

การประมวลผลข้อมูล GNSS อัตโนมัติเพื่อการหาปริมาณไอน้ำในอากาศสำหรับพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

อำนาจ สมภาร¹, พิรญา ตันตือนุภาพ¹, พงษ์ศักดิ์ จินดาศรี¹, สุรเจตส์ บุญญาอรุณเนตร¹,
ชัยพร กิจประชา², ชัยยุทธ เจริญผล² และ เฉลิมชนม์ สติระพจน์^{2,*}

¹สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

²ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

*chalermchon.s@chula.ac.th

บทคัดย่อ

การจัดการน้ำที่มีประสิทธิภาพเป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อประเทศเกษตรกรรมอย่างประเทศไทย ดังนั้นแบบจำลองการพยากรณ์ฝนที่แม่นยำถูกต้องเป็นสิ่งที่จะช่วยในการวางแผนการใช้น้ำและกักเก็บน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ (Precipitable Water Vapor, PWV) เป็นตัวแปรหลักในแบบจำลองการคาดการณ์ฝนและยังใช้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศในแต่ละฤดูกาล โดยทั่วไปค่าปริมาณไอน้ำในอากาศสามารถวัดได้โดยตรงจากเครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave radiometer) แต่ค่าใช้จ่ายของเครื่องมีราคาที่สูงมากที่จะติดตั้งในทุกๆ พื้นที่ ทางเลือกอีกทางสำหรับการหาปริมาณไอน้ำในอากาศคือการแปลงค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่อยู่ในข้อมูลดาวเทียม GNSS ให้เป็นค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ จากการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงค่าปริมาณไอน้ำในอากาศที่ได้จากข้อมูล GNSS มีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าปริมาณไอน้ำในอากาศที่ได้จากเครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ จากการติดตั้งสถานีฐานทำงานต่อเนื่อง (Continuously Operating Reference Stations: CORS) ที่ผ่านมาของสถาบันสารสนเทศน้ำและการเกษตรในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่ได้ดำเนินการร่วม 3 หน่วยงาน ได้แก่ กรมป้องกันและบรรเทาสาธารณภัย สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติและสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร ทำให้สามารถหาปริมาณไอน้ำในอากาศได้อย่างแม่นยำในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลโดยใช้โปรแกรมเชิงวิจัย Bernese GNSS จากสถานี CORS เหล่านี้ ในงานวิจัยนี้มุ่งที่จะทำการทดสอบการประมวลผลอัตโนมัติสำหรับการหาปริมาณไอน้ำในอากาศครอบคลุมพื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล ระบบที่เสนอนี้สามารถใช้เป็นทางเลือกสำหรับการหาปริมาณไอน้ำในอากาศที่แม่นยำสำหรับงานทางด้านอุตุนิยมวิทยาในอนาคต

คำสำคัญ: ระบบดาวเทียมนำหน้จีเอ็นเอสเอส, ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์, ค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ

บทนำ

การบริหารจัดการทรัพยากรน้ำเป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับทุกๆ ประเทศโดยเฉพาะประเทศเกษตรกรรมหากมีการจัดการที่ไม่มีประสิทธิภาพจะส่งผลให้เกิดความเสียหายเป็นวงกว้าง เช่นส่งผลทำให้เกิดภัยแล้งในประเทศ อุทกภัย เป็นต้น ซึ่งเหตุการณ์ที่กล่าวมาส่งผลกระทบอย่างใหญ่หลวงในด้านเศรษฐกิจ เกษตรกรรม ความเป็นอยู่ของประชาชนของประเทศ สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตร (องค์การมหาชน) หรือ สสนก. มีหน้าที่ในการจัดทำระบบคลังข้อมูลน้ำและภูมิอากาศแห่งชาติ ที่เป็นศูนย์รวมข้อมูลด้านทรัพยากรน้ำที่สำคัญของประเทศจาก 35 หน่วยงานของรัฐ เพื่อสนับสนุนรัฐบาลคือทั้งศูนย์ปฏิบัติการนายกรัฐมนตรี (PMOC) และสำนักงานทรัพยากรน้ำแห่งชาติหรือ สททช. ในการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ รวมทั้งสนับสนุนงานศึกษาวิจัยด้านทรัพยากรน้ำและสภาพอากาศในภาวะปกติ รวมทั้งร่วมให้ข้อมูลการวิเคราะห์สำหรับป้องกันและแก้ไขปัญหาอุทกภัยของประเทศในภาวะวิกฤต

ในการคาดการณ์ ติดตาม และศึกษาสภาพอากาศของสถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตรนั้นจะใช้แบบจำลองสภาพอากาศ (วาฟ-รอม) ซึ่งสามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า 7 วัน และข้อมูลการตรวจวัดจากสถานีโทรมาตรที่สามารถส่งข้อมูลแบบอัตโนมัติทุก 15 นาที อีกทั้งยังมีข้อมูลอีกหลายส่วนที่ได้นำมาใช้วิเคราะห์และคาดการณ์ ข้อมูลอีกส่วนที่ สสนก. สนใจศึกษาเพื่อนำมาเป็นข้อมูลส่วนหนึ่งในการวิเคราะห์คาดการณ์คือค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ (Precipitable Water Vapor: PWV) โดยปกติการวัดค่าปริมาณ

ไอน้ำในอากาศจะใช้เครื่องมือที่เรียกว่า radiosonde และ เครื่องไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (Microwave radiometer: MWR) (Yao, Shan, & Zhao, 2017) ถึงแม้ว่าจะมีความถูกต้องแม่นยำสูง แต่เนื่องด้วยความครอบคลุมทางด้านพื้นที่ต่ำและราคาที่สูงมากจึงทำให้ยากต่อการติดตั้งอุปกรณ์เหล่านี้ได้อย่างครอบคลุมในทุกบริเวณพื้นที่ (Wang, He, Wei, & Zhang, 2015)

ระบบดาวเทียมนำหนาสากล (Global Navigation Satellite Systems: GNSS) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในด้านพลเรือนและการศึกษา โดยเฉพาะการติดตามการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลก การวิเคราะห์แผ่นดินไหว การติดตามชั้นบรรยากาศ เป็นต้น (Sato, et al. 2013) เนื่องจากสัญญาณที่เดินทางจากดาวเทียมที่อยู่ในอวกาศผ่านชั้นบรรยากาศต่างๆ ของโลกได้แก่ ชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ และชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ทำให้ระยะทางที่วัดจากดาวเทียมไปยังเครื่องรับนั้นเกิดความผิดพลาดขึ้นซึ่งส่งผลให้การวัดระยะทางผิดไปจากความเป็นจริง ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเหล่านี้เพื่อให้ได้ระยะทางระหว่างดาวเทียมถึงเครื่องรับที่ถูกต้อง สำหรับค่าชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์นั้นสามารถใช้แบบจำลองเชิงเส้นของข้อมูลสองความถี่ (Ionosphere free combination) แต่สำหรับชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์นั้นไม่สามารถใช้แบบจำลองเชิงเส้นของข้อมูลสองความถี่ได้ เนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีคุณสมบัติที่แตกต่างจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ ดังนั้นในการหาค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้โดยการใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ต่างๆ แต่แบบจำลองในปัจจุบันยังไม่สามารถหาค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ได้ทั้งหมด ดังนั้นในงานที่ต้องการความละเอียดถูกต้องสูง จะทำการประมาณค่าเหล่านี้ในขั้นตอนการประมวลผล (Kouba, 2015) นอกจากนี้จะถูกนำมาใช้ปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนเพื่อให้ได้ค่าพิกัดที่ถูกต้องสูงแล้ว เนื่องจากค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เกิดจากก๊าซและปริมาณไอน้ำในอากาศ ทำให้มีการประยุกต์ใช้ค่าคลาดเคลื่อนเหล่านี้ศึกษาชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์โดยการเปลี่ยนค่าคลาดเคลื่อนชนิดนี้ให้เป็นค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ โดยการศึกษาที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าค่าปริมาณไอน้ำในอากาศที่ได้จากระบบดาวเทียม GNSS มีความถูกต้องใกล้เคียงกับการใช้เครื่องมือไมโครเวฟเรดิโอมิเตอร์ (MWR) (Rocken, et al. 1995) (Sato, et al. 2013) (Yao, Shan, & Zhao, 2017) เนื่องจากราคาเครื่องรับสัญญาณที่ถูกกว่าเมื่อเทียบกับเครื่องมือ MWR จึงทำให้สามารถติดตั้งได้ครอบคลุมพื้นที่มากกว่า ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมอย่างสูงในการใช้หาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศจากระบบดาวเทียม GNSS มาใช้ทางด้านอุตุนิยมวิทยา นอกจากนี้งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการนำค่าปริมาณไอน้ำในอากาศที่ได้จากข้อมูลดาวเทียม GNSS มาช่วยในการเพิ่มความแม่นยำคาดการณ์ฝนล่วงหน้าได้ในระดับใกล้เคียงความจริง (Near realtime) (Cao, Liao, & Uradzinski, 2016) (Yao, Shan, & Zhao, 2017)

สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำและการเกษตรได้มีการจัดตั้งสถานีพิกัดอ้างอิงแบบต่อเนื่อง ในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลเพื่อใช้อ้างอิงค่าพิกัด และใช้ในการหาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ สำหรับการคาดการณ์ฝนเพื่อจัดการบริหารทรัพยากรน้ำของประเทศไทย โดยงานวิจัยนี้จะทำการพัฒนาระบบประมวลผลข้อมูล GNSS ด้วยโปรแกรมเชิงวิจัยที่มีชื่อว่า Bernese GNSS เวอร์ชัน 5.2 แบบอัตโนมัติ เพื่อสำหรับหาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศจากสถานี CORS ของ สสนก. แบบอัตโนมัติ เพื่อช่วยในการติดตามและคาดการณ์การฝนตกในพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล

1. การหาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศจากระบบดาวเทียม GNSS

ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในข้อมูลระบบดาวเทียม GNSS จะมีส่วนประกอบอยู่ 2 ส่วนหลักๆ ได้แก่ ส่วนแห้งที่เกิดจากก๊าซต่างๆ ในบรรยากาศ (Dry part) และส่วนเปียก (Wet part) ที่เกิดจากปริมาณไอน้ำในอากาศ ค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นส่วนแห้ง สามารถคำนวณหาได้หากเราทราบค่าความกดอากาศพื้นผิว (air surface pressure, Ps) ณ ตำแหน่งที่ตั้งสถานี ได้จากสมการ (Bevis, 1992)

$$ZHD = \frac{2.2768 \times Ps}{1 - 0.00266 \cos(2\phi) - 0.00000028H} \quad (1)$$

จากสมการที่ 1

Ps = ค่าความกดอากาศพื้นผิว ในหน่วย มิลลิบาร์

ϕ = ละติจูดที่สถานีรับวัดดาวเทียม ในหน่วย เรเดียน

H = ความสูงเหนือระดับทะเลปานกลาง (MSL) ในหน่วย เมตร

จะได้ค่า ZHD (Zenith Hydrostatic Delay) ในหน่วย มิลลิเมตร

และใน Wet Part เกิดจากปริมาณไอน้ำที่มีอยู่ในบรรยากาศ ซึ่งสามารถคำนวณได้ จากสมการ (Bevis et al. 1992)

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2)$$

จะได้ค่า ZWD (Zenith Wet Delay) ในหน่วย มิลลิเมตร

ค่า ZWD ที่ได้สามารถนำไปคำนวณหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศได้จากความสัมพันธ์จากสมการ

$$PWV = ZWD * \Pi \quad (3)$$

จะได้ค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศ ในหน่วย มิลลิเมตร

โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ Π สามารถประมาณค่าได้จากสมการ (Bevis et al. 1992)

$$\Pi = \frac{10^6}{\rho_w \times R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)} \quad (4)$$

โดยที่ ρ_w = ความหนาแน่นของน้ำในสถานะของเหลว (999.97 กก/ลบ.ม.)

R_v = ค่าคงที่ของไอน้ำ (461.525 จูล/กก.*เคลวิน)

k'_2 = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (22.1 เคลวิน/มิลลิบาร์)

k_3 = ค่าคงที่ของการหักเหในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (3,739 เคลวิน²/มิลลิบาร์)

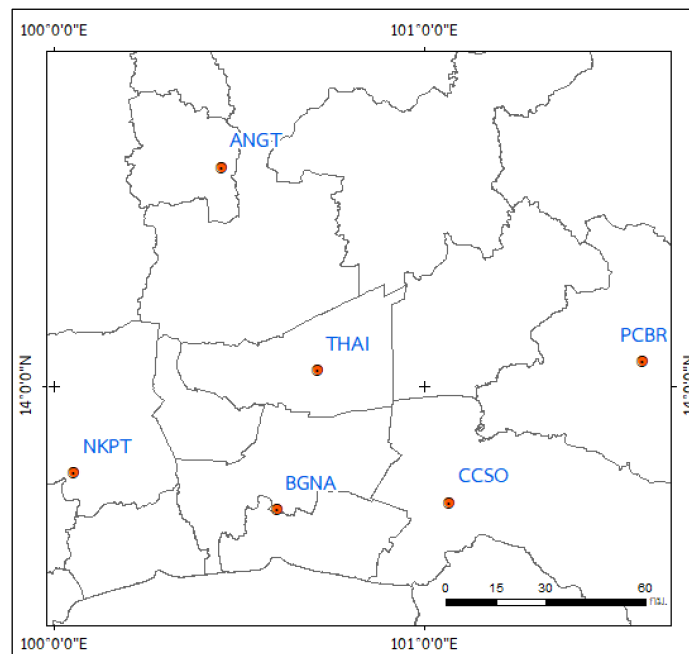
T_m = ค่าอุณหภูมิเฉลี่ยของชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ (เคลวิน)

ในการประมวลผลหาค่า T_m ณ เวลาใดๆ เป็นการยากที่จะวัดค่าที่ถูกต้อง อีกทั้งจำเป็นต้องใช้เวลาในการประมวลผล อีกทางเลือกหนึ่งคือการประมาณค่าโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งอยู่ในรูปของความสัมพันธ์เชิงเส้นกับข้อมูลอุณหภูมิพื้นผิว ณ ตำแหน่งที่ตั้งของสถานี มีหลากหลายแบบจำลองที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อประมาณค่า T_m ในพื้นที่ต่างๆ ทั่วโลก ซึ่งในการศึกษาวิจัยนี้ แบบจำลองการประมาณค่าอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่นสำหรับประเทศไทย จากการศึกษาวิจัยของ Suwantong et al. (2016) ถูกนำมาใช้เพื่อประมาณค่า T_m ดังสมการที่ (5)

$$T_m = 0.6066 * T_s + 113.291 \quad (5)$$

ข้อมูลที่ใช้และการประมวลผลในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการใช้การประมวลผลอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นทำการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในบรรยากาศจากสถานี CORS ของ สสนก. เป็นเวลา 3 เดือน ซึ่งมีจำนวน 6 สถานีครอบคลุมพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล และสถานี IGS จากประเทศฟิลิปปินส์ เพื่อใช้เป็นสถานีอ้างอิงค่าพิกัดระบบพิกัด ITRF2014 ซึ่งข้อมูลจากสถานี CORS จะอยู่ในรูปแบบมาตรฐานของ Receiver Independent Exchange (RINEX) เวอร์ชัน 2.11 (Gurtner & Estey, 2001) โดยมีลักษณะเป็นรายวัน (Daily file) โดยมีความถี่ในการเก็บข้อมูลที่ 15 วินาที โดยระบบประมวลผลอัตโนมัติจะใช้ข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและค่าแก้ทางพิกัดดาวเทียมความละเอียดสูงจาก International GNSS Service (IGS) (Dow, Neilan, & Rizos, 2009) โดยจะใช้เทคนิคค่าต่างครั้งที่สอง (Double-Differencing technique) โดยจะทำการประมาณค่าพิกัดสถานีทั้ง 3 แกนโดยอยู่บนระบบพิกัด ITRF2014 และทำการประมาณค่าคลาดเคลื่อนชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ และจะทำการแยกค่าคลาดเคลื่อนส่วนแห้ง โดยใช้สมการที่ (1) และทำการนำส่วนเปียก มาทำการหาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศด้วยสมการที่ 3, 4, 5 และ 6 จากนั้นระบบจะนำค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ ที่ได้จากระบบการประมวลผลมาพล็อตเป็นแผนที่เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของค่าปริมาณไอน้ำในอากาศ



รูปที่ 1 แสดงขอบเขตพื้นที่ศึกษาบริเวณพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล และตำแหน่งที่ตั้งสถานี GNSS ที่ใช้ในการศึกษาวิจัย

ผลลัพธ์

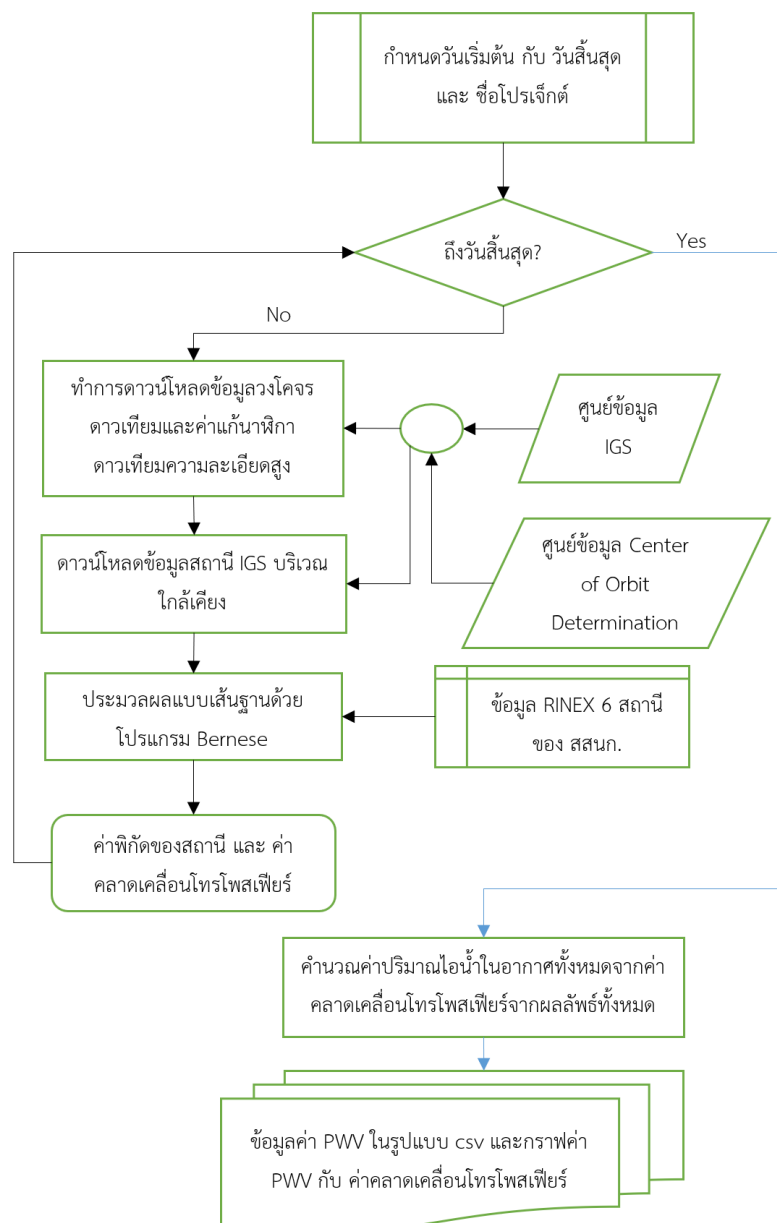
1.1. การประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าปริมาณไอน้ำในอากาศแบบอัตโนมัติ

จากการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบอัตโนมัติ ผลการพัฒนาสามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของระบบได้ดังรูปที่ 2 เริ่มต้นจากการกำหนดวันเริ่ม และสิ้นสุดการประมวลผล จากนั้นโปรแกรมจะประมวลผลข้อมูลแบบรายวัน ในขั้นตอนการประมวลผลเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความละเอียดถูกต้องสูง จำเป็นต้องขจัดค่าคลาดเคลื่อนหลายชนิด เช่น ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากวงโคจรดาวเทียม (Orbit Errors), นาฬิกาดาวเทียม (Satellite Clocks), ค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศ (Atmospheric Delay), แรงมหาสมุทร (Ocean Tide Loading), การแกว่งตัวของขั้วโลก (Polar Motion) และการหมุนของแกนส่งสัญญาณของดาวเทียม GNSS (Phase Wind-up) เป็นต้น ซึ่งจำเป็นต้องจัดเตรียมไฟล์ต่างๆ ไว้ให้พร้อมก่อนการประมวลผล ในการนี้จึงได้พัฒนาสคริปต์เพื่อดาวน์โหลดข้อมูลที่จำเป็นในการประมวลประกอบไปด้วยข้อมูลวงโคจรและค่าแก้ทางพิกัดดาวเทียมความละเอียดสูง และข้อมูลรังวัด (Observation Data) จากสถานี PIMO ที่อยู่ในโครงข่าย IGS เพื่อสร้างเส้นฐานระยะยาว (มากกว่า 500 กิโลเมตร) ในขั้นตอนการประมวลผล จากนั้นโปรแกรมจะประมวลผลข้อมูล GNSS ในรูปแบบ RINEX เวอร์ชัน 2 ทั้ง 6 สถานีของ

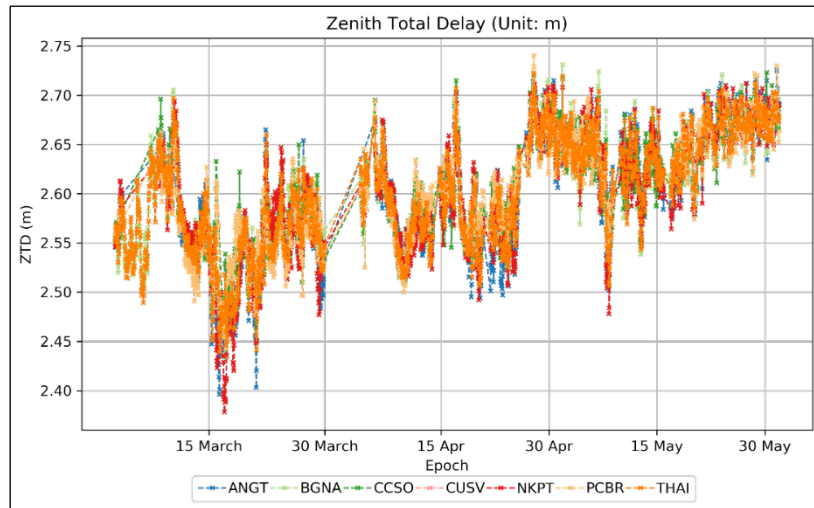
สนก. ร่วมกับสถานี PIMO แล้วประมวลผลข้อมูลแบบเส้นฐานด้วยโปรแกรม Bernese ที่ได้รับรวมขั้นตอนการประมวลผลต่าง ๆ ไว้ในรูปแบบภาษาสคริปต์ ผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลคือค่าพิคตของสถานี และค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์แบบรายชั่วโมงในรูปแบบแท็กไฟล์ (Text File) และกราฟ

1.2. ผลการประมวลผลข้อมูล GNSS เพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

ผลการประมวลผลข้อมูล GNSS จากสถานี CORS ทั้ง 6 สถานีของ สนก. ด้วยระบบประมวลผลข้อมูล GNSS แบบอัตโนมัติ ด้วยวิธีการประมวลผลแบบเส้นฐานร่วมกับข้อมูลวงโคจรและค่าแก้ทางพิกาตดาวเทียมความละเอียดสูง พบว่าค่าคลาดเคลื่อนที่มีผลกระทบต่อคลื่นสัญญาณ GNSS ที่เกิดชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ในช่วงเดือนมีนาคม ถึง เดือนพฤษภาคม 2561 มีค่าอยู่ระหว่าง 2.35 – 2.75 เมตร ความละเอียดจากการประมวลผลข้อมูลมีค่าเฉลี่ยของส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานอยู่ที่ ± 4 มิลลิเมตร โดยหลังจากช่วงกลางเดือนมีนาคม จนถึงปลายเดือนพฤษภาคม พบว่าค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง



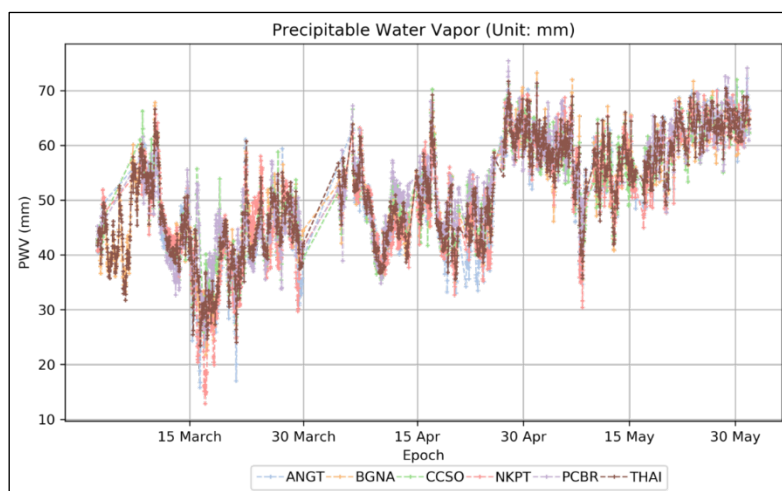
รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบอัตโนมัติ



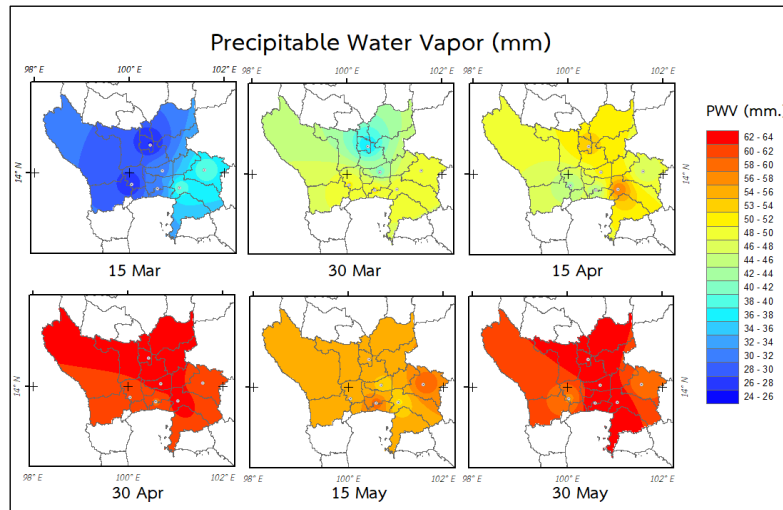
รูปที่ 3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าคลาดเคลื่อนรวมทางตั้งที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ที่มีผลกระทบต่อระยะทางที่วัดได้จากคลื่นสัญญาณไมโครเวฟจากระบบดาวเทียม GNSS เมื่อคลื่นสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์

1.3. ผลลัพธ์การประมาณค่าปริมาณไอน้ำในอากาศจากระบบประมวลผลข้อมูล GNSS แบบอัตโนมัติ

ผลลัพธ์ที่ได้จากการแปลงค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นปริมาณไอน้ำในอากาศ ร่วมกับข้อมูลแบบจำลองอุณหภูมิเฉลี่ยท้องถิ่น จะเห็นได้ว่ารูปแบบการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในอากาศมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าคลาดเคลื่อนในชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่าไอน้ำในอากาศ ทั้งนี้จากประมวลผลเพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในอากาศช่วงเดือนมีนาคม ถึง เดือนพฤษภาคม มีค่าอยู่ระหว่าง 15 มิลลิเมตรถึง 75 มิลลิเมตร โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังกลางเดือนมีนาคม ซึ่งในช่วงนี้ของทุกปีจะเป็นช่วงของการปรับเปลี่ยนจากมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ (Northeast Monsoon) เป็นมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ (Southwest Monsoon) โดยเฉพาะเดือนเมษายนบริเวณประเทศไทย ดวงอาทิตย์จะอยู่เกือบตรงศีรษะในช่วงเที่ยงวัน ส่งผลให้สภาพอากาศร้อนอบอ้าวและแห้งแล้ง แต่บางครั้งอาจได้รับมวลอากาศเย็นจากประเทศจีน ทำให้เกิดการปะทะกันของมวลอากาศเย็นและร้อน ทำให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนองและลมกระโชกแรง



รูปที่ 4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำอากาศในช่วงเดือนมีนาคม ถึง พฤษภาคม 2561



รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าปริมาณไอน้ำในอากาศในช่วงเดือนมีนาคม ถึง เดือนพฤษภาคม 2561 ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร เขตปริมณฑลและจังหวัดใกล้เคียง

วิจารณ์และสรุปผลงานวิจัย

จากการพัฒนาการประมวลผลข้อมูล GNSS แบบอัตโนมัติด้วยโปรแกรม Bernese เพื่อประมาณค่าปริมาณไอน้ำในอากาศแบบรายชั่วโมง ด้วยเทคนิคการประมวลผลแบบเส้นฐานร่วมกับข้อมูลวงโคจรและค่าแก้ทางพิคาตาวเทียมความละเอียดสูงจาก IGS พบว่าค่าคลาดเคลื่อนเนื่องจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ช่วงเดือนมีนาคม ถึง เดือนพฤษภาคมอยู่ค่าระหว่าง 2.35-2.75 เมตร โดยมีค่าความละเอียดในการประมวลผลโดยเฉลี่ยอยู่ที่ ± 4 มิลลิเมตร โดยที่ค่าคลาดเคลื่อนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังกลางเดือนมีนาคม ผลลัพธ์การแปลงค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์เป็นปริมาณไอน้ำในอากาศได้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในอากาศในช่วง 3 เดือนซึ่งมีรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับค่าคลาดเคลื่อนรวมทางดิ่งที่เกิดจากชั้นบรรยากาศโทรโพสเฟียร์ ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของไอน้ำในอากาศโดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องหลังกลางเดือนมีนาคม จาก 30 มิลลิเมตรไปเป็น 60 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับการปรับเปลี่ยนฤดูกาลเข้าสู่ช่วงฤดูร้อนซึ่งได้รับอิทธิพลจากมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ โดยจะทำให้อุณหภูมิของอากาศจะเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะมีผลทำให้ในอากาศมีปริมาณไอน้ำเพิ่มมากขึ้น โดยลักษณะสภาพอากาศในช่วงนี้จะร้อนอบอ้าวโดยทั่วไป บางครั้งเกิดการปะทะกันของมวลอากาศเย็นกับมวลอากาศร้อน ซึ่งอาจก่อให้เกิดพายุฝนฟ้าคะนอง และฝนตกหนักได้ในช่วงนี้ จากผลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการพัฒนาระบบอัตโนมัติเพื่อประมวลผลข้อมูล GNSS สามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของปริมาณไอน้ำในอากาศได้เป็นอย่างดี สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการพยากรณ์อากาศสำหรับงานทางด้านอุตุนิยมวิทยาในอนาคต และเพื่อให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วได้อย่างต่อเนื่อง การเพิ่มความละเอียดของช่วงเวลาในการประมวลผล (Temporal Resolution) จากรายชั่วโมง เป็นรายครึ่งชั่วโมงจนถึงทุกๆ 15 นาที จำเป็นจะต้องทำการศึกษาในลำดับต่อไป

บรรณานุกรม

- Bevis, M., Businger, S., Herring, T. A., Rocken, C., Anthes, R. A., & Ware, R. H. (1992). GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 97, 15.
- Cao, Y., Liao, R., & Uradzinski, M. (2016). Analysis of water vapor characteristics of regional rainfall around Poyang Lake using ground-based GPS observations. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 51, 467-479.
- Dow, J. M., Neilan, R. E., & Rizos, C. (2009). The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *Journal of Geodesy*, 83(3), 191-198.

- Gurtner, W., & Estey, L. (2001). RINEX: The Receiver Independent Exchange Format Version 2.11. 2005. Selex, Thales and AT-One for the SESAR Joint Undertaking within the frame of the SESAR Programme co-financed by the EU
- Kouba, J. (2015). A Guide to Using the IGS Products. International GNSS Service (IGS). Retrieved from <http://kb.igs.org/hc/en-us/articles/201271873>
- Rocken, C., Hove, T. V., Johnson, J., Solheim, F., Ware, R., Bevis, M., Chiswell, S., & Businger, S. (1995). GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 12(3), 468-478.
- Sato, K., Realini, E., Tsuda, T., Oigawa, M., Iwaki, Y., Shoji, Y., & Seko, H. (2013). A high-resolution, precipitable water vapor monitoring system using a dense network of GNSS receivers.
- Suwantong, R., Satirapod, C., Srestasathien, P., & Kitpracha, C. (2016). Deriving the Mean Tropospheric Temperature Model using AIRS and AMSU for GNSS Precipitable Water Vapour Estimation. ION GNSS+ 2016, Sept. 12-16, Portland, Oregon.
- Wang, H., He, J., Wei, M., & Zhang, Z. (2015). Synthesis Analysis of One Severe Convection Precipitation Event in Jiangsu Using Ground-Based GPS Technology. *Atmosphere*.
- Yao, Y., Shan, L., & Zhao, Q. (2017). Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application. *Scientific Reports*, 7, 12465.