



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม

อนุรักษ์วิทยา

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำ
ของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า
จังหวัดเชียงใหม่

Determination of Stomatal Conductance Equation Coefficients for Estimating
Evapotranspiration of Hill Evergreen Forest Using Penman-Monteith Model
at Kog-Ma Watershed, Chiang Mai Province

นามผู้วิจัย นางสาวประคำแก้ว บุญธรรม

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(อาจารย์ชัชชัย ตันตสิรินทร์, วท.ม.)

กรรมการ

(อาจารย์พงษ์ศักดิ์ วิทวัสสุติกุล, วท.ด)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์เอ็จ สโรบล, Ph.D)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ดร.ชนันท์ เอ็มพันธ์, Ph.D)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อัจฉกหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำ
ของป่าดิบเขา ด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

Determination of Stomatal Conductance Equation Coefficients for Estimating Evapotranspiration
of Hill Evergreen Forest Using Penman-Monteith Model
at Kog-Ma Watershed, Chiang Mai Province

โดย

นางสาวประคำแก้ว บุญธรรม

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2550

ประจำแก้ว บุญธรรม 2550: การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ ปรินญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (การจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม) สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา ปรธานกรรมการที่ปรึกษา: อาจารย์ชัชชัย ต้นศิริรินทร์, วท.ม. 115 หน้า

การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชด้วยแบบจำลอง Jarvis และประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith และนำไปเปรียบเทียบกับค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดได้ด้วยวิธี Eddy-Correlation การศึกษาเริ่มจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นเทพทาโรและต้นก้อหม่น (*Cinnamomum porrectum* and *Lithocarpus elegans*) จากนั้นหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชด้วยแบบจำลอง Jarvis ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ระดับ ด้วยวิธีการ Generalized Reduced Gradient เลือกสมการการชักนำปากใบพืชที่เหมาะสมและถูกต้องจาก 4 ระดับสมการ เพื่อใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของพืชด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน, ธันวาคม พ. ศ. 2548 และ เดือนมกราคม พ. ศ. 2549 และตรวจสอบความถูกต้องกับค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดด้วยวิธี Eddy Correlation โดยใช้ค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (model efficiency, EFF) ของ Nash and Sutcliffe

ผลการศึกษา พบว่า ส่วนใหญ่ปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (PAR) อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ มีสหสัมพันธ์ (r) กับค่าการชักนำปากใบพืช ค่อนข้างสูง ยกเว้นในบางวันไม่มีสหสัมพันธ์กัน ทั้งนี้เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ มากกว่า ส่วนความชื้นมีค่าสหสัมพันธ์ต่ำจึงเลือกใช้ปัจจัยสิ่งแวดล้อม 3 ปัจจัยแรกในการหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืช จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ทั้ง 4 ระดับสมการ เมื่อนำไปประมาณค่าการชักนำปากใบพืชแล้ว ค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบของต้นเทพทาโรมีค่าเท่ากับ 0.6594, 0.6242, 0.6727 และ 0.5041 ตามลำดับ ส่วนต้นก้อหม่นมีค่าเท่ากับ 0.6540, 0.5964, 0.6042 และ 0.5551 ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวจึงเลือกใช้สมการระดับที่ 3 เพราะผลลัพธ์ที่ได้มีความถูกต้องและสมเหตุสมผลมากที่สุด สมการที่ได้คือ $G_{sw} = 0.146 \left(\frac{Q}{Q+96.66} \right) \left[\left(\frac{T-7.04}{16.33} \right) \cdot \left(\frac{43.00-T}{19.60} \right)^{1.20} \right] \cdot \frac{(1-0.05D)}{(1+0.2D)}$ เมื่อนำสมการมาใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำรายเดือน ทั้ง 3 เดือน มีค่าประมาณ 30, 32 และ 49 มิลลิเมตรต่อเดือน ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยรายวันมีค่าเท่ากับ 1.0, 1.1 และ 1.6 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความถูกต้องกับค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดได้จากวิธีการ Eddy-Correlation ด้วยค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ พบว่ามีค่าเท่ากับ 0.6018, 0.6240 และ 0.5386 ตามลำดับ

Prakumkaew Boontum 2007: Determination of Stomatal Conductance Equation Coefficients for Estimating Evapotranspiration of Hill Evergreen Forest Using Penman-Monteith Model at Kog-Ma Watershed, Chiang Mai Province. Master of Science (Watershed and Environmental Management), Major field: Watershed and Environmental Management, Department of Conservation. Thesis Advisor: Mr.Chatchai Tantasirin, MS. 115 pages.

To estimate evapotranspiration (Et) of a hill evergreen forest at Kog Ma watershed, Chiang Mai province, northern Thailand, analyses to derive coefficients of Jarvis' stomatal conductance model were carried out. The objectives of the study are to derive coefficients of Jarvis' model and apply to estimate Et based on Penman-Monteith model and verify it results with Et measured by Eddy Correlation method. The relationship between stomatal conductance of *Cinnamomum porrectum* (A) and *Lithocarpus elegans* (B) and several environmental factors were analyzed. The coefficients were derived using Generalized Reduced Gradient technique. Four different levels of Jarvis' model were compared. The most suitable model was selected to estimate Et during November and December 2005 and January 2006. Modelling accuracy was verified using a parameter called Model Efficiency (EFF) proposed by Nash and Sutcliffe. Estimated Et from the model was calibrated using Generalized Reduced Gradient technique. The results can be summarized as follow.

Generally, photosynthetically active radiation (PAR), temperature and relative humidity have high correlation with stomatal conductance. However, in some day, there is no relationship among these environmental factors. The reason probably because other factors have higher effects on stomatal conductance than those factors. In addition, it was found that soil moisture has very low relationship with stomatal conductance. Therefore, soil moisture can not be applied, only PAR, temperature and relative humidity were applied in Jarvis' model. The accuracy of estimating stomatal conductance from four level equations of species A using EFF is 0.6594, 0.6242, 0.6727 and 0.5041 respectively. While that from species B is 0.6540, 0.5964, 0.6042 and 0.5551 respectively. The third level of Jarvis' model was then applied to Penman-Monteith model since it shows the highest and the most reasonable results on estimating stomatal conductance. The model is $G_{sw} = 0.146 \left(\frac{Q}{Q+96.66} \right) \cdot \left[\left(\frac{T-7.04}{16.33} \right) \cdot \left(\frac{43.00-T}{19.60} \right)^{1.20} \right] \cdot \frac{(1-0.05D)}{(1+0.2D)}$. Estimated monthly Et during November and December 2005 and January 2006 is about 30, 32 and 49 mm. respectively and average daily Et is 1.0, 1.1 and 1.6 mm. respectively. The accuracy comparing with that measured by Eddy-Correlation method using EFF is 0.6018, 0.6240 and 0.5386 respectively.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาในการให้คำแนะนำชี้แนะงานวิจัย และการตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนกำลังใจจากท่านอาจารย์ชัชชัย ตันตสิรินทร์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ วิทวัสชุตินกุล กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชาเอก รองศาสตราจารย์ ดร.เอ็จ สโรบล กรรมการที่ปรึกษาสาขาวิชารอง อาจารย์ ดร.รุ่งเรือง พูลศิริ ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์ ตั้งจจรรวม และอาจารย์ ดร.สมนิมิตร พุกงาม ที่ให้คำปรึกษา และคอยชี้แนะแนวทางการศึกษาครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณศิริรัชฎญา พิमान และนักวิจัยจากโครงการ Japan Science and Technology Agency (JST) ทุกท่าน ที่เอื้อเฟื้อคอยดูแลช่วยเหลือทุกอย่างในการเก็บข้อมูลภาคสนาม และการรวบรวมข้อมูล ขอขอบคุณเพื่อนวนศาสตร์รุ่นที่ 66 และพี่น้องวนศาสตร์ ตลอดจนขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ สาขาการจัดการลุ่มน้ำและสิ่งแวดล้อม ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ขอมอบแด่ คุณย่าสวาท บุญธรรม บิดา มารดา ญาติพี่น้องในครอบครัวอันเป็นที่รักยิ่งของข้าพเจ้า ผู้ที่ให้กำลังใจ และส่งเสริมในการศึกษามาตลอด ครูและอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้ความเข้าใจในวิชาการทุกๆ ด้านแก่ข้าพเจ้า

ประจำแก้ว บุญธรรม

พฤษภาคม 2550

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	41
อุปกรณ์	41
วิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	48
สรุปและข้อเสนอแนะ	77
สรุป	77
ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	80
ภาคผนวก	90
ภาคผนวก ก	91
ภาคผนวก ข	92
ภาคผนวก ค	98
ภาคผนวก ง	109
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	115

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิมตัวกับค่าการชักนำปากใบพืช	36
2	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (PAR) กับค่าการชักนำปากใบพืช บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	48
3	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ กับค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นเทพทาโร และต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	49
4	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิใบ และอุณหภูมิเหนือเรือนยอด กับค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	52
5	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นเทพทาโร และต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	53
6	ค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กับค่า RMSE ของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	57
7	ค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กับค่า RMSE ของต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	57
8	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Jarvis และความถูกต้องของแบบจำลองแต่ละระดับสมการของต้นเทพทาโร บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	60
9	สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Jarvis และความถูกต้องของแบบจำลองแต่ละระดับสมการของต้นก่อหม่น บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	60
10	ค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นของแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	68
11	ผลการปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	71
12	ปริมาณการคายระเหยน้ำที่ประมาณจากแบบจำลอง Penman-Monteith	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
ข1	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าการชักนำปากใบพืชกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม ของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	92
ข2	ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าการชักนำปากใบพืชกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม ของต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	95
ค1	ค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้ด้วยแบบจำลอง Jarvis และปัจจัย สิ่งแวดล้อมของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	98
ค2	ค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้ด้วยแบบจำลอง Jarvis และปัจจัย สิ่งแวดล้อมของต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	104
ง1	ข้อมูลอัตราการคายระเหยน้ำ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมในเดือนพฤศจิกายน บริเวณ พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	109
ง2	ข้อมูลอัตราการคายระเหยน้ำ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมในเดือนธันวาคม บริเวณ พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	111
ง3	ข้อมูลอัตราการคายระเหยน้ำ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมในเดือนมกราคม บริเวณ พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	113

สารบัญญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการการระเหยน้ำจากพื้นที่ผิวอิสระ	6
2	แนวความคิดของแบบจำลอง Penman-Monteith	23
3	ความต้านทานของปากใบพืชต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซ และไอน้ำระหว่างพืชกับ สิ่งแวดล้อม	29
4	เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการคายระเหยน้ำด้วยวิธี Eddy-Correlation ที่สถานี ตรวจวัดอากาศ ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	39
5	ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่	44
6	ความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อม อัตราการคายน้ำ และค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	50
7	ความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อม อัตราการคายน้ำ และค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	51
8	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a , b_1 และ b_2 กับค่า RMSE ของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	55
9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a , b_1 และ b_2 กับค่า RMSE ของต้นก่อหม่น บริเวณ พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	56
10	ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง กับค่าอิทธิ ต่อการชักนำปากใบพืชจากสมการ $f(Q)$, $f(T)$ และ $f(D)$ บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	59
11	การกระจายของค่าการชักนำปากใบพืชที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Jarvis กับค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ของต้นก่อหม่น บริเวณลุ่มน้ำ ห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	62
12	การกระจายของค่าการชักนำปากใบพืชที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Jarvis กับค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ของต้นเทพทาโร บริเวณลุ่มน้ำ ห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	63

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
13	ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับค่าอิทธิพลที่มีต่อการชักนำปากใบพืช ทั้ง 4 ระดับสมการของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	65
14	ค่าการชักนำปากใบพืชจากการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง Jarvis กับค่าการชักนำปากใบที่ตรวจวัดได้ของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น(เส้นสีเขียว) และค่าการชักนำปากใบพืชจากสมการเฉลี่ย (เส้นสีดำ) บริเวณป่าดิบเขา ดอยบุญ จังหวัดเชียงใหม่	67
15	ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นกับค่า RMSE ในเดือนพฤศจิกายน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	69
16	ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นกับค่า RMSE ในเดือนธันวาคม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	69
17	ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นกับค่า RMSE ในเดือนมกราคม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	70
18	ความผันแปรของการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ระหว่างวันที่ 12-18 พฤศจิกายน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่	72
19	ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ที่ประมาณค่าจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้โดยวิธี Eddy-Correlation ของในพฤศจิกายน	73
20	ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ที่ประมาณค่าจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้โดยวิธี Eddy-Correlation ในเดือนธันวาคม	73
21	ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ที่ประมาณค่าจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้โดยวิธี Eddy-Correlation ในเดือนมกราคม	74

การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำ
ของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

Determination of Stomatal Conductance Equation Coefficients for Estimating
Evapotranspiration of Hill Evergreen Forest Using Penman-Monteith Model
at Kog-Ma Watershed, Chiang Mai Province

คำนำ

การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) เป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างการระเหยน้ำ (evaporation) และการคายน้ำ (transpiration) อันเป็นกระบวนการหนึ่งในวัฏจักรน้ำ โดยกระบวนการนี้ คือ การเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ กับการคายน้ำผ่านปากใบของพืช (stomata) อันส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำเข้าสู่บรรยากาศ สำหรับการจัดการลุ่มน้ำมีจุดมุ่งหมายที่สำคัญประการหนึ่ง คือ การเก็บน้ำไว้ในดิน เก็บดินให้อยู่กับที่ (keep water in soil, keep soil in place) แต่การคายระเหยน้ำเป็นการสูญเสียน้ำออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำที่จะเอื้อประโยชน์เพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคลดน้อยลง ดังนั้นในการจัดการลุ่มน้ำจึงมีความจำเป็น ต้องทราบถึงปริมาณการคายระเหยน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ เพื่อให้มีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ จึงต้องมีการประเมินปริมาณหรือการคาดการณ์จำนวน และอัตราการคายระเหยน้ำจากพื้นที่ลุ่มน้ำ เมื่อทราบถึงปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำออกไปจากพื้นที่ลุ่มน้ำ จึงมีการจัดการพื้นที่ลุ่มน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถคาดคะเนปริมาณน้ำที่เหลืออยู่ นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการจัดการลุ่มน้ำด้านการใช้ประโยชน์ที่ดิน เนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีอัตราการคายน้ำที่แตกต่างกัน ทำให้พื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินที่แตกต่างกันมีอัตราการคายระเหยน้ำที่ต่างกันด้วย ดังนั้นหากทราบปริมาณน้ำที่สูญเสียน้ำออกจากพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในรูปแบบต่างๆ ทำให้สามารถจัดสรรและวางแผนการจัดการการใช้ประโยชน์ที่ดินในพื้นที่ลุ่มน้ำ เพื่อลดปริมาณการสูญเสียน้ำในรูปของไอน้ำจากการคายระเหยน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำได้ เพื่อให้มีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ในพื้นที่ลุ่มน้ำ

พืชแต่ละชนิดมีการอัตราการคายน้ำที่แตกต่างกัน ซึ่งการคายน้ำของพืช เป็นส่วนหนึ่งของการคายระเหยน้ำ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการคายน้ำ คือ การชักนำปากใบพืช หรือความสามารถ

ในการนำน้ำของปากใบ (stomatal conductance) อันเป็นคุณสมบัติของพืชเกี่ยวกับความง่ายของไอน้ำ ซึ่งหลุดพ้นจากใบพืชผ่านปากใบพืช (Huxman and Smith, 2001) พืชแต่ละชนิดมีค่าการชักนำปากใบพืชที่แตกต่างกัน หากทราบถึงค่าการชักนำปากใบพืชจะทำให้ทราบถึงปริมาณน้ำที่พืชคายน้ำออกมาในรูปของไอน้ำ ดังนั้นการประมาณค่าการชักนำปากใบพืชจึงเป็นแนวทางการศึกษาหนึ่ง เพื่อใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของพืช

แนวทางการศึกษาการประมาณค่าการชักนำปากใบพืชที่ถูกต้องแม่นยำนั้น ต้องอาศัยวิธีการประมาณค่าการชักนำปากใบพืชที่ดี มีประสิทธิภาพ และเป็นที่ยอมรับของนักวิชาการด้านต่างๆ วิธีการประมาณค่าการชักนำปากใบพืชในระยะแรกทำการศึกษาโดยเปรียบใบไม้ เป็นด้วย 1 ใบ ใช้หลักของการแพร่ของน้ำในถ้วย ต่อมาพัฒนาเป็นแบบจำลองด้านการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช และปัจจุบันเป็นแบบจำลองที่ใช้ปัจจัยสิ่งแวดล้อม ข้อดีของแบบจำลองปัจจัยสิ่งแวดล้อมคือ ง่ายต่อความเข้าใจ และถึงแม้ไม่มีข้อมูลด้านสรีรวิทยาของพืชก็สามารถประมาณค่าการชักนำปากใบพืชได้ ถูกต้องแม่นยำ แบบจำลอง Jarvis เป็นแบบจำลองหนึ่งที่ใช้กันอย่างกว้างขวางในการประมาณค่าการชักนำปากใบพืช และผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องค่อนข้างสูง นอกจากนี้แบบจำลอง Jarvis ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของพืช โดยวิธีการที่นำค่าการชักนำปากใบพืชไปประยุกต์ใช้ คือ การประมาณค่าการคายระเหยโดยใช้แบบจำลอง Penman-Monteith

แบบจำลอง Penman-Monteith มีจุดเด่นอยู่ที่การใช้ปัจจัยด้านพืชเข้ามาเกี่ยวข้อง นั่นคือความสามารถในการนำน้ำของปากใบพืช ซึ่งในพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการนำน้ำของปากใบพืชแตกต่างกัน จึงเหมาะสมต่อการประมาณค่าการคายระเหยน้ำในแต่ละพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดิน ในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เกษตรกรรม เป็นต้น เพื่อคาดคะเนปริมาณน้ำ และอัตราการคายระเหยน้ำที่เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน เป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการอุทกวิทยา และส่งผลต่อปริมาณน้ำที่มนุษย์สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นเมื่อทราบปริมาณการคายระเหยน้ำที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละการใช้ประโยชน์ที่ดิน ทำให้สามารถใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนการใช้ประโยชน์ที่ดิน และการจัดการลุ่มน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ เพื่อให้มีปริมาณน้ำเพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ของมนุษย์

จากที่กล่าวมาข้างต้น แม้ว่าแบบจำลอง Penman-Monteith สามารถประมาณค่าการคายระเหยน้ำในแต่ละพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินได้อย่างถูกต้องแม่นยำ และนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่ในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาในด้านนี้ เนื่องจากแบบจำลองใช้ปัจจัยหรือตัวแปรในการศึกษามาก

มีความซับซ้อนในการคำนวณ และไม่มีข้อมูลที่เพียงพอต่อการศึกษา อย่างไรก็ตามการศึกษาวิจัย บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ในปัจจุบันมีการดำเนินการเก็บข้อมูลด้านอุตุ-อุทกวิทยาหลายด้าน รวมทั้งข้อมูลการชักนำปากใบพืชและการตรวจวัดการคายระเหยน้ำด้วยวิธี Eddy-Correlation ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการศึกษาเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การชักนำปากใบพืช และการประมาณค่าการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลองPenman-Monteith ของพื้นที่ป่าดิบเขาได้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีความสำคัญและจะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในการวางแผนการจัดการลุ่มน้ำในอนาคต รวมทั้งเป็นแนวทางในการศึกษาลักษณะเดียวกันนี้กับการใช้ประโยชน์ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดินอื่นได้ต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับค่าการชักนำปากใบพืช
2. เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืช และนำไปประมาณค่าการคายระเหยน้ำของเรือนยอดป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman–Monteith
3. เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการประมาณค่าการคายระเหยน้ำจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดด้วยวิธี Eddy-Correlation

การตรวจเอกสาร

1. การคายระเหยน้ำ (Evapotranspiration)

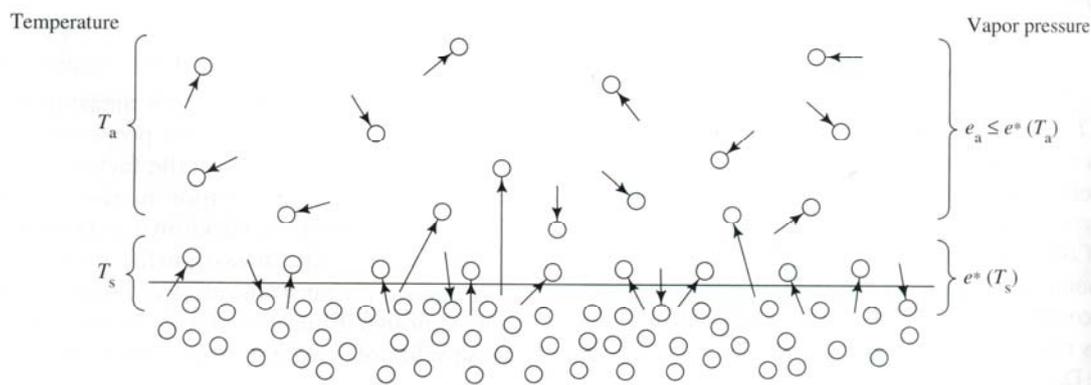
1.1 นิยามและความหมาย

การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) เป็นกระบวนการหนึ่งในวัฏจักรน้ำ โดยการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำจากของเหลวกลายเป็นไอ และเป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างการระเหยน้ำ (evaporation) หมายถึงการสูญเสียน้ำจากผิวน้ำหรือจากผิวดินโดยตรง ร่วมกับกระบวนการคายน้ำของพืช (transpiration) (เกษม, 2526, 2539) และ Allen *et al.* (1998) อธิบายความหมายไว้คล้ายคลึงกันว่า “การคายระเหยน้ำ” เป็นการร่วมกันของสองกระบวนการ คือ การสูญเสียน้ำออกไปจากผิวน้ำการระเหยและการคายน้ำของพืช ส่วน Dingman (2002) อธิบายว่าเป็นการรวบรวมระบบต่างๆ ระบบที่มีน้ำในลักษณะของเหลวหรือของแข็งที่อยู่บนพื้นผิวโลกกลายเป็นไอน้ำสู่บรรยากาศโดยรวมทั้งที่ระเหยจากแม่น้ำ ลำคลอง หนอง บึง พื้นดิน และยังรวมทั้งการคายน้ำจากพืชพรรณด้วย วิชา (2535) ได้อธิบายว่ากระบวนการคายระเหยเป็นส่วนหนึ่งของการหมุนเวียนน้ำ (hydrologic cycle) หรือเรียกว่า “วัฏจักรของน้ำ” กล่าวคือ น้ำที่อยู่บนผิวโลกทั้งที่อยู่ในดิน พืช และแหล่งน้ำระเหยกลายเป็นไอน้ำ ทำให้เกิดเมฆและฝนตกลงมาสู่พื้นโลกเป็นไปตลอดกาลเวลา ทำให้มีน้ำหมุนเวียนจากของเหลวกลายเป็นไอ จากไอลั่นตัวเป็นหยดน้ำอีกต่อ โดยทางทฤษฎีน้ำจะระเหยไปได้ 1 กรัม ต้องใช้ปริมาณความร้อนประมาณ 583.2 แคลอรีที่อุณหภูมิอากาศ 25 องศาเซลเซียส ส่วนการคายน้ำของพืช ตามการทดลองของนักวิทยาศาสตร์พบว่า น้ำที่พืชดูดจากดินไปใช้ในกระบวนการต่างๆ พืชจะใช้น้ำเพื่อการคายน้ำกลับสู่บรรยากาศ 95 เปอร์เซ็นต์ และอีก 5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณน้ำที่พืชดูดขึ้นมาจากดินพืชจะใช้ในการเจริญเติบโต กระบวนการคายน้ำมีผลให้พืชสามารถดูดซับสารอาหารจากดินมากขึ้น และมีผลทำให้ระบบต่างๆ ของพืชดีขึ้นด้วย อย่างไรก็ตาม หากมีการคายระเหยน้ำที่มากเกินไป จะมีผลกระทบต่อพืชอาจกระทบกระเทือนถึงตายได้ (เกษม, 2539)

จากที่กล่าวมาข้างต้นสรุปได้ว่า การคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะของน้ำที่เป็นของเหลวให้กลายเป็นไอน้ำ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการร่วมกันระหว่างการระเหยน้ำ (evaporation) กับกระบวนการคายน้ำของพืช (transpiration) ส่งผลให้เกิดการสูญเสียน้ำเข้าสู่บรรยากาศ ทำให้ปริมาณน้ำที่มนุษย์นำมาใช้ประโยชน์ได้ลดลง

Dingman (2002) อธิบายว่า มโนทัศน์ของการคายระเหยน้ำ ประกอบด้วย 2 กระบวนการ คือ กระบวนการระเหยน้ำจากพื้นผิวน้ำ หรือจากผิวดิน โดยตรง และกระบวนการคายน้ำของพืช สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) กระบวนการระเหยน้ำ (evaporation process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงสถานะ จากของเหลวไปเป็นไอ น้ำ เมื่อมีพลังงานความร้อนซึ่งส่วนใหญ่มาจากพลังงานจากแสงอาทิตย์ (solar radiation) เข้ามากระทำกับ โมเลกุลน้ำ โมเลกุลน้ำจะเกิดการสั่นอย่างไม่มีทิศทาง เมื่อมีพลังงานความร้อนมากขึ้น ประมาณ 580 แคลลอรี่ต่อกรัม บริเวณผิวน้ำ โมเลกุลของน้ำที่เชื่อมต่อกันด้วย hydrogen bond จะหลุดออก และเคลื่อนที่ขึ้นสู่บรรยากาศบริเวณเหนือผิวน้ำ พลังงานที่ทำให้เกิดการระเหยนี้เรียกว่า ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (latent heat of vaporization) ในระบบปิดเมื่อ ไอ น้ำ ในบรรยากาศบริเวณเหนือผิวน้ำมีปริมาณมากขึ้น จนเกิดภาวะอิ่มตัว (saturated vapor pressure) เป็นภาวะที่อัตราการระเหยน้ำสุทธิยุติลง บรรยากาศไม่สามารถรับไอ น้ำ ได้อีกต่อไป จากนั้นไอ น้ำ ที่ อิ่มตัวเหนือพื้นผิวน้ำจะเคลื่อนที่สูงขึ้นตามหลักการแพร่ จากความหนาแน่นสูงไปสู่ความหนาแน่น ต่ำ (ภาพที่ 1) ในระบบเปิดเช่น ทะเลสาบ หรือน้ำขุ่น ปริมาณ ไอ น้ำ ในอากาศจะเคลื่อน โดยการพัดพาของลม เคลื่อนย้ายไอ น้ำ บริเวณผิวน้ำการระเหย ทำให้สามารถระเหยน้ำได้ในปริมาณมาก



ภาพที่ 1 กระบวนการการระเหยน้ำจากพื้นที่ผิวน้ำอิสระ
ที่มา: Dingman (2002)

จากภาพที่ 1 แสดงถึงทฤษฎีที่ดัดแปลงโดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ชื่อ John Dalton เรียกว่า “Dalton’s law” ($e^*(T_s) - e_a$) ซึ่งเป็นพื้นฐานของหลักการเคลื่อนที่ของมวลสาร (mass transfer) จากบริเวณที่มีความหนาแน่นสูงไปสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นต่ำ เนื่องจากความเข้มข้น

ของความชื้นลดลงตามระดับความสูง จึงเรียกระบวนการนี้ว่า กระบวนการแพร่ (diffusion) เป็นกระบวนการหนึ่งของการเปลี่ยนแปลงของไหล เช่น กระบวนการความจุความร้อน, โหมดัม และการแพร่เป็นการแพร่จากความหนาแน่นสูงไปสู่ความหนาแน่นต่ำในแนวตั้งซึ่งรวมเรียกหลักการนี้ว่า Fick's first law of diffusion (Dingman, 2002; เกษม, 2539) ดังสมการที่ 1

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

เมื่อ $F_z(X)$ คือ อัตราการเคลื่อนย้ายของสาร X ในแนวแกน Z ต่อพื้นที่หน้าตัดหนึ่งหน่วยและต่อช่วงเวลาหนึ่งหน่วย (เรียกว่าความเข้มข้นของสาร X, flux of X) โดยที่ $\frac{dC(X)}{dZ}$ คือ ความแตกต่างของความเข้มข้นของสาร X ระหว่างความสูงที่แตกต่างกัน 2 ระดับ (dZ) และ D_x คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแลกเปลี่ยน (exchange coefficient) ได้แก่ ความหนาแน่นของอากาศ ความกดดันของอากาศ ความเสียดทาน (friction) ฯลฯ อันเป็นปัจจัยควบคุมความสามารถในการแพร่ของสาร X จากระดับต่ำสู่ระดับที่สูงกว่า จากสมการที่ 1 ซึ่งเป็นสมการมาตรฐานที่นิยมใช้กันทั่วไป ไม่ว่าจะเป็นการเคลื่อนที่ของมวลสารใดๆ ก็ตาม เช่น ไอน้ำ ความร้อน และ โหมดัม เป็นต้น เมื่อความต่างของไอน้ำหรือความดันไอน้ำ (vapor pressure) ในสองระดับความสูงจากผิวหน้าการระเหยที่แตกต่างกัน (dZ) โดยสมมติให้ D_x คงที่ การระเหยน้ำมีค่าผันแปรตามปริมาณความต่างของไอน้ำ โดยในขณะที่ฝนตก ความชื้นในอากาศใกล้เคียง 100 เปอร์เซ็นต์ ของชั้นบรรยากาศ ทำให้ค่า $dC(X)$ มีค่าน้อย หรือเข้าใกล้ศูนย์ การระเหยน้ำมีน้อยมากหรือแทบไม่มีเลย แต่ในสภาวะจริงค่าการคายระเหยมิได้ถูกควบคุมเพียงค่า $dC(X)$ เพียงอย่างเดียว ค่า D_x นับเป็นปัจจัยที่ควบคุมการระเหยมากที่สุดจึงมีความยุ่งยากที่จะตรวจวัดค่านี้ กล่าวคือ มิใช่เพียงการวัดค่าของไอน้ำให้ถูกต้องเท่านั้น แต่รวมไปถึงการวัดค่า D_x และสภาวะอากาศขณะนั้นด้วย

ดังนั้นกระบวนการระเหยน้ำ เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอน้ำ เมื่อของเหลวได้รับความร้อนประมาณ 580 แคลลอรี่ต่อกรัม บริเวณผิวน้ำ ทำให้อนุภาคของไอน้ำหลุดออกจากของเหลว และเคลื่อนที่จากผิวน้ำขึ้นสู่ด้านบนตามหลักการ Dalton's law ในระบบปิดไอน้ำจะเคลื่อนที่ในแนวตั้งแต่ในระบบเปิดไอน้ำจะได้รับอิทธิพลของลม เป็นตัวการพัดพาเคลื่อนย้ายไอน้ำออกไป สังเกตได้จากพื้นที่ใกล้แหล่งน้ำจะมีอากาศเย็นกว่าพื้นที่ที่อยู่ห่างไกลแหล่งน้ำ

2) กระบวนการคายน้ำ (transpiration process) เป็นการระเหยของน้ำจากระบบเนื้อเยื่อพืชสู่ชั้นบรรยากาศ กระบวนการนี้เริ่มจากการดูดซับ (absorption) น้ำและความชื้นจากดิน โดยรากพืชเข้าไปในระบบเนื้อเยื่อเคลื่อนย้ายลำเลียง (translocation) จากรากสู่ลำต้น และกิ่งก้าน ส่งผ่านถึงใบ และเคลื่อนที่จากระบบเนื้อเยื่อใบพืชสู่โพรงปากใบ (stomatal cavities) จึงเกิดการระเหย และออกจากปากใบไปสู่บรรยากาศภายนอกในรูปของไอน้ำ ซึ่งกระบวนการคายน้ำเป็นปัจจัยที่สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช เนื่องจากเมื่อพืชดูดซับก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ในอากาศเพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรต น้ำจะถูกใช้ในการละลายและลำเลียงสารอาหารไปสู่เซลล์พืช เพื่อใช้ในกระบวนการต่างๆ ของพืช การเคลื่อนย้ายของไอน้ำออกสู่บรรยากาศนั้นถูกควบคุมโดยการทำงานของเซลล์คุม (guard cells) ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปิด-ปิดของเซลล์คุม คือ ปริมาณแสงที่พืชได้รับความชื้น และปริมาณน้ำที่มีในเซลล์ใบพืช (Dingman, 2002) การคายน้ำของพืชส่วนใหญ่เกิดขึ้นผ่านปากใบประมาณ 80-97 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำที่พืชคายออกมาทั้งหมด ความจริงแล้วปริมาณน้ำที่พืชคายออกสู่บรรยากาศนั้น มิได้เกิดจากใบพืชเพียงอย่างเดียว ยังเกิดจาก cuticle, lenticels และ epidermis แต่ปริมาณน้ำมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับส่วนที่เกิดจากปากใบ ดังนั้นจึงเป็นส่วนที่ไม่ค่อยคำนึงถึง เมื่อพืชคายน้ำจึงมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอประมาณ 560-580 แคลลอรี่ต่อกรัม ส่วนของพืชที่มีการคายน้ำจึงมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับอากาศโดยรอบตามปกติพืชพยายามต่อต้านการคายน้ำด้วยวิธีปรับตัวเองให้คงทนอยู่กลางแจ้ง และพืชต้องเก็บน้ำและความร้อนไว้ใช้ในกระบวนการต่างๆ (Kramer and Koslowski, 1979; Bidwell, 1980)

1.2 ประเภทของการคายระเหยน้ำ

การจำแนกชนิดของการคายระเหยน้ำ นักอุตุนิยมวิทยาได้แบ่งการคายระเหยน้ำออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ “การคายระเหยน้ำสูงสุด” (potential evapotranspiration) และ “การคายระเหยน้ำจริง” (actual evapotranspiration) (เกษม, 2526; Dingman, 2002)

1.2.1 การคายระเหยน้ำสูงสุดหรือศักยภาพการคายระเหยน้ำ (potential evapotranspiration, PET) หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการคายน้ำของพืชและการระเหยน้ำสู่บรรยากาศได้สูงสุดในสภาวะอากาศขณะหนึ่ง โดยต้องมีปริมาณน้ำเอื้ออำนวยอย่างไม่จำกัด ซึ่งการคายระเหยน้ำสูงสุดจะมีค่าเท่ากับหรือสูงกว่าการคายระเหยน้ำจริงเสมอ Baldocchi (2003a) อธิบายคำจำกัดความของศักยภาพการคายระเหยน้ำว่า “The evapotranspiration from an extended surface of a short grass that is supplied with water and canopy covers the ground completely” จากคำจำกัดความสามารถ

อธิบายได้ว่า การคายระเหยน้ำสูงสุด คือ การคายระเหยน้ำจากพื้นผิวหญ้าสั้นที่ปกคลุมผิวน้ำดินอย่างสม่ำเสมอและมีการให้น้ำอย่างเต็มที่ตลอดเวลา ซึ่งมีลักษณะคล้ายการระเหยน้ำจากภาชนะที่มีน้ำอยู่ตลอดเวลา ส่วนวีรพล (2538) อธิบายว่า การคายระเหยน้ำสูงสุด เป็นการคายระเหยน้ำที่เกิดขึ้นในกรณีที่ความชื้นในดินมีน้ำเอื้ออำนวยให้กับพืชตลอดเวลา โดยค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดเป็นค่าที่มีบทบาทในการแบ่งเขตความแห้งแล้ง ใช้หลักการพื้นที่ที่มีปริมาณการคายระเหยน้อย จะมีความแห้งแล้งมาก นักชลประทานนิยมใช้ค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดในการประเมินปริมาณน้ำที่ระบายสู่พื้นที่เกษตรกรรม เพราะทำให้มีน้ำใช้สม่ำเสมอ ส่วน Chang (1968) อธิบายว่า คำจำกัดความของคำว่า “short grass” ขาดการอธิบายที่แน่ชัดว่าความสูงของพืชมีความสูงเท่าใด ถึงแม้ในทางทฤษฎีอธิบายว่าความสูงของพืชไม่มีผลต่อการคายระเหยน้ำเพราะมีการให้น้ำอย่างเต็มที่ แต่ความแตกต่างของคุณสมบัติกายภาพ (physical property) ของพืชมีอิทธิพลต่อ albedo หรือ surface roughness ทำให้อัตราการคายระเหยน้ำแตกต่างกัน ส่วนคำจำกัดความของ “canopy covers the ground completely” ยังขาดความชัดเจนในทางทฤษฎี การคลุมพื้นที่อย่างสมบูรณ์แสดงว่าพืชรับพลังงานจากดวงอาทิตย์ไว้ทั้งหมด ซึ่งในความเป็นจริงความหนาแน่นของพืชมีผลอย่างยิ่งต่อการรับพลังงานจากดวงอาทิตย์ หากพืชมีความหนาแน่นสูงจะรับพลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์ได้น้อยกว่าพืชที่มีความหนาแน่นต่ำ และทฤษฎีนี้ไม่ได้กำหนดขนาดของพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนโดยกระแสนอน ซึ่งในธรรมชาติพื้นที่ขนาดใหญ่จะมีการถ่ายเทความร้อนได้ช้ากว่าพื้นที่ขนาดเล็ก สอดคล้องกับ Change (2003) ได้เสนอข้อจำกัดว่าต้องไม่มีการแลกเปลี่ยนถ่ายเทความร้อนรอบๆ พื้นที่ ปริมาณน้ำจะสูญเสียออกจากพืชและดินเท่านั้น และเป็นปัจจัยเพียงอย่างเดียวที่ควบคุมการคายระเหยสูงสุด

1.2.2 การคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration, AET) หมายถึง ปริมาณไอน้ำที่เกิดจากการคายน้ำของพืชและการระเหยน้ำสู่บรรยากาศได้จริงในสภาวะอากาศขณะนั้น ปริมาณน้ำที่สูญเสียไปขึ้นอยู่กับปัจจัยควบคุมหลายอย่าง เช่น ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิ ความเร็วลม ปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ชนิดพืช เป็นต้น หากไม่มีปริมาณความชื้นในดินให้พืชอย่างเต็มที่และตลอดเวลา ปริมาณน้ำในดินจะถูกดึงออกจากดินจนความชื้นลดลงเรื่อยๆ ในกรณีนี้จะเป็นการคายระเหยจริง ซึ่งมีอัตราลดลงและต่ำกว่าการคายระเหยสูงสุด จนกระทั่งถึงจุดเหี่ยวถาวร (PWP) การคายระเหยน้ำจริงจะยุติลง ดังนั้น เมื่อใดที่ปริมาณน้ำที่ใช้ในการคายระเหยไม่พอเพียงหรือความชื้นในดินลดลงต่ำกว่าความจุความชื้นสนาม (Field Capacity) เมื่อนั้นกระบวนการคายระเหยสูงสุดจึงไม่สามารถเกิดขึ้นได้ (วีรพล, 2538; Change, 2003) ปริมาณการคายระเหยจริงนี้ในหมู่นักการจัดการลุ่มน้ำต้องการทราบเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นส่วนที่เกิดขึ้นจริง อันมีผลสะท้อนถึงบรรยากาศ และ

สิ่งแวดล้อมในพื้นที่ลุ่มน้ำ เนื่องจากในการจัดการลุ่มน้ำจำเป็นต้องลดการสูญเสียน้ำออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำให้มากที่สุด เพื่อให้มีน้ำที่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการพยายามหาค่าการคายระเหยน้ำจริงที่ถูกต้องที่สุด

1.3 ปัจจัยที่ควบคุมการคายระเหย

ปริมาณการคายระเหยน้ำผันแปรไปในแต่ละประเภทของการใช้ประโยชน์ที่ดิน ลักษณะอากาศ และลักษณะทางสรีรวิทยาของพืช โดยปริมาณการคายระเหยน้ำรายวันในป่าดิบแล้ง สะเทรราชประมาณ 4 มิลลิเมตร (Chunkao, 1971) ป่าดิบเขาโดยเฉลี่ยประมาณ 3 มิลลิเมตร (เรณู และคณะ, 2524) และ พื้นที่นาข้าวประมาณ 5 มิลลิเมตร (ปิยพงษ์, 2544) เป็นต้น ปริมาณน้ำที่คายระเหยสู่บรรยากาศเหล่านี้มีบทบาทต่อการควบคุมปริมาณความร้อนที่เผาผลาญอากาศ (sensible heat) เพราะในบริเวณที่มีน้ำน้อย หรือที่แห้งแล้ง มีอุณหภูมิของอากาศที่สูง เช่น ภาคอีสาน ซึ่งมีพื้นที่ป่าเป็นป่าเต็งรังเป็นส่วนใหญ่ ส่วนในที่มีมีความชุ่มชื้น พบว่า อุณหภูมิอากาศจะค่อนข้างเย็น เช่น ภาคเหนือ ซึ่งป่าไม้ส่วนใหญ่เป็นป่าดิบเขา ดังนั้น ความชื้นในอากาศเกิดจากการคายระเหยน้ำในบริเวณที่มีน้ำให้แก่กระบวนการตลอดเวลา มีความชุ่มชื้น อุณหภูมิอากาศเย็นกว่าพื้นที่แห้งแล้ง เอ็จ (2530) และวีรพล (2538) อธิบายว่า ปัจจัยที่ควบคุมการคายระเหยน้ำสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา ปัจจัยทางพืชพรรณ และ ปัจจัยอิทธิพลของปริมาณน้ำที่พืชสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ ส่วน Allen *et al.* (1998) อธิบายว่า ปัจจัยที่ควบคุมการคายระเหยน้ำนั้นที่สำคัญมี 3 ลักษณะใหญ่ๆ คือ ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา ลักษณะทางสรีรวิทยาของพืช และการจัดการพื้นที่และปัจจัยสิ่งแวดล้อม ซึ่งแต่ละประเด็นมีบทบาทแตกต่างกันออกไป ดังนี้

1.3.1 ปัจจัยเกี่ยวกับลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา (Meteorological factors)

ปัจจัยทางด้านอากาศมีหลายประการด้วยกัน ในกรณีที่น้ำให้แก่การคายระเหยอย่างไม่จำกัด อัตราการคายระเหยน้ำจะถูกควบคุมโดยลักษณะอากาศเหนือผิวดินเท่านั้น ลักษณะอากาศที่ควบคุมนี้ประกอบด้วย รังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ ความชื้นอากาศ และความเร็วลม ซึ่งพอจะจำแนกออกได้ ดังนี้

1) รังสีดวงอาทิตย์ (solar radiation) ปริมาณรังสีของดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบลงสู่พื้นผิวของโลก ขึ้นอยู่กับลักษณะสิ่งแวดล้อมของโลก เช่น ตำแหน่งของพื้นที่บนผิวโลก

ฤดูกาล ช่วงเวลาของวัน และสภาพของท้องฟ้า เป็นต้น รังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลก มีทั้งรังสีความร้อนคลื่นสั้นและคลื่นยาว ซึ่งช่วงคลื่นที่มีผลต่อการคายน้ำของพืชมากที่สุดคือ ช่วงคลื่นสีแดง และน้อยที่สุดคือช่วงคลื่นสีน้ำเงิน ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ลงมายังพื้นผิวโลกมีประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของรังสีดวงอาทิตย์ทั้งหมด เนื่องจากถูกชั้นบรรยากาศดูดซับไว้ ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมายังพื้นผิวโลก เรียกว่า รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (net radiation) เกษม (2539) อธิบายว่า ปริมาณรังสีดวงอาทิตย์สุทธิส่วนใหญ่ถูกใช้เป็นการคายระเหยน้ำ (latent heat) ที่เหลือใช้ในการเผาผลาญอากาศ (sensible heat) และไหลลงสู่ดิน (soil heat flux) นอกจากนี้ยังใช้ในกระบวนการส่วนอื่นๆ จึงกล่าวได้ว่ารังสีดวงอาทิตย์สุทธิมีบทบาทต่อการคายระเหยน้ำเป็นอย่างยิ่ง เพราะเป็นพลังงานที่ทำให้ปัจจัยอื่นๆ มีความผันแปรตาม เช่น อุณหภูมิ และความชื้น เป็นต้น

2) อุณหภูมิของอากาศ (air temperature) อุณหภูมิของอากาศแปรผันตรงกับปริมาณรังสีของดวงอาทิตย์ที่โลกได้รับ อุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นในตอนเช้าและจะสูงสุดในช่วงเวลาประมาณ 14.00 น. แล้วค่อยลดลง โดยส่วนใหญ่ได้รับอิทธิพลมาจากดวงอาทิตย์ ถ้าอุณหภูมิสูงโอกาสที่น้ำจะกลายเป็นไอน้ำจะสูงขึ้น เนื่องจากสาเหตุสามประการคือ ประการแรก อุณหภูมิมีบทบาทต่อการส่งเสริมการเคลื่อนที่ขึ้นของโมเลกุลให้ออกจากผิวหน้าการระเหยได้มากขึ้น ประการที่สองเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดช่องว่างของไอน้ำจากผิวหน้าการระเหยสู่บรรยากาศมากขึ้น และประการสุดท้ายอุณหภูมิมิผลทำให้กิจกรรมทางชีวเคมีเป็นไปด้วยดี การคายน้ำของพืชจึงมากขึ้น ทำให้มีผลต่อการคายระเหยน้ำที่มากขึ้น (วิชา, 2535)

3) ความชื้นของอากาศ (humidity) ความชื้นในอากาศมีค่าต่ำลงเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น เช่น ช่วงเวลากลางวัน สำหรับช่วงที่มีอากาศเย็นในช่วงตอนกลางคืน ความชื้นมีค่าสูงขึ้นหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่า ความชื้นในอากาศแปรผกผันกับอุณหภูมิของอากาศ และอัตราการระเหยน้ำจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อความชื้นมีค่าน้อยลง ความชื้นในบรรยากาศโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว (vapor pressure deficit) ซึ่งเป็นความแตกต่างของความชื้นที่ผิวระเหยและบรรยากาศ ถ้ามีปริมาณมาก การคายระเหยน้ำจะค่อนข้างมาก อันเป็นตัวการสำคัญในการควบคุมการเคลื่อนย้ายไอน้ำจากผิวหน้าการคายระเหยสู่บรรยากาศ สังเกตได้ว่าในพื้นที่ป่าดิบเขาซึ่งมีความชื้นมีค่ามาก การคายระเหยน้ำจะมีค่าน้อยกว่าป่าเต็งรัง และป่าสักธรรมชาติ ซึ่งมีความชื้นน้อยกว่าป่าดิบเขา (เกษม, 2539)

4) การเคลื่อนที่ของลม (wind movement) เป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้อัตราการระเหยน้ำสูงขึ้น เพราะลมสามารถพัดพาไอน้ำจากบริเวณที่มีความชื้นสูงไปสู่บริเวณความชื้นต่ำ ทำให้บริเวณที่เคยมีความชื้นสูงมีไอน้ำลดลง ดังนั้น โอกาสที่น้ำจะระเหยมีเพิ่มขึ้น อีกทั้งลมเป็นตัวพัดพาไอน้ำและสะสมความร้อนของอากาศให้กระจายทั่วๆ ไป และลมจะพัดจากบริเวณที่มีอากาศเย็นไปสู่ที่มีอากาศร้อน ทำให้ไอน้ำในอากาศเย็นลอยตัวขึ้น เกษม (2539) อธิบายว่าเมื่อความสามารถในการนำน้ำของบรรยากาศ (atmospheric conductance) มีค่ามากขึ้น การระเหยน้ำมีค่ามากขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณไอน้ำบริเวณผิวการคายระเหยอิสระลดต่ำลง เพราะถูกพัดพาโดยลม ทำให้การคายระเหยน้ำเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง โดยการเคลื่อนที่ของลมในแนวนอนนำปริมาณไอน้ำที่ผิวการระเหยออกจากพื้นที่ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลต่อการนำพาความร้อนจากพื้นที่ข้างเคียง ซึ่งลมแนวนอนจะพัดพาอิทธิพลภายนอก เข้าสู่พื้นที่ เช่น นำความร้อนมาสู่ผิวหน้าการคายระเหย ทำให้การคายระเหยเพิ่มขึ้น หากนำความชื้นเข้ามาการคายระเหยจะมีค่าลดลง ดังนั้นลมจึงมีบทบาทต่อการนำพาความร้อนและความชื้นของบรรยากาศทำให้มีผลต่อการคายระเหยน้ำ

1.3.2 ปัจจัยด้านพืช

1) พืชพรรณที่ปกคลุม (vegetation cover) พืชพรรณแต่ละชนิดมีความแตกต่างในการดูดซึมน้ำเอาไว้โดยรากพืช และการคายน้ำออกสู่บรรยากาศ ในการศึกษาทางด้านอุทกวิทยา ป่าไม้ถือว่าพืชพรรณส่วนใหญ่เป็นสภาพป่าไม้ ซึ่งการแบ่งชนิดของป่าออกไปอีก เช่น ป่าเต็งรัง ป่าดิบเขา ป่าดิบชื้น ป่าชายเลน ฯลฯ โดยแต่ละสภาพป่าก็มีองค์ประกอบของพืชต่างกันไป เช่น ชนิดของพืช (species) ความหนาแน่นของพืชพรรณ (density) ระยะห่างระหว่างต้น (spacing) จำนวนเปอร์เซ็นต์เรือนยอดปกคลุมดิน (crown cover) การกระจายของพรรณพืชในพื้นที่ (distribution) สัดส่วนของพรรณพืชชนิดต่างๆ ในพื้นที่ (proportion of species) ฯลฯ (วิชา, 2535)

2) ชนิดของพืชพรรณ (plant species) พืชพรรณแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในจำนวนใบ ขนาดใบ จำนวนปากใบ เป็นต้น ทำให้โอกาสที่พืชคายน้ำออกไปแตกต่างกัน โดยพืชที่เป็นไม้ไม่ผลัดใบจะมีโอกาสคายน้ำได้มากกว่าพืชที่ผลัดใบ เพราะ พืชนั้นขึ้นอยู่ในที่มีความชื้นในดินสูง พืชจึงไม่จำเป็นต้องผลัดใบเพื่อลดการสูญเสียน้ำในช่วงหน้าแล้งที่มีความชื้นในดินต่ำ ช่วงเวลาการคายน้ำมีโอกาสเกิดขึ้นตลอดทั้งปี และพืชนั้นมักมีจำนวนใบหนาแน่นมาก มีเรือนยอดหลายๆ ชั้น อัตราการคายน้ำจึงมีมากกว่า ในพื้นที่แห้งแล้ง พืชพรรณส่วนใหญ่มีใบที่ค่อนข้างเล็ก เช่น พืชทะเลทราย ทั้งนี้เพื่อลดอัตราการสูญเสียน้ำจากการคายน้ำ (วิชา, 2535)

3) สรีรวิทยาของพืช (plant physiology) ปัจจัยเกี่ยวกับพืชพรรณนั้นมีผลต่อกระบวนการคายระเหย ในรูปของการคายน้ำจากปากของใบพืช พืชต้องคายน้ำเพื่อลดความร้อน และเพื่อดูดแร่ธาตุขึ้นมาใช้เป็นอาหารจึงต้องคายน้ำออกไปทางปากใบ สำหรับการคายน้ำของพืช เกิดจากการที่ปากใบเปิดขึ้นให้อิอน้ำซึ่งอยู่ในช่องว่างภายในปากใบของ guard cell เปิด อิอน้ำจะแพร่กระจาย (diffuse) ออกสู่บรรยากาศ (Ward and Elliot, 1995)

1.3.3 การจัดการพื้นที่และปัจจัยสิ่งแวดล้อม

การจัดการพื้นที่ มีอิทธิพลต่อการคายระเหยน้ำเป็นอย่างมาก เพราะเป็นการจัดการเปลี่ยนแปลงและควบคุมสภาพอากาศ และควบคุมพืช จึงส่งผลต่อการคายระเหยน้ำ ในปัจจุบันการจัดการพื้นที่มีหลากหลายวิธีขึ้นกับวัตถุประสงค์ของผู้ดำเนินการ เช่น ต้องการลดอัตราการคายระเหยน้ำของพื้นที่โล่ง จึงจัดการปลูกพืชคลุมดิน ซึ่งสภาพความชื้นในดิน (soil moisture condition) เป็นอีกปัจจัยที่มีบทบาทต่อการคายระเหยน้ำ ปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในดินนั้นเป็นตัวจำกัดการคายระเหยน้ำได้เป็นอย่างมาก เนื่องจากพืชพรรณต้องอาศัยความชื้นจากดินในการคายน้ำ ถ้าสภาพความชื้นในดินมีน้อยพืชพรรณก็ต้องเก็บน้ำไว้ใช้มากกว่าที่จะปล่อยให้คายน้ำ โดยที่การคายน้ำแปรผันตามสภาพความชื้น ความสามารถของพื้นที่ในการให้น้ำแก่พืช และการจัดการพื้นที่ เอ็จ (2530) อธิบายว่าสามารถใช้สารเคมีเพื่อช่วยลดการคายน้ำได้ เรียกสารเคมีกลุ่มนี้ว่า antitranspiration จะคอยขัดขวางและชักนำให้ปากใบพืชปิด หรือช่วยสะท้อนแสง ลดปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งอาจลดค่าการคายน้ำได้ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนใหญ่จะใช้ได้กับพืชที่ปลูกใน greenhouse แต่เมื่อใช้ในพื้นที่แปลงศึกษาไม่ได้ผล การจัดการพื้นที่นอกจากใช้สารเคมี การคลุมดิน ยังมีหลากหลายวิธี เช่น การเปลี่ยนแปลงพืชที่ปลูก โดยเลือกปลูกพืชที่ใช้น้ำในปริมาณน้อย รวมทั้งการจัดการในด้านวิชาการเกษตรกรรมอื่นๆ ดังนั้นการจัดการพื้นที่และปัจจัยแวดล้อมจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อการคายระเหยน้ำ ซึ่งหากมีแนวทางในการจัดการพื้นที่ดี จะช่วยลดปริมาณน้ำที่สูญเสียออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ

1.4 การประมาณค่าการคายระเหยน้ำของพืช

การประมาณค่าการคายระเหยน้ำเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการศึกษา การจัดการลุ่มน้ำ และนักอุตุนิยมวิทยา เพื่อต้องการทราบปริมาณน้ำสูญเสียออกไปโดยที่มนุษย์ไม่ได้ใช้ประโยชน์ มีปริมาณเท่าใด แต่การหาอัตราการคายระเหยน้ำให้มีค่าถูกต้องเป็นสิ่งที่ยาก เพราะความเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศมีอยู่ตลอดเวลา ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมต่างๆ

โดยการเกิดการคายระเหยน้ำต้องเกิดจากสมมติฐาน 3 ประการด้วยกัน ประการแรกต้องมีความร้อนเพื่อใช้ในการคายระเหยประมาณ 580 แคลอรีต่อกรัม หรือกล่าวได้ว่าต้องมีพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำ (latent heat of vaporization) ในการคายระเหย ประการที่สองปริมาณความชื้นหรือความดันไอน้ำในบรรยากาศต้องมีน้อยกว่าบริเวณที่ผิวระเหย ตามทฤษฎีการฟุ้งกระจาย (diffuse theory) และประการสุดท้ายต้องมีน้ำให้แก่กระบวนการคายระเหย (Dingman, 2002)

การประมาณค่าการคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) จำแนกได้เป็น 3 วิธี คือ วิธีการสมดุลของน้ำ (water balance method) วิธีการทางอุตุนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน (micrometeorological method) และวิธีลุ่มน้ำจำลอง (lysimeter) (เกษม, 2526; วิชา, 2535) ส่วน Ward and Elliot (1995); Dingman (2002) แบ่งแนวทางการศึกษาการคายระเหยน้ำออกเป็น 2 แนวทางคือ การศึกษาการคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration) เช่น การศึกษาโดยใช้ lysimeter และการศึกษาการคายระเหยน้ำสูงสุด (potential evapotranspiration) เช่น สมการ Penman-Monteith ดังนั้นการศึกษการคายระเหยน้ำจึงแบ่งได้เป็น 2 วิธีคือ การคายระเหยน้ำจริง และการคายระเหยน้ำสูงสุด ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1.4.1 การศึกษาการคายระเหยน้ำจริง

1) วิธีการสมดุลของน้ำบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (water balance method) เป็นการประมาณค่าการคายระเหยจริง ใช้หลักการสมดุล โดยปริมาณน้ำที่เข้ามาในพื้นที่ลุ่มน้ำจะเท่ากับปริมาณน้ำที่ออกไปจากลุ่มน้ำ เกษม (2526) ดังสมการที่ 2

$$Et = P + I - O_g - R \pm \Delta S \quad (2)$$

เมื่อ	Et	คือ	ปริมาณการคายระเหยน้ำจากพื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
	P	คือ	ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยที่ตกในพื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
	I	คือ	ปริมาณน้ำที่ (อาจ) ไหลเข้าสู่พื้นที่ลุ่มน้ำทั้งผิวดินและใต้ดิน (มิลลิเมตร)
	O _g	คือ	ปริมาณน้ำที่ (อาจ) ไหลออกจากพื้นที่ลุ่มน้ำ (มิลลิเมตร)
	R	คือ	ปริมาณน้ำผิวดินที่ไหลจากพื้นที่ลุ่มน้ำวัดที่ outlet (มิลลิเมตร)
	ΔS	คือ	ปริมาณน้ำในดินอาจมีน้อยหรือมากกว่าตอนที่เริ่มคำนวณก็ได้ (มิลลิเมตร)

จากการศึกษา พบว่า วิธีการนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก เป็นวิธีที่ง่าย แต่ความผิดพลาดมักเกิดขึ้นได้ง่ายเช่นกัน เนื่องจากอุปสรรคในการวัดค่าต่างๆ ของสมการมักมีความยากลำบากและความผิดพลาดเสมอ ตัวอย่างเช่น การวัด I และ O_g เป็นการยากที่จะวัดได้อย่างถูกต้อง อีกทั้งระยะเวลาการวัดนั้นต้องเป็นเวลานานอย่างต่ำไม่ควรน้อยกว่า 5 ปี อย่างไรก็ตามถ้ามีการวัดค่า R , P และ ΔS ได้ถูกต้องจะสามารถวัดค่าการคายระเหยน้ำของพืชได้เป็นอย่างดี

2) Lysimetric Measurement เป็นเครื่องมือที่มีลักษณะเป็นถังขนาดใหญ่ ฝังอยู่ในดินมีความแม่นยำมากในการวัดอัตราการคายระเหยน้ำ Chang (1968) กล่าวว่า lysimeter ที่ดีจะต้องมีลักษณะใกล้เคียงกับสภาพธรรมชาติมากที่สุด ประการแรกต้องมีขนาดใหญ่ และเพื่อขจัดปัญหาเรื่อง boundary effect และการเจริญเติบโตของราก ประการที่สอง คุณสมบัติทางกายภาพของดินที่อยู่ภายใน lysimeter ต้องใกล้เคียงกับดินที่อยู่ภายนอกให้มากที่สุด ประการสุดท้ายจำนวนต้นพืชใน lysimeter ต้องมีความหนาแน่นเท่ากับพื้นที่รอบๆ ใช้หลักในการหาปริมาณการคายระเหยน้ำโดยวิธีสมดุลน้ำ วิธีการนี้เหมาะสมกับพืชขนาดเล็ก ไม่เหมาะกับการศึกษาการคายระเหยน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ เนื่องจากสภาพภูมิประเทศมีความสลับซับซ้อน และพรรณไม้ในพื้นที่ลุ่มน้ำมีลักษณะเป็นต้นไม้ใหญ่ ระบบรากลึกและซับซ้อนกว่าสภาพที่ใช้ในการศึกษาโดย lysimeter เป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้การเคลื่อนย้ายจะลำบาก การสร้างต้องใช้ต้นทุนสูงแต่ค่าการคายระเหยจริงที่ตรวจวัดได้นั้นมักนิยมใช้สอบเทียบกับวิธีการ และแนวทางในการศึกษาการคายระเหยน้ำด้วยวิธีอื่นๆ เพราะถือว่ามีความถูกต้องค่อนข้างสูง

3) การประเมินค่าการคายระเหยน้ำโดยอาศัยสมดุลพลังงาน (energy balance) เป็นวิธีการที่ใช้หลักสมดุลของพลังงานมาคำนวณหาปริมาณการคายระเหยน้ำ คล้ายคลึงกับวิธีสมดุลน้ำ แต่ได้ใช้สมการในรูปของพลังงาน และคำนวณปริมาณการคายระเหยน้ำจากปริมาณที่เหลือเพื่อรักษาสมดุลของพลังงาน

3.1) Bowen ratio method เป็นการหาอัตราการคายระเหยน้ำจริง ซึ่งเป็นที่นิยมและยอมรับในหมู่นักวิชาการจัดการลุ่มน้ำ เนื่องจากให้ค่าการคายระเหยน้ำใกล้เคียงกับ lysimeter เป็นอย่างมาก Dingman (2002) อธิบายว่า Bowen ratio เป็นการศึกษาคายระเหยน้ำจริงที่ประยุกต์หลักการเคลื่อนย้ายมวล (mass transfer) ในการประมาณค่า มีวิธีการ ดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4

$$B = H / LE \quad (3)$$

$$B = \frac{\rho C_p K_h (\Delta T / \Delta Z)}{(0.622 \rho L E K_w / P) (\Delta e / \Delta Z)} \quad (4)$$

เมื่อ	B	คือ	อัตราส่วนโบเวน (Bowen ratio)
	H	คือ	ความร้อนที่ใช้ในการเผาอากาศ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	LE	คือ	ความร้อนที่ถูกใช้เพื่อการระเหยน้ำ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	ρ	คือ	ความหนาแน่นของอากาศ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	C_p	คือ	ความร้อนจำเพาะของอากาศ (จูลล์ต่อองศาเซลเซียสต่อกรัม)
	L	คือ	ความร้อนแฝงในการระเหยน้ำ (แคลอรีต่อกรัม)
	P	คือ	ความดันบรรยากาศ (มิลลิบาร์)
	ค่า 0.622	คือ	อัตราส่วนโมเลกุลระหว่างอากาศชื้นและอากาศแห้ง
	$\Delta T / \Delta Z$ และ $\Delta e / \Delta Z$	คือ	ความแตกต่างของอุณหภูมิและความชื้นจริงในบรรยากาศ

3.2) Aerodynamic method เป็นวิธีการที่ใช้ความเร็วของลมเป็นส่วนสำคัญในการคำนวณหาการคายระเหยน้ำ โดยต้องเป็นพื้นที่เปิด (open uniform site) และบรรยากาศต้องมีสภาพเป็นกลาง (neutral condition) คือ ภาวะที่อุณหภูมิของพื้นที่ เท่ากับอุณหภูมิกายนอก วิธีการนี้มีความยุ่งยากในการวัดมาก กล่าวคือ สภาพอากาศที่อยู่ในลักษณะ neutral condition เกิดขึ้นได้ยาก ดังนั้นวิธีการนี้เมื่อใช้ในการหาการคายระเหยน้ำจะได้ค่าที่น้อยกว่า และมีความยุ่งยากกว่าวิธี Bowen ratio ภายใต้อสมมติฐานสามประการ โดยประการแรก ความเร็วลมต้องผันแปรต่อ $\ln Z$ ประการที่สอง ค่าของแรงเฉือนของบรรยากาศที่ความเร็วลมต่างกัน (shearing stress) มีค่าคงที่ตลอดความสูง และประการสุดท้าย ค่าสัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ (transfer coefficient) ของน้ำ เท่ากับโมเมนต์ัม หรือ $K_w = K_M$ ซึ่งมีสมการดังสมการที่ 5

$$E = \frac{[3.46 \times 10^6 / T_a] \cdot [(U_2 - U_1) - (e_1 - e_2)]}{\ln[(z_2 - d) / (z_1 - d)]} \quad (5)$$

โดยที่	E	คือ	อัตราการคายระเหย (เซนติเมตรต่อวินาที)
	U_1, U_2	คือ	ความเร็วลมที่ความสูง 2 ระดับ (เซนติเมตรต่อวินาที)
	Ta	คือ	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)

e_1, e_2	คือ	ความดันไอ (มิลลิบาร์) ที่ความสูง 2 ระดับ z_1 และ z_2
d	คือ	ความหยาบของพื้นผิว

การประยุกต์ใช้สมการจะทำการวัดความเร็วตามแนวตั้ง วัดตามความสูงในระดับต่างๆ พร้อมทั้งวัดอุณหภูมิและความดันไอน้ำเช่นเดียวกับวิธีการของ Bowen ratio และมักได้ค่าการคายระเหยน้ำที่ต่ำกว่าวิธี Bowen ratio โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าลักษณะอากาศไม่อยู่ในสภาพที่ใกล้ neutral condition แต่ถ้าในสภาวะอากาศที่ใกล้ neutral condition จะให้ค่าการคายระเหยจริงเทียบเท่ากับการใช้ลุ่มน้ำจำลอง (lysimeter) (เกษม, 2539)

1.4.2 การศึกษาการคายระเหยน้ำสูงสุด

1) การศึกษาการคายระเหยน้ำจากภาควัดการคายระเหยน้ำ (pan evapotranspiration) เป็นวิธีการที่ค่อนข้างเก่า แต่ง่ายในการศึกษาการคายระเหยน้ำโดยส่วนใหญ่ใช้ภาควัดการคายระเหยน้ำแบบมาตรฐานเรียกว่า Class A Pan มีขนาดความลึก 25 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 120 เซนติเมตร ระดับน้ำที่สูญเสียจากการคายระเหยจะวัดจากการลดลงของน้ำในภาควัดตามระดับในตะขอ (hook gauge) ที่ติดตั้งไว้กลางภาควัด การศึกษาการคายระเหยด้วย Class A Pan มักจะได้ค่าการคายระเหยน้ำที่เกินความจริงประมาณ 20 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากได้รับพลังงานของรังสีดวงอาทิตย์ตลอดเวลา

2) การประมาณค่าการคายระเหยน้ำโดยอาศัยเทคนิคทางอุตุนิยมนิยมวิทยาใกล้ผิวดิน เป็นที่นิยมในหมู่นักอุตุนิยมนิยมวิทยาเป็นอย่างมาก เพราะเป็นการวัดได้สะดวก และถ้าตรวจวัดข้อมูลต่างๆ ได้ถูกต้องดีแล้ว ก็สามารถหาค่าการคายระเหยได้ในช่วงระยะเวลาสั้นๆ เนื่องจากการวัดการคายระเหยน้ำโดยตรงมักทำได้ยาก ดังนั้นจึงมีผู้เสนอสมการหรือแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลทางด้านอุตุนิยมนิยมที่ทำการวัดได้ สมการเหล่านี้มีตั้งแต่สมการที่ง่ายไปจนถึงสมการที่ซับซ้อน ความถูกต้องและความง่ายจะแตกต่างกันไป ในที่นี้ขอยกตัวอย่างบางสมการพอสังเขป ซึ่งแบ่งตามข้อมูลหรือปัจจัยที่ใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยได้แก่

2.1) Thornthwaite Equation เป็นวิธีการประมาณค่าโดยใช้อุณหภูมิเป็นหลัก (temperature base method) พัฒนามาจากความสัมพันธ์ของค่าการระเหยสูงสุดรายเดือนกับอุณหภูมิและความยาวนานของช่วงมีแสง โดยทั่วไปแล้วสมการนี้นิยมใช้ในหมู่นักเกษตร

และนักชลประทาน ซึ่งใช้อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน (mean monthly air temperature) มาใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำเท่านั้น ในความเป็นจริงอุณหภูมิสามารถตรวจวัดได้ในทุกสถานที่ เพราะวัดได้ง่ายไม่ยุ่งยาก แต่ผลการประมาณค่าที่ได้ยังขาดความแม่นยำเท่าที่ควร Sumner (1996) ได้อธิบายว่าไม่สามารถใช้สมการนี้ประมาณหาการคายระเหยในช่วงเวลาสั้นๆได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้ยังใช้อยู่ถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะในหมู่นักชลประทาน และนักชีวภูมิศาสตร์ ที่หาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายของพืชกับสมดุลของน้ำเป็นการหาค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดรายเดือน โดยกำหนดว่าใน 1 เดือนมี 30 วัน และมีช่วงได้รับแสงใน 1 วันเป็น 12 ชั่วโมงเท่านั้น ซึ่งอาจเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย เนื่องจากยังขาดข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาอย่างมาก (เกษม, 2539) สามารถประมาณการคายระเหยน้ำได้จากสมการที่ 6

$$PET = 1.6 (10 TC / I) a \quad (6)$$

เมื่อ	a	คือ	$0.49 + 0.0179 I - 0.0000771 I^2 + 0.000000675 I^3$
	PET	คือ	การคายระเหยน้ำสูงสุดรายเดือน (มิลลิเมตร)
	TC	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน (องศาเซลเซียส)
	I	คือ	ดัชนีความร้อน (ผลรวมของดัชนีความร้อนรายเดือน 12 เดือน)

2.2) Haise Reference Radiation Method เป็นวิธีที่ใช้ปัจจัยพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เป็นปัจจัยหลักในการศึกษา เนื่องจากพลังงานรังสีดวงอาทิตย์เป็นแหล่งของพลังงานที่ทำให้เกิดการคายระเหยน้ำ ซึ่ง Jensen and Haise (1963) ได้ทำการศึกษาโดยใช้ข้อมูลจากการตรวจวัดมากกว่า 3,000 ครั้ง โดยหาค่าการคายระเหยน้ำจริงจากตัวอย่างดิน วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของรังสีดวงอาทิตย์ และค่าการคายระเหยน้ำ เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$PET = (0.078 + 0.0252 TA) * RI * 0.017 \quad (7)$$

เมื่อ	PET	คือ	การระเหยน้ำสูงสุดรายวัน (มิลลิเมตร)
	TC	คือ	อุณหภูมิของอากาศ (องศาเซลเซียส)
	RI	คือ	รังสีดวงอาทิตย์ (แลงลีย์)

ค่าคงที่ 0.017 เป็นการเปลี่ยนจากแลงลีย์เป็นมิลลิบาร์ของการระเหยน้ำที่เท่ากัน

2.3) Blaney-Criddle Method เป็นวิธีการประมาณการคายระเหยน้ำที่นิยมมากทางภาคตะวันตกของสหรัฐอเมริกา วิธีนี้คล้ายกับวิธีของ Thornwaite คือ การคายระเหยน้ำขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$PET = 25.4 * Kc * (DL / TDL) * (0.056052 TA^2 + 1.42776 TA + 7.6672) \quad (8)$$

เมื่อ	PET	คือ	การระเหยน้ำสูงสุดรายวัน (มิลลิเมตร)
	TA	คือ	อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (องศาเซลเซียส)
	DL	คือ	ความยาวของวัน (ชั่วโมง)
	TDL	คือ	ผลรวมของทุกๆ ความยาวของวันสำหรับทั้งปี = 4,465.6 ชั่วโมง
	Kc	คือ	สัมประสิทธิ์ระดับการเจริญเติบโตของพืชในแต่ละชนิดที่ศึกษา

2.4) Penman Method เป็นวิธีการหาค่าการคายระเหยสูงสุด โดย Penman (1948) ได้คิดแบบจำลองที่สามารถประมาณค่าการคายระเหยน้ำที่ใช้ความสัมพันธ์พื้นฐานทางกายภาพมาพัฒนาสมการการคายระเหยน้ำ เป็นการศึกษาค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดที่ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันไอน้ำที่ผิวหน้าการระเหย รวมกับความเร็วลม (Baldocchi, 2003a) ส่วน Ward and Elliot (2002) อธิบายว่าสมการ Penman รวมถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการให้พลังงาน และกระบวนการในการเคลื่อนที่ของไอน้ำที่ผิวหน้าการระเหยมาใช้ในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด โดยยึดหลักการของ Dalton's Law ซึ่งกล่าวถึงการระเหยของน้ำขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันไอน้ำ (vapor pressure deficit) ระหว่างผิวหน้าการระเหยกับอากาศเหนือการระเหยขึ้นไป ส่วน Dingman (2002) ได้กล่าวว่า Penman equation เป็นการรวมหลักการและแนวความคิดของการเคลื่อนย้ายมวล (mass-transfer) ร่วมกับสมดุลพลังงาน (energy balance) ดังสมการที่ 9 และสมการที่ 10

$$E = \frac{\Delta \cdot \text{netradiation} + \gamma \cdot \text{masstransfer}}{\Delta + \gamma} \quad (9)$$

$$E = \frac{\Delta \cdot (K + L) + p_a \cdot c_a \cdot C_{at} \cdot e_a^* \cdot (1 - W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v + (\Delta + \gamma)} \quad (10)$$

เมื่อ	E	คือ	อัตราการระเหยน้ำ (มิลลิเมตรต่อวินาที)
	Δ	คือ	ค่าความชันของสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำอิ่มตัวกับอุณหภูมิ
	K	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นสุทธิ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	L	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาวสุทธิ (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	c_a	คือ	ความจุความร้อนของอากาศ (เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม)
	C_{at}	คือ	การนำน้ำของบรรยากาศ (มิลลิเมตรต่อวินาที)
	e_a^*	คือ	ความดันไอน้ำอิ่มตัว (กิโลปาสกาล)
	W_a	คือ	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)
	ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	λ_v	คือ	ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (เมกะจูลล์ต่อกิโลกรัม)
	γ	คือ	psychometric constant

$$\text{โดยที่ } \gamma = \frac{c_a \cdot P}{0.622 \cdot \lambda_v} \quad (11)$$

เมื่อ	P	คือ	ความดันบรรยากาศ (กิโลปาสกาล)
	λ_v	คือ	$2.50 - 2.36 \times 10^{-3} \cdot T$

$$\text{และ } \Delta = \frac{de^*}{dT} = \frac{2508.3}{(T + 237.3)^2} \cdot \exp\left(\frac{17.3 \cdot T}{T + 237.3}\right) \quad (12)$$

เมื่อ	T	คือ	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)
-------	-----	-----	------------------------------

$$\text{และ } (K + L) = [(K_{in} - K_{out}) + (\varepsilon_w L_{in} - L_{out})] \quad (13)$$

เมื่อ	K_{in}	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นที่ตกสู่พื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	K_{out}	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้นที่สะท้อนกลับจากพื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	ε_w	คือ	emissivity of trees ≈ 0.96
	L_{in}	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาวที่ตกสู่พื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)
	L_{out}	คือ	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นยาวที่สะท้อนกลับจากพื้นผิว (วัตต์ต่อตารางเมตร)

สามารถหาค่าการนำน้ำของบรรยากาศ (C_{at}) ได้จาก

$$C_{at} = \frac{V_a}{6.25 \cdot \left[\ln \left(\frac{Z_m - Z_d}{Z_o} \right) \right]^2} \quad (14)$$

โดยที่	Z_m	คือ	$Z_{veg} + 2$
	Z_d	คือ	$0.7 \cdot Z_{veg}$
	Z_o	คือ	$0.1 \cdot Z_{veg}$

เมื่อ	Z_{veg}	คือ	ความสูงของพืชที่ทำการศึกษา (เมตร)
	V_a	คือ	ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)

Chunkao (1971) ได้ประเมินการคายระเหยน้ำในพื้นที่ป่าดิบแล้ง และพื้นที่โล่งบริเวณสถานีวิจัยสิ่งแวดล้อมสะแกราช จังหวัดนครราชสีมา ระหว่างเดือนมิถุนายนถึงเดือนกันยายน พ.ศ. 2514 โดยวิธี Bowen ratio, Aerodynamic และ Penman พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำรายวัน โดยวิธี Bowen ratio ในพื้นที่ป่าดิบแล้ง มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8-5.8 มิลลิเมตรต่อวัน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.7 มิลลิเมตรต่อวัน ในพื้นที่โล่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0-9.3 มิลลิเมตรต่อวัน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 3.2 มิลลิเมตรต่อวัน ค่าการคายระเหยน้ำจริงโดยวิธี Aerodynamic ในพื้นที่ป่าดิบแล้งมีค่าระหว่าง 0.2-7.3 มิลลิเมตรต่อวัน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 1.9 มิลลิเมตรต่อวัน สำหรับค่าการคายระเหยน้ำรายวัน โดยวิธี Penman ในพื้นที่ป่าดิบแล้ง มีค่าอยู่ระหว่าง 4.9-17.1 มิลลิเมตรต่อวัน มีค่าเฉลี่ยประมาณ 4.9 มิลลิเมตรต่อวัน เช่นเดียวกับ สุชาสินี (2544) ได้ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด ในแต่ละภูมิภาคโดยใช้รังสีดวงอาทิตย์และข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจอากาศเกษตร และสถานีตรวจอากาศอุตุนิยมวิทยาทั้งหมด 50 สถานี ซึ่งผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด จากแบบจำลองของ Penman, Jensen-Haise, Thornthwaite และ Turc กับการระเหยน้ำจากถาดวัด พบว่า แบบจำลองทั้ง 4 สามารถคำนวณค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดได้ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนด (coefficient of determination, r^2) และแนวโน้มความผันแปรในแต่ละเดือนแล้ว สามารถสรุปได้ว่า Penman method เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำสูงสุด

2.5) Penman–Monteith Model ปรับปรุงจากแบบจำลอง Penman (1948) โดย Monteith (1965) ได้ตั้งข้อสมมติฐานว่าปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อความร้อนที่ใช้ในการระเหยน้ำ (latent heat) และ ความร้อนที่ใช้ในการเผาอากาศ (sensible heat) อันเป็นความแตกต่างกันระหว่างปัจจัยของโมเมนต์และปริมาณความร้อนในอัตราใดอัตราหนึ่ง โดยพิจารณาว่าการเกิดการคายระเหยน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยของดัชนีความต้านทานของพืชและความต้านทานของอากาศ ซึ่งในระบบปิดพืชจะคายน้ำได้นั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำน้ำในบรรยากาศ (atmospheric conductance, C_{at}) เป็นปัจจัยในการหาอัตราการระเหย ส่วนในระบบเปิดการคายระเหยน้ำของพืชยังขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำน้ำของเรือนยอด (canopy conductance) (Jensen *et al.*, 1990) ส่วน Dingman (2002) อธิบายว่าสามารถนำสมการความสามารถในการนำน้ำของเรือนยอดมาประยุกต์เพื่ออธิบายอัตราการคายระเหยน้ำของใบพืช จากพื้นที่ป่าหรือบริเวณที่ปกคลุมโดยพืชพรรณต่างๆ ได้ดังสมการที่ 15

$$ET = \frac{\Delta \cdot (K + L) + \rho_a \cdot c_a \cdot C_{at} \cdot e_a^* \cdot (1 - W_a)}{\rho_w \cdot \lambda_v \cdot [\Delta + \gamma \cdot (1 + C_{at} / C_{can})]} \quad (15)$$

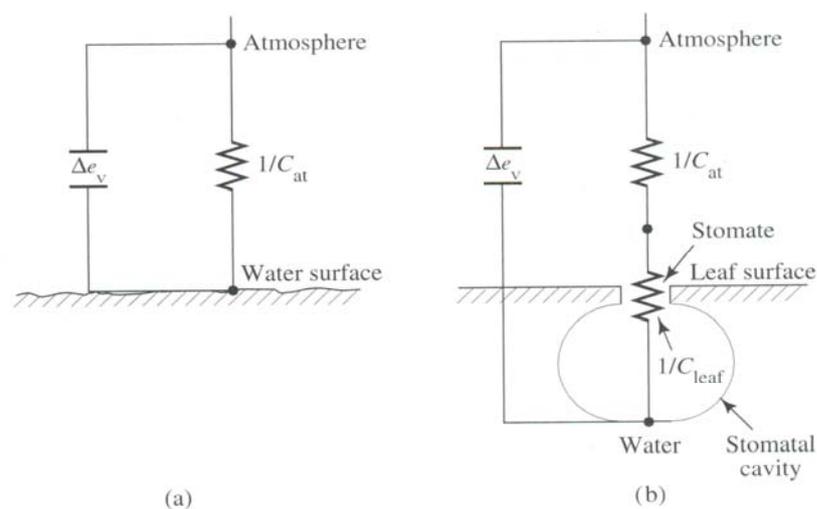
เมื่อ E คือ อัตราการระเหยน้ำ (มิลลิเมตรต่อวินาที)
 C_{can} คือ การนำน้ำของเรือนยอดพืช (มิลลิเมตรต่อวินาที)

จากสมการ พบว่า แบบจำลอง Penman-Monteith ได้ใช้หลักการว่า การเกิดการคายระเหยน้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยของดัชนีความต้านทานของพืช และความต้านทานของอากาศ จึงเป็นแบบจำลองที่ใช้ปัจจัยด้านพืชมาเกี่ยวข้อง ทำให้มีความถูกต้องและเป็นที่ยอมรับมากกว่าวิธีการประมาณค่าในวิธีอื่นๆ และแบบจำลองได้รวบรวมองค์ประกอบที่มีผลต่อการคายระเหยน้ำ ได้แก่ ปัจจัยของรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นของอากาศ ความเร็วลม และความชื้นในดิน โดยที่ใบพืชจะสูญเสียน้ำในรูปของการคายระเหยน้ำใน 2 ลักษณะ (Dingman, 2002) คือ

1) สูญเสียน้ำจากปากใบพืช เป็นปริมาณน้ำที่สูญเสียผ่านปากใบพืช (stomata) ซึ่งพืชจะคายน้ำเพื่อรักษาสมดุลของพืชไว้ การคายน้ำของพืชจะมีปริมาณมากน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความสามารถในการนำน้ำของปากใบพืช (stomatal conductance)

2) สูญเสียน้ำจากปริมาณน้ำที่ระเหยจากพื้นที่ผิวใบ โดยน้ำในส่วนนี้จะเป็นปริมาณน้ำที่ถูกเก็บกักไว้โดยใบพืช หรือเรียกว่าน้ำพืชยึด (interception) เมื่อน้ำตกค้างอยู่บริเวณผิวใบ และจะระเหยออกไปในรูปของไอน้ำ

ดังนั้นในระบบเปิดการคายระเหยน้ำจึงต้องพิจารณาความสามารถในการชักนำปากใบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในบรรยากาศ กับปริมาณน้ำในใบพืช (ภาพที่ 2) ซึ่งค่าความสามารถในการนำน้ำของใบ มีสมการแสดงความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 16



ภาพที่ 2 แนวความคิดของแบบจำลอง Penman-Monteith (a) การระเหยน้ำ (b) การคายระเหยน้ำ
ที่มา: Dingman (2002)

$$C_{leaf} = C_{leaf}^* \cdot f_K(K_{in}) \cdot f_\rho(\Delta\rho_v) \cdot f_T(T_a) \cdot f_\theta(\Delta\theta) \quad (16)$$

เมื่อ	C_{leaf}	คือ	ความสามารถในการนำน้ำของใบ (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
	C_{leaf}^*	คือ	ความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบ (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
	K_{in}	คือ	พลังงานรังสีตกกระทบคลื่นสั้น (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
	$\Delta\rho_v$	คือ	ความชื้นในอากาศที่ห่างจากความอิ่มตัว (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)
	T_a	คือ	อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)
	$\Delta\theta$	คือ	ความชื้นในดินที่ห่างจากความอิ่มตัว (มิลลิเมตร)

โดยที่ f เป็นอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีความสัมพันธ์กับความสามารถในการนำน้ำของใบพืช (leaf conductance) สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) พลังงานรังสีตกกระทบคลื่นสั้น (incident shortwave radiation flux, K_{in}) เมื่อ K_{in} มีค่าเพิ่มขึ้น จะส่งผลต่อพลังงานที่ตกลงบนใบพืชเพิ่มขึ้น ดังนั้นการคายระเหยน้ำจะมากขึ้น เพราะกิจกรรมในการสังเคราะห์ด้วยแสงมีมากขึ้น เนื่องจากที่พลังงานรังสีตกกระทบคลื่นสั้น เป็นพลังงานที่พืชใช้ในกิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสง

2) ความชื้นในอากาศที่ห่างจากความอิ่มตัว (humidity deficit) เมื่อความชื้นในอากาศยังมีน้อยความสามารถในการคายระเหยน้ำจะมีมาก เพราะมีช่องว่างในบรรยากาศอยู่มาก ทำให้สามารถรับปริมาณไอน้ำจากการคายระเหยได้มากขึ้น จนกระทั่งอากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น การคายระเหยน้ำจะลดลง และเมื่ออากาศมีความชื้นสูงสุดจนถึงจุดอิ่มตัวการคายระเหยน้ำจะยุติลง

3) อุณหภูมิอากาศ (air temperature) เมื่ออุณหภูมิต่ำจะมีการคายระเหยน้ำได้น้อย โดยที่ระดับอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียสจะไม่มีการคายระเหยเกิดขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการคายระเหยน้ำจะเพิ่มขึ้น และเพิ่มขึ้นสูงสุดที่อุณหภูมิประมาณ 17-22 องศาเซลเซียส และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจากจุดนี้การคายระเหยน้ำจะลดลง เนื่องจากพืชจะรักษาอุณหภูมิในใบพืชไว้ให้เหมาะสมต่อกิจกรรมต่างๆ ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิต่ำหรือสูงเกินไปพืชจะคายน้ำได้น้อย

4) ความชื้นในดินที่ห่างจากความอิ่มตัว (soil moisture deficit) ดินที่มีความชื้นภายในดินน้อย จะมีค่าการคายระเหยที่น้อยเพราะเมื่อมีปริมาณความชื้นในดินน้อยรากพืชดูดซึมน้ำได้น้อยลง พืชจึงคายน้ำได้น้อย ส่วนดินที่มีปริมาณความชื้นในดินมาก การคายระเหยน้ำจะมากกว่า เพราะมีปริมาณน้ำในดินที่เพียงพอต่อการใช้ประโยชน์ของพืช

ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อม กับความผันแปรของค่าการนำน้ำของใบพืช (leaf conductance) ดังสมการที่ 16 ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น สามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากตารางที่ 7-6 ใน Dingmann (2002) หรือผลการศึกษาของ Stewart (1988)

ใบพืช 1 ใบจะมีจำนวนปากใบอยู่มาก เมื่อนำค่าการชักนำปากใบพืชหรือค่าการนำน้ำของปากใบพืช (stomata conductance) ทั้งหมดมารวมกันจะได้ค่าการนำน้ำของใบพืช

(leaf conductance) สามารถหาได้จากอัตราส่วนของจำนวนปากใบพืชต่อพื้นที่ใบพืช โดยขึ้นอยู่กับขนาดของปากใบ และการเปิดปิดของปากใบ ซึ่งจำนวนปากใบของพืชมีจำนวนระหว่าง 10,000–100,000 ปากใบต่อตารางเซนติเมตร ของพื้นที่ผิวใบพืช 1 ใบ (Hewlett, 1982) โดยความสามารถในการนำน้ำของใบ จะขึ้นอยู่กับปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นในบรรยากาศ และความชื้นในดิน ในธรรมชาติเรือนยอดของพืชพรรณเช่น ป่าไม้ ทุ่งหญ้า และพื้นที่เกษตร มีปริมาณใบมากมายจึงไม่สะดวกในการคิดความสามารถในการนำน้ำของใบพืช ดังนั้นค่าการนำน้ำของพืช จึงอธิบายได้โดยการตั้งสมมติฐานว่า พื้นที่ผิวของพืชพรรณเปรียบเสมือนใบไม้ 1 ใบ (big leaf) ซึ่งเป็นผลรวมของค่าการนำน้ำ (conductance) ทั้งหมด เรียกว่า ค่าการนำน้ำของเรือนยอด (canopy conductance) โดยขนาดของเรือนยอดแสดงด้วยค่าดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index, LAI) ซึ่งหาได้จากพื้นที่ทั้งหมดของพื้นที่ผิวใบพืชเหนือพื้นดินต่อพื้นที่ปกคลุมของเรือนยอด (Dingman, 2002) มีสมการดังนี้

$$LAI = \frac{\text{Total area of leaf surface above ground area}}{\text{Area}} \quad (17)$$

ค่าการนำน้ำของเรือนยอดสามารถหาได้จากสมการที่ 18

$$C_{can} = f_s \cdot LAI \cdot C_{leaf} \quad (18)$$

เมื่อ C_{can} คือ ความสามารถในการนำน้ำของเรือนยอด (มิลลิเมตรต่อวินาที)
 LAI คือ ดัชนีพื้นที่ผิวใบ
 f_s คือ สัมประสิทธิ์พื้นที่ใบที่ไม่ได้รับแสง หรือเรียกว่าสัดส่วนร่มเงา

แบบจำลอง Penman-Monteith สามารถปรับเทียบบางปัจจัยให้เหมาะสมกับพื้นที่ได้แก่ ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index, LAI) ความหยาบของพื้นผิว (zero plant displacement) และ สัดส่วนร่มเงา (shelter factor) ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยนี้จะเปลี่ยนแปลงตามพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินในรูปแบบต่างๆ โดยที่ดัชนีพื้นที่ใบพืชสามารถหาได้จากสมการที่ 17 หากค่าดัชนีพื้นที่ใบมีค่ามาก แสดงว่ามีปริมาณการปกคลุมของพืชสูง ส่วนความหยาบของพื้นผิว คือปัจจัยที่แสดงถึงความหยาบของพื้นผิวเรือนยอดพืชใช้ในการประมาณค่าความสามารถในการนำน้ำของบรรยากาศ ดังสมการที่ 14 โดยที่ d คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Z_d และ 0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของ Z_0 ถ้าหากค่าสัมประสิทธิ์ d มีค่าต่ำ และค่าสัมประสิทธิ์ 0 มีค่าสูง แสดงว่าพืชมีค่าความหยาบของพื้นผิวที่ค่อนข้างสูง เช่น พื้นที่ป่าธรรมชาติ หากค่า d มีค่าสูง และค่า 0 มีค่าต่ำ แสดงว่าความหยาบ

ของพืชมีค่าต่ำ เช่น พืชสวนป่าชั้นอายุเดียว หรือพืชเกษตร ซึ่งค่าความหยาบของพื้นผิวเป็นส่วนหนึ่งในการหาค่าความสามารถในการนำน้ำของบรรยากาศในสมการที่ 15 ส่วนค่าสัดส่วนร่วมเงาคือปัจจัยที่ใช้ในการหาค่าการนำน้ำของเรือนยอดพืชในสมการที่ 18 โดยที่การคายน้ำของใบพืชในแต่ละใบจะแตกต่างกัน เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากเงาของพืชที่ถูกลบบัง หากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าการคายน้ำของพืชมีค่าสูง เนื่องจากได้รับแสงอย่างเต็มที่ และหากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าพืชมีการคายน้ำที่น้อย เนื่องจากเกิดร่มเงา หรือถูกลบบังมากทำให้พืชรับแสงได้น้อย

แบบจำลอง Penman-Monteith มีความถูกต้องค่อนข้างสูงจึงเป็นที่นิยมใช้ในการศึกษาการคายระเหยน้ำในพื้นที่ต่างๆ จากการศึกษาของ พันทิพย์ (2542) ซึ่งเปรียบเทียบอัตราการคายระเหยน้ำของพืชที่คำนวณได้จากแบบจำลองต่างๆ กับค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดได้จากถังวัดการใช้น้ำของพืช (lysimeter) ของสถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม พบว่า แบบจำลอง Penman-Monteith ประเมินค่าการคายระเหยน้ำใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จาก lysimeter มากที่สุด รองมาได้แก่ FAO-Penman และ Penman (1963) ตามลำดับ เช่นเดียวกับการศึกษาของ ทนงศักดิ์ (2545) ที่เปรียบเทียบค่าการคายระเหยน้ำของพืชโดยวิธี Penman-Monteith และวิธี Penman Modified กับ lysimeter พบว่า วิธี Penman-Monteith มีค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square error, RMSE) เป็น 0.17 ส่วนวิธี Penman-Modified มีค่า RMSE เป็น 1.05 ดังนั้นแบบจำลอง Penman-Monteith จึงมีความเหมาะสมที่ใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำเพราะมีค่าการคายระเหยที่ใกล้กับวิธี lysimeter

นอกจากจะใช้แบบจำลอง Penman-Monteith ในการศึกษาการคายระเหยน้ำยังสามารถปรับปรุงให้แบบจำลอง มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น ดังตัวอย่างการศึกษาของ Sumner (1996) ทำการศึกษาการคายระเหยน้ำของพืชในพื้นที่ป่าที่ถูกทำลายที่ทะเลสาบ Wales Ridge รัฐ Florida ประมาณค่าการคายระเหยน้ำโดยวิธี Penman-Monteith และวิธี Penman โดยใช้วิธี Eddy-Correlation ตรวจวัดค่าการคายระเหยน้ำจริง เพื่อนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์ผลต่างและความคลาดเคลื่อนกับการประมาณค่า และปรับแก้ความถูกต้องของแบบจำลอง โดยทำการปรับปรุง Penman-Monteith ด้วยการปรับเทียบค่าสหสัมพันธ์ กับการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy-Correlation เพื่อหาค่าความต้านทานของเรือนยอดพืช (canopy resistance) และเปรียบเทียบความถูกต้องของ Penman-Monteith ดั้งเดิม และปรับปรุงใหม่ จากผลการศึกษาพบว่า Penman-Monteith ที่ปรับปรุงขึ้นมีความถูกต้องมากกว่า มีค่าสหสัมพันธ์ดีกว่าสูตรดั้งเดิม เช่นเดียวกับ Kimak *et al.* (2001) ทำการศึกษาการประเมินการคายระเหยน้ำจากแบบจำลอง Physically Based และแบบจำลอง Empirically

Based สำหรับเรือนเพาะชำที่ Ohio ทำการศึกษาต้น Red maple ในช่วงเดือนสิงหาคมถึงเดือนกันยายน แบบจำลองที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ แบบจำลอง Penman-Monteith, Penman modified, Stanghellini และ Fynn ทำการเปรียบเทียบค่าการคายระเหยน้ำที่ประมาณค่าได้จาก lysimeter พบว่าแบบจำลองมีความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยเป็น 15.00, 31.00, 19.74 และ 16.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองที่สามารถประมาณค่าได้แม่นยำใกล้เคียงกับ lysimeter และมีค่าสหสัมพันธ์มากที่สุดคือ แบบจำลอง Penman-Monteith

2. การชักนำปากใบพืช (Stomatal Conductance)

2.1 ปากใบพืช

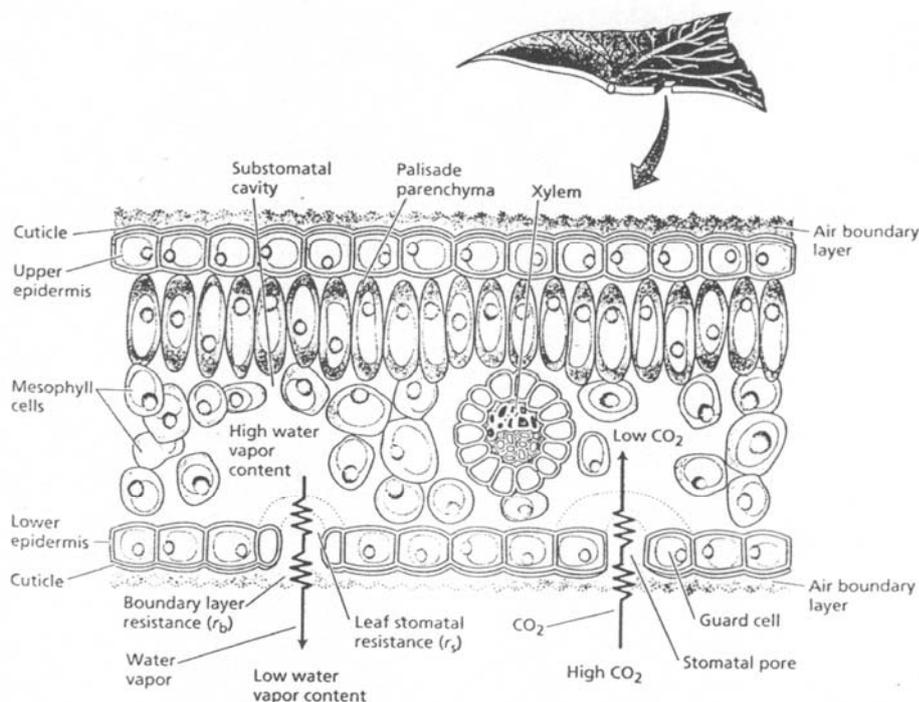
ปากใบ (stomata) เป็นส่วนของเซลล์ผิว (epidermis) ที่เปลี่ยนไป ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนก๊าซและคายน้ำ ประกอบด้วยเซลล์คุม (guard cell) 2 เซลล์ มีลักษณะพิเศษกว่าเซลล์ผิวทั่วไปตรงที่เซลล์คุมมีคลอโรพลาสต์ (chloroplast) จึงสามารถสังเคราะห์ด้วยแสงได้ เซลล์คุมทั้งสองนี้จะอยู่ติดกัน โดยด้านที่ติดกันจะมีผนังหนา บริเวณระหว่างเซลล์คุมทั้งสองจะมีปากใบ เมื่อเซลล์คุมอยู่ในสภาพที่ขาดน้ำ ขนาดของปากใบจะแคบหรือปิดทำให้น้ำไม่สามารถระเหยออกทางปากใบได้ แต่สภาพที่มีน้ำเพียงพอจะทำให้เซลล์คุมเกิดการขยายตัวผนังเซลล์ด้านที่บางจะขยายตัวและยึดตัวออกได้มากกว่า จึงเกิดแรงดึงให้ผนังด้านในที่หนาโค้งเข้า เป็นเหตุให้ปากใบเปิด ในสภาพเช่นนี้น้ำจะสามารถระเหยออกทางปากใบได้ (สมบุญ, 2544)

การเปิด-ปิดของปากใบถูกควบคุมโดยความเต่งของเซลล์ ปากใบจะเปิดเมื่อเซลล์คุมเต่งและจะปิดเมื่อเซลล์คุมแฟบ ซึ่งเซลล์คุมจะตอบสนองต่อปัจจัยสภาพแวดล้อมทั้งภายใน ได้แก่ กระบวนการทางชีวเคมีของพืช และภายนอก ได้แก่ แสง ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ เป็นต้น โดยปกติในพืชทั่วไปปากใบจะปิดในเวลากลางคืน และเปิดเมื่อได้รับแสงในตอนเช้า ในวันที่อากาศร้อนอุณหภูมิสูงพืชได้รับแสงแดดมาก ใบของพืชหรือเซลล์สัมผัสอากาศโดยตรงจะสูญเสียตัวอย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นอันตรายต่อพืชได้ พืชมีการป้องกันการสูญเสียน้ำโดยสร้างไขหรือคิวทิน (cutin) เคลือบผิวใบและลำต้น เรียกว่าชั้นคิวทิเคิล (cuticle) ในลำต้นที่อายุมากพืชจะสร้างสารซูเบอร์รินในชั้นของคอร์กป้องกันการระเหยน้ำ ดังนั้นการคายน้ำของพืชส่วนใหญ่จะเกิดที่ช่องปากใบ (stomatal pore) การที่พืชเปิดปากใบในเวลากลางวันทำให้พืชคายน้ำได้มาก และเมื่อสภาพแวดล้อมวิกฤตจริงๆ พืชก็อาจปิดปากใบได้ ถึงแม้ว่าจะเป็นเวลากลางวัน โดยเฉพาะเวลาเที่ยงหรือบ่าย

2.2 การชักนำปากใบพืช (Stomatal Conductance)

การชักนำปากใบพืช หรือความสามารถในการนำน้ำของปากใบ (stomatal conductance) หมายถึง สมบัติของพืชเกี่ยวกับความง่ายของไอน้ำซึ่งหลุดพ้นจากใบพืชโดยผ่านช่องเล็กในปากใบพืช ซึ่งมีความหมายตรงกับภาษาอังกฤษว่า “A plant property related to the ease with which water vapor escapes from plant leaves through small pores in the leaves known as stomata” (Huxman and Smith, 2001) สำหรับความต้านทานของปากใบพืช (stomatal resistance) จะมีความหมายในทางตรงกันข้ามกับค่าการชักนำของปากใบพืชคือสมบัติของพืชเกี่ยวกับความยากของไอน้ำซึ่งหลุดพ้นจากใบพืชโดยผ่านช่องเล็กในปากใบพืช (ภาพที่ 3) โดยความต้านทานปากใบพืชเป็นสัดส่วนผกผันกับค่าการชักนำปากใบพืช เมื่อค่าต้านทานของปากใบมากแสดงว่าพืชมีค่าการชักนำปากใบที่ต่ำ ทำให้อัตราการคายน้ำของพืชต่ำหรือปากใบพืชอาจปิดได้ หากมีค่าความต้านทานปากใบพืชต่ำค่าการชักนำของปากใบพืชจะสูง ปากใบพืชจะเปิดและปลดปล่อยไอน้ำออกมาสู่บรรยากาศ พืชจึงมีอัตราการคายน้ำมาก ดังนั้นการปิดเปิดของปากใบพืชมีอิทธิพลต่อความต้านทานและการชักนำของปากใบพืชเป็น อย่างมาก ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้มีอิทธิพลโดยตรงกับการคายน้ำของพืชจากกล่าวได้ว่าพืชจะคายน้ำได้มากน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับค่าการชักนำปากใบพืช

การสูญเสียน้ำของพืชเกิดขึ้นได้จากทางปากใบ ทางผิวของลำต้น และการสูญเสียน้ำทางรอยแตกตามลำต้น แต่การสูญเสียน้ำที่มีบทบาทสำคัญต่อพืชมากที่สุดคือการคายน้ำที่เกิดขึ้นทางปากใบ เพราะการสูญเสียในลักษณะนี้มีปริมาณมากที่สุด (Bidwell, 1980; Devlin, 1990) โดยปริมาณน้ำที่พืชนำมาใช้ในกระบวนการชีวเคมีจะมีค่าประมาณ 5 ถึง 10 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณน้ำทั้งหมดที่พืชดูดขึ้นมา ซึ่งปริมาณน้ำส่วนใหญ่ที่เหลือจากกระบวนการต่างๆจะสูญเสียไปในรูปของการคายน้ำ (Devlin, 1990; Kramer and Kozlowski, 1979) ดังนั้นพืชที่มีการสูญเสียน้ำหรือพืชที่มีอัตราการคายน้ำต่ำ เป็นพืชที่มีความต้องการใช้น้ำในปริมาณน้อย และมีความสามารถในการมีชีวิตอยู่รอดได้ในสภาพแห้งแล้ง



ภาพที่ 3 ความต้านทานของปากใบพืชต่อการแลกเปลี่ยนก๊าซ และไอน้ำระหว่างพืชกับสิ่งแวดล้อม ที่มา: Zeiger (1983)

Yamashita (1952); Fujino (1967); Fischer (1968) อธิบายว่าปัจจัยที่มีผลต่อการชักนำปากใบพืช นอกจากจะมีปัจจัยภายใน อันได้แก่ ปัจจัยด้านความดันอากาศ พิเอช และการเคลื่อนย้ายไอออนแล้ว ปากใบพืชยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยสิ่งแวดล้อม ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแลกเปลี่ยนไอออน และพิเอชในเซลล์ ดังนั้นปากใบพืชจะได้รับอิทธิพลของปัจจัยทางด้านสรีระของพืช และด้านปัจจัยสิ่งแวดล้อมซึ่งแบ่งได้เป็น 6 ปัจจัย คือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetically active radiation, PAR), ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์พืช (intercellular CO₂ concentration), อุณหภูมิใบพืช (leaf temperature), ความชื้นสัมพัทธ์หรือความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว (relative humidity or vapor pressure deficit), ศักย์ของน้ำในดิน (soil water potential) และ ศักย์ของน้ำในใบพืช (leaf water potential) ซึ่งมีรายละเอียด ดังต่อไปนี้

2.2.1 ปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง เป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชักนำปากใบพืชเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากพืชใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการสังเคราะห์ด้วยแสง และกระบวนการหายใจ ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญมีอิทธิพลอย่างยิ่งต่อการเปิด-ปิดปากใบ และการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ระหว่างพืชกับบรรยากาศ Zeiger (1983) ศึกษาอิทธิพล

ของรังสีดวงอาทิตย์ต่อเซลล์คุม พบว่าเซลล์คุมที่ได้รับแสง จะทำการสังเคราะห์ด้วยแสง และเมื่อมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่เพิ่มมากขึ้น เซลล์คุมจะเต่ง ทำให้ปากใบพืชเปิด มีการแลกเปลี่ยนก๊าซในใบพืชกับบรรยากาศ เมื่อมีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่สูงมาก ปากใบจะปิด ซึ่งพบว่าพืชตอบสนองต่อแสงในช่วงสีน้ำเงิน (blue light) ได้มากกว่าแสงในช่วงคลื่นอื่น

2.2.2 ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์ เมื่อความดันในเซลล์คุมลดลง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์คุมจะเพิ่มขึ้น Mansfield *et al.* (1990) อธิบายว่า ปฏิกริยาระหว่างก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำมีผลทำให้พีเอชเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลผลิตจากปฏิกิริยาได้กรดคาร์บอกซิลิก (HCO_3^-) และ ไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น (H^+) มีผลทำให้เซลล์คุมเหี่ยวเพราะสูญเสียน้ำจากการทำปฏิกิริยาปากใบพืชจึงปิดเพื่อรักษาค่าพีเอชให้สมดุลน้ำที่อยู่รอบเซลล์คุมจะแพร่เข้ามาทำให้เซลล์คุมเต่งและปากใบจึงเปิดออก และปลดปล่อยไอน้ำออกมา

2.2.3 อุณหภูมิใบพืช มีอิทธิพลต่อกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงในเซลล์คุม เนื่องจากคลอโรพลาสต์ในเซลล์คุมได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของระดับโพแทสเซียมไอออน (K^+) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความดันและพีเอชในเซลล์คุม พืชแต่ละชนิดมีระดับของอุณหภูมิที่เหมาะสม (optimum temperature) แตกต่างกัน จากการศึกษาพบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการหายใจของพืช ประมาณ 35-45 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมของพืชจะทำให้การทำงานของ เอนไซม์ (enzyme) เป็นปกติด้วย นอกจากนี้อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อความดันในเซลล์คุม อัตราการหายใจของพืช กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง รวมถึงมีผลต่อความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์คุมด้วย (Zeiger, 1983)

2.2.4 ความชื้นสัมพัทธ์หรือความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว Schulze (1986) อธิบายว่าในสภาวะที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัวมีค่าสูง การชักนำปากใบพืชจะมีค่าสูง ทำให้เกิดการคายน้ำที่มาก ทั้งนี้ต้องขึ้นกับศักย์ของน้ำในใบพืชและความสามารถในการดูดซึมและเคลื่อนย้ายน้ำจากรากพืชสู่ใบ ในขณะเดียวกันหากมีความชื้นในบรรยากาศที่มาก ค่าการชักนำปากใบพืชจะต่ำการคายน้ำของพืชจะลดลงเช่นกัน

2.2.5 ศักย์ของน้ำในดินและในใบพืช (soil water potential and leaf water potential) ปากใบพืชจะปิดเมื่อความชื้นในดินมีน้อยไม่เพียงพอต่อการคายน้ำ เนื่องจากศักย์ของน้ำในดินจะมีผลต่อศักย์ของน้ำในใบพืช ทำให้มีผลต่อความดันในเซลล์คุม และความเข้มข้นของก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์คุมอีกด้วย หากมีปริมาณน้ำที่เพียงพอต่อการคายน้ำ ค่าการชักนำปากใบพืชจะมีค่าสูง และปากใบพืชจะเปิดออก อัตราการคายน้ำจะเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกันหากปริมาณน้ำในดินไม่เพียงพอต่อการคายน้ำของพืชค่าการชักนำปากใบพืชจะต่ำ ปากใบพืชจะปิด และอัตราการคายน้ำจะลดลง โดยเซลล์คุมจะได้รับการกระตุ้นจากฮอร์โมนพืช abscisic acid (ABA) และ cytokinin เมื่อระดับพีเอชเปลี่ยนแปลงหรือระดับน้ำในใบพืชเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อการกระจายของ ABA และสารละลายอื่นๆ โดย cytokinin จะเหนี่ยวนำให้ปากใบเปิดออกเพื่อปลดปล่อยไอน้ำ และสารละลายออกไปเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายในใบพืช เพื่อให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการต่างๆ นักสรีรวิทยาอธิบายว่าเป็นการชักนำการเปิด-ปิดปากใบพืชโดยฮอร์โมนที่มีปฏิกิริยาที่สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำในเซลล์คุม (Sharkey, 1984; Schulze, 1986)

2.3 แบบจำลองประมาณค่าการชักนำปากใบพืช

พืชจะคายน้ำได้มากน้อยแตกต่างกันขึ้นอยู่กับ การชักนำปากใบพืชหรือความต้านทานของปากใบพืช ดังนั้นค่าการชักนำปากใบพืชจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้บอกถึงความสามารถในการคายน้ำ การชักนำปากใบพืชมีการศึกษาโดยนักสรีรวิทยาพืชและนักการเกษตรมาเป็นระยะเวลานาน เริ่มตั้งแต่การปลูกพืชในกระถางแล้วชั่งน้ำหนัก จนพัฒนามาถึงการใช้แบบจำลองเข้ามาอธิบายถึงกระบวนการต่างๆ แบบจำลองการชักนำปากใบพืชมีการศึกษาในหลายระดับ ตั้งแต่ระดับเล็ก คือระดับใบพืช ระดับเรือนยอด จนถึงระดับใหญ่ในระดับพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่ง Suzuki (1991); Baldocchi (2003b) ได้อธิบายว่าสามารถจำแนกแบบจำลองการชักนำปากใบพืชออกเป็น 4 ประเภท ได้แก่

2.3.1 แบบจำลองแนวความคิด (Conceptual Model)

หลักการของแบบจำลองแนวความคิดเริ่มจากการสมมติให้ใบไม้เปรียบเสมือนถังน้ำที่มีน้ำอยู่ในถัง โดยใช้หลักการแพร่ของน้ำจากผิวหน้าการระเหยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งทำการศึกษาว่าในแต่ละพื้นที่หน้าตัดมีค่าการนำน้ำจากปากใบพืชเป็นเท่าใด Kondo (1982) ได้ทำการทดลองโดยใช้ภาชนะทรงกระบอก (cylinder) ศึกษาอัตราการแพร่ของน้ำหรืออัตราการระเหยของน้ำมาใช้เป็นหลักการว่าใบพืชเหมือนภาชนะทรงกระบอกมีความลึก ซึ่งเปรียบเป็นขนาดของใบพืช และพื้นที่หน้าตัดของภาชนะทรงกระบอกเปรียบเป็นขนาดความกว้างของเนื้อเยื่อปากใบพืช ซึ่งความกว้างของปากใบแตกต่างกันไปในแต่ละชนิดของพืช พืชที่มีปากใบใหญ่จะมีการนำน้ำมาก และมีค่าการคายน้ำที่มากกว่าปากใบขนาดเล็ก ต่อมา Brown and Davies (1900) ได้ปรับปรุง

เพิ่มเติมโดยเพิ่มปัจจัยความเร็วลม ซึ่งอธิบายว่าเมื่อไอน้ำแพร่ผ่านเซลล์คุม และออกมาสู่ภายนอก รอบๆ ปากใบ และผิวใบพืชในชั้น laminar layer ในการศึกษาระยะแรกได้ใช้ปัจจัยความเร็วลม และขนาดของรูปากใบ พบว่ามีความยุ่งยากในการวัดขนาดของปากใบพืชเป็นอย่างมาก ยิ่งเมื่อนำไปศึกษาในพื้นที่ต่างๆ ยังขาดความถูกต้อง เนื่องจากในแต่ละพื้นที่ศึกษามีความแตกต่างทางสภาพภูมิประเทศ และสรีรวิทยาของพืชแต่ละชนิด ดังนั้นในช่วงแรกของการศึกษานี้จึงเป็นการศึกษาในแนวความคิดที่ยากจะนำไปใช้ในพื้นที่ศึกษาจริง

2.3.2 แบบจำลองย่อยของแบบจำลองการสังเคราะห์ด้วยแสงของพืช (Sub Model in Photosynthesis Model)

แบบจำลองนี้เป็นส่วนย่อยของแบบจำลองการสังเคราะห์ด้วยแสง โดยเป็นส่วนหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง ปัจจัยที่ใช้ในการศึกษาการประมาณค่าการชักนำปากใบพืช คือ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในใบพืช เพราะใบพืชไม่ได้แลกเปลี่ยนไอน้ำกับบรรยากาศเพียงอย่างเดียว และกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงก็ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในกระบวนการ Baldoocchi (2003b) อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานของปากใบพืช (stomatal resistance) กับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในใบพืช พบว่าเมื่อความต้านทานของปากใบพืชเพิ่มขึ้นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะมีค่าลดลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ Fisher and Edward (1981) ซึ่งใช้ความสัมพันธ์ระหว่างศักย์ของน้ำในใบพืช กับค่าการชักนำปากใบพืช ต่อมาได้มีการพัฒนาการศึกษาด้านแบบจำลองการสังเคราะห์ด้วยแสง โดย (Ball *et al.*, 1991) พัฒนาแบบจำลองโดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นของอัตราการสังเคราะห์ด้วยแสง ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในใบพืช และความชื้นสัมพัทธ์ ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน

2.3.3 แบบจำลองระยะเวลา (Time Functional Model)

แบบจำลองนี้ใช้ช่วงเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งแบบจำลองแนวความคิด และแบบจำลองย่อยของแบบจำลองการสังเคราะห์ด้วยแสง ไม่ได้ใช้ระยะเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง จึงสามารถประมาณค่าการชักนำปากใบพืชในช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่งเท่านั้น แต่แบบจำลองด้านระยะเวลาจะใช้เวลาเข้ามาเกี่ยวข้องทั้งในระดับรายวัน รายเดือน และรายฤดูกาล หรือในรอบระยะเวลา 1 ปี ทำให้สามารถหาค่าการชักนำปากใบพืชในแต่ละช่วงเวลาได้ Stewart (1988); Gash *et al.*

(1989); Dolman *et al.* (1991) ทำการศึกษาปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ ความชื้นสัมพัทธ์ และอุณหภูมิ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการชักนำเรือนยอดพืช (canopy conductance) ในช่วงเวลา 1 วัน เมื่อพิจารณาในระดับเรือนยอดพืช จึงเพิ่มปัจจัยดัชนีพื้นที่ผิวใบมาใช้ในการประเมินค่าด้วย เนื่องจากศึกษาการชักนำปากใบพืชเป็นการศึกษาในระดับใบเท่านั้น ซึ่งพืช 1 ต้นมีใบจำนวนมากมาย ดังนั้นจึงต้องใช้ปัจจัยดัชนีพื้นที่ใบเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยทำการศึกษาในพื้นที่ป่าไม้ที่รัฐเซดฟอร์ด ประเทศอังกฤษ, เลสแลนด์ ประเทศฝรั่งเศส และในป่าดิบชื้นบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำอเมซอน ซึ่งทั้งสามพื้นที่จะใช้เป็นพื้นที่ในการเก็บข้อมูลเพื่อนำมาปรับแก้ความถูกต้องของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่ได้มีความถูกต้องสูงในการศึกษาค่าการนำน้ำของเรือนยอดพืช ต่อมา Shuttleworth (1988) ได้เพิ่มปัจจัยศักย์ของน้ำในดิน (soil water potential) ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในแต่ละฤดูกาล ของค่าการนำน้ำของเรือนยอดพืช ในพื้นที่ลุ่มน้ำอเมซอน Rampisela *et al.* (1990); Suzuki (1991) ได้เพิ่มปัจจัยความดันไอน้ำที่ห่างจากความอึดตัว (vapor pressure deficit) เพื่อประมาณค่าความต้านทานของเรือนยอด (canopy resistance) ในรายวันและในฤดูกาล ของพื้นที่ลุ่มน้ำเกอยู (Kiryu) ประเทศญี่ปุ่น พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบกับ อิทธิพลของพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำ (latent heat flux) ต่อการเคลื่อนที่ของน้ำในลำต้น (sap flow) และอัตราการคายน้ำของพืช

ข้อดีของแบบจำลองระยะเวลา (time functional model) คือ ง่ายต่อความเข้าใจ ไม่ซับซ้อน และสามารถประเมินค่าการชักนำปากใบพืช ในแต่ละระยะเวลาทำให้เห็นการเปลี่ยนแปลงในรายวัน และรายฤดูกาลได้ดี นิยมใช้ในการศึกษาอัตราการคายระเหยน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ เพราะถึงแม้ผู้วิจัยขาดองค์ความรู้และข้อมูลด้านสรีรวิทยาของพืช ก็สามารถทำการศึกษาค่าการชักนำปากใบพืชได้ และมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดในพื้นที่ศึกษา

2.3.4 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงปัจจัยสิ่งแวดล้อม (Environmental Variable Model)

แบบจำลองใช้หลักปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการชักนำปากใบพืช ได้แก่ รังสีดวงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอึดตัว ศักย์ของน้ำในดิน และความเข้มข้นของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂ concentration) ปัจจัยเหล่านี้ จะถูกเลือกนำมาศึกษาในระดับใบพืช และในระดับเรือนยอด โดยเริ่มจากการตรวจวัดค่าการชักนำปากใบพืชและนำไปหาความสัมพันธ์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อม หลักการของแบบจำลองคือทำการตรวจวัดค่าการชักนำปากใบพืชในระดับใบพืช แล้วนำมาปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์กับค่าชักนำปากใบพืชที่คำนวณได้จาก

แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับการชักนำปากใบพืชที่ได้ทำการคิดค้นขึ้นมีลักษณะความสัมพันธ์จะอยู่ในรูปสมการเส้นโค้งจากวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (non linear least square) เพื่อประมาณค่าการชักนำปากใบพืช โดยแบบจำลองจะสมมติว่าเรือนยอดพืช (canopy) คือใบไม้ 1 ใบ เนื่องจากเรือนยอดของพืชพรรณเช่น ป่าไม้ ทุ่งหญ้า และพื้นที่เกษตร ในความเป็นจริงมีปริมาณใบมากมายจึงไม่สะดวกในการประมาณค่าความสามารถในการนำน้ำของใบ ดังนั้นค่าการนำน้ำของใบ สามารถอธิบายได้โดยการตั้งสมมติฐานว่าพื้นที่ผิวของพืชพรรณเปรียบเสมือนใบไม้ 1 ใบ เรียกว่า “big leaf” ซึ่งเป็นผลรวมของค่าการนำน้ำ (conductance) ในพื้นที่ทั้งหมด ขนาดของ “big leaf” แสดงโดยค่าดัชนีพื้นที่ใบ ต่อมาหลักการนี้ได้ประยุกต์ใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของพืช ด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith (Jarvis, 1976)

แบบจำลอง Penman-Monteith ในส่วนของสมการประมาณค่าการนำน้ำของใบพืช ใช้ปัจจัยในสมการเช่นเดียวกับแบบจำลอง Jarvis แต่แนวทางการศึกษาเพื่อให้ได้มา ซึ่งผลในแต่ละปัจจัยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน Lhomme *et al.* (1995) ทำการศึกษาการนำน้ำของเรือนยอดพืช (canopy conductance) โดยวิธี Penman-Monteith จากการศึกษา พบว่า โดยพื้นฐานของแนวความคิดใกล้เคียงกับแบบจำลอง Jarvis การศึกษาปัจจัยความต้านทานเรือนยอดพืช วิธี Jarvis Model มีเพียง 2 ปัจจัย ที่มีการคำนวณที่แตกต่างกับการศึกษาปัจจัยความต้านทานเรือนยอดพืชโดยวิธี Penman-Monteith คือปัจจัยความชื้นในดิน และ ปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ แต่เมื่อพิจารณา พบว่าถึงแม้จะใช้ปัจจัยในการคำนวณที่แตกต่างกัน แต่ผลลัพธ์ที่ได้เหมือนกัน ดังนั้นปัจจัยที่ใช้ในการประมาณค่าการนำน้ำของใบพืชโดยวิธี Penman-Monteith จึงคล้ายกับวิธีแบบจำลอง Jarvis และในทางทฤษฎี การประเมินค่าการนำน้ำของใบโดยวิธี Penman-Monteith เหมือนกับวิธี Jarvis Model

แบบจำลอง Jarvis เป็นแบบจำลองที่ใช้ในการประเมินค่าการนำน้ำของใบพืช ใช้ปัจจัยในการศึกษา ได้แก่ รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง, ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว, อุณหภูมิของอากาศหรืออุณหภูมิของใบ, ความชื้นในดินและ ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อเยื่อพืช (intercellular CO₂ concentration) (Jarvis, 1976) ดังสมการที่ 19

$$g_{sw} = g_{sw \max} \cdot f(Q) \cdot f(T) \cdot f(D) \cdot f(\theta_s) \cdot f(c_i) \quad (19)$$

เมื่อ g_{sw} คือ ค่าการชักนำปากใบพืช หรือค่าการนำน้ำของปากใบ (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)

$g_{sw\max}$	คือ	ค่าการชักนำปากใบพืชสูงสุด (โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
Q	คือ	รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)
T	คือ	อุณหภูมิอากาศ หรืออุณหภูมิใบ (องศาเซลเซียส)
D	คือ	ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว (กิโลปาสกาล)
θ_s	คือ	ความชื้นในดิน (มิลลิเมตร)
C_i	คือ	ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อเยื่อพืช (ไมโครโมลต่อตารางเมตรต่อวินาที)

ปัจจัยแต่ละปัจจัยจะอยู่ในรูปของสมการความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันตามลักษณะของกระบวนการทางอุทกวิทยา สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) $f(Q)$ อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (PAR) กับค่าการชักนำปากใบพืช สมการแสดงความสัมพันธ์ในรูปของ rectangular hyperbola โดยส่วนใหญ่กราฟลักษณะนี้จะถูกใช้แสดงถึงการสังเคราะห์ด้วยแสง (simple light-photosynthesis curve) ดังสมการที่ 20

$$g_{sw\max} \cdot f(Q) = \frac{g_{sw\max} \cdot f(Q)}{Q + g_{sw\max}/a} \quad (20)$$

จากสมการ Q คือ PAR ปัจจัยที่ไม่ทราบค่ามี 2 ปัจจัยได้แก่ $g_{sw\max}$ และ a โดย $g_{sw\max}$ แสดงถึงระดับที่กราฟคงที่ และ a คือค่าความลาดชันของกราฟ

2) $f(T)$ อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิของอากาศหรืออุณหภูมิของใบพืช กับค่าการชักนำปากใบพืช เป็นสมการที่คิดค้นโดย Sharpe and Spence (1987) ซึ่งได้นำเสนอถึงหลักการพลวัตความร้อน (thermo dynamic) ซึ่ง Jarvis (1976) นำมาประยุกต์ใช้ ดังสมการที่ 21

$$f(T) = \left(\frac{T - T_n}{T_o - T_n} \right) \cdot \left\{ \left(\frac{T_x - T}{T_x - T_o} \right)^{\frac{T_x - T_o}{T_o - T_x}} \right\} \quad (21)$$

จากสมการ T คือ อุณหภูมิของอากาศหรืออุณหภูมิของใบพืช ปัจจัยที่ไม่ทราบค่า โดย T_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิที่เหมาะสม (optimum temperature), T_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่ำสุด (minimum temperature) และ T_x คือค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิสูงสุด (maximum temperature)

3) $f(D)$ อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัวกับค่าการชักนำปากใบพืช ซึ่งมีสมการถึง 4 สมการ ประกอบด้วยปัจจัยที่ไม่ทราบค่า คือ b_1 และ b_2 มีสมการ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัวกับค่าการชักนำปากใบพืช

สมการ	ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า	สมการที่
$f(D) = 1 - b_1 D$ ($f(D)=0$ เมื่อ $b_1 D > 1$)	b_1	(22.1)
$f(D) = \frac{1}{1 + b_1 D}$	b_1	(22.2)
$f(D) = \frac{1 - b_1 D}{1 + b_2 D}$	b_1 และ b_2	(22.3)
$f(D) = \frac{1}{1 + (D/b_1)^{b_2}}$	b_1 และ b_2	(22.4)

จากสมการ D คือ ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว โดยที่ Jarvis (1976) ทำการศึกษาสมการที่ 22.1 ถึงสมการที่ 22.3 โดยศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัวกับค่าการชักนำปากใบ ต่อมา Fisher and Edward (1981) พัฒนาสมการที่ใช้เพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในใบพืช กับค่าการชักนำปากใบพืช ซึ่งแสดงในรูปของ s-shape ดังสมการที่ 22.4

4) $f(\theta_s)$ อธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดิน กับค่าการชักนำปากใบพืช ดังสมการที่ 23

$$f(\theta_s) = 1 - \left(\frac{\theta_{\max} - \theta}{\theta_{\max} - c} \right) \quad (23)$$

โดยที่ θ_{\max} คือ ความชื้นในดินที่จุดอิ่มตัว และ C คือค่าปัจจัยที่แสดงจุดเหี่ยวถาวร (permanent wilting point, PWP)

5) $f(C_i)$ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเนื้อเยื่อพืชกับค่าการชักนำปากใบพืช ดังสมการที่ 24

$$f(C_i) = \begin{cases} = 1 & \text{เมื่อ } C_i < 100 \\ = 1 - a_{cc} C_i & \text{เมื่อ } 100 < C_i < 1000 \\ = a_{cc} & \text{เมื่อ } C_i > 1000 \end{cases} \quad (24)$$

โดยที่ a_{cc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการ และ C_i คือ ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ตรวจวัดได้ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อลูกบาศก์เมตร

จากการศึกษาของ Sirisampan (1999) ศึกษาค่าการชักนำปากใบพืชด้วยแบบจำลอง Jarvis ในพืช 6 ชนิด พบว่า ปัจจัยที่ใช้ในการประมาณค่าการชักนำปากใบพืช คือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว และอุณหภูมิของอากาศ ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดิน และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์พืชกับการชักนำปากใบพืช พบว่า มีค่าสหสัมพันธ์ที่ต่ำมาก เช่นเดียวกับ Kosugi (1996) ทำการศึกษาการแลกเปลี่ยนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำระหว่างบรรยากาศกับพืช โดยศึกษาในพืช 3 ชนิด คือ *Quercus glauca*, *Cinnamomum camphora* และ *Pasania edulis* อายุ 5-8 ปี บริเวณมหาวิทยาลัยเกียวโต ประเทศญี่ปุ่น ด้วยแบบจำลอง Jarvis พบว่า ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเซลล์พืช และศักย์ของน้ำในดินกับการชักนำปากใบพืชกับค่าการชักนำปากใบพืช มีความสัมพันธ์ที่ต่ำมาก ซึ่งสมการชักนำปากใบพืชส่วนใหญ่นิยมใช้เพียง 3 ปัจจัยแรกคือ รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง อุณหภูมิอากาศ หรืออุณหภูมิใบ และความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว

3. Eddy-Correlation

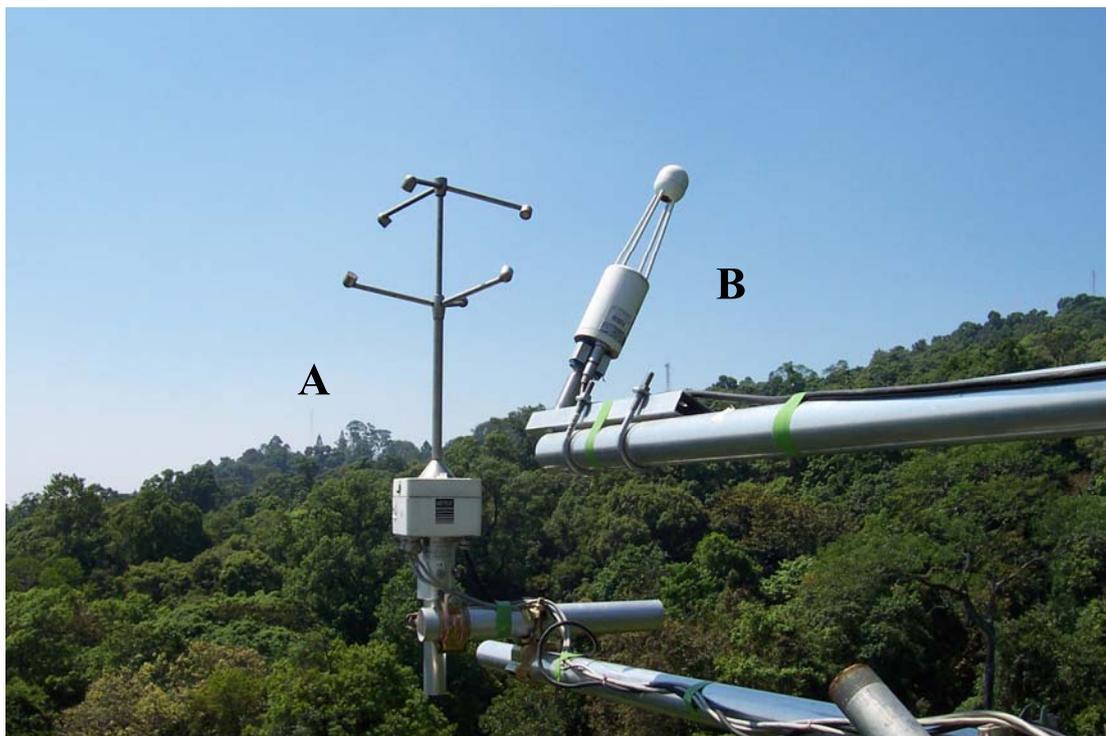
Eddy-Correlation เป็นวิธีการวัดการคายระเหยน้ำที่ถือว่าเป็นค่าการคายระเหยน้ำจริง (actual evapotranspiration) และเป็นที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องกับการประมาณค่า

การคายระเหยน้ำโดยวิธีอื่นๆ โดยอาศัยหลักการของไอน้ำมีการเคลื่อนย้ายในแนวตั้ง (vertical) หรือการเคลื่อนที่ ขึ้น-ลง ของมวลอากาศขนาดเล็ก เรียกว่า eddies (Swinbank, 1951; Baldocchi, 2005) ซึ่ง Dingmann (2002) อธิบายว่า Eddy–Correlation คืออัตราการเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนของไอน้ำ จากผิวหน้าการระเหยหนึ่งๆ ในช่วงเวลาสั้นๆ เป็นการเปลี่ยนแปลงในแนวตั้งของการเคลื่อนที่ของอากาศ (u_a) และความชื้นสมบูรณ์ (q') ซึ่งถือว่าเป็นการวัดค่าโดยตรงของความเข้มข้นของไอน้ำในอากาศตามหลักการเคลื่อนที่ของมวล หลักการพื้นฐานของความหนาแน่นของมวลและพลังงาน ระหว่างผิวดินกับบรรยากาศ ดังสมการที่ 25

$$E = (\rho_a / \rho_w) \cdot \overline{u_a \cdot q'} \quad \text{เมื่อ - แทนค่าเฉลี่ย} \quad (25)$$

เมื่อ	E	คือ	อัตราการเคลื่อนที่ของไอน้ำ (มิลลิเมตรต่อวินาที)
	ρ_a	คือ	ความหนาแน่นของบรรยากาศ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	ρ_w	คือ	ความหนาแน่นของน้ำ (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)
	u_a	คือ	สัดส่วนการเคลื่อนที่ของอากาศในแนวตั้งต่อระยะเวลาเฉลี่ย
	q'	คือ	ความชื้นสมบูรณ์ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)

Eddy-Correlation เป็นการตรวจวัดอัตราการเปลี่ยนแปลงของบรรยากาศในแนวตั้ง ส่วนใหญ่ จะศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพลังงานความร้อนในการเผาอากาศ (sensible heat flux) พลังงานความร้อนในการระเหยน้ำ (latent heat flux) ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ เครื่องมือที่ตรวจวัดคือ 3-D dimensional sonic anemometer ใช้ในการตรวจวัดองค์ประกอบต่างๆ ของลม และตรวจวัดอุณหภูมิ โดยมีอุปกรณ์ open path H_2O/CO_2 infrared gas analyzer ใช้ในการตรวจวัดความเข้มข้นของไอน้ำ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำการตรวจวัดใน 3 ทิศทางคือ แกน X แกน Y และแกน Z ตรวจวัดสืบครั้งต่อเวลา 1 วินาที ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาการคายระเหยน้ำด้วยวิธี Eddy-Correlation ที่สถานีตรวจวัดอากาศ ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ (A คือ 3-D Dimensional Sonic Anemometer B คือ Open Path H₂O/CO₂ Infrared Gas Analyzer)

Atmospheric Radiation Measurement Program (2001) อธิบายว่าหลักการทำงานของ 3-D dimensional sonic anemometer เริ่มจากแกนทั้ง 3 คู่ของเครื่องมือจะทำการส่งสัญญาณและรับสัญญาณในลักษณะเป็นสัญญาณเสียง ส่งสัญญาณ 10 ครั้งในเวลา 1 วินาที การตรวจวัดใช้หลักการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียงจากแกนส่งสัญญาณมายังแกนรับสัญญาณหากมีการเปลี่ยนแปลงการเคลื่อนที่ของลมจะทำให้ระยะเวลาในการเดินทางของคลื่นเสียงจากตัวส่งสัญญาณไปยังตัวรับสัญญาณเปลี่ยนแปลงไป เช่นเดียวกับ Sonic Temperature ซึ่งคำนวณได้จากความเร็วของคลื่นเสียงต่อระยะทางในแนวตั้ง ส่วน open path H₂O/CO₂ infrared gas analyzer ตรวจวัดความเข้มข้นของไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยการปล่อยรังสีอินฟราเรดอันเป็นช่วงคลื่นที่ถูกดูดกลืนด้วยไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจจะวัดถูกเฉลี่ยในราย 30 นาที ตัวอย่างการศึกษาได้แก่ Valentijn *et al.* (2005) ทำการศึกษาการเปรียบเทียบความแตกต่างของการวัดอัตราการคายระเหยน้ำจริงสำหรับ แปลงการศึกษการคายระเหยน้ำในพื้นที่ลาดชันที่มีการให้น้ำตลอดเวลา (wet sloping grassland) โดยวิธีการ Bowen ratio และ Eddy-Correlation นำค่าที่ได้ไป

ประยุกต์ใช้หาความสัมพันธ์กับสภาพพื้นที่ศึกษา และทำการเปรียบเทียบกับแปลงทดลองแบบปล่อยตามธรรมชาติ พบว่าทั้งสองวิธีสามารถประมาณค่าการคายระเหยได้เป็นอย่างดี และสามารถยอมรับได้ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคายระเหยของวิธีการ Penman-Monteith และ Priestley-Taylor พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน ค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดด้วย Eddy-Correlation ถือว่าเป็นค่าการคายระเหยจริงในพื้นที่ นิยมใช้ตรวจสอบความถูกต้องกับค่าการคายระเหยน้ำที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลองต่างๆ โดย Sumner and Jacobs (2004) ทำการศึกษาการคายระเหยน้ำด้วยวิธี Penman-Monteith, Priestley-Taylor และ pan evaporation เพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำในทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ที่เมือง Floral รัฐ Florida ตรวจวัดค่าการคายระเหยจริงโดยวิธี Eddy-Correlation (ET_s) ราย 30 นาที เป็นเวลา 19 เดือน ใช้สมการถดถอยทำการศึกษาความสัมพันธ์ของการคายระเหยน้ำที่ทำการประมาณค่ากับการคายระเหยน้ำจริงพบว่า Penman Monteith มีค่าผลรวมของความคลาดเคลื่อน (sum error, SE) ประมาณ 0.15 มิลลิเมตรต่อวัน ส่วน Priestley-taylor มีค่าประมาณ 0.11 มิลลิเมตรต่อวัน และ pan evaporation มีค่าประมาณ 0.4 มิลลิเมตรต่อวัน จากผลการศึกษาพบว่าวิธี Penman-Monteith มีค่าความคลาดเคลื่อนรายวันมากกว่าวิธี Priestley-Taylor ส่วน pan evaporation มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุด ส่วน Philip *et al.* (2004) ศึกษาผลกระทบของความชื้นในดิน ต่อค่าการชักนำปากใบพืช ในพื้นที่ลุ่มน้ำเมซอน ตรวจวัดค่าการคายระเหยน้ำจริงโดยวิธี Eddy-Correlation และเปรียบเทียบกับค่าการคายระเหยน้ำจากแบบจำลอง Penman-Monteith เพื่อหาสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมที่ใช้ในการศึกษาการชักนำปากใบพืชโดยวิธี Jarvis model พบว่า ค่าการชักนำปากใบพืชมีความสัมพันธ์กับความชื้นในบรรยากาศ และความชื้นในดิน เมื่อปรับเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Jarvis สามารถประมาณค่าการคายระเหยน้ำจากแบบจำลอง Penman-Monteith ใกล้เคียงกับค่าการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดด้วย Eddy-Correlation

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่

1. คอมพิวเตอร์
2. อุปกรณ์เครื่องเขียน

1. การรวบรวมข้อมูล

1.1 ข้อมูลค่าการซึมน้ำปากใบ (stomatal conductance) และค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลต่อค่าการซึมน้ำปากใบพืช ใช้ข้อมูลทุติยภูมิจากการศึกษาของศิริชัยญา (2545) ซึ่งทำการศึกษาค่าการซึมน้ำปากใบพืชในรอบวัน และในแต่ละฤดูกาล ของต้นเทพทาโร (*Cinnamomum porrectum*) และต้นก่อหม่น (*Lithocarpus elegans*) ซึ่งเป็นพรรณไม้ที่อยู่ใกล้หอคอยมากที่สุด (พรรณไม้เด่นคือ ไม้ตระกูลก่อ (Fagaceae) รองมาเป็นไม้ทะเลโล้ (*Shima wallichii*; Korth) ไม้มณฑา (*Manglietia garrettii*; Carib) และไม้เหมือด (*Helicia excelsa*) ตามลำดับ (ชุมพล, 2512)) โดยทำการตรวจวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์ก๊าซด้วยแสงอินฟราเรดชนิดพกพา (Portable Infrared Gas Analyzer) ชนิด LCA-4 (Leaf Chamber Analysis) ซึ่งดำเนินการตรวจวัดระหว่างวันที่ 21 สิงหาคม พ.ศ.2542 ถึง 21 มิถุนายน พ.ศ.2543 และวัดค่าปัจจัยสิ่งแวดล้อมบริเวณตำแหน่งใบ (environmental factors at leaf scale) ซึ่งได้แก่ อุณหภูมิผิวใบ (leaf temperature) อุณหภูมิของอากาศ (air temperature) ความดันบรรยากาศ (air pressure) พลังงานรังสีตกกระทบคลื่นสั้น (incident photon flux) รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetically active radiation, PAR) ความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว (vapor pressure deficit) และค่าการซึมน้ำปากใบพืช (stomatal conductance) ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ใช้ในการหาค่าการซึมน้ำปากใบพืช โดยใช้แบบจำลอง Jarvis พร้อมทั้งตรวจสอบความถูกต้องกับค่าการซึมน้ำปากใบพืช ที่ทำการตรวจวัดได้

1.2 ข้อมูลปัจจัยสิ่งแวดล้อม เพื่อใช้ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith ซึ่งได้จากการตรวจวัดปัจจัยสิ่งแวดล้อมบริเวณสถานีตรวจวัดอากาศของกลุ่มน้ำห้วยคอกม้า โดยใช้ข้อมูลจากโครงการวิจัยเรื่อง Effects of rainfall variable on water cycle and ecosystem in tropical for under asian monsoon climate ซึ่งเป็นการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์

กับมหาวิทยาลัยโตเกียวภายใต้ทุนสนับสนุนจากสถาบัน Japan Science and Technology Agency (JST) ได้แก่ ข้อมูลอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม รังสีดวงอาทิตย์สุทธิ และความชื้นในดิน

1.3 ข้อมูลค่าการคายระเหยน้ำจริงของป่าดิบเขา ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธี Eddy–Correlation โดยใช้ข้อมูลของโครงการวิจัยร่วมดังกล่าวในข้อ 1.2 ซึ่งตรวจวัดด้วย Ultrasonic Anemometer และ Open Path H₂O/CO₂ Infrared Gas Analyzer ติดตั้งในระดับความสูง 40 เมตร ทำการวิเคราะห์อัตราการเปลี่ยนแปลงของไอน้ำและพลังงานในแนวตั้งราย 30 นาที ได้แก่ พลังงานความร้อนในการเผาผลาญอากาศ (sensible heat flux) พลังงานความร้อนในการคายระเหย (latent heat flux) อุณหภูมิ (temperature) ความเร็วลม (wind speed) ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ เพื่อใช้เป็นข้อมูลการคายระเหยน้ำจริงเปรียบเทียบความถูกต้องกับค่าการคายระเหยน้ำที่ประมาณค่าจากแบบจำลอง และใช้ในการเปรียบเทียบปัจจัยบางปัจจัยในแบบจำลอง Penman–Monteith

2. การวิเคราะห์ข้อมูล

2.1 ศึกษาความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อค่าการชักนำปากใบพืชในรอบวัน และในแต่ละฤดูกาลของป่าดิบเขาธรรมชาติ โดยข้อมูลปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ ปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิใบ อุณหภูมิอากาศ และความชื้นในดิน ซึ่งใช้ข้อมูลที่รวบรวมโดยศิริชญญา (2545) ดังกล่าวในข้อ 1.1 โดยวิธีการเขียนกราฟแสดงการกระจาย (scatter plot) และวิเคราะห์ค่าสหสัมพันธ์ (correlation analysis)

2.2 หาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืช โดยนำผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยจากข้อ 2.1 เป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกปัจจัยเพื่อประเมินค่าการชักนำปากใบพืช ด้วยแบบจำลอง Jarvis ตามสมการที่ 19 ซึ่งประกอบด้วยสมการหลักต่างๆ ตั้งแต่สมการที่ 20 ถึงสมการที่ 23 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ ได้แก่ a, T_x, T_o, T_n, b_1 และ b_2 ด้วยวิธี Generalized Reduced Gradient (GRG) ของคำสั่ง Solver ในโปรแกรม Microsoft Excel (ภาคผนวก ก) ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2.1 กำหนดค่าสัมประสิทธิ์การชักนำปากใบพืชตั้งต้น ซึ่งเป็นค่าที่ใช้เริ่มต้นในวิธีการ GRG โดยการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำการทดลองกำหนดขึ้นหลายๆ ค่า กับรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square error, RMSE) และเลือกค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แบบจำลองมีค่า RMSE ต่ำที่สุดมาใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้น

2.2.2 กำหนดให้สมการประเมินค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (model efficiency, EFF) ของ Nash and Sutcliffe (1970) ดังสมการที่ 26 เป็นสมการเป้าหมาย ซึ่งค่า EFF ที่ได้ต้องมีค่าสูงสุด (maximum target)

$$EFF = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (26)$$

โดยที่	y_i	คือ	ค่าที่ตรวจวัดได้จริง
	\hat{y}_i	คือ	ค่าที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง
	\bar{y}_i	คือ	ค่าเฉลี่ยของค่าที่ตรวจวัดได้จริง

2.2.3 เลือกค่าสัมประสิทธิ์ของระดับสมการ (สมการที่ 20 ถึง 24) ที่มีค่า EFF มากที่สุด และมีความใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริง (ข้อ 1.1) มากที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการประมาณค่าการนำน้ำของเรือนยอด (canopy conductance, สมการที่ 17) ในแบบจำลอง Penman-Monteith

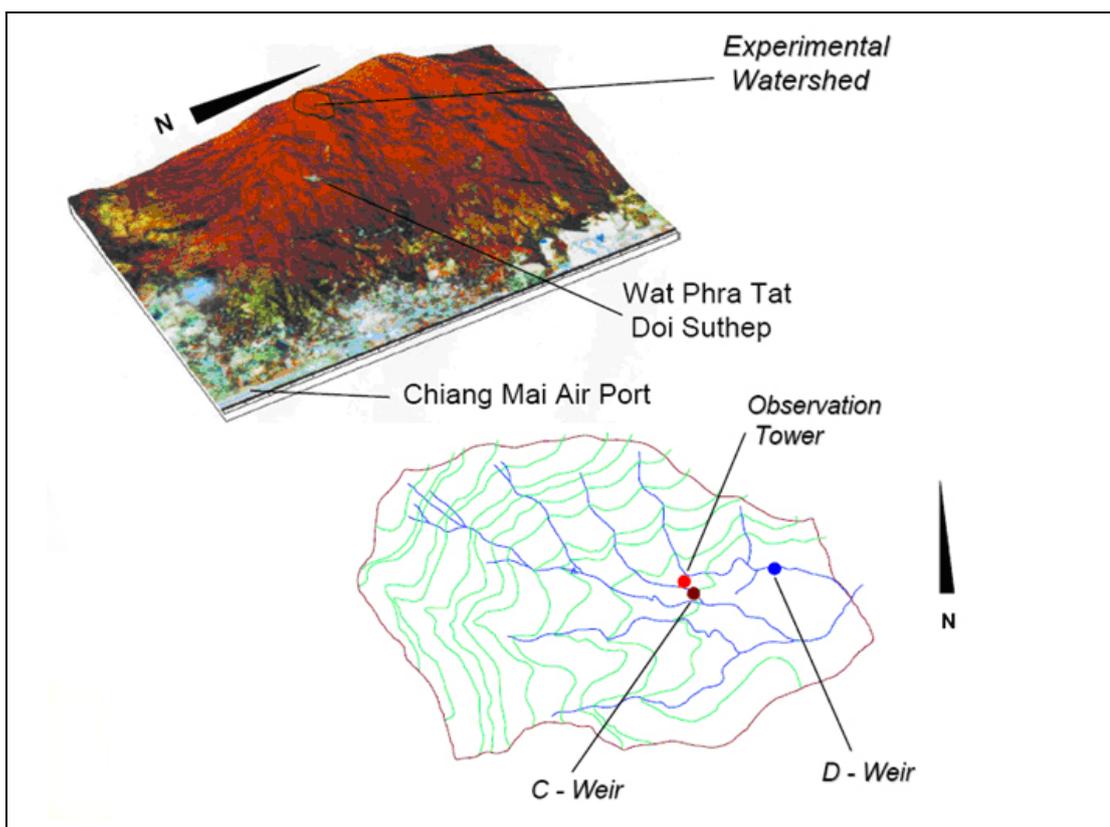
2.3 ประเมินค่าการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith ราย 10 นาที โดยใช้ข้อมูลปัจจัยสิ่งแวดล้อมจากข้อ 1.2 ระหว่างเดือนพฤศจิกายน ถึง ธันวาคม 2548 และเดือนมกราคม 2549 และสรุปผลการศึกษาเป็นรายวัน และรายเดือน ทั้งนี้เนื่องจากทั้ง 3 เดือนไม่มีปัจจัยของฝนเข้ามาเกี่ยวข้องทำให้สามารถประมาณค่าการคายระเหยน้ำได้โดยไม่ต้องพิจารณาถึงอิทธิพลของน้ำที่ค้างตามเรือนยอดพืช (canopy intercepted water) โดยมีรายละเอียดของการดำเนินการดังนี้

2.3.1 ปรับเทียบพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ได้แก่ คำนีพื้นที่ใบ (leaf area index, LAI) ความหยาบของพื้นผิว (zero plane displacement) และสัดส่วนร่มเงา (shelter factor) โดยเริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นเช่นเดียวกับวิธีการในข้อ 2.2.1 และ ข้อ 2.2.2

2.3.2 นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากข้อ 2.3.1 มาแทนค่าลงในแบบจำลองเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำ และตรวจสอบความถูกต้องกับค่าที่ตรวจวัดได้จากวิธี Eddy-Correlation โดยใช้ค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (สมการที่ 26)

สถานที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา คือ บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ (ภาพที่ 5) ซึ่งมีลักษณะทั่วไปของพื้นที่ศึกษา (ศิริชญญา, 2545) ดังนี้



ภาพที่ 5 ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่
ที่มา: ชัชชัย (2549)

1. ลักษณะภูมิประเทศ

ลุ่มน้ำห้วยคอกม้าอยู่ในเขตอุทยานแห่งชาติดอยสุเทพ-ปุย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ บริเวณ ทางด้านทิศใต้ติดกับพระตำหนักภูพิงคราชนิเวศน์ ระหว่างเส้นรุ้งที่ $18^{\circ}45'$ เหนือ และ เส้นแวงที่ $98^{\circ}54'$ ตะวันออก ห่างจากตัวเมืองเชียงใหม่ไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ประมาณ 30 กิโลเมตร หรือประมาณ 750 กิโลเมตรจากกรุงเทพมหานคร สภาพภูมิประเทศตั้งอยู่ในระดับความสูงจากระดับน้ำทะเลตั้งแต่ 1,268-1,620 เมตร มีความสูงเฉลี่ย 1,400 เมตรจากระดับน้ำทะเล มีเนื้อที่ลุ่มน้ำ

ทั้งหมดประมาณ 0.64 ตารางกิโลเมตร รูปร่างของกลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามีลักษณะอยู่ระหว่างรูปสี่เหลี่ยม (rectangular shape) และรูปพัด (fan shape) มีค่าความลาดชันเฉลี่ยตามน้ำหนักของพื้นที่ประมาณ 37 เปอร์เซ็นต์ ลำธารมีลักษณะแบบ dendritic pattern อัตราส่วนของจำนวนลำธารต่อพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 33.71 ลำธารต่อตารางกิโลเมตร ความยาวรวมของทุกลำธารประมาณ 9.37 กิโลเมตรต่อตารางกิโลเมตร ค่า compactness coefficient ของพื้นที่ประมาณ 1.2 ซึ่งแสดงว่ามีการระบายน้ำได้ดี กลุ่มน้ำห้วยคอกม้าเป็นต้นกำเนิดของห้วยแก้ว ซึ่งไหลตามด้านลาดทิศตะวันออกสู่ลุ่มน้ำปิง โดยพื้นที่ที่ลุ่มน้ำปกคลุมด้วยป่าดิบเขาทำให้น้ำในลำธารมีน้ำไหลตลอดปี (perennial stream) (เกษม, 2512)

2. ลักษณะธรณีวิทยา

บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้าจัดอยู่ใน โครงสร้างทางธรณีแบบ north west continental highland ซึ่งประกอบด้วยหิน granite ในยุค Triassic และ late cretaceous ประมาณ 30.4 เปอร์เซ็นต์ quartzite ในยุค tertiary ประมาณ 34.8 เปอร์เซ็นต์ หิน mica และ gneiss preperman ประมาณ 9.0 เปอร์เซ็นต์ รวมทั้งหินทรายที่อยู่บริเวณสันเขาประมาณ 21.7 เปอร์เซ็นต์ และหินอื่นๆ กระจายอยู่ทั่วไปประมาณ 4.1 เปอร์เซ็นต์ วัตถุที่ให้กำเนิดดินบริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้าเป็นพวก sedentary material คือเป็น residuum local colluviums เนื่องมาจากลักษณะพื้นที่เป็นภูเขาสูงชันวัตถุให้กำเนิดดินจะทับถมโดยมีแรงดึงดูดของโลกเป็นตัวการ และรวมตัวเข้ากับวัตถุต้นกำเนิดดินที่อยู่รวมกันก่อกำเนิดดิน reddish brown lateritic soils (สาโรจน์, 2512)

3. ลักษณะทางปฐพีวิทยา

ลักษณะดินในบริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้าเกิดจากอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศ และสิ่งมีชีวิตต่างๆ โดยเฉพาะพืช ซึ่งดินส่วนใหญ่จัดอยู่ใน great soil group: reddish-brown & red-yellow podzolic soil เกิดจากหินต้นกำเนิดพวก granite, gneiss และพวก quartzite จะพบปะปนตามผิวดินหรือถ้าจำแนกแบบ soil taxonomy ก็เป็นแบบ tropohumults ความลึกของดินชั้น A เฉลี่ยประมาณ 20-80 เซนติเมตร มีสีดำเข้ม ชั้น B ประมาณ 60-155 เซนติเมตร มีสีแดงปนน้ำตาล เข้ม เนื้อดินเป็นแบบ sandy loam โครงสร้างของดินชั้น A และ B เป็นแบบ subangular blocky ขนาดของเม็ดดินมีขนาดปานกลางการเกาะยึดของเม็ดดินค่อนข้างอ่อนความลึกของดินที่รากพืชหยั่งถึงลึกประมาณ 130 เซนติเมตร (นิพนธ์, 2512) ปริมาณอินทรีย์วัตถุของดิน จากการศึกษาของ วีระศักดิ์ (2524)

พบว่า ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินชั้น A,B1,B2 และ B3 มีประมาณ 9.9,4.8,1.6, และ 0.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในป่าดิบเขา ซึ่งมีผลทำให้ดูดซับเก็บกักน้ำไว้ได้มาก สำหรับความหนาแน่นรวมของดินป่าดิบเขาในดินชั้น A, B1, B2 และ B3 มีประมาณ 0.77,0.95,1.11 และ 1.30 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตร และความพรุนของดินประมาณ 64 , 58 , 53 และ 47 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับความเป็นกรดเป็นด่างของดินชั้น A มีค่าพีเอชประมาณ 5.56 และชั้น B ประมาณ 5.24 สมรรถนะในการอุ้มน้ำของอินทรีย์วัตถุที่บริเวณผิวน้ำดินโดยเฉลี่ยประมาณ 2.5 เท่าของน้ำหนักดิน สมรรถนะในการอุ้มน้ำของดินชั้น B ประมาณ 62 เปอร์เซ็นต์ และของดินชั้น A ประมาณ 51 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

4. ลักษณะพืชพรรณ

บริเวณคอกขลุ่ย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ โดยทั่วไปปกคลุมไปด้วยป่าดิบเขาธรรมชาติ นอกจากบริเวณสันเขาบางตอนที่เคยถูกแผ้วถางทำลายเพื่อใช้ประโยชน์ที่ดินมาก่อนจะมีหญ้าคาขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น บริเวณสันเขาบางแห่งปกคลุมไปด้วยไม้ตระกูลก่อ ระดับต่ำลงมาจะเป็นไม้พวกตระกูลตะเคียนและเหมือด บริเวณใกล้ริมลำห้วยจะมีไม้พวกมณฑาดอย และกอน้ำ ส่วนในลำห้วยที่มีน้ำไหลผ่านประกอบด้วยพรรณไม้พวกบอน และตองสาต ซึ่งเป็นพรรณไม้ชอบน้ำขึ้นอยู่อย่างหนาแน่น จากการแจกแจงสำรวจนับไม้ตระกูลพรรณไม้ขนาดใหญ่จะมีปริมาตรไม้ประมาณ 70-88 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกตาร์ เป็นไม้ตะเคียนประมาณ 27.26 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกตาร์ และมณฑาดอยประมาณ 11.66 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกตาร์ ปริมาณเปอร์เซ็นต์การปกคลุมของเรือนยอดโดยเฉลี่ยประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ โดยบริเวณสันเขามีการปกคลุมของเรือนยอดประมาณ 75-80 เปอร์เซ็นต์ ระหว่างสันเขากับลำห้วยประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ และบริเวณลำห้วยประมาณ 90-95 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการศึกษาถึง stand composition และ stand density ของป่าดิบเขา พบว่า ในบริเวณลุ่มน้ำแห่งนี้มีพรรณไม้ประมาณ 159 ชนิด และพืชชอบน้ำอีกประมาณ 21 ชนิด ความหนาแน่นของไม้ในป่าดิบเขา ประมาณ 132 ต้นต่อไร่ และความหนาแน่นของพรรณไม้พื้นล่างประมาณ 154-164 ต้นต่อ 100 ตารางเมตร ซึ่งพรรณไม้หลัก คือ ไม้ตระกูลก่อ (Fagaceae) ประกอบด้วย ก่อเคียว ก่อแดง ก่อแป้น ก่อแหลม กอน้ำ ก่อตาหมู ฯลฯ ไม้ชั้นบนเป็นพวกก่อ เคียวมากที่สุด ความหนาแน่นของพรรณไม้มากที่สุดประมาณ 10.88 เปอร์เซ็นต์ เมื่อขึ้นเป็นลูกไม้หรือไม้ชั้นล่าง เป็นพวกก่อเคียว และกำยานมากที่สุด ประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นเป็นพรรณไม้ชนิดอื่นๆ (ชุมพล, 2512)

5. ลักษณะทางอุตุนิยมวิทยา

พื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้ายู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ฤดูฝนเริ่มจากเดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม มรสุมนี้มีผลทำให้ฝนตกมาก โดยเฉพาะในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม มักจะมีพายุดีเปรสชันเคลื่อนตัวจากทะเลจีนใต้เข้าประเทศไทยทางตอนเหนือของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคเหนือของประเทศ และในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์เป็นช่วงฤดูหนาว เพราะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้อากาศหนาวเย็น และช่วงฤดูร้อนเริ่มจากเดือนมีนาคมจนถึงเดือนเมษายน ลักษณะอากาศโดยทั่วไปของพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้ายตั้งแต่ พ.ศ.2508 จนถึง พ.ศ.2524 จะมีอากาศเย็นสบายตลอดปี อุณหภูมิของอากาศตลอดปีประมาณ 20 องศาเซลเซียส อุณหภูมิต่ำสุดในเดือนมกราคมเฉลี่ยประมาณ 16.6 องศาเซลเซียส และสูงสุดในเดือนเมษายน เฉลี่ยประมาณ 23.3 องศาเซลเซียส ปกติในตอนเช้าและเย็นมีหมอกปกคลุม โดยเฉพาะหลังจากฝนตกหนักในฤดูฝนและฤดูหนาวจะมีหมอกปกคลุมโดยทั่วไปตลอดวัน ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยประมาณ 81.09 เปอร์เซ็นต์ และต่ำสุดในเดือนมีนาคมประมาณ 61.87 เปอร์เซ็นต์ ลมพัดแรงในตอนเย็นและค่าความเร็วลมประมาณ 6.75-17.26 กิโลเมตรต่อชั่วโมงโดยเฉลี่ย อัตราเร็วลมต่ำสุดในเดือนกันยายนประมาณ 5.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อัตราเร็วลมสูงสุดในเดือนมีนาคม ประมาณ 12.6 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ปริมาณรังสีจากดวงอาทิตย์ต่ำสุด 281 แคลอรีต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน อัตราการระเหยน้ำตลอดปีประมาณ 1,174.1 มิลลิเมตร อัตราการระเหยน้ำมีมากที่สุดในเดือนมีนาคมประมาณ 180.47 มิลลิเมตร ปริมาณฝนเฉลี่ยตลอดปีประมาณ 2,043 มิลลิเมตร ฝนตกมากที่สุดในเดือนกรกฎาคม ประมาณ 597.07 มิลลิเมตร จำนวนวันที่ฝนตกตลอดปีประมาณ 130 วัน ลักษณะของฝนที่ตกส่วนใหญ่เป็นแบบ orographic และ thunderstorm precipitation

ผลและวิจารณ์

1. ความสัมพันธ์ของค่าการชักนำปากใบพืชกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (photosynthetically active radiation, PAR) อุณหภูมิเหนือเรือนยอด และอุณหภูมิใบ ความชื้นสัมพัทธ์ และความชื้นในดินกับค่าการชักนำปากใบพืชของป่าดิบเขาธรรมชาติ โดยวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (correlation analysis) จากต้นเทพทาโร และต้นก่อหม่น ซึ่งเป็นพรรณไม้ที่ขึ้นอยู่ใกล้บริเวณสถานีตรวจวัดอากาศบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า (ภาคผนวก ข) ได้ผลดังนี้

1.1 รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (PAR)

ความสัมพันธ์ระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (PAR) กับค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโรและก่อหม่น พบว่า โดยทั่วไปเมื่อค่า PAR มีความเข้มเพิ่มขึ้น ค่าการชักนำปากใบพืชก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อค่า PAR มีความเข้มลดลง ค่าการชักนำปากใบพืชจะลดลงเช่นกัน โดยมีค่าสหสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง (PAR) กับค่าการชักนำปากใบพืช บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

ชนิดพืช	21 ต.ค. 42	22 ต.ค. 42	20 พ.ย. 42	21 พ.ย. 42	26 ธ.ค. 42	2 มี.ค. 43	3 มี.ค. 43	25 พ.ค. 43	26 พ.ค. 43	20 มิ.ย. 43	21 มิ.ย. 43
เทพทาโร	0.85	0.65	0.74	0.70	0.79	0.47	0.32	0.36	0.65	0.04	0.27
ก่อหม่น	0.72	-0.25	0.65	0.58	0.79	0.49	-0.09	0.75	0.01	0.02	0.39

อย่างไรก็ตามในบางวัน ค่า PAR กับค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโร (20 มิ.ย. 43) และต้นก่อหม่น (3 มี.ค. 43, 26 พ.ค. 43 และ 20 มิ.ย. 43) ไม่มีสหสัมพันธ์กัน ทั้งนี้เนื่องจากได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับ Tantasirin *et.al* (2001) ที่ทำการศึกษาสหสัมพันธ์ระหว่างค่าการสังเคราะห์ด้วยแสง การคายน้ำ และการชักนำปากใบพืชกับปัจจัย

สิ่งแวดล้อม พบว่า ค่าการคายน้ำและการชักนำปากใบไม่สัมพันธ์กับค่า PAR ในขณะที่การสังเคราะห์ด้วยแสงมีแนวโน้มผันแปรตามค่า PAR มากกว่า ดังภาพที่ 6 และภาพที่ 7

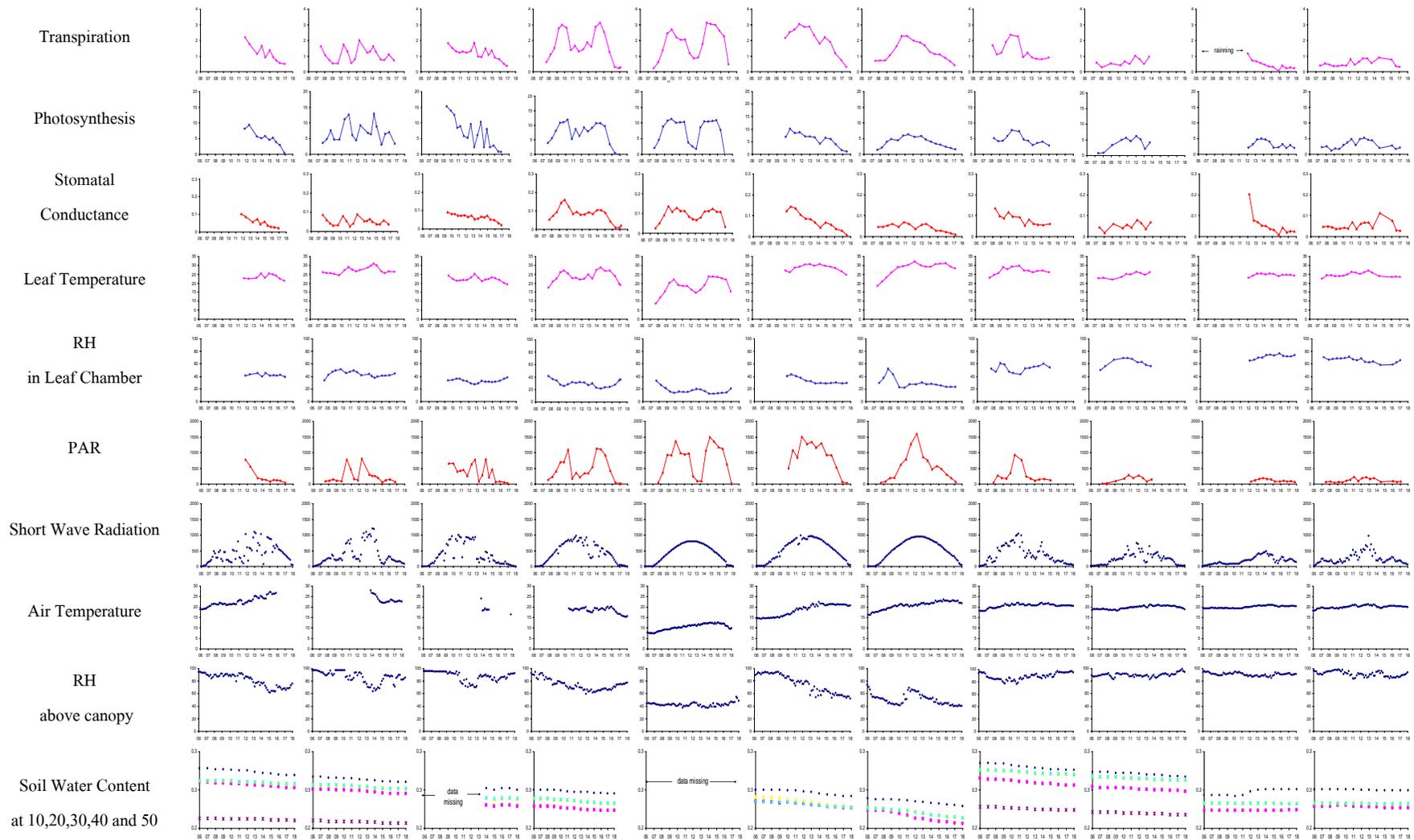
1.2 ความชื้นสัมพัทธ์

การศึกษาความสัมพันธ์ของปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์กับค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น โดยใช้ค่าสหสัมพันธ์ได้ผลการศึกษา ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์ กับค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นเทพทาโร และต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

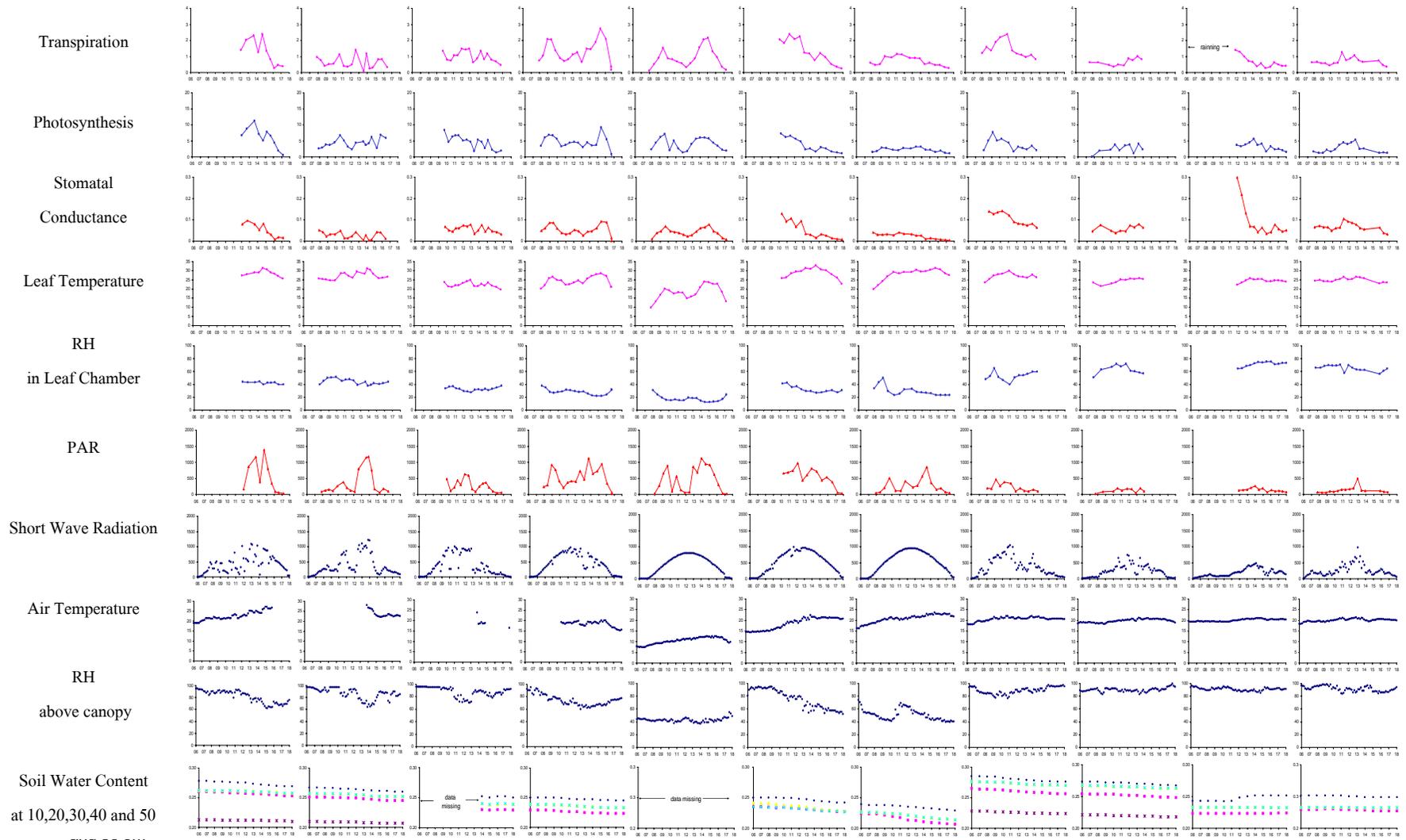
ชนิดพืช	21 ส.ค. 42	22 ส.ค. 42	20 พ.ย. 42	21 พ.ย. 42	26 ธ.ค. 42	2 มิ.ย. 43	3 มิ.ย. 43	25 พ.ค. 43	26 พ.ค. 43	20 มิ.ย. 43	21 มิ.ย. 43
เทพทาโร	0.06	-0.63	-0.23	-0.41	-0.83	0.90	0.38	-0.51	0.19	-0.64	-0.61
ก่อหม่น	0.34	-0.10	-0.70	-0.45	-0.67	0.82	0.50	-0.38	-0.45	-0.92	-0.07

ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นสัมพัทธ์กับค่าการชักนำปากใบพืชจากตารางที่ 3 พบว่าโดยทั่วไปมีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงข้ามซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี กล่าวคือเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เพิ่มขึ้นค่าการชักนำปากใบพืชจะลดลง อย่างไรก็ตามในบางวัน ค่าความชื้นสัมพัทธ์กับค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโร (21 ส.ค. 42 และ 26 พ.ค. 43) และต้นก่อหม่น (22 ส.ค. 42 และ 21 มิ.ย. 43) ไม่มีสหสัมพันธ์กัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ มากกว่า



Aug 21,1999 Aug 22, 1999 Nov 20, 1999 Nov 21, 1999 Dec 26, 1999 Mar 02, 2000 Mar 03, 2000 May 25, 2000 May 26, 2000 Jun 20, 2000 Jun 21, 2000

ภาพที่ 6 ความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อม อัตราการคายน้ำ และค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ ที่มา: Tantasirin *et al.* (2001)



Aug 21, 1999 Aug 22, 1999 Nov 20, 1999 Nov 21, 1999 Dec 26, 1999 Mar 02, 2000 Mar 03, 2000 May 25, 2000 May 26, 2000 Jun 20, 2000 Jun 21, 2000

ภาพที่ 7 ความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อม อัตราการคายน้ำ และค่าการชักนำปากใบพืช ของต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่
ที่มา: Tantasirin *et al.* (2001)

1.3 อุณหภูมิเหนือเรือนยอด และอุณหภูมิใบ

การศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิเหนือเรือนยอด และอุณหภูมิใบกับค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น โดยใช้ค่าสหสัมพันธ์ (ตารางที่ 4) พบว่า ส่วนใหญ่มีค่าสหสัมพันธ์ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามในบางวัน อุณหภูมิทั้งสอง กับค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโร (22 ส.ค. 42, 3 มี.ค. 43, 25 พ.ค. 43 และ 21 มิ.ย. 43) และต้นก่อหม่น (2 มี.ค. 43 และ 26 พ.ค. 43) ไม่มีสหสัมพันธ์กัน ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับค่าการชักนำปากใบพืชส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันยกเว้นในวันที่ 3 มี.ค. 43, 25 พ.ค. 43 และ 20 มิ.ย. 43 ของต้นเทพทาโร และวันที่ 22 ส.ค. 42, 2 มี.ค. 43, 3 มี.ค. 43 และ 20 มิ.ย. 43 ของต้นก่อหม่น มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้าม ทั้งนี้เนื่องจากอาจได้รับอิทธิพลจากปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่นๆ มากกว่า

ตารางที่ 4 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิใบ และอุณหภูมิเหนือเรือนยอด กับค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

วัน เดือน ปี	ต้นเทพทาโร		ต้นก่อหม่น	
	อุณหภูมิใบ	อุณหภูมิเหนือเรือนยอด	อุณหภูมิใบ	อุณหภูมิเหนือเรือนยอด
21 สค. 42	0.54	0.15	0.47	0.34
22 สค. 42	0.28	0.35	-0.33	-0.42
20 พย. 42	0.70	0.61	0.85	0.87
21 พย. 42	0.56	0.58	0.62	0.70
26 ธค. 42	0.83	0.81	0.82	0.74
2 มีค. 43	0.16	0.10	-0.14	-0.13
3 มีค. 43	-0.11	-0.22	-0.53	-0.50
25 พค. 43	-0.01	-0.03	0.31	0.32
26 พ.ค. 43	0.57	0.60	0.02	0.17
20 มิย. 43	-0.70	-0.57	-0.82	-0.73
21 มิย. 43	0.05	0.16	0.52	0.60

1.4 ความชื้นในดิน

การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับค่าการชั่งน้ำหนักใบพืชจากความชื้นในดิน 5 ระดับความลึกคือ 10, 20, 30, 40 และ 50 เซนติเมตร พบว่าความชื้นในดินมีความสัมพันธ์กับค่าการชั่งน้ำหนักใบพืชต่ำ โดยต้นเทพทาโรมีค่าสหสัมพันธ์ทั้ง 5 ระดับความลึกประมาณ 0.19, 0.19, 0.21, 0.20 และ 0.20 ตามลำดับ ส่วนต้นก่อหม่นมีค่าสหสัมพันธ์ประมาณ 0.38, 0.26, 0.32, 0.33 และ 0.22 ตามลำดับ (ตารางที่ 5) ความชื้นในดินช่วงที่ทำการตรวจวัดค่อนข้างคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงให้เห็นอย่างเด่นชัด อีกทั้งในการศึกษาได้ตรวจวัดความชื้นราย 10 นาที ทำให้อิทธิพลของความชื้นในดินที่มีต่อการชั่งน้ำหนักใบพืชมีค่าต่ำ

ตารางที่ 5 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินกับค่าการชั่งน้ำหนักใบพืช ของต้นเทพทาโร และต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

ชนิดพืช	ระดับความลึกของดิน (ซม.)				
	10	20	30	40	50
ต้นเทพทาโร	0.19	0.19	0.21	0.20	0.20
ต้นก่อหม่น	0.38	0.26	0.32	0.33	0.22

จากผลการศึกษา สอดคล้องกับการศึกษาของ Kosugi (1996) และ Sirisampan (1999) ที่ศึกษาอิทธิพลของความชื้นในดินกับค่าการชั่งน้ำหนักใบพืชในประเทศญี่ปุ่น พบว่าปัจจัยความชื้นในดินมีอิทธิพลต่ำ และไม่เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้ในแบบจำลอง Jarvis เนื่องจากมีการวิเคราะห์ข้อมูลราย 10 นาที ทำให้ความผันแปรของความชื้นในดินต่ำ หากพิจารณารายฤดูกาล ความชื้นในดินจะแสดงความผันแปร และมีอิทธิพลต่อค่าการชั่งน้ำหนักใบพืชได้เด่นชัดกว่า สอดคล้องกับศิริชัยญา (2545) อธิบายว่าจากการศึกษาอิทธิพลของความชื้นในดินต่อการคายน้ำของพืช พบว่า ในการวิเคราะห์ราย 10 นาที มีค่าสหสัมพันธ์ต่ำ แต่เมื่อพิจารณารายฤดูกาลปัจจัยความชื้นในดินมีอิทธิพลต่อการคายน้ำในช่วงฤดูฝน

จากผลการศึกษาข้างต้น สามารถสรุปได้ว่า ปัจจัยที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ค่าการชั่งน้ำหนักใบพืชได้แก่ รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

ซึ่งทั้ง 3 ปัจจัยจะนำไปประยุกต์ใช้ในแบบจำลอง Jarvis เพื่อประมาณค่าการชักนำปากใบพืช บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

2 ค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืช

การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืช ได้แก่ a , T_x , T_o , T_n , b_1 และ b_2 ของพื้นที่ป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ ด้วยแบบจำลอง Jarvis โดยใช้ปัจจัยสิ่งแวดล้อม ได้แก่ รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง อุณหภูมิเหนือเรือนยอด และความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 ระดับสมการ ได้แก่

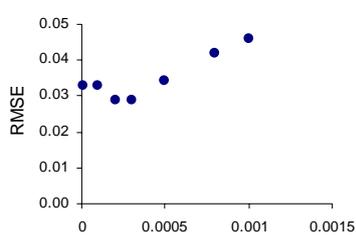
- สมการระดับที่ 1 $g_{sw} = g_{swmax} \cdot f(Q) \cdot f(T) \cdot f(D1)$
- สมการระดับที่ 2 $g_{sw} = g_{swmax} \cdot f(Q) \cdot f(T) \cdot f(D2)$
- สมการระดับที่ 3 $g_{sw} = g_{swmax} \cdot f(Q) \cdot f(T) \cdot f(D3)$
- สมการระดับที่ 4 $g_{sw} = g_{swmax} \cdot f(Q) \cdot f(T) \cdot f(D4)$

โดยที่ $f(Q)$ คือสมการที่ 20 และ $f(T)$ คือสมการที่ 21 ส่วน $f(D1)$ ถึง $f(D4)$ คือสมการที่ 22.1 ถึง 22.4 ตามลำดับ ซึ่งได้ผลการศึกษาดังนี้

2.1 ค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้นของแบบจำลอง Jarvis

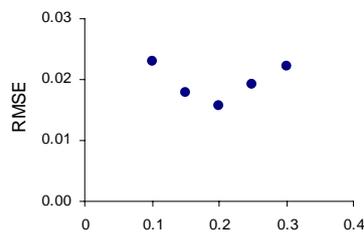
สัมประสิทธิ์ตั้งต้น คือ ค่าที่ใช้เริ่มต้นในวิธีการ GRG ซึ่งได้จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำการทดลองกำหนดขึ้นหลายๆ ค่า กับรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square error, RMSE) และเลือกค่าสัมประสิทธิ์ที่ทำให้แบบจำลองมีค่า RMSE ต่ำที่สุดมาใช้เป็นค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้น จากการศึกษาพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ a , T_n , T_o , T_x , b_1 และ b_2 มีความไว (sensitivity) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าการชักนำปากใบพืชแตกต่างกัน โดยค่าสัมประสิทธิ์ a มีความไวมากที่สุด รองมาคือ b_1 และ b_2 ตามลำดับ (ภาพที่ 8 และ ภาพที่ 9) ส่วน T_n , T_o , T_x มีความไวในการเปลี่ยนแปลงต่ำที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อทดลองเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ a ค่า RMSE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงมาก เพราะเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีค่าสหสัมพันธ์กับค่าการชักนำปากใบพืชสูง มีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ชัดเจนต่อการเปลี่ยนแปลงของการชักนำปากใบพืช ในขณะที่เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า T_n , T_o , T_x พบว่าค่า RMSE มีอัตราการเปลี่ยนแปลงต่ำกว่า ที่เป็นเช่นนี้เพราะปัจจัยอุณหภูมิมีความสัมพันธ์กับค่าการชักนำปากใบพืชน้อยกว่าปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์

สมการระดับที่ 1



ค่าสัมประสิทธิ์ a

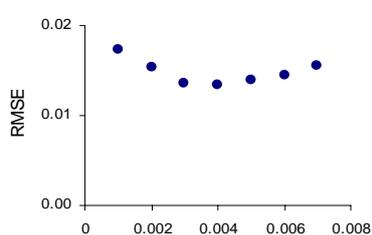
• a = 0.0002



ค่าสัมประสิทธิ์ b1

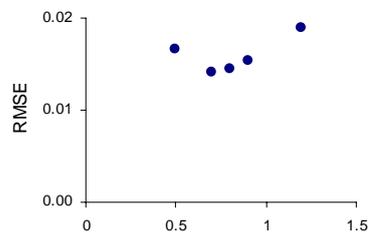
• b1 = 0.2

สมการระดับที่ 2



ค่าสัมประสิทธิ์ b1

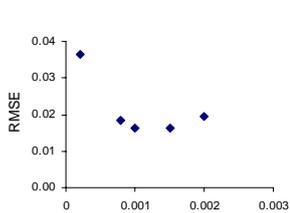
• a = 0.004



ค่าสัมประสิทธิ์ b1

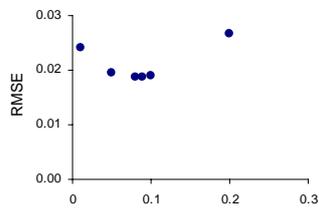
• b1 = 0.7

สมการระดับที่ 3



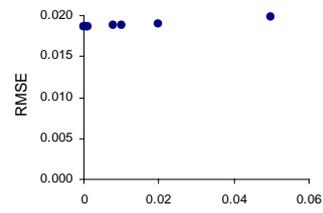
ค่าสัมประสิทธิ์ a

• a = 0.0015



ค่าสัมประสิทธิ์ b1

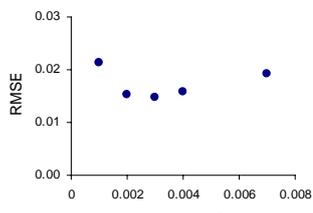
• b1 = 0.06



ค่าสัมประสิทธิ์ b2

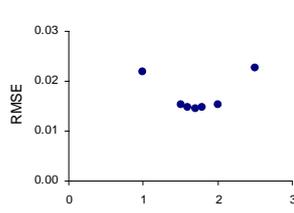
• b2 = 0.08

สมการระดับที่ 4



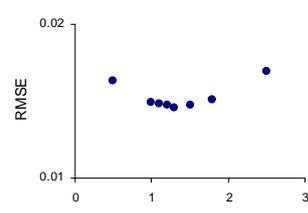
ค่าสัมประสิทธิ์ a

• a = 0.003



ค่าสัมประสิทธิ์ b1

• b1 = 1.7

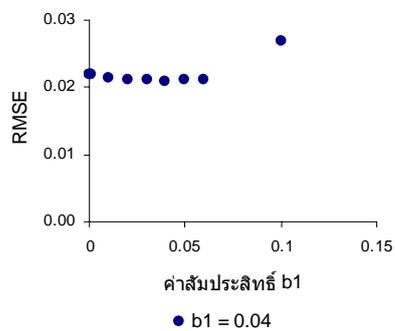
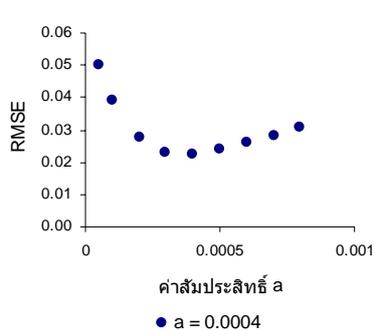


ค่าสัมประสิทธิ์ b2

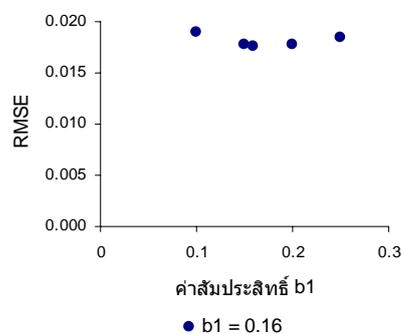
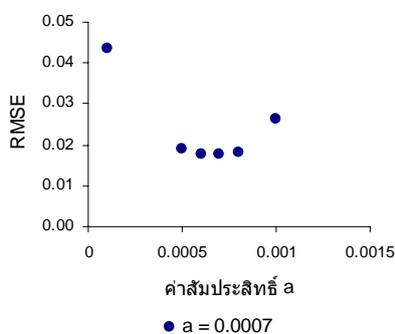
• b2 = 1.3

ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a , b_1 และ b_2 กับค่า RMSE ของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

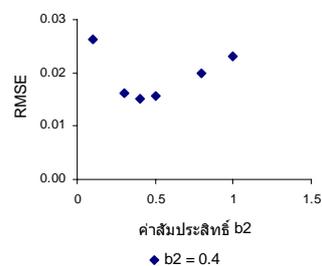
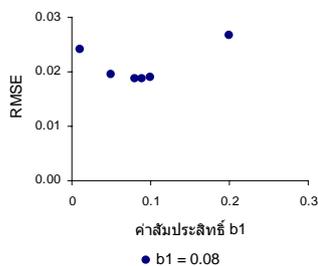
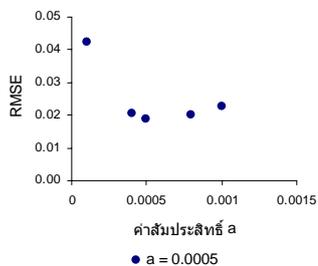
สมการระดับที่ 1



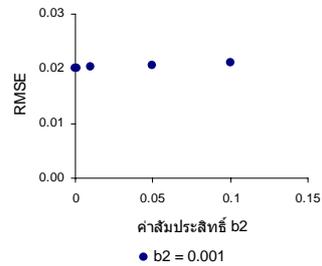
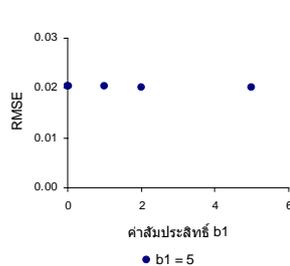
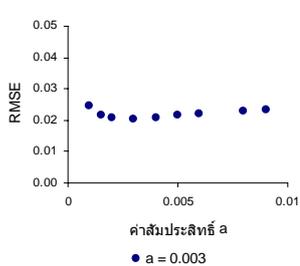
สมการระดับที่ 2



สมการระดับที่ 3



สมการระดับที่ 4



ภาพที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ a , b_1 และ b_2 กับค่า RMSE ของต้นก้อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

ค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้นของแบบจำลอง Jarvis ที่ใช้ในการปรับเทียบด้วยวิธี GRG ของต้นเทพทาโร และต้นก่อหม่น แสดงในตารางที่ 6 และตารางที่ 7 ตามลำดับ

ตารางที่ 6 ค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กับค่า RMSE ของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

สมการระดับที่	a	b_1	b_2	T_o	T_n	T_x
1	0.0004	0.04	-	25	5	45
2	0.0007	0.16	-	25	5	45
3	0.0005	0.06	0.080	25	5	45
4	0.0030	5.00	0.001	25	5	45

ตารางที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้นจากความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์กับค่า RMSE ของต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

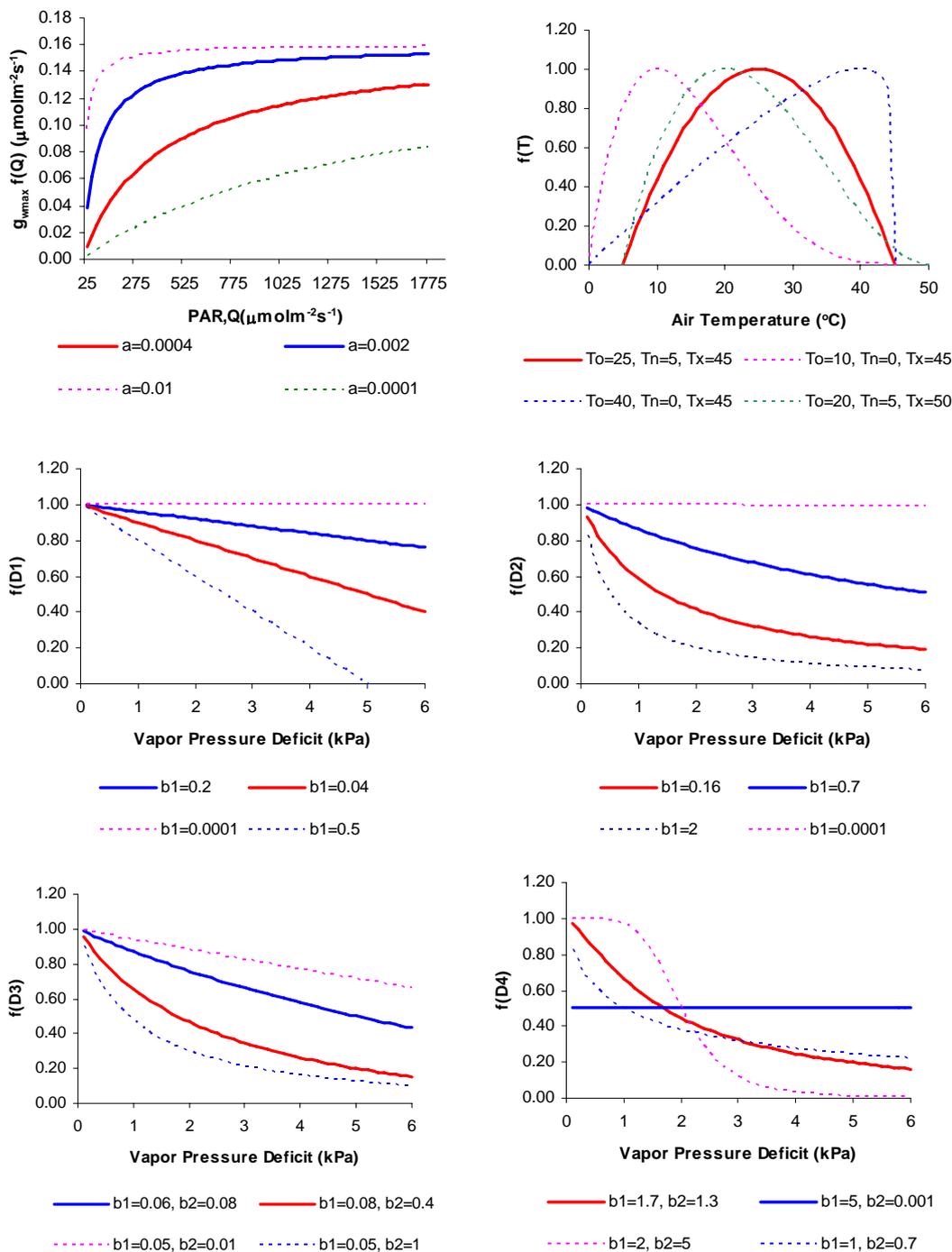
สมการระดับที่	a	b_1	b_2	T_o	T_n	T_x
1	0.002	0.20	-	25	5	45
2	0.004	0.70	-	25	5	45
3	0.002	0.08	0.4	25	5	45
4	0.003	1.70	1.3	25	5	45

จากตาราง กำหนดให้ค่าสัมประสิทธิ์ T_o , T_n และ T_x ของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น ทุกระดับสมการให้มีค่าเท่ากัน เนื่องจากปัจจัยอุณหภูมิมีความไวในการเปลี่ยนแปลง RMSE ต่ำ จึงกำหนดค่าตามช่วงที่นิยมใช้ให้มีค่าเท่ากับ 25, 5, 45 ตามลำดับ (Kosugi, 1996; Sirisampan, 1999; Baldocchi, 2003b)

ส่วนค่าการชักนำปากใบพืชสูงสุด Tantasirin *et al.* (2001) ได้ศึกษาค่าการชักนำปากใบพืชสูงสุด (g_{svmax}) ของต้นเทพทาโร และต้นก่อหม่นบริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า พบว่า มีค่าประมาณ 0.16 และ 0.13 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ

Korner (1994) ได้ทำการตรวจวัดค่าการชักนำปากใบพืชสูงสุดพืชในป่าดิบไม่ผลัดใบ พบว่า มีค่าประมาณ 0.136 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ส่วนป่าผลัดใบมีค่าประมาณ 0.190 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที

จากค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้นที่กล่าวมาแล้วข้างต้นเมื่อนำไปสร้างเป็นเส้นแนวโน้ม ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับค่าอิทธิพลที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าชักนำปากใบพืช ได้ผลดังแสดงในภาพที่ 10 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์ a มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสม (0.0007-0.002) หากมีค่าต่ำกว่าจะทำให้ค่าการชักนำปากใบพืชมีค่าต่ำมาก และหากมีค่าสูงกว่าจะทำให้ค่าการชักนำปากใบพืชสูง และคงที่ ซึ่งไม่สมเหตุสมผล เนื่องจาก ค่าอิทธิพลของ $f(Q)$ ควรเป็นแนวโน้มในทิศทางเดียวกับปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ T_o , T_n และ T_x พบว่า ค่าอิทธิพล $f(T)$ จะผันแปรตามค่าสัมประสิทธิ์ แนวโน้มความสัมพันธ์ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากกราฟความสัมพันธ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะมีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ T_o และจะตัดแกน x ที่อุณหภูมิมีค่าเท่ากับ T_n และ T_x โดยที่หากกำหนดค่า T_n ให้มีค่าต่ำกว่าค่าตั้งต้น ลักษณะกราฟจะเอียงไปทางขวา ในขณะที่เมื่อให้ค่า T_x มีค่ามากกว่าค่าตั้งต้น กราฟจะเอียงไปทางซ้าย และผลการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์ b_1 และ b_2 พบว่า ลักษณะความสัมพันธ์ทั้ง 4 สมการมีความเหมาะสม หากกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ให้มีค่าต่ำกว่าค่าตั้งต้นลักษณะกราฟจะลดลงมีแนวโน้มเข้าใกล้ศูนย์และหากกำหนดให้มีค่ามากกว่าลักษณะกราฟก่อนข้างเป็นเส้นตรงไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งไม่สมเหตุสมผล เนื่องจาก การลดลงของความชื้นในบรรยากาศควรเป็นเส้นโค้งแบบพาราโบลา (Misson *et al.*, 2004) ทั้งนี้ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับค่าอิทธิพลที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าชักนำปากใบพืชสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kosugi (1996); Sirisampan (1999); Yamasaki *et. al.* (2004); Baldocchi (2006) ที่ศึกษาความสัมพันธ์ของทั้ง 3 ปัจจัยกับค่าอิทธิพลต่อการชักนำปากใบ พบว่ามีแนวโน้มความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับผลการศึกษา



ภาพที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง กับค่าอิทธิพลที่มีต่อการชักนำปากใบพืชจากสมการ $f(Q)$, $f(T)$ และ $f(D)$ บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

ตารางที่ 8 สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Jarvis และความถูกต้องของแบบจำลองแต่ละระดับสมการของต้นเทพทาโร บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

สมการระดับที่	g_{swmax}	a	b_1	b_2	T_o	T_n	T_x	EFF
1	0.145	0.00056	0.041	-	20.1	5.6	42.7	0.6594
2	0.151	0.00068	0.161	-	22.1	2.6	41.8	0.6242
3	0.156	0.00058	0.107	0.001	21.7	4.8	40.9	0.6727
4	0.154	0.00269	7.621	0.126	21.7	1.1	49.5	0.5041

ตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์ของแบบจำลอง Jarvis และความถูกต้องของแบบจำลองแต่ละระดับสมการของต้นก่อหม่น บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

สมการระดับที่	g_{swmax}	a	b_1	b_2	T_o	T_n	T_x	EFF
1	0.138	0.00161	0.241	-	26.0	10.9	40.1	0.6540
2	0.139	0.00313	0.706	-	24.1	9.8	42.2	0.5964
3	0.135	0.00229	0.002	0.395	25.1	9.3	40.0	0.6042
4	0.131	0.00300	1.730	1.344	27.3	8.6	45.0	0.5551

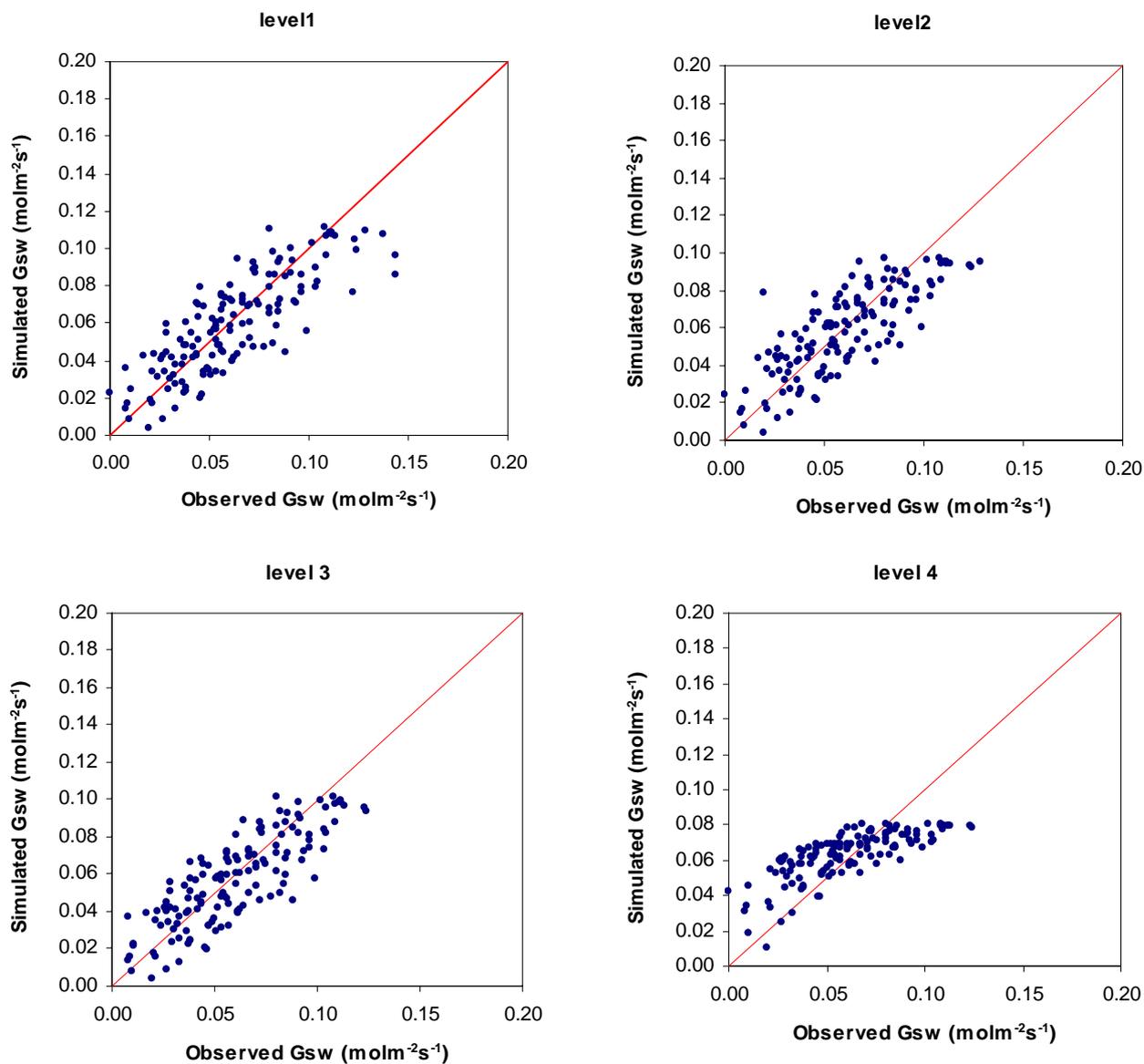
2.2 ค่าสัมประสิทธิ์สมการชักนำปากใบพืช

การหาค่าสัมประสิทธิ์การชักนำปากใบพืชด้วยวิธี GRG โดยใช้คำสั่ง Solver จากค่าสัมประสิทธิ์ตั้งต้น ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 8 และตารางที่ 9 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การชักนำปากใบพืชสูงสุด (g_{swmax}) ของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่นที่ได้จากการปรับเทียบ มีค่าประมาณ 0.145-0.156 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที และ 0.131-0.139 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวไม่แตกต่างจากค่าตั้งต้น (0.16 และ 0.13 โมลต่อตารางเมตรต่อวินาที ตามลำดับ) ที่กำหนดไว้ และในทำนองเดียวกัน ค่าสัมประสิทธิ์ a , b_1 และ b_2 ก็ไม่แตกต่างจากค่าตั้งต้นที่กำหนดไว้มากนัก ส่วนค่า T_x , T_o และ T_n มีความแตกต่างไปจากค่าตั้งต้นพอสมควร ตัวอย่างเช่น ค่า T_o ของต้นเทพทาโรลดลงจาก 25 องศาเซลเซียส เหลือประมาณ 20 องศาเซลเซียส หรือ ค่า T_n ของต้น

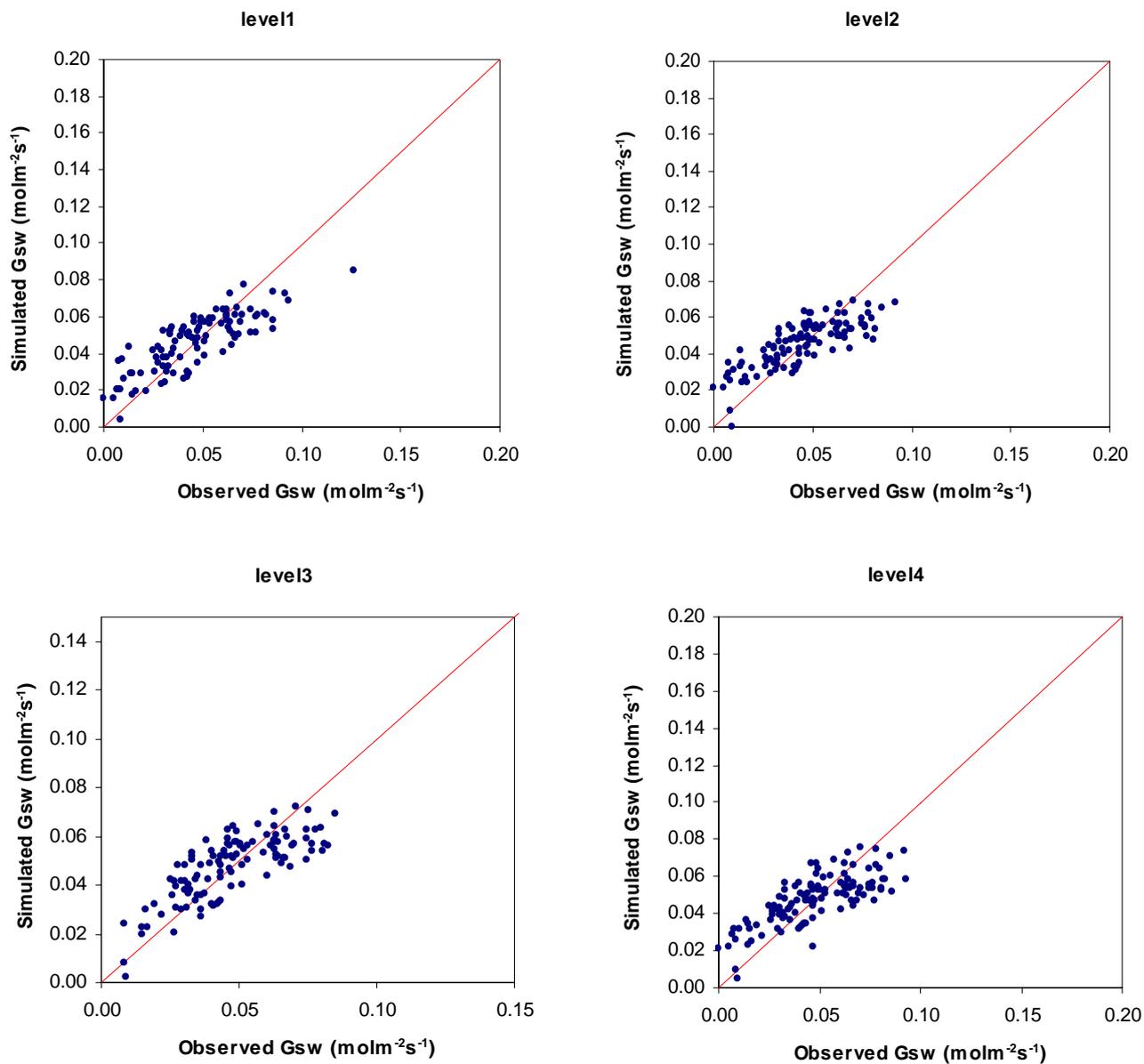
ก่อนหน้าเพิ่มจาก 5 องศาเซลเซียส ประมาณ 10 องศาเซลเซียส เป็นต้น อย่างไรก็ตามความแตกต่างที่เกิดขึ้นมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่า EFF น้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ a , b_1 และ b_2

ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากวิธี GRG ข้างต้น ส่งผลให้การประมาณค่าการชักนำปากใบพืชด้วยแบบจำลอง Jarvis ของสมการทั้ง 4 ระดับ ของต้นเทพทาโรมีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (EFF) เท่ากับ 0.6594, 0.6242, 0.6727 และ 0.5041 ตามลำดับ (ตารางที่ 8) ส่วนต้นก่อนหน้ามีค่าเท่ากับ 0.6540, 0.5964, 0.6042 และ 0.5551 ตามลำดับ (ตารางที่ 9) ซึ่งผลการศึกษาดังกล่าวมีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Sirisampan (1999) และ Kosugi (1996) โดย Sirisampan (1999) ทำการศึกษาในพืช 6 ชนิด และใช้เพียงสมการระดับที่ 4 พืชที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ *Q. serrata*, *V. bracteanum*, *I. pedunculosa*, *E. japonica*, *L. japonicum* และ *A. japonica* มีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (EFF) เป็น 0.52, 0.33, 0.48, 0.41, 0.33 และ 0.37 ตามลำดับ ส่วน Kosugi (1996) ทำการศึกษาพืช 3 ชนิด คือ *Quercus glauca* พบว่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (EFF) ทั้ง 4 ระดับสมการ มีค่าเท่ากับ 0.59, 0.53, 0.59 และ 0.63 ตามลำดับ และ *Cinnamomum camphora* มีค่าเท่ากับ 0.88, 0.89, 0.89 และ 0.90 ตามลำดับ และ *Pasania edulis* มีค่าเท่ากับ 0.54, 0.53, 0.54 และ 0.54 ตามลำดับ

เมื่อนำค่าการชักนำปากใบที่ทำกรวิเคราะห์ได้จากแบบจำลอง มาสร้างกราฟ 45 องศา เพื่อเปรียบเทียบกับค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ของต้นเทพทาโรและต้นก่อนหน้า พบว่าข้อมูลส่วนใหญ่มีแนวโน้มเกาะกลุ่มและเข้าใกล้เส้น 45 องศา (ภาพที่ 11 และ ภาพที่ 12) แสดงว่าค่าการชักนำปากใบพืชที่ทำกรวิเคราะห์ได้มีความสัมพันธ์กับค่าการชักนำปากใบพืชที่ได้จากการตรวจวัด อย่างไรก็ตามการกระจายของค่าการชักนำปากใบพืชของต้นเทพทาโรและต้นก่อนหน้าของสมการระดับที่ 3 มีลักษณะการกระจายรอบเส้น 45 องศาดีกว่าสมการระดับอื่น



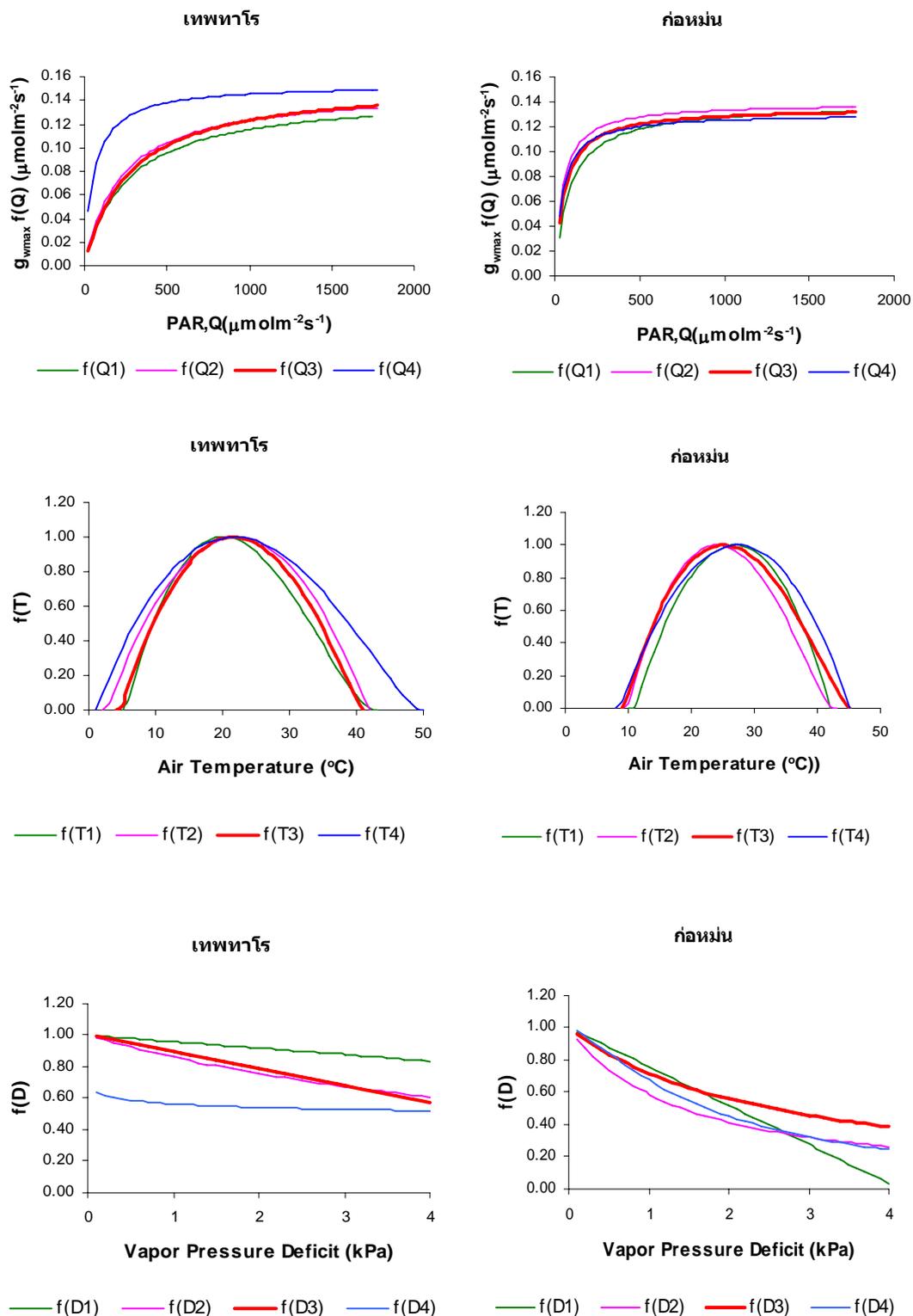
ภาพที่ 11 การกระจายของค่าการชักนำปากใบพืชที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Jarvis กับค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ ของต้นเทพทาโร บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 12 การกระจายของค่าการชักนำปากใบพืชที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง Jarvis กับค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ ของต้นก่อหม่น บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

2.3 สมการการชักนำปากใบพืช

สมการชักนำปากใบพืชที่สร้างจากค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากข้อ 2.2. เมื่อนำมาเขียนเป็นเส้นกราฟแสดงแนวโน้มอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีต่อการการชักนำปากใบพืช ซึ่งได้แก่รังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง อุณหภูมิเหนือเรือนยอด และความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัว ของทั้ง 4 ระดับสมการ พบว่า สมการระดับที่ 1 มีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบสูงที่สุด แต่มีข้อมูลบางส่วนกระจายห่างเส้น 45 องศา (ภาพที่ 11 และ ภาพที่ 12) และลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับค่าอิทธิพลที่มีต่อการชักนำปากใบพืชทั้ง 3 อิทธิพลไม่สมเหตุสมผล เนื่องจากเมื่อแทนค่า b_1 ลงในสมการ $f(D1)$ พบว่า มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง (ภาพที่ 13) ซึ่งตรงข้ามกับการศึกษาของ Dingmann (2002) อธิบายว่าความสัมพันธ์ของความดันไอน้ำที่ห่างจากความอิ่มตัวกับค่าอิทธิพล $f(D)$ พบว่าลักษณะความสัมพันธ์จะมีค่าลดลงจนถึงระดับหนึ่งจะคงที่ เช่นเดียวกับ Misson *et al.* (2004) อธิบายว่าลักษณะความสัมพันธ์ควรเป็นเส้นโค้งแบบพาราโบลา ดังนั้นสมการระดับที่ 3 มีความเหมาะสมต่อการศึกษการชักนำปากใบพืชมากที่สุด เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ และการกระจายรอบเส้น 45 องศาได้ดีกว่าสมการระดับอื่น และความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อมกับค่าอิทธิพลที่มีต่อการชักนำปากใบพืชทั้ง 3 ปัจจัย มีความสมเหตุสมผลมากกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ Massman and Kuafmann (1991) ซึ่งศึกษาสมการชักนำปากใบพืชของป่าสนเขาในเทือกเขา Rocky ประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่าสมการระดับที่ 3 มีความถูกต้องและเหมาะสมในการประมาณค่าการชักนำปากใบพืชมากที่สุด รองมาคือสมการระดับที่ 2 สมการระดับที่ 1 และสมการระดับที่ 4 อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้ต่างจากผลการศึกษาของ Kosugi (1996) ที่ศึกษาสมการชักนำปากใบพืชของพรรณไม้บริเวณมหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น พบว่าความถูกต้องของสมการระดับที่ 4 มีความถูกต้องมากที่สุด แต่ได้เลือกใช้สมการระดับที่ 1 เนื่องจากมีสมการที่ง่ายต่อการศึกษามากกว่าสมการระดับที่ 4 และพบว่า การกระจายรอบเส้น 45 องศาดีกว่าสมการระดับอื่น ซึ่งเป็นการศึกษาพรรณไม้ในเมือง ลักษณะทางอนุนิยมิวิทยา จึงแตกต่างจากการศึกษาในพื้นที่ป่าไม้ ทำให้สมการชักนำปากใบพืชมีความแตกต่างกัน



ภาพที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยสิ่งแวดล้อม กับค่าอิทธิพลที่มีต่อการชักนำปากใบพืชทั้ง 4 ระดับสมการของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

สมการชักนำปากใบพืชจากแบบจำลอง Jarvis ที่ได้จากสมการระดับที่ 3 ของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น แสดงดังสมการที่ 27 และ 28 ตามลำดับ ส่วนสมการชักนำปากใบพืชของป่าดิบเขา บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้าซึ่งได้จากการเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ของสมการที่ 27 และสมการที่ 28 ได้ผลดังแสดงในสมการที่ 29

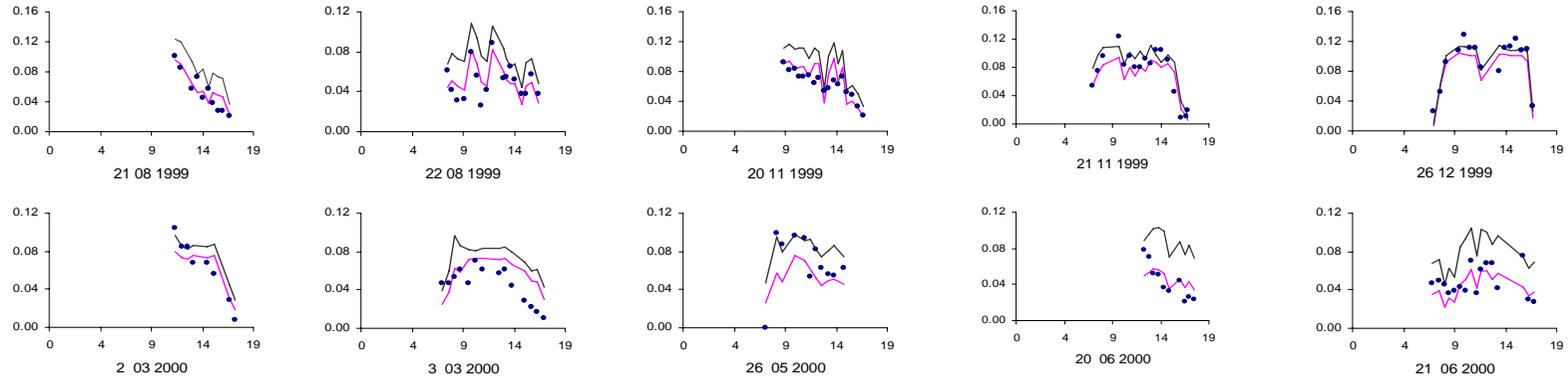
$$G_{sw} = 0.156 \left(\frac{Q}{Q+268.42} \right) \cdot \left[\left(\frac{T-4.80}{16.90} \right) \cdot \left(\frac{40.90-T}{19.27} \right)^{1.14} \right] \cdot \frac{(1-0.11D)}{(1+0.001D)} \quad (27)$$

$$G_{sw} = 0.136 \left(\frac{Q}{Q+55.65} \right) \cdot \left[\left(\frac{T-9.30}{15.76} \right) \cdot \left(\frac{45.00-T}{19.92} \right)^{1.20} \right] \cdot \frac{(1-0.002D)}{(1+0.395D)} \quad (28)$$

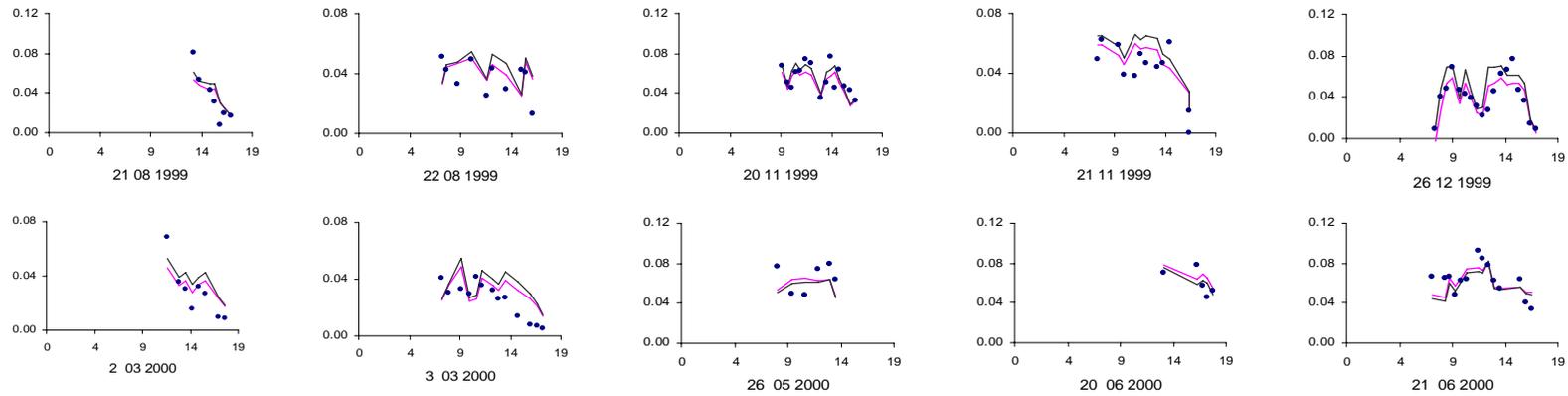
$$G_{sw} = 0.146 \left(\frac{Q}{Q+96.66} \right) \cdot \left[\left(\frac{T-7.04}{16.33} \right) \cdot \left(\frac{43.00-T}{19.60} \right)^{1.20} \right] \cdot \frac{(1-0.05D)}{(1+0.2D)} \quad (29)$$

เมื่อเปรียบเทียบค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้กับค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้ จากสมการที่ 27 ถึงสมการที่ 29 ได้ผลการศึกษาดังภาพที่ 14 (จุดสีดำ คือ ค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ เส้นสีชมพู คือ ค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้จากสมการที่ 27 และสมการที่ 28 และเส้นสีดำ คือ ค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้จากสมการที่ 29) พบว่าค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้จากทั้ง 3 สมการส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้ (ภาคผนวก ค) อย่างไรก็ตามค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้จากสมการที่ 28 ของต้นเทพทาโรมีค่าสูงกว่าค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ (วันที่ 20 มิ.ย. 42 และวันที่ 21 มิ.ย. 42) ทั้งนี้อาจเกิดจากอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อมส่งผลต่อการตรวจวัดค่าการชักนำปากใบพืชในช่วงเวลาดังกล่าว

ต้นเทพทาโร



ต้นก่อหม่น



ภาพที่ 14 ค่าการชักนำปากใบพืชจากการประมาณค่าด้วยแบบจำลอง Jarvis กับค่าการชักนำปากใบพืชที่ตรวจวัดได้ของต้นเทพทาโรและต้นก่อหม่น (เส้นสีชมพู) และค่าการชักนำปากใบพืชจากสมการเฉลี่ย (เส้นสีดำ) บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

3. การตรวจสอบความถูกต้องและเปรียบเทียบแบบจำลอง Penman-Monteith

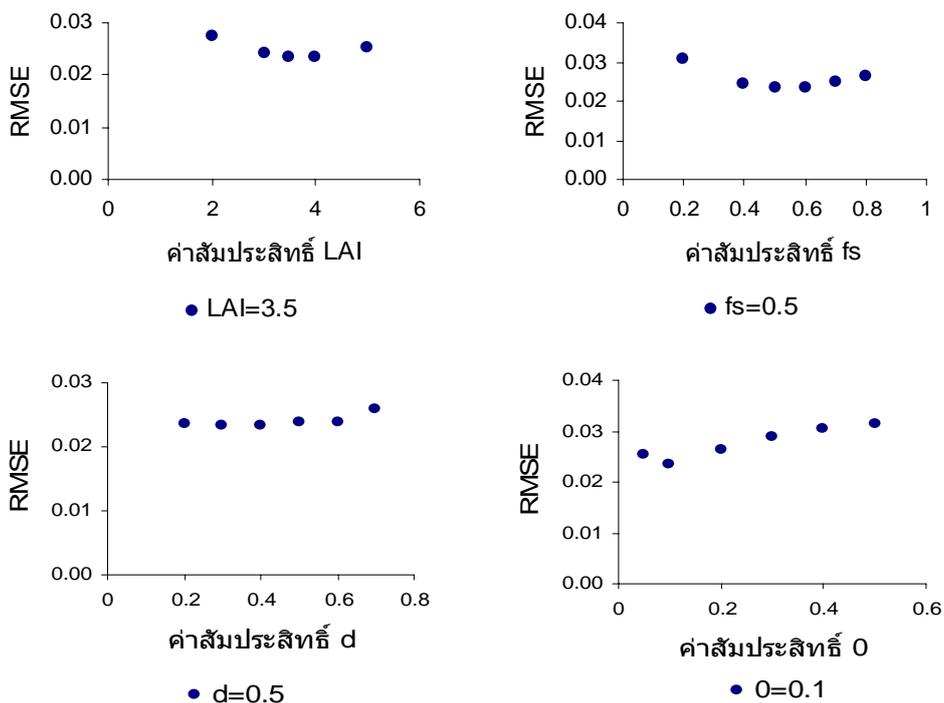
การประมาณค่าการคายระเหยน้ำจากแบบจำลอง Penman-Monteith ระหว่างเดือนพฤศจิกายน ถึงเดือนธันวาคม 2548 และเดือนมกราคม 2549 บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ โดยการปรับเทียบ (calibration) พารามิเตอร์ ได้แก่ ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index, LAI), ความหยาบของพื้นผิว (zero plane displacement, d และ 0) และ สัดส่วนร่มเงา (shelter factor, f_s) ได้ผลการศึกษาดังนี้

3.1 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

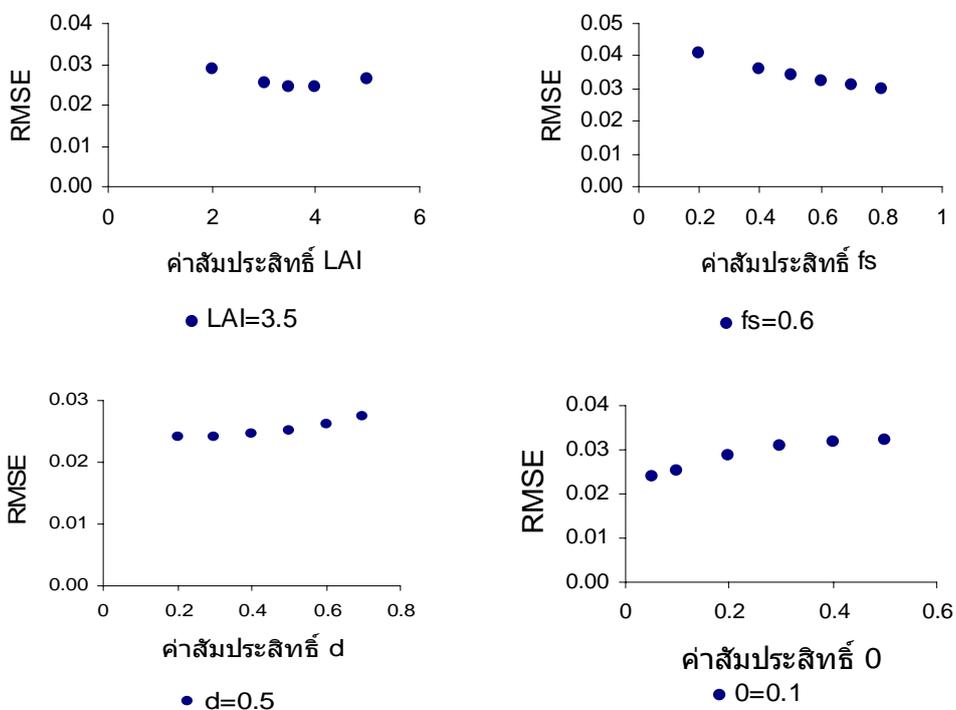
การปรับเทียบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Penman-Monteith ได้แก่ ดัชนีพื้นที่ใบ ความหยาบของพื้นผิว และ สัดส่วนร่มเงา เริ่มจากการกำหนดพารามิเตอร์ตั้งต้น โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ปัจจัยกับรากที่สองของค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square error, RMSE) เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการ GRG ดังแสดงในภาพที่ 15 ถึงภาพที่ 17 พบว่า พารามิเตอร์ตั้งต้นทั้ง 3 ปัจจัยมีความไวแตกต่างกัน กล่าวคือดัชนีพื้นที่ใบ มีความไวมากที่สุด รองมาคือ สัดส่วนร่มเงา และความหยาบของพื้นผิว สรุปผลการศึกษาค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นที่ได้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นของแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

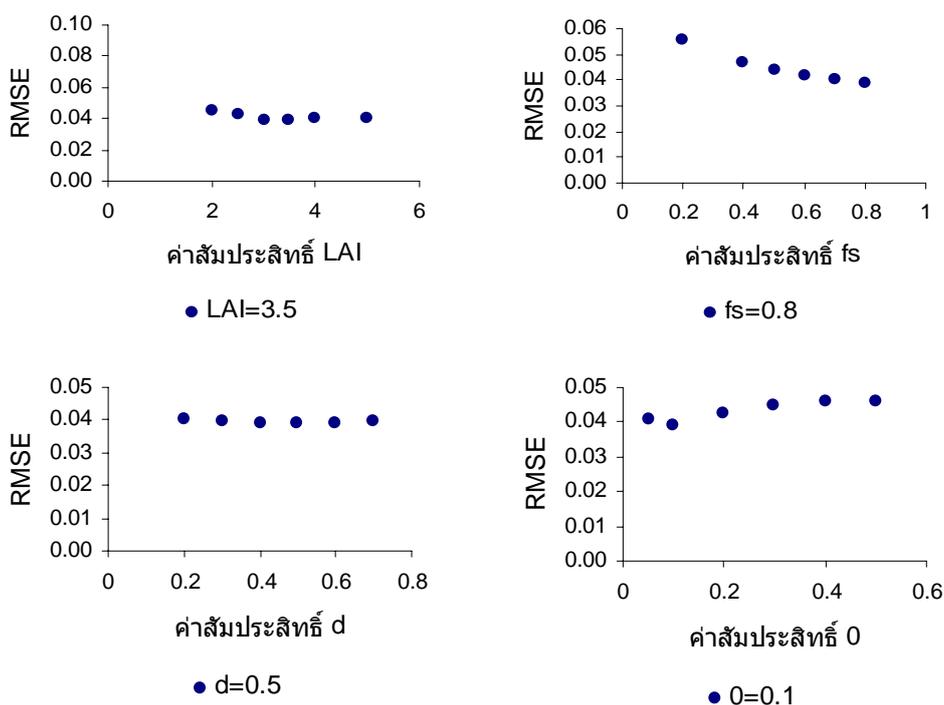
เดือน	ดัชนีพื้นที่ใบ (LAI)	สัดส่วนร่มเงา (f_s)	ความหยาบของพื้นผิว	
			d	0
พฤศจิกายน	3.5	0.50	0.50	0.10
ธันวาคม	3.5	0.60	0.50	0.10
มกราคม	3.5	0.80	0.50	0.10



ภาพที่ 15 ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นกับค่า RMSE ในเดือนพฤศจิกายน บริเวณพื้นที่
ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 16 ความสัมพันธ์ของค่าพารามิเตอร์ตั้งต้นกับค่า RMSE ในเดือนธันวาคม บริเวณลุ่มน้ำ
ห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 17 ความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยตั้งต้นกับค่า RMSE ในเดือนมกราคม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า ค่าดัชนีพื้นที่ใบทั้ง 3 เดือนมีค่าตั้งต้นประมาณ 3.5 สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Kosaka *et al.* (2004) ที่พบว่า ค่าดัชนีพื้นที่ใบของป่าดิบเขาที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้ามามีค่าประมาณ 3.5 ถึง 5.0 และสำเร็จ (2548) พบว่า ค่าดัชนีพื้นที่ใบของป่าเขตร้อนมีค่าอยู่ระหว่าง 3.0 ถึง 4.0 เช่นเดียวกับ Federer *et al.* (1996) พบว่า โดยส่วนใหญ่พื้นที่ป่าไม้มีค่าดัชนีพื้นที่ใบประมาณ 3.0 ถึง 6.0 ส่วนค่าความหยาบของพื้นผิวประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ d ซึ่งส่วนใหญ่นิยามกำหนดให้มีค่าประมาณ 0.7 แต่ค่าพารามิเตอร์ d ตั้งต้นที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าเพียง 0.5 ทั้งนี้ เนื่องจากในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้าเป็นพื้นที่ป่าดิบเขาประกอบด้วยพรรณไม้ที่หลากหลาย และมีเรือนยอดทั้ง 4 ระดับ ได้แก่ ไม้เรือนยอดเด่น ไม้เรือนยอดรอง ไม้พุ่ม และไม้พื้นล่าง จึงมีความสูงของพืชที่หลากหลาย ทำให้มีความหยาบของพื้นผิวมากกว่าค่าที่นิยามใช้ ซึ่งส่งผลให้ค่าความต้านทานของอากาศ (atmospheric resistance) มีค่าสูง ส่วนพารามิเตอร์ 0 พบว่า มีค่าเป็น 0.1 ทั้ง 3 เดือน โดยเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่นิยามใช้ศึกษา และค่าพารามิเตอร์สัดส่วนร่วมเงา (f_g) ทั้ง 3 เดือนมีค่าประมาณ 0.50, 0.60 และ 0.80 ตามลำดับ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในแต่ละเดือนมุมของรังสีดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบมายังเรือนยอดของต้นไม้มีค่าไม่เท่ากัน โดยเดือนมกราคมมีสัดส่วนของ

เรือนยอดที่ได้รับแสงอาทิตย์สูงกว่าเดือนพฤศจิกายน และธันวาคม คือมีค่าประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่เรือนยอดทั้งหมด

เมื่อนำพารามิเตอร์ตั้งต้นของแบบจำลอง Penman-Monteith ทั้ง 3 ปีวิจัย ดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับวิธี GRG ได้ผลการศึกษาดังตารางที่ 11 พบว่า ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 3 ปีวิจัยมีค่าใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์ตั้งต้น โดยค่า d มีค่าเท่ากับ 0.41, 0.40 และ 0.53 ตามลำดับ และค่าพารามิเตอร์ 0 ทั้ง 3 เดือน มีค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งพารามิเตอร์ทั้งสองมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกมามีความหยาบของพื้นผิวมาก ส่วนค่าส่วนสัดส่วนร่วมเงามีค่าเท่ากับ 0.53, 0.65 และ 0.85 ตามลำดับ

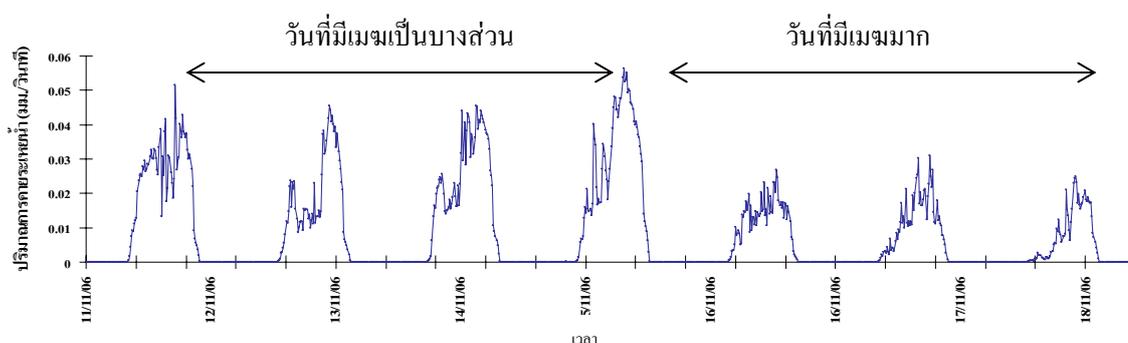
ตารางที่ 11 ผลการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

เดือน	ดัชนีพื้นที่ใบ (LAI)	สัดส่วนร่วมเงา (fs)	ความหยาบของพื้นผิว		EFF
			d	0	
พฤศจิกายน	3.51	0.53	0.41	0.10	0.6018
ธันวาคม	3.50	0.65	0.40	0.10	0.6240
มกราคม	3.50	0.85	0.53	0.10	0.5386

เมื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบ (EFF) พบว่า ทั้ง 3 เดือน มีค่าเท่ากับ 0.6018, 0.6240 และ 0.5386 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าผลการศึกษาของ Sumner and Jacops (2004) ที่ศึกษาอัตราการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith พร้อมทั้งดำเนินการเปรียบเทียบค่าดัชนีพื้นที่ใบ และตรวจสอบความถูกต้องกับค่าที่ตรวจวัดได้ด้วยวิธี Eddy-Correlation ของทุ่งหญ้าเลี้ยงสัตว์ และพบว่า EFF มีค่าเท่ากับ 0.80 นอกจากนี้ ผลการศึกษาที่ได้ยังต่ำกว่าผลการศึกษาของ Sumner (1996) ที่ทำการศึกษาในแปลงทดลองที่ปลูกหญ้าโดยมีการให้น้ำตลอดเวลา พบว่า EFF มีค่าแบบเท่ากับ 0.90 สาเหตุที่การศึกษานี้มีค่า EFF ค่อนข้างต่ำกว่าการศึกษาดังกล่าว เนื่องจากพื้นที่ป่าดิบเขาที่มีความหลากหลายของพืชพรรณมาก ในขณะที่งานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่เป็นงานวิจัยพืชชนิดเดียวหรือสวนป่า แต่การศึกษานี้มีข้อจำกัดในการตรวจวัดค่าการชักนำปากใบพืช ทำให้สามารถศึกษาได้เฉพาะพืชพรรณบริเวณรอบๆ หอคอยของสถานีตรวจวัดอากาศได้พืชเพียง 2 ชนิด ในขณะที่ค่าการคายระเหยน้ำที่วัดได้จากวิธี Eddy-Correlation เกิดจากของเรือนยอดต้นไม้หลากหลายชนิดที่กระจายอยู่รอบบริเวณที่ทำการตรวจวัด

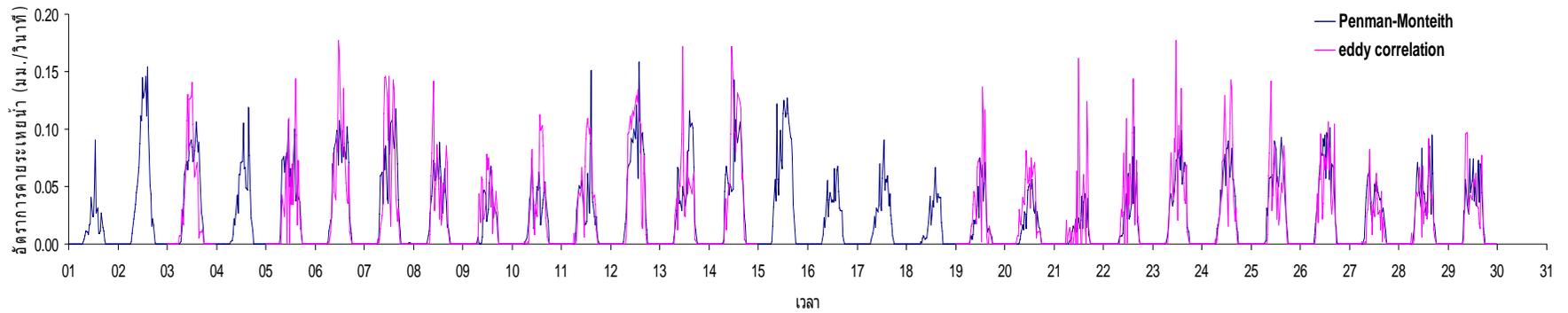
3.2 ค่าการคายระเหยน้ำจากแบบจำลอง Penman-Monteith

การศึกษาความผันแปรของการคายระเหยน้ำจากข้อมูลราย 10 นาที พบว่า มีความผันแปรสูง ซึ่งโดยทั่วไปเกิดจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ กล่าวคือในแต่ละช่วงวันการคายระเหยน้ำมีค่าค่อยๆ เพิ่มขึ้นในช่วงเช้า และมีค่าสูงสุดในช่วงบ่าย จากนั้นลดลงจนถึงช่วงเย็น อย่างไรก็ตามการปกคลุมของเมฆมีอิทธิพลต่อการคายระเหยน้ำด้วยเช่นกัน โดยในช่วงเวลาที่มีเมฆปกคลุม ค่าการคายระเหยน้ำจะมีค่าลดลง และกลับเพิ่มขึ้นเมื่อไม่มีการบดบังของกลุ่มเมฆ และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลรวมการคายระเหยน้ำในวันที่มีเมฆบางส่วนกับวันที่มีเมฆมาก พบว่า วันที่มีเมฆมากมีค่าการคายระเหยน้ำน้อยกว่าวันที่มีเมฆบางส่วนอย่างเห็นได้ชัดดังตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 18

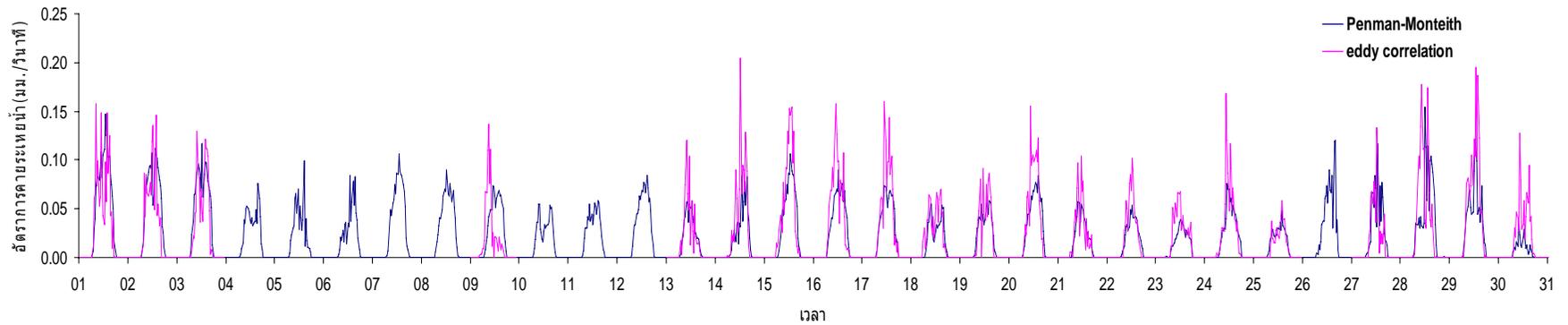


ภาพที่ 18 ความผันแปรของการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ระหว่างวันที่ 12-18 พฤศจิกายน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

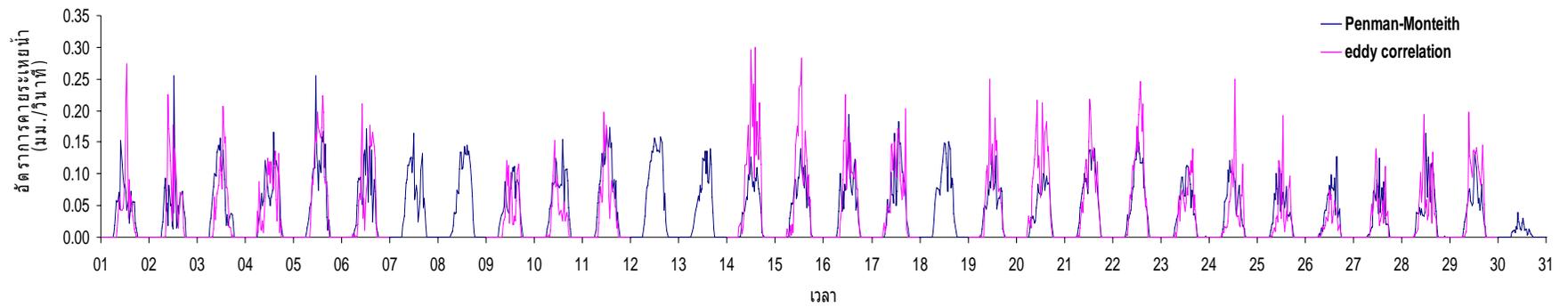
เมื่อเปรียบเทียบความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลองที่ได้ปรับเทียบแล้วกับค่าที่ตรวจวัดได้ด้วยวิธี Eddy-Correlation ตลอดช่วงเวลา 3 เดือน พบว่า ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาทีที่ประมาณค่าได้ด้วยแบบจำลองกับค่าที่ทำการตรวจวัดได้มีความสอดคล้องกันทั้ง 3 เดือน ดังภาพที่ 19 ถึงภาพที่ 21 โดยเส้นสีชมพู คือ อัตราการคายระเหยน้ำที่ตรวจวัดด้วยวิธี Eddy-Correlation ซึ่งตัดข้อมูลบางวันออก เนื่องจากข้อมูลที่ตรวจวัดมีความคลาดเคลื่อนสูง กล่าวคือผลรวมของพลังงานความร้อนในการเผาอากาศ (sensible heat flux) กับพลังงานความร้อนในการระเหยน้ำ (latent heat flux) มีความแตกต่างอย่างมากเมื่อเทียบกับค่ารังสีดวงอาทิตย์สุทธิ (net radiation)



ภาพที่ 19 ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ที่ประมาณค่าจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้โดยวิธี Eddy-Correlation ในเดือนพฤศจิกายน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 20 ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ที่ประมาณค่าจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้โดยวิธี Eddy-Correlation ในเดือนธันวาคม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่



ภาพที่ 21 ความผันแปรของค่าการคายระเหยน้ำราย 10 นาที ที่ประมาณค่าจากแบบจำลองกับค่าที่ตรวจวัดได้โดยวิธี Eddy-Correlation ในเดือนมกราคม บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

ปริมาณการคายระเหยน้ำที่ประมาณด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith ตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนธันวาคม 2548 และเดือนมกราคม 2549 มีค่าประมาณ 30, 32 และ 49 มิลลิเมตรต่อเดือน ตามลำดับ (ตารางที่ 12) จะเห็นได้ว่าในช่วงข้อมูลที่คัดเลือกมาศึกษา ปริมาณการคายระเหยน้ำรายเดือนมีค่ามากที่สุด คือ เดือนมกราคม รองมาคือเดือนธันวาคม และเดือนพฤศจิกายน ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยสิ่งแวดล้อม โดยที่ในเดือนพฤศจิกายน มีปริมาณรังสีดวงอาทิตย์ค่อนข้างต่ำ ส่วนในเดือนธันวาคมและเดือนมกราคมปริมาณรังสีดวงอาทิตย์มีค่าสูง อีกทั้ง อุณหภูมิเฉลี่ยรายเดือน ในเดือนมกราคมมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุด รองมาคือเดือนพฤศจิกายน และเดือนธันวาคมตามลำดับ และอิทธิพลของความชื้นในบรรยากาศซึ่งพบว่า ในเดือนพฤศจิกายนมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายเดือนมากที่สุด รองมาคือเดือนมกราคม และเดือนธันวาคมตามลำดับ ปัจจัยสิ่งแวดล้อมเหล่านี้มีอิทธิพลต่อการคายระเหยน้ำ จึงทำให้เดือนมกราคม และเดือนธันวาคมมีค่าการคายระเหยน้ำที่สูงกว่าเดือนพฤศจิกายน

ตารางที่ 12 ปริมาณการคายระเหยน้ำที่ประมาณจากแบบจำลอง Penman-Monteith

เดือน	รังสีดวงอาทิตย์คลื่นสั้น	อุณหภูมิ	ความชื้นสัมพัทธ์	การคายระเหยน้ำ	
	เฉลี่ยรายเดือน	เฉลี่ยรายเดือน	เฉลี่ยรายเดือน	จากแบบจำลอง	
	(วัตต์ต่อตารางเมตร)	(องศาเซลเซียส)	(เปอร์เซ็นต์)	Penman-Monteith	
				(มม./เดือน)	(มม./วัน)
พฤศจิกายน	149.5	18.2	87.2	30.25	1.0
ธันวาคม	167.3	14.8	76.8	31.95	1.1
มกราคม	167.0	19.6	85.8	48.79	1.6

เมื่อเปรียบเทียบค่าการคายระเหยน้ำรายเดือนจากการศึกษาข้างต้นกับค่าการคายระเหยน้ำที่ศึกษาด้วยวิธีอื่นๆ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Tanaka *et al.* (2002) ที่ได้ประมาณการคายระเหยน้ำของพืชในป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ด้วยแบบจำลอง Multilayer พบว่า ค่าการคายระเหยน้ำรายเดือนอยู่ในช่วง 26-88 มิลลิเมตรต่อเดือน โดยที่อัตราการคายระเหยน้ำจะมีค่าสูงในช่วงเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนเมษายน และอัตราการคายระเหยน้ำรายวันอยู่ในช่วง 0.8-2.5 มิลลิเมตรต่อวัน เมื่อเปรียบเทียบค่าการคายระเหยน้ำที่ได้จากการศึกษากับค่าการคายระเหยน้ำจากถาดวัดการคายระเหย พบว่าปริมาณการคายระเหยน้ำจากถาดวัดการคายระเหยของทั้ง 3 เดือนมีค่าประมาณ 111.0, 99.4 และ 88.9 มิลลิเมตรต่อเดือน ตามลำดับ (เรณู และคณะ, 2524) แสดงให้เห็นว่าค่าการคายระเหยน้ำจริงมีความแตกต่างจากค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดมาก

ส่วนค่าการคายระเหยน้ำรายวันทั้ง 3 เดือน พบว่า ค่าเฉลี่ยรายวันจากแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 1.0, 1.1 และ 1.6 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ (ภาคผนวก ง) ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการศึกษาด้วยมาตรวัดการคายระเหยส่วนการคายระเหยน้ำ พบว่า มีค่าเฉลี่ยรายวันประมาณ 3.2, 3.2 และ 2.8 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ (เรณู และคณะ, 2524) และเมื่อนำผลการศึกษาที่ได้ไปเปรียบเทียบกับพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินอื่น พบว่าอัตราการคายระเหยน้ำในพื้นที่ป่าดิบเขามีค่าต่ำกว่า พื้นที่ป่าเต็งรัง สวนสัก และพื้นที่เกษตรต่างๆ ดังเช่น ผลการศึกษาของ Pukngam (2001) ซึ่งพบว่า ค่าการคายระเหยน้ำในพื้นที่ป่าดิบเขามีค่าต่ำกว่าในพื้นที่ป่าเบญจพรรณผสมป่าเต็งรัง และสวนป่าสัก ซึ่งมีค่าการคายระเหยน้ำจริง เท่ากับ 3.7 และ 3.6 มิลลิเมตร พื้นที่นาข้าว มีค่าเท่ากับ 3.3 มิลลิเมตร ตามลำดับ ส่วนในพื้นที่ ไร่ฝ้าย สวนกล้วย ไร่อ้อย และสวนละมุด มีค่าการคายระเหยน้ำจริง เป็น 4.8, 2.7, 5.0, และ 4.6 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ เช่นเดียวกับผลการศึกษาของ ปิยพงษ์ (2544) ได้ทำการศึกษาคายระเหยน้ำโดยวิธี Bowen ratio ในพื้นที่นาข้าวมีการคายระเหยน้ำรายวันเฉลี่ย 4.4 มิลลิเมตร สำหรับป่าเต็งรังผสมเบญจพรรณมีการคายระเหยน้ำรายวันในช่วงฤดูหนาวเท่ากับ 4.3 มิลลิเมตร และฤดูฝนเท่ากับ 4.9 มิลลิเมตร อัตราการคายระเหยน้ำที่ทำการศึกษามีค่าต่ำกว่า อาจเป็นเพราะพื้นที่เหล่านี้มีเอกลักษณ์ของสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างจากพื้นที่ป่าดิบเขา เช่น มีอุณหภูมิที่สูงกว่า และความชื้นสัมพัทธ์มีค่าต่ำ มีการจัดการพื้นที่แตกต่างกัน โดยพื้นที่เกษตรมีการใช้น้ำกับพืชอย่างเต็มที่ ทำให้ค่าการคายระเหยน้ำมีค่าสูงกว่า

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชกนปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith ในพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ ได้ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

1. การศึกษาความผันแปรของปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อค่าการชกนปากใบพืช พบว่า ปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ปัจจัยอุณหภูมิ ทั้งอุณหภูมิเหนือเรือนยอด และอุณหภูมิมวลใบ และปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ ส่วนใหญ่มีค่าสหสัมพันธ์กับค่าการชกนปากใบพืชสูง ยกเว้นในบางวัน ไม่มีสหสัมพันธ์กัน ทั้งนี้อาจเนื่องจากได้รับอิทธิพลจากปัจจัยอื่นๆ มากกว่า ส่วนปัจจัยความชื้นในดินมีค่าสหสัมพันธ์มีค่าต่ำในทุกๆ เดือน ดังนั้นจึงเลือกปัจจัยรังสีดวงอาทิตย์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสง ปัจจัยอุณหภูมิ และปัจจัยความชื้นสัมพัทธ์ เพื่อใช้เป็นปัจจัยในการประมาณค่าการชกนปากใบพืชด้วยแบบจำลอง Jarvis

2. การประมาณค่าสัมประสิทธิ์สมการการชกนปากใบพืช พบว่า สมการระดับที่ 1 ถึง สมการระดับที่ 4 มีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบของต้นเทพทาโร เท่ากับ 0.6594, 0.6242, 0.6727 และ 0.5041 ตามลำดับ ส่วนต้นกุ่มห่มมีค่าเท่ากับ 0.6540, 0.5964, 0.6042 และ 0.5551 ตามลำดับ จากผลการศึกษาจึงประยุกต์ใช้สมการระดับที่ 3 ในการประมาณค่าการคายระเหยน้ำด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith เนื่องจากมีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบสูง และมีการกระจายรอบเส้น 45 ดีกว่า โดยมีสมการดังนี้
$$G_{sw} = 0.146 \left(\frac{Q}{Q+96.66} \right) \cdot \left[\left(\frac{T-7.04}{16.33} \right) \cdot \left(\frac{43.00-T}{19.60} \right)^{1.20} \right] \cdot \frac{(1-0.05D)}{(1+0.2D)}$$

3. การตรวจสอบความถูกต้องและเปรียบเทียบแบบจำลอง Penman-Monteith เริ่มจากเปรียบเทียบพารามิเตอร์ทั้ง 3 ปัจจัย พบว่า มีค่าดัชนีพื้นที่ใบเป็น 3.51, 3.50 และ 3.50 ตามลำดับ ส่วนค่าความหยาบของพื้นผิว มีค่าพารามิเตอร์ d เป็น 0.53, 0.65 และ 0.85 ตามลำดับ ค่าพารามิเตอร์ 0 มีค่าเป็น 0.1 ทั้ง 3 เดือน และมีค่าสัดส่วนรวมเงาเป็น 0.41, 0.40 และ 0.53 ตามลำดับ

4. ความถูกต้องของแบบจำลอง Penman-Monteith พบว่า ประสิทธิภาพในการจำลองแบบทั้ง 3 เดือน มีค่าเป็น 0.6018, 0.6240 และ 0.5386 ตามลำดับ

5. การคายระเหยน้ำที่ประมาณค่าได้จากแบบจำลอง รายเดือนมีค่าประมาณ 30, 32 และ 49 มิลลิเมตรต่อเดือน ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 1.0, 1.1 และ 1.6 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาการหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่ มีข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาในครั้งต่อไป ดังนี้

1. การเลือกพันธุ์ไม้ที่ใช้ในการตรวจวัดค่าการชักนำปากใบพืช ควรครอบคลุมทั้งพันธุ์ไม้เด่นและพันธุ์ไม้รองของสังคมพืชที่เลือกศึกษาในสัดส่วนที่เหมาะสม ทั้งนี้เพื่อให้ค่าที่ตรวจวัดได้เป็นตัวแทนของพฤติกรรมการเปิดปิดปากใบ ซึ่งจะส่งผลต่อการประมาณค่าการคายน้ำให้มีความใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดจริงมากยิ่งขึ้น

2. ควรศึกษาอิทธิพลของความชื้นในดินที่มีต่อการชักนำปากใบพืชเพิ่มเติมในพื้นที่แห้งแล้ง เพราะปัจจัยความชื้นในดินอาจมีอิทธิพลต่อการชักนำปากใบพืชมากกว่าพื้นที่ที่มีความชุ่มชื้นอย่างป่าดิบเขาที่ห้วยคอกม้า ทั้งนี้เพื่อให้การประมาณค่าการชักนำปากใบพืชมีความสมเหตุสมผลมากที่สุด และเพิ่มประสิทธิภาพของสมการการชักนำปากใบพืชให้มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

3. การตรวจสอบความถูกต้องของค่าการคายระเหยน้ำที่ได้จากแบบจำลอง Penman-Monteith ควรทำการศึกษาให้มีระยะเวลาและความต่อเนื่องมากกว่าการศึกษาก่อนหน้านี้ เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงความผันแปรของกระบวนการคายระเหยน้ำได้ครอบคลุมทุกฤดูกาล

4. การประมาณค่าการคายระเหยน้ำในการศึกษานี้ครอบคลุมเฉพาะส่วนที่เป็นการคายน้ำ ดังนั้นในการศึกษากครั้งต่อไปควรจะรวมแบบจำลองประมาณค่าน้ำพืชชนิด เช่น แบบจำลอง Rutter เพิ่มไว้ด้วย ทั้งนี้เพื่อให้การประมาณค่าการคายระเหยน้ำ มีความต่อเนื่องครอบคลุมตลอดช่วงฤดูกาล และมีความใกล้เคียงกับกระบวนการที่เกิดขึ้นจริงในธรรมชาติ

5. ควรทำการศึกษาในลักษณะเดียวกับการศึกษานี้ ในพื้นที่ที่มีการปกคลุมของชนิดพันธุ์พืชอื่นๆ เช่น สวนป่า ไม้ผล และพืชเกษตร เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้ในการพยากรณ์

ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน/สิ่งปกคลุมดินต่อกระบวนการคายระเหย
น้ำและสมดุลของน้ำในพื้นที่ลุ่มน้ำ ซึ่งจะเป็นแนวทางในการวางแผนการจัดการลุ่มน้ำได้อย่างมี
ประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กิติ ภัคศิวิฒนะกุล. 2546. **Advance Excel**. พิมพ์ครั้งที่ 2. KTP, กรุงเทพฯ.

เกษม จันท์แก้ว. 2512. รูปร่างและลักษณะของกลุ่มน้ำ, น. 40-48. ใน เกษม จันท์แก้ว, บรรณาธิการ. **การวิจัยลุ่มน้ำที่ห้วยคอกม้า เล่มที่ 1**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2526. **อุทกวิทยาลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

_____. 2539. **หลักการจัดการลุ่มน้ำ**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ซัชชัย ดันตสิรินทร์. 2549. Kog-Ma Experimental Watershed. **เอกสารประกอบการสอนวิชาอุทกวิทยาป่าไม้ประยุกต์**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ชุมพล งามส่องใส. 2512. ลักษณะพืชพรรณ, น. 98-124. ใน เกษม จันท์แก้ว, บรรณาธิการ. **การวิจัยลุ่มน้ำที่ห้วยคอกม้า เล่มที่ 1**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

ทนงศักดิ์ เชิดนรินทร์. 2545. การเปรียบเทียบค่าการคายระเหยน้ำของพืชโดยวิธี **Penman-Monteith และวิธี Modified Penman กับ Lysimeter**. โครงการนิสิตกรรมชลประทาน. คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

นิพนธ์ ตั้งธรรม. 2512. ลักษณะทางปฐพีวิทยา ของลุ่มน้ำห้วยคอกม้า, น. 103-164. ใน เกษม จันท์แก้ว, บรรณาธิการ. **การวิจัยลุ่มน้ำที่ห้วยคอกม้า เล่มที่ 1**. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- ปิยพงษ์ ทองดีนอก. 2544. การประเมินค่าการคายระเหยน้ำโดยวิธี **Bowen ratio** ในพื้นที่ที่มีการใช้ประโยชน์ที่ดินหลายรูปแบบของจังหวัดสุโขทัย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พันทิพย์ พีชมงคล. 2542. การศึกษาความเหมาะสมและความสำคัญของตัวแปรของสูตรเพนแมนในสถานะลมฟ้าอากาศของสถานีอุตุนิยมวิทยานครปฐม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เรณู สุวรรณรัตน์, เกษม จันทร์แก้ว, นิพนธ์ ตั้งธรรม, สามัคคี บุญยะวัฒน์ และ วิชา นิยม. 2524. สมดุลของน้ำในป่าดิบเขาธรรมชาติ ดอยปู่ย เชียงใหม่. การวิจัยลุ่มน้ำที่ห้วยคอกม้า เล่มที่ 36. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วิชา นิยม. 2535. **อุทกวิทยาป่าไม้**. ภาควิชาอนุรักษวิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วีรพล เต็มสมบัติ. 2538. **หลักอุทกวิทยา**. ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์ ทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วีระศักดิ์ อุดมโชค. 2524. การกระจายช่องว่างขนาดต่างๆ ของดินป่าดิบเขาและไร่เลื่อนลอยบริเวณดอยปู่ย จังหวัดเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศิริัญญา พิมาณ. 2545. การประเมินอัตราการคายน้ำของเทพทาโร และก่อหม่น ในป่าดิบเขา ดอยปู่ย จ.เชียงใหม่ โดยใช้แบบจำลอง **Penman-Monteith**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สมบุญ เตชะภิญญาวัฒน์. 2544. **สรีรวิทยาของพืช**. ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- สาโรจน์ ศักดิ์เจริญ. 2512. ลักษณะทางธรณีวิทยา, น. 98-124. ใน เกษม จันทรแก้ว, บรรณาธิการ. การวิจัยลุ่มน้ำที่ห้วยคอกม้า เล่มที่ 1. ภาควิชาอนุรักษ์วิทยา คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สำเร็จ ปานอุทัย. 2548. การศึกษา CO₂ Flux ในป่าเขตร้อนของประเทศไทย, น. 193. ใน การประชุมวิชาการการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศทางด้านป่าไม้ "ศักยภาพของป่าไม้ในการสนับสนุนพิธีสารเกียวโต". กรมป่าไม้, กรุงเทพฯ.
- สุชาติณี โพธิ์สุนทร. 2544. การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการประเมินค่าการคายระเหยน้ำสูงสุดแต่ละภูมิภาคโดยใช้รังสีดวงอาทิตย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เอ็จ สโรบล. 2530. ภูมิอากาศพืชชั้นสูง. ภาควิชาพืชไร่นา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ.
- Allen, R.G, L.S. Pereira , D. Raes and M. Smith. 1998. **Crop evapotranspiration**. Food and Agriculture Organization of the United Nations., Rome, Italy.
- Atmosphreic Radiation Measurement Program. 2001. **Eddy-Correlation Flux Measurement System (ECOR)**. Atmosphreic Radiation Measurement Program. Available Source: <http://www.arm.gov.html>. April 2, 2006.
- Baldocchi, D. 2003a. **Canopy Evaporation and Transpiration, Part 1**. Department of Environmental Science, Policy and Management. University of California. Available Source: <http://nature.berkeley.edu/biometlab.htm>, March 24, 2005.
- _____. 2003b. **Stomatal Conductance and Photosynthesis as Modulated by a Changed Atmospheric CO₂ Concentration, Part 3**. Department of Environmental Science, Policy and Management. University of California. Available Source: <http://nature.berkeley.edu/biometlab.htm>, March 24, 2005.

- Baldocchi, D. 2005. **Micromet Flux Measurements, Eddy-Covariance, Part 1**. Department of Environmental Science, Policy and Management. University of California. Available Source: [http:// nature.berkeley.edu/biometlab.htm](http://nature.berkeley.edu/biometlab.htm), March 20, 2005.
- _____. 2006. **Stomatal Conductance, Part 3**. Department of Environmental Science, Policy and Management. University of California. Available Source: <http://nature.berkeley.edu/biometlab.htm>, March 1, 2006.
- Ball, J.T., G.J. Collatz, C. Grivet and J.A. Berry. 1991. Physical and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration : a model that includes a laminar boundary layer. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology**. 54: 107-136.
- Bidwell, R.G.S. 1980. **Plant Physiology**. McMillan Co.Inc, New York.
- Brown, H. T. and W.J. Davies. 1900. Static diffusion of gases and liquids in relation to the assimilation of carbon and transpiration in plants. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology**. 193: 223-291.
- 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. **Forest Research Bulletin**. 16: 1-95.
- Devlin, R. M. 1990. **Plant Physiology**. D. Van. Norstrand Co., New York.

- Dingman, L.S. 2002. **Physical Hydrology**. University of New Hampshire. Prentice Hall, New Jersey.
- Dolman, A. J., J. H. C. Gash, J. Roberts. And W. J Shuttleworth. 1991. Stomata and surface conductance in tropical rainforest. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology**. 54: 303-318.
- Federer, C.A., C. J. Vorosmarty and B. Fekete. 1996. Intercomparison of methods for potential evapotranspiration in regional or global water balance models. **Journal of Water Resources Research**. 32: 15-21.
- Fischer, R.A. 1968. Stomatal Opening: Role of potassium uptake by guard cells. **Journal of Science**. 160: 784-785.
- Fisher, M.J. and D.A. Edward. 1981. An analysis of the effects of repeated short-term soil water deficits on stomatal conductance to carbon dioxide and leaf photosynthesis by the legume *Macroptilium atropurpureum* cv. Siratro. **Journal of Plant Physiology**. 8: 347-357.
- Fujino, M. 1967. Role of adenosinetriphosphate and adenosinetriphosphatase in stomatal movement. **Science Bullentin of the Faculty of Education. Nagasaki University**. 18: 1-47.
- Gash, J. H. C., W. J. Shuttleworth, C.R. Lloyd and J. Gelpe. 1989. Micrometeorological measurement in Les Landes forest during HAPEX-MOBILHY. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology**. 46: 131-147.
- Hewlett, T.C. 1982. **Principle of Forest Hydrology (2nd ed.) Athens**. University of Georgia Press, Georgia.

- Huxman, T.E. and S.D Smith. 2001. **Photosynthesis in an invasive grass and native forest at elevated CO₂ during an El Nino year in the Mojave Desert.** Effect of Elevated CO₂ on Two Mojave Desert Plants. Available Source: <http://www.CO2science.org/JOURNAL/2001/v4n33b1.html>, September 10, 2006.
- Jarvis, P.C. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. **Journal of Plant Physiology.** 273: 593-610.
- Jensen, M.E. and H.R. Haise. 1963. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of Irrigation and Drainage.** 89: 15-41.
- _____. R.D. Burman and R.G. Allen. 1990. **Evapotranspiration and Irrigation Water Requirement.** ASCE Manuals and Reports on Engineering NO. 70, American Social Civil Engineering., New York.
- Kirnak H., R.C Hansen, H.M. Keener and T.H. Short. 2001. An Evaluation of Physically Based and Empirically Determined Evapotranspiration Models for Nursery Plants. **Journal of Agricultural and Forest.** 26: 355-362.
- Kondo, T. 1982. Correlation between Potassium Uptake Rhythm and Nitrate Uptake Rhythm in *Lemna gibba* G3. **Journal of Plant and Cell Physiology.** 23: 909-915.
- Korner, Ch. 1994. Leaf diffusive conductances in major vegetation types of the globe, pp. 463-490. In E.D. Schulze and M.M. Caldwell, eds. **Ecophysiology of Photosynthesis.** Berlin, Germany.
- Kosaka, I. H. Takizawa. K. Tanaka. C. Tantasirin. M. Suzuki . Y. Tsukamoto. 2004. Characteristics of Turbulence Components above a Hill Evergreen Forest in Tropical Region. **Journal of Japan Society Hydrological & Water Resource.** 17(2): 123-133.

Kosugi, Y. 1996. **Leaf-scale Analysis of the CO₂ and HO₂ Exchange Processes between Trees and the Atmosphere.** Kyoto University, Japan.

Kramer, P.J. and T.T. Koslowski. 1979. **Physiology of Woody Plants.** Academic Press, New York.

Lhomme, J.P., A. Chehbouni, E. Elguero and G. Boulet. 1995. Examination of Monteith's Parameterization of Canopy Resistance. **American Meteorological Society.** 29: 11-16.

Mansfield, T.A., A.M. Hetherington and C.J. Atkinson. 1990. Some current aspects of stomatal physiology. **Journal of Plant Physiology.** 41: 55-75.

Massman, W.J. and M.R Kaufmann. 1991. Stomatal response to certain environmental factor: comparison of models for subalpine trees in the Rocky Mountains. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology.** 54: 155-167.

Misson, L., J.A Panek and A.H Goldstein. 2004. A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forests. **University of California Postprints 24.** 5: 529-541.

Monteith, J.L. 1965. **Evaporation and Environment.** Cambridge University, NewYork.

Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe, 1970. River flow forecasting through conceptual model, Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology.** 10: 282-290.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. **Proceeding Royal Science London.** 193: 120-146.

- Penman, H.L. 1963. Vegetation and Hydrology. **Journal of The Ecological Society of America** 44: 831-832.
- Philip, P.H., M. Perter, H.C. John and M. Yadvinder. 2004. Effect of soil moisture on canopy conductance of Amazonian rain forest. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology**. 122: 215-227.
- 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.
- Rampisela, A.D, M. Suzuki and Y. Fukushima. 1990. Application of the Penman-Monteith model to estimation of the evapotranspiration rate of a forested watershed. **Journal of Japan Forest Meteorology**. 72: 1-10.
- 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.
- Sharkey, T. D. 1984. Transpiration-induced changes in the photosynthetic capacity of leaves. **Journal of Plant Physiology**. 160: 143-150.
- Sharpe, P.J. and R.D. Spence. 1987. Stomatal function, pp 58-75 *In* E. Zeiger, ed. **Stomatal mechanics**. Stanford University, California.
- Shuttleworth, W.J. 1988. Evaporation from Amazon rain forest. **Journal of Plant physiology**. 233: 321-346.
- Sirisampan, S. 1999. **Diurnal and seasonal variations of stomatal conductance in six plants species composing warm-temperate forest.** Special Program of Atmosphere and Hydrosphere Graduate School of Science Nagoya University, Japan.

- Stewart, J.B. 1988. Modelling surface conductance of pine forest. **Agricultural and Forest Meteorology**. 43: 19-35.
- Sumner, D.M. 1996. **Evapotranspiration from Successional Vegetation in a Deforested Area of the Lake Wales Ridge, Florida**. U.S.GEOLOGICAL SURVEY Water-Resources Investigations Report 96-4244. Available Source: <http://www.elsevier.com/locate/hydrol>, August 22, 2004.
- _____. and S. Jacob. 2004. Utility of Penman–Monteith, Priestley–Taylor, Reference evapotranspiration, and pan evaporation methods to estimate pasture evapotranspiration. **Journal of Hydrology**. 308: 81–104.
- Suzuki, M. 1991. Evapotranspiration from forests. **Journal of Japan Hydrological and Water Resource**. 4: 9-22.
- Swinbank, WC. 1951. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal of Meteorology**. 8: 135-145.
- Tanaka, K., N. Yoshifuji, C. Tantasirin, M. Suzuki and N. Tangtham. 2002. Transpiration peak over a hill evergreen forest in northern Thailand in late dry season: Assessing the seasonal changes in evapotranspiration using a multilayer model. **Journal of Geophysical Research**. 108: 41-55.
- Tantasirin, C., S. Piman, H. Takizawa, N. Tangtham and M. Suzuki. 2001. Diurnal and Seasonal Variation of CO₂ and H₂O Exchange at the Leaf Scale in Hill Evergreen Forest, Northern Thailand, p. 256. **In Proceeding 2001 Workshop on GAME-Tropics in Thailand during 5th-7th March 2001**. Organized by National Sub-committee for GAME-Tropics in Thailand and Japan Sub-committee for GAME-Tropics, Bangkok.

- Valentijn, R.N., D. Pauwels and S. Roeland. 2005. **Comparison of different methods to Measure and model actual evapotranspiration rates for a wet sloping grassland.** Agricultural Water Management. Available Source: [http:// www.elsevier.com/locate/jhydrol](http://www.elsevier.com/locate/jhydrol), August 26, 2004.
- Ward, A.D. and W.J. Elliot. 1995. **Environmental Hydrology.** Lewis Publishers, New York.
- Yamasaki, T., K. Kato, T. Kuwada, T. Nakai, H. Park and T. Ohta. 2004. Land surface model simulation on CREST forest sites using measured leaf-scale physiological parameters. **Journal of Hydrometeorology.** 5: 504-515.
- Yamashita, T. 1952. Influences of potassium supply upon various properties and movement of the guard cell. **Sieboldia Acta Biologia.** 1: 51-70.
- Zeiger, E. 1983. The biology of stomatal of guard cells. **Journal of Plant Physiology .** 34: 441-465.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

วิธี GRG ในโปรแกรม Solver

Solver คือ ส่วนของกลุ่มคำสั่งที่บางครั้งเรียกว่า เครื่องมือการวิเคราะห์ what-if ด้วย Solver จะหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับสูตรในเซลล์ๆ หนึ่ง เรียกว่า เซลล์เป้าหมาย บนแผ่นงาน Solver ทำงานกับกลุ่มของเซลล์ที่เกี่ยวข้องกับสูตรในเซลล์เป้าหมายไม่ว่า โดยตรงหรือทางอ้อม Solver และปรับเปลี่ยนค่าในเซลล์ที่กำลังเปลี่ยนแปลงที่ตามิที่ผู้กำหนด เซลล์ที่ปรับเปลี่ยน เพื่อให้ผลลัพธ์ที่ผู้ต้องการจากสูตรของเซลล์เป้าหมาย และสามารถนำค่าคงที่มาใช้เพื่อจำกัดค่าที่ Solver รวมถึงสามารถใช้ในแบบจำลอง และค่าจำกัดสามารถอ้างอิงถึงเซลล์อื่นๆ ที่มีผลกระทบต่อสูตรของเซลล์เป้าหมายได้ ใช้ Solver เพื่อกำหนดค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของเซลล์ๆ หนึ่ง โดยการเปลี่ยนเซลล์อื่นๆ Excel จะทำการคำนวณเซลล์ที่อ้างอิงถึงเซลล์อื่นใหม่อีกครั้ง เมื่อเซลล์ที่ถูกอ้างอิงถึงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่า การคำนวณชนิดนี้ช่วยหลีกเลี่ยงการคำนวณที่ไม่จำเป็นต่างๆ Excel ยังคำนวณสมุดงานทุกครั้งที่สมุดงานถูกเปิดอีกด้วย และสามารถใช้ Solver เมื่อผู้ใช้จำเป็นต้องค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับบางเซลล์โดยการปรับเปลี่ยนค่าของหลายๆ เซลล์ หรือเมื่อต้องการใช้อ้างอิงบางอย่างกับค่าอย่างน้อยหนึ่งค่าในการคำนวณ (กิติ, 2546) เครื่องมือ Solver ของ Microsoft Excel ใช้วิธีที่เหมาะสมที่ไม่ใช่เชิงเส้นตรง Generalized Reduced Gradient (GRG2) ที่พัฒนาโดย Leon Lasdon แห่ง University of Texas at Austin และ Allan Waren แห่ง Cleveland State University ปัญหาเชิงเส้นตรง และปัญหาเชิงจำนวนเต็มจะใช้วิธีซิมเพล็กซ์ ด้วยขอบเขตของตัวแปรและวิธีแขนงและขอบเขตที่คิดค้น โดย John Watson และ Dan Fylstra จากบริษัท Frontline Systems, Inc ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสม ภายใต้ขอบเขตที่กำหนด ค่าที่เหมาะสม จะเป็นค่าสูงสุด หรือค่าต่ำสุด ก็ขึ้นอยู่กับผู้กำหนดเช่นกัน ในเซลล์เป้าหมาย หรือเซลล์ผลลัพธ์ จะต้องมิสมการ หรือแบบจำลอง ในเซลล์เป้าหมายจะเปลี่ยนแปลงตามเซลล์ที่เป็นค่าคงที่ หรือเซลล์สัมประสิทธิ์ ที่จะทำให้เซลล์เป้าหมายเปลี่ยนแปลงไป ซึ่ง Solver จะทำการเลือกค่าที่เหมาะสม ภายใต้เงื่อนไขที่ผู้กำหนด โดย Solver จะทำการค้นหาเซลล์สัมประสิทธิ์วนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกว่าจะได้ค่าที่เหมาะสม

ภาคผนวก ข

ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าการชักนำปากใบพืชกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม

ตารางผนวกที่ ข1 ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างค่าการชักนำปากใบพืชกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม
ของต้นเทพทาร์ บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

	Air temp	leaf temp	%RH	P.A.R.	Gs
21 สิงหาคม 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.7977	1.0000			
%RH	-0.1418	-0.0542	1.0000		
P.A.R.	-0.2199	0.3233	0.0857	1.0000	
Gs	0.1488	0.5359	0.0558	0.8508	1.0000
22 สิงหาคม 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9235	1.0000			
%RH	-0.3775	-0.1785	1.0000		
P.A.R.	0.3380	0.6441	-0.0075	1.0000	
Gs	0.2804	0.3530	-0.6348	0.6475	1.0000
20 พฤศจิกายน 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9151	1.0000			
%RH	-0.7852	-0.6634	1.0000		
P.A.R.	0.5866	0.8589	-0.3101	1.0000	
Gs	0.6063	0.7030	-0.2320	0.7375	1.0000
21 พฤศจิกายน 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9812	1.0000			
%RH	-0.9558	-0.9398	1.0000		
P.A.R.	0.7847	0.8720	-0.7090	1.0000	
Gs	0.5754	0.5634	-0.4068	0.7017	1.0000

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

	Air temp	leaf temp	%RH	P.A.R.	Gs
26 ธันวาคม 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9766	1.0000			
%RH	-0.9464	-0.9117	1.0000		
P.A.R.	0.8139	0.9178	-0.7280	1.0000	
Gs	0.8131	0.8270	-0.8308	0.7856	1.0000
2 มีนาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9523	1.0000			
%RH	-0.2414	-0.1605	1.0000		
P.A.R.	0.7781	0.9085	0.1935	1.0000	
Gs	0.1067	0.1588	0.9079	0.4687	1.0000
3 มีนาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9704	1.0000			
%RH	-0.5738	-0.5270	1.0000		
P.A.R.	0.6269	0.7902	-0.2861	1.0000	
Gs	-0.2159	-0.1118	0.3798	0.3289	1.0000
25 พฤษภาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9608	1.0000			
%RH	-0.2572	-0.3922	1.0000		
P.A.R.	0.6838	0.8281	-0.7305	1.0000	
Gs	-0.0250	-0.0062	-0.5097	0.3670	1.0000

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

	Air temp	leaf temp	%RH	P.A.R.	Gs
26 พฤษภาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9784	1.0000			
%RH	0.1058	0.2907	1.0000		
P.A.R.	0.7050	0.8186	0.6900	1.0000	
Gs	0.5985	0.5741	0.1921	0.6498	1.0000
20 มิถุนายน 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9729	1.0000			
%RH	0.5782	0.7268	1.0000		
P.A.R.	0.6138	0.5592	-0.1112	1.0000	
Gs	-0.5798	-0.7010	-0.6426	0.0358	1.0000
21 มิถุนายน 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9862	1.0000			
%RH	-0.1159	-0.0043	1.0000		
P.A.R.	0.7639	0.8091	-0.0513	1.0000	
Gs	0.1600	0.0481	-0.6053	0.2740	1.0000

ตารางผนวกที่ ข2 ค่าสัมพัทธ์ระหว่างค่าการชักนำปากใบพืชกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม ของต้นก่อหม่น
บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

	Air temp	leaf temp	%RH	P.A.R.	Gs
21 สิงหาคม 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9484	1.0000			
%RH	0.1193	0.0335	1.0000		
P.A.R.	0.7444	0.9062	0.0408	1.0000	
Gs	0.3398	0.4716	0.3423	0.7243	1.0000
22 สิงหาคม 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9385	1.0000			
%RH	-0.6270	-0.5439	1.0000		
P.A.R.	0.7632	0.9265	-0.4642	1.0000	
Gs	-0.3364	-0.4153	-0.1035	-0.2451	1.0000
20 พฤศจิกายน 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9187	1.0000			
%RH	-0.8519	-0.7724	1.0000		
P.A.R.	0.5672	0.8417	-0.4550	1.0000	
Gs	0.8702	0.8465	-0.6994	0.6525	1.0000
21 พฤศจิกายน 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9499	1.0000			
%RH	-0.9394	-0.9013	1.0000		
P.A.R.	0.7222	0.8887	-0.6398	1.0000	
Gs	0.6974	0.6217	-0.4499	0.5781	1.0000

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

	Air temp	leaf temp	%RH	P.A.R.	Gs
26 ธันวาคม 2542					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9580	1.0000			
%RH	-0.9356	-0.8877	1.0000		
P.A.R.	0.5440	0.7574	-0.4593	1.0000	
Gs	0.7385	0.8181	-0.6698	0.7894	1.0000
2 มีนาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9749	1.0000			
%RH	-0.4341	-0.3499	1.0000		
P.A.R.	0.5655	0.6717	0.4196	1.0000	
Gs	-0.1292	-0.1400	0.8228	0.4877	1.0000
3 มีนาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9636	1.0000			
%RH	-0.6896	-0.6214	1.0000		
P.A.R.	0.3562	0.5805	-0.0715	1.0000	
Gs	-0.4983	-0.5259	0.5032	-0.0878	1.0000
25 พฤษภาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9600	1.0000			
%RH	-0.2739	-0.0713	1.0000		
P.A.R.	0.4324	0.5715	-0.1187	1.0000	
Gs	0.3159	0.3099	-0.3796	0.7490	1.0000

ตารางผนวกที่ ข2 (ต่อ)

	Air temp	leaf temp	%RH	P.A.R.	Gs
26 พฤษภาคม 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9620	1.0000			
%RH	-0.1011	0.1459	1.0000		
P.A.R.	0.3674	0.5697	0.6077	1.0000	
Gs	0.1723	0.0213	-0.4522	0.0109	1.0000
20 มิถุนายน 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9799	1.0000			
%RH	0.5432	0.6711	1.0000		
P.A.R.	0.5118	0.5051	-0.0759	1.0000	
Gs	-0.7372	-0.8164	-0.9230	0.0153	1.0000
21 มิถุนายน 2543					
Air temp	1.0000				
leaf temp	0.9516	1.0000			
%RH	-0.0782	-0.0351	1.0000		
P.A.R.	0.5583	0.7617	-0.1466	1.0000	
Gs	0.5974	0.4996	-0.0699	0.3867	1.0000

ภาคผนวก ค

ค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้ด้วยแบบจำลอง Jarvis และปัจจัยสิ่งแวดล้อม

ตารางผนวกที่ ค1 ค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้ด้วยแบบจำลอง Jarvis และปัจจัยสิ่งแวดล้อมของต้นเทพทาโร บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
21 สิงหาคม 2542	11:46	22.8	40.8	892.3	0.10	0.11
	12:23	22.6	43.4	636.6	0.09	0.10
	13:22	23.0	45.2	225.8	0.06	0.06
	13:57	25.5	39.6	166.8	0.07	0.04
	14:26	23.0	45.1	160.6	0.05	0.05
	14:59	25.4	40.9	96.5	0.06	0.03
	15:26	24.8	42.0	163.2	0.04	0.05
	15:51	24.1	41.4	136.0	0.03	0.04
	16:20	22.5	42.6	119.6	0.03	0.04
	16:56	21.2	38.7	41.0	0.02	0.02
22 สิงหาคม 2542	08:06	25.6	42.2	128.2	0.06	0.04
	08:36	25.7	47.0	167.0	0.04	0.05
	09:03	25.3	49.7	129.3	0.03	0.04
	09:42	24.5	51.6	110.1	0.03	0.04
	10:23	27.2	45.1	880.5	0.08	0.09
	10:54	28.9	47.0	541.9	0.06	0.07
	11:22	27.6	49.4	181.5	0.03	0.05
	11:51	26.6	46.3	143.2	0.04	0.04
	12:22	27.4	41.5	923.4	0.09	0.09
	13:22	28.7	44.1	336.3	0.05	0.06
	13:44	29.8	40.1	290.1	0.06	0.05
	14:06	30.9	37.7	289.9	0.06	0.04

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	14:28	29.9	39.9	229.6	0.05	0.04
	15:05	26.5	40.8	64.8	0.04	0.02
	15:31	25.7	41.4	136.3	0.04	0.04
	16:03	26.6	41.8	167.0	0.06	0.04
	16:45	26.4	44.6	71.4	0.04	0.02
20 พฤศจิกายน 2542	09:26	24.3	33.9	750.7	0.09	0.09
	09:59	22.4	34.5	743.9	0.08	0.10
	10:28	21.4	36.3	444.9	0.08	0.08
	10:53	21.5	36.4	490.1	0.07	0.09
	11:18	21.8	33.4	515.3	0.07	0.09
	11:47	21.8	32.1	295.1	0.07	0.07
	12:18	23.3	29.1	710.5	0.06	0.09
	12:45	25.2	27.4	887.0	0.07	0.09
	13:13	23.1	29.1	92.0	0.05	0.03
	13:40	21.1	32.6	328.6	0.06	0.07
	14:08	22.1	31.8	899.9	0.07	0.10
	14:33	22.4	31.4	243.1	0.06	0.06
	14:56	23.2	31.1	523.1	0.07	0.08
	15:22	22.8	31.3	82.8	0.05	0.03
	15:55	21.9	33.0	96.1	0.05	0.03
	16:29	20.2	36.3	65.5	0.03	0.03
	16:55	19.3	38.4	35.5	0.02	0.01
21 พฤศจิกายน 2542	07:41	17.5	41.6	158.1	0.05	0.05
	08:12	20.9	36.8	269.1	0.08	0.07
	08:43	22.5	34.8	471.9	0.10	0.08
	10:14	25.3	28.0	1241.7	0.12	0.10
	10:47	22.7	31.7	206.9	0.08	0.05

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C ^o)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	11:18	23.1	30.2	401.8	0.10	0.08
	11:48	22.0	31.6	249.6	0.08	0.06
	12:22	22.6	30.8	393.5	0.08	0.08
	12:53	25.0	26.7	382.3	0.09	0.07
	13:25	22.4	29.5	615.8	0.08	0.09
	13:57	27.2	23.1	1296.3	0.10	0.09
	14:31	28.8	21.1	1258.9	0.10	0.08
	15:05	26.9	23.6	1037.1	0.09	0.08
	15:43	27.2	23.8	484.0	0.04	0.07
	16:23	24.0	27.5	39.3	0.01	0.01
	16:58	19.6	34.6	16.2	0.01	0.01
	17:08	19.0	35.8	8.0	0.02	0.00
26 ธันวาคม 2542	07:40	8.7	33.0	44.2	0.03	0.01
	08:15	12.1	26.2	426.5	0.05	0.07
	08:49	15.3	21.2	1054.8	0.09	0.10
	09:55	22.1	13.5	1550.8	0.11	0.11
	10:31	19.1	15.4	1121.9	0.13	0.10
	11:03	18.6	15.2	1075.1	0.11	0.10
	11:36	18.5	15.2	1106.4	0.11	0.10
	12:09	16.3	17.5	272.5	0.08	0.06
	13:45	18.9	16.5	1212.9	0.08	0.11
	14:16	23.7	12.6	1697.7	0.11	0.10
	14:48	23.8	12.6	1535.8	0.11	0.10
	15:21	23.5	12.9	1332.5	0.12	0.10
	15:53	22.7	13.7	1269.5	0.11	0.10
	16:26	21.9	14.5	719.0	0.11	0.09
	17:00	15.4	20.7	34.2	0.03	0.01

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
2 มีนาคม 2543	11:47	29.3	37.6	1711.1	0.10	0.09
	12:27	30.3	32.7	1448.4	0.09	0.08
	13:02	30.7	32.1	1518.4	0.08	0.07
	13:36	29.8	29.1	1319.5	0.07	0.08
	14:55	29.7	28.7	1054.9	0.07	0.07
	15:34	29.3	29.7	1046.5	0.06	0.08
	16:56	26.7	28.8	73.1	0.03	0.02
	17:32	24.6	29.4	34.8	0.01	0.01
3 มีนาคม 2543	07:39	18.5	29.3	48.8	0.05	0.02
	08:13	21.0	38.0	86.1	0.05	0.03
	08:47	23.3	52.4	216.6	0.05	0.06
	09:22	25.9	43.1	231.4	0.06	0.06
	10:11	29.0	22.6	693.0	0.05	0.07
	10:49	29.5	22.2	900.0	0.07	0.07
	11:27	30.3	27.6	1450.2	0.06	0.07
	13:00	30.0	30.0	982.5	0.06	0.07
	13:34	29.3	27.5	850.6	0.06	0.07
	14:11	29.2	28.3	533.7	0.04	0.06
	15:22	30.8	25.2	546.4	0.03	0.05
	16:01	31.2	23.3	339.3	0.02	0.04
	16:37	29.3	23.5	220.5	0.02	0.04
17:10	28.3	23.1	84.8	0.01	0.02	
26 พฤษภาคม 2543	07:45	22.9	52.0	52.3	0.00	0.02
	08:51	25.7	60.6	216.5	0.10	0.06
	09:24	29.0	59.2	200.5	0.09	0.05
	10:29	29.3	45.4	1056.5	0.10	0.08
	11:23	29.8	43.3	877.3	0.09	0.08

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	11:58	27.0	52.6	277.6	0.05	0.05
	12:30	27.2	53.4	196.9	0.08	0.05
	13:03	26.2	55.3	131.2	0.06	0.04
	13:37	26.9	56.2	169.8	0.06	0.05
	14:14	27.1	60.1	188.6	0.05	0.05
	15:03	26.1	54.0	135.9	0.06	0.04
20 มิถุนายน 2543	12:43	24.1	66.7	143.1	0.08	0.05
	13:14	25.4	69.8	181.0	0.07	0.06
	13:44	25.5	70.1	210.3	0.05	0.06
	14:14	25.0	74.1	192.0	0.05	0.06
	14:44	25.4	74.5	171.3	0.04	0.06
	15:14	25.2	73.4	85.8	0.03	0.04
	16:20	24.8	72.4	128.8	0.04	0.05
	16:49	24.7	72.2	91.2	0.02	0.04
	17:17	24.7	72.2	116.4	0.03	0.05
	17:46	24.2	73.7	79.8	0.02	0.03
21 มิถุนายน 2543	07:29	22.4	70.4	78.2	0.05	0.03
	08:06	24.5	66.4	96.2	0.05	0.04
	08:37	24.4	67.5	46.2	0.05	0.02
	09:08	24.0	68.5	71.4	0.04	0.03
	09:37	24.0	68.6	56.9	0.04	0.03
	10:08	24.3	69.2	125.6	0.04	0.05
	10:37	24.8	71.2	155.7	0.04	0.05
	11:07	26.3	67.4	258.0	0.07	0.07
	11:39	25.8	66.0	114.8	0.04	0.04
	12:09	25.1	68.4	218.0	0.06	0.07

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C ^o)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
	12:38	26.0	62.9	245.5	0.07	0.07
	13:09	27.0	62.2	185.7	0.07	0.05
	13:39	25.9	63.9	210.8	0.04	0.06
	16:05	23.5	59.1	107.9	0.08	0.04
	16:33	23.7	62.5	75.0	0.03	0.03
	17:03	23.6	65.6	87.8	0.03	0.04

ตารางผนวกที่ ค2 ค่าการชักนำปากใบพืชที่ประมาณค่าได้ด้วยแบบจำลอง Jarvis และปัจจัย
สิ่งแวดล้อมของต้นก่อหม่น บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวงอาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
21 สิงหาคม 2542	13:38	29.0	43.5	1325.9	0.08	0.05
	14:11	29.1	44.3	442.9	0.05	0.05
	15:12	30.8	42.2	903.9	0.04	0.04
	15:40	29.1	42.1	391.1	0.03	0.04
	16:08	28.3	43.4	91.1	0.01	0.03
	16:35	27.1	39.4	61.7	0.02	0.02
	17:11	25.7	39.5	30.6	0.02	0.02
22 สิงหาคม 2542	07:52	25.7	40.0	87.1	0.05	0.03
	08:20	25.4	44.9	137.9	0.04	0.04
	09:18	24.8	50.6	121.3	0.03	0.05
	10:39	28.6	45.5	432.6	0.05	0.05
	12:07	26.1	45.9	92.3	0.03	0.04
	12:36	29.6	38.7	905.8	0.04	0.05
	13:55	31.3	37.4	1336.1	0.03	0.04
	15:19	25.8	40.6	56.8	0.04	0.03
	15:48	26.0	41.6	206.3	0.04	0.05
	16:27	26.6	43.7	109.9	0.01	0.04
20 พฤศจิกายน 2542	09:44	23.7	33.7	551.5	0.07	0.06
	10:14	21.4	36.2	129.2	0.05	0.04
	10:41	21.1	36.7	254.3	0.05	0.06
	11:06	22.2	33.6	495.3	0.06	0.06
	11:30	22.0	32.6	346.1	0.06	0.06
	12:01	23.2	29.7	710.7	0.07	0.06
	12:31	24.2	28.5	675.3	0.07	0.06
	13:25	21.6	31.5	99.1	0.03	0.04

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	13:53	21.7	32.1	278.5	0.05	0.06
	14:20	22.8	31.0	385.7	0.08	0.06
	14:44	21.8	32.6	421.3	0.05	0.06
	15:08	23.4	30.6	252.3	0.06	0.05
	15:37	21.9	32.8	114.2	0.05	0.04
	16:10	21.1	34.8	54.4	0.04	0.03
	16:45	19.6	37.9	67.0	0.03	0.03
21 พฤศจิกายน 2542	07:57	20.1	37.4	270.7	0.05	0.06
	08:26	22.0	35.1	325.5	0.06	0.06
	09:56	25.0	28.0	472.7	0.06	0.05
	10:29	24.8	28.5	241.0	0.04	0.05
	11:31	22.6	30.7	464.6	0.04	0.06
	12:04	23.6	29.1	450.7	0.05	0.06
	12:36	24.7	27.9	822.1	0.05	0.06
	13:44	25.6	25.2	1278.7	0.04	0.06
	14:15	27.1	22.8	733.0	0.05	0.05
	14:50	28.1	22.0	822.5	0.06	0.04
	16:43	21.1	31.8	55.5	0.01	0.03
	16:43	21.1	31.5	23.0	0.00	0.01
26 ธันวาคม 2542	07:59	9.8	31.1	34.4	0.01	0.00
	08:33	13.3	23.8	310.7	0.04	0.03
	09:06	16.9	19.1	745.1	0.05	0.05
	09:39	20.1	15.8	1011.7	0.07	0.06
	10:14	19.2	15.2	115.5	0.05	0.03
	10:46	17.5	16.3	645.5	0.04	0.05
	11:19	18.2	15.1	160.7	0.04	0.04
	11:52	17.9	15.4	65.0	0.03	0.02

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
	12:25	15.0	19.1	77.1	0.02	0.02
	12:56	15.8	18.7	984.4	0.03	0.05
	13:28	17.0	18.3	780.9	0.05	0.05
	14:00	20.9	14.7	1276.1	0.06	0.06
	14:32	24.0	12.1	1069.1	0.07	0.05
	15:04	23.7	12.5	1038.1	0.08	0.05
	15:37	22.7	13.3	692.9	0.05	0.05
	16:09	22.9	13.5	343.7	0.04	0.05
	16:43	18.5	17.1	36.0	0.01	0.02
	17:13	13.3	23.8	15.6	0.01	0.00
2 มีนาคม 2543	12:07	29.6	37.1	1111.5	0.07	0.05
	13:19	31.3	29.3	683.4	0.04	0.03
	13:55	30.9	29.7	913.1	0.03	0.04
	14:35	32.7	26.4	805.3	0.02	0.03
	15:14	30.6	27.4	492.6	0.03	0.03
	15:51	30.2	29.4	604.5	0.03	0.04
	17:14	26.1	27.5	66.0	0.01	0.02
	17:49	22.7	30.9	32.2	0.01	0.02
3 มีนาคม 2543	07:56	20.0	33.7	48.0	0.04	0.03
	08:30	22.1	43.4	72.7	0.03	0.04
	09:40	27.0	29.5	577.6	0.03	0.05
	10:28	29.2	23.1	122.9	0.03	0.02
	11:09	28.6	25.6	118.1	0.04	0.03
	11:44	29.1	32.1	460.7	0.04	0.04
	12:41	29.2	32.6	252.3	0.03	0.04
	13:18	30.3	28.0	318.1	0.03	0.03
	13:53	29.4	27.4	634.0	0.03	0.04

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	15:04	30.4	26.0	409.7	0.01	0.03
	16:19	30.8	23.1	216.5	0.01	0.03
	16:54	28.6	23.5	79.0	0.01	0.02
	17:25	27.6	23.2	39.0	0.01	0.01
26 พฤษภาคม 2543	08:39	21.7	62.9	89.7	0.08	0.05
	10:00	23.1	67.3	114.6	0.05	0.06
	11:07	25.3	68.1	138.7	0.05	0.07
	12:20	25.7	61.0	182.7	0.07	0.06
	13:27	25.8	58.4	221.4	0.08	0.06
	13:29	25.3	56.5	103.9	0.06	0.05
20 มิถุนายน 2543	13:56	25.8	69.6	230.9	0.07	0.08
	16:34	24.8	71.3	110.0	0.08	0.06
	17:03	24.7	72.0	122.2	0.06	0.07
	17:31	24.4	73.3	102.5	0.05	0.07
	18:00	24.0	73.0	71.0	0.05	0.05
21 มิถุนายน 2543	07:45	24.4	65.9	74.4	0.07	0.05
	08:52	24.1	68.3	63.4	0.07	0.05
	09:22	24.1	69.7	113.0	0.07	0.06
	09:53	24.1	69.4	89.0	0.05	0.06
	10:23	24.8	69.1	127.8	0.06	0.07
	10:53	25.4	70.4	177.2	0.06	0.07
	11:54	25.1	69.9	181.1	0.09	0.08
	12:24	25.5	65.7	214.4	0.09	0.07
	12:54	26.5	62.7	563.7	0.08	0.08
	13:24	26.5	62.4	143.5	0.06	0.06

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	เวลา	อุณหภูมิเหนือ เรือนยอด (C°)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	รังสีดวง อาทิตย์ PAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืช ที่ตรวจวัดได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	ค่าการชักนำ ปากใบพืชที่ ประมาณค่าได้ ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
	13:54	25.8	62.3	124.9	0.06	0.05
	15:49	22.9	56.2	130.4	0.06	0.06
	16:19	23.7	60.7	96.2	0.04	0.05
	16:48	23.6	64.2	84.7	0.03	0.05

ภาคผนวก ง

ปริมาณการคายระเหยน้ำของแบบจำลอง Penman-Monteith และ วิธี Eddy Correlation รายวัน

ตารางผนวกที่ ง1 ข้อมูลอัตราการคายระเหยน้ำ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมในเดือนพฤศจิกายน บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

วัน/เดือน/ปี	รังสีดวงอาทิตย์ (W/m ²)	อุณหภูมิ (C ^o)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความเร็วลม (m ²)	อัตรา การคายระเหยน้ำ penman-monteith (mm)	อัตรา การคายระเหยน้ำ Eddy-Correlation (mm)
1 พย. 2548	-	-	-	-	-	-
2 พย. 2548	-	-	-	-	-	-
3 พย. 2548	658.59	19.7	0.83	1.2	1.4	1.5
4 พย. 2548		-				
5 พย. 2548	689.74	19.9	0.85	0.9	1.2	1.0
6 พย. 2548	709.27	20.5	0.85	1.2	1.5	1.5
7 พย. 2548	886.60	20.0	0.90	1.5	1.4	1.5
8 พย. 2548	754.86	19.3	0.92	2.2	1.0	1.0
9 พย. 2548	568.50	18.4	0.96	2.1	0.6	0.8
10 พย. 2548	379.30	19.1	0.88	1.5	0.8	1.0
11 พย. 2548	449.25	19.6	0.90	1.0	0.9	1.2
12 พย. 2548	764.04	20.4	0.82	1.3	1.6	1.7
13 พย. 2548	630.76	20.5	0.86	1.5	1.2	1.1
14 พย. 2548	813.25	20.3	0.77	1.5	1.5	1.7
15 พย. 2548	-	-	-	-	-	-
16 พย. 2548	-	-	-	-	-	-
17 พย. 2548	-	-	-	-	-	-
18 พย. 2548	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ๑1 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	รังสีดวงอาทิตย์ (W/m ²)	อุณหภูมิ (C ^o)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	ความเร็ว ลม (ม ²)	อัตรา การคายระเหยน้ำ penman-monteith (mm)	อัตรา การคายระเหยน้ำ Eddy-Correlation (mm)
19 พย. 2548	617.33	18.0	0.94	1.8	0.7	1.0
20 พย. 2548	514.90	16.9	0.95	1.5	0.6	1.0
21 พย. 2548	263.16	15.0	0.97	1.1	0.4	0.7
22 พย. 2548	625.50	14.5	0.93	1.1	0.7	1.0
23 พย. 2548	756.68	15.2	0.81	1.3	1.1	1.3
24 พย. 2548	726.94	15.5	0.84	1.2	1.1	1.2
25 พย. 2548	685.88	16.4	0.84	1.0	1.2	1.0
26 พย. 2548	744.94	17.2	0.82	1.2	1.3	1.1
27 พย. 2548	533.95	17.7	0.85	1.3	0.9	0.6
28 พย. 2548	463.03	18.4	0.82	1.2	1.1	0.8
29 พย. 2548	570.89	17.9	0.87	1.3	1.0	0.9
30 พย. 2548	462.45	17.4	0.87	1.8	0.9	1.3

ตารางผนวกที่ ๖2 ข้อมูลอัตราการคายระเหยน้ำ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมในเดือนธันวาคม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

วัน/เดือน/ปี	รังสีดวงอาทิตย์ (W/m ²)	อุณหภูมิ (C ^o)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความเร็วลม (m ²)	อัตรา การคายระเหยน้ำ penman-monteith (mm)	อัตรา การคายระเหยน้ำ Eddy-Correlation (mm)
1 ธค. 2548	685.42	15.6	0.70	1.66	1.81	1.58
2 ธค. 2548	634.15	16.2	0.82	1.67	1.61	1.33
3 ธค. 2548	646.65	16.5	0.70	1.01	1.58	1.28
4 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
5 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
6 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
7 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
8 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
9 ธค. 2548	507.76	16.3	0.98	4.01	0.89	0.86
10 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
11 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
12 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
13 ธค. 2548	609.98	17.0	0.97	0.45	0.81	0.80
14 ธค. 2548	737.64	15.5	0.95	0.99	0.83	1.27
15 ธค. 2548	688.80	14.7	0.81	0.95	1.24	1.64
16 ธค. 2548	715.25	13.6	0.71	1.03	1.14	1.50
17 ธค. 2548	691.27	14.1	0.69	0.67	1.07	1.41
18 ธค. 2548	468.12	13.4	0.67	1.44	0.73	0.95
19 ธค. 2548	646.82	12.5	0.86	0.93	0.83	0.90
20 ธค. 2548	653.56	11.5	0.82	0.74	1.12	1.43
21 ธค. 2548	441.09	13.7	0.76	0.57	0.71	0.79
22 ธค. 2548	639.71	10.6	0.97	0.97	0.63	0.82

ตารางผนวกที่ ง2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	รังสีดวงอาทิตย์ (W/m ²)	อุณหภูมิ (C ^o)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	ความเร็ว ลม (m ²)	อัตรา การคายระเหยน้ำ penman-monteith (mm)	อัตรา การคายระเหยน้ำ Eddy-Correlation (mm)
23 ธค. 2548	417.97	9.8	0.67	1.23	0.52	0.81
24 ธค. 2548	573.83	12.1	0.78	1.06	0.88	1.18
25 ธค. 2548	391.09	14.5	0.80	2.20	0.57	0.49
26 ธค. 2548	-	-	-	-	-	-
27 ธค. 2548	650.84	16.5	0.56	0.67	1.50	0.80
28 ธค. 2548	650.84	16.5	0.56	0.67	1.52	1.47
29 ธค. 2548	685.92	16.0	0.56	0.82	1.59	1.61
30 ธค. 2548	551.66	15.4	0.79	1.25	1.31	0.91
31 ธค. 2548	694.14	16.0	0.79	0.73	1.49	2.07

ตารางผนวกที่ 3 ข้อมูลอัตราการคายระเหยน้ำ และปัจจัยสิ่งแวดล้อมในเดือนมกราคม บริเวณพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่

วัน/เดือน/ปี	รังสีดวงอาทิตย์ (W/m ²)	อุณหภูมิ (C ^o)	ความชื้นสัมพัทธ์ (%)	ความเร็วลม (m ²)	อัตรา การคายระเหยน้ำ penman-monteith (mm)	อัตรา การคายระเหยน้ำ Eddy-Correlation (mm)
1 มค. 2549	758.3	20.0	90.95	1.3	1.3	1.3
2 มค. 2549	816.5	21.1	80.66	1.6	1.5	1.5
3 มค. 2549	1052.4	20.9	82.06	1.8	1.8	1.5
4 มค. 2549	658.6	20.5	81.48	1.3	1.9	1.7
5 มค. 2549	776.2	20.1	86.15	1.4	2.1	2.6
6 มค. 2549	919.7	20.3	84.26	1.7	1.9	1.9
7 มค. 2549	-	-	-	-	-	-
8 มค. 2549	-	-	-	-	-	-
9 มค. 2549	531.9	18.7	80.67	1.0	1.6	1.2
10 มค. 2549	858.8	19.4	79.84	1.3	1.9	1.0
11 มค. 2549	-	-	-	-	-	-
12 มค. 2549	-	-	-	-	-	-
13 มค. 2549	850.2	19.8	78.05	1.3	2.4	1.7
14 มค. 2549	769.2	20.2	91.47	1.3	1.5	3.2
15 มค. 2549	663.6	20.2	88.58	1.2	1.7	2.7
16 มค. 2549	968.8	20.0	88.15	1.5	1.7	2.2
17 มค. 2549	1035.2	19.7	82.98	1.6	2.0	2.4
18 มค. 2549	-	-	-	-	-	-
19 มค. 2549	738.4	19.1	88.84	1.3	1.6	2.1
20 มค. 2549	606.2	19.2	85.42	1.9	1.6	3.0
21 มค. 2549	872.1	19.4	81.97	1.3	2.0	2.2

ตารางผนวกที่ ง3 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	รังสีดวงอาทิตย์ (W/m ²)	อุณหภูมิ (C ^o)	ความชื้น สัมพัทธ์ (%)	ความเร็ว ลม (m ²)	อัตรา การคายระเหยน้ำ penman-monteith (mm)	อัตรา การคายระเหยน้ำ Eddy-Correlation (mm)
22 มค. 2549	808.0	19.2	80.53	1.5	1.9	2.4
23 มค. 2549	670.6	18.7	84.68	1.7	1.6	1.4
24 มค. 2549	745.0	18.4	87.93	1.1	1.5	1.4
25 มค. 2549	678.9	18.3	90.03	1.0	1.3	1.1
26 มค. 2549	369.5	18.7	92.48	1.4	1.2	0.7
27 มค. 2549	528.9	19.1	92.28	1.4	1.0	1.1
28 มค. 2549	981.2	19.8	89.73	1.6	1.5	1.3
29 มค. 2549	746.8	19.6	90.49	2.1	1.5	2.1
30 มค. 2549	-	-	-	-	-	-
31 มค. 2549	-	-	-	-	-	-

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวประคำแก้ว บุญธรรม
วัน เดือน ปี ที่เกิด	11 ตุลาคม พ.ศ.2524
สถานที่เกิด	จังหวัดชัยนาท
ประวัติการศึกษา	วท.บ (วนศาสตร์) เกียรตินิยมอันดับสอง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	

