

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทนี้เป็นารอธิบายแนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่เกี่ยวข้องโดยแบ่งหัวข้อการนำเสนอเพื่อให้เกิดความสะดวกในการทำความเข้าใจ ดังนี้

1. ทฤษฎีเกี่ยวกับฝน
2. ชนิดของฝนในประเทศไทย
3. การพยากรณ์อากาศ
4. ทฤษฎีของฟัซซีเซต (Fuzzy set)
5. อัลกอริธึมแบบอาณานิคมมด (Ant-Colony Optimization, ACO)
6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

รายละเอียดของแต่ละหัวข้อจะอธิบายดังต่อไปนี้

ทฤษฎีเกี่ยวกับฝน

น้ำฝนถือเป็นข้อมูลที่สำคัญของวัฏจักรน้ำ และเป็นข้อมูลที่มีความสำคัญในด้านการวางแผนในการปฏิบัติงานและเกี่ยวกับการออกแบบด้านวิศวกรรมแหล่งน้ำรวมถึงการนำไปใช้และป้องกันภัยพิบัติอันเนื่องมาจากน้ำฝน น้ำมีความสำคัญต่อมนุษย์ ทั้งด้านการเกษตรหรือแม้แต่อุตสาหกรรม (A.D.Ward และ S.W Trimble. 2004)

1. ลักษณะของฝน (Precipitation characteristics)

แบ่งเป็น (กรมอุตุนิยมวิทยา. 2540)

1.1 การกระจายของฝน (Rainfall distribution) การตกของฝนที่กระจายครอบคลุมพื้นที่ขนาดเล็ก อาจมีผลต่อการเกิดอุทกภัยในพื้นที่ ในขณะที่เดียวกันหากมีฝนตกหนักและกระจายครอบคลุมพื้นที่ขนาดใหญ่ ทำให้เกิดอุทกภัยได้

1.2 ความหนักเบาของฝน (Rainfall intensity) ได้แก่ ปริมาณน้ำฝนที่ตกต่อหน่วยเวลาโดยทั่วไปความแรงของฝนวัดต่อหนึ่งชั่วโมง (มิลลิเมตรต่อชั่วโมง) ซึ่งมีความหนักเบาแตกต่างกัน ไป หากฝนมีความหนักเบาสูง ก็จะทำให้เกิดน้ำไหลบ่าหน้าดินได้ง่าย เป็นที่มาของการเกิดน้ำท่วมหรืออุทกภัย

1.3 ความยาวนานของฝนที่ตก (Rainfall duration) ถ้าฝนตกหนักในช่วงเวลาสั้น ๆ อาจทำให้เกิดอุทกภัยแบบฉับพลันได้ แต่ถ้าหากฝนตกหนักและนาน ทำให้เกิดอุทกภัยรุนแรงได้

1.4 ปริมาณฝน (Amount of rainfall) ปริมาณน้ำฝนทั้งหมดสามารถใช้ในการจำแนกชนิดภูมิอากาศหรือแบ่งเขตค่าความชื้นในพื้นที่ที่มีฝน

2. การวัดปริมาณน้ำฝน

การวัดปริมาณน้ำฝนมี 3 วิธีหลัก ๆ ดังนี้

2.1 การวัดปริมาณน้ำฝนจากอากาศโดยสถานีภาคพื้นดิน

ปริมาณน้ำฝนโดยทั่วไปจะวัดเป็นความสูงในแนวดิ่ง เช่น มิลลิเมตร เครื่องมือที่วัดปริมาณน้ำฝนจากอากาศ (Precipitation Gages) เนื่องจากน้ำฝนจากอากาศในประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นฝน ดังนั้นเครื่องมือที่ใช้คือ Raingage การวัดปริมาณน้ำฝนโดยใช้เครื่องมือวัดต่าง ๆ ดังที่กล่าวอาจมีข้อผิดพลาดได้ เครื่องวัดที่ใช้กันทั่วไปมี 3 ชนิด คือ

2.1.1 แบบถังกระดก (Tipping-bucket Gage)

2.1.2 แบบชั่งน้ำหนัก (Weighting-type Gage)

2.1.3 แบบทุ่นลอย (Float Recording Gage)

2.2 การวัดปริมาณน้ำฝนจากอากาศด้วยเรดาร์

2.3 การวัดปริมาณน้ำฝนจากอากาศด้วยดาวเทียมอุตุนิยมวิทยา

ในการศึกษาสมดุลของน้ำจะใช้ข้อมูลน้ำฝนจากเครื่องวัดบนพื้นดิน หรือจากเรดาร์ไม่เพียงพอ ดาวเทียมไม่สามารถวัดน้ำฝนได้โดยตรงแต่ในการประยุกต์ข้อมูลจากดาวเทียมมาใช้งาน คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขความสว่าง (Brightness Number) กับปริมาณฝนที่วัดได้จริง ระดับความสว่าง (Degree of Brightness) เป็นตัวบ่งบอกอุณหภูมิหรือความสูงของเมฆ

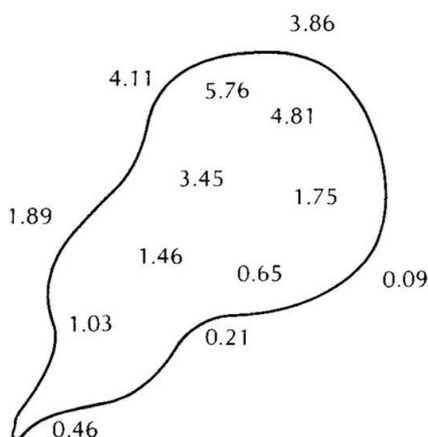
เกณฑ์การพิจารณาปริมาณฝนในระยะเวลา 24 ชั่วโมงของแต่ละวันตั้งแต่เวลา 07.00 น. ของวันหนึ่งถึงเวลา 07.00 น. ของวันรุ่งขึ้น ตามลักษณะของฝนที่ตกในประเทศที่อยู่ในเขตร้อนย่านมรสุมมีดังนี้

ฝนวัดจำนวนไม่ได้	ปริมาณฝนน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร
ฝนเล็กน้อย	ปริมาณฝนระหว่าง 0.1 - 10.0 มิลลิเมตร
ฝนปานกลาง	ปริมาณฝนระหว่าง 10.1 - 35.0 มิลลิเมตร
ฝนหนัก	ปริมาณฝนระหว่าง 35.1 - 90.0 มิลลิเมตร
ฝนหนักมาก	ปริมาณฝนตั้งแต่ 90.1 มิลลิเมตรขึ้นไป

3. วิธีค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝน

ในกรณีที่สถานีวัดกระจายตัวอย่างไม่เป็นระบบ ไม่ครอบคลุมพื้นที่เท่า ๆ กันอย่างทั่วถึง การหาค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนที่ถูกต้อง (Effective uniform depth (EUD) of precipitation) ของพื้นที่ศึกษาใด ๆ สามารถทำได้ 3 วิธี ดังนี้

3.1 วิธีเฉลี่ยเลขคณิต (Arithmetic mean) วิธีนี้จะให้ค่าเฉลี่ยที่ถูกต้อง ถ้าหากสถานีวัดมีการกระจายตัวอย่างเหมาะสม และครอบคลุมพื้นที่เท่า ๆ กัน ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนที่ถูกต้อง (EUD) ได้จากผลรวมของปริมาณน้ำฝนทุกสถานีหารด้วยจำนวนสถานีดังภาพที่ 2.1

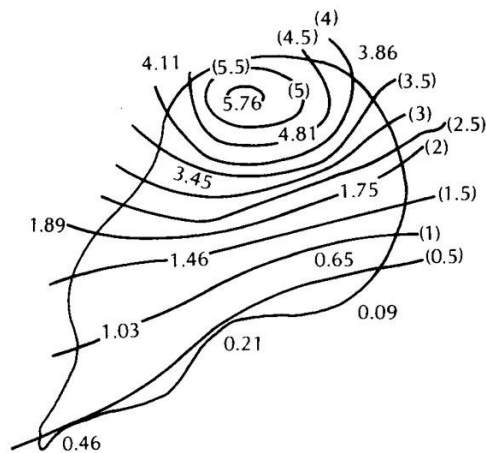


ภาพที่ 2.1 ตำแหน่งสถานีวัดอยู่ที่ตำแหน่งทศนิยม

ค่าเฉลี่ย = $(1.03 + 0.65 + 1.46 + 1.75 + 4.81 + 3.45 + 5.76)/7 = 2.70$ เซนติเมตร

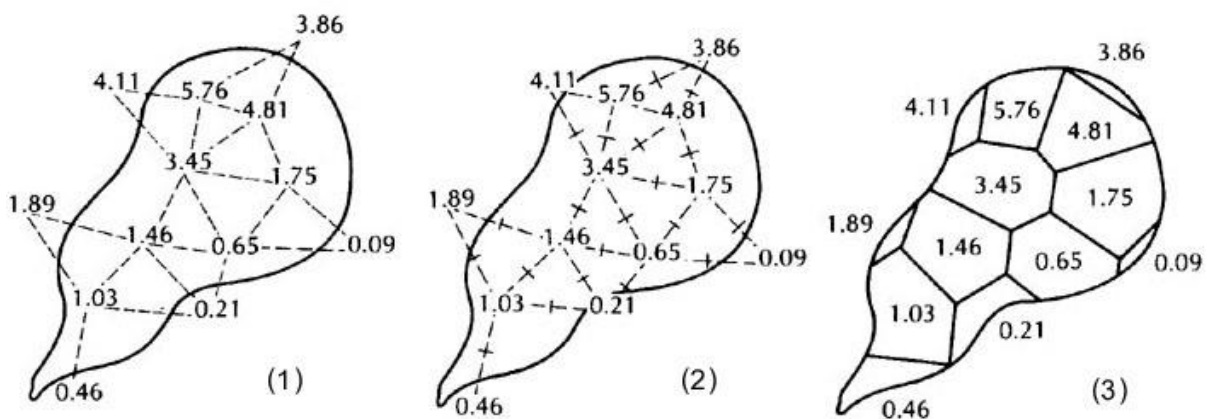
หมายเหตุ : ในการหาค่าเฉลี่ยไม่ได้นำ ค่าปริมาณน้ำฝนจากหกสถานีที่อยู่นอกพื้นที่รับน้ำมาใช้

3.2 เส้นชั้นน้ำฝนที่เท่ากัน (Isohyetal lines) ในลักษณะที่เขียนเส้นชั้นระดับความสูง (Elevation contour) ทั่ว ๆ ไป เมื่อเขียนเส้นชั้นน้ำฝนที่เท่ากันแล้วทำการวัดพื้นที่ระหว่างเส้นชั้นน้ำฝนที่อยู่ติดกัน โดยใช้เครื่องมือวัดพื้นที่ (Planimeter) ค่าเฉลี่ยของน้ำฝนของพื้นที่ใด ๆ ที่อยู่ระหว่างเส้นชั้นน้ำฝนสองเส้น ก็คือ ค่าเฉลี่ยของเส้นน้ำฝนทั้งสองเส้นนั้น ๆ ทำ การหาค่าเฉลี่ยในลักษณะดังกล่าวสำหรับพื้นที่ทั้งหมด ซึ่งค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนที่ถูกต้อง (EUD) ของพื้นที่รับน้ำทั้งหมด ก็คือผลรวมของค่าเฉลี่ยที่เฉลี่ยน้ำหนักตามพื้นที่ของแต่ละพื้นที่ดังภาพที่ 2.2 วิธีนี้มีข้อโดยตรงที่ว่าจะต้องมีการเขียนเส้นชั้นน้ำฝนใหม่ทุกครั้งที่จะต้องมีการหาค่าเฉลี่ย



ภาพที่ 2.2 แสดงการเขียนเส้นน้ำฝนที่เท่ากัน (Isohyetal contour)

3.3 วิธีเฉลี่ยไทเซน (Thiessen method) วิธีนี้ใช้ในกรณีที่สถานีตรวจวัดมีการกระจายตัวอย่างไม่เป็นระบบ ไม่ครอบคลุมที่กันอย่างทั่วถึงวิธีการโดยการลากเส้นตรงเชื่อมสถานีวัดน้ำฝนที่ใกล้เคียงกันให้เป็นรูปสามเหลี่ยม จากนั้นลากเส้นแบ่งครึ่งให้ตั้งฉากกับแต่ละด้านของรูปสามเหลี่ยมที่สร้างขึ้น ก็จะได้รูปหลายเหลี่ยม (Polygons) หลาย ๆ รูป ทำการวัดพื้นที่ที่อยู่ภายในรูปหลายเหลี่ยมแต่ละรูป และคำนวณพื้นที่ดังกล่าวออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่รับน้ำทั้งหมดผลคูณระหว่างปริมาณน้ำฝนที่แต่ละสถานีกับพื้นที่ที่คำนวณออกมดังกล่าวจะเป็นค่าเฉลี่ยน้ำฝนของพื้นที่รูปหลายเหลี่ยมนั้น ๆ ทำเช่นเดียวกันกับรูปสามเหลี่ยมทุกรูป ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนที่ถูกต้อง (EUD) ของพื้นที่รับน้ำทั้งหมดก็คือ ผลรวมของค่าเฉลี่ยที่เฉลี่ยน้ำหนักตามพื้นที่ดังภาพที่ 2.3



ภาพที่ 2.3 การหาค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝน โดยวิธีเฉลี่ยไทเซน (Thiessen method)

ชนิดของฝนในประเทศไทย

ในประเทศไทย มีการเกิดฝนประเภทต่าง ๆ ดังนี้

1. ฝนปะทะภูเขา (Orographic rain) เป็นฝนที่เกิดจากกระแสลมพัดพาอากาศชื้นจากทะเลและมหาสมุทรมาปะทะกับภูเขา และถูกผลักดันให้ลอยขึ้นไปตามความลาดเขา เมื่ออากาศเย็นลงจนถึงจุดหนึ่ง ความชื้นในอากาศอึดตัวและไอน้ำจะกลั่นตัวเป็นละอองน้ำจับตัวกันเป็นเมฆ จนกระทั่งตกลงมาด้านต้นลมภูเขา (Windward side) ฝนประเภทนี้ส่วนมากจะตกเบาบางทางด้านต้นลมของภูเขา แต่จะตกหนักถึงหนักมากถ้ามีลักษณะของกระแสลมกำลังแรง หรือการยกตัวของอากาศขึ้นสู่เบื้องบนอย่างรวดเร็วเข้ามาประกอบด้วย ในบริเวณที่มีภูมิประเทศเป็นเทือกเขาจะปรากฏฝนลักษณะนี้

2. ฝนเนื่องจากการพาความร้อน (Convective rain หรือ Thunder storm rain) เป็นฝนที่เกิดจากการระเหยน้ำเป็นไอน้ำลอยขึ้นไปในอากาศร่วมกับอากาศร้อน เนื่องจากพื้นโลกได้รับพลังงานจากดวงอาทิตย์ เป็นฝนที่ตกในช่วงเวลาสั้น ๆ อาจจะตกหนักและตกเพียงเฉพาะบริเวณแคบ ๆ มักเกิดในช่วงฤดูร้อน ซึ่งตอนกลางคืนท้องฟ้าโปร่ง แต่ตอนกลางวันพื้นดินได้รับความร้อน ทำให้มวลอากาศที่ปกคลุมอยู่เหนือพื้นดินลอยตัวสูงขึ้นและไม่เสถียรภาพ ประกอบกับลักษณะอากาศในแนวตั้งค่อนข้างชื้น จึงก่อให้เกิดเมฆในตอนกลางวัน และเมื่อยอดเมฆสูงขึ้นจนกลายเป็นเมฆฝนในช่วงบ่ายและค่ำเมฆเหล่านี้ก่อตัวหนาแน่นขึ้นเป็นก้อนใหญ่ เรียกว่า เมฆก่อตัวในแนวตั้ง (Convective cloud) ได้แก่ เมฆคิวมูลัส (Cumulus) และเมฆคิวมูโลนิมบัส (Cumulonimbus) หรือเมฆฝนฟ้าคะนอง ดังนั้นจึงมักจะมีพายุฝนฟ้าคะนองรวมอยู่ด้วยเสมอ ซึ่งมักเกิดมากในเดือนพฤษภาคม

3. ฝนจากพายุเขตร้อน (Cyclonic rain) ลักษณะของพายุหมุนเขตร้อนจะมีลมพัดเวียนเข้าหาศูนย์กลางคล้ายวงก้นหอยในทิศทางทวนเข็มนาฬิกา สำหรับพายุที่เกิดในซีกโลกเหนือที่ศูนย์กลางของพายุเป็นบริเวณที่มีความกดอากาศต่ำสุด มีเมฆชั้นต่ำก่อตัวในแนวตั้งหนาแน่นโดยรอบ ซึ่งเมื่อเคลื่อนตัวผ่านไปไต่ จะทำให้มีฝนตกหนักติดต่อกับหลายวันและมีลมแรงก่อให้เกิดความเสียหายได้ โดยปกติมักก่อตัวในทะเลซึ่งมีความชื้นสูงแล้วเคลื่อนตัวเข้าสู่พื้นแผ่นดิน เช่นพายุที่ก่อตัวในทะเลจีนใต้หรือมหาสมุทรแปซิฟิก พายุหมุนเขตร้อนที่เคลื่อนผ่านประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2494 ถึง พ.ศ. 2540 มีจำนวน 162 ครั้ง เฉลี่ยประมาณปีละ 3.44 ครั้ง

4. ฝนจากแนวปะทะ อากาศ ร้อน (Warm front) เป็นแนวปะทะระหว่าง อากาศในซีกโลกเหนือและซีกโลกใต้เกิดขึ้น เนื่องจากโลกหมุนจากตะวันตกไปตะวันออก และที่ละติจูดต่ำประมาณ 0-30 องศาเหนือและใต้ โลกจะหมุนเร็วกว่าอากาศที่ห่อหุ้มโลกอยู่ เกิดลักษณะที่เรียกว่า ลมสินค้า จากเส้นศูนย์สูตรไปทางซีกโลกเหนือเรียกว่า ลมสินค้าตะวันออกเฉียงเหนือ ส่วนในซีกโลกใต้เรียกว่า ลมสินค้าตะวันออกเฉียงใต้ ลมสองชนิดนี้จะพัดสอบเข้าหากันเป็นแนวตรงเส้นศูนย์สูตร แต่แนวนี้เคลื่อนที่ไปตามเดคลิเนชันของดวงอาทิตย์ เรียกว่า แนวสอบเข้าหากันเขตร้อน (Inter - tropical

convergence zone : ITCZ) หรือ ร่องมรสุม (Monsoon trough) หรือร่องความกดอากาศต่ำ (Low pressure trough) เกิดฝนตกหนักบริเวณกว้าง

การพยากรณ์อากาศ

1. การพยากรณ์อากาศ

การคาดหมายสถานะอากาศของลมฟ้าอากาศ รวมทั้งปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่จะเกิดขึ้นในช่วงเวลาข้างหน้า ตัวอย่างเช่น การคาดหมายลมฟ้าอากาศใน 24 ชั่วโมงข้างหน้าจะมีลักษณะอย่างไร เช่น จะมีฝนหรือฝนฟ้าคะนองหรือไม่ ลมจะพัดทิศอะไร ด้วยความเร็วขนาดไหน เป็นต้น การพยากรณ์อากาศแบ่งได้ตามระยะเวลาของการคาดหมาย ดังนี้ (สถานีอุตุนิยมวิทยานครสวรรค์ อ.เมือง จ.นครสวรรค์. 2552)

- 1.1 พยากรณ์อากาศระยะปัจจุบัน (Now cast) พยากรณ์ในเวลาไม่เกิน 2 ชั่วโมง
- 1.2 พยากรณ์อากาศระยะสั้นมาก (Very short-range Forecast) พยากรณ์ระหว่าง 3-12 ชั่วโมง
- 1.3 พยากรณ์อากาศระยะสั้น (Short-range Forecast) พยากรณ์ระหว่าง 12-72 ชั่วโมง
- 1.4 พยากรณ์อากาศระยะปานกลาง (Medium-range Forecast) พยากรณ์ระหว่าง 3-10 วัน
- 1.5 พยากรณ์อากาศระยะนาน (Long-range Forecast) พยากรณ์ตั้งแต่ 10 วันขึ้นไป

2. องค์ประกอบของการพยากรณ์อากาศ

การพยากรณ์อากาศมีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ประการ คือ การตรวจอากาศ การสื่อสารข้อมูลข่าวอากาศและการวิเคราะห์ลักษณะอากาศ

2.1 การตรวจอากาศ

การตรวจอากาศนั้น กระทำเพื่อให้ได้ทราบถึงสถานะอากาศปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วย การตรวจอากาศผิวพื้นและการแผ่รังสี การตรวจอากาศชั้นบน การตรวจอากาศทะเล การตรวจอากาศด้วยดาวเทียม การตรวจอากาศด้วยเรดาร์ และการตรวจอากาศด้วยเครื่องมือตรวจอากาศอัตโนมัติ

2.2 การสื่อสารข้อมูลข่าวอากาศ

การสื่อสารข้อมูลข่าวอากาศ เป็นการรับส่งข้อมูลที่ได้จากการตรวจอากาศ และการสื่อสารข้อมูลนั้นนับว่ามีความสำคัญต่อการพยากรณ์อากาศเป็นอย่างยิ่ง แม้ว่าจะมีการตรวจอากาศ แต่ถ้ามี่ระบบการสื่อสารข้อมูลแล้ว การพยากรณ์อากาศก็ไม่สามารถที่จะกระทำได้ ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่

ตรวจวัดได้จากสถานีอุตุนิยมวิทยาในส่วนภูมิภาค จะส่งมายังส่วนกลางผ่านระบบโทรคมนาคม อุตุนิยมวิทยา ข้อมูล และข่าวสารเหล่านี้ จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์ และการพยากรณ์อากาศต่อไป อย่างไรก็ตามข้อมูลอุตุนิยมวิทยาในประเทศนั้นไม่เพียงพอที่จะใช้ในการพยากรณ์อากาศได้ เพราะระบบลมฟ้าอากาศนอกประเทศมีส่วนอย่างมากต่อสภาวะอากาศในประเทศไทยด้วย จึงต้องมีการแลกเปลี่ยนข้อมูลกับต่างประเทศ โดยผ่านทางระบบโทรคมนาคมรอบโลก (Global Telecommunication System – GTS) ซึ่งประเทศไทยได้รับเลือกให้เป็นศูนย์กลางการสื่อสารของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

2.3 การวิเคราะห์ลักษณะอากาศ

สามารถแบ่งขั้นตอนเป็น 5 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การบันทึกผลการตรวจอากาศที่ได้รับทั้งหมดทั้งในประเทศและต่างประเทศ ลงบนแผนที่หรือแผนภูมิทางอุตุนิยมวิทยาชนิดต่าง ๆ เช่นแผนที่อากาศผิวพื้น แผนที่อากาศชั้นบน แผนภูมิการหยั่งอากาศชั้นบนด้วยสัญลักษณ์มาตรฐานทางอุตุนิยมวิทยา

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์ผลการตรวจอากาศที่ได้รับจากขั้นตอนแรก โดยการลากเส้นแสดงค่าองค์ประกอบทางอุตุนิยมวิทยา เช่น เส้นความกดอากาศเท่าที่ระดับน้ำทะเลเฉลี่ย เพื่อแสดงตำแหน่งและความรุนแรงของระบบลมฟ้าอากาศ เส้นทิศทาง และความเร็วลมในระดับความสูงต่างๆ เพื่อแสดงลักษณะอากาศในระดับบน และเส้นแสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามความสูง เพื่อแสดงเสถียรภาพของบรรยากาศ ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการเกิดเมฆและฝน

ขั้นตอนที่ 3 การคาดหมายการเปลี่ยนแปลง และการเคลื่อนที่ของตัวระบบลมฟ้าอากาศที่วิเคราะห์ได้ในขั้นตอนที่ 2 โดยใช้วิธีการพยากรณ์อากาศแบบต่างๆ

ขั้นตอนที่ 4 การออกคำพยากรณ์ ณ ช่วงเวลาและบริเวณที่ต้องการ โดยพิจารณาจากตำแหน่งและความรุนแรงของระบบลมฟ้าอากาศที่ได้ดำเนินการไว้แล้วในขั้นตอนที่ 3

ขั้นตอนที่ 5 การส่งคำพยากรณ์อากาศไปยังสื่อมวลชน เพื่อเผยแพร่ต่อไปสู่ประชาชนและส่งไปยังหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อดำเนินการต่อไปตามความเหมาะสม เช่น การป้องกันและบรรเทาภัยพิบัติที่เกิดจากลมฟ้าอากาศ

3. เกณฑ์ที่ใช้ในการพยากรณ์อากาศ

เกณฑ์การพิจารณาปริมาณฝนในระยะเวลา 24 ชั่วโมงของแต่ละวันตั้งแต่เวลา 07.00 น. ของวันหนึ่งถึงเวลา 07.00 น. ของวันรุ่งขึ้น

ฝนตกวัดจำนวนไม่ได้	ปริมาณน้อยกว่า 0.1 มิลลิเมตร
ฝนตกเล็กน้อย	ปริมาณตั้งแต่ 0.1-10.0 มิลลิเมตร
ฝนตกปานกลาง	ปริมาณตั้งแต่ 10.1-35.0 มิลลิเมตร
ฝนตกหนัก	ปริมาณตั้งแต่ 35.1-90.0 มิลลิเมตร

ฝนตกหนักมาก	ปริมาณตั้งแต่ 90.1 มิลลิเมตรขึ้นไป
4. การพยากรณ์อากาศบริเวณที่มีฝนตก	
ฝนบางแห่ง	มีฝนไม่เกิน 20 % ของพื้นที่
ฝนเป็นแห่งๆ	มีฝนเกิน 20 % แต่ไม่เกิน 40 % ของพื้นที่
ฝนกระจาย	มีฝนเกิน 40 % แต่ไม่เกิน 60 % ของพื้นที่
ฝนเกือบทั่วไป	มีฝนเกิน 60 % ของพื้นที่ แต่ไม่เกิน 80 % ของพื้นที่
ฝนทั่วไป	มีฝนเกิน 80 % ของพื้นที่ฝนเป็นบริเวณกว้างมีฝนอยู่ในขอบเขตของพายุ
5. เกณฑ์อุณหภูมิของอากาศ	
อากาศร้อน	มีอุณหภูมิตั้งแต่ 35 องศาเซลเซียส แต่ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส
อากาศร้อนจัด	มีอุณหภูมิตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส ขึ้นไป
อากาศเย็น	มีอุณหภูมिन้อยกว่า 23 องศาเซลเซียส ลงไปถึง 16 องศาเซลเซียส
อากาศหนาว	มีอุณหภูมिन้อยกว่า 16 องศาเซลเซียส ลงไปถึง 8 องศาเซลเซียส
อากาศหนาวจัด	มีอุณหภูมिन้อยกว่า 8 องศาเซลเซียส ลงไป
6. ท้องฟ้าและเมฆ	
ท้องฟ้าแจ่มใส (Fine)	ไม่มีเมฆ/น้อยกว่า 1 ส่วน
ท้องฟ้าโปร่ง (Fair)	จำนวนเมฆ ตั้งแต่ 1-3 ส่วน
เมฆบางส่วน (Partly cloudy)	จำนวนเมฆ ระหว่าง 3-5 ส่วน
เมฆเป็นส่วนมาก (Cloudy)	จำนวนเมฆ ระหว่าง 5-8 ส่วน
เมฆมาก (Very Cloudy)	จำนวนเมฆ ระหว่าง 8-9 ส่วน
เมฆเต็มท้องฟ้า (Overcast)	จำนวนเมฆ 10 ส่วน

หมายเหตุ : คำว่า “ส่วน” หมายถึง 1/10 ของท้องฟ้า

7. สถานีวัดสภาพท้องฟ้า

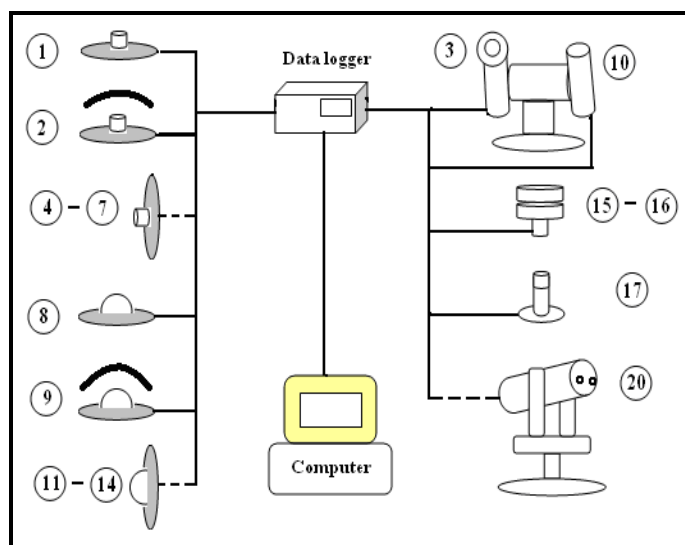
สถานีวัดสภาพท้องฟ้าของคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เริ่มติดตั้งอุปกรณ์บนชั้น 5 ของอาคารคณะวิศวกรรมศาสตร์ เมื่อวันที่ 1 เดือน กันยายน พ.ศ. 2547 ตั้งอยู่ที่พิกัดที่ละติจูด $16^{\circ}14'$ เหนือ, ลองจิจูด $103^{\circ}15'$ ตะวันออก ขณะที่พิกัดศูนย์กลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยอยู่ที่ $16^{\circ}11'$ เหนือ, ลองจิจูด $103^{\circ}04'$ ตะวันออก สถานีวัด

สภาพท้องฟ้าเริ่มดำเนินการเก็บข้อมูลเมื่อวันที่ 16 กันยายน พ.ศ. 2547 ข้อมูลที่ทำการบันทึกประกอบด้วยรายการเครื่องมือดังตารางที่ 2.1

ภาพที่ 2.4 (ก) ภาพโดยรวมของสถานีวัดที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม ภาพที่ 2.4 (ข) แสดงอุปกรณ์ของสถานีวัดสภาพท้องฟ้าตามมาตรฐาน CIE มหาวิทยาลัยมหาสารคาม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2.4 (ก) สถานีวัดสภาพท้องฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

(ข) ผังการติดตั้งเครื่องมือสำหรับเก็บข้อมูล

8. ลักษณะของสภาพท้องฟ้า

เมื่อพิจารณาการแบ่งประเภทของสภาพท้องฟ้า โดยทั่วไปแล้วจะพิจารณาจากปริมาณของเมฆในท้องฟ้า ซึ่งลักษณะของท้องฟ้าสามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ลักษณะ คือ

8.1 สภาพท้องฟ้าโปร่งไม่มีเมฆปกคลุม (Clear sky)

สภาพท้องฟ้าลักษณะนี้เกิดจาก 2 องค์ประกอบ คือ แสงกระจายจากท้องฟ้า (Diffuse Illumination) และแสงตรงจากดวงอาทิตย์ (Direct Illumination) ซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของดวงอาทิตย์เป็นหลัก ความส่องสว่างของพื้นผิวแนวระนาบจากแสงกระจายของท้องฟ้า หากพิจารณาเพียงครึ่งส่วนท้องฟ้า จะมีค่าความส่องสว่างอยู่ระหว่าง 300 – 2,200 ฟุตแคนเดิล และมีค่าเฉลี่ย 1,000 ฟุตแคนเดิล ความส่องสว่างของพื้นผิวในแนวตั้งขึ้นอยู่กับมุมเอซิมัทและมุมระดับความสูงของดวงอาทิตย์ เนื่องจากปริมาณความสว่างที่ไม่สม่ำเสมอของท้องฟ้าลักษณะนี้มีความสว่างสูงในทิศทางที่อยู่ใกล้ดวงอาทิตย์ และลดต่ำลงเมื่ออยู่ห่าง หรือด้านตรงข้ามดวงอาทิตย์

8.2 สภาพท้องฟ้ามีเมฆปกคลุมบางส่วน (Partly cloudy sky or intermediate)

การหาค่าความสว่างของท้องฟ้าลักษณะนี้ทำได้ยากเนื่องจากการแปรเปลี่ยนของเมฆอยู่ตลอดเวลา ค่าความส่องสว่างหากเมฆที่ปกคลุมมีลักษณะเบาบาง ค่าความส่องสว่างจากท้องฟ้ามีค่ามากกว่าที่ได้จากท้องฟ้าแบบโปร่ง 10 % ถึง 15 % เนื่องจากการสะท้อนแสงของเมฆ หากเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้าเป็นกลุ่มหนาทึบ หรือมีสีดำ เช่น เมฆฝน อาจทำให้แสงกระจายที่สะท้อนจากท้องฟ้าและปริมาณแสงตรงจากดวงอาทิตย์ถูกกั้น นั่นคือแสงจะถูกดูดกลืนมากกว่าสะท้อน ทำให้ค่าความสว่างจากท้องฟ้าลดลง

8.3 สภาพท้องฟ้าที่ปกคลุมด้วยเมฆมาก (Overcast sky)

สภาพท้องฟ้าที่ปกคลุมด้วยเมฆมากจนไม่สามารถมองเห็นแหล่งกำเนิดแสงหรือดวงอาทิตย์ได้ มีความสว่างในปริมาณที่แตกต่างกัน ความสว่างระดับสูงสุดที่ส่องกระทบพื้นผิวในระนาบมีความสว่างมากกว่าในแนวระนาบที่ส่องกระทบพื้นผิวในแนวตั้ง ประมาณ 3 เท่า อีกกรณี คือ มีความสว่างในปริมาณที่สม่ำเสมอกับความสว่างในระดับสูงสุดที่ส่องกระทบพื้นผิวในแนวระนาบ มีความสว่างเท่ากับในแนวระนาบ ที่ส่องกระทบพื้นผิวในแนวตั้ง

9. การแบ่งสภาพท้องฟ้า

9.1 การแบ่งสภาพท้องฟ้าแบบ Sky ratio

ในความเป็นจริงสภาพท้องฟ้าเกิดเป็นสภาพท้องฟ้าที่ไม่มีเมฆเลย หรือมีเมฆปกคลุมทั้งหมดนั้นเกิดขึ้นได้ยากและน้อยครั้งมากจึงคิดแทนด้วยสมการของสภาพท้องฟ้าแบบมีเมฆปกคลุมทั้งหมดของคณะกรรมการระหว่างชาติว่าด้วยความสว่าง แต่ทาง CIE ก็ได้ทำการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างความสว่างของสภาพท้องฟ้าจากการแบ่งสภาพท้องฟ้าโดยแบ่งสภาพเมฆและการปกคลุมของเมฆ การแบ่งระดับสภาพท้องฟ้าจะแบ่งหนึ่งในสิบส่วนเท่า ๆ กัน แต่ละส่วนจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าสภาพ

ท้องฟ้าอยู่ในสภาพอย่างไร ซึ่ง 0 เป็นสภาพที่ไม่มีเมฆ และ 1.0 เป็นสภาพที่มีเมฆมาก ค่า Sky ratio จะได้อัตราส่วนระหว่างรังสีกระจายและรังสีรวม ดังสมการ 2.1

$$SR = \frac{E_{ed}}{E_{eg}} \quad (2.1)$$

เมื่อ SR คือ ดัชนี Sky ratio
 E_{ed} คือ รังสีกระจาย (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 E_{eg} คือ รังสีรวม (วัตต์ต่อตารางเมตร)

จากที่กล่าวมาข้างต้นค่า Sky ratio คือ ค่าของอัตราส่วนของปริมาณเมฆบนท้องฟ้า นั่นเอง เพราะเมฆเป็นปัญหาสำคัญสำหรับการวัดค่าพลังงานและแสงสว่างจากท้องฟ้า ดังนั้นการนำเอาอัตราส่วนของเมฆมาคิดจึงทำให้การแบ่งสภาพท้องฟ้าของเราเพื่อที่จะมาหาค่าสมการสำหรับการทำนายค่าพลังงานและแสงสว่างยังมีความถูกต้องมากขึ้น

9.2 การแบ่งสภาพท้องฟ้าแบบ Perez's Clearness index

Perez และคณะ (1993 : 235-245) กลุ่มนักฟิสิกส์ในนครจีนัวของสวิตเซอร์แลนด์ ได้ทำการวัดค่าประสิทธิภาพของแสงสว่างที่เมืองอัลบานีและนิวยอร์กเป็นเวลา 45 วัน ในช่วง ปี ค.ศ. 1985 พบว่าประสิทธิภาพของแสงสว่างแปรตามพารามิเตอร์ 3 ตัวด้วยกัน คือ มุม Zenith, Perez's Clearness index และ Brightness Index

$$\text{Clearness index}(\varepsilon) = \frac{\frac{E_{ed} + E_{es}}{E_{ed}} + 1.041z^3}{1 + 1.041z^3} \quad (2.2)$$

$$\text{Brightness index}(\Delta) = m \frac{E_{ed}}{E_{eo}} \quad (2.3)$$

เมื่อ E_{es} คือ รังสีตรง (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 E_{ed} คือ รังสีกระจาย (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 E_{eo} คือ รังสีอาทิตย์ที่มาถึงชั้นบรรยากาศของโลก (วัตต์ต่อตารางเมตร)
 z คือ มุมเซนนิท (องศา)
 m คือ มวลอากาศ

มุมเซนิตของดวงอาทิตย์ (Solar zenith angle, Ψ) เป็นมุมที่วัดจากจุดกลางของท้องฟ้า มุมนี้จะมีค่า 0 องศา เมื่อตอนเที่ยงตรงตามเวลาสุริยะ ซึ่งสัมพันธ์กับมุมระดับความสูงของดวงอาทิตย์ตั้งสมการ

$$\psi = 90^\circ - \beta \text{ องศา}$$

$$\text{หรือ } \cos \psi = \cos I \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin I \cdot \sin \delta \text{ องศา}$$

ค่า Δ จะแปรผันตามความหนาแน่นของเมฆในท้องฟ้า และค่า ϵ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อท้องฟ้ามีเมฆมาก และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไปจนถึงท้องฟ้าที่ไม่มีเมฆปกคลุม โดยสังเกตจากค่าพารามิเตอร์ของทั้ง 3 ค่า คือ มุม Zenith, Perez's Clearness index และ Brightness Index

ตารางที่ 2.1 ค่าดัชนีการแบ่งสภาพท้องฟ้า

ดัชนีการแบ่งสภาพท้องฟ้า		ลักษณะของสภาพท้องฟ้า
Sky ratio (SR)	Perez's Clearness index (ϵ)	
$0.0 \leq SR \leq 0.3$	$4.500 \leq \epsilon$	ฟ้าใส
$0.3 < SR < 0.8$	$1.065 < \epsilon < 4.500$	ฟ้ามีเมฆบางส่วน
$1.0 \geq SR \geq 0.8$	$1.0 \leq \epsilon \leq 1.065$	ฟ้าครึ้ม

ทฤษฎีของฟัซซีเซต (Fuzzy set)

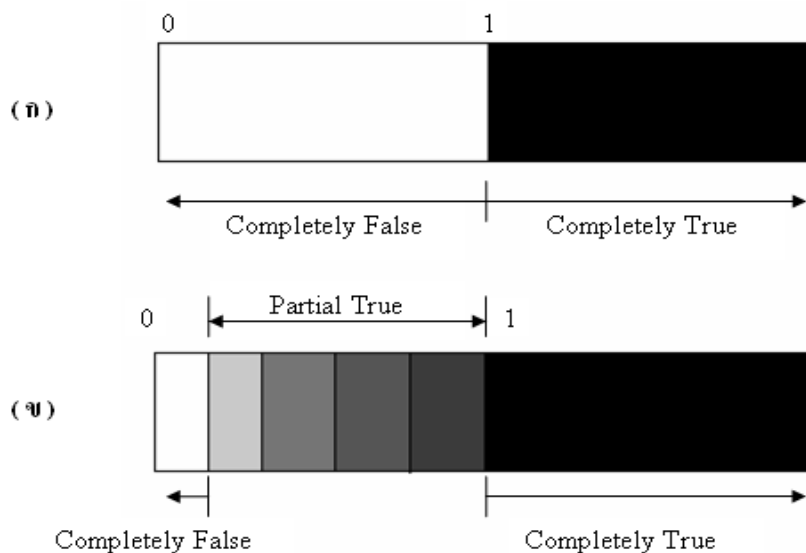
ในปี พ.ศ. 2508 Dr.Zadeh ได้คิดค้นทฤษฎีฟัซซีเซตขึ้นจากนั้นได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ เป็นอย่างมากนับตั้งแต่กลางปี พ.ศ. 2513 จนถึงปัจจุบันซึ่งมีหลักและวิธีการดังต่อไปนี้ (Zadeh and Kacprzyk. 1992)

1. แนวคิดของฟัซซี

ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic) เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการตัดสินใจบนภาวะที่ไม่แน่นอนและความไม่ชัดเจนของข้อมูล เป็นการเตรียมการสำหรับความไม่แน่ชัดของวัตถุประสงค์และยอมให้มีการยืดหยุ่นได้โดยใช้หลักเหตุผลที่เลียนแบบวิธีการคิดที่ซับซ้อนของมนุษย์

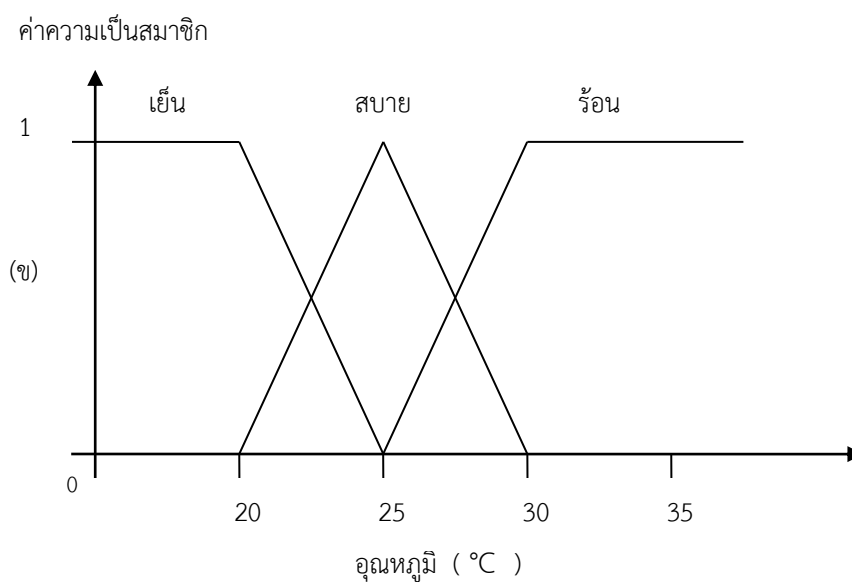
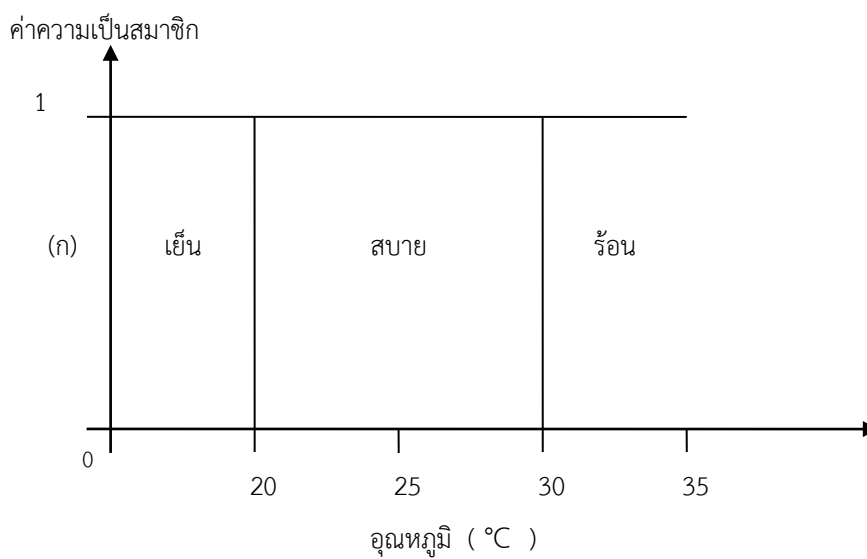
ฟัซซีลอจิกมีลักษณะที่พิเศษกว่าตรรกศาสตร์แบบเดิม (Boolean logic) คือเป็นแนวคิดที่มีการต่อขยายในส่วนของความจริง (Partial true) หรือโตนเทา (Grays) โดยค่าของความจริงจะอยู่

ในช่วงระหว่างจริง (Completely true) กับเท็จ (Completely false) ส่วนในตรรกศาสตร์แบบเดิมจะมีค่าเป็น จริง กับ เท็จ หรือ ขาว กับ ดำ เท่านั้น แสดงในภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.5 ความแตกต่างระหว่าง (ก) ตรรกศาสตร์แบบเดิม (Boolean logic) กับ (ข) ฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic)

ฟัซซีเซต (Fuzzy set) เป็นเซตที่สมาชิกในเซตมีค่าระดับความเป็นสมาชิกตั้งแต่ 0 ถึง 1 ส่วนในเซตแบบเดิม (Classical set) สมาชิกในเซตจะมีค่าความเป็นสมาชิกเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้นในภาพที่ 2.6 แสดงค่าความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิห้องในช่วงของ เย็น สบาย และร้อน โดยเครื่องปรับอากาศจะทำงานตอบสนองในแต่ละช่วงอุณหภูมิไม่เท่ากัน ในกรณีที่อุณหภูมิเท่ากับ 22°C ในภาพที่ 2.6 (ก) จะเป็นสับเซตของอุณหภูมิในช่วงสบาย การควบคุมระบบปรับอากาศจะเปลี่ยนจากเย็นมาอยู่ที่โหมดสบายทันทีและในภาพที่ 2.6 (ข) จะเป็นสับฟัซซีเซตของอุณหภูมิทั้ง 2 ช่วงคือ เย็น และสบาย โดยค่าความเป็นสมาชิกในช่วงของเย็นจะมีมากกว่าในช่วงของสบาย การควบคุมระบบปรับอากาศยังคงครอบคลุมโหมดการทำงานในช่วงเย็นอยู่ ซึ่งทำให้ลดภาระในการทำงานของเครื่องปรับอากาศลงได้



ภาพที่ 2.6 แสดงฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของอุณหภูมิ (ก) เซตแบบเดิม (Classical set) และ (ข) ฟัซซีเซต (Fuzzy set)

2. นิยามฟัซซีเซต

Jang, Sun and Mizutani (2000) ได้ให้นิยามของฟัซซีเซตและฟังก์ชันความเป็นสมาชิก คือ

$$\underline{A} = \{x, \mu_A(x) | x \in X\} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\mu_A(x)$ = ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function, MF)
 x = ค่าความเป็นสมาชิก (Membership value) มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1

3. การดำเนินการของฟัซซีเซต

Ross (1995) การดำเนินการของฟัซซีเซตจะคล้ายกับการของเซตแบบเดิม คือการดำเนินการ Union, Intersection และ Complement ดังภาพที่ 2.7 (ก) ถึง (ค) สามารถแสดงได้ดังต่อไปนี้

3.1 Union ของฟัซซีเซต อาจเรียกได้เป็น OR operation

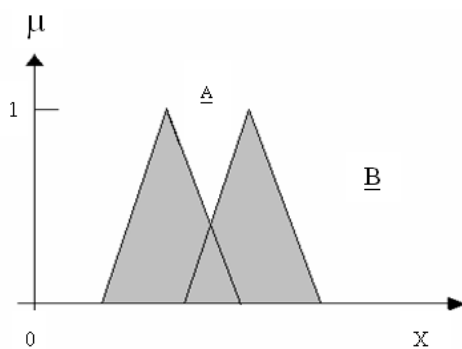
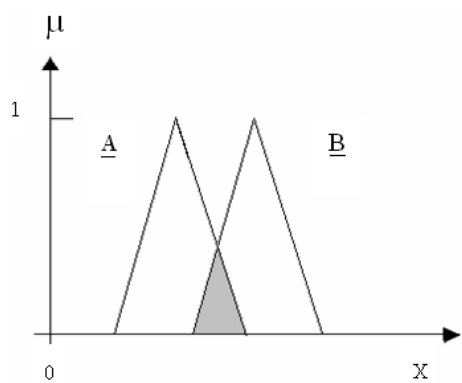
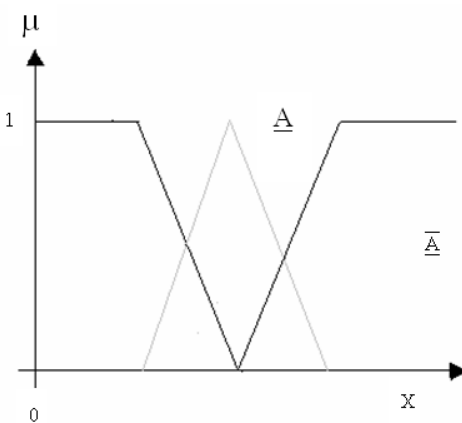
$$\begin{aligned}\mu_{\underline{A} \cup \underline{B}}(x) &= \mu_{\underline{A}}(x) \vee \mu_{\underline{B}}(x) \\ &= \max(\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x))\end{aligned}\quad (2.5)$$

3.2 Intersection ของฟัซซีเซต อาจเรียกได้เป็น AND operation

$$\begin{aligned}\mu_{\underline{A} \cap \underline{B}}(x) &= \mu_{\underline{A}}(x) \wedge \mu_{\underline{B}}(x) \\ &= \min(\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x))\end{aligned}\quad (2.6)$$

3.3 Complement ของฟัซซีเซต

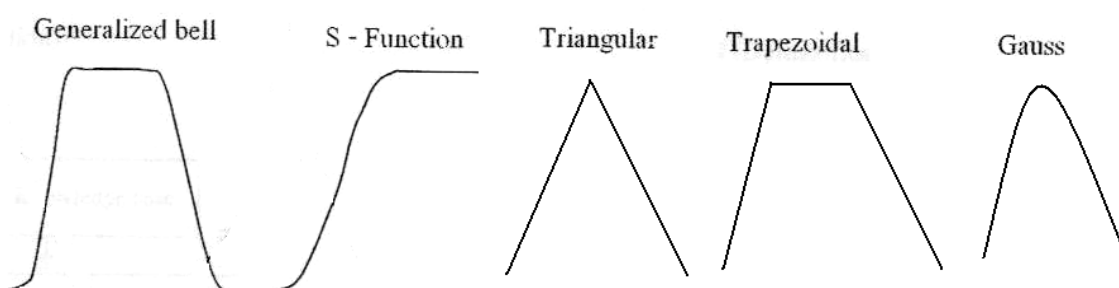
$$\mu_{\overline{\underline{A}}}(x) = 1 - \mu_{\underline{A}}(x)\quad (2.7)$$

(ก) Union ของฟัซซีเซต $\underline{A}, \underline{B}$ (ข) Intersection ของฟัซซีเซต $\underline{A}, \underline{B}$ (ค) Complement ของฟัซซีเซต \underline{A} ภาพที่ 2.7 การดำเนินการ Union, Intersection, และ Complement ของฟัซซีเซต $\underline{A}, \underline{B}$

4. ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

ฟังก์ชันความเป็นสมาชิก หรือฟังก์ชันตามตัวแปรฟuzzy เป็นฟังก์ชันที่มีการกำหนดระดับความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ใช้ โดยเป็นตัวแทนของความไม่ชัดเจนที่ปรากฏขึ้นซึ่งอาจเป็นเพราะความไม่แน่ชัด ความคลุมเครือ หรือความกำกวม ดังนั้นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจึงเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้ในฟuzzy ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อคุณสมบัติหรือการดำเนินการของฟuzzy เพราะรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นมีความสำคัญต่อกระบวนการคิดในการแก้ปัญหา หรือการพัฒนาต่างๆ ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะสมมาตรหรือไม่สมมาตรก็ได้ ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก เช่น รูปสามเหลี่ยม (Triangular) รูปสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal) แบบเกาส์ (Gauss) รูปตัวเอส (S-Shaped) และรูปโค้งระฆังคว่ำ (Generalized bell) ภาพที่ 2.8

ในการเลือกใช้ฟังก์ชันของความเป็นสมาชิกนั้น สิ่งที่ต้องพิจารณาที่คือความเหมาะสม ความครอบคลุมของข้อมูลที่ใส่โดยสามารถซ้อนทับกันได้เพื่อให้การดำเนินงานราบเรียบไม่เกิดการขาดช่วง ซึ่งอาจทำให้เกิดค่าความเป็นสมาชิกหลายค่าได้ และฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั้นสามารถที่จะปรับเปลี่ยนแก้ไขได้ เพื่อที่จะทำให้เกิดความเหมาะสมที่สุดในการดำเนินการ (Panigrahi and Mujumda. 2000 : 89-109)

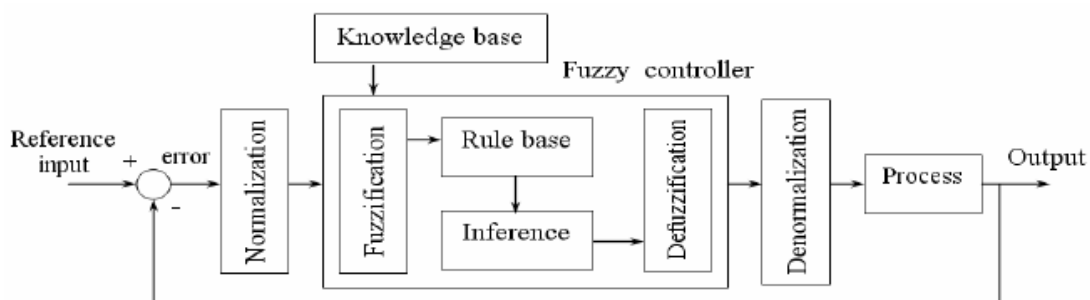


ภาพที่ 2.8 ลักษณะฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในแบบต่าง ๆ

แนวทางที่เป็นไปได้ในการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิก หรือฟังก์ชันตามตัวแปรฟuzzy อาจกำหนดได้ตามฟังก์ชันความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่ม สัญชาตญาณ หลักตรรกวิทยา ซึ่งในวิธีการต่างๆ ที่ใช้ในการกำหนดค่าความเป็นสมาชิก เช่น Intuition, Inference, Rank ordering, Angular fuzzy set, Artificial neural networks, Genetic algorithms, Inductive reasoning, Soft partitioning, Meta rule และ Fuzzy statistics

5. กระบวนการควบคุมแบบฟัซซีลอจิก

กระบวนการควบคุมการตัดสินใจแบบฟัซซี แสดงภาพที่ 2.9 ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) พื้นฐานการเรียนรู้ (Knowledge base) ที่นำมาใช้ในการตัดสินใจกฎพื้นฐาน (Rule-base) กระบวนการตัดสินใจ (Decision-making logic) และกระบวนการฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)



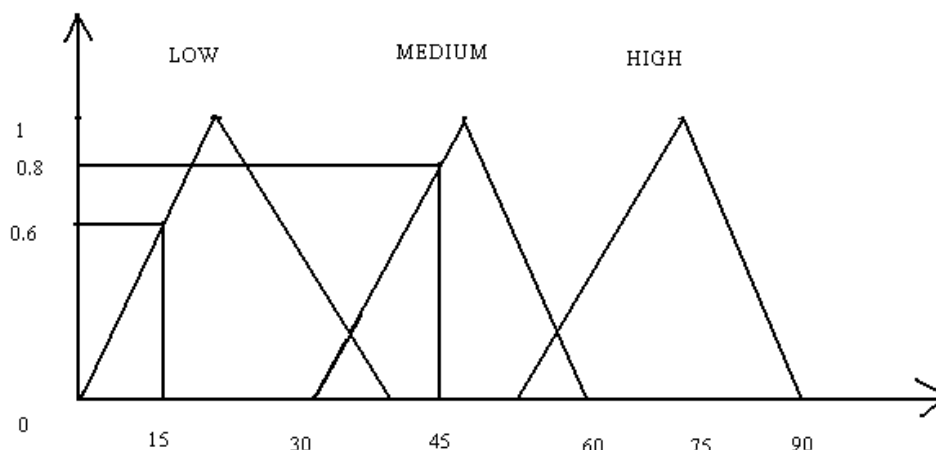
ภาพที่ 2.9 การควบคุมการตัดสินใจแบบฟัซซีลอจิก

5.1 กระบวนการฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

ฟัซซีฟิเคชัน เป็นกระบวนการในการสร้างปริมาณหรือจำนวนของตัวแปรที่ใช้ให้เป็นตัวแปรแบบฟัซซีโดยการนำเอาความไม่ชัดเจนมาพิจารณา เพื่อกำหนดค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรที่ใช้ ซึ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะแทนความไม่ชัดเจนที่ปรากฏขึ้น จากภาพที่ 2.10 จะเห็นว่าค่าความเป็นสมาชิก (Membership value) ของปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำที่ 80 % เป็นสมาชิกของฟัซซีเซตทั้งในช่วง Medium และ High ซึ่งมีค่าความเป็นสมาชิกเป็น 0.8 และ 0.6 ตามลำดับ

5.2 พื้นฐานการเรียนรู้ (Knowledge based)

พื้นฐานการเรียนรู้จะนำไปใช้ในการแบ่งช่วง และกำหนดรูปร่างของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรฟัซซีในตัวแปรที่ใช้ (Input) และผลลัพธ์ (Output) ตลอดจนเงื่อนไขหรือกฎต่าง ๆ ที่ใช้ในการตัดสินใจ (Jang, Sun and Mizutani. 2000)



ภาพที่ 2.10 ค่าความเป็นสมาชิก (Membership value) ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของปริมาณน้ำในอ่างเก็บน้ำ

5.3 กฎพื้นฐาน (Rule-base)

ในสายงานของ Artificial intelligence ที่เป็นการเปลี่ยนแปลงการเรียนรู้ของมนุษย์ไปยังวิธีการนั้นส่วนมากที่นิยมใช้ในการแสดงเหตุและผลมักอยู่ในรูปแบบของตัวแปรภาษา (Linguistic variables) โดยการผสมโครงสร้างของกฎซึ่งสามารถแสดงโดย

$$\text{IF Premise (antecedent), THEN Conclusion (consequent)} \quad (2.8)$$

สมการ 2.8 เป็นรูปแบบกฎพื้นฐาน (IF-THEN) ที่เป็นการอนุมานคือ ถ้าเรารู้ข้อเท็จจริง (ข้อเสนอ สิ่งที่เกิดขึ้นก่อน) เราสามารถอนุมานข้อเท็จจริงได้ (บทสรุป, ผลที่ตามมา) ระบบกฎพื้นฐานเป็นรูปแบบที่มีลักษณะเด่นที่ว่าเป็นระบบที่มีความสามารถในการแก้ปัญหาได้ดี ซึ่งแหล่งที่มาของการควบคุมอาจจะมาจากประสบการณ์ของมนุษย์ หรือมาจากแหล่งอื่นแต่ต้องมีความสอดคล้อง มีปฏิสัมพันธ์กัน และมีความสมบูรณ์ของกฎควบคุมฟัซซี

5.4 การตัดสินใจ (Decision-making logic)

ในกระบวนการตัดสินใจจะมีการกำหนด Implication ของฟัซซี และใช้การดำเนินการเชื่อมต่อแบบ AND, OR จากนั้นใช้กระบวนการอนุมาน ซึ่งในกรณีที่มีกฎพื้นฐานมากกว่า 1 ข้อขึ้นไปในการอนุมานจำเป็นจะต้องรวมกฎเข้าด้วยกัน (Aggregation) จากนั้นใช้ดีฟัซซิฟิเคชันในการหาค่า output ของระบบ Ross กล่าวว่าในการอนุมานแบ่งได้เป็น 4 กรณีคือ

5.4.1 Input ไปยังระบบเป็นค่า และใช้ Max-min เป็นวิธีในการอนุมาน

5.4.2 Input ไปยังระบบเป็นฟัซซีเซตและใช้ Max-product เป็นวิธีในการอนุมาน

5.4.3 Input ไปยังระบบเป็นฟัซซีเซตและใช้ Max-min เป็นวิธีในการอนุมาน

5.4.4 Input ไปยังระบบเป็นฟัซซีเซตและใช้ Max-product เป็นวิธีในการอนุมาน

วิธีการอนุมานทั้ง 2 แบบคือวิธี Max-min method และ Max-product method ดังภาพที่ 2.11 และ 2.12 สามารถแสดงได้ดังนี้

1. Max-min method ใช้กฎการหาค่าต่ำสุด (Minimum operation rule) ของ Mamdani เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกในการหาค่า แสดงได้โดย

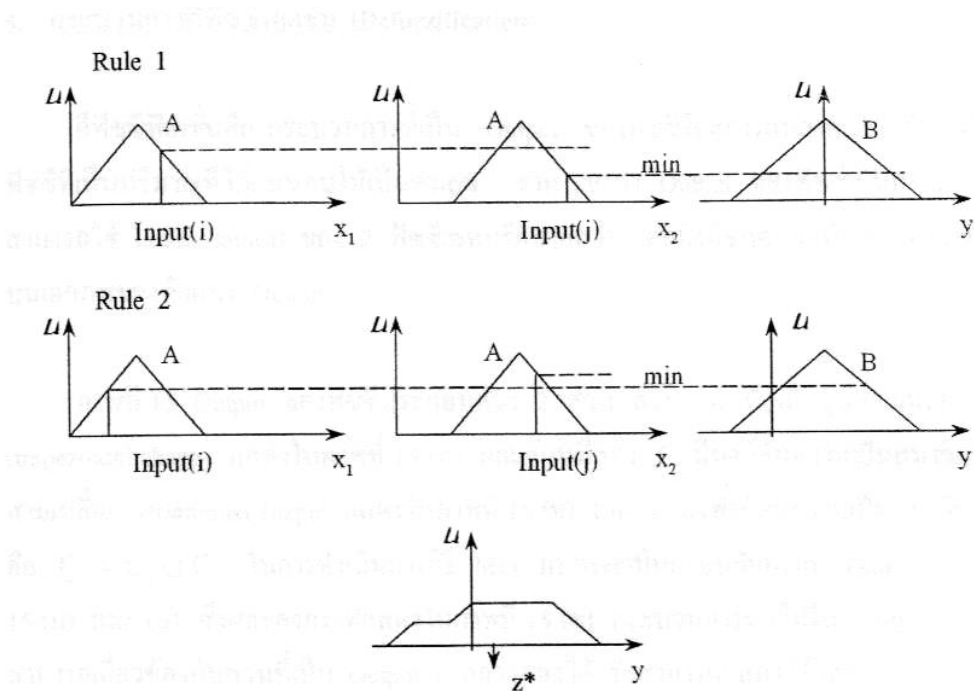
$$\mu_{\underline{B}}^k(y) = \max_k \left[\min \left[\mu_{A_1}^k(\text{input}(i)), \mu_{A_2}^k(\text{input}(j)) \right] \right] \quad (2.9)$$

เมื่อ $k = 1, 2, \dots, r$

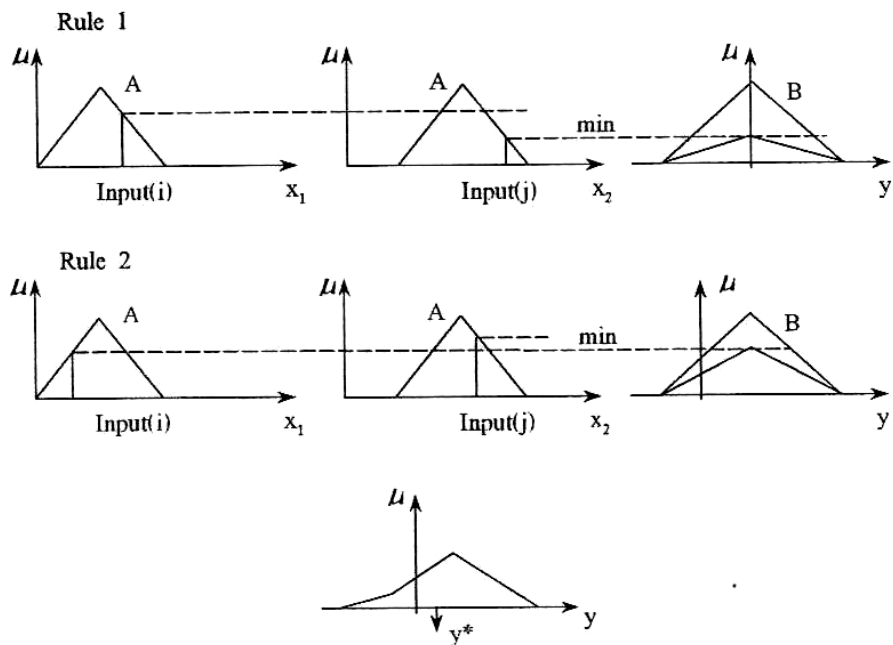
2. Max-product method บางครั้งอาจเรียกเป็นวิธี Max-dot ใช้กฎผลคูณของ Larsen เป็นฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับหาค่า แสดงได้โดย

$$\mu_{\underline{B}}^k(y) = \max_k \left[\mu_{A_1}^k(\text{input}(i)) \cdot \mu_{A_2}^k(\text{input}(j)) \right] \quad (2.10)$$

เมื่อ $k = 1, 2, \dots, r$



ภาพที่ 2.11 Graphical Mamdani (Max-min) inference method



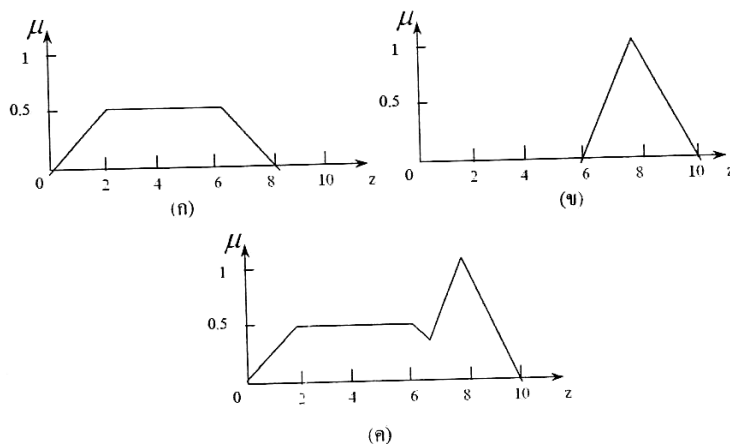
ภาพที่ 2.12 Graphical Max-product implication method

6. กระบวนการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

ดีฟัซซีฟิเคชันคือ กระบวนการที่เป็น Output ของฟัซซีโดยการแปลงผลการตัดสินใจแบบฟัซซีที่เป็นปริมาณที่ไม่แน่นอนให้เป็นตัวเลข ซึ่งการหาค่า Output ของฟัซซีเป็นกระบวนการที่สามารถใช้ Union logical ของ 2 ฟัซซีเซตหรือมากกว่า โดยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะกำหนดบนเอกภพของตัวแปร Output (Jairaj and Vedula. 2000 : 457-472)

ภาพที่ 2.13 Output ของฟัซซีประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนแรก, C_1 เป็นรูปสามเหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal shape) แสดงในภาพที่ 2.13 (ก) และส่วนที่สอง C_2 มีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular shape) แสดงในภาพที่ 2.13 (ข) Union ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกทั้งสองคือ $\underline{C} = C_1 \cup C_2$ ในการดำเนินการวิธี Max กราฟจะเป็นกรอบล้อมรอบ Output ของภาพที่ 2.13 (ก) และ (ข) ซึ่งผลของกราฟแสดงในภาพที่ 2.13 (ค) กระบวนการทั่วไปใน Output ของฟัซซีสามารถเกี่ยวข้องกับส่วนที่เป็น Output มากกว่าสองได้

ซึ่งสามารถแสดงได้โดย
$$\underline{C}_k = \bigcup_{i=1}^k \underline{C}_i \tag{2.11}$$



ภาพที่ 2.13 กระบวนการ Output ของฟัซซี (ก) ส่วนที่ 1 ของ Output (ข) ส่วนที่ 2 ของ output (ค) Union ของทั้งสองส่วน

วิธีการหา Output ของเกณฑ์แบบฟัซซีหรือกระบวนการดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) มีหลายวิธีโดยวิธีที่ได้รับความนิยมมากมี 7 วิธี (Ross. 1995) มีรายละเอียดดังนี้

1. Max – membership principle เป็นที่รู้จักในวิธีของ Height method วิธีนี้ใช้ค่าสูงสุดของฟังก์ชัน Output

2. Centroid method กระบวนการนี้ (บางที่อาจเรียกเป็น Center of area, Center of gravity) เป็นวิธีการที่แพร่หลาย
3. Weighted average method วิธีนี้จะใช้ได้ในกรณีที่ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของ Output สมมาตรกันเท่านั้น
4. Mean-max membership วิธีการนี้ (บางที่เรียกว่า Middle-of-maxima) เป็นความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับแบบแรก เว้นแต่ที่ค่ามากที่สุดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกจะไม่เป็นลักษณะเฉพาะตัว (ค่ามากที่สุดมีค่ามากกว่าจุดเดียว)
5. Center of sums วิธีการนี้เป็นวิธีการในการหาดีฟัซซีฟิเคชัน ที่เร็วกว่าแบบอื่นๆ โดยกระบวนการจะเกี่ยวข้องกับการรวมทางพีชคณิตของ Output ในแต่ละตัวของฟัซซีเซต แทน C1 และ C2 ของ Union ซึ่งจุดตัดผ่านของพื้นที่ (Intersect) จะเป็นค่าของ Defuzzification
6. Center of largest area และ Output ของฟัซซีเซตมีอย่างน้อย 2 จำนวนที่มีขอบเขตแยกกัน ดังนั้น Center of gravity จะเป็นการคำนวณโดยใช้ Centroid method ในการหาค่าดีฟัซซีฟิเคชันของฟัซซีเซตที่อยู่ภายในขอบเขต (Convex fuzzy subregion) ของพื้นที่มากที่สุด (Largest area)
7. First (or last) of maxima วิธีนี้ใช้ Output ทั้งหมด หรือผลรวมของ Output ในทุกส่วนที่แยกกันของฟัซซีเซต ต่อค่าน้อยที่อยู่ในขอบเขตของค่ามากที่สุดของระดับความเป็นสมาชิก

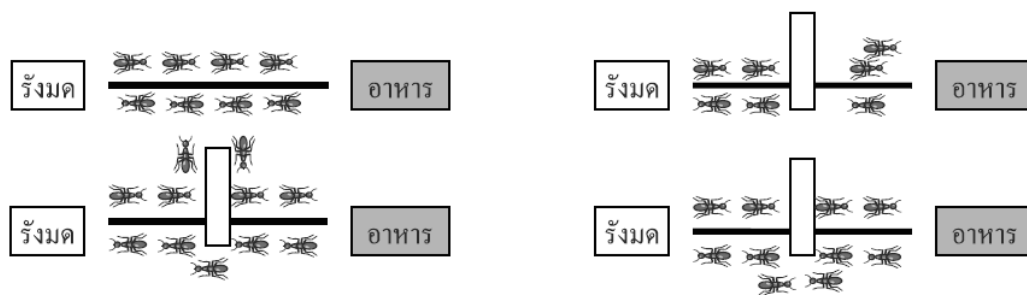
อัลกอริธึมแบบอาณานิคมมด (Ant-Colony Optimization, ACO)

อัลกอริธึมแบบอาณานิคมมด Ant-Colony Optimization (ACO) เลียนแบบพฤติกรรมของมดจริง ๆ ในธรรมชาติมดนั้นสามารถเดินทางจากรังของมันไปยังแหล่งอาหารและกลับมาสู่รังได้ โดยมดจะเลือกเส้นทางที่จะใช้เดินให้มีระยะทางรวมนั้นเกือบจะได้เป็นระยะทางที่สั้นที่สุด จากแนวคิดนี้ทำให้ Dorigo (Dorigo and Stutzle, 2004) ได้พัฒนาอัลกอริธึมอาณานิคมมดขึ้นมาซึ่งนับเป็นอัลกอริธึมสำหรับหาค่าที่ดีที่สุดแบบหนึ่งซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำงาน การหาค่าตอบที่ดีที่สุดแบบอัลกอริธึมอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization Algorithm) หรือต่อไปจะเรียกว่า ACO Algorithm เป็นการอัลกอริธึมซึ่งจำลองการทำงานมาจากชีวิตและพฤติกรรมจริงของการทำงานของมด โดยจุดนั้นเกือบจะตาบอด (Dorigo and Gambardella, 1997) แต่อย่างไรก็ตามมดนั้นสามารถค้นหาเส้นทางจากรังของมันไปยังแหล่งอาหารและย้อนกลับมายังรังของมันได้ โดยระยะทางที่มดใช้ในการเดินทางนั้นเกือบจะมีระยะทางใกล้เคียงกับเส้นทางที่สั้นที่สุด

พฤติกรรมดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้ พิจารณาเส้นทางของมด จากดังในภาพที่ 2.14 ถ้าเส้นทางเป็นเส้นทางตรง การเดินทางของมดจะเป็นเส้นทางตรงซึ่งเป็นระยะที่สั้นที่สุดเป็นพื้นฐานอยู่

แล้ว อย่างไรก็ตามหากมีสิ่งกีดขวางเกิดขึ้น โอกาสที่มดจะเดินหลบหลีกไปทางซ้ายหรือขวาจะเป็น 50-50 เปอร์เซ็นต์ กรณีเส้นทางหนึ่งมีระยะทางสั้นกว่าอีกเส้นทางหนึ่ง มดตัวที่เลือกเส้นทางที่สั้นกว่า ย่อมไปสู่แหล่งอาหารและย้อนกลับไปสู่รังได้ก่อนมดที่เลือกเส้นทางที่ยาวกว่า

ส่วนมดอื่น ๆ นั้นจะพิจารณาเส้นทางที่สั้นกว่าได้อย่างไร เมื่อมดเดินทางนั้นจะมีการฝากกลิ่น หรือฟีโรโมน (Pheromone) เพื่อตามรอยเอาไว้ มดตัวต่อไปที่เดินมาจะพิจารณาจากความแรงของ กลิ่นที่ได้รับ และมดตัวต่อ ๆ มากี่จะอาศัยข้อมูลจากกลิ่นที่ได้รับนี้ในการตัดสินใจเลือกทางเดินต่อไป โดยเราพิจารณาเส้นทางที่มดต้องตัดสินใจมีอยู่ทั้งหมดสองเส้นทางคือเส้นทางด้านบนและเส้นทาง ด้านล่าง หากเส้นทางใดที่มีความแรงของกลิ่นมากก็แสดงว่ามีมดจำนวนมากผ่านเส้นทางนั้น ซึ่งเป็นผล มาจากมดแต่ละตัวมีการฝากกลิ่นเมื่อเดินผ่านไปแล้วเท่า ๆ กันนั่นเอง



ภาพที่ 2.14 เส้นทางของมด (Dorigo and Gambardella,1997)

ในการค้นหาเส้นทางของมดนั้นจะมีอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการเลือกเส้นทางของมันก็คือ การระเหยของฟีโรโมน (Evaporate) ที่มดได้ฝากไว้ในแต่ละเส้นทาง ซึ่งการระเหยนั่นจะขึ้นอยู่กับเวลา จากการที่มดมีความเร็วในการเดินทางที่คงที่ ดังนั้นจากภาพที่ 2.14 หากมีทางเลือกที่มีระยะทาง แตกต่างกันเส้นทางที่มีระยะยาวกว่าย่อมต้องใช้เวลาในการเดินทางที่มากกว่า ซึ่งจะทำให้สูญเสียฟีโร โโมนจากการระเหยมากกว่าเส้นทางที่มีระยะทางสั้นกว่า และเนื่องจากมดตัวต่อ ๆ มา มีการพิจารณา เส้นทางเดินจากความเข้มข้นของฟีโรโมน ดังนั้นมดตัวอื่น ๆ จะมีความน่าจะเป็นที่จะเลือกเส้นทางที่สั้น กว่าในการเดินทางนั่นเอง

อัลกอริธึมแบบอาณานิคมมดเป็นอัลกอริธึมเชิงสุ่ม โดยมีปัจจัยที่สำคัญมากของอัลกอริธึม คือ ฟีโรโมนซึ่งจะใช้เป็นปัจจัยที่ใช้ในการตัดสินใจในการเลือกเส้นทางของอัลกอริธึมโดยจะเรียกอัลกอริธึมที่ มีการทำงานในลักษณะนี้ว่าฟีโรโมนโมเดล ซึ่งฟีโรโมนโมเดลนั้นเป็นโมเดลสำหรับใช้ในการจัดการ แก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดเชิงคอมบินาโทเรียล Combinatorial Optimization (CO) โดยปัญหา CO นั้นสามารถนิยามเป็นปัญหาที่แตกต่างกันได้หลายรูปแบบ ซึ่งอัลกอริธึมแบบอาณานิคมมดนั้นก็คือ

การใช้ฟีโรโมนโมเดลในรูปแบบที่เข้ากับปัญหานั้น ๆ ยกตัวอย่างเช่น ปัญหา CO ที่สำคัญมากปัญหาหนึ่งคือปัญหาคนเดินทางขายของ

อัลกอริธึม Ant System (Dorigo and Gambardella, 1997) นับเป็นอัลกอริธึมเริ่มแรกที่น่าเอาหลักการของมดในธรรมชาติมาใช้ในอัลกอริธึมเพื่อแก้ปัญหาการหาค่าที่ดีที่สุดเชิงคอมบินาทอเรียล ซึ่งนำเอาการตัดสินใจเลือกเส้นทางในการเดินทางทุก ๆ เส้นทางที่เป็นได้ตามค่าฟีโรโมนด้วยความน่าจะเป็นค่าหนึ่ง

อัลกอริธึม Ant System เป็นการใช้อัลกอริธึมอาณาจักรมดในการแก้ปัญหาคนเดินทางขายของ (Stutzle and Dorigo, 1999) โดยมีกราฟ $G = (V, E, W)$ ซึ่งมีโหนด $r, s \in V$ และ $\eta(r, s) \in W$ และมีมด k ตัว ในการทำงาน โดยจะกำหนดให้ $P_k(r, s)$ เป็นความน่าจะเป็นของมดตัวที่ k ที่โหนด r ในการที่จะเลือกเส้นทางย้ายไปที่โหนด s และจะมี $J_k(r)$ เป็นเซตของโหนดที่มดตัวที่ k ในโหนด r ที่ยังไม่ได้เดินทางไป (unvisited node) ส่วนค่าน้ำหนักเส้นทางของมดตัวที่ k เดินทางจากโหนด r ไปยังโหนด s มีค่าเป็น $\eta(r, s)$ หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่าการมองเห็นจาก r ไป s ซึ่งค่าการมองเห็นนี้จะเป็นส่วนกลับกับระยะทางของเส้นเชื่อมจากโหนด r ไปยังโหนด s หรือเรียกว่า d_{rs} และเมื่อมดได้เลือกเส้นทางแล้ว มดนั้นจะมีการฝากกลิ่นหรือฟีโรโมนไว้ตามเส้นทางโดยจะกำหนดให้ $\tau(r, s)$ เป็นฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมจากโหนด r ไปยังโหนด s และสุดท้ายนั้นจะกำหนดให้ β เป็นพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทำงานโดยเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง

การทำงานของ Ant System มีการทำงานอัลกอริธึม ดังในภาพที่ 2.15 ซึ่งจะมีการทำงานในสองส่วน คือส่วนกำหนดค่าเริ่มต้นของอัลกอริธึมและส่วนที่เป็นฟังก์ชันในการทำงาน โดยในบรรทัดที่ 1 นั้นจะกำหนดค่าฟีโรโมนเริ่มต้นในแต่ละเส้นเชื่อม ส่วนบรรทัดที่ 2 นั้นกำหนดให้มีมดทั้งหมด m ตัวในการทำงานโดยวางมดแต่ละตัวในโหนดใด ๆ ในกราฟแบบสุ่ม อัลกอริธึมจะมีการทำงานเป็นวนรอบตามจำนวนรอบของการทำงานในอัลกอริธึมบรรทัดที่ 3 และการทำงานนั้นจะกำหนดให้มีมด m ตัว โดยมดแต่ละตัวทำหน้าที่ของมันอย่างอิสระในการเลือกเส้นทาง ในอัลกอริธึมบรรทัดที่ 6 และทำการจดจำค่าโหนดที่ได้ทำการเดินทางไปแล้วในบรรทัดที่ 7 เพื่อไม่ให้เดินทางซ้ำ เมื่อมดเดินทางได้ครบรอบการทำงาน จะทำให้การปรับค่าฟีโรโมนตามเงื่อนไขของอัลกอริธึมในบรรทัดที่ 8 และทำการคำนวณค่าระยะทางที่เดินทางได้ โดยการทำงานของอัลกอริธึมจะเป็นแบบวนซ้ำ หากยังไม่ถึงเงื่อนไขที่ตั้งไว้จะทำงานต่อไปจนกระทั่งสุดท้ายเมื่อครบกำหนดรอบของการทำงาน จะทำการหาระยะทางที่สั้นที่สุดของมดในบรรทัดที่ 11

PROCEDURE Ant System

1. Initial Pheromone Value
2. Place the m ants on the node of the graph

3. **while** Condition is not met **do**
4. **for** $k = l$ to m **do** // m ants
5. **for** $r = l$ to $n - l$ **do**
6. ant k random walk to node j
7. update $J_k(r)$
8. update pheromone
9. Calculate Distance L_k
- 10.
11. Print Shortest Path

ภาพที่ 2.15 โค้ดเทียมของอัลกอริธึม Ant System

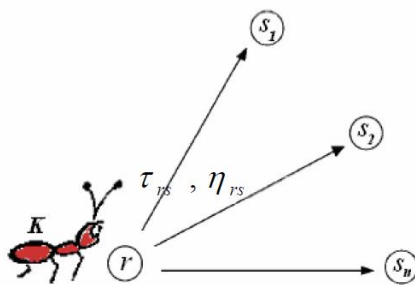
จากภาพที่ 2.15 โค้ดเทียมของอัลกอริธึม Ant System ซึ่งจะประกอบด้วยฟังก์ชันย่อย ๆ อยู่สองฟังก์ชันคือ ในบรรทัดที่ 6 เป็นฟังก์ชันการเลือกเส้นทางเดินของมด และบรรทัดที่ 8 เป็นฟังก์ชันการปรับค่าฟีโรโมนของมดใดในอัลกอริธึม

การเลือกเส้นทางของมด

จากภาพที่ 2.15 ฟังก์ชันย่อยในอัลกอริธึม Ant System ในบรรทัดที่ 6 (ant k random walk to node j) การเลือกเส้นทางเดินของมดจะทำการเลือกเส้นทางตามความน่าจะเป็นโดยขึ้นอยู่กับสองปัจจัยคือ ค่าฟีโรโมนบนเส้นทางที่เป็นตัวเลือกและค่าการมองเห็น ในภาพที่ 2.16 และมีการคำนวณค่าตามสมการ

$$P_k(r,s) = \begin{cases} \frac{[\tau(r,s)][\eta(r,s)]^\beta}{\sum_{u \in J_k(r)} [\tau(r,u)][\eta(r,u)]^\beta} & \text{if } s \in J_k(r) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.11)$$

โดยในภาพที่ 2.16 แสดง $J_k(r)$ เมื่อ $r = i$ ของตัวมดที่ k โดยจะกำหนดให้มดแต่ละตัวมีความสามารถในการจดจำเส้นทางในการเดินทางว่าเมืองใดที่เดินทางผ่านมาแล้วบ้างโดยจะพิจารณาจาก $J_k(r)$ หากโหนดในที่อยู่ในเส้นทางยังไม่ถูกทำการเลือกหรือมีค่าที่ยังไม่ได้เก็บไว้ใน $J_k(r)$ แล้วนั้นก็ทำการพิจารณาเลือกเส้นทางนั้นในการตัดสินใจ โดยมดแต่ละตัวจะต้องทำการเดินทางครบรอบ



ภาพที่ 2.16 การเลือกเส้นทางเดินของมด (Dorigo and Stutzle, 2004)

ส่วนในกรณีปัญหา TSP อยู่บนระนาบเราจะมี $d_{rs} = \sqrt{(r_1 - s_1)^2 + (r_2 - s_2)^2}$ เมื่อ r และ s เป็นโหนดสองโหนดใด ๆ ที่มีพิกัดที่ (r_x, r_y) และ (s_x, s_y) ตามลำดับ

อัลกอริธึม Ant System จะทำงานแบบวนซ้ำ โดยหากมดตัวที่ k ทำงานครบหนึ่งรอบจะกำหนดให้ค่าระยะทางของมดตัวที่ k ในการเดินทางครบรอบเป็น L_k โดยการทำงานครบรอบนี้เรียกว่า tour

การปรับค่าฟีโรโมนของมด

จากภาพที่ 2.15 แสดงฟังก์ชันย่อยในอัลกอริธึม Ant System ในบรรทัดที่ 8 (update pheromone) การปรับค่าของฟีโรโมนนั้นจะทำการปรับค่าเมื่อมดเดินทางครบหนึ่งรอบ โดยจะมีการปรับค่าฟีโรโมนบนเส้นเชื่อมต่างๆ ตามสมการ

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau(r, s) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_k(r, s) \quad (2.12)$$

โดยกำหนดให้ ρ เป็นอัตราการระเหยของค่าฟีโรโมน ซึ่งจะเป็นค่าคงที่อยู่ระหว่าง $[0, 1]$

$$\text{โดยที่ } \Delta \tau_k(r, s) = \begin{cases} 1/L_k & \text{if } (r, s) \in \text{tour done by ant } k \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Saruwatari และ Yomota (1995 : 163-167) ได้ใช้ทฤษฎีฟuzzyเซตในการคาดการณ์ค่าความต้องการใช้น้ำชลประทานบนพื้นที่ปลูกข้าวในประเทศญี่ปุ่นในปี พ.ศ. 2538 และใช้เป็นเครื่องมือในการ

ตัดสินใจของผู้บริหารโครงการชลประทานโดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้และพื้นที่ที่ต้องการเพาะปลูก

Shrestha และคณะ (1996 : 262-269) ได้ใช้ทฤษฎีฟัชชีเซตในการจัดการอ่างเก็บน้ำหลายวัตถุประสงค์ขึ้นในปี พ.ศ. 2539 เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้า การอุปโภค บริโภค อุตสาหกรรม การชลประทาน การควบคุมน้ำท่วม และการคมนาคมทางน้ำ โดยเปรียบเทียบกับการปฏิบัติจริง โดยใช้หลักของ (IF-THEN) โดยใช้ข้อมูลพื้นที่เพาะปลูกของรัฐบาลของรัฐโอคลาโฮมาซึ่งอยู่ท่าตอนใต้ของสหรัฐอเมริกา

Bahat และคณะ (2000 : 137-145) ได้นำทฤษฎีฟัชชีเซตไปใช้ในการควบคุมความชื้นในดินเพื่อประโยชน์ในการควบคุมการให้น้ำชลประทานในปี พ.ศ. 2542 โดยใช้ความชื้นในดินและพื้นที่การเพาะปลูกโดยใช้ข้อมูลจากเม็กซิโก

Cazemier และคณะ (2001 : 113-132) ได้ประยุกต์ใช้ทฤษฎีฟัชชีเซตในการประมาณค่าปริมาณน้ำที่ยอมให้พืชนำไปใช้ได้ ในปี พ.ศ. 2544 จากฐานข้อมูลดินที่ไม่แน่นอน โดยกำหนดตัวแปรฟัชชีเป็นเนื้อดินและคุณสมบัติต่าง ๆ ของดิน

Anongrit Kangrang และ Chavalit Chaleeraktragoon (2007 : 2744-2749) ได้ประยุกต์ใช้ฟัชชีเซตในการหาประสิทธิภาพการชลประทานโดยใช้ตัวแปรเข้าคือ ปริมาณน้ำที่สามารถใช้ได้และพื้นที่ที่ต้องการเพาะปลูก ตัวแปรออก คือ ประสิทธิภาพการชลประทาน

อนุจิตร ภูมิพันธ์ (2551) ศึกษาการคายระเหยของพืชอ้างอิงด้วยแบบจำลองฟัชชีเซตใช้วิธีการทางด้านคณิตศาสตร์ในการหาคำตอบ โดยตัวแปรต้นคือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม ส่วนตัวแปรตามคือ การคายระเหยของพืชอ้างอิง พบว่าค่าการคายระเหยของพืชอ้างอิงที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันด้วยค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานอยู่ระหว่าง 0.100-0.116 มม./วัน

มันทนา พุกษะวัน และ สุดาพร นิมมา (2538) การพยากรณ์ฝนรายฤดูของประเทศไทย ซึ่งได้แสดงวิธีของการพยากรณ์ปริมาณฝน ของฝนรายฤดู ผลการพยากรณ์ที่ได้จาก 2 วิธีนี้ร่วมพิจารณากับความแปรปรวนของภูมิอากาศ ที่กระทบไปทั่วโลกในปัจจุบันแล้วสรุปเป็นการพยากรณ์ฝนในฤดูฝนของแต่ละภาคของประเทศไทย

จะเห็นได้ว่าทฤษฎีของฟัชชีเซตนั้น เหมาะที่จะนำมาสร้างแบบจำลองเพื่อหาปริมาณน้ำฝน เพราะฟัชชีเซตมีความสามารถในการประมาณค่าตัวแปรที่มีความคลุมเครือไม่ชัดเจนและยังสามารถประมาณค่าของตัวแปรที่มีอยู่จำกัดได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้เพียงตัวแปรอุทกวิทยาพื้นฐานไม่กี่ตัวเท่านั้น จะเห็นได้ว่าฟัชชีเซตจึงเป็นทฤษฎีที่มีความเหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้การประมาณค่าปริมาณน้ำฝนในงานวิจัยนี้

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงนำเอาทฤษฎีฟิสิกส์เซต-อัลกอริธึมแบบอาณานิคมมาประยุกต์ใช้ในการประมาณปริมาณน้ำฝน โดยใช้ตัวแปรอุทกวิทยาพื้นฐาน (อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมและความส่องสว่างท้องฟ้า)