

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII
เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า

Development of KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII Models for Runoff Estimation

โดย

นางสาววาสนา จันทร์แดง

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อขอความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)

พ.ศ. 2564

วาสนา จันทร์แดง 2564: การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII
เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมทรัพยากรน้ำ)
สาขาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศาสตราจารย์นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, Ph.D. 96 หน้า

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการพัฒนา KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบกึ่งกระจายตัว ที่มีพื้นฐานจาก FLEXL ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า แบบลัมพ์ โดยทั้ง 3 แบบจำลอง สามารถสอบเทียบได้โดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM ทั้งนี้ หลักการในการพัฒนาแบบจำลองแบบกึ่งกระจายตัวคือพื้นที่ที่ลุ่มน้ำจะถูกแบ่งออกเป็นลุ่มน้ำย่อยและน้ำท่าที่เกิดขึ้นในแต่ละลุ่มน้ำย่อยจะถูกเคลื่อนตัวอย่างต่อเนื่องไปยังจุดออกของลุ่มน้ำ ทั้งนี้ KU-FLEX-SD-NDII เป็นแบบจำลองที่มีการเพิ่มศักยภาพของ KU-FLEX-SD ในการกระจายพารามิเตอร์ของปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัวสูงสุดสำหรับแต่ละลุ่มน้ำย่อยด้วยดัชนี NDII จากนั้นทำการทดสอบประสิทธิภาพของทั้ง 3 แบบจำลอง โดยการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าจำนวน 14 สถานี ที่ตั้งอยู่บนลุ่มน้ำปึงตอนบน ระหว่างปี พ.ศ. 2546 - 2557 ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ทั้ง 3 แบบจำลอง สามารถประเมินน้ำท่าได้ถูกต้องใกล้เคียงกันในทุกสถานีวัดน้ำท่า อย่างไรก็ตาม การพัฒนาแบบจำลองแบบกึ่งกระจายตัวมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อการประเมินน้ำท่า ณ จุดพิจารณาที่ต้องการโดยไม่ต้องสอบเทียบแบบจำลองดังนั้น จึงได้นำผลการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบ KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่าจำนวน 5 และ 13 สถานี ซึ่งตั้งอยู่ด้านเหนือน้ำของ P.1 และ P.73 ที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าจากการตรวจวัด รวมทั้งเปรียบเทียบกับผลการประเมินน้ำท่าจากการสอบเทียบในทุกสถานี โดย FLEXL ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองพบว่า ค่า NSE เฉลี่ยที่ 5 สถานี ซึ่งตั้งอยู่ด้านเหนือน้ำของ P.1 มีค่าเท่ากับ 0.73 เปรียบเทียบกับค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.70 และ 0.69 ที่ได้จาก KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ในขณะที่ค่า NSE เฉลี่ยที่ 13 สถานี ซึ่งตั้งอยู่ด้านเหนือน้ำของ P.73 มีค่าเท่ากับ 0.66 เปรียบเทียบกับค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.29 และ 0.26 ที่ได้จาก KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ตามลำดับ ผลการประเมินน้ำท่าด้วยความถูกต้องที่ต่ำมากโดยแบบจำลองแบบกึ่งกระจายตัวที่ทำการสอบเทียบที่ P.73 มีความเป็นไปได้สูงที่เกิดขึ้นจากการจัดการน้ำที่เกิดขึ้นมากในช่วงท้ายน้ำของ P.1 จนถึง P.73 นอกจากนั้นแล้ว การศึกษานี้พบว่าผลการประเมินปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัวที่เป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่ P.73 ของทั้ง 14 สถานี โดยแบบจำลองกึ่งกระจายตัวมีความสัมพันธ์ที่ดีกับดัชนี NDII ที่ใช้บ่งชี้สภาพความชุ่มชื้นของลุ่มน้ำมากกว่าผลที่ได้จาก FLEXL อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น แบบจำลองกึ่งกระจายตัวที่พัฒนาขึ้นจึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้เพื่อเพิ่มความถูกต้องของการบริหารจัดการน้ำ อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มีการจัดการน้ำในปริมาณมากจำเป็นต้องนำข้อมูลการจัดการน้ำมาประกอบการดำเนินงานเพื่อเพิ่มความถูกต้องให้กับแบบจำลองแบบกึ่งกระจายตัว

Wasana Jandang 2021: Development of KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII Models for Runoff Estimation. Master of Engineering (Water Resources Engineering), Major Field: Water Resources Engineering, Department of Water Resources Engineering.

Thesis Advisor: Professor Nutchanat Sriwongsitanon, Ph.D. 96 pages.

This study aims to develop KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII, which are semi-distributed rainfall-runoff models, based on FLEXL which is a lumped rainfall-runoff model. These three models can be automatically calibrated using Program MOSCEM. In model development, the catchment area has to be divided into sub-catchments and runoff from upstream sub-catchments are routed downstream to the outlet of a catchment. KU-FLEX-SD-NDII was developed to enhance the ability of KU-FLEX-SD by providing the parameter Su_{max} , which is the maximum unsaturated soil moisture capacity for each sub-catchment using NDII values of each sub-catchment. The performance of these three models was carried out by model calibration at 14 gauging stations located in the Upper Ping River Basin between 2003 and 2014. The results show that these three models can provide runoff estimates with similar degree of accuracy at all stations. However, the main objective of developing a semi-distributed model is to provide runoff estimates at required locations without model calibration. Therefore, runoff estimates, which are by products of model calibration by KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII at 5 and 13 gauging stations upstream of the calibrated stations P.1 and P.73, respectively, were compared to observed data. These runoff estimates also compared to those results given by FLEXL which required model calibration at all stations. The results of model performance comparison show that the average NSE value for 5 upstream stations of P.1 is 0.73 provided by FLEXL compared to the values of 0.70 and 0.69 provided by KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII. The average NSE value for 13 upstream stations of P.73 is 0.66 provided by FLEXL compared to the values of 0.29 and 0.26 provided by KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII, respectively. Very poor accuracy of runoff estimates by SD models calibrated at P.73 possibly due to regulated flows highly presented between P.1 and P.73. Moreover, the study shows that unsaturated soil moisture capacity at all stations provided by KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII calibrated at P.73 are significantly higher correlated with NDII - which can be used to indicate soil moisture of the river basin - than those of given by FLEXL. Therefore, the developed SD models are suitable to be used to improve the accuracy of water management. However, the data of highly regulated flow in any river basin need to be included in model application to improve the accuracy of SD model performance.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

___ / ___ / ___

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา และสนับสนุนในการวางแผนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรณพิมพ์ พุทธรักษา มะเปี่ยม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ข้อคิดเห็น ให้คำปรึกษา และขอเสนอแนะตลอดการจัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ และคณาจารย์ทุก ๆ ท่าน ทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้อบรมสั่งสอนและมอบความรู้อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบพระคุณกรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยา ที่ให้การอนุเคราะห์ข้อมูลด้านอุทกวิทยา และขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (SENSWAT) ที่ได้สนับสนุนข้อมูลฝนรายวันแบบกริด SENSWAT-GGR และข้อมูลปริมาณการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันแบบกริด เพื่อใช้ประกอบวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ ที่คอยช่วยเหลือ ตลอดจนให้คำแนะนำในด้านต่าง ๆ สุดท้ายนี้ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดเนื่องจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบแต่บิดา มารดา และครอบครัว ผู้ซึ่งคอยสนับสนุนด้านการศึกษาและให้กำลังใจผู้วิจัยตลอดมา

วาสนา จันทร์แดง

มีนาคม 2564

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	7
อุปกรณ์และวิธีการ	34
อุปกรณ์	34
วิธีการ	34
ผลและวิจารณ์	51
สรุปและข้อเสนอแนะ	68
สรุป	68
ข้อเสนอแนะ	70
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	71
ภาคผนวก	75
ภาคผนวก ก ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII	76
ภาคผนวก ข ปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (Su) จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1	84
ภาคผนวก ค ปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (Su) จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	88
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	96

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ลุ่มน้ำสาขาของกลุ่มน้ำปึงตอนบน	8
2	รายละเอียดของสถานีตรวจอากาศ ในลุ่มน้ำปึงตอนบน	11
3	ค่าเฉลี่ยรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศหลักของสถานีตรวจอากาศ ในลุ่มน้ำปึงตอนบน	12
4	การใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำปึงตอนบน	14
5	สมการสมดุลน้ำและสมการ โครงสร้างของแบบจำลอง FLEXL	22
6	รายละเอียดของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา	40
7	รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของแต่ละลุ่มน้ำย่อย	43
8	ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII โดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 14 สถานี	53
9	ชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เมื่อสอบเทียบโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 14 สถานี	55
10	ค่า NSE ของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII	61
11	ความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลังระหว่างดัชนี NDII และปริมาตรเก็บ กักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (S_u) ที่ได้จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII	63

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	สภาพภูมิประเทศ ขอบเขตลุ่มน้ำหลัก และขอบเขตลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปึงตอนบน	9
2	การผันแปรค่าเฉลี่ยรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศของสถานีตรวจอากาศในลุ่มน้ำปึงตอนบน	13
3	การใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำปึงตอนบนระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552	15
4	Prism storage และ Wedge storage ในช่วงลำน้ำที่มีหน้าตัดคงที่	18
5	โครงสร้างของแบบจำลอง FLEXL	20
6	สถานีวัดน้ำท่าที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ลุ่มน้ำปึงตอนบน	41
7	ขอบเขตลุ่มน้ำย่อยและสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1	47
8	ขอบเขตลุ่มน้ำย่อยและสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.73	48
ภาพผนวกที่		
ก1	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.20	77
ก2	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.75	77
ก3	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A	78
ก4	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.67	78
ก5	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.21	79

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก6	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1	79
ก7	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.81	80
ก8	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.77	80
ก9	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.82	81
ก10	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.84	81
ก11	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.76	82
ก12	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.85	82
ก13	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.24A	83
ก14	ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73	83
ข1	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.20 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1	85
ข2	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.75 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1	85

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ข3	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.4A กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1	86
ข4	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.67 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1	86
ข5	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.21 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1	87
ข6	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.1 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1	87
ค1	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.20 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	89
ค2	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.75 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	89
ค3	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.4A กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	90
ค4	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.67 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	90

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค5	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.21 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	91
ค6	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.1 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	91
ค7	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.81 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	92
ค8	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.77 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	92
ค9	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.82 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	93
ค10	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.84 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	93
ค11	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.76 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	94
ค12	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.85 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	94

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ก13	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.24A กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	95
ก14	ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.73 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73	95

การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า

Development of KU-FLEX-SD and KU-FLEX-SD-NDII Models for Runoff Estimation

คำนำ

ปริมาณน้ำท่าเป็นองค์ประกอบที่สำคัญขององค์ประกอบหนึ่งในวัฏจักรทางอุทกวิทยา และเป็นข้อมูลพื้นฐานที่ใช้ในการจัดการทรัพยากรน้ำที่มีอยู่ให้เหมาะสมกับความต้องการใช้น้ำของมนุษย์และสิ่งแวดล้อม โดยต้องจัดการไม่ให้เกิดปัญหาอุทกภัย และปัญหาภัยแล้งตามมา ดังนั้น การตรวจวัดปริมาณน้ำท่าจึงมีความจำเป็น โดยหน่วยงานหลักที่ทำการตรวจวัดคือ กรมชลประทาน และกรมทรัพยากรน้ำ อย่างไรก็ตาม การวัดปริมาณน้ำท่าจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรบุคคล เวลา และงบประมาณในปริมาณมาก ทำให้จำนวนสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการตรวจวัดโดยหน่วยงานจึงมีอยู่อย่างจำกัด ด้วยเหตุผลดังกล่าว การประเมินปริมาณน้ำท่าโดยวิธีการทางอ้อมจึงมีความจำเป็น จึงได้มีการพัฒนาแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า (Rainfall-runoff model) เพื่อใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่า ตำแหน่งที่ต้องการ ซึ่งสามารถดำเนินการได้ทั้งในกรณีของพื้นที่รับน้ำฝนที่มีสถานีวัดน้ำท่า (Gauged catchment) ตั้งอยู่ และพื้นที่รับน้ำฝนที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่า (Ungauged catchment)

แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องจากอดีตจนถึงปัจจุบัน อาทิเช่น แบบจำลอง SCS (Sharma and Singh, 1992), TANK (Sugawara, 1974), NAM (Gan *et al.*, 1997), URBS (Malone, 1999), FLEXL (Fenicia *et al.*, 2008), FLEX-Topo (Gao *et al.*, 2014), Modified NAM (นุชนารถ, 2560) เป็นต้น อย่างไรก็ตาม แบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ที่ได้รับการพัฒนาขึ้นมานั้น ส่วนใหญ่เป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ (Lumped model) ซึ่งสามารถประเมินปริมาณน้ำท่าที่จุดออกของพื้นที่รับน้ำที่พิจารณาได้เท่านั้น ซึ่งในบรรดาแบบจำลองประเภทลัมพ์เหล่านี้พบว่า แบบจำลอง FLEXL ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยนักวิจัยหลายกลุ่มและให้ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าได้เป็นอย่างดีในแต่ละพื้นที่ศึกษา อาทิเช่น ผลการศึกษาที่ดำเนินการโดย Fenicia *et al.* (2008); Kavetski and Fenicia (2011); Gao *et al.* (2014); Tekleab *et al.* (2015), Sriwongsitanon *et al.* (2016), นุชนารถ และคณะ (2560) โดยแนวความคิดพื้นฐานที่สำคัญของ

แบบจำลอง FLEXL คือ การแบ่งการเก็บกักออกเป็น 5 ส่วน คือ (1) การเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow reservoir) (2) การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (Interception reservoir) (3) การเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated reservoir) (4) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast reservoir) และ (5) การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Slow reservoir) อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง FLEXL สามารถประเมินน้ำท่าได้ที่จุดออกของพื้นที่รับน้ำที่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่เท่านั้น นอกจากนั้นแล้ว ตามโครงสร้างของแบบจำลอง FLEXL ไม่มีการแยกการเคลื่อนตัวของน้ำท่าที่เกิดบนพื้นที่ลุ่มน้ำออกจากการเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำ ทั้ง ๆ ที่ในสภาพความเป็นจริงการเคลื่อนตัวของทั้งสองส่วนมีความแตกต่างกัน

นอกจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่า ประเภทลัมพ์แล้ว ยังมีแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed model) ที่สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าได้ทั้งจุดออกของพื้นที่รับน้ำ และจุดใด ๆ ที่ต้องการด้านเหนือน้ำของจุดพิจารณาที่สถานีวัดน้ำท่า ซึ่งแบบจำลอง URBS ที่ถูกพัฒนาขึ้น โดย Queensland Department of Natural Resources and Mines ในปี ค.ศ. 1990 เป็นตัวอย่างของแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัวที่สามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มความสามารถของแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าได้เป็นอย่างดี โดยข้อดีของแบบจำลอง URBS คือการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำหลักออกเป็นกลุ่มน้ำย่อยที่มีขนาดพื้นที่รับน้ำฝนใกล้เคียงกันทุกกลุ่มน้ำย่อย การแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำในลักษณะดังกล่าวทำให้สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าของทุกกลุ่มน้ำย่อย ทั้งนี้ เนื่องจากแบบจำลอง URBS ได้ทำการแบ่งการเคลื่อนตัวของน้ำท่าออกเป็น 2 ส่วน คือ การเคลื่อนตัวของน้ำท่าบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment routing) และการเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำ (Channel routing) โดยทำการเคลื่อนตัวตามแนวทางการไหลของน้ำจากกลุ่มน้ำย่อยบนสุดลงสู่กลุ่มน้ำย่อยด้านล่างน้ำจนถึงจุดสุดท้ายที่สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำ

ดังนั้น ในการศึกษาวิจัยได้นำแนวความคิดพื้นฐานของแบบจำลอง FLEXL และแนวคิดในการแบ่งพื้นที่ลุ่มน้ำย่อยของแบบจำลอง URBS มาใช้เพื่อสร้างแบบจำลอง FLEX แบบกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed FLEX model) หรือแบบจำลอง KU-FLEX-SD โดยแต่ละกลุ่มน้ำย่อยจะใช้แบบจำลอง FLEXL ในการประเมินปริมาณน้ำท่าที่จุดออกของแต่ละกลุ่มน้ำย่อย จากนั้นจะทำการเคลื่อนตัวน้ำท่าจากท้ายน้ำของกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำมายังท้ายน้ำของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำที่อยู่ถัดไป เพื่อนำมารวมกับน้ำท่าที่เกิดขึ้นจากกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำที่กำลังพิจารณา โดยจะดำเนินการต่อเนื่องกันไปจนถึงจุดสุดท้ายที่สถานีวัดน้ำท่าด้านท้ายน้ำ นอกจากนี้ยังมีการนำดัชนี NDII (Normalized Different Infrared Index) มาใช้ประกอบการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD ซึ่งให้ชื่อว่าแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII โดยการนำมาใช้เป็นสัดส่วนในการกระจายพารามิเตอร์

ปริมาณเก็บกักสูงสุดในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Maximum unsaturated soil storage; $Sumax$) ให้มีความแตกต่างกันในแต่ละลุ่มน้ำย่อย เพื่อให้มีความใกล้เคียงกับสภาพตามธรรมชาติที่ชั้นดินแต่ละบริเวณมีความสามารถในการเก็บกักน้ำที่ไม่เท่ากัน สำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมนั้น จะใช้การสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติโดยโปรแกรม MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective function) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้เพื่อการเลือกพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมประกอบด้วยตัวแปรทางสถิติ 3 ตัวแปร คือ (1) ประสิทธิภาพการไหล (Efficiencies of flows, KGE_F) (2) ลอการิทึมของการไหล (Logarithm of flows, KGE_L) และ (3) โค้งช่วงเวลากการไหล (Flow duration curves, KGE_F) ทั้งนี้ แบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII จะนำมาประยุกต์ใช้กับสถานีวัดน้ำท่าในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งมีจำนวนทั้งหมด 14 สถานี ต่อจากนั้นจะทำการตรวจสอบประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าที่ลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ของสถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 ที่วิเคราะห์โดยแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII กับผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากแบบจำลอง FLEXL เพื่อสรุปประสิทธิผลของแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่ได้รับการพัฒนาในการศึกษานี้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ซึ่งเป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed rainfall-runoff model) โดยใช้แนวคิดพื้นฐานของแบบจำลอง FLEXL และแบบจำลอง URBS
2. เพื่อประยุกต์ใช้โปรแกรม MOSCEM ในการสอบเทียบค่าพารามิเตอร์ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสม ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective function)
3. เพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการประเมินปริมาณน้ำท่าของแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ตลอดจนเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับแบบจำลอง FLEXL ทั้งกรณีที่สอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง และผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73
4. เพื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S_u) ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

ขอบเขตการศึกษา

1. พื้นที่ศึกษา คือ พื้นที่ลุ่มน้ำปึงตอนบน ซึ่งมีขนาดพื้นที่เท่ากับ 25,299.73 ตารางกิโลเมตร
2. การประเมินกราฟน้ำท่าสำหรับสถานีวัดน้ำท่าในลุ่มน้ำปึงตอนบนดำเนินการโดยแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII
3. ข้อมูลความลึกฝนที่ใช้ในการศึกษานั้นเป็นข้อมูลแบบรายวันแบบกริด (Gridded Gauged Rainfall; GGR) ที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT) โดยนำข้อมูลฝนรายวันจากสถานีตรวจวัด 1,779 สถานี มาตรวจสอบความถูกต้องด้วยกระบวนการโค้งทับทวิ (Double mass curve)

4. ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ใช้เป็นข้อมูลรายวันแบบกริดที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ ศูนย์วิจัย SENSWAT โดยสร้างมาจากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยารายวันจากสถานีตรวจอากาศ 103 สถานี ทั่วประเทศ มาคำนวณหาค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงด้วยวิธี Penman-Monteith โดยมีข้อมูลด้านเข้าคือข้อมูลอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ อาทิเช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ชั่วโมง แสงแดด เป็นต้น

5. ข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องในการประเมินปริมาณน้ำท่าของแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่าที่เลือกพิจารณาเป็นแบบรายวัน ซึ่งในการประเมินกราฟน้ำท่าโดยใช้แบบจำลองดังกล่าว ได้พิจารณาเลือกสถานีที่ไม่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลางและขนาดใหญ่

6. ข้อมูลดัชนี NDII (Normalized Different Infrared Index) ซึ่งเป็นข้อมูลเฉลี่ยราย 8 วัน จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil storage; S_u) ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII โดยค่า S_u ที่ได้จากแบบจำลองดังกล่าวจะเป็นค่า S_u รายวัน ซึ่งต้องนำไปเฉลี่ยราย 8 วันก่อนนำไปเปรียบเทียบกับค่าดัชนี NDII

7. ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาจะใช้ช่วงเวลาจากปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2557 ซึ่งเป็นปีที่มีข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิง ตลอดจนข้อมูลความลึกฝนและปริมาณน้ำท่าครบถ้วนสมบูรณ์

8. การสอบเทียบแบบจำลองเพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII นั้น ได้ดำเนินการโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM ซึ่งเชื่อมต่อกับแบบจำลอง FLEXL และถูกนำมาประยุกต์ใช้กับแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ทั้งนี้ โปรแกรม MOSCEM แบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ได้ถูกพัฒนาขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB

9. การสอบเทียบแบบจำลองเพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ด้วยโปรแกรม MOSCEM นั้น มีการใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ประกอบด้วยตัวแปรทางสถิติ 3 ตัวแปร คือ (1) ประสิทธิภาพการไหล (Efficiencies of flows, KGE_p)

(2) ลอการิทึมของการไหล (Logarithm of flows, KGE_f) และ (3) โค้งช่วงเวลาการไหล (Flow duration curves, KGE_p)

10. ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องอีกครั้งหนึ่งด้วยค่า Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลการประเมินน้ำท่าในภาพรวม ทั้งกรณีทดสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง และผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73

11. ผลการประเมินปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S_u) จากทั้ง 3 แบบจำลอง จะถูกนำมาเปรียบเทียบความถูกต้องในการประเมิน S_u ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u ในรูปแบบสมการกำลัง ทั้งกรณีทดสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง และผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73

การตรวจเอกสาร

1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาของงานวิจัยนี้คือพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งมีรายละเอียดของลักษณะภูมิประเทศ สภาพภูมิอากาศ และการใช้ที่ดินดังต่อไปนี้

1.1 ลักษณะภูมิประเทศของลุ่มน้ำปิงตอนบน

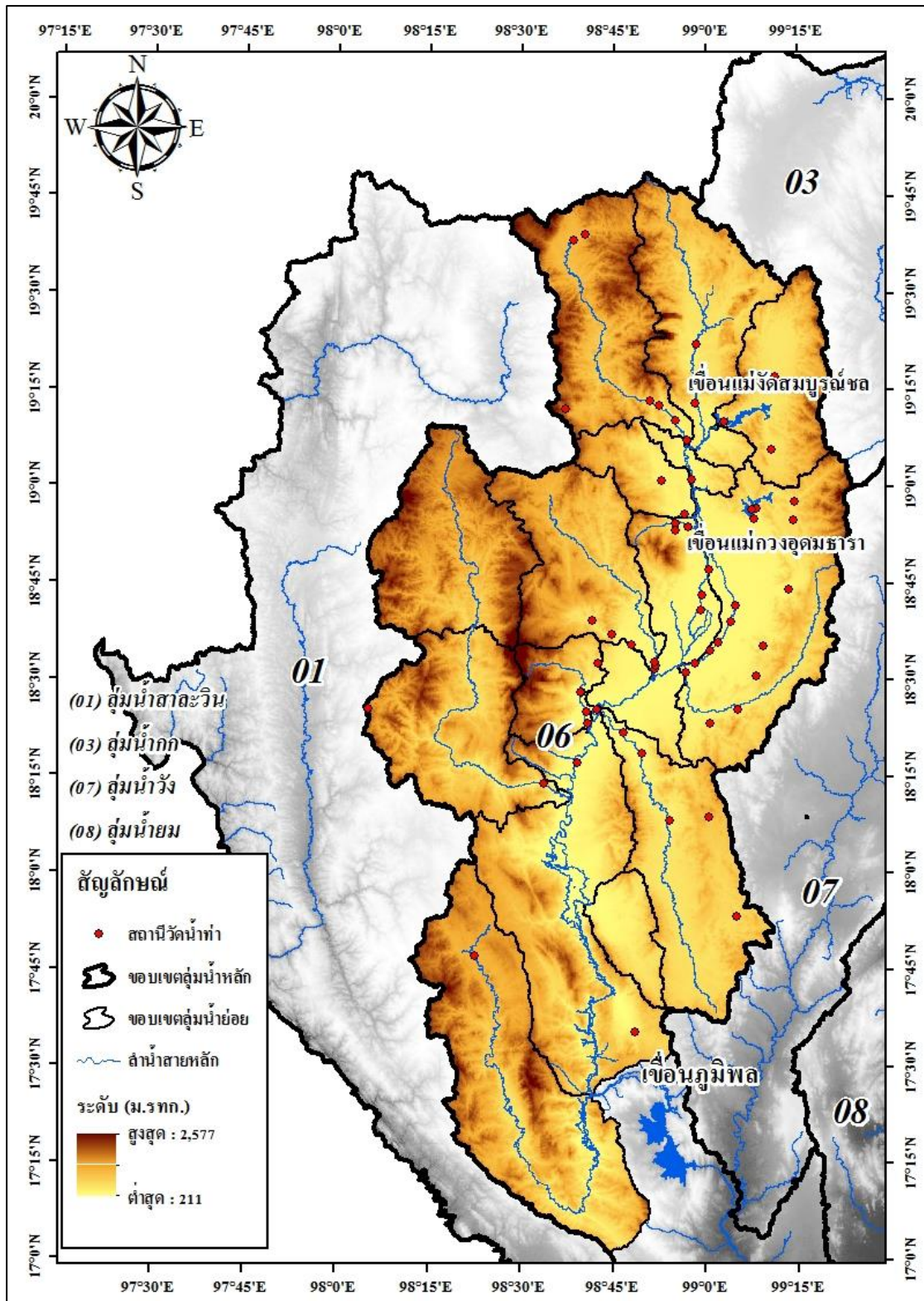
ลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปิงส่วนที่อยู่เหนือเขื่อนภูมิพลขึ้นไป ตั้งอยู่ระหว่างละติจูด 17 องศา 42 ฟลิปดาเหนือ ถึง 19 องศา 48 ลิปดา 56 ฟลิปดาเหนือ และลองจิจูด 98 องศา 3 ลิปดา 17 ฟลิปดาตะวันออก ถึง 99 องศา 24 ลิปดา 31 ฟลิปดาตะวันออก ลุ่มน้ำปิงตอนบนมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 25,299.73 ตารางกิโลเมตร ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ของจังหวัด เชียงใหม่ และลำพูน ตลอดจนพื้นที่บางส่วนของจังหวัดเชียงราย แม่ฮ่องสอน ลำปาง และตาก ลักษณะภูมิประเทศส่วนใหญ่ของลุ่มน้ำเป็นภูเขาสูง โดยทิศเหนือของลุ่มน้ำติดกับประเทศสาธารณรัฐแห่งสหภาพเมียนมา ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำกก และลุ่มน้ำวัง ทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำสาละวิน ลุ่มน้ำปิงตอนบนแบ่งออกเป็นลุ่มน้ำสาขาทั้งหมด 14 ลุ่มน้ำ รายละเอียดของแต่ละลุ่มน้ำสาขา แสดงดังตารางที่ 1 และสภาพภูมิประเทศ ขอบเขตลุ่มน้ำหลัก และขอบเขตลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปิงตอนบนแสดงดังภาพที่ 1

ลำน้ำสายหลักของลุ่มน้ำปิงตอนบนคือ แม่น้ำปิง ซึ่งมีต้นกำเนิดจากทิวเขาผีปันน้ำ ในเขตอำเภอเชียงดาว จังหวัดเชียงใหม่ โดยจะไหลจากทิศเหนือลงมาทางทิศใต้ผ่านหุบเขา เมื่อเข้าเขตอำเภอแม่แตงจะมีน้ำแม่จืด ไหลมาบรรจบทางฝั่งซ้ายและน้ำแม่แตง ไหลมาบรรจบทางฝั่งขวาและไหลลงสู่พื้นที่ราบลุ่มน้ำในเขตจังหวัดเชียงใหม่ มีน้ำแม่กวง ไหลมาบรรจบทางฝั่งซ้ายที่บริเวณจังหวัดลำพูน จากนั้นแม่น้ำปิงจะไหลไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้ โดยมีน้ำแม่ลีซึ่งไหลจากอำเภอถ้ำตั้งขึ้นมาทางเหนือมาบรรจบกับแม่น้ำปิงที่อำเภอจอมทองทางด้านฝั่งซ้าย จากอำเภอจอมทองแม่น้ำปิงไหลลงได้มีน้ำแม่แจ่ม ไหลมาบรรจบทางฝั่งขวาที่อำเภอฮอดก่อนไหลลงสู่อ่างเก็บน้ำเขื่อนภูมิพลที่อำเภอดอยเต่า

ตารางที่ 1 กลุ่มน้ำสาขาของกลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	รหัสกลุ่มน้ำสาขา	ชื่อกลุ่มน้ำสาขา	พื้นที่ (ตร.กม.)	ร้อยละของพื้นที่ ในกลุ่มน้ำปิงตอนบน
1	0602	แม่น้ำปิงตอนบน	1,904.10	7.53
2	0603	น้ำแม่จืด	1,279.77	5.06
3	0604	แม่น้ำแม่แตง	1,953.90	7.72
4	0605	แม่น้ำปิงส่วนที่ 2	1,527.40	6.04
5	0606	น้ำแม่วิม	567.81	2.24
6	0607	น้ำแม่กวง	2,876.70	11.37
7	0608	น้ำแม่งาน	1,733.04	6.85
8	0609	น้ำแม่ลี	2,079.65	8.22
9	0610	น้ำแม่กลาง	614.98	2.43
10	0611	แม่น้ำปิงส่วนที่ 3	3,184.82	12.59
11	0612	น้ำแม่แจ่มตอนบน	1,963.38	7.76
12	0613	น้ำแม่แจ่มตอนล่าง	1,932.50	7.64
13	0614	น้ำแม่หาด	517.25	2.04
14	0615	น้ำแม่คีน	3,164.43	12.51
รวม			25,299.73	100.00

ที่มา: กรมทรัพยากรน้ำ (2552)



ภาพที่ 1 สภาพภูมิประเทศ ขอบเขตลุ่มน้ำหลัก และขอบเขตลุ่มน้ำสาขาของลุ่มน้ำปิงตอนบน

1.2 สภาพภูมิอากาศของกลุ่มน้ำปิงตอนบน

สภาพภูมิอากาศทั่วไปของกลุ่มน้ำปิงตอนบนอยู่ภายใต้อิทธิพลของลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นแล้วในแต่ละปีกลุ่มน้ำปิงตอนบนจะได้รับอิทธิพลจากพายุดีเปรสชัน ซึ่งมาจากทะเลจีนใต้ในช่วงเดือนกรกฎาคมถึงกันยายน ทำให้กลุ่มน้ำปิงตอนบนมีฝนตกชุกตั้งแต่เดือนพฤษภาคมถึงเดือนตุลาคม จากการรวบรวมข้อมูลสภาพภูมิอากาศที่สถานีตรวจอากาศในพื้นที่กลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งบันทึกไว้โดยกรมอุตุนิยมวิทยา ช่วงปี พ.ศ. 2528-2557 จำนวน 4 สถานี ได้แก่ สถานี สกษ.แม่โจ้ สถานีจังหวัดเชียงใหม่ สถานีจังหวัดลำพูน และสถานีเขื่อนภูมิพล รายละเอียดแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 2 นั้น สามารถสรุปช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศหลักแสดงดังตารางที่ 3 การผันแปรรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศแสดงดังภาพที่ 2 และสรุปค่าเฉลี่ยของตัวแปรภูมิอากาศได้ ดังนี้

(1) อุณหภูมิเฉลี่ยมีค่าพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือนเป็น 22.1 ถึง 29.6 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 26.3 องศาเซลเซียส

(2) ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายปีเท่ากับ 72.0 เปอร์เซ็นต์ และช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือนเป็น 56.0 ถึง 81.5 เปอร์เซ็นต์

(3) ปริมาณการระเหยจากภาคมีช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือนเท่ากับ 95.0 ถึง 181.5 มิลลิเมตร และปริมาณการระเหยจากภาคเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1,527.6 มิลลิเมตร

(4) ความครึ้มของเมฆเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 4.7 เดคา (0-10 เดคา) และช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือนเท่ากับ 1.3 ถึง 8.2 เดคา

(5) ความเร็วลมเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1.5 น็อต และช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือนเท่ากับ 1.0 ถึง 1.9 น็อต

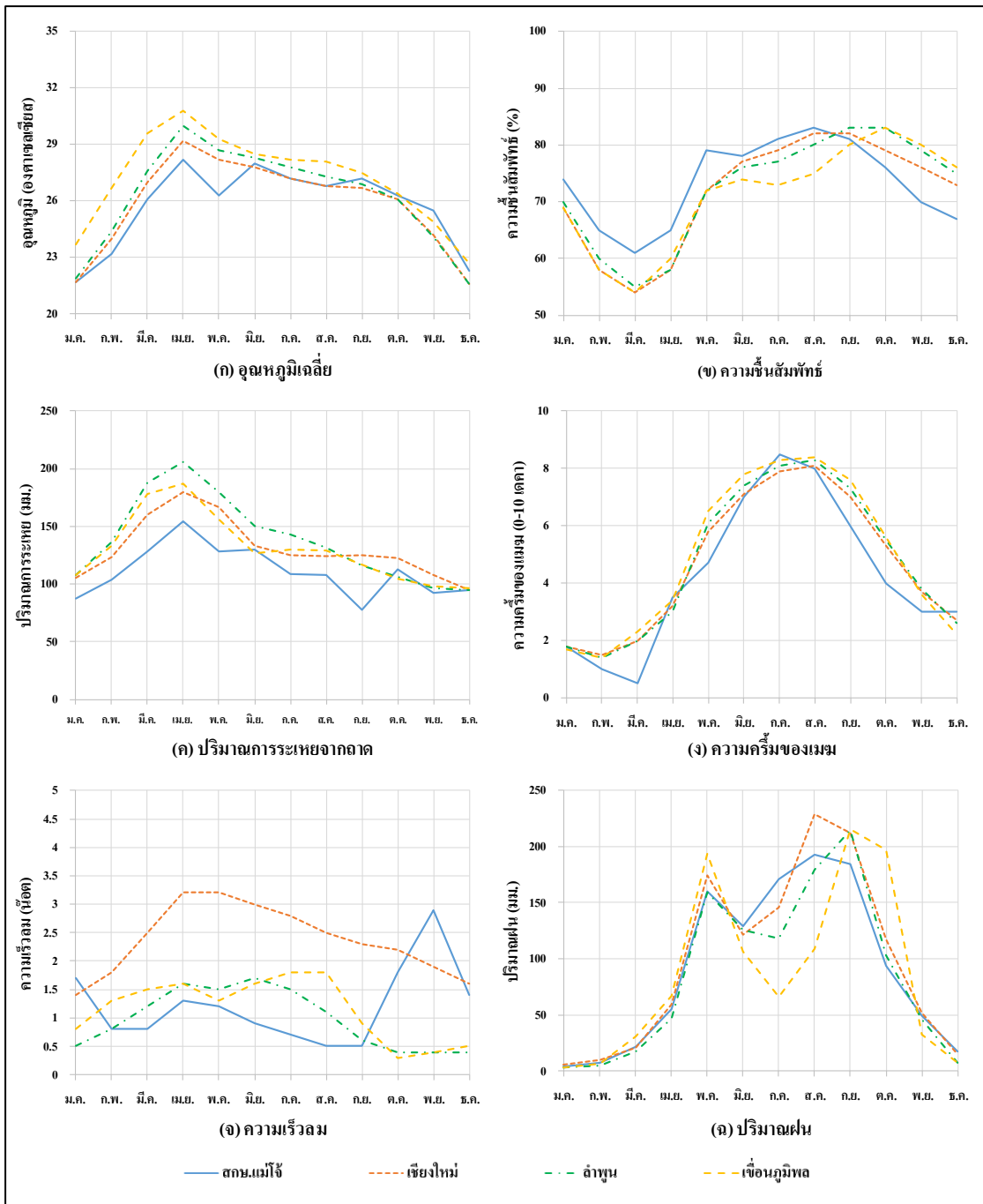
(6) ปริมาณฝนมีช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือนเท่ากับ 4.0 ถึง 206.8 มิลลิเมตร และปริมาณฝนเฉลี่ยรายปีเท่ากับ 1,076.4 มิลลิเมตร

ตารางที่ 2 รายละเอียดของสถานีตรวจอากาศ ในลุ่มน้ำปิงตอนบน

ลำดับที่	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ที่ตั้ง			พิกัด		ช่วงปีที่พิจารณา (พ.ศ.)	
			ตำบล	อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
1	327301	สภ.แม่ใจ	หนองหาร	สันทราย	เชียงใหม่	18.906679	99.005198	2549	2557
2	327501	เชียงใหม่	สุเทพ	เมืองเชียงใหม่	เชียงใหม่	18.771526	98.969330	2528	2557
3	329201	ลำพูน	บ้านกลาง	เมืองลำพูน	ลำพูน	18.566663	99.038599	2528	2557
4	376203	เขื่อนภูมิพล	สามเงา	สามเงา	ตาก	17.243889	99.002500	2528	2557

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศหลักของสถานีตรวจอากาศ ในลุ่มน้ำปิงตอนบน

สถานีตรวจอากาศ	ตัวแปรภูมิอากาศ	ค่าเฉลี่ยรายปี	ช่วงพิสัยของค่าเฉลี่ยรายเดือน		
สภข.แม่โจ้	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.7	21.7 (ม.ค.)	-	28.2 (เม.ย.)
	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	73.2	61.0 (มี.ค.)	-	83.0 (ส.ค.)
	ปริมาณการระเหยจากลาด (มม.)	1,325.9	77.8 (ก.ย.)	-	154.3 (เม.ย.)
	ความครึ้มของเมฆ (0-10 เดคา)	4.3	0.5 (มี.ค.)	-	8.5 (ก.ค.)
	ความเร็วลม (น็อต)	1.2	0.5 (ส.ค.)	-	2.9 (พ.ย.)
	ปริมาณฝน (มม.)	1,086.2	3.6 (ม.ค.)	-	193.1 (ส.ค.)
เชียงใหม่	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25.9	21.6 (ธ.ค.)	-	29.2 (เม.ย.)
	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	71.4	54.0 (มี.ค.)	-	82.0 (ส.ค.)
	ปริมาณการระเหยจากลาด (มม.)	1,566.5	94.7 (ธ.ค.)	-	179.6 (เม.ย.)
	ความครึ้มของเมฆ (0-10 เดคา)	4.7	1.5 (ก.พ.)	-	8.1 (ส.ค.)
	ความเร็วลม (น็อต)	2.4	1.4 (ม.ค.)	-	3.2 (เม.ย.)
	ปริมาณฝน (มม.)	1,160.4	5.6 (ม.ค.)	-	228.5 (ส.ค.)
ลำพูน	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	26.2	21.6 (ธ.ค.)	-	30.0 (เม.ย.)
	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	72.3	55.0 (มี.ค.)	-	83.0 (ก.ย.)
	ปริมาณการระเหยจากลาด (มม.)	1,655.2	94.4 (ธ.ค.)	-	205.4 (เม.ย.)
	ความครึ้มของเมฆ (0-10 เดคา)	4.8	1.4 (ก.พ.)	-	8.3 (ส.ค.)
	ความเร็วลม (น็อต)	1.0	0.4 (ต.ค.)	-	1.7 (มิ.ย.)
	ปริมาณฝน (มม.)	1,024.5	3.3 (ม.ค.)	-	214.5 (ก.ย.)
เขื่อนภูมิพล	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	27.2	22.7 (ธ.ค.)	-	30.8 (เม.ย.)
	ความชื้นสัมพัทธ์ (เปอร์เซ็นต์)	71.0	54.0 (มี.ค.)	-	83.0 (ต.ค.)
	ปริมาณการระเหยจากลาด (มม.)	1,562.9	96.3 (ธ.ค.)	-	186.8 (เม.ย.)
	ความครึ้มของเมฆ (0-10 เดคา)	4.9	1.4 (ก.พ.)	-	8.4 (ส.ค.)
	ความเร็วลม (น็อต)	1.2	0.3 (ต.ค.)	-	1.8 (ก.ค.)
	ปริมาณฝน (มม.)	1,034.3	3.4 (ม.ค.)	-	215.7 (ก.ย.)



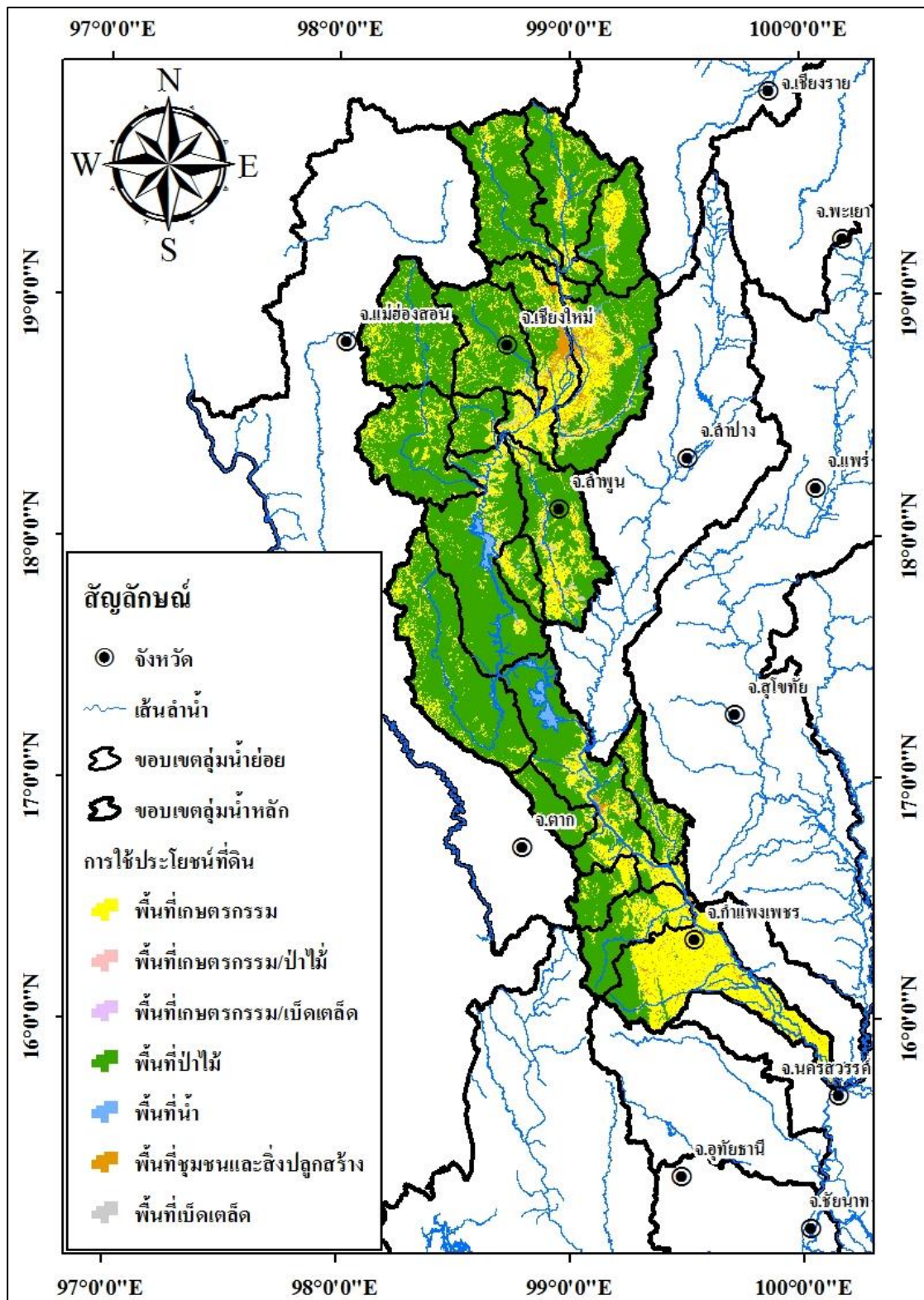
ภาพที่ 2 การผันแปรค่าเฉลี่ยรายเดือนของตัวแปรภูมิอากาศของสถานีตรวจอากาศในลุ่มน้ำปิงตอนบน

1.3 การใช้ประโยชน์ที่ดินของกลุ่มน้ำปิงตอนบน

จากการศึกษาข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน ปี พ.ศ. 2551 และ ปี พ.ศ. 2552 ของกลุ่มน้ำปิงตอนบน พบว่า พื้นที่ส่วนใหญ่ของกลุ่มน้ำปิงตอนบนเป็นพื้นที่ป่าไม้ 14,619,535 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 67.83 ของพื้นที่กลุ่มน้ำปิงตอนบน รองลงมาเป็นพื้นที่เกษตรกรรม 5,304,829 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 24.61 ของพื้นที่กลุ่มน้ำปิงตอนบน ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่กลุ่มน้ำปิงตอนบนยังคงมีความอุดมสมบูรณ์ของผืนป่าอยู่มาก โดยรายละเอียดการใช้ประโยชน์ที่ดินในกลุ่มน้ำปิงตอนบนทั้งหมดแสดงดังตารางที่ 4 และ การใช้ประโยชน์ที่ดินในกลุ่มน้ำปิงตอนบน ปี พ.ศ. 2551 และปี พ.ศ. 2552 แสดงดังภาพที่ 3

ตารางที่ 4 การใช้ประโยชน์ที่ดินในกลุ่มน้ำปิงตอนบน

ประเภทการใช้ที่ดิน	พื้นที่ (ไร่)	สัดส่วน (%)
พื้นที่เกษตรกรรม	5,304,829	24.61
พื้นที่เกษตรกรรม/ป่าไม้	3	0.00
พื้นที่เกษตรกรรม/เบ็ดเตล็ด	5,109	0.02
พื้นที่ป่าไม้	14,619,535	67.83
พื้นที่น้ำ	376,664	1.75
พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง	784,500	3.64
พื้นที่เบ็ดเตล็ด	462,893	2.15
รวมพื้นที่	21,553,533	100.00



ภาพที่ 3 การใช้ประโยชน์ที่ดินในลุ่มน้ำปิงตอนบนระหว่างปี พ.ศ. 2551 ถึง พ.ศ. 2552

2. แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำท่า

การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของน้ำท่าทำได้ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ (1) วิธีการเคลื่อนที่ของระบบแบบลัมพ์ (Lumped system routing) และ (2) วิธีการเคลื่อนที่แบบกระจายตัว (Distributed system model) (นุชนารถ, 2545) ซึ่งมีพอสรุปได้ดังนี้

2.1 แบบจำลองของระบบลัมพ์ (Lumped system model)

แบบจำลองประเภทลัมพ์ ปริมาณน้ำท่าจะถูกคำนวณเป็นฟังก์ชันกับเวลาอย่างเดียวกัน จุดที่พิจารณาซึ่งโดยทั่วไปหมายถึง การเคลื่อนที่ทางอุทกวิทยา (Hydrologic routing) ซึ่งข้อมูลด้านเข้า (Input) $I(t)$ ข้อมูลด้านออก (Output) $Q(t)$ และปริมาณการเก็บกัก (Storage) $S(t)$ มีความสัมพันธ์กับตามสมการต่อเนื่อง (Continuity equation) ดังสมการที่ (1)

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (1)$$

กรณีที่ทราบปริมาณการไหลเข้า (Inflow hydrograph; $I(t)$) ก็ยังไม่สามารถแก้สมการที่ (1) เพื่อหากราฟน้ำท่าของปริมาณการไหลออก (Outflow hydrograph; $Q(t)$) ได้เนื่องจากมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 2 ตัว ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์ที่เรียกว่า ฟังก์ชันของปริมาณการเก็บกัก (Storage function) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง S, I และ Q เมื่อนำฟังก์ชันของปริมาณการเก็บกักมารวมกับสมการต่อเนื่องแล้ว ก็สามารถนำมาแก้สมการ เพื่อหาค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าทั้ง 2 ตัวได้ โดยทั่วไปแล้ว ฟังก์ชันของปริมาณการเก็บกักสามารถเขียนให้อยู่ในรูปฟังก์ชันใด ๆ ของ I, Q และอนุพันธ์เวลา (Time derivation) ของ I และ Q ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$S = f\left(I, \frac{dI}{dt}, \frac{d^2I}{dt^2}, \dots, Q, \frac{dQ}{dt}, \frac{d^2Q}{dt^2}, \dots\right) \quad (2)$$

สมการที่ (1) และ (2) สามารถแก้ได้โดยการดิฟเฟอเรนทิเอท สมการที่ (2) และนำไปแทนค่าในสมการที่ (1) จากนั้นทำการอินทิเกรตสมการของอนุพันธ์ (Differential equation) เพื่อหาค่า $Q(t)$ ในฟังก์ชันของ $I(t)$ ซึ่งการแก้สมการดังกล่าวใช้วิธีไฟไนท์ ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference solution method) มาประยุกต์ โดยเวลาจะถูกแบ่งออกเป็นช่วง ๆ และสมการต่อเนื่อง หรือสมการที่ (1)

จะถูกคำนวณจากเวลาหนึ่งไปยังอีกเวลาหนึ่ง ด้วยการใส่ฟังก์ชันปริมาณการเก็บกัก (Storage function) หรือสมการที่ (2) มาประกอบการพิจารณาในแต่ละช่วงเวลา

รูปแบบของฟังก์ชันปริมาณการเก็บกักที่ทำการวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 2 ระบบ ดังนี้

2.1.1 การเคลื่อนที่ของระดับน้ำในอ่าง (Level pool routing)

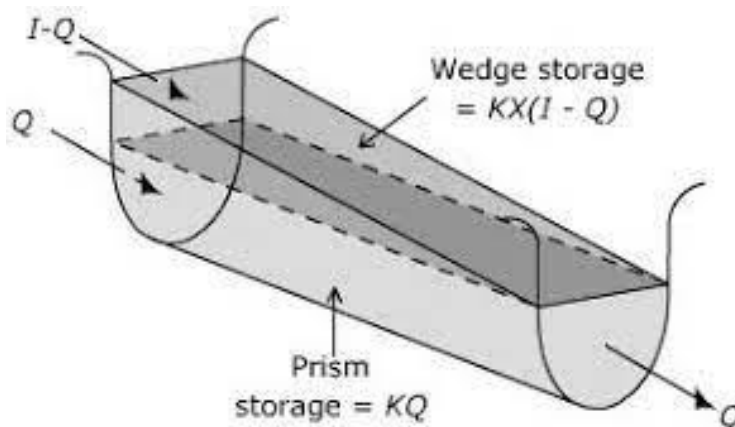
การเคลื่อนที่ของระดับน้ำในอ่างเป็นกระบวนการคำนวณกราฟน้ำท่าของปริมาณการไหลออกจากอ่างเก็บน้ำซึ่งมีผิวน้ำอยู่ในแนวระดับ โดยต้องมีการกำหนดกราฟน้ำท่าของปริมาณการไหลเข้า และลักษณะเฉพาะของปริมาณการเก็บกักและปริมาณการไหลออก (Storage-outflow characteristics)

หลักการในการแก้ปัญหาทำได้โดยการแบ่งเวลาออกเป็นช่วง ๆ โดยในแต่ละช่วงมีคาบเวลาเท่ากับ Δt เมื่อทำการอินทิเกรตสมการที่ (1) ในแต่ละช่วงเวลา (Time interval) ประกอบกับการพิจารณารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณการเก็บกักในช่วงเวลา Δt แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้สมการที่ใช้คำนวณปริมาณการไหลออก $Q(t)$ ดังสมการที่ (3)

$$\left(\frac{2S_{j+1}}{\Delta t} + Q_{j+1} \right) = (I_j + I_{j+1}) + \left(\frac{2S_j}{\Delta t} - Q_j \right) \quad (3)$$

2.1.2 การเคลื่อนที่ของแม่น้ำโดยวิธีทางอุทกวิทยา (Hydrologic river routing)

วิธีมัสคิงกัม (Muskingum method) เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการแก้ปัญหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการเก็บกักและปริมาณการไหลแบบเปลี่ยนแปลง โดยวิธีการนี้เป็นการจำลองแบบปริมาตรการเก็บกักของน้ำท่วมในทางน้ำ ด้วยการรวม Wedge storage และ Prism storage ดังแสดงในภาพที่ 4 ในระหว่างช่วงเวลาที่เกิดคลื่นน้ำท่วมมีค่าเพิ่มขึ้น (Advance of a flood wave) ปริมาณการไหลเข้าจะมากกว่าปริมาณการไหลออก จะเกิด Wedge storage ขึ้น และในช่วงเวลาของการลดลงปริมาณน้ำไหลออกจะมากกว่าปริมาณน้ำไหลเข้า ส่งผลให้ Wedge storage มีค่าเป็นลบ ในส่วนของ Prism storage นั้น หมายถึงปริมาตรของรูปตัดตามขวางของทางน้ำที่มีค่าคงที่ตามแนวยาวของทางที่มีรูปร่างคงที่



ภาพที่ 4 Prism storage และ Wedge storage ในช่วงลำน้ำที่มีหน้าตัดคงที่

สมมติให้พื้นที่หน้าตัดขวางของปริมาณการไหลของน้ำท่วมเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณการไหลในแต่ละหน้าตัดขวาง โดยที่ปริมาตรของ Prism storage มีค่าเท่ากับ KQ เมื่อ K คือค่าสัมประสิทธิ์สัดส่วน (Proportional coefficient) และปริมาตรของ Wedge storage เท่ากับ $KX(I-Q)$ เมื่อ X คือค่าแฟกเตอร์ถ่วงน้ำหนัก (Weighting factor) มีค่าอยู่ในช่วง $0 \leq X \leq 0.5$ ดังนั้นปริมาณการเก็บกักทั้งหมดคือผลรวมของส่วนประกอบทั้งสองส่วนดังสมการที่ (4)

$$S = KQ + KX(I - Q) \quad (4)$$

2.2 แบบจำลองระบบกระจายตัว (Distributed system model)

แบบจำลองประเภทกระจายตัว ปริมาณน้ำท่าจะถูกคำนวณเป็นฟังก์ชันของทั้งเวลาและสถานที่ ในที่นี้มักหมายถึงการเคลื่อนทางชลศาสตร์ (Hydraulic routing) ซึ่งเป็นการไหลของน้ำผ่านดินหรือทางน้ำของกลุ่มน้ำใด ๆ ที่อัตราการไหล ความเร็ว และความลึกของการไหลมีการเปลี่ยนแปลงตามสถานที่ (Space) ตลอดพื้นที่ลุ่มน้ำ ในการประมาณค่าอัตราการไหล และระดับน้ำ (Water level) ณ ตำแหน่งที่สนใจในระบบลำน้ำ สามารถทำได้โดยการใช้แบบจำลองการเคลื่อนที่ของน้ำท่าแบบกระจายตัว (Distributed flow routing model) ซึ่งแบบจำลองประเภทนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของ partial differential equation (the Saint-Venant equations) สำหรับการไหลแบบมิติเดียว (One-dimension flow) ซึ่งยอมให้อัตราการไหลและระดับน้ำสามารถคำนวณได้ในรูปฟังก์ชันของเวลาและสถานที่ (Time and space) โดยแบบจำลองกระจายตัวมีข้อได้เปรียบแบบจำลองแบบลัมพ์ตรงที่เป็นการคำนวณหาอัตราการไหลและระดับน้ำพร้อมกันไปที่เดียว

แทนที่จะคำนวณแยกกัน จึงทำให้แบบจำลองกระจายตัวเป็นการประมาณค่าที่ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงของการไหลแบบ Unsteady nonuniform flow ผ่านลำน้ำมากกว่าแบบจำลองแบบลัมพ์

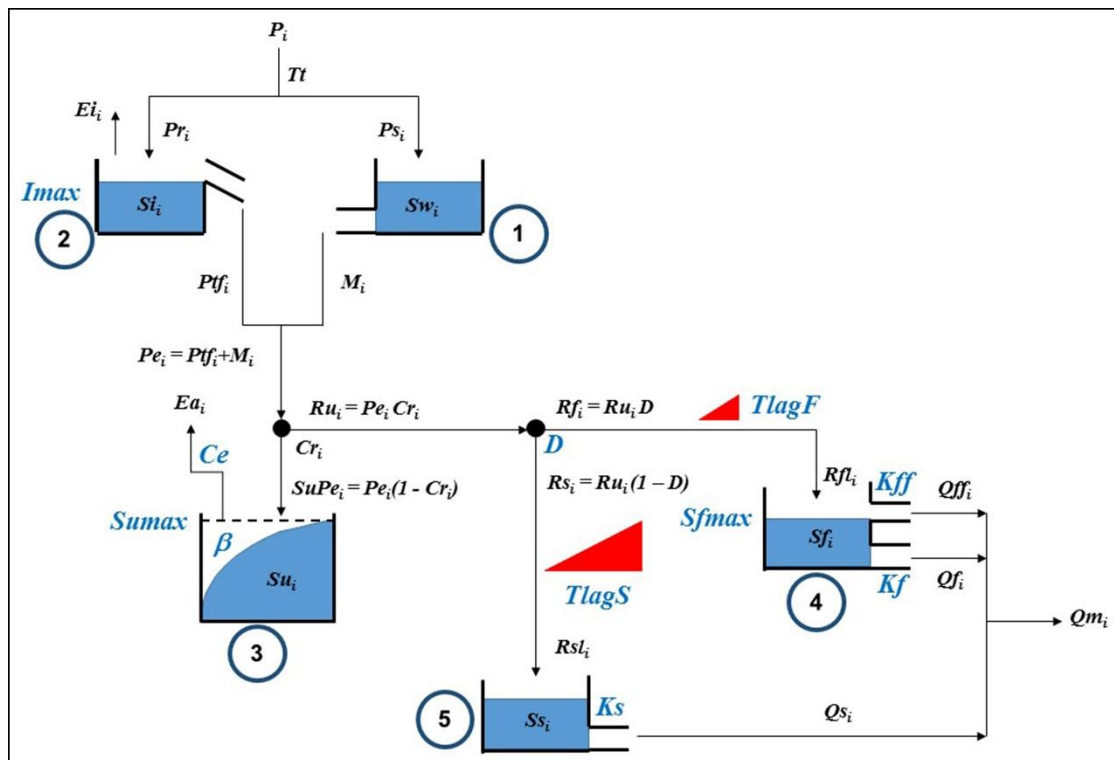
3. ทฤษฎีของแบบจำลอง FLEXL

แบบจำลอง FLEXL เป็นแบบจำลองแบบลัมพ์ (Lumped model) โดยแนวความคิดหลักของแบบจำลองคือการแบ่งปริมาณการเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำออกเป็น 5 ชั้นเก็บกัก (Reservoirs) (นุชนารถ, 2559) ดังแสดงในภาพที่ 5 และสมการที่ใช้ในการคำนวณของแบบจำลอง FLEXL แสดงดังในตารางที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วยสมการสมดุลน้ำและสมการโครงสร้างของแบบจำลองสำหรับรายละเอียดของปริมาณการเก็บกักในแต่ละส่วนแสดงดังต่อไปนี้

3.1 การเก็บกักในชั้นหิมะ (Snow reservoir)

การเก็บกักในชั้นหิมะเกิดจากหิมะตกลงสู่พื้นที่ลุ่มน้ำในช่วงฤดูหนาว และจะเริ่มละลายในช่วงฤดูใบไม้ผลิ ซึ่งปริมาณน้ำที่เกิดจากการละลายของหิมะจะถูกสมมติว่าซึมลงสู่ดินโดยไม่ผ่านกระบวนการ Interception เนื่องจากในการศึกษานี้ นำแบบจำลอง FLEXL มาประยุกต์ใช้ในพื้นที่ลุ่มน้ำของประเทศไทยซึ่งไม่มีหิมะตกจึงไม่พิจารณาการเก็บกักในชั้นหิมะ ทั้งนี้ สมการสมดุลน้ำของการเก็บกักในชั้นหิมะแสดงดังสมการที่ (5) และปริมาณน้ำที่เกิดจากการละลายของหิมะคำนวณได้จากสมการที่ (6)

โดยที่ Sw_i คือ ปริมาตรเก็บกักในชั้นหิมะ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
 Ps_i คือ ปริมาณหิมะที่ตกลงสู่พื้นดิน หน่วยเป็นมิลลิเมตร
 M_i คือ ปริมาณน้ำที่เกิดจากการละลายของหิมะ หน่วยเป็นมิลลิเมตร
 F_{DD} คือ อัตราการละลายของหิมะ หน่วยเป็นมิลลิเมตรต่อวันต่อองศา
 T_i คือ อุณหภูมิของอากาศ หน่วยเป็นองศาเซลเซียส
 และ Tt คือ อุณหภูมิเริ่มต้นที่เกิดการละลาย หน่วยเป็นองศาเซลเซียส



ภาพที่ 5 โครงสร้างของแบบจำลอง FLEXL

3.2 การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception (Inception reservoir)

ปริมาณฝนที่ตกลงมาจะถูกเก็บกักไว้ร่วมกับกระบวนการ Interception ในช่วงเวลา ก่อนหน้า จากนั้นปริมาณที่เก็บกักในกระบวนการ Interception จะระเหยกลับคืนสู่ชั้นบรรยากาศ โดยสมมูลน้ำในส่วนของ การเก็บกักโดยกระบวนการ Interception แสดงดังสมการที่ (7) และ ปริมาณการระเหยในกระบวนการ Interception คำนวณได้จากสมการที่ (8) ทั้งนี้ ปริมาณฝนส่วนเกิน ที่เหลือจากการการระเหยคำนวณได้จากสมการที่ (9)

โดยที่ S_i คือ ปริมาณเก็บกักโดยกระบวนการ Interception หน่วยเป็นมิลลิเมตร)

Pr_i คือ ปริมาณฝนที่ตกลงมา หน่วยเป็นมิลลิเมตร

E_i คือ ปริมาณการระเหยจากการเก็บกักโดยกระบวนการ Interception หน่วยเป็น มิลลิเมตร

Ptf_i คือ ปริมาณฝนส่วนเกิน (Effective rainfall) จากการสูญเสียโดยกระบวนการ Interception หน่วยเป็นมิลลิเมตร

Ep_i คือ ศักย์การคายระเหย (Potential evaporation) ที่คำนวณด้วยวิธี Penman-Monteith และ $Imax$ คือ ปริมาตรเก็บกักสูงสุดโดยกระบวนการ Interception หน่วยเป็นมิลลิเมตร

3.3 การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Unsaturated soil reservoir)

การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะคำนวณจากปริมาณฝนส่วนเกิน (Pe_i) สำหรับประเทศไทยซึ่งไม่มีหิมะ ดังนั้น ปริมาณฝนส่วนเกินจึงเท่ากับปริมาณฝนส่วนเกินจากการสูญเสียโดยกระบวนการ Interception (Ptf_i) จากนั้น Pe_i จะซึมลงสู่ชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำและถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนหนึ่งจะถูกเก็บกักไว้ในดินในรูปของความชื้นของดิน (Soil moisture) ซึ่งเป็นจุดเด่นของแบบจำลอง FLEXL โดยใช้ความสัมพันธ์จากแบบจำลอง Xinanjiang และส่วนที่เหลือจะไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ โดยค่าสัมประสิทธิ์น้ำท่า (Runoff coefficient; Cr_i) จะเป็นตัวแบ่งน้ำทั้งสองส่วนดังกล่าว โดยสมมูลน้ำของการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำแสดงดังสมการที่ (10) ค่า Cr_i ที่ใช้ในแบบจำลองคำนวณได้โดยสมการที่ (11) ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Ru_i) คำนวณได้โดยสมการที่ (12) ทั้งนี้ การเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำจะเกิดการคายระเหยที่ต้องการจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Ea_i) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (13)

โดยที่ Su_{i-1} คือ ปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำก่อนวันที่พิจารณา 1 วัน หน่วยเป็นมิลลิเมตร

Su_i คือ ปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ณ วันที่พิจารณา หน่วยเป็นมิลลิเมตร

$Sumax$ คือ ปริมาตรเก็บกักสูงสุดในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ หน่วยเป็นมิลลิเมตร

β คือ สัมประสิทธิ์การกระจายเชิงพื้นที่ของปริมาณการเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำบนพื้นที่ลุ่มน้ำ

และ Ce คือ สัมประสิทธิ์การระเหย

ตารางที่ 5 สมการสมดุลน้ำและสมการโครงสร้างของแบบจำลอง FLEXL

ชั้นที่	ปริมาตรเก็บกัก	สมการสมดุลน้ำ	สมการโครงสร้าง
1	ชั้นหิมะ	$\frac{dSw}{dt} = Ps_i - M_i$ (5)	$M_i = \begin{cases} F_{DD}(T_i - Tt); T_i > Tt \\ 0; T_i \leq Tt \end{cases}$ (6)
2	กระบวนกร Interception	$\frac{dSi}{dt} = Pr_i - Ei_i - Ptf_i$ (7)	$Ei_i = \begin{cases} Ep_i; Si_i > 0 \\ 0; Si_i = 0 \end{cases}$ (8)
			$Ptf_i = \begin{cases} 0; Si_i < Imax \\ Pr_i; Si_i = Imax \end{cases}$ (9)
3	ชั้นดินไม่อิ่มตัว ด้วยน้ำ	$\frac{dSu}{dt} = Pe_i(1 - Cr_i) - Ea_i$ (10)	$Cr_i = 1 - \left(1 - \frac{Su_{i-1}}{Sumax}\right)^\beta$ (11)
			$Ru_i = Pe_i \cdot Cr_i$ (12)
			$Ea_i = (Ep_i - Ei_i) \min\left(\frac{Su_i}{Sumax \cdot Ce}, 1\right)$ (13)
4	น้ำท่าที่มี การตอบสนอง เร็ว	$\frac{dSf}{dt} = Rft_i - Qff_i - Qf_i$ (14)	$Rf_i = Ru_i D$ (15)
			$c_{lagF}(j) = \frac{j}{\sum_{u=1}^{TlagF} u}$ (16)
			$Rfl_i = \sum_{j=1}^{TlagF} C_{lagF}(j) \cdot Rf_{i-j-1}$ (17)
			$Qff_i = \frac{\max(0, Sf_i - Sfmax)}{Kff}$ (18)
			$Qf_i = \frac{Sf_i}{Kf}$ (19)
5	น้ำท่าที่มี การตอบสนอง ช้า	$\frac{dSs}{dt} = Rs_i - Qs_i$ (20)	$Rs_i = Ru_i(1 - D)$ (21)
			$c_{lagS}(j) = \frac{j}{\sum_{u=1}^{TlagS} u}$ (22)
			$Rsl_i = \sum_{j=1}^{TlagS} C_{lagS}(j) \cdot Rs_{i-j-1}$ (23)
			$Qs_i = \frac{Ss_i}{Ks}$ (24)

3.4 การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Fast respond reservoir)

ปริมาณน้ำที่ไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Ru_i) จะถูกแบ่งโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์ของการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Splitter coefficient; D) และไหลมายังชั้นการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว สมดุลน้ำของการเก็บกักในชั้นดังกล่าวแสดงดังในสมการที่ (14) โดยปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว (Rf_i) คำนวณได้จากสมการที่ (15) โดย Rf_i จะถูกหน่วงเวลา เพื่อให้การไหลเกิดล่าช้ากว่าการเกิดปริมาณฝน โดยเป็นไปตามฟังก์ชันหน่วงเวลา (Lag function) ดังแสดงในสมการที่ (16) ทั้งนี้ ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วที่ถูกหน่วงเวลา (Rfl_i) คำนวณได้จากสมการที่ (17)

โดยที่ $C_{lagF}(j)$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของ Rf_i ในวันที่ $i-j+1$ ในเมื่อ j มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง $TlagF$ และ $TlagF$ คือ การหน่วงเวลาของการเกิดฝนจนถึงเวลาที่เกิดปริมาณการไหลสูงสุด หน่วยเป็น ชั่วโมง

Rfl_i ข้างต้นจะถูกนำมารวมกับปริมาตรการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาก่อนหน้า (Sf_{i-1}) กลายเป็นปริมาตรการเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาถัดไป (Sf_i) จากนั้นปริมาณการเก็บกักในส่วนนี้จะถูกนำมาตรวจสอบว่ามีค่ามากกว่าปริมาตรเก็บกักสูงสุดของชั้นน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว ($Sfmax$) หรือไม่ โดยถ้ามีค่ามากกว่าแล้วจะเกิดการไหลเหนือฝูดิน ซึ่งคำนวณได้ดังสมการที่ (18) ทั้งนี้ อัตราการไหลเหนือฝูดินที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะของการตอบสนองแบบเส้นตรง (Linear respond reservoir) ที่ขึ้นกับค่าคงที่ Kff

โดยที่ Qff_i คือ อัตราการไหลเหนือฝูดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว หน่วยเป็นมิลลิเมตร
และ Kff คือ สัดส่วนของการไหลออกสู่ทางน้ำของน้ำของน้ำเหนือฝูดิน

ปริมาณน้ำท่าที่เหลืออยู่ในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็วจะมีการไหลใต้ฝูดิน โดยคำนวณได้จากสมการที่ (19)

โดยที่ Q_f คือ อัตราการไหลใต้ผิวดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นที่มีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว
หน่วยเป็นมิลลิเมตร

และ K_f คือ สัดส่วนของการไหลออกสู่ทางน้ำของน้ำใต้ผิวดิน

3.5 การเก็บกักในชั้นของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (Slow reacting reservoir)

สมดุลน้ำในเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (20) โดยปริมาณน้ำที่ไหลออกจากชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Ru_i) ที่ไหลมายังชั้นการเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าคำนวณได้จากสมการที่ (21) ปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า (R_s) จะถูกหน่วงเวลาเพื่อให้เกิดล่าช้ากว่าการเกิดปริมาณฝน โดยเป็นไปตามฟังก์ชันหน่วงเวลา (Lag function) ดังแสดงในสมการที่ (22) และปริมาณน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าที่ถูกหน่วงเวลา (R_{sL}) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (23)

โดยที่ $C_{lagS}(j)$ คือ ค่าถ่วงน้ำหนักของ R_s ในวันที่ $i-j+1$ ในเมื่อ j มีค่าตั้งแต่ 1 จนถึง $TlagS$

และ $TlagS$ คือ การหน่วงเวลาของปริมาณการไหลจากชั้นรากพืชไปยังชั้นน้ำใต้ดิน หน่วยเป็น ชั่วโมง

จากนั้น R_{sL} ที่คำนวณได้จะถูกนำมารวมกับปริมาตรเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้าในช่วงเวลาก่อนหน้า ($S_{s,i-1}$) กลายเป็นปริมาตรเก็บกักของน้ำท่าที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า ณ ช่วงเวลาที่พิจารณา (S_s) จากนั้นปริมาตรเก็บกักในส่วนนี้จะไหลไปรวมกับน้ำใต้ดิน และไหลออกสู่ทางน้ำอย่างช้า ๆ โดยคำนวณปริมาณการไหลออกได้จากสมการที่ (24)

โดยที่ Q_{s_i} คือ อัตราการไหลของน้ำใต้ดินที่เกิดจากการเก็บกักในชั้นเก็บกักที่มีการตอบสนองอย่างเชื่องช้า หน่วยเป็นมิลลิเมตร

และ K_s คือ สัดส่วนของการไหลออกสู่ทางน้ำของน้ำใต้ดิน

4. แบบจำลอง URBS

แบบจำลอง URBS ถูกพัฒนาโดย Queensland Department of Natural Resources and Mines ในปี ค.ศ. 1990 เพื่อการพยากรณ์น้ำท่วม โดยมีพื้นฐานแนวความคิดจากแบบจำลอง RORB (Laurenson and Meins, 1990) นอกจากการพยากรณ์น้ำท่วมแล้ว URBS ยังสามารถจำลองแบบอัตราการไหลและระดับน้ำในลักษณะเหตุการณ์เดียว และเหตุการณ์ต่อเนื่องได้ สามารถแสดงผลด้านออกในรูปแบบของ spreadsheet ได้ URBS ยังสามารถนำมาใช้เพื่อการจำลองการชะล้าง และการพัฒนาตะกอน สามารถอธิบายถึงผลกระทบที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงชุมชนเมือง และการตัดไม้ทำลายป่า และสามารถวิเคราะห์ความเสียหายที่เกิดจากน้ำท่วมได้เช่นกัน (นุชนารถ, 2556)

แบบจำลอง URBS ประกอบด้วยแบบจำลองย่อย 3 แบบจำลอง คือ (1) แบบจำลองการเคลื่อนตัวของปริมาณน้ำท่า (2) แบบจำลองการสูญเสียของความลึกฝน และ (3) แบบจำลองการประเมินปริมาณการไหลพื้นฐาน ซึ่งรายละเอียดของแต่ละแบบจำลองสามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 แบบจำลองการเคลื่อนตัวของปริมาณน้ำท่า

แบบจำลอง URBS เป็นแบบจำลองประเภทโครงข่ายการเคลื่อนตัวของปริมาณน้ำท่า (runoff-routing networked models) ของพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย โดยแบบจำลองการเคลื่อนตัวของปริมาณน้ำท่าประกอบด้วย แบบจำลองพื้นฐาน (basic model) และแบบจำลองแยกส่วน (split model) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

4.1.1 แบบจำลองพื้นฐาน

สมมติฐานของแบบจำลองพื้นฐาน คือ ปริมาตรเก็บกักในพื้นที่ลุ่มน้ำ และปริมาณเก็บกักของลำน้ำในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย จะถูกพิจารณาพร้อมกันในลักษณะของอ่างเก็บน้ำแบบไม่เป็นเส้นตรง (nonlinear reservoir) โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเก็บกัก และอัตราการไหล ($S-Q$) ของอ่างเก็บน้ำแบบไม่เป็นเส้นตรง แสดงดังสมการที่ (25)

$$S = k_c Q^m \quad (25)$$

- โดยที่ S คือ ปริมาตรเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำ และลำน้ำ หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อวินาที
- k_c คือ ค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนตัวแบบไม่เป็นเส้นตรงของอ่างเก็บน้ำ
- Q คือ ปริมาณน้ำไหลออก หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
- และ m คือ พารามิเตอร์การเปลี่ยนแปลงแบบไม่เป็นเส้นตรงของพื้นที่ลุ่มน้ำ (catchment nonlinearity parameter)

ค่าคงที่สำหรับการเคลื่อนตัวแบบไม่เป็นเส้นตรงของอ่างเก็บน้ำ (k_c) เป็นฟังก์ชันกับลักษณะเฉพาะของปริมาตรเก็บกักของพื้นที่ลุ่มน้ำ และปริมาตรเก็บกักของลำน้ำ เมื่อทำการแทนค่า k_c ลงในสมการที่ (25) จะได้สมการของปริมาตรเก็บกักที่เปลี่ยนรูปไปดังสมการที่ (26)

$$S = \left\{ \frac{\alpha f L n (1+F)^2}{\sqrt{S_c} (1+U)^2} \right\} Q^m \quad (26)$$

- โดยที่ α คือ พารามิเตอร์การหน่วงของการเก็บกัก (storage lag parameter)
- f คือ แฟกเตอร์ความยาวของช่วงลำน้ำ
- L คือ ความยาวลำน้ำ หน่วยเป็นกิโลเมตร
- U คือ สัดส่วนพื้นที่เมืองของพื้นที่ลุ่มน้ำ
- F คือ สัดส่วนพื้นที่ป่าไม้ของพื้นที่ลุ่มน้ำ
- n คือ สัมประสิทธิ์ความขรุขระของทางน้ำ
- และ S_c คือ ความลาดชันของทางน้ำ

4.1.2 แบบจำลองแยกส่วน

แบบจำลองแยกส่วนเป็นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของน้ำท่า ซึ่งมีหลักการคล้ายกับแบบจำลองพื้นฐาน ต่างกันตรงที่ปริมาตรเก็บกักของลุ่มน้ำ และลำน้ำจะถูกแบ่งแยกออกจากกันอย่างอิสระ โดยเมื่อฝนตกลงมาบนพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย ปริมาณฝนจะเคลื่อนตัวผ่านปริมาตรเก็บกักของลุ่มน้ำซึ่งตั้งอยู่ที่จุดศูนย์กลางของพื้นที่ลุ่มน้ำ เพื่อไหลไปสู่ลำน้ำ โดยใช้หลักการการเคลื่อนตัวของน้ำท่าบนพื้นที่ลุ่มน้ำ จากนั้นปริมาณการไหลออกจากปริมาตรเก็บกักของลุ่มน้ำจะเข้าสู่ปริมาตรเก็บกักของลำน้ำ จะถูกเคลื่อนตัวไปตามทางน้ำด้วยวิธีมัลติลิงกัมแบบไม่เป็น

เส้นตรง (Nonlinear Muskingum) โดยหลักการเคลื่อนตัวของปริมาณน้ำผ่านปริมาตรเก็บกักกลุ่มน้ำ และปริมาตรเก็บกักลำน้ำแสดงได้ดังนี้

(1) การเคลื่อนตัวของน้ำท่าบนพื้นที่ลุ่มน้ำ (Catchment routing)

การเคลื่อนตัวของน้ำท่าบนพื้นที่ลุ่มน้ำ จะใช้หลักการของอ่างเก็บน้ำ แบบไม่เป็นเส้นตรงเพื่อคำนวณปริมาตรเก็บกักกลุ่มน้ำ โดยความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรเก็บกัก และอัตราการไหลแสดงดังสมการที่ (27)

$$S_{catch} = \left\{ \frac{\beta \sqrt{A}(1+F)^2}{(1+U)^2} \right\} Q^m \quad (27)$$

โดยที่ S_{catch} คือ ปริมาตรเก็บกักของกลุ่มน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อวินาที)

β คือ พารามิเตอร์การหน่วงของกลุ่มน้ำ (catchment lag parameter)

และ A คือ พื้นที่ลุ่มน้ำ หน่วยเป็นตารางกิโลเมตร

(2) การเคลื่อนตัวของน้ำท่าในลำน้ำ (Channel routing)

การเคลื่อนตัวในลำน้ำจะใช้พื้นฐานของวิธีมัสคิงกัม (Muskingum method) แบบไม่เป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (28)

$$S_{chnl} = \alpha f \frac{nL}{\sqrt{S_c}} (xQ_u + (1-x)Q_d)^{n_1} \quad (28)$$

โดยที่ S_{chnl} คือ ปริมาตรเก็บกักในลำน้ำ หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตร ชั่วโมง ต่อวินาที

α คือ พารามิเตอร์ของการเคลื่อนตัวของลำน้ำ

Q_u คือ ปริมาณการไหลเข้าด้านเหนือน้ำ หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

Q_d คือ ปริมาณการไหลออกด้านท้ายน้ำ หน่วยเป็นลูกบาศก์เมตรต่อวินาที

x คือ พารามิเตอร์การเคลื่อนตัวโดยวิธีมัสคิงกัม

และ n_1 คือ พารามิเตอร์แบบไม่เป็นเส้นตรงของวิธีมัสคิงกัม

4.2 แบบจำลองการสูญเสียปริมาณน้ำฝน

แบบจำลอง URBS มีแนวคิดในการจำลองการสูญเสียปริมาณน้ำฝน 2 วิธี ได้แก่ การจำลองการสูญเสียแบบเหตุการณ์เดียว และแบบเหตุการณ์ต่อเนื่อง

4.3 แบบจำลองการไหลพื้นฐาน

แบบจำลอง URBS สามารถประเมินปริมาณการไหลพื้นฐานได้ทั้งแบบคงที่ และแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลา โดยค่าเริ่มต้นของปริมาณการไหลพื้นฐานสามารถกำหนดให้เท่ากับค่าแรก ของข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่กำหนดใน gauging station files (Q_r) สำหรับการประเมินปริมาณการไหล พื้นฐานแบบคงที่นั้น จะกำหนดให้มีค่าเท่ากับ Q_r ตลอดช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ในขณะที่ปริมาณ การไหลพื้นฐานแบบเปลี่ยนแปลงตามเวลาคำนวณได้โดยใช้สมการที่ (29)

$$Qb_i = BR(Qb_{i-1}) + BC(Q_r)^{BM} \quad (29)$$

โดยที่ Qb_i , Qb_{i-1} คือ ปริมาณการไหลพื้นฐานสำหรับช่วงเวลา i และ $i-1$ ตามลำดับ

BR คือ แฟคเตอร์ลดถอยปริมาณการไหลพื้นฐานรายวัน (daily baseflow recession factor)

BC คือ ค่าคงที่ของการไหลพื้นฐาน (baseflow constant)

BM คือ ค่าเลขกำลังของการไหลพื้นฐาน (baseflow exponent)

5. ดัชนีภัยแล้ง Normalized Difference Infrared Index (NDII)

ดัชนีภัยแล้ง NDII เป็นดัชนีความแตกต่างจากค่าปกติของรังสีอินฟราเรด ซึ่งประเมิน จากเทคนิคการรับรู้จากระยะไกล ได้รับการพัฒนาขึ้นโดย Hardisky et al. (1983) โดยสามารถ คำนวณได้จากการนำช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น (SWIR) ที่มีความยาวช่วงคลื่นบริเวณศูนย์กลางที่ 1.64 ไมโครเมตร ($\rho_{1.64\mu m}$) มาใช้งานร่วมกับคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) ที่มีความยาวช่วงคลื่น บริเวณศูนย์กลางที่ 0.86 ไมโครเมตร ($\rho_{0.86\mu m}$) มาใช้คำนวณหาดัชนีความแตกต่างจากค่าปกติของ รังสีอินฟราเรด (NDII) เพื่อตรวจสอบสภาพภัยแล้ง หรือความชุ่มชื้นของพืชพรรณ โดยคำนวณ ได้จากสมการที่ (30)

$$NDII = \frac{\rho_{0.86\mu m} - \rho_{1.64\mu m}}{\rho_{0.86\mu m} + \rho_{1.64\mu m}} \quad (30)$$

โดยที่ $\rho_{0.86\mu m}$ คือ ค่าการสะท้อนกลับจากพื้นผิวในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ที่มีศูนย์กลาง 0.86 ไมโครเมตร

และ $\rho_{1.64\mu m}$ คือ ค่าการสะท้อนกลับจากพื้นผิวในช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้นที่มีศูนย์กลาง 1.64 ไมโครเมตร

ดัชนี NDII มีการประยุกต์ใช้ค่าการสะท้อนกลับของพื้นผิว 2 ช่วงคลื่น ได้แก่ (1) ช่วงคลื่นที่มีความไว (Sensitive) และ (2) ช่วงคลื่นที่ไม่มีความไว (Insensitive) ในการอธิบายความจุของน้ำในใบพืช ซึ่งประกอบด้วย (1) ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) และ (2) ช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น (SWIR) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความจุน้ำในพืช อย่างไรก็ตาม การประมาณค่าความจุของน้ำในพืชโดยใช้ช่วงคลื่น NIR และ SWIR ยังคงมีความคลุมเครืออยู่ เนื่องจากไม่สามารถที่จะขจัดผลกระทบของดินบริเวณพื้นผิวออกได้อย่างสมบูรณ์ (Gao, 1996) เพราะค่าที่ดาวเทียมวัดได้เป็นค่าที่ผสมกันของการสะท้อนกลับของพืช และที่ดินว่างเปล่า การสะท้อนกลับของสิ่งปกคลุมจะได้รับผลกระทบมากจากการสะท้อนกลับของดิน โดยเฉพาะบริเวณที่ความหนาแน่นของต้นไม้ต่ำหรือสิ่งปกคลุมไม่ครอบคลุมทั้งพื้นที่ ในขณะที่การสะท้อนกลับของดินได้รับผลกระทบจากความชื้นในดินรวมทั้งปัจจัยอื่นๆ เช่น ส่วนประกอบของแร่อินทรีย์วัตถุ ลักษณะของเนื้อดิน เป็นต้น แต่สำหรับพื้นที่ใดๆนั้น การสะท้อนกลับของดินจะขึ้นอยู่กับความชื้นบริเวณผิวดินเนื่องจากปัจจัยอื่นๆ นั้นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากเมื่อเทียบกับเวลา ดังนั้น ความชื้นในดินจึงถูกนำมาพิจารณาในการจำลองแบบเสมือนจริงของการสะท้อนกลับบนพื้นผิว และดัชนีเกี่ยวกับน้ำในพืช

6. การสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม MOSCEM

โปรแกรม MOSCEM (Multiobjective Shuffled Complex Evolution Matropolis) ถูกพัฒนาขึ้นโดย Vrugt *et al.* (2003) เพื่อใช้ในการหาค่าชุดพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objectives optimization) โดยเป็นกระบวนการค้นหาชุดคำตอบจากคำตอบที่เป็นไปได้ โดยจะได้ค่าสูงสุดหรือต่ำสุดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์พร้อมๆ กัน โดยผลลัพธ์ที่ได้จากการแก้ปัญหา

เรียกว่า ชุดคำตอบที่ดีที่สุด ซึ่งชุดคำตอบจะอยู่บนเส้นโค้งที่ใช้ในการกำหนดขอบเขตของคำตอบ (Pareto front) (นุชนารณ, 2559)

ขั้นตอนการดำเนินการของโปรแกรม MOSCEM สามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: กำหนดจำนวนพารามิเตอร์ของปัญหา (dimension, n) จำนวนกลุ่มของประชากร (complexes; q) ขนาดของประชากรที่ต้องการสุ่ม (s) และจำนวนจุดในแต่ละกลุ่มประชากร (m) ซึ่งคำนวณได้จากความสัมพันธ์ $m = s/q$

ขั้นตอนที่ 2: การสร้างประชากรเบื้องต้น โดยการสุ่ม และคำนวณค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละประชากรที่สุ่มขึ้นมา

ขั้นตอนที่ 3: การคำนวณค่า fitness ของสตริงแต่ละตัว (individual) จากนั้นเรียงลำดับสตริงคำตอบแต่ละตัวจากค่า fitness จากค่ามากไปหาค่าน้อย ทั้งสตริงคำตอบ และค่า fitness จะถูกเก็บไว้ในเมตริก D ดังนั้น แถวแรกของเมตริก D คือ สตริงคำตอบที่มีค่า fitness สูงสุด

ขั้นตอนที่ 4: การเริ่มต้นแบ่งเมตริก D ออกเป็น q กลุ่ม ขนาดกันไปเป็นลำดับอย่างต่อเนื่อง (parallel sequence) ซึ่งในที่นี้กำหนดให้เมตริก D ที่ถูกแบ่งแล้วเป็นเมตริก S^k ดังนั้น จะได้เมตริกจำนวน S^q กลุ่ม ยกตัวอย่างเช่น S^k คือ $D[k, 1:n+1]$ เมื่อ $k = 1, 2, \dots, q$ และ n คือจำนวนประชากร โดยในการคำนวณจะเริ่มต้นจากเมตริก S ที่มีค่า fitness สูงสุด

ขั้นตอนที่ 5: การเริ่มต้นแบ่งเมตริก D ออกเป็น q กลุ่ม และตั้งชื่อแต่ละกลุ่มว่า C^k เมื่อ $k = 1, 2, \dots, q$

ขั้นตอนที่ 6: เริ่มขั้นตอนของการวิวัฒนาการ (evolution) ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

(1) กำหนดจำนวนรอบในการประเมินประชากรชุดใหม่ที่จะสุ่มขึ้นมา

(2) หาค่าความสัมพันธ์ covariance ของประชากรทั้งหมดใน C^k

(3) สุ่มค่า Z โดยใช้การแจกแจงปกติ (normal distribution)

(4) สร้างประชากรรุ่นใหม่ (offspring) จากค่าที่สุ่มได้ และความสัมพันธ์ covariance ของประชากร

(5) ตรวจสอบว่าประชากรรุ่นใหม่อยู่ในขอบเขตที่กำหนดหรือไม่

(6) หาค่า fitness ของประชากรรุ่นใหม่

(7) คำนวณค่า $\alpha = (f_i / f_{i+1})^{\beta(t+1)}$

โดยที่ β คือ scaling factor สำหรับโปรแกรม MOSCEM กำหนดให้เท่ากับ 0.5

f_i คือ ค่า fitness ของประชากร

และ f_{i+1} คือ ค่า fitness ของประชากรรุ่นใหม่

(8) เปรียบเทียบค่า α กับค่า Z ในขั้นตอนที่ 2

ถ้า $Z \leq \alpha$ จะนำประชากรรุ่นใหม่เพิ่มลงในเมตริก S^k และแทนประชากรชุดที่มีค่า fitness ที่น้อยกว่าของเมตริก C^k ด้วยประชากรรุ่นใหม่

ถ้า $Z > \alpha$ จะไม่รับประชากรรุ่นใหม่

(9) ทำซ้ำจนครบรอบประเมิน

ขั้นตอนที่ 7: การนำเมตริก C^k แทนกลับไปเมตริก D จากนั้นเรียงลำดับสตรงค่าตอบแต่ละตัวจากค่า fitness จากมากไปหาน้อยอีกครั้ง

ขั้นตอนที่ 8: การตรวจสอบเงื่อนไขการจบกระบวนการ ถ้าหากถูกต้องจะจบกระบวนการ แต่ถ้าไม่ถูกต้องจะกลับไปเริ่มขั้นตอนที่ 5 ใหม่

7. สัมประสิทธิ์ Kling-Gupta (Kling-Gupta Efficiency)

สัมประสิทธิ์ Kling-Gupta (Kling-Gupta Efficiency; KGE) เป็นค่าทางสถิติระหว่างผลการประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าและข้อมูลจากสถานีตรวจวัด โดยค่า KGE จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ KGE มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงที่ดีมากและปริมาณทั้งสองสำหรับทุกค่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก และในกรณีที่ KGE มีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ทั้งในเชิงปฏิภาคและเชิงปริมาณ โดยในการศึกษานี้ นำค่า KGE มาใช้เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จำนวน 3 ค่า ดังนี้ (1) ประสิทธิภาพการไหล (Efficiencies of flows, KGE_E) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (31) (2) ลอการิทึมของการไหล (Logarithm of flows, KGE_L) และ (3) โด่งช่วงเวลาการไหล (Flow duration curves, KGE_F)

$$KGE_E = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{STD_{Mod}}{STD_{Obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{Avg_{Mod}}{Avg_{Obs}} - 1\right)^2} \quad (31)$$

โดยที่ r คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

STD_{Mod} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง

STD_{Obs} คือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า

Avg_{Mod} คือ ค่าเฉลี่ยของผลประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

Avg_{Obs} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

ในกรณีของค่า KGE_L คำนวณได้จากสมการที่ (31) โดยใช้ค่าลอการิทึมของการไหลในการคำนวณ เช่นเดียวกับค่า KGE_F ที่คำนวณได้จากสมการข้างต้น โดยใช้ค่าปริมาณการไหลที่ถูกเรียงลำดับจากค่ามากไปยังค่าน้อยก่อนนำไปแทนค่าในสมการที่ (31)

8. สัมประสิทธิ์ Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency)

สัมประสิทธิ์ Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency; NSE) เป็นค่าทางสถิติที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าด้วยแบบจำลอง หรือประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยค่า NSE จะมีค่าอยู่ระหว่าง $-\infty$ ถึง 1 ในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองมีความสัมพันธ์แบบปฏิภาคโดยตรงที่ดีมากและปริมาณทั้งสองสำหรับทุกค่า มีค่าใกล้เคียงกันมาก

และในกรณีที่ NSE มีค่าเข้าใกล้ $-\infty$ แสดงว่าชุดข้อมูลทั้งสองไม่มีความสัมพันธ์ทั้งในเชิงปฏิภาค และเชิงปริมาณ โดยที่ค่า NSE คำนวณได้จากสมการที่ (32)

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^N (Obs_i - Mod_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Obs_i - Avg_{Obs})^2} \right) \quad (32)$$

- โดยที่ Obs_i คือ ข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
 Mod_i คือ ผลการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)
 Avg_{Obs} คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่า (ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที)

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรมที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง การวิเคราะห์ข้อมูลพื้นฐานเพื่อการสร้างข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วย โปรแกรม ArcGIS 10.2 โปรแกรม Python 2.7 และโปรแกรม MATLAB เวอร์ชัน R2018a
2. ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด และข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันแบบกริด ที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT และข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่ตรวจวัดโดยกรมชลประทาน ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึงปี พ.ศ. 2557
3. ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model; DEM) ที่ครอบคลุมพื้นที่ประเทศไทย จาก Shuttle Radar Topography Mission (STRM) ที่มีความละเอียดของจุดภาพ (Resolution) 30 เมตร
4. ข้อมูลดัชนี Normalized Different Infrared Index (NDII) ที่ได้จากงานวิจัยที่ดำเนินการโดย Srivongsitanon et al. (2016)
5. ห้องดำเนินงานวิจัยและสาธารณูปโภค

วิธีการ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า” มีขั้นตอนในการศึกษาโดยสรุปได้ดังนี้

1. การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

2. การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาในกลุ่มน้ำปีงตอนบนในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2557 ซึ่งประกอบด้วย (1) ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด (2) ข้อมูลศักยภาพการคายระเหยของพืชอ้างอิงแบบกริด (3) ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวัน (4) ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) และ (5) ข้อมูลดัชนี NDII

3. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบ

4. การสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL

5. การสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

6. การเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง และผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73

7. การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated soil storage; S_u) ที่ได้จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ทั้งที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง และผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73

ในแต่ละขั้นตอนการศึกษามีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

1.1 การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD

แบบจำลอง KU-FLEX-SD (Semi-distributed FLEX model) เป็นแบบจำลองน้ำฝน-น้ำท่าแบบกึ่งกระจายตัว ซึ่งได้รับการพัฒนาตามหลักการของแบบจำลอง FLEXL เพื่อการประเมินกราฟน้ำท่าที่จุดออกของทุกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณาภายใต้ลุ่มน้ำหลักที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง แบบจำลอง KU-FLEX-SD จะใช้หลักการของการประเมินน้ำท่าในแต่ละลุ่มน้ำย่อยตามกระบวนการของ

แบบจำลอง FLEXL ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ และใช้หลักการของการเคลื่อนที่ของน้ำท่า จากจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำไปยังจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำ โดยวิธีการ Muskingum ดังนั้น พื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองด้านท้ายน้ำจะถูกแบ่งเป็น กลุ่มน้ำย่อยที่ต้องการประเมินน้ำท่า ทั้งนี้ ปริมาณน้ำท่าในแต่ละกลุ่มน้ำย่อยสามารถประเมินได้ด้วย แบบจำลอง FLEXL ดังกล่าวข้างต้น โดยการคำนวณความลึกฝนส่วนเกินที่แตกต่างกันในแต่ละ กลุ่มน้ำย่อยของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง ความลึกฝนส่วนเกินของแต่ละ กลุ่มน้ำย่อยจะเคลื่อนตัวไปยังจุดออกของกลุ่มน้ำโดยใช้การหน่วงเวลาของการเกิดฝนจนถึงเวลาที่เกิด ปริมาณการไหลสูงสุด ($TlagF$) และการหน่วงเวลาของปริมาณการไหลจากชั้นรากพืชไปยังชั้นน้ำใต้ดิน ($TlagS$) โดยพารามิเตอร์ $TlagF$ และ $TlagS$ ของแต่ละกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณาคำนวณได้จากสมการที่ (33) และ (34) ตามลำดับ

$$TlagF_{sub} = TlagF \sqrt{A_{sub}/A} \quad (33)$$

$$TlagS_{sub} = TlagS \sqrt{A_{sub}/A} \quad (34)$$

โดยที่ $Tlag$ คือ พารามิเตอร์ของการหน่วงเวลาของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง (ชั่วโมง)

$Tlag_{sub}$ คือ พารามิเตอร์ของการหน่วงเวลาของกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา (ชั่วโมง)

A คือ พื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง (ตารางกิโลเมตร)

A_{sub} คือ พื้นที่รับน้ำของกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา (ตารางกิโลเมตร)

ทั้งนี้ ในการศึกษาี้แนะนำให้ $TlagF$ และ $TlagS$ เป็นแบบรายชั่วโมงแทนที่จะเป็นแบบ รายวัน ตามที่ใช้ในแบบจำลอง FLEXL ทั้งนี้ เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการประเมินน้ำท่าของแบบจำลอง KU-FLEX-SD จากนั้นปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำจะเคลื่อนตัวน้ำท่าผ่านลำน้ำจากจุดออก ของแต่ละกลุ่มน้ำย่อยไปตามลำน้ำไปยังจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำโดยใช้วิธีการเคลื่อนตัวของ Muskingum เพื่อนำไปรวมกับปริมาณน้ำท่าที่ประเมินได้ของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำต่อไป ทั้งนี้ การเคลื่อนตัวของกราฟน้ำท่าโดยวิธีการ Muskingum คำนวณได้จากสมการที่ (35)

$$S_{chnl} = K_{sub}(XQ_{up} + (1-X)Q_{down}) \quad (35)$$

- โดยที่ S_{chl} คือ ปริมาตรเก็บกักในลำน้ำ (ลูกบาศก์เมตร ชั่วโมงต่อวินาที)
 K คือ พารามิเตอร์หน่วงเวลาของลำน้ำ สำหรับสถานีวัดน้ำท่าที่สอบเทียบแบบจำลอง
 X คือ พารามิเตอร์ของการเคลื่อนตัวในลำน้ำ สำหรับสถานีวัดน้ำท่าที่สอบเทียบแบบจำลอง

ทั้งนี้ K_{sub} สามารถคำนวณได้จากผลคูณของค่า K และความยาวลำน้ำจากจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำถึงจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำ (L_{sub}) ดังแสดงในสมการที่ (36)

$$K_{sub} = KL_{sub} \quad (36)$$

1.2 การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII

แบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII ถูกพัฒนามาจากแบบจำลอง KU-FLEX-SD เพื่อเพิ่มความสามารถในกระจายพารามิเตอร์ของปริมาตรเก็บกักสูงสุดในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ($Sumax$) ให้มีความแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มน้ำย่อย ซึ่งพารามิเตอร์ดังกล่าวในแบบจำลอง KU-FLEX-SD จะใช้ค่าเดียวกันในทุกกลุ่มน้ำย่อย ทั้งที่ในสภาพความเป็นจริงนั้นความสามารถในการเก็บกักน้ำของดินแต่ละบริเวณอาจไม่เท่ากัน พารามิเตอร์ $Sumax$ จึงควรมีค่าที่แตกต่างกัน

จากการศึกษาของ Sriwongsitanon *et al.* (2016) พบว่า ดัชนี NDII มีความสัมพันธ์กับปริมาตรเก็บกักในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S_u) เฉลี่ยราย 8 วัน ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำดัชนี NDII มาใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD ให้เป็นแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII โดยนำดัชนี NDII มาใช้ในการกระจายพารามิเตอร์ $Sumax$ ของแต่ละกลุ่มน้ำย่อย ซึ่งความสัมพันธ์ที่ใช้ในการกระจายแสดงได้ดังในสมการที่ (37)

$$Sumax_i = Sumax \times \left(\frac{[(NDII_{i,max})^b - (NDII_{i,min})^b]_{max}}{[(NDII_{max})^b - (NDII_{min})^b]_{max}} \right) \quad (37)$$

- โดยที่ $Sumax_i$ คือ ปริมาตรเก็บกักสูงสุดในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำในแต่ละกลุ่มน้ำย่อย (มิลลิเมตร)
 $Sumax$ คือ ปริมาตรเก็บกักสูงสุดในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำของสถานีที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง (มิลลิเมตร)
 $NDII_{i,max}$ คือ ดัชนี NDII สูงสุดในแต่ละปีของกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา

- $NDII_{i,min}$ คือ ดัชนี NDII ต่ำสุดในแต่ละปีของกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา
- $NDII_{max}$ คือ ดัชนี NDII สูงสุดในแต่ละปีของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง
- $NDII_{min}$ คือ ดัชนี NDII ต่ำสุดในแต่ละปีของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง
- b คือ เลขยกกำลังของดัชนี NDII ซึ่งมีค่าระหว่าง 1 ถึง 5

2. การรวบรวมข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

2.1 ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด

ข้อมูลความลึกฝนที่ใช้ในการศึกษา คือ ข้อมูลความลึกฝนรายวันแบบกริด (Gauged Gridded Rainfall; GGR) ที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management (SENSWAT) โดยนำข้อมูลความลึกฝนรายวันจากสถานีตรวจวัดทั่วประเทศ จำนวน 1,779 สถานี มาตรวจสอบความถูกต้องด้วยกระบวนการโค้งทับทวิ (Double mass curve) จากนั้นนำข้อมูลฝนที่ผ่านการตรวจสอบแล้วมาสร้างเป็นข้อมูลฝนเชิงกริดด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทาง (Inverse Distance Weighted; IDW) สำหรับการศึกษานี้ได้พิจารณาข้อมูลฝนแบบกริด ในช่วงปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2557 ที่ครอบคลุมพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยการเฉลี่ยเชิงพื้นที่เพื่อเป็นข้อมูลด้านเข้าสำหรับแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้

2.2 ข้อมูลศักยภาพการคายระเหยของพืชอ้างอิง

ข้อมูลศักยภาพการคายระเหยของพืชอ้างอิง (Potential evapotranspiration) ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้มาจากข้อมูลศักยภาพการคายระเหยของพืชอ้างอิงรายวันแบบกริดที่ถูกพัฒนาขึ้นภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT โดยสร้างมาจากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยารายวันจากสถานีตรวจอากาศ 103 สถานี ทั่วประเทศมาคำนวณหาค่าศักยภาพการคายระเหยของพืชอ้างอิงด้วยวิธี Penman-Monteith โดยมีข้อมูลด้านเข้า คือ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ อาทิเช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ชั่วโมงแสงแดด เป็นต้น จากนั้นนำข้อมูลศักยภาพการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่คำนวณได้มาสร้างเป็นข้อมูลแบบกริดด้วยวิธีส่วนกลับของระยะทาง (Inverse Distance Weighted; IDW) (กมลพัฒน์ และนุชนารถ, 2562) ทั้งนี้ในการศึกษานี้ได้พิจารณาใช้ข้อมูลการคายระเหยของพืชอ้างอิงแบบกริดในช่วงปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2557 มาเฉลี่ยเชิงพื้นที่เพื่อเป็นข้อมูลด้านเข้าสำหรับแบบจำลองที่ประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้

2.3 ข้อมูลปริมาณน้ำท่ารายวัน

ข้อมูลน้ำท่าที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ คือ ข้อมูลน้ำท่าแบบรายวันที่สถานีวัดน้ำท่าจำนวน 14 สถานี ที่มีข้อมูลในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2557 ซึ่งประกอบด้วย สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.20, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85, P.24A และ P.73 แสดงดังภาพที่ 6 โดยขนาดพื้นที่รับน้ำฝน ที่ตั้ง ช่วงปีสถิติข้อมูล และปริมาณการให้น้ำจำเพาะของสถานีวัดน้ำท่าที่นำมาใช้ในการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 6 โดยในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าปริมาณการให้น้ำจำเพาะ (Specific yield) มีค่าอยู่ระหว่าง 3.97 ถึง 15.46 ลิตรต่อวินาทีต่อตารางกิโลเมตร ซึ่งตรวจวัดได้ที่สถานีวัดน้ำท่า P.85 และ P.82 ตามลำดับ สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 14 สถานีที่นำมาใช้ในการศึกษานั้นตั้งอยู่ภายในพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบน และเป็นสถานีที่ไม่ได้รับผลกระทบโดยตรงจากโครงการพัฒนาแหล่งน้ำขนาดกลางและขนาดใหญ่ อย่างไรก็ตาม ในลุ่มน้ำย่อยแม่จืดเป็นที่ตั้งของเขื่อนแม่จืดสมบูรณ์ชล ซึ่งมีความจุเก็บกักประมาณ 265 ล้านลูกบาศก์เมตร และในลุ่มน้ำย่อยแม่กวังเป็นที่ตั้งของเขื่อนแม่กวังอุดมธารา ซึ่งมีความจุเก็บกักประมาณ 263 ล้านลูกบาศก์เมตร ดังนั้นการบริหารจัดการอ่างเก็บน้ำจะทำให้เกิดการไหลที่ถูกจัดการ (Regulated flow) ซึ่งส่งผลกระทบต่อ การประเมินน้ำท่าโดยแบบจำลองที่ใช้ในการศึกษานี้ ดังนั้น ได้นำข้อมูลน้ำที่ปล่อยออกจากเขื่อนแม่จืดสมบูรณ์ชล และเขื่อนแม่กวังอุดมธารามาเป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

ตารางที่ 6 รายละเอียดของสถานีวัดน้ำท่าที่ใช้ในการศึกษา

ลำดับที่	รหัสสถานี	ชื่อสถานี	ลำน้ำ	ที่ตั้ง		พิกัด		พื้นที่รับน้ำฝน (ตร.กม.)	ช่วงปีสถิติ ข้อมูล (พ.ศ.)	ปริมาณการให้น้ำ จำเพาะ (ลิตร/วินาที/ตร.กม.)
				อำเภอ	จังหวัด	ละติจูด	ลองจิจูด			
1	P.20	บ้านเชียงดาว	แม่น้ำปิง	เชียงดาว	เชียงใหม่	19.367778	98.972500	1,309	2522 - 2557	11.63
2	P.75	บ้านช่อแล	แม่น้ำปิง	แม่แตง	เชียงใหม่	18.143889	99.010000	3,029	2542 - 2557	7.92
3	P.4A	บ้านแม่แตง	น้ำแม่แตง	แม่แตง	เชียงใหม่	19.120833	98.947500	1,954	2510 - 2557	6.15
4	P.67	บ้านแม่แตง	แม่น้ำปิง	สันทราย	เชียงใหม่	19.019722	98.961944	5,333	2539 - 2557	7.78
5	P.21	บ้านริมใต้	น้ำแม่ริม	แม่ริม	เชียงใหม่	18.929167	98.943056	516	2503 - 2557	8.47
6	P.1	สะพานนารัฐ	แม่น้ำปิง	เมือง	เชียงใหม่	18.785833	99.008056	6,142	2476 - 2557	7.81
7	P.81	บ้านโป่ง	น้ำแม่กวง	สันกำแพง	เชียงใหม่	18.693611	99.081944	1,364	2545 - 2557	6.98
8	P.77	บ้านสบแม่สะปัวด	น้ำแม่ทา	แม่ทา	ลำพูน	18.424167	98.083889	550	2542 - 2557	6.60
9	P.82	บ้านสบวิน	น้ำแม่วาง	แม่วาง	เชียงใหม่	18.651944	98.690000	391	2546 - 2557	15.46
10	P.84	บ้านพันตน	น้ำแม่วาง	แม่วาง	เชียงใหม่	18.590000	98.799444	454	2546 - 2557	8.27
11	P.76	บ้านแม่ฮีไฮ	น้ำแม่ลี้	ลี้	ลำพูน	18.135278	98.903333	1,541	2543 - 2557	4.87
12	P.85	บ้านหลายแก้ว	น้ำแม่ลี้	บ้านโฮ้ง	ลำพูน	18.363889	98.775556	1,972	2546 - 2557	3.97
13	P.24A	สะพานประชาอุทิศ	น้ำแม่กลาง	จอมทอง	เชียงใหม่	18.417222	98.674722	448	2516 - 2557	11.07
14	P.73	บ้านสบสอย	แม่น้ำปิง	จอมทอง	เชียงใหม่	18.285556	98.652500	14,777	2541 - 2557	8.44

2.4 ข้อมูลแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model; DEM)

ในการศึกษานี้ได้นำแบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (DEM) มาใช้ในการแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลอง ตลอดจนพื้นที่รับน้ำฝนของกลุ่มน้ำย่อยของสถานีที่พิจารณา เพื่อนำขนาดพื้นที่ไปเป็นข้อมูลด้านเข้าสำหรับแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII โดยการศึกษานี้เลือกใช้แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลขจากโครงการ Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) ซึ่งสร้างขึ้นโดยความร่วมมือระหว่าง NASA และ National Geospatial-Intelligence Agency (NGA) ทั้งนี้ SRTM มีความละเอียด 30 เมตร ซึ่งเรียกว่าผลิตภัณฑ์ SRTM-30 สำหรับการแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนดังกล่าวได้พิจารณาใช้ Watershed ในโปรแกรม ArcGIS10.2 เป็นเครื่องมือในการดำเนินงาน

2.5 ข้อมูลดัชนี NDII

ในการศึกษานี้ได้นำข้อมูลดัชนี NDII มาใช้ประกอบการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII จากนั้นได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII กับปริมาณเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัวเฉลี่ย 8 วัน (S_u) ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง ซึ่งข้อมูลดัชนี NDII ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้เป็นข้อมูลเฉลี่ยราย 8 วัน ในรูปแบบกริดที่มีความละเอียด 500 เมตร ในระหว่างปี พ.ศ. 2546 ถึง พ.ศ. 2557 ซึ่งสามารถดาวน์โหลดได้จาก <ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT> (Vermote *et al.*, 2011) โดยข้อมูล NDII ที่นำมาใช้เป็นข้อมูลค่าสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละปีของกลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา สำหรับข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้น เป็นข้อมูลเชิงอนุกรมเวลา (Time series) ของดัชนี NDII

3. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบ

ในการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII จะดำเนินการที่ทุกสถานีวัดน้ำท่าจำนวน 14 สถานี และนำผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.1 และ P.73 มาตรวจสอบความถูกต้องในการประเมินน้ำท่า ดังนั้น การแบ่งกลุ่มน้ำย่อยจึงต้องครอบคลุมตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าทั้ง 14 สถานี นอกจากนั้นแล้ว การสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII จะได้ผลลัพธ์ในทุกกลุ่มย่อยที่ทำการแบ่งกลุ่มน้ำ ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงได้แบ่งพื้นที่กลุ่มน้ำออกเป็น

87 กลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในภาพที่ 7 และภาพที่ 8 เมื่อแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนแล้วในลำดับต่อมาคือ การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของพื้นที่รับน้ำฝนของกลุ่มน้ำย่อยเหล่านั้นซึ่งประกอบด้วย ขนาดของพื้นที่รับน้ำฝน และความยาวลำน้ำที่เชื่อมระหว่างจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านเหนือน้ำ ไปยังจุดออกของกลุ่มน้ำย่อยด้านท้ายน้ำ ซึ่งความยาวลำน้ำดังกล่าวถูกนำมาใช้ในกรณีของการสอบเทียบ แบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เท่านั้น รายละเอียดของการวิเคราะห์ลักษณะ ทางกายภาพของแต่ละกลุ่มน้ำย่อยแสดงดังในตารางที่ 7 โดยในกรณีที่กลุ่มน้ำย่อยใดเป็นกลุ่มน้ำ ด้านเหนือน้ำและไม่ได้รับน้ำท่าจากกลุ่มน้ำย่อยใด ๆ จะไม่มีกระบวนการเคลื่อนตัวของน้ำในลำน้ำ เกิดขึ้น ทำให้ไม่มีการแสดงความยาวของลำน้ำ

ตารางที่ 7 รายละเอียดลักษณะทางกายภาพของแต่ละกลุ่มน้ำย่อย

กลุ่มน้ำย่อยที่	จุดออก ของกลุ่มน้ำ	พื้นที่กลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำระหว่าง กลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา (กม.)
S1	เขื่อนแม่จัดสมบูรณ์ชล	1,280	-
S2	-	115	-
S3	-	130	16.95 (S2 ถึง S3)
S4	-	200	-
S5	-	178	9.19 (S3 ถึง S5)
S6	-	198	21.31 (S5 ถึง S6)
S7	-	188	-
S8	-	141	20.81 (S7 ถึง S8)
S9	P.20	159	10.89 (S6 ถึง S9)
S10	-	153	9.91 (S9 ถึง S10)
S11	-	137	11.04 (S10 ถึง S11)
S12	P.75	150	16.43 (S11 ถึง S12)
S13	-	155	9.77 (S12 ถึง S13)
S14	-	123	-
S15	-	183	-
S16	-	181	17.00 (S15 ถึง S16)

ตารางที่ 7 (ต่อ)

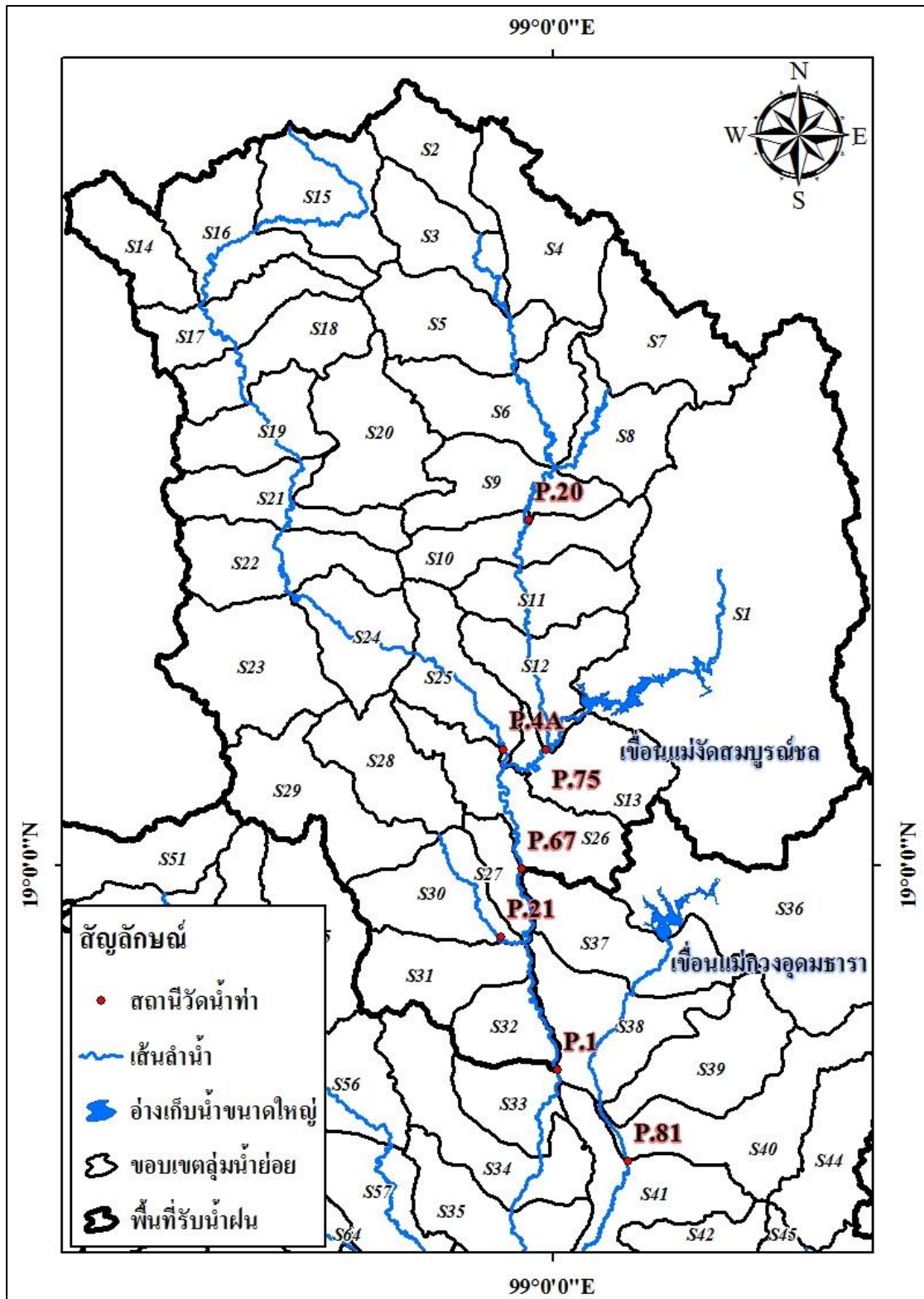
ลุ่มน้ำย่อยที่	จุดออก ของลุ่มน้ำ	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำระหว่าง ลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา (กม.)
S17	-	133	10.44 (S16 ถึง S17)
S18	-	152	9.43 (S17 ถึง S18)
S19	-	136	10.71 (S18 ถึง S19)
S20	-	210	-
S21	-	139	12.39 (S19 ถึง S21)
S22	-	177	12.30 (S21 ถึง S22)
S23	-	230	-
S24	-	142	20.34 (S22 ถึง S24)
S25	P.4A	149	23.09 (S24 ถึง S25)
S26	P.67	195	18.36 (S25 ถึง S26)
S27	-	57	11.58 (S26 ถึง S27)
S28	-	154	-
S29	-	211	-
S30	P.21	151	21.18 (S29 ถึง S30)
S31	-	147	4.26 (S30 ถึง S31)
S32	P.1	90	14.56 (S31 ถึง S32)
S33	-	101	12.13 (S32 ถึง S33)
S34	-	211	8.25 (S33 ถึง S34)
S35	-	197	14.81 (S34 ถึง S35)
S36	เขื่อนแม่กวงอุดมธารา	556	-
S37	-	190	10.22 (S36 ถึง S37)
S38	-	199	16.63 (S37 ถึง S38)
S39	-	182	-

ตารางที่ 7 (ต่อ)

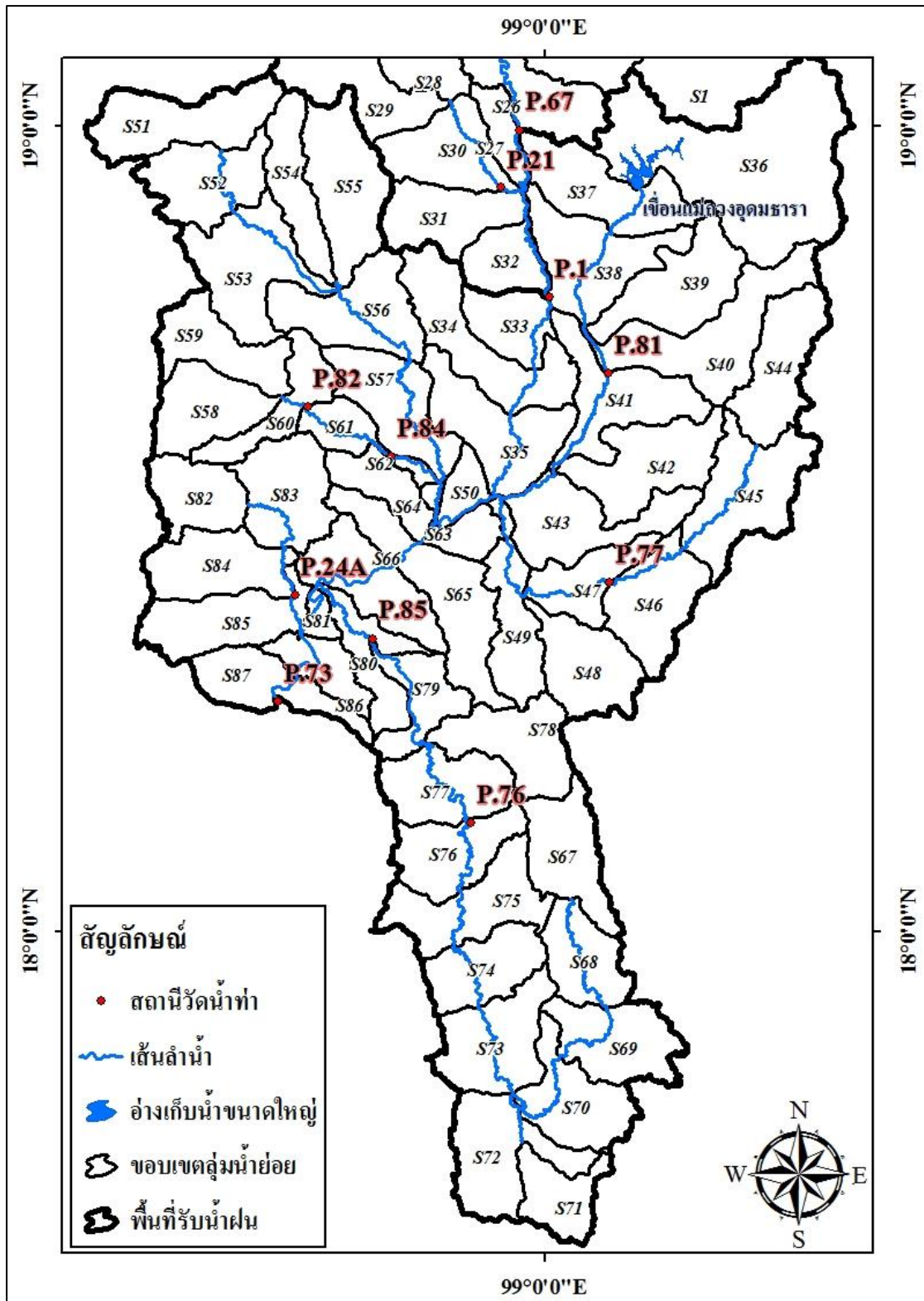
ลุ่มน้ำย่อยที่	จุดออก ของลุ่มน้ำ	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำระหว่าง ลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา (กม.)
S40	P.81	238	7.40 (S38 ถึง S40)
S41	-	184	19.59 (S40 ถึง S41)
S42	-	193	-
S43	-	183	9.41 (S41 ถึง S43)
S44	-	168	-
S45	-	215	23.14 (S44 ถึง S45)
S46	P.77	167	14.05 (S45 ถึง S46)
S47	-	109	16.15 (S46 ถึง S47)
S48	-	155	-
S49	-	138	18.92 (S47 ถึง S49)
S50	-	49	11.94 (S49 ถึง S50)
S51	-	191	-
S52	-	162	13.98 (S51 ถึง S52)
S53	-	213	23.16 (S52 ถึง S53)
S54	-	123	-
S55	-	204	-
S56	-	192	18.29 (S53 ถึง S56)
S57	-	170	27.14 (S56 ถึง S57)
S58	-	146	-
S59	-	138	-
S60	P.82	106	4.70 (S59 ถึง S60)
S61	P.84	63	17.73 (S60 ถึง S61)
S62	-	13	9.69 (S61 ถึง S62)
S63	-	11	8.68 (S62 ถึง S63)

ตารางที่ 7 (ต่อ)

ลุ่มน้ำย่อยที่	จุดออก ของลุ่มน้ำ	พื้นที่ลุ่มน้ำ (ตร.กม.)	ความยาวลำน้ำระหว่าง ลุ่มน้ำย่อยที่พิจารณา (กม.)
S64	-	139	2.69 (S63 ถึง S64)
S65	-	228	5.45 (S64 ถึง S65)
S66	-	166	15.54 (S65 ถึง S66)
S67	-	156	-
S68	-	128	25.43 (S67 ถึง S68)
S69	-	164	14.85 (S68 ถึง S69)
S70	-	158	22.30 (S69 ถึง S70)
S71	-	102	-
S72	-	188	9.84 (S71 ถึง S72)
S73	-	182	19.60 (S72 ถึง S73)
S74	-	137	14.19 (S73 ถึง S74)
S75	-	181	12.09 (S74 ถึง S75)
S76	P.76	146	18.07 (S75 ถึง S76)
S77	-	159	21.68 (S76 ถึง S77)
S78	-	165	-
S79	P.85	108	22.97 (S77 ถึง S79)
S80	-	108	14.38 (S79 ถึง S80)
S81	-	24	10.32 (S80 ถึง S81)
S82	-	119	-
S83	-	169	14.80 (S82 ถึง S83)
S84	P.24A	160	9.17 (S83 ถึง S84)
S85	-	167	6.17 (S84 ถึง S85)
S86	-	81	10.51 (S85 ถึง S86)
S87	P.73	134	5.57 (S86 ถึง S87)



ภาพที่ 7 ขอบเขตลุ่มน้ำย่อยและสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1



ภาพที่ 8 ขอบเขตลุ่มน้ำย่อยและสถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.73

4. การสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL

ดำเนินการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL ที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85, P.24A และ P.73 โดยตรง เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองด้วยโปรแกรม MOSCEM โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้เพื่อการเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสมประกอบด้วยตัวแปรทางสถิติ 3 ตัวแปร คือ KGE_E , KGE_L และ KGE_F ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง FLEXL มีทั้งหมด 11 พารามิเตอร์ สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา

5. การสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

การสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ดำเนินการใน 2 รูปแบบ ดังนี้ (1) สอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 พิจารณาผลการประเมินปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อย ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 และ (2) สอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่าอื่น ๆ ที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำของสถานี P.73 อีก 13 สถานี โดยตรง ในการสอบเทียบแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง เพื่อหาชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองโดยการสอบเทียบแบบจำลองแบบอัตโนมัติที่ดำเนินการด้วยโปรแกรม MOSCEM ซึ่งเป็นกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ฟังก์ชันหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective function) โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้เพื่อการเลือกชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลองที่เหมาะสม คือ ค่า KGE ที่คำนวณจากปริมาณน้ำท่าใน 3 ลักษณะ นำมาเป็นตัวแปรทางสถิติ 3 ตัวแปร ดังนี้ (1) KGE_E เพื่อการให้ความสำคัญกับปริมาณน้ำท่าที่มีค่าสูง (2) KGE_L เพื่อการให้ความสำคัญกับปริมาณน้ำท่าที่มีค่าน้อย และ (3) KGE_F เพื่อการให้ความสำคัญกับปริมาณน้ำท่าในภาพรวม ทั้งนี้ พารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง KU-FLEX-SD มีทั้งหมด 13 พารามิเตอร์ โดยแบ่งออกเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง FLEXL จำนวน 11 พารามิเตอร์ และพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Muskingum จำนวน 2 พารามิเตอร์ เช่นเดียวกับแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII แตกต่างกันตรงที่แบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII มีพารามิเตอร์ที่แสดงถึงเลขยกกำลังที่เป็นตัวแทนความสัมพันธ์ระหว่าง Su และ NDII เพิ่มขึ้นมาอีกจำนวน 1 พารามิเตอร์ ซึ่งผลการประเมินน้ำท่าที่ได้จากทั้ง 2 แบบจำลองคือ กราฟน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 ตลอดจนน้ำท่าของกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ภายในสถานีวัดน้ำท่า P.1 จำนวน 5 สถานี และภายในสถานีวัดน้ำท่า P.73 จำนวน 13 สถานี

6. การเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่าโดยแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรงและผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73

ดำเนินการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าด้วยแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII โดยการนำกราฟน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบทั้ง 3 แบบจำลอง ที่สถานีวัดน้ำท่าโดย มาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าที่ได้จากการตรวจวัด โดยการหาค่า Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) ที่คำนวณได้จากสมการที่ (32) เพื่อให้เห็นภาพรวมของผลการประเมินน้ำท่าด้วยทั้ง 3 แบบจำลอง จากนั้นนำผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 ซึ่งสำหรับสถานีวัดน้ำท่า P.1 ประกอบด้วยผลการประเมินปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ในส่วนของสถานีวัดน้ำท่า P.73 ประกอบด้วยผลการประเมินปริมาณน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85 และ P.24A มาเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่าที่สถานีตรวจวัดนั้น

7. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (Unsaturated soil storage; S_u) ที่ได้จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ทั้งที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง และผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73

ในการศึกษานี้ นอกจากการตรวจสอบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII แล้ว ยังมีการนำปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S_u) เฉลี่ย 8 วัน มาหาความสัมพันธ์กับดัชนี NDII สำหรับแต่ละสถานีวัดน้ำท่าในรูปแบบของสมการกำลังและพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of determination; R^2) หากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จะแสดงให้เห็นว่าค่า S_u เฉลี่ยราย 8 วัน มีความสัมพันธ์กับดัชนี NDII ตามผลการศึกษาของ Sriwongsitanon *et al.* (2016) ซึ่งจะสามารถบ่งบอกได้ถึงความถูกต้องของการประเมิน S_u ของทั้ง 3 แบบจำลองได้

ผลและวิจารณ์

การศึกษานงานวิจัยเรื่อง “การพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เพื่อการประเมินปริมาณน้ำท่า” สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังต่อไปนี้

1. ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง
2. ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73
3. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และปริมาณเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (S_u) ที่ได้จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

รายละเอียดของผลการศึกษาในแต่ละส่วนแสดงดังต่อไปนี้

1. ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่าจากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง

ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII โดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85, P.24A และ P.73 แสดงดังในตารางที่ 8 โดยตารางดังกล่าวได้แสดงค่าทางสถิติทั้ง 3 ตัวแปรเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าของแบบจำลอง ซึ่งประกอบด้วยค่า KGE_E , KGE_L และ KGE_F ซึ่งเป็นตัวแปรทางสถิติที่ใช้ในกระบวนการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด รวมทั้งค่า NSE ที่ใช้เป็นตัวแปรทางสถิติกลางที่ใช้แสดงภาพรวมของผลการสอบเทียบแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลอง เมื่อพิจารณาในแต่ละแบบจำลองพบว่า ค่าเฉลี่ยของค่า KGE_E , KGE_L , KGE_F และ NSE สำหรับแต่ละแบบจำลองเป็นดังนี้ (1) แบบจำลอง FLEXL มีค่า 0.83, 0.58, 0.96 และ 0.67 ตามลำดับ (2) แบบจำลอง KU-FLEX-SD มีค่า 0.84, 0.65, 0.96 และ 0.69 ตามลำดับ และ (3) แบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII มีค่า 0.84, 0.62, 0.96 และ 0.70 ซึ่งจะเห็นได้ว่า แบบจำลอง

KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII สามารถประเมินปริมาณน้ำท่าที่มีค่าสูงได้ใกล้เคียงกับแบบจำลอง FLEXL และยังสามารถประเมินปริมาณน้ำท่าที่มีค่าน้อยได้ดีกว่าแบบจำลอง FLEXL โดยเฉพาะแบบจำลอง KU-FLEX-SD ที่ค่า KGE_L เฉลี่ยเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญอีกด้วย นอกจากนี้เมื่อพิจารณาในรายสถานีจะเห็นได้ว่ามี 2 สถานีที่ค่า KGE_L มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า สถานีวัดน้ำท่า P.77 และ P.84 ซึ่งเป็นสถานีที่มีพื้นที่รับน้ำฝนเท่ากับ 550 และ 454 ตารางกิโลเมตร ตามลำดับ เป็นไปในลักษณะเดียวกันทั้งแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เมื่อเปรียบเทียบกับแบบจำลอง FLEXL แต่เมื่อพิจารณาค่า KGE_E และ KGE_F พบว่า ทั้ง 2 สถานี ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าบริเวณพื้นที่รับน้ำฝนของสถานี P.77 และ P.84 มีปริมาณการไหลที่ถูกจัดการ (Regulated flow)

ชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII แสดงดังตารางที่ 9 โดยแบบจำลอง FLEXL มีพารามิเตอร์ควบคุมแบบจำลอง 11 พารามิเตอร์ ได้แก่ I_{max} , $Sumax$, Ce , β , D , Kf , Ks , $TlagF$, $TlagS$, $Sfmax$ และ Kff ในส่วนของแบบจำลอง KU-FLEX-SD มีพารามิเตอร์ควบคุมแบบจำลอง 13 พารามิเตอร์ ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ของแบบจำลอง FLEXL จำนวน 11 พารามิเตอร์ และพารามิเตอร์ของการเคลื่อนตัวน้ำท่าโดยวิธี Muskingum อีก 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ K และ x ในกรณีของแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII มีพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง 14 พารามิเตอร์ ซึ่งมีพารามิเตอร์เพิ่มจากแบบจำลอง KU-FLEX-SD อีก 1 พารามิเตอร์ คือ ค่า b

เมื่อนำปริมาณน้ำท่าที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา มาบวกสะสมแล้วนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำท่าสะสมที่ได้จากสถานีวัดน้ำท่าแต่ละสถานีดังแสดงในภาพผนวกที่ ก1 ถึง ก14 ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำท่าสะสมที่ประเมินจากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณน้ำท่าสะสมจากการตรวจวัดที่สถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณา โดยเฉพาะแบบจำลอง FLEXL มีความใกล้เคียงมากที่สุด มีเพียง 4 สถานีเท่านั้นที่ปริมาณน้ำท่าสะสมของแบบจำลอง FLEXL ก่อนข้างต่างจากปริมาณน้ำท่าสะสมที่สถานีตรวจวัด

ตารางที่ 8 ผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD -NDII โดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 14 สถานี

สถานีวัดน้ำท่า	แบบจำลอง	ค่าทางสถิติ							
		NSE		KGE _E		KGE _L		KGE _F	
P.20 (1,309 ตร.กม.)	FLEXL	0.64		0.82		0.56		0.97	
	KU-FLEX-SD	0.66	(2%)	0.83	(1%)	0.53	(-6%)	0.98	(1%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.66	(2%)	0.83	(1%)	0.76	(34%)	0.97	(0%)
P.75 (3,029 ตร.กม.)	FLEXL	0.74		0.86		0.74		0.97	
	KU-FLEX-SD	0.80	(7%)	0.90	(4%)	0.80	(9%)	0.99	(2%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.80	(8%)	0.90	(4%)	0.81	(9%)	0.99	(2%)
P.4A (1,954 ตร.กม.)	FLEXL	0.75		0.88		0.67		0.98	
	KU-FLEX-SD	0.75	(-1%)	0.87	(0%)	0.78	(17%)	0.99	(1%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.75	(0%)	0.87	(-1%)	0.65	(-2%)	0.97	(0%)
P.67 (5,333 ตร.กม.)	FLEXL	0.79		0.89		0.67		0.96	
	KU-FLEX-SD	0.82	(4%)	0.90	(2%)	0.78	(17%)	0.97	(1%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.81	(4%)	0.90	(2%)	0.77	(15%)	0.98	(1%)
P.21 (516 ตร.กม.)	FLEXL	0.74		0.86		0.85		0.96	
	KU-FLEX-SD	0.75	(2%)	0.88	(2%)	0.87	(2%)	0.98	(2%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.75	(2%)	0.88	(2%)	0.83	(-3%)	0.99	(3%)
P.1 (6,142 ตร.กม.)	FLEXL	0.86		0.93		0.84		0.99	
	KU-FLEX-SD	0.88	(2%)	0.94	(1%)	0.84	(0%)	0.99	(0%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.88	(2%)	0.94	(1%)	0.78	(-7%)	0.98	(-1%)
P.81 (1,364 ตร.กม.)	FLEXL	0.41		0.71		0.50		0.96	
	KU-FLEX-SD	0.48	(18%)	0.70	(-2%)	0.55	(11%)	0.85	(-11%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.56	(37%)	0.73	(2%)	0.55	(10%)	0.85	(-12%)
P.77 (550 ตร.กม.)	FLEXL	0.41		0.72		0.60		0.92	
	KU-FLEX-SD	0.44	(6%)	0.71	(-1%)	0.55	(-8%)	0.94	(2%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.43	(5%)	0.71	(-1%)	0.49	(-18%)	0.95	(3%)

ตารางที่ 8 (ต่อ)

สถานีวัดน้ำท่า	แบบจำลอง	ค่าทางสถิติ							
		NSE		KGE _E		KGE _L		KGE _F	
P.82 (391 ตร.กม.)	FLEXL	0.73		0.86		0.88		0.97	
	KU-FLEX-SD	0.74	(0%)	0.87	(1%)	0.88	(0%)	0.98	(2%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.74	(1%)	0.86	(0%)	0.87	(-1%)	0.97	(0%)
P.84 (454 ตร.กม.)	FLEXL	0.60		0.77		-0.58		0.88	
	KU-FLEX-SD	0.60	(0%)	0.75	(-3%)	-0.10	(-82%)	0.84	(-5%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.65	(8%)	0.79	(2%)	-0.49	(-15%)	0.88	(0%)
P.76 (1,541 ตร.กม.)	FLEXL	0.58		0.79		0.62		0.98	
	KU-FLEX-SD	0.56	(-3%)	0.78	(-1%)	0.62	(-1%)	0.98	(0%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.56	(-3%)	0.78	(-1%)	0.67	(9%)	0.98	(0%)
P.85 (1,972 ตร.กม.)	FLEXL	0.57		0.79		0.66		0.92	
	KU-FLEX-SD	0.61	(7%)	0.80	(2%)	0.70	(6%)	0.99	(7%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.62	(8%)	0.80	(2%)	0.75	(14%)	0.97	(5%)
P.24A (448 ตร.กม.)	FLEXL	0.63		0.82		0.62		0.98	
	KU-FLEX-SD	0.67	(6%)	0.83	(1%)	0.72	(16%)	0.96	(-1%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.65	(3%)	0.83	(1%)	0.62	(0%)	0.98	(0%)
P.73 (14,777 ตร.กม.)	FLEXL	0.88		0.94		0.47		0.98	
	KU-FLEX-SD	0.90	(3%)	0.95	(1%)	0.62	(34%)	0.99	(1%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.90	(3%)	0.95	(2%)	0.66	(42%)	0.99	(2%)
เฉลี่ย	FLEXL	0.67		0.83		0.58		0.96	
	KU-FLEX-SD	0.69	(3%)	0.84	(1%)	0.65	(13%)	0.96	(0%)
	KU-FLEX-SD -NDII	0.70	(5%)	0.84	(1%)	0.62	(8%)	0.96	(0%)

หมายเหตุ % หมายถึง เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างค่าทางสถิติของแบบจำลองนั้น ๆ เทียบกับ
ค่าทางสถิติของแบบจำลอง FLEXL

ตารางที่ 9 ชุดพารามิเตอร์ที่ควบคุมแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เมื่อสอบเทียบโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 14 สถานี

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	พารามิเตอร์													
		<i>I</i> _{max} (mm)	<i>S</i> _{max} (mm)	<i>C</i> _e	β	<i>D</i>	<i>K</i> _f	<i>K</i> _s	<i>T</i> _{lagF} (hr)	<i>T</i> _{lagS} (hr)	<i>S</i> _{fmax} (mm)	<i>K</i> _{ff}	<i>K</i>	<i>x</i>	<i>b</i>
P.20	FLEXL	3.17	397.48	1.00	0.46	0.65	8.54	26.85	1.93	40.84	15.60	4.34			
	KU-FLEX-SD	4.34	649.12	0.97	0.76	0.74	7.21	25.19	5.70	15.85	17.72	2.17	0.41	0.27	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.26	308.96	0.91	0.60	0.65	3.32	44.54	7.30	155.55	13.03	1.44	0.56	0.27	2.86
P.75	FLEXL	4.91	586.70	0.93	0.33	0.54	14.27	195.83	1.56	27.31	3.48	8.93			
	KU-FLEX-SD	3.68	796.80	0.89	0.26	0.54	1.57	14.23	10.60	124.17	6.22	1.39	0.59	0.11	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.43	414.52	0.80	0.31	0.79	9.09	18.04	14.13	190.38	12.07	2.35	0.42	0.13	3.40
P.4A	FLEXL	4.02	552.48	0.72	0.33	0.74	8.63	9.90	3.80	26.82	8.45	5.10			
	KU-FLEX-SD	4.08	518.54	0.57	0.30	0.82	4.56	38.11	11.15	125.18	5.13	3.75	0.28	0.27	
	KU-FLEX-SD-NDII	3.78	551.36	0.82	0.24	0.65	3.64	8.20	9.48	158.90	3.64	3.33	0.29	0.18	2.20
P.67	FLEXL	4.57	559.94	0.93	0.33	0.91	17.08	117.33	3.23	29.65	14.08	16.28			
	KU-FLEX-SD	3.81	498.86	0.66	0.31	0.72	3.49	17.82	17.73	250.73	15.31	3.00	0.30	0.21	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.30	358.86	0.69	0.33	0.55	4.11	8.10	12.59	101.42	13.00	2.75	0.27	0.28	1.75

ตารางที่ 9 (ต่อ)

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	พารามิเตอร์													
		<i>I</i> _{max} (mm)	<i>S</i> _{max} (mm)	<i>C</i> _e	β	<i>D</i>	<i>K</i> _{<i>f</i>}	<i>K</i> _{<i>s</i>}	<i>T</i> _{lag<i>F</i>} (hr)	<i>T</i> _{lag<i>S</i>} (hr)	<i>S</i> _{<i>f</i>max} (mm)	<i>K</i> _{<i>ff</i>}	<i>K</i>	<i>x</i>	<i>b</i>
P.21	FLEXL	3.62	798.86	0.85	0.43	0.64	16.72	60.13	3.12	44.11	6.52	3.59			
	KU-FLEX-SD	2.49	749.81	0.68	0.42	0.74	7.07	76.62	4.35	94.55	4.92	2.56	1.02	0.19	
	KU-FLEX-SD-NDII	3.76	697.68	0.66	0.56	0.64	11.01	45.41	4.93	77.08	6.78	1.68	1.82	0.26	2.81
P.1	FLEXL	2.89	578.98	0.85	0.31	0.73	15.74	141.97	4.79	54.45	7.59	9.41			
	KU-FLEX-SD	3.13	655.76	0.74	0.33	0.83	4.68	28.01	16.28	294.43	6.40	3.29	0.34	0.22	
	KU-FLEX-SD-NDII	2.25	398.16	0.75	0.24	0.90	17.75	93.90	16.61	245.18	14.48	4.27	0.33	0.24	2.10
P.81	FLEXL	2.68	698.13	0.54	0.47	0.21	3.28	6.53	3.27	51.93	17.30	1.33			
	KU-FLEX-SD	4.90	444.17	0.84	0.10	0.40	3.54	5.05	10.45	79.56	17.31	2.92	1.77	0.34	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.81	315.97	0.70	0.11	0.22	2.59	2.96	8.79	94.27	10.04	2.35	1.50	0.28	4.30
P.77	FLEXL	4.18	563.75	0.99	0.25	0.18	1.74	2.07	1.30	40.90	6.92	1.04			
	KU-FLEX-SD	4.84	543.54	0.97	0.23	0.89	2.63	32.47	7.04	5.73	18.18	2.03	1.04	0.11	
	KU-FLEX-SD-NDII	3.44	578.97	0.97	0.16	0.82	2.39	53.55	3.05	47.90	17.49	1.83	0.66	0.28	1.93

ตารางที่ 9 (ต่อ)

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	พารามิเตอร์													
		<i>I</i> _{max} (mm)	<i>S</i> _{max} (mm)	<i>C</i> _e	β	<i>D</i>	<i>K</i> _f	<i>K</i> _s	<i>T</i> _{lagF} (hr)	<i>T</i> _{lagS} (hr)	<i>S</i> _{fmax} (mm)	<i>K</i> _{ff}	<i>K</i>	<i>x</i>	<i>b</i>
P.82	FLEXL	5.00	621.13	0.86	0.65	0.45	9.30	76.90	4.59	51.43	8.62	3.49			
	KU-FLEX-SD	4.40	761.24	0.64	0.96	0.49	6.07	82.87	7.09	8.94	13.25	2.11	1.43	0.23	
	KU-FLEX-SD-NDII	3.61	716.64	0.82	0.58	0.46	49.43	66.99	6.15	13.88	16.81	2.72	1.30	0.20	1.39
P.84	FLEXL	4.06	799.76	0.54	0.28	0.61	8.07	138.23	3.87	45.45	2.78	4.63			
	KU-FLEX-SD	4.26	780.13	0.54	0.25	0.42	2.42	43.83	7.23	139.99	6.58	2.21	1.16	0.20	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.97	773.72	0.55	0.24	0.45	1.69	75.93	5.49	16.57	6.62	1.47	0.68	0.22	3.86
P.76	FLEXL	1.68	413.31	0.85	0.15	0.20	1.65	3.14	2.61	38.75	18.32	1.55			
	KU-FLEX-SD	3.30	314.64	0.74	0.15	0.88	2.66	103.47	7.04	159.84	19.42	1.82	0.57	0.32	
	KU-FLEX-SD-NDII	2.18	215.33	0.78	0.12	0.36	3.29	3.66	8.61	137.47	19.31	2.51	0.20	0.21	3.60
P.85	FLEXL	2.68	504.29	0.91	0.14	0.04	1.37	2.34	2.96	72.95	19.27	1.31			
	KU-FLEX-SD	4.29	447.84	0.83	0.16	0.30	1.78	2.51	5.34	223.79	9.70	1.53	0.18	0.20	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.10	260.38	0.73	0.13	0.86	8.04	9.72	10.35	99.39	6.55	3.10	0.38	0.20	3.57

ตารางที่ 9 (ต่อ)

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	พารามิเตอร์													
		<i>I_{max}</i> (mm)	<i>S_{max}</i> (mm)	<i>C_e</i>	β	<i>D</i>	<i>K_f</i>	<i>K_s</i>	<i>T_{lagF}</i> (hr)	<i>T_{lagS}</i> (hr)	<i>S_{fmax}</i> (mm)	<i>K_{ff}</i>	<i>K</i>	<i>x</i>	<i>b</i>
P.24A	FLEXL	4.71	733.06	0.88	0.43	0.78	6.59	38.31	2.41	68.23	9.89	3.14			
	KU-FLEX-SD	4.78	693.64	0.77	0.46	0.71	14.02	36.33	6.05	11.37	13.01	1.83	1.08	0.32	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.56	705.09	0.66	0.62	0.83	7.69	42.49	4.92	18.76	15.66	1.82	0.90	0.15	1.54
P.73	FLEXL	3.51	484.77	0.99	0.50	0.25	7.47	8.61	4.14	57.88	16.76	1.54			
	KU-FLEX-SD	3.24	517.02	0.95	0.25	0.96	33.61	133.20	38.58	613.13	1.04	4.54	0.34	0.17	
	KU-FLEX-SD-NDII	4.08	348.51	0.85	0.36	0.91	11.74	17.78	39.10	124.70	4.70	2.51	0.46	0.19	1.88

2. ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73

เมื่อทำการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองจะประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำท่าของทุกกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.1 โดยมี 5 กลุ่มน้ำย่อยที่มีสถานีวัดน้ำท่าอยู่ที่จุดออกของกลุ่มน้ำ สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้น ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า NSE เทียบกับค่าตรวจวัดปริมาณน้ำท่าของแต่ละสถานีวัดน้ำท่า เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่า ค่า NSE สำหรับแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 10 โดยมีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.70 และ 0.69 สำหรับแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสอบเทียบแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 เพียงสถานีเดียว สามารถให้ผลการประเมินปริมาณของกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.1 ได้ถูกต้องเป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับค่า NSE ที่สอบเทียบแบบจำลอง FLEXL ที่แต่ละสถานีโดยตรง พบว่า ค่า NSE ของแบบจำลอง KU-FLEX-SD มี 2 สถานี ที่มีค่า NSE สูงกว่าแบบจำลอง FLEXL ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า P.75 และ P.67 ในส่วนของแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII มีค่า NSE สูงกว่าแบบจำลอง FLEXL จำนวน 2 สถานี ซึ่งเป็นสถานีเดียวกันกับแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII และเมื่อพิจารณาค่า NSE ระหว่างแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII พบว่า ค่า NSE จากแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII สูงกว่าค่า NSE จากแบบจำลอง KU-FLEX-SD จำนวน 3 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า P.75, P.4A และ P.67

เมื่อทำการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ผลพลอยได้จากการสอบเทียบแบบจำลองจะประกอบไปด้วย ปริมาณน้ำท่าของทุกกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำของสถานีวัดน้ำท่า P.73 โดยมี 13 กลุ่มน้ำย่อย ที่มีสถานีวัดน้ำท่าอยู่ที่จุดออกของกลุ่มน้ำ สถานีวัดน้ำท่าเหล่านั้น ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85 และ P.24A ซึ่งสามารถนำไปคำนวณหาค่า NSE เทียบกับค่าตรวจวัดปริมาณน้ำท่าของแต่ละสถานีวัดน้ำท่า เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องของผลการประเมินปริมาณน้ำท่า ค่า NSE สำหรับแต่ละสถานีแสดงดังตารางที่ 10 โดยมีค่า NSE เฉลี่ยเท่ากับ 0.29 และ 0.26 สำหรับแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการสอบเทียบแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 เพียงสถานีเดียว สามารถให้ผล

การประเมินปริมาณของกลุ่มน้ำย่อยที่อยู่ภายในพื้นที่รับน้ำฝนของสถานีวัดน้ำท่า P.73 ได้ไม่คืบหน้า เมื่อเปรียบเทียบกับค่า NSE ที่สอบเทียบแบบจำลอง FLEXL ที่แต่ละสถานีโดยตรง พบว่า ค่า NSE ของแบบจำลอง KU-FLEX-SD มีเพียง 2 สถานีที่มีค่า NSE สูงกว่าแบบจำลอง FLEXL ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า P.81 และ P.85 มีค่า NSE ในภาพรวมแต่ละสถานีสูงสุด 3 อันดับ ได้แก่ P.1, P.85 และ P.20 ซึ่งมีเท่ากับ 0.70, 0.62 และ 0.59 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 สถานี มีขนาดพื้นที่รับน้ำฝน 6,142 ตารางกิโลเมตร 1,972 ตารางกิโลเมตร และ 1,309 ตารางกิโลเมตร ในส่วนของแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII มีค่า NSE สูงกว่าแบบจำลอง FLEXL จำนวน 2 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า P.77 และ P.85 มีค่า NSE ในภาพรวมแต่ละสถานีสูงสุด 3 อันดับ ได้แก่ P.1, P.85 และ P.20 ซึ่งมีเท่ากับ 0.69, 0.60 และ 0.58 ตามลำดับ โดยทั้ง 3 สถานีมีขนาดพื้นที่รับน้ำฝนดังที่กล่าวข้างต้น และเมื่อพิจารณาค่า NSE ระหว่างแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII พบว่า ค่า NSE จากแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII สูงกว่าค่า NSE จากแบบจำลอง KU-FLEX-SD เพียง 4 สถานี ได้แก่ สถานีวัดน้ำท่า P.77, P.82, P.84 และ P.76

จากค่า NSE ที่แสดงดังตารางที่ 10 จะเห็นได้ว่าเมื่อแยกพิจารณาตามแบบจำลองนั้น แบบจำลอง KU-FLEX-SD ที่สอบเทียบโดยตรงที่สถานีค่า NSE จะมีค่าสูงกว่าการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 ในทุกสถานี นอกจากนี้ค่า NSE ของการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 จะมีค่าสูงกว่าการสอบเทียบแบบจำลองที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 และแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII ก็เป็นไปในลักษณะเดียวกัน

ตารางที่ 10 ค่า NSE ของผลการประเมินน้ำท่าจากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD -NDII

สถานี วัดน้ำท่า	พื้นที่ รับน้ำฝน (ตร.กม.)	แบบจำลอง FLEXL	แบบจำลอง KU-FLEX-SD						แบบจำลอง KU-FLEX-SD -NDII					
			สอบเทียบโดยตรง		สอบเทียบที่		สอบเทียบที่		สอบเทียบโดยตรง		สอบเทียบที่		สอบเทียบที่	
			ที่สถานี	สถานีวัดน้ำท่า P.1	สถานีวัดน้ำท่า P.1	สถานีวัดน้ำท่า P.73	ที่สถานี	สถานีวัดน้ำท่า P.1	สถานีวัดน้ำท่า P.1	สถานีวัดน้ำท่า P.73	ที่สถานี	สถานีวัดน้ำท่า P.1	สถานีวัดน้ำท่า P.73	
P.20	1,309	0.64	0.66 (2%)	0.63 (-2.74%)	0.59 (-9%)	0.66 (2%)	0.62 (-4%)	0.58 (-10%)						
P.75	3,029	0.74	0.80 (7%)	0.75 (1.07%)	0.56 (-24%)	0.80 (8%)	0.78 (5%)	0.53 (-28%)						
P.4A	1,954	0.75	0.75 (-1%)	0.74 (-2.04%)	0.50 (-34%)	0.75 (0%)	0.74 (-1%)	0.42 (-44%)						
P.67	5,333	0.79	0.82 (4%)	0.81 (3.31%)	0.73 (-8%)	0.81 (4%)	0.82 (4%)	0.71 (-10%)						
P.21	516	0.74	0.75 (2%)	0.59 (-19.63%)	0.10 (-87%)	0.75 (2%)	0.51 (-31%)	-0.06 (-108%)						
เฉลี่ย 5 สถานี	2,428	0.73	0.75 (3%)	0.70 (-4%)	0.49 (-33%)	0.76 (3%)	0.69 (-5%)	0.43 (-41%)						
P.1	6,142	0.86	0.88 (2%)		0.70 (-18%)	0.88 (2%)		0.69 (-20%)						
P.81	1,364	0.41	0.48 (18%)		0.51 (25%)	0.56 (37%)		0.38 (-6%)						
P.77	550	0.41	0.44 (6%)		0.41 (-1%)	0.43 (5%)		0.41 (1%)						
P.82	391	0.73	0.74 (0%)		-0.49 (-166%)	0.74 (1%)		-0.48 (-165%)						
P.84	454	0.60	0.60 (0%)		-1.59 (-365%)	0.65 (8%)		-1.38 (-329%)						
P.76	1,541	0.58	0.56 (-3%)		0.57 (-3%)	0.56 (-3%)		0.57 (-3%)						
P.85	1,972	0.57	0.61 (7%)		0.62 (8%)	0.62 (8%)		0.60 (4%)						
P.24A	448	0.63	0.67 (6%)		0.33 (-48%)	0.65 (3%)		0.27 (-57%)						
เฉลี่ย 13 สถานี	1,959	0.66	0.68 (3%)	0.70 (7%)	0.29 (-56%)	0.69 (5%)	0.69 (6%)	0.26 (-60%)						

3. ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และปริมาณเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (S_u) ที่ได้จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และปริมาณเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (S_u) ที่ได้จากทั้ง 3 แบบจำลอง โดยนำค่า S_u จากการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL วดินน้ำท่าโดยตรงทั้ง 14 สถานี มาเฉลี่ยราย 8 วัน จากนั้นนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์กับดัชนี NDII ในรูปแบบของสมการกำลังจะได้ค่าความสัมพันธ์ดังแสดงในตารางที่ 11 ในส่วนของแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ค่า S_u ที่ได้จะเป็นตัวแทนของแต่ละลุ่มน้ำย่อยแล้วนำมาเฉลี่ยเชิงพื้นที่เพื่อเป็นตัวแทนของแต่ละสถานี จากนั้นนำไปเฉลี่ยราย 8 วัน ก่อนนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์กับดัชนี NDII เช่นกัน โดยค่าความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลังแสดงดังตารางที่ 11 ซึ่งกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากทั้ง 3 แบบจำลอง เมื่อทำการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.1 แสดงดังภาพผนวกที่ ข1 ถึง ข6 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากทั้ง 3 แบบจำลอง ในกรณีสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.73 แสดงดังภาพผนวกที่ ค1 ถึง ค14 เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination; R^2) ของความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากการสอบเทียบแบบจำลองในกรณีต่าง ๆ สามารถแบ่งได้เป็น 5 กรณีดังนี้ (1) S_u จากการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL ที่สถานีวัดน้ำท่าโดยตรง มีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.51 ในฤดูแล้ง 0.32 ในฤดูฝน และ 0.23 ตลอดปี (2) S_u จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 มีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.51 ในฤดูแล้ง 0.34 ในฤดูฝน และ 0.26 ตลอดปี (3) S_u จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 มีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.60 ในฤดูแล้ง 0.34 ในฤดูฝน และ 0.25 ตลอดปี (4) S_u จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 มีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.54 ในฤดูแล้ง 0.35 ในฤดูฝน และ 0.27 ตลอดปี และ (5) S_u จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD -NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 มีค่า R^2 เฉลี่ยเท่ากับ 0.57 ในฤดูแล้ง 0.33 ในฤดูฝน และ 0.26 ตลอดปี ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า S_u ที่ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII มีความสัมพันธ์กับดัชนี NDII มากกว่าค่า S_u จากแบบจำลอง FLEXL นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าค่า S_u ได้จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 มีความสัมพันธ์กับดัชนี NDII มากกว่า S_u จากการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73

ตารางที่ 11 ความสัมพันธ์ในรูปแบบสมการกำลังระหว่างดัชนี NDII และปริมาตรเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (S_u) ที่ได้จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	ช่วงฤดูแล้ง (พ.ย. - มี.ค.)			ช่วงฤดูฝน (เม.ย. - ต.ค.)			ตลอดปี		
		<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2	<i>a</i>	<i>b</i>	R^2
P.20	FLEXL	442.8	0.3	0.58	723.8	0.7	0.37	497.7	0.4	0.29
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	649.5	0.2	0.41	912.4	0.6	0.33	645.4	0.3	0.19
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	578.5	0.3	0.57	859.8	0.6	0.36	611.0	0.4	0.25
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	666.7	0.2	0.42	958.6	0.6	0.34	678.4	0.3	0.21
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	539.8	0.3	0.51	810.1	0.7	0.35	564.2	0.4	0.24
P.75	FLEXL	776.9	0.4	0.61	1,005.2	0.7	0.33	740.2	0.4	0.22
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	847.0	0.4	0.54	1,141.8	0.7	0.36	825.6	0.5	0.24
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	743.3	0.4	0.72	1,076.2	0.7	0.40	784.0	0.5	0.31
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	873.2	0.4	0.55	1,201.6	0.7	0.37	871.8	0.5	0.25
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	726.8	0.4	0.65	1,039.1	0.8	0.38	746.6	0.5	0.29
P.4A	FLEXL	1,718.4	1.1	0.55	2,252.1	1.4	0.29	2,214.6	1.3	0.32
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,501.1	0.9	0.52	1,969.8	1.2	0.30	1,921.6	1.1	0.32
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,410.4	0.9	0.71	1,847.8	1.2	0.32	1,771.0	1.1	0.36
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,569.5	0.9	0.56	2,077.0	1.2	0.31	2,010.3	1.1	0.34
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,533.5	1.1	0.68	1,965.8	1.4	0.31	1,894.0	1.3	0.35

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	ช่วงฤดูแล้ง (พ.ย. - มี.ค.)			ช่วงฤดูฝน (เม.ย. - ต.ค.)			ตลอดปี		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
P.67	FLEXL	1,023.9	0.6	0.67	1,531.2	1.0	0.37	1,139.2	0.8	0.30
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,132.4	0.6	0.58	1,713.8	1.0	0.39	1,273.4	0.8	0.31
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,020.0	0.6	0.78	1,624.8	1.0	0.42	1,218.1	0.8	0.37
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,162.5	0.6	0.62	1,806.5	1.0	0.40	1,339.8	0.8	0.33
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,035.8	0.7	0.73	1,673.1	1.2	0.41	1,233.8	0.9	0.37
P.21	FLEXL	1,215.5	0.6	0.34	1,573.1	0.9	0.23	1,124.8	0.6	0.15
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,385.4	0.8	0.43	1,845.7	1.2	0.26	1,265.4	0.8	0.18
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,219.7	0.8	0.62	1,706.9	1.2	0.27	1,203.9	0.9	0.23
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,434.8	0.8	0.50	1,974.1	1.2	0.27	1,355.5	0.9	0.21
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,321.8	1.0	0.62	1,881.2	1.4	0.27	1,288.4	1.1	0.24
P.1	FLEXL	1,140.0	0.7	0.66	1,917.6	1.1	0.41	1,352.0	0.9	0.34
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,195.3	0.7	0.57	1,883.0	1.1	0.39	1,332.3	0.8	0.30
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,073.1	0.7	0.78	1,784.3	1.1	0.43	1,278.9	0.9	0.36
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	1,223.0	0.7	0.63	1,986.1	1.1	0.41	1,403.9	0.8	0.32
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,100.0	0.8	0.73	1,875.2	1.3	0.42	1,313.6	1.0	0.37

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	ช่วงฤดูแล้ง (พ.ย. - มี.ค.)			ช่วงฤดูฝน (เม.ย. - ต.ค.)			ตลอดปี		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
P.81	FLEXL	623.9	0.3	0.30	1,000.7	0.8	0.45	484.1	0.3	0.15
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	532.0	0.2	0.40	839.1	0.6	0.51	444.8	0.2	0.14
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	436.5	0.3	0.41	838.8	0.8	0.53	379.1	0.3	0.19
P.77	FLEXL	681.5	0.4	0.47	873.5	0.7	0.25	617.8	0.4	0.16
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	663.9	0.4	0.55	869.9	0.7	0.27	602.4	0.4	0.19
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	655.1	0.4	0.49	825.8	0.7	0.25	568.6	0.4	0.17
P.82	FLEXL	1,419.8	0.9	0.31	1,093.9	0.7	0.12	1,209.7	0.8	0.15
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,357.9	0.9	0.39	1,227.1	0.8	0.13	1,278.2	0.8	0.16
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,509.9	0.8	0.32	1,265.2	0.8	0.12	1,369.3	0.8	0.15

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	ช่วงฤดูแล้ง (พ.ย. - มี.ค.)			ช่วงฤดูฝน (เม.ย. - ต.ค.)			ตลอดปี		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
P.84	FLEXL	2,366.2	1.0	0.34	2,044.7	1.0	0.17	2,052.6	1.0	0.18
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,377.9	0.9	0.52	1,651.3	1.0	0.22	1,528.9	1.0	0.25
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P.76	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,565.4	0.9	0.46	1,617.5	1.0	0.20	1,556.9	0.9	0.22
	FLEXL	397.4	0.2	0.58	556.2	0.5	0.42	388.7	0.2	0.29
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	464.7	0.1	0.50	515.3	0.3	0.33	395.8	0.1	0.16
P.85	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	399.8	0.2	0.52	462.1	0.4	0.34	343.0	0.2	0.19
	FLEXL	514.3	0.2	0.57	571.8	0.4	0.33	440.5	0.2	0.21
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P.85	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	499.4	0.2	0.55	520.1	0.4	0.31	411.2	0.2	0.17
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	444.6	0.2	0.55	468.8	0.4	0.32	364.6	0.2	0.19

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สถานีวัด น้ำท่า	แบบจำลอง	ช่วงฤดูแล้ง (พ.ย. - มี.ค.)			ช่วงฤดูฝน (เม.ย. - ต.ค.)			ตลอดปี		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
P.24A	FLEXL	1,330.2	0.6	0.42	1,359.3	0.8	0.19	1,305.0	0.7	0.20
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,136.3	0.7	0.59	1,412.8	0.9	0.23	1,265.6	0.8	0.27
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	1,247.5	0.9	0.58	1,449.4	1.1	0.23	1,330.9	1.0	0.27
P.73	FLEXL	828.0	0.6	0.72	1,258.5	1.0	0.49	759.2	0.6	0.32
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	921.9	0.5	0.78	1,409.4	0.9	0.53	857.6	0.6	0.34
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	919.4	0.6	0.76	1,428.9	1.1	0.52	839.3	0.7	0.36
ค่าเฉลี่ย	FLEXL	-	-	0.51	-	-	0.32	-	-	0.23
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	0.51	-	-	0.34	-	-	0.26
	KU-FLEX-SD (สอบเทียบที่สถานี P.73)	-	-	0.60	-	-	0.34	-	-	0.25
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.1)	-	-	0.54	-	-	0.35	-	-	0.27
	KU-FLEX-SD-NDII (สอบเทียบที่สถานี P.73)	-	-	0.57	-	-	0.33	-	-	0.26

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

แบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทกึ่งกระจายตัว (Semi-distributed Model) ได้รับการพัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ภายใต้ศูนย์วิจัย SENSWAT โดยแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ได้รับการพิสูจน์แล้วว่า มีประสิทธิภาพในการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่าที่พิจารณาได้เป็นอย่างดี เห็นได้จากเมื่อสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่าทั้ง 14 สถานี บนพื้นที่ลุ่มน้ำปิงตอนบนโดยตรง แบบจำลอง KU-FLEX-SD มีค่า NSE มากกว่าแบบจำลอง FLEXL จำนวน 10 สถานี และแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII มีค่า NSE มากกว่าแบบจำลอง FLEXL จำนวน 12 สถานี นอกจากนั้นแล้ว สิ่งที่สำคัญมากที่สุดคือ แบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII สามารถให้ผลพลอยได้ของการประเมินกราฟน้ำท่าสำหรับลุ่มน้ำย่อยต่าง ๆ ภายในสถานีวัดน้ำท่าที่ทำการสอบเทียบแบบจำลองหรือ ณ บริเวณที่ไม่มีสถานีวัดน้ำท่าตั้งอยู่ โดยได้พิสูจน์ว่าจากผลของการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 จะให้ผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67 และ P.21 และสำหรับการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 จะให้ผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.20, P.75, P.4A, P.67, P.21, P.1, P.81, P.77, P.82, P.84, P.76, P.85 และ P.24A ในขณะที่การสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL จำเป็นต้องทำการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำทาดังกล่าวโดยตรง เนื่องจากเป็นแบบจำลองประเภทลัมพ์ ซึ่งแน่นอนว่าผลการประเมินน้ำท่าโดยตรงที่สถานีเหล่านี้ควรให้ผลการประเมินน้ำท่าที่ถูกต้องมากกว่าการประเมินน้ำท่าที่เป็นผลพลอยได้จากการประเมินน้ำท่าที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 ที่ดำเนินการโดยแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาพบว่า จากการสอบเทียบทั้ง 2 แบบจำลอง ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ค่า NSE ของปริมาณน้ำท่าซึ่งเป็นผลพลอยได้ มีค่าสูงกว่าค่า NSE ของแบบจำลอง FLEXL จำนวน 2 สถานี เช่นกันทั้งแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII เช่นเดียวกับการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ที่ให้ค่า NSE ของปริมาณน้ำท่าซึ่งเป็นผลพลอยได้ มีค่าสูงกว่าค่า NSE ของแบบจำลอง FLEXL จำนวน 2 สถานี ในทั้ง 2 แบบจำลอง

นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าการสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 ให้ผลพลอยได้ของการประเมินน้ำท่าที่มีความถูกต้องมากกว่าการสอบเทียบ

แบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73 ซึ่งสาเหตุที่ได้ผลดังกล่าวอาจเนื่องมาจากการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่รับน้ำระหว่างสถานี P.1 ถึงสถานี P.73 มีมากกว่าการบริหารจัดการน้ำในกลุ่มน้ำของสถานี P.1 นอกจากนั้นแล้ว สถานีวัดน้ำท่าที่อยู่ในพื้นที่รับน้ำระหว่างสถานี P.1 ถึง P.73 เป็นสถานีที่อยู่บนลำน้ำสายย่อยทั้งหมด โดยไม่มีสถานีใดตั้งอยู่บนแม่น้ำปิงสายหลัก ซึ่งโดยปกติแล้วจะให้ผลการสอบเทียบแบบจำลองที่มีความถูกต้องน้อยกว่าผลการสอบเทียบที่เกิดขึ้นบนลำน้ำสายหลัก

ในส่วนสุดท้ายของการศึกษาเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII กับปริมาณเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (S_u) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อสอบเทียบแบบจำลอง KU-FLEX-SD ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1 และ P.73 สามารถประเมินค่า S_u ที่มีความสัมพันธ์กับดัชนี NDII ได้ดีกว่าแบบจำลอง FLEXL จำนวน 5 สถานี ที่ตั้งอยู่ด้านเหนือน้ำของ P.1 และ 10 สถานี ที่ตั้งอยู่ด้านเหนือน้ำของ P.73 ตามลำดับ ถึงแม้จะไม่ใช้การสอบเทียบโดยตรงที่สถานีวัดน้ำท่าก็ตาม ในส่วนแบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII ซึ่งถูกพัฒนาให้มีการใช้พารามิเตอร์ $Sumax$ ในแต่ละกลุ่มน้ำย่อยแตกต่างกันด้วยการนำดัชนี NDII มาใช้เป็นสัดส่วนในการกระจายนั้น ไม่ได้ทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII กับ S_u พัฒนาขึ้นจากแบบจำลอง KU-FLEX-SD อย่างมีนัยสำคัญ แต่แบบจำลอง KU-FLEX-SD-NDII สามารถบ่งบอกถึงปริมาณเก็บกักสูงสุดในชั้นดินที่ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ (Maximum unsaturated soil storage; $Sumax$) ในแต่ละกลุ่มน้ำที่แตกต่างกันได้ จึงสรุปได้ว่าทั้งแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII สามารถประเมินค่า S_u ได้ค่อนข้างดี

ข้อเสนอแนะ

จากการพัฒนาแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ในการศึกษาี้ แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการประเมินปริมาณน้ำทำได้อย่างถูกต้อง เมื่อทำการสอบเทียบที่สถานีวัดน้ำทำโดยตรง และยังสามารถประเมินปริมาตรเก็บกักในชั้นดิน ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ในแต่ละพื้นที่ลุ่มน้ำย่อย แม้ในตำแหน่งที่ต้องการข้อมูลปริมาณน้ำทำไม่มีสถานีตรวจวัดตั้งอยู่ได้ แต่ผลพลอยได้จากการสอบเทียบยังคงมีปัญหาในเรื่องของความถูกต้องของน้ำทำที่ประเมินมาได้ ซึ่งอาจมาจากการบริหารจัดการน้ำในพื้นที่ศึกษา ทำให้ผลการประเมินไม่ถูกต้องเท่าที่ควร ในการศึกษาี้ จึงมีข้อเสนอแนะให้นำแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ไปประยุกต์ใช้บนพื้นที่ลุ่มน้ำอื่น ๆ ของประเทศไทย ทั้งในลุ่มน้ำที่มีการบริหารจัดการน้ำตั้งแต่หน่วย ปานกลาง ไปจนถึงมาก เพื่อหาข้อสรุปถึงอิทธิพลของการบริหารจัดการน้ำที่มีต่อผลการประเมินน้ำทำ โดยแบบจำลองทั้งสองแบบจำลอง และถ้าพบว่าการบริหารจัดการน้ำเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลกระทบต่อ การลดความถูกต้องของการประเมินน้ำทำ ก็สามารถสรุปได้ว่าแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินน้ำทำ ตลอดจนปริมาตร เก็บกักในชั้นดิน ไม่อิ่มตัวด้วยน้ำ ซึ่งจะเป็ข้อมูลสำคัญในการบริหารจัดการน้ำของประเทศได้ต่อไป ทั้งนี้ เนื่องจากในกรณีที่มีการบริหารจัดการน้ำในลุ่มน้ำที่ทำการประเมินน้ำทำ จะไม่สามารถประเมิน น้ำทำได้ถูกต้องด้วยแบบจำลองน้ำฝน-น้ำทำ ใด ๆ นอกจากจะมีการนำข้อมูลการบริหารจัดการน้ำ ไปใช้เป็นองค์ประกอบในการประเมินน้ำทำ อาทิเช่น การดึงน้ำออกจากลำน้ำไปใช้เพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ ซึ่งในกรณีที่ทราบข้อมูลการบริหารจัดการก็สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลด้านเข้าให้กับแบบจำลอง KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ได้เช่นกัน ซึ่งจะไม่สามารถดำเนินการได้ด้วยแบบจำลอง น้ำฝน-น้ำทำ แบบลัมพ์

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมทรัพยากรน้ำ. 2552. แผนที่มาตรฐานการแบ่งลุ่มน้ำหลัก และลุ่มน้ำสาขาของประเทศไทย. สำนักวิจัยพัฒนาและอุทกวิทยา, กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

กรมทรัพยากรน้ำ. 2559. โครงการศึกษาความมั่นคงของลุ่มน้ำอย่างยั่งยืนทั้ง 25 ลุ่มน้ำ. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2545. การจำลองสถานะน้ำท่วม **Flood Modelling**. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2556. อุทกวิทยาขั้นสูง. พิมพ์ครั้งที่ 2. วีรวรรณ พรินทร์ดีง์ แอนด์ แพ็คเกจจิง, นนทบุรี.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์, 2559. โครงการการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง **FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM** โดยการใช้การสอบเทียบแบบอัตโนมัติ. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน.

นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์. 2560. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง **FLEXL, FLEX-Topo และ Modified NAM** โดยการใช้การสอบเทียบอัตโนมัติ. สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน กรุงเทพมหานคร.

วีระพล แต่สมบัติ. **หลักอุทกวิทยา**. ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes and M. Smith 2006. **FAO Irrigation and Drainage Paper No.56 Crop evapotranspiration.**

Chu, H.-J. and L.-C. Chang. 2009. Applying Partical Swarm Optimization to Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model. **Journal of Hydrologic Engineering** 14: 1024-1027.

- De Silva, Dayawansa R.P., N.D.K. and M.D. Ratnasiri. 2007. A comparison of methods used in estimating missing rainfall data. **Journal of Agricultural Sciences** 3: 101-108.
- Fenicia, F., H. H. G. Savenije, P. Matgen and L. Pfiste. 2008. Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. **Water Resour. Res.** 44: W01402, doi:10.1029/2006WR005563.
- Gan, T.Y., E.M. Dlamini and G.F. Biftu. 1997. Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling. **Journal of Hydrology** 192: 81-103.
- Gao, H, M. Hrachowitz, F. Fenicia, S. Gharari and H. H. G. Savenije. 2014. Testing the realism of a topography-driven model (FLEX-Topo) in the nested catchments of the Upper Heihe, China. **Hydrol. Earth Syst. Sci.** 18: 1895–1915.
- Gao, H., M. Hrachowitz, S. J. Schymanski, F. Fenicia, N. Sriwongsitanon, and H. H. G. Savenije. 2014. Climate controls how ecosystems size the root zone storage capacity at catchment scale. **Geophys. Res. Lett.** 41: 7916–7923, doi:10.1002/2014GL061668.
- Gao, H., M. Hrachowitz, N. Sriwongsitanon, F. Fenicia, S. Gharari, and H. H. G. Savenije. 2016. Accounting for the influence of vegetation and landscape improves model transferability in a tropical savannah region. **Water Resour. Res.** 52: doi:10.1002/2016WR019574.
- Kavetski, D. and F. Fenicia. 2011. Elements of a flexible approach for conceptual hydrological modeling: 2. Application and experimental insights. **Water Resources Research** 47: 1-19.
- Kling, H., M. Fuchs and M. Paulin. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. **Journal of Hydrology** 424-425: 264-277.

- Malone, T. 1999 . Using URBS for real time flood modelling. **In 25th Hydrology & Water Resources Symposium, 2nd International Conference on Water Resources & Environment Research**, pp. 603, Institution of Engineers, Australia.
- Nash, J.E. and J.V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: A discussion of principles. **Journal of Hydrology** 10: 282-290.
- Searcy, J.K. and C.H. Hardison. 1960. Double-mass curves. U.S. Geol. Surv. **Water Supply Pap** 3: 49-56.
- Sharma, K.D. and S. Singh. 1992. Runoff estimation using Landsat Thematic Mapper data and the SCS model. **Hydrological sciences journal** 37: 39-52.
- Sriwongsitanon, N., H. Gao, H. H. G. Savenije, E. Maekan, S. Saengsawang and S. Tianpopirug. 2016. Comparing the Normalized Difference Infrared Index (NDII) with root zone storage in a lumped conceptual model. **Hydrology & Earth System Sciences** 20: 3361-3377.
- Sugawara, M. 1974. Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin River, Kitsu River, Sanaga River and Nam Mune. **Research Notes of the National Research Center for Disaster Prevention** 11: 1-64.
- Tekleab, S., S. Uhlenbrook, H.H.G. Savenije, Y. Mohamed and J. Wenninger. 2015. Modelling rainfall–runoff processes of the Chemoga and Jedeb meso-scale catchments in the Abay/Upper Blue Nile basin, Ethiopia. **Hydrological Sciences Journal** 60, 11 (2015): 2029-2046.
- Vrugt, J.A., H.V. Gupta, L.A. Batidas, W. Bouten and S. Sorooshian. 2003. Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. **Water Resources Research** 39.

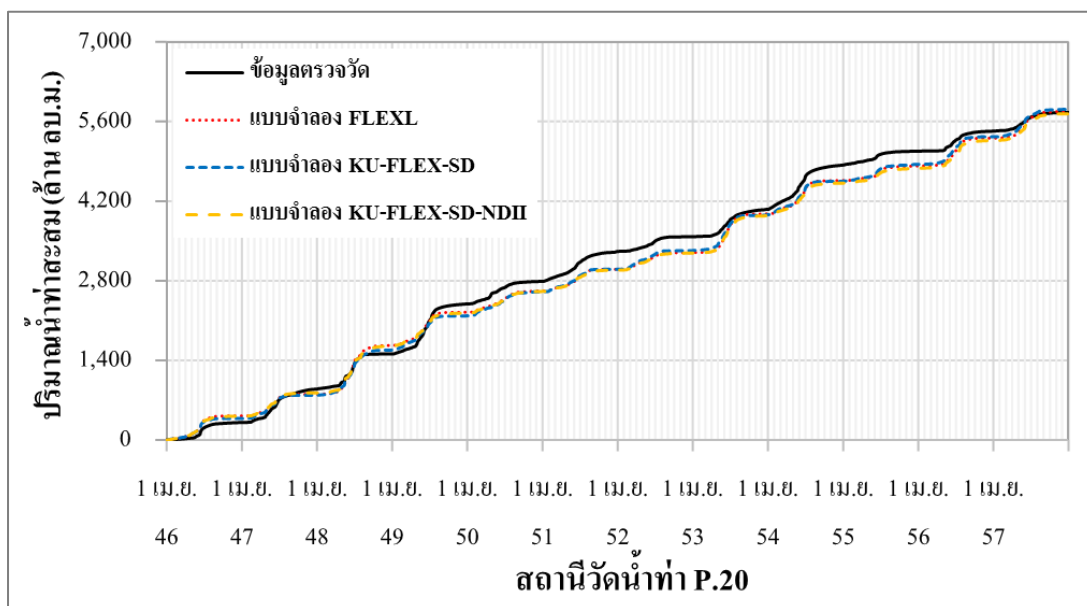
Yilmaz, K. K., H. V. Gupta and T. Wagener. 2008. A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. **Water Resour. Res.** 44: W09417, doi:10.1029/2007WR006716

Zhao, R.J., P.L. Wang and F.B. Hu. 1992. Relations between parameter values and corresponding natural conditions of Xinanjiang model. **Hohai Univ.**

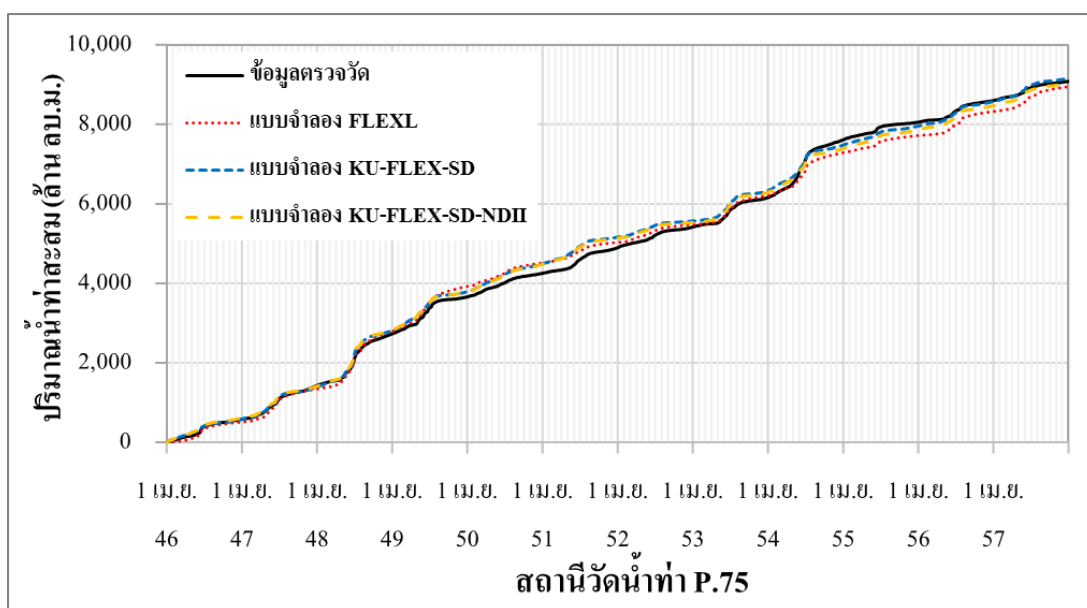
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

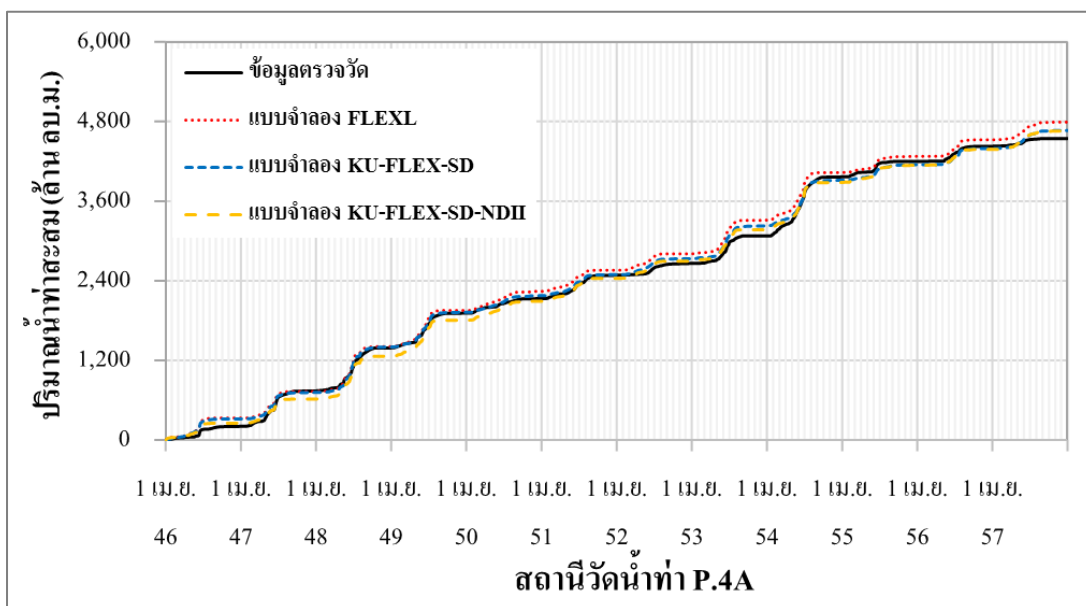
ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ
KU-FLEX-SD-NDII



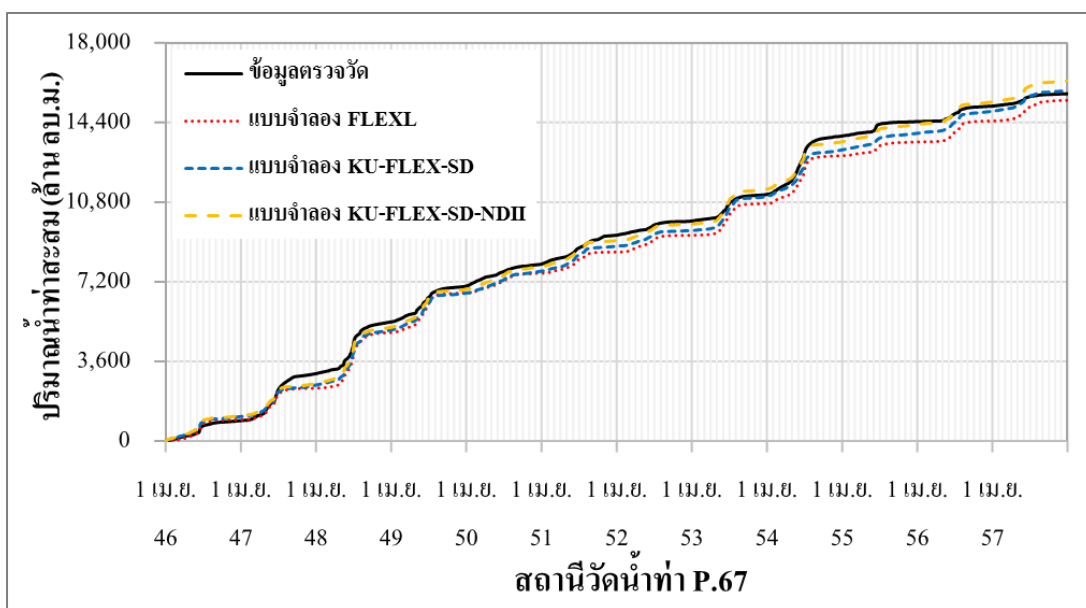
ภาพผนวกที่ ก1 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.20



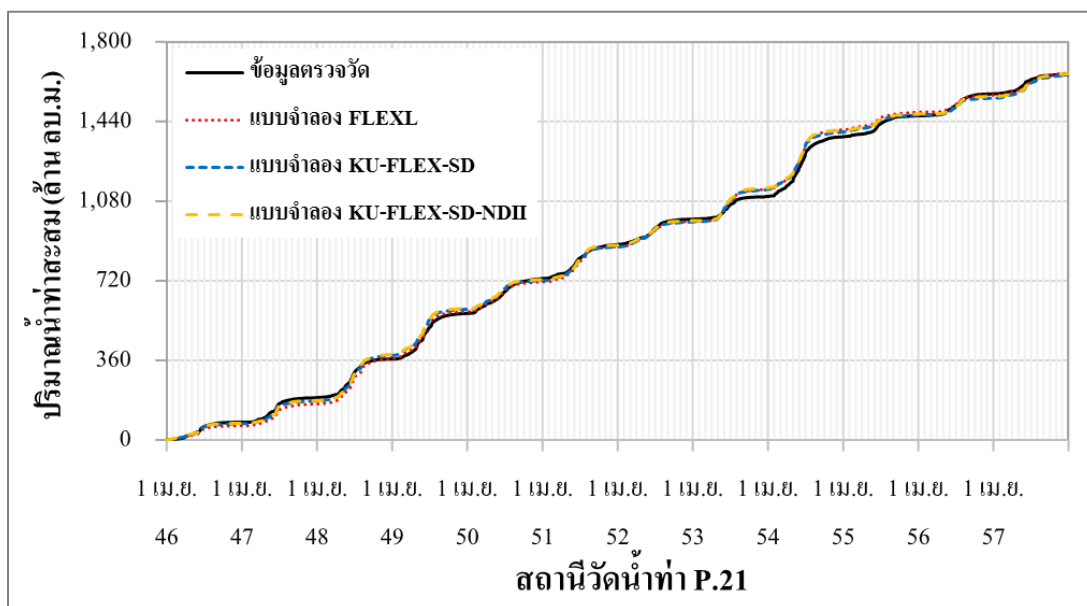
ภาพผนวกที่ ก2 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.75



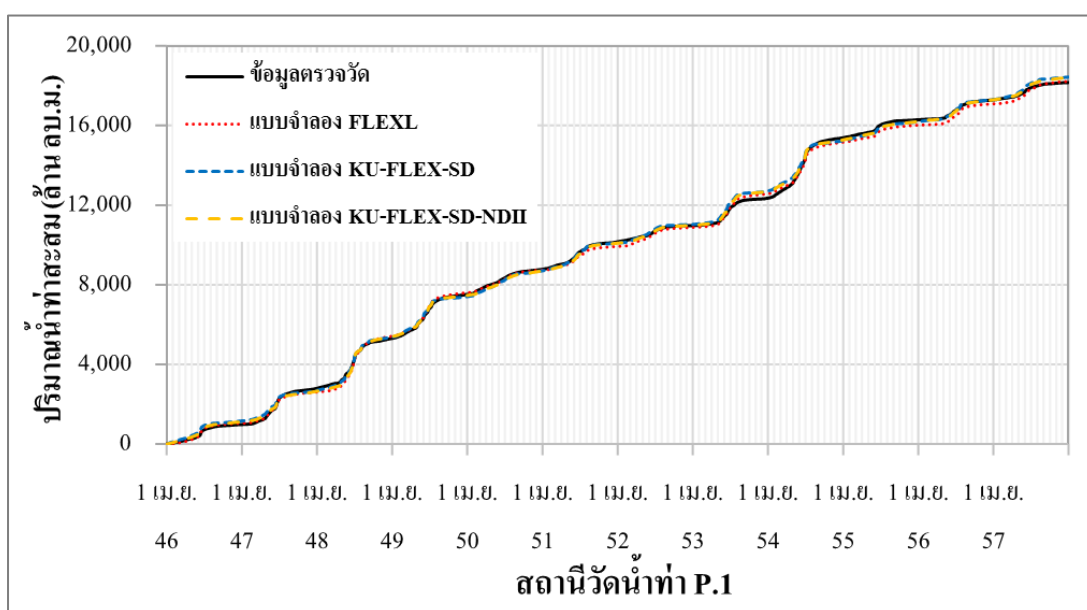
ภาพผนวกที่ ก3 ปริมาณน้ำทำสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.4A



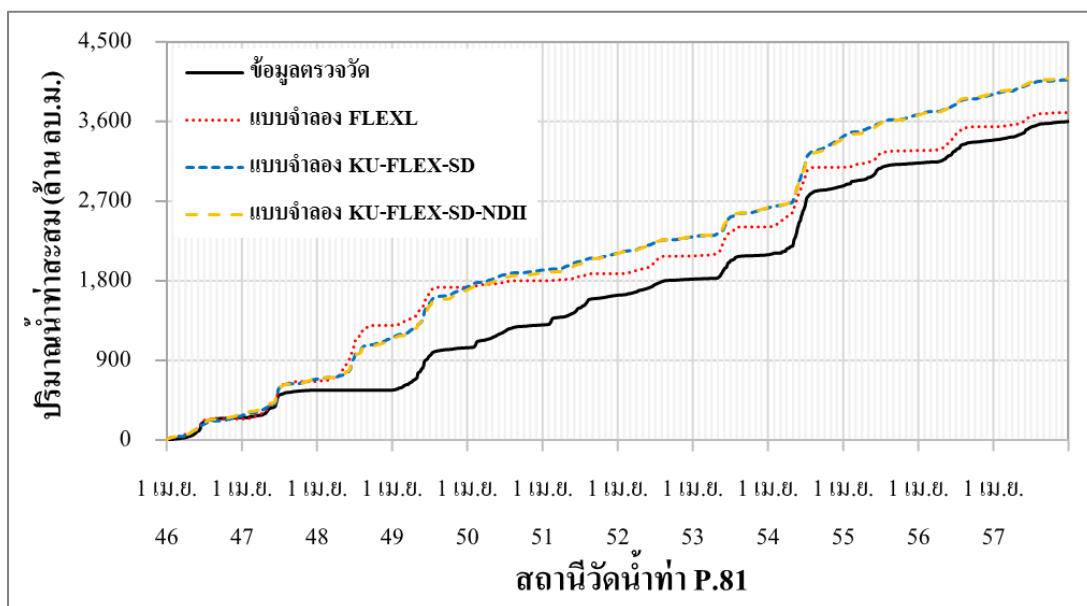
ภาพผนวกที่ ก4 ปริมาณน้ำทำสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.67



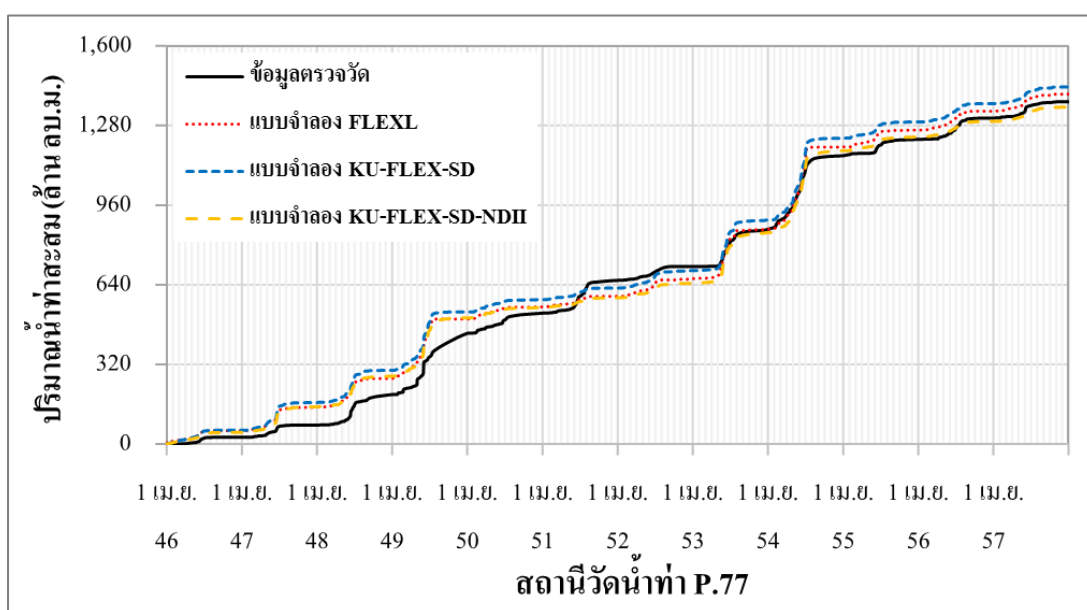
ภาพผนวกที่ ก5 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.21



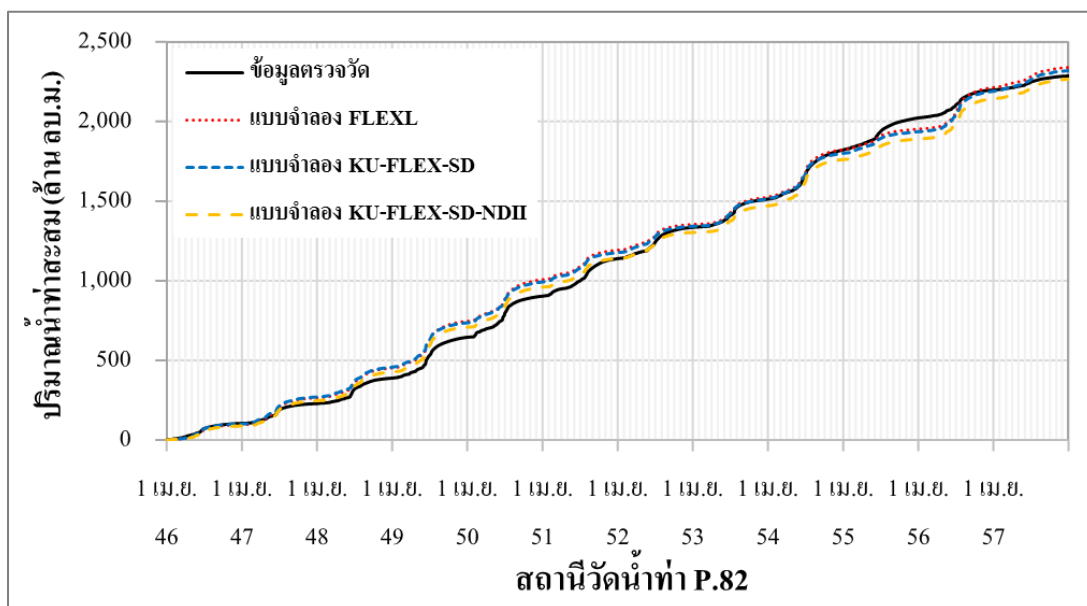
ภาพผนวกที่ ก6 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.1



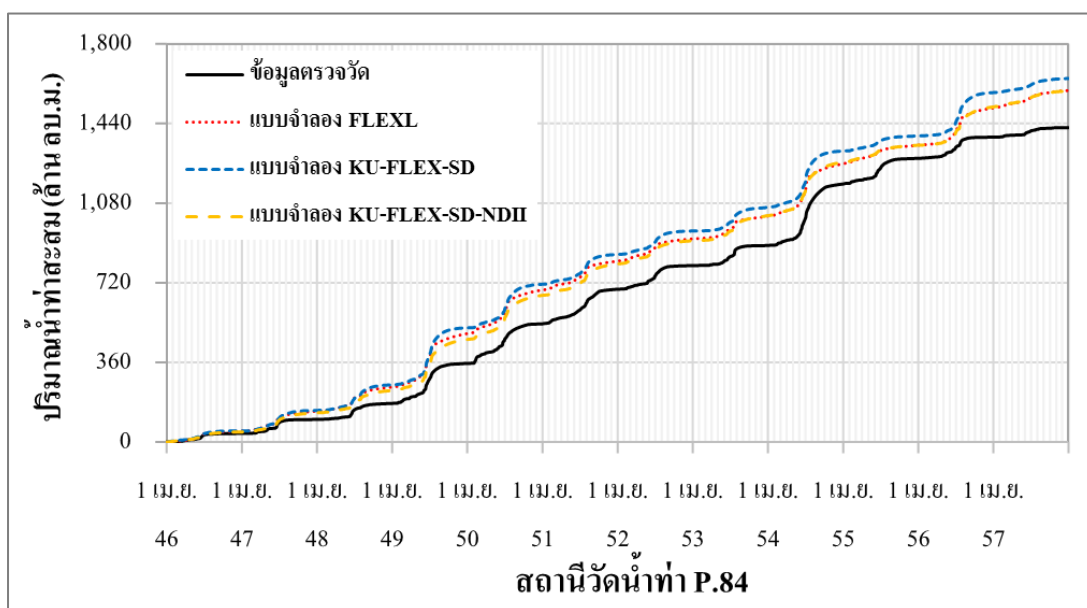
ภาพผนวกที่ ก7 ปริมาณน้ำที่สะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.81



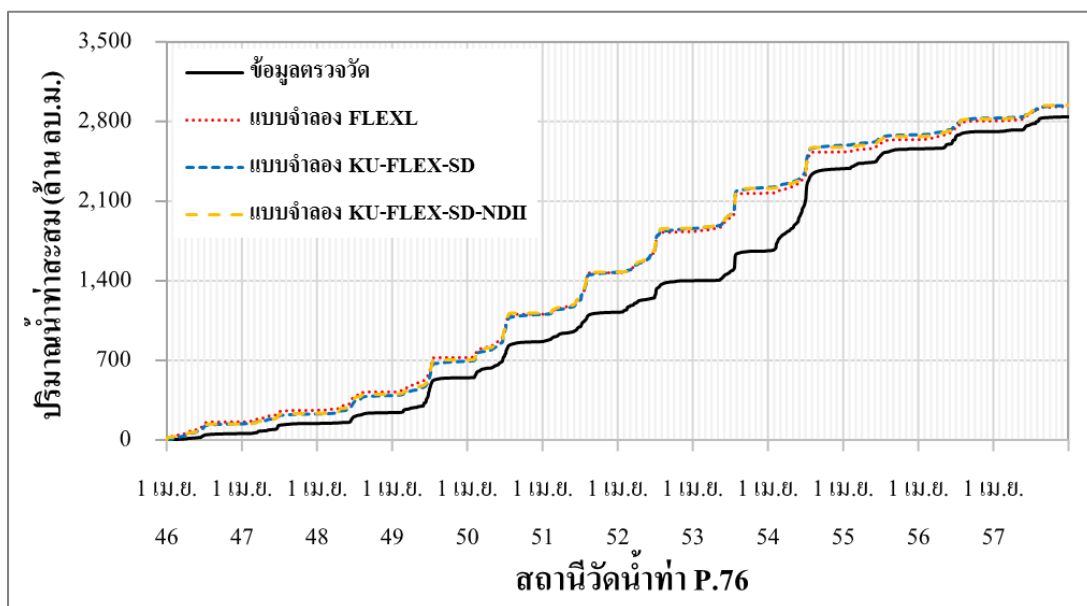
ภาพผนวกที่ ก8 ปริมาณน้ำที่สะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.77



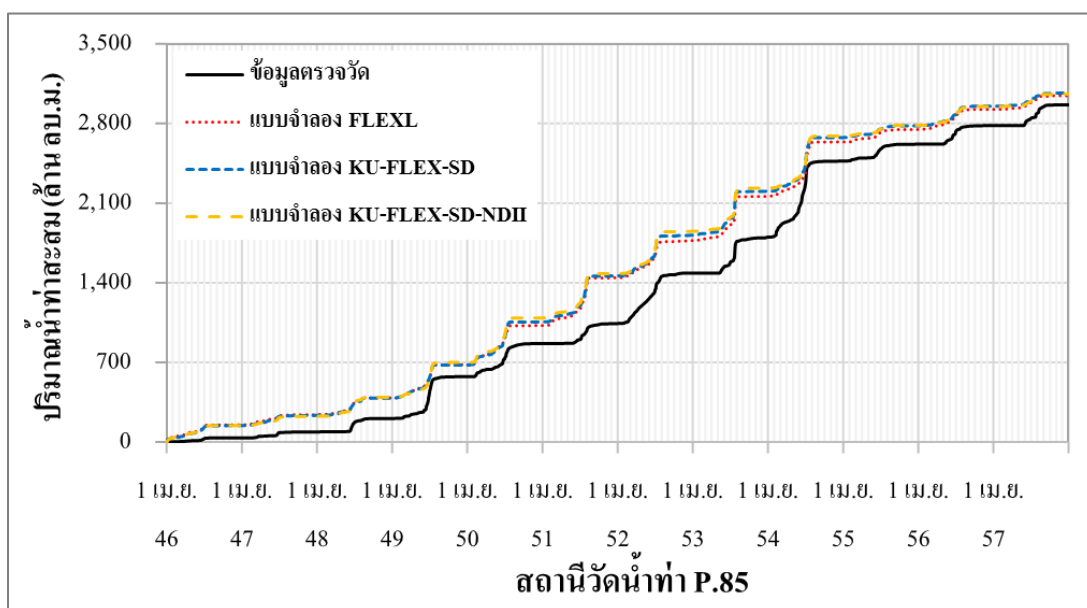
ภาพผนวกที่ ก9 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.82



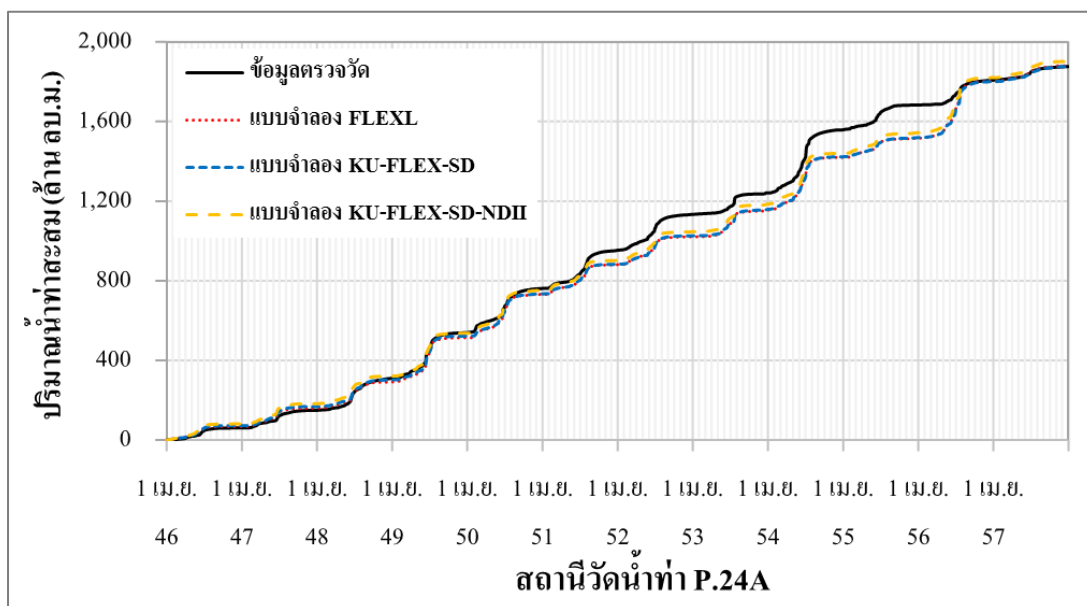
ภาพผนวกที่ ก10 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.84



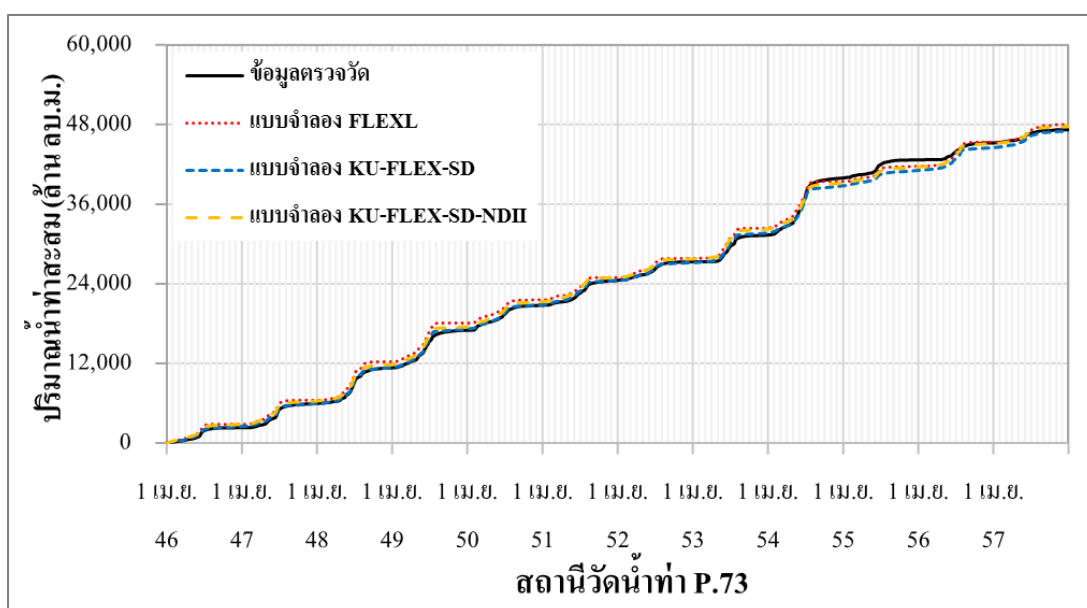
ภาพผนวกที่ ก11 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.76



ภาพผนวกที่ ก12 ปริมาณน้ำท่าสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.85



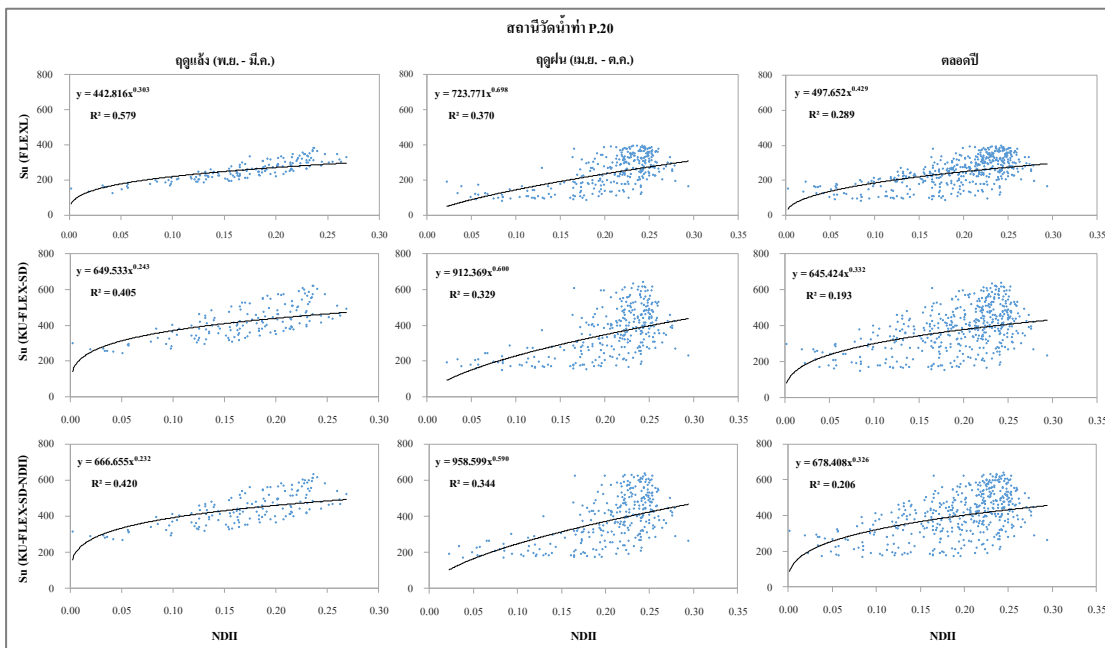
ภาพผนวกที่ ก13 ปริมาณน้ำทำสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.24A



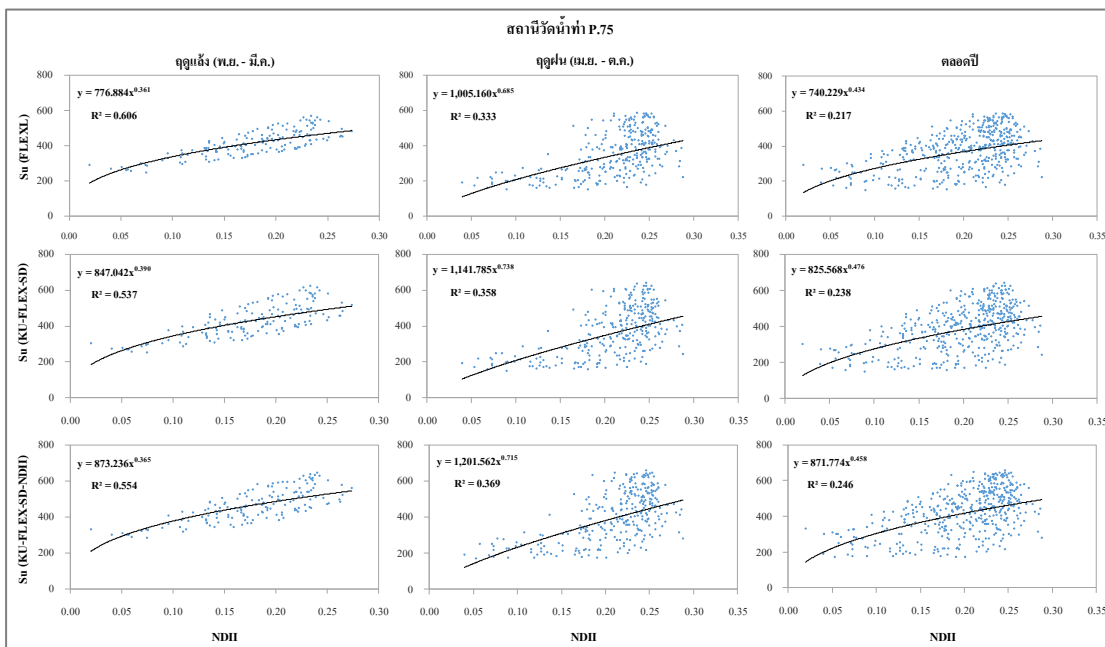
ภาพผนวกที่ ก14 ปริมาณน้ำทำสะสมของผลการสอบเทียบแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานีวัดน้ำท่า P.73

ภาคผนวก ข

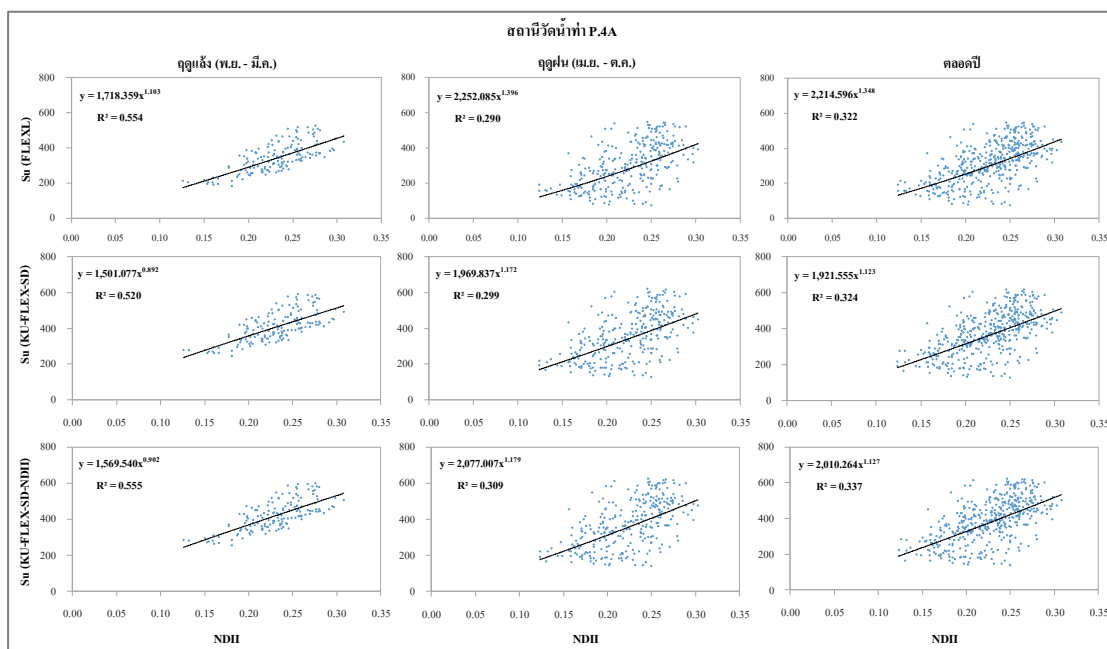
ปริมาณเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (S_u) จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD
และ KU-FLEX-SD-NDII กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1



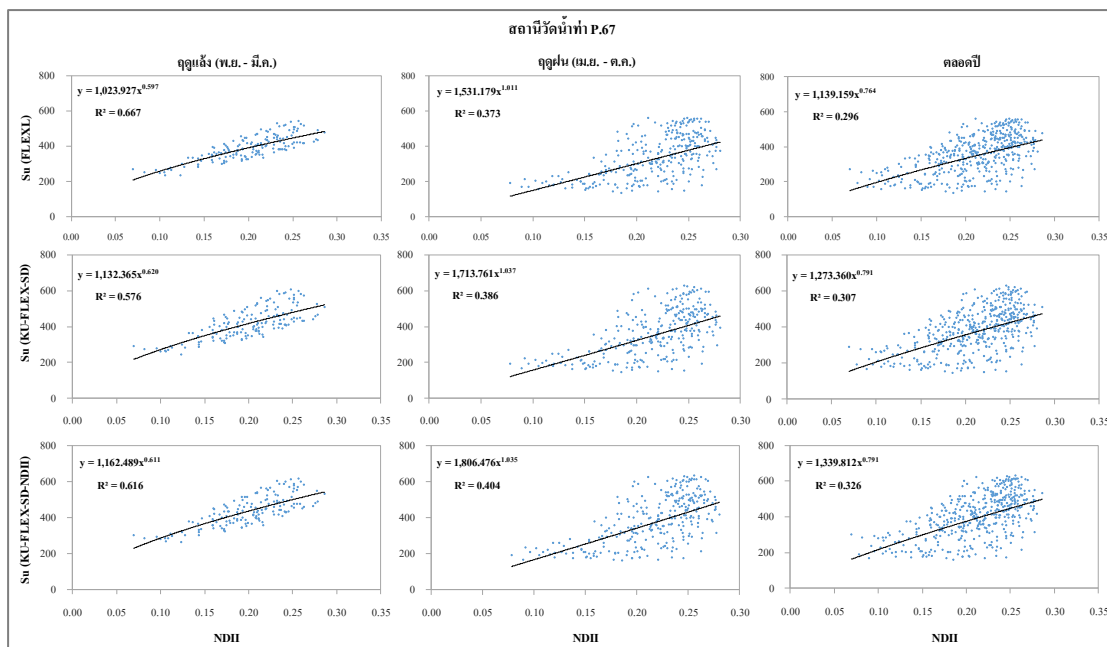
ภาพผนวกที่ ข1 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.20 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1



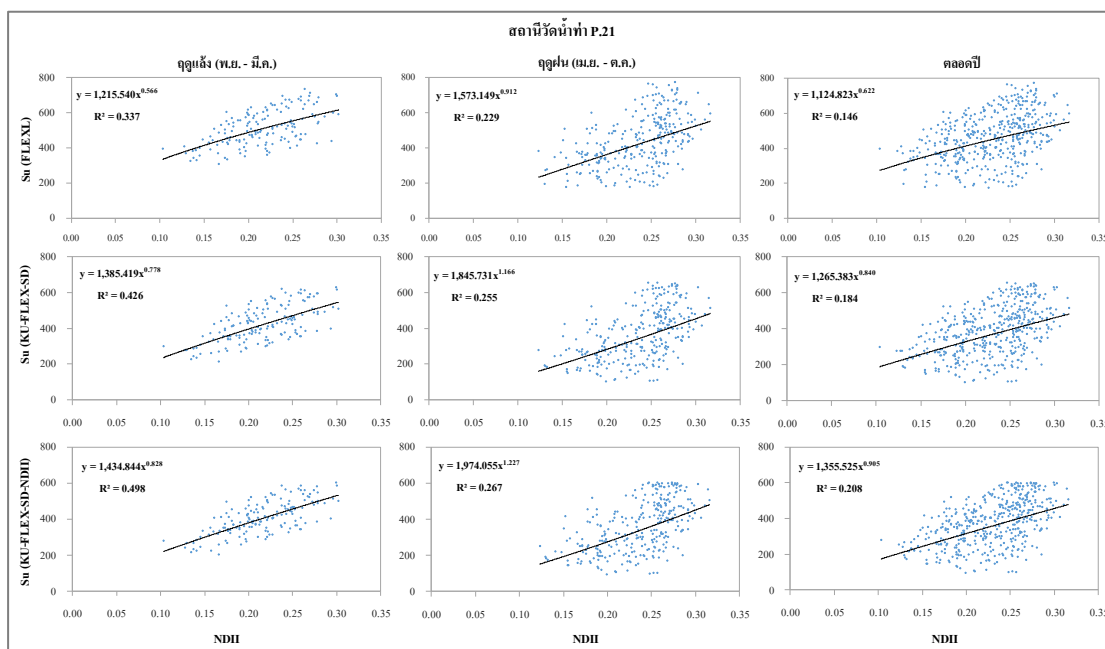
ภาพผนวกที่ ข2 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.75 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1



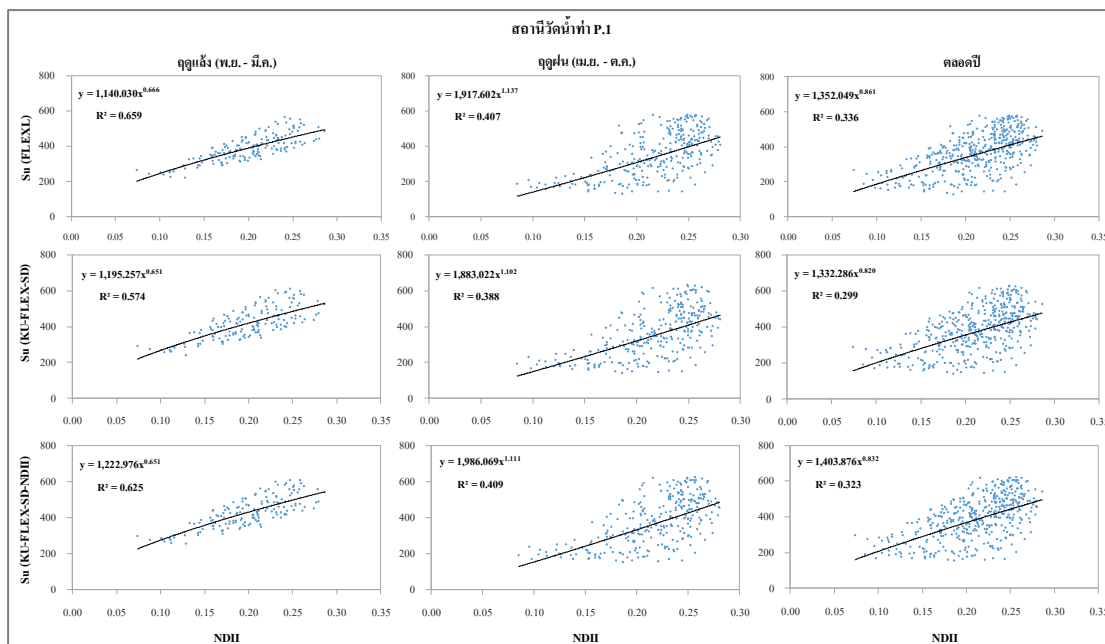
ภาพผนวกที่ ๓ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.4A กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1



ภาพผนวกที่ ๔ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.67 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1



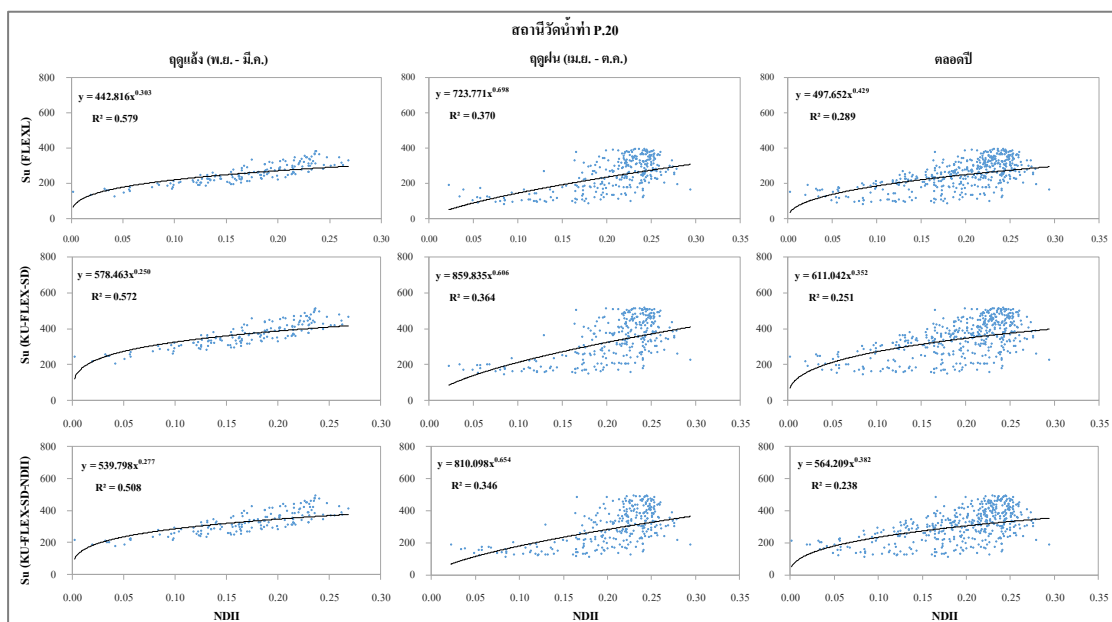
ภาพผนวกที่ ข5 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.21 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1



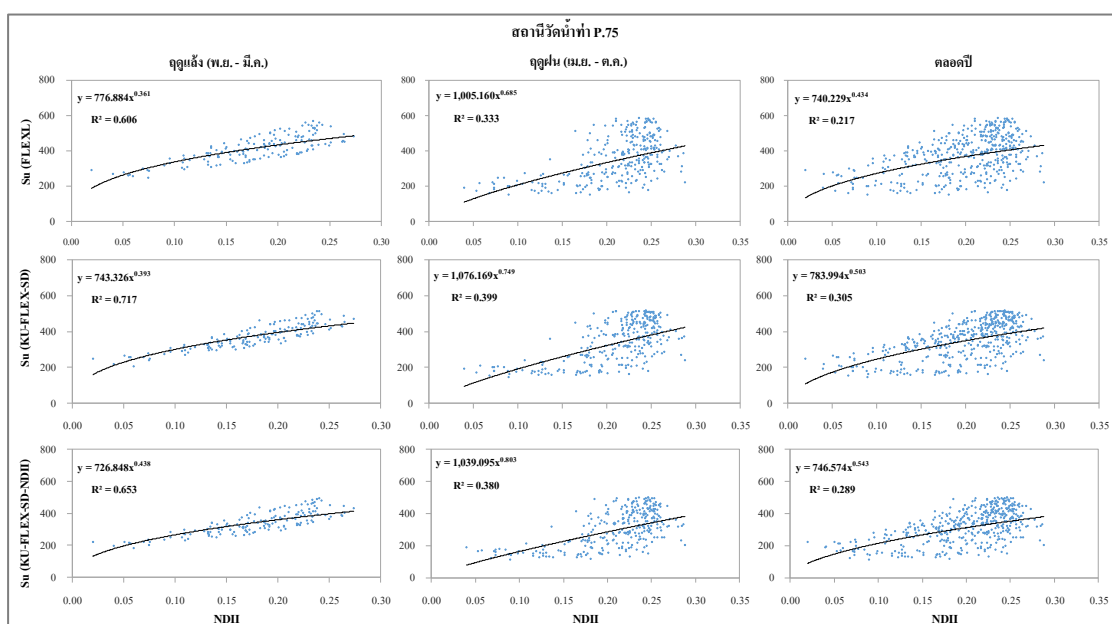
ภาพผนวกที่ ข6 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.1 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.1

ภาคผนวก ค

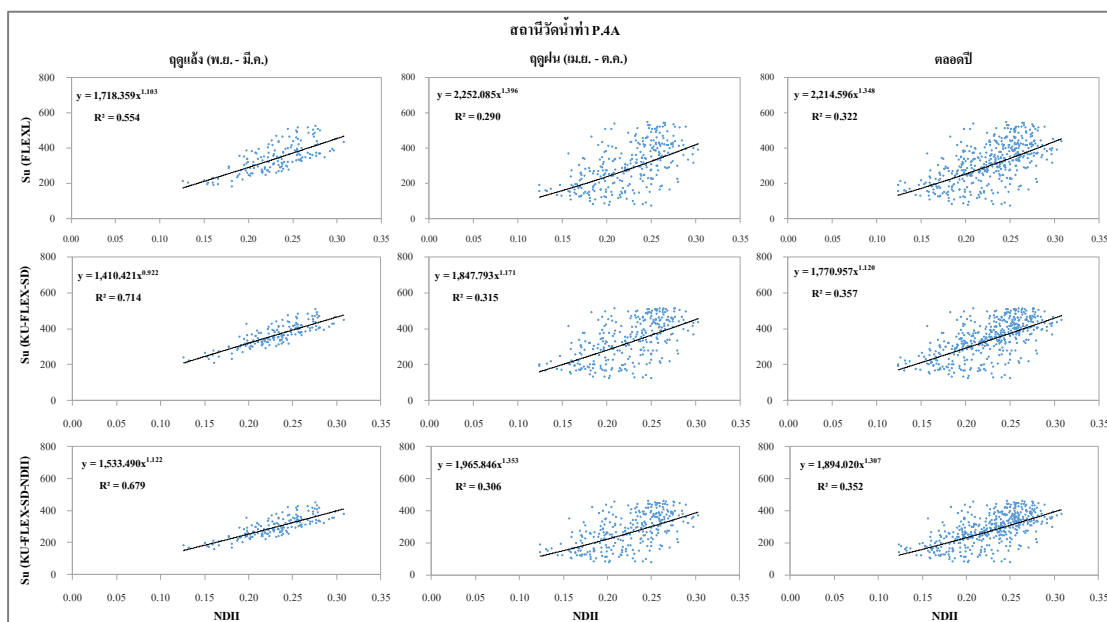
ปริมาณเก็บกักในชั้นดินไม่อิ่มตัว (S_u) จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD
และ KU-FLEX-SD-NDII กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



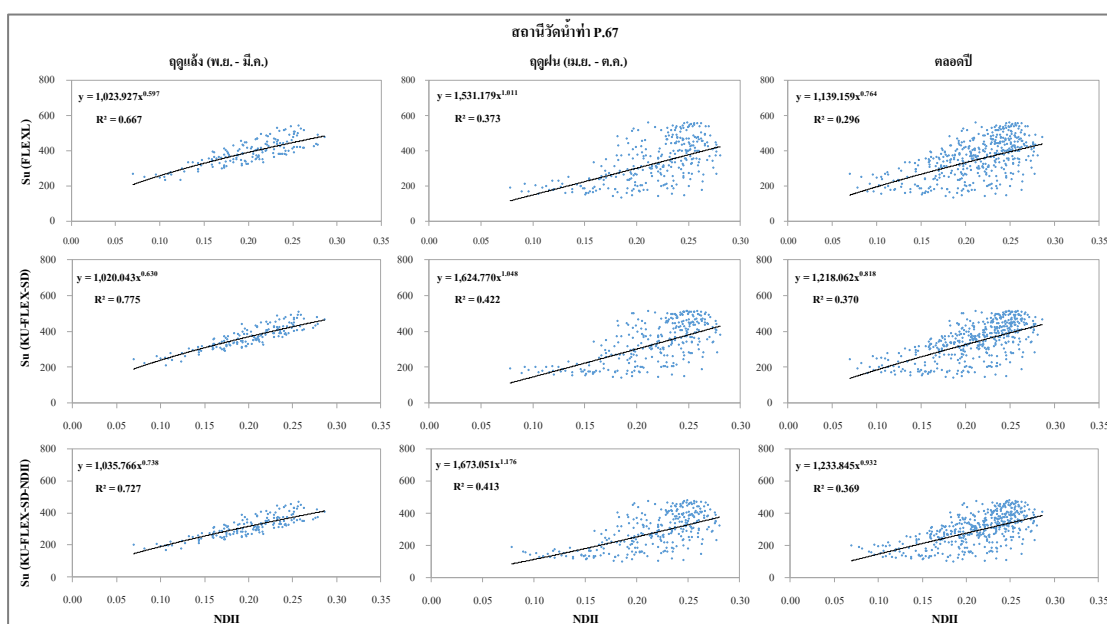
ภาพผนวกที่ ๑ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.20 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



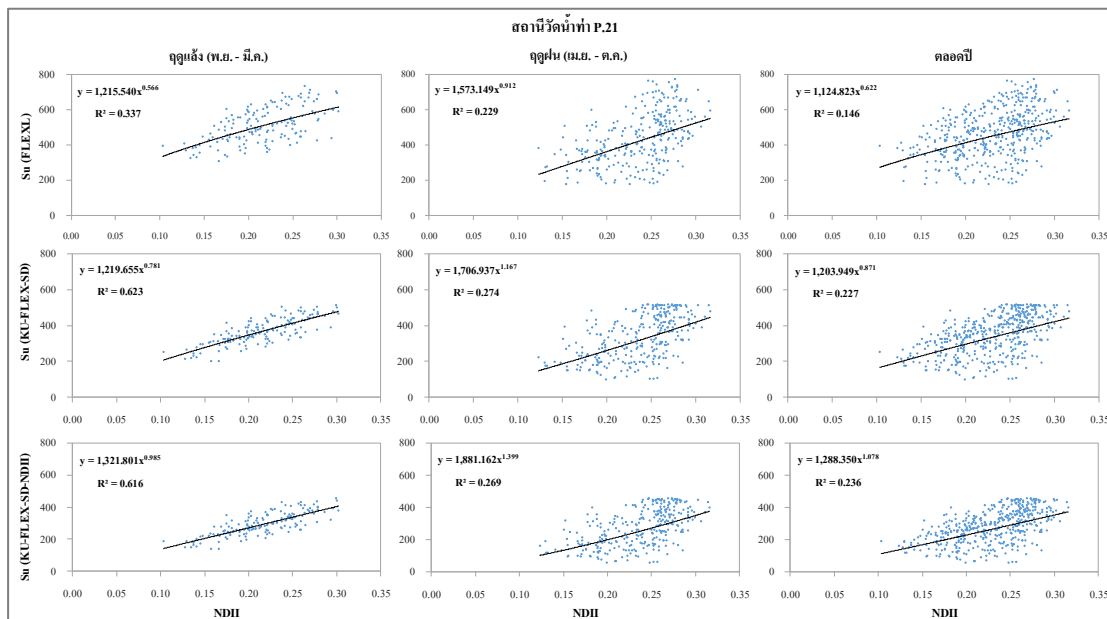
ภาพผนวกที่ ๒ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ Su จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.75 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



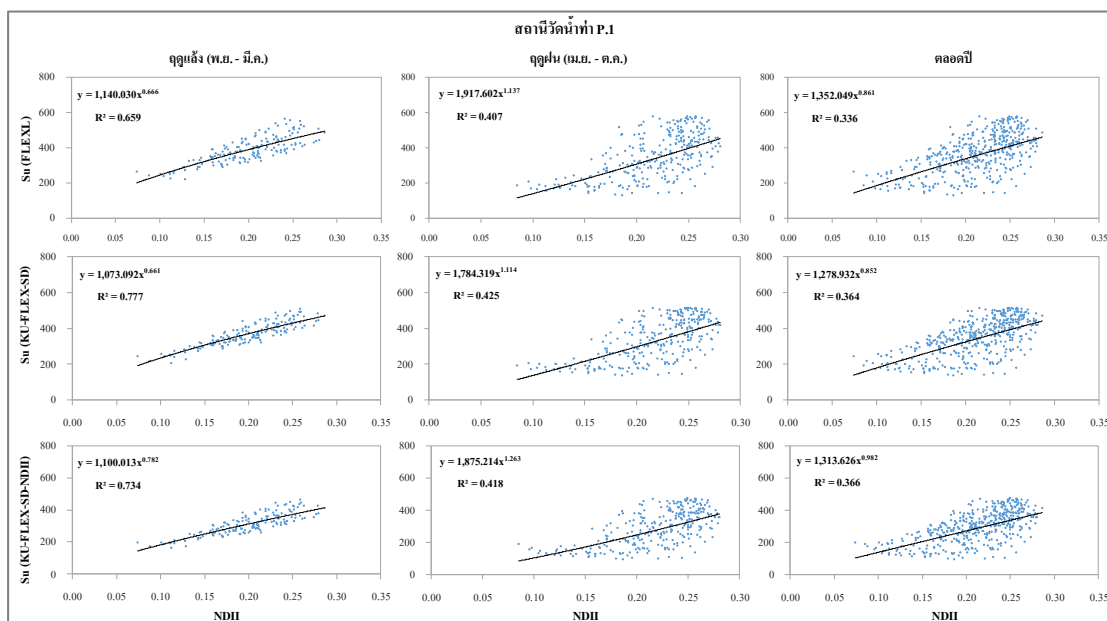
ภาพผนวกที่ ค3 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.4A กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



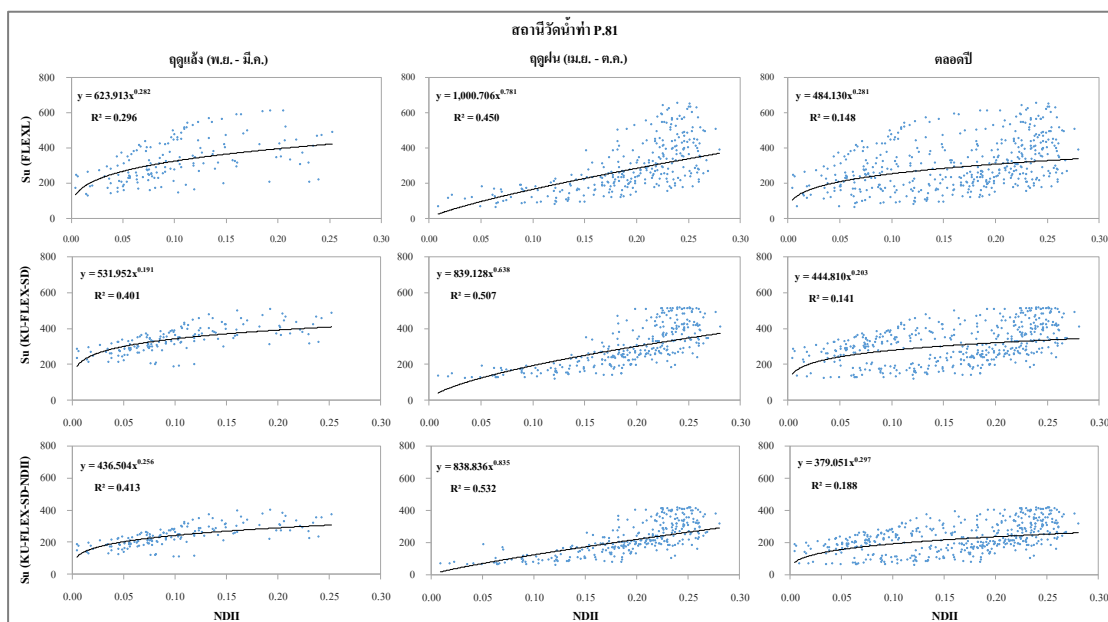
ภาพผนวกที่ ค4 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.67 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



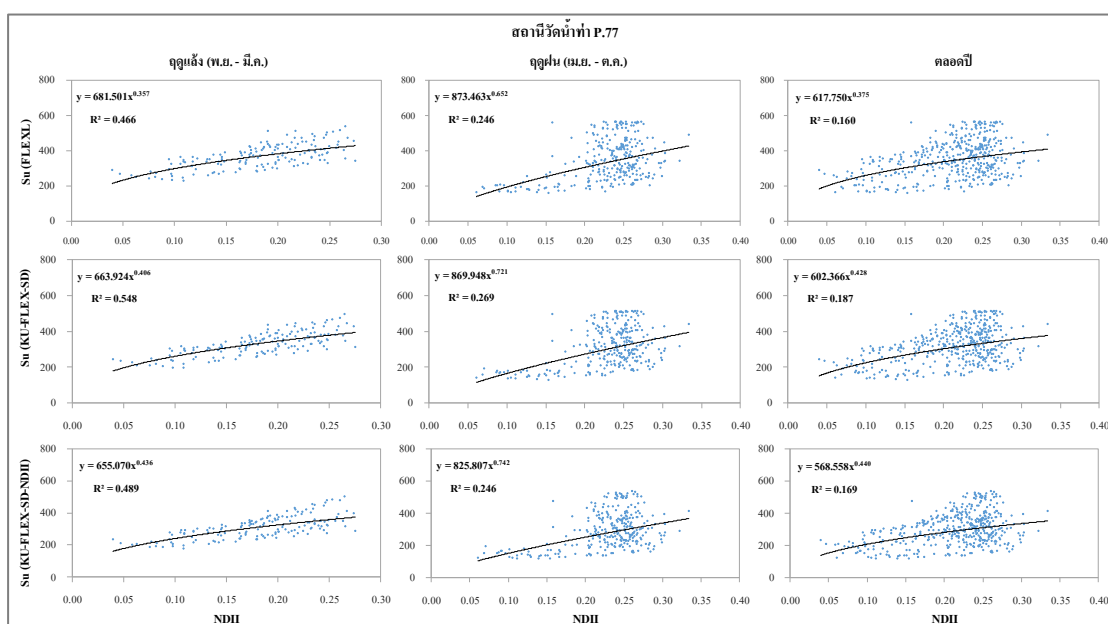
ภาพผนวกที่ ๕ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.21 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



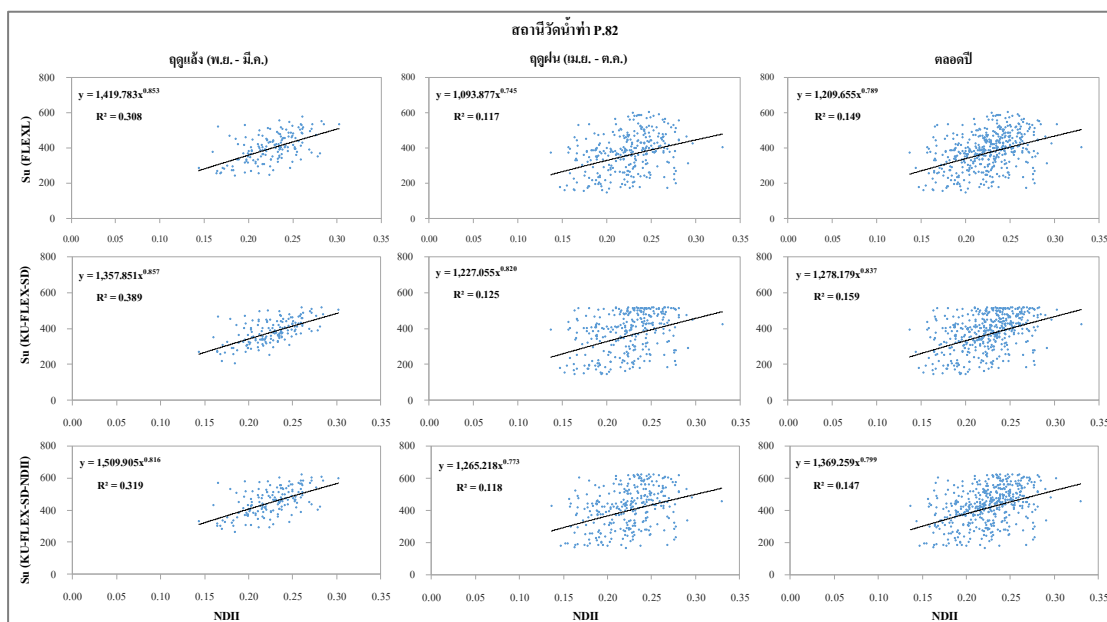
ภาพผนวกที่ ๖ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.1 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



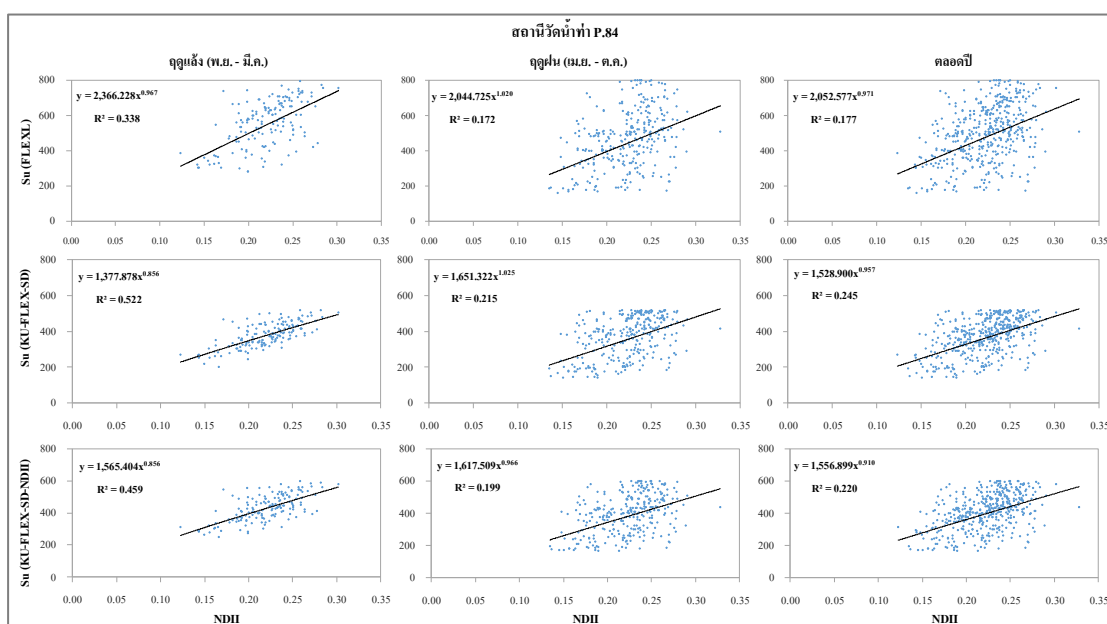
ภาพผนวกที่ ๗ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.81 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



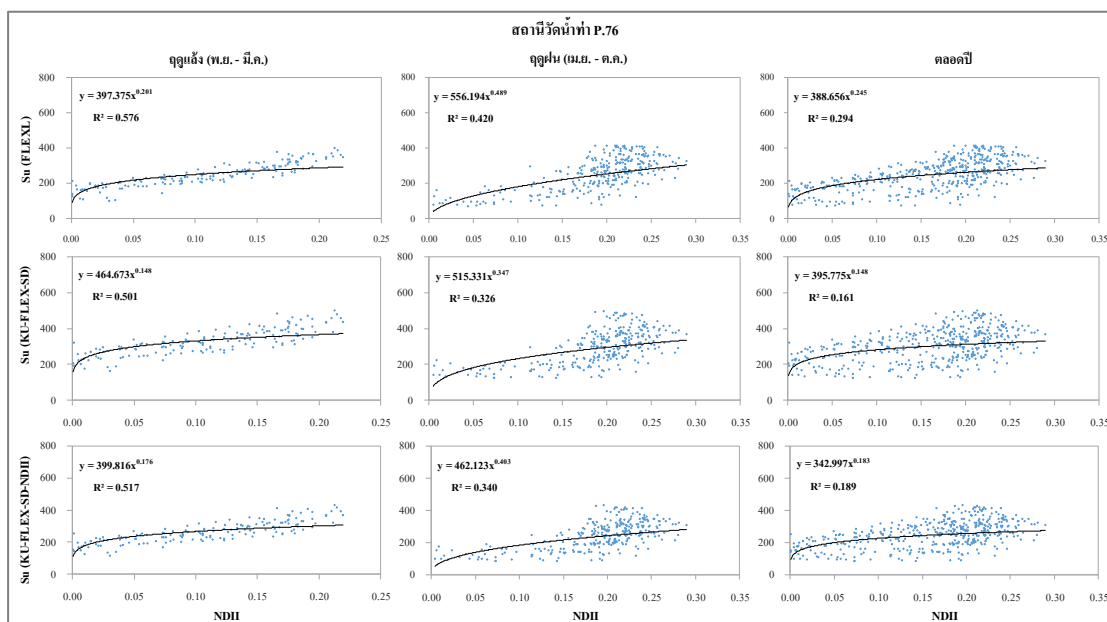
ภาพผนวกที่ ๘ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.77 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



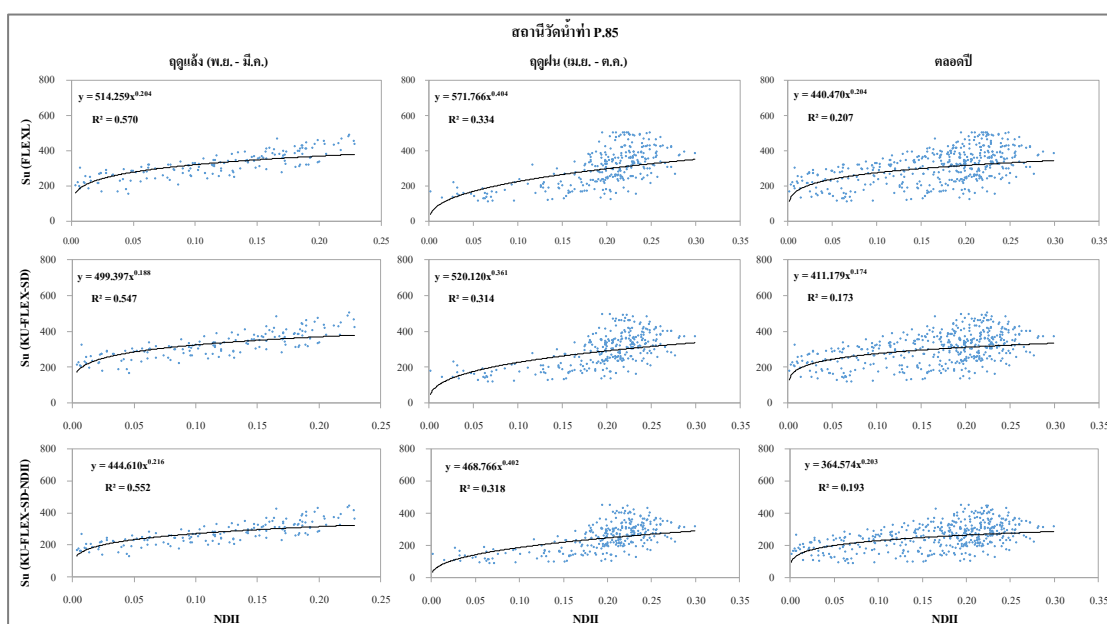
ภาพผนวกที่ ๙ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.82 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



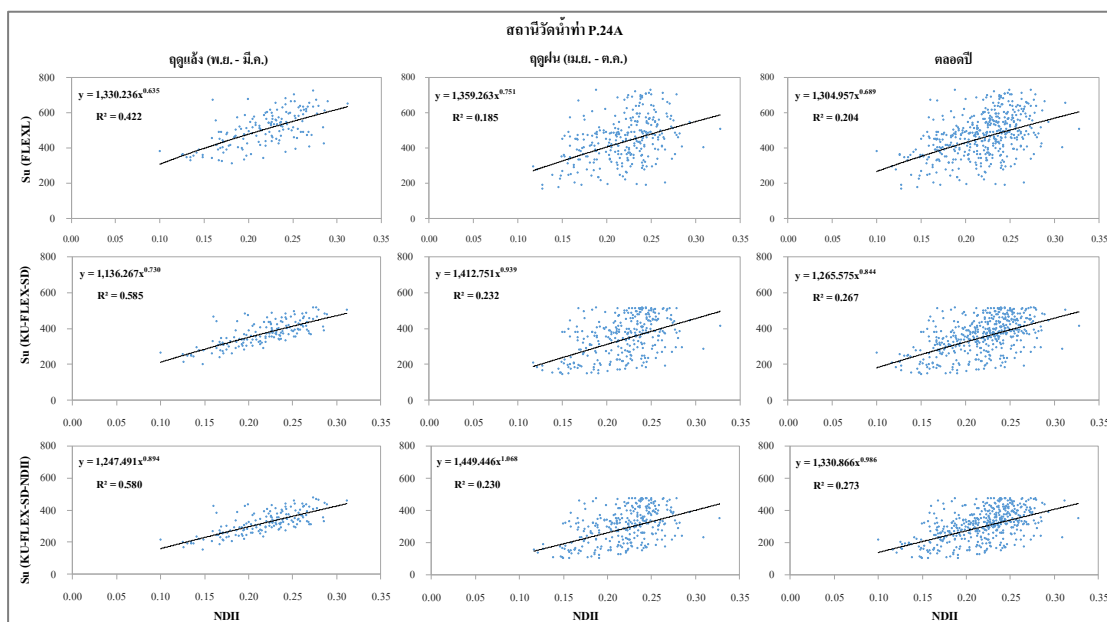
ภาพผนวกที่ ๑๐ ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.84 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



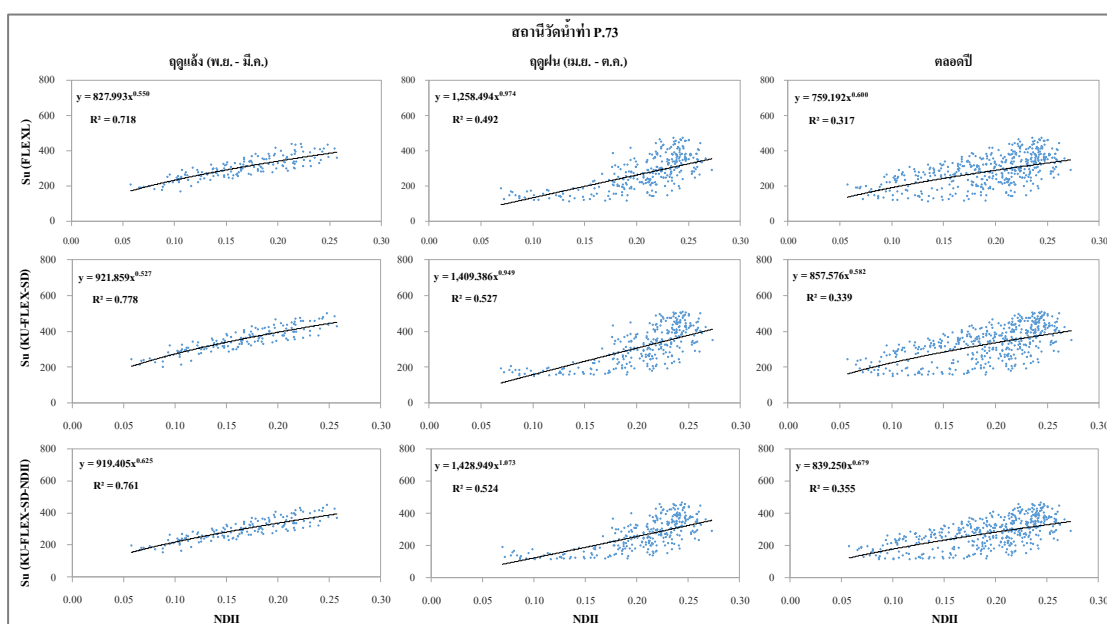
ภาพผนวกที่ ค11 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.76 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



ภาพผนวกที่ ค12 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.85 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



ภาพผนวกที่ ค13 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.24A กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73



ภาพผนวกที่ ค14 ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนี NDII และ S_u จากแบบจำลอง FLEXL, KU-FLEX-SD และ KU-FLEX-SD-NDII ที่สถานี P.73 กรณีสอบเทียบที่สถานี P.73

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ	นางสาววาสนา จันทร์แดง
เกิดวันที่	22 กุมภาพันธ์ 2537
สถานที่เกิด	เพชรบุรี
ประวัติการศึกษา	วศ.บ. (วิศวกรรมศาสตร์) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งปัจจุบัน	วิศวกรชลประทานปฏิบัติการ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติ
ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	-