



วิทยานิพนธ์

การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า
ด้วยกระบวนการน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว

DEVELOPMENT OF KU-FLEX-TOPO-SD MODEL FOR RUNOFF
ESTIMATION USING SEMI-DISTRIBUTED RAINFALL-RUNOFF
PROCESSES

นายศรัณภัสร์ เอี่ยมอำไพ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปีการศึกษา ๒๕๖๒

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

สาขาวิชา วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

ภาควิชา วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ

เรื่อง การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยกระบวนการ
น้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัว

Development of KU-FLEX-TOPO-SD Model for Runoff Estimation using Semi-
Distributed Rainfall-Runoff Processes

นามผู้วิจัย นายศรัณภัสร์ เอี่ยมอำไพ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรรณดี ไทยสยาม, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

.....
(รองศาสตราจารย์สมหวัง ชันตยานุวงศ์, Ph.D.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยกระบวนการ
น้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัว

Development of KU-FLEX-TOPO-SD Model for Runoff Estimation using Semi-Distributed
Rainfall-Runoff Processes

โดย

นายศรัณกัศร์ เอี่ยมอำไพ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

ปีการศึกษา 2562

ศรัณภัสร์ เอี่ยมอำไพ: การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยกระบวนการน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ) สาขาวิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์ชูชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D. ปีการศึกษา 2562

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนา KU-FLEX-TOPO-SD ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภทกึ่งกระจายตัวจากพื้นฐานของ FLEX-TOPO ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบลัมพ์ โครงสร้างหลักของการพัฒนาแบบจำลองคือ การประเมินน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำ จากนั้นเคลื่อนตัวน้ำท่าจากจุดออกผ่านทางน้ำจนถึงจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำก่อนที่จะมารวมกับน้ำท่าที่เกิดขึ้นในกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำ วิธีการ Muskingum ถูกนำมาใช้เพื่อการเคลื่อนตัวน้ำท่าผ่านทางน้ำโดยเวลาที่ใช้ในการเดินทางสำหรับแต่ละกลุ่มน้ำย่อย (K_{sub}) ได้จากการปรับค่า K ของกลุ่มน้ำที่สอบเทียบด้วยความยาวลำน้ำที่เคลื่อนผ่าน นอกจากนั้นแล้วขนาดพื้นที่ของกลุ่มน้ำย่อยได้ถูกนำมาใช้เพื่อปรับค่า lag_F และ lag_S (พารามิเตอร์แสดงการหน่วงเวลาของการตอบสนองเร็วและช้าของกลุ่มน้ำที่สอบเทียบ) เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นสำหรับแต่ละ กลุ่มน้ำย่อย รวมทั้งเปอร์เซ็นต์ของ Hillslope, Terrace และ Wetland ของแต่ละกลุ่มน้ำย่อยถูกนำมาใช้เพื่อปรับค่าพารามิเตอร์ Su_{max} เพื่อให้ได้ค่าพารามิเตอร์เหล่านั้นสำหรับแต่ละกลุ่มน้ำย่อย จากผลการทดสอบแบบจำลองที่ได้รับการพัฒนาที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A ซึ่งครอบคลุมพื้นที่กลุ่มน้ำ 47,800 ตารางกิโลเมตร ในกลุ่มน้ำชี พบว่า KU-FLEX-TOPO-SD สามารถประเมินน้ำท่าได้ถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดมากกว่า FLEX-TOPO อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นแล้ว KU-FLEX-TOPO-SD สามารถประเมินน้ำท่าที่จุดออกของ 12 สถานี ด้านเหนือน้ำของ E.20A โดยไม่ต้องสอบเทียบแบบจำลองเพิ่มเติมดังที่ต้องดำเนินการโดย FLEX-TOPO โดยผลการศึกษาพบว่า KU-FLEX-TOPO-SD ให้ผลการประเมินน้ำท่าในภาพรวมที่ถูกต้องมากกว่าเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จาก FLEX-TOPO โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สถานีวัดน้ำท่าที่มีพื้นที่กลุ่มน้ำมาก นอกจากนั้นแล้ว ผลการศึกษาพบว่า ดัชนี MSI ที่ได้รับการพิสูจน์ในการศึกษานี้ว่าสามารถใช้ตรวจสอบสภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งให้กับพื้นที่กลุ่มน้ำของประเทศไทยนั้น พบว่า มีความสัมพันธ์กับความชื้นในดินที่ได้จาก KU-FLEX-TOPO-SD มากกว่าที่ได้จาก FLEX-TOPO

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Sarunphas Iamampai : Development of KU-FLEX-TOPO-SD Model for Runoff Estimation using Semi-Distributed Rainfall-Runoff Processes. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering. Thesis Advisor: Professor Nutchanat Sriwongsitanon, Ph.D. Academic Year 2019

This study aims to develop the KU-FLEX-TOPO-SD, which is a semi-distributed rainfall-runoff model, based on FLEX-TOPO - a lumped rainfall-runoff model. The main structure of model development is to estimate the runoff for the upstream sub-catchment and to route it through a channel of the downstream sub-catchment before adding with runoff from the downstream sub-catchment at its outlet. Muskingum method is applied for the channel routing by adjusting the travel time of the calibrated catchment (K) using its reach length to produce K_{sub} . The sub-catchment area is also used to adjust the parameters $Tlag_f$ and $Tlag_s$, which are fast and slow response of the calibrated catchment, to acquire those parameters for the individual sub-catchment. The percentage of hillslope, terrace and wetland of each sub-catchment are applied to adjust the parameter Su_{max} to obtain the parameters for the sub-catchment. The developed model was tested at the gauging station E.20A which cover the catchment area of 47,800 square km^2 in Chi River Basin. The results show that KU-FLEX-TOPO-SD can estimate runoff significantly closer to the observed data compared to the results provided by FLEX-TOPO. Moreover, KU-FLEX-TOPO-SD can estimate runoff at the outlet of 12 gauging stations upstream of E.20A without extra model calibration which was carried out by FLEX-TOPO. The overall outputs show that KU-FLEX-TOPO-SD can estimate runoff a little closer to the observed data than the results provided by FLEX-TOPO, especially for the stations with large catchment areas. Finally, MSI - which was proved in this study that it can be used to detect the wetness and dryness for Thailand River Basins – was found to have higher relationships with the unsaturated soil moisture estimated using KU-FLEX-TOPO-SD compared to those of provided by FLEX-TOPO.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____/____/____

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือและสนับสนุนในการวางแผนวิจัยในฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษา และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ให้มีความสมบูรณ์ และขอขอบคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณดี ไทยสยาม ที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำตลอดที่ข้าพเจ้าศึกษา ณ สถาบันแห่งนี้

ขอขอบคุณกรมชลประทานที่ได้สนับสนุนข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวันสำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณศูนย์วิจัยการรับรู้ระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (SENSWAT) ที่ได้สนับสนุนข้อมูลฝนกริดแบบรายวัน โดยมีชื่อว่า SENSWAT-GGR เพื่อใช้สำหรับประกอบการวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับนิสิตปริญญาโท และทุนวิจัยเพื่อการดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้ระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management; SENSWAT) โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยภายใต้ศูนย์วิจัยดังกล่าว

ศรัณภัสร์ เอี่ยมอำไพ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
สารบัญภาพผนวก.....	ฉ
คำนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	3
ขอบเขตการศึกษา.....	4
การตรวจเอกสาร.....	5
1. พื้นที่ศึกษา.....	5
1.1 ลักษณะทั่วไปของกลุ่มน้ำชี.....	5
1.2 สภาพภูมิอากาศ.....	7
1.2 การใช้ที่ดิน.....	10
2. การแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยการใช้แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข.....	12
3. กระบวนการเฉลี่ยเชิงพื้นที่.....	14
4. ทฤษฎีของแบบจำลอง FLEX-TOPO.....	16
1. พื้นที่ลาดชัน (Hillslope).....	17
2. พื้นที่ลาดเอียง (Terrace).....	22
3. พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland).....	24

5. MOSCEM (Multi Objective Shuffle Complex Evolution Matropolis)	26
6. ดัชนี MSI (Moisture Stress Index).....	27
7. Kling-Gupta Efficiency (KGE)	27
8. Nash-Sutcliffe 's Efficiency (NSE)	28
อุปกรณ์และวิธีการ	30
อุปกรณ์.....	30
วิธีการ	31
1. รวบรวมข้อมูล	32
1.1 ข้อมูลน้ำท่า	32
1.2 ข้อมูลฝนเชิงพื้นที่แบบกริด (Gridded Gauged Rainfall)	34
1.3 ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM)	37
2. แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของกลุ่มน้ำย่อยในกลุ่มน้ำชี...38	
2.1 แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและความยาวลำน้ำสายหลักของกลุ่มน้ำย่อยในกลุ่มน้ำชี.....	38
3. วิเคราะห์ความลึกฝนเชิงพื้นที่แบบรายวันของแต่ละลุ่มน้ำย่อยในกลุ่มน้ำชี.....	42
4. พัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินน้ำท่าแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM.....	45
5. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM.....	47
6. วิเคราะห์ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เพื่อการตรวจสอบสภาพความแห้งแล้งของประเทศไทย.....	47
7. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI กับ ความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา.....	48
ผลการศึกษา.....	49
1. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM.....	49

2. ผลการวิเคราะห์ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เพื่อการตรวจสอบสภาพความแห้งแล้ง ของประเทศไทย.....	54
2.1 ผลการแบ่งระดับสภาพความแห้งแล้งและความชุ่มชื้นด้วยดัชนี MSI.....	54
2.2 ผลการเปรียบเทียบค่าของดัชนี MSI กับสภาพการใช้ที่ดินและปริมาณฝน	63
3. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI กับความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา.....	65
สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ.....	69
1. สรุปผลการศึกษา.....	69
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก.....	72
ประวัติการศึกษา และการทำงาน.....	96

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 กลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำชี	6
ตารางที่ 2 สัดส่วนการใช้ที่ดินของแต่ละลุ่มน้ำสาขาในกลุ่มชีในปี พ.ศ. 2553–2556.....	10
ตารางที่ 3 ตำแหน่งที่ตั้ง ช่วงปีสถิติข้อมูลและขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ศึกษา.....	32
ตารางที่ 4 สถิติข้อมูลน้ำท่ารายเดือนและรายปีเฉลี่ยในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา.....	33
ตารางที่ 5 ความลึกฝนรายเดือนและรายปีเฉลี่ยระหว่างปี พ.ศ. 2544-2558 สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำชี	35
ตารางที่ 6 ความลึกฝนรายเดือนและรายปีเฉลี่ยระหว่างปี พ.ศ. 2544-2558 สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา.....	36
ตารางที่ 7 ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำสายหลักของ 98 ลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำชีที่ทำการศึกษา.....	39
ตารางที่ 8 ลักษณะเฉพาะของสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 13 สถานี ในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา.....	42
ตารางที่ 9 ความลึกฝนเชิงพื้นที่รายเดือน รายฤดูกาล และรายปีเฉลี่ย ของ 98 ลุ่มน้ำย่อย ในกลุ่มน้ำชี	43
ตารางที่ 10 ค่าของชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A.....	52
ตารางที่ 11 ค่าของชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง FLEX-TOPO ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี	52
ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบค่าทางสถิติที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่เลือกพิจารณา.....	53
ตารางที่ 13 การกระจายตัวของค่าดัชนี MSI และปริมาณฝนเฉลี่ยในประเทศไทย.....	57
ตารางที่ 14 การกำหนดระดับความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งสำหรับลุ่มน้ำในประเทศไทย โดยดัชนี MSI.....	58

ตารางที่ 15 ค่าของดัชนี MSI เฉลี่ยรายฤดูกาลและรายปีในแต่ละประเภทการใช้ที่ดินของแต่ละ
ภูมิภาค.....64

ตารางที่ 16 ค่าทางสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI กับความชื้นในดินที่ได้จาก
แบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่เลือกพิจารณา....67

สารบัญญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1	สภาพภูมิประเทศและขอบเขตของกลุ่มน้ำชี.....	6
ภาพที่ 2	ร่องความกดอากาศต่ำ ทิศทางลมมรสุม และทางเดินพายุหมุนเขตร้อนที่พัดผ่านประเทศไทย.....	9
ภาพที่ 3	การใช้ที่ดินของแต่ละกลุ่มน้ำย่อยในกลุ่มน้ำชีในปี พ.ศ. 2553–2556.....	12
ภาพที่ 4	องค์ประกอบของกลุ่มน้ำ	13
ภาพที่ 5	กลุ่มน้ำย่อยที่ถูกแบ่งโดยเครื่องมือ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS 10.....	14
ภาพที่ 6	ตัวอย่างชั้นข้อมูลด้านเข้าและด้านออกสำหรับเครื่องมือ Zonal Statistic as Table	15
ภาพที่ 7	โครงสร้างของแบบจำลอง FLEX-TOPO	17
ภาพที่ 8	โครงสร้างของแบบจำลอง FLEX-TOPO	18
ภาพที่ 9	โครงสร้างของแบบจำลอง FLEX-Topo ในพื้นที่ลาดเอียงและพื้นที่ชุ่มน้ำ.....	23
ภาพที่ 10	หลักการของกระบวนการ Pareto Ranking สำหรับปัญหาที่มีสองพารามิเตอร์ (θ_1, θ_2) (a) และมีสองวัตถุประสงค์ (F_1, F_2) (b).....	26
ภาพที่ 11	ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา	34
ภาพที่ 12	ข้อมูลฝนกริดรายปีเฉลี่ยและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 161 สถานีในกลุ่มน้ำชี.....	37
ภาพที่ 13	การแบ่งพื้นที่กลุ่มน้ำย่อยของกลุ่มน้ำชีออกเป็น 98 กลุ่มน้ำย่อย.....	39
ภาพที่ 14	เปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO ที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A.....	54
ภาพที่ 15	การแจกแจงความถี่ของดัชนี MSI สำหรับประเทศไทยราย 8 วัน ในระหว่างปี พ.ศ. 2545-2561.....	58
ภาพที่ 16	สภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งเฉลี่ยรายเดือนของพื้นที่กลุ่มน้ำในประเทศไทยจากการแบ่งช่วงของดัชนี MSI ตามตารางที่ 14.....	62

ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.20A68

สารบัญภาพผนวก

หน้า

ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.73	74
ภาพที่ 19 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.72	75
ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.32A	76
ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.5	77
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.23	78
ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.6C	79
ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.21	80
ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.9	81
ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.66A	82
ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.18	83
ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.54	84

ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.70	85
ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.73	86
ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.72	87
ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.32A	88
ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.5	89
ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.23	90
ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.6C	91
ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.21	92
ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.9	93
ภาพที่ 38 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.66A	94
ภาพที่ 39 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.18	95
ภาพที่ 40 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.54	96

ภาพที่ 41 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.70	97
--	----

คำนำ

ปริมาณน้ำท่าเป็นตัวแปรด้านอุทกวิทยาที่มีความสำคัญมากต่อการบริหารจัดการน้ำ เนื่องจากเป็นตัวแปรที่บ่งชี้ศักยภาพของกลุ่มน้ำ ซึ่งถ้ามีมากเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาอุทกภัย และถ้ามีน้อยเกินไปจะทำให้เกิดปัญหาภัยแล้งและการแย่งชิงน้ำระหว่างภาคส่วนการใช้น้ำ ดังนั้นหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบด้านการบริหารจัดการน้ำของประเทศจึงต้องการทราบข้อมูลน้ำท่า ณ ตำแหน่งที่มีความสำคัญ โดยวิธีการที่ดำเนินการคือการติดตั้งสถานีวัดน้ำท่าซึ่งต้องใช้งบประมาณมากในการติดตั้งและดำเนินการจัดเก็บอย่างต่อเนื่อง รวมทั้งไม่สามารถติดตั้งได้ทุกตำแหน่งตามที่ต้องการได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่ามาใช้ในการประเมินน้ำท่า ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ที่ต้องการ นอกเหนือจากการใช้เพื่อการประเมินน้ำท่าสำหรับเหตุการณ์ที่ใกล้จะเกิดขึ้นเพื่อการเตรียมพร้อมรับมือกับผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากน้ำ ทั้งนี้ แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับการพัฒนามีมากมาย ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลอง NAM (Gan et al., 1997), SCS (Sharma and Singh, 1992), FLEXL (Fenicia et al., 2008) และ FLEX-TOPO (Gao et al., 2013) เป็นต้น โดยแบบจำลองเหล่านี้เป็นแบบจำลองแบบลัมพ์ที่สามารถประเมินน้ำท่าได้เฉพาะตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองเท่านั้น ซึ่งเป็นการจำกัดความสามารถของแบบจำลอง ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจาย (Semi-Distributed Rainfall-Runoff Model) ขึ้นมาเพื่อหำารถประเมินน้ำท่าได้ทุกตำแหน่งที่ต้องการทราบข้อมูล โดยตัวอย่างของแบบจำลองประเภทนี้คือ แบบจำลอง URBS (Carroll, 2004; Mapiam and Sriwongsitanon, 2009) และ SWAT (Arnold et al., 2012; Santhi et al., 2001) เป็นต้น โดยแต่ละแบบจำลองก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันไปซึ่งในกรณีที่ต้องการปรับปรุงแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้นจะกระทำได้ยากเนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้ไม่มีการเผยแพร่ Source Code ดังนั้น เพื่อให้สามารถสร้างแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัวที่ดีและเหมาะสมกับพื้นที่ที่ต้องการศึกษา จึงเป็นที่มาของการศึกษานี้ที่ต้องการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัวจากพื้นฐานของแบบจำลอง FLEX-TOPO (Gao et al., 2013; Savenije, 2010) ทั้งนี้เนื่องจากแบบจำลอง FLEX-TOPO ได้รับการพิสูจน์แล้วว่ามีความมีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าได้ถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดของพื้นที่ลุ่มน้ำในหลายประเทศ รวมทั้งลุ่มน้ำในประเทศไทยที่ทำการศึกษาโดย (Sriwongsitanon et al., 2020)

ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สำหรับการประเมินน้ำท่าด้วยกระบวนการแบบกึ่งกระจายตัว โดยใช้พื้นฐานของกระบวนการ

น้ำฝน-น้ำท่า แบบลัมพ์จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และแนวคิดของกระบวนการน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัวจากแบบจำลอง KU-FLEX-SD (Sriwongsitanon et al., 2020) จากนั้นจึงนำแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD มาประยุกต์ใช้กับสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำชี นอกจากนั้นแล้วได้มีการประยุกต์ใช้แบบจำลอง FLEX-TOPO ซึ่งเป็นแบบจำลองแบบลัมพ์มาใช้เพื่อประเมินน้ำท่าในลุ่มน้ำชีเช่นกัน เพื่อนำมาเปรียบเทียบให้เห็นความสามารถของแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่จะพัฒนาขึ้น เพื่อนำไปสู่การเผยแพร่ให้กับหน่วยงานที่มีหน้าที่รับผิดชอบในด้านการบริหารจัดการน้ำของประเทศและผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกฝ่ายเพื่อสร้างประโยชน์ให้กับการบริหารจัดการน้ำของประเทศ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สำหรับการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยกระบวนการแบบกึ่งกระจายตัว โดยใช้ทฤษฎีพื้นฐานจากแบบจำลอง FLEX-TOPO และแบบจำลอง KU-FLEX-SD
2. เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่ารายวันสำหรับสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำชี โดยแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD
3. เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI (Moisture Stress Index) และความชื้นในดิน (S_u) ที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD

ขอบเขตการศึกษา

1. พื้นที่ศึกษาคือพื้นที่ลุ่มน้ำชีซึ่งมีขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 49,131 ตารางกิโลเมตร
2. การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ได้พิจารณาใช้พื้นฐานของกระบวนการน้ำฝน-น้ำท่า แบบลัมพ์จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และกระบวนการน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัวจากแบบจำลอง KU-FLEX-SD
3. ข้อมูลด้านเข้าสำหรับแบบจำลองในส่วนของข้อมูลความลึกฝนรายวันจะเลือกใช้ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริดที่ได้จากผลงานวิจัยของ (Sriwongsitanon et al., 2019a) ซึ่งเป็นข้อมูลความลึกฝนที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแบบรายเดือนด้วยวิธี Double Mass Curve
4. ข้อมูลด้านเข้าสำหรับแบบจำลองในส่วนของข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวัน จะเลือกใช้ข้อมูลการคายระเหยแบบกริดที่ได้จากผลงานวิจัยของ (Sriwongsitanon et al., 2019a) โดยเป็นข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่คำนวณด้วยวิธี Penman Monteith ที่ใช้ข้อมูลอุณหภูมิมิถวิทยาแบบรายวันเป็นข้อมูลด้านเข้า
5. การเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่ารายวันของแต่ละแบบจำลอง นอกจากจะพิจารณาจากความเข้ากันได้ระหว่างปริมาณน้ำท่ารายวันที่ได้จากแต่ละแบบจำลองและจากข้อมูลตรวจวัดแล้ว จะใช้ผลการเปรียบเทียบระหว่างปริมาณความชื้นในดินที่ได้จากแต่ละแบบจำลองกับดัชนี MSI (Moisture Stress Index) ที่ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำชีที่พิจารณา
6. ในการศึกษานี้จะทำการสอบเทียบแบบจำลองในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2544 จนถึงปี พ.ศ. 2558 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่มิข้อมูลความลึกฝน ข้อมูลน้ำท่า ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง และข้อมูลดัชนี MSI ครบถ้วนสมบูรณ์ ทั้งนี้ สถานีวัดน้ำท่าที่นำมาประยุกต์ใช้จะเลือกจากสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำชีที่ไม่ได้รับผลกระทบจากอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่และขนาดกลาง
7. การหาชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสอบเทียบทุกแบบจำลอง จะเลือกใช้จากโปรแกรม MOSCEM ซึ่งเชื่อมต่อกับแบบจำลองที่ดำเนินการบนโปรแกรม MATLAB

การตรวจเอกสาร

1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาสำหรับงานวิจัยนี้คือ พื้นที่ลุ่มน้ำชี โดยมีรายละเอียดที่สำคัญดังต่อไปนี้

1.1 ลักษณะทั่วไปของลุ่มน้ำชี

ลุ่มน้ำชีตั้งอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีพื้นที่ลุ่มน้ำรวมทั้งสิ้น 49,131.92 ตารางกิโลเมตร หรือ 30,707,453 ไร่ มีพื้นที่ส่วนใหญ่อยู่ในเขต 14 จังหวัด ได้แก่ ชัยภูมิ ขอนแก่น หนองบัวลำภู อุดรธานี มหาสารคาม นครราชสีมา เลย เพชรบูรณ์ กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ด ยโสธร อุบลราชธานี ศรีสะเกษ และ มุกดาหาร ลุ่มน้ำชีมีทิศเหนือติดกับลุ่มน้ำโขง ทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำมูล ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำโขงและลุ่มน้ำมูล ทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำป่าสัก ดังแสดงในภาพที่ 1 ลุ่มน้ำชีมีการแบ่งลุ่มย่อยออกเป็นทั้งหมด 20 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในตารางที่ 1

สภาพภูมิประเทศของลุ่มน้ำชีประกอบไปด้วยเทือกเขาสูง ทางทิศตะวันออกและทิศเหนือคือ เทือกเขาภูพาน ทิศตะวันตกคือเทือกเขาดงพญาเย็นซึ่งเป็นต้นกำเนิดของแม่น้ำชีและแม่น้ำสาขาที่สำคัญหลายสาย ส่วนพื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบถึงลูกคลื่นลอนและมีเนินเล็กน้อยทางตอนใต้ของลุ่มน้ำ ลำน้ำสาขาหลัก คือ แม่น้ำชี ลำน้ำสาขาที่สำคัญ คือ น้ำพรม น้ำพอง น้ำเชิญ ลำปาวและน้ำยัง

แม่น้ำชีมีต้นกำเนิดมาจากยอดเขาในแนวเทือกเขาเพชรบูรณ์ ในเขตอำเภอเกษตรสมบูรณ์ จังหวัดชัยภูมิ แม่น้ำชีไหลลงมาทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ผ่านอำเภอจัตุรัสและอำเภอเมืองชัยภูมิ แล้วไหลย้อนขึ้นไปทางทิศตะวันออกเฉียงเหนือผ่านอำเภอกอนสวรรค์ จังหวัดชัยภูมิ อำเภอเมืองจัตวา อำเภอเมืองขอนแก่น และไหลลงมาทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ผ่านอำเภอโกสุมพิสัย อำเภอเมืองมหาสารคาม อำเภอเสลภูมิ อำเภอพนมไพร จังหวัดร้อยเอ็ด อำเภอเมืองยโสธร อำเภอมหาชนะชัย จังหวัดยโสธร และอำเภอเขื่อง จังหวัดอุบลราชธานี จากนั้นไหลลงมาบรรจบกับแม่น้ำมูลที่อำเภอเมือง จังหวัดอุบลราชธานี โดยแม่น้ำชีมีความยาวประมาณ 830 กิโลเมตร

12	ลำน้ำเชิญ	2903.55
13	ลำน้ำพองตอนล่าง	2316.23
14	ห้วยสายบาตร	677.63
15	ลำน้ำชีส่วนที่ 4	5092.51
16	ลำปาวตอนบน	3265.25
17	ลำพันชาด	697.53
18	ลำปาวตอนล่าง	4344.85
19	ลำน้ำยัง	4204.30
20	ลำน้ำชีตอนล่าง	2718.10
กลุ่มน้ำชี		49,131.92

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ

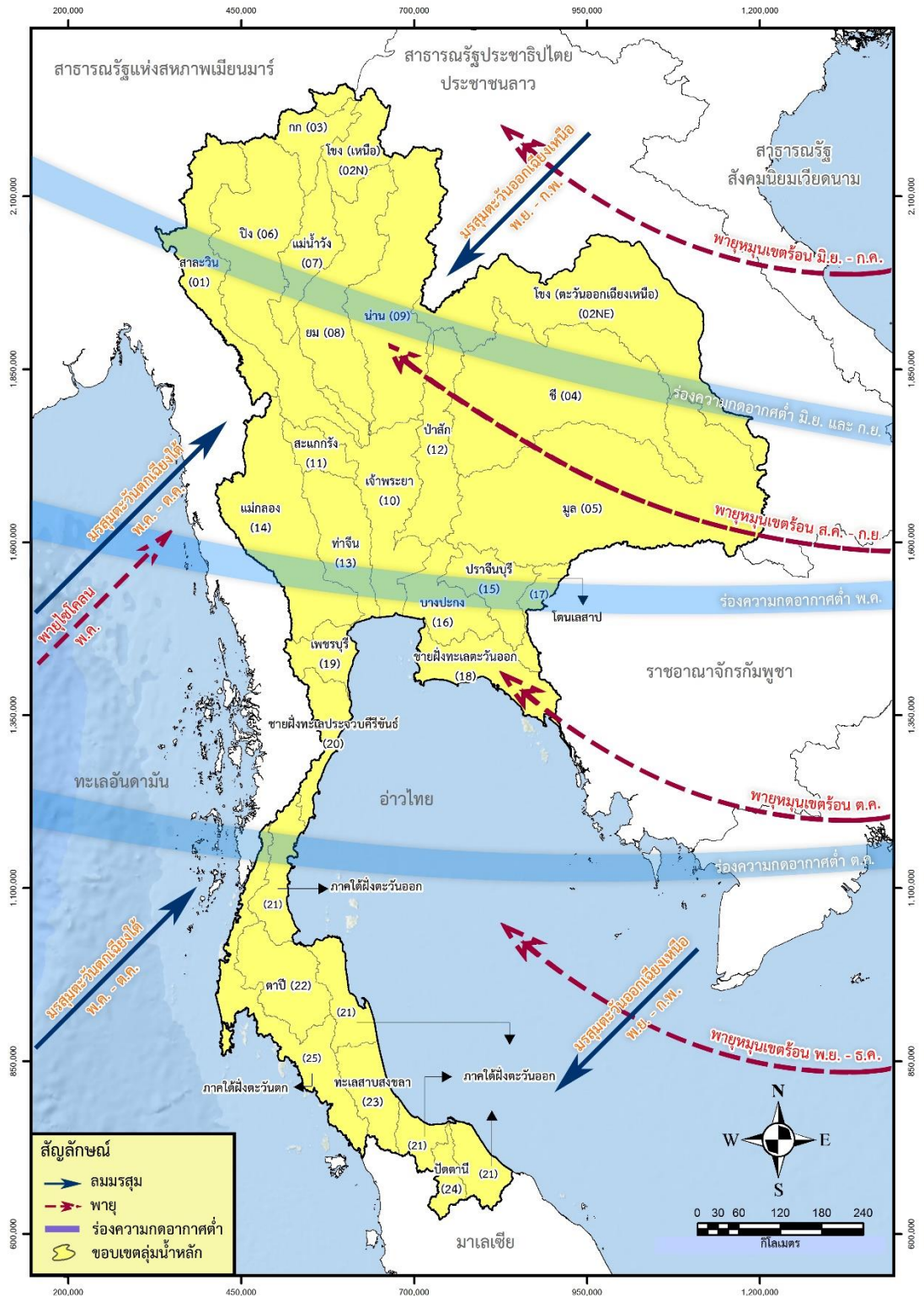
1.2 สภาพภูมิอากาศ

กลุ่มน้ำชีได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นแล้วในแต่ละปีจะได้รับอิทธิพลจากลมดีเปรสชันซึ่งพัดมาจากทะเลจีนใต้ ทำให้มีฝนตกหนักในฤดูฝน โดยอิทธิพลของลมมรสุมทั้งสองทำให้เกิดฤดูกาลทั้งหมด 3 ฤดู คือ ฤดูร้อน ฤดูฝน และฤดูหนาว ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้จะพัดพามวลอากาศชื้นจากมหาสมุทรอินเดียและอ่าวไทยเข้าปกคลุมพื้นที่กลุ่มน้ำชีในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนตุลาคม ซึ่งจะทำให้มีเมฆมากและฝนตกชุก ส่วนลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ จะพัดพามวลอากาศเย็นและแห้งจากประเทศจีนเข้าปกคลุมกลุ่มน้ำชีระหว่างเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ ซึ่งจะทำให้พื้นที่ส่วนใหญ่มีท้องฟ้าโปร่ง อากาศหนาวเย็นและแห้งแล้งทั่วไป นอกจากนั้นแล้ว พื้นที่กลุ่มน้ำชียังได้รับอิทธิพลจากพายุหมุนเขตร้อนและร่องความกดอากาศต่ำที่พัดผ่านเข้ามาตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม ดังในภาพที่ 2 สำหรับสภาพภูมิอากาศในแต่ละฤดูกาลสรุปได้ดังนี้

1) ฤดูร้อน เกิดขึ้นระหว่างกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนเมษายน โดยมีสภาพอากาศร้อนและแห้งแล้ง และบางครั้งอาจมีมวลอากาศเย็นจากประเทศจีนแผ่ปกคลุมลงมาปะทะมวลอากาศร้อนทางตอนบนของประเทศทำให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนอง ลมกระโชกแรงและอาจมีลูกเห็บตกโดยเรียกว่าพายุฤดูร้อน

2) ฤดูฝน เกิดขึ้นระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม โดยเกิดจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้และร่องความกดอากาศต่ำพาดผ่านประเทศไทย ทำให้มีฝนตกชุกโดยทั่วไป ร่องความกดอากาศต่ำนี้จะพาดผ่านตอนกลางของประเทศไทยในเดือนพฤษภาคม แล้วเลื่อนขึ้นไปทางตอนเหนือเรื่อย ๆ จนประมาณปลายเดือนมิถุนายนจะพาดผ่านบริเวณประเทศจีนตอนใต้ทำให้ประเทศไทยรวมถึงพื้นที่ของกลุ่มน้ำชีมีปริมาณฝนลดลงหรือเรียกว่าฝนทิ้งช่วง โดยจะมีระยะเวลาประมาณ 1-2 สัปดาห์ และในเดือนกรกฎาคมจะเลื่อนกลับลงมาพาดผ่านประเทศไทยอีกครั้งทำให้มีฝนชุกต่อเนื่องจนกระทั่งเดือนพฤศจิกายนฝนจะเริ่มลดลง

3) ฤดูหนาว เกิดขึ้นระหว่างกลางเดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ โดยลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือจะพัดปกคลุมกลุ่มน้ำชี ซึ่งเป็นช่วงเปลี่ยนจากฤดูฝนเป็นฤดูหนาว



ภาพที่ 2 ร่องความกดอากาศต่ำ ทิศทางลมมรสุม และทางเดินพายุหมุนเขตร้อนที่พัดผ่านประเทศไทย

ที่มา: โครงการศึกษาความมั่นคงอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำ (กรมทรัพยากรน้ำ, 2559)

1.2 การใช้ที่ดิน

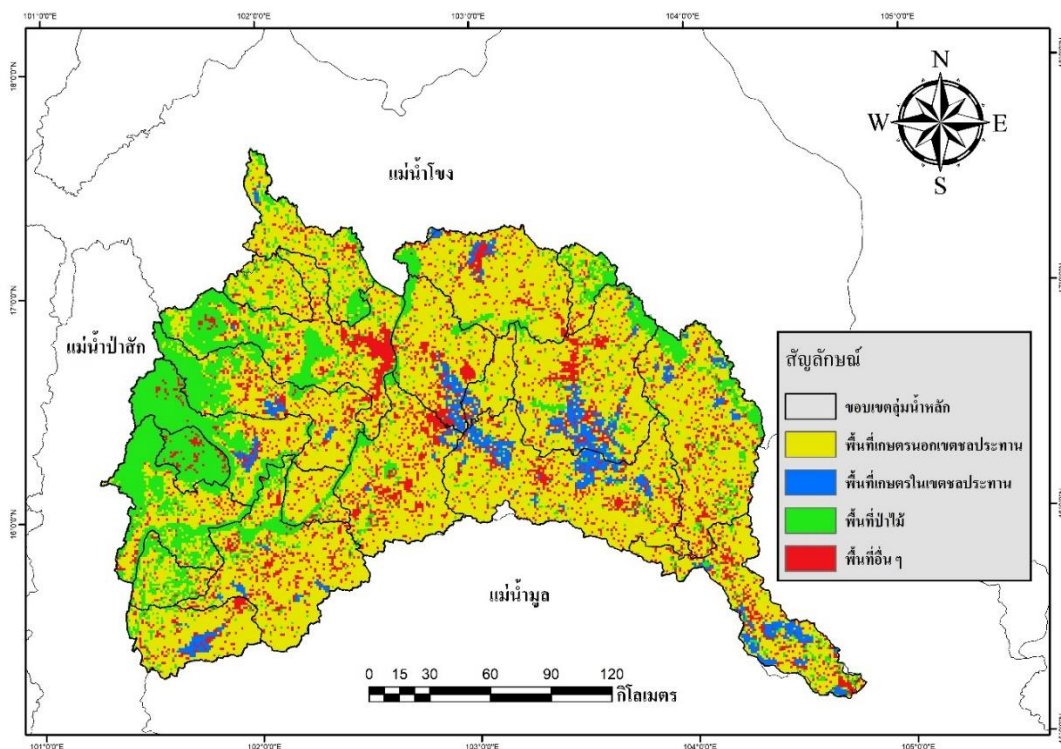
จากข้อมูลที่ใช้ที่ดินระหว่างปี พ.ศ. 2553–2556 ที่ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูล โดยกรมพัฒนาที่ดินสามารถนำมาสรุปการใช้ที่ดินประเภทต่าง ๆ สำหรับลุ่มน้ำซึ่งแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ลุ่มน้ำซึ่งมีพื้นที่ทั้งหมด 49,131.92 ตารางกิโลเมตร มีสภาพการใช้ที่ดินที่สำคัญแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลัก คือ (1) พื้นที่ป่าไม้ 9,792.21 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 19.93 % ของพื้นที่ลุ่มน้ำ (2) พื้นที่เกษตรกรรมในเขตชลประทาน 2,066.89 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 4.21 % ของพื้นที่ลุ่มน้ำ (3) พื้นที่เกษตรกรรมน้ำฝน 30,528.73 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 62.14 % ของพื้นที่ลุ่มน้ำ และ (4) พื้นที่การใช้ที่ดินแบบประเภทอื่น ๆ 6,744.09 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 13.73 % ของพื้นที่ลุ่มน้ำ

ตารางที่ 2 สัดส่วนการใช้ที่ดินของแต่ละลุ่มน้ำสาขาในลุ่มน้ำในปี พ.ศ. 2553–2556

ลำดับที่	ลุ่มน้ำสาขา	พื้นที่ลุ่มน้ำย่อย (ตร.กม.)	สัดส่วนการใช้ที่ดิน							
			ป่าไม้		เกษตรกรรมในเขตชลประทาน		เกษตรกรรมนอกเขตชลประทาน		อื่น ๆ	
			ตร.กม.	%	ตร.กม.	%	ตร.กม.	%	ตร.กม.	%
1	ลำน้ำชีตอนบน	2,550.80	1,417.77	55.6%	0.00	0.0%	963.37	37.8%	169.66	6.7%
2	ลำสะพุง	742.31	619.78	83.5%	0.00	0.0%	32.12	4.3%	90.41	12.2%
3	ลำกระเจวน	893.69	368.13	41.2%	0.00	0.0%	466.38	52.2%	59.18	6.6%
4	ลำคันฉู	1,732.65	140.52	8.1%	116.70	6.7%	1,250.37	72.2%	225.07	13.0%
5	ลำน้ำชีส่วนที่ 2	3,795.36	503.60	13.3%	68.73	1.8%	2,667.30	70.3%	555.74	14.6%
6	ห้วยสามหมอก	764.89	119.96	15.7%	0.00	0.0%	553.48	72.4%	91.45	12.0%
7	ลำน้ำชีส่วนที่ 3	3,276.24	279.53	8.5%	56.85	1.7%	2,299.05	70.2%	640.80	19.6%
8	ลำน้ำพองตอนบน	4,129.75	1,311.86	31.8%	9.47	0.2%	2,099.21	50.8%	709.21	17.2%
9	น้ำพวย	922.35	137.65	14.9%	0.00	0.0%	704.70	76.4%	80.00	8.7%
10	ลำพะเนียง	1,890.42	434.43	23.0%	17.76	0.9%	1,284.35	67.9%	153.89	8.1%

11	น้ำพรหม	2,211.46	1,228.33	55.5%	67.52	3.1%	733.21	33.2%	182.41	8.2%
12	ลำน้ำเชิญ	2,903.55	963.12	33.2%	73.36	2.5%	1,516.85	52.2%	350.22	12.1%
13	ลำน้ำพองตอนล่าง	2,316.23	222.01	9.6%	174.52	7.5%	1,513.68	65.4%	406.02	17.5%
14	ห้วยสายบาตร	677.63	30.64	4.5%	50.67	7.5%	533.85	78.8%	62.46	9.2%
15	ลำน้ำชีส่วนที่ 4	5,092.51	166.81	3.3%	507.58	10.0%	3,669.85	72.1%	748.27	14.7%
16	ลำปาวตอนบน	3,265.25	264.11	8.1%	98.30	3.0%	2,480.03	76.0%	422.81	12.9%
17	ลำพันขาด	697.53	253.33	36.3%	0.00	0.0%	382.93	54.9%	61.27	8.8%
18	ลำปาวตอนล่าง	4,344.85	436.26	10.0%	432.71	10.0%	2,820.30	64.9%	655.58	15.1%
19	ลำน้ำยัง	4,204.30	648.37	15.4%	111.83	2.7%	2,856.40	67.9%	587.70	14.0%
20	ลำน้ำชีตอนล่าง	2,718.10	237.86	8.8%	284.48	10.5%	1,702.10	62.6%	493.66	18.2%
	ลุ่มน้ำชี	49,131.92	9,792.21	19.9%	2,066.89	4.2%	30,528.7	62.1%	6,744.09	13.7%

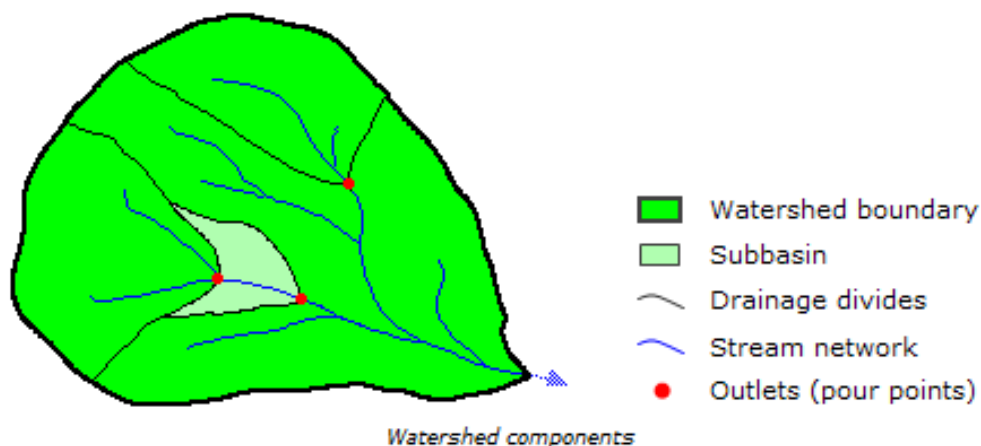
ที่มา : กรมพัฒนาที่ดิน (ปี พ.ศ. 2553-2556)



ภาพที่ 3 การใช้ที่ดินของแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำชีในปี พ.ศ. 2553–2556

2. การแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยการใช้แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข

ลุ่มน้ำ (Watershed) คือพื้นที่รองรับน้ำฝนที่ถูกแบ่งด้วยสันปันน้ำ ทำให้เกิดการไหลของน้ำจากสันปันน้ำหรือพื้นที่สูงไปยังพื้นที่ที่ต่ำกว่าและไหลลงสู่ลำน้ำสายย่อย จากนั้นจึงไหลลงสู่ลำน้ำสายหลักก่อนที่จะไหลไปรวมกันที่จุดออก (Outlet) ซึ่งเป็นจุดที่มีระดับต่ำที่สุดของลุ่มน้ำ โดยลุ่มน้ำสามารถทำการแบ่งแยกเป็นลุ่มน้ำย่อย (Sub-Basin) โดยลักษณะทั่วไปของลุ่มน้ำแสดงดังในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 องค์ประกอบของกลุ่มน้ำ

ที่มา: ArcGIS 10 Help

การแบ่งลุ่มน้ำออกเป็นลุ่มน้ำย่อยสามารถทำได้โดยการพิจารณาขอบเขตของลุ่มน้ำย่อยจากแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) โดยในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ผลิตภัณฑ์ SRTM-30 จากหน่วยงาน The U.S. Geological Survey's (USGS) ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่นงานวิจัยของ Mukul et al. (2015) เพื่อใช้วิเคราะห์ทิศทางการไหลของน้ำ (Flow Direction) ภายในลุ่มน้ำ จากนั้นจึงกำหนดจุดออก (Pourpoint, Outlet) ของแต่ละลุ่มน้ำย่อยสำหรับตัวอย่างการแบ่งลุ่มน้ำย่อยโดยใช้เครื่องมือ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS 10 แสดงดังในภาพที่ 5 ทั้งนี้ ในการศึกษานี้ได้ใช้กระบวนการดังกล่าวเพื่อการแบ่งลุ่มน้ำซึ่งออกเป็นลุ่มน้ำย่อยเพื่อการประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO ในการประเมินน้ำท่าต่อไป

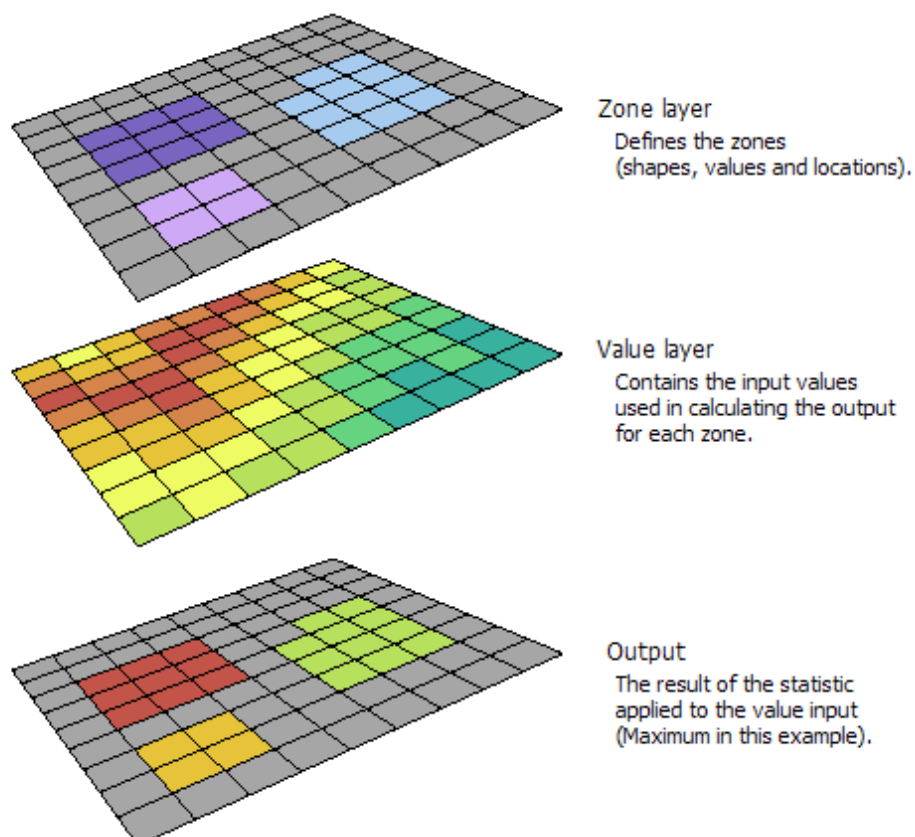


ภาพที่ ๕ กลุ่มน้ำย่อยที่ถูกแบ่งโดยเครื่องมือ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS 10
ที่มา: ArcGIS 10 Help

3. กระบวนการเฉลี่ยเชิงพื้นที่

เนื่องจากข้อมูลแผนที่ใช้ในการศึกษานี้เป็นข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบกริด (Raster) แต่ในการศึกษานี้เป็นการศึกษาในระดับกลุ่มน้ำย่อยจึงได้ทำการคำนวณค่าเฉลี่ยปริมาณฝนสำหรับทุกกริดภายในกลุ่มน้ำย่อยที่ศึกษา โดยได้นำเครื่องมือ Zonal Statistic as Table ที่มีอยู่ในโปรแกรม ArcGIS 10 มาใช้ในการเฉลี่ยเชิงพื้นที่ (Areal Average) โดยใช้คำสั่ง Zonal Statistic as Table ซึ่งเป็นเครื่องมือสำหรับหาค่าทางสถิติเชิงพื้นที่ของข้อมูลแบบกริด (Raster) ในขอบเขตที่กำหนด (Zone Layer) สำหรับค่าทางสถิติที่สามารถคำนวณได้ด้วยเครื่องมือ Zonal Statistic as Table ประกอบด้วย (1) ค่าสูงสุด (Maximum) (2) ค่าต่ำสุด (Minimum) (3) ค่าเฉลี่ย (Mean) (4) มัชฐาน (Median)

(5) พิสัย (Range) (6) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และ (7) ผลรวม (Sum) เพื่อใช้
นำไปคำนวณหาปริมาณฝนเฉลี่ยเชิงพื้นที่



ภาพที่ 6 ตัวอย่างชั้นข้อมูลด้านเข้าและด้านออกสำหรับเครื่องมือ Zonal Statistic as Table
ที่มา: ArcGIS 10 Help

จากภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่า สำหรับข้อมูลด้านเข้ามี 2 ชั้น ซึ่งประกอบไปด้วย (1) Zone Layer คือ ขอบเขตที่ต้องการประเมินค่าทางสถิติ และ (2) Value Layer คือ ข้อมูลแบบกริดที่ต้องการนำไปประเมินค่าทางสถิติ โดยในที่นี้ได้ทำการยกตัวอย่างการประเมินค่าสูงสุด (Maximum) ของแต่ละพื้นที่ ทั้งหมด 3 พื้นที่ และให้ผลลัพธ์ (Output) ดังแสดงในภาพที่ 6

4. ทฤษฎีของแบบจำลอง FLEX-TOPO

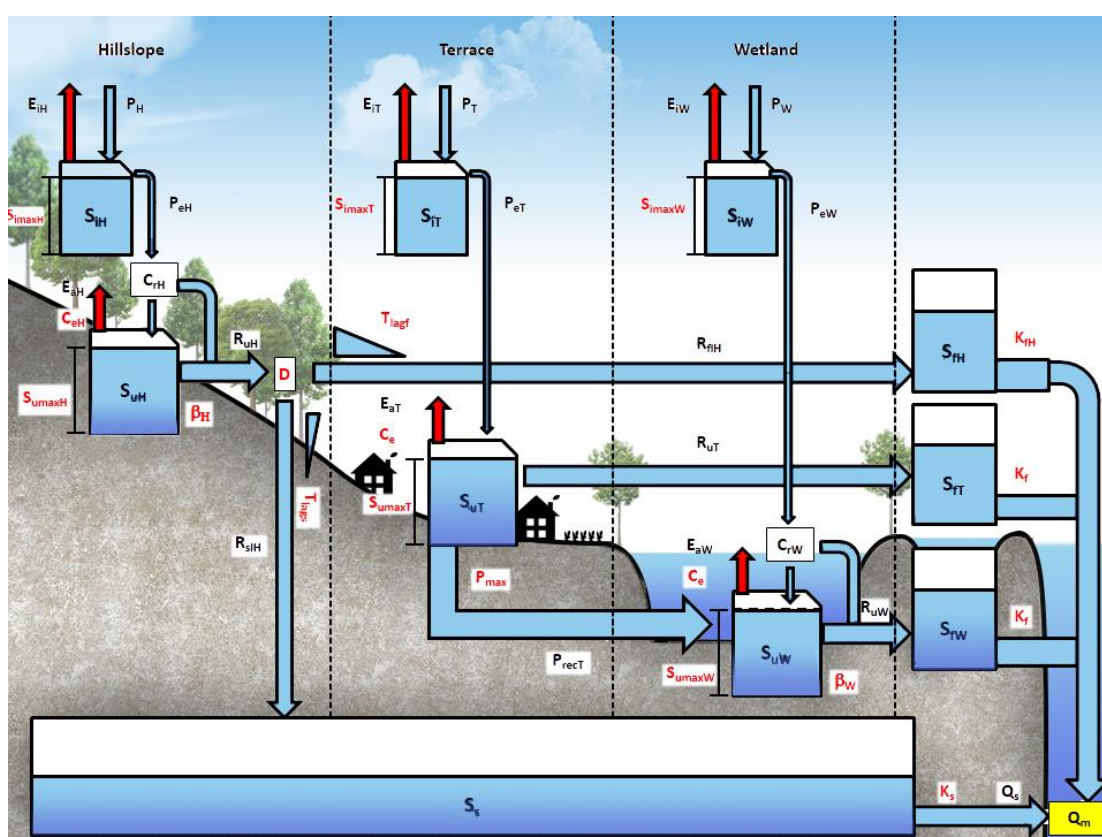
FLEX-TOPO เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อการประเมินน้ำท่าจากข้อมูลน้ำฝน โดยแบบจำลอง FLEX-TOPO นั้นได้รับการพัฒนามาจากแบบจำลอง FLEXL โดยได้เพิ่มเติมจากแนวคิดที่ว่า กระบวนการทางอุทกวิทยาที่เกิดขึ้นในแต่ละสภาพภูมิประเทศ (Landscape) จะมีขั้นตอนการเกิดน้ำท่าที่แตกต่างกัน ดังนั้น แบบจำลอง FLEX-TOPO จึงมีการแบ่งลักษณะภูมิประเทศออกเป็นทั้งหมด 3 ประเภท คือ (1) พื้นที่ลาดเขา (Hillslope) (2) พื้นที่ลาดเอียง (Terrace) และ (3) พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland) ซึ่งลักษณะภูมิประเทศแต่ละประเภทนั้นได้ทำการแบ่งแยกโดยใช้ลักษณะพื้นที่ประกอบไปด้วย (1) ค่าความแตกต่างของระดับความสูงของพื้นที่กับระดับความสูงของตำแหน่งที่เป็นลำน้ำที่อยู่ใกล้ที่สุด (Highest above nearest drainage, HAND) (Rennó et al., 2008) และ (2) ความลาดชันของพื้นที่ (Slope)

การวิเคราะห์ค่าความแตกต่างของระดับความสูงของพื้นที่กับระดับความสูงของตำแหน่งที่เป็นลำน้ำที่อยู่ใกล้ที่สุด (HAND) เริ่มต้นจากการใช้แบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข (DEM) มาวิเคราะห์หาทิศทางการไหลจากเซลล์ (Cell) ต่าง ๆ ในแบบจำลองความสูงเชิงตัวเลข โดยใช้คำสั่ง Flow direction ในโปรแกรม ARCGIS 10 ซึ่งมีหลักการคือ เซลล์ที่พิจารณาจะแสดงทิศทางการไหลไปยังเซลล์ใกล้เคียงที่ต่ำที่สุด จากนั้นจึงทำการรวบรวมทิศทางการไหลสะสม โดยใช้คำสั่ง Flow Accumulation ซึ่งค่าการไหลสะสมนี้จะเป็นตัวแทนในการบอกปริมาณพื้นที่ของน้ำที่ไหลมารวมตัวกัน โดยแต่ละเซลล์ถือว่ามีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 1 เท่ากันทุกเซลล์ จากนั้นจะกำหนดตำแหน่งเซลล์ที่เปรียบเสมือนเป็นทางน้ำธรรมชาติ โดยคิดจากขนาดพื้นที่ที่สามารถทำให้เกิดทางน้ำตามธรรมชาติได้ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้ขนาดพื้นที่เท่ากับ 0.16 ตารางกิโลเมตรเป็นตัวกำหนด จากนั้นจึงคำนวณหาค่าการไหลสะสมเพื่อใช้กำหนดเป็นทางน้ำธรรมชาติดังสมการที่ (1)

$$D_a = \frac{160,000}{C_{size}^2} \quad (1)$$

โดยที่ D_a = ค่าการไหลสะสมที่ใช้กำหนดลำน้ำธรรมชาติ
 C_{size} = ขนาดความละเอียดของแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลข (DEM)

ลักษณะภูมิประเทศทั้งหมด 3 ประเภท สามารถจำแนกแต่ละประเภทได้ดังนี้ (1) พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland) คือ พื้นที่ที่มีค่า HAND น้อยกว่า 5 เมตร (2) พื้นที่ลาดเอียง (Terrace) คือพื้นที่ที่มีค่า HAND มากกว่าหรือเท่ากับ 5 เมตร และมีความลาดชันน้อยกว่า 0.1 และ (3) พื้นที่ลาดชัน (Hillslope) คือพื้นที่ที่มีค่า HAND มากกว่า 5 เมตร และมีความลาดชันมากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 และจากที่กล่าวมาข้างต้นลักษณะภูมิประเทศที่แตกต่างกันย่อมส่งผลให้แต่ละพื้นที่ที่มีกระบวนการเกิดน้ำท่าที่แตกต่างกัน โดยในภาพที่ 7 นั้นได้แสดงกระบวนการเกิดน้ำท่าของแต่ละลักษณะภูมิประเทศ

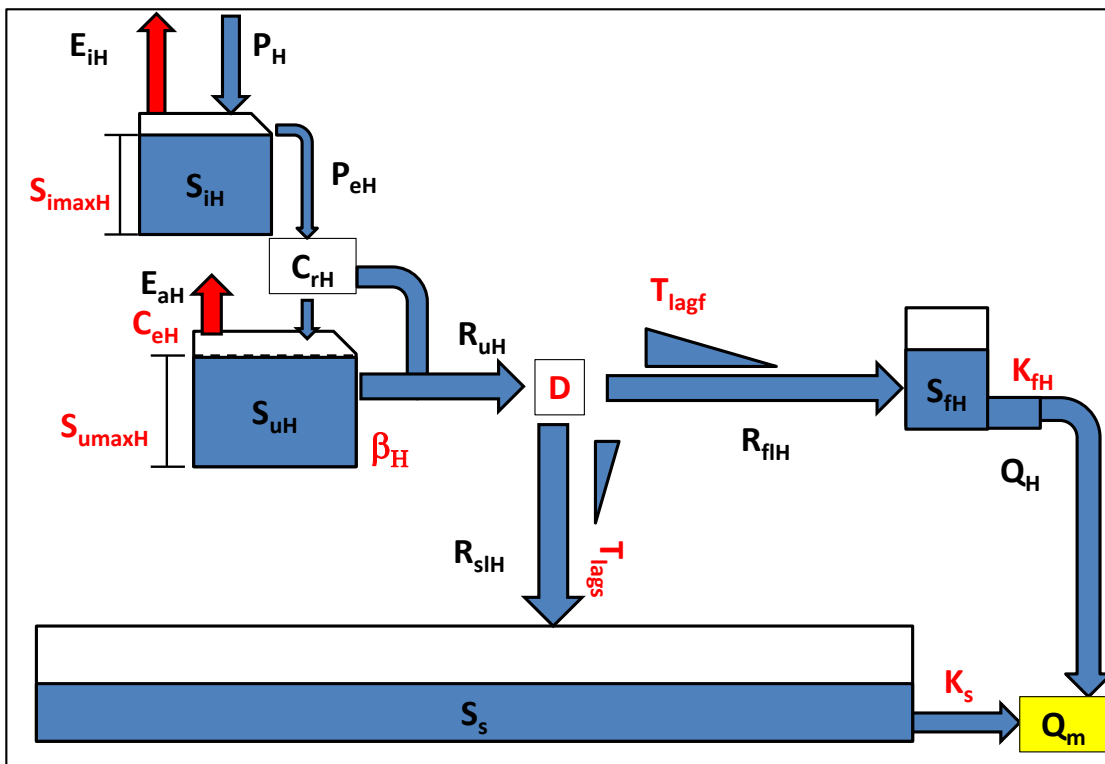


ภาพที่ 7 โครงสร้างของแบบจำลอง FLEX-TOPO

1. พื้นที่ลาดเขา (Hillslope)

พื้นที่ลาดเขา (Hillslope) ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ที่ปกคลุมไปด้วยป่าไม้ อยู่ห่างไกลจากลำน้ำ และมีความลาดชันสูง โดยแบบจำลอง FLEX-TOPO มีแนวคิดสำหรับการแบ่งแหล่งเก็บกักน้ำ ออกเป็นทั้งหมด 5 แหล่ง ได้แก่ (1) การเก็บกักชั้นหิมะ (ประเทศไทยไม่นำมาพิจารณา) (2) การเก็บกักชั้นการคั่งของพืชพรรณ (S_{iH}) (3) การเก็บกักชั้นรากพืช (S_{uH}) (4) การเก็บกักชั้น

น้ำท่าที่มีการตอบสนองเร็ว (S_{iH}) และ (5) การเก็บกักชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองช้า (S_s) ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 โครงสร้างของแบบจำลอง FLEX-TOPO

1.1 แหล่งเก็บกักในชั้นการดักของพืชพรรณของพื้นที่ลาดเขา

จากพื้นที่ลาดเขาส่วนมากจะถูกปกคลุมด้วยป่าไม้ ดังนั้นเมื่อฝนตกลงมา ต้นไม้ที่ปกคลุมนี้ จะทำหน้าที่ดักน้ำฝนไม่ให้น้ำฝนตกลงสู่พื้นดิน ทำให้ปริมาณน้ำฝนบางส่วนไม่สามารถเดินทางลงสู่พื้นดินได้ โดยสมการที่ (2) ได้แสดงถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นของแหล่งเก็บกักในชั้นการดักของพืชพรรณ และปริมาตรเก็บกักสูงสุด S_{imaxH} มีค่าระหว่าง 1 ถึง 5 มิลลิเมตรเพื่อให้สอดคล้องตามภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ป่าไม้

$$E_{i(H)(t)} = \min(S_{i(H)(t-1)} + P_{(t)}, E_{p(t)}, S_{imax(H)}) \tag{2}$$

โดยที่ $E_{i(H,T,W)(t)}$ = ปริมาณการระเหยจากการเก็บกักในชั้นการดักของพืชพรรณ (มิลลิเมตร)

$P_{(t)}$ = ปริมาณฝนที่ตก ณ วันที่พิจารณา (มิลลิเมตร)

$$E_{p(t)} = \text{ศักยภาพการระเหย (Potential evaporation) (มิลลิเมตร)}$$

$$S_{imaxH} = \text{ปริมาณการระเหยจากการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception สูงสุด}$$

จากนั้นเมื่อมีปริมาณน้ำฝนมากกว่าปริมาณการสูญเสียในกระบวนการของชั้นการคักของพืชพรรณ ปริมาณน้ำฝนในส่วนที่เกินจะไหลลงสู่แหล่งเก็บกักในชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเขา ($S_{uH}(t)$) ปริมาณน้ำที่ไหลลงไปเรียกว่าปริมาณฝนส่วนเกินในพื้นที่ลาดเขา ($P_{eH}(t)$) คำนวณจากสมการที่ (3)

$$P_{e(H)(t)} = \begin{cases} P(t) + S_{i(H)(t-1)} - S_{imax(H)}, & P(t) + S_{i(H)(t-1)} > S_{imaxH} \\ 0, & P(t) + S_{i(H)(t-1)} \leq S_{imaxH} \end{cases} \quad (3)$$

1.2 แหล่งเก็บกักในชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเขา

เมื่อมีปริมาณฝนส่วนเกินเกิดขึ้นหลังจากกระบวนการในชั้นการคักของพืชพรรณ ปริมาณฝนส่วนเกินนี้จะถูกแบ่งแยกออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ส่วนที่จะไหลลงในส่วนของชั้นรากพืช ($S_{uH(t)}$) และ (2) ส่วนที่จะเกิดเป็นน้ำท่า ($R_{rH(t)}$) โดยมีค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า (Runoff coefficient of hillslope, $C_{rH(t)}$) เป็นตัวแบ่ง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า นั้น จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามความชันในชั้นรากพืช ($S_{uH(t)}$) ที่มีอยู่ ณ ขณะนั้น และพารามิเตอร์ βH ที่บ่งบอกความไม่เป็นเส้นตรงของอัตราส่วนระหว่างความชันในชั้นรากพืชต่อความชันในชั้นรากพืชสูงสุดแสดงดังสมการที่ (4) สำหรับปริมาณน้ำที่ไหลลงสู่ชั้นรากพืชและปริมาณที่เกิดเป็นน้ำท่า นั้น จะสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (5) และ (6) ตามลำดับ จากนั้น ปริมาณน้ำท่าจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ (1) ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Flow into fast respond, $R_{rH(t)}$) และ (2) ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Groundwater recharge, $R_{sH(t)}$) โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Splitter coefficient, D) เป็นตัวแบ่ง โดยมีค่าระหว่าง 0.1 ถึง 1 ดังนั้น ค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างเชื่องช้าคือ $1 - D$ และเมื่อสิ้นสุดวันในส่วนของชั้นรากพืชจะมีการคายระเหยขึ้นดังแสดงในสมการที่ (7) และ สมการที่ (8)

$$C_{rH(t)} = 1 - \left(1 - \frac{S_{uH(t)}}{S_{imaxH}}\right)^{\beta H} \quad (4)$$

$$S_{uH(t)} = S_{uH(t-1)} + P_{eH(t)}(1 - C_{rH(t)}) \quad (5)$$

$$R_{uH(t)} = \begin{cases} (P_{eH(t)} * C_{rH(t)}) + (S_{uH(t)} - S_{umaxH}), & S_{uH(t)} > S_{umaxH} \\ P_{eH(t)} * C_{rH(t)}, & S_{uH(t)} \leq S_{umaxH} \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{aH(t)} = \min \left(S_{uH(t)}, (E_{pH(t)} - E_{iH(t)}), \frac{S_{uH(t)}}{C_{eH} S_{umaxH}} (E_{pH(t)} - E_{iH(t)}) \right) \quad (7)$$

$$S_{uH(t+1)} = S_{uH(t)} - E_{aH(t)} \quad (8)$$

สำหรับปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($R_{fH(t)}$) และ ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ($R_{sH(t)}$) ได้มีการคำนวณในส่วนของกรหน่วงเวลา โดยใช้ฟังก์ชันหน่วงเวลา (Lag function) ที่ให้ค่าถ่วงน้ำหนักเพิ่มขึ้นตามเวลาแบบเส้นตรง (Linearly increase weight) ดังแสดงในสมการที่ (9) เพื่อให้มีความสอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของน้ำ และในส่วนของปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($R_{fH(t)}$) และปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างช้า ($R_{sH(t)}$) สามารถคำนวณได้จากสมการที่(10)

$$C(i) = \frac{i}{\sum_{u=1}^{T_{lag(f/s)}} u} \quad (9)$$

โดยที่ $C_{(i)}$ = ค่าถ่วงน้ำหนักของ R_f ในวันที่ $(t - i + 1)$ ในเมื่อ i มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง T_{lag}
 $T_{lag(f/s)}$ = จำนวนวันที่น้ำท่ามีการหน่วงตามเวลา (วัน)

$$R_{(f/s)tH(t)} = \sum_{i=1}^{T_{lag(f/s)}} C(i) \cdot R_{(fH/sH)}(t - i + 1) \quad (10)$$

เมื่อ $R_{(f/s)tH(t)}$ = ปริมาณน้ำท่าที่เกิดจากการตอบสนองอย่างรวดเร็ว/ช้า ที่เป็นผลจากการหน่วงเวลา ณ วันที่พิจารณา ($t = 1, 2, 3, \dots$)

1.3 แหล่งเก็บกักชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ลาดเขา

แหล่งเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ลาดเขา ($S_{fH(t)}$) เป็นแหล่งเก็บกักสุดท้ายที่จะปล่อยน้ำท่าออกสู่ลำน้ำ ณ จุดที่พิจารณา โดยการวิเคราะห์ประมาณการไหลเหนือผิวดินที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของการตอบสนองแบบเส้นตรง (Linear respond reservoir) ที่ขึ้นกับค่าคงที่ K_{fH} และ K_{ffH} โดยปริมาณเก็บกักของชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($R_{fH(t)}$) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (11) สำหรับในกรณีที่มีปริมาณน้ำในแหล่งเก็บกักของชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วมากกว่าปริมาณเก็บกักสูงสุดของชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($S_{fH(max)}$) จะทำให้เกิดการไหลบ่าบนผิวดินดังสมการที่ (12) ในส่วนของการไหลระหว่างผิวดินและชั้นใต้ดินคำนวณได้ดังสมการที่ (13) และสำหรับปริมาณน้ำในแหล่งเก็บกักของชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วเมื่อสิ้นสุดวันจะคำนวณได้ดังสมการที่ (14)

$$S_{fH(t)} = S_{fH(t-1)} + R_{fH}(t) \quad (11)$$

$$Q_{ffH}(t) = \frac{S_{fH(t)} - S_{fH(max)}}{K_{ffH}} * \Delta t \quad (12)$$

$$Q_{fH}(t) = \frac{S_{fH(t)}}{K_{fH}} * \Delta t \quad (13)$$

$$S_{fH(t+1)} = S_{fH(t)} - Q_{fH}(t) \quad (14)$$

โดยที่	K_{ffH}	=	Residence time ของการไหลเหนือผิวดิน
	K_{fH}	=	Residence time ของการไหลระหว่างผิวดินและชั้นใต้ดิน
	$S_{fH(t)}$	=	ปริมาณน้ำในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (มิลลิเมตร)
	$Q_{ffH}(t)$	=	อัตราการไหลเหนือผิวดิน (มิลลิเมตร)
	$Q_{fH}(t)$	=	อัตราการไหลระหว่างผิวดินและชั้นใต้ดิน (มิลลิเมตร)

1.4 แหล่งเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Slow reacting reservoir)

แหล่งเก็บกักการเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ($S_{s(t)}$) เป็นแหล่งเก็บกักที่เปรียบเสมือนแหล่งเก็บน้ำใต้ดิน ซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการเก็บน้ำไว้ใช้สำหรับฤดูแล้ง โดยที่การประเมินอัตราการไหลใต้ดินที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของการตอบสนองแบบเส้นตรง

(Linear respond reservoir) ที่ขึ้นกับค่าคงที่ K_s โดยที่น้ำที่ไหลเข้าถึงคือปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชิงซ้ำ ($R_{slH(t)}$) จากชั้นรากพืช แสดงดังสมการที่ (15) จากนั้นจึงเกิดการไหลของน้ำใต้ดินดังสมการที่ (16) และเมื่อสิ้นสุดวันจะเหลือปริมาณเก็บกักเป็นไปตามสมการที่ (17)

$$S_s(t) = S_{s(t-1)} + RslH(t) \quad (15)$$

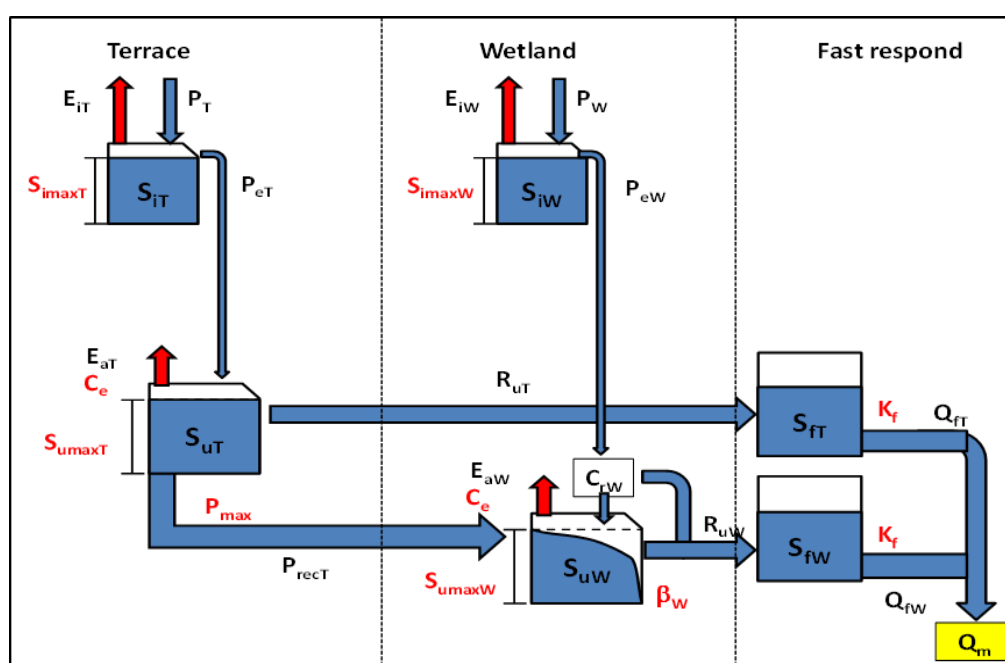
$$Q_{s(t)} = \frac{S_s(t)}{K_s} * \Delta t \quad (16)$$

$$S_{s(t+1)} = S_{s(t)} - Q_{s(t)} \quad (17)$$

โดยที่ $Q_{s(t)}$ = อัตราการไหลของน้ำใต้ดิน (มิลลิเมตร)
 $S_{s(t)}$ = ปริมาณน้ำในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างเชิงซ้ำ (มิลลิเมตร)
 K_s = Residence time ของการไหลของน้ำใต้ดิน

2. พื้นที่ลาดเอียง (Terrace)

พื้นที่ลาดเอียง (Terrace) เป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันในพื้นที่ต่ำ โดยส่วนใหญ่จะเป็นพื้นที่เกษตรกรรม, ทุ่งหญ้า และเมือง แต่เนื่องจากพื้นที่มีลักษณะราบนั้นจึงมีกระบวนการคำนวณน้ำท่าแตกต่างจากพื้นที่อื่นแสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 โครงสร้างของแบบจำลอง FLEX-Topo ในพื้นที่ลาดเอียงและพื้นที่ชุ่มน้ำ

2.1 การเก็บกักชั้นการดักของพืชพรรณของพื้นที่ลาดเอียง

สำหรับการเก็บกักชั้นการดักของพืชพรรณของพื้นที่ลาดเอียงนั้น รูปแบบสมการมีแนวคิดเกี่ยวกับการเก็บกักชั้นการดักของพืชพรรณของพื้นที่ลาดเขา เพียงแค่เปลี่ยนตัวห้อยท้ายจาก H เป็น T

2.2 แหล่งเก็บกักในชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเอียง

แหล่งเก็บกักในชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเอียง ($S_{uT(t)}$) มีสมมุติฐานว่าพื้นที่ลาดเอียงส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ราบลุ่มทำให้การเกิดน้ำไหลบ่าบนผิวดินเกิดได้ยาก ดังนั้นน้ำฝนส่วนเกิน ($P_{eT(t)}$) ทั้งหมดที่ไหลมาจากแหล่งเก็บกักในชั้น จะไหลลงสู่แหล่งเก็บกักที่ชั้นรากพืชทั้งหมดแสดงดังสมการที่ (18) เมื่อปริมาณน้ำเก็บกักมีมากกว่าปริมาณเก็บกักสูงสุดในชั้นรากพืช ($S_{u\max T}$) จึงจะเกิดปริมาณน้ำท่า (Generated flow, $R_{uT(t)}$) แสดงดังสมการที่ (19) โดยมีความแตกต่างจากกระบวนการคิดของพื้นที่ลาดเขาคือ ไม่มีการคิดค่าของสัมประสิทธิ์น้ำท่าและการแบ่งน้ำท่าในส่วนของ การตอบสนองอย่างเชิงซ้ำ สำหรับพื้นที่ลาดเอียงนั้น เป็นพื้นที่ที่มีความลาดชันต่ำ ทำให้น้ำที่อยู่ในพื้นที่ไม่สามารถเดินทางได้อย่างสะดวก ทำให้มีการซึมของน้ำลงสู่ชั้นใต้ดิน (Percolation, $P_{ercT(t)}$) โดยคำนวณได้จากสมการที่ (20) และพารามิเตอร์ P_{\max} เป็นพารามิเตอร์จำกัดการซึมสูงสุดของน้ำ และสมการที่ (21) แสดงการคำนวณความชื้นในชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเอียง ($S_{uT(t)}$) ก่อนเกิดการระเหย และในส่วนของ การคายระเหยจะมีการคำนวณเช่นเดียวกับพื้นที่ลาดเขา

$$S_{uT(t)} = S_{uT(t-1)} + P_{eT(t)} \quad (18)$$

$$R_{uT(t)} = \begin{cases} S_{uT(t)} - S_{u\max T}, & S_{uT(t)} > S_{u\max T} \\ 0, & S_{uT(t)} < S_{u\max T} \end{cases} \quad (19)$$

$$P_{ercT(t)} = \min(S_{uT(t)}, P_{\max}) \quad (20)$$

โดยที่ P_{\max} = พารามิเตอร์การซึมสูงสุดของแบบจำลองที่มีค่าแนะนำระหว่าง 0.5 ถึง 3

$$S_{uT(t)} = S_{uT(t)} - P_{ercT(t)} \quad (21)$$

2.3 แหล่งเก็บกักชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ลาดเอียง

สำหรับการเก็บกักชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ลาดเอียงนั้น รูปแบบสมการมีแนวคิดเดียวกับการเก็บกักชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ลาดเขาเพียงแค่เปลี่ยนตัวห้อยท้ายจาก H เป็น T และแนะนำควรมีค่า K_r อยู่ระหว่าง 1 ถึง 9 เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่

3. พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland)

พื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland) เป็นพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขังในช่วงฤดูฝนและมีขอบเขตบริเวณที่ตั้งอยู่ติดกับลำน้ำง่ายต่อการเกิดน้ำท่า มีกระบวนการคำนวณน้ำท่าแตกต่างจากพื้นที่อื่นแสดงดังภาพที่ 9

3.1 การเก็บกักชั้นการดักของพืชพรรณของพื้นที่ชุ่มน้ำ

สำหรับการเก็บกักชั้นการดักของพืชพรรณของพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น มีรูปแบบสมการเช่นเดียวกับการเก็บกักชั้นการดักของพืชพรรณของพื้นที่ลาดเขาเพียงแค่เปลี่ยนตัวห้อยท้ายจาก H เป็น W

3.2 แหล่งเก็บกักในชั้นรากพืชของพื้นที่ชุ่มน้ำ

สำหรับแหล่งเก็บกักชั้นรากพืชของพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น มีรูปแบบสมการในการคำนวณเช่นเดียวกับการเก็บกักในชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเขาแต่เนื่องจากพื้นที่นี้เป็นพื้นที่ที่ต่ำที่สุดของกลุ่มน้ำดังนั้น น้ำที่อยู่ในพื้นที่ลาดเอียง (Terrace) จะไหลมาสมทบในชั้นรากพืชของพื้นที่ชุ่มน้ำ ($S_{uw(t)}$) ก่อนเกิดน้ำท่า โดยน้ำที่ซึมมาจากชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเอียง ($C_{R(t)}$) แสดงดังสมการที่ (22)

$$C_{R(t)} = P_{\text{percT}(t)} * \frac{\text{PropT}}{\text{PropW}} \quad (22)$$

โดยที่ $C_{R(t)}$ = น้ำที่ซึมมาจากชั้นรากพืชของพื้นที่ลาดเอียง (มิลลิเมตร)
 PropT = อัตราส่วนพื้นที่ Terrace

PropW = อัตราส่วนพื้นที่ Wetland

3.3 แหล่งเก็บกักชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ชุ่มน้ำ

สำหรับการเก็บกักชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ชุ่มน้ำนั้น รูปแบบสมการมีแนวคิดเกี่ยวกับการเก็บกักชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วของพื้นที่ลาดเขา เพียงแค่เปลี่ยนตัวห้อยท้ายจาก H เป็น W และแนะนำควรมีค่า K_r อยู่ระหว่าง 1 ถึง 20 เพื่อให้สอดคล้องกับสภาพพื้นที่

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น ปริมาณน้ำท่า ($Q_{m(t)}$) ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO จะคำนวณจากปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ลาดเขา ($Q_{FH(t)}$) น้ำท่าในพื้นที่ลาดเอียง ($Q_{FT(t)}$) น้ำท่าในพื้นที่ชุ่มน้ำ ($Q_{FW(t)}$) และน้ำท่าจากน้ำใต้ดิน ($Q_{S(t)}$) ซึ่งปริมาณการไหลทั้งหมดจะไหลมารวมตัวกันที่จุดออกของลำน้ำดังสมการที่ (23)

$$Q_{m(t)} = Q_{S(t)} + (Q_{FH(t)} * PropH) + (Q_{FT(t)} * PropT) + (Q_{FW(t)} * PropW) \quad (23)$$

โดยที่ PropH = อัตราส่วนพื้นที่ Hillslope

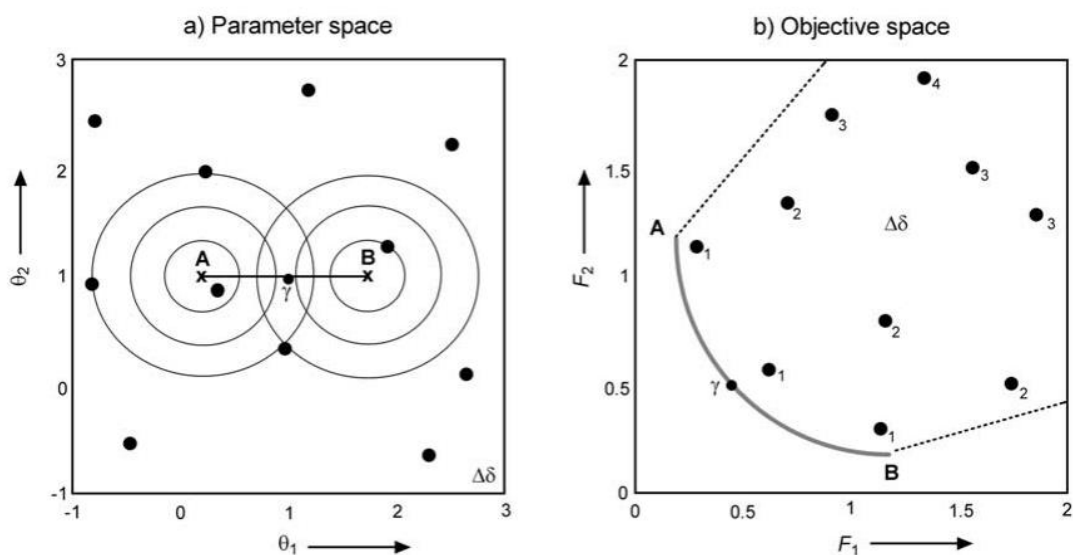
PropT = อัตราส่วนพื้นที่ Terrace

PropW = อัตราส่วนพื้นที่ Wetland

5. MOSCEM (Multi Objective Shuffle Complex Evolution Matropolis)

โปรแกรม MOSCEM ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย (Vrugt et al., 2003) เพื่อใช้ในการสอบเทียบแบบจำลองทางอุทกวิทยาแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Function) โดยได้เริ่มจากการสุ่มประชากรชุดแรกจากวิธี Latin Hyper Cube เพื่อสร้างประชากรชุดเริ่มต้นที่มีการกระจายตัวอย่างทั่วทั้งมิติ และเริ่มทำการคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับประชากรทุกตัวที่สุ่มมา จากนั้นจะจัดลำดับของประชากรแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยกระบวนการ Pareto Ranking แล้วจึงนำไปผ่านกระบวนการสุ่มซ้ำโดยใช้อัลกอริทึม Markov Chain Monte Carlo Sample เพื่อให้ได้ประชากรชุดถัดไป สำหรับผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหาโดย MOSCEM จะเป็นชุดคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ที่เรียกว่า Pareto Front ซึ่งก็คือ ชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์อยู่ในลำดับที่ 1 ดังแสดงในภาพที่ 10 กล่าวคือ Pareto Front เป็นชุดพารามิเตอร์ที่มีค่าของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ไม่แพ้

พารามิเตอร์ชุดอื่น ๆ ซึ่งในกรณีการแก้ปัญหาแบบ Minimize จะไม่มีพารามิเตอร์ชุดไหนที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่น้อยกว่าค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของ Pareto Front



ภาพที่ 10 หลักการของกระบวนการ Pareto Ranking สำหรับปัญหาที่มีสองพารามิเตอร์ (θ_1, θ_2) (a) และมีสองวัตถุประสงค์ (F_1, F_2) (b)

6. ดัชนี MSI (Moisture Stress Index)

ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เป็นดัชนีภัยแล้งที่สามารถบ่งบอกถึงสภาพการขาดแคลนน้ำในดิน ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดย (Welikhe et al.) โดยคำนวณมาจากค่าการสะท้อนกลับในช่วงคลื่น Near Infrared (NIR) ที่มีศูนย์กลางความยาวคลื่นอยู่ที่ 0.86 ไมโครเมตร ($\rho_{0.86}$) และค่าการสะท้อนกลับในช่วงคลื่น Shortwave Infrared (SWIR) ที่มีศูนย์กลางความยาวคลื่นอยู่ที่ 1.64 ไมโครเมตร ($\rho_{1.64}$) ดังในสมการที่ (24)

$$MSI = \frac{\rho_{1.64}}{\rho_{0.86}} \quad (24)$$

ดัชนี MSI ได้ถูกพัฒนาโดย (Hunt Jr and Rock, 1989) เพื่อใช้เปรียบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากการสำรวจภาคสนามในระดับที่ความลึกจากผิวดิน 5-20 เซนติเมตร และได้พบว่าในระดับความลึกที่ 20 เซนติเมตร ดัชนี MSI มีความสัมพันธ์กับค่าความชื้นในดินได้ดีกว่าระดับความลึกอื่นๆ โดยดัชนี MSI มีค่าระหว่าง 0 ถึง 3 ซึ่งค่าที่มากจะบ่งบอกถึงสภาพการขาดแคลนน้ำที่มากขึ้น

7. Kling-Gupta Efficiency (KGE)

ดัชนีประสิทธิภาพ Kling-Gupta Efficiency (KGE) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้สำหรับเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์สำหรับการสอบเทียบแบบจำลองในงานวิจัยนี้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (25) โดยที่ค่า KGE มีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ KGE มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงที่ดีมากและปริมาณทั้งสองสำหรับทุกค่ามีค่าใกล้เคียงกันมาก และในกรณีที่ KGE มีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ทั้งในเชิงปฏิภาคและเชิงปริมาณ

$$KGE = 1 - ED \quad (25)$$

$$ED = \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (26)$$

$$\alpha = S_Y/S_X \quad (27)$$

$$\beta = \bar{Y}/\bar{X} \quad (28)$$

โดยที่	\bar{X}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
	\bar{Y}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
	S_X	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
	S_Y	=	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง
	r	=	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ในการศึกษานี้ได้นำ KGE มาประยุกต์ใช้สำหรับการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์โดยแบ่งออกเป็น 3 ฟังก์ชันดังนี้

1) KGE คือการประเมิน KGE ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด โดยพิจารณาจากข้อมูลอัตราการไหล

2) KGE_{LF} คือการประเมิน KGE ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด โดยพิจารณาจากลอการิทึมของอัตราการไหล เพื่อให้ความสำคัญกับอัตราการไหลในช่วงหน้าแล้งหรือช่วงเวลาที่อัตราการไหลต่ำ (Low Flow)

3) KGE_{FDC} คือการประเมิน KGE ระหว่างผลลัพธ์จากแบบจำลองและข้อมูลตรวจวัด โดยพิจารณาจากโค้งอัตราการไหล-ช่วงเวลา (Flow Duration Curve) เพื่อให้ความสำคัญกับสมดุลน้ำ (Water Balance) โดยที่ปริมาตรที่ทุกช่วงเวลาต้องมีปริมาณที่ไม่ต่างกันมาก

8. Nash-Sutcliffe's Efficiency (NSE)

ค่าตัวแปรทางสถิติที่นำมาใช้ในการประเมินประสิทธิภาพ ระหว่างผลการคำนวณจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า และข้อมูลตรวจวัด คือ Nash-Sutcliffe's Efficiency (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (29) โดยที่ค่า NSE มีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงที่ดีมากและปริมาณทั้งสองสำหรับทุกค่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก และในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ทั้งในเชิงปฏิภาคและเชิงปริมาณ

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_i^N (Y_i - X_i)^2}{\sum_i^N (Y_i - \bar{Y})^2} \right] \quad (29)$$

โดยที่	X_i	=	ผลการคำนวณจากแบบจำลอง
	Y_i	=	ข้อมูลการตรวจวัด
	\bar{Y}	=	ค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด
	N	=	จำนวนข้อมูล
	i	=	แสดงถึงลำดับของอนุกรมข้อมูล

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลซึ่งประกอบด้วยโปรแกรม ArcGIS 10, MATLAB 2017 และ Python 2.7
2. ผลลัพธ์ฝนรายวันแบบกริด SENSWAT-GGR ที่พัฒนาขึ้นโดยศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (SENSWAT) และข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวันในลุ่มน้ำชี ซึ่งทำการตรวจวัดโดยกรมชลประทาน

3. ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model, DEM) ของลุ่มน้ำชี โดยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์จากหน่วยงาน Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

4. ห้องดำเนินงานวิจัยและสาธิตรูปโลก

วิธีการ

ในการดำเนินงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยกระบวนการน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว” มีขั้นตอนในการดำเนินงานสรุปได้ดังนี้

1. รวบรวมข้อมูลเพื่อประกอบการศึกษาดังต่อไปนี้
 - 1.1 ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด และปริมาณน้ำท่ารายวันของสถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำชี ระหว่างปี พ.ศ. 2544 จนถึงปี พ.ศ. 2558
 - 1.2 ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) ที่ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำชี

- 1.3 ข้อมูลดัชนี Moisture Stress Index (MSI) ที่ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำชี
2. แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่เลือกใช้เพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง
3. คำนวณปริมาณความลึกฝนเชิงพื้นที่ในแต่ละลุ่มน้ำย่อยแบบรายวันในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2544 จนถึงปี พ.ศ. 2558
4. พัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ให้มีคุณสมบัติเป็นแบบกึ่งกระจายตัว โดยใช้แนวคิดพื้นฐานมาจากแบบจำลอง FLEX-TOPO
5. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM
6. วิเคราะห์ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เพื่อการตรวจสอบสภาพความแห้งแล้งของประเทศไทย
7. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI ความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา

จากขั้นตอนดำเนินงานดังกล่าว สามารถอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานและรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูล

1.1 ข้อมูลน้ำท่า

ในการศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลน้ำท่าจากสถานีตรวจวัดที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำชี โดยพบว่ามีจำนวนสถานีวัดน้ำท่าของกรมชลประทานทั้งสิ้น 68 สถานี อย่างไรก็ตาม ในการศึกษานี้ได้พิจารณาเลือกสถานีที่มีข้อมูลในระหว่าง ปี พ.ศ. 2544 ถึง ปี พ.ศ. 2558 (15 ปี) เพื่อให้สอดคล้องกับข้อมูลจากตัว

รับรู้ MODIS ที่นำมาใช้คำนวณดัชนี MSI (Moisture Stress Index) ที่นำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ดังอธิบายรายละเอียดในหัวข้อที่ (5) และ (6) จากการตรวจสอบพบว่ามีจำนวนสถานีทั้งสิ้น 13 สถานี โดยตำแหน่งที่ตั้ง ช่วงปีสถิติข้อมูล และขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้แสดงดังในตารางที่ 3 และสถิติข้อมูลน้ำท่ารายเดือนและรายปีเฉลี่ยในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 4 สำหรับตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังในภาพที่ 11

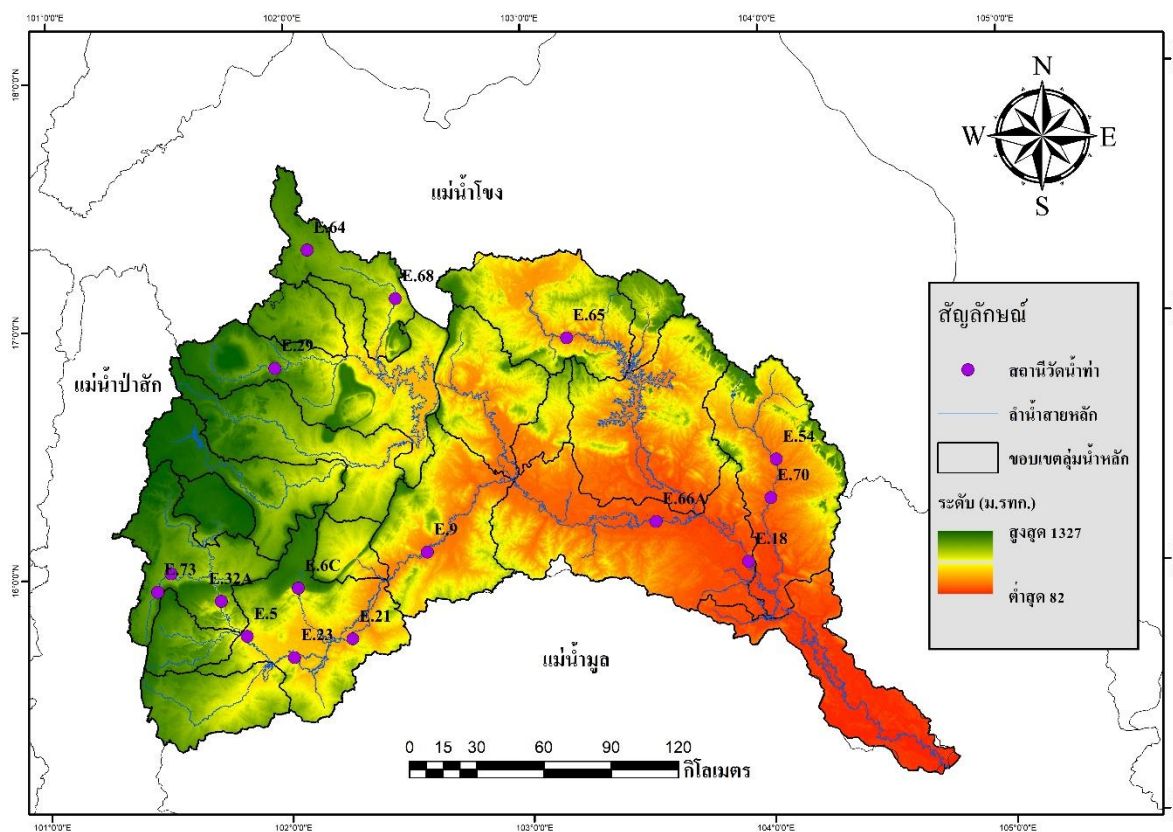
ตารางที่ 3 ตำแหน่งที่ตั้ง ช่วงปีสถิติข้อมูลและขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ศึกษา

รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ตำแหน่งที่ตั้ง				ช่วงปีสถิติข้อมูล (พ.ศ.)		พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร. กม.)
		อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด	เริ่มต้น	สิ้นสุด	
E.5	บ้านโนนเปลือย	อ.บ้านเขว้า	จ.ชัยภูมิ	15.77	101.81	2501	ปัจจุบัน	4,207
E.6C	บ้านคาคโดน	อ.เมือง	จ.ชัยภูมิ	15.96	102.03	2516	ปัจจุบัน	378
E.9	บ้านโจด	อ.มัญจาคีรี	จ.ขอนแก่น	16.10	102.57	2510	ปัจจุบัน	10,878
E.18	บ้านท่าสะแบง	กิ่งอ.ทุ่งเขาหลวง	จ.ร้อยเอ็ด	16.03	103.91	2517	ปัจจุบัน	41,187
E.20A	บ้านฟ้าหยาด	อ.มหาชนะชัย	จ.ยโสธร	15.52	104.25	2517	ปัจจุบัน	47,800
E.21	บ้านแก่งโก	อ.เมือง	จ.ชัยภูมิ	15.75	102.25	2511	ปัจจุบัน	8,777
E.23	บ้านค่าย	อ.เมือง	จ.ชัยภูมิ	15.68	102.01	2511	ปัจจุบัน	6,282
E.32A	บ้านหนองอ้อ	อ.บ้านเขว้า	จ.ชัยภูมิ	15.91	101.71	2510	ปัจจุบัน	2,906
E.54	บ้านแก่งยาว	อ.ภูผินารายณ์	จ.กาฬสินธุ์	16.44	104.03	2512	ปัจจุบัน	1,548
E.66A	บ้านม่วงลาด	อ.จังหาร	จ.ร้อยเอ็ด	16.20	103.53	2526	ปัจจุบัน	31,879
E.70	บ้านกุดกว้าง	อ.โพนทอง	จ.ร้อยเอ็ด	16.29	104.00	2527	ปัจจุบัน	2,647
E.72	บ้านเจียง	อ.ภักดีชุมพล	จ.ชัยภูมิ	16.02	101.50	2531	ปัจจุบัน	323
E.73	บ้านวังตะกุน	อ.ภักดีชุมพล	จ.ชัยภูมิ	15.95	101.45	2531	ปัจจุบัน	251

ตารางที่ 4 สถิติข้อมูลน้ำท่ารายเดือนและรายปีเฉลี่ยในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา

หน่วย: ล้าน ลบ.ม.

รหัสสถานี	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ฤดูฝน	ฤดูแล้ง	รายปี
E.73	2.0	5.0	7.6	6.4	13.8	25.8	16.4	6.0	3.8	3.1	2.2	1.8	75.0	23.9	93.9
E.72	1.3	2.9	4.0	5.2	10.7	23.7	12.9	4.8	2.4	2.0	1.5	1.3	59.4	16.3	72.8
E.32A	9.4	24.6	37.1	42.6	122.6	356.5	203.1	58.4	14.1	8.8	6.3	5.7	786.6	127.2	889.2
E.5	4.8	31.6	49.1	49.4	131.0	418.1	286.4	77.5	16.2	9.8	5.2	3.5	965.6	148.5	1082.5
E.23	5.7	21.3	40.2	32.8	98.4	373.5	400.6	108.5	15.8	7.3	3.7	4.6	966.9	166.8	1112.5
E.6C	2.1	2.4	3.0	2.5	8.6	34.0	28.8	8.6	2.7	1.8	1.7	1.9	79.4	21.1	98.1
E.21	4.6	26.1	45.7	34.1	104.0	430.5	677.1	203.5	25.5	15.9	4.5	1.9	1317.6	282.0	1573.4
E.9	3.4	21.6	39.7	23.3	90.4	361.4	729.8	311.6	33.2	4.4	1.7	2.1	1266.1	378.0	1622.5
E.66A	111.8	168.8	235.9	212.1	523.2	1058.5	1430.5	985.7	225.2	91.9	67.1	79.1	3629.1	1729.7	5189.9
E.18	160.4	225.0	323.1	395.5	947.2	1647.8	1745.6	1145.3	319.9	148.6	116.6	117.1	5284.2	2232.8	7292.0
E.54	1.6	9.8	41.5	84.9	202.6	207.4	70.0	11.2	3.1	2.0	2.3	1.9	616.1	31.9	638.2
E.70	1.6	11.7	56.1	141.7	364.2	401.3	137.2	21.0	4.4	3.4	1.6	0.7	1112.2	44.5	1144.9
E.20A	179.3	261.2	381.6	552.1	1432.5	2411.7	2318.8	1415.0	458.0	152.6	113.5	122.9	7357.9	2702.6	9799.3



ภาพที่ 11 ตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำท่าในกลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา

1.2 ข้อมูลฝนเชิงพื้นที่แบบกริด (Gridded Gauged Rainfall)

ในการศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลความลึกฝนแบบกริด (Gridded Gauged Rainfall) จากการศึกษาของ Sriwongsitanon et al. (2019b) ในระหว่างปี พ.ศ. 2544 จนถึงปี พ.ศ. 2558 ที่สร้างมาจากข้อมูลสถานีตรวจวัดน้ำฝนทั่วประเทศไทยจำนวน 1,774 สถานี ซึ่งเป็นสถานีวัดน้ำฝนของกรมชลประทาน จำนวน 1,150 สถานี กรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 582 สถานี และหน่วยงานอื่นๆ จำนวน 47 สถานี โดยข้อมูลความลึกฝนของสถานีวัดน้ำฝนเหล่านี้ได้รับการตรวจสอบความถูกต้องแบบรายเดือนด้วยวิธี Double Mass Curve รวมทั้งการตัดข้อมูลที่มีความผิดปกติออกไป จากนั้นจึงนำข้อมูลความลึกฝนที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องแล้วมาสร้างเป็นข้อมูลฝนกริดที่มีขนาดจุดภาพเท่ากับ 1*1 ตารางกิโลเมตร สำหรับในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลฝนกริดดังกล่าวที่ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำชีมาใช้ในการศึกษา โดยข้อมูลฝนกริดรายปีเฉลี่ยและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 161 สถานี ที่ตั้งอยู่ในลุ่มน้ำชีแสดงดังในภาพที่ 12 สำหรับข้อมูลข้อมูลความลึกฝนรายเดือนและรายปีเฉลี่ยในระหว่างปี พ.ศ. 2544-2558 สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำชีที่ใช้ใน

การศึกษาแสดงดังในตารางที่ 5 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความลึกฝนรายปีเฉลี่ยของกลุ่มน้ำ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,315.5 มิลลิเมตร โดยมีค่าสูงสุดในกลุ่มน้ำสาขาลำน้ำยังซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,578.3 มิลลิเมตรต่อปี และต่ำสุดในกลุ่มน้ำสาขาลำคันฉูซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,094.4 มิลลิเมตรต่อปี

เนื่องจากการศึกษานี้ได้ใช้ข้อมูลฝนรายวันแบบกริดเป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าต่าง ๆ ที่เลือกพิจารณาจำนวน 13 สถานี ดังนั้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ความลึกฝนรายเดือนและรายปีเฉลี่ย ในช่วงเวลาปี พ.ศ. 2544 - 2558 ที่ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 ลุ่มน้ำ ดังใน ตารางที่ 6 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าความลึกฝนรายปีเฉลี่ยมีค่าสูงสุดสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำ ของสถานีวัดน้ำท่า E.54 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,567.6 มิลลิเมตร และต่ำสุดสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำของ สถานีวัดน้ำท่า E.6C ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,102.1 มิลลิเมตร

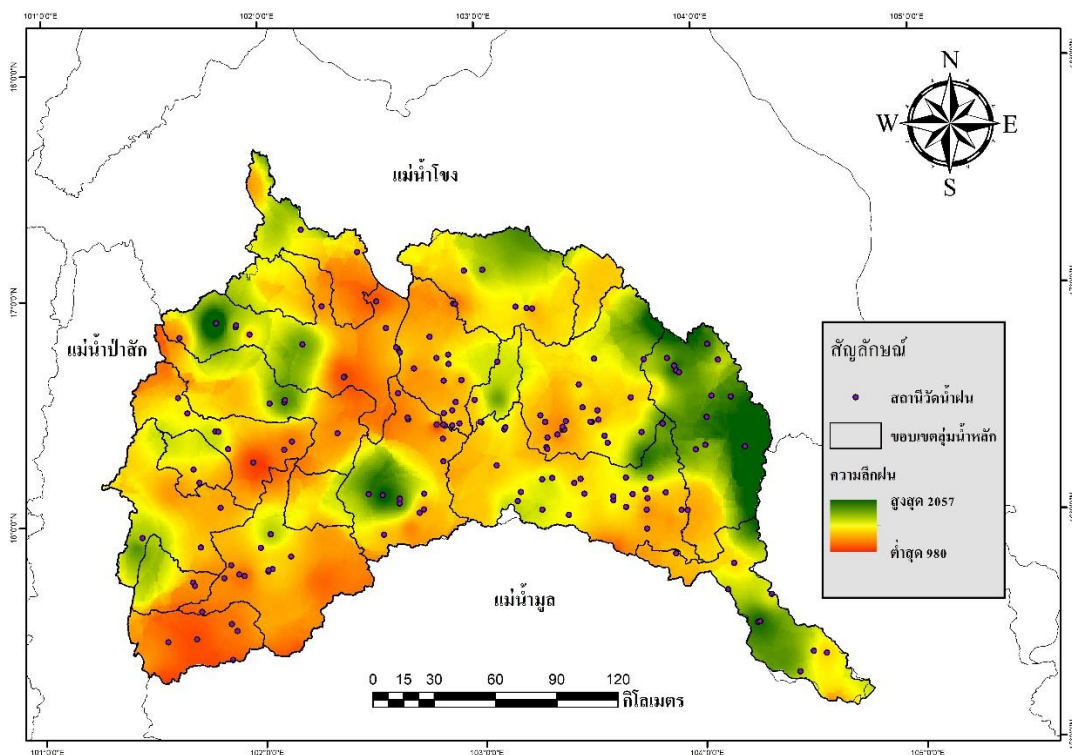
ตารางที่ 5 ความลึกฝนรายเดือนและรายปีเฉลี่ยระหว่างปี พ.ศ. 2544-2558 สำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อย ของลุ่มน้ำชี

ลุ่มน้ำสาขา	หน่วย: มม.												รายปี
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	
ลำน้ำชีตอนบน	17.0	12.1	39.2	108.2	162.3	129.8	137.5	237.3	294.9	136.3	23.3	5.1	1302.8
ลำสะพุง	13.3	14.7	50.8	83.6	168.6	92.8	139.6	233.7	329.9	169.7	17.9	7.0	1321.4
ลำกระเจาน	17.6	12.5	35.1	118.6	171.8	123.3	137.3	235.5	279.4	159.4	18.8	5.9	1315.0
ลำคันฉู	16.7	5.4	44.0	102.7	138.2	103.3	102.3	196.7	188.9	176.4	17.5	2.3	1094.4
ลำน้ำชีส่วนที่ 2	18.5	8.7	31.6	100.3	162.1	105.8	116.6	221.0	264.5	151.2	13.8	2.9	1196.9
ห้วยสามหมอก	19.2	4.4	29.7	77.7	169.6	90.2	148.6	253.7	344.7	155.0	11.8	2.5	1306.9
ลำน้ำชีส่วนที่ 3	20.0	4.1	18.6	76.0	161.3	89.4	164.8	287.2	362.8	131.7	16.5	1.0	1333.6
ลำน้ำพองตอนบน	14.2	13.6	36.0	96.0	169.6	117.3	145.4	253.5	320.8	129.9	18.6	3.4	1318.3
น้ำพวย	12.1	9.1	37.4	84.6	208.5	123.6	162.1	231.0	330.8	114.5	16.8	5.8	1336.3
ลำพะเนียง	6.8	3.7	17.7	51.7	191.8	125.6	172.6	294.8	338.9	80.4	7.6	0.6	1292.2
น้ำพรม	11.7	7.3	43.6	77.3	148.2	85.7	133.6	216.5	300.1	176.2	16.1	3.7	1220.0
ลำน้ำเชิญ	13.3	7.2	35.8	88.9	155.2	103.6	125.7	250.0	325.8	159.1	17.1	6.5	1288.3
ลำน้ำพองตอนล่าง	17.6	3.5	16.5	82.6	153.3	127.9	176.9	271.4	286.5	93.8	12.3	0.7	1242.9

ห้วยสายบาตร	11.5	6.0	13.5	79.3	159.6	145.3	180.2	340.3	361.5	89.7	10.4	0.4	1397.7
ลำน้ำชีส่วนที่ 4	17.2	8.8	15.7	56.8	165.3	122.1	185.8	277.1	349.0	104.2	10.7	1.2	1314.0
ลำปาวตอนบน	12.2	7.2	17.6	55.2	178.5	197.9	212.2	319.8	267.2	79.4	15.5	5.7	1368.5
ลำพันชาด	10.1	7.8	12.9	47.0	156.6	184.9	234.5	310.4	268.9	50.9	15.0	0.5	1299.6
ลำปาวตอนล่าง	11.3	11.0	12.6	49.4	160.2	165.7	216.3	332.5	304.6	81.2	6.8	1.0	1352.8
ลำน้ำยัง	10.8	4.1	12.0	39.2	171.3	162.5	301.7	426.5	346.3	93.5	9.4	1.0	1578.3
ลำน้ำชีตอนล่าง	8.1	3.9	18.2	59.7	166.1	127.8	233.5	325.6	355.9	112.0	18.7	1.2	1430.7
เฉลี่ย (ลุ่มน้ำชี)	14.0	7.8	26.9	76.7	165.9	126.2	171.4	275.7	311.1	122.2	14.7	2.9	1315.5

ตารางที่ 6 ความลึกฝนรายเดือนและรายปีเฉลี่ยระหว่างปี พ.ศ. 2544-2558 สำหรับแต่ละสถานีวัด
น้ำท่าในลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับ	สถานี วัดน้ำท่า	หน่วย: มิลลิเมตร											ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	รายปี	
		เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.				มี.ค.
1	E.73	3.1	18.9	50.8	103.6	179.3	160.4	154.6	222.0	283.2	133.8	18.0	3.5	1133.2	197.9	1331.2
2	E.72	4.2	18.0	42.7	93.5	163.8	166.5	148.4	204.3	264.7	113.2	18.1	4.7	1060.9	181.0	1241.9
3	E.32A	3.2	17.5	44.4	96.9	157.5	142.1	125.8	195.8	266.1	123.7	22.3	5.1	1011.1	189.3	1200.4
4	E.5	3.3	17.6	43.9	96.3	160.0	140.0	125.3	194.3	260.6	125.0	21.5	5.2	1005.2	187.7	1192.9
5	E.23	3.2	15.8	43.2	90.6	151.1	130.4	116.4	183.8	244.1	125.2	20.2	5.0	951.0	178.0	1129.0
6	E.6C	4.4	10.8	40.2	80.7	115.0	96.7	113.3	206.1	277.7	136.6	15.9	4.6	945.5	156.7	1102.1
7	E.21	3.7	16.0	44.1	90.4	147.0	124.0	114.0	188.7	249.0	125.6	18.6	4.9	948.3	177.8	1126.0
8	E.9	4.2	15.6	43.2	86.1	145.6	117.1	114.7	193.7	256.2	126.7	17.9	4.4	953.9	171.3	1125.3
9	E.66A	5.0	15.6	35.4	78.6	146.0	126.1	135.1	225.2	280.7	122.4	16.7	3.4	1035.5	154.6	1190.1
10	E.18	5.1	14.7	32.7	71.9	149.5	144.3	152.3	249.7	278.0	114.6	15.4	3.0	1088.4	142.8	1231.2
11	E.54	5.9	14.6	25.6	50.7	198.8	231.9	282.1	405.4	267.8	75.9	7.8	1.3	1461.8	105.8	1567.6
12	E.70	4.7	14.5	22.5	44.1	187.3	215.8	274.3	404.0	287.1	82.1	9.4	0.9	1450.5	96.1	1546.7
13	E.20A	5.0	14.1	31.5	68.3	152.7	150.8	164.7	264.8	277.1	111.9	15.1	2.7	1122.0	136.7	1258.6



ภาพที่ 12 ข้อมูลฝนกริตรายปีเฉลี่ยและตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำฝนจำนวน 161 สถานีในลุ่มน้ำชี

1.3 ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM)

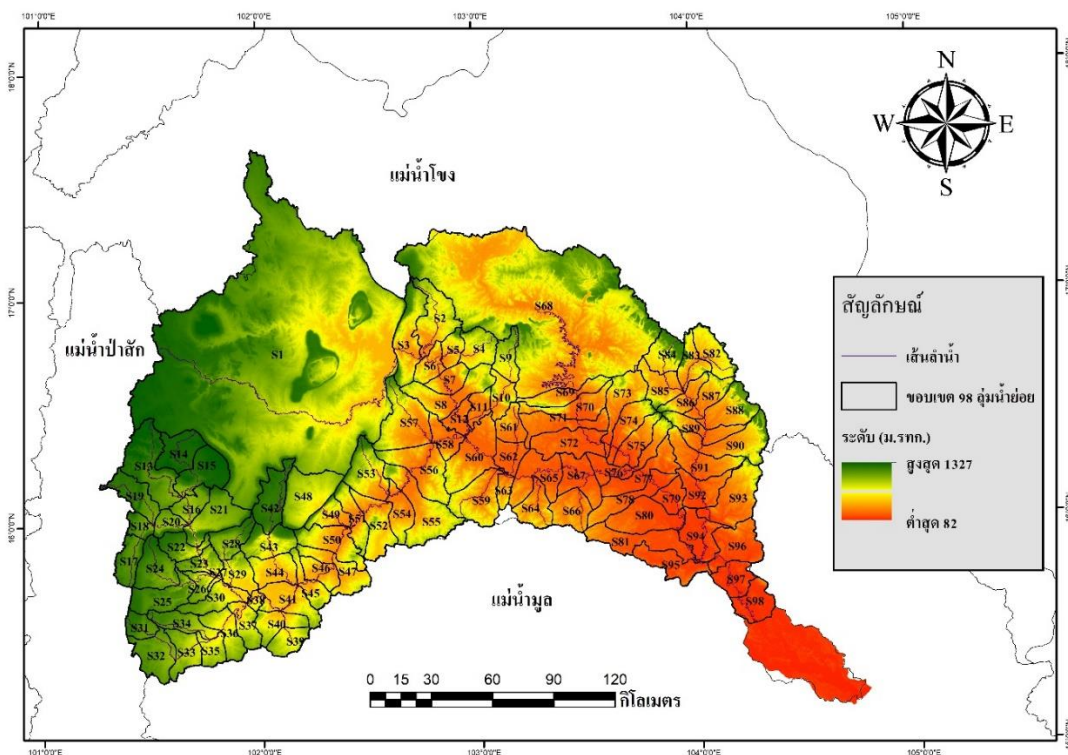
ในการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้ผลิตภัณฑ์ SRTM-30 จากหน่วยงาน The U.S. Geological Survey (USGS) ทั้งนี้ ผลิตภัณฑ์ SRTM-30 มีขนาดความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) เท่ากับ 30 เมตร สำหรับในการศึกษานี้ได้ทำการ Download ผลิตภัณฑ์ SRTM-30 จากเว็บไซต์ https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-1-arc?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำชี เพื่อใช้ประกอบการประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD สำหรับการประเมินกราฟน้ำท่าของลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณาในช่วงเวลาระหว่าง พ.ศ. 2544-2558

2. แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและการวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะทางกายภาพของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำชี

2.1 แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยและความยาวลำน้ำสายหลักของลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำชี

ในการศึกษานี้ได้นำแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD มาประยุกต์ใช้เพื่อประเมินกราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.20 ซึ่งเป็นสถานีวัดน้ำท่าท้ายน้ำสุดในลุ่มน้ำชี โดยมีพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 47,800 ตารางกิโลเมตร อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สามารถแสดงผลการประเมินน้ำท่าที่ท้ายน้ำของทุกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยออกเป็น 98 ลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในภาพที่ 13 รวมทั้งได้แสดงขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำของลุ่มน้ำย่อยเหล่านี้ในตารางที่ 7 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ขนาดพื้นที่ ลุ่มน้ำของ S.1 และ S.68 มีขนาดใหญ่กว่าลุ่มน้ำอื่น ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 12,057.52 และ 6,019.57 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้เนื่องจากจุดออกของลุ่มน้ำย่อยทั้งสองเป็นที่ตั้งของเขื่อนอุบลรัตน์และเขื่อนลำปาว ตามลำดับ ในขณะที่ลุ่มน้ำย่อยที่เหลือมีขนาดระหว่าง 20.53 ถึง 650.9 ตารางกิโลเมตร โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 308.8 ตารางกิโลเมตร ทั้งนี้ ท้ายน้ำของลุ่มน้ำย่อยเหล่านี้ได้รวมถึงตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าทางด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A จำนวน 12 สถานี (ดูตารางที่ 7 ประกอบ) ไว้ด้วยเพื่อใช้ตรวจสอบความมีประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ในการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A ทั้งนี้ ลักษณะเฉพาะของสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 13 สถานี ในลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 8 โดยในตารางดังกล่าวได้แสดงข้อมูลพื้นที่ลุ่มน้ำ ความลึกฝนรายปีเฉลี่ย ปริมาณน้ำท่ารายปีเฉลี่ย สัดส่วนระหว่างน้ำท่าต่อน้ำฝน เปอร์เซ็นต์การใช้ที่ดินของพื้นที่เกษตรกรรมในเขตและนอกเขตชลประทาน พื้นที่ป่าไม้ และพื้นที่อื่น ๆ

นอกจากขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยที่จะต้องนำไปประกอบการใช้งานแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD แล้ว แบบจำลองต้องการข้อมูลความยาวลำน้ำจากจุดไกลสุดบนสันปันน้ำจนถึงจุดออกของแต่ละลุ่มน้ำย่อย ทั้งนี้ ได้แสดงความยาวลำน้ำสายหลักของทั้ง 98 ลุ่มน้ำย่อย ดังในตารางที่ 7 โดยแสดงให้เห็นว่า ความยาวลำน้ำสายหลักของพื้นที่ลุ่มน้ำของ S.1 และ S.68 มีขนาดยาวกว่าลุ่มน้ำอื่น ๆ โดยมีค่าเท่ากับ 317.68 และ 460.00 กิโลเมตร สำหรับลุ่มน้ำอื่น ๆ มีความยาวของลำน้ำสายหลักเฉลี่ยเท่ากับ 27.94 กิโลเมตร โดยมีความยาวที่สั้นที่สุดเท่ากับ 4.80 กิโลเมตร และยาวที่สุดเท่ากับ 86.91 กิโลเมตร



ภาพที่ 13 การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำชีออกเป็น 98 ลุ่มน้ำย่อย

ตารางที่ 7 ขนาดพื้นที่ลุ่มน้ำและความยาวลำน้ำสายหลักของ 98 ลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำชีที่ทำการศึกษา

รหัสลุ่มน้ำย่อย	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	จุดออก	ความยาวลำน้ำจากสันปันน้ำถึงจุดออก (กม.)
S1	12057.52	เขื่อนอุบลรัตน์	317.68
S2	478.66		74.61
S3	494.79		22.44
S4	285.15		24.50
S5	157.40		19.49
S6	185.51		30.32
S7	200.21		25.13
S8	451.40		14.82
S9	226.69		33.68
S10	212.00		21.59
S11	149.78		18.64
S12	152.28		40.33
S13	650.88		86.21
S14	336.43		42.20

S15	405.88		29.48
S16	198.57		26.54
S17	251.62	E.73	38.17
S18	127.78		14.27
S19	306.63	E.72	59.52
S20	149.16		31.01
S21	450.39	E.32A	17.16
S22	225.80		10.60
S23	189.96		25.70
S24	382.64		47.25
S25	377.05		12.95
S26	134.01		23.13
S27	20.53	E.5	4.80
S28	256.85		33.54
S29	237.31		20.80
S30	280.40		34.30
S31	164.52		32.87
S32	372.43		29.88
S33	264.06		29.13
S34	257.01		65.73
S35	169.59		21.95
S36	281.47		15.29
S37	223.57		35.45
S38	56.93	E.23	22.00
S39	203.39		13.44
S40	255.52		14.77
S41	368.36		60.26
S42	380.75	E.6C	64.77
S43	333.07		25.35
S44	292.11		34.06
S45	201.13		21.13
S46	199.93		23.38
S47	316.36		8.53
S48	560.00		30.40
S49	204.89		28.47
S50	392.72		30.40
S51	255.68		22.89
S52	393.53	E.9	26.54
S53	429.32		48.46
S54	255.78		21.44

S55	591.09		25.76
S56	535.57	E.16A	36.94
S57	606.70		55.98
S58	208.58		30.95
S59	475.48	S59	44.26
S60	588.43		46.37
S61	204.81		22.38
S62	197.51		25.21
S63	107.94		8.56
S64	278.35		37.70
S65	441.91		40.86
S66	306.94		27.56
S67	349.43	E.66A	54.76
S68	6019.57	เขื่อนลำปาว	460.0
S69	265.79		7.21
S70	325.87		15.94
S71	337.66		5.42
S72	423.28		28.93
S73	381.16		9.53
S74	280.83		9.65
S75	273.47		21.72
S76	339.60	E.18	53.62
S77	364.86		8.48
S78	325.92		11.95
S79	181.52		16.01
S80	461.43		22.02
S81	468.37		32.47
S82	300.69		25.92
S83	235.31		34.16
S84	285.50	E.54	30.04
S85	282.36		30.79
S86	186.74	E.70	11.60
S87	233.05		11.64
S88	380.46		8.55
S89	247.74		8.67
S90	477.94		9.44
S91	394.91		20.31
S92	305.18		27.15
S93	537.08		14.18
S94	337.33		50.91

S95	327.57		4.85
S96	426.54		16.13
S97	259.44		35.55
S98	295.57	E.20A	32.49
เฉลี่ย	308.79		27.94

ตารางที่ 8 ลักษณะเฉพาะของสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 13 สถานี ในลุ่มน้ำชีที่ใช้ในการศึกษา

สถานี	E.73	E.72	E.32A	E.5	E.23	E.6C	E.21	E.9	E.66A	E.18	E.54	E.70	E.20A
พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตารางกิโลเมตร)	252	328	2,877	4,207	6,771	381	8,806	10,918	31,758	41,278	1524	2,630	47,721
ความลึกฝน (มิลลิเมตร)	1343	1230	1203	1199	1133	1097	1126	1123	1157	1210	1523	1537	1248
ปริมาณน้ำท่า (มิลลิเมตร)	400	238	331	276	176	276	191	159	175	189	449	466	220
สัดส่วนน้ำท่า-น้ำฝน (%)	29.76	19.34	27.52	22.98	15.53	25.16	17.00	14.18	15.13	15.64	29.47	30.36	17.62
พื้นที่เกษตรนอกเขตชลประทาน (%)	47.83	22.31	21.50	34.22	50.72	50.47	55.50	59.80	65.14	64.61	65.24	64.95	66.03
พื้นที่เกษตรในเขตชลประทาน (%)	0.00	0.00	0.00	0.01	2.79	0.00	2.49	1.95	4.13	7.17	5.27	4.59	6.20
พื้นที่ป่าไม้ (%)	38.65	74.90	70.51	58.37	36.15	38.01	30.90	26.35	16.89	14.19	18.10	18.32	13.45
พื้นที่อื่นๆ (%)	13.53	2.79	7.99	7.40	10.35	11.53	11.11	11.90	13.83	14.03	11.38	12.13	14.32

3. วิเคราะห์ความลึกฝนเชิงพื้นที่แบบรายวันของแต่ละลุ่มน้ำย่อยในลุ่มน้ำชี

ในการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินน้ำท่าในแต่ละลุ่มน้ำย่อยของพื้นที่ลุ่มน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A นั้น จำเป็นต้องใช้ข้อมูลความลึกฝนเชิงพื้นที่ของทั้ง 98 ลุ่มน้ำย่อย ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2544 ถึง ปี พ.ศ. 2558 เป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง โดยในการศึกษานี้ได้นำผลิตภัณฑ์ฝนกริด SENSWAT-GGR มาทำการประเมินความลึกฝนรายวันในช่วงเวลาดังกล่าวด้วยเครื่องมือ Zonal Statistic as Table ที่มีอยู่ในโปรแกรม ArcGIS 10 ผลการประเมินความลึกฝนเชิงพื้นที่รายเดือน รายฤดูกาล และรายปีเฉลี่ย ของทั้ง 98 ลุ่มน้ำย่อย แสดงดังในตารางที่ 9 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความลึกฝนรายปีเฉลี่ยของทั้ง 98 ลุ่มน้ำย่อย มีค่าอยู่ระหว่าง 919.1 ถึง 1,513.5 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งเกิดขึ้นที่ลุ่มน้ำย่อย S33 และ S83 ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ความลึกฝนเชิงพื้นที่รายเดือน รายฤดูกาลและรายปีเฉลี่ยของ 98 ลุ่มน้ำย่อย ในลุ่มน้ำชี

หน่วย: มิลลิเมตร

รหัสลุ่มน้ำย่อย	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	ฤดูฝน (พ.ค.-ต.ค.)	ฤดูแล้ง (พ.ย.-เม.ย.)	รายปี
S1	52.7	145.8	149.8	170.5	267.2	231.4	56.0	5.7	3.4	12.9	10.2	30.7	115.6	1020.6	1136.2
S2	45.7	143.7	157.6	168.8	256.6	210.0	53.0	4.7	3.3	12.9	9.3	29.3	105.2	989.6	1094.9
S3	59.5	135.7	137.7	162.2	246.9	217.5	66.9	5.6	5.2	14.6	13.1	37.3	135.3	966.8	1102.0
S4	52.7	158.0	154.0	180.7	298.2	266.6	48.0	6.8	1.8	11.1	8.3	25.6	106.3	1105.5	1211.8
S5	49.6	154.9	140.6	172.3	258.7	230.2	46.4	7.9	2.3	13.5	6.5	20.0	99.8	1003.1	1102.9
S6	60.1	145.7	137.5	160.4	230.5	211.3	52.2	7.3	4.7	13.5	9.2	25.4	120.2	937.6	1057.8
S7	55.0	153.9	137.5	162.8	251.4	226.9	45.8	8.9	3.4	12.2	9.0	19.9	108.4	978.2	1086.6
S8	71.0	150.0	144.5	161.2	258.1	239.1	53.1	7.7	3.3	12.6	10.2	27.8	132.6	1006.1	1138.7
S9	54.6	151.7	165.3	178.0	316.3	287.5	50.8	6.1	1.2	9.9	8.3	29.5	109.4	1149.6	1259.0
S10	53.3	145.0	159.2	156.4	306.4	281.3	51.8	5.5	0.9	10.6	5.2	20.7	96.2	1100.1	1196.3
S11	71.6	152.8	149.7	157.4	274.8	250.3	48.3	7.4	2.7	11.8	7.3	23.2	124.0	1033.3	1157.3
S12	78.8	156.5	144.0	159.6	254.1	230.7	56.2	7.8	4.0	16.2	10.0	30.4	147.1	1001.2	1148.3
S13	89.0	149.5	135.5	143.1	210.0	258.2	87.1	11.3	6.7	10.4	17.2	53.2	187.7	983.4	1171.2
S14	106.7	162.0	121.9	135.6	217.0	295.4	105.8	11.9	8.0	10.5	23.5	63.3	224.0	1037.9	1261.8
S15	89.2	153.8	114.2	127.6	204.1	278.8	92.0	7.2	5.6	7.8	22.6	55.6	188.1	970.6	1158.7
S16	78.7	146.1	120.6	131.3	185.6	251.4	76.7	7.9	3.8	6.9	17.6	46.5	161.4	911.6	1073.0
S17	94.1	181.7	142.3	171.2	243.5	300.1	83.1	13.7	2.9	8.9	17.0	65.9	202.5	1122.0	1324.4
S18	103.7	183.7	144.1	170.2	240.0	288.2	83.8	11.8	3.8	10.1	15.0	69.9	214.1	1110.0	1324.1
S19	84.9	159.7	146.5	162.5	221.9	259.3	76.8	9.3	4.4	9.6	14.7	54.6	177.5	1026.6	1204.1
S20	93.0	168.0	128.9	151.0	215.2	272.2	85.0	10.5	4.3	8.5	16.3	59.7	192.3	1020.2	1212.5
S21	81.3	150.6	111.9	122.8	171.9	248.8	74.8	5.9	3.5	7.0	17.6	44.9	160.1	880.9	1041.0
S22	91.7	170.0	117.7	143.9	202.9	272.3	90.3	9.2	5.4	8.2	17.7	51.1	183.2	997.1	1180.3
S23	85.4	157.0	105.1	124.4	177.4	249.9	89.0	6.7	6.6	8.7	19.2	44.8	171.4	902.7	1074.1
S24	99.2	182.5	129.2	162.6	229.6	286.3	87.6	13.3	4.1	9.0	17.1	68.2	210.8	1077.9	1288.7
S25	75.5	162.6	117.7	145.3	203.4	247.6	90.1	10.6	4.2	9.2	16.1	50.6	166.2	966.7	1132.9
S26	87.6	145.3	101.8	114.4	168.7	231.3	88.9	8.5	7.6	9.2	21.4	50.7	184.9	850.4	1035.3
S27	87.6	141.4	101.6	112.6	166.7	232.5	86.3	7.4	8.1	10.0	22.2	52.5	187.8	841.2	1029.0
S28	84.2	144.8	106.5	123.6	185.9	252.9	82.6	5.6	5.7	9.8	17.1	47.7	170.1	896.2	1066.3
S29	77.7	130.7	101.7	115.5	182.3	248.8	83.7	6.2	5.5	10.9	15.5	49.3	165.1	862.7	1027.8
S30	82.7	133.3	99.5	108.0	168.0	230.2	87.6	8.8	6.6	9.0	18.7	49.0	174.7	826.6	1001.4
S31	62.1	154.3	131.4	150.7	203.1	231.4	89.7	10.2	2.8	10.4	12.4	50.8	148.6	960.6	1109.2
S32	65.7	146.1	113.3	110.0	184.4	207.2	90.6	11.5	3.1	7.0	11.5	49.4	148.2	851.5	999.7
S33	66.9	131.8	94.7	93.3	159.9	199.6	93.4	8.3	3.8	7.7	11.1	48.5	146.4	772.7	919.1
S34	69.6	140.0	98.5	106.7	168.7	208.8	92.1	7.7	3.8	8.5	13.7	46.5	149.7	814.6	964.3
S35	74.8	125.4	93.4	94.6	152.3	209.4	94.2	8.2	5.2	8.0	15.2	49.4	160.8	769.1	929.8

S36	79.6	125.6	98.8	102.6	162.3	222.1	90.5	10.6	7.1	7.3	18.5	48.9	172.0	801.8	973.8
S37	87.5	130.6	101.0	106.8	177.3	233.2	88.9	10.4	5.9	7.9	21.4	53.4	186.4	837.8	1024.3
S38	87.2	132.7	101.8	112.2	189.4	248.7	83.6	7.7	6.1	9.9	19.4	57.2	187.5	868.4	1056.0
S39	82.1	138.3	98.7	116.2	177.2	233.5	89.1	10.8	2.8	11.9	22.5	48.7	178.8	852.9	1031.8
S40	95.1	140.7	101.6	109.8	189.1	238.7	90.1	9.8	3.5	9.2	23.7	57.1	198.4	870.1	1068.4
S41	86.7	141.5	101.9	114.2	199.8	247.9	86.2	6.6	5.6	10.4	18.7	56.9	184.9	891.5	1076.4
S42	79.3	125.3	94.8	125.1	204.1	269.8	86.4	7.9	5.4	9.2	13.1	46.3	161.2	905.5	1066.7
S43	88.0	136.8	104.6	129.6	222.5	269.3	84.5	5.9	6.7	12.2	16.1	59.8	188.8	947.3	1136.1
S44	83.7	137.0	102.7	121.0	210.5	259.4	80.5	5.4	7.5	11.2	17.8	64.7	190.3	911.2	1101.5
S45	82.1	150.5	100.5	111.7	205.5	238.2	89.5	3.9	4.7	10.1	15.0	51.1	167.0	895.7	1062.8
S46	80.0	152.0	97.9	111.0	204.8	235.4	88.5	3.4	4.2	10.1	14.0	50.5	162.2	889.7	1051.9
S47	66.4	147.8	95.7	124.0	199.4	243.2	81.8	3.9	3.0	10.1	14.3	46.2	144.0	891.9	1035.8
S48	66.8	134.5	85.6	132.9	208.6	279.8	85.2	7.8	5.9	10.2	14.4	43.5	148.5	926.5	1075.1
S49	57.8	144.1	81.2	138.4	221.5	276.5	79.9	5.3	3.7	9.9	16.1	41.5	134.2	941.5	1075.7
S50	65.0	146.9	87.5	126.2	207.2	248.9	79.5	4.7	3.4	11.4	14.7	49.3	148.5	896.2	1044.7
S51	50.9	143.4	83.1	147.7	234.0	313.0	82.4	4.4	2.4	8.1	16.4	34.4	116.6	1003.6	1120.2
S52	52.9	140.2	88.7	156.4	243.5	328.7	85.1	3.5	1.8	8.2	16.5	36.6	119.4	1042.7	1162.2
S53	54.9	153.3	87.9	157.5	236.2	336.6	80.1	4.4	5.2	10.5	19.6	38.8	133.5	1051.6	1185.1
S54	57.2	139.7	86.1	168.0	257.3	327.8	83.5	4.1	1.8	9.4	11.5	31.8	115.9	1062.3	1178.2
S55	56.8	139.9	87.3	163.2	250.1	309.6	77.6	5.6	3.0	14.9	11.9	32.9	125.2	1027.6	1152.8
S56	68.4	145.9	100.6	153.9	237.9	262.6	67.9	6.4	4.1	17.1	11.8	37.0	144.9	968.9	1113.7
S57	79.7	140.7	121.1	147.5	220.0	222.9	59.0	6.7	4.3	10.2	14.8	38.6	154.3	911.2	1065.4
S58	83.8	151.2	127.0	153.6	234.1	221.6	61.8	7.1	3.5	14.9	11.3	38.3	158.9	949.3	1108.1
S59	46.6	144.7	102.0	178.1	268.4	284.4	73.2	14.4	2.3	12.6	10.7	30.1	116.7	1050.9	1167.6
S60	70.8	143.3	127.1	157.6	260.5	255.0	56.1	6.8	3.1	14.6	10.6	33.5	139.4	999.8	1139.1
S61	50.3	134.9	157.2	161.0	300.7	277.5	49.5	2.5	1.6	11.5	4.2	22.8	92.8	1080.8	1173.7
S62	58.5	138.0	140.9	176.7	282.7	281.6	53.3	6.2	1.9	13.0	11.2	33.6	124.5	1073.2	1197.7
S63	50.9	143.8	107.9	195.0	276.9	285.0	72.8	14.8	1.7	13.5	12.1	31.6	124.6	1081.4	1206.1
S64	59.6	158.9	119.3	210.3	275.5	275.0	75.3	15.4	1.0	14.5	11.7	35.1	137.5	1114.4	1251.9
S65	54.7	143.5	130.9	201.7	272.6	268.5	61.9	12.8	1.4	15.1	12.6	31.6	128.2	1079.1	1207.3
S66	74.9	157.9	142.4	217.4	268.7	261.7	70.0	19.1	0.7	14.5	9.0	41.2	159.4	1118.2	1277.5
S67	56.4	157.0	152.3	229.3	274.9	241.5	64.4	17.3	1.8	12.9	9.2	32.0	129.6	1119.5	1249.2
S68	53.1	147.8	146.7	211.6	284.0	249.2	59.8	11.1	1.2	12.2	10.6	28.7	116.9	1099.1	1216.0
S69	35.4	130.1	165.8	201.9	310.2	224.6	43.4	0.8	1.0	8.1	11.2	14.8	71.5	1076.0	1147.4
S70	37.4	139.3	169.6	209.1	302.1	223.7	43.8	0.9	1.3	8.1	9.9	17.4	75.0	1087.6	1162.6
S71	40.2	140.5	156.0	191.9	286.6	231.3	46.8	1.3	1.3	7.9	7.5	18.9	77.1	1053.2	1130.3
S72	48.6	147.7	159.2	204.7	271.5	233.6	47.3	3.7	1.5	9.4	8.1	24.8	96.1	1064.0	1160.1
S73	42.0	148.6	188.9	234.5	318.3	219.4	39.0	2.1	1.6	7.9	8.2	22.0	83.8	1148.8	1232.6
S74	44.2	158.4	194.4	237.3	322.9	235.5	41.2	2.7	1.6	7.7	7.0	24.2	87.3	1189.7	1277.1
S75	45.6	169.9	199.1	247.9	351.5	271.5	46.9	5.2	1.0	8.0	6.0	27.9	93.7	1286.9	1380.7

S76	49.5	170.1	191.1	243.7	332.7	263.7	53.9	8.2	1.3	9.1	7.1	30.6	105.7	1255.2	1361.0
S77	50.1	174.3	187.5	241.9	334.7	269.4	61.5	8.8	0.9	9.2	7.8	36.5	113.4	1269.4	1382.8
S78	60.1	177.5	179.8	230.1	300.0	256.6	71.1	11.2	1.3	11.7	10.5	47.7	142.6	1215.0	1357.6
S79	43.9	180.8	201.0	233.6	343.2	247.2	57.5	5.8	0.7	9.6	6.0	42.1	108.2	1263.4	1371.5
S80	54.0	176.5	181.3	215.8	299.2	248.3	67.7	9.1	1.3	8.5	8.9	44.8	126.4	1188.8	1315.2
S81	50.6	162.2	162.7	198.9	285.7	254.6	67.3	9.9	0.8	7.6	6.7	38.5	114.1	1131.5	1245.6
S82	36.1	169.2	228.2	301.4	374.8	220.3	31.8	2.0	1.0	8.7	10.8	18.5	77.0	1325.8	1402.8
S83	48.2	182.3	239.0	321.7	390.1	236.5	39.4	3.7	2.2	9.5	12.2	28.8	104.5	1409.0	1513.5
S84	57.2	178.0	229.3	301.3	380.9	239.2	42.8	5.2	2.5	10.7	10.9	30.1	116.6	1371.5	1488.1
S85	53.2	168.2	214.4	282.8	361.6	229.2	42.6	4.5	2.0	7.6	10.5	33.4	111.1	1298.8	1409.9
S86	48.2	178.6	221.5	298.1	390.9	249.7	44.0	3.7	1.8	8.3	14.9	28.3	105.2	1382.8	1488.0
S87	41.0	174.8	214.4	305.8	405.7	245.5	41.6	3.3	1.0	8.8	21.3	23.0	98.4	1387.8	1486.2
S88	34.5	164.5	213.7	308.4	394.8	265.5	46.1	3.3	0.4	6.9	11.6	22.2	78.9	1393.0	1471.9
S89	33.8	160.5	203.5	292.4	387.9	278.2	54.4	3.6	0.7	6.2	10.8	21.6	76.6	1376.9	1453.5
S90	28.2	154.8	212.0	320.6	396.4	297.9	57.6	3.9	0.4	5.9	7.9	18.8	65.2	1439.2	1504.4
S91	28.2	154.9	196.1	265.9	367.6	275.6	60.0	4.4	0.3	6.0	5.2	22.6	66.7	1320.3	1387.0
S92	36.7	167.4	204.3	245.0	351.9	250.9	57.2	5.5	0.5	10.0	5.7	37.4	95.8	1276.7	1372.5
S93	39.8	141.4	209.2	291.4	363.9	279.1	57.4	8.3	1.2	10.5	8.2	30.5	98.4	1342.5	1440.9
S94	45.6	167.4	190.4	218.8	329.8	243.1	57.2	6.1	0.7	8.9	6.5	41.8	109.6	1206.7	1316.3
S95	45.7	157.2	148.7	190.7	282.5	261.5	66.2	6.6	0.4	4.4	5.5	35.2	97.8	1106.8	1204.6
S96	53.6	142.7	170.7	237.9	313.0	259.5	60.2	9.6	2.2	8.0	9.3	36.7	119.3	1183.9	1303.2
S97	55.1	151.3	150.6	221.9	292.0	282.2	63.7	8.3	2.2	3.7	5.4	35.6	110.3	1161.9	1272.2
S98	63.3	163.3	189.7	250.9	313.4	288.8	69.8	9.2	2.9	4.2	9.0	41.4	130.0	1276.0	1406.0

4.พัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินน้ำท่าแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม

MOSCEM

ในขั้นตอนการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD นั้น ได้นำภาษา MATLAB มาประยุกต์ใช้เพื่อเขียนโปรแกรมสำหรับแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และมีการเชื่อมต่อกับโปรแกรม MOSCEM ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นแล้วโดย (Vrugt et al., 2003) เพื่อการหาค่าพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมโดยใช้ฟังก์ชันแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization)

โครงสร้างของแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่นำมาเขียนด้วยโปรแกรม MATLAB ในการศึกษาประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบ ดังต่อไปนี้

1) จัดเตรียมข้อมูลลักษณะของสภาพภูมิประเทศในแต่ละพื้นที่ของกลุ่มน้ำย่อย โดยการวิเคราะห์ความแตกต่างของระดับความสูงของพื้นที่กับระดับความสูงของตำแหน่งที่เป็นลำน้ำที่อยู่ใกล้ที่สุด (Highest Above Nearest Drainage, Hand) ที่คำนวณมาจากข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) รวมทั้งข้อมูลความลาดชันของพื้นที่ เพื่อนำมาใช้ประกอบการจำแนกลักษณะภูมิประเทศออกเป็น 3 ประเภท คือ พื้นที่ลาดเขา (Hillslope) พื้นที่ลาดเอียง (Terrace) และพื้นที่ชุ่มน้ำ (Wetland) เพื่อประกอบการใช้งานแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD โดยในแต่ละกลุ่มน้ำย่อยจะมีการประเมินน้ำท่ามารวมกันที่ท้ายน้ำของแต่ละกลุ่มน้ำย่อย

2) การเคลื่อนตัวในลำน้ำ (Channel Routing) จากสมการการเคลื่อนตัวของน้ำ Muskingum Method ดังแสดงในสมการที่ (30) ได้ถูกนำมาใช้เคลื่อนตัวกราฟน้ำท่าจากทางออกของกลุ่มน้ำย่อย ด้านเหนือน้ำไปยังทางออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำ ก่อนที่จะมารวมกับกราฟน้ำท่าที่เกิดขึ้นในกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำ ที่ถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ K และ X โดยที่ K คือ พารามิเตอร์ที่ใช้ในการห้วงเวลาของกราฟน้ำท่า และ X คือ แฟลคเตอร์ถ่วงน้ำหนัก ทั้งนี้ ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ทั้ง 2 พารามิเตอร์ นั้นดำเนินการด้วยโปรแกรม MOSCEM สำหรับค่าของ K_{sub} สำหรับแต่ละกลุ่มน้ำย่อยนั้น คำนวณด้วยสมการที่ (31) โดยการปรับค่า K_{sub} ด้วยความยาวของแต่ละกลุ่มน้ำย่อย (L_{sub})

$$S_{channel-sub} = K_{sub}(XQ_{up} + (1 - X)Q_{down}) \quad (30)$$

$$K_{sub} = KL_{sub} \quad (31)$$

3) คำนวณเวลาการหน่วงของกราฟน้ำท่าในส่วนของ การไหลบนผิวดิน (Overland Flow) และการไหลระหว่างผิวดินกับน้ำใต้ดิน (Interflow) ซึ่งเป็นส่วนของกราฟน้ำท่าที่มีการตอบสนองเร็ว (Fast Response) ที่ถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ T_{lagF} และกราฟน้ำท่าในส่วนของ การไหลของน้ำใต้ดิน (Groundwater Flow) ซึ่งเป็นส่วนของกราฟน้ำท่าที่มีการตอบสนองช้า (Slow Response) ที่ถูกควบคุมโดยพารามิเตอร์ T_{lagS} ทั้งนี้ ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของพารามิเตอร์ทั้ง 2 พารามิเตอร์ นี้ ดำเนินการด้วยโปรแกรม MOSCEM สำหรับค่าของ $T_{lagF-sub}$ และ $T_{lagS-sub}$ สำหรับแต่ละกลุ่มน้ำย่อย คำนวณด้วยสมการที่ (32) และ (33) โดยการปรับค่า T_{lagF} และ T_{lagS} ด้วยรากที่สองของสัดส่วนระหว่างขนาดพื้นที่กลุ่มน้ำของแต่ละกลุ่มน้ำย่อย (A_{sub}) กับขนาดของกลุ่มน้ำหลักที่ใช้ในการสอบเทียบแบบจำลอง (A)

$$T_{lagF-sub} = T_{lagF} \sqrt{A_{sub}/A} \quad (32)$$

$$T_{lagS-sub} = T_{lagS} \sqrt{A_{sub}/A} \quad (33)$$

5. ประยุกต์ใช้แบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

การสอบเทียบแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD จะใช้ข้อมูลจำนวน 14 ปี ในช่วงระหว่าง ปี พ.ศ. 2544-2558 สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX-TOPO นั้น จะดำเนินการสำหรับทั้ง 13 สถานีวัดน้ำท่า ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.23, E.6C, E.21, E.9, E.66C, E.18, E.54 E.70 และ E.20A และสำหรับในการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD นั้น ได้ดำเนินการเฉพาะที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A อย่างไรก็ตาม ผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A จะได้ผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.23, E.6C, E.21, E.9, E.66C, E.18, E.54 และ E.70 ซึ่งสามารถนำไปเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีเหล่านี้โดยแบบจำลอง FLEX-TOPO เพื่อการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่พัฒนาขึ้นในการศึกษานี้

6. วิเคราะห์ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เพื่อการตรวจสอบสภาพความแห้งแล้งของประเทศไทย

ในการศึกษานี้ได้ทำวิเคราะห์ค่าดัชนี MSI (Moisture Stress Index) ซึ่งเป็นดัชนีภัยแล้งที่คำนวณได้ตามสมการที่ (24) ซึ่งหมายถึงสัดส่วนระหว่างค่าการสะท้อนกลับในช่วงคลื่น Near Infrared (NIR) ที่มีศูนย์กลางความยาวคลื่นอยู่ที่ 0.86 ไมโครเมตร ($\rho_{0.86}$) และค่าการสะท้อนกลับในช่วงคลื่น Shortwave Infrared (SWIR) ที่มีศูนย์กลางความยาวคลื่นอยู่ที่ 1.64 ไมโครเมตร ($\rho_{1.64}$) โดยค่าสะท้อนกลับดังกล่าวสามารถดาวน์โหลดได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมชุดผลิตภัณฑ์ MOD09A1 ที่ได้จากดาวเทียม Terra ด้วยตัวรับรู้ MODIS จากเว็บไซต์ <ftp://eft1.cr.usgs.gov/MOLT> โดยเป็นข้อมูลที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) เท่ากับ 500 เมตร และความละเอียดเชิงเวลา (Temporal Resolution) เท่ากับ 8 วัน ทั้งนี้ ค่าการสะท้อนกลับในช่วงคลื่น Near Infrared (NIR) และในช่วงคลื่น Shortwave Infrared (SWIR) ตรงกับค่าการสะท้อนกลับของแบนด์ที่ 2 และ 6 ในชุดผลิตภัณฑ์ MOD09A1 ซึ่งมีทั้งหมด 7 แบนด์ โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม HEG (The

HDF-EOS To GeoTIFF Conversion Tool) เพื่อคืนค่าการสะท้อนกลับของทั้ง 7 แบนด์ รวมทั้งการแปลงไฟล์ให้เป็นประเภท GeoTIFF และเลือกใช้ข้อมูลแบนด์ 2 และแบนด์ 6 เพื่อการวิเคราะห์ค่าดัชนี MSI ทั้งนี้ ในการศึกษาี้ได้ทำการดาวน์โหลดข้อมูลที่ครอบคลุมทุกพื้นที่ลุ่มน้ำของประเทศไทยในช่วงเวลาระหว่าง พ.ศ. 2544-2561 เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาพภัยแล้งในประเทศไทย ทั้งนี้ เพื่อหาศักยภาพของดัชนี MSI ในการตรวจสอบสภาพความแห้งแล้งสำหรับทุกพื้นที่ลุ่มน้ำในประเทศไทย โดยในแต่ละลุ่มน้ำของแต่ละภูมิภาคจะมีลักษณะความแห้งแล้งและความชุ่มชื้นที่แตกต่างกันไปตามความแตกต่างของความลึกฝน การใช้ที่ดิน และลักษณะเฉพาะทางกายภาพอื่น ๆ ดังนั้น จึงมีความจำเป็นต้องพิจารณาค่าของดัชนี MSI ในทุกพื้นที่ทั่วประเทศ เพื่อใช้กำหนดค่าของดัชนี MSI ให้ครอบคลุมระดับความแห้งแล้งและความชุ่มชื้นสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำทั่วประเทศ

7. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI กับ ความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา

ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI ราย 8 วัน กับข้อมูลความชื้นในดิน (Unsaturated Soil Moisture, S_u) เฉลี่ยราย 8 วัน ที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในช่วงเวลาระหว่าง พ.ศ. 2545-2561 ของแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณานั้น ไม่สามารถนำค่าอนุกรมเวลาของทั้ง 2 ชุดข้อมูล มาเปรียบเทียบกันโดยตรงเพื่อหาค่า NSE (Nash Sutcliffe Efficiency) เนื่องจากสเกลที่ไม่ตรงกัน ดังนั้น ในการศึกษาี้จึงได้ปรับสเกลของค่าดัชนี MSI ให้มีสเกลเหมือนกับค่าความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ด้วยวิธี Linear Scaling ดังแสดงในสมการที่ (33) โดยที่ X_{avg} , SD_X คือค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของดัชนี MSI และ Y_{avg} , SD_Y คือค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD

$$Y_i = \left(\frac{X_i - X_{avg}}{SD_X} \right) SD_Y + Y_{avg} \quad (33)$$

ผลการศึกษา

การศึกษางานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยกระบวนการน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัว” สามารถสรุปผลการศึกษาได้ 3 หัวข้อ ดังนี้

(1) ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO โดยการสอบเทียบแบบจำลองอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

(2) ผลการวิเคราะห์ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เพื่อการประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบสภาพภัยแล้งในประเทศไทย

(3) ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI ความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา

สำหรับรายละเอียดของผลการศึกษาในแต่ละหัวข้อแสดงได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการประยุกต์ใช้แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO โดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD แบบอัตโนมัติที่สถานี E.20A ในระหว่างปี พ.ศ. 2544 – 2558 โดยใช้โปรแกรม MOSCEM เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดแสดงดังในตารางที่ 10 และผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX-TOPO เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี แสดงดังในตารางที่ 11

ตามที่ได้อธิบายไว้ในวิธีการศึกษาในข้อย่อที่ (5) แล้วว่า การสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD นั้น ได้ดำเนินการเฉพาะที่สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำสุดของแม่น้ำชีคือที่สถานีวัดท่า E.20 และจะได้ผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A จำนวน 12 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.23, E.6C, E.21, E.9, E.66C, E.18, E.54 และ E.70 ดังนั้น จึงสามารถนำข้อมูลกราฟน้ำท่าที่ได้จากการประเมินในระหว่าง

ปี พ.ศ. 2544–2558 ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่าดังกล่าว ผลการประเมินค่า KGE , KGE_L และ KGE_{FDC} แสดงดังในตารางที่ 12 ซึ่งค่าทางสถิติเหล่านี้เป็นค่าที่ใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง MOSCEM ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองจึงได้แสดงดัชนี NSE เพิ่มอีก 1 ดัชนีเพื่อใช้เป็นตัวแปรทางสถิติกลางในการเปรียบเทียบ

สำหรับในกรณีของการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX-TOPO นั้น จำเป็นต้องดำเนินการในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี ซึ่งให้ค่าทางสถิติของดัชนี KGE , KGE_L , KGE_{FDC} และ NSE ดังแสดงในตารางที่ 12 เช่นเดียวกัน ทั้งนี้เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าทางสถิติที่ได้จากการประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A อย่างไรก็ตาม ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEX-TOPO ย่อมมีความเป็นไปได้ที่จะให้ค่าทางสถิติที่ดีกว่าที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เนื่องจากแบบจำลอง FLEX-TOPO เป็นการหาค่าของชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี ในขณะที่แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD เป็นการหาค่าชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับภาพรวมของสถานีวัดน้ำท่า E.20A

จากผลการเปรียบเทียบค่า NSE ที่สถานี E.20A โดยแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.79 และ 0.83 ตามลำดับ โดยแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ให้ค่า NSE ที่สูงกว่าแบบจำลอง FLEX-TOPO ประมาณ 5.06% ในขณะที่ภาพรวมของทั้ง 13 สถานี พบว่า แบบจำลอง แบบจำลอง FLEX-TOPO ให้ค่า NSE ที่สูงกว่าแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ประมาณ 7.14% จากการเปรียบเทียบค่า NSE ที่ได้จากทั้ง 2 แบบจำลอง ที่สถานีวัดน้ำท่าที่เหลือ 12 สถานี พบว่า แบบจำลอง FLEX-TOPO ให้ค่า NSE ที่สูงกว่าแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ใน 7 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.6C, E.54 และ E.70 โดยให้ค่า NSE ที่สูงกว่าเท่ากับ 25.0%, 5.56%, 11.84%, 4.88%, 28.36%, 38.6%, และ 40.3% ตามลำดับ โดยสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้มีพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 251,323,2,906, 4,207,378, 1,548 และ 2,647 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ให้ค่า NSE ที่สูงกว่าแบบจำลอง FLEX-TOPO ใน 5 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.23, E.21, E.9, E.66A และ E.18 โดยให้ค่า NSE ที่สูงกว่าเท่ากับ 6.67%, 5.26%, 7.89%, 7.69% และ 9.33% ตามลำดับ โดยสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้มีพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 6,282, 8,777, 10,878, 31,879 และ 41,187 ตารางกิโลเมตรตามลำดับ จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง FLEX-TOPO มี

ความสามารถในการประเมินกราฟน้ำท่าได้ถูกต้องกว่าแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สำหรับสถานีวัดน้ำท่าที่มีพื้นที่ลุ่มน้ำไม่มากนัก (ในที่นี้คือไม่เกิน 4,207 ตารางกิโลเมตร) ในขณะที่แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD มีความสามารถในการประเมินกราฟน้ำท่าได้ถูกต้องกว่าแบบจำลอง FLEX-TOPO สำหรับสถานีวัดน้ำท่าที่มีพื้นที่ลุ่มน้ำค่อนข้างมาก (ในที่นี้คือมากกว่า 6,282 ตารางกิโลเมตร)

สำหรับการเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO ที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A แสดงดังในภาพที่ 14 ซึ่งในภาพดังกล่าวได้แสดง (ก) กราฟน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO กับกราฟน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด และ (ข) กราฟน้ำท่าสะสม (Mass Curve) ที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง กับกราฟน้ำท่าสะสมที่ได้จากการตรวจวัด สำหรับการเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A จำนวน 12 สถานี แสดงดังในภาคผนวกที่ ก1 ถึง ก12

ตารางที่ 10 ค่าของชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่ได้จาก การสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A

พารามิเตอร์ของแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD									
ImaxH	ImaxT	ImaxW	SumaxH	SumaxT	SumaxW	Ce	betaH	betaW	D
3.75	3.42	3.34	410.96	318.44	620.73	0.25	2.1	1.04	0.9
Kff	KfH	Kf	Ks	Sfmax	Alpha(K _m)	x	Pmax	TlagF	TlagS
6.11	9.71	6.28	20.78	7.47	1.18	0.21	1.93	22.6	182.7

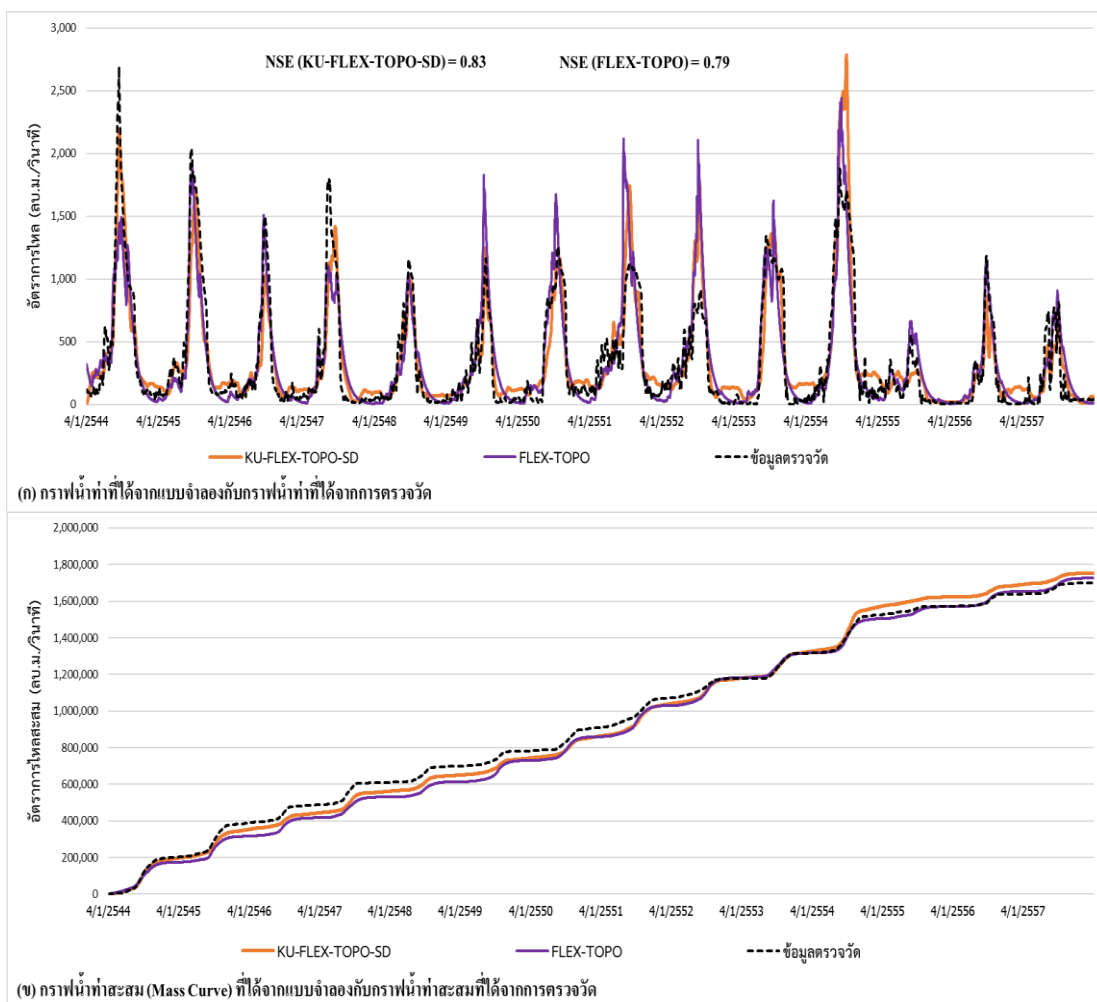
ตารางที่ 11 ค่าของชุดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง FLEX-TOPO ที่ได้จากสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า 13 สถานี

	E.73	E.72	E.32A	E.5	E.23	E.6C	E.21	E.9	E.66A	E.18	E.54	E.70	E.20A
ImaxH	4.04	3.66	3.81	2.77	3.62	4.09	3.30	3.79	4.11	2.54	4.84	4.99	4.44
ImaxT	3.91	3.74	3.56	2.57	3.18	3.62	3.28	3.52	2.98	2.15	3.72	4.20	4.20
ImaxW	3.55	3.12	2.98	2.18	3.25	3.31	2.97	2.55	3.34	2.43	3.47	3.99	4.32
SumaxH	3453	3235	239.2	2962	2499	3058	322.6	332.0	413.0	530.4	467.1	334.0	605.3
SumaxT	5509	6974	741.4	3644	704.7	4879	468.9	721.8	592.8	622.0	746.9	610.9	630.1
SumaxW	474.0	650.0	567.7	539.2	675.0	554.2	296.5	608.0	380.1	315.1	706.8	509.9	612.1
Ce	0.63	0.50	0.64	0.74	0.73	0.94	0.95	0.76	0.59	0.54	0.55	0.84	0.80
betaH	0.92	0.31	0.12	0.26	0.15	0.28	0.15	0.14	0.42	0.33	0.78	0.13	0.60
D	0.26	0.38	0.02	0.09	0.25	0.05	0.02	0.07	0.04	0.03	0.36	0.45	0.11
Kff	0.76	1.15	1.31	4.92	7.48	2.90	9.40	2.88	16.11	19.81	2.28	4.72	20.32
KfH	0.80	1.44	3.26	5.04	9.99	6.14	11.51	14.50	24.65	25.83	2.41	5.20	24.62
Kf	0.79	1.59	4.32	4.59	5.53	4.76	6.25	6.42	8.23	8.74	2.25	4.43	8.85
Ks	1.39	3.37	6.16	6.10	12.36	8.63	17.10	19.64	31.46	33.46	2.89	5.79	33.50
TlagF	1.04	2.26	1.94	2.11	2.08	3.54	2.74	2.29	3.55	1.16	4.52	4.17	1.55
TlagS	27.41	29.16	84.23	62.32	58.90	37.60	37.06	60.12	82.83	53.08	56.91	28.72	84.74
Sfmax	14.13	19.16	14.38	13.34	5.98	2.00	4.58	7.81	19.34	12.92	6.59	9.78	12.98
betaW	0.97	0.80	1.62	1.62	1.96	1.30	0.90	0.53	0.86	0.94	0.22	2.13	0.23
Pmax	0.95	0.50	2.72	0.72	1.48	2.40	0.95	1.18	2.92	0.77	2.12	0.62	1.52

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบค่าทางสถิติที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่เลือกพิจารณา

สถานี วัดน้ำท่า	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	การสอบเทียบแบบจำลอง								% ความ แตกต่าง
		FLEX-TOPO				KU-FLEX-TOPO-SD				
		NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	NSE	KGE	KGE _L	KGE _{FDC}	
E.73	251	0.48	0.70	0.43	0.85	0.36	0.45	0.19	0.60	25
E.72	323	0.54	0.76	0.56	0.91	0.51	0.72	0.59	0.89	5.56
E.32A	2,906	0.76	0.87	0.58	0.96	0.67	0.46	0.55	0.47	11.84
E.5	4,207	0.82	0.91	0.63	0.98	0.78	0.71	0.60	0.73	4.88
E.23	6,282	0.75	0.86	0.75	0.95	0.80	0.76	0.78	0.78	-6.67
E.6C	378	0.67	0.82	0.56	0.93	0.48	0.73	0.34	0.88	28.36
E.21	8,777	0.76	0.85	0.77	0.91	0.80	0.65	0.75	0.65	-5.26
E.9	10,878	0.76	0.87	0.60	0.95	0.82	0.75	0.61	0.76	-7.89
E.66A	31,879	0.78	0.89	0.77	0.97	0.84	0.89	0.60	0.91	-7.69
E.18	41,187	0.75	0.89	0.79	0.99	0.82	0.86	0.58	0.90	-9.33
E.54	1,548	0.57	0.77	0.78	0.96	0.35	0.62	0.82	0.76	38.6
E.70	2,647	0.67	0.82	0.72	0.97	0.40	0.58	0.82	0.65	40.3
E.20A	47,800	0.79	0.89	0.74	0.97	0.83	0.89	0.56	0.94	-5.06
เฉลี่ย	12,236	0.70	0.70	0.43	0.85	0.65	0.70	0.60	0.76	7.14

หมายเหตุ: % ความแตกต่างของค่า NSE สองแบบจำลองคิดเทียบกับค่า NSE ที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO



ภาพที่ 14 เปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO ที่สถานีวัดน้ำท่า E.20A

2. ผลการวิเคราะห์ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เพื่อการตรวจสอบสภาพความแห้งแล้งของประเทศไทย

การประยุกต์ใช้ดัชนี MSI (Moisture Stress Index) เพื่อการตรวจสอบสภาพความแห้งแล้งของประเทศไทยสามารถสรุปผลการศึกษาได้ใน 2 ส่วน คือ (1) ผลการแบ่งระดับสภาพความแห้งแล้งและความชุ่มชื้นด้วยดัชนี MSI และ (2) ผลการเปรียบเทียบค่าของดัชนี MSI กับสภาพการใช้ที่ดินและปริมาณฝน

2.1 ผลการแบ่งระดับสภาพความแห้งแล้งและความชุ่มชื้นด้วยดัชนี MSI

ในการศึกษานี้ได้นำค่าของดัชนี MSI สำหรับประเทศไทยราย 8 วัน ในระหว่างปี พ.ศ. 2545 - 2561 มาแสดงการแจกแจงความถี่ในภาพที่ 15 จากภาพดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าดัชนี MSI ส่วนใหญ่มีค่าระหว่าง 0.2 ถึง 1.9 ดังนั้น จึงทำการแบ่งช่วงของค่าดัชนี MSI ออกเป็น 8 ช่วง โดยแต่ละช่วงมีค่าของดัชนี MSI แตกต่างกันช่วงละ 0.2 ยกเว้นช่วงแรกและช่วงสุดท้าย ดังนี้ (1) $MSI < 0.4$ (2) $0.4 \leq MSI < 0.6$ (3) $0.6 \leq MSI < 0.8$ (4) $0.8 \leq MSI < 1$ (5) $1 \leq MSI < 1.2$ (6) $1.2 \leq MSI < 1.4$ (7) $1.4 \leq MSI < 1.6$ และ (8) $1.6 \leq MSI$ โดยผลการแจกแจงความถี่ของดัชนี MSI ในช่วงดังกล่าวมีค่าเท่ากับ 1.2%, 28.7%, 36.0%, 14.1%, 10.2%, 7.5%, 2.1% และ 0.2% ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า 90.2% ของดัชนี MSI มีค่าน้อยกว่า 1.2 และ 9.8% มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.2 นอกจากนั้นแล้ว ได้ทำการแจกแจงความถี่ของดัชนี MSI โดยเฉลี่ยใน แต่ละเดือนระหว่างปี พ.ศ. 2545-2561 ดังในตารางที่ 13 เพื่อใช้เป็นแนวทางในการกำหนดระดับสภาพความแห้งแล้ง จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าของดัชนี MSI ในเดือนกันยายนซึ่งเป็นเดือนที่มีความชุ่มชื้นมากที่สุดนั้นมีค่าต่ำกว่า 1.2 ทั้งหมด ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่า ดัชนี MSI ที่มีค่าต่ำหมายถึงสภาพความชุ่มชื้นและค่าสูงหมายถึงสภาพความแห้งแล้ง โดยพื้นที่ลุ่มน้ำของประเทศไทยไม่ควรมีความแห้งแล้งในเดือนกันยายน ด้วยเหตุผลดังกล่าวจึงกำหนดค่าเบื้องต้นของดัชนี MSI ที่ต่ำกว่า 1.2 เป็นค่าที่กำหนดสภาพความชุ่มชื้น จากนั้นจึงนำสมมุติฐานนี้ไปตรวจสอบความเป็นไปได้ในการใช้ตัวเลขนี้ในการกำหนดสภาพความชุ่มชื้นและแห้งแล้งในแต่ละพื้นที่ทั่วประเทศไทย โดยได้ทำการกำหนดระดับความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งสำหรับลุ่มน้ำในประเทศไทยโดยดัชนี MSI ออกเป็น 8 ช่วง ดังแสดงในตารางที่ 14 โดยกำหนดให้มีระดับความชุ่มชื้น 5 ระดับ และระดับความแห้งแล้ง 3 ระดับ เมื่อนำข้อมูลการจัดระดับดังกล่าวไปแสดงตามค่าเฉลี่ยรายเดือนของพื้นที่ลุ่มน้ำในประเทศไทยจะได้สภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้ง เฉลี่ยรายเดือนของพื้นที่ลุ่มน้ำในประเทศไทยดังแสดงในภาพที่ 16

ภาพที่ 16 และตารางที่ 13 แสดงให้เห็นว่าในเดือนกันยายนไม่มีสภาพความแห้งแล้งเกิดขึ้นในทุกพื้นที่ทั่วประเทศไทย ในขณะที่เดือนสิงหาคมและเดือนตุลาคมมีสภาพความแห้งแล้งเกิดขึ้นเฉพาะในระดับที่ 1 เท่ากันคือ 0.1% สำหรับในเดือนกรกฎาคมมีสภาพความแห้งแล้งเกิดขึ้นเฉพาะในระดับที่ 1 เท่ากับ 0.3% ในขณะที่เดือนมิถุนายนและพฤศจิกายนมีสภาพความแห้งแล้งเกิดขึ้นเฉพาะในระดับที่ 1 และระดับที่ 2 โดยมีค่าเท่ากับ 1.3% และ 0.2% ในเดือนมิถุนายน ตามลำดับ และเท่ากับ 1.5% และ 0.1% ในเดือนพฤศจิกายน ตามลำดับ

ในขณะที่เดือนธันวาคม มกราคม กุมภาพันธ์ มีนาคม เมษายน และ พฤษภาคม มีสภาพความแห้งแล้งเกิดขึ้นทั้ง 3 ระดับ โดยในระดับที่ 1 ของแต่ละเดือนมีค่าเท่ากับ 8.4%, 15.6%, 20.9%, 20.7%, 15.3% และ 6% โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดเกิดขึ้นในเดือนกุมภาพันธ์และต่ำสุดในเดือน พฤษภาคม ในระดับที่ 2 ของ แต่ละเดือนมีค่าเท่ากับ 0.9%, 3.1%, 7.9%, 7.2%, 5% และ 1.3% โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดเกิดขึ้นในเดือนกุมภาพันธ์และต่ำสุดในเดือนธันวาคม และสำหรับในระดับที่ 3 ของแต่ละเดือนมีค่าเท่ากับ 0.1%, 0.2%, 0.5%, 0.6%, 0.4% และ 0.1% โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดเกิดขึ้นในเดือนมีนาคมและต่ำสุดในเดือนธันวาคมและพฤษภาคม

สำหรับสภาพความแห้งแล้งในช่วงฤดูแล้ง (พฤศจิกายน-เมษายน) และความชุ่มชื้นในช่วงฤดูฝน (พฤษภาคม-ตุลาคม) เฉลี่ยทั่วประเทศไทยซึ่งแสดงในภาพที่ 16 และตารางที่ 13 เช่นกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในช่วงฤดูแล้งมีสภาพความแห้งแล้งจากระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 3 เท่ากับ 13.7%, 4% และ 0.3% ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดเกิดขึ้นในระดับที่ 1 โดยสภาพความแห้งแล้งจะพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ รองลงมาคือภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก ตามลำดับ ในขณะที่ในช่วงฤดูฝนมีสภาพความแห้งแล้งจากระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 3 เท่ากับ 1.3%, 0.3% และ 0% ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดเกิดขึ้นในระดับที่ 1 เช่นเดียวกับในฤดูแล้ง โดยสภาพความแห้งแล้งในฤดูฝนนั้นมีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำมาก

สำหรับสภาพความชุ่มชื้นในช่วงฤดูฝนจากระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 5 เท่ากับ 3.5%, 10.9%, 45.7%, 37% และ 1.3% ตามลำดับ โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดเกิดขึ้นในระดับที่ 3 โดยสภาพความชุ่มชื้นในภาคตะวันออกเฉียงเหนือน้อยกว่าภูมิภาคอื่น ๆ และสภาพความชุ่มชื้นจะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจากภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก ตามลำดับ ในขณะที่ในช่วงฤดูแล้งมีสภาพความชุ่มชื้นจากระดับที่ 1 ถึงระดับที่ 5 เท่ากับ 16.9%, 17.3%, 26.2%, 20.3% และ 1.2% โดยเปอร์เซ็นต์สูงสุดเกิดขึ้นในระดับที่ 3 เช่นเดียวกับในฤดูฝน โดยสภาพความชุ่มชื้นในช่วงฤดูแล้งเกิดขึ้นในพื้นที่ป่าไม้ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือบริเวณอุทยานแห่งชาติเขาใหญ่และน้ำหนาวซึ่งมีสภาพความชุ่มชื้นที่มากอย่างเห็นได้ชัดเจน รวมทั้งพื้นที่ป่าไม้ในภาคเหนือและภาคตะวันตก นอกจากนั้นแล้ว บริเวณพื้นที่เกษตรกรรมในเขตชลประทานได้แสดงสภาพความแห้งแล้งที่น้อยกว่าบริเวณอื่น ๆ ในขณะที่ภาคใต้ไม่เกิดสภาพความแห้งแล้ง ทั้งนี้เนื่องจากภาคใต้มีปริมาณฝนและไม่เย็นต้นมากกว่าภูมิภาคอื่น ๆ ของประเทศ (ดูสภาพการใช้ที่ดินในภาพที่ 16 (ต) ประกอบ)

จากผลการจัดระดับความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งสำหรับลุ่มน้ำในประเทศไทยโดยดัชนี MSI ออกเป็น 8 ช่วง และนำผลดังกล่าวไปประเมินสภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งในแต่ละเดือนและแต่ละภูมิภาค พบว่า สามารถประเมินการกระจายตัวของความแห้งแล้งและความชุ่มชื้นที่มีความเหมาะสมทั้งในส่วนของ การกระจายตัวในมิติของเวลาและสถานที่ (Time and Spatial Distribution) ได้อย่างสมเหตุสมผลกับสภาพภูมิประเทศ ภูมิอากาศ และปริมาณฝนที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและสถานที่เช่นกัน ดังนั้น ผลการจัดระดับความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งสำหรับลุ่มน้ำในประเทศไทยโดยดัชนี MSI ออกเป็น 8 ช่วง ดังกล่าว จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการตีความสภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งสำหรับลุ่มน้ำในประเทศไทยได้ต่อไป

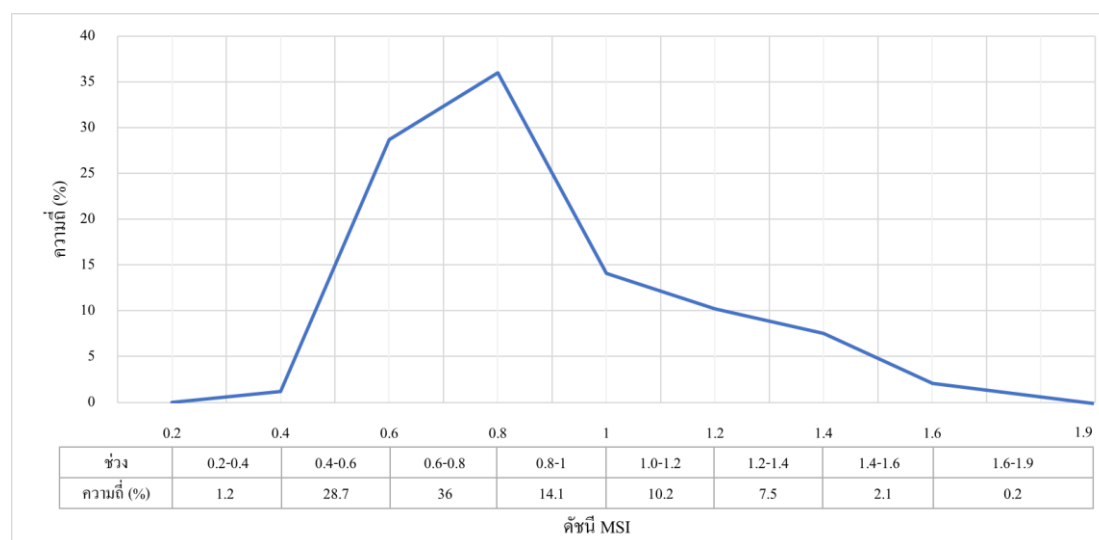
ตารางที่ 13 การกระจายตัวของค่าดัชนี MSI และปริมาณฝนเฉลี่ยในประเทศไทย

เดือน	$0.4 \leq$	$0.6 \leq$	$0.8 \leq$	$1.0 \leq$	$1.2 \leq$	$1.4 \leq$	MSI	ปริมาณฝน เฉลี่ย (มิลลิเมตร)		
	MSI < 0.4	MSI < 0.6	MSI < 0.8	MSI < 1.0	MSI < 1.2	MSI < 1.4			MSI < 1.6	
มกราคม	1.6	18.8	25.4	16	19.3	15.6	3.1	0.2	0.89	31
กุมภาพันธ์	1.7	15.1	20.9	14.1	18.9	20.9	7.9	0.5	0.97	13
มีนาคม	1	13.6	19.4	17.6	19.9	20.7	7.2	0.6	0.97	55
เมษายน	0.6	15.6	22.8	20.6	19.7	15.3	5	0.4	0.92	84
พฤษภาคม	1	23.6	32.9	22.1	13	6	1.3	0.1	0.79	180
มิถุนายน	0.9	29.1	45.6	17.7	5.2	1.3	0.2	0	0.70	158
กรกฎาคม	2.2	37.5	48.8	9.5	1.7	0.3	0	0	0.64	200
สิงหาคม	1.6	39	52.5	6.3	0.5	0.1	0	0	0.63	242
กันยายน	1.2	46.2	48.3	4	0.3	0	0	0	0.61	270
ตุลาคม	0.9	46.6	46.2	5.7	0.5	0.1	0	0	0.62	161
พฤศจิกายน	1.1	34.4	38.9	16.9	7	1.5	0.1	0.1	0.70	69
ธันวาคม	1	24.3	29.9	18.6	16.8	8.4	0.9	0.1	0.81	35
ฤดูแล้ง	1.2	20.3	26.2	17.3	16.9	13.7	4	0.3	0.88	286
ฤดูฝน	1.3	37	45.7	10.9	3.5	1.3	0.3	0	0.67	1,212
เฉลี่ยทั้งปี	1.2	28.7	36	14.1	10.2	7.5	2.1	0.2	0.77	1,498

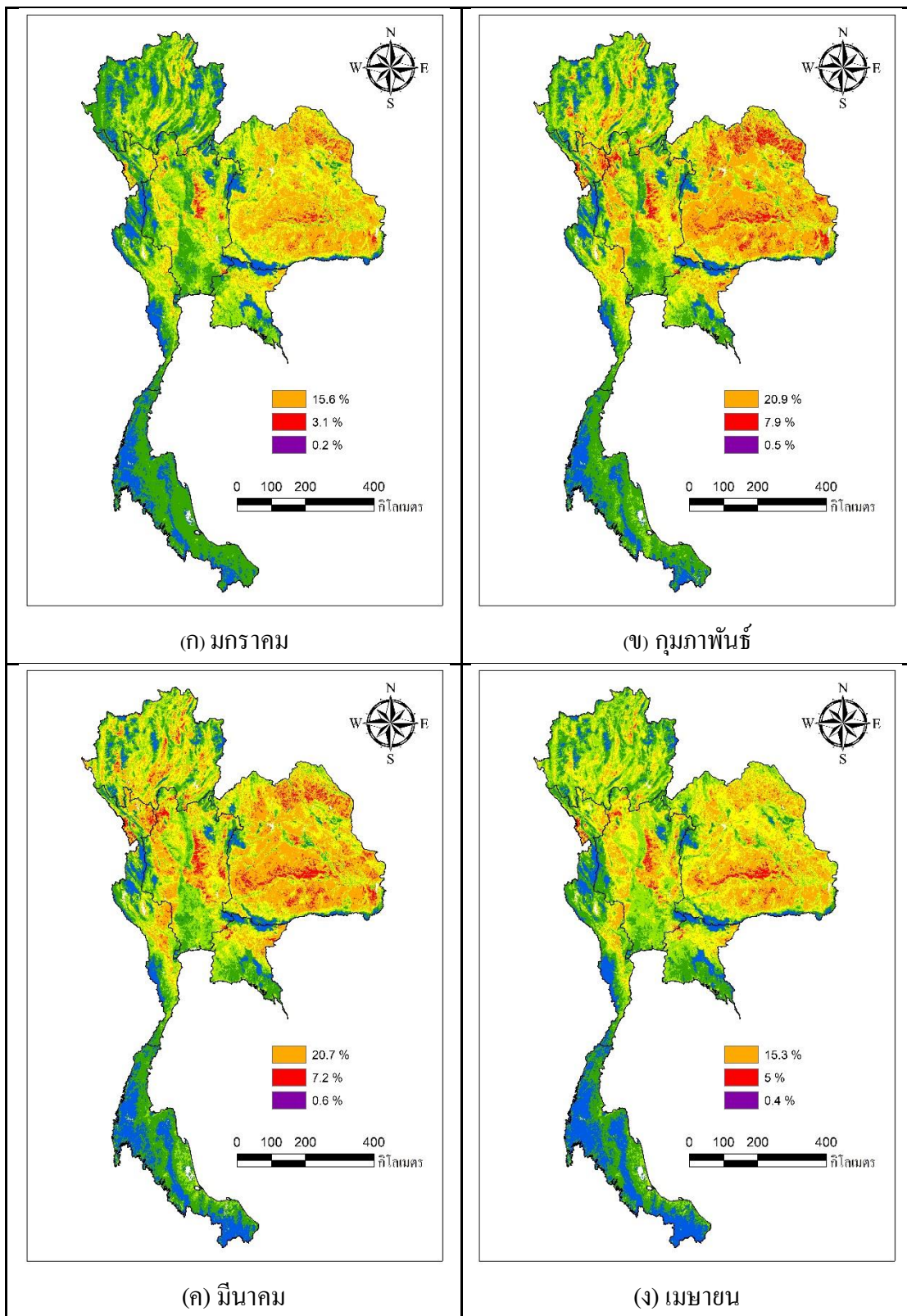
ตารางที่ 14 การกำหนดระดับความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งสำหรับลุ่มน้ำในประเทศไทยโดยดัชนี

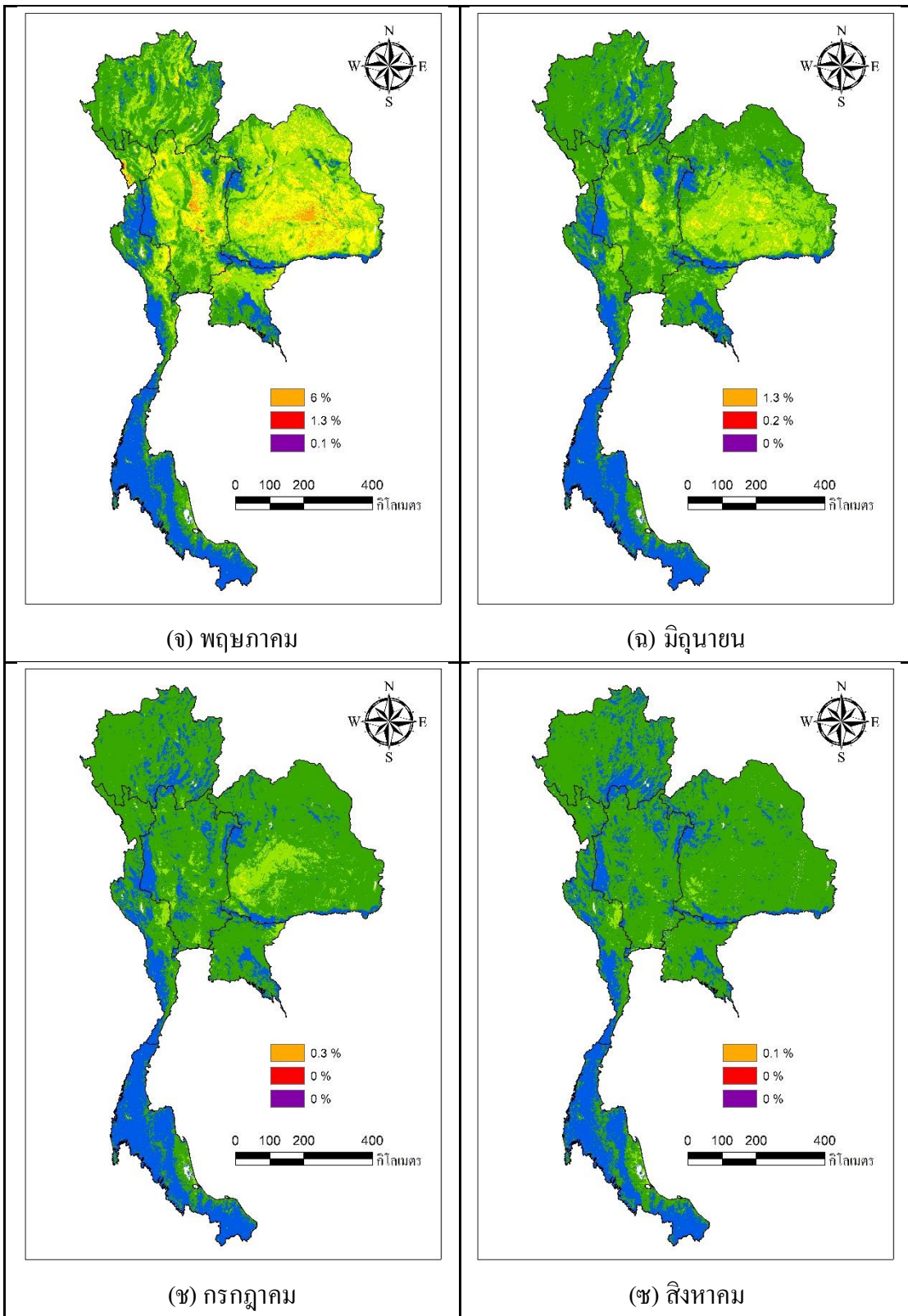
MSI

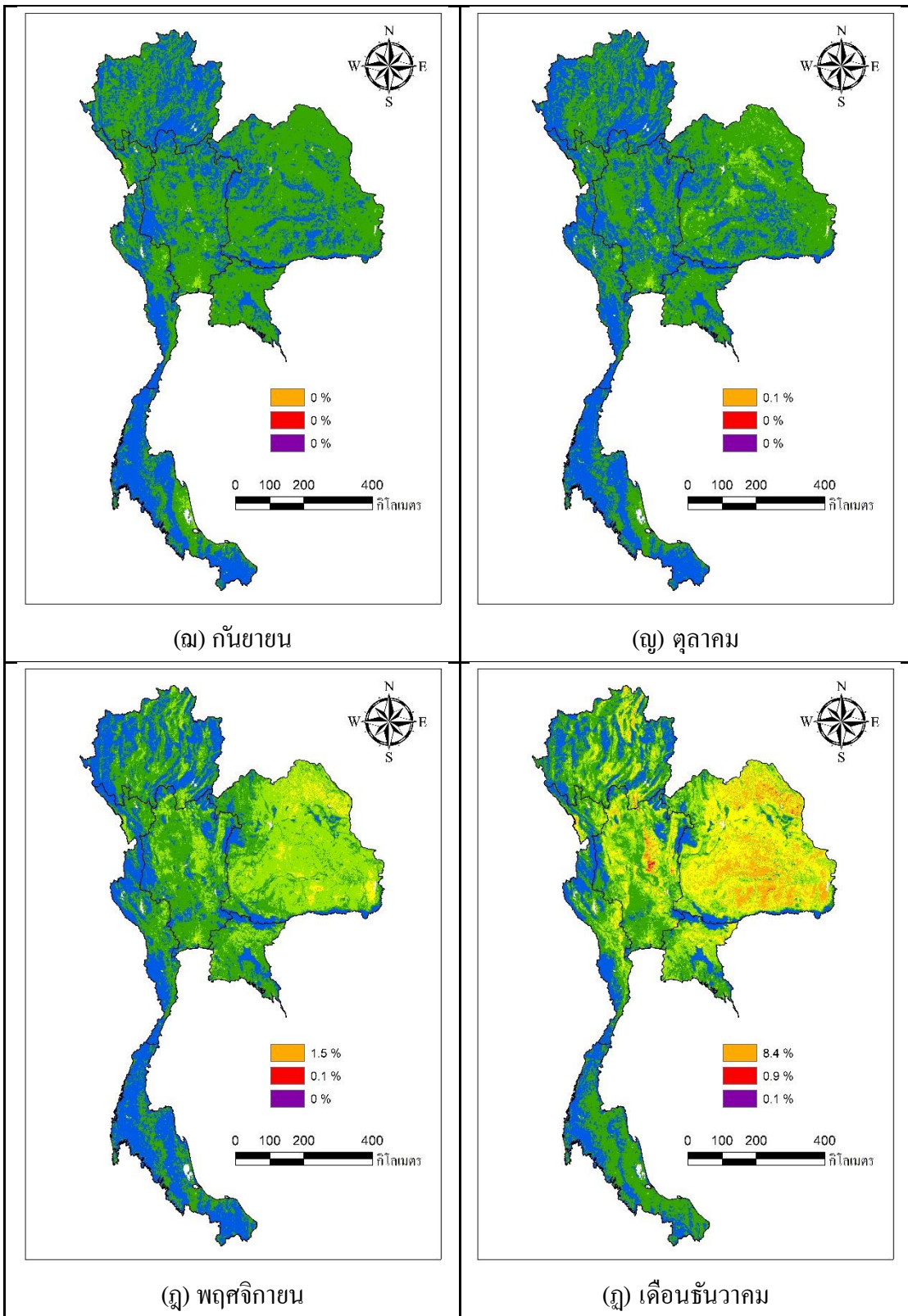
		ช่วงของดัชนี MSI						
ระดับความ	MSI	$0.4 \leq$	$0.6 \leq$	$0.8 \leq$	$1 \leq$	$1.2 \leq$	$1.4 \leq$	MSI
ชุ่มชื้นและ	< 0.4	MSI	MSI	MSI	MSI	MSI	MSI	≥ 1.6
ความแห้ง		< 0.8	< 0.8	< 1	< 1.2	< 1.4	< 1.6	
แล้ง	ชุ่มชื้น ระดับที่ 5	ชุ่มชื้น ระดับที่ 4	ชุ่มชื้น ระดับที่ 3	ชุ่มชื้น ระดับที่ 2	ชุ่มชื้น ระดับที่ 1	แห้งแล้ง ระดับที่ 1	แห้งแล้ง ระดับที่ 2	แห้งแล้ง ระดับที่ 3

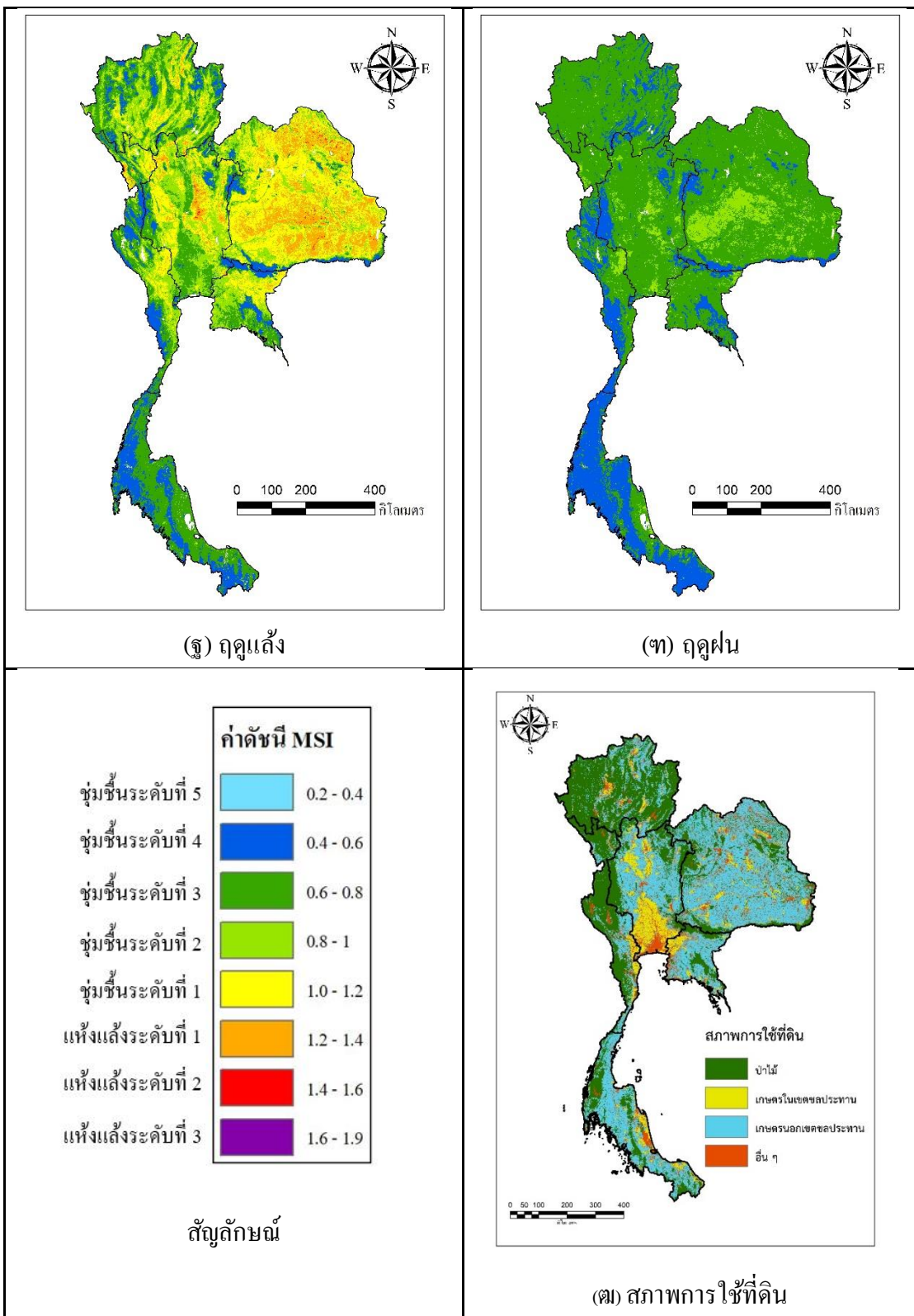


ภาพที่ 15 การแจกแจงความถี่ของดัชนี MSI สำหรับประเทศไทยราย 8 วัน ในระหว่างปี พ.ศ. 2545-2561









ภาพที่ 16 สภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งเฉลี่ยรายเดือนของพื้นที่ลุ่มน้ำในประเทศไทยจากการแบ่งช่วงของดัชนี MSI ตามตารางที่ 14

2.2 ผลการเปรียบเทียบค่าของดัชนี MSI กับสภาพการใช้ที่ดินและปริมาณฝน

เพื่อแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าของดัชนี MSI กับการใช้ที่ดินและปริมาณฝนอย่างชัดเจนมากขึ้น ดังนั้น ในที่นี้จึงได้แสดงการเปรียบเทียบค่าของดัชนี MSI ในแต่ละฤดูกาลตามสภาพการใช้ที่ดินและปริมาณฝนในแต่ละภูมิภาคดังในตารางที่ 15 ซึ่งในตารางดังกล่าวได้ทำแบ่งประเภทการใช้ที่ดินออกเป็น 4 ประเภท คือ พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เกษตรในเขตชลประทาน พื้นที่เกษตรกรรมนอกเขตชลประทาน และพื้นที่อื่นๆ ซึ่งประกอบด้วย พื้นที่ราบลุ่ม พื้นที่เมือง เป็นต้น จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าเฉลี่ยของดัชนี MSI สำหรับการใช้ที่ดินทุกประเภทในภาคใต้มีค่าต่ำกว่าภูมิภาคอื่น ๆ ของประเทศ ซึ่งหมายความว่าภาคใต้มีความชุ่มชื้นมากกว่าภูมิภาคอื่น ๆ ในขณะที่ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่าเฉลี่ยของดัชนี MSI สูงสุดหรือมีความแห้งแล้งมากกว่าภูมิภาคอื่น ๆ ตามด้วยภาคกลาง ภาคเหนือ ภาคตะวันออก และภาคตะวันตก ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบค่าของดัชนี MSI ในภูมิภาคเดียวกันแต่มีการใช้ที่ดินที่แตกต่างกัน พบว่า พื้นที่ป่าไม้ในแต่ละภูมิภาคมีสภาพความชุ่มชื้นมากกว่าการใช้ที่ดินประเภทอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมในเขตชลประทานของภาคกลางบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยามีสภาพความชุ่มชื้นมากกว่าพื้นที่เกษตรกรรมนอกเขตชลประทานอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับพื้นที่เกษตรกรรมทั้งสองประเภทในภูมิภาคอื่น ๆ มีความใกล้เคียงกันจนไม่สามารถแยกให้เห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจน นอกจากนั้นแล้ว ในตารางดังกล่าวได้แสดงข้อมูลปริมาณฝนเฉลี่ยในแต่ละภูมิภาคและฤดูกาล ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนว่า ปริมาณฝนมีอิทธิพลโดยตรงต่อการเกิดสภาพความแห้งแล้งในฤดูแล้งและสภาพความชุ่มชื้นในฤดูฝน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ภาคใต้ซึ่งมีปริมาณฝนมากกว่าภูมิภาคอื่น ๆ จึงเป็นผลให้ภาคใต้มีความชุ่มชื้นมากกว่าทุกภูมิภาคและแม้กระทั่งในช่วงฤดูแล้งก็ไม่ประสบสภาวะความแห้งแล้ง

ตารางที่ 15 ค่าของดัชนี MSI เฉลี่ยรายฤดูกาลและรายปีในแต่ละประเภทการใช้ที่ดินของแต่ละภูมิภาค

ภูมิภาค	ภูมิภาค	ดัชนี MSI เฉลี่ย				ค่าเฉลี่ย	ความลึก ฝนเฉลี่ย (มม.)	
		ป่าไม้	เกษตร ในเขต ชลประทาน	เกษตร นอกเขต ชลประทาน	อื่น ๆ			
เหนือ	สัดส่วนพื้นที่ (%)	70.8	2.6	20.6	6.1			
	ฤดูแล้ง	0.73	0.92	0.92	0.91	0.78	168	
	ฤดูฝน	0.63	0.71	0.69	0.71	0.66	1152	
	รายปี	0.68	0.82	0.81	0.81	0.72	1320	
กลาง	สัดส่วนพื้นที่ (%)	23.5	20.4	42.0	14.2			
	ฤดูแล้ง	0.73	0.84	0.98	0.89	0.86	384	
	ฤดูฝน	0.61	0.7	0.73	0.74	0.68	1338	
	รายปี	0.67	0.77	0.86	0.82	0.77	1722	
ตะวันออก	สัดส่วนพื้นที่ (%)	22.3	9.5	51.9	16.3			
	ฤดูแล้ง	0.59	0.82	0.85	0.87	0.78	246	
	ฤดูฝน	0.6	0.7	0.68	0.72	0.66	1536	
ตะวันออก	รายปี	0.59	0.76	0.77	0.80	0.72	1782	
	เหนือ	สัดส่วนพื้นที่ (%)	18.4	3.7	64.1	13.8		
		ฤดูแล้ง	0.82	1.07	1.08	1.04	1.02	144
ฤดูฝน		0.64	0.7	0.74	0.74	0.72	1284	
รายปี		0.73	0.90	0.91	0.89	0.87	1428	
ตะวันตก	สัดส่วนพื้นที่ (%)	63.1	5.5	22.1	9.2			
	ฤดูแล้ง	0.69	0.84	0.9	0.89	0.76	192	
	ฤดูฝน	0.61	0.69	0.72	0.72	0.66	1074	
	รายปี	0.65	0.77	0.81	0.81	0.71	1266	
ใต้	สัดส่วนพื้นที่ (%)	28.5	5.9	54.1	11.4			
	ฤดูแล้ง	0.54	0.66	0.61	0.68	0.6	1056	
	ฤดูฝน	0.53	0.64	0.57	0.63	0.58	1194	
	รายปี	0.54	0.65	0.59	0.66	0.59	2250	

ประเทศ					
ไทย	รายปี	0.65	0.76	0.79	0.80

3. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี MSI กับความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา

แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และ FLEX-TOPO นั้น นอกจากสามารถใช้เพื่อประเมินน้ำท่าแล้วยังสามารถประเมินความชื้นในดิน (Unsaturated Soil Moisture, Su) สำหรับในทุกกลุ่มน้ำย่อยรวมทั้งที่สถานีวัดน้ำท่าที่ทำการศึกษา โดยแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่ทำการสอบเทียบเฉพาะที่สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำสุดของแม่น้ำชีคือที่สถานีวัดท่า E.20 จะได้กราฟน้ำท่ารวมทั้งความชื้นในดิน (Su) ที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A จำนวน 12 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.73, E.72, E.32A, E.5, E.23, E.6C, E.21, E.9, E.66C, E.18, E.54 และ E.70 แต่สำหรับแบบจำลอง FLEX-TOPO จำเป็นต้องทำการสอบเทียบแบบจำลองที่ทุกสถานีวัดน้ำที่เลือกพิจารณา เพื่อให้ได้กราฟน้ำท่าและความชื้นในดิน (Su) ที่แต่ละสถานีวัดน้ำท่าของทั้ง 13 สถานี จากนั้นจึงนำค่าความชื้นในดิน (Su) ที่ได้จากแบบจำลอง ทั้ง 2 แบบจำลอง ในระหว่างปี พ.ศ. 2545 – 2558 ไปเปรียบเทียบกับค่าดัชนี MSI ในช่วงเวลาเดียวกัน ที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 13 สถานี

การเปรียบเทียบความเข้ากันได้ระหว่างความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง กับค่าของดัชนี MSI พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination, R^2) และค่า NSE ดังแสดงในตารางที่ 16 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ผลการเปรียบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำ E.20A ซึ่งเป็นสถานีที่ทำการสอบเทียบโดยทั้ง 2 แบบจำลอง พบว่า แบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ให้ค่า R^2 เท่ากับ 0.39 และ 0.67 ตามลำดับ และค่า NSE เท่ากับ 0.25 และ 0.64 ตามลำดับ โดยแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ให้ค่า NSE สูงกว่าแบบจำลอง FLEX-TOPO ถึง 156%

ดังได้กล่าวแล้วว่าแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ซึ่งทำการสอบเทียบแบบจำลองเฉพาะที่สถานี E.20A เท่านั้น และจะได้ค่าความชื้นในดินที่เป็นผลพลอยได้ในอีก 12 สถานี ด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A ในขณะที่แบบจำลอง FLEX-TOPO ต้องดำเนินการในทั้ง 13

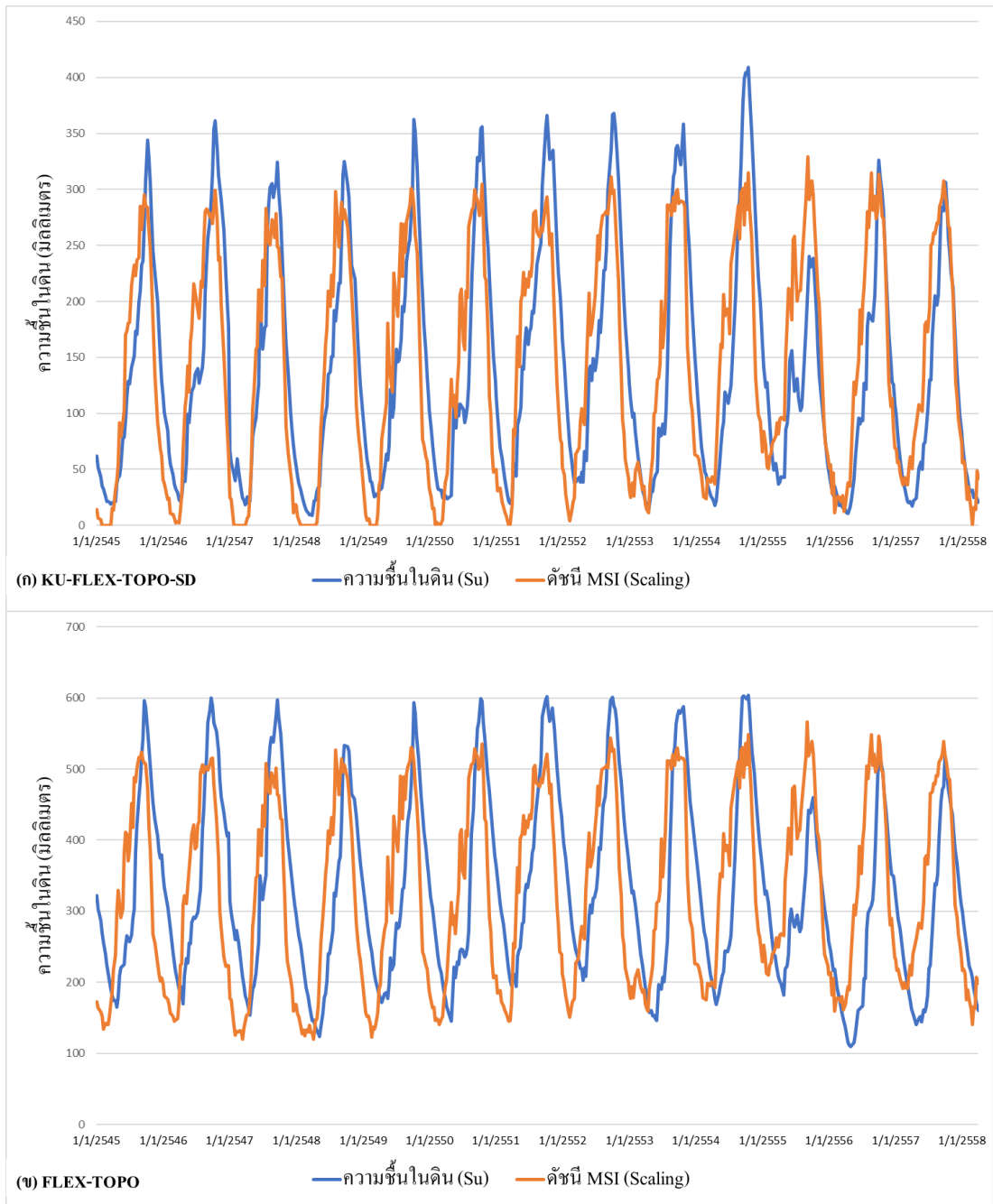
สถานี อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบความเข้ากันได้ระหว่างความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง กับค่าของดัชนี MSI พบว่า แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD กลับให้ผลดีกว่าแบบจำลอง FLEX-TOPO กล่าวคือ แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ให้ค่า NSE โดยเฉลี่ยทั้ง 13 สถานี ที่สูงกว่าค่า NSE ที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO ประมาณ 26.66% ทั้งนี้แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ให้ค่า NSE ที่สูงกว่าแบบจำลอง FLEX-TOPO ใน 7 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.73, E.23, E.6C, E.9, E.66A, E.54, E.70 และ E.20A โดยให้ค่า NSE ที่สูงกว่าเท่ากับ 82.76%, 19.61%, 15.56%, 65.79%, 3.39%, 64.52%, และ 2.04% ตามลำดับ โดยสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้มีพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 251, 6, 282, 378, 10, 878, 31, 879, 1548 และ 2,647 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ ในขณะที่แบบจำลอง FLEX-TOPO ให้ค่า NSE ที่สูงกว่าแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ใน 5 สถานี ซึ่งประกอบด้วยสถานีวัดน้ำท่า E.72, E.32A, E.5, E.21 และ E.18 โดยให้ค่า NSE ที่สูงกว่าเท่ากับ 6.9%, 25%, 3.51%, 11.43% และ 16.22% ตามลำดับ โดยสถานีวัดน้ำท่าเหล่านี้มีพื้นที่ลุ่มน้ำเท่ากับ 323, 2,906, 4,207, 87,77 และ 41,187 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้ ความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง เข้ากันได้ดีกับดัชนี MSI ในช่วงฤดูแล้งมากกว่าในช่วงฤดูฝนอย่างเห็นได้ชัดเจนโดยพิจารณาจาก R^2 ที่มีค่าในช่วงฤดูแล้งที่สูงกว่าในช่วงฤดูฝน ทั้งนี้เนื่องจากในช่วงฤดูแล้งมีปริมาณฝนน้อย ดังนั้น ความชื้นในดินจึงค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่องในทำนองเดียวกับการลดลงของดัชนี MSI ในขณะที่ค่า MSI ในช่วงฤดูฝนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องจากปริมาณฝนที่ตกลงมา อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินอาจมีความแตกต่างกัน กล่าวคือ ดัชนี MSI เป็นดัชนีที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในระดับใบพืชแต่ความชื้นในดินเป็นการเปลี่ยนแปลงในระดับของความชื้นในชั้นรากพืช

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.20A แสดงดังในภาพที่ 17 ซึ่งในภาพดังกล่าวได้แสดง (ก) ความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD และค่าดัชนี MSI หลังการปรับสเกล (ข) ความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และค่าดัชนี MSI หลังการปรับสเกล สำหรับการเปรียบเทียบดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง ที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือของสถานีวัดน้ำท่า E.20A จำนวน 12 สถานี แสดงดังในภาคผนวกที่ ข1 ถึง ข12

ตารางที่ 16 ค่าทางสถิติที่ได้จากการเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI กับความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่เลือกพิจารณา

สถานีวัดน้ำท่า	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	FLEX-TOPO			KU-FLEX-TOPO-SD			% ความแตกต่าง		
		สัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R ²)			สัมประสิทธิ์การตัดสิ้นใจ (R ²)					
		NSE			NSE					
			ฤดูแล้ง	ฤดูฝน		รายปี	ฤดูแล้ง		ฤดูฝน	รายปี
E.73	251	0.29	0.72	0.29	0.42	0.53	0.78	0.23	0.57	-82.76
E.72	323	0.58	0.76	0.18	0.62	0.54	0.72	0.14	0.57	6.9
E.32A	2,906	0.72	0.83	0.31	0.74	0.54	0.77	0.22	0.58	25
E.5	4,207	0.57	0.81	0.4	0.62	0.55	0.79	0.31	0.59	3.51
E.23	6,282	0.51	0.81	0.58	0.57	0.61	0.83	0.5	0.64	-19.61
E.6C	378	0.45	0.74	0.44	0.53	0.52	0.72	0.36	0.55	-15.56
E.21	8,777	0.7	0.88	0.65	0.72	0.62	0.83	0.56	0.65	11.43
E.9	10,878	0.38	0.78	0.63	0.48	0.63	0.84	0.6	0.66	-65.79
E.66A	31,879	0.59	0.81	0.67	0.63	0.61	0.82	0.63	0.65	-3.39
E.18	41,187	0.74	0.85	0.7	0.76	0.62	0.81	0.65	0.65	16.22
E.54	1,548	0.31	0.65	0.54	0.43	0.51	0.69	0.54	0.57	-64.52
E.70	2,647	0.49	0.71	0.61	0.56	0.5	0.7	0.58	0.56	-2.04
E.20A	47,800	0.25	0.69	0.66	0.39	0.64	0.81	0.7	0.67	-156
เฉลี่ย	12,236	0.51	0.77	0.51	0.57	0.57	0.78	0.46	0.61	-26.66

หมายเหตุ: % ความแตกต่างของค่า NSE สองแบบจำลองคิดเทียบกับค่า NSE ที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO



ภาพที่ 17 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.20A

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการศึกษา

แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ได้รับการพัฒนาจากแบบจำลอง FLEX-TOPO ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับการพิสูจน์ว่ามีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าได้อย่างถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดในพื้นที่ลุ่มน้ำของหลาย ๆ ประเทศ (Gao et al., 2013) โดยแบบจำลอง FLEX-TOPO มีจุดเด่นคือมีการนำลักษณะสภาพภูมิประเทศมาใช้แบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำท่าให้แบบจำลองสามารถประเมินน้ำท่าได้ถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง FLEX-TOPO เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบลัมพ์ (Lumped Rainfall-Runoff Model) จึงสามารถประเมินน้ำท่าได้เฉพาะที่สถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้พัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ให้เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัว (Semi-Distributed Rainfall-Runoff Model) ที่สามารถประเมินน้ำท่าได้ทั้งที่สถานีวัดน้ำท่าที่สอบเทียบแบบจำลองและที่จุดท้ายน้ำของทุกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง โดยแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สามารถสอบเทียบแบบจำลองได้โดยอัตโนมัติโดยใช้โปรแกรม MOSCEM เช่นเดียวกับแบบจำลอง FLEX-TOPO

จากการตรวจสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD โดยใช้ลุ่มน้ำซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษา พบว่า แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สามารถประเมินน้ำท่าที่สถานี E.20A ซึ่งมีพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่คือ 47,800 ตารางกิโลเมตร ได้อย่างถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด รวมทั้งได้ความถูกต้องมากกว่าแบบจำลอง FLEX-TOPO นอกจากนั้นแล้ว แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สามารถประเมินน้ำท่าได้ที่สถานีวัดน้ำท่าด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่า E.20A อีกจำนวน 12 สถานี โดยไม่ต้องทำการสอบเทียบที่สถานีเหล่านั้น ในขณะที่แบบจำลอง FLEX-TOPO จำเป็นต้องทำการสอบเทียบในแต่ละสถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้น จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองในการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 12 สถานี พบว่า แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD สามารถประเมินน้ำท่าได้ใกล้เคียงกับข้อมูลตรวจวัดมากกว่าผลการประเมินน้ำท่าที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง FLEX-TOPO ที่สถานีวัดน้ำท่า 5 สถานี ที่อยู่ด้านท้ายน้ำทั้งหมด ในขณะที่แบบจำลอง FLEX-TOPO มีความสามารถในการประเมินน้ำท่าได้ถูกต้องกว่าที่สถานีวัดน้ำท่า 7 สถานี ที่อยู่ด้านเหนือน้ำทั้งหมด

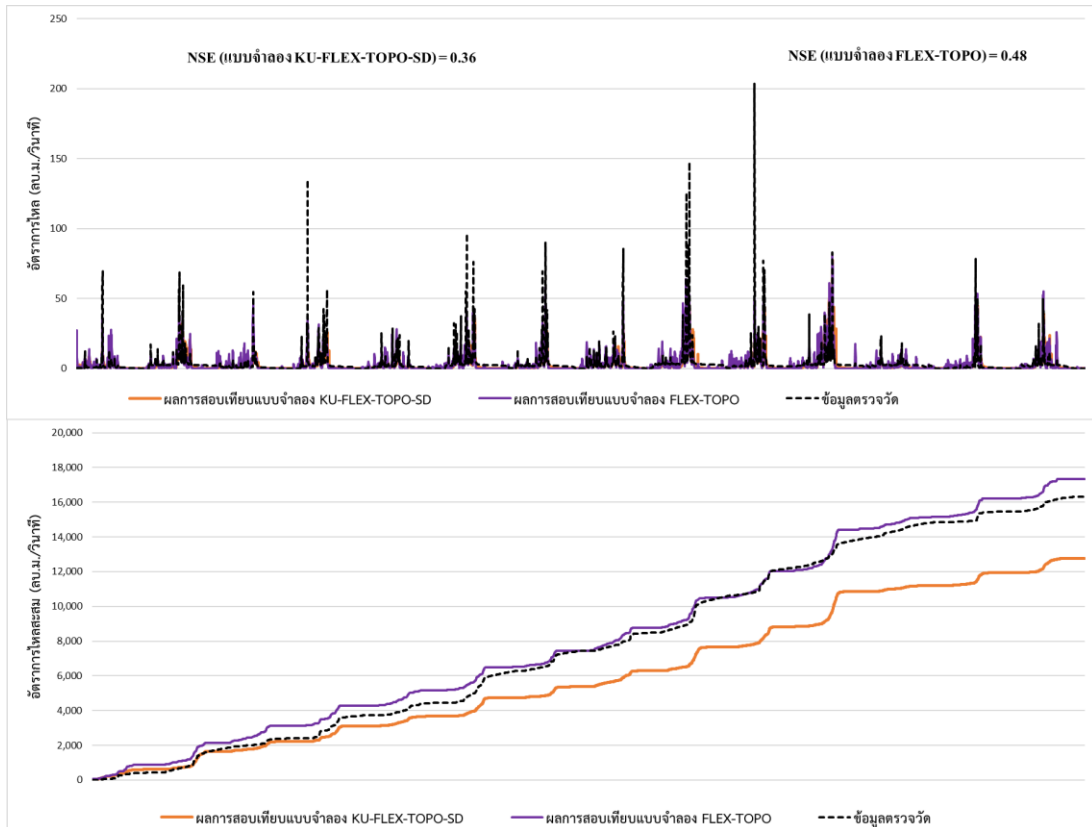
ในการศึกษานี้ได้มีการนำดัชนี MSI ราย 8 วัน ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2545-2561 มาใช้ประเมินสภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำของประเทศไทย และได้พบว่าค่าของดัชนี MSI ที่น้อยกว่า 1.2 เป็นค่าที่เหมาะสมที่ใช้กำหนดสภาพความชุ่มชื้นของพื้นที่ลุ่มน้ำในประเทศไทย ในขณะที่ MSI ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1.2 เป็นค่าที่ใช้กำหนดสภาพความแห้งแล้ง ทั้งนี้ สภาพความชุ่มชื้นถูกแบ่งออกเป็น 5 ช่วง และสภาพความแห้งแล้งถูกแบ่งออกเป็น 3 ช่วง โดยแต่ละช่วงมีค่าแตกต่างกันเท่ากับ 0.2 เมื่อใช้ช่วงดังกล่าวกำหนดความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งแล้วนำไปประยุกต์ใช้กับลุ่มน้ำในประเทศไทยในช่วงเวลาทั้ง 12 เดือน พบว่า มีความสอดคล้องกับสภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งในทุกช่วงเวลาและทุกพื้นที่ลุ่มน้ำในภาพรวม รวมทั้งมีความสอดคล้องกับสภาพการใช้ที่ดินและปริมาณฝนที่เปลี่ยนแปลงไป

นอกจากนั้นแล้ว ผลการศึกษาพบว่า ความชื้นในดิน (Unsaturated Soil Moisture, S_u) ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานี E.20A โดยแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD มีความสัมพันธ์กับดัชนี MSI มากกว่าที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO เป็นอย่างมาก ในขณะที่ความชื้นในดินที่สถานีวัดน้ำท่าจำนวน 12 สถานี ที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD มีความสัมพันธ์กับดัชนี MSI โดยเฉลี่ยมากกว่าที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO เล็กน้อย

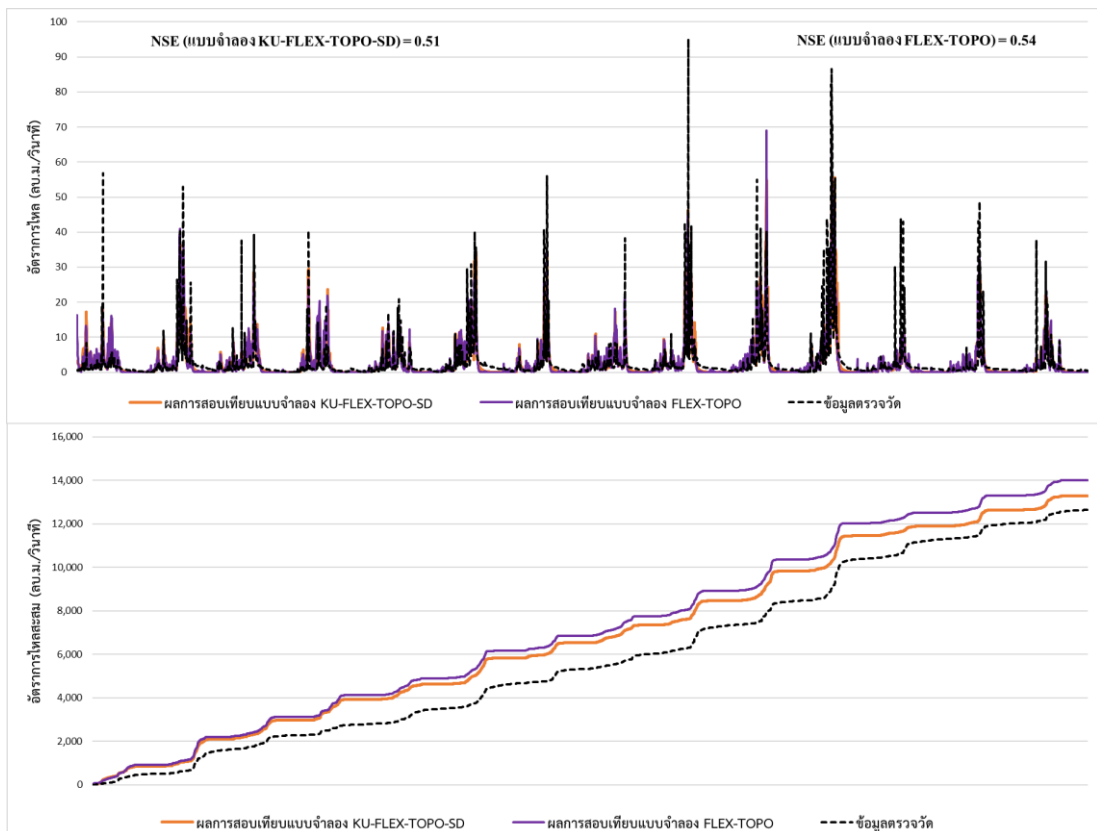
จากผลการศึกษาที่ได้ทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ที่ได้รับการพัฒนาในการศึกษานี้เป็นแบบจำลองที่มีศักยภาพในการประเมินน้ำท่าทั้งที่สถานีที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองและที่ลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง รวมทั้งข้อมูลความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD มีความสัมพันธ์ที่ดีกับดัชนี MSI ที่ได้รับการพิสูจน์ในการศึกษานี้ว่ามีความสามารถในการตรวจสอบสภาพความชุ่มชื้นและความแห้งแล้งให้กับพื้นที่ ลุ่มน้ำของประเทศไทย อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ควรได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมให้สามารถประเมินน้ำท่าได้ถูกต้องมากขึ้นสำหรับลุ่มน้ำที่มีพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดเล็กเพื่อให้สามารถนำแบบจำลอง KU-FLEX-TOPO-SD ไปใช้งานในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำทุกขนาดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

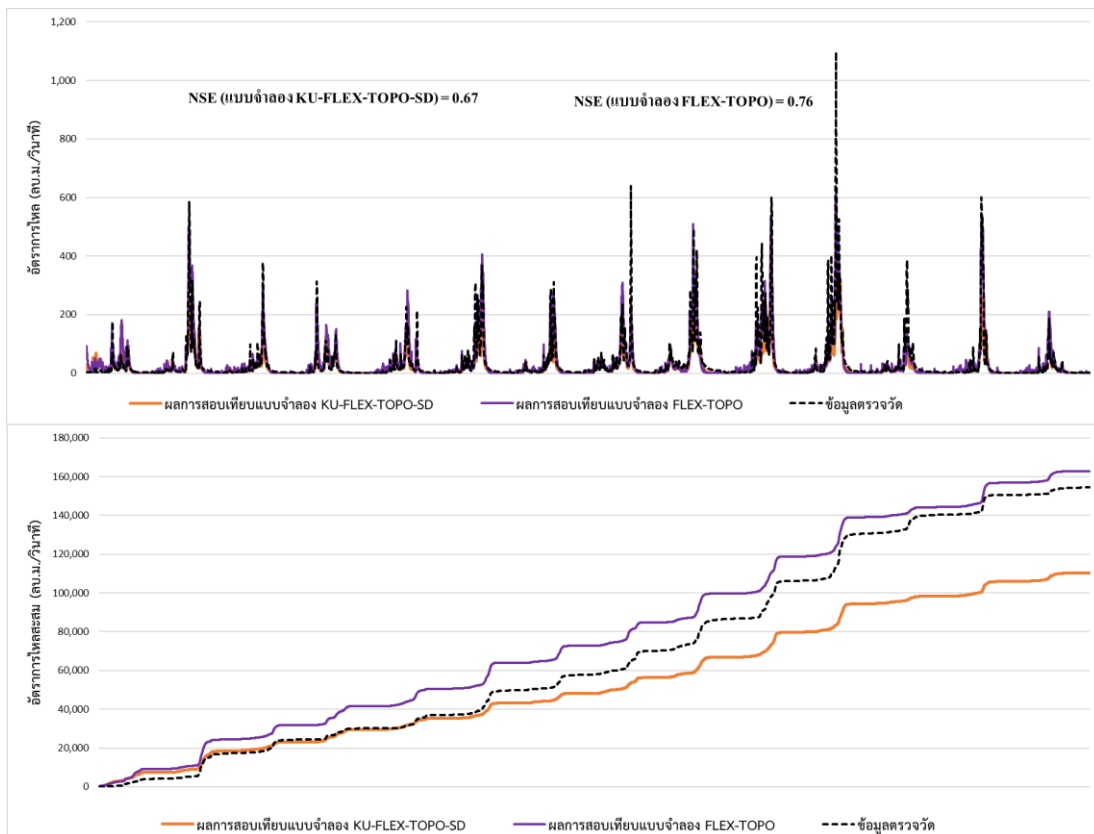
ภาคผนวก



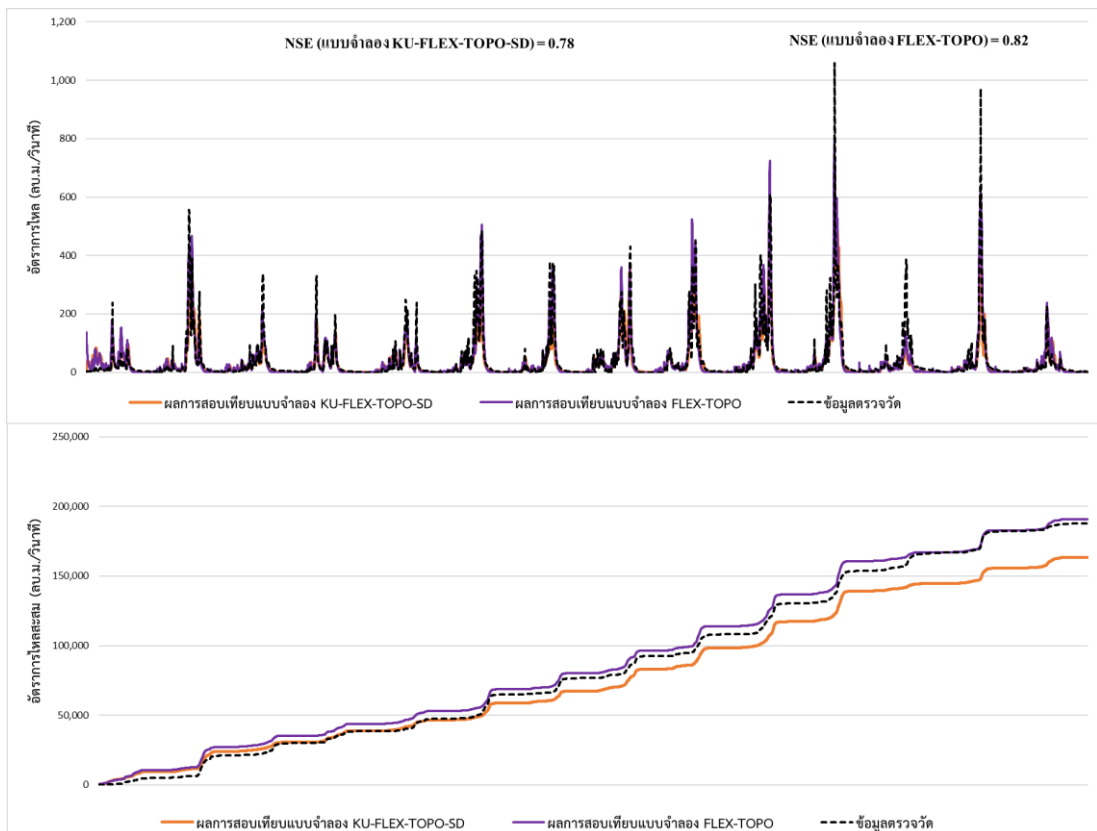
ภาพที่ 18 การเปรียบเทียบผลการประเมินนำ้ทำจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัด
นำ้ทำ E.73



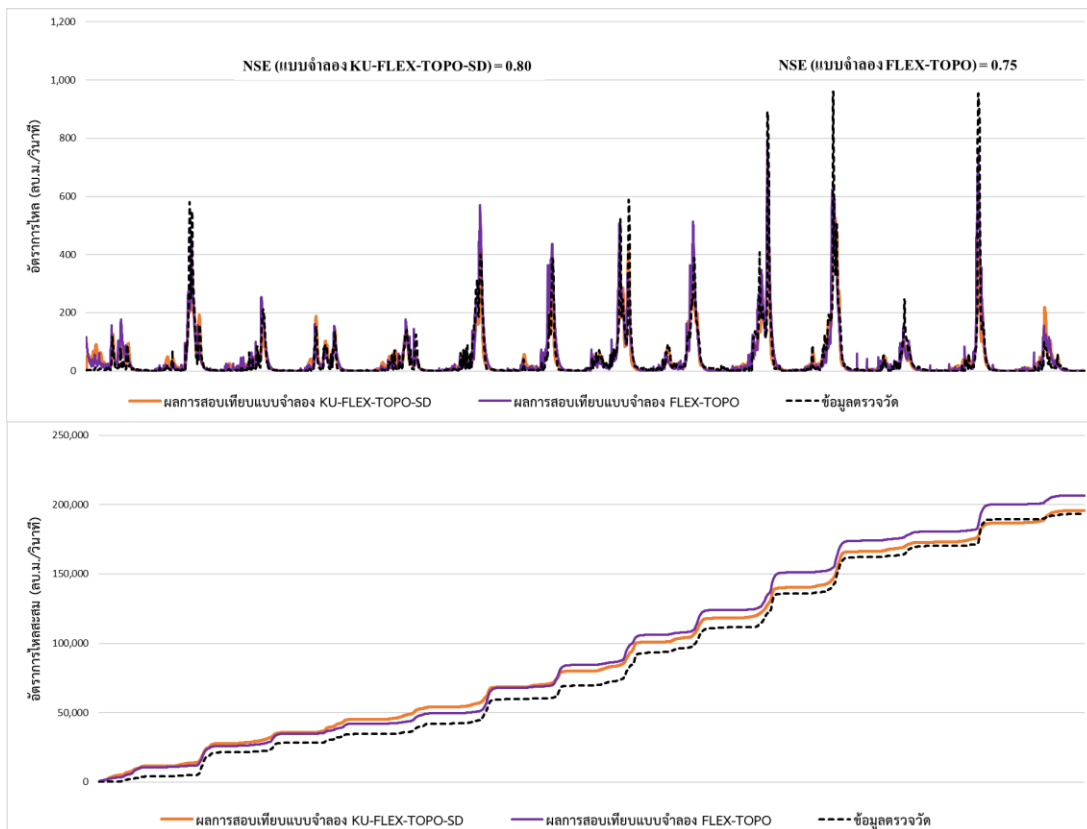
ภาพที่ 19 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.72



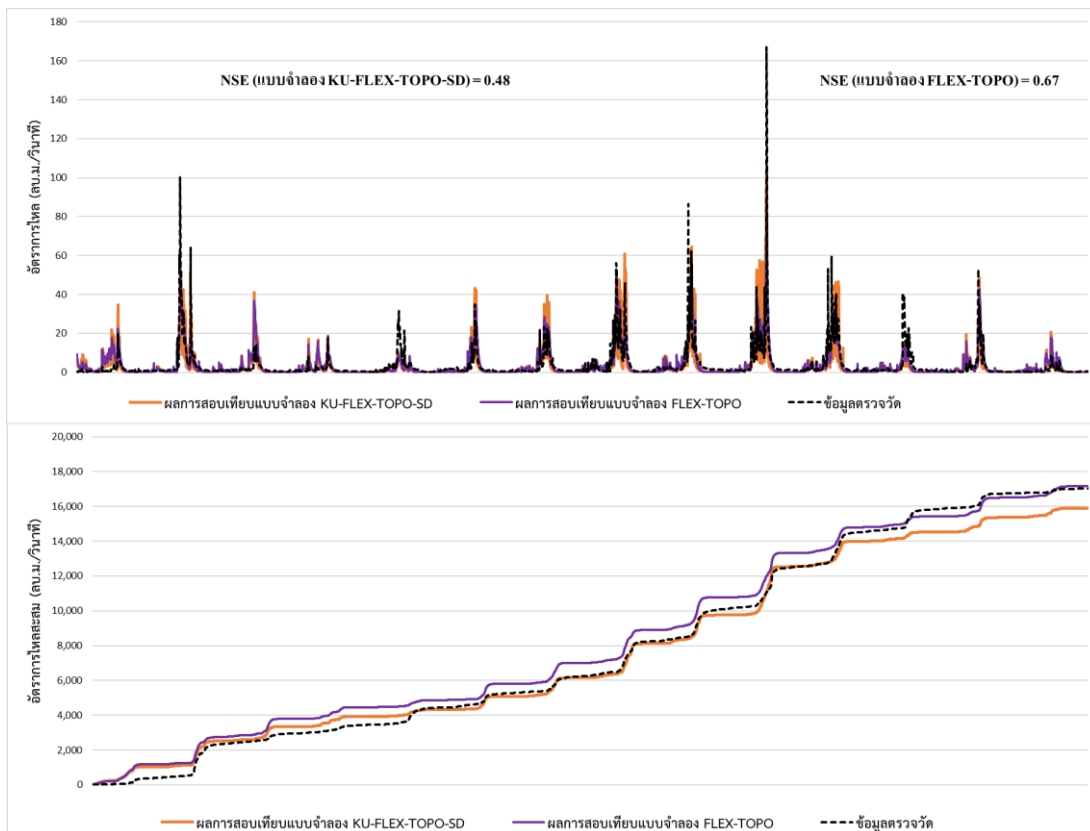
ภาพที่ 20 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.32A



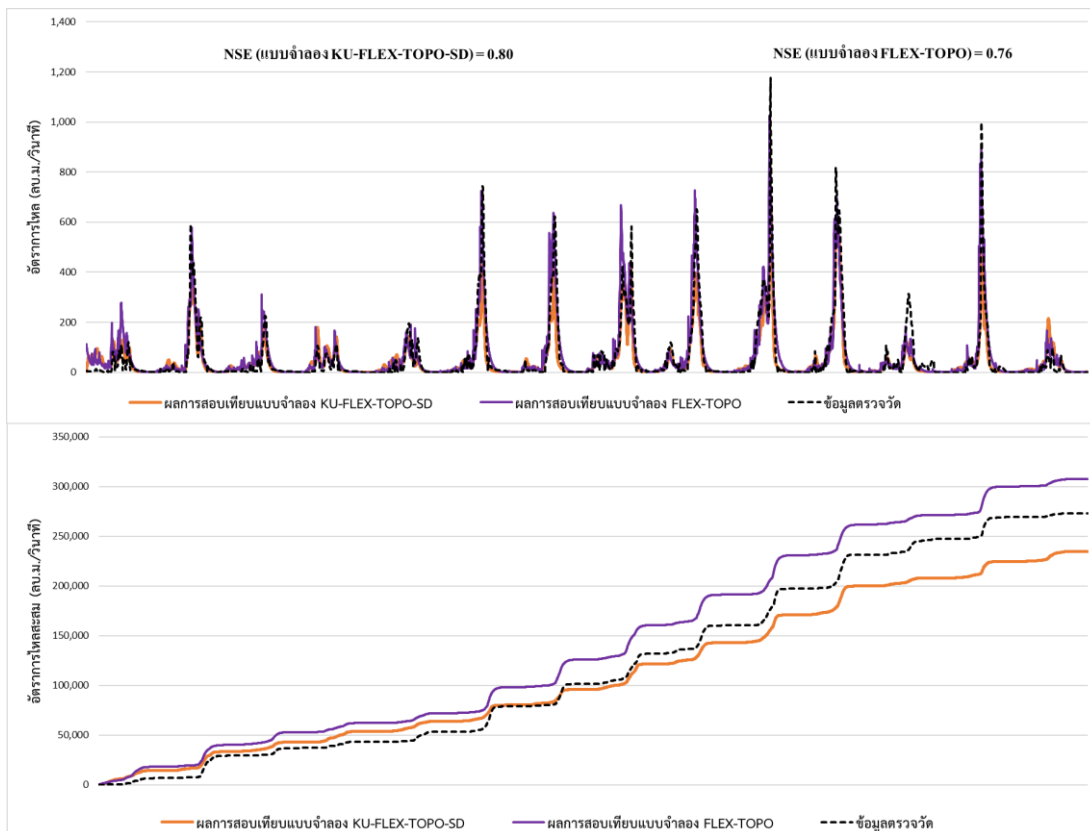
ภาพที่ 21 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.5



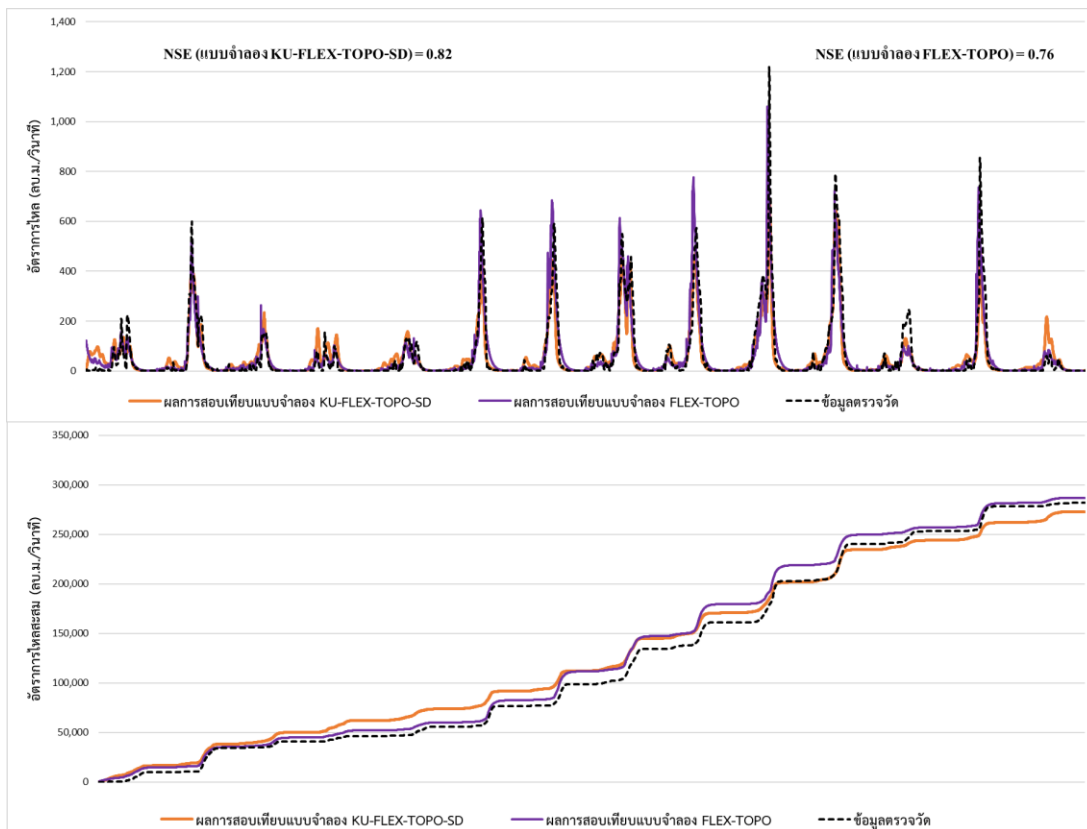
ภาพที่ 22 การเปรียบเทียบผลการประเมินนำ้ทำจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดนำ้ทำ E.23



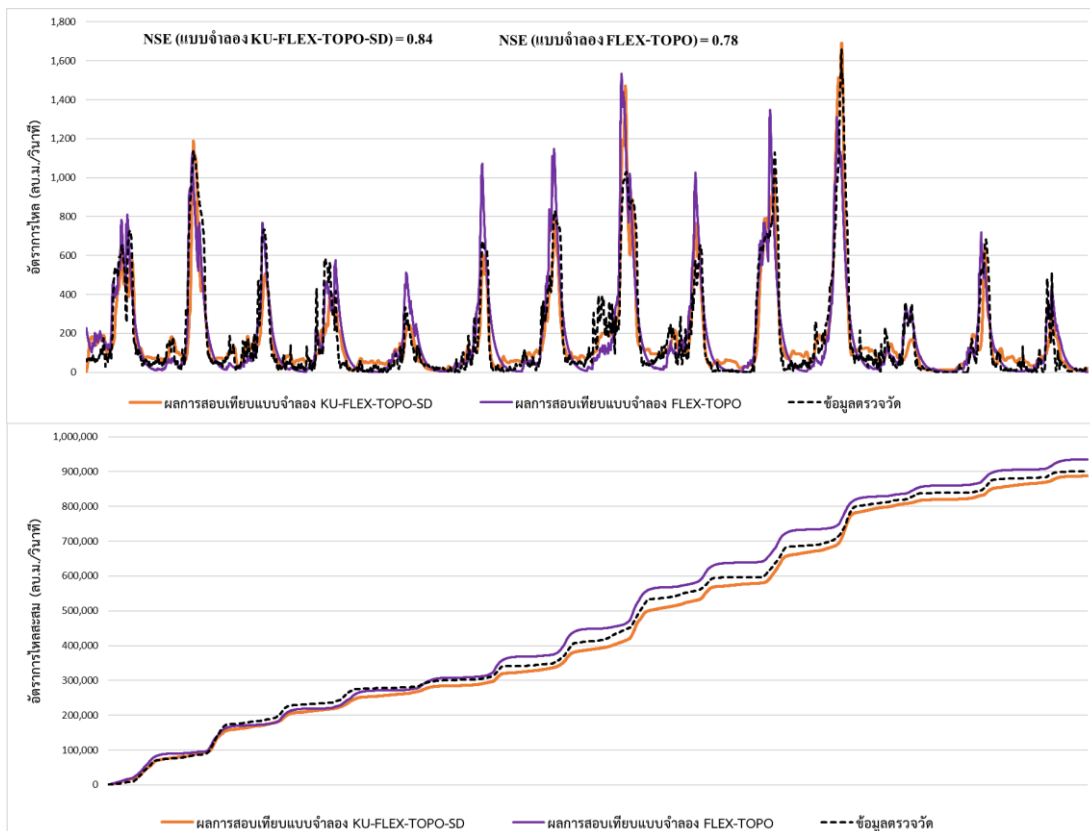
ภาพที่ 23 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.6C



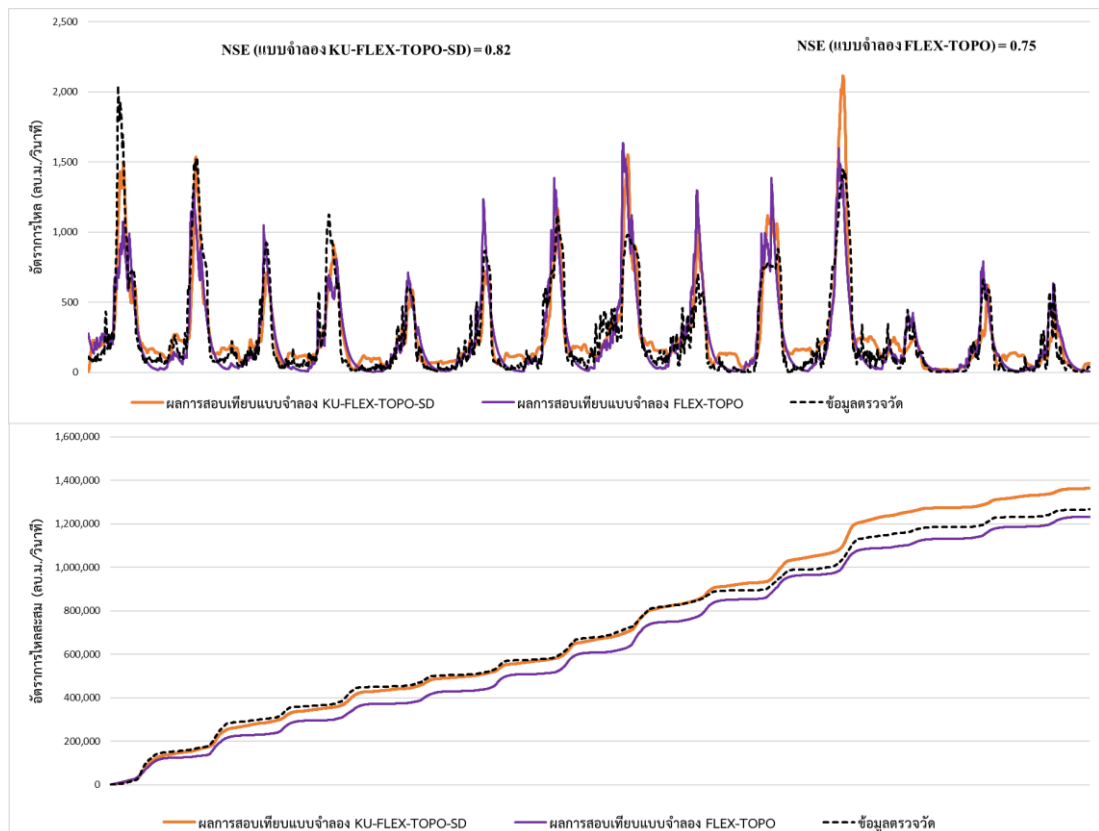
ภาพที่ 24 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.21



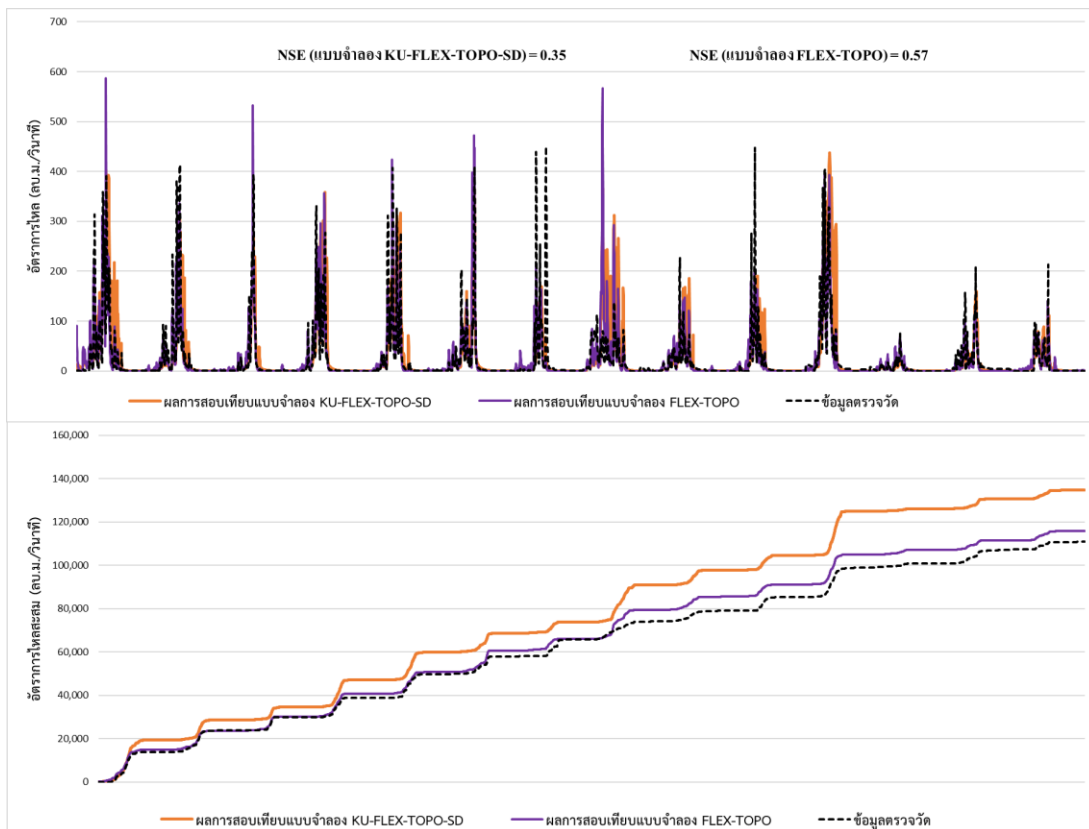
ภาพที่ 25 การเปรียบเทียบผลการประเมินนำ้ทำจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดนำ้ทำ E.9



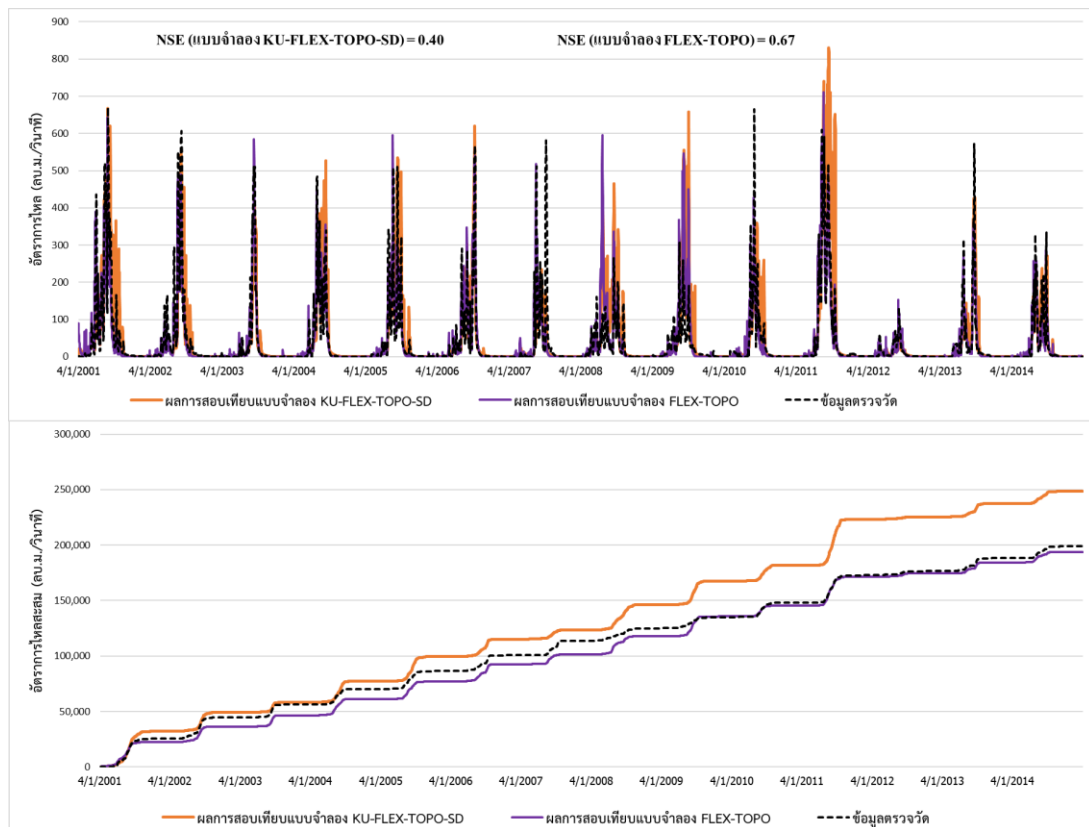
ภาพที่ 26 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.66A



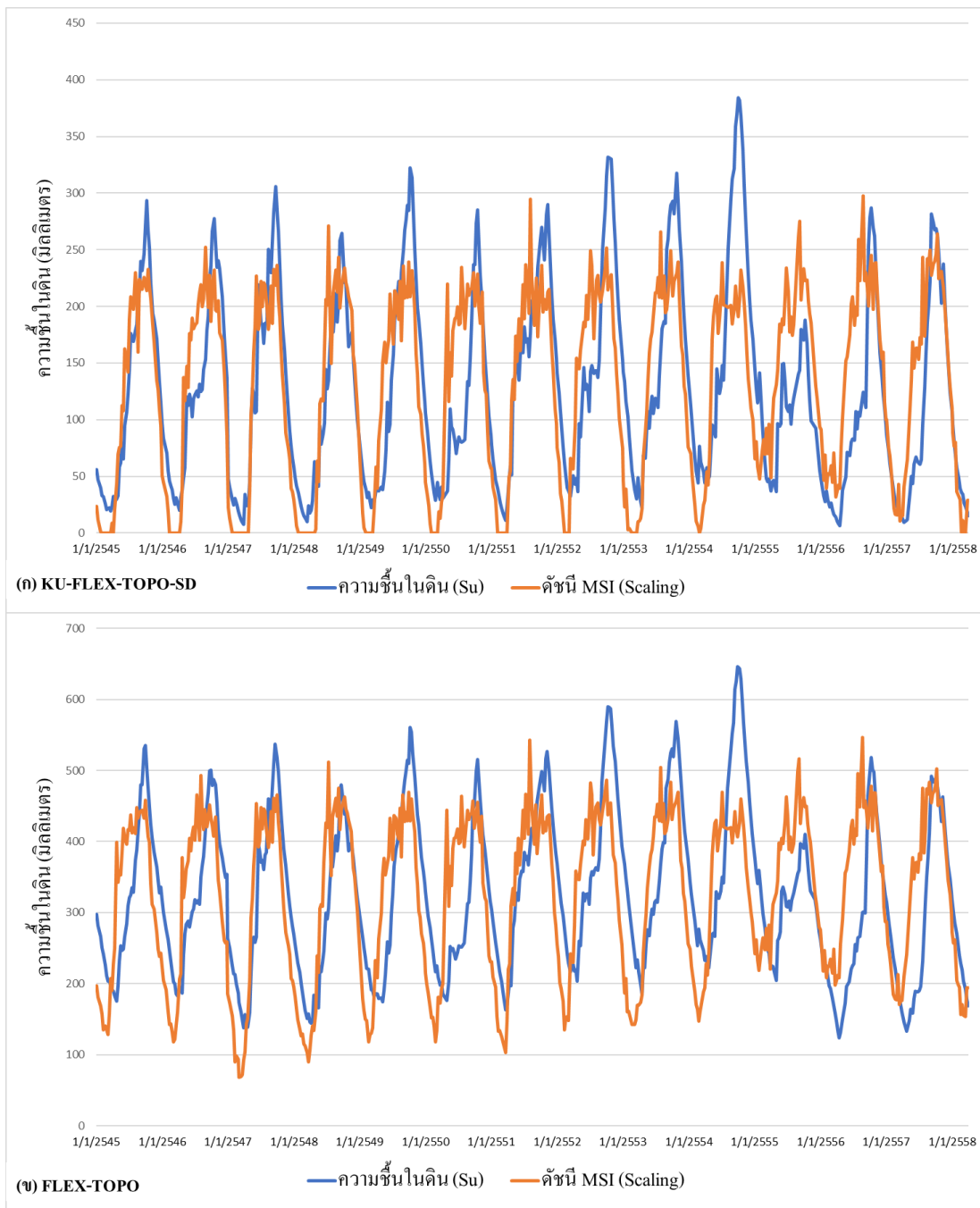
ภาพที่ 27 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.18



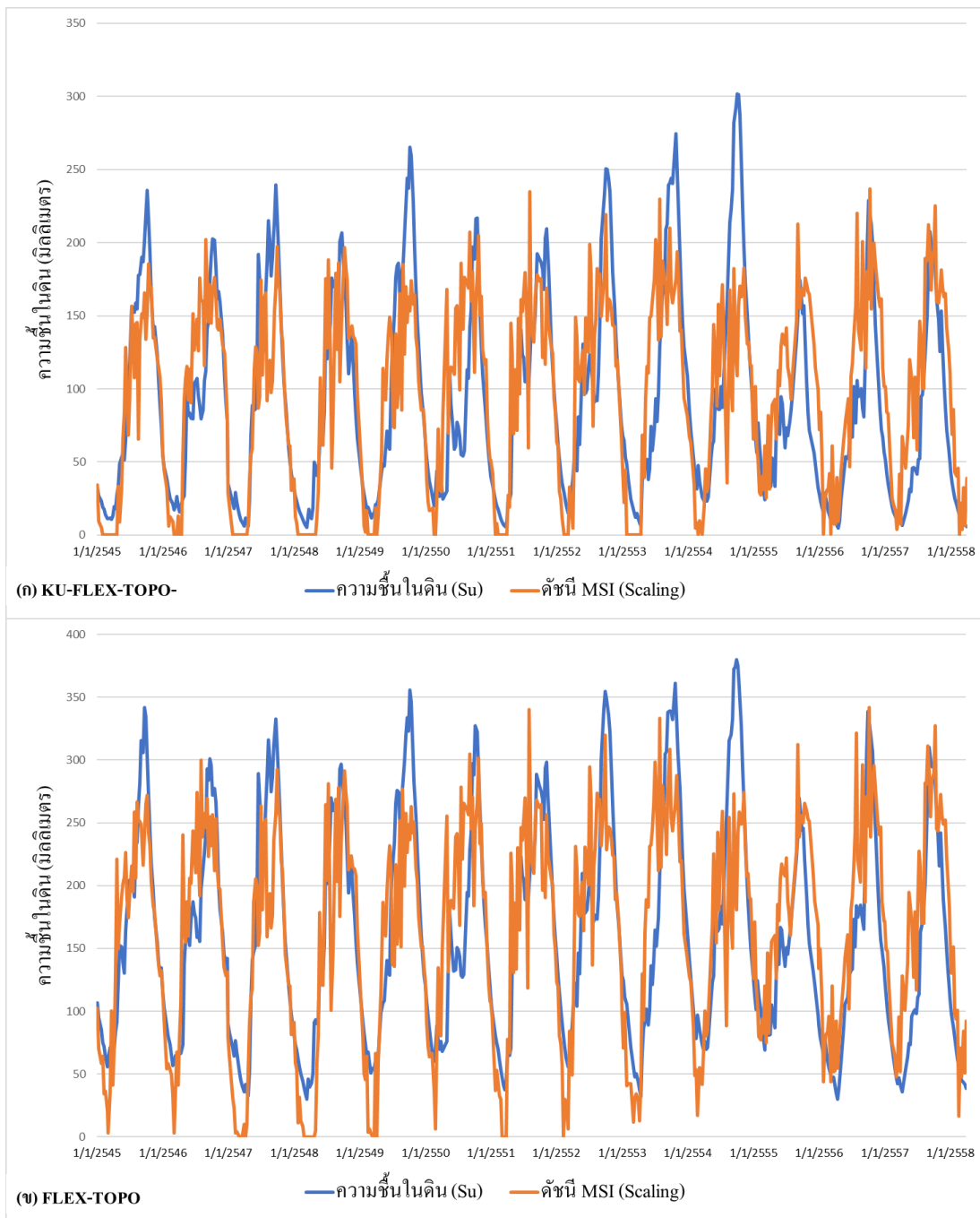
ภาพที่ 28 การเปรียบเทียบผลการประเมินนำ้ทำจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดนำ้ทำ E.54



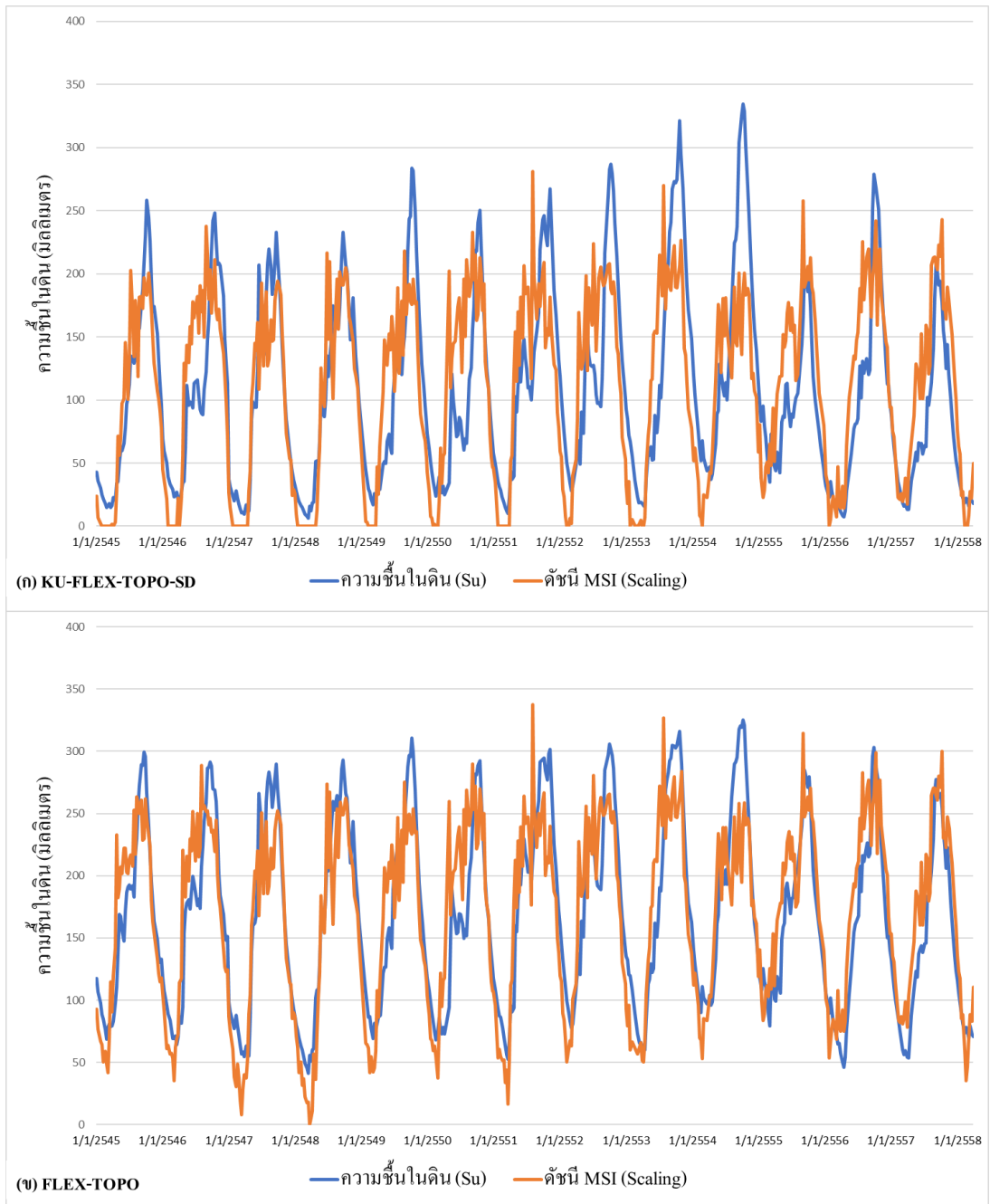
ภาพที่ 29 การเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลองที่เลือกพิจารณา ณ ตำแหน่งสถานีวัดน้ำท่า E.70



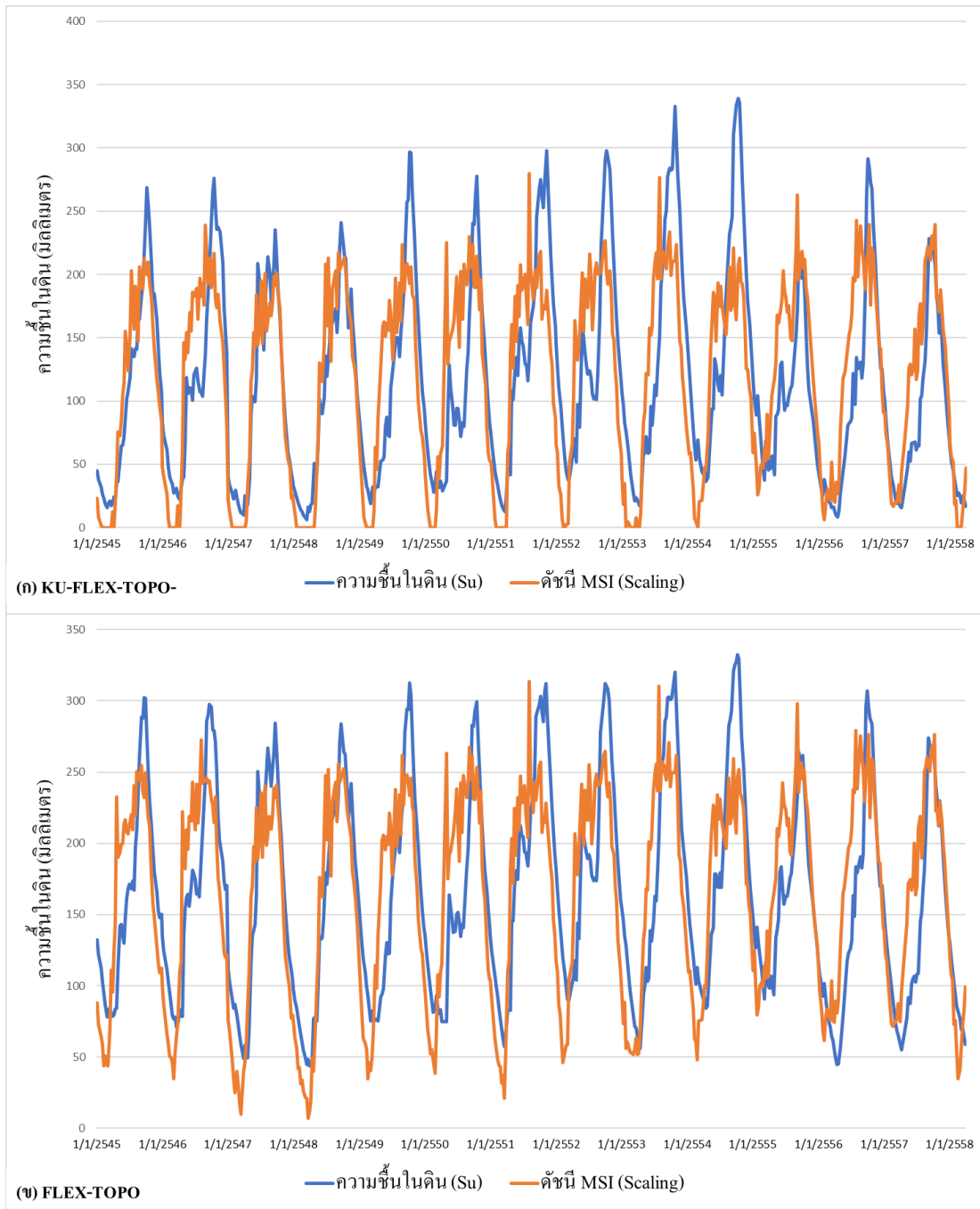
ภาพที่ 30 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชันในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.73



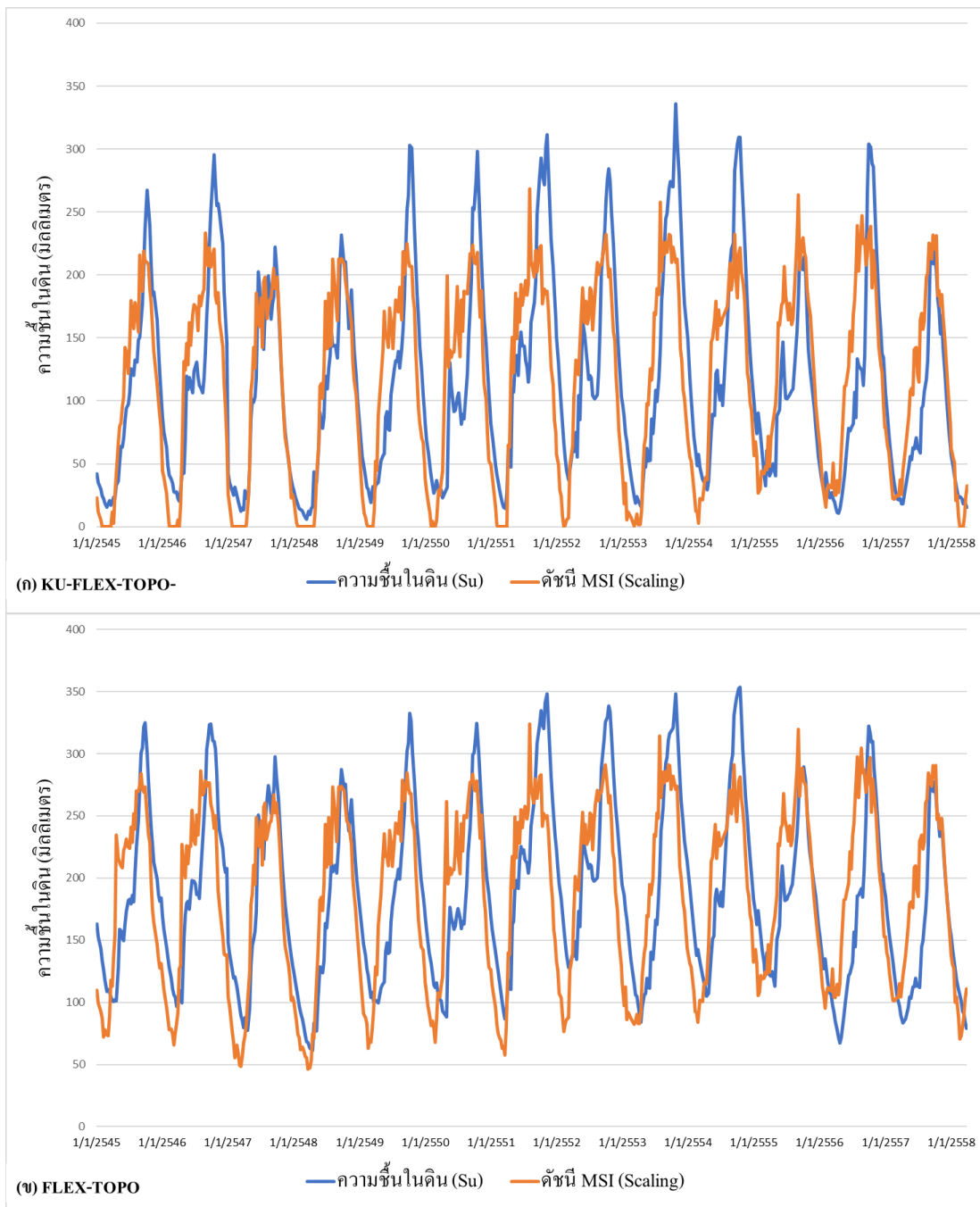
ภาพที่ 31 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.72



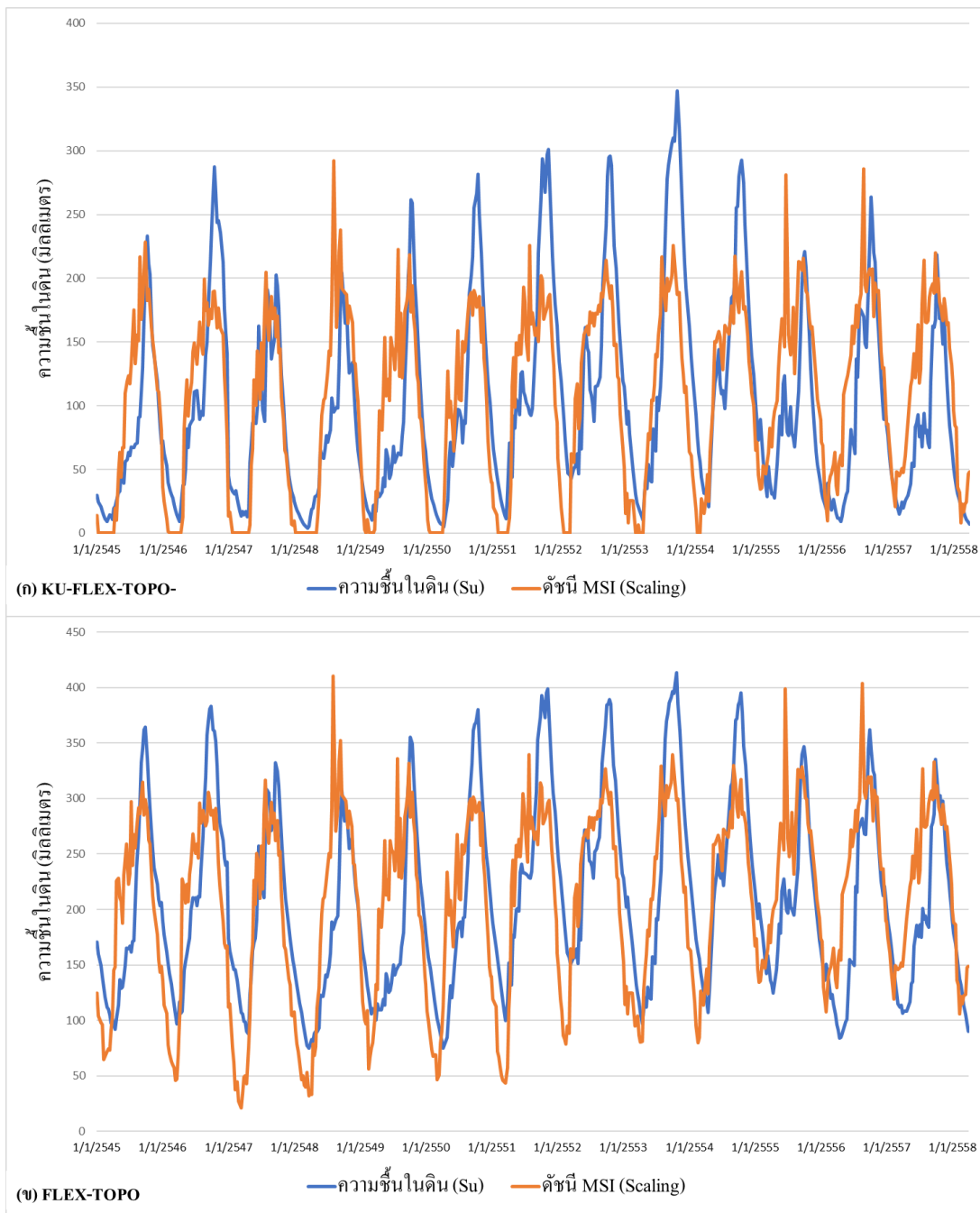
ภาพที่ 32 การเปรียบเทียบระหว่างคัดนี้ MSI และความชันในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.32A



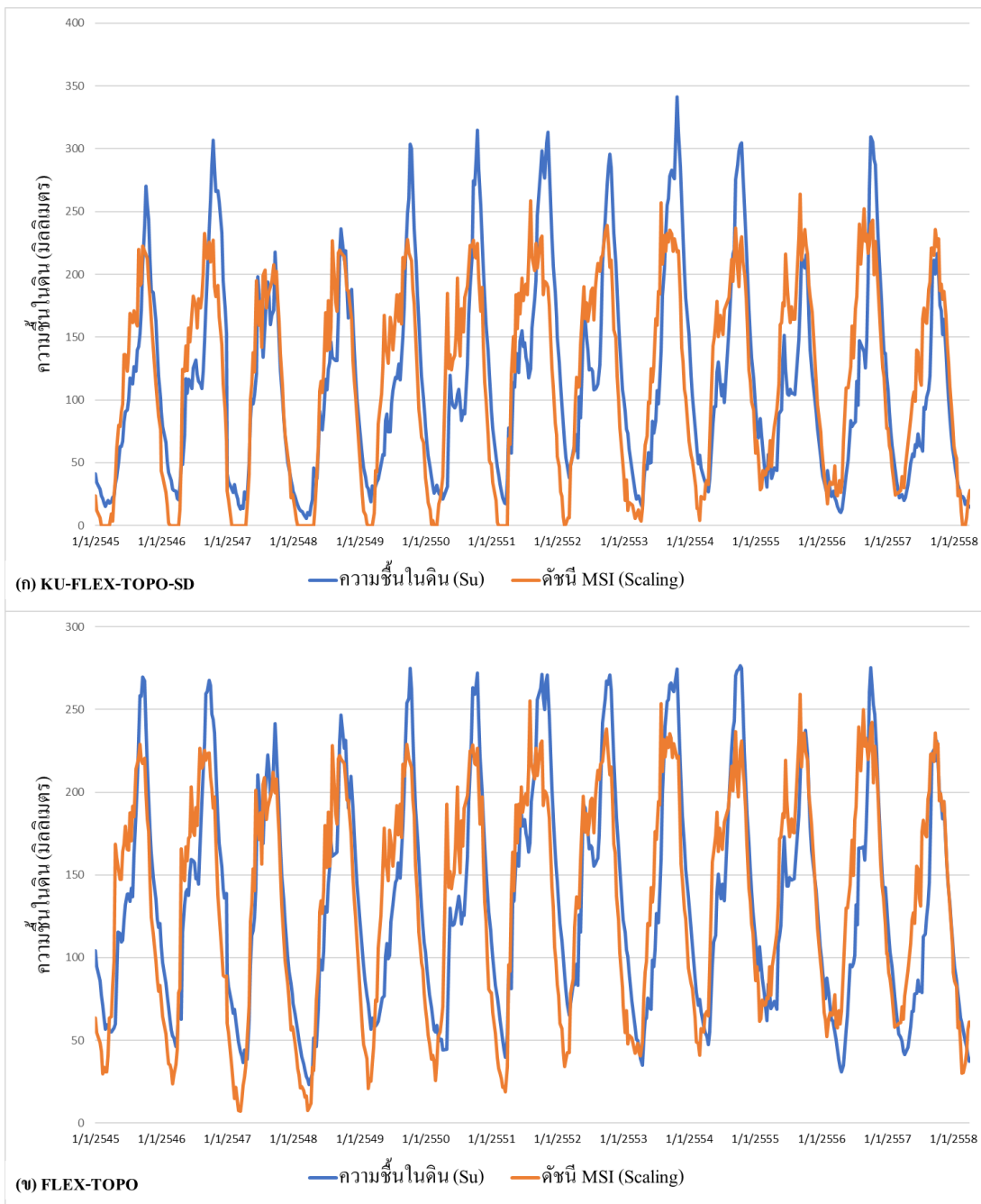
ภาพที่ 33 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.5



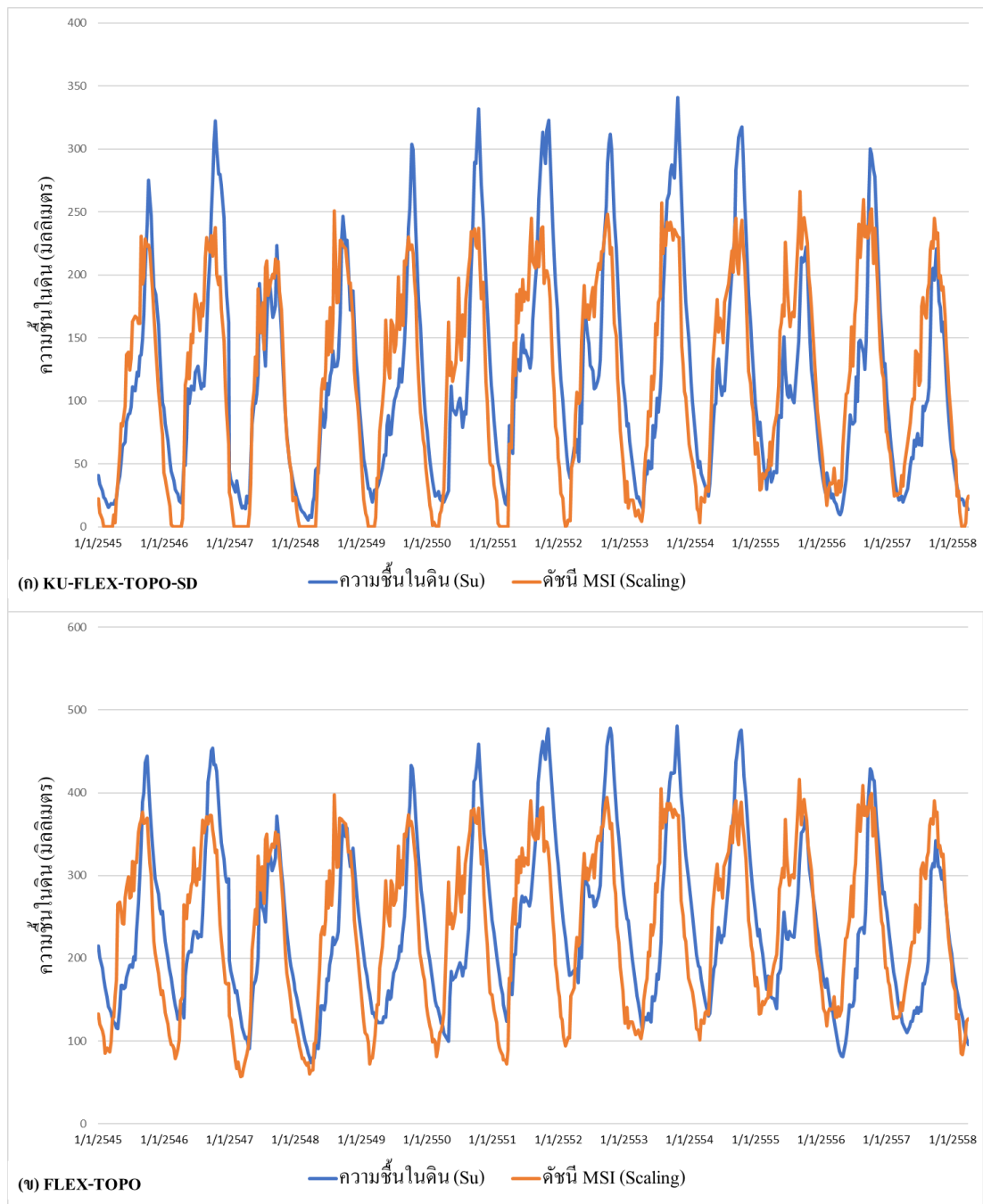
ภาพที่ 34 การเปรียบเทียบระหว่างค่านี MSI และความชันในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.23



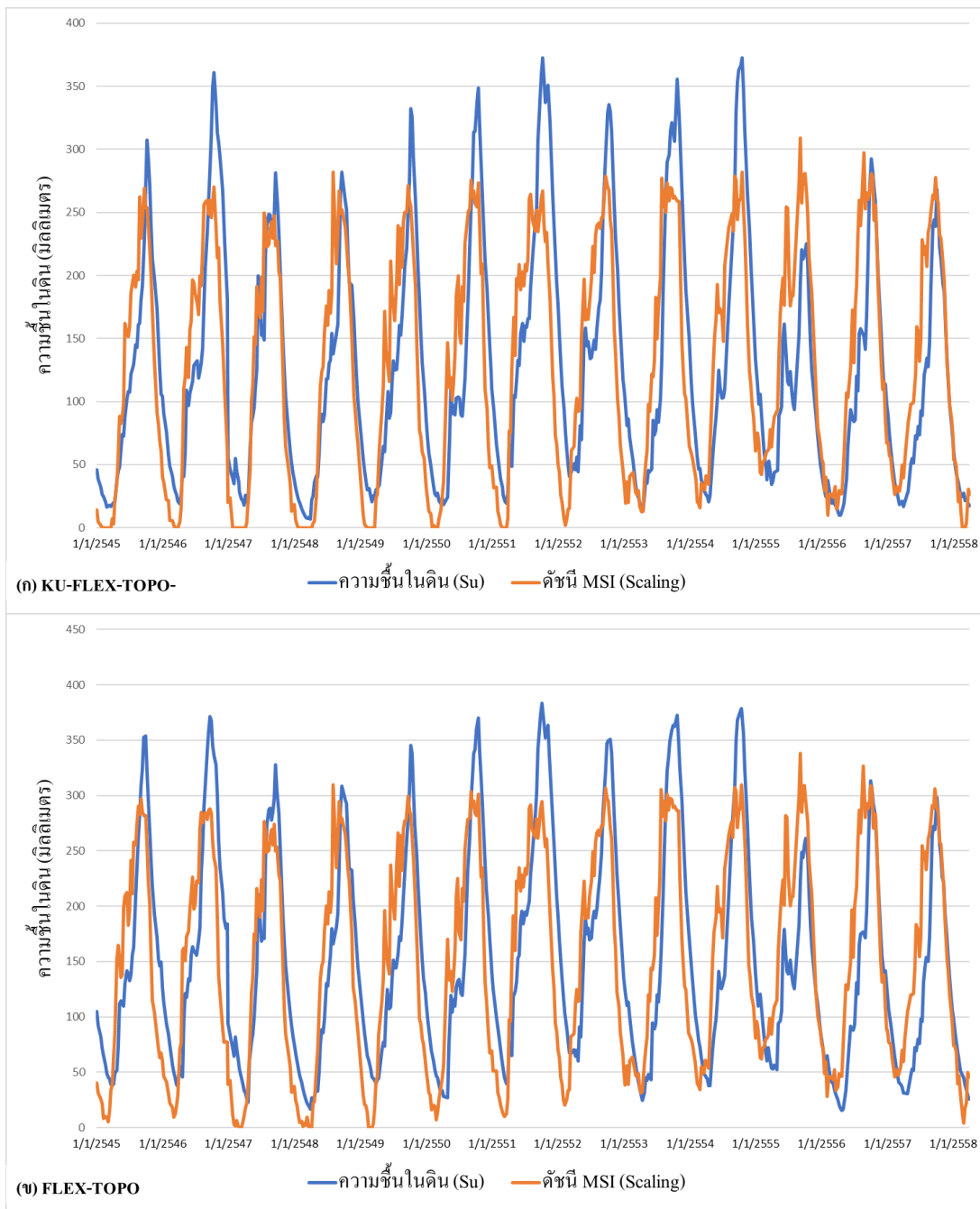
ภาพที่ 35 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความขึ้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.6C



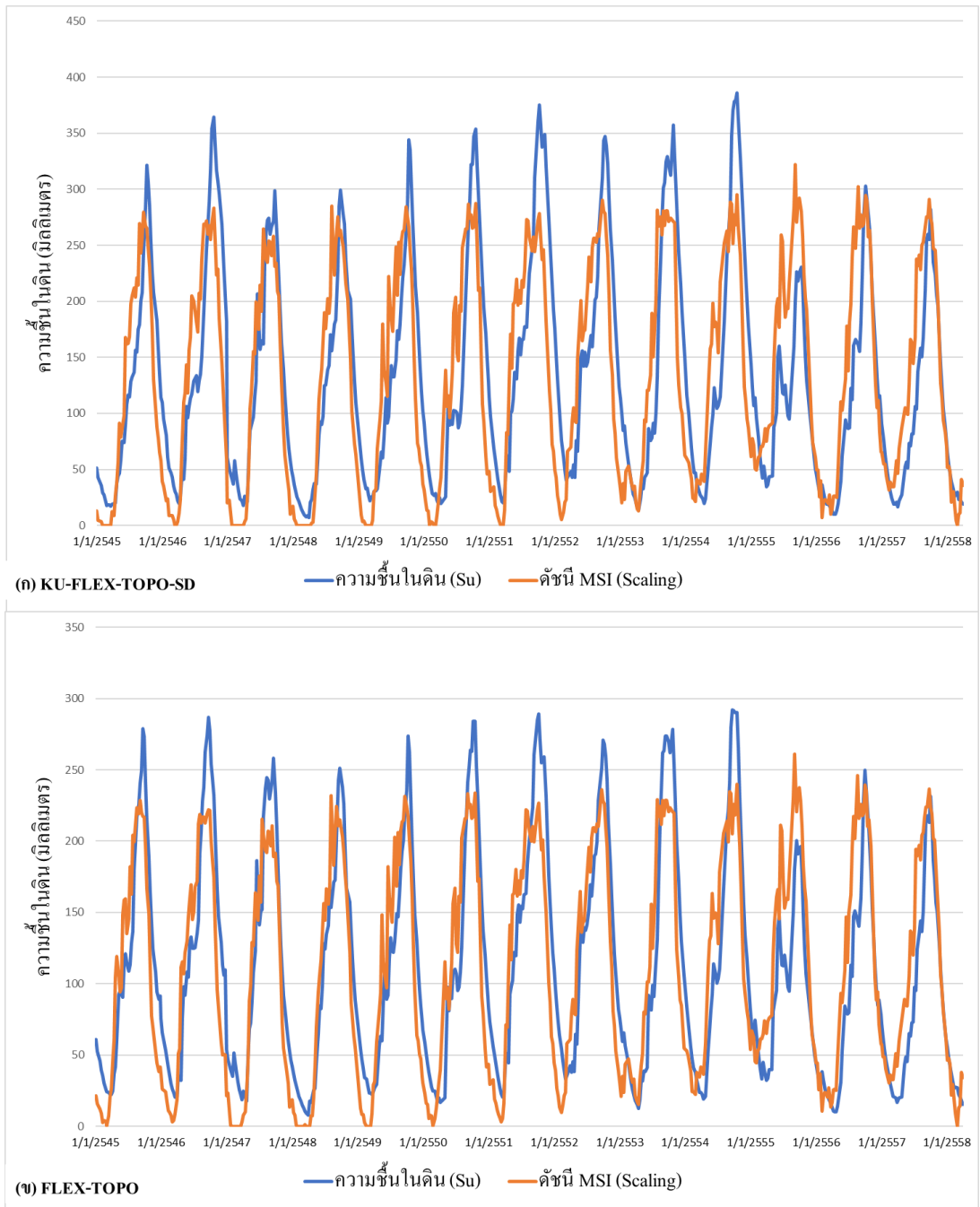
ภาพที่ 36 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.21



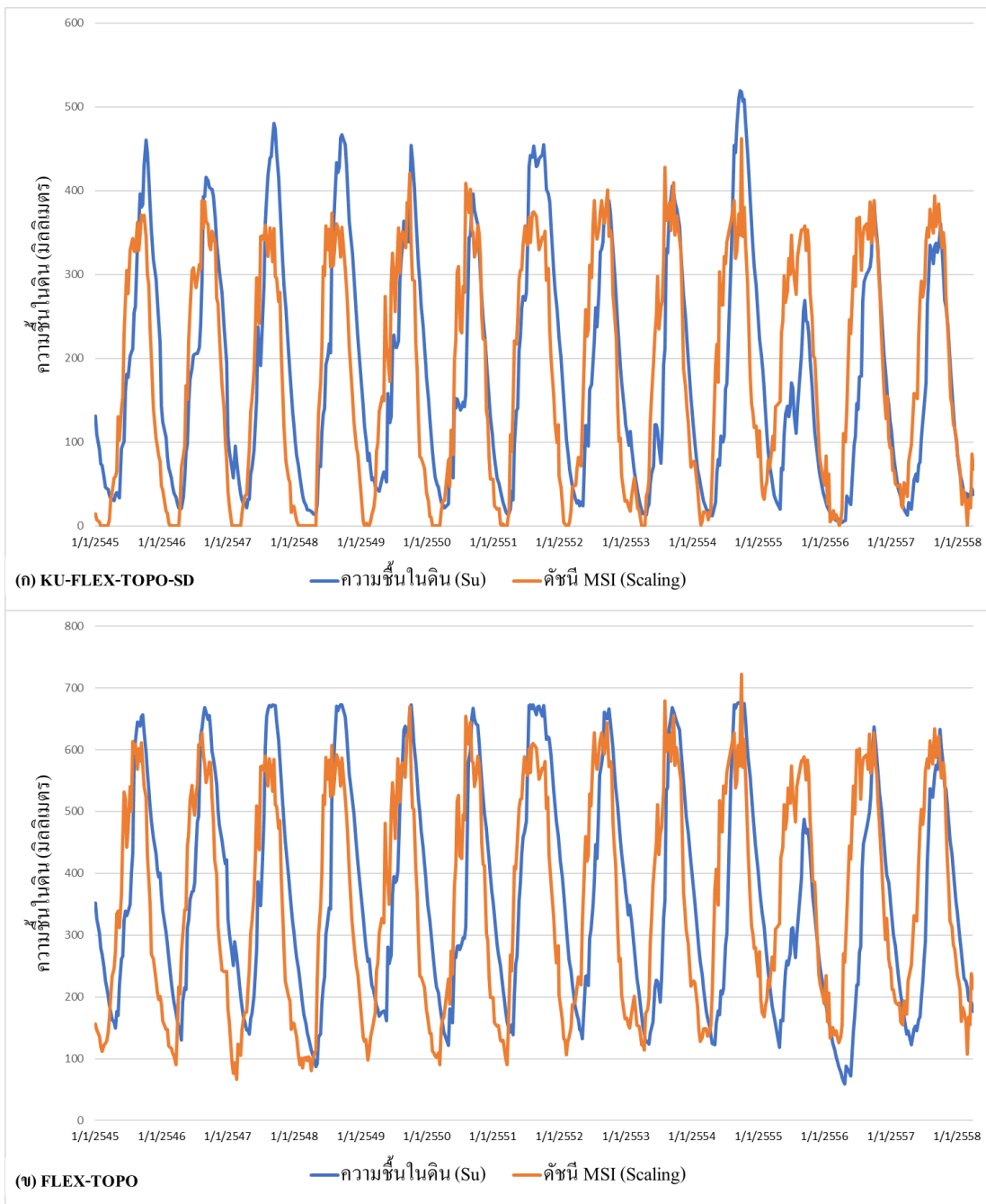
ภาพที่ 37 การเปรียบเทียบระหว่างค่านี MSI และความขึ้นในคืนที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.9



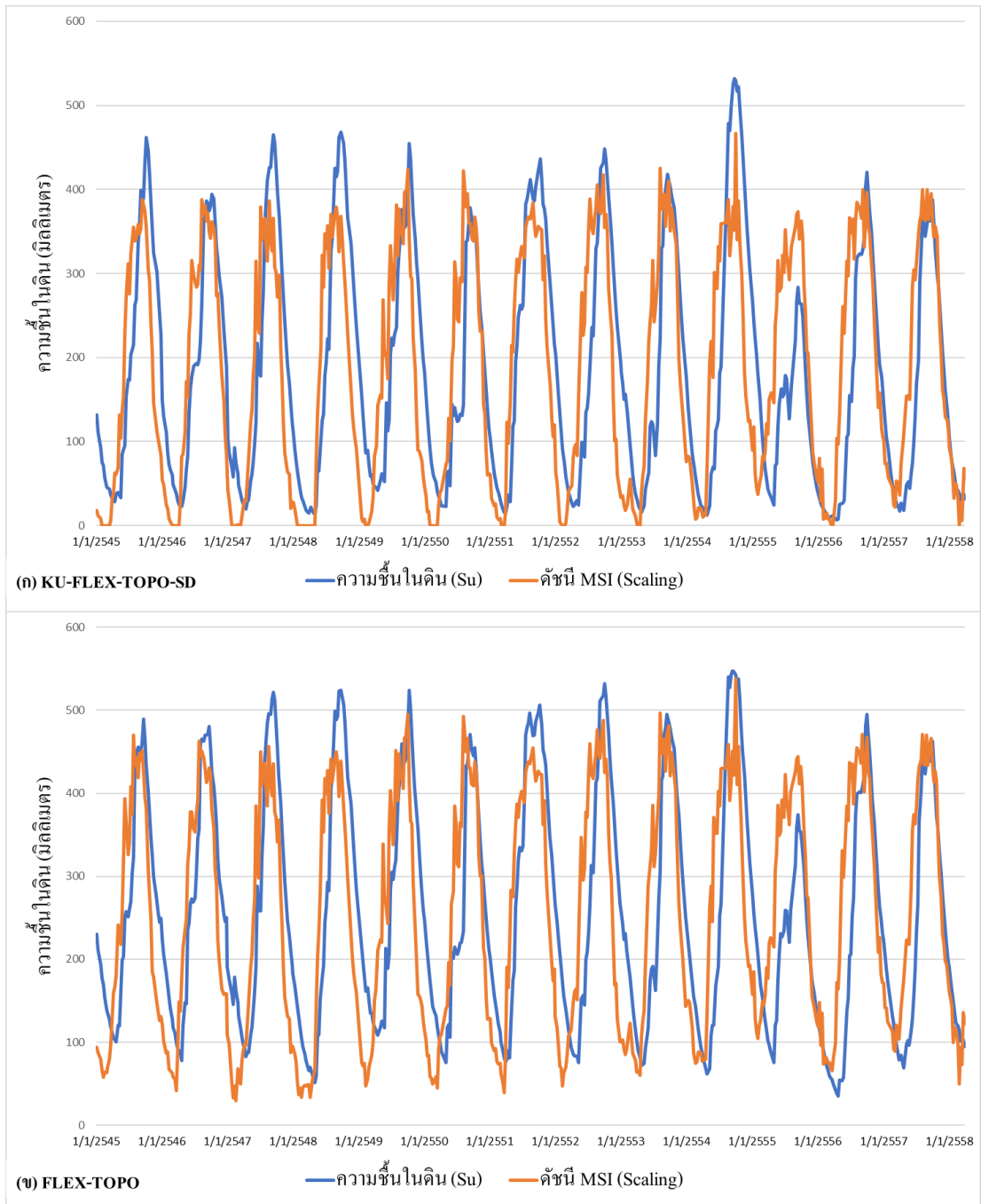
ภาพที่ 38 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.66A



ภาพที่ 39 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.18



ภาพที่ 40 การเปรียบเทียบระหว่างดัชนี MSI และความชันในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.54



ภาพที่ 41 การเปรียบเทียบระหว่างคดัชนี MSI และความชื้นในดินที่ได้จากแบบจำลอง FLEX-TOPO และ KU-FLEX-TOPO-SD ที่สถานี E.70

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	ศรัณภัสร์ เอี่ยมอำไพ
วัน เดือน ปี เกิด	19 ตุลาคม 2537
ที่อยู่ปัจจุบัน	5/2 หมู่ 3 ต.ขุนแก้ว อ.นครชัยศรี จ.นครปฐม 73120
ประวัติการศึกษา	วศ.บ (วิศวกรรมโยธา-ทรัพยากรน้ำ) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน

- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., and Van Liew, M. W., 2012, SWAT: Model use, calibration, and validation: *Transactions of the ASABE*, v. 55, no. 4, p. 1491-1508.
- Carroll, D. G., 2004, URBS: A Rainfall Runoff Routing Model for Flood Forecasting and Design, Version.
- Fenicia, F., Savenije, H. H. G., Matgen, P., and Pfister, L., 2008, Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement: *Water Resources Research*, v. 44, no. 1.
- Gan, T. Y., Dlamini, E. M., and Biftu, G. F., 1997, Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling: *Journal of Hydrology*, v. 192, no. 1-4, p. 81-103.
- Gao, H., Hrachowitz, M., Fenicia, F., Gharari, S., and Savenije, H. H. G., 2013, Testing the realism of a topography driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China: *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, v. 10, no. 10.
- Hunt Jr, E. R., and Rock, B. N., 1989, Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances: *Remote sensing of environment*, v. 30, no. 1, p. 43-54.
- Mapiam, P. P., and Sriwongsitanon, N., 2009, Estimation of the URBS model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper Ping river basin, Thailand: *ScienceAsia*, v. 35, no. 2009, p. 49-56.
- Mukul, M., Srivastava, V., and Mukul, M., 2015, Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network, *Journal of Earth System Science*, Volume 124, p. 1343-1357.
- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., 1970, River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, Volume 10, p. 282-290.

- Rennó, C. D., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Soares, J. V., Hodnett, M. G., and Tomasella, J., 2008, HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia: *Remote Sensing of Environment*, v. 112, no. 9, p. 3469-3481.
- Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R., and Hauck, L. M., 2001, Validation of the swat model on a large river basin with point and nonpoint sources 1: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, v. 37, no. 5, p. 1169-1188.
- Savenije, H. H. G., 2010, HESS Opinions" Topography driven conceptual modelling (FLEX-Topo)": *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 14, no. 12, p. 2681-2692.
- Sharma, K. D., and Singh, S., 1992, Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model: *Hydrological sciences journal*, v. 37, no. 1, p. 39-52.
- Sriwongsitanon, N., Jandang, W., Suwawong, T., and Savenije, H. H. G., 2020, Development of Semi-distributed FLEX-SD Model for runoff estimation in tropical nested catchments: *Hydrology and Earth System Sciences*.
- Sriwongsitanon, N., Tantisuvanichkul, K., Kaprom, C., Archavakijgosol, S., Williams, J., and Bastiaanssen, W. G. M., 2019a, An Advanced Gridded Monthly Rainfall Product for Thailand Based on Rain Gauges, Double Mass Curves, and Remote Sensing Rainfall Products: *J. Hydrol.*
- , 2019b, An Advanced Gridded Monthly Rainfall Product for Thailand Based on Rain Gauges, Double Mass Curves, and Remote Sensing Rainfall Products, *J. Hydrol.*
- Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bastidas, L. A., Bouten, W., and Sorooshian, S., 2003, Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models: *Water resources research*, v. 39, no. 8.
- Welikhe, P., Quansah, J. E., and Fall, S., Elhenney WMc (2017) Estimation of Soil Moisture Percentage Using LANDSAT-based Moisture Stress Index: *J Remote Sensing & GIS*, v. 6, no. 200, p. 2.