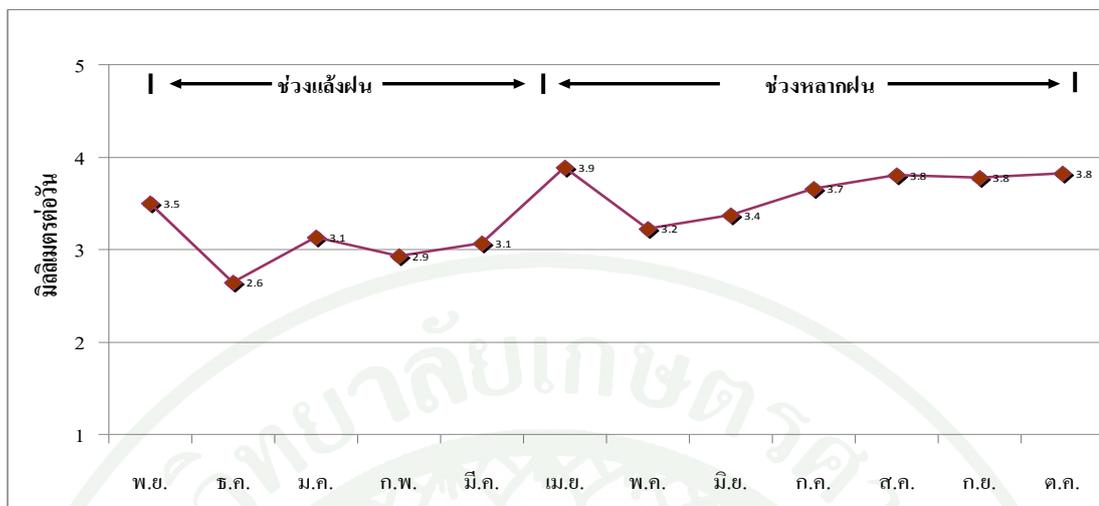
Gs = ความร้อนที่สะสมไว้ในดินเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

Ta = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (องศาเซลเซียส)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายวันต่อเดือน (ร้อยละ)

WS = ความเร็วลมเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (เมตรต่อวินาที)

Rainfall = ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อวัน)



ภาพที่ 8 ความผันแปรของการคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

ทำให้น้ำระเหยได้มากและรวดเร็วกว่าในช่วงที่คืนมีอุณหภูมิต่ำ หรือคืนที่มีความชื้นดินสูง และในช่วงเดือนเมษายนท้องฟ้าโปร่ง มีเมฆปกคลุมน้อย จึงทำให้ค่าการคายระเหยน้ำจริงสูง ประกอบด้วยมีความเร็วลมเฉลี่ยต่อเดือนมากซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.6 เมตรต่อวินาที ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอากาศมาก ส่งผลต่อความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศสูง ซึ่งประจำแก้ว (2550) กล่าวว่าในช่วงเวลาที่มีเมฆปกคลุม ค่าการคายระเหยน้ำจะมีค่าลดลง และกลับเพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีการบดบังของกลุ่มเมฆ จึงทำให้มีค่าการคายระเหยน้ำจริงสูง เช่นเดียวกับการศึกษาของ ปิยพงษ์ (2544) ได้ศึกษาการคายระเหยน้ำในพื้นที่จังหวัดสุโขทัย พบว่าค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน มีค่าเท่ากับ 5.5 มิลลิเมตรต่อวัน และมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยสูงสุดเช่นเดียวกัน และในเดือน พฤษภาคมมีค่าการคายระเหยลดลงเนื่องจากมีปริมาณการตกของฝนที่สูง ท้องฟ้ามีเมฆมาก อุณหภูมิต่ำ ส่งผลให้การคายระเหยน้ำจริงต่ำ

## 1.2. สมดุลพลังงาน

จากการศึกษาสมดุลพลังงานของพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 (ตารางที่ 4) พบว่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 16.1 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 14.7 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ในเดือนกรกฎาคม และสูงสุดเท่ากับ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ในเดือนเมษายน และจากการศึกษาสมดุลพลังงานได้แสดงความผันแปรเฉลี่ยรายเดือนของค่าสมดุลพลังงาน (ภาพที่ 9)

ตารางที่ 4 สมดุลพลังงานรายเฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

เดือน / ช่วงเวลา	Rs (MJ/m <sup>2</sup> /day)	สมดุลพลังงาน (MJ/m <sup>2</sup> /day)				Bowen Ratio	Rainfall (mm)	
		Rn	$\lambda E$	H	Gs			
ช่วงแล้งฝน	พ.ย.	15.5	11.8	8.6	2.9	0.3	0.4	30.3
	ธ.ค.	14.9	11.3	6.5	4.3	0.6	0.7	0.0
	ม.ค.	16.1	10.6	8.0	2.1	0.6	0.3	0.0
	ก.พ.	16.1	10.8	7.5	2.6	0.7	0.5	3.8
	มี.ค.	17.2	11.5	7.9	3.0	0.7	0.4	26.8
เฉลี่ย	15.96	11.2	7.7	2.98	0.58	0.46	12.2	
หลากฝน	เม.ย.	18.0	12.3	10.2	1.8	0.3	0.2	42.5
	พ.ค.	15.6	10.7	8.5	2.0	0.3	0.2	246.0
	มิ.ย.	17.5	12.2	8.9	2.7	0.4	0.3	163.0
	ก.ค.	14.7	11.2	8.9	2.1	0.1	0.2	113.5
	ส.ค.	16.2	11.4	9.3	1.8	0.3	0.2	251.8
	ก.ย.	16.8	11.8	9.3	2.2	0.3	0.2	275.8
	ต.ค.	14.9	11.4	9.3	1.8	0.3	0.2	190.0
	เฉลี่ย	16.2	11.6	9.2	2.1	0.3	0.2	183.2
เฉลี่ยทั้งปี	16.1	11.4	8.6	2.4	0.4	0.3	1343.5	
%ของ Rs	100.0	70.8	-	-	-	-	-	
%ของ Rn	-	100.0	75.1	21.4	3.5	-	-	

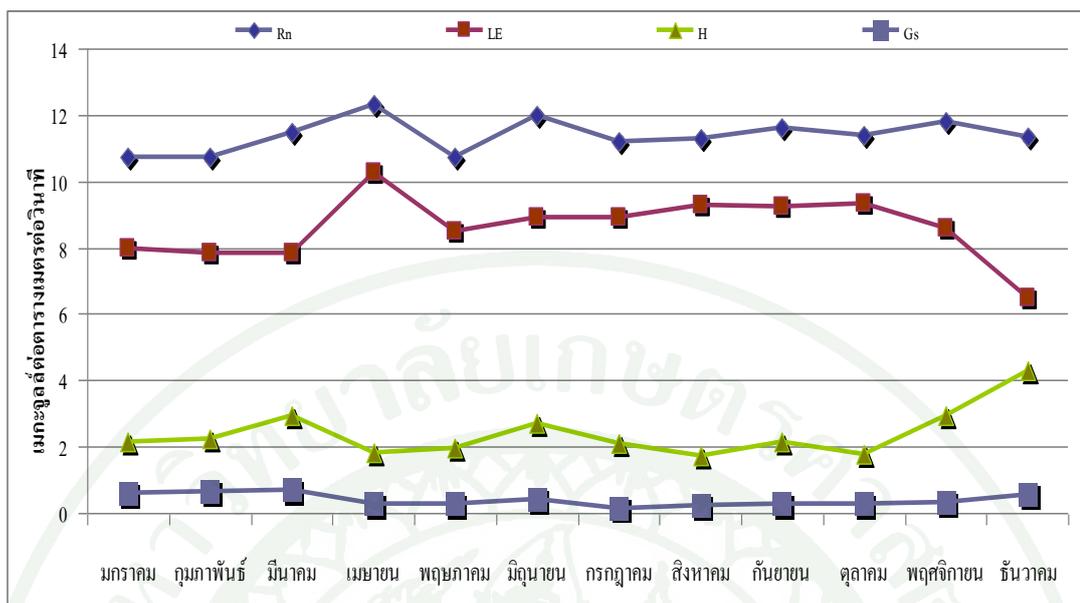
หมายเหตุ : Rs = รังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันต่อเดือน (solar radiation)

Rn = รังสีสุทธิเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (net radiation)

Gs = ความร้อนที่สะสมไว้ในดินเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (heat storage in soil)

$\lambda E$  = ความร้อนที่ใช้ในการเผาผลาญน้ำเฉลี่ยรายเดือน (latent heat of vaporization)

H = ความร้อนที่ใช้ในการเผาผลาญอากาศเฉลี่ยรายเดือน (sensible heat)



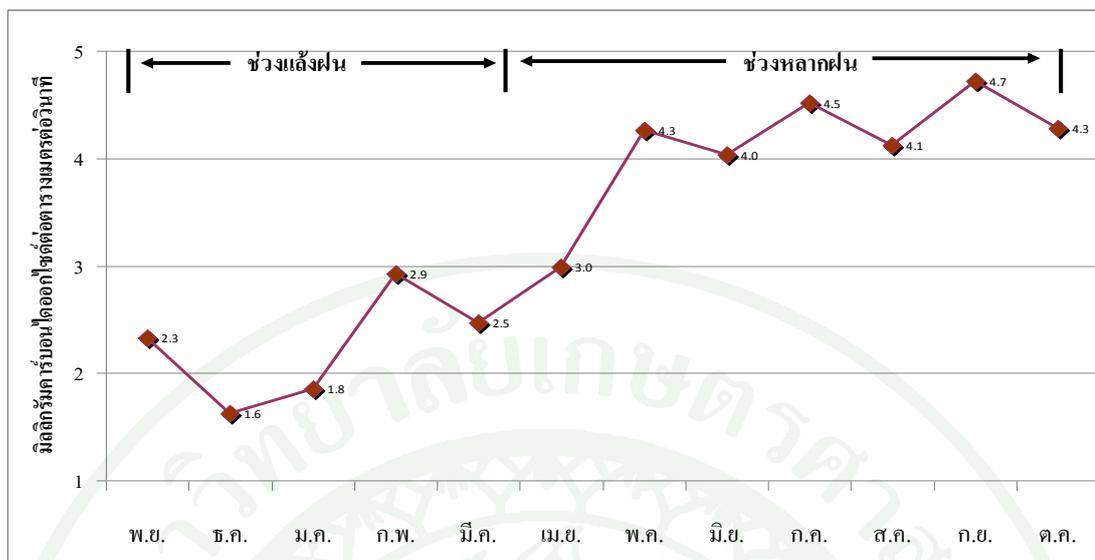
ภาพที่ 9 ความผันแปรเฉลี่ยรายเดือนของค่าสมดุลพลังงาน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

สาเหตุที่ทำให้ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สูงในช่วงนี้ เนื่องจากเป็นช่วงที่มีท้องฟ้าโปร่ง ปริมาณเมฆที่ปกคลุมน้อย จึงทำให้ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pukngam (2001) ได้ศึกษาสมดุลพลังงาน ในความแตกต่างของชนิดป่าในภาคเหนือระหว่างปี พ.ศ. 2540 ถึงพ.ศ. 2542 พบว่าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีค่าอยู่ระหว่าง 14.7 ถึง 18 เมกะจูลต่อตารางเมตร ต่อวัน ส่วนสาเหตุที่ทำให้ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีค่าต่ำสุดในเดือนกรกฎาคม เนื่องจากเป็นช่วงที่มี แนวพายุพัดเข้าสู่ประเทศไทยจึงทำให้มีจำนวนวันที่ฝนตกสูงมีเมฆปกคลุมมาก ส่งผลให้มีปริมาณ รังสีดวงอาทิตย์ส่งผ่านลงมาได้น้อย ส่วนปริมาณรังสีสุทธิ (net radiation) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.4 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน หรือคิดเป็นร้อยละ 70.8 ของปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ โดยปริมาณรังสี สุทธิที่ใช้ในการเผาผลาญน้ำ ( $\lambda E$ ) ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการเผาผลาญอากาศ (H) ความ ร้อนที่เก็บสะสมไว้ในดิน (Gs) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.6, 2.4 และ 0.4 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวินาที หรือคิดเป็นร้อยละ 75.1, 21.4 และ 3.5 ตามลำดับ โดยที่ปริมาณรังสีสุทธิมีค่าต่ำสุดในช่วงเดือน มกราคม ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.6 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน เนื่องจากมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ต่ำ ส่งผลทำให้มีปริมาณรังสีสุทธิมีค่าต่ำตามไปด้วย ส่วนปริมาณรังสีสุทธิมีค่าสูงสุดในช่วงเดือน เมษายน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.3 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน เนื่องจากในช่วงเดือนนี้เป็นช่วงที่เริ่มมี ปริมาณน้ำฝนเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 42.5 มิลลิเมตร และเริ่มเข้าสู่ช่วงหลากฝน ส่งผลให้ พลังงานความร้อนที่ใช้ในการเผาผลาญน้ำสูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 10.2 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน จึง

ทำให้ปริมาณรังสีสุทธิสูงในช่วงนี้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Pukngam (2001) พบว่าปริมาณรังสีสุทธิมีค่าต่ำสุดในเดือนมกราคม และปียพงษ์ (2544) ได้ศึกษาสมมูลพลังงานในพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินหลายรูปแบบในจังหวัดสุโขทัย พบว่าปริมาณรังสีสุทธิสูงสุดในช่วงเดือนเมษายน ถึงเดือนมิถุนายน และต่ำสุดในช่วงเดือนธันวาคม ถึงเดือนกุมภาพันธ์

## 2. การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพื้นที่สวนสัก อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2552 (ตารางที่ 4) พบว่าค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.3 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยมีค่าของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยต่ำสุดในเดือนธันวาคม เท่ากับ 1.6 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที และค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 4.7 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาทีในเดือนกันยายน (ภาพที่ 10) และสาเหตุที่ทำให้ค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าต่ำสุด ในช่วงเดือนธันวาคม เนื่องจากสวนสักมีการทิ้งใบหมด ทำให้ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากใบ ซึ่งเป็นการปลดปล่อยในส่วนที่มากกว่าส่วนอื่นของต้นสัก การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงนี้ส่วนมากเกิดขึ้นจากกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในดิน และการหายใจของลำต้น กิ่ง และรากพืชเท่านั้น อีกทั้งในช่วงเดือนธันวาคมไม่มีฝนตก เพราะเริ่มเข้าสู่ช่วงแล้งฝน จึงทำให้ดินแห้ง ปริมาณน้ำที่สะสมไว้ในดินต่ำ จึงทำให้ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดินจึงสูง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.6 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวินาที มีผลต่อการเจริญเติบโตของสัก ทำให้สักชดอการเติบโต กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ลดน้อยลง ส่งผลทำให้การปลดปล่อยก๊าซหรือการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดต่ำลงในช่วงนี้ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของพิมลรัตน์ (2544) ที่พบว่าเมื่อไม่มีฝนตกมาเพิ่มความชื้นในดินลดลงโดยการระเหยหรือถูกพืชและสิ่งมีชีวิตในดินนำน้ำที่อยู่ในดินไปใช้ จึงทำให้ดินมีช่องว่างที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความเข้มข้นและความดันก๊าซต่าง ๆ ในดินลดลง และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินสู่บรรยากาศลดลงด้วย ส่วนค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าสูงสุดในเดือนกันยายน และในช่วงหลากฝน เนื่องจากในช่วงนี้ใบของสวนสักมีขนาดใหญ่มีการเจริญเติบโตของใบเต็มที่ ใบสักมีความสมบูรณ์ แข็งแรง และมีปริมาณปากใบมาก ส่งผลให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูง รวมทั้งการหายใจของพืชที่เกิดจากใบ ลำต้น กิ่ง และรากพืชสูง อีกทั้งกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์มีมากขึ้น



ภาพที่ 10 ความผันแปรของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

เนื่องจากในช่วงเดือนกันยายนเป็นช่วงหลากฝนซึ่งมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายเดือนสูงสุดเท่ากับ 275.8 มิลลิเมตร จึงทำให้มีปริมาณน้ำที่สะสมไว้ในดินสูง ซึ่งถ้ามีปริมาณน้ำหรือความชื้นในดินสูง ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์มีเพิ่มมากขึ้น รากพืชสามารถหายใจได้มากขึ้น จุลินทรีย์ในดินสามารถย่อยสลายใบสักรที่ร่วงหล่นในช่วงแล้งฝนได้ดี ส่งผลให้มีค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงในช่วงนี้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ลำเรียง (2547) พบว่าเมื่อความชื้นในดินเพิ่มขึ้น จุลินทรีย์ในดินสามารถทำกิจกรรมได้มากขึ้นมีการหายใจมากขึ้น พืชมีการเติบโตมากขึ้น รากพืชมีการหายใจมากขึ้น ทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินสู่บรรยากาศมากขึ้นด้วยรวมทั้งใบสักรที่ร่วงหล่นเกิดการย่อยสลายขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน และช่วงฤดูฝน เศษซากพืชต่าง ๆ ที่ร่วงหล่นลงมาในช่วงฤดูแล้ง เมื่อได้รับความชื้นที่เหมาะสมจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์และทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศอย่างรวดเร็ว และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ส่วนใหญ่แล้วเกิดขึ้นในส่วนของดิน ซึ่งเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายอินทรีย์วัตถุ และการหายใจของรากพืช คิดเป็นร้อยละ 75 ที่เหลือเป็นในส่วนของ ลำต้น กิ่ง และใบ คิดเป็นร้อยละ 25 ของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Bazzaz and Williams (1991) พบว่าพื้นที่ที่มีอินทรีย์วัตถุมาก จะมีอัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดิน จำนวนจุลินทรีย์ในดิน และกิจกรรมของจุลินทรีย์ในดิน มากกว่าพื้นที่ที่มีอินทรีย์วัตถุน้อยกว่า และผลการศึกษาของ

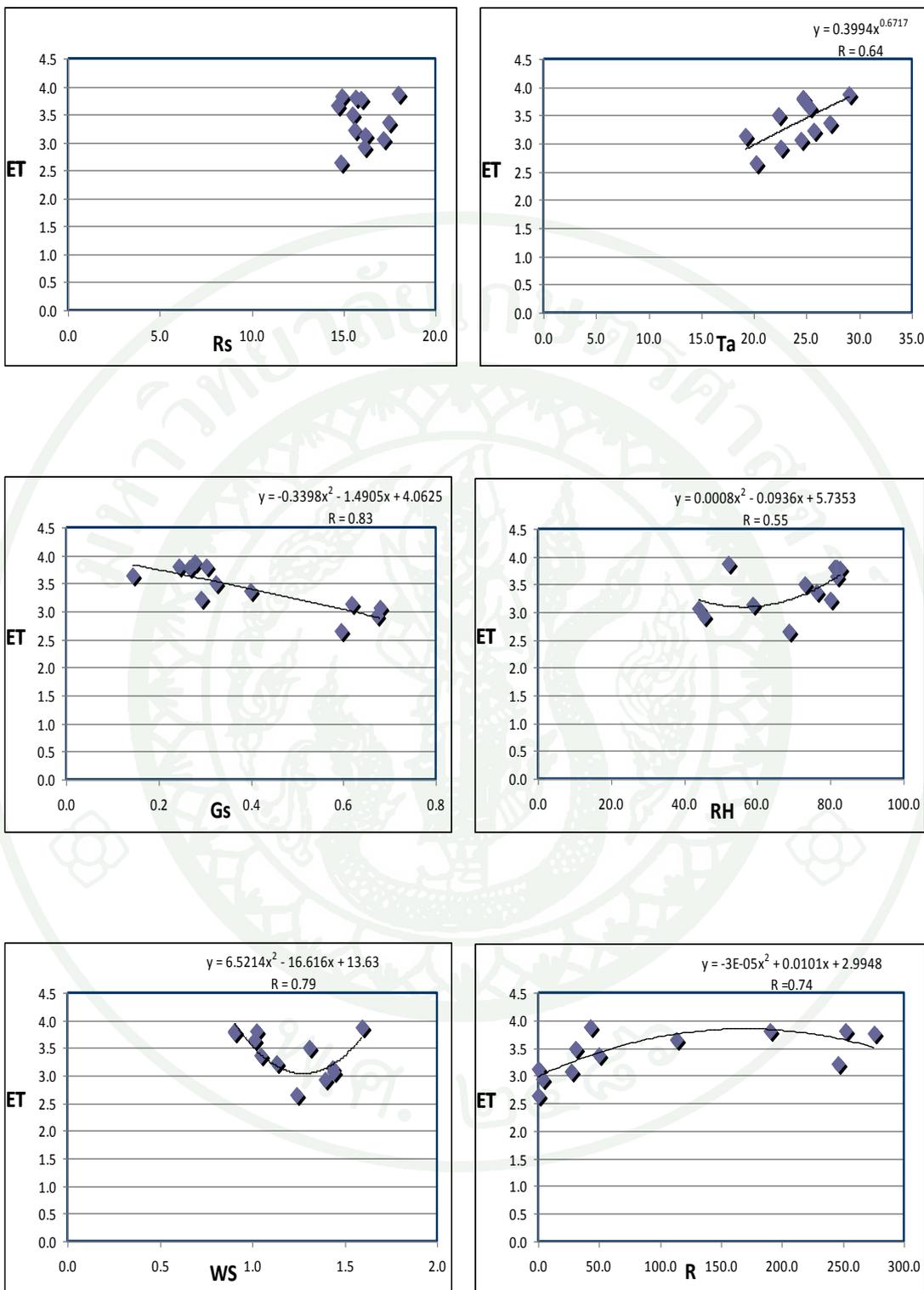
Bonan (1995) ซึ่งพบว่าพื้นที่ผิวใบมีบทบาทสำคัญต่อการดูดซับรังสีจากดวงอาทิตย์เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสง โดยส่งผลทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนก๊าซ จึงทำให้มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก รวมทั้งมีปริมาณน้ำฝนที่มาก จึงทำให้รากพืชหายใจได้มากขึ้นรวมทั้งจุลินทรีย์สามารถย่อยสลายใบที่ร่วงหล่นในช่วงแล้งฝนได้ดี

### 3. ความสัมพันธ์ของค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

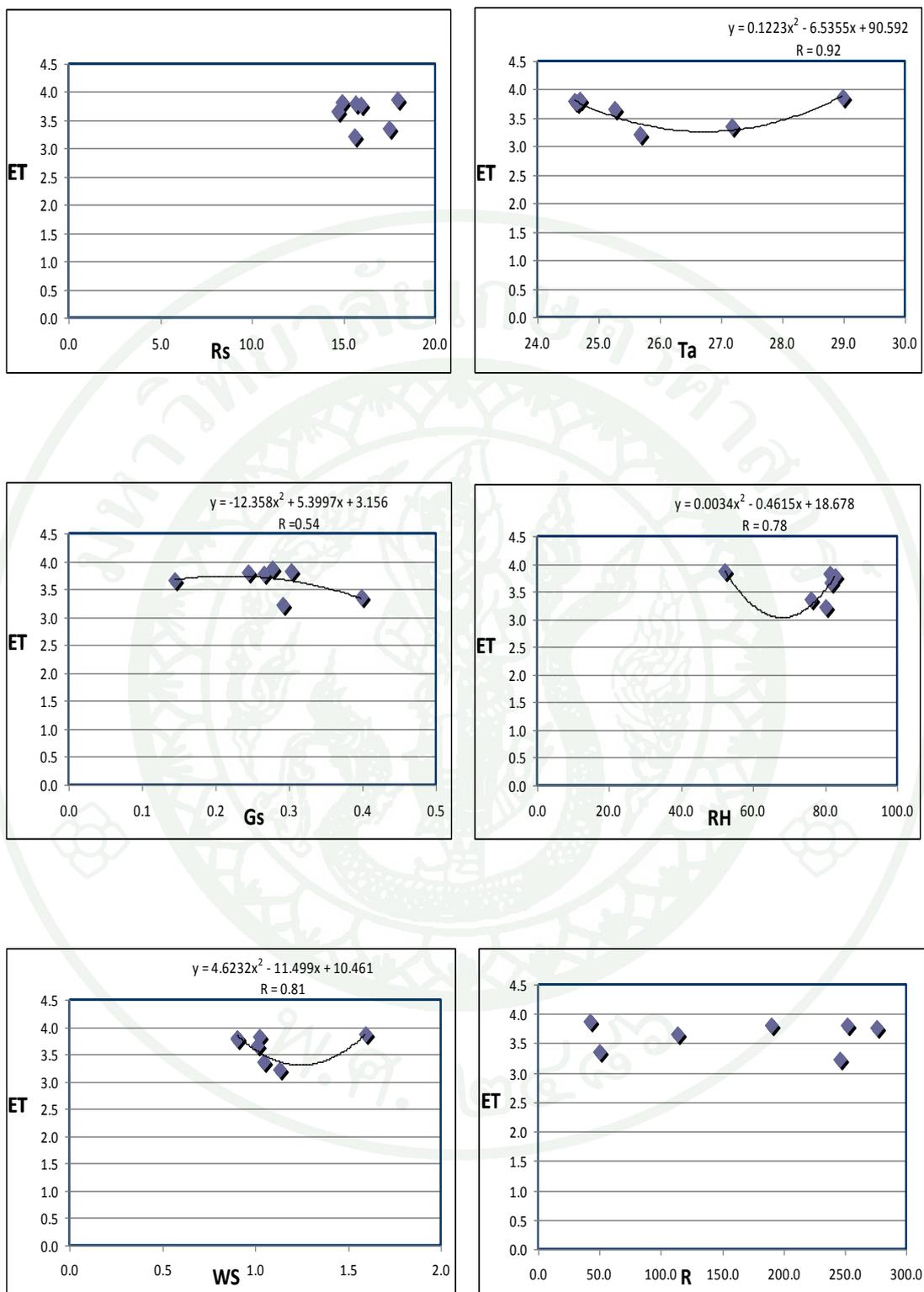
#### 3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างการคายระเหยน้ำจริงกับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

จากการศึกษาการคายระเหยน้ำจริงและปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และ ปริมาณน้ำฝน และเมื่อนำค่าการคายระเหยน้ำจริง มาหาความสัมพันธ์ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในรูปแบบสมการความสัมพันธ์แบบต่าง ๆ โดยแบ่งออกเป็นช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คือ ช่วงรายปี (annual) ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม (ภาพที่ 11) ช่วงหลากฝน (wet period) ตั้งแต่เดือนเมษายน ถึงเดือนตุลาคม (ภาพที่ 12) และช่วงแล้งฝน (dry period) ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนมีนาคม (ภาพที่ 13) ได้ผลดังนี้

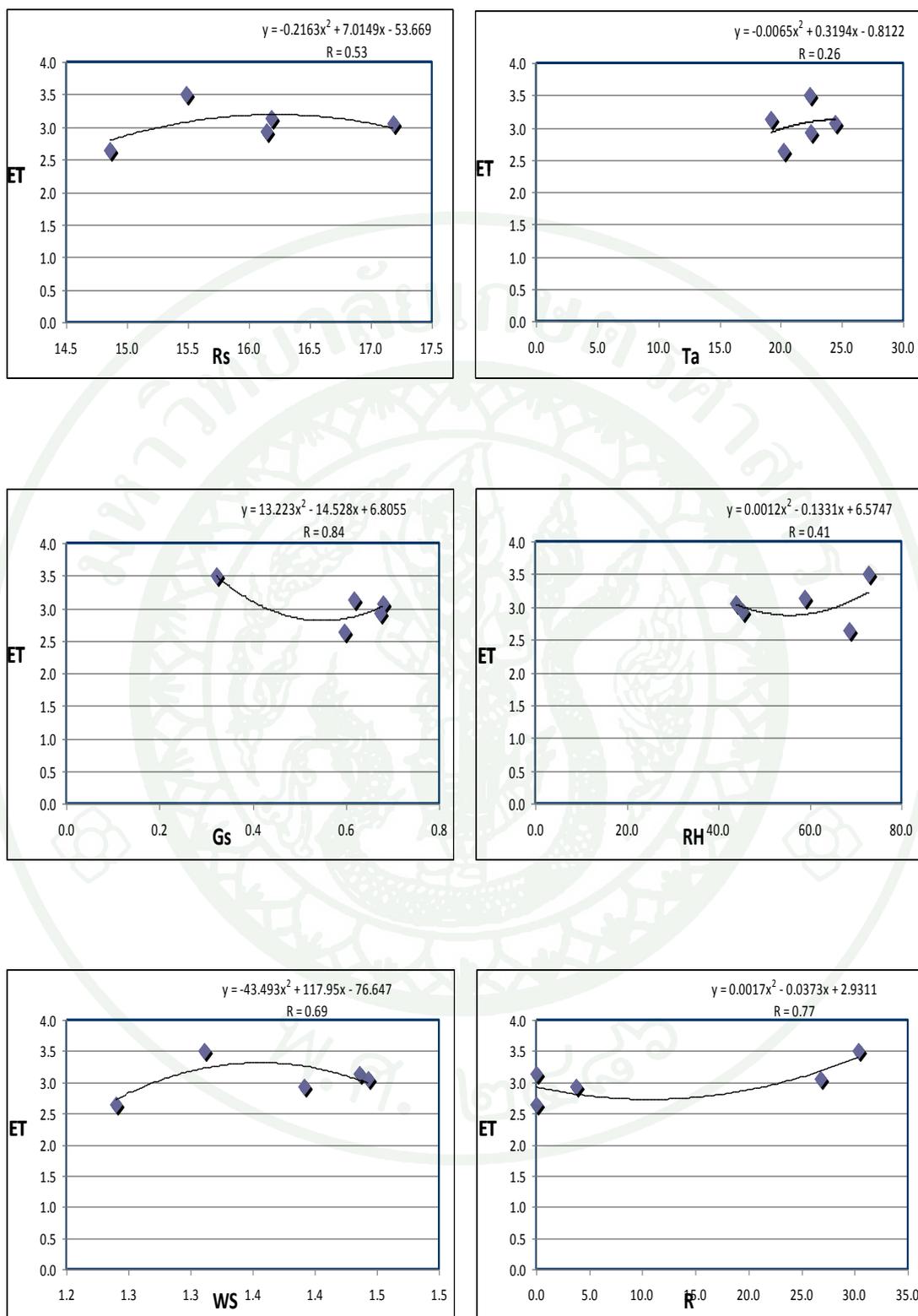
จากการศึกษาความสัมพันธ์ในช่วงรายปี พบว่าปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับค่าการคายระเหยน้ำจริงมากที่สุดคือ ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดิน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.83 เนื่องมาจากความร้อนที่สะสมไว้ในดินมีผลต่อกิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ รวมถึงการเจริญเติบโตของสั๊ก ซึ่งส่งผลต่อการเปิด-ปิดปากใบ ซึ่งมีผลต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนปัจจัยที่มีความสัมพันธ์รองลงมาคือ ความเร็วลม ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิอากาศ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.79, 0.74, 0.64 และ 0.55 ตามลำดับ โดยที่ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำจริงน้อยที่สุดคือ รังสีดวงอาทิตย์ เนื่องมาจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว อาทิเช่น มีเมฆปกคลุมมาก ท้องฟ้าปิด จะทำให้รังสีดวงอาทิตย์ต่ำ โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.26 หรือไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ



ภาพที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างการคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ในช่วงรายปี บริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



ภาพที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างการคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ในช่วงหลาก  
ฝน บริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างการคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ในช่วง  
แล้งฝนบริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของข้อมูลการคายระเหยน้ำจริงและข้อมูลอุณหภูมิอากาศในช่วงกลางวัน พบว่าปัจจัยทางอุณหภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำจริงมากที่สุดคือ อุณหภูมิอากาศ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.92 เนื่องจากในช่วงนี้อุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงมาก โดยที่อุณหภูมิอากาศมีผลโดยตรงต่อค่าการคายระเหยน้ำจริง ซึ่งถ้ามีอุณหภูมิสูง ส่งผลให้เกิดการคายระเหยน้ำจริงสูง และในทางตรงข้าม ถ้ามีอุณหภูมิต่ำ การคายระเหยน้ำจริงก็ต่ำด้วย อีกทั้งอุณหภูมิอากาศยังมีผลต่อการเปิดปิดของปากใบ ซึ่งถ้ามีอุณหภูมิสูงมากส่งผลให้ปากใบปิดเพื่อลดการคายน้ำ โดยที่วิชา (2535) กล่าวว่าอุณหภูมิจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นในช่วงตอนเช้า และอุณหภูมิจะสูงสุดในช่วงบ่าย แล้วค่อยลดลงเมื่อตอนเย็น ซึ่งมีผลต่อการเปิด-ปิดของปากใบพืช ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับช่วงฤดูกาล และสภาพอากาศด้วย ส่วนปัจจัยที่มีความสัมพันธ์รองลงมาคือ ความเร็วลม ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ และ ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดิน ซึ่งมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.81, 0.78 และ 0.54 ตามลำดับ โดยที่ปัจจัยทางอุณหภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำน้อยที่สุดคือ รังสีดวงอาทิตย์ และ ปริมาณน้ำฝน เนื่องจากในช่วงกลางวันปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ และ ปริมาณน้ำฝนค่อนข้างสูง ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละเดือน มีความเปลี่ยนแปลงน้อย จึงทำให้ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ และ ปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์กับค่าการคายระเหยน้ำจริงน้อยมาก โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.31 และ 0.01 หรือไม่มีความสัมพันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

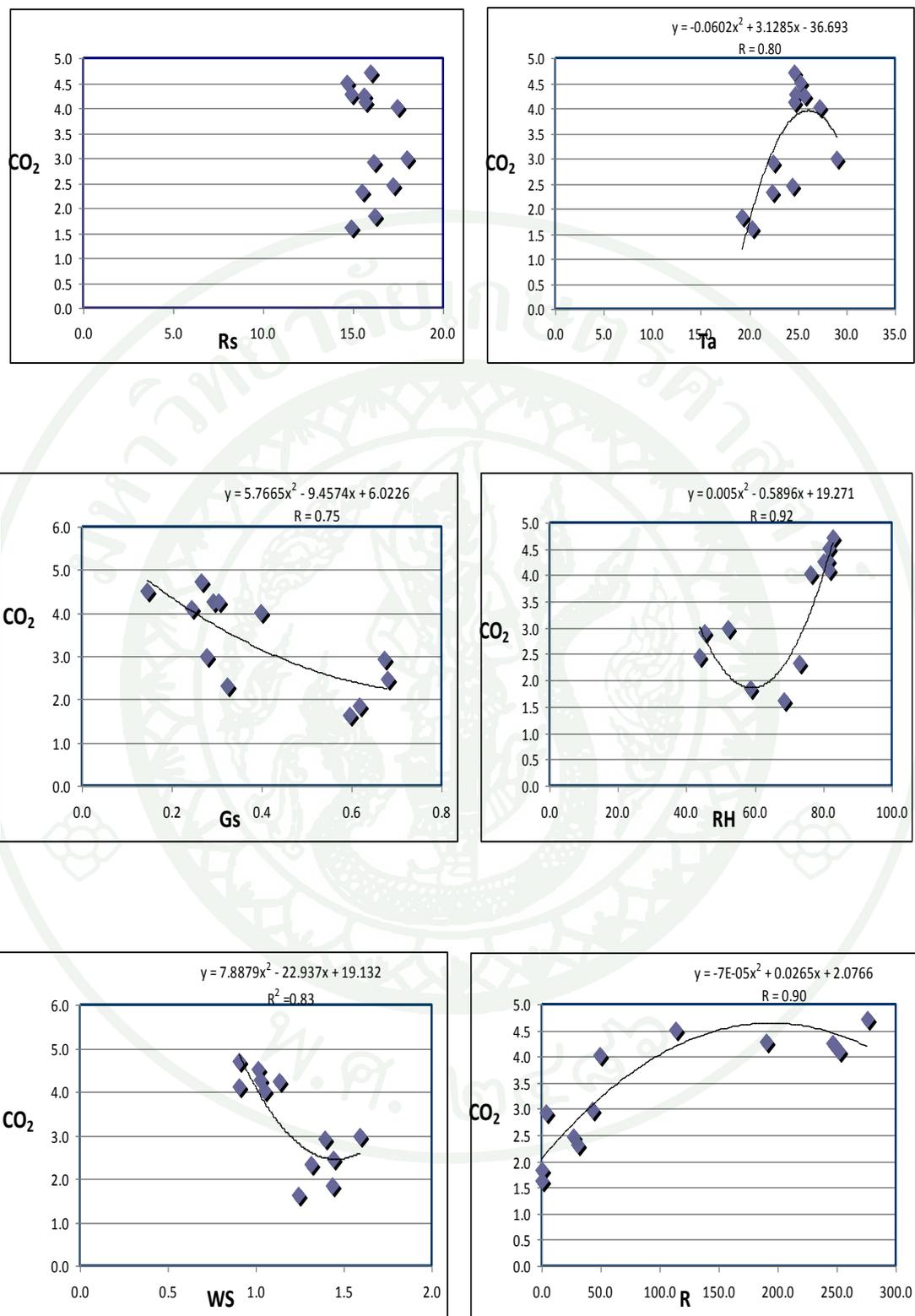
ส่วนในช่วงแล้งฝน พบว่าปัจจัยทางอุณหภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำจริงมากที่สุดคือ ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดิน เนื่องจากในช่วงแล้งฝนมีปริมาณน้ำฝนน้อย จึงทำให้ดินแห้ง ความชื้นในดินต่ำ และสักรมีการทิ้งใบซึ่งทำให้อิทธิพลของปัจจัยอื่นไม่มีผล แต่ค่าการคายระเหยน้ำจริงมีผลกับค่าความชื้นในดิน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.84 และปัจจัยที่มีความสัมพันธ์รองลงมาคือ ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม รังสีดวงอาทิตย์ และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.77, 0.69, 0.53 และ 0.41 ตามลำดับ โดยที่ปัจจัยทางอุณหภูมิอากาศที่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำจริงน้อยที่สุดคือ อุณหภูมิอากาศ เนื่องจากในช่วงแล้งฝน ใบสักรมีการทิ้งใบเพื่อลดการคายน้ำ ซึ่งอุณหภูมิอากาศมีอิทธิพลต่อการเปิด-ปิดของปากใบ อิทธิพลที่เกิดจากการคายน้ำของใบลดลง และในช่วงนี้ส่วนมากจะเกิดจากการระเหยน้ำจากผิวหน้าดินเป็นหลัก จึงทำให้การคายระเหยน้ำจริงในช่วงแล้งฝนมีค่าน้อย ซึ่งอาจส่งผลทำให้อุณหภูมิอากาศมีความสัมพันธ์กับค่าการคายระเหยน้ำน้อย โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.26 หรือไม่มีความสัมพันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

### 3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

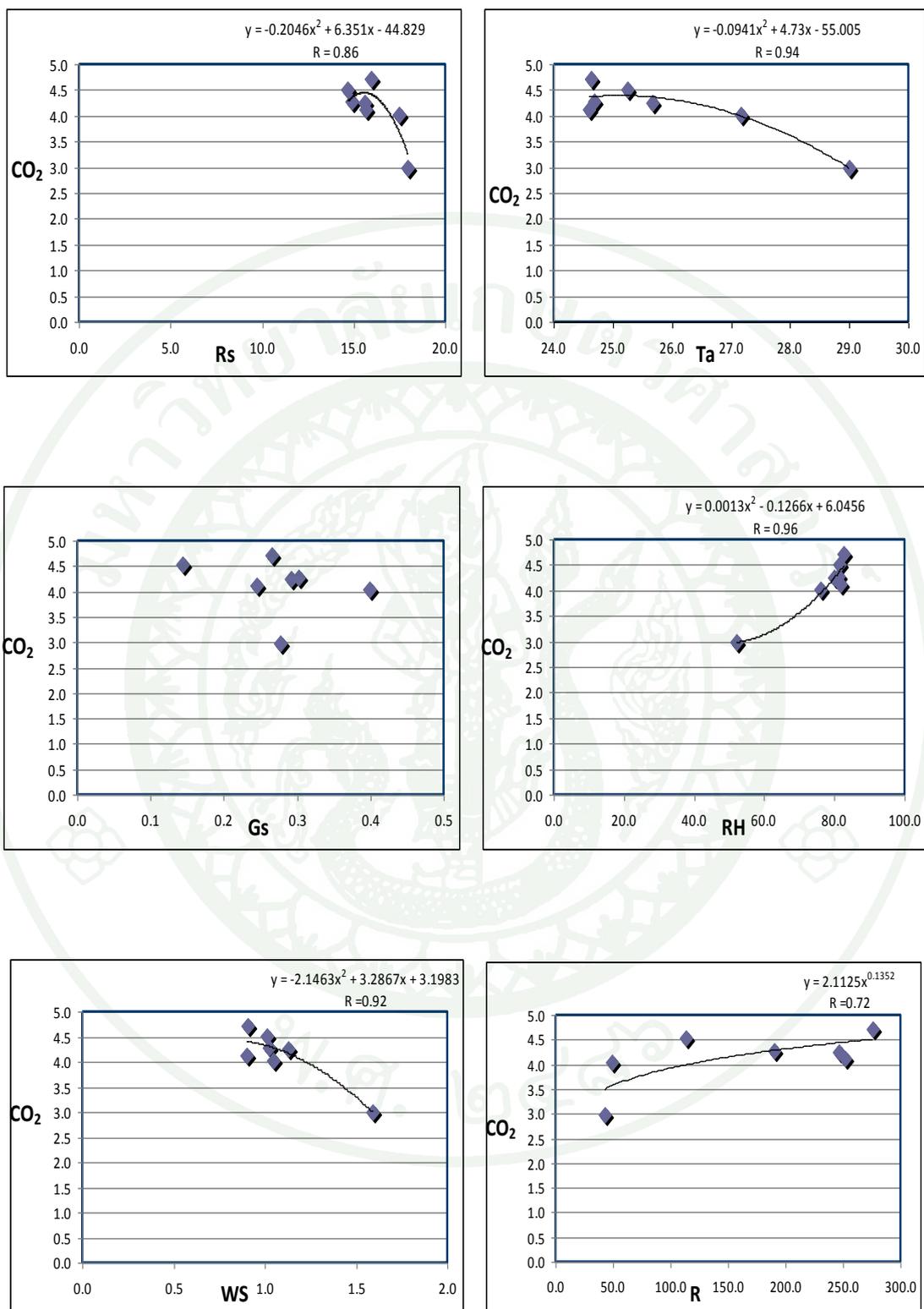
จากการศึกษาการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และปริมาณน้ำฝน และเมื่อนำค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาหาความสัมพันธ์ร่วมกับข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในรูปแบบสมการความสัมพันธ์แบบต่าง ๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ในแต่ละช่วงว่าปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาใดมีความสัมพันธ์กับค่าการคายระเหยน้ำจริง และค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบ่งออกเป็นช่วงเวลาที่แตกต่างกันคือ ช่วงรายปี (annual) ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม (ภาพที่ 14) ช่วงหลากฝน (wet period) ตั้งแต่เดือนเมษายน ถึงเดือนตุลาคม (ภาพที่ 15) และช่วงแล้งฝน (dry period) ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนมีนาคม (ภาพที่ 16) สามารถอธิบายได้ดังนี้

จากการศึกษาในช่วงรายปี พบว่าปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ ความชื้นสัมพัทธ์ เนื่องจากปริมาณความชื้นสัมพัทธ์มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา และมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 43.8 - 82.7 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.92 รองลงมาคือ ปริมาณน้ำฝน ความเร็วลม อุณหภูมิอากาศ และปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดิน ซึ่งมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.90, 0.83, 0.80 และ 0.75 ตามลำดับ โดยที่ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำน้อยที่สุดคือ รังสีดวงอาทิตย์ เนื่องจากปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ปัจจัยอื่นมีความสัมพันธ์กับค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่า โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.16 หรือไม่มีความสัมพันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

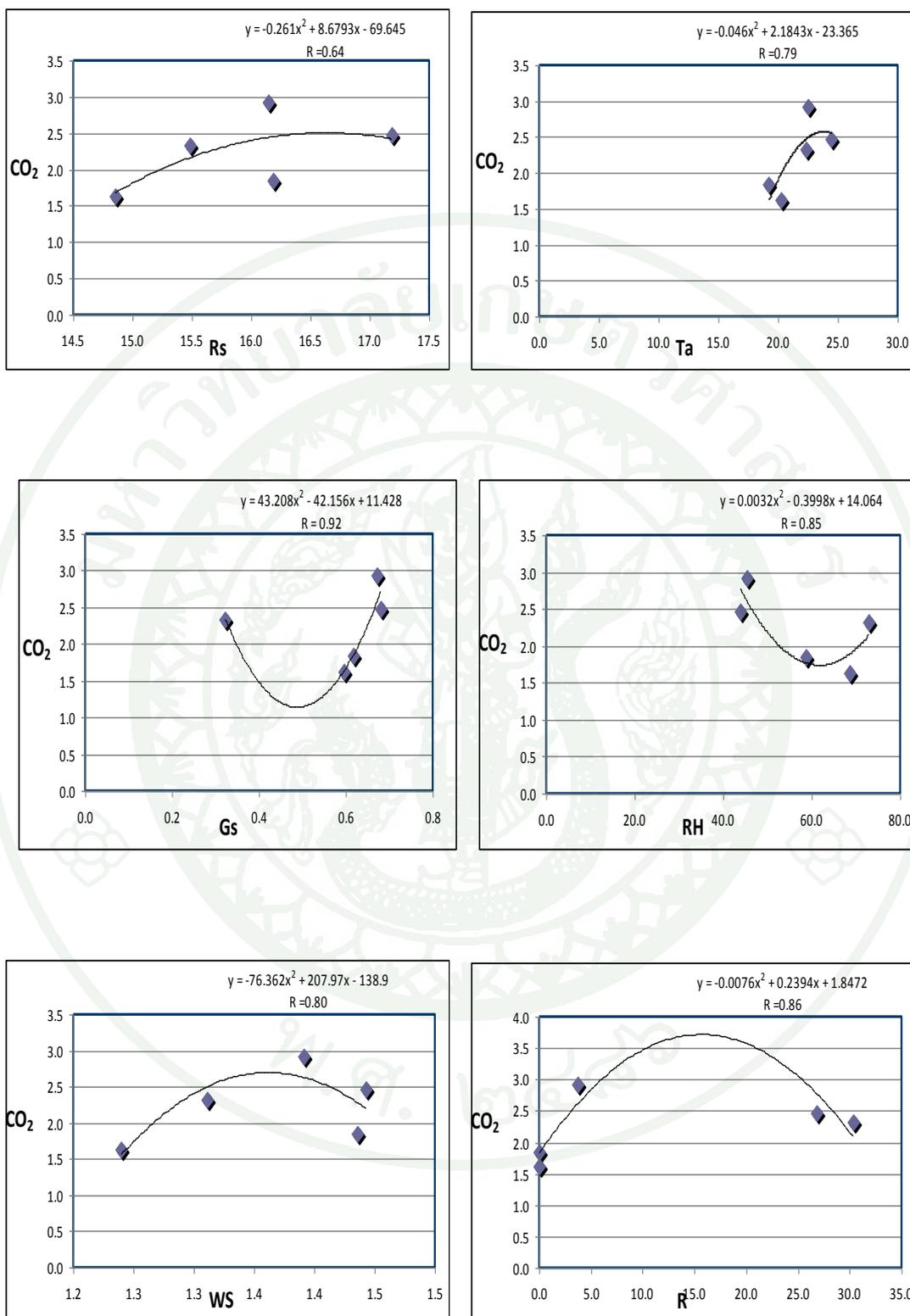
ซึ่งจากการศึกษาความสัมพันธ์ของข้อมูลการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในช่วงหลากฝน พบว่าปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ ความชื้นสัมพัทธ์ เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์จะแปรผันตรงกับปริมาณน้ำในอากาศ ซึ่งถ้ามีปริมาณน้ำในอากาศมาก ความชื้นก็มากตามไปด้วย ซึ่งมีอิทธิพลต่อการเปิด-ปิดปากใบ มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และจากการศึกษาของ Salisbury and Ross (1992) พบว่าน้ำเป็นองค์ประกอบของเซลล์ และน้ำมีผลต่อการเปิด-ปิดของปากใบพืช การขาดน้ำทำให้ปากใบปิด เพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำ



ภาพที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในช่วงรายปี บริเวณที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในช่วงหลากฝน บริเวณที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในช่วงแล้งฝน บริเวณที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

ซึ่งมีผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.96 ส่วนปัจจัยที่มีความสัมพันธ์รองลงมาคือ อุณหภูมิอากาศ ความเร็วลม รังสีดวงอาทิตย์ และปริมาณน้ำฝน ซึ่งมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.94, 0.92, 0.86 และ 0.72 ตามลำดับ โดยที่ปัจจัยทาง อุตุณิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้อยที่สุด คือ ปริมาณ ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน เนื่องจากเป็นช่วงหลากฝน ปริมาณน้ำฝนมาก ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่ สะสมไว้ในดินสูง ทำให้ความร้อนที่สะสมไว้ในดินมีน้อย และมีการเปลี่ยนแปลงของความร้อนใน ดินน้อย จึงทำให้ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดิน มีความสัมพันธ์กับการปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์น้อย โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.31 หรือไม่มีความสัมพันธ์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ส่วนความสัมพันธ์ในช่วงแล้งฝน พบว่าปัจจัยทางอุตุณิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับ การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากที่สุดคือ ปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดิน โดยมีค่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.92 เนื่องจากปริมาณความร้อนที่สะสมไว้ในดินมีการ เปลี่ยนแปลงค่อนข้างมากเนื่องจากในช่วงนี้มีปริมาณการตกของฝนน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.2 มิลลิเมตร ส่งผลให้ดินแห้ง รวมทั้งสักมีการทิ้งใบในช่วงนี้ โดยที่การปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ส่วนมากในช่วงนี้เกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ อธิพลของปัจจัยอื่น เช่น ใบ ลำต้น จึงเกิดการสังเคราะห์แสง การหายใจลดลง ซึ่งส่งผลต่อค่าการ ปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของสมบูรณ์ (2547) พบว่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของพืชเกิดขึ้นได้ทั้งทางปากใบ (stomatal transpiration) ทางผิวของลำต้น (cuticle transpiration) และทางรอยแตกตามลำต้น (lenticel transpiration) แต่การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สำคัญและมีปริมาณมากที่สุด คือ ทาง ปากใบ ส่วนปัจจัยที่มีความสัมพันธ์รองลงมาคือ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม อุณหภูมิอากาศ รังสี ดวงอาทิตย์ และปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.86, 0.85, 0.80 และ 0.79 ตามลำดับ โดย ที่ปัจจัยทางอุตุณิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำน้อยที่สุด คือ ปริมาณน้ำฝน เนื่องจากในช่วงแล้งฝนมีปริมาณน้ำฝนน้อยจึงทำให้มีความสัมพันธ์กับค่าการคายระเหยน้ำจริงต่ำ โดยมีค่า  $r$  เท่ากับ 0.64

#### 4. แบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ปัจจัยทางด้านอุตุนิยมวิทยาบางประการ

##### 4.1 แบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริง

จากการศึกษาการคายระเหยน้ำจริงร่วมกับการศึกษาข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ได้แก่ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และปริมาณน้ำฝน ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2550 ถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2552 แล้วนำค่าเฉลี่ยรายเดือนที่ได้หาสมการความสัมพันธ์ และทำคัดเลือกตัวแปร โดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (stepwise multiple regression analysis) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริง ซึ่งได้แบ่งแบบจำลองออกเป็นช่วงเวลา คือ ช่วงรายปี (annual) ตั้งแต่เดือนมกราคม ถึงเดือนธันวาคม ช่วงหลากฝน (wet period) ตั้งแต่เดือนเมษายน ถึงเดือนตุลาคม และช่วงแล้งฝน (dry period) ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนมีนาคม ได้ผลดังตารางที่ 5 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 5 แบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริง ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

ช่วงเวลา	แบบจำลอง	ค่าสถิติ		
		r	F-Ratio	MSE
ช่วงรายปี	$ET_A = 0.761 + 0.095Ta + 0.005R$	0.56**	73.08	0.21
ช่วงหลากฝน	$ET_A = 1.542 + 0.131Rs$	0.63**	121.40	0.15
ช่วงแล้งฝน	$ET_A = \text{non significance}$			

หมายเหตุ : \*\* = significance ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

$ET_A$  = การคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (มิลลิเมตรต่อวัน)

$Ta$  = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายวันต่อเดือน (องศาเซลเซียส)

$R$  = ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร)

$Rs$  = ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันต่อเดือน (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวินาที)

แบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงในช่วงรายปี พบว่าอุณหภูมิอากาศ และ ปริมาณน้ำฝนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการคายระเหยน้ำจริง ซึ่งหากมีอุณหภูมิอากาศสูง มีผล ทำให้ค่าการคายระเหยน้ำจริงสูงตามไปด้วย และหากมีปริมาณน้ำฝนมากมีผลทำให้ค่าการคายระเหยน้ำจริงสูงมากเช่นเดียวกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.56 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

แบบจำลองที่ใช้ในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงในช่วงหลากฝน แสดงให้เห็นว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการคายระเหยน้ำจริง ซึ่งถ้าปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มาก ส่งผลให้ค่าการคายระเหยน้ำจริงมากด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.63 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ส่วนแบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงในช่วงแล้งฝน พบว่าปัจจัยทาง อุตุนิยมิวิทยาไม่มีอิทธิพลกับการคายระเหยน้ำจริง เนื่องจากการคายระเหยน้ำจริงมักเกิดขึ้นที่ใบ เป็นส่วนใหญ่ อีกทั้งในช่วงนี้ปริมาณน้ำฝนที่ตกมีน้อย ต้นสั๊กมีการทิ้งใบ จึงทำให้ปัจจัยทาง อุตุนิยมิวิทยามีความสัมพันธ์กับค่าการคายระเหยน้ำจริงน้อย

จากแบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้ใน 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงรายปี ช่วงหลากฝน และช่วงแล้งฝน พบว่าแบบจำลองในช่วงหลากฝน มีความถูกต้องมากที่สุด โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) สูงที่สุด เท่ากับ 0.63 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

#### 4.2 แบบจำลองการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร่วมกับการศึกษาข้อมูลทาง อุตุนิยมิวิทยา ได้แก่ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน อุณหภูมิอากาศ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และปริมาณน้ำฝน ตั้งแต่เดือนมกราคม ปี พ.ศ. 2550 ถึงเดือนธันวาคม ปี พ.ศ. 2552 แล้วนำค่าเฉลี่ยรายเดือนที่ได้มาหาสมการความสัมพันธ์ และทำคัดเลือกตัวแปรโดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณแบบเป็นขั้นตอน (Stepwise multiple regression analysis) เพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งได้แบ่งแบบจำลองออกเป็นช่วงเวลา คือ ช่วงรายปี (annual) ช่วงหลากฝน (wet period) ตั้งแต่เดือนเมษายน ถึงเดือนตุลาคม และช่วงแล้งฝน (dry period) ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนมีนาคม ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แบบจำลองการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่สวนสัก  
จังหวัดลำปาง

ช่วงเวลา	แบบจำลอง	ค่าสถิติ		
		r	F-Ratio	MSE
ช่วงรายปี	$CO_2 = -1.272+0.007R+0.161Ta$	0.91**	20.09	0.28
ช่วงหลากฝน	$CO_2 = 0.507+0.047RH$	0.95**	43.97	0.37
ช่วงแล้งฝน	$CO_2 = -2.170+0.202Ta$	0.49**	47.18	0.71

หมายเหตุ : \*\* = significance ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

$CO_2$  = อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายเดือน  
(มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที)

Ta = อุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือน (องศาเซลเซียส)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือน (เปอร์เซ็นต์)

R = ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตร)

แบบจำลองการประเมินค่าปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงรายปี พบว่า ปริมาณน้ำฝน และอุณหภูมิอากาศ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถ้าปริมาณน้ำฝนมาก ส่งผลทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่มาก เนื่องจากมีปริมาณน้ำเพื่อใช้ในการเติบโตสูง และถ้าอุณหภูมิสูง มีผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงตามไปด้วย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.91 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

จากการศึกษาแบบจำลองการประเมินค่าปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงหลากฝน พบว่าปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถ้าความชื้นสัมพัทธ์มาก ส่งผลทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากตามไปด้วย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.95 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99

ส่วนแบบจำลองการประเมินค่าปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วงแล้งฝน พบว่าอุณหภูมิอากาศ เป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถ้าอุณหภูมิสูง ส่งผลต่อการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงตามไปด้วย โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.49

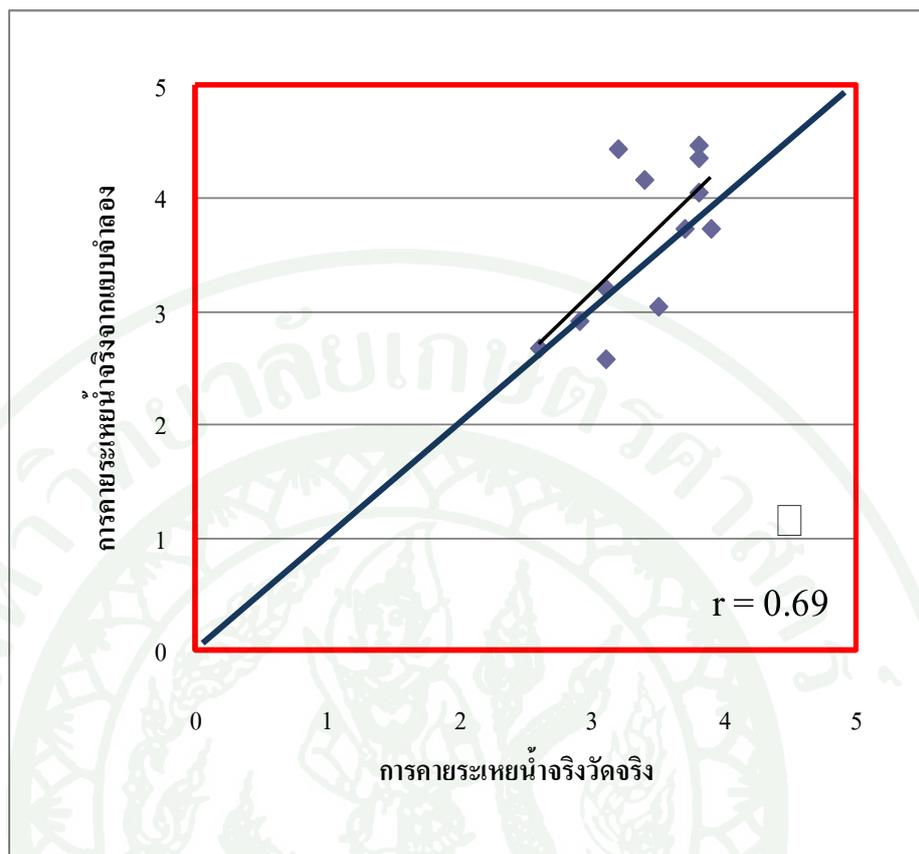
จากแบบจำลองการประเมินค่าปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้ใน 3 ช่วงเวลา คือ ช่วงรายปี ช่วงหลากฝน และช่วงแล้งฝน พบว่าแบบจำลองในช่วงหลากฝน มีความถูกต้องมาก โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) สูงที่สุด เท่ากับ 0.95 ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 99 และแบบจำลองในแต่ละช่วงเวลามีตัวแปรที่แตกต่าง เนื่องจากสภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา จึงทำให้ข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ส่งผลทำให้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในแต่ละช่วงของแบบจำลองมีความแตกต่างกัน

## 5. การสอบเทียบแบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการศึกษาการคายระเหยน้ำจริงโดยวิธี Bowen Ratio และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากเครื่องวัดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2550 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.2552 ได้สร้างแบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยมีการสอบเทียบแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง ได้ผลการศึกษาดังนี้

### 5.1 แบบจำลองการคายระเหยน้ำจริง

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงโดยการนำค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากการตรวจวัดจริงในพื้นที่ มาหาความสัมพันธ์กับค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงจากแบบจำลอง (ภาพที่ 17) พบว่าค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กันค่อนข้างสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.69 และค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากสวนสักมีการทิ้งใบและมีความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ซึ่ง ในช่วงที่ทำการศึกษามีแนวพายุกัดผ่านประเทศไทย



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการคายระเหยน้ำจริงจากการวัดจริงกับค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากแบบจำลอง

จากนั้นทำการหาสมการเพื่อใช้ในการสอบเทียบค่าที่ได้จากแบบจำลอง โดยการนำค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ตรวจวัดได้กับค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากแบบจำลอง มาหาความสัมพันธ์ แล้วแทนค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากการตรวจวัดจริงในแต่ละเดือนในสมการ (สมการที่ 24) ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากการสอบเทียบ ดังตารางที่ 7

$$ET_{\text{mea}} = 1.1422(ET_{\text{est}}) - 0.2684 \quad (24)$$

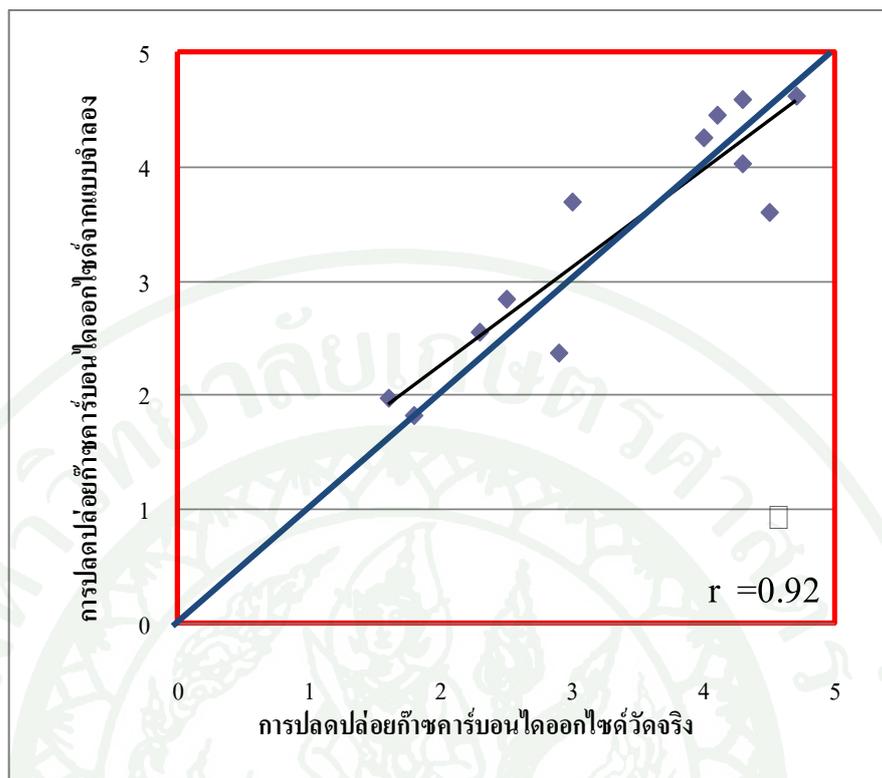
โดยที่  $ET_{\text{mea}}$  = การคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากการวัดจริงในแต่ละเดือน  
 $ET_{\text{est}}$  = การคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากการสอบเทียบในแต่ละเดือน

ตารางที่ 7 การคายระเหยน้ำจริง การคายระเหยน้ำจริงที่ได้จากแบบจำลอง และการคายระเหยน้ำจริงจากการสอบเทียบ

ช่วงเวลา/ เดือน	การคายระเหยน้ำจริง	การคายระเหยน้ำจริง จากแบบจำลอง	การคายระเหยน้ำจริง จากการสอบเทียบ	
ช่วงแล้งฝน	พ.ย.	3.5	3.0	3.7
	ธ.ค.	2.6	2.7	2.7
	ม.ค.	3.1	2.6	3.3
	ก.พ.	2.9	2.9	3.0
	มี.ค.	3.1	3.2	3.3
เฉลี่ย	3.1	2.9	3.2	
ช่วงหลากฝน	เม.ย.	3.9	3.7	4.2
	พ.ค.	3.2	4.4	3.4
	มิ.ย.	3.4	4.2	3.6
	ก.ค.	3.7	3.7	4.0
	ส.ค.	3.8	4.4	4.1
	ก.ย.	3.8	4.5	4.1
	ต.ค.	3.8	4.1	4.1
เฉลี่ย	3.6	4.1	3.9	
เฉลี่ยทั้งปี	3.4	3.6	3.6	

## 5.2 แบบจำลองการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการนำค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการตรวจวัดจริงในพื้นที่ มาศึกษาความสัมพันธ์กับค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการประเมินค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากแบบจำลอง (ภาพที่ 18) พบว่าค่าที่ได้มีความสัมพันธ์กันสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $r$ ) เท่ากับ 0.92 และค่าที่ได้มีค่าสูงกว่าความเป็นจริงเนื่องจากสวนสักมีการทิ้งใบและมีความเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ ซึ่ง ในช่วงที่ทำการศึกษามีแนวายุพัดผ่านประเทศไทย



ภาพที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการวัดจริงกับค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแบบจำลอง

จากนั้นทำการหาสมการระหว่างค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรวจวัดจริงได้กับค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากแบบจำลอง เพื่อใช้หาค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสอบเทียบ แล้วแทนค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการตรวจวัดจริงในแต่ละเดือนในสมการ (สมการที่ 25) ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสอบเทียบ ดังตารางที่ 8

$$\text{CO}_2\text{mea} = 0.8565(\text{CO}_2\text{est}) + 0.5448 \quad (25)$$

โดยที่  $\text{CO}_2\text{mea}$  = การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการวัดจริง  
ในแต่ละเดือน  
 $\text{CO}_2\text{est}$  = การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการสอบ  
เทียบในแต่ละเดือน

ตารางที่ 8 การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จริง การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
ที่ได้จากแบบจำลอง และการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการสอบเทียบ

ช่วงเวลา/ เดือน	การปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์	การปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ จากแบบจำลอง	การปลดปล่อยก๊าซ คาร์บอนไดออกไซด์ จากการสอบเทียบ	
ช่วงแล้งฝน	พ.ย.	2.3	2.5	2.5
	ธ.ค.	1.6	2.0	1.9
	ม.ค.	1.8	1.8	2.1
	ก.พ.	2.9	2.4	3.0
	มี.ค.	2.5	2.8	2.7
เฉลี่ย	2.2	2.3	2.4	
ช่วงหลากฝน	เม.ย.	3	3.7	3.1
	พ.ค.	4.3	4.6	4.2
	มิ.ย.	4	4.2	4.0
	ก.ค.	4.5	3.6	4.4
	ส.ค.	4.1	4.5	4.1
	ก.ย.	4.7	4.6	4.6
	ต.ค.	4.3	4.0	4.2
เฉลี่ย	4.1	4.2	4.1	
เฉลี่ยทั้งปี	3.3	3.4	3.4	

## สรุปและข้อเสนอแนะ

### สรุป

การประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามวิทยาบางประการ ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง ได้ผลการศึกษารูปได้ ดังนี้

1. การคายระเหยน้ำจริง ( $ET_A$ ) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.4 มิลลิเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายวันต่อเดือนอยู่ระหว่าง 2.6 - 3.9 มิลลิเมตรต่อวัน โดยในเดือนธันวาคมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตรต่อวัน และค่าสูงสุดเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตรต่อวัน ในเดือนเดือนเมษายน

2. ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ มีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 16.1 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายวันต่อเดือนอยู่ระหว่าง 14.7 - 18 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน โดยมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 14.7 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ในเดือนกรกฎาคม และสูงสุดเท่ากับ 18 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ในเดือนเมษายน ส่วนปริมาณรังสีสุทธิ (net radiation) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.4 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน คิดเป็นร้อยละ 70.8 ของปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายเดือนอยู่ระหว่าง 10.6 - 12.3 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน โดยที่ปริมาณรังสีสุทธิมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 10.6 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ในเดือนมกราคม และค่าสูงสุดเท่ากับ 12.3 เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ในเดือนเมษายน

3. การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$  emission) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.3 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที ซึ่งมีค่าเฉลี่ยรายเดือนอยู่ระหว่าง 1.6 - 4.7 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที โดยในเดือนธันวาคมมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 1.6 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที และค่าสูงสุดเท่ากับ 4.7 มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที ในเดือนกันยายน

4. แบบจำลองเพื่อใช้ในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ช่วงรายปี  $ET_A = 0.761 + 0.095Ta + 0.05R$ ,  $CO_2 = -1.272 + 0.007R + 0.161Ta$  ช่วงหลากฝน  $ET_A = 1.542 + 0.131R_s$ ,  $CO_2 = 0.507 + 0.047RH$  และช่วงแล้งฝน  $ET_A = \text{non significance}$ ,  $CO_2 = -2.170 + 0.202Ta$  ตามลำดับ

5. การสอบเทียบและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหย น้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากข้อมูลอุตุนิมวิทยาในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง พบว่าค่าที่ได้จากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กันสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) เท่ากับ 0.69 และ 0.92

### ข้อเสนอแนะ

การประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ ข้อมูลอุตุนิมวิทยาบางประการ ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง มีข้อเสนอแนะจากการศึกษาในครั้งนี้และเพื่อการศึกษาในครั้งต่อไปได้ ดังนี้

#### 1. ข้อเสนอแนะที่ได้จากผลการศึกษา

1.1 จากผลการศึกษาการคายระเหยน้ำจริง พบว่าค่าการคายระเหยน้ำจริงมีค่าน้อยอาจ เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดเกิดชำรุดในบางช่วงเวลาของการทำการศึกษา ซึ่งมาจากสาเหตุของสภาพอากาศ พายุ ฟ้าผ่า ฯลฯ ซึ่งไม่สามารถทำการเก็บข้อมูลในช่วงเวลานั้นได้ เป็นเหตุให้ข้อมูลขาดหายและไม่ต่อเนื่อง

1.2 จากผลการศึกษาแบบจำลองเพื่อใช้ในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงในช่วงแล้งฝน พบว่าปัจจัยทางอุตุนิมวิทยาไม่มีความสัมพันธ์กับการคายระเหยน้ำจริง ทั้งนี้อาจเนื่องจากในช่วงแล้งฝน ต้นสักมีการทิ้งใบ ซึ่งเกิดการระเหยของน้ำในช่วงนี้มากกว่าการคายน้ำ และการคายระเหยน้ำจริงของสักขึ้นอยู่กับปัจจัยทางด้านสรีรวิทยาของพืชมากกว่าปัจจัยทางด้านอุตุนิมวิทยา เช่น การเปิดปิดของปากใบพืช การสังเคราะห์แสง ดัชนีพื้นที่ผิวใบ ลักษณะ โครงสร้างของเรือนยอด เป็นต้น

## 2. ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยครั้งต่อไป

2.1 เพื่อที่จะให้แบบจำลองการประเมินค่าการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ควรมีการศึกษาปัจจัยทางด้านสรีรวิทยาของพืชร่วมด้วย เช่น การเปิดปิดของปากใบพืช การสังเคราะห์แสง ดัชนีพื้นที่ผิวใบ ลักษณะ โครงสร้างของเรือนยอด เป็นต้น

2.2 ควรมีการศึกษาในพื้นที่สวนสักในช่วงอายุที่แตกต่างกันร่วมด้วย เพื่อใช้เป็นข้อมูลพื้นฐาน อ้างอิง หรือเปรียบเทียบกับค่าที่ทำการศึกษาได้ในครั้งนี้ ทั้งนี้เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการพยากรณ์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน สิ่งปกคลุมดินต่อกระบวนการคายระเหยน้ำและสมดุลของน้ำ รวมทั้งการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการวางแผนการจัดการลุ่มน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

## เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กองภูมิอากาศ. 2553. ข้อมูลลักษณะอากาศในคาบ 38 ปี (พ.ศ. 2515 - พ.ศ. 2553) จังหวัดลำปาง. กรมอุตุนิยมวิทยา, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาดิน. 2527. รายงานการสำรวจดินจังหวัดลำปาง. กรมพัฒนาที่ดิน, กรุงเทพฯ.

เกษม จันทร์แก้ว. 2515. อุทกวิทยาลุ่มน้ำ. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2539. หลักการจัดการลุ่มน้ำ. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. 2536. คู่มือปฏิบัติการปฐพีวิทยาเบื้องต้นโดยใช้ระบบ โสตทัศนูปกรณ์. โรงพิมพ์ชวนพิมพ์ พระนคร, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2541. ปฐพีวิทยาเบื้องต้น. ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ประคำแก้ว บุญธรรม. 2550. การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา ด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ปิยพงษ์ ทองดินออก. 2544. การประเมินค่าการคายระเหยน้ำโดยวิธี Bowen Ratio ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลายรูปแบบของจังหวัดสุโขทัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พิมลรัตน์ พุทธิมิถินประทีป. 2544. อิทธิพลของฤดูกาลต่อองค์ประกอบและอัตราการแพร่ระเหยของก๊าซจากหลุมฝังกลบมูลฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงษ์ศักดิ์ สหุณาฟู. 2538. **ผลผลิตและการหมุนเวียนของธาตุอาหารในระบบนิเวศป่าไม้**. ภาควิชา  
วนวัฒนวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นาฏสุดา ภูมิจันทร์. 2547. การศึกษาแหล่งกักเก็บก๊าซเรือนกระจกจากภาคป่าไม้ และกิจกรรมการ  
เปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินภายใต้พิธีสารเกียวโต, น.1-16. ใน รายงานการประชุม  
การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้ : ป่าไม้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพ  
ภูมิอากาศ. 16 - 17 สิงหาคม 2547, โรงแรมมารวย การ์เด้น. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า  
และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.

ศุริยะ สถาพร. 2547. **ความผันแปรตามฤดูกาลของดัชนีพื้นที่เรือนยอด และอัตราการสังเคราะห์  
แสงของพรรณไม้เด่นในป่าดิบแล้ง จังหวัดนครราชสีมา และป่าเบญจพรรณ จังหวัด  
กาญจนบุรี**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ลดาวัลย์ พวงจิตร. 2546. สมดุลคาร์บอน น. 165 - 192. ใน การประยุกต์ใช้ข้อมูลวิจัยการ  
เปลี่ยนแปลงของป่าเขตร้อนและผลกระทบเพื่อการจัดการระบบนิเวศป่าเขตร้อนแบบ  
ผสมผสาน. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. กรุงเทพฯ.

ลดาวัลย์ อธิพันธุ์อำไพ. 2533. การสังเคราะห์แสงและการหายใจของกล้าไม้กระถินเทพา. **วารสาร  
วนศาสตร์**. 9(1): 1 - 11.

ลดาวัลย์ พวงจิตร, สนิท อักษรแก้ว และวัลยา คงผล. 2540. การสังเคราะห์แสงและการตอบสนอง  
ต่อปัจจัยแสงของพรรณไม้ป่าชายเลนบางชนิด. รายงานการสัมมนา ระบบนิเวศป่าชายเลน  
แห่งชาติ ครั้งที่ 10 “การจัดการและการอนุรักษ์ป่าชายเลน : บทเรียนในรอบ 20 ปี”.  
สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ, กรุงเทพฯ.

วิชา นิยม. 2535. **อุทกวิทยาป่าไม้**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วิบูลย์ บุญชูโชตร. 2526. **หลักการชลประทาน**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

วีรพล เต็มสมบัติ. 2538. **หลักสูตรวิทยา**. ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ทรัพยากรน้ำ คณะ  
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สาพิศ ดิลกสัมพันธ์ ภาณุมาศ ลาดปลาและ และเจษฎา เหลืองแจ่ม. 2547. การดูดซับก๊าซ  
คาร์บอนไดออกไซด์ของพรรณไม้ป่าเบญจพรรณ. ใน การประชุมการเปลี่ยนแปลงสภาพ  
ภูมิอากาศทางด้านป่าไม้ : ป่าไม้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ณ โรงแรมมารวย การ์  
เด็น, กรุงเทพฯ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช ระหว่างวันที่ 16 - 17 สิงหาคม  
2547.

สาพิศ ดิลกสัมพันธ์, ธิติ วิสารัตน์, สำเริง ปานอุทัย, ภาณุมาศ ลาดปลาและ, สิรรัตน์ จันทร์มเสถียร  
และศุภรัตน์ ตำราญ. 2548. วัฏจักรคาร์บอนในป่าดิบแล้งสะแกราษและป่าเบญจพรรณกลุ่ม  
น้ำแม่กลอง. ใน รายงานการประชุมวิชาการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่า  
ไม้ “ศักยภาพของป่าไม้ในการสนับสนุนพิธีสารเกียวโต” ณ โรงแรมมารวย การ์เด็น,  
กรุงเทพฯ ระหว่างวันที่ 4 - 5 สิงหาคม 2548.

สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2538. **สรีวิทยาของพืช**. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

\_\_\_\_\_. 2544. **สรีวิทยาของพืช**. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

สมบูรณ์ พรหมเสน. 2547. การพัฒนาแบบจำลองการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลอุณหภูมิตามวิทยา  
และค่าการชักนำของปากใบพืชในพื้นที่ทำการเกษตรและสวนป่า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สันติ ทองพำนัก. 2528. **หลักสูตรวิทยา**. ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน คณะวิศวกรรมศาสตร์  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม, นครปฐม.

สิทธิพร สุขเกษม. 2530. **อุณหภูมิตามวิทยาเกษตรเบื้องต้น**. ภาควิชาปฐพีศาสตร์ และอนุรักษศาสตร์  
คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, เชียงใหม่.

- สำเร็จ ปานอุทัย. 2547. การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากดินของป่าดิบแล้งและป่าเบญจพรรณ. ใน เอกสารประกอบการประชุมการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้ : ป่าไม้กับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ. กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช, กรุงเทพฯ.
- อุทิศ กุญอินทร์. 2542. นิเวศวิทยาพื้นฐานเพื่อการป่าไม้. ภาควิชาชีววิทยาป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- เอ็จ สโรบล. 2530. ภูมิอากาศพืชชั้นสูง. ภาควิชาพืชไร่ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- Bazzaz, F.A. and W.E. Williams. 1991. Atmospheric CO<sub>2</sub> Concentrations Within a Mixed Forest: Implications for Seedling Growth. **Ecology** 72 (1): 12-16.
- Bidwell, R.G.S. 1980. **Plant Physiology**. McMillan Co.Inc, New York.
- Bouma, T.Y. and D.R. Bryla. 2000. On the Assessment of Root and Soil Respiration for Soils of Different Textures: Interactions with Soil Moisture Contents and Soil CO<sub>2</sub> Concentrations. **Plant and Soil** 227 (1-2): 215-221.
- Bonan, G.B. 1995. Land-Atmospheric Interactions for Climate System Models: Coupling Biophysical, Biogeochemical and Ecosystem Dynamical Processes. **Remote Sensing of Environment**. 51: 57-73.
- Chang, J.H. 1968. **Climate and Agriculture: An Ecological Survey**. Aldine Publishing Company, Chicago.
- Change, M. 2003. **Forest Hydrology**. Boca Raton, Washington D.C.

- Chunkao, K. 1971. **An Analysis of Evapotranspiration of Dry-Evergreen Forest at Sakaerat**, Thailand. For. Res. Bull, No.16, Fac. of Forestry, Kasetsart University, Bangkok.
- Dingman, L.S. 2002. **Physical Hydrology**. University of New Hampshire. Prentice Hall, New Jersey.
- Dugas, W.A., M.L. Heuer. and H.S. Mayeux. 1999. Carbon dioxide fluxes over Bermuda grass, native prairies, and sorghum. **Agricultural and Forest Meteorology** 93 (2): 121-139.
- Keeling, C.D. and T.P. Whorf. 1998. **Atmospheric CO<sub>2</sub> records from sites in SIO air sampling Network, in Trends**. A Compendium of Data on Global Change, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn.
- Kramer, P.J. and T.T. Kozlowski. 1979. **Physiology of Woody Plants**. Academic Press, New York.
- Jensen, M.E. and H.R. Haise. 1963. Estimating Evapotranspiration from Solar Radiation. **J. Irrigation and Drainage**. Dir, ASCE. 89: 15-41.
- Jensen, M.E. Burman, R.D and Allen, R.G. (ed). 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirement. **ASCE Manuals and Reports on Engineering No.70.**, Am. Soc. Civil Engrs, New York.
- Mielnick, P.C. and W.A. Dugas. 1999. Soil CO<sub>2</sub> Flux in a Tall Grass Prairie. **Soil Biology and Biochemistry**. 32: 221-228.
- Office of Environmental Policy and Planning (OEPP). 2000. **Thailand's National Greenhouse Gas Inventory 1994**. Ministry of Science, Technology and Environment. Bangkok.

Raich, J.W. and C.S. Potter. 1995. Global Patterns of Carbon Dioxide Emissions from Soils. **Global Biochemical Cycles**. 9: 23-36.

Raich, J.W. and A. Tufekcioglu. 2000. Vegetation and Soil Respiration: Correlation and Controls. **Biogeochemistry**. 48: 71-90.

Rayment, M.B. and P.G. Jarvis. 2000. Temporal and Spatial Variation of Soil CO<sub>2</sub> Efflux in a Canadian Boreal Forest. **Soil Biology and Biochemistry**. 32: 35-45.

Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1992. Plant Physiology. **Wadsworth Publishing Company, California**.

Schulze, E.D. 1986. Carbon Dioxide and Vapor Exchange in Response to Drought in the Atmosphere and in Soil. **Journal of Plant Physiology**. 37: 247-274.

Pukngam, S. 2001. **The Comparative Studies on Evapotranspiration of Paddy Field and Different Forest Types in the Northern Thailand based on Bowen Ratio Method**. Ph.D. Thesis, Kasetsart University.

Ward, A.D. and W.J. Elliot. 1995. **Environmental Hydrology**. Lewis Publishers, New York.

Zeiger, E. 1983. The Biology of Stomatal of Guard Cells. **Journal of Plant Physiology**. 34: 441-465.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ข้อมูลสมดุลพลังงานเฉลี่ยรายเดือน บริเวณพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัด  
ลำปาง ระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2552

เดือน/ปี	Rs (MJ/m <sup>2</sup> /day <sup>-1</sup> )	สมดุลพลังงาน (MJ/m <sup>2</sup> /day <sup>-1</sup> )			
		Rn	LE	H	Gs
มกราคม 50	15.05	10.28	8.19	1.82	0.27
กุมภาพันธ์ 50	15.50	10.65	9.30	1.17	0.18
มีนาคม 50	16.88	11.60	8.97	2.29	0.34
เมษายน 50	17.96	12.34	10.25	1.82	0.27
พฤษภาคม 50	15.62	10.74	8.48	1.96	0.30
มิถุนายน 50	17.47	12.00	8.90	2.70	0.40
กรกฎาคม 51	14.66	11.19	8.93	2.12	0.14
สิงหาคม 51	14.95	11.41	9.45	1.76	0.20
กันยายน 51	15.06	11.49	9.06	2.21	0.23
ตุลาคม 51	14.90	11.37	9.33	1.76	0.28
พฤศจิกายน 51	15.48	11.82	8.56	2.93	0.33
ธันวาคม 51	14.86	11.34	6.49	4.30	0.56
มกราคม 52	17.31	11.20	7.79	2.47	0.95
กุมภาพันธ์ 52	16.79	10.86	6.38	3.32	1.17
มีนาคม 52	17.49	11.31	6.68	3.61	1.02
สิงหาคม 52	17.51	11.33	9.06	1.91	0.36
กันยายน 52	18.64	12.06	9.53	2.19	0.34
เฉลี่ย	16.24	11.35	8.55	2.37	0.43

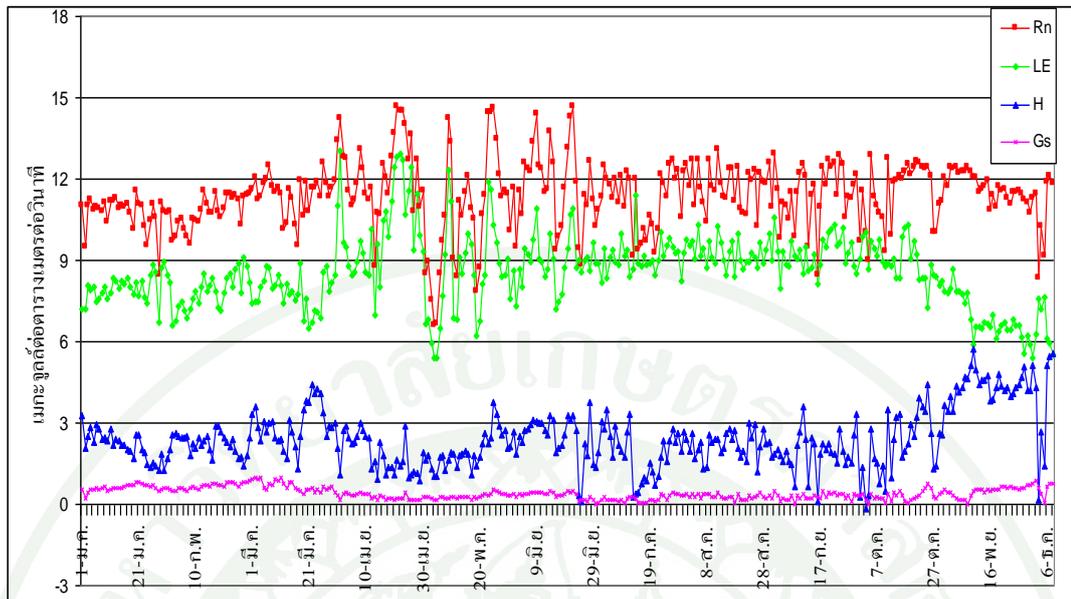
หมายเหตุ : Rs = รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation)

Rn = รังสีสุทธิ (net radiation)

Gs = ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน (heat storage in soil)

H = ความร้อนที่ใช้ในการเผาผลาญอากาศ (sensible heat)

LE = ความร้อนที่ใช้ในการเผาผลาญน้ำ (latent heat of vaporization)



ภาพผนวกที่ ก1 ความผันแปรรายวันของค่าสมดุลพลังงาน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



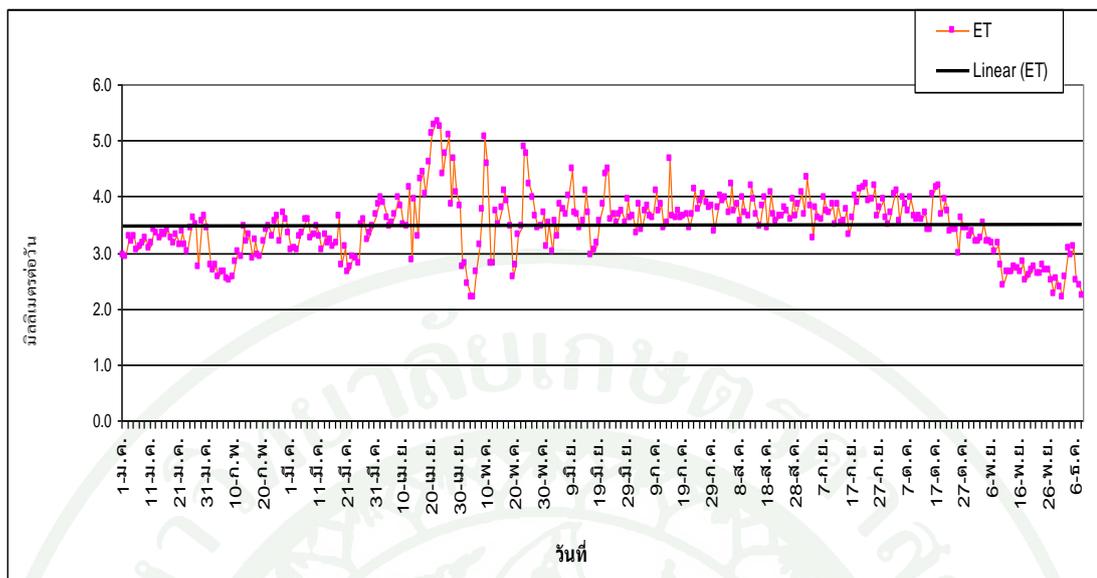
ภาคผนวก ข  
การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และค่าการคายระเหยน้ำจริง

ตารางผนวกที่ ข1 ข้อมูลการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ บริเวณพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ระหว่าง ปี พ.ศ. 2550 - 2552

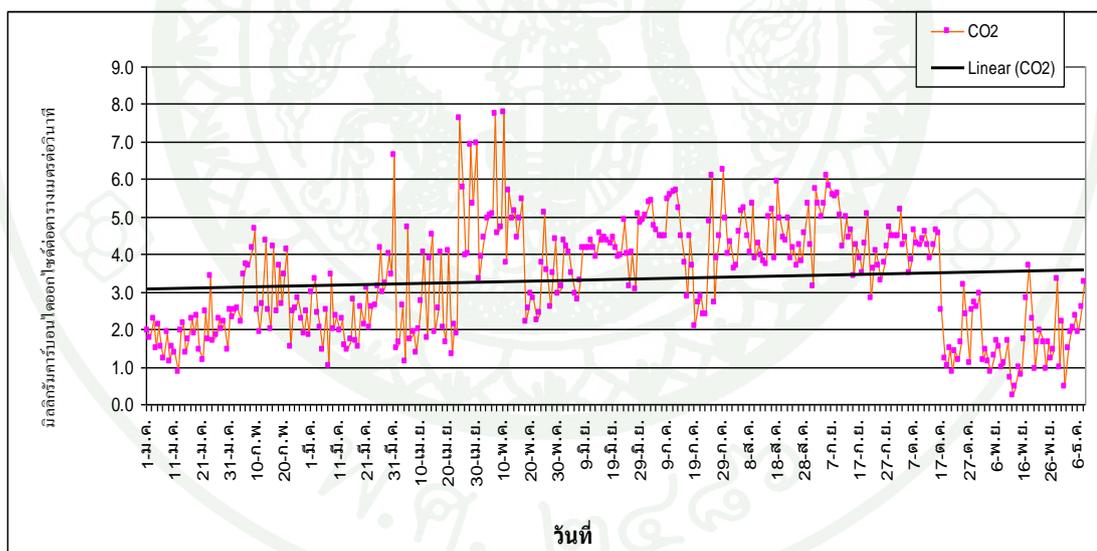
เดือน/ปี	ET <sub>A</sub> (mm/day)	CO <sub>2</sub> (mgCO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /s <sup>-1</sup> )
มกราคม 50	3.10	1.58
กุมภาพันธ์ 50	3.55	2.32
มีนาคม 50	3.41	2.89
เมษายน 50	3.92	3.25
พฤษภาคม 50	3.22	4.33
มิถุนายน 50	3.36	4.03
กรกฎาคม 51	3.66	4.33
สิงหาคม 51	3.87	4.66
กันยายน 51	3.71	4.85
ตุลาคม 51	3.82	4.28
พฤศจิกายน 51	3.50	2.43
ธันวาคม 51	2.64	1.66
มกราคม 52	3.16	2.12
กุมภาพันธ์ 52	2.30	3.54
มีนาคม 52	2.72	2.05
สิงหาคม 52	3.70	3.43
กันยายน 52	3.90	4.12
เฉลี่ย	3.39	3.29

หมายเหตุ : ET<sub>A</sub> = การคายระเหยน้ำจริง (มิลลิเมตรต่อวัน)

CO<sub>2</sub> = อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
(มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที)



ภาพผนวกที่ ข1 ความผันแปรของการคายระเหยน้ำจริงเฉลี่ยรายวัน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



ภาพผนวกที่ ข2 ความผันแปรของการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เฉลี่ยรายวัน ในพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง



ภาคผนวก ค  
ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ตารางผนวกที่ ค1 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา บริเวณพื้นที่สวนสัก อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ระหว่างปี พ.ศ. 2550 - 2552

เดือน/ปี	Ta (°C)	Gs (MJ/m <sup>2</sup> /day <sup>-1</sup> )	RH (%)	WS (m/s <sup>-1</sup> )	Rainfall (mm)
มกราคม 50	22.33	0.27	57.86	1.46	0.00
กุมภาพันธ์ 50	24.57	0.18	41.26	1.41	2.50
มีนาคม 50	28.87	0.34	38.36	1.43	6.00
เมษายน 50	28.99	0.27	52.01	1.64	42.50
พฤษภาคม 50	25.67	0.30	79.97	1.13	246.00
มิถุนายน 50	27.16	0.40	76.09	1.05	49.50
กรกฎาคม 51	25.26	0.14	81.58	1.01	113.50
สิงหาคม 51	25.27	0.20	81.90	0.95	194.50
กันยายน 51	24.86	0.23	83.48	0.96	125.50
ตุลาคม 51	24.69	0.28	81.18	1.05	190.00
พฤศจิกายน 51	22.37	0.33	72.90	1.31	106.00
ธันวาคม 51	20.23	0.56	68.53	1.24	0.00
มกราคม 52	16.10	0.95	59.65	1.41	0.00
กุมภาพันธ์ 52	20.37	1.17	49.30	1.37	5.00
มีนาคม 52	20.00	1.02	49.33	1.45	63.00
สิงหาคม 52	23.53	0.36	80.11	0.78	252.00
กันยายน 52	23.86	0.34	81.03	0.75	330.00
เฉลี่ย	23.77	0.43	66.74	1.20	-

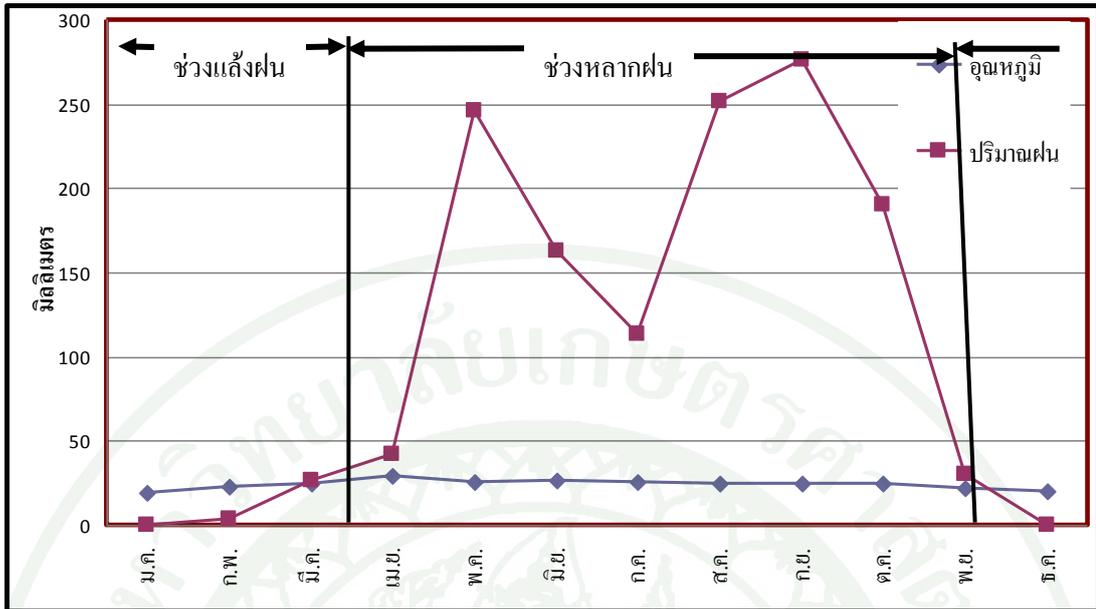
หมายเหตุ : Gs = ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

Ta = อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)

WS = ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

Rainfall = ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อวัน)



ภาพผนวกที่ ๑ ช่วงหลากฝน (wet period) และช่วงแล้งฝน (dry period) ของพื้นที่สวนสัก อำเภอมะเมาะ จังหวัดด้าปาง

ตารางผนวกที่ ค2 ข้อมูลอุตุวิทยามหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ จังหวัดลำปาง พ.ศ. 2515 - 2553 (ค่าเฉลี่ย 38 ปี)

เดือน	อุณหภูมิต่ำสุด (°C)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	การระเหยน้ำ (มม.)	ปริมาณน้ำฝน (มม.)	จำนวนวันฝนตก (วัน)
มกราคม	11.2	33.6	69	3.5	2.6	1
กุมภาพันธ์	14.7	38.1	59	4.5	10	1
มีนาคม	18.5	40.6	49	5.9	25.1	3
เมษายน	20	41.7	63	5.5	62.7	6
พฤษภาคม	21.3	37.2	83	3.8	178.4	16
มิถุนายน	22.2	36.8	83	4.2	148.6	16
กรกฎาคม	22.2	35	83	2.9	138.7	19
สิงหาคม	22.5	34.3	83	3.8	199.5	20
กันยายน	22	34.4	84	3.7	222.2	18
ตุลาคม	20.2	33.5	83	3.4	102.9	10
พฤศจิกายน	14	34.7	76	3.4	32.5	4
ธันวาคม	13	34.7	71	3.4	6.5	1

ที่มา: กองภูมิอากาศ (2553)

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของสถานีตรวจอากาศแม่มอก อำเภอเถิน จังหวัดลำปาง ปี พ.ศ. 2550 - 2552 (ค่าเฉลี่ย 3 ปี)

เดือน	อุณหภูมิเฉลี่ย (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความเร็วลม (ม.ต.)	การระเหยน้ำ (มม.)	ปริมาณน้ำฝน (มม.)
มกราคม	23.1	70.0	7.7	3.3	9.4
กุมภาพันธ์	26.4	66.5	8.7	4.0	24.0
มีนาคม	28.8	61.0	9.7	5.2	24.2
เมษายน	31.1	62.7	13.0	5.8	73.9
พฤษภาคม	29.1	78.0	14.3	4.5	243.2
มิถุนายน	29.4	78.3	13.0	4.3	87.8
กรกฎาคม	28.8	78.7	13.7	3.9	110.3
สิงหาคม	28.9	80.3	12.7	3.9	136.3
กันยายน	28.7	83.0	11.0	3.6	190.5
ตุลาคม	27.8	83.7	8.3	3.3	112.5
พฤศจิกายน	25.1	77.7	7.3	3.1	17.2
ธันวาคม	23.2	75.0	6.0	2.7	12.3

ที่มา: กองภูมิอากาศ (2553)



ภาคผนวก ง  
แบบจำลอง

ตารางผนวกที่ 1 แบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน ในช่วงหลากฝน (wet period) บริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

เดือน	แบบจำลอง	ค่าตัวแปรทางสถิติ		
		R <sup>2</sup>	F-Ratio	MSE
เม.ย.	$ET_A = -0.991 + 0.273R_s$	0.75	83.3**	0.109
	$CO_2 = 4.691 + 0.175R_s - 6.221G_s$	0.33	6.61**	15.964
พ.ค.	$ET_A = 0.019 + 0.205R_s$	0.91	288.81**	0.048
	$CO_2 = 3.953 + 0.047R_s$	0.15	4.9	1.92
มิ.ย.	$ET_A = 0.230 + 0.179R_s$	0.97	760.14**	0.005
	CO <sub>2</sub> non significance	-	-	-
ก.ค.	ET <sub>A</sub> non significance	-	-	-
	$CO_2 = 69.097 + 0.563R_s - 1.958T_a - 2.89RH$	0.88	26.87**	0.189
ส.ค.	$ET_A = 2.605 + 0.076R_s$	0.3	12.45	0.049
	CO <sub>2</sub> non significance	-	-	-
ก.ย.	$ET_A = 3.238 + 2.030G_s$	0.67	56.55**	0.019
	CO <sub>2</sub> non significance	-	-	-
ต.ค.	$ET_A = 13.551 - 0.060RH - 0.197T_a$	0.60	20.99**	0.023
	$CO_2 = -0.370 + 0.057RH$	0.19	6.83**	0.356

หมายเหตุ : ET<sub>A</sub> = การคายระเหยน้ำจริง (มิลลิเมตรต่อวัน)

CO<sub>2</sub> = อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
(มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที)

R<sub>s</sub> = ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน)

G<sub>s</sub> = ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

T<sub>a</sub> = อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)

RH = ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)

W<sub>s</sub> = ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

Rain = ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อวัน)

ตารางผนวกที่ 2 แบบจำลองการคายระเหยน้ำจริงและการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์รายเดือน ในช่วงแล้งฝน (dry period) บริเวณพื้นที่สวนสัก จังหวัดลำปาง

เดือน	แบบจำลอง	ค่าตัวแปรทางสถิติ		
		R <sup>2</sup>	F-Ratio	MSE
พ.ย.	$ET_A = 0.029 - 1.620Gs + 0.013R + 0.090Ta + 0.125Rs$	0.54	7.43**	0.383
	$CO_2 = -9.116 + 0.092RH + 0.216Ta$	0.74	23.69**	16.535
ธ.ค.	$ET_A = 4.127 - 0.902Gs - 0.096Rs + 0.355WS$	0.67	18.25**	0.364
	CO <sub>2</sub> non significance	-	-	-
ม.ค.	$ET_A = 4.046 - 0.016RH$	0.28	11.12**	0.326
	CO <sub>2</sub> non significance	-	-	-
ก.พ.	$ET_A = -2.765 + 0.353Rs$	0.69	58.53**	2.507
	CO <sub>2</sub> non significance	-	-	-
มี.ค.	$ET_A = 1.360 + 0.099Rs$	0.15	5.18**	0.310
	$CO_2 = -5.489 + 0.326Ta$	0.17	6.06	3.15

หมายเหตุ :  $ET_A$  = การคายระเหยน้ำจริง (มิลลิเมตรต่อวัน)

$CO_2$  = อัตราการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  
(มิลลิกรัมคาร์บอนไดออกไซด์ต่อตารางเมตรต่อวินาที)

$Rs$  = ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน)

$Gs$  = ความร้อนที่สะสมไว้ในดิน (เมกะจูลต่อตารางเมตร)

$Ta$  = อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)

$RH$  = ความชื้นสัมพัทธ์ (ร้อยละ)

$Ws$  = ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

$Rain$  = ปริมาณน้ำฝน (มิลลิเมตรต่อวัน)

## ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	ว่าที่ร้อยตรีบรรจงศักดิ์ ฝึกสมบูรณ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	1 พฤษภาคม พ.ศ. 2528
สถานที่เกิด	อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏ สวนดุสิต
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	-
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	-
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-