ผลงานเรื่องที่ 2

ผลงานฉบับเต็ม

เรื่อง

การประเมินศักย์การคายระเหยบนพื้นที่สูงด้วยวิธี Hargraves Delta Temperature

Estimating Potential Evapotranspiration in Highland Region with Hargreaves Delta Temperature Method

ของ

นายกานต์ ไตรโสภณ

ตำแหน่งนักวิชาการเกษตรชำนาญการพิเศษ ตำแหน่งเลขที่ 819

สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 6

เสนอ

ขอประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่งนักวิชาการเกษตรเชี่ยวชาญ

ผู้เชี่ยวชาญด้านพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง

ตำแหน่งเลข ที่ 819 สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 6

กรมพัฒนาที่ดิน

กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
หลักการและเหตุผล	3
วัตถุประสงค์การศึกษา	4
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์การศึกษา	9
ผลการศึกษาและวิจารณ์	15
สรุปผลการศึกษา	27
การนำไปใช้ประโยชน์	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	32

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	พลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ย	16
2	เปรียบเทียบผลการคำนวณตามวิธีการ FAO Penman-Monteith และ Hargreaves Delta Temperature ก่อนการสอบเทียบสมการ	21
3	ผลการสอบเทียบสมการ Hargreaves Delta Temperature เปรียบเทียบกับวิธี Penman-Monteith	23
4	วิเคราะห์ผลการคำนวณด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature เปรียบเทียบกับวิธี FAO Penman-Monteith เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการด้วยข้อมูลในพื้นที่ลุ่มไปใช้ในพื้นที่สูง	24
5	วิเคราะห์ผลการคำนวณด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature เปรียบเทียบกับวิธี FAO Penman-Monteith โดยสลับค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างสถานีบนพื้นที่สูง	25

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แสดงตำแหน่งที่ตั้งและการกระจายตัวของสถานีอุตุนิยมวิทยา ที่ใช้ข้อมูลในการศึกษาทั้ง 4 แห่ง	11

สารบัญภาคผนวก

แผนภูมิที่		หน้าที่
1	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงฤดูแล้ง	32
2	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน อำเถอเวียงสา จังหวัดน่านในช่วงฤดูแล้ง	32
3	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง อำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูแล้ง	33
4	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง อำเภอเวียงแก่น จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูแล้ง	33
5	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperatureโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงฤดูฝน	34
6	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน อำเภอเวียงสา จังหวัดน่านในช่วงฤดูฝน	34
7	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperatureโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง อำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูฝน	35

สารบัญภาคผนวก (ต่อ)

แผนภูมิที่		หน้า
8	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง อำเภอเวียงแก่น จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูฝน	35
9	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	36
10	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	36
11	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	37
12	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	37
13	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	38
14	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่านภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	38
15	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	39
16	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธีFAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว	39

สารบัญภาคผนวก (ต่อ)

แผนภูมิที่		หน้า
17	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1	40
18	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1	40
19	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1	41
20	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1	41
21	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	42
22	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	42
23	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	43
24	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	43

สารบัญภาคผนวก (ต่อ)

แผนภูมิที่		หน้า
25	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง	44
26	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง	44
27	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง	45
28	เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง	45

การประเมินศักย์การคายระเหยบนพื้นที่สูงด้วยวิธี Hargraves Delta Temperature

Estimating Potential Evapotranspiration in Highland Region with Hargreaves Delta Temperature Method

นายกานต์ ไตรโสภณ สำนักงานพัฒนาที่ดินเขต 6

บทคัดย่อ

วิธีการคำนวณศักย์การคายระเหยที่ได้รับการยอมรับว่าเป็นวิธีการมาตรฐานโดย Food and Agriculture Organization (FAO) คือวิธี FAO Penman–Monteith ซึ่งใช้หลักการสมดุลของพลังงานในสภาพแวดล้อมโดยคำนวณจากพารามิเตอร์ทางอุตุนิยมวิทยาหลายค่า ด้วยวิธีการดังกล่าวแม้จะมีความเที่ยงตรงสูงแต่มีข้อจำกัดในการใช้งานในประเทศไทยเนื่องจากเครือข่ายของสถานีอุตุนิยมวิทยาอัตโนมัติที่บันทึกพารามิเตอร์ที่จำเป็นในการคำนวณมีไม่ครอบคลุมพื้นที่มากพอ โดยเฉพาะในพื้นที่สูง วิธีการคำนวณศักย์การคายระเหย Hargreaves Delta Temperature อ้างอิงหลักการสมดุลพลังงานเช่นกัน โดยตั้งสมมุติฐานว่า การถ่ายเทพลังงานถูกสะท้อนออกมาในรูปของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในรอบวัน ซึ่งมีสถานีอุตุนิยมวิทยาที่บันทึกข้อมูลทั้งสองค่านี้จำนวนมากกว่าและมีการกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่มากกว่า ในการศึกษานี้ได้รวบรวมข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ลุ่ม 2 สถานี และพื้นที่สูง 2 สถานี และทำการสอบเทียบ (calibrate) สัมประสิทธิ์ของวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ผลการคำนวณจากวิธีการ Penman-Monteith เป็นค่าอ้างอิง จากนั้นนำพารามิเตอร์ที่สอบเทียบได้จากสถานีในที่ราบลุ่มไปใช้ในสถานีบนพื้นที่สูง เปรียบเทียบกับการสลับค่าพารามิเตอร์ที่ผ่านการสอบเทียบแล้วระหว่างสถานีบนพื้นที่สูงด้วยกัน เพื่อประเมินความเป็นไปได้ที่จะทำการสอบเทียบพารามิเตอร์ที่จำเป็นจากเครือข่ายสถานีอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ลุ่มสำหรับนำไปใช้บนพื้นที่สูง ซึ่งผลการศึกษาปรากฏว่าสามารถนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบในพื้นที่ลุ่มไปใช้ในพื้นที่สูงได้ ค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับที่จะนำไปใช้ในบริเวณพื้นที่สูงของภาคเหนือตอนบนตั้งแต่ละติจูด17 องศาเหนือขึ้นไปมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0015-0.0017

Abstract

Food and Agriculture Organization has recommended the so-called FAO Penman - Monteith equation as a standard procedure for calculating potential evapo-transpiration. Somehow this method, though it is very accurate, has limited use in Thailand owing to the fact that it requires various meteorological parameters to address energy balance in the environment. Meteorological stations which record such parameters are very few, particularly in the highland region of the country. The alternative is the Hargreaves Delta Temperature method which also bases on energy balance concept but assumes that the energy balance can be empirically accounted for through the difference between daily lowest and highest temperature. And there are more stations that keep record of daily temperature throughout the highland region which make this approach more applicable. In this study meteorological data from 4 automatic stations are gathered, 2 are in the lowland and other 2 are in the highland. The Hargreaves equation is calibrated against Penman-Monteith equation in each station. The calibrated co-efficient from the lowland stations is then validated against Penman-Monteith calculation in the highland stations and co-efficient calibrated in the highlands station are also validated against each other. It is found that calibrated co-efficient from lowland region can be used in the highland region with acceptable range of deviation. The most suitable co-efficient is in the range of 0.0015-0.0017 for the upper North of the country which situated between 17-20 degrees north.

หลักการและเหตุผล

ในการวางแผนการใช้ที่ดิน การวางแผนการปลูกพืชและการวางแผนการให้น้ำชลประทาน นอกจากข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับดินและที่ดินแล้ว จำเป็นอย่างยิ่งที่นักวางแผนจะต้องมีความเข้าใจและมีข้อมูลที่ชัดเจนเกี่ยวกับสมดุลของน้ำในพื้นที่ อันเป็นข้อจำกัดอีกประการหนึ่งสำหรับการใช้ประโยชน์ที่ดิน สมดุลของน้ำนั้นอธิบายโดยง่ายจะประกอบด้วย 3 ส่วนคือ 1) น้ำที่เข้ามาในลุ่มน้ำหรือพื้นที่รับน้ำ ซึ่งได้แก่น้ำฝนที่ตกลงในพื้นที่หรือน้ำท่าที่ไหลผ่านบริเวณที่สนใจศึกษา 2) น้ำที่ไหลออกไปจากลุ่มน้ำ/พื้นที่รับน้ำทั้งในรูปของน้ำไหลบ่าผิวดิน (surface run-off) และ/หรือน้ำท่า (stream flow) 3) น้ำที่พืชใช้ไปกับการคายระเหย อันเป็นกระบวนการสำคัญที่ส่งอิทธิพลต่อการเจริญเติบโตและการให้ผลผลิตของพืช ซึ่งข้อมูลทั้ง 3 ส่วนนี้ได้มาจากการตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยาและอุทกวิทยาประกอบกับการคำนวณด้วยสมการคณิตศาสตร์ทั้งในวิธีทางสถิติและฟิสิกส์

หลักการในการคำนวณน้ำที่พืชใช้ไปกับการคายระเหยที่นิยมปฏิบัติกันเป็นมาตรฐานนั้น ใช้วิธีคำนวณศักย์การคายระเหยจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากนั้นคูณด้วยสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวของพืชตามชนิดและช่วงอายุในการเจริญเติบโตของพืชนั้นๆ วิธีการที่แนะนำโดย Food and Agricultural Organization (FAO) ได้แก่วิธี FAO Penman-Monteith ซึ่งใช้ข้อมูลความเร็วลม พลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความดันบรรยากาศ ตลอดจนตำแหน่งที่ตั้งของสถานีตรวจวัดและความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางในการคำนวณ (Allen *et al*., 1998) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสำหรับประเทศไทยแล้วข้อมูลดังกล่าวจะมีการตรวจวัดเฉพาะในสถานีที่จัดตั้งขึ้นเป็นการเฉพาะ มีการกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่ไม่ทั่วถึง เนื่องจากมีการลงทุนด้านการจัดหาเครื่องมือตรวจวัดและการบำรุงรักษาสูงกว่าสถานีทั่วไป นอกจากนั้นโดยที่เครื่องมือตรวจวัดย่อมมีการเสื่อมสภาพชำรุดเสียหายเป็นปรกติ จึงมีข้อมูลที่มีการตรวจวัดต่อเนื่องยาวนานและมีคุณภาพดีพอจะใช้อ้างอิงได้ไม่มากนัก

สำหรับพื้นที่สูงของประเทศไทยปริมาณน้ำที่สามารถใช้เพื่อการชลประทานได้มีอยู่จำกัด โดยเฉพาะในช่วงฤดูหนาวซึ่งพ้นฤดูมรสุมไปแล้ว แต่เป็นฤดูที่พื้นที่ประเทศไทยอยู่ภายใต้อิทธิพลของมวลอากาศเย็นที่เคลื่อนลงมาจากตอนกลางของทวีป ทำให้สภาพอากาศอากาศบนพื้นที่สูงมีความคล้ายคลึงกับพื้นที่ที่อยู่ในละติจูดสูงกว่า ส่งผลให้เกษตรกรสามารถผลิตพืชเศรษฐกิจที่ตามปรกติไม่สามารถผลิตได้อย่างเช่นผักหรือผลไม้เมืองหนาว นับเป็นช่วงเวลาที่เปิดโอกาสให้เกษตรกรบนพื้นที่สูงสามารถสร้างรายได้อย่างสำคัญ เพียงแต่การเพาะปลูกในช่วงดังกล่าวจะถูกจำกัดด้วยปริมาณน้ำที่จะใช้เพื่อการผลิต ซึ่งปัญหานี้จะบรรเทาได้ด้วยการบริการจัดการน้ำที่ใช้เพื่อการชลประทานอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะต้องอาศัยความต้องการใช้น้ำของพืชที่เที่ยงตรงเป็นพื้นฐานแต่สถานีอุตุนิยมวิทยาบนพื้นที่สูงที่ทำการตรวจวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่จะใช้ในการคำนวณตามวิธีการ FAO Penman-Monteith มีอยู่น้อยมาก ไม่สามารถครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดได้ อันเป็นอุปสรรคสำคัญที่จะคำนวณปริมาณและอัตราการใช้น้ำของพืช ตลอดจนวางแผนการผลิตพืชให้สอดคล้องกับปริมาณน้ำที่มีอยู่จำกัดได้ อย่างไรก็ตามยังมีวิธีการคำนวณศักย์การคายระเหยในรูปแบบอื่นที่ออกแบบมาสำหรับใช้ในพื้นที่ซึ่งมีข้อมูลด้านอุตุนิยมวิทยาจำกัดโดยเฉพาะ เช่นวิธีการ Hargreaves

Delta Temperature (Hargreaves *et al*., 2004) ซึ่งผู้พัฒนาวิธีการเล็งเห็นถึงข้อจำกัดด้านข้อมูลที่ทำให้ไม่อาจใช้วิธี FAO Penman-Monteith ได้ในประเทศหรือพื้นที่ซึ่งการพัฒนาด้านเทคโนโลยียังไม่ดีพอ วิธีการของ Hargreaves จึงใช้เพียงข้อมูลอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุดในรอบวัน และตำแหน่งที่ตั้งทางละติจูดของสถานีตรวจวัดในการคำนวณเท่านั้น ซึ่งข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในรอบวันมีสถานีตรวจวัดกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่สูงของประเทศไทย

การจะนำวิธีการของ Hargreaves มาใช้นั้นจำเป็นต้องมีการสอบเทียบสมการเพื่อหาสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับพื้นที่ที่จะใช้งานก่อน ในการศึกษานี้ได้ทำการสอบเทียบสมการโดยใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 4 แห่งซึ่งมีที่ตั้งในจังหวัดเชียงใหม่ เชียงรายและน่าน โดย 2 สถานีเป็นสถานีในพื้นที่ลุ่ม และ 2 สถานีเป็นสถานีในพื้นที่สูง จากนั้นทดสอบนำสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการกับสถานีในพื้นที่ราบมาทดลองทำการ validation กับข้อมูลจากสถานีในพื้นที่สูง เพื่อจะประเมินความเป็นไปได้ที่จะใช้กระบวนการอย่างเดียวกันนี้สำหรับการคำนวณหาศักย์การคายระเหยในพื้นที่สูงอื่นๆ ต่อไป

วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อทำการสอบเทียบวิธีการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature กับวิธี FAO Penman-Montieth
2. เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการนำสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการตามข้อ 1 จากสถานีอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ลุ่ม ไปใช้ในพื้นที่สูง

การตรวจเอกสาร

วิธีการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชที่เป็นวิธีการวัดตรงและหากควบคุมการทดลองได้ดีพอจะได้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรง คือ การใช้ lysimeter เป็นเครื่องมือ แต่วิธีการดังกล่าวสิ้นเปลืองและยากแก่การควบคุมการทดลอง ตลอดจนการที่สภาพภูมิอากาศและดินที่แตกต่างออกไปล้วนมีผลทำให้ปริมาณการใช้น้ำของพืชแตกต่างกันออกไป ในทางปฏิบัติจึงนิยมใช้วิธีคำนวณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงหรือศักย์การคายระเหยซึ่งทำได้โดยอาศัยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาของท้องถิ่นนั้นเป็นพื้นฐาน ก่อนที่จะทำการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชด้วยการนำสัมประสิทธิ์การใช้น้ำของพืชไปคูณ

วิธีการคำนวณศักย์การคายระเหยโดยอาศัยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นฐานที่นิยมใช้กันในประเทศไทยนั้นมีหลายวิธี ขึ้นกับข้อมูลที่มีอาทิ วิธีของ Blaney-Criddle, Hargreaves, Penman และ Thornthwaite ซึ่งจากการทดลองในประเทศเองและจากผลการทดลองในประเทศอื่นๆ ทั่วโลกพบว่าวิธีการ Penman หรือวิธีการอื่นๆ ที่ดัดแปลงจากวิธีการของ Penman ให้ผลการคำนวณที่ใกล้เคียงกับการตรวจวัดโดยตรงได้ดีกว่าวิธีอื่นๆ (กรมชลประทาน, 2554)

สมการ FAO Penman-Montieth

McMahon *et al*. (2016) ได้กล่าวถึงความเป็นมาในการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธีการ Penman-Montieth ว่า Howard Penman ตีพิมพ์ผลงานในปี 1948 โดยอธิบายว่าพลังงานที่เกี่ยวข้องกับศักย์การคายระเหยประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรกคือพลังงานสุทธิที่พื้นที่นั้นๆ ได้รับจากดวงอาทิตย์ และส่วนที่สองเป็นผลสืบเนื่องมาจากการเคลื่อนไหวของกระแสอากาศและความต่างระหว่างความดันไอน้ำที่ผิวของการระเหยและความดันไอน้ำในอากาศ ด้วยข้อจำกัดทางเทคโนโลยีในเวลานั้นทำให้การวัดพลังงานจากแสงอาทิตย์อย่างเที่ยงตรงทำได้ยาก Penman จึงเสนอวิธีการประมาณค่านี้จากการเปรียบเทียบชั่วโมงแสงของวันเทียบกับความยาววันที่เป็นได้ตามทฤษฎี เนื่องจากการวัดชั่วโมงแสงของวันเป็นสิ่งที่ทำการบันทึกทั่วไปในสถานีอุตุนิยมวิทยาของยุคนั้น จากค่าชั่วโมงแสงของวันจะสามารถคำนวณพลังงานแสงอาทิตย์ที่พื้นผิวได้รับโดยตรง และยังบอกค่าขีดความครึ้มของเมฆซึ่งสามารถใช้คำนวณค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่สะท้อนจากฐานเมฆ ผลการคำนวณให้ค่าที่แม่นยำสำหรับเป็นค่าเฉลี่ยในรอบ 10 วัน สมการต้นแบบของ Penman คือ

$$ET = \frac{\Delta R_n + \gamma f(u)(e_s - e_a)}{\varphi_v(\Delta + \gamma)} \qquad (1)$$

โดย ET: อัตราการคายระเหยน้ำ (มิลลิเมตร/วัน)

Δ : ค่าความชันของกราฟความดันไออิ่มตัว (กิโลปาสคาล/องศาเซลเซียส)

R_n : รังสีดวงอาทิตย์สุทธิที่ผิวทรงพุ่มพืช (เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน)

$f(u)$: คือฟังก์ชั่นของความเร็วลม (เมตร/วินาที)

e_s : แรงดันไออิ่มตัว (กิโลปาสคาล)

e_a : แรงดันไอน้ำในบรรยากาศ (กิโลปาสคาล)

φ_v : ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอ (จูล/กิโลกรัม)

γ: Psychrometric constant (กิโลปาสคาล/องศาเซลเซียส)

สมการนี้มีสมมุติฐานว่าสภาพของพืชพรรณที่ปกคลุมพื้นดินคือหญ้าตัดสั้นและมีปริมาณน้ำไม่จำกัด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นการคำนวณอัตราการคายและระเหยน้ำสูงสุดของพืช ต่อมาในปี 1965 Monteith ได้ปรับปรุงสมการ Penman ด้วยการเพิ่มเทอมของการถ่ายเทความร้อนในดิน (Soil heat flux) เทอมของความเหนี่ยวนำทางอากาศพลศาสตร์ ที่เป็นตัวแทนของความยากง่ายในการที่โมเลกุลของน้ำจะหลุดจากพื้นผิวสู่อากาศ และเทอมของอิทธิพลของปากใบที่มีต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลน้ำจากผิวใบสู่อากาศ (stomata resistance) สมการที่ได้รับการปรับปรุงนี้รู้จักกันในชื่อ Penman-Monteith Equation มีรูปสมการดังนี้

$$E = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a C_p (e_s - e_a) g_a}{\varphi_v (\Delta + \gamma\left(1 + \frac{g_a}{g_s}\right)} \quad (2)$$

โดย $\boldsymbol{E}$ **:** อัตราการคายระเหยจริง (มิลลิเมตร/วัน)

ซึ่งเทอมที่เพิ่มมาในสมการนี้ได้แก่

G : เทอมของการถ่ายเทความร้อนในดิน (เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน)

g_a : ความเหนี่ยวนำทางอากาศพลศาสตร์(เมตร/วินาที)

g_s : เทอมความเหนี่ยวนำของปากใบ(เมตร/วินาที)

ρ_a : ความหนาแน่นของอากาศเมื่อไม่มีไอน้ำ(กิโลกรัม/ตารางเมตร)

C_p : ความร้อนจำเพาะของอากาศที่ไม่มีไอน้ำเมื่อกำหนดให้อุณหภูมิคงที่ (จูลล์/กิโลกรัม/เคลวิน)

ต่อมา Allen *et al.* (1998) ได้อธิบายกระบวนการคายระเหยว่าเป็นไปภายใต้หลักสมดุลของพลังงานโดยพลังงานที่ตกกระทบพื้นที่ผิวการคายระเหยจะต้องเท่ากับพลังงานที่สูญเสียไปจากพื้นที่ผิวการคายระเหยในช่วงเวลาเดียวกัน และได้ให้คำจำกัดความพืชอ้างอิง (reference crop) เสียใหม่ว่าคือ "พืชซึ่งสูง 0.12 เมตร มีแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์ของพืช (surface resistance) คงที่เท่ากับ 70 วินาที/เมตร และค่าการสะท้อนพลังงาน (albedo) เท่ากับ 0.23" ทั้งยังได้ดัดแปลงสมการ Penman-Monteith ใหม่เป็น

$$\mathrm{ET_0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (3)$$

โดยเทอมที่เพิ่มมาคือ $\boldsymbol{T}$ **:** อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันวัดที่ความสูง 2 เมตร (องศาเซลเซียส)

U_2 : ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร (เมตร/วินาที)

สมการนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อ FAO Penman-Monteith ตามที่ปรากฏใน Irrigation and drainage paper 56 และได้รับการแนะนำให้ใช้วิธีนี้เป็นวิธีการมาตรฐานในการคำนวณความต้องการใช้น้ำของพืช

ข้อจำกัดในการใช้งานสมการ Penman และ Penman-Monteith คือทั้งสองสมการต้องการข้อมูลที่ไม่มีการตรวจวัดในสถานีอุตุนิยมวิทยาทั่วไปในประเทศที่ยังไม่มีความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีมากพอ ทำให้ในการคำนวณการใช้น้ำของพืชจำเป็นต้องอ้างอิงข้อมูลจากสถานีซึ่งอยู่ห่างไกลจากพื้นที่ใช้งาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการผันแปรของสภาพอากาศเฉพาะที่อันเป็นผลมาจากภูมิประเทศและสภาพแวดล้อมด้านการใช้ที่ดิน Condova *et al*. (2015) ได้ทำการทดลองใช้วิธีการประเมินค่าพารามิเตอร์บางค่าด้วยสมการ empirical ก่อนจะใช้วิธี FAO Penman-Monteith คำนวณศักย์การคายระเหย โดยใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 2 แห่งบนเทือกเขาแอนดิสในประเทศเอกวาดอร์เป็นข้อมูลอ้างอิง ซึ่งผล

การศึกษาพบว่า การประเมินค่าความเร็วลมไม่มีผลต่อผลการคำนวณศักย์การคายระเหย การประเมินค่าพลังงานแสงอาทิตย์ทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ถึง 24 เปอร์เซ็นต์ การประเมินค่าความชื้นสัมพัทธ์ทำให้มีความคลาดเคลื่อน 14 เปอร์เซ็นต์ และหากทำการประเมินพารามิเตอร์ทุกค่ายกเว้นอุณหภูมิจะทำให้มีค่าความคลาดเคลื่อนได้มากถึง 30 เปอร์เซ็นต์

สมการ Hargreaves

ด้วยข้อจำกัดด้านข้อมูลดังกล่าวจึงได้มีความพยายามที่จะพัฒนาสมการ empirical ที่ใช้เพียงข้อมูลซึ่งมีการตรวจวัดในสถานีอุตุนิยมทั่วไปขึ้นทดแทน ค่าที่มักจะไม่มีการตรวจวัดในสมการ (2) และ (3) และมีผลอย่างมากต่อการคำนวณศักย์การคายระเหยคือค่าพลังงานแสงอาทิตย์ซึ่ง Hargreaves *et al*. (2003) ได้อธิบายถึงพัฒนาการในการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยในปี 1975 ภายหลังจากประมวลผลข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่บันทึกจาก lysimeter เขาได้เสนอสมการสำหรับใช้คำนวณศักย์การคายระเหยดังนี้

$$\mathrm{ET_0} = 0.0075\mathrm{R_s}\mathrm{TF} \qquad (4)$$

$\mathbf{ET_0}$ คือศักย์การคายระเหย และ $\mathbf{R_s}$ คือพลังงานรวมจากแสงอาทิตย์ที่พื้นผิวการระเหยได้รับทั้งสองตัวแปรมีหน่วยเดียวกันเป็นความลึกของน้ำที่ระเหย (มิลลิเมตร/วัน) และ $\mathbf{TF}$ คือความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดในหน่วยฟาเรนไฮท์ สมการเดียวกันนี้เมื่อวัดอุณหภูมิในหน่วยเซลเซียสจะเขียนใหม่ได้เป็น

$$\mathrm{ET_0} = 0.0135\mathrm{R_s}(\mathrm{TC} + 17.8) \quad (5)$$

$\mathbf{TC}$ คือความแตกต่างของอุณหภูมิในหน่วยเซลเซียส

ในปี 1977 Hargreaves ทำการสรุปเพิ่มเติมว่า สามารถจะคำนวณค่า $\mathbf{Rs}$ ได้จากค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหนือชั้นบรรยากาศ $\mathbf{(R_a)}$ และร้อยละของชั่วโมงแสงต่อความยาววัน$\mathbf{(S)}$ ทำนองเดียวกับสมการ Angstom โดย Hargreaves เสนอรูปแบบสมการใหม่ดังนี้

$$\mathrm{R_s} = 0.0075\mathrm{R_a}\mathrm{S}^{0.5} \qquad (6)$$

การคำนวณค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหนือชั้นบรรยากาศและความยาววันทำได้อย่างแม่นยำด้วยหลักการทางฟิสิกส์ดาราศาสตร์ แต่ค่าชั่วโมงแสงของวันยังคงเป็นค่าที่มีข้อมูลจำกัดอยู่

ในปี 1982 Hargreaves และ Samani ได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลอุตุนิยมจากหลายประเทศและพบว่า S มีความสัมพันธ์กับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิในรอบวันและได้เสนอสมการ

$$R_s = K_{RS} R_a T R^{0.50} \qquad (7)$$

ในสมการนี้ TR คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด (เซลเซียส) ในรอบวันซึ่งเป็นค่าที่ตรวจวัดในสถานีอุตุนิยมทั่วไป K_{rs} คือสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่าง $\mathrm{Rs/Ra}$ และผลต่างของอุณหภูมิ

ในปี 1985 Hargreaves และคณะได้เสนอรูปของสมการที่ใช้ในการคำนวณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงซึ่งเป็นการรวมสมการที่ (4) และ (6) เข้าด้วยกันดังนี้

$$\mathrm{ET_0} = C\mathrm{R_a}(\mathrm{TC} + 17.8)\mathrm{TR^h} \quad (8)$$

โดยกำหนดให้ C มีค่าเท่ากับ 0.0023 และ h มีค่าเท่ากับ 0.5

การใช้งานสมการHargreavesในภูมิภาคต่างๆ

Almorox and Grieser (2016) ได้อธิบายถึงการนำสมการ Hargreaves ไปใช้งานว่า มีปัจจัยหลายประการที่มีอิทธิพลต่อค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดที่วัดได้ อาทิความเร็วลม ความชื้นสัมพัทธ์ ตำแหน่งที่ตั้งทางละติจูดของพื้นที่ที่สนใจศึกษา ความสูงจากระดับน้ำทะเล สภาพภูมิประเทศ รูปแบบการกระจายตัวของพายุฝน การไหลเวียนของกระแสอากาศเฉพาะที่และความใกล้ไกลจากแหล่งน้ำขนาดใหญ่ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลต่อการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยสมการ Hargreaves เพื่อขจัดข้อบกพร่องดังกล่าว ผู้วิจัยทั้งสองได้ทำการทดสอบความแม่นยำในการทำนายศักย์การคายระเหยของสมการ Hargreaves (สมการที่ 8) ในสภาพภูมิอากาศต่างๆ ตามการจำแนกในระบบ Koppen โดยใช้ฐานข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเกษตรของ FAO และอ้างอิงสมการ FAO Penman-Montieth (สมการที่ 3) เป็นค่ามาตรฐานและสรุปว่า ทั้งค่าสัมประสิทธิ์และค่า exponent ที่ให้ผลการคำนวณดีที่สุดจะแปรผันไปตามสภาพภูมิอากาศ และการสอบเทียบสมการสำหรับแต่ละสถานีจะให้ผลลัพธ์ในการคำนวณที่ดีที่สุดสำหรับสถานีนั้นๆ

Trajkovik (2007) ได้ทำการสอบเทียบสมการ Hargreaves สำหรับภูมิอากาศในคาบสมุทรบัลข่านซึ่งเป็นแบบร้อนชื้น (Humid) กับวิธี FAO Penman-Monteith โดยทำการปรับค่า exponent (h) ของสมการและพบว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับภูมิอากาศในพื้นที่คาบสมุทรบัลข่านคือ 0.424 โดยตัวเลข exponent ค่านี้จะให้ผลคำนวณศักย์การคายระเหยเฉลี่ยสูงกว่าวิธี FAO Penman-Monteith เพียง 1เปอร์เซ็นต์ ในทำนองเดียวกัน Subburayan *et al.* (2011) ได้ทำการสอบเทียบค่า exponent ของสมการ Hargreaves ในรัฐทมิฬนาดูของประเทศอินเดียที่มีภูมิอากาศแบบร้อนชื้น ค่า exponent ที่ให้ผลลัพธ์การคำนวณดีที่สุดคือ 0.653 โดยผลการคำนวณเทียบกับสมการ FAO Penman-Montieth มีค่า root mean square error (RMSE) เพียง 1.22 มิลลิเมตร/วัน

Heydari (2014) ได้ทำการสอบเทียบสมการโดยใช้ข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 15 สถานีในภาคกลางของอิหร่าน ในการสอบเทียบนี้ได้คงค่า exponent ไว้ที่ 0.5 และเปลี่ยนค่าสัมประสิทธิ์ *C* แทน ซึ่ง

พบว่าค่า *C* ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละสถานีอยู่ในช่วง 0.0018 - 0.0037 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์ใหม่ที่ได้นี้จะทำให้ค่า RMSE ลดลงถึงร้อยละ 40 เมื่อเทียบกับค่า 0.0023 ที่เสนอโดย Hargreaves *et al.* (2003)

Lima *et al*. (2013) ได้ทำการเปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธี FAO Penman-Monteith กับวิธีของ Hargreaves ด้วยข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาในอำเภอ São João ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศบราซิลและพบว่า หากใช้ค่าสัมประสิทธิ์และ exponent ตามที่เสนอโดย Hargreaves *et al*. (2003) ในภาพรวมตลอดทั้งปีจะมีค่า RMSE ที่ 1.43 มิลลิเมตร/วัน โดยจะมีค่าสูงเป็นพิเศษในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงมิถุนายน ที่ในภูมิภาคที่ทำการศึกษามีความต้องการใช้น้ำของพืชต่ำ หลังจากทำการสอบเทียบสมการและได้ค่าสัมประสิทธิ์ *C* ใหม่เป็น 0.00175 แล้วค่า RMSE ลดลงเหลือ 0.52 มิลลิเมตร/วันในทำนองเดียวกัน Mendicino and Senatore (2013) ได้ทำการสอบเทียบสัมประสิทธิ์ด้วยข้อมูลอุตุนิยมวิทยาจากสถานีตรวจวัดในภาคใต้ของอิตาลีจำนวน 137 สถานี ในจำนวนนี้ 34 สถานีอยู่ติดชายฝั่งทะเลและอีก 103 สถานีอยู่ลึกเข้ามาในแผ่นดินใหญ่ ผลการสอบเทียบในแต่ละสถานีให้ค่าสัมประสิทธิ์ซึ่งให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำสูงจนผู้วิจัยมีความเชื่อมั่นที่จะใช้สมการ Hargreaves ในการคำนวณศักย์การคายระเหยเป็นรายวันได้อย่างไรก็ตามจากการทดสอบในประเทศจีน Xu *et al*. (2001) มีความเห็นว่าสมการ Hargreaves ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการคำนวณศักย์การคายระเหยรายวันจนกว่าจะมีการสอบเทียบสมการอย่างจริงจังสำหรับแต่ละพื้นที่ก่อน

ทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าสมการ Hargreaves สามารถนำมาใช้คำนวณศักย์การคายระเหยสำหรับวางแผนการใช้ที่ดิน วางแผนการเพาะปลูกหรือวางแผนการให้น้ำชลประทานได้ โดยมีเงื่อนไขว่าจะต้องทำการสอบเทียบสมการก่อน สำหรับประเทศไทยที่มีข้อจำกัดเรื่องการกระจายตัวของสถานีตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยาเกษตรไม่ดีพอ ตลอดจนแต่ละสถานีมักประสบปัญหาในการบำรุงรักษาและสอบเทียบอุปกรณ์อันเป็นผลให้มูลข้อสำคัญ เช่น พลังงานแสงอาทิตย์และความชื้นสัมพัทธ์มีความคลาดเคลื่อน การสอบเทียบสมการ Hargreaves กับสถานีที่ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือเพื่อนำไปใช้ยังพื้นที่ใกล้เคียงจึงเป็นวิธีการที่สามารถทดแทนข้อจำกัดนี้ได้ นอกจากนี้การนำวิธีการนี้ไปใช้บนพื้นที่สูงเพื่อวางแผนการปลูกพืชและการให้น้ำเป็นรายแปลงจะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำที่มีอยู่จำกัดได้

อุปกรณ์และวิธีการศึกษา

1. รวบรวมข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาอัตโนมัติ 4 สถานี โดย 2 สถานีเป็นสถานีที่มีที่ตั้งบนพื้นที่สูงและอีก 2 สถานีมีที่ตั้งในพื้นที่ลุ่ม ทั้งนี้สำหรับสถานีในพื้นที่ลุ่มได้เลือกสถานีที่มีที่ตั้งห่างไกลจากชุมชนขนาดใหญ่เพื่อขจัดอิทธิพลของกิจกรรมของมนุษย์ที่มีต่ออุณหภูมิ ความเร็วลม และปริมาณฝุ่นละอองในอากาศให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นได้โดยสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ใช้เป็นแหล่งข้อมูลสำหรับพื้นที่ลุ่มได้แก่

สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) ตั้งอยู่ที่อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ละติจูด 19 องศา 17 ลิปดา 10 วิลิปดา เหนือ และลองจิจูด 98 องศา 56 ลิปดา 47 วิลิปดา ตะวันออก มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 355 เมตรลักษณะภูมิประเทศเป็นที่ราบลุ่มขนาดใหญ่ล้อมด้วยภูเขา

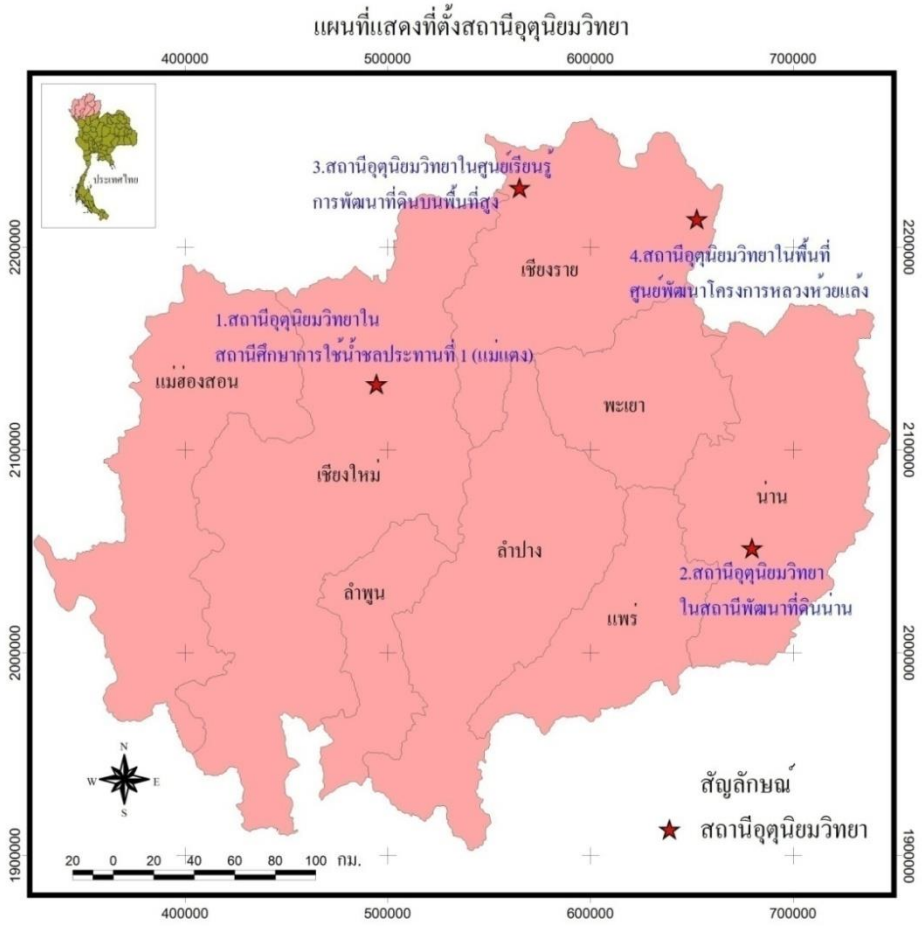
สถานีพัฒนาที่ดินน่าน ตั้งอยู่ที่อำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน ละติจูด 18 องศา 32 ลิปดา 50 วิลิปดา เหนือ ลองจิจูด 100 องศา 42 ลิปดา 8 วิลิปดา ตะวันออก มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 255 เมตร ลักษณะภูมิประเทศคล้ายคลึงกับสถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 1 กล่าวคือเป็นพื้นที่ราบลุ่มขนาดใหญ่ล้อมด้วยหุบเขา

สำหรับสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ใช้เป็นแหล่งข้อมูลสำหรับพื้นที่สูง ได้แก่

ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ตั้งอยู่ที่ อำเภอเวียงแก่น จังหวัดเชียงรายละติจูด 20 องศา 00 ลิปดา 56 วิลิปดาเหนือ ลองจิจูด 100 องศา 27 ลิปดา 28 วิลิปดา ตะวันออก มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 540 เมตรลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงชัน พื้นที่ป่าส่วนใหญ่ถูกบุกรุกทำลาย มีการใช้ที่ดินเพื่อปลูกพืชไร่และไม้ผลไม้ยืนต้นโดยอาศัยน้ำฝน

ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ตั้งอยู่ที่ อำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ละติจูด 20 องศา 9 ลิปดา 33 วิลิปดาเหนือ ลองจิจูด 99 องศา 37 ลิปดา 19 วิลิปดา ตะวันออก มีความสูงเหนือระดับน้ำทะเล 1,200 เมตร ลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาสูงชัน พื้นที่ป่าส่วนใหญ่ถูกบุกรุกทำลาย มีการใช้ที่ดินเพื่อปลูกพืชไร่และไม้ผลไม้ยืนต้นโดยอาศัยน้ำฝนเช่นเดียวกับที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง

ตำแหน่งที่ตั้งและการกระจายตัวของสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้ง 4 แห่งมีดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงตำแหน่งที่ตั้งและการกระจายตัวของสถานีอุตุนิยมวิทยา ที่ใช้ข้อมูลในการศึกษาทั้ง 4 แห่ง

2. แยกข้อมูลในแต่ละปีออกเป็น 2 ชุดตามช่วงฤดูกาล โดยกำหนดให้ฤดูมรสุมเริ่มในเดือนพฤษภาคมและสิ้นสุดในเดือนตุลาคม ช่วงเวลาที่เหลือของปีเป็นฤดูแล้ง ทั้งนี้โดยตั้งสมมุติฐานตามการศึกษาของ Shahidian *et al*. (2012) ที่พบจากการศึกษาค่าสหสัมพันธ์ระหว่างผลการคำนวณจากสมการ FAO Penman-Montieth และสมการ Hargreaves ในแคลิฟอร์เนียและโบลิเวียว่า ในช่วงฤดูฝนค่าสหสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองสมการต่ำกว่าช่วงฤดูแล้ง ซึ่งแสดงว่าสภาพแวดล้อมของสองฤดูกาลที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์และขีดความครึ้มของเมฆต่างกัน มีผลต่อการคำนวณด้วยสมการ Hargreaves

3. ทำการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธีการ FAO Penman-Montieth ดังสมการที่ (3) เพื่อใช้เป็นค่าอ้างอิงโดยที่ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษามีฐานเป็นรายวัน ในกรณีนี้ได้ตัดปัจจัยอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนในดิน (soil heat flux, G) ออก เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนในดินในรอบวันมักจะสมดุลในตัวเองและคิดเป็นสัดส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่ง Allen *et al*. (1998) เสนอว่าในการคำนวณศักย์การคายระเหยเป็นรายวันถึงราย 10 วัน สามารถกำหนดให้เทอม G มีค่าเท่ากับ 0 ได้ ประกอบกับบางสถานีไม่มีการบันทึกข้อมูลดังกล่าว การคำนวณในส่วนอื่นๆ อ้างอิง Allen *et al*. (1998) เช่นกัน โดยมีรายละเอียดดังนี้

เทอมความลาดชันของกราฟความดันไออิ่มตัว(Δ)ทำโดยสมการ

$$\Delta = \frac{4098\left[0.6108exp\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)\right]}{(T+273.3)^2} \quad (9)$$

T : อุณหภูมิอากาศ (องศาเซลเซียส)

เทอม psychrometric constant (γ) (กิโลปาสคาล/องศาเซลเซียส) ทำโดยสมการ

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} P \quad (10)$$

P : ความดันบรรยากาศ (กิโลปาสคาล) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$P = 101.3\left(\frac{293-0.0065z}{293}\right)^{5.26} \quad (11)$$

Z : ระดับความสูงของสถานีจากระดับน้ำทะเล (เมตร)

เทอมแรงดันไออิ่มตัว e_s (กิโลปาสคาล) คำนวณได้จากสมการ

$$e_s = \frac{e(T_{max})+e(T_{min})}{2} \quad (12)$$

E (T_{max}) และ *e* (T_{min}) : แรงดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด (กิโลปาสคาล) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$e_T = 0.6108\, exp\left[\frac{17.27T}{T+237.3}\right] \quad (13)$$

T : อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)

เทอมแรงดันไอน้ำในบรรยากาศ e_a (กิโลปาสคาล) คำนวณได้จากสมการ

$$e_a = e(T_{min})\frac{RH_{max}}{100} \quad (14)$$

RH_{max} : ความชื้นสัมพันทธ์สูงสุดในรอบวัน *(%)*

ทุกสถานีตรวจวัดความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร และรายงานเป็นความเร็วลมเฉลี่ยในรอบวันในหน่วย เมตร/วินาที จึงสามารถนำค่านี้มาใช้ในสมการที่ (3) ได้โดยตรง

เทอมของพลังงานแสงอาทิตย์มีรายการคำนวณดังนี้

พลังงานแสงอาทิตย์ที่เหนือชั้นบรรยากาศ R_a (เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน) คำนวณได้โดยสมการ

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_s D_r[\omega_s sin(\varphi)sin(\delta) + cos(\varphi)cos(\delta)sin(\omega_s)] \quad (15)$$

G_s *:* solar constant มีค่าเท่ากับ 0.082 เมกกะจูล/ตารางเมตร/นาที

D_r : inverse relative distance ระหว่างโลกกับพระอาทิตย์ ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\mathrm{D_r} = 1 + 0.033cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (16)$$

J : วันที่ 1-365 ในรอบปี

δ: มุมเอียงของแกนโลกที่กระทำต่อเส้นตั้งฉากไปยังดวงอาทิตย์ (เรเดียน) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\delta = 0.409sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1.39\right) \quad (17)$$

ω_s : มุมชั่วโมงของเวลาพระอาทิตย์ตก (เรเดียน) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$\omega_s = arccos\left(-tan(\varphi)tan(\delta)\right) \quad (18)$$

φ : ตำแหน่งทางละติจูดของสถานีตรวจวัด (เรเดียน)

ความยาววัน *N* (ชั่วโมง) คำนวณได้จากสมการ

$$N = \frac{24}{\pi}\omega_s \quad (19)$$

พลังงานแสงอาทิตย์ในกรณีที่ท้องฟ้าปราศจากเมฆ R_{so} คำนวณได้จากสมการ

$$R_{so} = (0.75 + 2\mathrm{x}10^{-5}z)R_a \quad (20)$$

Z : ความสูงเหนือระดับน้ำทะเลของสถานีตรวจวัด (เมตร)

พลังงานรังสีคลื่นสั้นสุทธิ R_{ns} (เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน) คำนวณได้จากสมการ

$$R_{ns} = (1 - a)R_s \quad (21)$$

a : คือค่าการสะท้อนพลังงานของสภาพแวดล้อม ในกรณีของสถานีอุตุนิยมวิทยาที่ได้รับการดูแลอย่างดี พื้นเป็นหญ้าตัดสั้น มีค่าเท่ากับ 0.23

R_s : ค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่วัดได้

พลังงานรังสีคลื่นยาวสุทธิ R_{nl} (เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน) คำนวณได้จากสมการ

$$\mathrm{R_{nl}} = \sigma\left[\frac{(T_{max}+273.16)^4+(T_{min}+273.16)^4}{2}\left(0.34 - 0.14\sqrt{e_a}\right)\left[1.35\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right]\right] \quad (22)$$

σ : คือค่าคงที่ Stefan–Boltzman มีค่าเท่ากับ 4.903 x 10^{-9} เมกกะจูล/เคลวิน$^{-4}$/ ตารางเมตร/วัน

ตัวแปรอื่นๆ เป็นไปดังที่กล่าวแล้วข้างต้น

พลังงานรังสีจากดวงอาทิตย์สุทธิ (R_n) (เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน) คำนวณได้จากสมการ

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (23)$$

4. ทำการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature ดังสมการที่ (8) โดยในขั้นต้นใช้ค่าสัมประสิทธิ์เท่า C = 0.0023 และค่า Exponent h เท่ากับ 0.5 เทอม R_a ทำการคำนวณด้วยสมการที่ 15 จากนั้นหารด้วย 2.45 เพื่อเปลี่ยนหน่วยจาก เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน เป็น มิลลิเมตร/วัน

5. ทำการสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์ในสมการ Hargreaves Delta Temperature เพื่อให้ได้ค่าศักย์การคายระเหยที่ใกล้เคียงค่าอ้างอิงในสถานีเดียวที่คำนวณได้จากสมการ FAO Penman-Monteith มากที่สุด โดยหาผลต่างของการคำนวณทั้งสองวิธีการ แล้วหาค่า Root Mean Square Error (RMSE) (มิลลิเมตร/วัน) จากนั้นใช้ฟังก์ชั่น solver ในโปรแกรมสำเร็จรูป Microsoft Excel หาค่าสัมประสิทธิ์ C ที่ทำให้ RMSE มีค่าต่ำที่สุด ก่อนจะทดสอบความเข้ากันได้ของข้อมูลทั้ง 2 ชุดด้วยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ค่า RMSE คำนวณได้ตามสมการ

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - x_i)}{n}} \qquad (24)$$

y_i : ผลการคำนวณด้วยสมการ FAO Penman-Montieth (มิลลิเมตร/วัน) ซึ่งใช้เป็นค่าอ้างอิง

x_i : ผลการคำนวณด้วยสมการ Hargreaves (มิลลิเมตร/วัน)

n : จำนวนคู่ของข้อมูลที่นำมาเปรียบเทียบ

6. ทดสอบนำค่าสัมประสิทธิ์ C ที่สอบเทียบได้ดีที่สุดจากสถานีในที่ราบลุ่ม มาใช้กับสถานีบนพื้นที่สูง และทดสอบความเข้ากันได้ด้วยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์และ RMSE เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำค่าที่ได้จากการสอบเทียบด้วยชุดข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ลุ่มมาใช้ในพื้นที่สูง

7. ทดสอบนำค่าสัมประสิทธิ์ C ที่ได้จากสถานีในพื้นที่สูงด้วยกันไปใช้ยังอีกสถานีหนึ่ง และทดสอบความเข้ากันได้ด้วยวิธีหาค่าสหสัมพันธ์และ RMSE

8. เปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างข้อ 6 และข้อ 7 เพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการนำค่าที่ได้จากการทำการสอบเทียบด้วยชุดข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่สูงแห่งหนึ่งไปใช้บนพื้นที่สูงอื่นๆ หรือการนำข้อมูลจากสถานีในพื้นที่ลุ่มไปใช้ในพื้นที่สูง

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ในชุดข้อมูลทั้งหมดเมื่อทำการคัดกรองค่าพารามิเตอร์ที่ผิดปกติเนื่องจากความบกพร่องของอุปกรณ์ตรวจวัดออกแล้ว สามารถสรุปค่าพารามิเตอร์ที่มีการใช้งานร่วมกันและมีอิทธิพลอย่างยิ่งในการคำนวณศักย์การคายระเหยในวิธีการ FAO Penman-Monteith และ Hargreaves Delta Temperature อันได้แก่ค่าการรับพลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุดและเฉลี่ย ได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พลังงานแสงอาทิตย์ อุณหภูมิสูงสุด ต่ำสุดและอุณหภูมิเฉลี่ย

	สถานีบนพื้นที่สูง		สถานีในพื้นที่ลุ่ม	
พารามิเตอร์	สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานเชียงใหม่	สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินฯ เชียงราย	ศูนย์ฯโครงการหลวงห้วยแล้ง เชียงราย
พลังงานแสงอาทิตย์รายวัน (เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน)				
ฤดูแล้ง				
Mean	17.254	16.389	13.184	14.647
Standard deviation	3.005	3.938	3.995	4.257
ฤดูฝน				
Mean	17.316	15.615	13.735	14.041
Standard deviation	3.07	4.518	3.850	4.256
อุณหภูมิสูงสุดรายวัน (เซลเซียส)				
ฤดูแล้ง				
Mean	32.6	33.1	29.3	31.6
Standard deviation	3.41	4.106	2.857	4.689
ฤดูฝน				
Mean	33.0	33.0	28.3	32.8
Standard deviation	2.371	2.718	4.691	3.094
อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน (เซลเซียส)				
ฤดูแล้ง				
Mean	16.8	22.0	21.9	17.0
Standard deviation	3.71	4.289	1.656	2.804
ฤดูฝน				
Mean	23.2	25.1	18.7	21.9
Standard deviation	1.201	1.954	3.453	1.020

ตารางที่ 1 (ต่อ)

พารามิเตอร์	สถานีบนพื้นที่สูง		สถานีในพื้นที่ลุ่ม	
	สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานเชียงใหม่	สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินฯ เชียงราย	ศูนย์ฯโครงการหลวงห้วยแล้ง เชียงราย
อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (เซลเซียส)				
ฤดูแล้ง				
Mean	24.7	24.6	24.0	17.3
Standard deviation	3.097	3.727	1.874	2.825
ฤดูฝน				
Mean	28.1	27.0	21.5	22.9
Standard deviation	1.4	1.799	3.642	1.194

พลังงานแสงอาทิตย์

ในช่วงฤดูแล้งค่าการรับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันของทั้ง 4 สถานีจะอยู่ระหว่าง 13.184 เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง จังหวัดเชียงราย และ 17.254 เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) จังหวัดเชียงใหม่ และในฤดูฝนค่าการรับพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันจะอยู่ระหว่าง 13.735 - 17.316 เมกกะจูล/ตารางเมตร/วัน เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าพลังงานแสงอาทิตย์ของสถานีในพื้นที่ลุ่มด้วยกันมีความใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับที่ข้อมูลของสถานีในพื้นที่สูงก็มีความใกล้เคียงกัน โดยสถานีบนพื้นที่สูงจะมีค่าที่วัดได้ต่ำกว่า ในกรณีนี้เสริม (2560) ได้อธิบายว่ามีปัจจัย 2 ประการในชั้นบรรยากาศใกล้ผิวโลกที่ที่ช่วยดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ อันได้แก่ฝุ่นละอองและไอน้ำในบรรยากาศ โดยในภาพรวมของภูมิภาคในภาคเหนือจะมีค่าความลึกเชิงแสงของฝุ่นละอองเพิ่มขึ้นจากเดือนมกราคมไปสูงสุดในเดือนเมษายน จากนั้นจะค่อยๆลดลงจนมีค่าน้อยที่สุดในรอบปีในเดือนธันวาคม ส่วนปริมาณไอน้ำในชั้นบรรยากาศจะมีค่าสูงในช่วงเดือนพฤษภาคมถึงตุลาคม และต่ำในช่วงเวลาที่เหลือของปี ซึ่งสถานีบนพื้นที่สูงทั้งสองจะพบสภาพที่ท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมอยู่ทั่วไปในช่วงฤดูฝนและมีหมอกในเวลาเช้าตลอดทั้งปี ประกอบบริเวณรอบข้างจะมีการเผาชีวมวลเพื่อทำไร่ในช่วงฤดูแล้งเป็นปกติ ทำให้เกิดฝุ่นละอองจำนวนมาก อันน่าจะเป็นแหตุให้วัดค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันได้ต่ำกว่าสถานีในพื้นที่ลุ่ม

ในอีกทางหนึ่งพบว่า ค่าพลังงานแสงอาทิตย์เฉลี่ยรายวันที่วัดได้ในแต่ละสถานีมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในระหว่างฤดูฝนกับฤดูแล้ง โดยทุกสถานีมีค่าเฉลี่ยรายวันแตกต่างกันน้อยว่า 1 เมกกะจูล/

ตารางเมตร/วัน การแยกข้อมูลออกเป็น 2 ฤดู ฤดูฝนและฤดูแล้งนั้น เป็นไปโดยมีสมมุติฐานว่า ในช่วงฤดูฝนท้องฟ้าประเทศไทยมีเมฆปกคลุมมาก พลังงานแสงอาทิตย์ที่ตกกระทบพื้นผิวโลกจะถูกดูดซับโดยเมฆประกอบกับมีความชื้นในบรรยากาศสูง ซึ่งน่าจะดูดซับพลังงานแสงอาทิตย์ไว้ส่วนหนึ่งก่อนที่จะกระทบผิวโลก ต่างกับช่วงฤดูแล้งซึ่งท้องฟ้าโปร่งและมีความชื้นในอากาศต่ำกว่า (เสริม, 2560) ดังได้อธิบายแล้วข้างบน ซึ่งในกรณีนี้พบว่าไม่เป็นไปตามสมมุติฐานนั้นอย่างไรก็ตาม Matuszko (2012) ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานแสงอาทิตย์และขีดความครึ้มตลอดจนประเภทของเมฆและมีข้อสรุปว่า ขีดความครึ้มของเมฆมีผลต่อพลังงานแสงอาทิตย์ในทั้ง 2 ทาง คืออาจลดทอนพลังงานแสงอาทิตย์ที่ผ่านชั้นบรรยากาศลงมายังผิวโลกด้วยการดูดซับพลังงานดังกล่าวแล้วข้างต้น หรืออาจจะทำให้ผิวดินได้รับพลังงานมากขึ้นจากการสะท้อนพลังงานจากฐานเมฆก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นกับเงื่อนไขของประเภทของเมฆและขีดความครึ้มของเมฆ โดยในการศึกษานี้วัดความเข้มของพลังงานได้มากที่สุดเมื่อท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (3/8 - 6/8) โดยเมฆที่ปรากฏเป็นเมฆที่ก่อตัวในแนวตั้ง ซึ่งมักจะพบในฤดูฝน อันน่าจะเป็นเหตุให้ค่าเฉลี่ยของพลังงานแสงอาทิตย์รายวันในแต่ละสถานีไม่แตกต่างกันในระหว่างฤดูฝนและฤดูแล้ง

อุณหภูมิ

อุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในช่วงฤดูแล้งมีค่าอยู่ระหว่าง 17.3 ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง จังหวัดเชียงราย ถึง 24.7 เซลเซียส ที่สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) จังหวัดเชียงใหม่ สำหรับในฤดูฝนมีอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันอยู่ในช่วง 21.5 เซลเซียสที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง จังหวัดเชียงราย ถึง 28.1 เซลเซียส ที่สถานีทดลองการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) จังหวัดเชียงใหม่ ข้อมูลอุณหภูมิมีการเกาะกลุ่มกันในระหว่างในพื้นที่ลุ่มและพื้นที่สูงทำนองเดียวกับพลังงานแสงอาทิตย์ แสดงถึงอิทธิพลของภูมิประเทศและระดับความสูงที่มีต่อสภาพภูมิอากาศเฉพาะที่

ผลการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธี FAO Penman-Montieth

เมื่อนำข้อมูลดังกล่าวข้างต้นมาทำการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธี FAO Penman-Monteith ได้ผลดังนี้

สำหรับสถานีในพื้นที่ลุ่ม ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 3.1 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.830 มิลลิเมตร/วัน และในฤดูฝนมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 3.7 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.682 มิลลิเมตร/วัน ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 3.2 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.949 มิลลิเมตร/วัน และในฤดูฝนมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 3.4 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.962 มิลลิเมตร/วัน

สำหรับสถานีในพื้นที่สูง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 2.6 มิลลิเมตรโดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.815 มิลลิเมตร/วัน และในฤดูฝนมีศักย์

การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 2.7 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.809 มิลลิเมตร/วัน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 2.5 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.846 มิลลิเมตร/วัน และในฤดูฝนมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 2.7 มิลลิเมตรโดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.775 มิลลิเมตร/วัน (ตารางที่ 2)

ผลการคำนวณศักย์การคายระเหยด้วยวิธี Hargreaves โดยไม่สอบเทียบสมการ

สำหรับสถานีในพื้นที่ลุ่ม ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 4.9 มิลลิเมตร และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.186 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูฝนมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 5.0 มิลลิเมตร/วันโดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.828 มิลลิเมตร/วัน ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 4.2 มิลลิเมตร โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 1.077 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูฝนมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 4.4 มิลลิเมตร โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.868 มิลลิเมตร/วัน

สำหรับสถานีในพื้นที่สูง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.095 มิลลิเมตร/วัน และในฤดูฝนมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.864 มิลลิเมตร/วัน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ในฤดูแล้งมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตร โดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.458 มิลลิเมตร/วัน และในฤดูฝนมีศักย์การคายระเหยเฉลี่ยรายวันเท่ากับ 5.0 มิลลิเมตรโดยมีค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.0 มิลลิเมตร/วัน (ตารางที่ 2)

จากตัวเลขทั้ง 4 ชุดพบว่าเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ที่เสนอโดย Hargreaves (c = 0.0023) โดยไม่มีการสอบเทียบสมการ จะให้ผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มสูงกว่าวิธีการ FAO Penman-Monteith ที่เป็นวิธีมาตรฐาน สอดคล้องกับที่ Lima *et al.* (2013) พบจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์การคำนวณในทำนองเดียวกันที่ประเทศบราซิล ส่วน Gavilan *et al.* (2006) ทำการเปรียบเทียบการใช้งานสมการ Hargreaves โดยไม่สอบเทียบในสถานีที่อยู่ติดชายฝั่งและสถานีที่อยู่ลึกเข้ามาในแผ่นดินใหญ่ของประเทศสเปน ซึ่งมีภูมิอากาศแบบกึ่งแห้งแล้ง (semi-arid) และพบว่า ในสถานีที่อยู่ติดชายฝั่งมีแนวโน้มที่จะได้ผลลัพธ์การคำนวณที่ต่ำกว่าสมการ FAO Penman-Montieth ส่วนสถานีที่อยู่ลึกเข้ามาในแผ่นดินใหญ่มีแนวโน้มที่จะให้ผลลัพธ์สูงกว่า อย่างไรก็ตามการศึกษาในเขตกึ่งแห้งแล้งเช่นเดียวกันในประเทศอาฟริกาใต้กลับพบว่าหากทำการคำนวณด้วยสมการ Hargreaves โดยไม่มีการสอบเทียบสมการ ผลการคำนวณมีแนวโน้มจะให้ค่าศักย์การคายระเหยต่ำกว่าวิธีการ FAO Penman–Montieth ในทุกๆ เดือน (Moeletsi *et al*., 2013) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า รูปแบบดั้งเดิมของสมการ Hargreaves ไม่สามารถใช้การได้ดีในกับทุกสภาพแวดล้อม และจำเป็นต้องมีการสอบเทียบสมการก่อนนำไปใช้งานดังสมมุติฐานของการศึกษา

เมื่อเปรียบเทียบความเข้ากันได้ของข้อมูลเป็นรายวันพบว่าในฤดูแล้ง RMSE ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 มีค่า 1.8 มิลลิเมตร/วัน ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่านมีค่า 1.2 มิลลิเมตร/วัน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนา

ที่ดินบนพื้นที่สูงมีค่า 1.0 มิลลิเมตร/วัน และที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งมีค่า 2.1 มิลลิเมตร/ วัน ส่วนในฤดูฝน RMSE ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 มีค่า 1.4 มิลลิเมตร/วัน ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่านมีค่า 1.2 มิลลิเมตร/วัน ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงมีค่า 1.2 มิลลิเมตร/วัน และที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งมีค่า 2.4 มิลลิเมตร/วัน

แผนภูมิที่ 1 ถึง 4 ในภาคผนวกเปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยรายวันในสถานีตรวจวัดทั้ง 4 สถานีในช่วงฤดูแล้งระหว่างวิธี FAO Penman-Monteith กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยในวิธี Hargreaves Delta Temperature ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ c=0.0023 ดังสมการที่ (8) แผนภูมิที่ 5 ถึง 8 เปรียบเทียบผลการคำนวณทำนองเดียวกับแผนภูมิที่ 1 ถึง 4 ในสถานีอุตุนิยมวิทยาทั้ง 4 แห่ง สำหรับช่วงฤดูฝน

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบผลการคำนวณตามวิธีการ FAO Penman-Monteith และ Hargreaves Delta Temperature ก่อนการสอบเทียบสมการ

พารามิเตอร์	สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานเชียงใหม่	สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินฯ เชียงราย	ศูนย์ฯโครงการหลวงห้วยแล้ง เชียงราย
ฤดูแล้ง				
วิธีการ Penman				
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)	3.1	3.4	2.6	2.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.83	0.962	0.815	0.846
วิธีการ Hargreaves				
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)	4.9	4.2	3.5	4.5
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	1.186	1.077	1.095	1.458
RMSE	1.8	1.2	1.0	2.1
สหสัมพันธ์	0.811	0.766	0.921	0.941
ฤดูฝน				
วิธีการ Penman				
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)	3.7	3.4	2.7	2.7
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.682	0.962	0.809	0.775

ตารางที่ 2 (ต่อ)

พารามิเตอร์	สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานเชียงใหม่	สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินฯ เชียงราย	ศูนย์ฯโครงการหลวงห้วยแล้ง เชียงราย
วิธีการ Hargreaves				
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)	5.0	4.4	3.9	5.0
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.828	0.868	0.864	1.0
RMSE	1.4	1.2	1.2	2.4
สหสัมพันธ์	0.811	0.650	0.816	0.768

ผลการสอบเทียบสมการ

ตารางที่ 3 แสดงผลการสอบเทียบสมการจากสถานีทั้ง 4 แห่ง ซึ่งพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดลดลงจาก 0.0023 โดยที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ได้ค่าสัมประสิทธิ์ 0.0015 และ 0.0017 ในฤดูแล้งและฤดูฝนตามลำดับ โดยมีค่า RMSE 0.4 มิลลิเมตร/วัน เท่ากันทั้งสองฤดู ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่านได้ค่าสัมประสิทธิ์ 0.0018 เท่ากันทั้งในฤดูฝนและฤดูแล้งโดยมีค่า RMSE 0.6 มิลลิเมตร/วัน และ 0.7 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูฝนและฤดูแล้งตามลำดับที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงได้ค่าสัมประสิทธิ์ 0.0017 และ 0.0016 ในฤดูฝนและฤดูแล้งตามลำดับ โดยมีค่า RMSE 0.3 มิลลิเมตร/วัน และ 0.5 มิลลิเมตร/วันที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งมีค่าสัมประสิทธิ์ต่ำที่สุด คือ 0.0013 ในฤดูแล้ง และ 0.0012 ในฤดูฝน โดยมีค่า RMSE 0.3 มิลลิเมตร/วัน และ 0.5 มิลลิเมตร/วัน

เมื่อเปรียบเทียบค่า RMSE ก่อนและหลังการสอบเทียบสมการพบว่า ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ค่า RMSE ลดลงร้อยละ 77 และ 71 ในฤดูแล้งและฤดูฝน ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน ค่า RMSE ลดลงร้อยละ 50 และ 41 ในฤดูแล้งและฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ค่า RMSE ลดลงร้อยละ 58 และ 87 ในฤดูแล้งและฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ค่า RMSE ลดลงร้อยละ 87 และ 76 ในฤดูแล้งและฤดูฝน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการสอบเทียบสมการให้ผลเป็นที่น่าพอใจและสามารถใช้สมการ Hargreaves คำนวณศักย์การคายระเหยได้ใกล้เคียงกับสมการ FAO Penman–Montieth ในสถานีซึ่งใช้สอบเทียบสมการเอง

ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้อมูลทั้ง 2 ฤดู อยู่ในช่วง 0.650-.0937 ซึ่งยืนยันว่าผลการคำนวณด้วยวิธี FAO Penman–Monteith และ Hargreaves ภายหลังจากสอบเทียบค่าสัมประสิทธิ์แล้วมีลักษณะการเพิ่มขึ้นและลดลงไปในทำนองเดียวกันเป็นรายวันและมีความสัมพันธ์กันในระดับปานกลางถึงสูง การเปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยสมการทั้ง 2 ของแต่ละสถานีแสดงไว้ในแผนภูมิที่ 9–16 ในภาคผนวก

ตารางที่ 3 ผลการสอบเทียบสมการ Hargreaves Delta Temperature เปรียบเทียบกับวิธี Penman-Monteith

	สถานีในพื้นที่ลุ่ม		สถานีในพื้นที่สูง	
พารามิเตอร์	สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานเชียงใหม่	สถานีพัฒนาที่ดินน่าน	ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินฯ เชียงราย	ศูนย์ฯโครงการหลวงห้วยแล้ง เชียงราย
ฤดูแล้ง				
สัมประสิทธิ์ (c)	0.0015	0.0018	0.0017	0.0013
RMSE	0.4	0.6	0.3	0.3
สหสัมพันธ์	0.884	0.766	0.921	0.937
ฤดูฝน				
สัมประสิทธิ์ (c)	0.0017	0.0018	0.0016	0.0012
RMSE	0.4	0.7	0.5	0.5
สหสัมพันธ์	0.810	0.650	0.812	0.751

การทดสอบใช้สัมประสิทธิ์ข้ามสถานี

การนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการในพื้นที่ลุ่มไปใช้ในพื้นที่สูงพบว่า เมื่อนำค่าที่ได้จากสถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ไปใช้ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงโดยเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วยสมการ FAO Penman-Montieth ในฤดูแล้ง คำนวณค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยได้เท่ากับ 2.6 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร/วัน ส่วนในฤดูฝนค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยเท่ากับ 2.8 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร/วัน

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์จากสถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ไปใช้ยังศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ในฤดูแล้งคำนวณค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยได้เท่ากับ 2.9 มิลลิเมตร/วัน RMSE เพิ่มขึ้นเป็น 0.5 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูฝนคำนวณค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยได้เท่ากับ 3.8 มิลลิเมตร/วัน RMSE เพิ่มขึ้นเป็น 1.1 มิลลิเมตร/วัน

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากสถานีพัฒนาที่ดินน่านไปใช้ยังศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ในฤดูแล้งคำนวณค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยได้เท่ากับ 2.7 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 0.3 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูฝนคำนวณค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยได้เท่ากับ 3.0 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร/วัน

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากสถานีพัฒนาที่ดินน่านไปใช้ยังศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ในฤดูแล้งคำนวณค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยได้ท่ากับ 3.5 มิลลิเมตร/วัน RMSE เพิ่มขึ้นเป็น 1.1 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูฝนคำนวณค่าเฉลี่ยศักย์การคายระเหยได้เท่ากับ 3.9 มิลลิเมตร/วัน RMSE เพิ่มขึ้นเป็น 1.3

มิลลิเมตร/วัน ในทุกกรณีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ทศนิยม 3 ตำแหน่ง (ตารางที่ 4 และแผนภูมิที่ 17- 24)

ตารางที่ 4 วิเคราะห์ผลการคำนวณด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature เปรียบเทียบกับวิธี FAO Penman-Monteith เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการด้วยข้อมูลในพื้นที่ลุ่มไปใช้ในพื้นที่สูง

พารามิเตอร์ทางสถิติ	ที่มาของสัมประสิทธิ์	ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินฯเชียงราย	ศูนย์ฯโครงการหลวงห้วยแล้ง เชียงราย
ฤดูแล้ง	ศูนย์ศึกษาการใช้น้ำชลประทาน เชียงใหม่		
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)		2.6	2.9
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.807	0.938
RMSE (มิลลิเมตร/วัน)		0.3	0.5
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์		0.921	0.941
ฤดูฝน			
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)		2.9	3.7
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.637	0.753
RMSE (มิลลิเมตร/วัน)		0.5	0.8
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์		0.816	0.768
ฤดูแล้ง	สถานีพัฒนาที่ดินน่าน		
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)		2.7	3.5
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.845	1.121
RMSE (มิลลิเมตร/วัน)		0.3	1.1
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์		0.921	0.941
ฤดูฝน			
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)		3.0	3.8
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน		0.667	0.788
RMSE (มิลลิเมตร/วัน)		0.5	1.3
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์		0.816	0.769

การทดสอบสลับสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการในสถานีบนพื้นที่สูงด้วยกันพบว่า เมื่อนำสัมประสิทธิ์จากศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงไปใช้ยังศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ในฤดูแล้งคำนวณค่าศักย์การคายระเหยเฉลี่ยได้ 3.3 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 0.9 มิลลิเมตร/วัน ฤดูฝนคำนวณค่าศักย์การคายระเหยเฉลี่ยได้ 3.6 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร/วัน และเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์

จากศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งไปใช้ยังศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ในฤดูแล้งคำนวณค่าศักย์การคายระเหยเฉลี่ยได้ 1.9 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร/วัน ฤดูฝนคำนวณค่าศักย์การคายระเหยเฉลี่ยได้ 2.7 มิลลิเมตร/วัน RMSE เท่ากับ 0.8 มิลลิเมตร/วัน (ตารางที่ 5 และแผนภูมิที่ 25 – 28 ในภาคผนวก)

ตารางที่ 5 วิเคราะห์ผลการคำนวณด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature เปรียบเทียบกับวิธี FAO Penman-Monteith โดยสลับค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างสถานีบนพื้นที่สูง

พารามิเตอร์ทางสถิติ	ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินฯเชียงราย	ศูนย์ฯโครงการหลวงห้วยแล้ง เชียงราย
ฤดูแล้ง		
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)	1.9	3.3
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.592	1.079
RMSE (มิลลิเมตร/วัน)	0.8	0.9
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	0.921	0.941
ฤดูฝน		
เฉลี่ย (มิลลิเมตร/วัน)	2.1	3.6
ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.467	0.730
RMSE (มิลลิเมตร/วัน)	0.8	1.0
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	0.817	0.769

ผลการคำนวณแสดงให้เห็นอิทธิพลของความแตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุดสำหรับแต่ละสถานีอย่างชัดเจน โดยที่สัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุดของชุดข้อมูลจากศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงอยู่ในย่านเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์ที่ดีที่สุดของชุดข้อมูลจากสถานีในพื้นที่ลุ่ม การนำสัมประสิทธิ์จากสถานีในพื้นที่ลุ่มมาใช้ในการคำนวณจึงได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ โดยมีค่า RMSE เท่าเดิมทั้งในช่วงฤดูแล้งและฤดูฝน ในขณะที่ผลลัพธ์จากการคำนวณที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งมีค่า RMSE เพิ่มขึ้น 0.2 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูแล้งและ 0.3 มิลลิเมตร/วัน ในฤดูฝนเมื่อนำสัมประสิทธิ์จากสถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 มาใช้ และเพิ่มขึ้น 0.8 มิลลิเมตร/วัน ในทั้งสองฤดูเมื่อในสัมประสิทธิ์จากสถานีพัฒนาที่ดินน่านมาใช้การสลับสัมประสิทธิ์ระหว่างสถานีบนพื้นที่สูงด้วยกันก็ให้ผลไปในทำนองเดียวกัน

อย่างไรก็ตามความแตกต่างนี้ไม่มีผลในทางปฏิบัติในแง่ของการจัดหาน้ำและวางแผนการให้น้ำแก่พืช เนื่องจากในการประเมินปริมาณความต้องการน้ำชลประทานนั้น นอกจากปัจจัยความต้องการใช้น้ำของพืชเองแล้วยังมีปัจจัยเกี่ยวกับความสูญเสียในระบบส่งน้ำ (conveyance loss) อันเกิดจากการรั่วซึมและความสูญเสียเนื่องจากประสิทธิภาพของการให้น้ำแก่พืช (application loss) ซึ่งจะแตกต่างกันไปตามวิธีการให้น้ำและ

เมื่อรวมปัจจัยต่างๆ เข้าด้วยกันแล้ว ความต้องการน้ำชลประทานอาจสูงกว่าความต้องการน้ำของพืชได้ถึง 1 เท่าตัว (SCS, 1993) ซึ่งในการจัดหาน้ำต้นทุนและวางแผนให้น้ำจะต้องผนวกทุกปัจจัยเข้ามาทั้งหมด

เป็นที่น่าสังเกตว่า สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการในสถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 สถานีพัฒนาที่ดินน่านและศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.0015–0.0018 อันเป็นเหตุให้การนำสัมประสิทธิ์จากสถานีในพื้นที่ลุ่มทั้ง 2 สถานีมาใช้ยังศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงได้ผลลัพธ์การคำนวณที่สอดคล้องกัน และมีค่า RMSE อยู่ในเกณฑ์ที่น่าพอใจ ในขณะที่สัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งมีค่าแตกต่างออกไปคือ 0.0013 และ 0.0012 อันเป็นเหตุให้เมื่อนำสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการในพื้นที่ลุ่มมาใช้ จึงปรากฏความคลาดเคลื่อนของผลการคำนวณมากกว่า

อย่างไรก็ตาม โดยที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงมีความแตกต่างของความสูงจากระดับน้ำทะเลจากสถานีในพื้นที่ลุ่มมากกว่าศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงอยู่ที่ระดับความสูง 1,200 เมตร ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งอยู่ที่ระดับความสูง 540 เมตร สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 อยู่ที่ระดับความสูง 355 เมตร และสถานีพัฒนาที่ดินน่านอยู่ที่ระดับความสูง 255 เมตร แสดงว่าผลการสอบเทียบสมการที่ได้ค่าสัมประสิทธิ์แตกต่างกันอยู่ภายใต้อิทธิพลของสภาพอากาศเฉพาะที่ (micro-climate) มากกว่าความสูงจากระดับน้ำทะเล ซึ่งสอดคล้องกับที่ Temesgen *et al.* (2005) ทำการสอบเทียบสมการจากสถานีอุตุนิยมวิทยา 37 แห่งในรัฐแคลิฟอร์เนียสหรัฐอเมริกา และพบว่าผลการสอบเทียบสมการจะแปรผันไปตามสภาพภูมิอากาศเฉพาะที่ โดยปัจจัยที่มีอิทธิพลคือปริมาณน้ำฝนและความชื้นสัมพัทธ์ แต่เมื่อเปรียบเทียบศักย์การคายระเหยระหว่างสองวิธีการและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้ว ผลลัพธ์ในแต่ละสถานีมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี โดยมีค่าเฉลี่ยของ RMSE อยู่ที่ 0.65 มิลลิเมตร/วัน และมีค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อยู่ 0.87

ในการศึกษาอื่นๆ ได้มีการเสนอให้ปรับปรุงสมการ Hargreaves โดยในรูปแบบต่างๆ กัน อาทิ Medicino and Senatore (2013) เสนอว่าสามารถกำหนดความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์และค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุด (delta temperature) ให้อยู่ในรูปฟังก์ชั่น Quadratic ได้ และ Ravazzani *et al*. (2012) เสนอว่า ในบริเวณเทือกเขาแอลป์ของอิตาลีและสวิสเซอร์แลนด์ สามารถปรับปรุงความแม่นยำในการคำนวณของสมการ Hargreaves ได้โดยเพิ่มเทอม correction factor (c_0+c_1z) เข้าไปหน้าสมการ โดย c_0 และ c_1 คือค่าพื้นฐานของสัมประสิทธิ์ที่เพิ่มเข้ามามีค่าเท่ากับ 0.817 และ 0.00022 ตามลำดับ ส่วน z คือค่าความสูงจากระดับน้ำทะเลของสถานี อย่างไรก็ตามในการศึกษาทั้งสองกรณีมีจำนวนสถานีที่ใช้ข้อมูล 137 และ 40 สถานีตามลำดับ ในขณะที่ในการศึกษานี้มีจำนวนสถานีที่ใช้ข้อมูลเพียง 4 สถานี จึงไม่มีความเชื่อมั่นที่จะปรับปรุงรูปสมการ Hargreaves ใหม่เฉพาะสำหรับภูมิภาคได้ อนึ่ง เป้าหมายในการศึกษานี้คือต้องการสมการที่เรียบง่าย สะดวกแก่การใช้งาน สำหรับคาดการณ์ความต้องการน้ำชลประทานในพื้นที่ทุรกันดารห่างไกล ซึ่งการพัฒนาสมการให้มีความซับซ้อนยิ่งขึ้นแม้จะให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแต่จะทำให้สมการสูญเสียความสะดวกในการใช้งานไป

สรุปผลการศึกษา

เมื่อพิจารณาผลการคำนวณตามลำดับจะเห็นว่า ศักย์การคายระเหยที่คำนวณได้จากวิธีการ FAO Penman-Monteith มีการเกาะกลุ่มกันตามการจำแนกพื้นที่ต่ำและพื้นที่สูงเช่นเดียวกับค่าการรับพลังงานแสงอาทิตย์และอุณหภูมิ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าลักษณะภูมิอากาศเฉพาะท้องถิ่นมีอิทธิพลต่อศักย์การคายระเหย

ค่าสัมประสิทธิ์ 0.0023 ที่เสนอโดย Hargreaves *et al.* (2003) ให้ผลการคำนวณที่สูงกว่าค่าที่คำนวณโดยวิธี FAO Penman-Monteith ซึ่งใช้เป็นวิธีการมาตรฐานอ้างอิงในการศึกษานี้ จะเห็นได้จากแผนภูมิที่ 1- 8 ในภาคผนวก และการสอบเทียบสมการสามารถลดค่าความคลาดเคลื่อนนี้มาอยู่ในอัตราที่น่าพอใจได้ โดยทำให้ค่า RMSE ของทั้ง 4 สถานีอยู่ในย่าน 0.3-0.7 มิลลิเมตร/วัน

โดยที่ผลการสอบเทียบสมการที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้เคียงกับสถานีในพื้นที่ลุ่ม ดังนั้นจึงสามารถนำสัมประสิทธิ์ที่ได้จากสถานีในพื้นที่ลุ่มทั้ง 2 แห่งไปทำการคำนวณศักย์การคายระเหยที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูงได้ด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยมีความคลาดเคลื่อนจากวิธีการ FAO Penman-Monteith เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ดังจะเห็นได้จากค่า RMSE ที่แสดงในตารางที่ 4 และแผนภูมิที่ 17-18 และ 21-22 ในภาคผนวก ในขณะที่ผลการสอบเทียบสมการที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้งให้ค่าสัมประสิทธิ์ที่ต่ำกว่าสถานีอื่นๆ ดังนั้นเมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการสอบเทียบสมการในสถานีในพื้นที่ลุ่มไปใช้คำนวณศักย์การคายระเหย จึงได้ค่าที่มีแนวโน้มสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธีการ FAO Penman-Monteith ชัดเจนดังจะเห็นได้จากแผนภูมิที่ 19-2 และ 23-24 ในภาคผนวกอย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้มีค่า RMSE ต่ำกว่าเมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์ 0.0023 ตามที่ Hargreaves *et al.* (2003) เสนอ เฉลี่ยร้อยละ 38 ในฤดูแล้งและร้อยละ 43 ในฤดูฝน ผลการสลับค่าสัมประสิทธิ์ระหว่างสถานีบนพื้นที่สูงด้วยกันเป็นไปในทำนองเดียวกัน กล่าวคือแม้จะมีความคลาดเคลื่อนเพิ่มมากขึ้นเมื่อทดสอบโดยการคำนวณค่า RMSE แต่เมื่อพิจารณาความต้องการน้ำชลประทานโดยเพิ่มสัมประสิทธิ์ความสูญเสียเนื่องจากระบบส่งน้ำและความสูญเสียเนื่องเนื่องจากประสิทธิภาพของการให้น้ำร่วมด้วยแล้วความคลาดเคลื่อนนี้มีผลกระทบน้อยมากในแง่ของการจัดหาน้ำและบริหารจัดการระบบส่งน้ำ

กล่าวโดยสรุปแล้ว มีความเป็นไปได้ที่จะทำการสอบเทียบสมการคำนวณศักย์การคายระเหยจากสถานีอุตุนิยมวิทยาที่มีการตรวจวัดพารามิเตอร์ครบถ้วนสำหรับการคำนวณตามวิธี FAO Penman-Monteith เพื่อนำไปใช้ทำการคำนวณในพื้นที่สูงซึ่งมีการตรวจวัดเพียงค่าอุณหภูมิสูงสุด-ต่ำสุด ด้วยวิธี Hargreaves Delta Temperature ได้ สำหรับการศึกษานี้ทำในพื้นที่ภาคเหนือตอนบนของประเทศไทย ซึ่งมีละติจูดอยู่ระหว่าง 17-20 องศาเหนือ พบว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 0.0015 - 0.0017 อย่างไรก็ตามโดยที่ในวิธีการดังกล่าวมีการคำนวณค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหนือชั้นบรรยากาศเหนือพื้นที่ศึกษาซึ่งจะผันแปรไปตามตำแหน่งที่ตั้งทางละติจูดและช่วงเวลาในรอบปี ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้ในที่นี้อาจไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในพื้นที่อื่นๆ ที่มีที่ตั้งในละติจูดต่ำกว่า

การนำไปใช้ประโยชน์

โดยที่ลักษณะทั่วไปของพื้นที่สูงของประเทศไทยจะเป็นภูเขาสูงชัน มีพื้นที่ราบจำกัดและลำน้ำมีความลาดชันสูงไม่เอื้อต่อการก่อสร้างแหล่งน้ำ อ่างเก็บน้ำเพื่อเก็บสำรองน้ำไว้ใช้ในฤดูแล้งประกอบกับการที่เป็นพื้นที่ต้นน้ำทำให้ปริมาณน้ำที่สามารถใช้เพื่อการชลประทานได้มีอยู่จำกัด ดังนั้นในการกำหนดเขตการใช้ที่ดินและแนวทางการพัฒนาแหล่งน้ำ จำเป็นจะต้องพิจารณาศักยภาพของดินและที่ดินควบคู่ไปกับปริมาณทรัพยากรน้ำที่มีซึ่งตัวกลางที่เชื่อมโยงระหว่างปัจจัยทั้งสองนี้คือความต้องการใช้น้ำของพืช

วิธีการประเมินความต้องการใช้น้ำของพืชที่เที่ยงตรงที่สุดคือการใช้ค่าศักย์การคายระเหยคูณด้วยสัมประสิทธิ์การใช้น้ำ ข้อจำกัดของการใช้วิธีการนี้ในพื้นที่สูงคือขาดข้อมูลที่จำเป็นสำหรับทำการคำนวณศักย์การคายระเหย เนื่องจากจำนวนสถานีตรวจวัดทางอุตุนิยมวิทยาที่มีการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่จำเป็นสำหรับการคำนวณมีน้อยแห่ง จนไม่เพียงพอที่จะนำมาใช้อ้างอิงได้อย่างน่าเชื่อถือ

การศึกษานี้ได้แสดงให้เห็นว่า สำหรับภูมิอากาศในพื้นที่ลุ่มและพื้นที่สูงทางภาคเหนือตอนบนของประเทศไทยสามารถใช้วิธีการ Hargreaves Delta Temperature ทดแทนวิธีการ FAO Penman-Monteith ซึ่งถูกใช้เป็นวิธีการมาตรฐานได้โดยมีความน่าเชื่อถือในระดับที่น่าพอใจ นักวางแผนการใช้ที่ดินและวิศวกรชลประทานสามารถใช้การสอบเทียบสมการ Hargreaves Delta Temperature และนำผลลัพธ์มาใช้กับข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยาในพื้นที่ใกล้เคียงที่สุด เพื่อทำการคำนวณศักย์การคายระเหยได้ละเอียดถึงระดับรายวัน ทำให้วางแผนการใช้ที่ดิน แผนการปลูกพืชและแผนการจัดการน้ำร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นการเพิ่มพูนประสิทธิภาพในการใช้ทรัพยากรที่ดินและน้ำตามศักยภาพที่มี และลดความเสี่ยงที่จะเกิดความเสียหายต่อผลผลิตพืชเนื่องจากการขาดน้ำ และโดยที่การคำนวณค่าพลังงานแสงอาทิตย์ที่เหนือชั้นบรรยากาศในรอบปีสำหรับละติจูดต่างๆ ในรอบปีสามารถทำเพียงครั้งเดียวและใช้การได้ตลอดไป ส่งผลให้การคำนวณในส่วนที่เหลือเป็นไปโดยง่ายดังสมการที่ (8) ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะจัดตั้งสถานีที่ทำการวัดเพียงข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุดรายวันในพื้นที่ที่ต้องการบริหารจัดการน้ำชลประทานอย่างเข้มงวด ทำการคำนวณพลังงานแสงอาทิตย์ จากนั้นบันทึกข้อมูลอุณหภูมิเพื่อใช้ในการคำนวณศักย์การคายระเหยต่อไปได้โดยสะดวก

เอกสารอ้างอิง

กรมชลประทาน 2554 **คู่มือการหาปริมาณการใช้น้ำของพืชปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง และสัมประสิทธ์พืช** (ฉบับปรับปรุง กรกฎาคม 2554) ส่วนการใช้น้ำชลประทาน สำนักอุทกวิทยาและบริหารน้ำ กรมชลประทาน กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพฯ 130 หน้า.

เสริม จันทร์ฉาย 2560 **รังสีอาทิตย์** ตำราประกอบการสอนวิชา 514 523 รังสีอาทิตย์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร พิมพ์ครั้งที่สอง บ. เกษมพริ้นติ้งกรุ๊ป จำกัด นครปฐม

Allen, Richrd G., Luois S. Periera, Dirk Raes and Martin Smith 1998 **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirement**. FAO Irrigation and drainage paper 56: p.15

Almorox, J., and Grieser, J. (2015). Calibration of the Hargreaves–Samani method for the calculation of reference evapotranspiration in different Köppen climate classes**. Hydrology Research.** 47.2 2016 : 521- 531

Condova, Mario *et al.* 2015. Evaluation of Penman - Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data. **Mountain Research and Development.** Vol 38 No 3 : 230 – 239

Gavilán, P., Lorite, I. J., Tornero, S., & Berengena, J. (2006). Regional calibration of Hargreaves equation for estimating reference ET in a semiarid environment. **Agricultural Water Management.** 81(3) : 257–281.

Hargreaves, George H., F. Asce and Richard G. Allen. 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering** 129 (1): 53 – 63

Heydari, Mohammad Medhi 2014. Calibration of Hargreaves–Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Semi-arid and Arid Regions. **Achieve of Agronomy and Soil Science.** Volume 60 2014 Issue 5: 657 – 713

Lima, José Romualdo de Sousa *et al*. 2013. Calibration of Hargreaves-Samani Equation for Estimating Reference Evapotranspiration in Sub-Humid Region of Brazil. **Journal of Water Resource and Protection**. 2013, 5: 1-5

Matuszko, Dorata 2012. Influence of the Extent and Genera of Cloud Cover on Solar Radiation Intensity**. International Journal of Climatology.** 32:2403-2414

McMahon, T. A., Finlayson, B. L. and Peel, M. C. 2016. Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data**. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**. 3 (6) : 788–818

Mendicino, Giuceppe and Alfonso Senatore 2013. Regionalization of the Hargreaves Coefficient forthe Assessment of Distributed Reference Evapotranspiration in Southern Italy **J. Irrg. Drain Eng**. 2013 139: 394-362

Moeletsi, Mokhele, Sue Walker and Hamisai Hamandawana 2013. Comparison of the Hargreaves and Samani equation and the Thornthwaite equation for estimating dekadal evapotranspiration in the Free State Province, South Africa **Physics and Chemistry of the Earth**. 66 (2013) : 4–15

Ravazzani, G. *et al*. 2012. Modified Hargreaves-Samani Equation for the Assessment of Reference Evapotranspiration in Alpine River Basins**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering.** 138 (7) : 592–599

Shahidian, S. *et al*. 2012. Parametric calibration of the Hargreaves-Samani equation for use at new locations. **Hydrological Processes** 27(4) : 605–616

Subburayan, Sivaprakasam, A. Murugappan and S. Mohan 2011 Modified Hargreaves Equation for Estimation of ET0 in a Hot and Humid Location in Tamilnadu State, India. **International Journal of Engineering Science and Technology** Vol. 3 No. 1 Jan 2011: 592-600

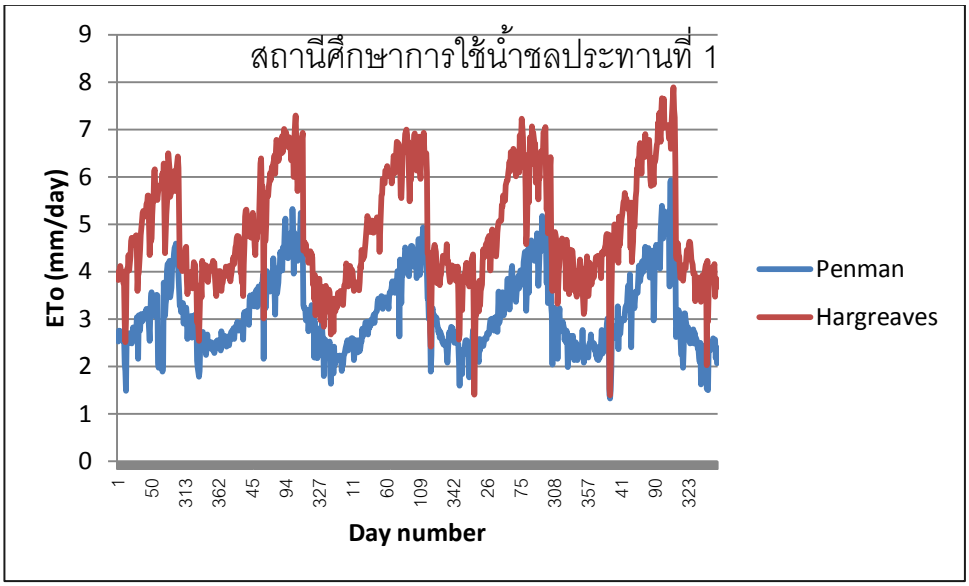
SCS 1993. **Irrigation Water Requirement.** Soil Conservation Service Part 623 National Engineering Handbook. p. 283

Temesgen, B., Eching, S., Davidoff, B. and Frame, K. 2005. Comparison of Some Reference Evapotranspiration Equations for California. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**. 131(1) : 73–84.

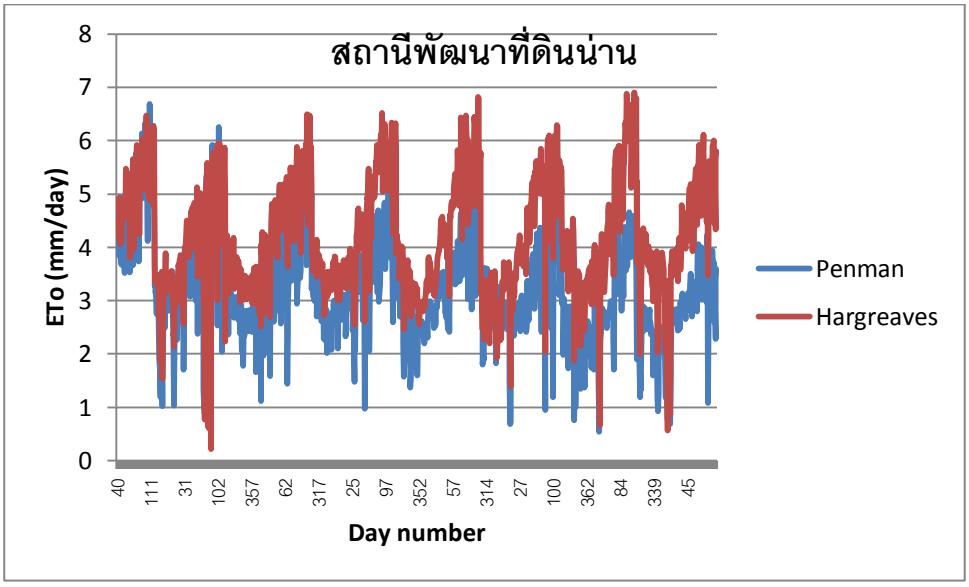
Trajkovik, Slavisa 2007. Hargreaves VS Penman-Monteith under Humid Condition**. Journal of Irrigation and Drainage Engineering** Volume 133 Issue 1-February 2007 DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38)

Xu, Junzeng *et al.* 2013. Evaluation and calibration of simple methods for daily reference evapotranspiration estimation in humid East China**. Archives of Agronomy and Soil Science** Vol. 59, No. 6, June 2013: 845–858

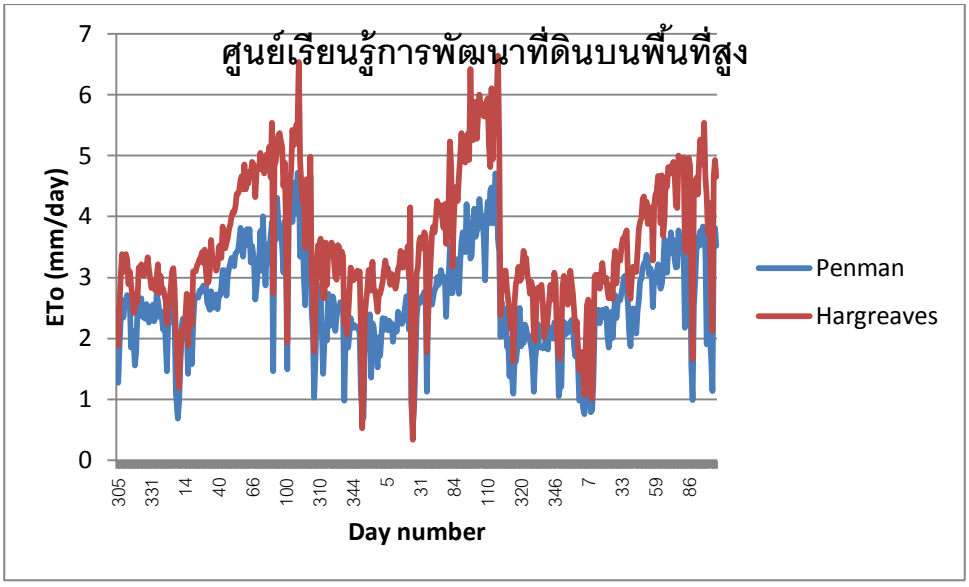
ภาคผนวก



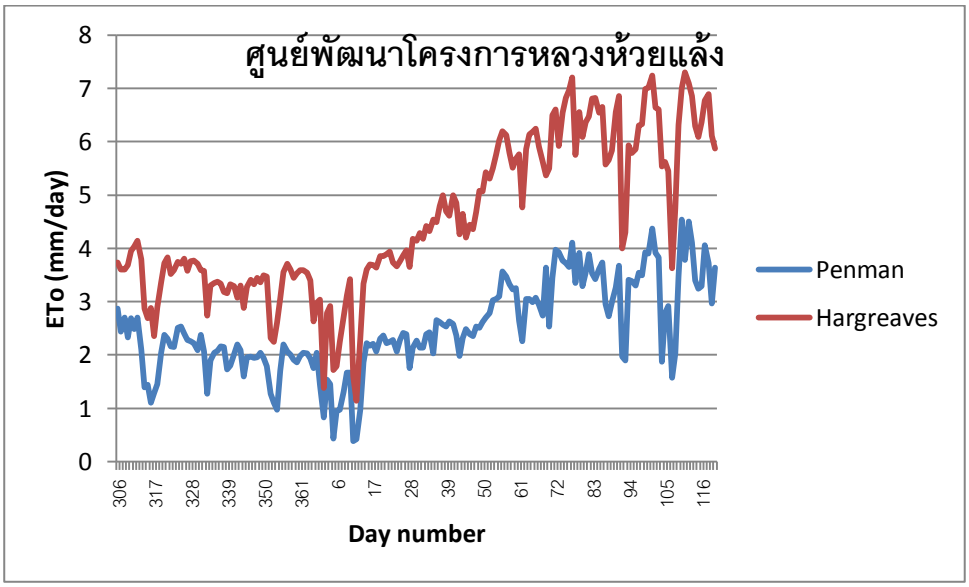
แผนภูมิที่ 1 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงฤดูแล้ง



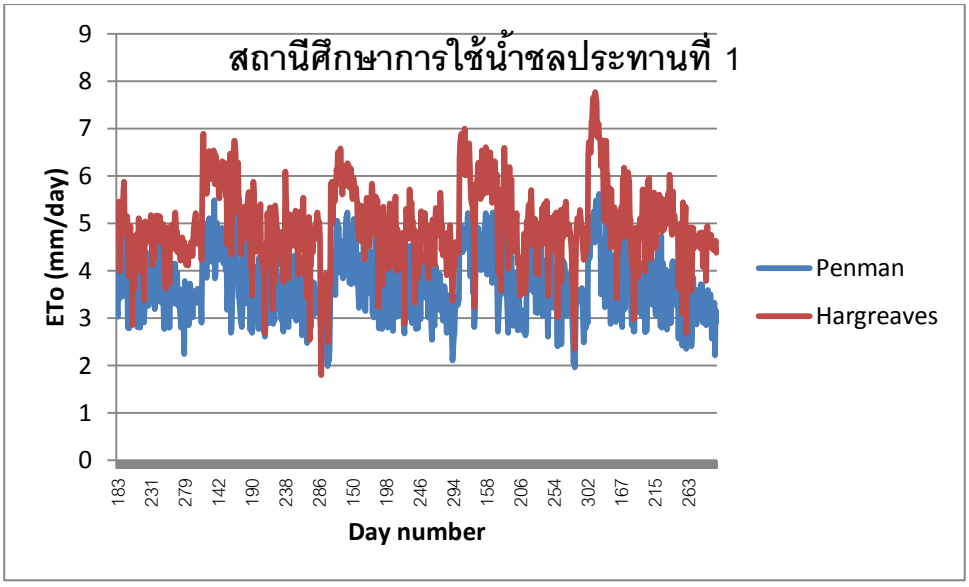
แผนภูมิที่ 2 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน อำเภอเวียงสา จังหวัดน่านในช่วงฤดูแล้ง



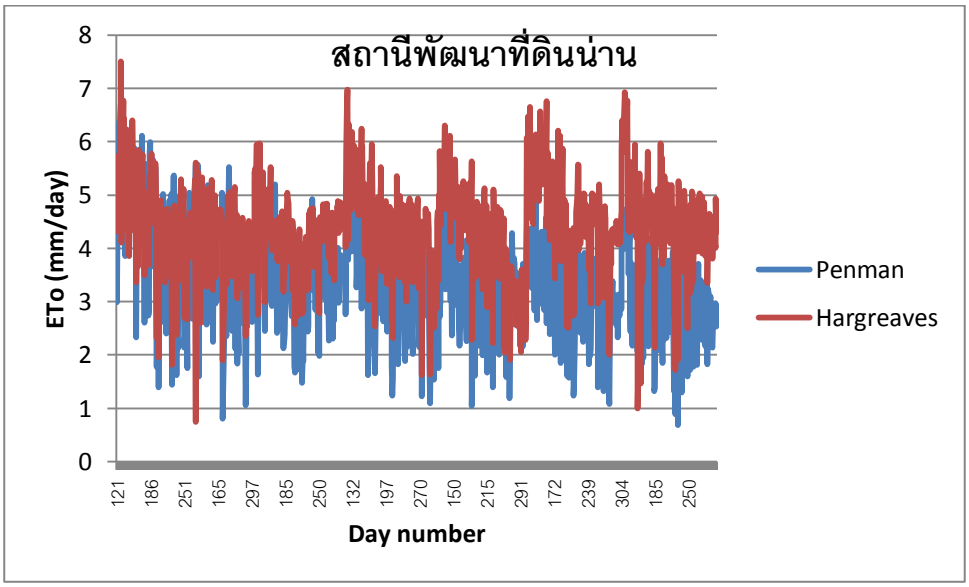
แผนภูมิที่ 3 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง อำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูแล้ง



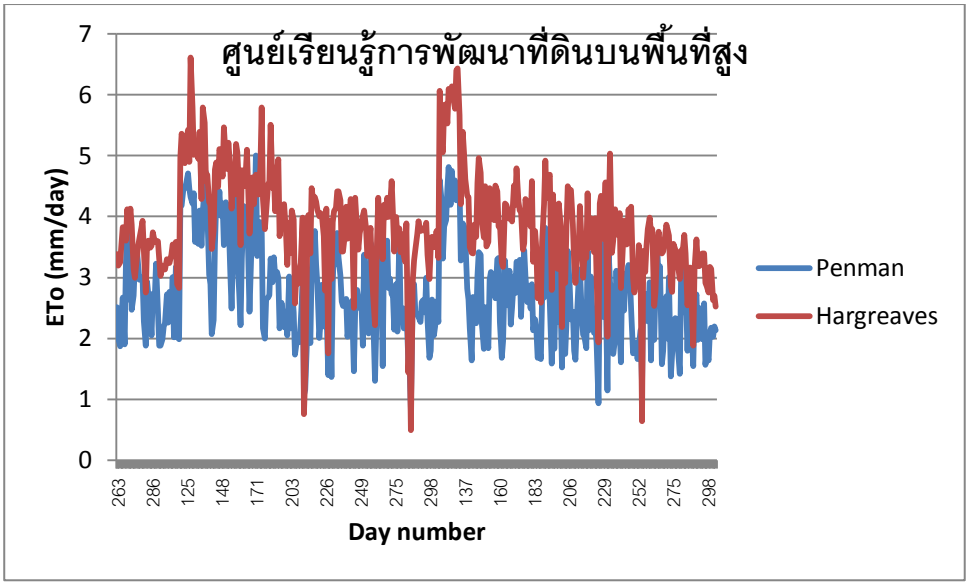
แผนภูมิที่ 4 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง อำเภอเวียงแก่น จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูแล้ง



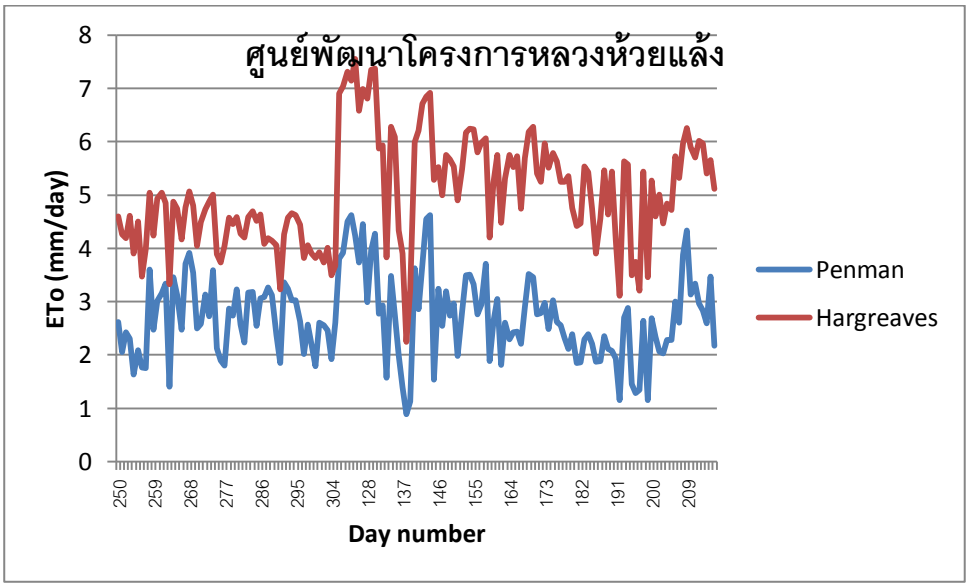
แผนภูมิที่ 5 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 (แม่แตง) อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ในช่วงฤดูฝน



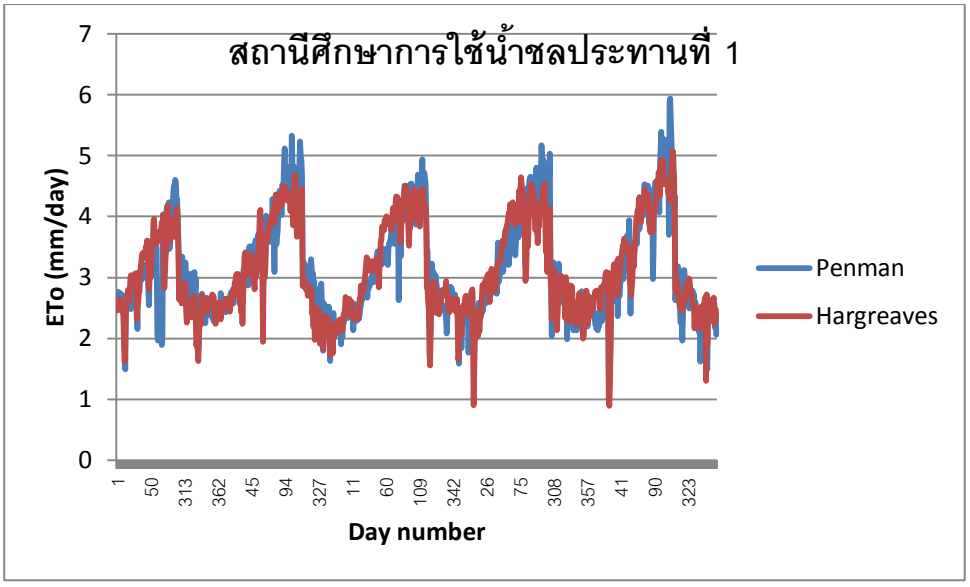
แผนภูมิที่ 6 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน อำเภอเวียงสา จังหวัดน่านในช่วงฤดูฝน



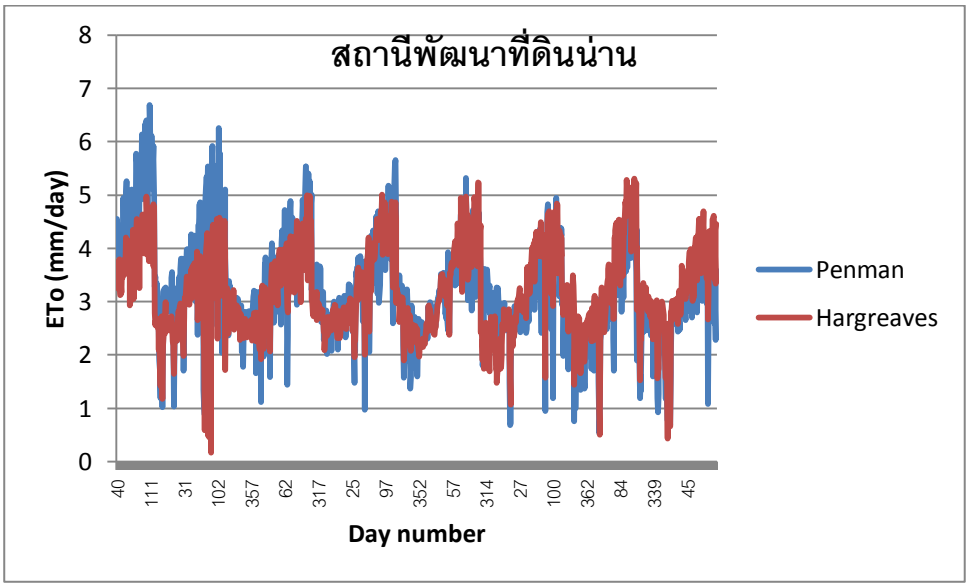
แผนภูมิที่ 7 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง อำเภอแม่ฟ้าหลวง จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูฝน



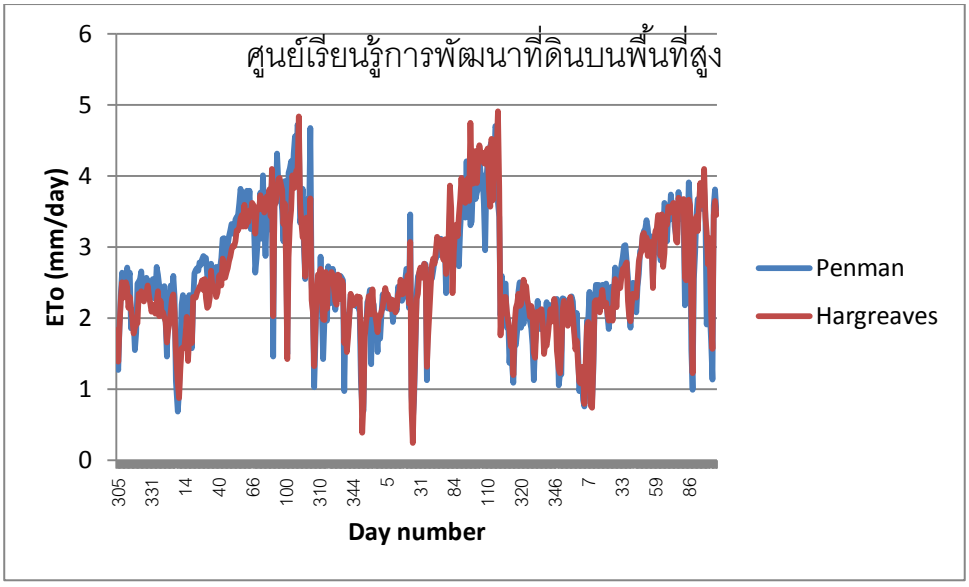
แผนภูมิที่ 8 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ (c) 0.0023 ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง อำเภอเวียงแก่น จังหวัดเชียงราย ในช่วงฤดูฝน



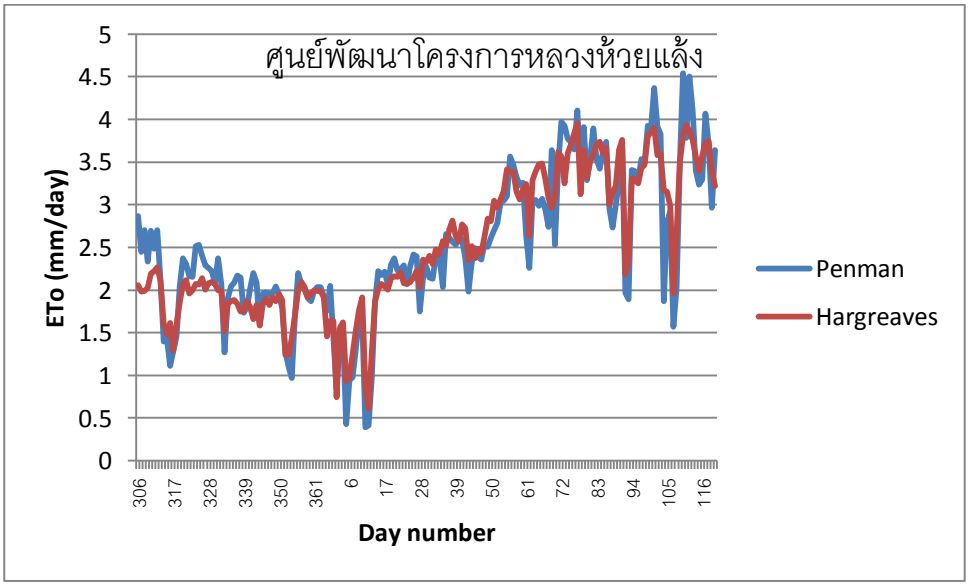
แผนภูมิที่ 9 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



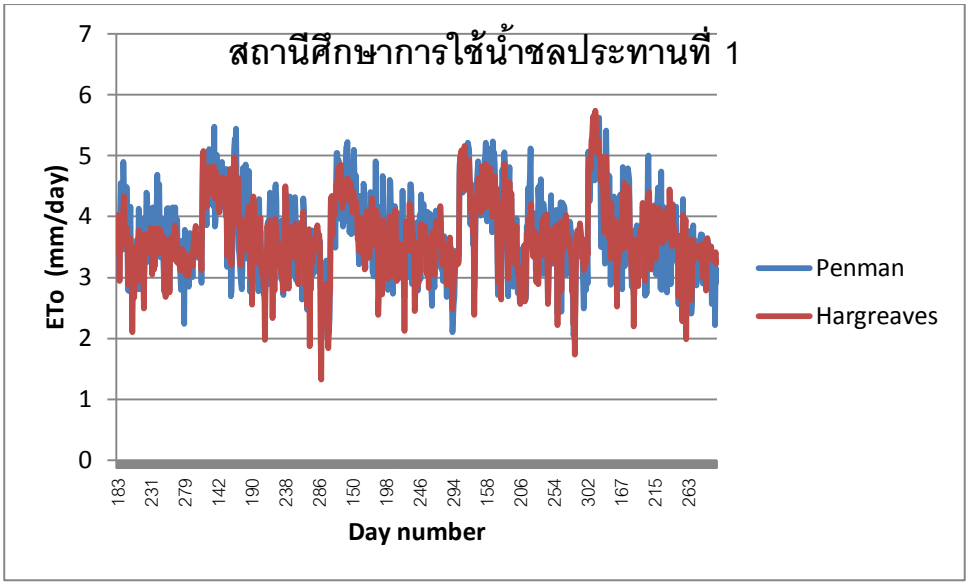
แผนภูมิที่ 10 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



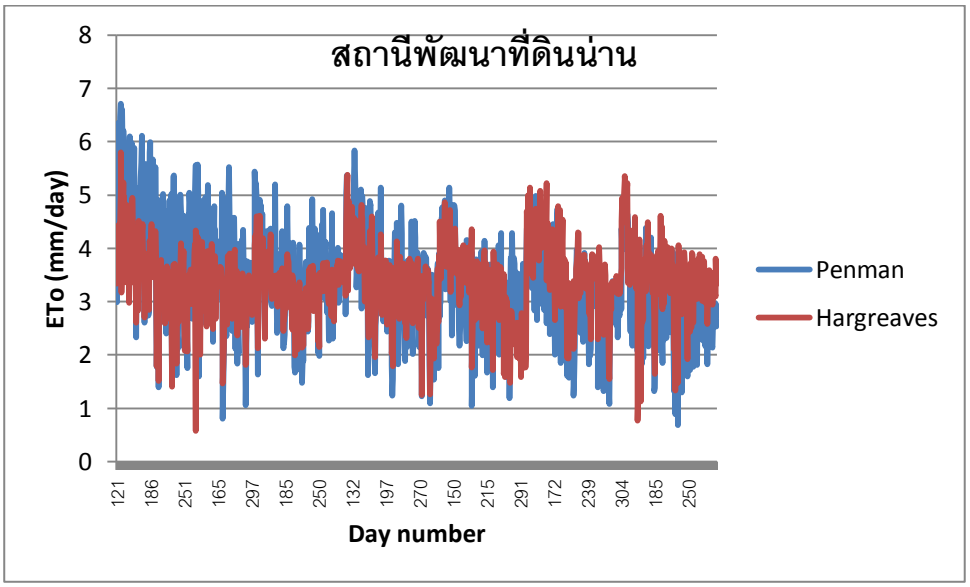
แผนภูมิที่ 11 เปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth และวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



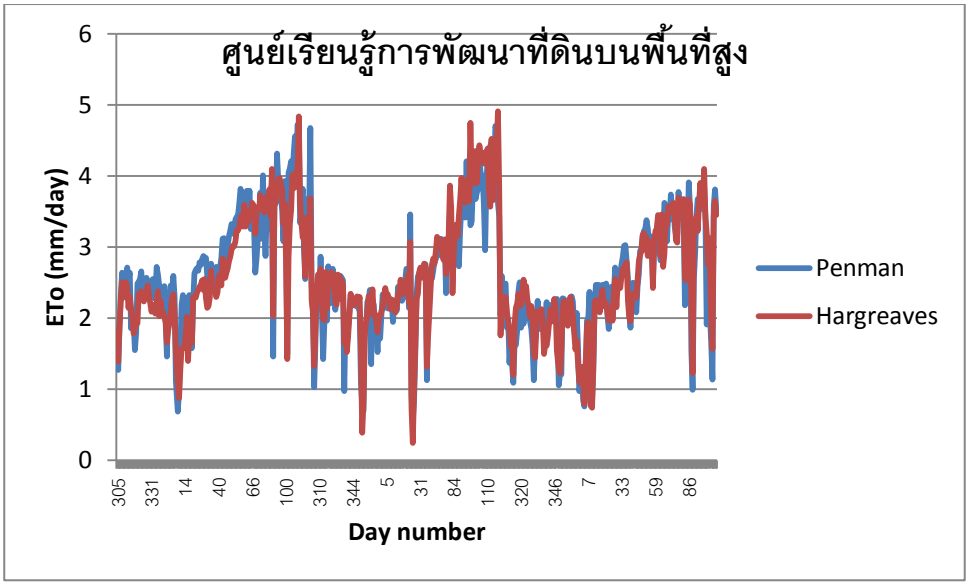
แผนภูมิที่ 12 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



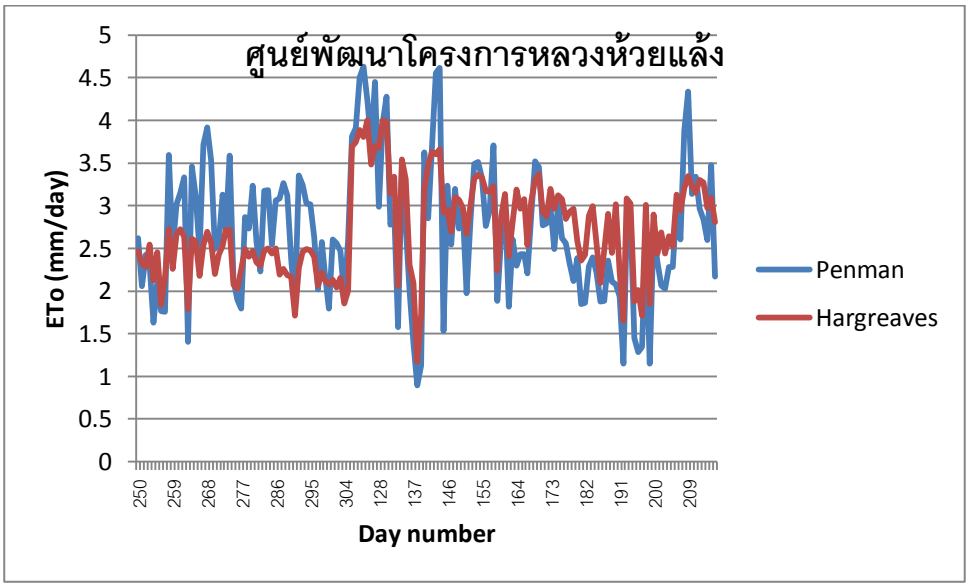
แผนภูมิที่ 13 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1 ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



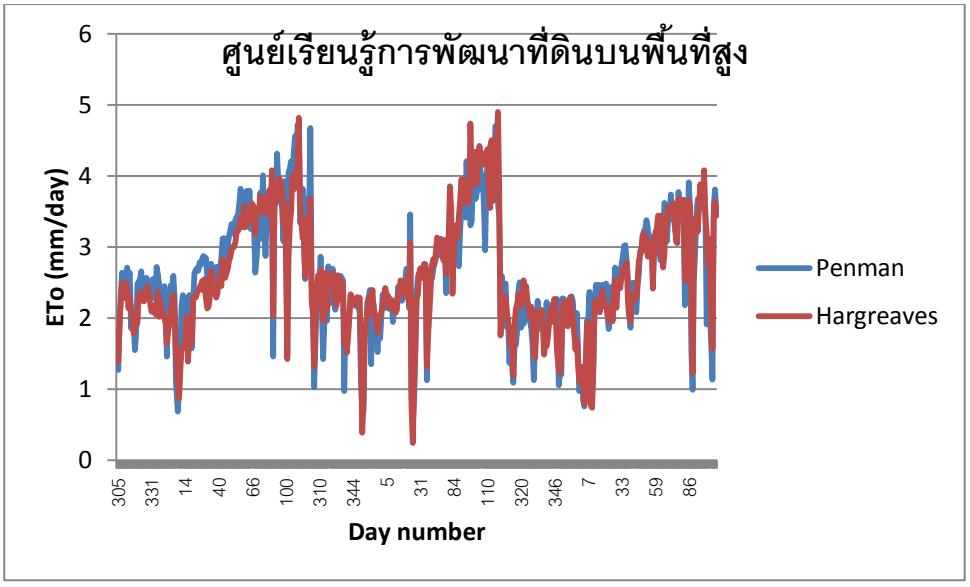
แผนภูมิที่ 14 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่สถานีพัฒนาที่ดินน่านภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



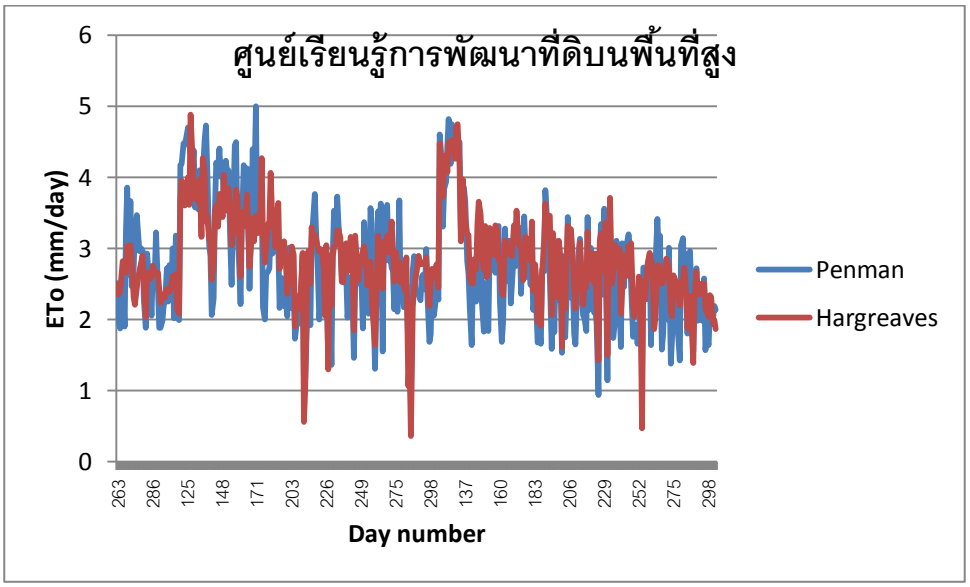
แผนภูมิที่ 15 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



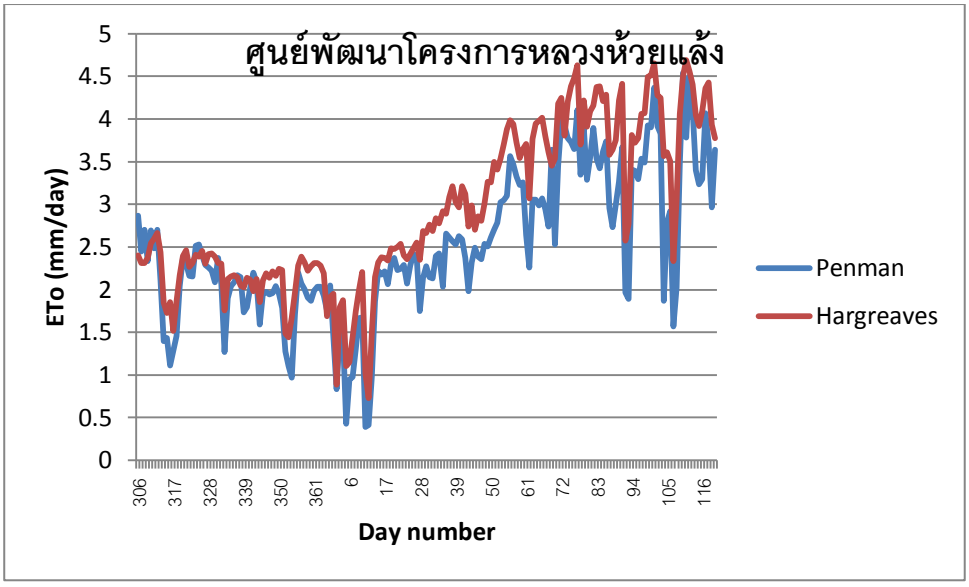
แผนภูมิที่ 16 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง ภายหลังทำการสอบเทียบสมการแล้ว



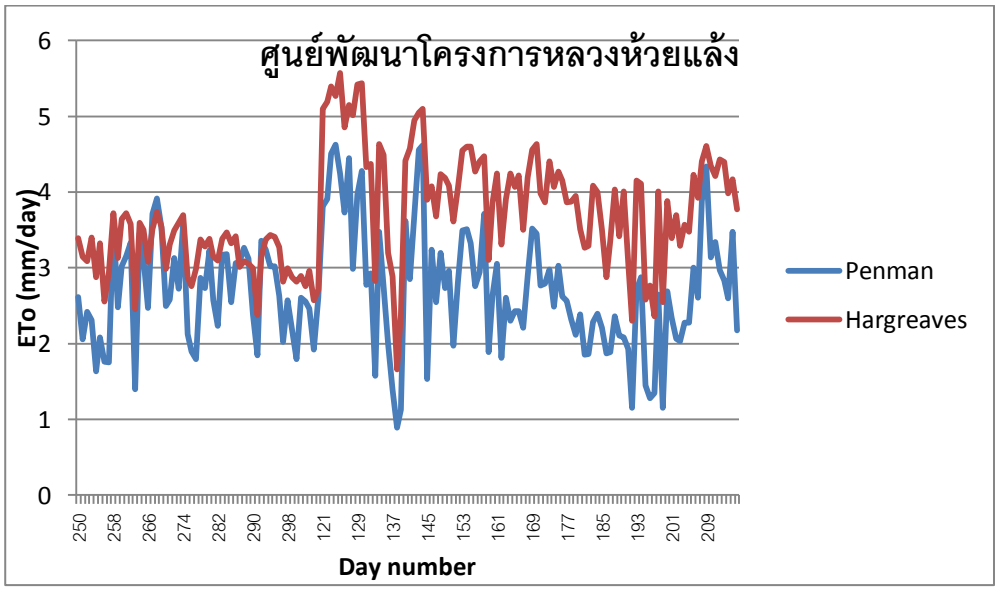
แผนภูมิที่ 17 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1



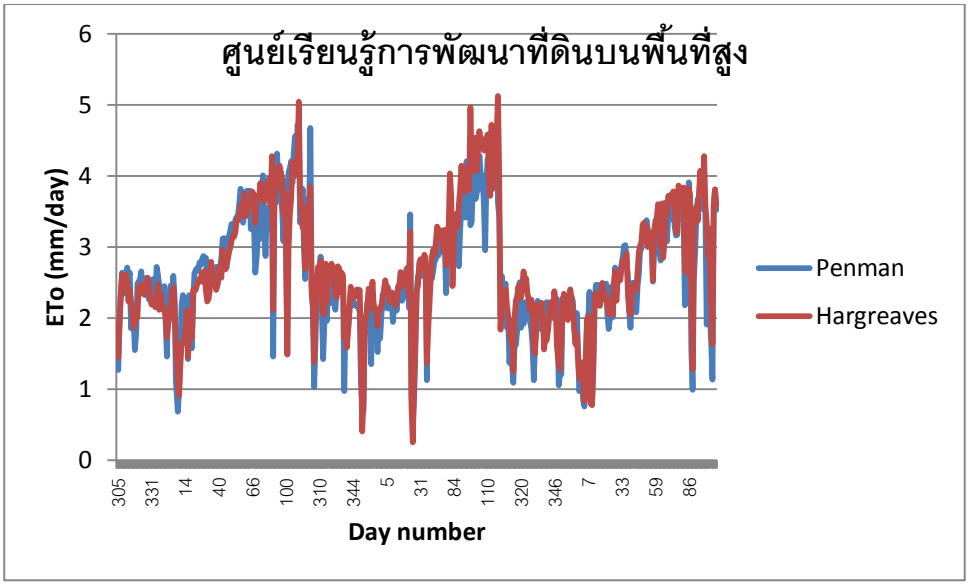
แผนภูมิที่ 18 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1



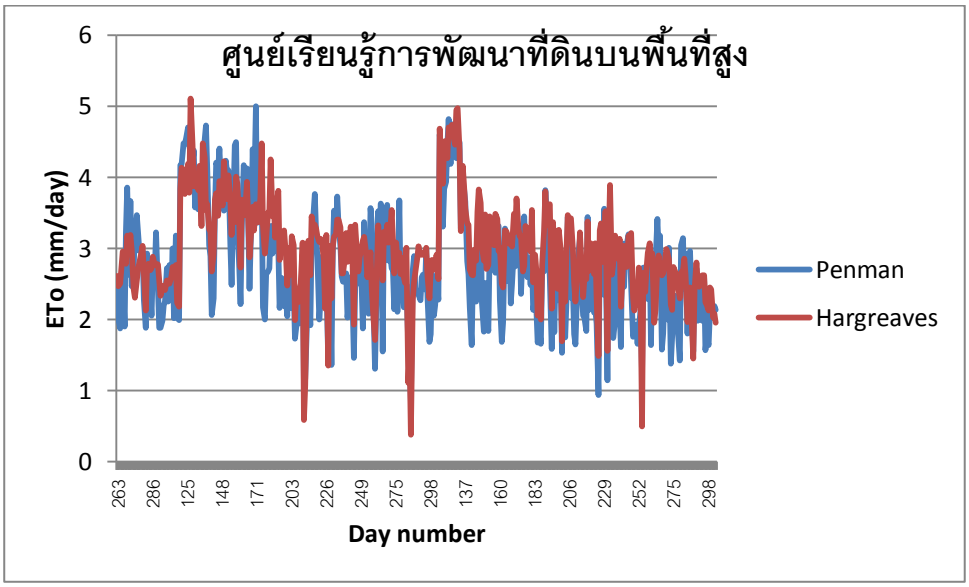
แผนภูมิที่ 19 เปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth และวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1



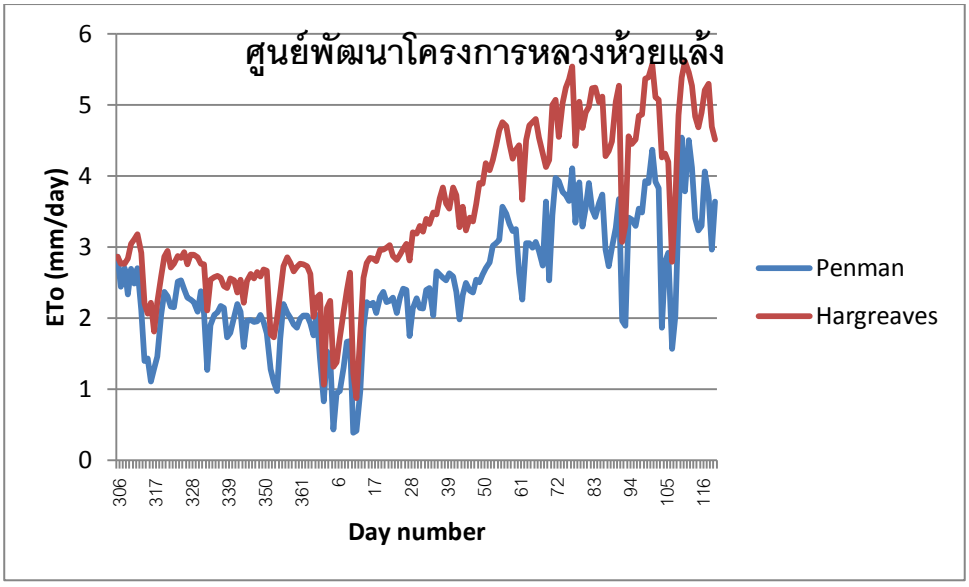
แผนภูมิที่ 20 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีศึกษาการใช้น้ำชลประทานที่ 1



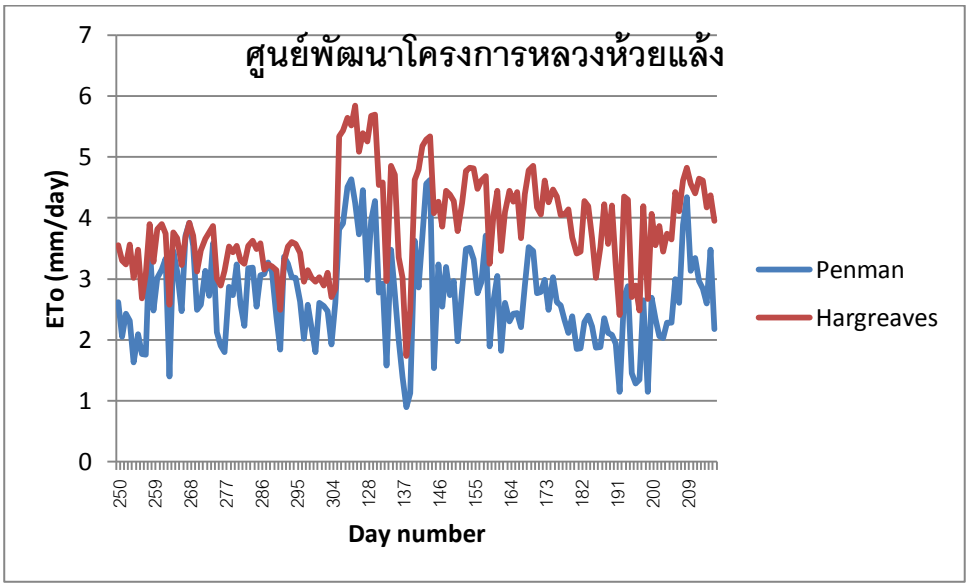
แผนภูมิที่ 21 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน



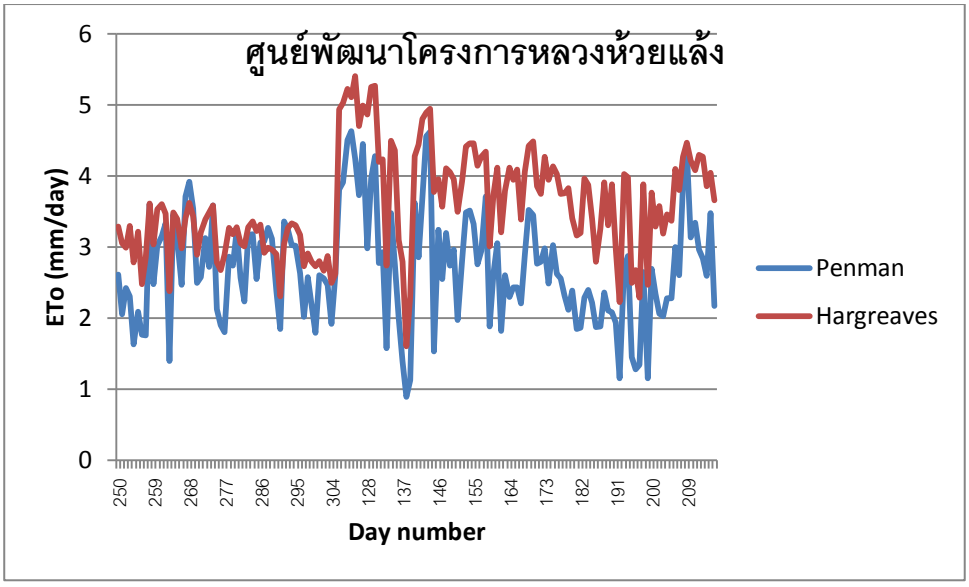
แผนภูมิที่ 22 เปรียบเทียบผลการคำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth และวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน



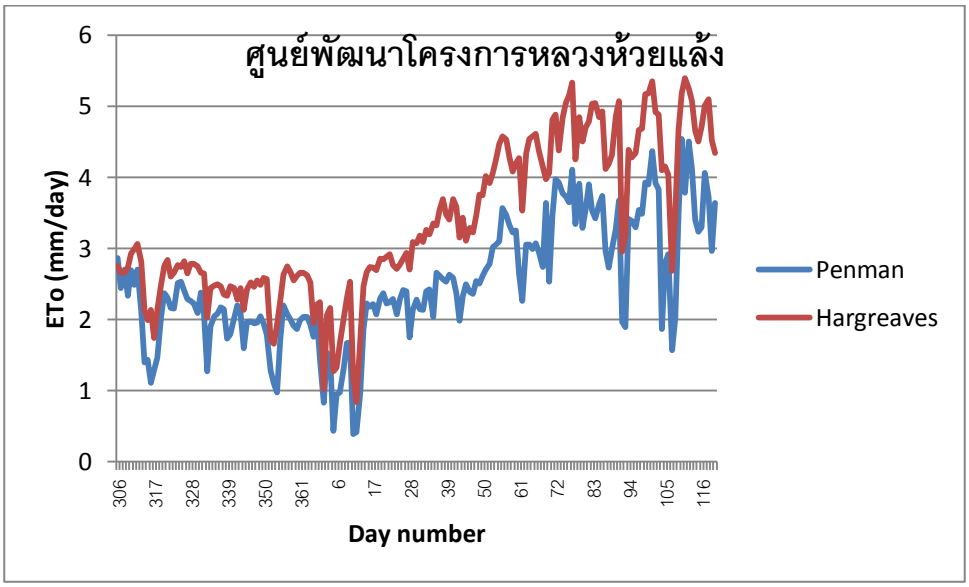
แผนภูมิที่ 23 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน



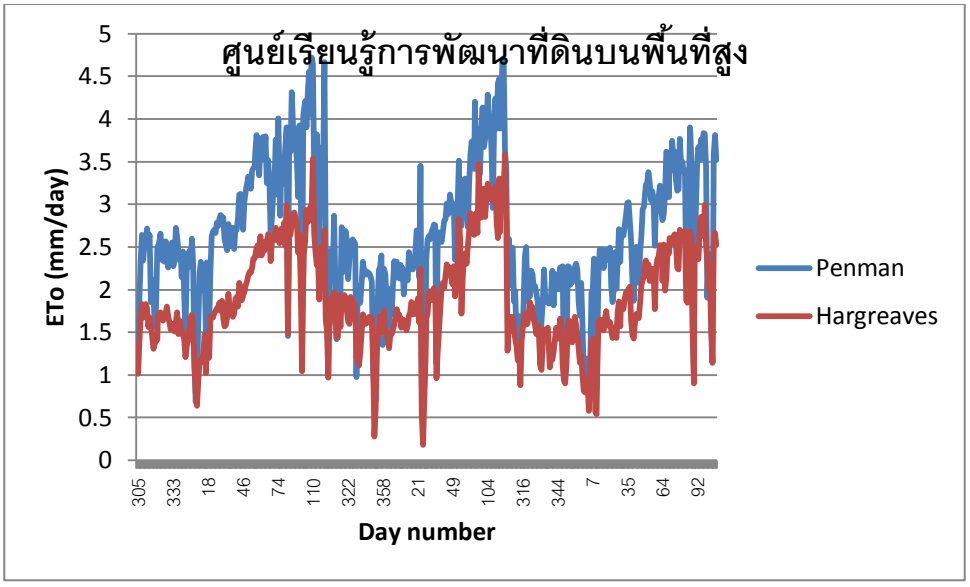
แผนภูมิที่ 24 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่สถานีพัฒนาที่ดินน่าน



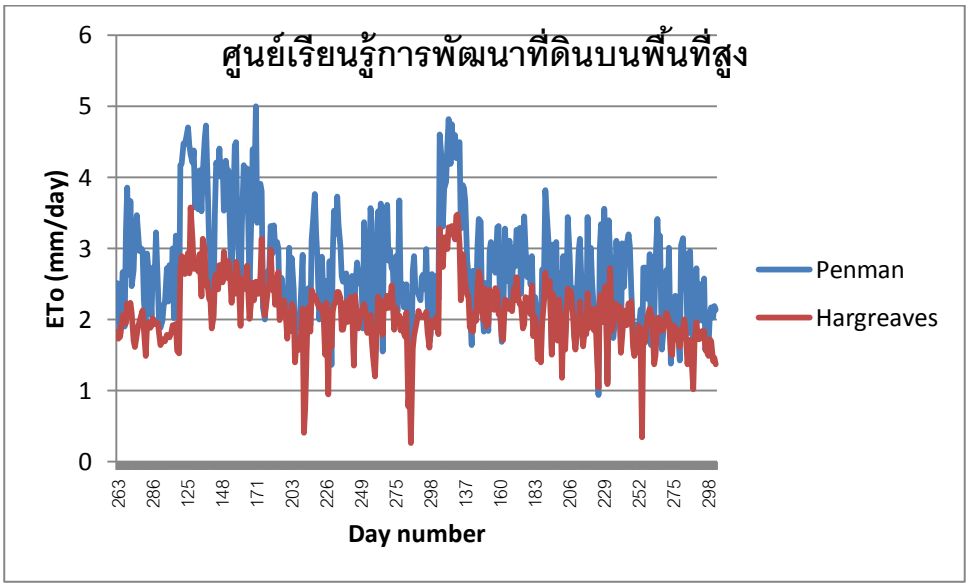
แผนภูมิที่ 25 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง



แผนภูมิที่ 26 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง



แผนภูมิที่ 27 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูแล้ง ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง



แผนภูมิที่ 28 เปรียบเทียบผลการคำนวณศักย์การคายระเหยที่คำนวณด้วยวิธี FAO Penman-Montieth กับวิธี Hargreaves Delta Temperature ในฤดูฝน ที่ศูนย์เรียนรู้การพัฒนาที่ดินบนพื้นที่สูง โดยใช้สัมประสิทธิ์ที่ทำการสอบเทียบที่ศูนย์พัฒนาโครงการหลวงห้วยแล้ง