J 4445

นิพนธ์ต้นฉบับ

แบบจำลองคณิตศาสตร์เพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาบริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่; 1. การจำลองแบบ การปรับเทียบ และการทวนสอบ

Mathematical Models for Estimating Evapotranspiration of a Hill Evergreen Forest in Kog Ma Watershed, Doi Pui, Chiang Mai Province; 1. Model Formulation, Calibration and Verification

ชัชชัย ตันตสิรินทร์ Chatchai Tantasirin
วิภารัตน์ ทองเด็จ Wiparat Thongdet

คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
Faculty of Forestry, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.
E-mail: fforect@ku.ac.th

รับต้นฉบับ 7 สิงหาคม 2555 รับลงพิมพ์ 20 กันยายน 2555

ABSTRACT

An application of a mathematical model was studied coupling the Penman, Penman-Monteith and Rutter's models to estimate the evapotranspiration of a hill evergreen forest at Huai Kog Ma, Doipui, Chiang Mai province, northern Thailand. The results obtained from the coupled model were compared with those measured from the Eddy-Correlation method. To calibrate and verify the results from the model, Nash and Sutcliffe's equation (NSE) was employed to indicate model efficiency.

The results on the efficiency of the model calibration for rainfall-intercepted water derived from the Rutter's model based on 10 and 30 minute data results produced an average NSE equal to 0.8858 and 0.8890, respectively. The average NSE of the transpiration estimation based on the Penman-Monteith model using 10 minute data was higher than from using 30 minute data with values of 0.3965 and 0.3181, respectively. The model verification of the rainfall interception showed a lower efficiency compared with that from the calibration process. The average NSE of the interception estimation using 10 minute data was lower than using from 30 minute data with values of 0.7662 and 0.8349, respectively. Verification of the transpiration estimation showed that the average NSE using the 30 minute data was higher than from using 10 minute data with values of 0.3596 and 0.3433, respectively.

Keywords: evapotranspiration, mathematic model, Huai Kog Ma watershed, hill evergreen forest

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการประยุกต์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งรวมแบบจำลอง Penman, Penman-Monteith และ Rutter ประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขา บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย จังหวัดเชียงใหม่ และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่วัดด้วยวิธี Eddy-Correlation โดยใช้สมการของ Nash and Sutclife (1970) เพื่อแสดงประสิทธิภาพ (model efficiency; NSE) จากการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลอง ผลการศึกษาสรุปได้ดังนี้

ประสิทธิภาพของการประมาณค่าน้ำพืชยืดราย 10 นาที และ 30 นาที ที่ได้จากขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลอง มีค่า NSE เฉลี่ยใกล้เคียงกัน คือ 0.8858 และ 0.8890 ตามลำดับ ส่วนการประมาณค่าปริมาณคายน้ำของพืช พบว่าราย 10 นาที มีค่า NSE เฉลี่ยสูงกว่าราย 30 นาที คือ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.3965 และ 0.3181 ตามลำดับ ส่วนผลการทวนสอบแบบจำลองการประมาณค่าน้ำพืชยืดราย 10 นาทีและ 30 นาที พบว่าค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองลดลง โดยการจำลองแบบราย 10 นาทีมีค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบต่ำกว่าราย 30 นาที โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7662 และ 0.8349 ตามลำดับ ส่วนผลการทวนสอบการประมาณค่าการคายน้ำของราย 10 นาที และ 30 นาที พบว่าแบบจำลองราย 30 นาทีมีความใกล้เคียงมากกว่าราย 10 นาที โดยมีค่าประสิทธิภาพในการจำลองแบบเฉลี่ยเท่ากับ 0.3596 และ 0.3433 ตามลำดับ

คำสำคัญ: การคายระเหยน้ำ แบบจำลองคณิตศาสตร์ ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ป่าดิบเขา

คำนำ

ปริมาณการคายระเหยน้ำถือเป็นส่วนที่สำคัญที่ต้องพิจารณาทางด้านการจัดการลุ่มน้ำ ทั้งนี้เนื่องจากเป็นส่วนที่สูญเสียออกจากระบบนิเวศลุ่มน้ำ หากมีปริมาณมากเกินไปก็จะส่งผลกระทบต่อปริมาณน้ำที่มนุษย์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ป่าดิบเขาถือเป็นแหล่งต้นน้ำลำธารที่สำคัญ หากเกิดการรบกวนหรือเปลี่ยนแปลงไปเป็นการใช้ที่ดินประเภทอื่น ย่อมส่งผลต่อปริมาณน้ำต้นทุนที่จะนำไปใช้ประโยชน์ได้ การเปลี่ยนแปลงปริมาณคายระเหยน้ำมีสาเหตุที่สำคัญ เช่น การเปลี่ยนแปลงระบบนิเวศป่าต้นน้ำเดิมไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม หรืออาจเกิดจากความผันผวนของสภาพภูมิอากาศ เช่นการตกของฝน หรือการแปรผันของอุณหภูมิอากาศที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากสภาวะโลกร้อน การคาดการณ์ว่าผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจะมีแนวโน้มไปในทิศทางใดจำเป็นต้องใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือ ปัจจุบันในประเทศไทยยังไม่มีการศึกษาในลักษณะนี้ การศึกษานี้จึงเป็นการทดลองนำแบบจำลองที่ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการประมาณค่าปริมาณน้ำที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการคายระเหยน้ำของพืช ได้แก่ แบบจำลองประมาณค่าการระเหยน้ำของ Penman (Penman, 1948) ค่าการคายน้ำของพืชของ Penman-Monteith (Monteith, 1965) และการสูญเสียน้ำจากส่วนที่ติดยึดค้างอยู่บนเรือนยอดของต้นไม้โดยแบบจำลองของ Rutter (Rutter *et al.*, 1971) ผลการศึกษาที่ได้หลังจากการปรับเทียบและทวนสอบแบบจำลองแล้ว สามารถนำไปประยุกต์ใช้คาดการณ์แนวโน้มของผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้นตามภาพเหตุการณ์ (scenario) ที่สนใจ และนำไปใช้ในการกำหนดนโยบายในการจัดการเพื่อปรับตัวหรือรับมือกับการแก้ปัญหาได้อย่างเหมาะสม

อุปกรณ์และวิธีการ

พื้นที่ศึกษา

การศึกษาวิจัยนี้เลือกพื้นที่ลุ่มน้ำห้วยคอกม้า ดอยปุย ตำบลสุเทพ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2508 โดยปัจจุบันมีการดำเนินการภายใต้โครงการวิจัยร่วมระหว่างคณะวนศาสตร์ มหาลัยเกษตรศาสตร์กับคณะวิทยาศาสตร์การเกษตรและชีวิต มหาวิทยาลัยโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น

การรวบรวมข้อมูล

รวบรวมข้อมูลต่างๆ ที่ตรวจวัดได้ระหว่างปี พ.ศ. 2551-2552 จากเครื่องมือที่ติดตั้งไว้บนหอคอยและแปลงทดลองน้ำพืชยืดที่อยู่ในบริเวณเดียวกัน ซึ่งบันทึกข้อมูลไว้ด้วยเครื่องบันทึกอัตโนมัติ ได้แก่ การตกของฝน น้ำฝนผ่านเรือนยอด ปัจจัยสิ่งแวดล้อม ปัจจัยด้านพืช และ ค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาที่ตรวจวัดด้วยวิธี Eddy-Correlation

การวิเคราะห์ข้อมูล

1. ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลต่างๆ ก่อนขั้นตอนการนำเข้าและการปรับเทียบแบบจำลอง โดยนำข้อมูลมาเขียนกราฟเพื่อพิจารณาความต่อเนื่องแนวโน้มการแปรผัน และความสมเหตุสมผลของข้อมูล ซึ่งการศึกษานี้ไม่ประมาณค่าของเดือนที่มีข้อมูลไม่สมบูรณ์

2. กำหนดแบบจำลองมโนทัศน์ ดังแสดงใน Figure 1 โดยรวมแบบจำลองประมาณค่าปริมาณน้ำฝนที่ติดยึด (intercepted water) และตกทะลุผ่าน (throughfall) เรือนยอดของป่าด้วยแบบจำลองของ Rutter *et al.* (1971) ปริมาณน้ำที่ระเหย (evaporation) จากเรือนยอดด้วยแบบจำลองของ Penman (1948) และปริมาณการคายน้ำ (transpiration) ของพืชด้วยแบบจำลองของ Penman-Motieth (1965) เข้าด้วยกัน และใช้สมการจากผลการศึกษาของประคำแก้ว (2550) เพื่อประมาณค่าสภาพนำของปากใบ (stomatal conductance) ในแบบจำลองของ Penman-Motieth

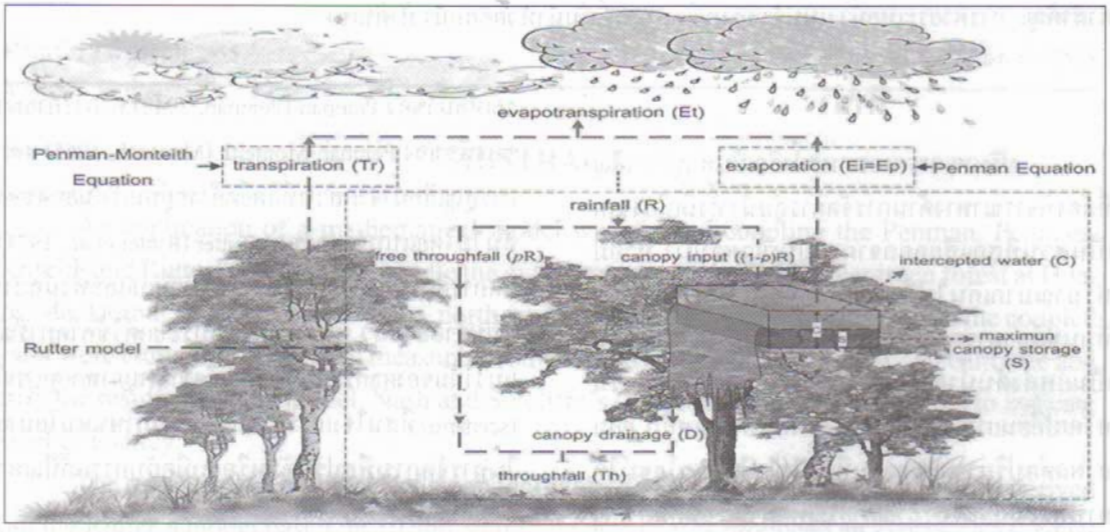

Figure 1 Conceptual model for estimating evapotranspiration of a hill evergreen forest at Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui, Chiang Mai province.

3. พัฒนาโปรแกรมแบบจำลองด้วยภาษา Visual basic for application (VBA) บนโปรแกรม Microsoft excel เพื่อแทนสมการคณิตศาสตร์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง

4. ปรับเทียบแบบจำลอง (model calibration) แบบกึ่งอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยภาษา VBA ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ทีละค่า ตั้งแต่ค่าต่ำสุดไปจนถึงสูงสุด ครอบคลุมช่วงค่าที่เป็นไปได้ จนครบทุกพารามิเตอร์ และบันทึกค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยความคาดเคลื่อนกำลังสอง (root mean square error; RMSE) ซึ่งคำนวณจากผลต่างระหว่างค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลอง กับค่าที่วัดได้จากการตรวจวัดด้วยวิธี Eddy-Correlation ที่เกิดจากการเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์แต่ละครั้ง พารามิเตอร์ที่ทำการปรับเทียบ ได้แก่ ค่าสภาพนำของปากใบสูงสุด (maximum stomatal conductance; C^*_{leaf}) ดัชนีพื้นที่ผิวใบพืช (leaf area index; LAI) อัตราการการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มต้น (initial canopy drainage rate; Ds) สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (canopy

drainage coefficient; b) และปริมาณเก็บกักน้ำของเรือนยอดสูงสุด (maximum canopy storage; S) โดยดำเนินการแยกปรับเทียบเป็นค่าพารามิเตอร์ของแต่ละเดือน และทดลองเปรียบเทียบการจำลองแบบระหว่างการใช้ข้อมูลนำเข้าที่มีช่วงระยะเวลาของข้อมูลห่างกันทุก 10 นาที (10 minute time interval) กับข้อมูล 30 นาที

5. เลือกค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองที่ทำให้ค่า RMSE มีค่าต่ำที่สุด และประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) โดยใช้สมการของ Nash and Sutcliffe (1970)

6. ทวนสอบแบบจำลอง (model verification) โดยนำพารามิเตอร์ที่ได้จากขั้นตอนการปรับเทียบของแต่ละเดือนไปใช้ประมาณค่าของข้อมูลปี พ. ศ. 2551 และ 2552 เพื่อพิจารณาว่าแบบจำลองยังคงประมาณค่าได้ใกล้เคียงกับขั้นตอนการปรับเทียบ

ผลและวิจารณ์

ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง

การปรับเทียบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ทำให้ผลการประมาณค่าจากแบบจำลองมีความใกล้เคียงกับที่ได้จากการตรวจวัดมากที่สุด ทั้งส่วนที่จำลองโดยใช้ข้อมูลราย 10 นาทีและราย 30 นาที ได้ผลดัง Table 1 และ Table 2 ตามลำดับ มีรายละเอียดดังนี้

1. สภาพนำของปากใบสูงสุด (C^*_{leaf}) ราย 10 นาที มีค่าอยู่ระหว่าง 0.4479-0.6747 เซนติเมตรต่อวินาที หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.5764 เซนติเมตรต่อวินาที ส่วนราย 30 นาที มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3647-0.5106 เซนติเมตรต่อวินาที หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.4168 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งผลการศึกษามีค่าสูงกว่าผลการศึกษาประคำแก้ว (2550) ซึ่ง C^*_{leaf} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.36-0.39 เซนติเมตรต่อวินาที เล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากการศึกษาของประคำแก้วเป็นการวัดค่าสภาพนำของปากใบพืชระดับใบ (leaf scale) ส่วนการศึกษานี้เป็นการศึกษาระดับเรือนยอด (canopy level) จึงทำให้ค่าที่ได้สูงกว่า

2. ดัชนีพื้นที่ผิวใบพืช (LAI) โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาทีของแต่ละเดือนมีค่าอยู่ระหว่าง 3.8750-4.1250 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.9929 ส่วนราย 30 นาที มีค่าสูงกว่าการใช้ข้อมูลราย 10 นาที โดยมีค่าระหว่าง 4.5000-5.5000 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 5.2000 อย่างไรก็ตาม แนวโน้มการแปรผันแต่ละเดือนเป็นไปในทางเดียวกัน และผลการศึกษาที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Tanaka *et al.* (2003) ซึ่งพบว่า LAI มีค่าระหว่าง 3.50-5.50

3. อัตราการการระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มต้น (Ds) ราย 10 นาทีของแต่ละเดือนมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0650-1.5600 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2250 โดยเดือนมีนาคม เดือนมิถุนายน เดือนสิงหาคมและเดือนกันยายนมีค่า Ds สูงกว่าเดือนอื่นๆ ส่วนค่า Ds ราย 30 นาทีของเดือนต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.6000-1.4500 หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.9607 ซึ่งผลการศึกษาที่ได้แตกต่างจาก Makoto *et al.* (2003) ศึกษาการคายระเหยน้ำของพื้นที่ป่าฝนเขตร้อนใน คาบสมุทรประเทศมาเลเซีย ด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith-Rutter พบว่ามี Ds เท่ากับ 0.0014 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างและสรีระวิทยาของพืช

4. สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) ราย 10 นาทีและ 30 นาทีของเดือนต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.1450-0.2500 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.1914 และ 0.1250-0.2250 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.1607 ตามลำดับ

5. ปริมาณเก็บกักน้ำของเรือนยอดสูงสุด (S) จากการจำลองแบบราย 10 นาที ของแต่ละเดือน พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 1.0000-1.4000 มิลลิเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2600 มิลลิเมตร ส่วนค่า S ราย 30 นาที มีค่าต่ำกว่าราย 10 นาที คือมีค่าระหว่าง 0.5000-0.8500 มิลลิเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7179 มิลลิเมตร อย่างไรก็ตามผลการศึกษาที่ได้สอดคล้องกับ Rutter *et al.* (1975) ซึ่งศึกษาเรือนยอดของต้นไม้ Hardwood Stands ในประเทศสหราชอาณาจักรอังกฤษ พบว่ามีค่าอยู่ระหว่าง 0.20-1.50 มิลลิเมตร ซึ่งค่าที่ได้กว้างมากเนื่องจากได้ศึกษาในต้นฤดูใบไม้ผลิและกลางฤดูใบไม้ผลิ และยังมีค่าใกล้เคียงกับการศึกษาของ Mathias *et al.* (2008) ที่ศึกษาการผันแปรตามฤดูกาลของการระเหยน้ำของน้ำพืชยืดจากเรือนยอดในพื้นที่ป่าแบญจพรรณ ประเทศสหราชอาณาจักรอังกฤษ อยู่ระหว่าง 0.50-1.58 มิลลิเมตร หรือมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.20 (± 0.31)

Table 1 Model parameters and validation coefficients for transpiration and interception estimation derived from calibration process based on 10 minute time interval data for 2008 in Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui, Chiang Mai province.

Month	C^*_{leaf} (cm/s)	LAI	Ds	b	S	Transpiration Estimation				Interception Estimation			
						RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R^2_{CF}	CF	RMSE	NSE	R^2_{CF}	CF
January	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
February	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
March	0.6747	4.1250	1.2500	0.2500	1.4000	4.0419	0.4030	0.4032	1.0076	0.5720	0.8831	0.8832	1.0095
April	0.5926	3.9750	1.0900	0.2150	1.2300	3.9228	0.5446	0.5446	1.0019	0.4689	0.9233	0.9260	1.4049
May	0.6029	3.9750	1.0650	0.1450	1.2100	3.8052	0.4015	0.4018	1.0096	0.6475	0.8448	0.8456	0.9739
June	0.4920	4.0000	1.5600	0.2050	1.4000	2.9472	0.4639	0.3684	0.9277	0.6619	0.8982	0.9190	0.8821
July	0.4479	3.8750	1.0900	0.1450	1.2500	2.6391	0.3708	0.3708	0.9958	0.9840	0.8814	0.8830	1.0389
August	0.5649	3.9750	1.2400	0.1750	1.3300	3.3467	0.2993	0.3004	1.0185	0.7037	0.8966	0.8966	0.9966
September	0.6473	4.0250	1.2800	0.2050	1.0000	3.9822	0.2924	0.2908	1.0046	0.8177	0.9025	0.9026	1.0085
October	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.8266	0.8566	0.8585	1.0403
November	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
December	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	0.5746	3.9929	1.2250	0.1914	1.2600	3.5264	0.3965	0.3829	0.9951	0.7103	0.8858	0.8893	1.0443

Notes: C^*_{leaf} = maximum stomatal conductance; LAI = leaf area index; Ds and b = canopy drainage coefficient; S = maximum canopy storage; RMSE = root mean square error; NSE = Nash and Sutcliffe (1970) model efficiency; R^2_{CF} = coefficient of determination of correction factor; CF = correction factor

Table 2 Model parameters and validation coefficients for transpiration and interception estimation derived from calibration process based on 30 minute time interval data for 2008 in Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui, Chiang Mai province.

Month	C^*_{leaf} (cm/s)	LAI	Ds	b	S	Transpiration Estimation				Interception Estimation			
						RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R^2_{CF}	CF	RMSE	NSE	R^2_{CF}	CF
January	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
February	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
March	0.5106	5.5000	1.2500	0.2250	0.8500	4.4070	0.3414	0.4737	1.2190	0.9125	0.9306	0.9065	0.9367
April	0.4376	5.5000	0.8750	0.2000	0.8250	4.3765	0.4332	0.6247	0.9541	1.0297	0.9045	0.9447	0.7327
May	0.4376	5.5000	0.8250	0.1250	0.7250	3.8526	0.4136	0.4900	1.2119	1.5954	0.8297	0.7732	0.9737
June	0.3647	4.5000	0.6000	0.1250	0.5000	3.4522	0.2644	0.4622	1.3764	2.0241	0.7424	0.9299	1.7020
July	0.4012	5.5000	0.6000	0.1250	0.5000	2.5740	0.3949	0.4695	1.1988	1.3185	0.9490	0.9378	1.0046
August	0.4012	4.8000	1.4500	0.1500	0.8000	3.4569	0.2679	0.4320	1.2860	1.8909	0.9336	0.8443	0.8670
September	0.3647	5.1000	1.1250	0.1750	0.8250	4.4816	0.1113	0.4775	1.4916	1.5780	0.8907	0.8948	0.9516
October	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.3891	0.9313	0.8535	0.9985
November	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
December	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	0.4168	5.2000	0.9607	0.1607	0.7179	3.8001	0.3181	0.4899	1.2483	1.4673	0.8890	0.8856	1.0209

Notes: C^*_{leaf} = maximum stomatal conductance; LAI = leaf area index; Ds and b = canopy drainage coefficient; S = maximum canopy storage; RMSE = root mean square error; NSE = Nash and Sutcliffe (1970) model efficiency; R^2_{CF} = coefficient of determination of correction factor; CF = correction factor

การปรับเทียบแบบจำลอง

ค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) จากขั้นตอนการปรับเทียบได้ผลดังแสดงใน Table 1 และ Table 2 แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การประมาณค่าการคายน้ำและน้ำพืชยืดของพืชจากข้อมูลราย 10 นาที และราย 30 นาที ตามลำดับ มีรายละเอียดดังนี้

1. ค่า NSE ของการประมาณค่าการคายน้ำราย 10 นาที ดัง Table 1 ของเดือนต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2924-0.5446 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.3965 ส่วนค่า R^2_{CF} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2908-0.5446 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.3829 ซึ่งค่า NSE และ R^2_{CF} ที่ได้มีค่าต่ำเนื่องจากค่าที่วัดได้จากวิธี Eddy-Correlation มีการแปรผันสูงมาก และค่า CF ของเดือนมิถุนายนและเดือนกรกฎาคม มีค่าต่ำกว่า 1 (ค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่วัดได้จากวิธี Eddy-Correlation) ส่วนเดือนอื่นๆ พบว่าค่า CF มีค่าสูงกว่า 1 โดยมี CF เฉลี่ยเท่ากับ 0.9951 ส่วนค่า NSE ของการประมาณค่าการการคายน้ำราย 30 นาที ดังแสดงใน Table 2 ของเดือนต่างๆ มีค่าต่ำกว่าการใช้ข้อมูลราย 10 นาที โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1113 – 0.4332 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.3181 และมีค่า R^2_{CF} อยู่ระหว่าง 0. 4320-0.6247 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.4899 ส่วนค่า CF เฉลี่ยของเกือบทุกเดือนมีค่าสูงกว่า 1 (ค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่วัดได้จากวิธี Eddy-Correlation) คิดเป็นค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2483 ยกเว้นเดือนกันยายนที่มีค่าเท่ากับ 0.9541

2. ค่า NSE ของการประมาณค่าน้ำพืชยืดราย 10 นาที ดัง Table 1 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8448-0.9233 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8858 ส่วน R^2_{CF} มีค่าอยู่ระหว่าง 0.8456-0.9260 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8893 โดยค่า CF ของเดือนพฤษภาคม มิถุนายน และกรกฎาคมมีค่าต่ำกว่า 1 ส่วนเดือนอื่นๆ พบว่าค่า CF มีค่าสูงกว่า 1 ซึ่งเมื่อคิดเป็นค่าเฉลี่ยจากข้อมูลทุกเดือนมีค่าเท่ากับ 1.0443 ส่วนค่า NSE ราย 30 นาที ดัง Table 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7424-0.9490 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8890 และมี R^2_{CF} อยู่ระหว่าง 0.7732-0.9447 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8856 ส่วนค่า CF ของเกือบทุกเดือนมีค่าต่ำกว่า 1 ยกเว้นเดือนมิถุนายนและกรกฎาคมที่มีค่าสูงกว่า 1 ซึ่งเมื่อเฉลี่ยค่าทุกเดือนแล้วมีค่าเท่ากับ 1.0209

จากผลการศึกษาดังกล่าวข้างต้น พบว่า NSE ของการประมาณค่าน้ำพืชยืดราย 10 นาทีและ 30 นาที มีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันเล็กน้อย คือ 0.8858 และ 0.8890 ตามลำดับ มีค่ามีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) เฉลี่ยมากกว่าร้อยละ 85 ทั้ง 2 ช่วงเวลา แต่ค่า RMSE ของราย 10 นาที มีค่าต่ำกว่าราย 30 นาที เล็กน้อย ค่า CF เฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกัน และใกล้เคียง 1 มาก ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าค่าน้ำฝนผ่านเรือนยอดและน้ำพืชยืดที่ประมาณได้จากการใช้ข้อมูลราย 10 นาที มีความใกล้เคียงกันกับการประมาณค่าด้วยข้อมูลราย 30 นาที ส่วนการประมาณค่าการคายน้ำของพืชจากข้อมูลราย 10 นาที มีใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดด้วยวิธี Eddy-Correlation มากกว่าการใช้ข้อมูลราย 30 นาทีเล็กน้อย โดยมีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.3965 และ 0.3181 ตามลำดับ และมีค่า R^2_{CF} เฉลี่ยแตกต่างกันไม่มากนัก คือ ร้อยละ 38.29 และ 48.99 ตามลำดับ รวมทั้งมีค่า RMSE ของแต่ละเดือนเฉลี่ยใกล้เคียงกันมากคือเท่ากับ 3.5264×10^{-5} และ 3.8001×10^{-5} ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการแปรผันของข้อมูลที่วัดจากวิธี Eddy-Correlation มีสูงมาก ส่วนค่า CF ของราย 10 นาทีมีค่าต่ำกว่า 1 เฉลี่ยเท่ากับ 0.9951 ซึ่งหมายถึงค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด ส่วนราย 30 นาทีมีค่าสูงกว่า 1 มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.2483

การทวนสอบแบบจำลอง

1. ผลการทวนสอบแบบจำลองเมื่อพิจารณาจากค่า NSE โดยข้อมูลน้ำพืชยืดและการคายน้ำที่ได้จากการตรวจวัด ในปี พ.ศ. 2552 และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของข้อมูลราย 10 และ 30 นาที ที่ได้จากขั้นตอนการปรับเทียบ พบว่าการประมาณค่าน้ำพืชยืดโดยใช้ข้อมูลราย 10 และ 30 นาที มีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.6001 และ 0.8148 หรือมีค่าลดลงจากการปรับเทียบ ร้อยละ 32.25 และ 10.42 ตามลำดับ ส่วนผลการทวนสอบของการประมาณค่าการคายน้ำโดยใช้ข้อมูลราย 10 นาทีและ 30 นาที พบว่า ค่า NSE ของเดือนต่างๆ มีค่าติดลบ สาเหตุเนื่องจากข้อมูล พ.ศ. 2552 มีปัจจัยด้านสภาพอากาศที่แตกต่างกับ พ.ศ. 2551 มาก เป็นผลให้เมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ปรับเทียบจาก พ.ศ. 2551 ไปใช้กับข้อมูล พ.ศ. 2552 ค่า RMSE และ SSE ที่ได้จาก

แบบจำลองมีค่าสูงมาก ค่า NSE จึงมีค่าติดลบ ดังนั้นจึงได้ทำการทวนสอบการจำลองแบบโดยใช้ข้อมูล พ.ศ. 2551 โดยนำค่าพารามิเตอร์ของเดือนที่มีลักษณะปัจจัยแวดล้อมใกล้เคียงกันมาทวนสอบแบบจำลอง มีผลการศึกษาดัง Table 3 และ Table 4

2. ผลการทวนสอบการประมาณค่าการคายน้ำจากข้อมูลปี พ. ศ. 2551 โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาทีได้ผลดัง Table 3 พบว่าค่า NSE มีค่าอยู่ระหว่าง 0.2066-0.4916 เฉลี่ยเท่ากับ 0.3433 (ลดลงร้อยละ 13.41) มีค่าสัมประสิทธิ์ตัวกำหนดของกราฟ 1:1 (R^2_{CF}) เฉลี่ยเท่ากับ 0.3485 (ลดลงร้อยละ 8.96) หรือมีค่าลดลงเฉลี่ยร้อยละ 11.19 โดยมีค่า CF เฉลี่ยเท่ากับ 0.9918 ส่วนผลการทวนสอบโดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ดัง Table 4 พบว่าค่า NSE ของมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1395-0.5361 เฉลี่ยเท่ากับ 0.3596 (เพิ่มขึ้นร้อยละ 13.05) และมีค่า R^2_{CF} เฉลี่ยเท่ากับ 0.4264 (ลดลงเฉลี่ยร้อยละ 12.97) ส่วน ค่า CF มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.1570 ซึ่งหมายถึงค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัด จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า การประมาณค่าการคายน้ำด้วยแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที มีความใกล้เคียงมากกว่าการใช้ข้อมูลราย 10 นาที

3. ผลการทวนสอบการประมาณค่าน้ำพืชยืดด้วยข้อมูล พ.ศ. 2551 โดยใช้ข้อมูลนำเข้าราย 10 นาที ดัง Table 3 มีค่า NSE อยู่ระหว่าง 0.5138-0.8981 เฉลี่ยเท่ากับ 0.7662 หรือมีค่าลดลงร้อยละ 13.50 และ R^2_{CF} มีค่าระหว่าง 0.7195-0.9118 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8343 หรือมีค่าลดลงร้อยละ 6.19 หรือลดลงเฉลี่ยร้อยละ 9.85 ส่วนค่า CF มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.0212 แสดงว่าค่าที่ประมาณมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัด ส่วนผลการทวนสอบการประมาณค่าน้ำพืชยืดโดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที ดัง Table 4 พบว่ามีค่า NSE อยู่ระหว่าง 0.3225-0.9495 เฉลี่ยเท่ากับ 0.8349 หรือมีค่าลดลงร้อยละ 6.08 และมีค่า R^2_{CF} ระหว่าง 0.8101-0.9467 หรือเฉลี่ยเท่ากับ 0.9060 ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 2.28 หรือลดลงเฉลี่ยร้อยละ 1.90 ส่วนค่า CF มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.0717 แสดงว่าค่าที่ประมาณได้จากแบบจำลองมีค่าต่ำกว่าที่ตรวจวัด

Table 3 Validation coefficients derived from verification process based on 10 minute time interval data for 2008 in Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui, Chiang Mai province.

Calibrate/ Validate	Transpiration Estimation				Interception Estimation			
	RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R^2_{CF}	CF	RMSE	NSE	R^2_{CF}	CF
January	-	-	-	-	-	-	-	-
February	-	-	-	-	-	-	-	-
March	4.4650	0.2714	0.4052	0.8532	1.0997	0.5679	0.7195	1.5517
April	4.1448	0.4916	0.5424	0.8975	0.5405	0.8981	0.9118	0.9033
May	3.8087	0.4004	0.4016	1.0218	1.1460	0.5138	0.7702	0.6749
June	3.1148	0.4012	0.3684	0.9277	0.9235	0.8018	0.8119	1.1081
July	2.6915	0.3456	0.3727	0.9061	1.0780	0.8577	0.8638	0.9305
August	3.5611	0.2066	0.3208	1.2267	0.8265	0.8574	0.8696	1.1002
September	4.0787	0.2865	0.0287	1.1095	1.0080	0.8519	0.8652	1.1041
October	-	-	-	-	1.0226	0.7806	0.8620	0.7966
November	-	-	-	-	-	-	-	-
December	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	3.6949	0.3433	0.3485	0.9918	0.9556	0.7662	0.8343	1.0212

Table 4 Validation coefficients derived from verification process based on 30 minute time interval data for 2008 in Huai Kog Ma Watershed, Doi Pui, Chiang Mai province.

Calibrate/ Validate	Transpiration Estimation				Interception Estimation			
	RMSE ($\times 10^{-5}$)	NSE	R^2_{CF}	CF	RMSE	NSE	R^2_{CF}	CF
January	-	-	-	-	-	-	-	-
February	-	-	-	-	-	-	-	-
March	3.0515	0.4777	0.4778	1.0050	0.4323	0.3225	0.8101	1.3276
April	3.9243	0.5361	0.6247	0.9541	1.4944	0.8139	0.9447	0.7327
May	3.9591	0.3756	0.4900	1.2710	0.7893	0.9439	0.9285	1.0129
June	3.9754	0.4700	0.4712	1.0224	0.8953	0.9464	0.9467	1.3692
July	2.9304	0.3343	0.4699	1.2881	1.4631	0.8654	0.9384	0.9968
August	2.6998	0.1395	0.4338	1.4239	1.3120	0.9495	0.8572	1.1318
September	3.7477	0.1838	0.0175	1.1347	2.0519	0.9218	0.9163	1.0171
October	-	-	-	-	1.3847	0.9159	0.9062	0.9858
November	-	-	-	-	-	-	-	-
December	-	-	-	-	-	-	-	-
Average	3.4697	0.3596	0.4264	1.1570	1.2279	0.8349	0.9060	1.0717

ผลการศึกษาจากข้อ 2 และ 3 สรุปได้ว่า การทวนสอบแบบจำลองโดยใช้ข้อมูลราย 10 นาทีและ 30 นาที มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ได้มีค่าลดลง แต่แบบจำลองที่ใช้ข้อมูลราย 30 นาทีมีค่าประสิทธิภาพของการจำลองแบบลดลงน้อยกว่าราย 10 นาที โดยค่าน้ำพืชยืดที่ประมาณได้จากแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลราย 10 นาทีและราย 30 นาที มีค่าสูงต่ำกว่าค่าตรวจวัดเล็กน้อย ส่วนค่าการคายระเหยน้ำที่ประมาณได้จากแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลราย 10 นาทีมีค่าสูงกว่าที่ตรวจวัด ในขณะที่การใช้ข้อมูลราย 30 นาทีประมาณค่าน้ำพืชยืด ค่าที่ได้จากแบบจำลองจะมีค่าต่ำว่าค่าที่ได้จากการตรวจวัด

สรุป

1. ผลการปรับเทียบแบบจำลองการคายระเหยน้ำ โดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที พบว่า

1.1 ค่าความสามารถในการนำน้ำสูงสุดของใบพืช (C^*_{leaf}) มีค่าระหว่าง 0.4479-0.6747 เซนติเมตรต่อวินาที เฉลี่ยเท่ากับ 0.5764 เซนติเมตรต่อวินาที

1.2 ดัชนีพื้นผิวใบพืช (LAI) มีค่าระหว่าง 3.8750-4.1250 เฉลี่ยเท่ากับ 3.9929

1.3 การระบายน้ำจากเรือนยอดเริ่มต้น (Ds) มีค่าระหว่าง 1.0650-1.5600 เฉลี่ยเท่ากับ 1.2250

1.4 สัมประสิทธิ์การระบายน้ำจากเรือนยอด (b) มีค่าระหว่าง 0.1450-0.2500 เฉลี่ยเท่ากับ 0.1914

1.5 ปริมาณเก็บกักน้ำของเรือนยอดสูงสุด (S) มีค่าระหว่าง 1.0000-1.4000 มิลลิเมตร เฉลี่ยเท่ากับ 1.2600 มิลลิเมตร

2. ผลการปรับเทียบแบบจำลองการคายระเหยน้ำโดยใช้ข้อมูลราย 30 นาที พบว่า

2.1 ค่า C^*_{leaf} มีค่าระหว่าง 0.3647-0.5106 เซนติเมตรต่อวินาที เฉลี่ยเท่ากับ 0.4168 เซนติเมตรต่อวินาที

2.2 ค่า LAI มีค่าระหว่าง 4.5000-5.5000 เฉลี่ยเท่ากับ 5.2000

2.3 ค่า Ds มีค่าระหว่าง 0.6000-1.4500 เฉลี่ยเท่ากับ 0.9607

2.4 ค่า b มีค่าระหว่าง 0.1250-0.2250 เฉลี่ยเท่ากับ 0.1607

2.5 ค่า S มีค่าระหว่าง 0.5000-0.8500 มิลลิเมตร เฉลี่ยเท่ากับ 0.7179 มิลลิเมตร

3. ผลการปรับเทียบแบบจำลอง พบว่า การประมาณค่าน้ำพืชยืดโดยใช้ข้อมูลราย 10 นาทีและ 30 นาที มีค่าประสิทธิภาพของแบบจำลอง (NSE) เฉลี่ยแตกต่างกันเล็กน้อย คือ 0.8858 และ 0.8890 ตามลำดับ ส่วนการประมาณค่าการคายน้ำของพืช พบว่าราย 10 นาที มีค่า NSE เฉลี่ยสูงกว่าราย 30 นาที เล็กน้อยเช่นกัน คือ 0.3965 และ 0.3181 ตามลำดับ

4. ผลการทวนสอบการประมาณค่าน้ำพืชยืดราย 10 นาทีและ 30 นาที พบว่าค่า NSE ลดลงทั้ง 2 ส่วน โดยการประมาณค่าโดยใช้ข้อมูลราย 10 นาทีมีค่า NSE ต่ำกว่าราย 30 นาที ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.7662 และ 0.8349 ตามลำดับ ส่วนผลการทวนสอบแบบจำลองของการประมาณค่าการคายน้ำโดยใช้ข้อมูลราย 10 นาที และ 30 นาที พบว่า ราย 10 นาทีมีความใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้สูงกว่าราย 30 นาที โดยมีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.3433 และ 0.3596 ตามลำดับ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ประคำแก้ว บุญธรรม. 2550. **การหาค่าสัมประสิทธิ์สมการการชักนำปากใบพืชเพื่อประมาณค่าการคายระเหยน้ำของป่าดิบเขาด้วยแบบจำลอง Penman-Monteith บริเวณลุ่มน้ำห้วยคอกม้า จังหวัดเชียงใหม่**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Dingman, S.L. 2002. **Physical Hydrology**. 2nd ed. University of New Hampshire. Prentice Hall, New Jersey.

Makoto, T., R. N. Abdul., Y. Yukio., N. Shoji., A. S. Siti., M. S. Mohd and T. Satoru. 2003. Long-term estimation of evaporation from a tropical rain forest in Peninsular Malaysia. **Water Resources Systems JAHS Publ** (280).

Mathias, H., T.W.R. Paul., D.M. David., J.H. Richard and J.G. David. 2008. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of mixed deciduous forest. **Journal of Agricultural and Forest Meteorology** (148):I655 - I667

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

Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. 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.

Rutter, A.J., K.A. Kershaw, P.C. Robin and A.J. Morton. 1971. A predictive model of rainfall interception in forest. I. Derivation of the model from observations in plantation of Corsican Pine. **Agriculture Meteorol** (9): 367-383.

Rutter, A.J. Morton and P.C. Robin. 1975. A predictive model of rainfall interception in forest. II. Generalization of the model and comparison with observation in some coniferous and hardwood stand. **Journal Appl.Ecol** (12):36-380

Tanaka, K., N. Yoshifuji, C. Tantasirin, M. Suzuki and N. Tangtham. 2003. Transpriration 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.