

การวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมของปริมาณน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบฉบับพลันในประเทศไทย

Regional Frequency Analysis of Instantaneously Annual Flood Data in Thailand

ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จังหวัดปทุมธานี

เบอร์โทรศัพท์ 0-2564-3001-9 # 3100 E-mail: cchava@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมของข้อมูลน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบฉบับพลันในประเทศไทย โดยวิธีดัชนีน้ำท่วม และประมาณการพารามิเตอร์ของทฤษฎีความถี่แจกแจงที่พิจารณา (LN3, GEV, GLO, P3, GPA และ WB) ด้วยโมเมนต์เชิงเส้น ข้อมูลน้ำท่วมที่ใช้ในการศึกษานี้ เป็นข้อมูลอยู่ในช่วงปี พ.ศ. 2464-2540 ของ 155 สถานี ทั่วประเทศ และแต่ละสถานีต้องมีความยาวข้อมูลตั้งแต่ 20 ปีขึ้นไป ผลการวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลน้ำท่วมตามวิธีดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าเกณฑ์วิเคราะห์ความไม่เข้าพวกของข้อมูลทางสถิติ การทดสอบค่าผิดปกติ และการตรวจสอบข้อมูลน้ำท่วมกับลุ่มน้ำข้างเคียง จำเป็นต้องถูกใช้ประกอบกันในการวิเคราะห์ความไม่เข้าพวกของข้อมูล ตัวแปรหลักสำหรับการวิเคราะห์ความไม่คล้ายคลึงทางสถิติของลุ่มน้ำรวม ได้แก่ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำ ผลการวิเคราะห์ได้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับแบบสถานีเดี่ยวที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ผลการเปรียบเทียบพอสรุปได้ว่า ประสิทธิภาพของวิธีที่ใช้ในการศึกษานี้ดีกว่าแบบสถานีเดี่ยวเพราะวิธีลุ่มน้ำรวมให้ค่าสัมพัทธ์ของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยน้อยกว่าวิธีสถานีเดี่ยว

ABSTRACT

The objective of this study is to analyze the regional frequency distributions of instantaneous annual-maximum flood data across Thailand using an index flood method with estimated linear-moment parameters of considered distributions (LN3, GEV, GLO, P3, GPA และ WB). The flood records of 155 stations, each of which having at least 20 years of the data, were used. The period of the chosen annual floods ranged from 1921 - 1997. Results of the analysis have demonstrated that computed discordance measure, outlier test, and comparison of suspected flood data with those of nearby stations are usually necessary in the analysis of data discordance. The principal variable used for analyzing heterogeneity of a region is the location of flow gauging stations. The regional frequency analysis is more effective than an traditionally at-site frequency analysis because it gives smaller relative root mean square error (RRMSE) than does the at-site one.

1. บทนำ

การวิเคราะห์ความถี่ของข้อมูลน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบฉบับพลัน (instantaneously flood data) ในประเทศไทยนั้น ส่วนใหญ่จะใช้วิธีการวิเคราะห์แบบสถานีเดี่ยว (at-site) วิธีการวิเคราะห์แบบนี้เป็นการนำข้อมูลของสถานีที่เราสนใจ มาใช้ในการคำนวณเพียงสถานีเดี่ยว ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะน่าเชื่อถือ ก็ต่อเมื่อสถานีที่สนใจมีข้อมูลยาวนานพอ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ สถานีที่พิจารณาแม้มีข้อมูลจำกัด ทำให้ผลการวิเคราะห์ไม่น่าเชื่อถือ

เพื่อแก้ไขปัญหาคือข้อมูลไม่เพียงพอ นักวิจัยจำนวนมากจึงได้แนะนำให้ใช้การวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวม (regional frequency analysis) วิธีวิเคราะห์แบบนี้เป็นการนำเอาข้อมูลน้ำท่วมของสถานีรอบข้าง ชดเชยข้อจำกัดเกี่ยวกับข้อมูล โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า ข้อมูลน้ำท่วมที่ถูกทำให้เป็นมาตราส่วนเดียวกัน (rescaled data) ภายในลุ่มน้ำรวม ต้องกระจายตามทฤษฎีแจกแจงความถี่เดียวกัน [1] วิธีลุ่มน้ำรวมจะดีกว่าวิธีสถานีเดี่ยว ก็ต่อเมื่อข้อมูลของลุ่มน้ำรวมเป็นไปตามสมมติฐานดังกล่าวข้างต้น

วิธีวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมมีหลายวิธี แต่ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายได้แก่ วิธีดัชนีน้ำท่วม (index flood) ที่ประมาณการพารามิเตอร์ด้วยโมเมนต์เชิงเส้น (linear moment, L -moment) (ดูตัวอย่างใน [2]) การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์วิธีดัชนีน้ำท่วมข้างต้น กับข้อมูลน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบฉบับพลันของประเทศไทย ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาเป็นข้อมูลน้ำท่วมระหว่างปี พ.ศ. 2464-2540 ของ 155 สถานี ทั่วประเทศ จากการศึกษาพบว่าวิธีดัชนีน้ำท่วมและ L -moment ดีกว่าวิธีวิเคราะห์ความถี่น้ำท่วมแบบสถานีเดี่ยว เพราะค่าควอนไทล์ (quantile) ประมาณการ ที่มีค่าสัมพัทธ์ของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (relative root mean square error, RRMSE) มีค่าน้อยกว่าวิธีวิเคราะห์แบบสถานีเดี่ยว

2. ทฤษฎีโมเมนต์เชิงเส้น

กำหนดให้ β_r คือโมเมนต์ตามสัดส่วนความน่าจะเป็น (probability-weight moments, PWMs) ลำดับที่ r ($r = 0, 1, 2, \dots$) และ λ_{r+1} คือโมเมนต์เชิงเส้น (linear moment, L moment) ลำดับที่ $r+1$ สำหรับทฤษฎีแจกแจงความถี่ใดๆ โมเมนต์เชิงเส้น λ_{r+1} สามารถเขียนให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์ของ PWM β_r ได้ดังนี้คือ [3]

$$\lambda_{r+1} = \sum_{k=0}^r \beta_k (-1)^{r-k} \binom{r}{k} \binom{r+k}{k} \quad (1)$$

โดยที่

$$\beta_r = E \left\{ X [F(x)]^r \right\} \quad (2)$$

เมื่อ $F(x)$ = ฟังก์ชันแจกแจงสะสม (Cumulative Distribution Function, CDF) ของตัวแปรสุ่ม X , และ $E\{.\}$ = ค่าคาดคะเน (expected value) ถ้าต้องการคำนวณค่าโมเมนต์เชิงเส้นประมาณการ $\hat{\lambda}_{r+1}$ ของ λ_{r+1} ก็ให้แทน PWM β_k ใน (1) ด้วยค่าประมาณการแบบไม่อคติ b_r ซึ่งสามารถคำนวณหาได้จาก [3]

$$b_r = n^{-1} \sum_{j=r+1}^n \frac{(j-1)(j-2)\dots(j-r)}{(n-1)(n-2)\dots(n-r)} x_{j:n} \quad (3)$$

เมื่อ $x_{j:n}$ = ข้อมูลที่มีค่ามากที่สุดลำดับที่ j n = จำนวนข้อมูล

อัตราส่วนโมเมนต์เชิงเส้น (L-moment ratio) สามารถแสดงได้โดย [4]

$$L\text{-coefficient of variation (L-CV)} = \tau = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (4)$$

$$L\text{-skewness} = \tau_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \quad (5)$$

$$L\text{-kurtosis} = \tau_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_2} \quad (6)$$

$$\tau_r = \frac{\lambda_r}{\lambda_2} \quad r=3, 4, \dots \quad (7)$$

การหาค่าประมาณการตัวอย่าง τ ของ τ และ τ_r ของ τ_r ทำได้โดยแทนค่า λ_r ด้วย $\hat{\lambda}_r$ ใน (4)-(7)

3. วิธีดัชนีนำท่วมและโมเมนต์เชิงเส้น

[1] ได้แบ่งการวิเคราะห์ความถี่แบบกลุ่มน้ำท่วม ด้วยวิธีดัชนีนำท่วมและโมเมนต์เชิงเส้น ออกเป็น 4 ขั้นตอนคือ 1) การวิเคราะห์ความไม่

เข้าพวกของข้อมูล 2) การวิเคราะห์ความไม่คล้ายคลึงกันทางสถิติของกลุ่มน้ำท่วม 3) การทดสอบความเหมาะสมของทฤษฎีการแจกแจงความถี่ของกลุ่มน้ำท่วม 4) การประมาณการควอนไทล์ ในแต่ละขั้นตอนพออธิบายโดยสรุปได้ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ความไม่เข้าพวกของข้อมูล

กำหนดให้ Q_j คือเวกเตอร์ของตัวแปรสุ่มน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบกลับพัน และ q_{ij} คือข้อมูลน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบกลับพันของสถานีที่ i ลำดับที่ j (เรียงลำดับจากมากไปน้อย) การวิเคราะห์ความไม่เข้าพวกจะเริ่มต้น โดยคำนวณค่าโมเมนต์เชิงเส้นประมาณการของข้อมูลน้ำท่วม q_{ij} ลำดับที่ 2, 3 และ 4 $[t_2^{(i)}, t_3^{(i)} \text{ และ } t_4^{(i)}]$ ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้ว จากนั้นเปรียบเทียบค่าทางสถิติเหล่านี้ว่ามีความแตกต่างจากค่าเฉลี่ยของกลุ่มมากน้อยเพียงใดด้วยเครื่องมือในการวัดความไม่เข้าพวก D_i โดย [4]

$$D_i = \frac{1}{3} N (u_i - \bar{u})^T I^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (8)$$

เมื่อ N = จำนวนสถานี และ

$$u_i = [t_2^{(i)} \quad t_3^{(i)} \quad t_4^{(i)}]^T \quad (9)$$

$$\bar{u} = N^{-1} \sum_{i=1}^N u_i \quad (10)$$

$$I = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (11)$$

ถ้า $D_i > 3$ แสดงว่าค่าประมาณการของอัตราส่วนโมเมนต์เชิงเส้นสำหรับสถานี i กระจายออกนอกกลุ่มที่พิจารณา และ [3] จึงได้แนะนำให้ตัดข้อมูลของสถานีนั้น ออกจากการวิเคราะห์ความถี่ในขั้นตอนต่อไป

แต่อย่างไรก็ดีข้อมูล q_{ij} ของสถานี i ใดๆ โดยปกติถือว่าสำคัญ การที่จะนำข้อมูลน้ำท่วมของสถานีนั้น ($D_i > 3$) ออกจากการวิเคราะห์ ควรตรวจสอบให้แน่ใจเสียก่อนว่า ข้อมูลน้ำท่วมของสถานีนั้น ไม่ถูกต้อง การศึกษานี้ได้้นำการทดสอบค่าผิดปกติ -- outlier test [5] มาใช้สำหรับตรวจสอบข้อมูลน้ำท่วม q_{ij} ของสถานีที่สงสัย (ค่าโมเมนต์เชิงเส้นของข้อมูลน้ำท่วมของสถานี i อยู่นอกกลุ่มสถานีที่พิจารณา) อีกขั้นตอนหนึ่ง ในการทดสอบค่าผิดปกติสำหรับข้อมูลของสถานีที่สงสัยหนึ่ง ถ้ากำหนดให้ $p_h =$ ค่าขอบเขตบนของเวกเตอร์ P_j เมื่อ

$P_j = \log(Q_j)$ และ $p_\ell =$ ค่าขอบเขตล่างของ P_j ค่าขอบเขตทั้งสองถูกแสดงไว้โดย [6]

$$p_h = \bar{p} + K_n \sigma_p \quad (12)$$

$$p_\ell = \bar{p} - K_n \sigma_p \quad (13)$$

โดยที่ $K_n =$ ค่าสัมประสิทธิ์ [5] $\bar{p} =$ ค่าเฉลี่ยของ P_j และ $\sigma_p =$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ P_j

ค่าขอบเขตบน p_h และล่าง p_ℓ ที่ได้จะถูกนำมาใช้ตรวจสอบ

ข้อมูลน้ำท่วมที่ผิดปกติ $[\log(q_{ij}) < p_\ell \text{ หรือ } \log(q_{ij}) > p_h]$ เมื่อพบข้อมูลน้ำท่วมที่ผิดปกติทั้งหมดแล้ว ข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของสถานีข้างเคียง ตั้งแต่ 1-3 สถานีขึ้นไป ถ้าข้อมูลน้ำท่วมของสถานีที่สงสัย ($D_i > 3$) ไม่สอดคล้องกันกับของสถานีข้างเคียง เช่น ถ้าสถานีที่สงสัยมีพื้นที่รับน้ำเล็กกว่าพื้นที่ลุ่มน้ำของสถานีเปรียบเทียบกับ แต่กลับให้ค่าอัตราการไหลสูงสุดเกือบเท่ากัน เป็นต้น ในกรณีเช่นนี้ชุดข้อมูลน้ำท่วมของสถานีที่พิจารณาถึงจะถูกตัดออกจากการวิเคราะห์ความถี่ในขั้นตอนต่อไป

3.2 การวิเคราะห์ความไม่คล้ายคลึงกันทางสถิติของกลุ่มน้ำรวม

การวิเคราะห์ในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อแบ่งข้อมูลน้ำท่วมสูงสุดของสถานีวัดน้ำต่างๆ ที่มีลักษณะทางสถิติคล้ายคลึงกัน ให้อยู่กลุ่มเดียวกัน ในที่นี้ข้อมูลน้ำท่วมถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มๆ โดยประยุกต์การวิเคราะห์กลุ่ม (cluster analysis) เข้ากับข้อมูลตำแหน่งที่ตั้ง (ละติจูด, ลองจิจูด) ของสถานีวัดน้ำที่พิจารณาเท่านั้น ข้อมูลลักษณะกายภาพลุ่มน้ำอื่นๆ เช่น พื้นที่รับน้ำ ระดับท้องน้ำ (river bed) เหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง เป็นต้น ที่ถูกแนะนำโดย [4] จะไม่ถูกพิจารณาในการศึกษานี้ เพื่อจะได้ไม่มีความแปรปรวนจากลักษณะกายภาพต่างๆ มากเกินไป จนอาจทำให้ไม่สามารถแบ่งกลุ่มน้ำรวม ให้มีข้อมูลน้ำท่วมรายปีสูงสุดภายในลุ่มน้ำรวมนั้นคล้ายคลึงกันได้

จากนั้นคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแบบถ่วงน้ำหนักของ L-CV ของแต่ละสถานี กับค่าเฉลี่ยของกลุ่มน้ำรวม (V) โดย

$$V = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N n_i [t^{(i)} - t^R]^2}{\sum_{i=1}^N n_i} \right\}^{1/2} \quad (14)$$

เมื่อ $n_i =$ จำนวนชั้นข้อมูลของสถานี i และ $t^R =$ ค่าเฉลี่ยของ L-CV ของลุ่มน้ำรวมที่พิจารณา ซึ่งถูกประมาณการ ได้ดังนี้คือ

$$t^R = \frac{\sum_{i=1}^N n_i t^{(i)}}{\sum_{i=1}^N n_i} \quad (15)$$

ขั้นตอนต่อไปหาค่าเฉลี่ย μ_V และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน σ_V ของข้อมูลสังเคราะห์ V ด้วยทฤษฎีความถี่แจกแจงแคปป่า (Kappa) จำนวน 500 ชุด ตัวอย่างข้อมูล ก่อนที่จะวัดความไม่คล้ายคลึงกันทางสถิติ (heterogeneity, H) ของแต่ละลุ่มน้ำรวมที่แบ่งได้ดังสมการ [4]

$$H = \frac{(V - \mu_V)}{\sigma_V} \quad (16)$$

ถ้า $H < 1$ แสดงว่าข้อมูลน้ำท่วมของแต่ละสถานีภายในลุ่มน้ำรวมได้รับการยอมรับว่าคล้ายคลึงกันทางสถิติ (acceptably homogeneous) ข้อมูลเหล่านี้จะถูกสรุปว่าแตกต่างกัน (definitely heterogeneous) ก็ต่อเมื่อ $H > 2$ ในกรณีนี้ ($H > 2$) สถานีในลุ่มน้ำรวมจำเป็นต้องถูกปรับเข้า-ออกจากลุ่มน้ำรวมข้างเคียง เพื่อให้ได้ค่า H ของลุ่มน้ำรวมที่พิจารณาเป็นที่ยอมรับได้ ($H < 1$) ทั้งนี้ลุ่มน้ำรวมเดียวกันไม่จำเป็นต้องมีสถานีที่อยู่ใกล้กัน [4]

3.3 การทดสอบความเหมาะสมของทฤษฎีการแจกแจงความถี่ของกลุ่มน้ำรวม

[4] ได้เสนอค่าทางสถิติ Z สำหรับทดสอบความเหมาะสมของทฤษฎีความถี่แจกแจงหนึ่ง ต่อข้อมูลน้ำท่วมของสถานีในลุ่มน้ำรวม ค่าทางสถิติ Z นี้คำนวณหาได้จาก

$$Z = (T_4 - t_4^R + B_4) / \sigma_4 \quad (17)$$

โดยที่

$$B_4 = N_{sim}^{-1} \sum_{m=1}^{N_{sim}} [t_4^{(m)} - t_4^R] \quad (18)$$

$$\sigma_4 = \left\{ [N_{sim} - 1]^{-1} \left[\sum (t_4^{(m)} - t_4^R)^2 - N_{sim} B_4^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (19)$$

เมื่อ $t_4^{(m)} =$ ค่าประมาณการของอัตราส่วนโมเมนต์เชิงเส้นลำดับที่ 4 สำหรับลุ่มน้ำรวม ที่ได้จากการสังเคราะห์ข้อมูลด้วยทฤษฎีที่กำลังทดสอบครั้งที่ m ถ้าผลทดสอบให้ $|Z| \leq 1.64$ แสดงว่าทฤษฎีที่ทดสอบสามารถนำไปใช้อธิบายการกระจายของข้อมูลได้

อย่างไรก็ตามทฤษฎีที่ผ่านเกณฑ์ Z ข้างต้น อาจมีด้วยกันได้หลายทฤษฎี เพื่อจะได้ทราบว่าทฤษฎีใดกันแน่ที่ควรนำไปใช้จำลองความถี่ของข้อมูลน้ำท่วมในกลุ่มน้ำรวม การศึกษานี้จะทดสอบความแม่นยำในการประมาณการควอนไทล์น้ำท่วมของทฤษฎีที่ได้เลือกไว้เบื้องต้น โดยเปรียบเทียบค่าสัมพัทธ์ของรากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยของแต่ละทฤษฎี F [relative root mean square error (RRMSE), $\zeta^R(F)$] ตามสมการ [4]

$$\zeta^R(F) = N^{-1} \sum_{i=1}^N \zeta_i(F) \quad (20)$$

เมื่อ

$$\zeta_i(F) = \left\{ M^{-1} \sum_{m=1}^M \left[\frac{\hat{Q}_i^{(m)}(F) - Q_i(F)}{Q_i(F)} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (21)$$

โดยที่ $\hat{Q}_i^{(m)}(F)$ คือควอนไทล์น้ำท่วมของสถานี i ประมาณการจากชุดข้อมูลสังเคราะห์ที่ m และ $M = 10,000$. ทฤษฎีความถี่แจกแจง F ใดที่ให้ ความคลาดเคลื่อน $\zeta^R(F)$ น้อยที่สุด จะถูกคัดเลือกไปใช้ประมาณการควอนไทล์ในลำดับต่อไป

3.4 การประมาณการควอนไทล์

หลังจากที่ได้ฟังก์ชันความถี่แจกแจง F แล้ว ค่าควอนไทล์ประมาณการ $\hat{Q}_i(F)$ ของน้ำท่วมที่สถานี i ในกลุ่มน้ำรวม $[Q_i(F)]$ ถูกหาได้โดย

$$\hat{Q}_i(F) = \hat{\lambda}_1^{(i)} \hat{g}(F) \quad (22)$$

เมื่อ $\hat{g}(F) =$ ค่าควอนไทล์ประมาณการของข้อมูลน้ำท่วม r_{ij} ที่ถูกปรับให้เป็นมาตรฐานเดียวกันจาก

$$r_{ij} = q_{ij} / \hat{\lambda}_1^{(i)} \quad (23)$$

J.R.M. Hosking, IBM Research Division, T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, New York 10598 U.S.A. ได้พัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับวิเคราะห์ความถี่แบบกลุ่มน้ำรวม ตามที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น และอนุญาตให้นำโปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ไปใช้ โดยความโหลดได้จาก <http://lib.stat.cmu.edu/general/lmoments>

4 การประยุกต์วิธีวิเคราะห์ความถี่ที่เสนอ

วิธีประยุกต์ความถี่ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่แล้ว ได้ถูกนำไปประยุกต์เข้ากับข้อมูลน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบลับพลันในประเทศไทย ซึ่งรวบรวมจากสถานีวัดน้ำทั่วประเทศของหน่วยงานต่างๆ ได้แก่ กรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และกรมทรัพยากรน้ำ สถานีวัดน้ำท่าที่ได้รับการคัดเลือกให้ใช้ในการศึกษานี้ จะต้องเป็นสถานีที่มีความยาวของข้อมูลตั้งแต่ 20 ปี ขึ้นไป และข้อมูลต้องไม่ได้รับผลกระทบจากการปฏิบัติงานของอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่ จากเกณฑ์ดังกล่าว ข้อมูลน้ำท่วมที่รวบรวมมาได้จำนวน 155 สถานีทั่วประเทศ มีความยาวข้อมูลอยู่ในช่วง 20-77 ปี (พ.ศ. 2464-2540) รูปที่ 1 แสดงตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าทั่วประเทศที่ใช้ ตารางที่ 1 นำเสนอความยาวของข้อมูลแต่ละสถานี

ตารางที่ 2 แสดงผลการตรวจสอบความไม่เข้าพวก และการทดสอบค่าผิดปกติ ของข้อมูลน้ำท่วมสำหรับสถานีที่มีค่า $D_i > 3$ (สถานี 010101, 011002, 030301, 060101, K.12 และ N.8) จากที่พิจารณาทั้งหมด 154 สถานี (ดูรายละเอียดใน [7]) จากตารางจะเห็นได้ว่าข้อมูลน้ำท่วมของสถานีเหล่านี้ ($D_i > 3$) ส่วนใหญ่แล้วจะมีค่าสูงหรือต่ำผิดปกติ ($p > p_h$ หรือ $p < p_l$) อยู่ ค่าผิดปกติเหล่านี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลของสถานีข้างเคียง ที่อยู่บนลำน้ำเดียวกันหรือเป็นลำน้ำสาขาของกลุ่มน้ำรวมเดียวกันกับสถานีที่มีค่าผิดปกติ ผลการเปรียบเทียบ (ดูรายละเอียดใน [7]) พอสรุปได้ว่ามีเพียงสถานี 011002 (น้ำแม่ขุม ที่บ้านท่าเรือผาแล อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน) เพียงสถานีเดียว ที่มีค่าข้อมูลไม่ถูกต้อง เนื่องจากข้อมูลน้ำท่วมในปี พ.ศ. 2537 สูงมากผิดปกติ เมื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลน้ำท่วมของสถานี 010101 (แม่น้ำสาละวิน บ้านแม่สามแลบ อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน) จึงจะไม่นำข้อมูลน้ำท่วมของสถานีนี้มาใช้ในการวิเคราะห์ในลำดับต่อไป

ตารางที่ 3 นำเสนอค่าความไม่คล้ายคลึง H และรหัสสถานีที่อยู่ในกลุ่มน้ำรวม โดยใช้ตำแหน่งสถานีเป็นหลักในการแบ่งกลุ่มน้ำรวม ดังที่เสนอในการศึกษานี้ ข้อมูลน้ำท่วมทั่วประเทศจะถูกแบ่งออกได้เป็น 25 กลุ่มน้ำรวม จำนวนสถานีของแต่ละกลุ่มอยู่ระหว่าง 2-12 สถานี และเมื่อพิจารณาค่าความไม่คล้ายคลึง H พบว่าข้อมูลน้ำท่วมภายในกลุ่มน้ำรวมเดียวกันมีความคล้ายคลึงกันทางสถิติ (ส่วนใหญ่ $H < 1$)

ในการหาทฤษฎีความถี่แจกแจง ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลน้ำท่วมในกลุ่มน้ำรวม ในที่นี้ใช้ 6 ทฤษฎี คือ three-parameters lognormal distribution (LN3), generalized extreme value distribution (GEV), Pearson type 3 (P3), generalized logistic distribution (GLO) generalized Pareto distribution (GPA) และ wakeby distribution (WB) ตารางที่ 4 สรุปค่า Z ของแต่ละทฤษฎีสำหรับกลุ่มน้ำรวมทั้ง 25 กลุ่มน้ำ ถ้าพิจารณาค่าความถี่ของ Z จะเห็นได้ว่า ทฤษฎีความถี่แจกแจงหลายชนิดอาจถูกยอมรับ ให้นำมาใช้อธิบายความถี่ของข้อมูลในกลุ่มน้ำรวมหนึ่ง ถ้า $|Z| \leq 1.64$ เพื่อที่จะคัดเลือกทฤษฎีความถี่แจกแจงที่เหมาะสมที่สุด

รูปที่ 2 แสดงกราฟของ RRMSE, $\zeta^R(F)$ กับควอนไทล์ของทฤษฎีความถี่แจกแจงต่างๆ สำหรับลุ่มน้ำรวม 2, 3, 4, 5, 6 และ 13 (ดูรายละเอียดลุ่มน้ำรวมอื่นๆ ใน [7]) จากรูปจะเห็นได้ว่าทฤษฎี LN3 เหมาะกับข้อมูลของลุ่มน้ำรวมที่ 2, 3 และ 4 ในขณะที่ GPA ควรถูกนำไปใช้กับข้อมูลของลุ่มน้ำรวมที่ 5 และ 6 ส่วนข้อมูลของลุ่มน้ำรวมที่ 13 นั้น ควรถูกจำลองด้วยทฤษฎี P3 ตารางที่ 5 สรุปทฤษฎีความถี่แจกแจงที่แนะนำและให้ค่าประมาณการ $\hat{g}(F)$ ของลุ่มน้ำรวมทั้งหมด ซึ่งถูกนำมาใช้หาควอนไทล์น้ำท่วมของสถานีที่ต้องการได้ เช่น ถ้าต้องการประมาณการขนาดน้ำท่วมที่ความน่าจะเป็นสะสม (F) เท่ากับ 0.9 ของสถานี Y.14 ขั้นตอนแรกเปิดตารางที่ 3 เพื่อหาว่ารหัสสถานี Y.14 อยู่ในลุ่มน้ำรวมใด จากนั้นเปิดตารางที่ 5 ที่ระดับความน่าจะเป็น = 0.9 อ่านค่า $\hat{g}(F)$ ได้เท่ากับ 1.831 ก่อนที่จะเปิดตารางที่ 6 (ค่าประมาณการของน้ำท่วมเฉลี่ยสำหรับสถานีต่างๆ) อ่านค่าประมาณการ $\hat{\mu}_1^{(y,14)} = 1,245.1$ ลบ.ม./วินาที ขั้นตอนสุดท้ายประยุกต์ (22) จะได้ $Q_{y,14}(F=0.9)$ เท่ากับ $1.831 \times 1,245.1 = 2,280$ ลบ.ม./วินาที

5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวม กับแบบสถานีเดียว

วิธีวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมตามที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้ถูกนำไปประเมินกับ ผลการวิเคราะห์ความถี่แบบสถานีเดียว ที่เสนอทฤษฎีความถี่แจกแจง GEV [8] โดยเปรียบเทียบค่า RRMSE ของค่าประมาณการควอนไทล์ ที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธี เพื่อหาประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ความถี่ ในที่นี้ค่า RRMSE ของวิธีวิเคราะห์แบบสถานีเดียว หามาจากค่าความแปรปรวนแปรของควอนไทล์ประมาณการ $Var[\hat{Q}(F)]$ เป็นหลัก เพราะค่าเอนเอียง (bias) ของควอนไทล์ประมาณการ $bias[\hat{Q}(F)]$ ซึ่งประมาณการพารามิเตอร์ต่างๆ ด้วยโมเมนต์เชิงเส้น นั้นน้อยมากจนตัดทิ้งได้ [9]

เนื่องจาก [10] ได้ทำการหาค่า $Var[\hat{Q}(F)]$ ไว้เพียง 70 สถานี ดังนั้นการเปรียบเทียบในขั้นตอนนี้จึงสามารถทำได้เพียง 70 สถานี เท่านั้น รูปที่ 3 แสดงค่า RRMSE $[\zeta^R(F)]$ ตามวิธีการวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมและแบบสถานีเดียวเป็นแผนภูมิแท่ง สำหรับสถานี 010201 010202 010501 010503 011801 (กรมทรัพยากรน้ำ) และสถานี E.6C E.9 E.16A E.26 E.29 PE.2 M.2 M.26 S.13 (กรมชลประทาน) ตามลำดับ การเปรียบเทียบของสถานีที่เหลือดูได้ใน [7] ผลการเปรียบเทียบพบว่าวิธีการวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมดีกว่าแบบสถานีเดียว เพราะให้ค่า RRMSE ของค่าควอนไทล์ประมาณการน้อยกว่า โดยเฉพาะที่รอบปีการเกิดซ้ำมากๆ เช่น ค่า RRMSE ของวิธีลุ่มน้ำรวมที่รอบปีการเกิดซ้ำ 20 ปี มีค่าน้อยกว่าค่า RRMSE ของวิธีแบบสถานีเดียวประมาณ 0 - 0.10 และที่รอบปีการเกิดซ้ำ 50 ปี มีค่าน้อยกว่าประมาณ 0.15 - 0.20 เป็นต้น

6. สรุปผลการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์วิธีวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวม โดยใช้วิธีดัชนีน้ำท่วมและประมาณการพารามิเตอร์ของทฤษฎีความถี่แจกแจงที่พิจารณาด้วยโมเมนต์เชิงเส้น กับข้อมูลน้ำท่วมรายปีสูงสุดแบบฉบับพลันระหว่างปี พ.ศ. 2464-2540 จาก 155 สถานี ของกรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย และกรมทรัพยากรน้ำแห่งชาติ ทั่วประเทศไทย

วิธีวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมนี้ประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การวิเคราะห์ความไม่เข้าพวกของข้อมูล การวิเคราะห์ความไม่คล้ายคลึงทางสถิติของลุ่มน้ำรวม การทดสอบความเหมาะสมของทฤษฎีการแจกแจงความถี่ต่างๆ (LN3, GEV, GLO, P3, GPA และ WB) และการประมาณการควอนไทล์

ผลการประยุกต์วิธีดังกล่าวข้างต้นกับข้อมูลน้ำท่วมพบว่า

- (1) ในขั้นตอนการวิเคราะห์ความไม่เข้าพวกของข้อมูลนั้น ไม่ควรใช้ค่าความไม่เข้าพวก D_i เพียงอย่างเดียว เป็นเกณฑ์ในการตัดข้อมูลของสถานีใดๆทิ้ง แต่ควรมีการตรวจสอบข้อมูลด้วยการทดสอบค่าผิดปกติ และเปรียบเทียบกับข้อมูลของสถานีข้างเคียงด้วย
- (2) การวิเคราะห์ความไม่คล้ายคลึงทางสถิติของลุ่มน้ำรวม โดยแบ่งกลุ่มตามตำแหน่งที่ตั้งของสถานีวัดน้ำเป็นหลัก ดีกว่าการวิเคราะห์กลุ่มที่ใช้ข้อมูลตำแหน่งที่ตั้ง พื้นที่รับน้ำ และระดับท้องน้ำของสถานีวัดน้ำ
- (3) การประมาณการค่าควอนไทล์ ตามวิธีวิเคราะห์ความถี่แบบลุ่มน้ำรวมนี้ มีประสิทธิภาพมากกว่าการประมาณการควอนไทล์ ด้วยวิธีวิเคราะห์ความถี่แบบสถานีเดียว ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป เพราะให้ค่า RRMSE ของค่าประมาณการควอนไทล์น้อยกว่า โดยเฉพาะที่รอบปีการเกิดซ้ำสูงๆ

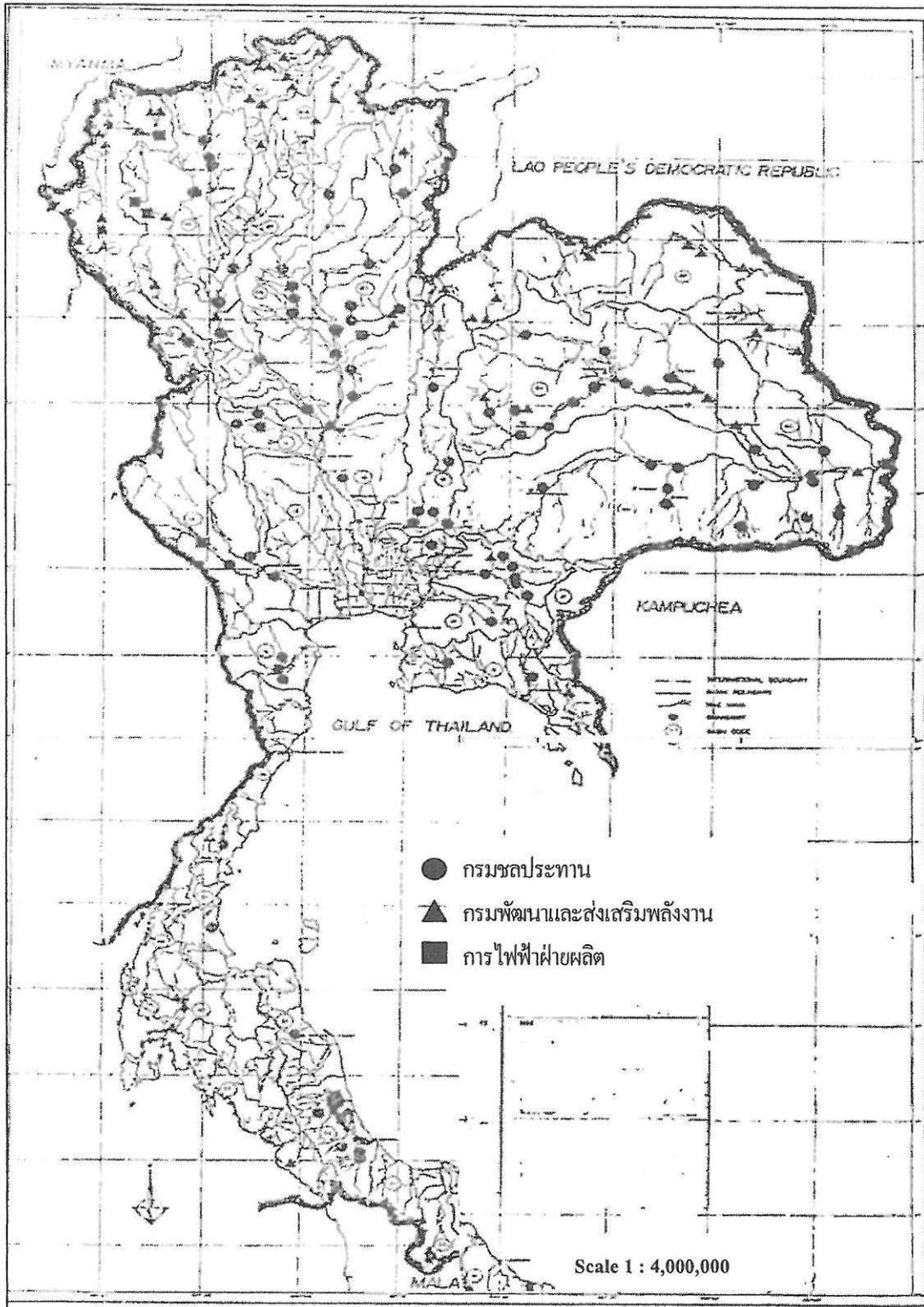
7. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณกรมชลประทาน การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย กรมทรัพยากรน้ำ ที่ให้ข้อมูลในการศึกษา คุณไครเทพ บุญครองการ อดีตนักศึกษาปริญญาโท ที่คำนวณข้อมูลในการศึกษา คุณอนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง นักศึกษาปริญญาเอก ที่ช่วยจัดทำต้นฉบับบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

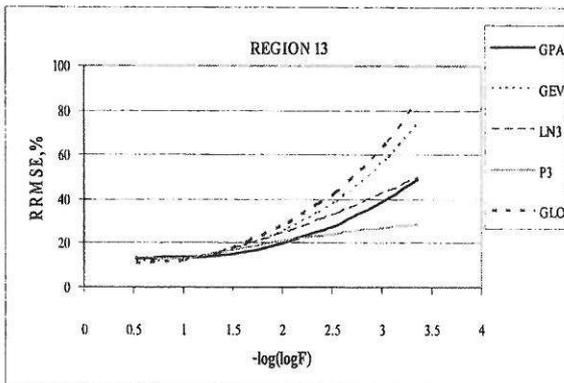
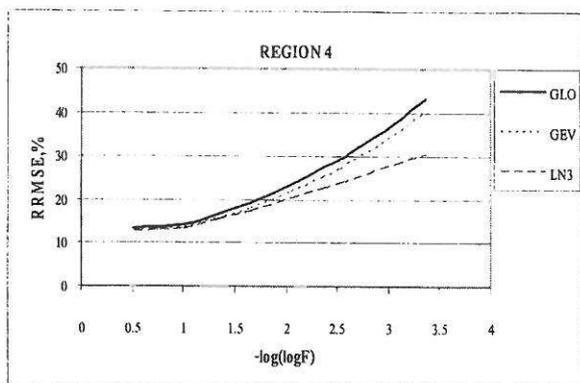
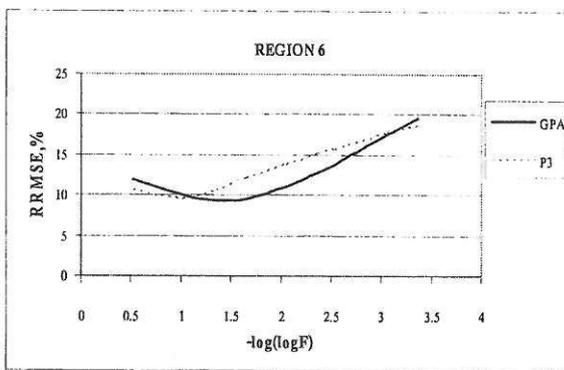
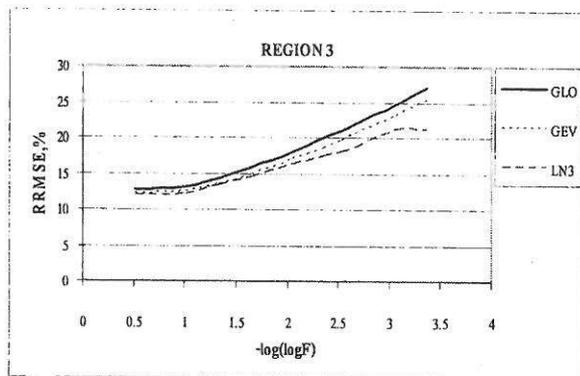
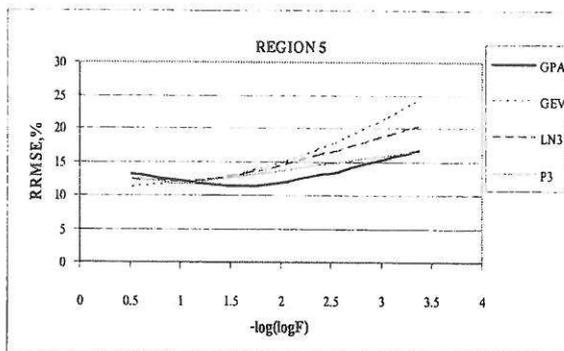
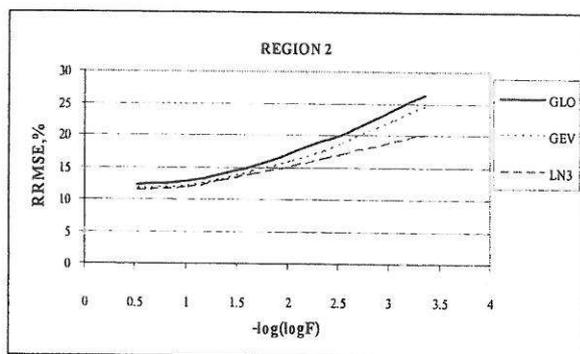
[1] Hosking, J.R.M., and Wallis, J.R., Some statistics useful in regional frequency analysis, *Water Resources Research*, Vol.(29), No.(2), pp 271-281, 1993. (Correction: *Water resources Research*, 31, 251, 1995.)

- [2] Rao, A.R., and Hamed, K.H., Regional frequency analysis of Wabash River flood data, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol.(2), No.(4), pp. 169-179, 1997.
- [3] Greenwood, J.A., Landwehr, J.M., Matalas, N.C., and Wallis, J.R., Probability weighted moments: Definition and relation to parameter of several distribution expressable in inverse form., *Water Resource Research*, Vol. 15, No.6, pp 1049-1054, 1979.
- [4] Hosking, J.R.M., and Wallis, J.R., *Regional frequency analysis an approach based on L-moments*, Cambridge University, 224 pages, 1996.
- [5] Chow, V.T., D.R., Maidment, and L.W. Mays, *Applied Hydrology*, International Edition, McGraw-Hill, 1988.
- [6] Hosking, J.R.M., Wallis, J.R., and Wood, E.F., Estimation of the generalized extreme value distribution by method of probability-weighted moments., *Technometrics*, Vol. 27, No.3, pp 251-261, 1985.
- [7] Boonkrong, T., Regional Frequency Analysis of Instantaneous Annual Maximum Flood in Thailand., *M. Eng. Thesis*, Faculty of Engineering, Thammasat University, 2002.
- [8] Chaleeraktragoon, C., Srochnanjeen, W., and Saengratwatchara, K., Probability distribution of annual flood data in Thailand., *Research and Development Journal of the Engineering Institute of Thailand*, Vol. 13, No. 3, pp 17-26, 2002.
- [9] Lu, L.H., and Stedinger, J.R. Variance of two- and three-parameter GEV/PWM quantile estimators: formulae, confidence intervals, and a comparison., *Journal of Hydrology*, Vol.(138), No.(1/2), pp. 247-267, 1992.
- [10] Srochnanjeen, W., Frequency Analysis Annual Maximum and Minimum Flows in Thailand., *Master's Thesis*, Faculty of Engineering, Thammasat University, 2000.

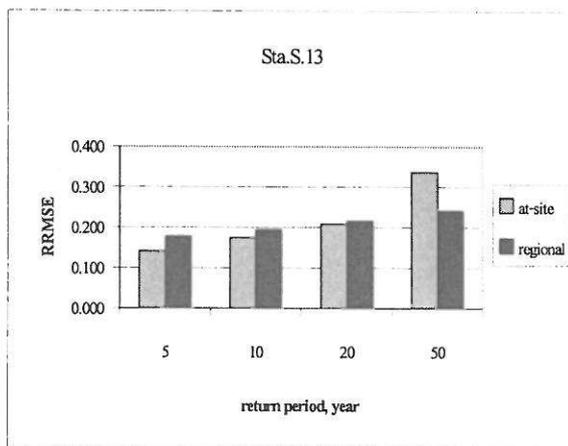
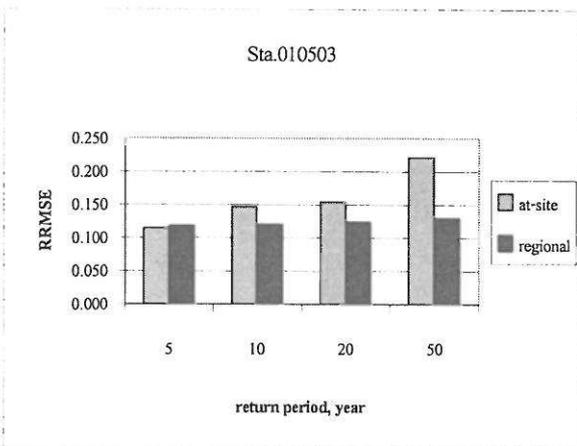
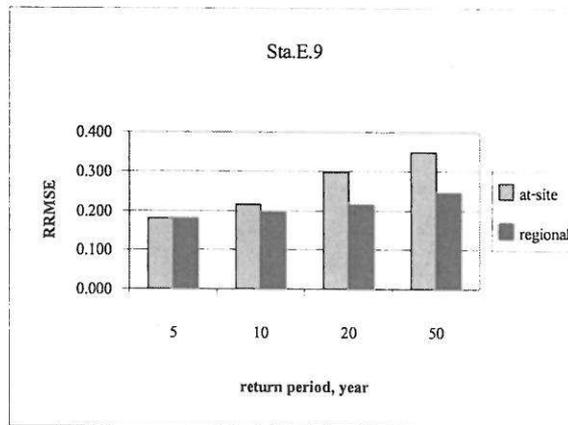
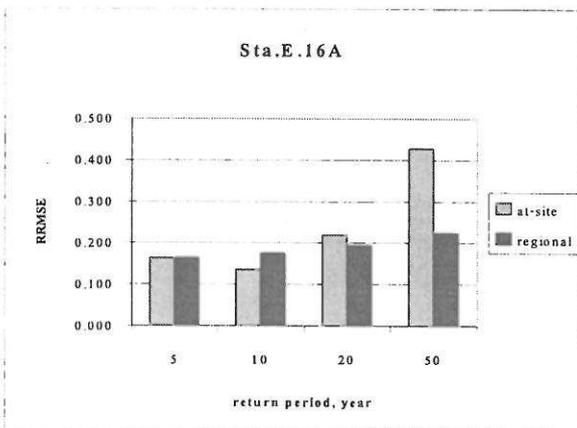
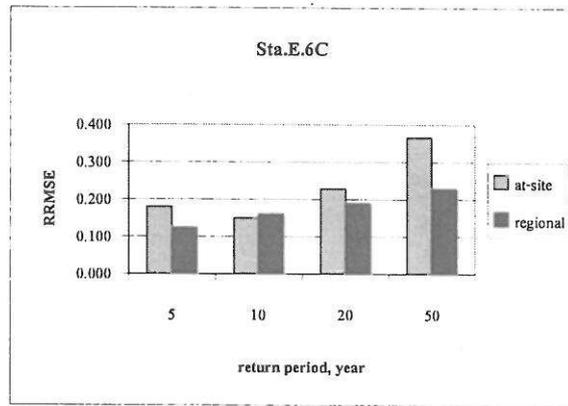
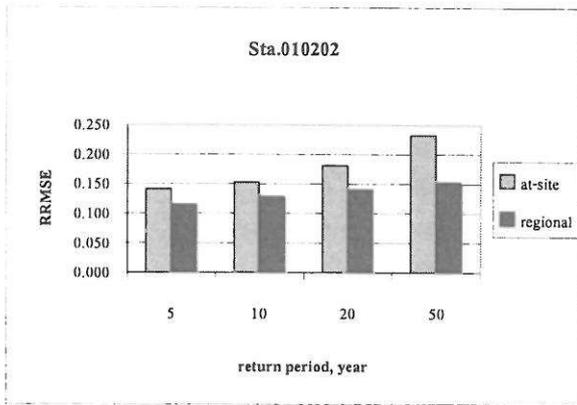


หมายเหตุ : ชื่อสถานีดูรายละเอียดใน [7]

รูปที่ 1 ตำแหน่งของสถานีวัดน้ำท่าทั่วประเทศที่ใช้



รูปที่ 2 ค่า RRMSE ของค่าควอนไทล์ประมาณการ
ในกลุ่มน้ำรวมที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 13



รูปที่ 3 ค่า RRMSE ของควอนไทล์ประมาณการโดยวิธีวิเคราะห์ความถี่แบบกลุ่มน้ำรวมและแบบสถานีเดียว (010202, 010501, 010503, E.6C, E.9, S.13)

ตารางที่ 1 ชื่อสถานีและความยาวข้อมูล น้ำท่ารายปีสูงสุดแบบฉบับพลัน

ลำดับ	ชื่อสถานี	ข้อมูล (ปี)	ลำดับ	ชื่อสถานี	ข้อมูล (ปี)	ลำดับ	ชื่อสถานี	ข้อมูล(ปี)	ลำดับ	ชื่อสถานี	ข้อมูล(ปี)
1	010101	23	40	030304	24	79	CT.9	21	118	N.8	37
2	010201	23	41	030307	20	80	E.1	42	119	N.22	30
3	010202	23	42	030401	26	81	E.5	44	120	N.24	33
4	010501	32	43	040101	20	82	E.6C	25	121	N.36	27
5	010503	23	44	040103	29	83	E.8A	43	122	N.40	21
6	010504	25	45	040104	22	84	E.9	30	123	N.42	20
7	010505	21	46	040107	35	85	E.16A	38	124	NY.3	20
8	010602	25	47	040202	25	86	E.18	24	125	P.1	77
9	011001	29	48	040602	26	87	E.20A	24	126	P.4A	41
10	011002	28	49	050117	35	88	E.21	30	127	P.7A	20
11	011102	22	50	050126	24	89	E.22A	27	128	P.14	44
12	101701	25	51	050127	30	90	E.23	30	129	P.17	43
13	011801	25	52	052902	28	91	E.26	28	130	P.24A	25
14	011802	26	53	060101	23	92	E.29	20	131	PE.1	23
15	020102	33	54	060301	20	93	E.32A	31	132	PE.2	25
16	020103	26	55	061301	20	94	E.54	29	133	PE.3	21
17	020105	30	56	061501	20	95	K.12	21	134	S.2	30
18	020112	26	57	090201	20	96	KGT.3	56	135	S.7	20
19	020114	26	58	091401	29	97	HGT.9	27	136	S.9	25
20	020122	35	59	091603	30	98	KGT.10	32	137	S.12	20
21	020129	35	60	120101	20	99	KGT.12	32	138	S.13	20
22	020301	25	61	150401	34	100	KGT.14	31	139	SW.16	20
23	020501	27	62	180201	23	101	KGT15A	30	140	W.16	24
24	020801	29	63	210103	22	102	KGT.18	29	141	X.64	24
25	021101	29	64	211101	32	103	M.2	44	142	X.67	31
26	021201	33	65	220701	24	104	M.5	42	143	X.68	25
27	021502	28	66	220702	24	105	M.6A	34	144	X.70	23
28	021503	22	67	220704	24	106	M.7	44	145	X.71	29
29	022501	23	68	240101	21	107	M.9	39	146	X.90	27
30	023202	35	69	240206	21	108	M.26	44	147	X.104	20
31	023203	31	70	240207	21	109	M.42	25	148	Y.3A	31
32	023501	27	71	250501	24	110	M.66	32	149	Y.4	34
33	030101	27	72	251102	24	111	M.69	26	150	Y.6	46
34	030102	24	73	B.6	34	112	M.80	32	151	Y.14	34
35	030201	28	74	B.8	24	113	M.89	28	152	Y.17	22
36	030214	25	75	C.2	42	114	M.91	21	153	Y.20	26
37	030216	24	76	C.13	46	115	N.1	65	154	Z.13	29
38	030301	26	77	CT.5A	29	116	N.5A	32	155	Z.15	21
39	030302	26	78	CT.7	23	117	N.7	47			

ตารางที่ 2 ค่าขอบเขตล่างบน และค่าผิดปกติของสถานีที่มีค่า $D_i > 3$

สถานี	010101	011002	030301	060101	K.12	N.8
(D_i , p_i)	(3.8222, 4.2945)	(-, 3.5433)	(1.9760, -)	(-, 2.9557)	(-, 2.5717)	(2.7465, -)
ค่าผิดปกติ	-	1994	1992 1993	1973 1975 1988	1996	1972
p	-	3.9154	1.9385 1.9759	2.9948 3.0719 3.0253	2.9638	2.6866

ตารางที่ 3 รหัสสถานีวัดน้ำและความไม่คล้ายคลึงกัน, H ของลุ่มน้ำรวมที่ 1-25

รหัสสถานีวัดน้ำในลุ่มน้ำรวม (ค่าความไม่คล้ายคลึงกัน H)																								
ลุ่มน้ำที่	1 (0.43)	2 (1.03*)	3 (0.98)	4 (0.77)	5 (0.86)	6 (0.08)	7 (1.11*)	8 (0.27)	9 (0.21)	10 (0.65)	11 (0.42)	12 (1.33*)	13 (0.54)											
ลุ่มน้ำที่ 1	010201	010504	020301	030302	P.24A	021101	011801	Y.6	091401	N.7	091603	E.6C	040107											
	010202	011001	030304	030216	PE.2	021201	011701	Y.14	N.22	N.8	N.24	E.18	E.8A											
	010505	090201	030307	030201	061501	021503	011802		N.40			E.20A	E.1											
	010501	N.1	030401	020501	P.4A, P14	E.29	SW.6		Y.17			040104	023501											
	010503	N.42	030102	W.16	PE.1, PE.3	021502	CT.5A		N.5A			E.54	023303											
			020801		060301	120101						E.26	040103											
ลุ่มน้ำที่ 2	14 (0.05)	15 (0.24)	16 (0.59)	17 (1.20*)	18 (1.03*)	19 (0.93)	20 (0.88)	21 (0.4)	22 (0.75)	23 (0.96)	24 (0.75)	25 (0.64)												
	S.12	S.7	KGT.14	KGT.3	M.66	M.2	020122	022501	C.2	CT.9	061301	180201	Z.13											
	S.13	M.89	KGT.15A	KGT.9	M.80	M.26	020129	020105	C.13	CT.7	010602	Z.15	Y.4											
			150401	NY.3	M.69, M7	M.6A	020102	010101		K.12	X.71		P.17											
			KGT.18	Y.3A	050127	M.9	020103	030301		B.6	240206		251102											
			KGT.10	023202	050126	M.91	020112	030101		B.8	X.104		220704											
		KGT.12		050117	M.42	020114	P.1		030214	011102		220702												
				052902	M.5								X.68											

* หมายถึงลุ่มน้ำรวมที่มีค่า $H > 1$ (ไม่ผ่านเกณฑ์) (.) ค่าความไม่คล้ายคลึงกัน, H

ตารางที่ 4 ค่าความเหมาะสมของทฤษฎีการแจกแจงความถี่ของกลุ่มน้ำรวม (Z) ของแต่ละทฤษฎีการแจกแจงความถี่ของแต่ละกลุ่มน้ำรวม

กลุ่มน้ำ รวมที่	Z					กลุ่มน้ำ รวมที่	Z				
	GLO	GEV	LN3	P3	GPA		GLO	GEV	LN3	P3	GPA
1	1.21	0.06	-0.44	-1.35	-2.74*	14	0.00	-0.14	-0.46	-1.00	-0.66
2	0.19	-0.66	-1.27	-2.33*	-2.93*	15	1.58	0.58	0.67	0.58	-1.42
3	0.74	-0.04	-0.66	-1.72*	-2.16*	16	0.09	-0.58	-1.08	-1.94*	-2.36*
4	-0.65	-1.11	-1.61	-2.48*	-2.46*	17	2.21*	0.05	0.43	0.35	-4.06*
5	2.68*	1.45	1.25	0.78	-1.27	18	-2.34*	-3.26*	-3.64*	-4.34*	-5.51*
6	3.2*	2.09*	1.91*	1.48	-0.38	19	1.15	0.60	-0.16	-1.46	-1.10
7	4.56*	3.13*	2.95*	2.46*	0.00	20	1.61	-1.57	-0.78	-0.80	-7.34*
8	2.36*	0.35	1.17	0.86	-2.75*	21	5.50*	3.99*	4.00*	3.72*	0.86
9	0.77	0.41	0.04	-0.59	-0.63	22	1.78*	1.29	0.32	-1.33	-0.43
10	-1.99*	-2.88*	-3.43*	-4.4*	-5.17*	23	-0.30	-0.49	-0.80	-1.32	-1.11
11	-0.03	-0.42	-1.19	-2.51*	-1.78*	24	0.88	-0.95	-0.64	-0.71	-4.46*
12	-1.58	-1.96*	-2.29*	-2.87*	-3.02*	25	-0.26	-1.21	-1.77*	-2.73*	-3.66*
13	0.00	-0.35	-0.63	-1.12	-1.32						

* หมายถึงทฤษฎีการแจกแจงความถี่ที่มีค่า $|Z| > 1.64$ (ไม่ผ่านเกณฑ์)

ตารางที่ 5 ทฤษฎีแจกแจงความถี่ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละกลุ่มน้ำรวม และค่าคอนโทลประมาณการ $\hat{g}(F)$ ของกลุ่มน้ำรวมที่ 1-25

กลุ่มน้ำรวมที่	ทฤษฎีที่ใช้	ความน่าจะเป็นสะสม, F									
		0.500	0.800	0.900	0.950	0.980	0.990	0.993	0.995	0.998	0.999
1	P3	0.871	1.378	1.727	2.061	2.490	2.807	2.968	3.119	3.527	3.832
2	LN3	0.859	1.324	1.679	2.053	2.585	3.021	3.257	3.487	4.156	4.704
3	LN3	0.859	1.310	1.659	2.029	2.561	2.999	3.238	3.471	4.152	4.712
4	LN3	0.830	1.318	1.715	2.150	2.794	3.338	3.640	3.937	4.820	5.562
5	GPA	0.882	1.494	1.834	2.094	2.348	2.488	2.547	2.596	2.701	2.759
6	GPA	0.882	1.493	1.831	2.091	2.344	2.484	2.543	2.592	2.697	2.755
7	WAK	0.890	1.484	1.808	2.054	2.289	2.417	2.471	2.515	2.608	2.659
8	GEV	1.045	1.247	1.322	1.369	1.407	1.424	1.431	1.436	1.445	1.449
9	P3	0.813	1.380	1.806	2.231	2.793	3.217	3.435	3.641	4.201	4.624
10	WAK	0.873	1.285	1.653	2.081	2.756	3.365	3.716	4.074	5.193	6.203
11	LN3	0.702	1.406	2.037	2.773	3.931	4.964	5.554	6.149	7.974	9.571
12	WAK	0.884	1.218	1.537	1.937	2.625	3.300	3.712	4.146	5.603	7.032
13	P3	0.820	1.413	1.844	2.269	2.823	3.239	3.452	3.652	4.196	4.607
14	P3	0.754	1.346	1.843	2.362	3.069	3.613	3.896	4.164	4.900	5.461
15	GPA	0.939	1.505	1.756	1.916	2.041	2.097	2.117	2.132	2.160	2.172
16	LN3	0.858	1.321	1.677	2.053	2.591	3.032	3.272	3.506	4.188	4.747
17	WAK	1.002	1.264	1.406	1.555	1.779	1.974	2.084	2.194	2.531	2.824
18	WAK	0.901	1.252	1.555	1.894	2.407	2.850	3.099	3.347	4.098	4.747
19	P3	0.721	1.490	2.093	2.705	3.523	4.146	4.467	4.771	5.601	6.230
20	GEV	0.996	1.210	1.320	1.407	1.497	1.552	1.576	1.597	1.645	1.675
21	GPA	0.925	1.446	1.701	1.876	2.027	2.100	2.128	2.151	2.194	2.215
22	P3	0.629	1.557	2.321	3.112	4.183	5.005	5.432	5.836	6.943	7.786
23	P3	0.744	1.423	1.965	2.519	3.263	3.831	4.125	4.403	5.163	5.741
24	P3	0.985	1.208	1.333	1.441	1.568	1.655	1.698	1.738	1.840	1.914
25	GEV	0.875	1.315	1.649	2.007	2.53	2.972	3.218	3.461	4.188	4.807

ตารางที่ 6 ค่าประมาณการโมเมนต์เชิงเส้นลำดับที่ 1 (หน่วย ลบ.ม./วินาที)

รหัสสถานี	I_1	รหัสสถานี	I_1	รหัสสถานี	I_1	รหัสสถานี	I_1	รหัสสถานี	I_1
010101	11711.7	023501	298.8	210103	169.4	E.54	371.5	P.1	401.9
010201	72.0	030101	385.5	211101	1206.4	K.12	77.6	P.4A	191.2
010202	73.5	030102	610.3	220701	164.6	KGT.3	780.9	P.7A	989.0
010501	454.6	030201	171.5	220702	38.2	KGT.9	330.3	P.14	421.9
010503	616.5	030214	52.0	220704	370.3	KGT.10	354.0	P.17	1179.1
010504	233.9	030216	41.2	240101	146.8	KGT.12	179.6	P.24A	116.1
010505	37.3	030301	174.6	240206	93.3	KGT.14	149.4	PE.1	177.4
010602	58.6	030302	207.2	240207	42.8	KGT.15A	205.4	PE.2	874.3
011001	275.5	030304	47.6	250501	20.4	KGT.18	195.3	PE.3	371.9
011002	614.8	030307	21.2	251102	201.3	M.2	233.2	S.2	600.3
011102	5.3	030401	65.4	B.6	302.6	M.5	1265.5	S.7	69.1
011701	160.7	040101	393.0	B.8	89.2	M.6A	517.0	S.9	684.9
011801	2023.7	040103	527.1	C.2	2498.2	M.7	2864.1	S.12	143.8
011802	1375.0	040104	678.0	C.13	2344.9	M.9	261.5	S.13	102.8
020102	10572.4	040107	994.8	CT.5A	293.4	M.26	243.7	SW.6	200.9
020103	10973.1	040202	193.2	CT.7	144.6	M.42	253.4	W.16	229.5
020105	16000.0	040602	62.2	CT.9	94.0	M.66	123.6	X.64	358.9
020112	17656.8	050117	2780.9	E.1	646.2	M.69	406.7	X.67	83.9
020114	16411.5	050126	4661.7	E.5	343.4	M.80	456.9	X.68	58.2
020122	24174.3	050127	3689.0	E.6C	62.4	M.89	107.0	X.70	70.5
020129	27351.4	052902	211.0	E.8A	565.9	M.91	43.2	X.71	122.3
020301	71.6	060101	613.6	E.9	519.1	N.1	1242.3	X.90	227.6
020501	186.9	060301	25.6	E.16A	549.7	N.5A	1064.3	X.104	282.6
020801	400.9	061301	13.2	E.18	820.4	N.7	1142.8	Y.3A	965.4
021101	64.8	061501	209.8	E.20A	1179.5	N.8	1255.1	Y.4	299.5
021201	133.2	090201	175.6	E.21	388.8	N.22	468.6	Y.6	1273.9
021502	435.2	091401	359.4	E.22A	205.3	N.24	339.1	Y.14	1245.1
021503	221.6	091603	322.9	E.23	369.5	N.36	178.6	Y.17	483.5
022501	538.5	120101	303.8	E.26	183.3	N.40	463.1	Y.20	986.3
023202	160.6	150401	232.3	E.29	271.3	N.42	929.2	Z.13	228.2
023303	183.6	180201	229.4	E.32A	358.7	NY.3	73.6	Z.15	53.1