

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื้อหาในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงหลักการและงานวิจัยต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับงานวิจัยชิ้นนี้ โดยผู้วิจัยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือหลักการพื้นฐานสำหรับการคำนวณความต้องการใช้น้ำของพืช ซึ่งรวมรายละเอียดเกี่ยวกับการคำนวณโดยตรงและการประมาณค่าจากแหล่งข้อมูลอื่น ๆ สำหรับเนื้อหาส่วนหลังจะเกี่ยวกับการประยุกต์และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดของหัวข้อต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### 2.1 ความต้องการน้ำของพืช

##### 2.1.1 แบบจำลองการเติบโตพืช

แบบจำลองการเติบโตพืช (crop model / crop growth model) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เพื่อพยากรณ์การเติบโตของพืช โดยปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชคือน้ำ ซึ่งพืชจำเป็นต้องใช้น้ำในขั้นตอนต่าง ๆ อยู่ตลอดเวลา และเนื่องจากพืชแต่ละชนิดมีความต้องการใช้น้ำแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ดังนั้นการคำนวณหรือการประมาณค่าเพื่อหาว่าพืชแต่ละชนิดต้องการน้ำใช้น้ำเท่าใดจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจอย่างต่อเนื่อง ซึ่ง Allen, Pereira, Raes and Smith (1998) ได้สรุปว่าความต้องการน้ำของพืช (crop water requirement) หมายถึงปริมาณของน้ำที่จำเป็นต้องให้กับพืชในขณะที่การคายระเหยของพืชนั้นเป็นปริมาณน้ำที่สูญเสียไประหว่างกระบวนการการคายระเหย ซึ่ง Allen, Pereira, Raes and Smith (1998) และ Allen et al. (2006) ได้รวบรวมและสรุปข้อมูลเกี่ยวกับการคายระเหย (evapotranspiration) ว่าการคายระเหยนี้เป็นกระบวนการสูญเสียน้ำของพืชที่เกิดจากกระบวนการหลัก 2 อย่างที่เกิดขึ้นพร้อมกัน แต่จะแยกออกจากกันไม่ได้

กระบวนการแรกคือการระเหย (evaporation) จากดินหรือแหล่งอื่นที่อยู่บริเวณรอบต้นพืช เป็นการเปลี่ยนสถานะของน้ำจากของเหลวเป็นไอน้ำและเคลื่อนออกมาจากพื้นผิวพืช กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ต้องใช้พลังงานซึ่งมักจะสัมพันธ์กับการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ (solar radiation) และอุณหภูมิอากาศแวดล้อม

สำหรับกระบวนการที่สองคือการสูญเสียน้ำโดยพืช เป็นกระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำภายในพืช เกิดขึ้นจากการที่พืชนำน้ำเข้าไปใช้ภายใน และมีบางส่วนที่ผ่านออกมาสู่บรรยากาศภายนอก เรียกว่ากระบวนการนี้ว่าการคายน้ำ (transpiration) ซึ่งการคายน้ำนี้มีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของน้ำภายในพืชอีกด้วย อย่างไรก็ตามพืชไม่ได้นำน้ำส่วนใหญ่ที่นำเข้ามาไปใช้ทั้งหมด มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ถูกนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต น้ำส่วนใหญ่เกือบ 99% จะสูญหายไปจากกระบวนการคายน้ำอยู่ในสภาพของไอน้ำและในบางกรณีอาจจะอยู่ในสภาพของหยดน้ำเรียกว่ากัตเตชัน (guttation) สำหรับปริมาณการใช้น้ำ (consumptive use) หรือการคายระเหยน้ำของพืช (crop evapotranspiration : ET) เป็นปริมาณน้ำของพืชชนิดใดชนิดหนึ่ง ซึ่งค่าที่รวมปริมาณน้ำที่สูญเสียจากองค์ประกอบต่าง ๆ ไว้แล้ว นิยมบอกค่านี้ในรูปแบบความลึกต่อหน่วยเวลา เช่น

มิลลิเมตรต่อวัน หรือในบางกรณีอาจจะบอกในรูปของปริมาตรต่อพื้นที่ต่อวัน เช่น ลูกบาศก์เมตรต่อตารางเมตรต่อวัน เป็นต้น

การใช้น้ำของพืชอ้างอิง (Reference crop evapotranspiration : ETO) เป็นอัตราการคายระเหย (rate) ที่วัดจากพื้นผิวของพืชอ้างอิง ไม่ขาดน้ำ ซึ่งพืชที่นิยมใช้เป็นพืชอ้างอิงนั้นมักจะมีคุณสมบัติสำคัญคือเจริญเติบโตง่ายและไม่มีการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้น้ำตลอดช่วงอายุ ตัวอย่างของพืชกลุ่มนี้ได้แก่ หญ้า และ อัลฟัลฟา เป็นต้น และดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าพืชแต่ละชนิดมีการคายระเหยแตกต่างกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องนำค่าการใช้น้ำของพืชอ้างอิงมาปรับปรุงเพื่อให้เหมาะสมกับพืชแต่ละแบบ โดยปรับการใช้น้ำของพืชอ้างอิงด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก เรียกว่าสัมประสิทธิ์พืช (crop coefficient : Kc) และเรียกค่าที่ถ่วงน้ำหนักแล้วว่าการใช้น้ำของพืชได้เงื่อนไขมาตรฐาน (Crop evapotranspiration under standard conditions : ETC)

### 2.1.2 การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์พืช

การคำนวณสัมประสิทธิ์พืชนั้นต้องการปัจจัยหลายค่า เช่น ชนิดพืช, อัลบีโด (albedo), สภาพอากาศ, และการระเหยของดิน นอกจากนั้นแล้วพืชแต่ละช่วงก็จะมีค่าสัมประสิทธิ์พืชไม่เท่ากันอีกด้วยโดยมีระยะที่สำคัญคือ ช่วงเริ่มต้น (initial stage), ช่วงเจริญเติบโต (crop development stage), ช่วงกลาง (mid season stage) และ ช่วงปลาย (late season stage) ผลที่ได้คือค่าสัมประสิทธิ์พืชจะเป็นเลขทศนิยมมีค่าระหว่าง 1 ถึง 9 มิลลิเมตรต่อวัน อย่างไรก็ตามผู้ที่นำค่าสัมประสิทธิ์พืชไปใช้ควรระวังและตรวจสอบให้แน่ใจ เพราะค่านี้มีความแตกต่างกันตามชนิดของพืช, ช่วงเวลาและเทคนิคที่ใช้ในการคำนวณ ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์พืชเฉลี่ยจากการทดลอง จากตารางจะเห็นว่าการคำนวณ ด้วยวิธีที่แตกต่างกันให้ค่าที่แตกต่างกัน เช่น ข้าว มีค่าสัมประสิทธิ์พืชเฉลี่ยตลอดการปลูก 117 วันที่ได้จากวิธี Modified Penman, Blaney-Criddle และ Pan method เท่ากับ 1.37, 0.98 และ 1.49 ตามลำดับ

**ตารางที่ 2.1** ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์พืชเฉลี่ยจากการทดลอง

ที่มา: กรมชลประทาน, 2554, pp.12

วิธีคำนวณ	สัมประสิทธิ์พืชเฉลี่ยตลอดอายุพืช		
	ข้าว (117 วัน)	งาดำ (89 วัน)	มะระ (74 วัน)
Modified Penman	1.37	0.84	1.03
Blaney-Criddle	0.98	0.64	1.21
Pan method	1.49	0.89	1.08

อย่างไรก็ตามมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการคายระเหยของพืช เช่น สภาพอากาศ, พืช และสภาพแวดล้อมหรือวิธีการจัดการการเพาะปลูก ในกรณีของสภาพอากาศจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการแผ่รังสี (radiation), อุณหภูมิและความชื้นอากาศ รวมถึงความเร็วลมด้วย อีกปัจจัยหนึ่งคือปัจจัยเกี่ยวกับพืช เช่น ชนิด และสายพันธุ์ ซึ่งพืชแต่ละชนิดจะมีการคายระเหยแตกต่างกันรวมทั้งยังมี

การคายระเหยที่แตกต่างกันในแต่ละช่วงเวลาของวงจรชีวิตอีกด้วย ประการสุดท้ายคือเรื่องของสภาพแวดล้อมของการเพาะปลูก เช่น ความเค็มของดิน, ปุ๋ย และ แมลงต่าง ๆ รวมไปถึงลักษณะการปกคลุมผิวดินและความหนาแน่นของการเพาะปลูกด้วย

### 2.1.3 การคำนวณการใช้น้ำด้วยการตรวจวัด

กรมชลประทาน (2554) ได้สรุปเทคนิคการตรวจวัดเพื่อหาค่าปริมาณการใช้น้ำของพืชด้วยเทคนิคแบบต่าง ๆ ที่นิยมใช้ ดังนี้

#### 1) ถังวัดการใช้น้ำของพืช

ซึ่งเป็นถังหรือกระถางที่มีการปลูกพืชที่ต้องการ ติดตั้งอยู่ท่ามกลางสภาพแวดล้อมธรรมชาติที่ใกล้เคียงกับการเพาะปลูกจริง มีอุปกรณ์สำหรับการวัดปริมาณน้ำที่สูญหายไป โดยมีถังวัดการใช้น้ำของพืชอยู่ 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นถังวัดการใช้น้ำแบบวัดความลึกของน้ำหรือวัดปริมาตรของน้ำที่สูญหายไปเพื่อนำมาใช้เปรียบเทียบกับน้ำที่เหลืออยู่ในระบบ ตัวอย่างของถังวัดการใช้น้ำในกลุ่มนี้ได้แก่ ถังวัดการใช้น้ำแบบระบายน้ำ, ถังวัดการใช้น้ำแบบน้ำใต้ดินคงที่และถังวัดการใช้น้ำของข้าว เป็นต้น สำหรับถังวัดอีกกลุ่มหนึ่งคือถังวัดการใช้น้ำแบบวัดน้ำหนัก ซึ่งจะใช้เทคนิคการสังเกตน้ำหนักโดยตรงหรืออาจจะได้จากค่าอื่นที่เกี่ยวข้องกับน้ำหนัก เช่น ความดันหรือความเค็ม เป็นต้น ตัวอย่างถังในกลุ่มนี้ได้แก่ ถังวัดการใช้น้ำแบบวัดด้วยเครื่องชั่งและถังวัดการใช้น้ำแบบทุ่นลอย เป็นต้น

#### 2) ความชื้นในดิน

เทคนิคนี้จะตรวจวัดหาค่าความชื้นในดิน เหมาะสำหรับการคำนวณกับดินที่มีเนื้อดินสม่ำเสมอ มีระดับน้ำใต้ผิวดินต่ำกว่าผิวดินมาก ซึ่งเทคนิคนี้จะต้องวัดความชื้นทั้งก่อนและหลังการให้น้ำทุกครั้ง

#### 3) แปลงทดลอง

ในกรณีนี้จะเป็นการศึกษาจากแปลงทดลองโดยตรง โดยอาศัยแนวคิดที่ว่าพืชจะให้ผลผลิตมากขึ้นถ้ามีปริมาณน้ำมากขึ้น ดังนั้นการวัดการใช้น้ำแบบนี้จะทำกับแปลงทดลองที่มีระดับน้ำใต้ดินต่ำกว่าผิวดินมากเพื่อให้แน่ใจว่าพืชจะไม่สามารถนำน้ำใต้ดินมาใช้ได้โดยตรง วิธีการทดลองทำได้ด้วยการให้น้ำกับพืชในปริมาณที่ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่พืชให้ผลผลิตลดลง จึงกำหนดใช้ปริมาณน้ำค่านั้นเป็นค่าความต้องการใช้น้ำของพืช

### 2.1.4 การคำนวณโดยใช้ข้อมูลภูมิอากาศ

นอกจากการวัดโดยตรงแล้วเรายังสามารถประมาณค่าความต้องการใช้น้ำของพืชได้ด้วยการใช้ข้อมูลภูมิอากาศ โดยกรมชลประทาน (2554) ได้สรุปปัจจัยที่สามารถนำมาคำนวณได้เป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรกคือข้อมูลภูมิประเทศ ข้อมูลกลุ่มนี้เป็นข้อมูลกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งที่ตั้งของพื้นที่เพาะปลูก โดยพารามิเตอร์ที่นิยมใช้ได้แก่พิกัดทางภูมิศาสตร์ เช่น ละติจูดและลองจิจูด รวมถึงความสูงของพื้นผิวภูมิประเทศจากระดับน้ำทะเลปานกลาง (mean sea level : MSL) ด้วย สำหรับกลุ่มที่สองคือข้อมูลภูมิอากาศหรือข้อมูลอุตุนิยมวิทยา ซึ่งมักจะเป็นข้อมูลเฉลี่ยรายวัน, รายสัปดาห์หรือรายเดือน แล้วแต่ความต้องการของพืช โดยพารามิเตอร์ที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ อุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, ความเร็วลมที่ระดับความสูง 2.00 เมตรเหนือผิวดิน, ชั่วโมงหรือความยาวนานแสงแดด, การระเหยของน้ำจากอ่างวัดการระเหย, และ ความครึ้มของเมฆ เป็นต้น

เทคนิคพื้นฐานสำหรับการคำนวณความต้องการน้ำของพืชนั้นอ้างอิงจาก FAO ซึ่งเป็นเทคนิคที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย โดยมีเทคนิคที่สำคัญและเป็นที่ใช้แพร่หลายอยู่ 7 เทคนิค ประกอบด้วย Modified Penman (FAO, 1992, pp.15-28), Blaney-Criddle (FAO, 1992, pp.15-28), Pan (FAO, 1992, pp.15-28), Thornthwaite (FAO, 1992, pp.15-28), Hargreaves (FAO, 1992, pp.15-28), Radiation (FAO, 1992, pp.15-28) และ Penman-Monteith (FAO, 1992, pp.15-28) ซึ่งกรมชลประทาน (2554, pp.21) ได้สรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในแต่ละเทคนิคไว้ดังแสดงในตารางที่ 2.2 โดยสำหรับในประเทศไทยนั้นพบว่า การคำนวณความต้องการใช้น้ำของพืชด้วยวิธี Penman และวิธีที่อ้างอิงจากเทคนิค Penman นั้นมีผลการประมาณค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการสังเกตมากกว่าเทคนิคอื่น ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากเทคนิคของ Penman นั้นใช้ปัจจัยต่าง ๆ ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชไว้อย่างรอบด้าน (กรมชลประทาน, 2554, pp.1) ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สรุปพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงวิธีต่าง ๆ  
ที่มา: กรมชลประทาน, 2554, pp.21

ชื่อ	พิกัดภูมิศาสตร์		ค่าระเหย	Uday	W2	Hsun	อุณหภูมิของอากาศ			ความชื้นสัมพัทธ์		
	XY	Z					min	max	mean	min	max	mean
MP	•	•			•	•	•	•	•			•
BC	•	•		•	•	•			•		•	
P			•									
T									•			•
H	•	•					•	•	•			
R	•	•		•	•	•			•			•
PM	•	•			•	•	•	•	•			•

หมายเหตุ: MP=Modified Penman, BC=Blaney-Criddle, P=Pan, T=Thornthwaite, H=Hargreaves, R=Radiation และ PM=Penman-Monteith

ยกตัวอย่างเช่นเทคนิคของ Penman-Monteith ซึ่งเป็นวิธีคำนวณ ETO โดยมีข้อมูลนำเข้าหลายค่า เช่น พิกัดทางภูมิศาสตร์, อุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, ความเร็วลมผิวดินหรือความเร็วลมที่ระดับความสูง 2.00 เมตรเหนือผิวดิน และจำนวนชั่วโมงแสงแดดเฉลี่ย โดยข้อมูลการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่สุดที่ใช้ในการแปลงน้ำจากสภาพของเหลวให้เป็นไอน้ำ ซึ่งปริมาณการแผ่รังสีนั้นจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งและเวลาในแต่ละปี นอกจากนั้นแล้วยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศซึ่งจะทำให้รังสีจากดวงอาทิตย์สะท้อนหรือรับพลังงานมาสะสมไว้ สำหรับรังสีจากดวงอาทิตย์ที่สะสมอยู่ในชั้นบรรยากาศจะทำให้อุณหภูมิอากาศสูงขึ้น ในกรณีของความชื้นของอากาศนั้นพบว่าหากอากาศมีความชื้นน้อยก็จะทำให้มีการดึงความชื้นจากดินออกไปมาก ในทางตรงกันข้ามหากอากาศมีความชื้นมากอยู่แล้วก็จะทำให้ไม่จำเป็นต้องดึงน้ำไปสะสมในอากาศมากนัก อีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่า ET คือความเร็วลมที่พัดเหนือพื้นผิวดิน เนื่องจากเมื่อน้ำที่ระเหยกลายเป็นไอ ไอน้ำจะสะสมตัวอยู่เหนือผิวดินบริเวณนั้น

หากไม่มีการถ่ายเทอากาศนั้นแล้ว ไอน้ำในอากาศก็จะอิ่มตัวและทำให้อัตราการระเหยลดลงไปเนื่องจากไอน้ำเต็มแล้ว

### 2.1.5 ประเทศไทย

ในรายงานของกรมชลประทาน (2554) ได้แสดงตัวอย่างการทดลองเพื่อคำนวณ ET ไร่สายชนิด การทดลองแรกคือการทดลองคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิงและค่าสัมประสิทธิ์ของหญ้าแฝก สายพันธุ์ราชบุรี โดยทำการทดลองที่สถานีค้นคว้าวิจัยการใช้น้ำชลประทานสามชุก จังหวัดสุพรรณบุรี ซึ่งมีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 8.6 เมตร ดำเนินการทดลองตั้งแต่ 1 มกราคม 2537 ถึง 31 ธันวาคม 2537 โดยใช้เทคนิคการวัดความต้องการใช้น้ำจากถังวัดน้ำ ร่วมกับการใช้อุตุนิยมิวิทยาในช่วงเวลาดังกล่าวมาคำนวณ โดยข้อมูลที่ใช้ประกอบด้วยอุณหภูมิของอากาศ, ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ, ความเร็วลมผิวดิน, จำนวนชั่วโมงแสงแดด และค่าการระเหยของน้ำจากอ่างวัดการระเหยแบบ Class-A Pan ซึ่งในการทดลองนั้นได้คำนวณโดยใช้เทคนิคต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาในตารางที่ 2.2 ทั้ง 7 วิธี โดยผลการคำนวณการใช้น้ำของหญ้าแฝกพบว่ามีค่าระเหย 6.17 มิลลิเมตรต่อวัน มีปริมาณการใช้น้ำเฉลี่ยตลอดการทดลองประมาณ 554 มิลลิเมตร หรือประมาณ 4.8 มิลลิเมตรต่อวัน และคำนวณค่าสปสได้เท่ากับ 0.79

การทดลองอีกส่วนหนึ่งคือการทดลองการประมาณการใช้น้ำของข้าวซึ่งทำด้วยแนวทางที่คล้ายกัน โดยใช้ถังวัดน้ำขนาดประมาณ 1 ลูกบาศก์เมตรที่ปลูกพืช 4 ชุด มีรูปแบบการเปิดกันถึงต่าง ๆ กัน จำลองสภาพแวดล้อมการปลูกให้ใกล้เคียงกับการเพาะปลูกในแปลงนาจริง หลังจากนั้นได้มีการให้น้ำและวัดปริมาณน้ำจนถึงระดับ 10 เซนติเมตรจากผิวดิน แล้ววัดการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในแต่ละวันด้วยเครื่องมือวัดระดับน้ำแบบขอ (hook gauge) โดยมีการเติมน้ำเข้าไปในถังหลังจากวัดข้อมูลทุกครั้งอย่างสม่ำเสมอเพื่อรักษาระดับน้ำให้เท่าเดิมตลอดเวลา สำหรับตัวอย่างการทดลองส่วนที่สามนั้นเป็นการคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำของพืชไร่ โดยใช้ถังวัดน้ำเช่นเดียวกัน ในกรณีนี้ใช้ถังที่มีขนาดใหญ่กว่าในกรณีของข้าวเล็กน้อยและมีถังอีกหนึ่งชุดวางไว้ใต้ถังหลักเพื่อรองรับน้ำที่เกินจากความสามารถในการอุ้มน้ำของดินที่ใช้ในการทดลอง

กรมชลประทาน (2554) ได้เผยแพร่ข้อมูลที่สำคัญกับการคำนวณการใช้น้ำของพืชหลายฉบับ เช่น การคำนวณปริมาณการใช้น้ำของพืชอ้างอิง ETO โดยใช้ข้อมูลอุตุนิยมิวิทยาจากกรมอุตุนิยมิวิทยาจากสถานีตรวจอากาศจำนวน 120 สถานีครอบคลุมพื้นที่ 64 จังหวัด เป็นข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2524 ถึง พ.ศ. 2553 รวมระยะเวลา 30 ปีมาคำนวณหาปริมาณการใช้น้ำด้วยวิธี Penman-Monteith นอกจากนี้แล้ว กรมชลประทานยังได้เผยแพร่ข้อมูลการใช้น้ำของพืช จำแนกตามรายภาคบริการประชาชนทั่วไปอีกด้วย นอกจากรายงานที่กล่าวมาแล้ว กรมชลประทาน (2554) ยังได้เผยแพร่ค่าสัมประสิทธิ์พืชของพืชชนิดต่าง ๆ ที่ปลูกในประเทศไทย จำนวน 40 ชนิด โดยได้คำนวณด้วยวิธีที่กล่าวในหัวข้อที่ผ่านมาทั้ง 7 วิธี พร้อมกับแยกสรุปข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์พืชเป็นรายสัปดาห์และรายเดือนให้เหมาะสมกับการความต้องการของพืช

### 2.1.6 การประมาณค่า ETO

เราอาจจะประมาณค่า ETO ได้จากความชื้นสัมพัทธ์ ยกตัวอย่างเช่นงานวิจัยของ Shah and Das (2012, pp228-229) ซึ่งได้ศึกษาการประมาณค่า ETO โดยใช้เทคนิคของ Modified Penman และ Penman-Moneith เปรียบเทียบกับความชื้นสัมพัทธ์ของดินที่เซ็นเซอร์วัดค่าได้

พบว่าอัตราการลดลงของ ET นั้นสอดคล้องกับการลดลงของค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่วัดได้ที่ความลึก 30 เซนติเมตรจากผิวดินโดยมีความสัมพันธ์เท่ากับ

$$Y = 0.01X^2 - 0.38X + 8.24 \quad (2.1)$$

เมื่อ  $X$ =ความชื้นสัมพัทธ์ของดินและ  $Y$ =ค่า ET ที่วัดได้จริง โดยมี  $R^2=0.97$  (Shah and Das, 2012, pp.229)

นอกจากการคำนวณด้วยวิธีที่กล่าวมาแล้ว ปัจจุบันยังมีแนวคิดที่นำข้อมูลอื่นมาช่วยในการคำนวณได้ โดยเฉพาะข้อมูลรับรู้จากระยะไกล (remotely sensed data) เช่นข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม ซึ่งอาจจะใช้ข้อมูลในย่านความถี่แสงตามองเห็นได้และย่านแสงอินฟราเรดมาคำนวณค่า  $K_c$  โดยแนวคิดหนึ่งคือการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ (vegetation index : VI) หรือดัชนีผลต่างพืชพรรณนอร์มัลไลซ์ (normalized difference vegetation index : NDVI) โดยเราสามารถคำนวณ

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (2.2)$$

เมื่อ  $RED$  คือค่าของพืชในช่วงคลื่นสีแดง และ  $NDVI$  คือดัชนีผลต่างพืชพรรณนอร์มัลไลซ์ที่คำนวณได้ โดยหลักการนั้นควรมีค่าในช่วง  $[-1.0, 1.0]$  แต่ในทางปฏิบัติจะมีค่าสูงสุดประมาณ 0.8 ถึง 0.9 (NASA, 2018)

โดย Duchemin et al. (2006) ได้เสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีผลต่างพืชพรรณนอร์มัลไลซ์กับดัชนีพื้นที่ใบที่ได้จากการสังเกตภาคสนามได้เป็น

$$K_{cb} = 1.07(1 - \exp(-0.84LAI))$$

และเสนอแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่าง  $K_{cb}$  กับ  $NDVI$  เป็น

$$K_{cb} = 1.07 \left[ 1 - \left( \frac{NDVI_{max} - NDVI}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^{0.84/0.54} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ  $NDVI_{min}$  เป็นค่าต่ำสุดดิน และ เป็นค่า  $NDVI_{max}$  สูงสุดของพืช

Er-Saki et al. (2007) ได้ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเรื่องการรวมแบบจำลอง FAO-PM56 เพื่อการประมาณความต้องการใช้น้ำของพืชโดยการใช้ข้อมูลรับรู้จากระยะไกลภาคพื้นดิน ซึ่งในกรณีนี้ได้จากการใช้เครื่อง reflectometer มือถือ MSR87 วัดค่าการสะท้อนบริเวณเรือนยอดใน 8 ช่วงคลื่น เพื่อนำมาคำนวณดัชนีผลต่างพืชพรรณนอร์มัลไลซ์ นอกจากนั้นแล้วยังมีการถ่ายภาพเรือนยอดเพื่อประมาณสัดส่วนพื้นที่ปกคลุมดิน โดยใช้กล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่มีเลนส์มุมกว้าง 183 องศา แล้วใช้เทคนิคการประมวลผลภาพเพื่อจำแนกส่วนที่เป็นดินและเรือนยอดออกจากกัน ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ปกคลุมดินและดัชนีผลต่างพืชพรรณนอร์มัลไลซ์ได้เป็นความสัมพันธ์

$$Y = 1.18(X - 0.14) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $X=NDVI$  และ  $Y=Fc$  โดย  $R^2=0.89$

Kambal, Kilic and Hubbard (2013) ได้นำเสนอบทความวิจัยที่เกี่ยวกับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์พืชโดยการใช้ข้อมูลดัชนีพืชพรรณที่คำนวณจากข้อมูลรับรู้จากระยะไกล ซึ่งคำนวณ  $ET_0$  โดยใช้เทคนิคของ Hargraves and Samnai ซึ่งคำนวณจาก

$$ET_0 = 0.01351KT Ra T_{max} T_{min} T_{mean} 17.8 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $ET_0$  ของหย้า (มิลลิเมตรต่อวัน), อุณหภูมิสูงสุดรายวัน (องศาเซลเซียส), อุณหภูมิต่ำสุดรายวัน

(องศาเซลเซียส), อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (องศาเซลเซียส), การแผ่รังสีนอกบรรยากาศ (เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน) และ  $KT = \text{สัมประสิทธิ์ซึ่งเป็นฟังก์ชันของผลต่างอุณหภูมิคำนวณได้จาก}$

$$KT = 0.00185 (T_{\max} - T_{\min})^2 - 0.0433(T_{\max} - T_{\min}) + 0.423 \quad (2.6)$$

ซึ่งคณะผู้วิจัยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (linear regression) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์พืชและดัชนีผลต่างพืชพรรณนอร์มัลไลซ์ที่คำนวณจากข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม MODIS ได้ผลความสัมพันธ์เป็น

$$KCNDVI = 1.4571NDVI - 0.1725 \quad (2.7)$$

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) เท่ากับ 0.8259 และผลการทดลองสรุปได้ว่าดัชนีผลต่างพืชพรรณนอร์มัลไลซ์และค่าสัมประสิทธิ์พืชมีความสัมพันธ์สูง และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างความสัมพันธ์นี้ในการเกษตรแบบชลประทานและแบบใช้น้ำฝน

Li et al. (2014) นำเสนอผลการวิจัยด้านการประมาณค่าการแผ่รังสีเฉลี่ยรายวันโดยใช้แบบจำลองจากข้อมูลอุณหภูมิ โดยมีการนำข้อมูลการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์เฉลี่ยรายเดือนและอุณหภูมิสูงสุดต่ำสุดเฉลี่ยรายเดือนมาประกอบการคำนวณ งานวิจัยนี้อ้างอิงแบบจำลองของ Hargreaves and Samani (1982) เพื่อการคำนวณการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์จากอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุดโดยอ้างอิงจากสูตรพื้นฐานซึ่งได้มีการปรับปรุงและเขียนใหม่ตามแนวทางของ Samani (20xx) และ Chen et al. (20xx) ได้เป็น

$$H/H_0 = a_1 \sqrt{\Delta T} \quad (2.8)$$

$$H/H_0 = (a_2 + b_2 \Delta T + c_2 \Delta T^2) \sqrt{\Delta T} \quad (2.9)$$

$$H/H_0 = a_3 \sqrt{\Delta T} + b_3 \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\Delta T = T_{\max} - T_{\min}$ ,  $H_0 = \text{ค่าเฉลี่ยรายเดือนของการแผ่รังสีนอกบรรยากาศเฉลี่ยรายวัน}$ , และ  $\{a_1, a_2, a_3, b_2, b_3, c_2\} = \text{สัมประสิทธิ์เชิงประจักษ์}$  โดยที่ผู้วิจัยได้ปรับปรุงสมการทั้งสามโดยนำค่าอุณหภูมิของอากาศและความชื้นสัมพัทธ์มารวมกัน แล้วปรับแบบจำลอง HS ใหม่ได้เป็น

$$H/H_0 = (a_4 + b_4 T_a) \sqrt{\Delta T} + c_4 \quad (2.11)$$

เมื่อ  $T_a = (T_{\max} + T_{\min})/2$  เป็นค่าอุณหภูมิอากาศเฉลี่ยรายเดือน และ  $\{a_4, b_4, c_4\}$  เป็นสัมประสิทธิ์เชิงประจักษ์ ผลการศึกษาพบว่าแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลอุณหภูมินี้ให้ค่าที่มีความแม่นยำดีกว่าแบบจำลอง Hargreaves and Samani, Chen et al. และ Samani

Vanino et al. (2015) ได้ศึกษาการประมาณค่า  $ET_p$  และค่าสัมประสิทธิ์พืชของ Tendone Vineyards โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมแลนด์แซตเอท (LANDSAT-8) และดาวเทียมแรปิดอาย (RapidEye) ร่วมกับข้อมูลอุณหภูมิต้องกันและอื่น ๆ เช่น ดัชนีพื้นที่ใบ (leaf area index : LAI) และค่าความเข้มแสงแวดล้อม เป็นต้น โดยการประมาณค่า  $ET_p$  นั้นกลุ่มผู้วิจัยได้ใช้เทคนิค Penman-Monteith ซึ่งคำนวณจากความสัมพันธ์

$$ET_p = f\{r, LAI, hc, T_a, RH, S, U\} \quad (2.12)$$

เมื่อ  $r = \text{อัลบีโด}$ ,  $LAI = \text{ดัชนีพื้นที่ใบ}$ ,  $hc = \text{ความสูงของพืช}$ ,  $T_a = \text{อุณหภูมิของอากาศ}$ ,  $RH = \text{ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ}$ ,  $S = \text{การแผ่รังสีของดวงอาทิตย์}$  และ  $U = \text{ความเร็วลม}$

Poisson et al. (2017) ตีพิมพ์บทความผลการศึกษาการประเมินและประมาณค่า  $ET$  และค่าสัมประสิทธิ์พืชของข้าวโพดด้วยวิธีการมาตรฐานของ FAO-PM56 จากการใช้ข้อมูลสองชุด โดยข้อมูลชุดแรกคือข้อมูล scintillometry ซึ่งใช้ซินทิลโลมิเตอร์ (scintillometer) เพื่อวัดข้อมูล

สภาพแวดล้อม และข้อมูลชุดที่สองคือข้อมูลอุตุนิยมวิทยาซึ่งรวบรวมข้อมูลที่จำเป็นจากสถานีตรวจอากาศเกือบทั้งหมด ซึ่งในบางกรณีจะมีการปรับวิธีการคำนวณพารามิเตอร์บางค่าขึ้นอยู่กับที่มาของข้อมูล เช่น ความชื้นสัมพัทธ์และการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ เป็นต้น โดยนำค่าจากซินทิลโลมิเตอร์มาคำนวณหา  $C2n$  และ  $Rn$ ,  $G$  และ heat flux และคำนวณค่าทุก ๆ 60 นาทีเพื่อให้สัมพันธ์กับค่าที่ได้จากสถานีตรวจอากาศ หลังจากนั้นจึงนำค่าทั้งหมดไปคำนวณ ET ด้วยสมการสมดุลพลังงาน ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $ETp$  จากซินทิลโลมิเตอร์และ FAO-PM56 ด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นได้เป็นความสัมพันธ์

$$ETpFAO = 0.78ETpscincin - 0.6 \quad (2.13)$$

เมื่อ  $ETpscincin$  คือค่าจากซินทิลโลมิเตอร์ และ  $ETpFAO$  คือค่าจาก FAO-PM56 นอกจากนี้คณะนักวิจัยยังได้ทดลองใช้โครงข่ายประสาทเทียม (artificial neural network : ANN) มาคำนวณค่า ET โดยแยกการเรียนรู้ข้อมูลซินและอุตุนิยมวิทยาและใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กลับ (back propagation) ในการเรียนรู้ข้อมูลแต่ละชุด ผลการศึกษาพบว่า ET จากการสังเกตกับค่าที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมจากชุดข้อมูลซินทิลโลมิเตอร์นั้นมีความสอดคล้องกันแต่มีความคลาดเคลื่อนเชิงเวลา และมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าเป็น

$$Y = 0.76X + 0.1 \quad (2.14)$$

สำหรับในส่วนของข้อมูล FAO นั้นไม่มีความคลาดเคลื่อนเชิงเวลาอย่างชัดเจน แต่ค่าที่คำนวณได้แตกต่างจากค่าที่ได้จากการสังเกตอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า

$$Y = 0.62X + 1.16 \quad (2.15)$$

ซึ่งความแตกต่างนี้อาจจะเกิดจากจำนวนข้อมูลที่นำมาใช้ให้เครือข่ายเรียนรู้ ล่าสุด Taherparvar and Pimroradian (2018) ได้ตีพิมพ์งานวิจัยเรื่องการประมาณค่า ET ของข้าวโดยใช้ค่าการสะท้อนแสงของข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียมแลนด์แซตเซเว่น (LANDSAT-7) ซึ่งนำมาสกัดข้อมูลดัชนีพืชพรรณ โดยมีการใช้อัลกอริทึมถ่วงน้ำหนักผกผันหรืออินเวิร์ตดิสตาเบอิลยู (invert distance weighting : IDW) ในการแก้ไขข้อมูลที่เสียหายในภาพถ่ายจากดาวเทียมแลนด์แซตเซเว่นร่วมกับการใช้ข้อมูลจากการสำรวจภาคสนามที่ทำการวัดค่า  $ETc$  ของข้าว โดยมีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์พืชที่ได้คำนวณได้จากดัชนีพืชพรรณ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์พืชนี้คำนวณด้วยวิธีที่แตกต่างกันหลายวิธีเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์พืชและค่าสัมประสิทธิ์พืชฐาน (basal crop coefficient :  $Kcb$ ) เทียบกับดัชนีพืชพรรณ ผลการทดลองสรุปว่าแบบจำลองที่ใช้เน้นให้ความสำคัญกับการประมาณค่า  $ET_0$  ในระดับภูมิภาค (regional scale)

## ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

### 2.2 การวิเคราะห์พืชพรรณจากระยะไกล

#### 2.2.1 การวิเคราะห์ด้วยดัชนีพืชพรรณ

ดัชนีพืชพรรณผลต่างนอร์มัลไลซ์หรือเอ็นดีวีไอ (normalized difference vegetation index : NDVI) เป็นดัชนีที่ใช้สำหรับการตรวจสอบความแข็งแรงของพืชพรรณ (vegetation) โดยมีแนวคิดพื้นฐานอยู่ที่การสะท้อนแสงของพืชในช่วงคลื่นแสงสีแดงและอินฟราเรดใกล้ (near infrared : NIR) ดังสมการ

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (2.16)$$



โดยที่ *RED* คือค่า DN ของแบนด์สีแดงและ *NIR* คือค่า DN ของแบนด์อินฟราเรดใกล้

### 2.2.2 ET

TSOUNI (2008) คำนวณค่า ET ด้วยวิธี FAO Penman-Monteith and Granger และร่วมกับเทคนิคคาร์ลสัน-บัฟฟัม (Carlson-Buffum) โดยใช้ข้อมูลดาวเทียมโนอา (NOAA) ในช่วงคลื่นที่ได้จากอุปกรณ์เอวีเอชอาร์อาร์ (Advanced Very High Resolution Radiometer : AVHRR) แปลงข้อมูลเป็นอัลบีโด, ดัชนีพืชพรรณผลต่างนอร์มัลไลซ์และอุณหภูมิพื้นผิว คำนวณค่าสัมประสิทธิ์พืชแบบรายวันและข้อมูลอื่น ๆ บางส่วนจะนำมาจากสถานีตรวจอากาศและประมาณค่าในช่วง (interpolate) ด้วยวิธีไม่เชิงเส้น สำหรับวิธีของคาร์ลสัน-บัฟฟัม (Carlson-Buffum) นั้นจะคำนวณค่าแบบรายวัน

### 2.2.3 งานวิจัย

Kim, Evans and Iverson (2008) ใช้ข้อมูลรับรู้จากระยะไกลเข้ามาร่วมในการควบคุมระบบการให้น้ำโดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายแบบกระจาย (distributed wireless sensor network) โดยสถานีวัดข้อมูลนั้นประกอบด้วยองค์ประกอบ 3 ส่วน ประกอบด้วยการบันทึกข้อมูล, การสื่อสารข้อมูลไร้สาย และการจัดการพลังงาน ระบบทั้งหมดทำงานด้วยแผงสุริยะ (solar panel) ที่ต่อกับแบตเตอรี่ 12 โวลต์ ข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะส่งแบบไร้สายด้วยบลูทูธ (Bluetooth) โดยในส่วนของสถานีวัดข้อมูลนั้นใช้ CR10 เชื่อมต่อกับตัวต่อชนิด D-type แบบ 9 ขาสำหรับการสื่อสารแบบอนุกรม RS232 กำหนดให้วัดข้อมูลทุก ๆ 10 วินาที ทำการบันทึกและส่งข้อมูลทุก ๆ 15 นาที มีการติดตั้งเซ็นเซอร์ 107 ของ Campbell Scientific ไว้ที่ความลึก 30 เซนติเมตรใต้ผิวดินและ 60 เซนติเมตรเหนือผิวดินเพื่อทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของดินและอุณหภูมิของอากาศตามลำดับ มีการติดตั้ง HMP35C เพื่อทำหน้าที่วัดความชื้นสัมพัทธ์ นอกจากนั้นยังติดตั้งเครื่องวัดการสะท้อนมวลน้ำ (water content reflectometer) CS616 เพื่อวัดปริมาณน้ำในดินที่ความลึก 30 และ 60 เซนติเมตรจากผิวดิน นอกจากนั้นยังมีไพราโนมิเตอร์ (pyranometer) LI200X เพื่อทำหน้าที่วัดการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์ สำหรับการสื่อสารข้อมูลนั้นด้วยการบลูทูธโดยใช้มอดูลซิกบี (Zigbee) ใช้แผงอากาศแบบแพทช์ (patch antenna) กำลัง 63 มิลลิวัตต์ ส่งสัญญาณได้ระยะทางประมาณ 1200 เมตร ระบบทั้งหมดสามารถใช้งานได้ประมาณ 3 วันครั้งโดยไม่มีการชาร์จแบตเตอรี่ใหม่

Shah and Das (2012) ยกตัวอย่างระบบเครือข่ายไร้สายสำหรับเกษตรกรรมความแม่นยำสูง (precision agriculture) โดยองค์ประกอบส่วนที่ทำหน้าที่วัดข้อมูลนั้นทำงานด้วยอุปกรณ์แบบมีสายและไร้สายร่วมกัน ประกอบด้วยมอดูล SHT11 เพื่อการวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของดิน และเซ็นเซอร์สำหรับการวัดพีเอชของดิน เป็นต้น โดยมีแหล่งพลังงานหลักเป็นแบตเตอรี่ที่มีระบบชาร์จไฟด้วยแผงสุริยะชนิดโพลีคริสตัลไลน์ (polycrystalline) ขนาดประมาณ 3 วัตต์ โดยจะมีการวัดค่าเหล่านี้ทุก ๆ 1 นาทีแล้วส่งแบบไร้สายในรูปแบบหลายทอด (multi-hop) ไปยังโหนดฐานที่ตั้งห่างออกไปประมาณ 700 เมตรซึ่งข้อมูลนี้จะถูกส่งต่อไปยังคอมพิวเตอร์แม่ข่ายอีกครั้งหนึ่งด้วยบริการจีพีอาร์เอส

Wang et al. (2013) นำเสนอระบบให้น้ำอัจฉริยะโดยใช้ข้อมูล ET โดยระบบตัดสินใจให้น้ำด้วยการใช้สมการสมดุลของน้ำ (water balance equation) ซึ่งได้จากการรวมข้อมูลอุตุนิยมนิเวศ เช่น อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของดิน, ความเร็วลม และการแผ่รังสีของดวงอาทิตย์

แล้วส่งต่อให้โหนดควบคุมผ่านการสื่อสารไร้สาย โดยมีหน่วยประมวลผลหลักเป็น LPC2387 ความเร็ว 72 เมกะเฮิร์ตซ์

Gutiérrez et al. (2014) พัฒนาระบบการให้น้ำอัตโนมัติโดยใช้เครือข่ายเซ็นเซอร์ไร้สายและมอดูลจีพีอาร์เอส โดยระบบหรือหน่วยที่ทำหน้าที่วัดข้อมูลประกอบด้วย VH400 ของ Vegetronix ทำหน้าที่เซ็นเซอร์วัดความชื้นของดินและ DS1822 อุณหภูมิของดิน โดยระบบที่ทำหน้าที่วัดข้อมูลแบบไร้สายนั้นควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC24FJ64GB004 และใช้ XBee Pro S2 ทำหน้าที่เป็นตัวรับส่งวิทยุ ระบบทั้งหมดทำงานด้วยแบตเตอรี่ชนิดนิกเกิลเมทัลไฮไดรด์ (Nickel-metal hydride : Ni-MH) ขนาดเอเอ (AA) ความจุ 2200 มิลลิแอมป์ชั่วโมง ชาร์จพลังงานใหม่ด้วยแผง MPT4.8-75 และป้องกันอุปกรณ์ทั้งหมดด้วยกล่องพีวีซีกันน้ำ ในส่วนของหน่วยที่ทำหน้าที่เก็บข้อมูลนั้นใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์และตัวรับส่งวิทยุเช่นเดียวกับระบบแรก และมีการเพิ่มมอดูลจีพีอาร์เอส MTSMC-G2-SP เพื่อการรับส่งข้อมูลผ่านเครือข่ายโทรศัพท์อีกชุดหนึ่ง โดยใช้คำสั่งเอทีในการรับส่งข้อมูล ภายในหน่วยนี้จะมีมอดูลทำหน้าที่ควบคุมปั้มน้ำสองปั้มน้ำโดยการใช้นิรเลย์ขนาด 40 แอมป์ ซึ่งเชื่อมต่อกับถังบรรจุน้ำขนาด 5,000 ลิตร ระบบที่พัฒนานั้นรองรับการทำงานหลายโหมด เช่น การทำงานแบบกำหนดตารางให้น้ำด้วยมือด้วยการกดปุ่ม, การกำหนดวันที่และเวลาสำหรับการให้น้ำควบคุมผ่านเว็บ และการทำงานแบบกำหนดวันที่และเวลาให้น้ำแบบอัตโนมัติระยะเวลาคงที่ โดยการทำงานแบบหลังนี้จะทำงานถ้าหากความชื้นดินแตกต่างจากค่าขีดแบ่งที่กำหนดไว้เกิน 5% หรือพบว่าอุณหภูมิของดินสูงกว่า 30 องศาเซลเซียส

## 2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์

### 2.3.1 Arduino

วิระ ศรีมาลา และคณะ (2558) ได้สรุปข้อมูลเกี่ยวกับ Arduino ไว้ว่า Arduino เป็นชื่อของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีขนาดเล็กและมีราคาถูก ที่มีการพัฒนาขึ้นมาด้วยแนวคิดแบบโอเพนซอร์ซ (open source) นั่นคือผู้พัฒนาบอร์ดจะเปิดเผยข้อมูลต้นฉบับทั้งส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทำงาน ภาพที่ 2.1 แสดงตัวอย่างของบอร์ด Arduino รุ่นต่าง ๆ



(ก) UNO

(ข) LEONARDO

(ค) MEGA 2560

ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างบอร์ด Arduino รุ่นต่าง ๆ

ที่มา: Arduino, 2018

บอร์ด Arduino นี้ถูกพัฒนาขึ้นมาในช่วงปีค.ศ. 2005 และปัจจุบันอยู่ภายใต้การจัดการของบริษัท Arduino และเนื่องจาก Arduino เป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบโอเพนซอร์ซ ดังนั้นจึงมีผู้นำบอร์ด Arduino นี้ไปต่อยอดดัดแปลงความสามารถเพิ่มเติมได้เป็นอีกหลายกลุ่มย่อย

แต่โดยรวมนั้นบอร์ด Arduino ส่วนใหญ่จะใช้หน่วยประมวลผลแบบ 8 บิตของ Atmel AVR หรืออาจจะมีบางรุ่นที่อาจจะใช้หน่วยประมวลผลแบบ 32 บิต ของ Atmel ARM และโดยทั่วไปแล้วบอร์ด Arduino จะมีขา (pin) สัญญาณแบบจีพีไอโอ (general-purpose input/output : GPIO) ไว้ให้ผู้ใช้เพื่อใช้สำหรับในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยขาจีพีไอโอนี้จะรองรับการสื่อสารทั้งแบบแอนะล็อกและดิจิทัล โดยผู้ใช้งานจะสามารถควบคุมการทำงานของบอร์ดผ่านการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาที่มีไวยากรณ์คล้ายกับภาษากลุ่ม C/C++ และภาษาจาวา โดยโปรแกรมเมอร์มักจะพัฒนาโปรแกรมจะทำได้ด้วยไอดีอี (integrated development editor : IDE) ที่ชื่อว่า Arduino IDE ซึ่งเป็นโปรแกรมแบบโอเพนซอร์ซเช่นเดียวกับตัวบอร์ด ตารางที่ 2.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของบอร์ด Arduino รุ่นต่าง ๆ

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของบอร์ด Arduino รุ่นต่าง ๆ (ข้อมูลปี พ.ศ.2561)

ที่มา: Arduino, 2018

รุ่น	Processor	Operating voltage (V)	Input voltage (V)	CPU speed (MHz)	Analog In/Out	Digital In/Out	EEPROM (KB)	SRAM (KB)	Flash (KB)
Uno	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Due	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Leonardo	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Mega 2560	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Mega ADK	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Micro	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Mini	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Nano	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Ethernet	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Esplora	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
ArduinoBT	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Fio	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Pro (168)	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Pro (328)	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Pro Mini	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
LilyPad	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
LilyPad USB	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
LilyPad Simple	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32

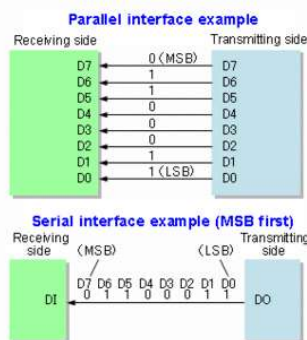
รุ่น	Processor	Operating voltage (V)	Input voltage (V)	CPU speed (MHz)	Analog In/Out	Digital In/Out	EEPROM (KB)	SRAM (KB)	Flash (KB)
LillyPad SimpleSnap	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32
Yun	ATmega328	5	7-12	16	6/0	14/6	1	2	32

### 2.3.2 โพรโทคอลของการสื่อสาร

โพรโทคอล (protocol) เป็นข้อกำหนดหรือรูปแบบสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ใช้สำหรับการรับส่งข้อมูล บอร์ดสื่อสารกับอุปกรณ์ต่อพ่วงได้หลายช่องทาง โดยส่วนมากจะใช้ขาจีพีไอโอซึ่งออกแบบให้มีหลายขา โดยโพรโทคอลที่ใช้กันอย่างกว้างขวางประกอบด้วย SERIAL, I2C และ SPI (serial peripheral interface : SPI) โดยมีรายละเอียดของการสื่อสารแต่ละแบบดังนี้

#### 1) การสื่อสารอนุกรม

โพรโทคอล SERIAL เป็นโพรโทคอลที่ออกแบบมาสำหรับการสื่อสารแบบอนุกรม โดยตัวส่งข้อมูลนำอินพุตที่อยู่ในรูปของแวลวลำดับของไบนารีมาส่งออกไปทีละบิต แต่ละบิตจะส่งออกไปทีละบิตตามลำดับ การส่งข้อมูลจะเริ่มด้วยการส่งบิตเริ่ม (start bit) ซึ่งโดยทั่วไปจะมีสถานะเป็น LOW จากนั้นจึงส่งสัญญาณออกไปครั้งละบิต เมื่อครบ 1 ไบนารีจึงส่งสัญญาณบิตสิ้นสุด (end bit) ที่มีสถานะเป็น HIGH โดยอาจจะมีการเพิ่มบิตตรวจสอบ (parity bit) ด้วยก็เป็นได้



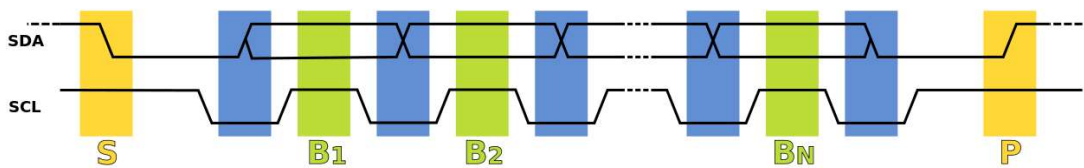
ภาพที่ 2.2 ตัวอย่างการเชื่อมต่อด้วยโพรโทคอลการสื่อสารอนุกรม

ที่มา: Wiki, 2018

ตัวรับจะนำบิตที่ได้รับมาเรียงต่อกันเป็นไบนารีและแวลวลำดับของไบนารีต่อไป โดยเรียกฮาร์ดแวร์หรือชิปที่ทำหน้าที่รับส่งข้อมูลระดับบิตนี้ว่ายูอาร์ท (universal asynchronous receiver-transmitter : UART) ออกแบบมาเพื่อการทำงานแบบไม่ประสานจังหวะ (asynchronous) โดยผู้นำไปใช้งานสามารถปรับรูปแบบข้อมูลและความเร็วของการสื่อสารได้

## 2) ไอส์แคร์ซี

โพรโทคอลไอทูซีหรือไอส์แคร์ซี (Inter-Integrated Circuit : I2C หรือ I2C) เป็นโพรโทคอลที่ออกแบบโดย NXP Semiconductors ในช่วงปี ค.ศ. 1982 ใช้สำหรับการสื่อสารแบบอนุกรมที่ทำงานแบบประสานจังหวะ (synchronous) เรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับข้อมูลหรือตัวควบคุมว่ามาสเตอร์ (master) ซึ่งมักหมายความถึงไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ส่งสัญญาณประสานนาฬิกาประสานการทำงานและเรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณนาฬิกาและรับคำสั่งงาน (command) ว่าสเลฟ (slave)



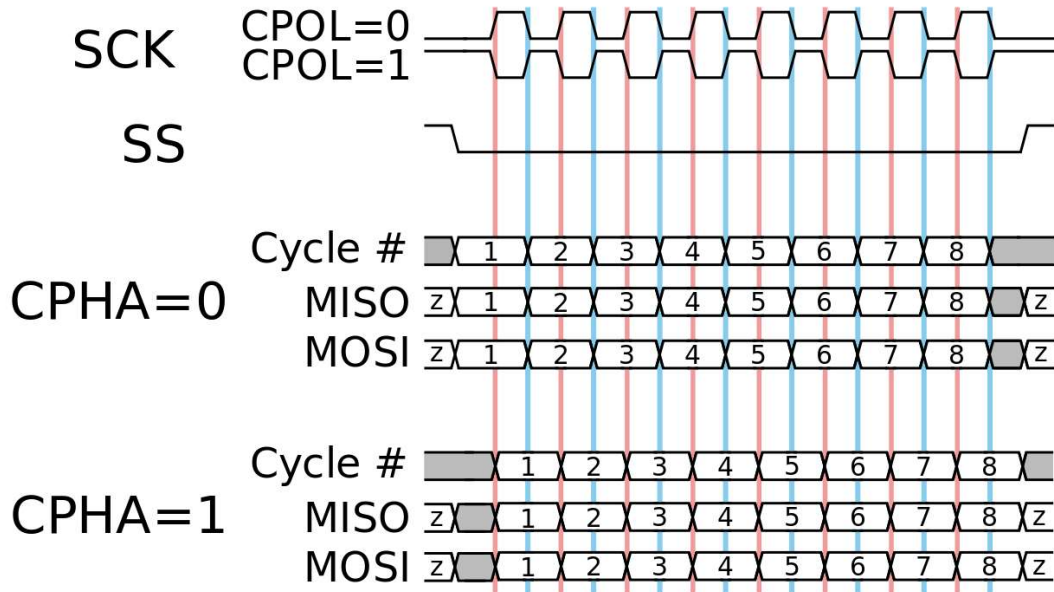
ภาพที่ 2.3 ตัวอย่างการเชื่อมต่อด้วยโพรโทคอลไอทูซี

ที่มา: Wikipedia, 2018

โดยโพรโทคอลนี้ใช้สายสัญญาณเพื่อการสื่อสารทั้งหมด 4 เส้นประกอบด้วยสายไฟที่มีแรงดันในช่วง +5V หรือ +3.3V 1 เส้น, สาย GND 1 เส้น, สายข้อมูลอนุกรม (serial data : SDA) 1 เส้น และสายนาฬิกาอนุกรม (serial clock : SCK) 1 เส้น ซึ่งโพรโทคอลไอส์แคร์ซีนี้อาจรับมาสเตอร์และสเลฟได้หลายชุดบนสายสัญญาณสื่อสารชุดเดียว อุปกรณ์ที่สื่อสารในโพรโทคอลนี้จะมีเลขที่อยู่ (address) ขนาด 7 - 10 บิตเพื่อระบุตัวตนในการสื่อสาร ออกแบบมาให้มีความเร็วในการสื่อสารในโหมดมาตรฐาน (standard mode) 100 กิโลบิตต่อวินาที หรือ 400 กิโลบิตต่อวินาทีหรือเร็วกว่าในโหมดเร็ว (fast mode)

## 3) เอสพีไอ

โพรโทคอลเอสพีไอเป็นโพรโทคอลสื่อสารอนุกรมแบบประสานเวลา ออกแบบและพัฒนาโดย Motorola ในช่วงทศวรรษ 80 รองรับการสื่อสารแบบ full duplex โดยเรียกอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ควบคุมและอุปกรณ์ที่รับคำสั่งงานว่ามาสเตอร์และสเลฟเช่นเดียวกับโพรโทคอลไอส์แคร์ซี ใช้สายสัญญาณในการสื่อสารทั้งหมด 6 เส้น แยกเป็นสายไฟและ GND 2 เส้น, สายสัญญาณนาฬิกาอนุกรม (SCK) 1 เส้น, มาสเตอร์เอาต์สเลฟอิน (master out, slave in : MOSI), มาสเตอร์อินสเลฟเอาต์ (master in, slave out : MISO), และ สเลฟซีเล็ค (slave select : SS) ซึ่งทำหน้าที่เลือกสเลฟ 1 เส้น ดังนั้นเอสพีไอจึงไม่ได้ใช้เลขที่อยู่ในการระบุตัวตน และมีมาสเตอร์หนึ่งชุดควบคุมสเลฟได้หลายตัว ดังตัวอย่างในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 ตัวอย่างการเชื่อมต่อด้วยโปรโตคอลเอสพีไอ  
ที่มา: Wikipedia, 2018

## 2.4 มาตรฐานการรับส่งข้อมูล

### 2.4.1 เอ็กซ์เอ็มแอล

เอ็กซ์เอ็มแอล (extensible markup language : XML) เป็นภาษาคอมพิวเตอร์ในกลุ่มภาษามาร์คอัพ (markup language) ออกแบบมาเพื่อการแลกเปลี่ยนข้อมูล โดยพื้นฐานของเอ็กซ์เอ็มแอลคือภาษามาร์คอัพ (markup language) ซึ่งพัฒนามาโดยมีแนวคิดของการใช้ป้ายระบุหรือแท็ก (tag) เพื่อระบุขอบเขตส่วนข้อความที่สนใจ ตัวอย่างของภาษามาร์คอัพคือภาษาเอชทีเอ็มแอล (hyper text markup language : HTML) แต่เนื่องจากข้อจำกัดเบื้องต้นของการกำหนดแท็กแบบตายตัวให้ขาดความยืดหยุ่นในการนำไปใช้งานเมื่อไม่มีชื่อแท็กที่สอดคล้องกับความต้องการ เอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลมีรูปแบบเอกสารทั้งแบบที่มนุษย์อ่านได้และแบบคอมพิวเตอร์อ่านได้ มีส่วนขยายของแฟ้มเป็น xml จุดเด่นประการหนึ่งคือผู้ใช้สามารถกำหนดชื่อแท็กได้เองตามต้องการ ดังนั้นปัจจุบันจึงนิยมนำไปใช้งานทั้งด้านการแลกเปลี่ยนข้อมูลและใช้เป็นรูปแบบแฟ้มของโปรแกรมประยุกต์บางโปรแกรม ภาพที่ 2.5 แสดงตัวอย่างเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล

```

1 <note>
2   <to>Tove</to>
3   <from>Jani</from>
4   <heading>Reminder</heading>
5   <body>Don't forget me this weekend!</body>
6 </note>

```

ภาพที่ 2.5 ตัวอย่างเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล

ที่มา: W3Schools, 2018

เอ็กซ์เอ็มแอลเป็นเอกสารแบบเอกสารจัดดีแล้ว (well-formed document) ซึ่งในข้อกำหนดของเอ็กซ์เอ็มแอลนั้นจะมีรายละเอียดกำกับการจัดรูปแบบต่าง ๆ อย่างชัดเจน โครงสร้างเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลนั้นจะมีเอ็กซ์เอ็มแอลโพรล็อก (XML prolog) ซึ่งเป็นตัวเลือกของการประกาศส่วนหัว ถ้าหากมีในเอกสารจะกำหนดให้อยู่บรรทัดแรกของเอกสาร เอ็กซ์เอ็มแอลโพรล็อกมีข้อมูลเกี่ยวกับเวอร์ชันและการเข้ารหัสของเอกสารทั้งหมด ตัวอย่างเช่น

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
```

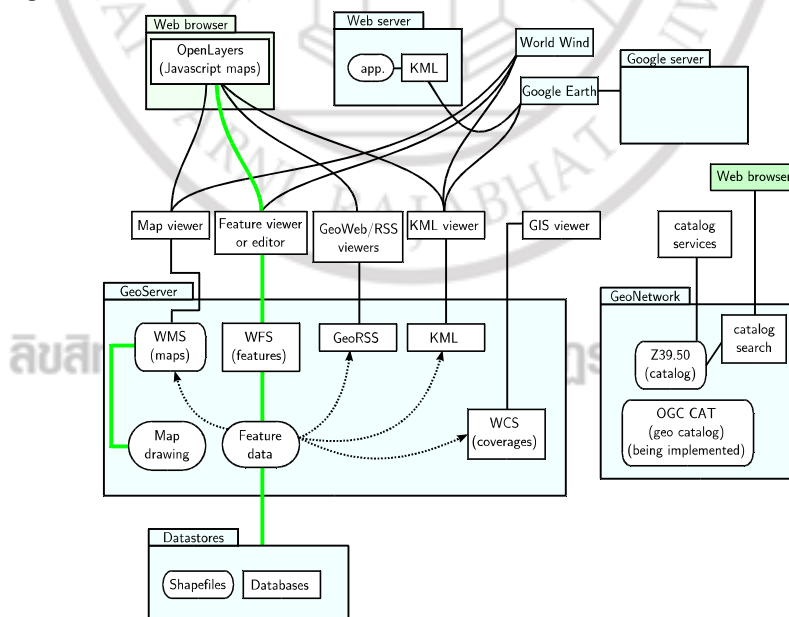
จะเป็นการกำหนดว่าเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลนี้จะใช้รูปแบบตามมาตรฐานเอ็กซ์เอ็มแอลเวอร์ชัน 1.0 รหัสอักขระในเอกสารด้วยมาตรฐานยูทียูเอฟเอช (UTF-8) ส่วนที่เหลือของเอกสารจะเป็นข้อมูล โดยข้อกำหนดเบื้องต้นสำหรับเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลดังต่อไปนี้

- 1) เอกสารทั้งหมดจะมีโหนดราก (root node) ได้เพียงโหนดเดียว
- 2) เปิดปิดตามลำดับให้ครบถ้วน
- 3) ชื่อเป็นอักขระพิเศษไม่ได้
- 4) ไวต่ออักษรใหญ่เล็ก (case sensitive)

การตรวจสอบความสมเหตุสมผล (validate) ของเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลอาจจะทำได้ด้วยดีทีดี (document type definition : DTD) หรือเอ็กซ์เอ็มแอลสกีมา (XML schema)

## 2.4.2 มาตรฐานทางภูมิสารสนเทศ

มีมาตรฐานหลายตัวที่นำมาใช้งานได้ แต่มาตรฐานทางภูมิสารสนเทศสากลมาตรฐานหนึ่งที่เป็นที่รู้จักและเป็นที่ยอมรับนั้นมักจะกำกับดูแลโดยโอจีซี (open geospatial consortium : OGC) ซึ่งเป็นองค์กรสากลด้านภูมิสารสนเทศ กำกับดูแลมาตรฐานทั้งแบบเปิดและแบบเชิงพาณิชย์ หน่วยงานนี้ดูแลมาตรฐานหลายด้าน ภาพที่ 2.6 แสดงตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานต่าง ๆ ที่โอจีซีกำกับ



ภาพที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างมาตรฐานต่าง ๆ ที่โอจีซีกำกับ  
ที่มา: Wikipedia, 2018

ที่สำคัญและเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้มี 2 มาตรฐาน ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1) ดับเบิลยูเอฟเอส

ดับเบิลยูเอฟเอส (web feature service : WFS) เป็นมาตรฐานหนึ่งของมาตรฐานด้านภูมิสารสนเทศที่กำกับด้วยโอจีซี ออกแบบมาใช้ในการแลกเปลี่ยนข้อมูลฟีเจอร์ (feature) ซึ่งมักจะหมายถึงข้อมูลเชิงพื้นที่ (spatial data) เช่น ข้อมูลจุดตำแหน่ง, เส้น และพื้นที่ เป็นต้น ขั้นตอนการรับส่งข้อมูลด้วยมาตรฐานนี้มีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2.4 และตารางที่ 2.5

**ตารางที่ 2.4** พารามิเตอร์การร้องขอบริการของมาตรฐานดับเบิลยูเอฟเอส

ที่มา: GeoServer, 2018

การดำเนินการ	รายละเอียด
GetCapabilities	Generates a metadata document describing a WFS service provided by server as well as valid WFS operations and parameters
DescribeFeatureType	Returns a description of feature types supported by a WFS service
GetFeature	Returns a selection of features from a data source including geometry and attribute values
LockFeature	Prevents a feature from being edited through a persistent feature lock
Transaction	Edits existing feature types by creating, updating, and deleting

**ตารางที่ 2.5** พารามิเตอร์ของมาตรฐานดับเบิลยูเอฟเอสที่เพิ่มมาในเวอร์ชัน 2.0.0

ที่มา: GeoServer, 2018

การดำเนินการ	รายละเอียด
GetPropertyValue	Retrieves the value of a feature property or part of the value of a complex feature property from the data store for a set of features identified using a query expression
GetFeatureWithLock	Returns a selection of features and also applies a lock on those features
CreateStoredQuery	Create a stored query on the WFS server
DropStoredQuery	Deletes a stored query from the WFS server



การดำเนินการ	รายละเอียด
ListStoredQueries	Returns a list of the stored queries on a WFS server
DescribeStoredQueries	Returns a metadata document describing the stored queries on a WFS server

ขั้นแรกในการใช้บริการของมาตรฐานดับเบิลยูเอฟเอสคือการร้องขอ `getCapabilities` ซึ่งมีรูปแบบการร้องขอเป็น

```
http://BASE_URL/?SERVICE=WFS&
REQUEST=GetCapabilities&
VERSION=2.0.0
```

โดยที่ `SERVICE=WFS` เป็นการระบุบริการที่ร้องขอไปยัง `BASE_URL` ซึ่งในตัวอย่างนี้ร้องขอ บริการ WFS สำหรับ `REQUEST=GetCapabilities` เป็นการระบุข้อความร้องขอเป็น `GetCapabilities` และกำหนดเวอร์ชันของการสื่อสารเป็น 2.0.0

ซึ่งผู้รับบริการจะรอข้อความตอบกลับซึ่งจะมีรายละเอียดทั้งหมดเกี่ยวกับ บริการที่ร้องขอ โดยข้อความตอบรับจากผู้ให้บริการนี้จะเป็นเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอลที่มีโหนดราก (root node) เป็น `WFS_Capability` โดยโหนดรากนี้จะมีโหนดลูกหลาย โหนดประกอบด้วย `ServiceIdentification`, `OperationsMetadata`, และ `FeatureTypeList` โดย จะบรรจุข้อมูลเกี่ยวกับผู้ให้บริการ เช่น ชื่อบริการ, บทคัดย่อ และชื่อที่อยู่สำหรับติดต่อผู้ให้บริการ เป็นต้น ในกรณีของตัวอย่างนี้จะบรรจุรายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินการ (operation) ที่ผู้ให้บริการ มี โดยจะระบุช่องทางการให้บริการ เช่น เอชทีทีพีเก็ต (HTTP GET) หรือเอชทีทีพีโพสต์ (HTTP POST), เวอร์ชันของบริการ และยูอาร์แอลสำหรับการร้องขอบริการ เป็นต้น

หลังจากทราบรายละเอียดแล้วจึงเข้าสู่ขั้นตอนการร้องขอข้อมูล ซึ่งมีรูปแบบ การร้องขอเป็น

```
http://BASE_URL/?SERVICE=WFS&
REQUEST=GetFeature&
VERSION=2.0.0&
TYPENAMES=FEATURE_NAME
```

โดย `TYPENAMES` เป็นชื่อหรือรายการ (list) ของชื่อฟีเจอร์ที่ได้จากบริการ `GetCapabilities` ในกรณีที่ต้องการร้องขอข้อมูลแบบมีเงื่อนไข ผู้ใช้สามารถทำได้ตามรูปแบบ

```
http://BASE_URL/?SERVICE=WFS&
REQUEST=GetFeature&
VERSION=2.0.0&
TYPENAMES=FEATURE_NAME&
COUNT=10&
BBOX=&
propertyName=&
sortBy=&
featureId=&
```

เมื่อ COUNT เป็นจำนวนฟีเจอร์สูงสุดที่จะให้ส่งข้อมูลกลับมา ในตัวอย่างกำหนดเป็น 10, BBOX เป็นค่ากล่องล้อมรอบ (bounding box) ของพื้นที่ที่สนใจ ระบุในรูปแบบของคู่ลำดับสองชุด คั่นด้วยเครื่องหมาย ลูกน้ำ แสดงค่าพิกัดน้อยสุดและมากที่สุดตามลำดับ โดยผู้ให้บริการจะกรองเฉพาะฟีเจอร์ที่อยู่ภายในกล่องล้อมรอบนี้เท่านั้น, propertyName เป็นรายการของคุณสมบัติหรือข้อมูลเชิงคุณลักษณะ (attribute) ที่จะค้นหา ผู้ให้บริการจะคืนฟีเจอร์ที่มีค่าข้อมูลเชิงคุณลักษณะตรงกับที่ค้นหาเท่านั้น, sortBy เป็นชื่อคีย์ที่จะใช้เรียงลำดับข้อมูลที่ส่งกลับคืนมา และ featureId เป็นคีย์ของฟีเจอร์ที่จะใช้ค้นหา

The image shows an XML snippet from a GetCapabilities response. It lists two feature types: 'province' and 'cities'. Callout boxes provide context: 'Province' is the feature class name, the SRS and output format are listed in GetCapabilities results, and the bounding box coordinates are included for the feature class. The 'cities' feature class is also mentioned as being included with all its properties.

```

- <wfs:FeatureTypeList>
- <wfs:FeatureType>
  <wfs:Name>wfs_services_ArcSDE_wfs:province</wfs:Name>
  <wfs:Title>province</wfs:Title>
  <wfs:DefaultSRS>urn:x-ogc:def:crs:EPSG:6.9:4326</wfs:DefaultSRS>
  <wfs:OtherSRS>urn:x-ogc:def:crs:EPSG:6.9:4326</wfs:OtherSRS>
- <wfs:OutputFormats>
  <wfs:Format>text/xml; subType=gml/3.1.1/profiles/gmlsf/1.0.0/0</wfs:Format>
</wfs:OutputFormats>
- <ows:WGS84BoundingBox>
  <ows:LowerCorner>141.003005981 41.913318634</ows:LowerCorner>
  <ows:UpperCorner>52.620281219 83.108322144</ows:UpperCorner>
</ows:WGS84BoundingBox>
</wfs:FeatureType>
- <wfs:FeatureType>
  <wfs:Name>wfs_services_ArcSDE_wfs:cities</wfs:Name>
  <wfs:Title>cities</wfs:Title>
  <wfs:DefaultSRS>urn:x-ogc:def:crs:EPSG:6.9:4326</wfs:DefaultSRS>
  <wfs:OtherSRS>urn:x-ogc:def:crs:EPSG:6.9:4326</wfs:OtherSRS>
- <wfs:OutputFormats>
  <wfs:Format>text/xml; subType=gml/3.1.1/profiles/gmlsf/1.0.0/0</wfs:Format>
</wfs:OutputFormats>
- <ows:WGS84BoundingBox>
  <ows:LowerCorner>135.159896851 43.72077179</ows:LowerCorner>
  <ows:UpperCorner>52.684871674 68.269996643</ows:UpperCorner>
</ows:WGS84BoundingBox>
</wfs:FeatureType>
</wfs:FeatureTypeList>

```

ภาพที่ 2.7 ตัวอย่างข้อความตอบกลับของการร้องขอ GetCapabilities  
ที่มา: ESRI, 2017

ข้อความตอบกลับของ GetFeature จะประกอบด้วยข้อมูลหลายฟิลด์ ซึ่งในกรณีของดับเบิลยูเอฟเอสจะมีโครงสร้างพื้นฐานตามมาตรฐานจีเอ็มแอล (geadsasfa markup language : GML) ซึ่งจะมีข้อมูลรูปทรงและข้อมูลเชิงคุณลักษณะต่าง ๆ ตามต้องการ ภาพที่ 2.8 แสดงตัวอย่างผลลัพธ์การร้องขอบริการดับเบิลยูเอฟเอสโดยมีการร้องขอข้อมูลจากชั้นข้อมูลจุด (point layer)

```

<gml:featureMember>
- <wfs_services_ArcSDE_wfs:cities gml:id="F293_1">
  <wfs_services_ArcSDE_wfs:OBJECTID>1</wfs_services_ArcSDE_wfs:OBJECTID>
  <wfs_services_ArcSDE_wfs:NAME>Vancouver</wfs_services_ArcSDE_wfs:NAME>
  <wfs_services_ArcSDE_wfs:CAPITAL>N</wfs_services_ArcSDE_wfs:CAPITAL>
  <wfs_services_ArcSDE_wfs:PROV_NAME>British Columbia</wfs_services_ArcSDE_wfs:PROV_NAME>
  <wfs_services_ArcSDE_wfs:POPULATION>1380729</wfs_services_ArcSDE_wfs:POPULATION>
  - <wfs_services_ArcSDE_wfs:SHAPE>
    - <gml:Point>
      <gml:pos>49.159999847 -123.069999695</gml:pos>
    </gml:Point>
  </wfs_services_ArcSDE_wfs:SHAPE>
</wfs_services_ArcSDE_wfs:cities>
</gml:featureMember>

```

All of the features in the cities feature class are listed.

It also lists all of the field names and the attributes for each feature.

ภาพที่ 2.8 ตัวอย่างข้อความตอบกลับของการร้องขอ GetFeature  
ที่มา: ESRI, 2017

## 2) เอสโอเอส

เอสโอเอส (sensor observation service : SOS) ปัจจุบันเวอร์ชัน 2.0 เป็นมาตรฐานบริการเว็บอีกแบบที่กำกับโดยโอจีซี ออกแบบเพื่อการรับส่งข้อมูลที่ได้จากการสังเกต (observation) เช่น ข้อมูลจากการตรวจวัดด้วยเซ็นเซอร์ เป็นต้น โดยรองรับการจัดการเซ็นเซอร์ทั้งการเพิ่มโหนดเซ็นเซอร์, แสดงข้อมูลและการเพิ่มข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ เป็นต้น

ตารางที่ 2.6 พารามิเตอร์ของมาตรฐานเอสโอเอสที่เพิ่มมาในเวอร์ชัน 2.0.0

ที่มา: GeoServer, 2018

การดำเนินการ	รายละเอียด
GetCapabilities	Returns a document that describes the functionality and resources offered by the SOS service that is provided by the server.
DescribeSensor	Returns a description of the procedures or sensors associated with an SOS.
GetObservation	Returns observation data that has been collected by the procedure or sensor.

## 3) โอแอนด์เอ็ม

โอแอนด์เอ็ม (observation and measurement : O&M) เป็นมาตรฐานสำหรับการจัดการค่าจากการสังเกตและการวัดข้อมูล (measurement) เป็นมาตรฐานหนึ่งที่ถูกเรียกใช้โดยบริการเอสโอเอส โครงสร้างภายในจะประกอบด้วยข้อมูลเกี่ยวกับการสังเกต เช่น ข้อมูลของพีเจอร์, รายละเอียดเกี่ยวกับอัลกอริทึมหรือเครื่องมือที่ใช้ และข้อมูลเกี่ยวกับเวลาที่ทำการวัดข้อมูล โดยข้อมูลบางส่วนภายในเอกสารนี้จะแสดงผลด้วยมาตรฐานเซ็นเซอร์เอ็มแอล (SensorML) ข้อดี

ประการหนึ่งคือมีความสามารถส่งผลลัพธ์ในรูปแบบเอกสารเจสัน (JavaScript Object Notation : JSON) ได้ ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนข้อมูลทำได้รวดเร็วขึ้นเนื่องจากแฟ้มเจสันมีโครงสร้างที่ซับซ้อนน้อยกว่าเอกสารเอ็กซ์เอ็มแอล และอยู่ในรูปแบบที่ภาษาจาวาสคริปต์ (JavaScript) สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรง



ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี