

การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมรวมโดยใช้การระเหยของน้ำเป็นกรณีศึกษา

CASE STUDY OF EVAPORATION USING DATA FUSION ANALYSIS



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-060-005

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมรวมโดยใช้การระเหยของน้ำเป็นกรณีศึกษา

CASE STUDY OF EVAPORATION USING DATA FUSION ANALYSIS



ฉานิน หาญณรงค์  
SHANIN HARNNARONG

พ.ศ.  
๒๕๕๒

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 95060  
วัน,เดือน,ปี..... 20 พ.ค. 2552

b. 120 1112.3  
i. ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2552

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
KMITL-2009-EN-M-060-005

# CASE STUDY OF EVAPORATION USING DATA FUSION ANALYSIS



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2009  
KMITL-2009-EN-M-060-005



**COPYRIGHT 2009**

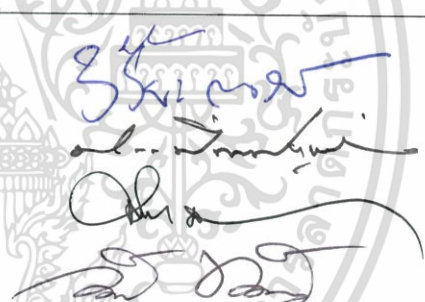
**FACULTY OF ENGINEERING**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตีแบบลงเนื้อหา และตีอย่างองงเงงเงงเงงของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมรวมโดยใช้การระเหยของน้ำเป็นกรณีศึกษา  
Thesis Title Case Study of Evaporation using Data Fusion Analysis  
นักศึกษา นางสาวมานิน หาญณรงค์  
รหัสประจำตัว 47060608  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-060-005

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ประสิทธิ์ จุลเสวีวงศ์	
รศ.วิริยะ กองรัตน์	
รศ.ดร.ประเสริฐ ปิ่นปฐมรัฐ	
รศ.วิศรุต ศรีรัตนะ	
รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันจันทร์ที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2551 เวลา 11.00-13.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 17 ธันวาคม พ.ศ. 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การวิเคราะห์ข้อมูลการหลอมรวมโดยใช้การระเหยของน้ำ เป็นกรณีศึกษา
นักศึกษา	นางสาวมานิน หาญณรงค์
รหัสนักศึกษา	47060608
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมการวัดคุม
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้วิธีการหลอมรวมข้อมูล โดยใช้การระเหยของน้ำเป็นกรณีศึกษา การรวมข้อมูลจะพิจารณาถึงการรวมกันของข้อมูลที่วัดมาได้จากเซ็นเซอร์ตั้งแต่สองตัวขึ้นไปซึ่งอาจจะเป็นคนละชนิดกันได้ ภายใต้รูปแบบที่ถูกดำเนินการรวมร่วมกัน สิ่งสำคัญของเทคนิคการหลอมรวมข้อมูล ในการนำข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ในแต่ละชนิดมารวมกันก็คือ การหาข้อสรุปหรือตีความหมายที่ได้เพียงอย่างเดียวเท่านั้น โดยไม่คำนึงถึงวิธีการได้รับข้อมูลหรือวิธีการที่ใช้ในการจัดการกับเซ็นเซอร์ ซึ่งในที่นี้จะสมมติว่าการออกแบบการวัดและการวางขั้นตอนในการวัดที่ถูกคิดขึ้นมีความเหมาะสมสำหรับการเก็บข้อมูล สำหรับวิทยานิพนธ์นี้จะทำการหาสมการในการประมาณค่าการระเหยด้วยวิธีทางสถิติที่เรียกว่าการวิเคราะห์สมการถดถอยเชิงเส้นแบบหลายตัวแปร ซึ่งจะทำให้ผลที่ได้จากสมการการประมาณค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้น โดยข้อมูลที่จะถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาซึ่งทำการวัดและจัดเก็บโดยกรมอุตุนิยมวิทยา ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากระบบการหลอมรวมข้อมูลจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองของการหาการระเหยของน้ำที่นิยมใช้ในทางอุทกวิทยา เพื่อดูประสิทธิภาพในการประมาณค่าของแบบจำลองที่ได้จากเทคนิคการหลอมรวมข้อมูล

<b>Thesis Title</b>	Case Study of Evaporation using Data Fusion Analysis
<b>Student</b>	Miss Shanin Harnnarong
<b>Student ID.</b>	47060608
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Instrumentation Engineering
<b>Year</b>	2009
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Vittaya Tipsuwannaporn

## ABSTRACT

This thesis proposes data analysis using data fusion method where used evaporation applies to case study. Data fusion refers to the combination of sensory data from multiple sensors into a common representational format. The focus is on combination of data from various sensors into a single inference or interpretation, without regard to how it is obtained, or how the sensors are organized. We assume that an appropriate sensing architecture and sensing plan has been devised to collect data. In this thesis will be sought for evaporative estimation equation via statistical method that called multiple regression analysis. Where the result obtained from the estimation equation will be indicated more accuracy. The data will be provided to analysis are factors of meteorology that measured and collected by Thai Meteorological Department. The result that can be received from data fusion system will be provided to compare with the result that can be estimates from evaporative estimation model of hydrology which used in general. In order to indicated efficiency of estimating model of data fusion analysis.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้ ด้วยความกรุณาจาก รศ.ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งกรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้คำปรึกษา ให้ความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้านเป็นอย่างดี ตลอดระยะเวลาในการศึกษาและทำวิจัยของผู้เขียน ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณ รศ.ดร.สาธิต อินทจักร์ ผู้ซึ่งกรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนแนวทางในการแก้ไขปัญหา ตลอดระยะเวลาของการศึกษาและการทำวิจัยของผู้เขียน เป็นอย่างดี ผู้เขียนรู้สึกซาบซึ้งในพระคุณเป็นอย่างยิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุก ๆ ท่านที่ได้ให้การศึกษแก่ผู้เขียน ตลอดจนเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่านที่ได้ให้ความช่วยเหลือต่าง ๆ แก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณคุณสัญญา สมัยมากที่ได้สละเวลามาช่วยเหลืองานวิจัยของผู้เขียนในงานด้านโปรแกรมมิ่ง จนวิทยานิพนธ์สำเร็จ

ขอขอบคุณคุณสมาน ปราการรัตน์ ฝ่ายวิเคราะห์อากาศเกษตร กองอากาศเกษตรกรรมอุดรนิยมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบผลการในการคำนวณหาการระเหยทางอุทกวิทยา ตลอดจนให้คำแนะนำ และตอบคำถามต่าง ๆ ของผู้วิจัยเป็นอย่างดี ขอขอบคุณคุณวิชาญ นุชประมุข เจ้าหน้าที่อุดรนิยมหาวิทยาลัย 6 กรมอุดรนิยมหาวิทยาลัย สถานีบางนาที่กรุณาให้ข้อมูลเกี่ยวกับเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดและเก็บบันทึกข้อมูลทางอุดรนิยมหาวิทยาลัย และเจ้าหน้าที่งานบริการข้อมูล กลุ่มภูมิอากาศ สำนักงานพัฒนาอุดรนิยมหาวิทยาลัย กรมอุดรนิยมหาวิทยาลัย สถานีบางนาที่เอื้อเฟื้อข้อมูลในการทำวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว ตลอดจนญาติและมิตรของผู้เขียนที่เป็นกำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุก ๆ เรื่องทำให้ผู้เขียนสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้เขียนขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

ฉานิน หาญณรงค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มา และความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่การค้นคว้าวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย.....	2
1.4 การเรียงลำดับเนื้อหาในวิทยานิพนธ์.....	3
บทที่ 2 ข้อมูลอุตุนิมวิทยา.....	4
2.1 องค์ประกอบของอากาศ.....	4
2.2 พลังงานจากดวงอาทิตย์.....	4
2.2.1 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์และรังสีโลก.....	4
2.2.2 รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ผิวโลก.....	5
2.2.3 การคำนวณรังสีจากดวงอาทิตย์.....	6
2.2.4 รังสีสุทธิที่ผิวโลก.....	9
2.2.5 การวัดการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์.....	10
2.3 อุณหภูมิ.....	11
2.3.1 หน่วยวัดอุณหภูมิ.....	11
2.3.2 การวัดอุณหภูมิ.....	11
2.4 ความกดอากาศ.....	13
2.5 ความชื้น.....	13
2.6 ลม.....	14
2.6.1 การวัดลม.....	14
2.6.2 การเปลี่ยนแปลงของลมตามสภาพภูมิศาสตร์.....	15
2.6.3 ความผันแปรของลมตามเวลา.....	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7 การระเหย.....	17
2.7.1 การระเหย.....	17
2.7.2 ปัจจัยทางอุณหภูมิมวิทยาที่มีผลต่อการระเหย.....	18
2.7.3 การตรวจวัดการระเหย.....	19
2.7.4 การคายระเหย.....	19
2.7.5 การหาค่าการคายน้ำรวมการระเหยสูงสุดจากข้อมูลอุณหภูมิมวิทยา.....	20
บทที่ 3 ทฤษฎีการหลอมรวมข้อมูล.....	24
3.1 แบบจำลองของการหลอมรวมข้อมูล.....	25
3.2 แบบจำลองของการปฏิบัติงาน.....	25
3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	27
3.3.1 การดึงเอาลักษณะที่สำคัญออกมาจากข้อมูล.....	29
3.3.2 การหาความสัมพันธ์ของข้อมูล.....	33
3.3.3 การหลอมรวมข้อมูล.....	35
3.4 แบบจำลองทางสถาปัตยกรรม.....	53
บทที่ 4 ผลการวิจัย.....	55
4.1 การประมาณค่าการระเหยจากระบบการหลอมรวมข้อมูล.....	55
4.2 ปริมาณการระเหยที่วัดได้จากถาดวัดการระเหย.....	64
4.3 แบบจำลองที่ใช้ในการหาค่าการระเหยทางอุทกวิทยา.....	64
4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณค่าการระเหย.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	68
บรรณานุกรม.....	69
ภาคผนวก.....	71
ภาคผนวก ก. ตาราง.....	72
ภาคผนวก ข. เซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดข้อมูลทางอุณหภูมิมวิทยา.....	78
ภาคผนวก ค. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	83

เอกสารนี้จัดทำขึ้นเพื่อสนับสนุนการดำเนินงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน $\alpha$ ของพื้นผิวต่าง ๆ .....	8
2.2 ค่า $Z_0$ และ $v_r$ .....	16
4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ทางอุณหภูมิต่าง ๆ .....	60
4.2 แสดงค่าการระเหยสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละปีจากการประมาณค่าด้วยวิธีต่าง ๆ .....	66
ก.1 รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่ผิวโลก เมื่อไม่มีบรรยากาศปกคลุมสำหรับซีกโลกเหนือ เมื่อเทียบเป็นค่าการระเหยของน้ำที่ $20^\circ\text{C}$ .....	73
ก.2 ค่า $N$ หรือค่าประจำวันเฉลี่ยของชั่วโมงที่มีแสงแดดยาวนานที่สุดที่สามารถจะเกิดขึ้นได้ ในซีกโลกเหนือ .....	74
ก.3 ค่า $\sigma T^4$ หรือรังสีที่สะท้อนจากวัตถุผิวสีดำ .....	74
ก.4 ค่า $e_n$ หรือค่าความดันไออิ่มตัวที่เหนือผิวน้ำ .....	75
ก.5 ค่าถ่วงน้ำหนัก .....	77
ก.6 ค่า $m/N$ .....	77



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ลำแสงจากดวงอาทิตย์กระทบผิวโลกที่เส้นรุ้งต่าง ๆ .....	5
2.2 แสดงปริมาณพลังงานของรังสีแสงอาทิตย์.....	6
2.3 สมดุลรังสีความร้อนที่พื้นผิว.....	7
2.4 การหารังสีสุทธิที่ผิวโลกได้รับ.....	9
2.5 เครื่องมือวัดระยะเวลาที่มีแสงแดดแบบ Campbell-Stokes Sunshine Recorder.....	11
2.6 ทิศทางของลม 16 ทิศทาง.....	15
2.7 หน้าตัดความเร็วลมแบบ Logarithmic Velocity Profile ในช่วง Friction Layer.....	16
2.8 การแบ่งแยกระหว่างกระบวนการการระเหยกับการคายน้ำ.....	19
3.1 แบบจำลองกระบวนการสำหรับการหลอมรวมข้อมูล.....	25
3.2 แสดงแนวทางในการทำการหลอมรวมข้อมูล.....	28
3.3 แสดงตัวอย่างของแผนผังการกระจาย.....	29
3.4 แสดงข้อมูลแตกกลุ่ม.....	30
3.5 แผนผังการกระจายชนิดสหสัมพันธ์เชิงบวก.....	31
3.6 แผนผังการกระจายชนิดสหสัมพันธ์เชิงบวก ชนิดไม่ชัดเจน.....	31
3.7 แผนผังการกระจายชนิดสหสัมพันธ์เชิงลบ.....	32
3.8 แผนผังการกระจายชนิดสหสัมพันธ์เชิงลบ ชนิดไม่ชัดเจน.....	32
3.9 แผนผังการกระจายแบบมีไขเชิงเส้นตรง.....	33
3.10 แผนผังการกระจายแบบไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน.....	33
3.11 แสดงข้อมูลโดยรวมของซอฟต์แวร์ที่ถูกนำมาใช้กับระบบการหลอมรวมข้อมูล.....	54
4.1 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างอุณหภูมิกับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย.....	57
4.2 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างรังสีแสงอาทิตย์กับค่าการระเหยที่ได้จากถาด วัดการระเหย.....	57
4.3 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างความเร็วลมกับค่าการระเหยที่วัดได้จากถาด วัดการระเหย.....	58
4.4 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างความชื้นกับค่าการระเหยที่วัดได้จากถาดวัดการระเหย.....	58
4.5 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับค่าการระเหยที่ได้จากถาด วัดการระเหย.....	59
4.6 แสดงค่าแผนภาพการกระจายระหว่างความดันอากาศกับค่าการระเหยที่ได้จากถาด วัดการระเหย.....	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างปริมาณน้ำฝนกับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย.....	60
4.8 แสดงค่าการระเหยที่ประมาณค่าได้จากระบบการหลอมรวมข้อมูล.....	63
4.9 แสดงส่วนเหลือจากค่าที่ได้จากการประมาณ.....	63
4.10 แสดงปริมาณการระเหยของน้ำที่ได้จากถาดวัดการระเหย ณ กรมอุตุนิยมวิทยา สถานีบางนา ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2548 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2550.....	64
4.11 แสดงค่าการระเหยที่ได้จากสมการ Modified Penman.....	66
4.12 แสดงค่าการระเหยของน้ำที่ได้จากวิธีต่าง ๆ .....	67
ข.1 เซนเซอร์สำหรับวัดความดันบรรยากาศ.....	79
ข.2 โปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ .....	79
ข.3 เซนเซอร์สำหรับวัดความเร็วลม.....	80
ข.4 เซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด.....	80
ข.5 เซนเซอร์สำหรับวัดความชื้นในอากาศ.....	81
ข.6 เซนเซอร์สำหรับวัดความยาวนานของแสงแดด.....	81
ข.7 ถาดวัดการระเหยแบบกลาสเอ.....	82
ข.8 เซนเซอร์สำหรับวัดปริมาณน้ำฝน.....	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหาที่นำไปสู่การค้นคว้าวิจัย

ในกระบวนการควบคุมหรือกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลใด ๆ ก็ตาม สิ่งที่เราต้องการคือ ทำให้การตัดสินใจและการสรุปผลมีความถูกต้อง แม่นยำ ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด โดยการจะได้มาของข้อสรุปที่ถูกต้องนั้น จำเป็นที่จะต้องมีข้อมูลที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์ให้เพียงพอ กับสิ่งที่ต้องการควบคุมหรือวิเคราะห์ ซึ่งในบางครั้งเราอาจจำเป็นต้องใช้ข้อมูลของสภาพแวดล้อม ประกอบในการตัดสินใจด้วย เพื่อให้ได้ข้อสรุปที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น เครื่องมือหรือวิธีการที่จะถูก นำมาใช้ในการวิเคราะห์มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน โดยในงานวิจัยนี้จะนำเสนอวิธีการหลอมรวมข้อมูล (Data Fusion) ซึ่งเป็นวิธีการที่กระทรวงกลาโหมของสหรัฐ (Department of Defense: DoD) นำไปใช้ในงานด้านการทหาร [17] เช่น การจดจำเป้าหมายแบบอัตโนมัติ (Automated Target Recognition) การสำรวจสนามรบ (Battlefield Surveillance) การนำร่องและควบคุมยานพาหนะ แบบอัตโนมัติ (Guidance and Control of Autonomous Vehicles) และยังคงรวมถึงงานที่ไม่ใช่ใน ด้านการทหารเช่น การติดตามการทำงานของเครื่องจักรที่มีความซับซ้อน (Monitoring of complex Machinery) การวินิจฉัยทางการแพทย์ (Medical Diagnosis) เป็นต้น สำหรับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ การระเหยของน้ำเป็นกรณีศึกษา โดยจะทำการศึกษาค้นคว้าหาตัวแปรทางอุณหพลศาสตร์ที่ มีอิทธิพลต่อการ ระเหยของน้ำโดยอาศัยวิธีการหลอมรวมข้อมูล (Data Fusion) เข้ามาช่วยในการรวมข้อมูลทาง อุณหพลศาสตร์ที่ได้รับมาจากเซนเซอร์หลากหลายชนิด ซึ่งการวิจัยนี้จะใช้ทฤษฎีทางสถิติที่เรียกว่า การวิเคราะห์ความถดถอยเป็นหลัก โดยผลที่ได้จากวิธีการนี้จะถูกเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการ คำนวณจากสมการที่นิยมใช้ในทางอุทกวิทยาและค่าการระเหยที่วัดได้จากถาดวัดการระเหยซึ่งเป็นที่ นิยมใช้ในทางปฏิบัติ

สำหรับในทางอุทกวิทยา วิธีการหาค่าการระเหยอาจแบ่งได้เป็น 2 แนวทาง ได้แก่ การตรวจวัด ข้อมูล และการคำนวณจากข้อมูลภูมิอากาศ และเนื่องจากการตรวจวัดอัตราการระเหยโดยตรงนั้น ทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการวัดการระเหยส่วนใหญ่แล้วมักเป็นการวัดปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปใน ขอบเขตที่พิจารณา หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ส่วนการคำนวณการระเหยจากข้อมูลภูมิอากาศนั้น จะ ไม่ได้วัดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการระเหยโดยตรงแต่จะใช้ข้อมูลภูมิอากาศมาวิเคราะห์ทางสถิติ เพื่อหาความสัมพันธ์กับการระเหย อาจแบ่งตามชนิดของข้อมูลที่นิยมใช้ได้แก่ วิธีการหาค่าการระเหย จากอุณหภูมิ (Temperature-Based Estimating Methods) เช่นวิธีของ Blaney-Criddle, วิธีการหาค่าการ ระเหยจากรังสีแสงอาทิตย์ (Radiation Methods) เช่นวิธีของ Makkink และท้ายสุดวิธีของ Penman ซึ่งอาจนับอยู่ในกลุ่มนี้ด้วย เนื่องจากในเบื้องต้น Penman ได้ใช้วิธีการทางสถิติในหลายส่วนของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า สมการ แต่ต่อมาได้มีการพัฒนาโดยนักทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการระเหยมาใช้ สำหรับในประเทศไทย ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

วิธีการหาค่าการระเหยโดยคำนวณจากข้อมูลภูมิอากาศตามแนวทางของ Penman เป็นวิธีที่ได้รับ ความนิยมใช้มากกว่าวิธีการหาโดยใช้อุณหภูมิและโดยใช้รังสีแสงอาทิตย์ แม้ว่าการหาโดยใช้อุณหภูมิ และรังสีแสงอาทิตย์จะต้องการข้อมูลและมีความซับซ้อนในการคำนวณน้อยกว่า แต่เนื่องจากวิธี ของ Penman ได้รวบรวมองค์ประกอบทุกอย่างที่มีผลต่อการระเหยมาอยู่ในสูตรจึงให้ผลการคำนวณที่ ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ดีกว่าวิธีอื่น ๆ [11]

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

1. ทำการศึกษาทฤษฎีและวิธีการในการหลอมรวมข้อมูล ตลอดจนทฤษฎีทางสถิติต่าง ๆ ที่จะนำมาใช้ในการหลอมรวมข้อมูล
2. ศึกษาหาตัวแปรและอิทธิพลของตัวแปรที่มีผลต่อการระเหยของน้ำ เพื่อใช้ในการสร้าง สมการหลักของการระเหยของน้ำโดยใช้วิธีการหลอมรวมข้อมูล

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษาวิจัย

1. วิธีการที่จะนำมาใช้ในการหาค่าการระเหยของน้ำเป็นวิธีที่พัฒนามาจากวิธีการหลอม รวมข้อมูล โดยใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาเป็นหลัก
2. ทฤษฎีที่จะนำมาใช้ในการรวมข้อมูลเข้าด้วยกันจะเป็นทฤษฎีทางสถิติที่เรียกว่าการ วิเคราะห์การถดถอยแบบหลายตัวแปร
3. ข้อมูลที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะเป็นข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่กรมอุตุนิยมวิทยา สถานีบางนา ทำการวัดและเก็บบันทึกไว้โดยเซนเซอร์วัดรังสีแสงอาทิตย์ เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ อากาศ และเซนเซอร์วัดความเร็วลมตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2548 ถึง วันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2550
4. ค่าการระเหยที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้จะถูกเปรียบเทียบกับค่าการระเหยที่ได้จากการ คำนวณจากสมการของ Penman
5. ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Albedo) ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาค่ารังสีสุทธิจาก ดวงอาทิตย์ เพื่อนำไปใช้ในการหาค่าการระเหยจากสมการ Penman จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน ที่มีค่าเท่ากับ 0.23 ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหญ้าซึ่งเป็นพืชอ้างอิงตามข้อกำหนดของ องค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## บทที่ 2

# ข้อมูลอุตุนิยมวิทยา

ลมฟ้าอากาศ (Weather) จะหมายถึงสภาพของบรรยากาศที่เป็นอยู่และเปลี่ยนแปลงในช่วงระยะเวลาหนึ่ง สภาพของบรรยากาศนี้โดยทั่วไปหมายถึง อุณหภูมิ ความชื้น ฝน เมฆ หมอก ลม รังสีแสงอาทิตย์ และทัศนวิสัยรวมเข้าด้วยกันทั้งหมด ลมฟ้าอากาศเป็นสภาพของอากาศในช่วงระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเปลี่ยนแปลงไปตามวัน เวลาและสถานที่ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอากาศดังกล่าวเรียกว่าอุตุนิยมวิทยา (Meteorology) โดยข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาจะมีความสำคัญทั้งในด้านการเกษตร การพาณิชย์ และการคมนาคมต่าง ๆ

ในการตรวจวัดข้อมูลของลมฟ้าอากาศนั้นจะต้องมีเครื่องมือที่จะใช้ในการตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของอากาศ เพื่อที่จะใช้ในการจัดเก็บและบันทึกข้อมูล เพื่อที่จะได้นำข้อมูลไปใช้ประโยชน์ต่อไป

### 2.1 องค์ประกอบของอากาศ

องค์ประกอบอากาศเบื้องต้นมี 4 ประเภทคือ

1. รังสีดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)
2. อุณหภูมิ (Temperature)
3. ความชื้น และหยาดน้ำฟ้า (Humidity and Precipitation)
4. ความกดอากาศ และลม (Air Pressure and Wind)

ในการศึกษาองค์ประกอบของอากาศทั้ง 4 ประเภทนี้ จะทำให้เข้าใจถึงสภาพลมฟ้าอากาศ ซึ่งจะทำให้สามารถทำการวิเคราะห์และคาดคะเนปริมาณต่าง ๆ ที่มีความเกี่ยวข้องกับลมฟ้าอากาศได้

### 2.2 พลังงานจากดวงอาทิตย์

#### 2.2.1 การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์และรังสีโลก (Solar and Earth Radiation)

ดวงอาทิตย์เป็นแหล่งพลังงานทางธรรมชาติที่ใหญ่ที่สุดที่โลกได้รับ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศ และระบบวงจรอุทกวิทยาของน้ำในส่วนต่าง ๆ ของโลก โดยที่พื้นผิวของดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิประมาณ  $6000^{\circ}\text{C}$  ซึ่งจะแผ่รังสีออกไปทุกทิศทุกทางในรูปของแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลังงานของการแผ่รังสีความร้อน (Electromagnetic Spectrum of Radiant Energy) เป็นความยาวคลื่น (Wavelengths) ที่เดินทางเป็นเส้นตรงจากดวงอาทิตย์มาถึงโลก เป็นระยะทางประมาณ 150 ล้านกิโลเมตร หรือ 93 ล้านไมล์ด้วยความเร็วประมาณ  $300,000\text{ km/s}$  หรือ  $186,000\text{ mile/s}$  ใช้เวลา

เดินทางประมาณ 8.5 วินาที ซึ่งพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ที่แผ่รังสีมายังโลกจะไม่สูญหายไปแม้ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระหว่างทาง แต่ขนาดลำแสงจะเล็กลงตามระยะทางที่ห่างจากดวงอาทิตย์ จะทำให้โลกได้รับความร้อนจากดวงอาทิตย์ประมาณ  $1/2,000,000$  เท่าของพลังงานความร้อนทั้งหมด

พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วย

(1) รังสีคลื่นสั้น (Shortwave Radiation) มีรังสีเอ็กซ์ (X-Rays) รังสีแกมมา (Gamma Rays) และรังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) ประมาณ 9% ของพลังงานทั้งหมด

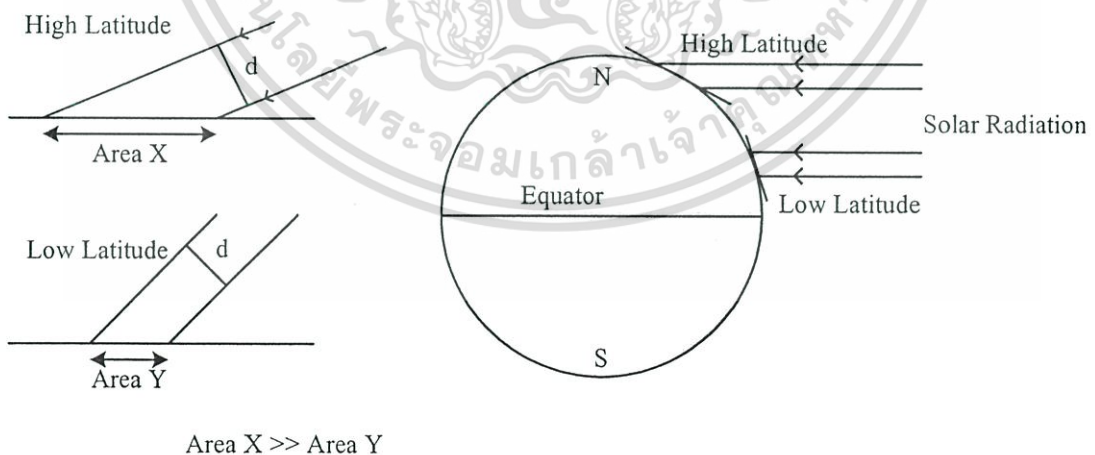
(2) รังสีที่มองเห็น (Visible Light) มีแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่า 7 สี ได้แก่ สีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และสีแดง มีอยู่ประมาณ 41 % ของพลังงานทั้งหมด

(3) รังสีคลื่นยาว (Longwave Radiation) ได้แก่ รังสีอินฟราเรด (Infrared Rays) ไมโครเวฟ (Microwave radar) คลื่นทีวี และคลื่นวิทยุ มีอยู่ประมาณ 50 % ของพลังงานทั้งหมด

อัตราการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ที่มาถึงชั้นบนสุดของบรรยากาศของโลก เรียกว่า ค่าคงที่ของรังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Constant) มีค่าอยู่ในช่วง  $1319 \text{ W/m}^2$  ถึง  $1430 \text{ W/m}^2$  ขึ้นอยู่กับสภาพอากาศ ระยะห่างจากโลกถึงดวงอาทิตย์ตามวงโคจรของโลกรอบดวงอาทิตย์ และเส้นรุ้งที่พิจารณา เป็นต้น ซึ่งค่าคงที่ของรังสีจากดวงอาทิตย์นี้จะลดลงเมื่อรังสีจากดวงอาทิตย์แผ่รังสีผ่านชั้นบรรยากาศของโลกมาสู่พื้นผิวโลก เนื่องจากมีการสะท้อน (Reflection) และการดูดกลืน (Absorption) ของรังสีคลื่นสั้น

### 2.2.2 รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ผิวโลก (Solar Radiation at Earth's Surface)

เนื่องจากลำแสงจากดวงอาทิตย์เดินทางเป็นเส้นตรงมาถึงโลก ทำให้บริเวณเส้นศูนย์สูตรและบริเวณเส้นรุ้งต่ำได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์มากกว่าบริเวณขั้วโลกและบริเวณเส้นรุ้งสูงดังรูปที่ 2.1

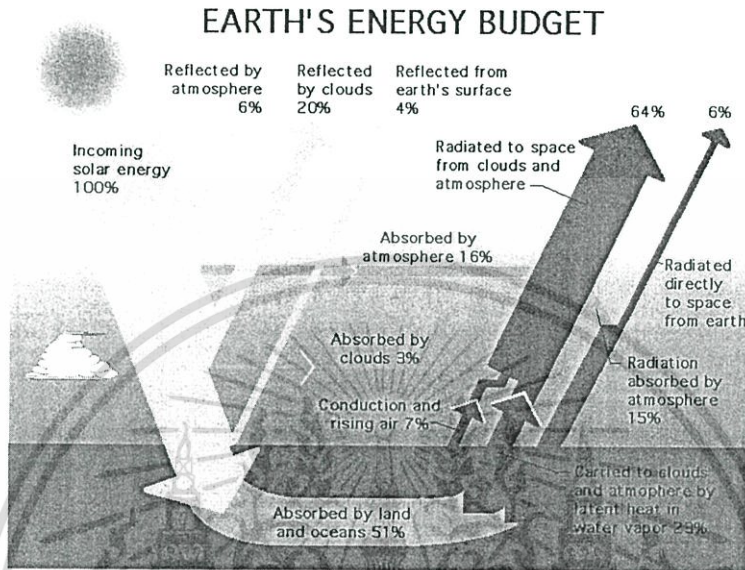


รูปที่ 2.1 ลำแสงจากดวงอาทิตย์กระทบผิวโลกที่เส้นรุ้งต่างๆ (ที่มา <http://www.ace.mmu.ac.uk/>

Resources/Teaching\_Packs/Key\_Stage\_4/Weather\_Climat/09.html)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีจากดวงอาทิตย์ที่มีมาถึงบริเวณชั้นนอกสุดของบรรยากาศของโลกจะมีบางส่วนกระจัดกระจาย (Scattered) ในบรรยากาศ และบางส่วนถูกดูดกลืน (Absorbed) ในชั้นบรรยากาศและบริเวณผิวโลก ขณะเดียวกันจะมีรังสีจากดวงอาทิตย์บางส่วนสะท้อนจากกลุ่มเมฆและผิวโลกซึ่งมีผลต่อสภาพบรรยากาศของโลก ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงปริมาณพลังงานของรังสีแสงอาทิตย์ (ที่มา <http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/all98invProject.Site/Pages/trl/inv2-1.abstract.html>)

### 2.2.3 การคำนวณรังสีจากดวงอาทิตย์

เมื่อมีรังสีจากดวงอาทิตย์เข้ากระทบพื้นผิวโลก ซึ่งอาจเป็นพื้นดินหรือพื้นผิวน้ำดังรูปที่ 2.3 จะเกิดรังสีตกกระทบ รังสีสะท้อน และการคายรังสี (Emission) ในบริเวณนั้น

กำหนดให้ รังสีตกกระทบบนพื้นผิว =  $R_i$

$$\text{รังสีสะท้อน} = \alpha R_i$$

เมื่อให้  $\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน (Albedo) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างรังสีสะท้อนต่อรังสีตกกระทบที่พื้นผิว มีค่า  $0 \leq \alpha \leq 1$  ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพื้นผิวดังตารางที่ 2.1 เป็นตัวแปรที่สำคัญในการหาการใช้ น้ำของพืช

รังสีที่พื้นผิวดูดกลืนหาได้จากรังสีตกกระทบบนพื้นผิว ลบด้วยรังสีสะท้อน ดังนี้

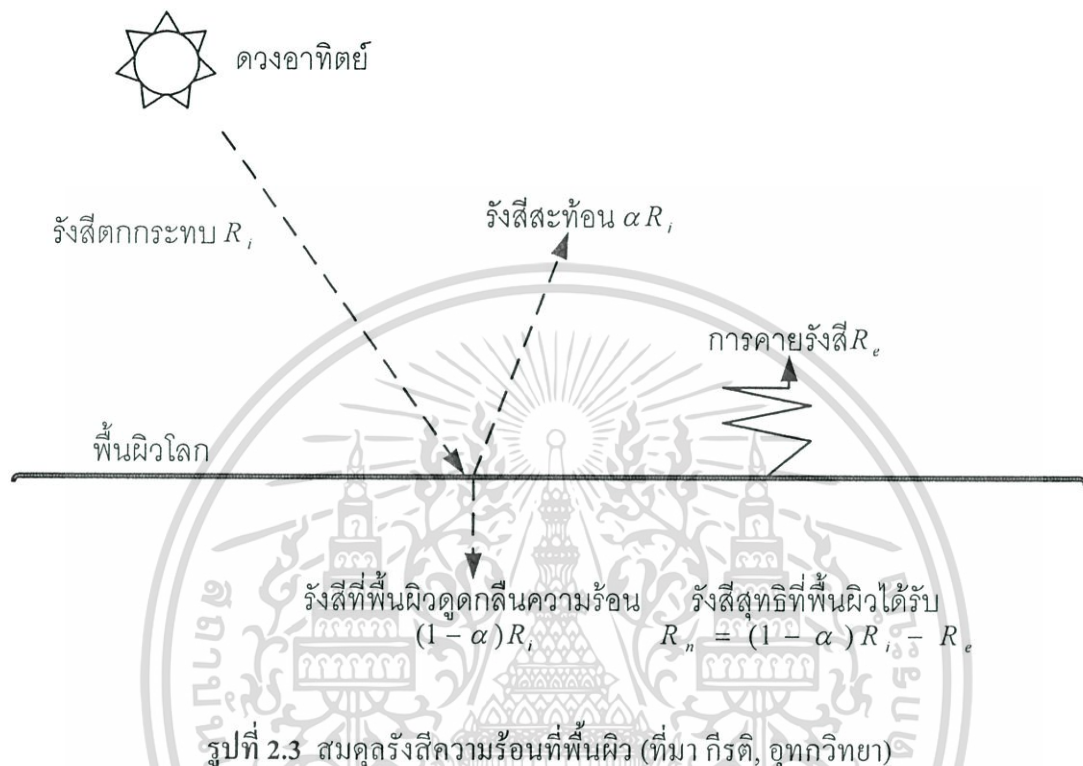
$$\begin{aligned} \text{รังสีที่พื้นผิวดูดกลืนความร้อน} &= R_i - \alpha R_i \\ &= (1 - \alpha) R_i \end{aligned}$$

เนื่องจากพื้นผิวมีการคายรังสี =  $R_e$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น รังสีสุทธิ (Net radiation) ที่พื้นผิวได้รับ หาได้จากรังสีที่พื้นผิวดูดกลืนความร้อน ลบด้วยการคายรังสีจะได้

$$\text{รังสีสุทธิที่พื้นผิวได้รับ } R_n = (1 - \alpha)R_i - R_e \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.3 สมดุลรังสีความร้อนที่พื้นผิว (ที่มา กิรีติ, อุทกวิทยา)

ปริมาณรังสีสุทธิที่พื้นผิวได้รับเป็นพลังงานหลัก (Major energy) ที่มีผลต่อการระเหยของน้ำบนโลกสำหรับปริมาณการคายรังสี สามารถหาได้จากกฎของ Stefan Boltzmann ดังสมการ

$$\text{การคายรังสี } R_e = e\sigma T^4 \quad (2.2)$$

โดยที่  $e$  คือ การคายรังสีความร้อนของพื้นผิว (Emissivity) มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับวัสดุสีดำ และเท่ากับ 0.97 สำหรับน้ำ

$\sigma$  คือ ค่าคงที่ของ Stefan - Boltzmann เท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$

และ  $T$  คือ อุณหภูมิสมบูรณ์ของพื้นผิว (Kelvin, K) โดยที่  $K = ^\circ C + 273$

เมื่อ  $^\circ C$  คือ อุณหภูมิเป็น Celsius

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นของการคายรังสีความร้อนเป็นปฏิภาคผกผันกับอุณหภูมิของพื้นผิวดัง กฎของ Wien คือ

$$\lambda = \frac{2.90 \times 10^{-3}}{T} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของการแผ่รังสีความร้อน (m)

และ  $T$  คือ อุณหภูมิของพื้นผิว (K)

ดังนั้นเมื่อใช้กฎของ Wien จะพบว่า ดวงอาทิตย์มีอุณหภูมิสูงกว่าผิวโลกมาก จึงมีผลทำให้ความยาวคลื่นที่เกิดจากการคายรังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์มีค่าน้อยกว่าความยาวคลื่นที่เกิดจากการคายรังสีความร้อนจากผิวโลก

ตารางที่ 2.1 สัมประสิทธิ์การสะท้อน  $\alpha$  ของพื้นผิวต่าง ๆ (กรีติ, อุทกวิทยา)

พื้นผิว	$\alpha$	พื้นผิว	$\alpha$
น้ำ	0.03 - 0.04	ต้น Spring wheat	0.10 - 0.25
ดินดำแห้ง	0.14	ต้น Winter wheat	0.16 - 0.23
ดินดำชื้น	0.08	ต้น Winter rye	0.18 - 0.23
ดินสีเทาแห้ง	0.25 - 0.30	หญ้าสูงหนาแน่น	0.18 - 0.20
ดินสีเทาชื้น	0.10 - 0.12	หญ้าเขียว	0.26
Blue, dry loam	0.23	หญ้าแห้ง	0.19
Blue, moist loam	0.16	ต้น โอ๊ก (Oak)	0.18
ทะเลทราย	0.29 - 0.31	ต้นสน (Pine)	0.14
ทรายสีเหลือง	0.35	ต้นสนไบເເລม (Fir)	0.1
ทรายสีขาว	0.34 - 0.40	ฝ้าย (Cotton)	0.20 - 0.22
ทรายแม่น้ำ	0.43	ข้าว	0.12
ทรายละเอียด	0.37	ผักกาดหอม	0.22
หิน	0.12 - 0.15	ต้นหัวผักกาดหวาน	0.18
พื้นที่เขตเมืองหนาแน่น	0.15 - 0.25	มันฝรั่ง	0.19
หิมะ	0.40 - 0.85	ทุ่งไม้พุ่มเตี้ย	0.1
น้ำแข็งในทะเล	0.36 - 0.50		

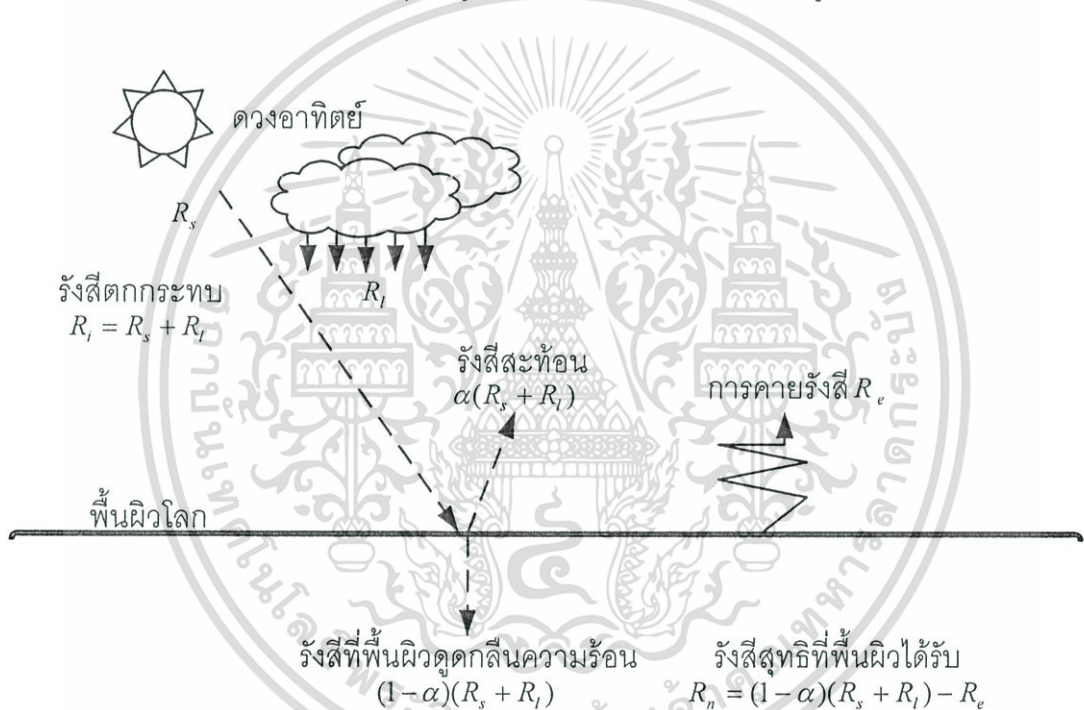
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.4 รังสีสุทธิที่ผิวโลก (Net radiation at earth's surface)

ความเข้ม (Intensity) ของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่มาถึงบรรยากาศโลกจะมีปริมาณลดลงเมื่อมาถึงพื้นผิวโลก เนื่องจากอิทธิพล 3 ประการ คือ

1. การกระจัดกระจายในชั้นบรรยากาศ
2. การดูดกลืน (Absorption) จากกลุ่มเมฆ
3. รังสีจากดวงอาทิตย์ที่กระทำต่อผิวโลกที่ไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับเส้นรุ้ง ฤดูกาล และเวลาต่าง ๆ ของวัน

เมื่อให้  $R_s$  คือ ความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่บนพื้นผิวโลกที่ได้รับ และ  $R_l$  คือ ความเข้มของการแผ่รังสีจากเมฆสู่พื้นผิวโลก ซึ่งมีความยาวคลื่นมากกว่าความยาวคลื่นของรังสีจากดวงอาทิตย์เพราะเมฆมีอุณหภูมิต่ำกว่ารังสีจากดวงอาทิตย์ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การหารังสีสุทธิที่ผิวโลกที่ได้รับ (ทีมา กิรติ, อุทกวิทยา)

$$\text{รังสีตกกระทบบนผิวโลก } R_i = R_s + R_l \quad (2.4)$$

$$\text{รังสีสะท้อน} = \alpha(R_s + R_l) \quad (2.5)$$

รังสีที่พื้นผิวโลกดูดกลืนความร้อน หาได้จากรังสีตกกระทบบนผิวโลก ลบด้วยรังสีสะท้อน

$$\text{รังสีที่พื้นผิวดูดกลืนความร้อน} = (1 - \alpha)(R_s + R_l) \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เนื่องจากการคายรังสี =  $R_e$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีสุทธิที่ผิวโลกได้รับ หาได้จากรังสีที่พื้นผิวดูดกลืนความร้อน ลบด้วยการคายรังสีความร้อน

$$\text{รังสีสุทธิที่ผิวโลกได้รับ} = (1 - \alpha)(R_s + R_l) - R_e \quad (2.7)$$

## 2.2.5 การวัดการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (Radiation measurement) แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ

### 2.2.5.1 เครื่องมือวัดความเข้มของรังสี

เครื่องมือวัดความเข้มของพลังงานจากดวงอาทิตย์ มีชื่อเรียกโดยทั่วไปว่า แอคติโนมิเตอร์ (Actinometer) และเรดิโอมิเตอร์ (Radiometer) แบ่งเป็น 5 แบบคือ

1. ไพเรลิโอมิเตอร์ (Pyrheliometer) คือ เครื่องมือสำหรับวัดความเข้มของรังสีตรงจากดวงอาทิตย์

2. ไพรานอมิเตอร์ (Pyranometer) คือ เครื่องมือสำหรับวัดรังสีคลื่นสั้นในโลก ซึ่งเป็นผลรวมของความเข้มของรังสีตรงจากดวงอาทิตย์และความเข้มของรังสีการกระจายในท้องฟ้า

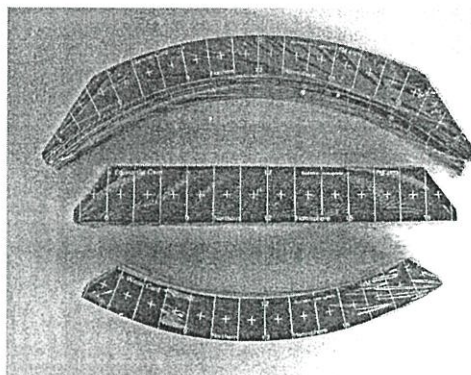
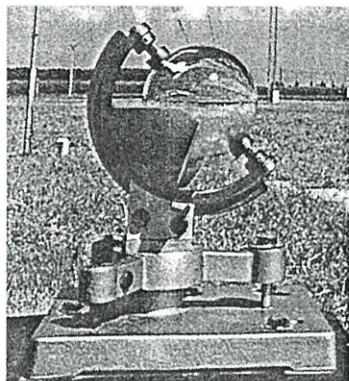
3. ไพเรจีโอมิเตอร์ (Pyrgeometer) คือ เครื่องมือสำหรับวัดรังสีคลื่นยาวในโลก ซึ่งถ้าหากยกเครื่องมือขึ้นใช้สำหรับวัดรังสีในบรรยากาศ และถ้าหากว่าเครื่องมือลงใช้สำหรับวัดรังสีสะท้อนจากโลกและจากบรรยากาศ

4. ไพรราดิโอมิเตอร์ (Pyradiometer) คือ เครื่องมือสำหรับวัดรังสีรวมของโลก ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งรังสีคลื่นสั้น และรังสีคลื่นยาว โดยถ้าให้ผิวหงายขึ้นใช้สำหรับวัดรังสีคลื่นยาวของโลกบวกกับรังสีโลก และถ้าให้ผิวคว่ำลงสำหรับวัดรังสีโลกและรังสีสะท้อนจากบรรยากาศบวกกับรังสีสะท้อน

5. ไพรราดิโอมิเตอร์สุทธิ (Net Pyradiator) หรือ เรดิโอมิเตอร์สุทธิ (Net radiometer) คือ เครื่องมือสำหรับวัดฟลักซ์รังสีคลื่นทั้งหมดสุทธิ ซึ่งหมายถึงผลต่างระหว่างความเข้มของรังสีจากดวงอาทิตย์ที่เข้ามาและที่ออกไป เรดิโอมิเตอร์ ที่มีการนำมาใช้งานออกทกวิทยามาก เช่น การศึกษาเกี่ยวกับการระเหย การใช้น้ำของพืช และการละลายหิมะ เป็นต้น

### 2.2.5.2 การวัดระยะเวลาที่มีแสงแดด

เครื่องมือสำหรับวัดระยะเวลาที่มีแสงแดดหรือวัดช่วงแสงใน 24 ชั่วโมง เรียกว่า Campbell-Stokes Sunshine Recorder มีลักษณะดังรูปที่ 2.5



(ก) เครื่องมือวัดระยะเวลาที่มีแสงแดด

(ข) กระจาดกราฟใช้สำหรับรับแสงจากลูกแก้ว

รูปที่ 2.5 เครื่องมือวัดระยะเวลาที่มีแสงแดดแบบ Campbell-Stokes Sunshine Recorder

หลักการตรวจวัดคือ นำกระจาดกราฟที่เตรียมไว้วางใต้ลูกแก้วทรงกลม เมื่อมีแสงแดด ลูกแก้วทรงกลมจะทำหน้าที่รับแสงแดดและรวมแสงลงไปเผากระจาดข้างล่าง ซึ่งจะสามารถตรวจวัดระยะเวลาที่มีแสงแดดใน 1 วัน ได้จากรอยไหม้ของแสงบนกระจาดกราฟที่ถูกไหม้เป็นเส้น

### 2.3 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิคือ ตัวเลขที่ใช้สำหรับบอกระดับความร้อนเย็นของอากาศหรือของวัตถุต่าง ๆ เป็นตัวแปรที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ

#### 2.3.1 หน่วยวัดอุณหภูมิ (Temperature scale)

หน่วยวัดอุณหภูมิมิ 3 แบบ คือ องศาเซลเซียส (Celsius, °C) องศาฟาเรนไฮต์ (Fahrenheit, °F) และองศาเคลวิน (Kelvin, K) ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{^{\circ}C}{5} = \frac{^{\circ}F - 32}{9} \quad (2.8)$$

และ

$$K = ^{\circ}C + 273 \quad (2.9)$$

#### 2.3.2 การวัดอุณหภูมิ (Measurement of temperature)

การวัดอุณหภูมิใช้เครื่องมือเรียกว่า เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) มีหลายประเภท เช่น เทอร์โมมิเตอร์แบบย่านและจดบันทึกอุณหภูมิตามเวลาที่กำหนด และเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่องหรือที่เรียกว่า เทอร์โมกราฟ (Thermograph) ซึ่งตามสถานีอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ มักจะมีการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ติดตั้งเทอร์โมมิเตอร์ไว้ใน เรือนเทอร์โมมิเตอร์ สำหรับรายละเอียดของเทอร์โมมิเตอร์แต่ละประเภท มีดังนี้

### 2.3.2.1 เทอร์โมมิเตอร์แบบอ่านและจดบันทึกอุณหภูมิตามเวลาที่กำหนด

1. เทอร์โมมิเตอร์ธรรมดา (Ordinary Thermometer) คือ เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิปกติทั่วไป เช่น อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิดิน และอุณหภูมิน้ำ เป็นต้น ซึ่งเป็นหลอดแก้วบรรจุปรอทหรือแอลกอฮอล์ ภายในหลอดแก้วเป็นสุญญากาศ

2. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิสูงสุด (Maximum Thermometer) คือ เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละวัน ทำด้วยหลอดแก้วที่มีกระเปาะบรรจุปรอท โดยมีคอคอดของหลอดแก้วเสียดจากกระเปาะขึ้นมา ติดตั้งเป็นมุม  $5^\circ$  กับแนวนอน ซึ่งบริเวณช่องว่างเหนือระดับปรอทเป็นสุญญากาศ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปรอทจะขยายตัวไหลผ่านคอคอดขึ้นไป และเมื่ออุณหภูมิลดลงปรอทที่ขยายตัวผ่านคอคอดจะค้างอยู่บนคอคอดไม่ไหลกลับเข้าสู่กระเปาะได้เอง และเมื่อต้องการเตรียมวัดอุณหภูมิสูงสุดใหม่ ก็ทำได้โดยนำเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิสูงสุดออกมา สลัดปลายกระเปาะ จะทำให้ปรอทไหลผ่านคอคอดลงไปยังกระเปาะข้างล่างได้

3. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิต่ำสุด (Minimum Thermometer) คือ เทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้วัดอุณหภูมิต่ำสุดในแต่ละวัน มีลักษณะเป็นหลอดแก้วใสบรรจุแอลกอฮอล์ และมีก้านเหล็กรูปครึ่งกลม ขนาดเล็กอยู่ในช่องว่างที่สามารถเคลื่อนตัวได้ โดยหลักการของเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิต่ำสุดคือ เมื่ออุณหภูมิลดลงแอลกอฮอล์จะหดตัวและเกิดแรงดึงผิวดึงก้านเหล็กรูปครึ่งกลมเลื่อนลงและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นแอลกอฮอล์ที่เกิดการขยายตัวจะไหลผ่านก้านเหล็กขึ้นไปโดยก้านเหล็กอยู่กับที่ จากหลักการดังกล่าวทำให้สามารถวัดอุณหภูมิต่ำสุดได้ตามต้องการ และเมื่อต้องการเตรียมวัดข้อมูลใหม่ ก็ทำได้โดยเอียงเทอร์โมมิเตอร์ให้ก้านเหล็กรูปครึ่งกลมไหลลงไปที่ปลายแอลกอฮอล์ด้านที่ติดกับสุญญากาศ ซึ่งต้องระวังอย่าให้ก้านเหล็กรูปครึ่งกลมเลื่อนหลุดออกไปนอกปลายแอลกอฮอล์ เพราะจะทำให้เกิดความผิดพลาดของค่าอุณหภูมิต่ำสุดที่อ่านได้ แล้วจึงวางเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิต่ำสุดในแนวนอนเพื่อใช้วัดอุณหภูมิต่ำสุดในวันต่อไป

4. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิต่ำสุดที่ยอดหญ้า (Grass Minimum Thermometer) เป็นเทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิต่ำสุดที่ยอดหญ้างัดตั้งวางในแนวนอน เพื่อบอกถึงอุณหภูมิเหนือพื้นดิน ว่ามาเกิดการเกิดน้ำค้างแข็งเหนือผิวดินหรือไม่ ซึ่งบางครั้งไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า โดยทั่วไปจะติดตั้งหลังจากดวงอาทิตย์ลับขอบฟ้าแล้ว และเก็บขึ้นก่อนดวงอาทิตย์จะขึ้นในวันถัดไป

5. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิใต้ดิน (Earth Thermometer) ใช้สำหรับวัดอุณหภูมิที่ความลึกต่าง ๆ ใต้ผิวดิน ซึ่งมีประโยชน์สำหรับวัดอุณหภูมิใต้ดินเพื่อการชลประทานหรือคาดการณ์น้ำหลาก เป็นต้น

### 2.3.2.2 เทอร์โมกราฟ (Thermograph)

เทอร์โมกราฟ คือเครื่องมือที่ใช้วัดอุณหภูมิอย่างต่อเนื่อง มีโครงสร้างทรงกระบอก

สำหรับใส่กระดาษกราฟที่หมุนตามเข็มนาฬิกาที่ตั้งไว้ ประกอบด้วยโลหะ 2 ชนิด ที่มีการยืดหดตัวไม่เท่ากันเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การระเหย ผลต่างของอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ทั้งสอง เรียกว่า Wet-bulb Depression เมื่อใช้ร่วมกับอุณหภูมิกอากาศ สามารถหาความชื้นของอากาศได้

2. ไฮโกรมิเตอร์แบบเส้นผม (Hair Hygrometer) มีหลักการว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศจะแปรเปลี่ยนไปตามความยาวของเส้นผม ค่าความชื้นที่เปลี่ยนแปลงไปจะถูกบันทึกลงบน Hair Hygrograph

3. ไฮโกรเทอร์โมกราฟ (Hygro-thermograph) รวม Hair Hygrometer กับ Thermograph เข้าด้วยกัน โดยจะบันทึกความชื้นสัมพัทธ์และอุณหภูมิตอบ Chart เดียวกัน

4. ไฮโกรมิเตอร์วัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dewpoint Hygrometer) ใช้วัดอุณหภูมิจุดน้ำค้างโดยตรง

5. ไฮโกรมิเตอร์แบบคิวเซลล์ (Dew-cell Hygrometer) ใช้วัดอุณหภูมิจุดน้ำค้าง

6. ไฮโกรมิเตอร์แบบสเปกตรอล (Spectral Hygrometer) วัดความชื้นอากาศโดยเลือกช่วงคลื่นของแสงอาทิตย์ที่ดูดซับด้วยไอน้ำ

## 2.6 ลม (Wind)

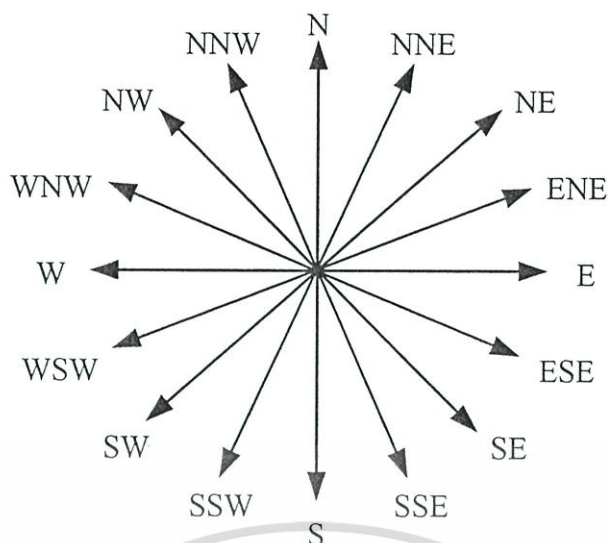
ลม คืออากาศที่มีการเคลื่อนที่ ที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการทางอุทก-อุตุนิยมวิทยา ลมทำให้การระเหยเกิดมากขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อน และความชื้นระหว่างผิวที่สัมผัสกับอากาศและอากาศ ลมเป็นปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งของการเกิดฝน

### 2.6.1 การวัดลม (Measurement of Wind)

โดยทั่วไปเราจะสนใจลมอยู่ 2 กรณี คือการวัดอัตราความเร็ว และทิศทางที่ลมพัดผ่านไป การวัดอัตราความเร็วของลมมีหน่วยสากลเป็นน็อต ความเร็วลม 1 กิโลเมตร/ชั่วโมง หรือเท่ากับ 1.15 ไมล์/ชั่วโมง (เท่ากับ 0.514 เมตร/วินาที)

เครื่องมือวัดอัตราความเร็วลมใช้ แอนนีโมมิเตอร์ (Anemometers) มีหลายชนิด ได้แก่ แอนนีโมมิเตอร์แบบถ้วย (Cup Anemometers) แอนนีโมมิเตอร์แบบใบพัด (Propeller Anemometers) และแอนนีโมมิเตอร์แบบท่อแรงดัน (Pressure-tube Anemometers)

เนื่องจากความเร็วลมแปรเปลี่ยนไปตามความสูงจากพื้นดิน จึงไม่มีมาตรฐานของความสูงในการติดตั้งเครื่องมือวัดความเร็ว ส่วนทิศทางของลมมี 16 ทิศทางดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ทิศทางของลม 16 ทิศทาง

### 2.6.2 การเปลี่ยนแปลงของลมตามสภาพภูมิศาสตร์ (Geographic Variation of Wind)

บนสันเขาหรือยอดเขา ความเร็วของลม ที่ระดับความสูงมากกว่า 10 เมตรเหนือพื้นดิน จะมีค่าสูงกว่าความเร็วลมในที่ที่มีอากาศเคลื่อนที่อิสระที่ความสูงเดียวกัน เนื่องจากอากาศถูกบังคับให้เคลื่อนที่ขึ้นไปตามไหล่เขา ในหุบเขาที่เป็นกำบังจะมีลมพัดอ่อน ลมพัดขึ้นไหล่เขาในเวลากลางวัน และพัดลงในเวลากลางคืน

ในช่วงความสูงไม่เกิน 600 เมตร ซึ่งเรียกว่าชั้นความเสียดทาน (Friction Layer) ความเร็วและทิศทางลม ถูกทำให้เปลี่ยนไปโดยต้นไม้ และสิ่งก่อสร้าง หน้าตัดความเร็วลม (Wind Profile) ในช่วงชั้นความเสียดทานจะเป็นเส้นโค้งแบบการกระจายความเร็วลมแบบลอการิทึม (Logarithmic Velocity Profile) ดังแสดงในรูปที่ 2.7 การประเมินค่าความเร็วลมที่ความสูงในชั้นความเสียดทานสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.10)

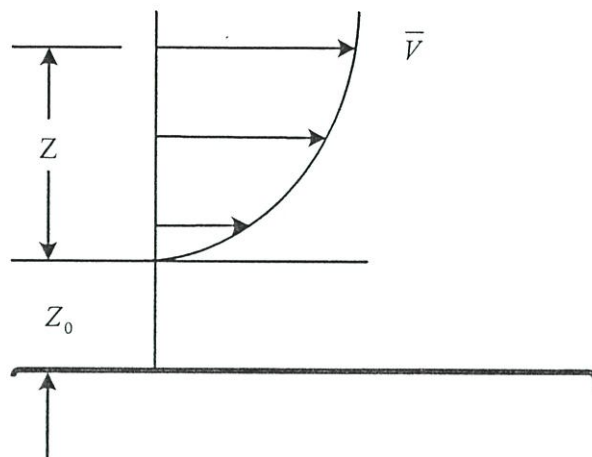
$$\frac{\bar{v}}{v_*} = \frac{1}{k} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (2.10)$$

โดยที่  $\bar{v}$  คือ อัตราเร็วลมเฉลี่ยที่ความสูง  $Z$  จากผิวดิน

$v_*$  คือ ความเร็วลมที่ระดับความสูง  $Z_0$  จากพื้นดิน (Friction Velocity)

$Z_0$  คือ ระยะขรุขระ (Roughness Length) (ค่า  $v_*$  และ  $Z_0$  คูได้จากตารางที่ 2.2)

$k$  คือ ค่าคงที่ของ Von Karman (Karman Constant) ปกติมีค่าเท่ากับ 0.4



รูปที่ 2.7 หน้าตัดความเร็วลมแบบ Logarithmic Velocity Profile ในช่วง Friction Layer

(ที่มา สายสุนีย์, 2546)

ตารางที่ 2.2 ค่า  $Z_0$  (Roughness Length) และ  $v_*$  (Friction Velocity) (สายสุนีย์, 2546)

ประเภทของพื้นผิว	$Z_0$ (ชม.)	$v_*$ (ชม./วินาที)
โคลนหรือน้ำแข็งที่มีพื้นผิวราบเรียบ	0.001	16
สนามหญ้าสูงไม่เกิน 1 ซม.	0.1	26
พื้นที่ลาดเอียงมีหญ้าสูงไม่เกิน 10 ซม.	0.7	36
พื้นที่มีหญ้าปกคลุมหนาแน่นสูงไม่เกิน 10 ซม.	2.3	45
พื้นที่มีหญ้าไม่หนาแน่นสูงไม่เกิน 50 ซม.	5.0	55
พื้นที่มีหญ้าปกคลุมหนาแน่นสูงไม่เกิน 50 ซม.	9.0	63

ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเฉลี่ย  $\bar{v}$  ที่ความสูง  $Z$  กับความเร็วเฉลี่ย  $\bar{v}_1$  ที่ระดับความสูง  $Z_1$  สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_1} = \frac{\ln \frac{Z}{Z_0 + 1}}{\ln \frac{Z_1}{Z_0 + 1}} \quad (2.11)$$

ในกรณีความเร็วลม  $\bar{v}_1$  และ  $\bar{v}_3$  ซึ่งวัดที่ความสูง  $Z_1$  และ  $Z_3$  ทราบค่า ถ้าต้องการหาความเร็วเฉลี่ย  $\bar{v}_2$  ที่ความสูง  $Z_2$  ซึ่งอยู่ระหว่าง  $Z_1$  และ  $Z_3$  สามารถหาได้โดยใช้สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ดังต่อไปนี้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ด้านทิศเหนือของลมที่ระดับความสูงเกินกว่าระยะชั้นความเสียดทาน นิยมใช้หลักการ

$$\bar{v}_2 = \bar{v}_3 - (\bar{v}_3 - \bar{v}_1) \left( \frac{\ln \frac{Z_3}{Z_2}}{\ln \frac{Z_3}{Z_1}} \right) \quad (2.12)$$

การหาค่าความเร็วลมที่ระดับความสูงเกินกว่าระยะชั้นความเสียดทาน นิยมใช้หลักการของการกระจายความเร็วลมแบบกฎตัวเลขยกกำลัง (Power Law Profile) ซึ่งมีรูปสมการดังนี้

$$\frac{\bar{v}}{\bar{v}_1} = \left( \frac{Z}{Z_1} \right)^k \quad (2.13)$$

ค่า  $k$  ขึ้นอยู่กับความหยาบของผิวและเสถียรภาพของบรรยากาศ โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 – 0.6 และค่าที่นิยมใช้คือ 1/7 [8]

การกระจายความเร็วลมแบบกฎลอการิทึมแทนหน้าตัดความเร็วลม (Velocity Profile) ลมได้ดีกว่า การกระจายความเร็วลมแบบกฎตัวเลขยกกำลัง ในช่วงความสูง 5 ถึง 8 เมตร เหนือพื้นดิน โดยที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกับความสูง (Lapse Rate) เป็นแบบอะเดียแบติก (Adiabatic) หรือใกล้เคียง ส่วนการกระจายความเร็วลมแบบกฎตัวเลขยกกำลัง แทนหน้าตัดความเร็วลมได้ดีในช่วงความสูงถึงประมาณ 100 เมตร

### 2.6.3 ความผันแปรของลมตามเวลา (Time Variation of Wind)

ความเร็วลมมีค่าสูงในฤดูหนาว รวมทั้งมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วมากในหน้าหนาว การเปลี่ยนแปลงความเร็วลมในหนึ่งวันมีมากบริเวณใกล้พื้นดินและเกิดในฤดูร้อน ความเร็วลมที่ผิวดินมีค่าต่ำสุดตอนพระอาทิตย์ขึ้นและเพิ่มขึ้นจนถึงค่ามากที่สุดตอนช่วงบ่ายอ่อน ๆ ที่ความสูงประมาณ 300 เมตรเหนือพื้นดินความเร็วลมสูงสุดเกิดในเวลากลางคืน และความเร็วลมต่ำสุดเกิดในเวลากลางวัน

## 2.7 การระเหย

### 2.7.1 การระเหย (Evaporation)

การระเหยเป็นกระบวนการที่น้ำจากพื้นดินและพื้นน้ำของโลกเคลื่อนย้ายสู่ชั้นบรรยากาศ เนื่องจากมีการแลกเปลี่ยนโมเลกุลของน้ำระหว่างผิวพื้นที่กำลังมีการระเหยและบรรยากาศเหนือผิวนั้น ขณะเดียวกันโมเลกุลของน้ำในบรรยากาศอาจตกลงมาสู่ผิวน้ำกลายเป็นของเหลวอีก ดังนั้นในทางอุทกวิทยานั้นจะนิยามการระเหยว่าเป็น อัตราสุทธิของการเคลื่อนย้ายไอน้ำ ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลของน้ำได้รับพลังงานความร้อนจำนวนหนึ่ง ซึ่งมากพอจะทำให้มันหลุดออกสู่บรรยากาศในสภาพการคายน้ำ ไม่ว่าจะเป็นพืชหรือสัตว์ก็ตาม และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นไอ โดยทั่วไปแล้วการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ต้องใช้พลังงานความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอน้ำ (Latent Heat of Vaporization) ประมาณ 2.45 กิโลจูล ต่อ น้ำ 1 กรัม ที่ความดันบรรยากาศ 1 บรรยากาศ และอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ซึ่งในธรรมชาติพลังงานความร้อนนี้จะมาจากดวงอาทิตย์เป็นสำคัญ นอกจากนี้ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งคือ ความสามารถในการพัดพาไอน้ำที่อยู่เหนือผิวระเหยออกไป ซึ่งจะส่งผลให้เกิดความแตกต่างของปริมาณไอน้ำที่มากบริเวณผิวระเหย และมีน้อยบริเวณเหนือผิวระเหย จึงส่งผลให้กระบวนการระเหยเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง

## 2.7.2 ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีผลต่อการระเหย

ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่มีผลต่อการระเหย (Meteorological Factors Affecting Evaporation)

### 1. รังสีจากดวงอาทิตย์ (Solar Radiation)

เป็นพลังงานที่สำคัญที่สุดของการระเหยของน้ำที่ถือว่าเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนพลังงาน ซึ่งจะทำให้เกิดการระเหยมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับเส้นรุ้ง (Latitude) ฤดูกาล (Season) ช่วงเวลาของวัน (Time of Day) และสภาพท้องฟ้าอากาศ (Sky Condition) ว่ามีเมฆปกคลุมมากน้อยเพียงใด เป็นต้น

### 2. อุณหภูมิ (Temperature)

มีผลต่อการระเหยคือ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของน้ำจะมีมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้เกิดพลังงานจลน์ที่ทำให้โมเลกุลของน้ำหลุดลอยสู่อากาศได้มากขึ้น

### 3. ความดันไอน้ำและความชื้น (Vapor Pressure and Humidity)

ทั้งความดันไอน้ำและความชื้นต่างก็มีความสัมพันธ์กัน ซึ่งตามกฎของดาลตัน (Dalton) พบว่าผลต่างของความดันไอน้ำอิ่มตัว กับความดันไอน้ำของอากาศหรือที่เรียกว่าผลต่างของความดันไอน้ำ (Vapor Pressure Gradient) เป็นตัวแปรที่ใช้หาอัตราการระเหยของน้ำ กล่าวคือถ้าผลต่างของความดันไอน้ำมาก อัตราการระเหยจะมากด้วย และเมื่อผลต่างของความดันไอน้ำน้อย จะทำให้เกิดการระเหยน้อยหรือไม่มีการระเหยเลย

### 4. ความดันบรรยากาศ (Atmospheric Pressure)

มีผลกระทบต่อการระเหยคือ ในบริเวณที่มีความดันบรรยากาศต่ำจะมีโมเลกุลของอากาศน้อยและมีความหนาแน่นของอากาศน้อยจึงทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถระเหยขึ้นไปได้ง่ายกว่าบริเวณที่มีความดันบรรยากาศสูง โดยความดันบรรยากาศของโลกจะมีแนวโน้มลดลงตามระดับความสูง ดังนั้นในบริเวณพื้นที่สูงจึงเกิดการระเหยได้มากกว่าบริเวณที่อยู่ต่ำกว่าซึ่งก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้อุณหภูมิจึงเกิดตามความสูงที่เพิ่มขึ้น

### 5. ลม (Wind)

เมื่อมีลมพัดผ่านเหนือผิวน้ำ ความเร็วลมจะพัดพาเอาไอน้ำที่อยู่เหนือผิวน้ำออกไปที่อื่น ทำให้เกิดผลต่างของความดันไอน้ำอิ่มตัวมากขึ้น เป็นผลให้เกิดการระเหยได้มากขึ้น ซึ่งการระเหยจะมากขึ้นตามความเร็วลมที่พัดผ่านผิวน้ำจนกระทั่งถึงจุดที่มีผลต่างของความดันไอน้ำอิ่มตัวเกือบจะคงที่ จะทำให้การเพิ่มความเร็วมไม่มีผลต่อการเพิ่มการระเหยของน้ำ โดยผลของความเร็ว

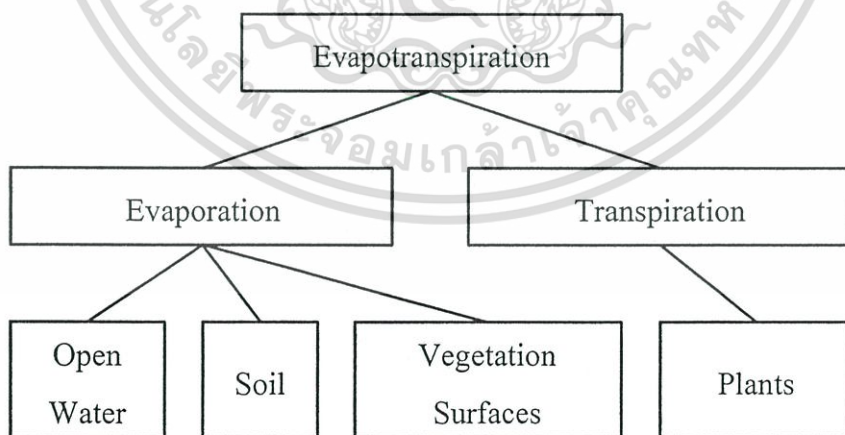
ลมต่อการระเหยจะมีความสัมพันธ์กับขนาดของมวลน้ำที่พิจารณา ซึ่งลมที่พัดพาเอาไอน้ำออกจากมวลน้ำขนาดเล็กจะใช้เวลาน้อยกว่าการพัดพาเอาไอน้ำออกจากมวลน้ำขนาดใหญ่

### 2.7.3 การตรวจวัดการระเหย

การตรวจวัดอัตราการระเหยโดยตรงนั้นทำได้ค่อนข้างยาก วิธีการวัดการระเหยส่วนใหญ่แล้วมักเป็นการวัดปริมาณน้ำที่เปลี่ยนแปลงไปในขอบเขตที่พิจารณา หรือข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ซึ่งทำได้หลายแนวทาง แต่วิธีที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติจะเป็นการหาการระเหยจากถาดวัดการระเหย (Pan Evaporation) โดยถาดวัดการระเหยจะมีอยู่หลายแบบ แต่ที่ใช้เป็นมาตรฐานในสถานีตรวจอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยานั้นจะเป็นถาดวัดการระเหยชนิดคลาสเอ (Class A Evaporation pan) ซึ่งทำด้วยเหล็กอบสังกะสี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 122 ซม. ลึก 25.4 ซม. วางถาดบนโครงไม้ ที่อากาศถ่ายเทตลอดผ่านด้านใต้ได้ เมื่อใช้งานจะใส่น้ำลงในถาดให้ลึก 20 ซม. และจะเติมน้ำเมื่อความลึกของน้ำในถาดลดลงเหลือประมาณ 18 ซม. ระดับน้ำในถาดจะถูกวัดทุก ๆ วัดด้วยชุกเกจ (Hook Gage) ปริมาณการระเหยหาได้จากผลต่างของระดับน้ำที่วัดได้ และปรับแก้ด้วยค่าความลึกของน้ำฝนที่วัดจากเครื่องวัดที่ติดตั้งอยู่ใกล้กัน

### 2.7.4 การคายระเหย (Evapotranspiration)

ปริมาณน้ำที่คืนกลับสู่บรรยากาศทั้งหมด ไม่ว่าจะมาจากระบวนการระเหยของน้ำ กระบวนการคายน้ำจากพืช หรือกระบวนการระเหยจากความชื้นในดินโดยตรง ต่างก็เป็นการนำน้ำกลับคืนสู่บรรยากาศทั้งสิ้น จึงไม่สามารถแยกออกจากกันได้ชัดเจน และในทางอุทกวิทยาจะเรียกรวมกันว่าการคายน้ำรวมการระเหย หรือการคายระเหย (Evapotranspiration, ET)



รูปที่ 2.8 การแบ่งแยกระหว่างกระบวนการการระเหยกับการคายน้ำ

(ที่มา [http://pirun.ku.ac.th/~fengesk/209241/04\\_Evaporation.pdf](http://pirun.ku.ac.th/~fengesk/209241/04_Evaporation.pdf))

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.7.5 การหาค่าการคายน้ำรวมการระเหยสูงสุดจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา (Evapotranspiration Estimate Using Meteorological Data)

การคำนวณหาค่าการคายน้ำรวมการระเหยสูงสุดจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา มีหลายวิธีตั้งแต่สูตรที่ได้จากการทดลองอย่างง่าย ๆ ที่ต้องการข้อมูลภูมิอากาศ หรือข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเพียงอย่างเดียว หรือสองอย่าง จนถึงสูตรที่มีความสลับซับซ้อน ต้องการข้อมูลอุตุนิยมวิทยาหลายอย่าง และมีการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อน ได้แก่วิธี Evaporation Pan, Blanney – Criddle, Radiation, Hargreves, Thornthwaite, Penman, Modified Penman, Penman Monteith เป็นต้น

ในที่นี้จะกล่าวถึง การคำนวณหาค่าการคายน้ำรวมการระเหยสูงสุดจากข้อมูลอุตุนิยมวิทยา โดยวิธีที่นิยมใช้กันอยู่เป็นส่วนใหญ่ 3 วิธี ได้แก่วิธี Penman, Modified Penman และ Penman Monteith ดังนี้

### 1. วิธี Penman

เนื่องจากการคายน้ำรวมการระเหยสูงสุด และการระเหยจากผิวน้ำอิสระ มีอิทธิพลมาจากองค์ประกอบทางอุตุนิยมวิทยาที่เหมือนกันคือ รังสีแสงอาทิตย์ ความชื้น ลม และอุณหภูมิ ถึงแม้จะมีความแตกต่างกันที่ความขรุขระของพื้นผิว สัดส่วนการสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์ (Albedo) และองค์ประกอบอื่น ๆ ก็ตาม การระเหยจากผิวน้ำอิสระ ก็ยังเป็นดัชนีของการคายน้ำรวมการระเหยสูงสุดที่ดีกว่าอุณหภูมิอย่างเดียว ดังนั้นสมการของ Penman จึงถูกดัดแปลงมาใช้ในการคำนวณหาค่าการคายน้ำรวมการระเหยสูงสุดได้เป็นอย่างดี โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$ET_p = \frac{\Delta Q_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} \quad (2.14)$$

โดยที่  $ET_p$  คือ ค่าการคายระเหยรวมสูงสุด หรือค่าการคายน้ำของพืชอ้างอิง

$\Delta$  คือ ความลาดชันของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันไออิ่มตัว (Saturated Vapor Pressure) กับอุณหภูมิอากาศ

$\gamma$  คือ ค่าคงที่ของเครื่องวัดความชื้น (Psychrometer Constant)

$Q_n$  คือ ค่ารังสีสุทธิจากดวงอาทิตย์

$E_a$  คือ ค่าการระเหย, มม./วัน

ค่ารังสีสุทธิจากดวงอาทิตย์สามารถประมาณได้จากสูตร

$$Q_n = Q_A(1-r)(0.26 + 0.50n/N) - \sigma T^4(0.56 - 0.0797\sqrt{e_d})(0.10 + 0.90n/N) \quad (2.15)$$

โดยที่  $Q_A$  คือ รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบสู่ผิวโลกเมื่อไม่มีบรรยากาศห่อหุ้ม, มม./วัน

(ดูตารางที่ ก.1 ภาคผนวก ก)

$r$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับของรังสีจากดวงอาทิตย์ (Reflection Coefficient) มีค่าแตกต่างกันตามแต่ละพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของงานวิจัยการเกษตรเพื่อพัฒนาเกษตรกรไทย โดยผู้จัดทำเห็นประโยชน์ของการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งสงวนลิขสิทธิ์และสงวนชื่อเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- n คือ ค่าจำนวนชั่วโมงที่มีแสงแดด (Actual Mean Sunshine Hour), ชั่วโมง/วัน
- N คือ ค่าประจำวันเฉลี่ยของจำนวนชั่วโมงที่มีแสงแดดยาวนานที่สุดที่จะสามารถเกิดขึ้นได้ (Maximum Possible Sunshine Hour) โดยค่า N นี้ จะมีค่าแตกต่างกันไปตามตำแหน่งบนพื้นผิวโลก (ดูตารางที่ ก.2 ภาคผนวก ก)
- $\sigma T^4$  คือ ค่ารังสีที่สะท้อนจากวัตถุผิวสีดำ, มม./วัน (ดูตารางที่ ก.3 ภาคผนวก ก)
- $e_d$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, มิลลิบาร์ โดยที่

$$e_d = (R.H. \times e_a) / 100 \quad (2.16)$$

R.H. คือ ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative Humidity)

$e_a$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวเหนือผิวน้ำ, มิลลิบาร์ (ดูตารางที่ ก.4 ภาคผนวก ก)

การหาค่า  $E_a$  หรือค่าการระเหย, มม./วัน สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$E_a = 0.262(e_a - e_d)(1 + 0.0062U_2) \quad (2.17)$$

โดยที่  $U_2$  คือ ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตรเหนือพื้นผิวดิน

ถ้าหากไม่มีการวัดความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตรเหนือพื้นผิวดินไว้ ก็สามารถดัดแปลงค่าความเร็วลมที่วัดได้ที่ระดับอื่นมาเป็นค่าที่ระดับ 2 เมตรเหนือพื้นดินได้ตามวิธีที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.6.2

## 2. วิธี Modified Penman

การหาค่าการคายระเหยสูงสุดด้วยสูตรของ Penman มีการดัดแปลงเพื่อให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น เรียกว่าวิธี Modified Penman โดยสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$ET_p = C[WR_n + (1-W)f(U)(e_a - e_d)] \quad (2.18)$$

โดยที่  $ET_p$  คือ ค่าการคายระเหยสูงสุด (มม./วัน)

C คือ ค่าปรับแก้ (Adjustment Factor) อาจใช้ค่า  $C = 1$  [8]

W คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor) ในเทอมของรังสีจากดวงอาทิตย์ (ตารางที่ ก.5 ภาคผนวก ก)

$e_a$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวเหนือผิวน้ำ, มิลลิบาร์ (ตารางที่ ก.4 ภาคผนวก ก)

$e_d$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, มิลลิบาร์

ค่า  $f(U)$  สามารถคำนวณได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f(U) = 0.27 \left( 1 + \frac{U_2}{100} \right) \quad (2.19)$$

โดยที่  $U_2$  คือ ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตรเหนือพื้นผิวดิน, กิโลเมตร/วัน

$R_n$  คือ ค่ารังสีแสงแดดสุทธิ สามารถคำนวณได้ดังนี้คือ

$$R_n = Q_A(1-r)(0.26 + 0.50n/N) - \sigma T^4(0.56 - 0.0797\sqrt{e_d})(0.10 + 0.90n/N) \quad (2.20)$$

โดยที่ค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (2.20) ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการหาค่าการคายระเหยด้วยวิธี Penman ดังนั้นจึงจะไม่กล่าวซ้ำในที่นี้อีก

สำหรับค่า  $n/N$  สามารถหาค่าได้จากค่าความครึ้มของเมฆ (Cloudiness) ได้จากตารางที่ ก.6 ภาคผนวก ก

### 3. วิธี Penman Monteith

การหาค่าการใช้ น้ำของพืชอ้างอิงโดยวิธี Penman Monteith จะมีลักษณะคล้ายกับสูตรของ Modified Penman เพียงแต่ค่าของตัวแปร มีความแตกต่างกันดังนี้

$$ET_p = C[W(R_n - G) + (1-W)f(U)(e_a - e_d)] \quad (2.21)$$

โดยที่  $ET_p$  คือ ค่าการคายระเหยสูงสุดหรือค่าการใช้ น้ำของพืชอ้างอิง มีหน่วยเป็น มม./วัน

$C$  คือ ค่าปรับแก้ (Adjustment Factor) อาจใช้ค่า  $C = 1$  [8]

$W$  คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor) ในเทอมของรังสีจากดวงอาทิตย์ (ตารางที่ ก.5 ภาคผนวก ก)

$e_a$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวเหนือผิวน้ำ, มิลลิบาร์ (ตารางที่ ก.4 ภาคผนวก ก)

$e_d$  คือ ความดันไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิจุดน้ำค้าง, มิลลิบาร์ สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$e_d = (e_a \times R.H._{mean}) / 100 \quad (2.22)$$

โดยที่  $R.H._{mean}$  คือ ค่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย

$f(U)$  คือ อิทธิพลของกระแสลม สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$f(U) = U_2 \left( \frac{899.92}{T + 273.16} \right) \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่  $U_2$  คือ ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตรเหนือพื้นผิวดิน, เมตร/วินาที  
 T คือ อุณหภูมิเฉลี่ย  
 G คือ ฟลักซ์ความร้อนของดิน (Soil Heat Flux) ใช้ค่าเท่ากับ 0 [8]  
 $R_n$  คือ ค่ารังสีแสงแดดสุทธิ สามารถคำนวณได้ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อการหาค่า  
 การคายระเหยด้วยวิธี Penman แล้ว ดังนั้นจึงจะไม่กล่าวซ้ำในที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ทฤษฎีการหลอมรวมข้อมูล

การหลอมรวมข้อมูล (Data Fusion) จะเป็นการรวมข้อมูล (Combine Data) จากเซนเซอร์หลาย ๆ ชนิดเพื่อที่จะหาข้อมูลหรือข้อสรุปเกี่ยวกับสิ่งที่เราสนใจซึ่งจะให้ผลที่ดีกว่าเซนเซอร์เพียงตัวเดียว สำหรับการนำการหลอมรวมข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ เช่นในงานทางด้านการทหาร ยกตัวอย่างเช่น การตรวจสอบเป้าหมายแบบอัตโนมัติ (Automatic identification of targets) การวิเคราะห์สภาพการณ์ของสนามรบ (Analysis of battlefield situations) และการประเมินสถานะภัยคุกคาม (Threat assessments) เป็นต้น สำหรับงานในด้านอื่น ๆ จะรวมถึงงานตรวจวัดระยะไกล (Remote sensing) ที่เกี่ยวกับการค้นหาพืชที่พื้นผิวดินที่รวมอยู่ในบริเวณเดียวกันหรือในการค้นหาตำแหน่งของแร่ธาตุ และในงานด้านอุตสาหกรรม เช่น การควบคุมเครื่องจักรที่มีความซับซ้อน ยกตัวอย่างเช่น โรงงานไฟฟ้านิวเคลียร์ เป็นต้นหรือในอุตสาหกรรมการผลิตแบบอัตโนมัติ (Automated Manufacturing) ข้อมูลจากเซนเซอร์แต่ละตัว และแต่ละชนิดจะถูกนำมา รวมกันโดยใช้เทคนิคที่มีอยู่ ได้หลายเทคนิคเช่น การประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing) สถิติ (Statistics) ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) การจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition) จิตวิทยาในกระบวนการคิด (Cognitive Psychology) และ ทฤษฎีเกี่ยวกับสารสนเทศ (Information Theory) เป็นต้น

การหลอมรวมข้อมูลจะคล้ายคลึงกับกระบวนการสะสมการเรียนรู้ที่มนุษย์ได้ใช้ในการรวบรวมข้อมูลอย่างต่อเนื่องจากเซนเซอร์ต่าง ๆ ของร่างกายเพื่อที่จะอนุมานเกี่ยวกับโลกภายนอก มนุษย์รับรู้ข้อมูล ภาพ (Sights) เสียง (Sounds) กลิ่น (Smells) รส (Tastes) และสัมผัส (Touch) เพื่อที่จะนำมาใช้ในการประเมินสิ่งแวดล้อมและสถานการณ์ที่จะเกิดขึ้นรอบ ๆ ตัว ในการจดจำ ผู้คนซึ่งเคยรู้จักแต่ไม่ได้พบกันเป็นเวลานาน จะต้องอาศัยหลาย ๆ ปัจจัยในการประเมิน เช่น ลักษณะทั่วไปของใบหน้า ลักษณะเด่นที่สามารถสังเกตเห็นได้ (ตัวอย่างเช่น ลักษณะเด่นของจมูก สีผม เป็นต้น) รูปแบบโทนเสียง หรือแม้กระทั่งลักษณะท่าทางของการเดินเพื่อที่จะนำมาใช้ในการประมวลผล หรือในกรณีที่ตัวตลกนำลักษณะเด่นของผู้คนที่มีชื่อเสียงมาล้อเลียนซึ่งผู้ชมจะรับรู้ได้ทันทีว่าเป็นใคร ในการจดจำและการประเมินสถานการณ์ของมนุษย์เป็นสิ่งที่ได้มาจากการฝึกฝน ความสนใจ เงื่อนไขทางกายภาพ และปัจจัยอื่น ๆ อีกมากมาย อย่างไรก็ตามโดยปกติแล้วมนุษย์จะใช้ประโยชน์จากการหลอมรวมกันของข้อมูลที่ได้รับมาเพื่อใช้ในการเรียนรู้เกี่ยวกับเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายนอก ซึ่งมีหลาย ๆ เทคนิคที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการหลอมรวมข้อมูลโดยมีความพยายามให้มีความใกล้เคียงกับความสามารถในกระบวนการหลอมรวมข้อมูลของมนุษย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 แบบจำลองของการหลอมรวมข้อมูล

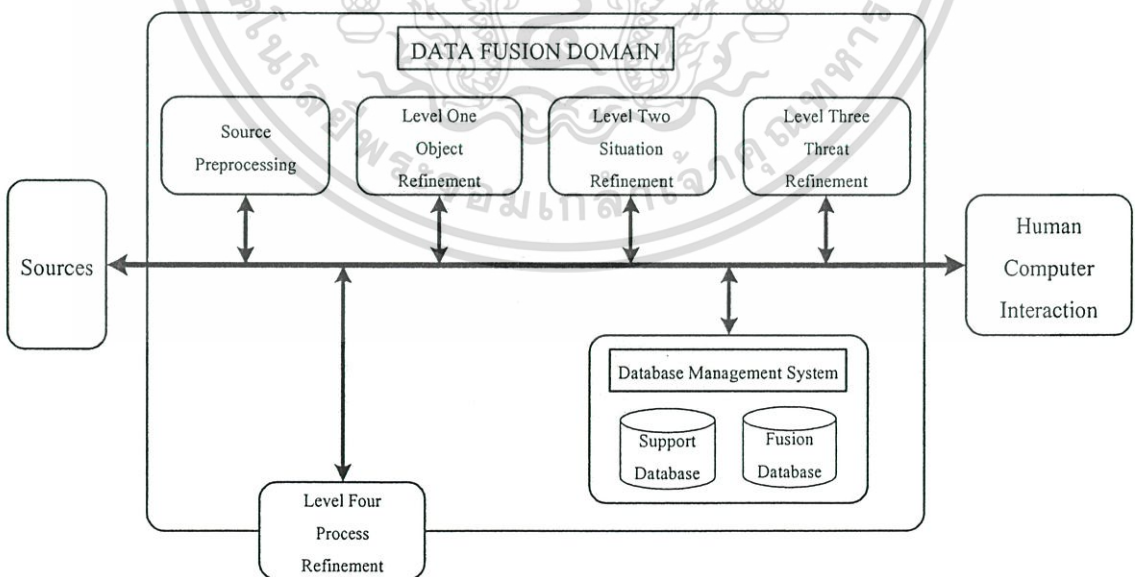
อินพุตที่ป้อนให้กับระบบหลอมรวมข้อมูลจะประกอบด้วยสามส่วนหลัก ๆ คือ 1. ข้อมูลที่ได้มาจากการตรวจวัดของเซนเซอร์ 2. ข้อมูลและคำสั่งที่ถูกป้อนโดยผู้ปฏิบัติการหรือผู้ใช้ และ 3. ข้อมูลที่ถูกจัดเก็บไว้ก่อนแล้วในฐานข้อมูล ในขณะที่เอาท์พุทของระบบหลอมรวมจะเป็นส่วนของข้อมูลที่ถูกนำมารวมกัน

มีหลายแนวความคิดที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการหลอมรวมข้อมูลได้ เช่น

- แบบจำลองของการปฏิบัติงาน (Functional model) สามารถแสดงให้เห็นในรูปแบบของการปฏิบัติงานได้ เช่น ฐานข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูล (Relevant databases) และการเชื่อมต่อเข้ากับกระบวนการหลอมรวมข้อมูล
- แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical model) สามารถใช้ในการบรรยายอัลกอริทึม (Algorithms) และกระบวนการทางลอจิกคอด (Logical Processes) ได้
- แบบจำลองทางสถาปัตยกรรม (Architectural model) สามารถใช้ในการกำหนดส่วนประกอบของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ได้ เช่น การนำข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันเข้าสู่ระบบ และการติดต่อกับภายนอก

### 3.2 แบบจำลองของการปฏิบัติงาน

ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายเกี่ยวกับแบบจำลองของการปฏิบัติงานสำหรับการหลอมรวมข้อมูล



รูปที่ 3.1 แบบจำลองกระบวนการสำหรับการหลอมรวมข้อมูล (ที่มา Hall & Llinas, 2001)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 3.1 แสดงให้เห็นแบบจำลองในการปฏิบัติงานสำหรับกระบวนการหลอมรวมข้อมูล โดยในแบบจำลองนี้จะแบ่งกระบวนการหลอมรวมข้อมูลออกเป็นระดับ 1, 2, 3 และ 4 ซึ่งในแต่ละระดับของกระบวนการหลอมรวมข้อมูลนั้นก็จะมีชื่อเรียกที่แตกต่างกันออกไป ข้อมูลที่ถูกนำเข้ามาในแบบจำลองจะเป็นข้อมูลที่มาจากแหล่งกำเนิด (Sources) ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้รับมาจากเซนเซอร์หลาย ๆ ตัว และแตกต่างชนิดกัน นอกจากนี้แล้วยังรวมถึงข้อมูลอื่น ๆ อีก เช่น ข้อมูลสถานะแวดล้อม ข้อมูลที่ได้ถูกจัดเก็บไว้ก่อน และคำแนะนำหรือข้อวินิจฉัยของมนุษย์ก็ถือได้ว่าเป็นอินพุทของระบบการหลอมรวมด้วยเช่นกัน หน้าที่หลักของการหลอมรวมจะรวมไปถึง การกลั่นกรองข้อมูลที่ได้รับมา (Source Preprocessing) การจัดเก็บข้อมูลที่เหมาะสม (Collections management) การประมวลผลในระดับที่ 1 การประมวลผลในระดับที่ 2 การประมวลผลในระดับที่ 3 การประมวลผลในระดับที่ 4 ระบบการจัดการฐานข้อมูล (Database Management System) และในส่วนของ การเชื่อมต่อระหว่างระบบกับภายนอกโดยมนุษย์หรือคอมพิวเตอร์ (Human Computer Interaction)

- ในการกลั่นกรองข้อมูลอินพุทที่รับเข้ามาในระบบ มีจุดประสงค์ก็เพื่อให้มั่นใจว่าคุณภาพของข้อมูลที่จะถูกนำมาใช้นั้นมีความเหมาะสม โดยการกลั่นกรองนี้อาจจะเป็นการจัดเรียงข้อมูลตามวันเวลา ตามสถานที่ ตามลักษณะหรือตามชนิดของเซนเซอร์ ข้อมูลที่สมบูรณ์เป็นเครื่องประกันว่าการทำการหลอมรวมจะได้ข้อสรุปที่น่าเชื่อถือ
- การจัดเก็บข้อมูลที่เหมาะสม จะเป็นการจัดการหรือควบคุมการจัดเก็บเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ดีที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในระบบการหลอมรวม ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดคุณสมบัติของเซนเซอร์ที่จะเลือกใช้ หรือในการติดตามการจัดเก็บข้อมูลของแต่ละเซนเซอร์ เป็นต้น และโดยหลักการแล้วการจัดเก็บข้อมูลที่เหมาะสมควรจะทำงานร่วมกับฟังก์ชันอื่น ๆ ในระบบการหลอมรวมข้อมูลได้เป็นอย่างดีเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อสรุปหรือเอาท์พุทที่มีความถูกต้องและเหมาะสมในการประเมินจากระบบการหลอมรวม
- การประมวลผลในระดับที่ 1 มีจุดมุ่งหมายที่จะทำการรวมข้อมูลจากเซนเซอร์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน เพื่อให้ได้ค่าประมาณเกี่ยวกับสิ่งที่เราสนใจให้มีความน่าเชื่อถือและถูกต้องมากที่สุด
- การประมวลผลในระดับที่ 2 จะเป็นส่วนที่ใช้เพื่อประเมินเกี่ยวกับสถานการณ์แวดล้อม โดยในส่วนนี้จะนำข้อมูลที่ได้มาประเมินสภาพแวดล้อม รวมถึงความสัมพันธ์ที่มีลักษณะเฉพาะของข้อมูลกับสภาพแวดล้อม และรูปแบบที่เวลาต่าง ๆ หรือช่วงเวลาต่าง ๆ ของข้อมูลกับสภาพแวดล้อม
- การประมวลผลในระดับที่ 3 (สำหรับทางด้านทหารหรือระบบการหลอมรวมที่มีความชาญฉลาด) จะเป็นการประเมินความเสี่ยง เพื่อที่จะตัดสินใจว่าสิ่งที่ได้จากการหลอมรวมข้อมูลมีอันตรายหรือไม่
- การประมวลผลในระดับที่ 4 จะเป็นส่วนที่ใช้ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการหลอมรวมข้อมูล

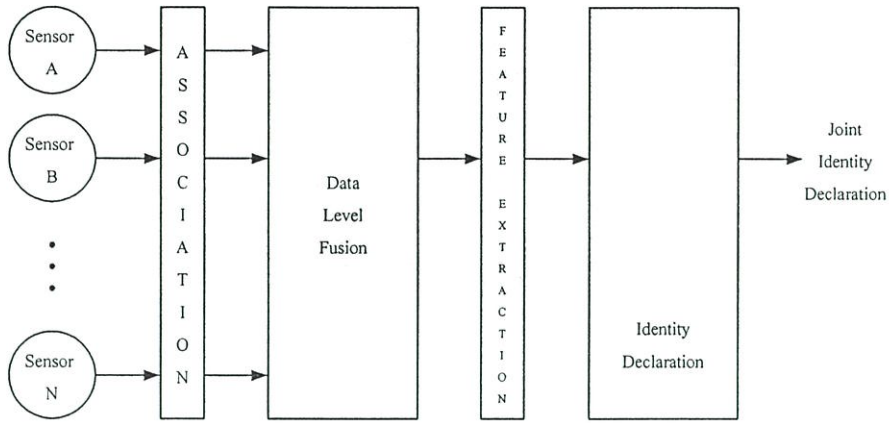
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

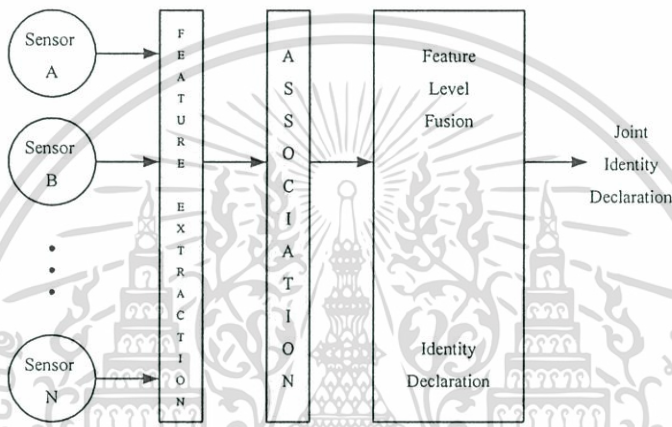
ในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงอัลกอริทึมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับกระบวนการหลอมรวมข้อมูลซึ่งมีมากกว่า 75 อัลกอริทึมที่สามารถนำมาใช้ในการหลอมรวมข้อมูล โดยเราสามารถแยกประเภทของแนวทางในการทำการหลอมรวมได้สามแนวทางดังนี้ (1) ทำการรวมข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์โดยตรง (2) ทำการแทนข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ให้อยู่ในรูปของเวกเตอร์ จากนั้นจึงทำการรวมในรูปของเวกเตอร์แทน หรือ (3) ทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้มาจากเซ็นเซอร์ในแต่ละตัวก่อน จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ถูกรวมผลไปทำการรวมเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำให้ได้ข้อสรุปหรือสิ่งที่จะช่วยในการตัดสินใจอยู่ในระดับที่ดีขึ้น โดยในแต่ละวิธีจะใช้อัลกอริทึมในการหลอมรวมข้อมูลที่แตกต่างกัน ดังที่แสดงในรูปที่ 3.2

ถ้าข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์เป็นข้อมูลที่มีขนาดที่เท่ากัน (เป็นต้นว่า ถ้าเซ็นเซอร์ที่ใช้ทำการวัดเป็นเซ็นเซอร์ที่มีลักษณะทางกายภาพที่เหมือนกัน เช่น เซ็นเซอร์ที่ใช้สำหรับการมองเป็นรูปภาพสองตัว หรือเซ็นเซอร์ที่เกี่ยวกับการวัดเสียงสองตัว) ดังนั้นข้อมูลดิบที่ได้จากเซ็นเซอร์จะถูกนำมารวมกันโดยตรงได้ เทคนิคที่ใช้สำหรับการประมวลผลข้อมูลชนิดนี้ ได้แก่ การมานฟิลเตอร์ริง เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์มีขนาดที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นข้อมูลที่ได้จะต้องถูกนำมารวมกันในรูปแบบ/สเตทเวกเตอร์ ในกรณีที่ใช้การรวมในลักษณะนี้ รูปแบบของข้อมูลจะถูกนำมาจากเซ็นเซอร์ที่ใช้ในการสังเกตแต่ละชนิด และถูกนำมารวมกันโดยการเชื่อมต่อกันในรูปแบบเวกเตอร์ และจะถูกนำไปเป็นอินพุตให้กับเทคนิคจดจำรูปแบบ (Pattern Recognition Techniques) เช่น นิวรอลเน็ตเวิร์ก (Neural Network), คลัสเตอร์ริงอัลกอริทึม (Clustering Algorithms) หรือวิธีการแบบเทมเพลต (Template Methods) เป็นต้น ส่วนการรวมข้อมูลในระดับการตัดสินใจ (Decision-Level Fusion) ในแนวทางที่สามจะนำข้อมูลจากเซ็นเซอร์มารวมกันหลังจากที่เซ็นเซอร์แต่ละตัวได้ถูกนำมาทำการกำหนดคุณลักษณะเกี่ยวกับตำแหน่ง, คุณสมบัติ, และลักษณะเฉพาะของเซ็นเซอร์แต่ละตัวแล้ว ตัวอย่างของแนวทางในการรวมข้อมูลในระดับการตัดสินใจได้แก่ วิธีการตัดสินใจแบบถ่วงดุล หรือเทคนิคการโหวต (Weighted Decision Methods or Voting Techniques), การอนุมานแบบคลาสสิกคอด (Classical Inference), การอนุมานแบบเบย์เซียน (Bayesian Inference), และวิธีของ Dempster-Shafer (Dempster-Shafer's Method)

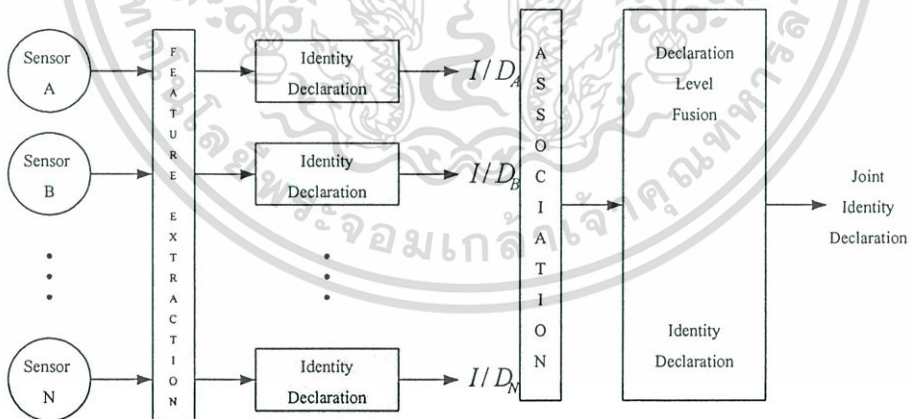
จากในรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าในแต่ละแนวทางของการทำการหลอมรวมข้อมูลจะมีขั้นตอนที่คล้ายคลึง กันคือ การดึงเอาลักษณะที่สำคัญออกมาจากข้อมูล (Feature Extraction) การหาความสัมพันธ์ของข้อมูล (Data Association) และการหลอมรวมข้อมูล (Fusion) โดยในการหลอมรวมข้อมูลนี้จะขึ้นอยู่กับแนวทางที่ถูกเลือกไว้ว่าจะทำการรวมข้อมูลในลักษณะใด



(a)



(b)



(c)

รูปที่ 3.2 แสดงแนวทางในการทำการหลอมรวมข้อมูล (a) ทำการรวมข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์โดยตรง (b) ทำการแทนข้อมูลที่ได้จากเซ็นเซอร์ให้อยู่ในรูปแบบเวกเตอร์แล้วทำการรวมในรูปแบบของเวกเตอร์แทน (c) ทำการประมวลผลข้อมูลที่ได้มาจากเซ็นเซอร์ในแต่ละตัวก่อน จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ถูกรวมผลไปทำการรวมเข้าด้วยกัน ซึ่งจะทำได้ข้อสรุปหรือสิ่งที่จะช่วย

ในการตัดสินใจที่อยู่ในระดับที่ดีขึ้น (ที่มา Hall & Llinas, 2001)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

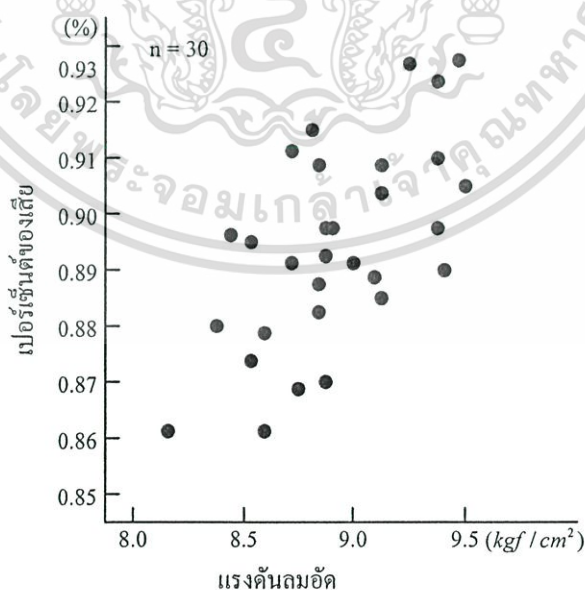
### 3.3.1 การดึงเอาลักษณะที่สำคัญออกมาจากข้อมูล

การดึงเอาลักษณะที่สำคัญออกมาจากข้อมูล จะเป็นการค้นหาลักษณะแฝงของข้อมูลที่อยู่ในกลุ่มข้อมูลจำนวนมาก ลักษณะที่น่าสนใจของข้อมูลเหล่านี้เช่น รูปแบบ ความสัมพันธ์ การเปลี่ยนแปลง โครงสร้างที่เด่นชัด หรือลักษณะที่ผิดปกติของข้อมูลจากข้อมูลจำนวนมาก ๆ จากข้อมูลที่ได้รับมา สำหรับในขั้นตอนนี้เราจะต้องทำการจัดเรียงข้อมูล (Data Alignment) หรือทำการแปลงรูปแบบของข้อมูล (Data Transformation) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ตามอัลกอริทึมและแบบจำลองที่ใช้ในการทำการหลอมรวมข้อมูลต่อไป โดยในการจัดเรียงข้อมูลนี้จะรวมถึงการทำการแปลงให้อยู่ในระยะเวลาพิคัดเดียวกัน ช่วงเวลาเดียวกัน และการแปลงหน่วยวัดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แผนผังการกระจาย (Scatter Diagrams) ซึ่งเป็นเครื่องมือทางสถิติอย่างหนึ่งในการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร โดยการนำค่าตัวแปรสองตัวมาจุดลงบนกราฟ  $xy$  แล้วดูความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้น

ขั้นตอนการสร้างแผนภาพการกระจาย สามารถดำเนินการได้ดังนี้

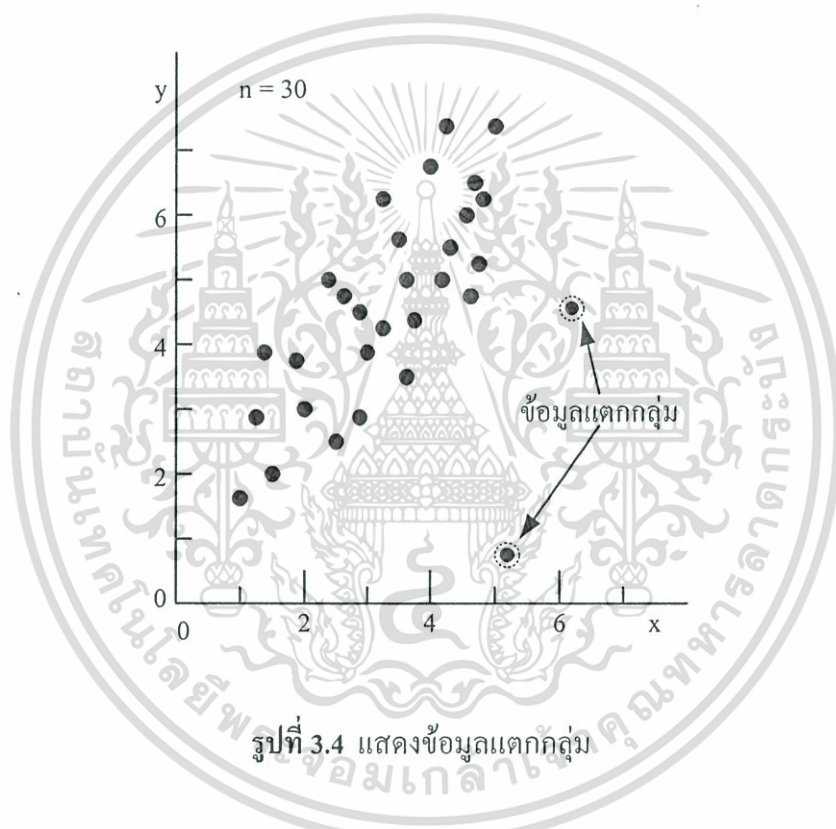
1. ทำการกำหนดข้อมูลที่ต้องการจะศึกษาความสัมพันธ์ร่วมกัน
2. ทำการแบ่งสเกลในกระดาศกราฟ โดยพิจารณาถึงความเหมาะสมกับข้อมูล และความง่ายต่อการพลอตกราฟ
3. ทำการพลอตข้อมูลจาก (1) ลงบนกราฟที่แบ่งสเกลไว้แล้วในข้อ (2)
4. ทำการตีความหมาย



รูปที่ 3.3 แสดงตัวอย่างของแผนผังการกระจาย

### การอ่านแผนผังการกระจาย

1. ลักษณะของแผนผังการกระจายมีแตกต่างกันไป ที่พบบากมี 6 แบบ ดังรูปที่ 3.5 – 3.10
2. แผนผังการกระจายสามารถนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแกน  $x$  และตัวแปรแกน  $y$  ทางสถิติเรียกว่า สหสัมพันธ์ (Correlation)
3. ในกรณีที่มีข้อมูลแตกกลุ่ม
  - ข้อมูลแตกกลุ่ม ปกติไม่นำไปพิจารณาหาความสัมพันธ์
  - ข้อมูลแตกกลุ่มอาจเกิดจาก การวัดคลาดเคลื่อน การจดบันทึกผิด หรือปัจจัยภายนอกอื่น
  - ควรพิจารณาหาสาเหตุของข้อมูลแตกกลุ่มให้ได้ เพราะจะทำให้ทราบข้อเท็จจริงบางอย่างได้



(ที่มา <http://www.kmitl.ac.th/~kbkittic/exdesign/scatter.html>)

4. โดยทั่วไปแล้ว สามารถแบ่งลักษณะความสัมพันธ์ของข้อมูลออกเป็น 3 แบบ ได้แก่
  - 4.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง
  - 4.2 ความสัมพันธ์แบบมิใช่เชิงเส้นตรง
  - 4.3 ความไม่สัมพันธ์ต่อกัน

โดยความสัมพันธ์แต่ละแบบสามารถอธิบายได้ดังนี้

- 4.1 ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าว อาจจะแบ่งออกได้เป็น

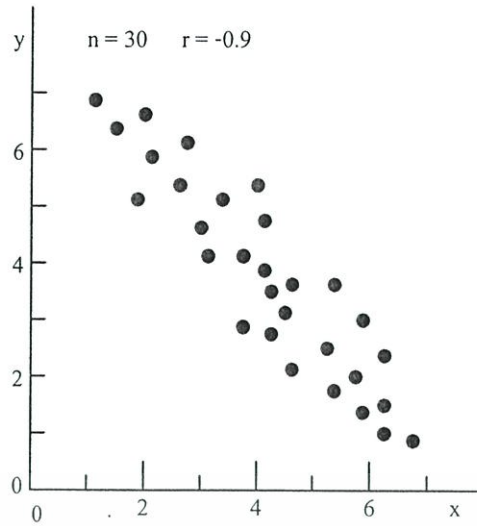
ความสัมพันธ์เชิงบวก (Positive Correlation) และความสัมพันธ์เชิงลบ (Negative Correlation) คำว่า  
เชิงเส้นตรง (Linear) ที่กล่าวถึงนี้ มีความหมายว่า ทุก ๆ หน่วยของ  $x$  ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลง จะทำให้  $y$   
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุใดเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยขนาดเท่าเดิมเสมอ โดยทางคณิตศาสตร์จะถือว่าสัดส่วนดังกล่าว ( $\Delta y / \Delta x$ ) เป็นค่าของความชัน (Slope) ของสมการเส้นตรง รูปที่ 3.5 แสดงสหสัมพันธ์เชิงบวกที่ความสัมพันธ์ของ  $y$  ต่อ  $x$  ชัดเจนมาก รูปที่ 3.6 แสดงสหสัมพันธ์เชิงบวกที่ความสัมพันธ์ของ  $y$  ต่อ  $x$  ไม่ชัดเจนนัก เพราะกลุ่มของข้อมูลกระจายตัวมาก รูปที่ 3.7 แสดงสหสัมพันธ์เชิงลบที่ความสัมพันธ์ของ  $y$  ต่อ  $x$  ชัดเจนมากเพราะข้อมูลเรียงเป็นแนวชัดเจน และรูปที่ 3.8 แสดงสหสัมพันธ์เชิงลบที่ความสัมพันธ์ของ  $y$  ต่อ  $x$  ไม่ชัดเจนนัก เพราะกลุ่มของข้อมูลกระจายตัวมาก [16]



รูปที่ 3.6 แผนผังการกระจายชนิดสหสัมพันธ์เชิงบวก ชนิดไม่ชัดเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



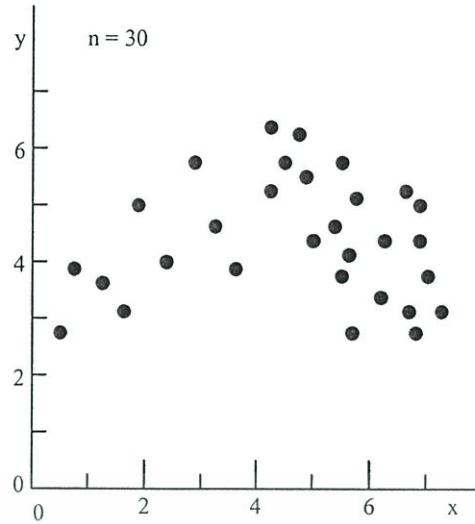
รูปที่ 3.7 แผนผังการกระจายชนิดสหสัมพันธ์เชิงลบ



รูปที่ 3.8 แผนผังการกระจายชนิดสหสัมพันธ์เชิงลบ ชนิดไม่ชัดเจน

4.2 ความสัมพันธ์แบบมิใช่เชิงเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้หมายความว่า ที่แต่ละหน่วยของ  $x$  ที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงจะทำให้  $y$  มีค่าเปลี่ยนแปลงไปไม่เท่ากัน ทั้งนี้แล้วแต่ว่าเป็นระยะ  $x$  ที่เท่าใด โดยทางคณิตศาสตร์ถือว่าค่าความชันมีค่าไม่คงที่ จึงเรียกว่า มิใช่เชิงเส้นตรง (Non-linear) รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์แบบมิใช่เชิงเส้นตรง

4.3 ความไม่สัมพันธ์ต่อกัน โดยแผนผังการกระจายไม่สามารถบอกได้ว่า ที่แต่ละหน่วยของ  $x$  ที่เปลี่ยนแปลงไปมีผลต่อ  $y$  อย่างไร เพราะกลุ่มของข้อมูลไม่แสดงว่า  $x$  มีผลอย่างไรต่อ  $y$  ซึ่งในกรณีนี้อาจจะต้องใช้เครื่องมือทางสถิติชนิดอื่น ๆ ในการหาค่าความสัมพันธ์แทน รูปที่ 3.10 แสดงเอกสารที่เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ความไม่สัมพันธ์ต่อกัน เพราะความสัมพันธ์ของ  $y$  ต่อ  $x$  ไม่มีไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แผนผังการกระจายแบบมีใช้เชิงเส้นตรง



รูปที่ 3.10 แผนผังการกระจายแบบความไม่สัมพันธ์ต่อกัน

### 3.3.2 การหาความสัมพันธ์ของข้อมูล

เป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ได้รับมาจากเซนเซอร์แต่ละตัว เพื่อใช้ลักษณะของข้อมูลหนึ่ง ๆ ในการบอกลักษณะที่จะเกิดขึ้นกับข้อมูลอีกตัวหนึ่ง ซึ่งอาจจะเป็นการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลในกลุ่มเดียวกัน หรืออาจจะเป็นการหาความสัมพันธ์ของตัวแปรระหว่างกลุ่มก็ได้ ซึ่งลักษณะของการหาความสัมพันธ์นั้นอาจแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ การหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล (Association Discovery) การหาความสัมพันธ์ในลักษณะที่เป็นลำดับของข้อมูล (Sequential Pattern Discovery) และการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลกับช่วงเวลาใด ๆ (Similar Time Sequence Discovery)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับในงานวิจัยนี้จะเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล โดยจะเลือกใช้ตัวสถิติที่เรียกว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะเป็นตัววัดระดับหรือขนาดของสัมพันธ์ภาพระหว่างกันและกันของตัวแปรสองตัวซึ่งเราใช้คำว่า สหสัมพันธ์ โดยปกติแล้วเมื่อตัวแปรทั้งสองสัมพันธ์ต่อกันและกันอยู่มากเพียงพอ เราอาจใช้ตัวแปรหนึ่งพยากรณ์ (Prediction) ค่าอีกตัวหนึ่งได้ ตัวแปรที่ใช้พยากรณ์อีกตัวหนึ่งนั้นเรียกว่าตัวแปรอิสระ มักจะแทนด้วยแกนนอน (x) ในแผนผังการกระจาย ส่วนตัวแปรที่ถูกพยากรณ์นั้นเรียกว่าตัวแปรตาม มักจะแทนด้วยแกนตั้ง (y) ดังในหัวข้อที่ 3.3.1 ซึ่งในการเลือกว่าตัวแปรใดจะเป็นตัวแปรอิสระ หรือตัวแปรตามก็ขึ้นอยู่กับว่าเราจะสนใจพยากรณ์ตัวแปรใดก็ให้ตัวแปรนั้นเป็นตัวแปรตาม การแสดงสัมพันธ์ภาพระหว่างตัวแปรนี้ไม่ได้แสดงว่าตัวแปรหนึ่งเป็นสาเหตุของอีกตัวแปรหนึ่งแต่อย่างใด สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองตัวที่ได้จากแผนผังการกระจายเพียงแต่บอกรู้เห็นว่าตัวแปรสองตัวเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน หรือในทางตรงกันข้าม การที่เรียกตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรอิสระ และอีกตัวแปรหนึ่งเป็นตัวแปรตามไม่ได้เกี่ยวกับการเป็นเหตุและผลของกันแต่อย่างใด

### 3.3.2.1 การคำนวณสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัว  $r$  สำหรับสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรที่คำนวณได้จากตัวอย่าง และใช้สัญลักษณ์  $\rho$  สำหรับสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรในประชากรทั้งหมด โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 3.1

$$\rho = r = \frac{S_{(xy)}}{\sqrt{S_{(xx)} \cdot S_{(yy)}}} \quad (3.1)$$

โดยที่  $\rho$  คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของประชากร

$r$  คือ สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวอย่าง

$$S_{(xx)} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)^2}{n} \quad (3.2)$$

$$S_{(yy)} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)^2}{n} \quad (3.3)$$

$$S_{(xy)} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\left( \sum_{i=1}^n X_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)}{n} \quad (3.4)$$

เมื่อ  $n$  คือ จำนวนคู่ของข้อมูล  $xy$

$S_{(xx)}$  คือ ผลรวมของกำลังสองของผลต่างระหว่างค่า  $X$  แต่ละค่ากับค่าเฉลี่ย  $\bar{X}$

$S_{(yy)}$  คือ ผลรวมของกำลังสองของผลต่างระหว่างค่า  $Y$  แต่ละค่ากับค่าเฉลี่ย  $\bar{Y}$

$S_{(xy)}$  คือ ค่าความผันแปรร่วมกัน (Covariation)

### 3.3.2.2 ความหมายของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ค่าของ  $r$  ซึ่งเป็นตัววัดขนาดหรือระดับ (ดัชนี) ของสหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสอง จะอยู่ระหว่าง  $-1$  ถึง  $+1$  เท่านั้น โดยที่  $r$  จะมีค่าและมีความหมายดังต่อไปนี้

-  $r$  มีค่าเป็น  $+$  ถ้าตัวแปรสองตัวเปลี่ยนแปลงไปในทางเดียวกัน คือเมื่อตัวหนึ่งเพิ่มขึ้นอีกตัวก็เพิ่มขึ้นด้วย เรียกว่ามีสหสัมพันธ์ทางบวกระหว่างตัวแปร

-  $r$  มีค่าเป็น  $-$  ถ้าตัวแปรสองตัวเปลี่ยนแปลงไปในทางตรงกันข้าม คือเมื่อตัวหนึ่งเพิ่มขึ้นอีกตัวหนึ่งก็จะลดลง เรียกว่ามีสหสัมพันธ์ทางลบระหว่างตัวแปร

-  $r$  มีค่าเป็น  $0$  ถ้าตัวแปรสองตัวไม่มีการเปลี่ยนแปลงร่วมกันเลย เรียกว่ามีค่าสหสัมพันธ์เป็นศูนย์ หรือ ไม่มีสหสัมพันธ์ต่อกันและกันเลย

- ถ้าค่า  $r$  เท่ากับ  $+1$  เราเรียกว่ามีสหสัมพันธ์ทางบวกแบบสมบูรณ์ (Perfect Positive Correlation) ระหว่างตัวแปร จุดค่าสังเกตบนแผนผังการกระจายจะเรียงเป็นเส้นตรงพอดี (เอียงขวา)

- ถ้าค่า  $r$  เท่ากับ  $-1$  เราเรียกว่ามีสหสัมพันธ์ทางลบแบบสมบูรณ์ (Perfect Negative Correlation) ระหว่างตัวแปร จุดค่าสังเกตบนแผนผังการกระจายจะเรียงเป็นเส้นตรงพอดี (เอียงซ้าย)

ถึงแม้จะไม่กำหนดตายตัวว่า  $r$  จะต้องมีความเท่าใดจึงจะเรียกว่ามีสหสัมพันธ์สูงหรือสหสัมพันธ์ต่ำ เพราะขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่จะใช้ค่าสหสัมพันธ์นั้นว่าต้องการความละเอียดมากเพียงใด แต่เกณฑ์ที่ใช้กันโดยคร่าว ๆ มักจะถือเอาค่า  $|r|$  (ค่า  $r$  ที่ไม่คิดเครื่องหมาย) ระหว่าง  $1.0$  ถึง  $0.7$  เป็นสหสัมพันธ์ระดับสูง ระหว่าง  $0.7$  ถึง  $0.4$  เป็นสหสัมพันธ์อย่างต่ำ และระหว่าง  $0.4$  ถึง  $0$  เป็นสหสัมพันธ์อย่างต่ำมากหรืออาจไม่มีสหสัมพันธ์เลย [5]

### 3.3.3 การหลอมรวมข้อมูล

สำหรับการหลอมรวมข้อมูลในที่นี้จะเป็นการนำข้อมูลที่ได้อาจมาจากขั้นตอนของการดึงเอาลักษณะที่สำคัญออกมา และนำมาหาความสัมพันธ์กันระหว่างข้อมูลแล้ว มารวมเข้าด้วยกัน โดยในงานวิจัยนี้จะอาศัยเทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอย ซึ่งเป้าหมายของงานวิเคราะห์ความถดถอยก็คือ เอกสารที่เป็นเอกสารที่ส่งวนเวียนสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพยายามหาหนทางประมาณค่าพารามิเตอร์  $\beta_j$  ของสมการที่ (3.5) ด้วยวิธีใดวิธีหนึ่งที่เราเห็นว่า เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุด

$$Y_i = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_{ji} + u_i ; i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3.5)$$

โดยที่  $\beta_j$  ในความหมายทางคณิตศาสตร์ก็คือความชัน (Slope) เมื่อวัดเทียบกับระนาบ  $X_j, Y$

นั่นคือ  $\beta_j = \frac{\Delta Y}{\Delta X_j} ; j = 2, 3, 4, \dots, k$  สำหรับงานวิเคราะห์ความถดถอย  $\beta_j$  ในที่นี้จะ

เรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์ความถดถอย (Regression coefficients)

$X_j$  คือตัวแปรอิสระใด ๆ

$Y_j$  คือตัวแปรตาม

$u_i$  คือค่าของความคลาดเคลื่อนจากแหล่งต่าง ๆ รวมกัน

### 3.3.3.1 การกำหนดความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์

เมื่อเราได้ตัวแปรอิสระ ( $X$ 's) ที่คาดว่าจะมีผลต่อความผันผวนในค่าของตัวแปรตาม ( $Y$ ) จากหัวข้อที่แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการกำหนดโครงสร้างความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์  $Y = f(X$ 's) โดยพยายามอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์เพื่อให้ทราบว่า  $f$  คือฟังก์ชันลักษณะใด เป็นสมการเส้นตรง พาราโบลา ไฮเพอร์โบลา เลขชี้กำลัง (Exponential) ล็อก หรือสมการลักษณะใด โดยวิธีที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติก็คือการนำค่าของ  $(X_{ji}, Y_i) ; i = 1, 2, 3, \dots, n ; j = 2, 3, 4, \dots, k$  มาพล็อตลงในแกนโคออร์ดิเนต  $X_j, Y$  กล่าวคือ ให้ทดลองลงจุด (Plot) ค่าสังเกตของ  $Y$  กับ  $X$  ตัวที่  $j$  ในแกน  $X_j, Y$  แล้วตรวจสอบโดยอาศัยความรู้ทางคณิตศาสตร์ว่า  $Y$  กับ  $X_j$  มีโค้งความสัมพันธ์ในรูปใด จากนั้นให้เปลี่ยนตัวแปร  $X$  เพื่อนำมาลงจุดคู่กับ  $Y$  เรื่อยไปจนครบตัวแปรอิสระ  $X$ 's ทุกตัว ผลลัพธ์ที่ได้คือ สมการความสัมพันธ์  $Y = f(X$ 's) ที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น เรามีตัวแปรอิสระ  $X$  ทั้งสิ้น 3 ตัว คือ  $X_2, X_3$  และ  $X_4$  และผลจากการบันทึกข้อมูล  $Z_i = (Y_i, X_{2i}, X_{3i}, X_{4i}) ; i = 1, 2, \dots, n$  ทำให้ทราบค่าสังเกตของตัวแปรทั้งสี่รวม  $n$  ชุด สมมุติผลการทดลองลงจุดข้อมูลในลักษณะของแผนภาพการกระจาย (Scatter diagram) ระหว่าง  $X_2$  กับ  $Y$  ระหว่าง  $X_3$  กับ  $Y$  และระหว่าง  $X_4$  กับ  $Y$  ปรากฏดังนี้

1. ความสัมพันธ์ระหว่าง  $X_2$  กับ  $Y$  มีลักษณะพาราโบลา  $Y = aX^2$

2. โค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $X_3$  กับ  $Y$  มีลักษณะของเอกโพเนนเชียล

$$Y = Ce^{-cX_3}$$

3. โค้งแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $X_4$  กับ  $Y$  มีลักษณะของสมการเส้นตรง

$$Y = C + mX_4$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองทั้ง 3 ประการทำให้เราสามารถกำหนดความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่าง  $Y$  กับ  $X_2, X_3, X_4$  ได้ดังสมการที่ (3.6)

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_2^2 + \beta_3 e^{-\beta_3 X_3} + \beta_4 X_4 + u \quad (3.6)$$

จะเห็นว่าวิธีนี้ทำให้ได้สมการความสัมพันธ์ที่ละเอียดถี่ถ้วน การนำเสนอสมการข้อ 1, 2 และ 3 มารวมกันโดยตรงได้นั้น เพราะมีเหตุผลที่เชื่อได้ว่า ตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่เพิ่มเข้าสู่แบบจำลองนั้น เป็นตัวแปรที่มีส่วนโดยตรงที่เข้ามาช่วยดูดซับ (Absorb) เอาความผันแปรของ  $Y$  ไว้ เมื่อเพิ่มตัวแปรอิสระเข้ามาตัวหนึ่ง ความผันแปรของ  $Y$  จะลดลงไปส่วนหนึ่ง เพราะตัวแปรที่เข้าสู่สมการล่าสุดดังกล่าวจะทำหน้าที่ดูดซับเอาความผันแปรไว้ในตัวเอง [5]

### 3.3.3.2 การวัดสหสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปร

ภายหลังจากได้รับข้อมูลของตัวแปร  $Y$  และตัวแปรอิสระ  $X$ 's มาแล้ว เราควรที่จะวิเคราะห์สหสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง  $X_i$  กับ  $X_j$ ;  $i \neq j = 2, 3, \dots, k$  ดูก่อนว่าตัวแปร  $X$ 's เหล่านี้ คู่ใดมีอัตราความผูกพันกัน สูงค่าน้อยเพียงใด ถ้า  $r_{ij}$  ( $r_{ij}$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่าง  $X_i$  กับ  $X_j$ ) มีค่าไม่สูงนักก็ไม่มีปัญหาใด แต่ถ้า  $r_{ij}$  มีค่าใกล้  $\pm 1$  แสดงว่า  $X_i$  และ  $X_j$  มีส่วนสัมพันธ์กันอยู่ ซึ่งถ้าหากนำทั้ง  $X_i$  และ  $X_j$  ไปเป็นตัวแปรอิสระในสมการ  $Y = f(X$ 's) จะเกิดปัญหาที่สำคัญก็คือ เราไม่อาจแยกได้ออกว่า  $X_i$  หรือ  $X_j$  มีอิทธิพลต่อ  $Y$  และนำไปสู่การตัดสินใจผิดพลาด (ถ้า  $X_i$  สัมพันธ์กับ  $X_j$  อย่างสมบูรณ์เราจะถือว่า  $X_i = kX_j$  หรือ  $X_i$  กับ  $X_j$  มีความไม่อิสระเชิงเส้น) ปัญหานี้เรียกว่าปัญหาภาวะร่วมเส้นตรง (Collinearity หรือ Multicollinearity) ซึ่งมีผลให้เกิดปัญหาหลายประการ เช่น ความแปรปรวนของค่าประมาณ  $\hat{\beta}_j$  ( $V(\hat{\beta}_j)$ ) มีค่าสูงเกินความเป็นจริง ( $V(\hat{\beta}_j) \rightarrow \infty$ ) ทำให้งานขาดความน่าเชื่อถือ และ  $\beta_j$  มีค่าที่อยู่ในรูปของรูปแบบที่ยังไม่กำหนด (Indeterminate Form) คือ  $\frac{0}{0}$  ทำให้ประมาณค่า  $\beta_j$  ไม่ได้เป็นต้น

การตรวจสอบสหสัมพันธ์  $r_{ij}$  ทำให้เราทราบได้ว่า  $X_i$  และ  $X_j$  สัมพันธ์กันสูงต่ำเพียงใด จะได้ป้องกันปัญหาการเกิด Multicollinearity ได้ วิธีปฏิบัติก็คือ ให้พิจารณาตัด  $X_i$  หรือ  $X_j$  ตัวใดตัวหนึ่งทิ้ง โดยตัดตัวแปรอิสระที่สัมพันธ์กับ  $Y$  น้อยกว่าทิ้งไป อย่างไรก็ตามการพิจารณาตัดตัวแปรอิสระ  $X$  ตัวใดตัวหนึ่งทิ้งไปนับว่าเป็นการเสี่ยงต่อความผิดพลาดอันเนื่องมาจากการตัดตัวแปรที่จำเป็นทิ้งโดยรู้เท่าไม่ถึงการณ์ได้มาก ซึ่งควรระวังตรงจุดนี้ด้วย

### 3.3.3.3 การประเมินคุณภาพของค่าประมาณ

การประเมินคุณภาพของค่าประมาณ  $\hat{\beta}_j$ ;  $j = 2, 3, \dots, k$  นั้นมีจุดมุ่งหมายเพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลอง  $Y = \hat{\beta}_1 + \sum_{j=2}^k \hat{\beta}_j X_j$  มีความน่าเชื่อถือเพียงใดและมีความสอดคล้องกับ

หลักฐานทางทฤษฎี ตลอดจนข้อตกลงของสมการถดถอยหรือไม่ การดำเนินการในขั้นนี้จึงดำเนินการเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เป็น 3 ระยะคือ การตรวจสอบความสอดคล้องกับหลักฐานทางทฤษฎี การตรวจสอบโดยนัยทางไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถิติ (First Order Test) และการตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อตกลงของสมการถดถอย (Second Order Test)

### 1. การตรวจสอบความสอดคล้องกับหลักฐานทางทฤษฎี (“A PRIORI” Criteria)

เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของสมการถดถอยของเราว่าสอดคล้องกับหลักเกณฑ์ทางทฤษฎีหรือขัดแย้งกับหลักเกณฑ์ทางทฤษฎี โดยหลักทางปฏิบัติ นั้น เราสามารถตรวจสอบความถูกต้องในขั้นต้นได้ว่างานวิจัยของเราถูกต้องหรือไม่ โดยการเปรียบเทียบเครื่องหมายของ  $\hat{\beta}_j$  ;  $j = 2, 3, \dots, k$  กับเครื่องหมายที่พึงจะเป็นตามทฤษฎี โดยถือเป็นหลักเกณฑ์ว่าถ้าเครื่องหมาย  $\hat{\beta}_j$  ขัดกับเครื่องหมายที่พึงเป็นตามทฤษฎีของ  $\beta_j$  แล้วสมการถดถอยของเรายังมีข้อบกพร่องจำเป็นต้องปรับปรุงแก้ไขให้มีเครื่องหมายสอดคล้องกัน เว้นแต่ได้สอบย่ำซ้ำ ๆ กันโดยอาศัยข้อมูลหลายชุดแล้วยังพบว่าเครื่องหมายของ  $\hat{\beta}_j$  ก็ยังคงขัดแย้งกับเครื่องหมายที่พึงเป็นไปได้ตามทฤษฎีแล้วจึงจะมีเหตุผลพอตั้งข้อสังเกตหรือแสดงความเห็นแย้งกับทฤษฎีได้ หลักเกณฑ์ทั่วไปของการกำหนดเครื่องหมายของ  $\beta_j$  ก็คือการพิจารณาว่าโดยปกติ  $Y$  กับ  $X_j$  ผันแปรค่าไปในทิศทางเดียวกัน หรือสวนทางกัน ถ้า  $Y$  กับ  $X_j$  มีค่าผันแปรไปในทิศทางเดียวกันให้ถือว่า  $\beta_j$  มีเครื่องหมายเป็นบวก ถ้า  $Y$  กับ  $X_j$  ผันแปรค่าไปในทิศทางตรงกันข้ามให้ถือว่า  $\beta_j$  มีเครื่องหมายลบ

### 2. การตรวจสอบโดยนัยทางสถิติ (Statistical Criteria: First Order Test)

การตรวจสอบโดยนัยทางสถิติ หมายถึง การวัดค่าความแปรปรวนของค่าประมาณ  $\hat{\beta}_j$  ( $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  ;  $j = 1, 2, \dots, k$ ) การวัดสหสัมพันธ์ การตรวจสอบนัยสำคัญทางสถิติ (Hypothesis Testing) การวัดความแม่นยำของแบบจำลองโดยอาศัยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination :  $R^2$ )

การวัดค่าความแปรปรวนของ  $\hat{\beta}_j$  มีเจตนาเพื่อจะดูว่า  $\hat{\beta}_j$  ที่ประมาณ โดยอาศัยข้อมูลที่มีอยู่นั้นมีความแม่นยำเพียงใด และ  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  ยิ่งมีค่าต่ำเพียงใดย่อมเป็นดัชนีชี้ให้เห็นว่า  $\hat{\beta}_j$  มีค่าใกล้เคียงค่าจริงคือ  $\beta_j$  มากเพียงนั้น และโดยปกติเราต้องการให้  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  มีค่าต่ำแต่ในทางปฏิบัติ นั้นเรามักไม่อาจควบคุมให้  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  มีค่าสูงต่ำได้ตามความปรารถนา เพราะ  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  จะมีค่าผันแปรไปตามค่าสังเกต  $Z_i = (Y_i, X_{2i}, X_{3i}, \dots, X_{ki})$  ;  $i = 1, 2, \dots, n$  ดังนั้นจึงปรากฏอยู่เสมอมาที่เราจำเป็นต้องใช้แบบจำลอง  $Y = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_j$  ทั้ง ๆ ที่  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  ;  $j = 1, 2, \dots, k$  มีค่าสูง อย่างไรก็ตามการจะดูเฉพาะค่าของ  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  เพียงประการเดียวนั้นว่ายังไม่เพียงพอและคลุมเครืออยู่มาก ทั้งนี้เพราะถ้าข้อมูลเดิมคือ  $Z_i = (Y_i, X_{2i}, X_{3i}, \dots, X_{ki})$  มีลักษณะผันผวนมาก และเป็นตัวเลขปริมาณสูงย่อมส่งผลให้  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  มีค่าสูงตามไปด้วย ซึ่งในกรณีนี้การเพ่งเล็งและยึดเอา  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  เป็นดัชนีวัดความน่าเชื่อถือของงานประมาณค่าจึงเป็นเรื่องที่ค่อนข้างเสี่ยงต่อการตัดสินใจผิดพลาดได้มาก ดังนั้นเราจึงนำเอาวิธีการตรวจสอบนัยสำคัญทางสถิติมาร่วมพิจารณาด้วย การตรวจสอบนัยสำคัญทางสถิติที่ใช้กันโดยทั่วไปสำหรับงานวิเคราะห์ความถดถอยคือ t-test และ F-test โดยมีเจตนาที่จะ

ทดสอบว่า  $\beta_j = 0$  ;  $j = 1, 2, \dots, k$  หรือไม่ เรื่องนี้บ่งชี้ว่าเชื่อมโยงกับการตรวจสอบด้วย  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  เป็นการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างดี กล่าวคือ ถ้า  $V(\hat{\beta}_j) \rightarrow \infty$  จะมีผลให้  $t_c \rightarrow 0$  ซึ่งเป็นเขตยอมรับ (Acceptance Region) เรา จะยอมรับว่า  $\beta_j = 0$  หรือ  $X_j$  ไม่ควรปรากฏในแบบจำลอง ให้ตัด  $X_j$  ออกจากแบบจำลอง ขณะเดียวกัน ถ้า  $V(\hat{\beta}_j) \rightarrow 0$  จะมีผลให้  $t_c \rightarrow \pm\infty$  ซึ่งเป็นเขตวิกฤต (Rejection Region) เรา ปฏิเสธสมมติฐาน  $H_0 : \beta_j = 0$  และยอมรับว่า  $\beta \neq 0$  หรือ  $X_j$  ควรปรากฏอยู่ในแบบจำลอง ส่วนการทดสอบโดย F-test นั้นเรามุ่งตรวจสอบนัยสำคัญเกี่ยวกับ  $\beta_j$  พร้อมกันคราวละหลายตัว หรือทุกตัว วิธีตรวจสอบโดยนัยทางสถิติที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่จะขาดเสียมิได้ก็คือการ ตรวจสอบความแม่นยำของสมการถดถอยโดยอาศัยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) โดยปกติ  $R^2$  เป็นปริมาณที่แสดงให้เห็นถึงอัตราความผันแปรทั้งหมดของ  $Y$  ที่ตัวแปรอิสระดึงเอาไปได้ กล่าวคือ ถ้า  $R^2$  มีค่าสูง แสดงว่าตัวแปรอิสระที่ระบุไว้นั้นช่วยกันดึงเอาความ เคลื่อนไหวในค่าของ  $Y$  ไปได้มาก ถ้า  $R^2$  มีค่าต่ำแสดงว่าตัวแปรอิสระช่วยกันดึงเอาความผันแปร หรือควบคุมความเคลื่อนไหวในค่าของ  $Y$  ได้น้อยและโดยปกติเราต้องการค่า  $R^2$  สูง ๆ อย่างไร ก็ตาม การที่จะตัดสินใจเลือกใช้สมการถดถอยรูปใด เราพึงพิจารณาหลักเกณฑ์ต่าง ๆ ที่กล่าว มาแล้วร่วม ๆ กัน จะยึดหลักเกณฑ์ใดหลักเกณฑ์หนึ่งมิได้ โดยทั่วไปแล้ว เราพึงพิจารณาตัดสินใจ เลือกใช้แบบจำลองหรือสมการถดถอยดังนี้

2.1 ในกรณีที่กำหนดสมการ และระบุตัวแปร โดยยึดถือพื้นฐานทางทฤษฎีเป็นเกณฑ์ เช่นงานทางด้านวิทยาศาสตร์ และเศรษฐศาสตร์ ให้เราถือเอาความถูกต้อง สอดคล้องกับทฤษฎี (เครื่องหมายและขนาดของ  $\beta_j$ ;  $j = 1, 2, \dots, k$ ) เป็นเกณฑ์ กล่าวคือ ถ้า  $\beta_j$  มีขนาดและเครื่องหมาย ขัดแย้งกับความเป็นจริงทางทฤษฎี แม้จะมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ก็ตามให้ถือว่ามีความผิดพลาด ขณะเดียวกันถ้าขนาด และเครื่องหมายของ  $\beta_j$  สอดคล้องกับเหตุผลทางทฤษฎี แม้จะไม่มีนัยสำคัญ (ยอมรับ  $H_0 : \beta_j = 0$ ) ก็ให้ถือว่าแบบจำลองถูกต้อง แต่ทั้งนี้เราต้องเลือกให้เฉพาะแบบจำลองที่ ให้ค่า  $R^2$  สูง ๆ เท่านั้น

2.2 ในกรณีทั่วไปโดยเฉพาะงานวิจัยทางสังคมศาสตร์ ซึ่งมักจะไม่มีทฤษฎีใดช่วยให้ สามารถกำหนดตัวแปร และแบบจำลองที่ชัดเจน ให้พิจารณาเลือกใช้แบบจำลองที่ให้  $R^2$  สูงและมี ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) คือ  $\sqrt{\hat{V}(\hat{\beta}_j)}$ ;  $j = 1, 2, \dots, k$  ต่ำ แต่โดยปกติแล้ว มักจะไม่ค่อยพบสถานการณ์เช่นนี้บ่อยครั้งนัก เหตุการณ์ที่มักปรากฏขึ้นคือเหตุการณ์ที่แบบจำลอง ให้ค่า  $R^2$  สูงแต่  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  สำหรับบางค่าของ  $j$  มักมีค่าสูง หรือ  $R^2$  มีค่าไม่สูงจนอยู่ในระดับที่น่า พึงพอใจ แต่  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  มีค่าต่ำด้วย เหตุการณ์นี้การตัดสินใจจึงจะต้องกระทำให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ ของงานกล่าวคือ

- ถ้างานวิจัยนั้นมีจุดประสงค์เพื่อพยากรณ์ค่าของ  $Y$  ในอนาคต ให้เรายึดเอา  $R^2$  เป็นหลัก โดยเลือกใช้แบบจำลองที่ให้ค่า  $R^2$  สูงแม้  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  จะมีค่าสูงในบางค่าหรือทุกค่าของ  $j$  ก็ตาม

- ถ้างานวิจัยนั้นมีจุดประสงค์เพื่อพัฒนาสูตรโครงสร้างของตัวแปร  $Y$  ให้เรายึดเอา  $\hat{V}(\hat{\beta}_j)$  เป็นหลัก กล่าวคือ ให้ตัดตัวแปรอิสระ  $X_j$  ที่ไม่มีความสำคัญ ( $\beta_j$  ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ) ทิ้งไป

### 3. การตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อตกลงของสมการถดถอย (Second Order Test)

แบบจำลอง  $Y = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_j + u$  สมการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

$\beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_j$  เรียกว่า ส่วนสมการระบบ (Systematic Part)

$u_i$  เรียกว่า ส่วนตัวแปรสุ่ม (Random Part)

ซึ่งเขียนเป็นไดอะแกรมได้ดังนี้คือ

$$Y_i = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_{ji} + u_i ; i = 1, 2, \dots, n = \text{Systematic Part} + \text{Random Part}$$

การศึกษาที่เรียกว่า การตรวจสอบโดยนัยทางสถิติ (First Order Test) คือการศึกษาในส่วนของ สมการระบบ (Systematic Part) ซึ่งประกอบไปด้วย การประมาณค่า  $\beta_j$  และการทดสอบนัยสำคัญของ  $\beta_j$  ส่วนการศึกษาเกี่ยวกับ ส่วนตัวแปรสุ่ม  $u_i$  (Random Part) เรียกว่า การตรวจสอบความสอดคล้องกับข้อตกลงของสมการถดถอย (Second Order Test) งานทั้งสองส่วนนี้อาจแยกจากกันได้โดยเด็ดขาดเพราะมีส่วนเชื่อมโยงถึงกันในรูปแบบของสาเหตุ และผลลัพธ์ โดยปกติ ส่วนของตัวแปรสุ่ม  $u_i$  มักจะทำหน้าที่เป็นสาเหตุมากกว่าเป็นผลลัพธ์ การศึกษาในส่วนของตัวแปรสุ่ม  $u_i$  มักจะเป็นเรื่องที่ยากลำบาก สลับซับซ้อน และมีการพัฒนาทางทฤษฎีอย่างกว้างขวาง และไม่มีที่สิ้นสุด ซึ่งส่งผลกระทบต่อเทคนิคการประมาณค่า และทดสอบนัยสำคัญเกี่ยวกับ  $\beta_j$  ที่แปลกใหม่อยู่ตลอดเวลา เนื่องจากการกำหนดความสัมพันธ์  $Y = f(X's)$  ซึ่งเราจำเป็นต้องกำหนดตัวแปรอิสระ  $X's$  ให้ครบถ้วนนั้น ในทางปฏิบัติเราไม่สามารถกำหนดตัวแปรอิสระให้ครบถ้วนได้นอกจากนี้ ยังมีความผิดพลาดอื่น ๆ เช่น ความคลาดเคลื่อนจากการวัด (Measurement Error), ความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ (Human Error) และอื่น ๆ ร่วมส่งผลกระทบต่ออยู่ด้วย ซึ่งความไม่สมบูรณ์และผิดพลาดเหล่านี้จะมีผลให้ค่าของ  $Y$  ผิดพลาดจากความเป็นจริง เพราะตัวแปรที่ขาดตกและความบกพร่องต่าง ๆ ดังกล่าว จะยังคงส่งอิทธิพลต่อความผันแปรในค่าของ  $Y$  อยู่ แต่เป็นการส่งอิทธิพลอยู่ภายนอก ด้วยเหตุนี้เราจึงจัดให้ตัวแปรทั้งหลายเหล่านี้รวมทั้งข้อผิดพลาดจากแหล่งต่าง ๆ รวมกันอยู่ในตัวแปรสุ่ม  $u$  ผนวงลงในความสัมพันธ์  $Y = f(X's)$  เรียกว่า ค่าความคลาดเคลื่อนสโตคาสติก (Stochastic Error) หรือ ตัวก่อกวน (Disturbance term) ทำให้ความสัมพันธ์ใหม่กลายเป็น  $Y = f(X's, u)$  ซึ่งจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรได้ครบถ้วนบริบูรณ์ตามความต้องการ แต่เนื่องจาก  $u$  เป็นแหล่งรวมของความผันแปรและข้อผิดพลาดมากมายประการไว้ในตัวเอง ทำให้เราไม่อาจวัดค่าของตัวแปรเชิงสุ่ม  $u$  ได้ ทั้งนี้อาจควบคุมพฤติกรรมที่ผันผวนของ  $u$  ได้ และทราบได้ที่เราจะไม่อาจควบคุมพฤติกรรมของ  $u$  ได้ งานวิเคราะห์ความถดถอยก็มิอาจ

ดำเนินต่อไปได้ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องควบคุมพฤติกรรมของ  $u$  ด้วยข้อตกลงบางประการ รวมถึงการกำหนดเงื่อนไขร่วมอื่น ๆ เกี่ยวกับตัวแปรอิสระ  $X$ 's ดังนี้

1.  $u$  เป็นตัวแปรเชิงสุ่ม
2.  $E(u) = 0$
3.  $E(u_i, u_j) = \sigma^2$  ;  $i = j$
4.  $E(u_i, u_j) = 0$  ;  $i \neq j$
5.  $u \sim N(0, \sigma_u^2)$
6. ตัวแปรอิสระ  $X$ 's เป็นตัวคงที่ หรือถ้า  $X$ 's เป็นตัวแปรสุ่ม  $X$ 's และ  $u$  ต้องเป็นอิสระต่อกัน
7. ไม่มี Measurement Error ในตัวแปรอิสระ  $X$ 's
8. ตัวแปรอิสระไม่มีสหสัมพันธ์เชิงเส้นต่อกันอย่างสมบูรณ์ หรือตัวแปร  $X$ 's ต้องเป็นอิสระต่อกัน

ข้อตกลงเหล่านี้เรากำหนดขึ้นทั้งเพื่อควบคุมความเคลื่อนไหวของ  $u$  และเพื่อความสะดวกในเชิงทฤษฎี โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเชิงทฤษฎีความน่าจะเป็นและทฤษฎีทางสถิติ งานวิเคราะห์ความถดถอยซึ่งพัฒนาขึ้นตั้งแต่ต้น เช่น สูตรต่าง ๆ การอภิปรายผล การตัดสินใจ ฯลฯ จึงกระทำไปตามข้อตกลงเหล่านี้ หรือยึดเอาข้อตกลงเหล่านี้เป็นเครื่องช่วย [5]

### 3.3.3.4 แบบจำลองเชิงเส้นรูปทั่วไปของงานวิเคราะห์ความถดถอย (General Linear Model)

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงเฉพาะรูปทั่วไปของสมการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) เท่านั้น ซึ่งจากสมการถดถอยในรูปทั่วไปนี้เราสามารถนำไปลดรูปสู่กรณีเฉพาะได้ ทุกกรณี สำหรับคำว่าสมการเชิงเส้น หรือแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Equation หรือ Linear Model) ในที่นี้หมายถึง ความเป็นเชิงเส้นในพารามิเตอร์  $\beta_j$  (Linear in Parameter  $\beta$ ) ซึ่งในแบบจำลอง

$$Y = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_j + u \quad \text{นั้น } \beta_j \text{ ทำหน้าที่เป็นตัวไม่ทราบค่า (Unknown Parameter) ขณะที่ } X_j$$

เป็นตัวแปรอิสระที่ทราบค่าได้จากข้อมูลที่มีอยู่ ด้วยเหตุนี้แบบจำลอง  $Y = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_j + u$

ที่  $\beta_j$  ยกกำลัง 1 เท่านั้นที่เป็นสมการหรือแบบจำลองเชิงเส้น (Linear Model หรือ Linear

Equation) ถ้า  $\beta_j$  ยกกำลังอื่น ๆ หรืออยู่ในรูปอื่น เช่น อยู่ในรูปผลคูณ  $\beta_s \beta_t$  อยู่ในรูปผลหาร

$\beta_s / \beta_t$  อยู่ในรูป  $\log$  เช่น  $\log \beta_j$ ,  $e^{\beta}$  หรือรูปกำลังของ  $X_j$  เช่น  $\beta_s X_j^{\beta_j}$  เป็นต้น จะมีใช้

แบบจำลองเชิงเส้น แต่เรียกว่าแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Model) ซึ่งจะต้องใช้วิธี

ประมาณค่า  $\beta_j$  ที่แตกต่างกันออกไป ส่วนกรณีที่ตัวแปร  $X_j$  ยกกำลังอื่นที่มีใช้ 1 ขณะที่  $\beta_j$  ยก

กำลัง 1 เช่น  $Y = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_j^c + u$  จะไม่ถือว่าเป็นแบบจำลองที่ไม่เป็นเชิงเส้น แต่เรียกชื่อ

เฉพาะว่า แบบจำลองเส้นโค้งเชิงเส้น (Curvilinear Model) ซึ่งยังคงใช้วิธีประมาณค่า  $\beta_j$

เช่นเดียวกับกรณีของแบบจำลองเชิงเส้นทุกประการ เพียงแต่แปลงรูป  $X_j^c$  ให้เป็นตัวแปรใหม่ คือ

$W_j$  เพื่อให้มีรูปร่างเป็นแบบจำลองเชิงเส้นได้อย่างสมบูรณ์ [5]

ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้น ระหว่างตัวแปร  $Y$  และตัวแปรอิสระ  $X_1, X_2, \dots, X_k$  ปรากฏดังสมการที่ (3.7)

$$Y_i = \beta_1 + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \dots + \beta_k X_{ki} + u_i ; i = 1, 2, \dots, n \quad (3.7)$$

= Systematic Part + Random Part

โดยที่  $X_{ii} = 1$  เสมอ ;  $i = 1, 2, \dots, n$  หรือ  $X_1 = (1, 1, \dots, 1)^T$   
หรือสามารถแสดงในรูปย่อ ได้ดังนี้

$$Y_i = \beta_1 + \sum_{j=2}^k \beta_j X_{ji} + u ; i = 1, 2, \dots, n$$

จากสมการที่ (3.7) เมื่อเรากำหนดค่าให้  $i = 1, 2, \dots, n$  จะปรากฏระบบสมการไม่เอกพันธ์เชิงเส้น (Linear Non-Homogeneous Equation) ทั้งหมด  $n$  สมการดังนี้

$$Y_1 = \beta_1 + \beta_2 X_{21} + \beta_3 X_{31} + \dots + \beta_k X_{k1} + u_1 \quad (1)$$

$$Y_2 = \beta_1 + \beta_2 X_{22} + \beta_3 X_{32} + \dots + \beta_k X_{k2} + u_2 \quad (2)$$

$$Y_3 = \beta_1 + \beta_2 X_{23} + \beta_3 X_{33} + \dots + \beta_k X_{k3} + u_3 \quad (3)$$

$$Y_n = \beta_1 + \beta_2 X_{2n} + \beta_3 X_{3n} + \dots + \beta_k X_{kn} + u_n \quad (n)$$

จัดเป็นรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$Y = X\beta + U \quad (3.8)$$

โดยที่  $Y$  คือ เวกเตอร์ขนาด  $n \times 1$  ของตัวแปรตาม  $Y$  คือ  $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)^T$

$U$  คือ เวกเตอร์ขนาด  $n \times 1$  ของ Stochastic Term (หรือ เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Error Term หรือ Disturbance Term) คือ  $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)^T$

$\beta$  คือ เวกเตอร์ขนาด  $k \times 1$  ของพารามิเตอร์  $\beta$  คือ  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)^T$

$X$  คือ เมทริกซ์ขนาด  $n \times k$  ของสัมประสิทธิ์ของพารามิเตอร์  $\beta$  หรือนัยหนึ่ง  $X$  คือ

เมทริกซ์ของเวกเตอร์  $X_1, X_2, \dots, X_k$  กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X = \begin{bmatrix} 1 & X_{21} & X_{31} & \cdots & X_{k1} \\ 1 & X_{22} & X_{32} & \cdots & X_{k2} \\ 1 & X_{23} & X_{33} & \cdots & X_{k3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & X_{2n} & X_{3n} & \cdots & X_{kn} \end{bmatrix} = (X_1, X_2, \dots, X_k)$$

จากแบบจำลอง  $Y = X\beta + U$  จะเห็นว่าเรามีความจำเป็นต้องควบคุมความเคลื่อนไหวทั้ง  $U$  และ  $X$  ไว้หลายประการเพื่อประโยชน์ในการประมาณค่าเวกเตอร์  $\beta$  หรือนัยหนึ่ง  $\beta_j$ ;  $j = 1, 2, \dots, k$  เหตุที่ต้องควบคุมตัวแปร  $U$  ก็เพราะ  $U$  เป็นตัวแปรที่เป็นแหล่งข้อผิดพลาดทั้งปวงจากการกำหนดความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ระหว่างตัวแปร  $Y$  กับตัวแปร  $X$ 's และด้วยเหตุที่  $U$  เป็นแหล่งรับความผิดพลาดทั้งหมดเอาไว้ ค่าของ  $U$  จึงไม่แน่นอนและไม่อาจวัดได้หรือสังเกตได้ (Unobservable Variable) และเพื่อให้งานประมาณค่าดำเนินไปได้ เราจึงจำเป็นต้องควบคุมความเคลื่อนไหวของ  $U$  ไว้ในกรอบที่พิจารณาเห็นว่าจำเป็นด้วยการกำหนดเป็นข้อตกลงได้ดังนี้

1.  $U$  เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรสุ่ม
2.  $E(U) = 0$  เมื่อ  $0$  คือ เวกเตอร์ศูนย์ (Zero vector) หรือ  $0 = (0, 0, \dots, 0)^T$
3.  $E(UU^T) = \sigma^2 I_n$ ; เมื่อ
4.  $U \sim N(0, \sigma^2 I_n)$

สำหรับตัวแปร  $X$ 's ก็เป็นไปในทำนองเดียวกัน คือ ในงานคาดหมายหรือพยากรณ์เกี่ยวกับค่าของ  $Y$  นั้นเราจะเห็นได้ว่า  $Y$  ย่อมมีความแปรเปลี่ยนไปได้จากสาเหตุหลายประการ โดยเราจะใช้  $X_j$  แทนสาเหตุที่  $j^{\text{th}}$  ที่ผลักดันให้  $Y$  เปลี่ยนแปลงค่าโดยที่  $X_j$  และ  $X_l$  ต้องมีสาเหตุเดียวกันหรือสืบเนื่องถึงกัน ขณะเดียวกัน  $X$ 's เหล่านี้จะต้องทำหน้าที่เป็นเพียงเงื่อนไขที่มีผลให้  $Y$  มีค่าแปรเปลี่ยนไปเท่านั้น ดังนั้นเราจึงต้องเพิ่มข้อตกลงไว้อีกดังนี้

5.  $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$  คือ เซตของค่าคงที่ หรือ  $X$  เป็นเมทริกซ์ค่าคงที่ (Fixed Matrix)
6.  $X$  ต้องมี Full Rank หรือ  $r(X) = k \leq n$

สำหรับข้อตกลงเหล่านี้อาจเป็นจริงหรือไม่เป็นจริงก็ได้ในทางปฏิบัติ สำหรับความหมายของข้อตกลงทั้ง 6 ประการนี้ จะขออธิบายดังนี้

1.  $U$  เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรสุ่ม หมายความว่า  $u_i$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$  เป็นตัวแปรสุ่ม การกำหนดให้ตัวแปร  $u_i$  เป็นตัวแปรสุ่มมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้สามารถควบคุมความเคลื่อนไหวของ  $u_i$  โดยได้อาศัยทฤษฎีความน่าจะเป็นซึ่งเราสามารถกำหนดฟังก์ชันความหนาแน่น (Probability density function, pdf) ของ  $u_i$  เพื่อใช้ประโยชน์ในการหาการแจกแจงของกลุ่มตัวอย่าง (Sampling Distribution) ของ  $\hat{\beta}$  และ  $Y$  ได้ โดยถ้ามองในแง่ของความเหมาะสมของข้อตกลง เราจะพบว่า เป็นสิ่งที่สมควรกำหนดเช่นนี้ เพราะ  $u$  มีความเคลื่อนไหวในลักษณะที่เป็นไปโดยสุ่มอยู่โดยธรรมชาติซึ่งเราไม่อาจคาดหมายล่วงหน้าได้ ข้อตกลงนี้จะส่งผลให้  $Y$  เป็นตัวแปรสุ่มด้วยเพราะ  $Y$  เป็นฟังก์ชันของ  $U$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.  $E(U) = 0$  หรือ  $E(u_i) = 0; i = 1, 2, \dots, n$  การกำหนดเช่นนี้หมายถึง การกำหนดว่า โดยเฉลี่ยแล้วค่าของ  $u_i$  จะหักลบกันหมดโดยไม่ส่งผลกระทบต่อความสัมพันธ์ระหว่าง  $Y$  กับ  $X$ 's ขณะเดียวกันลองพิจารณาจากสมการ  $Y = X\beta + U$  เราจะพบว่า  $E(Y) = X\beta$  แสดงว่าเมื่อมีการทดลองซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ณ ค่า  $X = X_0$  ค่าเฉลี่ยของ  $Y$  จะปรากฏอยู่บนผิว (Surface)  $Y = X\beta$  ดังนั้นข้อตกลงว่า  $E(U) = 0$  จึงถือเสมือนกับเรามีข้อตกลงว่า  $E(Y) = X\beta$  และชี้ให้เห็นว่าในการพยากรณ์นั้นเราจะพยากรณ์ค่า  $E(Y_i)$  มิใช่  $Y_i$

3.  $E(UU^T) = \sigma^2 I_n$  เป็นข้อตกลงที่ผนวกข้อตกลงสำคัญ 2 ประการไว้ด้วยกัน คือ  $E(u_i, u_j) = 0; i \neq j$  และ  $E(u_i^2) = \sigma^2; i = j$  พิจารณา  $E(UU^T)$  จะพบว่า

$$E(UU^T) = V(U) = E \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{bmatrix} (u_1, u_2, \dots, u_n) \quad (3.9)$$

$$= \begin{bmatrix} E(u_1^2) & E(u_1 u_2) & \cdots & E(u_1 u_n) \\ E(u_2 u_1) & E(u_2^2) & \cdots & E(u_2 u_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E(u_n u_1) & E(u_n u_2) & \cdots & E(u_n^2) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \sigma^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \sigma^2 \end{bmatrix}$$

$$= \sigma^2 I_n \quad (3.10)$$

ขณะเดียวกันข้อตกลงนี้จะส่งผลสะท้อนสู่ตัวแปร  $Y$  ด้วยดังนี้

$$\therefore Y = X\beta + U$$

$$\text{ดังนั้น} \quad V(Y) = V(U) = \sigma^2 I_n \quad (3.11)$$

โดยที่  $V(Y)$  คือ ความแปรปรวนเวกเตอร์ของตัวแปรตาม  $Y$

$V(U)$  คือ ความแปรปรวนของเวกเตอร์ของตัวแปรเชิงสุ่ม  $u_i$

$\sigma^2$  คือ ความแปรปรวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้วนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 $I_n$  คือ เมทริกซ์เอกลักษณ์  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อตกลงนี้ เราสามารถจำแนกการพิจารณาในรายละเอียดเป็นข้อตกลงย่อยได้ดังนี้

3.1  $E(u_i^2) = E(u_i u_i) = \sigma^2$ ;  $i = j$  แสดงว่าในทุกจุดของค่า  $X$ 's ที่คงที่ ค่าของ  $u_i$  จะมีการแจกแจงค่าเบี่ยงเบนไปจากค่าเฉลี่ย (คือ  $E(u_i) = 0$ ) เท่ากันเสมอ

3.2  $E(u_i u_j) = 0$  หรือ  $E(Y_i Y_j) = 0$ ;  $i \neq j$  หมายความว่าค่าของ  $u$  หรือค่าของ  $Y$  ในต่างช่วงต่างวาระ (Period) กันจะไม่สัมพันธ์กันหรือกระทบสืบเนื่องถึงกัน

4.  $U \sim N(0, \sigma^2 I_n)$  หรือ  $u_i \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $i = 1, 2, \dots, n$  ข้อตกลงนี้มีผลสะท้อนให้เสมือนตกลงว่า  $Y \sim N(X\beta, \sigma^2 I_n)$

5.  $X$  เป็นเมทริกซ์ค่าคงที่ (Fixed Matrix) หรือ  $X$  เป็นเซตของค่าคงที่ โดยที่  $X = (X_1, X_2, \dots, X_k)$  เมื่อ  $X_1 = (1, 1, 1, \dots, 1)^T$  กล่าวคือ ณ ค่า  $X_j = X_{j0}$  และทำการสำรวจและทดลองซ้ำ ๆ ณ ค่า  $X_j = X_{j0}$  นี้ค่าของ  $Y$  ที่ปรากฏขึ้นอาจซ้ำค่ากันหรือมีค่าแตกต่างกันก็ได้ การผันแปรในค่าของ  $Y$  ณ ค่า  $X_j = X_{j0}$  นี้มิใช่เพราะอิทธิพลของ  $X_j$  หากเป็นไปเพราะความผันแปรในค่าของ  $Y$  และอิทธิพลของ  $u$

6.  $X$  เป็นเมทริกซ์ที่มี Full Rank หมายความว่าสดมภ์ต่าง ๆ ของเมทริกซ์  $X$  คือ เวกเตอร์  $X_1, X_2, \dots, X_k$  จะต้องเป็นอิสระเชิงเส้นต่อกัน หรือนัยหนึ่งตัวแปรอิสระ  $X_j$  และ  $X_s$ ;  $j \neq s$  ต้องไม่เกี่ยวข้องกัน มิใช่ตัวแปรตัวเดียวกัน หรือไม่มีสหสัมพันธ์ที่สมบูรณ์ต่อกัน

ในทางทฤษฎีเมทริกซ์ เราสามารถพิสูจน์ได้โดยง่ายว่า ถ้า  $X$  มี Full Rank แล้ว เมทริกซ์  $(X^T X)^{-1}$  จะมีค่าปรากฏ และเนื่องจาก  $(X^T X)^{-1}$  จะถูกนำไปใช้ในการประมาณค่าให้กับ  $\hat{\beta}$  (ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป) จึงจะเห็นได้ว่าเราจำเป็นต้องมีเมทริกซ์  $(X^T X)^{-1}$  จึงจะสามารถประมาณค่า  $\beta$  ได้ ดังนั้น การตั้งข้อตกลงว่าเมทริกซ์  $X$  ต้องมี Full Rank จึงเป็นข้อตกลงที่มีผลสืบเนื่องโดยตรงต่อการปรากฏค่าของ  $\hat{\beta}$

### 3.3.3.5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ $\beta$

#### 1. หนทางเลือกในการประมาณค่า $\beta$

ในที่นี้จะเสนอวิธีประมาณค่าพารามิเตอร์  $\beta$  เป็น 2 วิธี วิธีแรกจะประมาณค่าโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary Least Square, OLS) ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยข้อตกลงเกี่ยวกับฟังก์ชันความหนาแน่น (pdf) ของตัวแปรสุ่ม  $u$  (หรือนัยหนึ่งคือ pdf ของ  $Y$ ) กับอีกวิธีหนึ่งคือวิธี MLE (Maximum Likelihood Estimation) ซึ่งจำเป็นต้องอาศัย pdf ของ  $Y$  ดังนี้

#### 1.1 วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Ordinary Least Square, OLS)

$$\text{จากสมการ } Y = X\beta + U$$

ให้  $\hat{\beta} = (\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_k)^T$  เป็นเวกเตอร์ของตัวประมาณค่าของ  $\beta$  ซึ่ง

เมื่อแทนที่  $\hat{\beta}$  ลงในสมการ  $Y = X\beta + U$

จะได้

$$Y = X\hat{\beta} + e \quad (3.12)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $e = \hat{U} = Y - X\hat{\beta}$

พิจารณา ผลรวมกำลังสองของส่วนเหลือ (Sum Square of Residual) จะพบว่า

$$\sum e_i^2 = (e_1, e_2, \dots, e_n) \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{bmatrix} = e^T e \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} e^T e &= (Y - X\hat{\beta})^T (Y - X\hat{\beta}) \\ &= (Y^T - \hat{\beta}^T X^T)(Y - X\hat{\beta}) \\ &= Y^T Y - Y^T X\hat{\beta} - \hat{\beta}^T X^T Y + \hat{\beta}^T X^T X\hat{\beta} \\ &= Y^T Y - 2\hat{\beta}^T X^T Y + \hat{\beta}^T X^T X\hat{\beta} \end{aligned} \quad (3.14)$$

โดยที่  $Y^T X\hat{\beta}$  และ  $\hat{\beta}^T X^T Y$  ต่างก็เป็นสเกลาร์ (Scalar) เพราะมีขนาด  $1 \times 1$  ดังนั้นจึงรวมกันได้

ดังนั้น

$$\frac{\partial e^T e}{\partial \hat{\beta}} = \frac{\partial}{\partial \hat{\beta}} (Y^T Y - 2\hat{\beta}^T X^T Y + \hat{\beta}^T X^T X\hat{\beta})$$

จะได้

$$0 - 2X^T Y + 2X^T X\hat{\beta} = 0$$

ทำให้ได้สมการรูปทั่วไป (Normal Equation) ดังนี้

$$(X^T X)\hat{\beta} = X^T Y \quad (3.15)$$

และเนื่องจากเรามีข้อตกลงว่าเมทริกซ์  $X$  ต้องมี Full Rank  $(X^T X)^{-1}$  จึงมีค่าปรากฏ

ดังนั้น

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.16)$$

เราจะได้ว่าสมการที่ (3.16) คือค่าประมาณของ  $\beta$  จากสมการที่ (3.16) แสดงว่า  $\hat{\beta}$  คือ OLS-Estimator ของ  $\beta$  และเนื่องจาก  $(X^T X)^{-1} X^T$  เป็นเมทริกซ์ของค่าคงที่ ดังนั้น  $\hat{\beta}$  จึงเป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของ  $Y$  เราจึงเรียก  $\hat{\beta}$  ว่าเป็นตัวประมาณค่าเชิงเส้น (Linear Estimator)

## 1.2 วิธี Maximum Likelihood Estimation Method (MLE)

จากสมการฟังก์ชันความหนาแน่นจะได้ว่า

$$L = \prod_{i=1}^n f_{u_i}(u_i) = \prod_{i=1}^n \left\{ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{u_i^2}{2\sigma^2}\right\} \right\} \quad (3.17)$$

$$= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp\left\{-\frac{\sum_{i=1}^n u_i^2}{2\sigma^2}\right\}$$

$$= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp\left\{-\frac{U^T U}{2\sigma^2}\right\}$$

$$= \frac{1}{(2\pi\sigma^2)^{n/2}} \exp\left\{-\frac{(Y - X\beta)^T (Y - X\beta)}{2\sigma^2}\right\}$$

$$\therefore \log L = -\frac{n}{2} \log(2\pi\sigma^2) - \frac{(Y - X\beta)^T (Y - X\beta)}{2\sigma^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{\partial}{\partial \beta} \log L = 0 - \frac{1}{2\sigma^2} \{0 - 2X^T Y + 2X^T X\beta\} = 0$$

จะได้

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3.18)$$

จะเห็นว่า  $\hat{\beta}$  ในสมการ (3.18) ซึ่งเป็น MLE ของ  $\beta$  ก็คือตัวประมาณค่าตัวเดียวกับ  $\hat{\beta}$  ตามวิธี OLS ที่ได้ตามสมการ (3.16) และขอให้สังเกตว่า  $\hat{\beta}$  ก็คือฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) ของ Y

2. คุณสมบัติของตัวประมาณค่า  $\hat{\beta}$ 

ในการศึกษาคุณสมบัติของตัวประมาณค่า  $\hat{\beta}$  เราจะต้องพิจารณาถึงเซตที่เป็นไปได้ทั้งหมด (All Possible Set) ของ  $\hat{\beta}$  ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปทุกครั้งที่มีการทดลองซ้ำ ๆ เมื่อกำหนดให้ X คงที่อยู่ ณ  $X = X_0$  กล่าวคือ เมื่อเรากำหนดให้  $X = X_0$  แล้วทำการบันทึกข้อมูลหรือทดลองซ้ำ ๆ อยู่ ณ จุดนั้น ผลที่ได้รับก็คือทำให้เราได้รับเวกเตอร์ Y และเวกเตอร์ U ที่แตกต่างกันไปซึ่งมีผลให้  $\hat{\beta}$  มีค่าผันแปรไปได้มากมาย ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้พิสูจน์คุณสมบัติของ  $\hat{\beta}$  ว่าเป็นตัวประมาณค่าที่ปราศจากอคติของ  $\beta$  หรือไม่ รวมถึงการหาค่าความแปรปรวน ( $V(\hat{\beta})$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าของ  $\hat{\beta}$  ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1 ค่าคาดหมายของ  $\hat{\beta}$  ( $E(\hat{\beta}) = \beta$ )

ทำการจัดรูป  $\hat{\beta}$  ให้เป็นฟังก์ชันของ  $\beta$  และ  $U$

จาก  $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$  และจากแบบจำลอง  $Y = X\beta + U$

$$\text{ดังนั้น} \quad \hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T (X\beta + U) \quad (3.19)$$

$$= (X^T X)^{-1} (X^T X)\beta + (X^T X)^{-1} X^T U$$

$$\hat{\beta} = \beta + (X^T X)^{-1} X^T U \quad (3.20)$$

แสดงว่า  $\hat{\beta}$  เป็นฟังก์ชันของ  $\beta$  และ  $U$

$$\text{ดังนั้น} \quad E(\hat{\beta}) = \beta + (X^T X)^{-1} X^T E(U) = \beta \quad (3.21)$$

2.2 ค่าความแปรปรวนของ  $\hat{\beta}$   $V(\hat{\beta})$

ให้  $V(\hat{\beta})$  เป็นค่าความแปรปรวนของ  $\hat{\beta}$  ดังนั้น

$$\text{จะได้} \quad V(\hat{\beta}) = E\{\hat{\beta} - E(\hat{\beta})\}\{\hat{\beta} - E(\hat{\beta})\}^T \quad (3.22)$$

$$= E(\hat{\beta} - \beta)(\hat{\beta} - \beta)^T$$

$$= E \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 - \beta_1 \\ \hat{\beta}_2 - \beta_2 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k - \beta_k \end{bmatrix} (\hat{\beta}_1 - \beta_1, \hat{\beta}_2 - \beta_2, \dots, \hat{\beta}_k - \beta_k)$$

$$= \begin{bmatrix} E(\hat{\beta}_1 - \beta_1)^2 & E(\hat{\beta}_1 - \beta_1)(\hat{\beta}_2 - \beta_2) & \cdots & E(\hat{\beta}_1 - \beta_1)(\hat{\beta}_k - \beta_k) \\ E(\hat{\beta}_2 - \beta_2)(\hat{\beta}_1 - \beta_1) & E(\hat{\beta}_2 - \beta_2)^2 & \cdots & E(\hat{\beta}_2 - \beta_2)(\hat{\beta}_k - \beta_k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E(\hat{\beta}_k - \beta_k)(\hat{\beta}_1 - \beta_1) & E(\hat{\beta}_k - \beta_k)(\hat{\beta}_2 - \beta_2) & \cdots & E(\hat{\beta}_k - \beta_k)^2 \end{bmatrix}$$

แต่จากสมการที่ (3.20) เราทราบว่า  $\hat{\beta}$  เป็นฟังก์ชันของ  $\beta$  และ  $U$  คือ  $\hat{\beta} = \beta + (X^T X)^{-1} X^T U$

$$\text{ดังนั้น} \quad V(\hat{\beta}) = E\{\beta + (X^T X)^{-1} X^T U - \beta\}\{\beta + (X^T X)^{-1} X^T U - \beta\}^T \quad (3.23)$$

$$= E\{(X^T X)^{-1} X^T U\}\{U^T X (X^T X)^{-1}\}$$

$$= (X^T X)^{-1} X^T E(UU^T) X (X^T X)^{-1}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
&= (X^T X)^{-1} X^T \sigma^2 I_n X (X^T X)^{-1} \\
&= \sigma^2 (X^T X)^{-1} (X^T X) (X^T X)^{-1} \\
&= \sigma^2 (X^T X)^{-1}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

จากสมการที่ (3.24)  $V(\hat{\beta}) = \sigma^2 (X^T X)^{-1}$  จะพบว่าเราสามารถหาค่า  $(X^T X)^{-1}$  ได้ เพราะ  $X$  เป็นเมทริกซ์ของค่าคงที่ (Fixed Matrix) แต่ยังไม่อาจทราบค่าของ  $\sigma^2 (X^T X)^{-1}$  ได้ เพราะ  $\sigma^2$  เป็นพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า ด้วยเหตุนี้จึงยังไม่อาจทราบค่า  $V(\hat{\beta})$  ได้ หนทางหนึ่งที่จะจะทำให้ทราบค่า  $V(\hat{\beta})$  ได้ก็คือการประมาณค่า  $\sigma^2$  ขึ้นมาใช้แทน  $\sigma^2$  โดยในงานวิจัยนี้จะอาศัยการประมาณค่าเฉลี่ยของกำลังสองของส่วนเหลือ (Expected Mean of Square of Residual; EMS) ดังนี้ จากผลรวมของกำลังสองของส่วนเหลือ (Sum of Square Residual)  $\sum e_i^2 = e^T e$  จะพบว่า

$$e^T e = (Y - X\hat{\beta})^T (Y - X\hat{\beta}) \tag{3.25}$$

แต่  $Y = X\beta + U$  และ  $\hat{\beta} = \beta + (X^T X)^{-1} X^T U$

$$\begin{aligned}
\text{จะได้ } e^T e &= [X\beta + U - X\{\beta + (X^T X)^{-1} X^T U\}]^T [X\beta + U - X\{\beta + (X^T X)^{-1} X^T U\}] \\
&= \{U - X(X^T X)^{-1} X^T U\}^T \{U - X(X^T X)^{-1} X^T U\} \\
&= \{[I_n - X(X^T X)^{-1} X^T] U\}^T \{[I_n - X(X^T X)^{-1} X^T] U\} \\
&= U^T \{I_n - X(X^T X)^{-1} X^T\} \{I_n - X(X^T X)^{-1} X^T\} U \\
&= U^T \{I_n - X(X^T X)^{-1} X^T\} U
\end{aligned}$$

เมทริกซ์  $M = (I_n - X(X^T X)^{-1} X^T)$  เป็น ไอเดมโพเทนต์เมทริกซ์ และเมทริกซ์สมมาตร (Idempotent Symmetrix Matrix) (ซึ่งมีคุณสมบัติว่า  $M^2 = MM = M$  และ  $M^T = M$  นอกจากนี้  $\text{tr } M = r(M)$ )

$$\begin{aligned}
\text{จะได้ } E(e^T e) &= \sigma^2 \text{tr}(I_n - X(X^T X)^{-1} X^T) \\
&= \sigma^2 (\text{tr } I_n - \text{tr } X(X^T X)^{-1} X^T) \\
&= \sigma^2 (n - \text{tr } (X^T X)^{-1} X^T X) \\
&= \sigma^2 (n - \text{tr } I_k) \\
&= \sigma^2 (n - k)
\end{aligned} \tag{3.26}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นั่นคือ 
$$E(\sum e_i^2) = \sigma^2(n-k) \text{ หรือ } E\left(\frac{\sum e_i^2}{n-k}\right) = \sigma^2 \quad (3.27)$$

โดยที่  $E\left(\frac{\sum e_i^2}{n-k}\right)$  คือ ค่าคาดหวังของค่าเฉลี่ยกำลังของส่วนเหลือ

ดังนั้น  $\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum e_i^2}{n-k}$  คือตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียงของ  $\sigma^2$  หรือเสนอ  $\sigma^2$  ในรูปเมทริกซ์ได้  
ดังนี้

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{e^T e}{n-k} = \frac{(Y - X\hat{\beta})^T (Y - X\hat{\beta})}{n-k} \quad (3.28)$$

ดังนั้น 
$$\begin{aligned} (Y - X\hat{\beta})^T (Y - X\hat{\beta}) &= Y^T Y - 2\hat{\beta}^T X^T Y + \hat{\beta}^T X^T X \hat{\beta} \\ &= Y^T Y - 2\hat{\beta}^T X^T Y + \hat{\beta}^T X^T Y \\ &= Y^T Y - \hat{\beta}^T X^T Y \\ \hat{\sigma}^2 &= \frac{Y^T Y - \hat{\beta}^T X^T Y}{n-k} \end{aligned} \quad (3.29)$$

โดยที่  $\hat{\sigma}^2$  คือ ค่าประมาณของ  $\sigma^2$

n คือ จำนวนข้อมูล

k คือ จำนวนตัวแปรอิสระ

2.3  $\hat{\beta}$  เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียงที่ดีที่สุด (Best Linear Unbiased Estimator: BLUE) ของ  $\beta$

ให้  $\hat{\beta}^*$  เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง (Unbiased Estimator) อีกตัวหนึ่งของ  $\beta$  นอกเหนือจากที่มีอยู่เดิม คือ  $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$  โดยที่  $\hat{\beta}^* \neq \hat{\beta}$

กำหนดให้ 
$$\hat{\beta}^* = \{(X^T X)^{-1} X^T + C\}Y = (X^T X)^{-1} X^T Y + CY = \hat{\beta} + CY \quad (3.30)$$

โดยที่ C คือ เมทริกซ์ขนาด  $k \times n$  ของค่าคงที่ กล่าวคือ  $C = (c_{ij})_{k \times n}$  หรือ C คือเมทริกซ์ขนาดเดียวกันกับ  $(X^T X)^{-1} X^T$

การพิสูจน์จะพิสูจน์เป็น 3 กรณีคือ

1.  $\hat{\beta}$  เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) ของตัวแปรสุ่ม  $Y_i; i = 1, 2, \dots, n$

2.  $\hat{\beta}^*$  เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง (Unbiased Estimator) ของ  $\beta$  ภายใต้เงื่อนไขที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
3.  $V(\hat{\beta}^*) \geq V(\hat{\beta})$  หักดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวทางในการจะเป็นดังนี้

1. จาก  $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$  เมื่อกำหนดให้  $M = (X^T X)^{-1} X^T$  ดังนั้นจะได้

$$\hat{\beta} = MY$$

หรือ

$$\hat{\beta}_j = \sum_{i=1}^n m_{ij} Y_i ; j = 1, 2, \dots, k$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า  $\hat{\beta}$  เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรสุ่ม  $Y_i ; i = 1, 2, \dots, n$

ในทำนองเดียวกัน  $\hat{\beta}^* = \hat{\beta} + CY = (X^T X)^{-1} X^T Y + CY = (M + C)Y$

จะได้

$$\hat{\beta}_j^* = \sum_{i=1}^n (m_{ji} + c_{ji}) Y_i ; j = 1, 2, \dots, k$$

ซึ่งแสดงว่า  $\hat{\beta}^*$  ก็เป็นฟังก์ชันเชิงเส้นของตัวแปรสุ่ม  $Y_i ; i = 1, 2, \dots, n$  เช่นกัน

2. พิจารณา  $\hat{\beta}^* = \hat{\beta} + CY$  โดยที่  $\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y$  และ  $Y = X\beta + U$

ดังนั้น

$$\hat{\beta}^* = (X^T X)^{-1} X^T (X\beta + U) + C(X\beta + U) \quad (3.31)$$

$$= \beta + (X^T X)^{-1} X^T U + CX\beta + CU$$

$$= \beta + CX\beta + \{(X^T X)^{-1} X^T + C\}U$$

ดังนั้น

$$E(\hat{\beta}^*) = \beta + CX\beta + 0 = \beta + CX\beta \neq \hat{\beta}^*$$

แสดงว่า  $\hat{\beta}^*$  จะเป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียง (Unbiased Estimator) ของ  $\beta$  ได้ก็ต่อเมื่อ

$CX = 0$  (0 ในที่นี้คือเมทริกซ์ศูนย์ (Zero Matrix) ขนาด  $k \times k$ ) หรือนัยหนึ่ง  $CX = 0$  คือเงื่อนไขที่จะ

ทำให้  $\hat{\beta}^*$  เป็นตัวประมาณค่าที่ไม่เอนเอียงของ  $\beta$

3. พิจารณา  $V(\hat{\beta}^*)$  จะพบว่า

$$V(\hat{\beta}^*) = E(\hat{\beta}^* - \beta)(\hat{\beta}^* - \beta)^T \quad (3.32)$$

แต่

$$\hat{\beta}^* - \beta = \beta + CX\beta + \{(X^T X)^{-1} X^T + C\}U - \beta$$

และเนื่องจาก  $CX = 0$

ดังนั้น

$$\hat{\beta}^* - \beta = \{(X^T X)^{-1} X^T + C\}U$$

นั่นคือ

$$V(\hat{\beta}^*) = E(\hat{\beta}^* - \beta)(\hat{\beta}^* - \beta)^T$$

$$= \{(X^T X)^{-1} X^T + C\}E(UU^T)\{(X^T X)^{-1} X^T + C\}^T$$

$$= \sigma^2 \{(X^T X)^{-1} X^T + C\}\{X(X^T X)^{-1} + C^T\}$$

$$= \sigma^2 \{(X^T X)^{-1} X^T X (X^T X)^{-1} + (X^T X)^{-1} X^T C^T + CX(X^T X)^{-1} + CC^T\}$$

แต่เนื่องจาก  $CX = 0$  และ  $(CX)^T = X^T C^T = 0$

ดังนั้น

$$V(\hat{\beta}^*) = \sigma^2 \{(X^T X)^{-1} + CC^T\} = \sigma^2 (X^T X)^{-1} + \sigma^2 CC^T$$

นั่นคือ

$$V(\hat{\beta}^*) = V(\hat{\beta}) + \sigma^2 CC^T$$

หรือ

$$V(\hat{\beta}_j^*) = V(\hat{\beta}_j) + \sigma^2 C_j C_j^T ; j = 1, 2, \dots, k$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $C_j$  คือ แถวที่  $j$  ของเมทริกซ์  $C$

พิจารณา  $V(\hat{\beta}_j^*) = V(\hat{\beta}_j) + \sigma^2 C_j C_j^T$  ไม่เป็นจำนวนติดลบ หรือเมทริกซ์  $CC^T$  เป็นเมทริกซ์ของจำนวนบวกน้อย ๆ (Semi Positive Definite Matrix) แสดงว่า  $V(\hat{\beta}_j^*) - V(\hat{\beta}_j) \geq 0$  หรือ  $V(\hat{\beta}_j^*) \geq V(\hat{\beta}_j); j = 1, 2, \dots, k$

แสดงว่า  $\hat{\beta}$  มีความแปรปรวนต่ำที่สุด (Minimum Variance) หรือเป็นตัวประมาณค่าที่ดีที่สุด (Best Estimator) นั่นคือผลการพิสูจน์ข้อ 1 – 3 ยืนยันให้เห็นว่า  $\hat{\beta}$  เป็น BLUE ของ  $\beta$

### 3. สัมประสิทธิ์แห่งการตัดสินใจ (Coefficient of Determination) : $R^2$

สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ คือดัชนีวัดความแม่นยำ (Precision) ของสมการประมาณค่า โดยถือว่าดัชนีดังกล่าวคือ อัตราส่วนเปรียบเทียบของความผันแปรที่อธิบายได้ด้วยแบบจำลอง (Explained Variation) ต่อความผันแปรรวมทั้งหมดของตัวแปรสุ่ม  $Y$  หมายความว่า โดยปกติของงานวิเคราะห์ความถดถอยนั้นเราให้ความสนใจในธรรมชาติของตัวแปร  $Y$  และมีความปรารถนาที่จะทราบพฤติกรรมของตัวแปรสุ่ม  $Y$  ในอนาคต แต่เนื่องจากตัวแปร  $Y$  เป็นตัวแปรสุ่ม ความผันผวนในพฤติกรรมของ  $Y$  ย่อมมีสาเหตุมาจากแหล่งต่าง ๆ หลายแหล่งผสมผสานกัน วิธีในทางปฏิบัติของเราในกรณีเช่นนี้ก็คือ ให้พยายามแยกหรือดึงเอาสาเหตุที่ผสมผสานกันดังกล่าวแล้วออกมา แล้วนำเสนอไว้ในรูปของตัวแปรอิสระ  $X$ 's ให้มากที่สุดเท่าที่จะมากได้ ด้วยเหตุนี้ส่วนหนึ่งของสาเหตุที่ทำให้ค่าของ  $Y$  ผันแปรไปได้จึงปรากฏให้เห็นเด่นชัดขึ้นและมองเห็นได้ว่าเป็นอะไร ด้วยการเสนอสมการความสัมพันธ์ไว้ ในรูปของ  $Y = f(X$ 's) ดังนั้นส่วนหนึ่งของความผันแปรของ  $Y$  (Total Variation) จึงระบุได้ว่ามาจากสาเหตุแห่งความผันแปรที่มองเห็นได้ อธิบายได้ซึ่งก็คือความผันแปรอันเนื่องมาจากตัวแปรอิสระ  $X$ 's เหล่านี้ แต่เนื่องจากสาเหตุที่ผสมผสานกันแล้วมีผลให้ตัวแปรสุ่ม  $Y$  มีค่าผันผวนไปนั้น มีจำนวนสาเหตุที่มากมายยากที่จะระบุได้ครบถ้วน จึงเป็นสิ่งที่เป็นไปได้ที่เราจะดึงสาเหตุเหล่านั้นออกมาให้ปรากฏตัวได้ครบ จึงทำให้สาเหตุแห่งความผันแปรของ  $Y$  บางส่วนตกค้างหรือหลงเหลืออยู่ สาเหตุเหล่านี้จะแอบส่งอิทธิพลต่อความผันผวนในค่าของ  $Y$  อย่างซ่อนเร้น โดยที่เราเองไม่อาจบ่งบอกระบุหรืออธิบายได้ ด้วยเหตุดังกล่าวเราจึงสามารถสรุปได้ว่า

ความผันแปรรวมของ  $Y =$  ความผันแปรในส่วนที่เนื่องจาก  $X$ 's + ความผันแปรที่แฝงเร้น

เนื่องจากการวัดค่าความแม่นยำหรือคุณภาพของงาน โดยเสนอผลในรูปของปริมาณสัมบูรณ์ (Absolute Quantity) เป็นสิ่งที่เข้าใจได้ยาก วิธีที่จะทำให้เข้าใจได้ง่ายและเข้าใจได้ทันทีควรใช้ปริมาณสัมพัทธ์ (Relative Quantity) โดยเสนอคุณภาพของงานในลักษณะต่อไปนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ} = \frac{\text{Explained Variation}}{\text{Total Variation}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{หรือ} \quad = \frac{\text{Explained Variation}}{\text{Total Variation}} \times 100\%$$

โดยที่ Explained Variation หมายถึง ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้

Total Variation หมายถึง ความผันแปรรวม

จะเห็นได้ว่าถ้าความผันแปรที่สามารถอธิบายได้มีค่าสูงขึ้น อัตราส่วนเปรียบเทียบจะมีค่าสูงขึ้น และสูงสุดเท่ากับ 1 ถ้าความผันแปรที่สามารถอธิบายได้มีค่าเท่ากับความผันแปรรวม ซึ่งมีความหมายว่าแบบจำลองที่เรากำหนดตัวแปรอิสระขึ้นมาเพื่ออธิบายความผันผวนในค่าของ Y นั้นสามารถอธิบายความผันผวนดังกล่าวได้ครบถ้วน และแสดงให้เห็นได้ในขณะเดียวกันว่าความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้มีค่าเท่ากับ 0 ในทำนองเดียวกันถ้าความผันแปรที่สามารถอธิบายได้มีค่าต่ำลง อัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่าง ความผันแปรที่อธิบายได้/ความผันแปรรวม จะมีค่าต่ำลง มีผลให้ ความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้/ความผันแปรรวม มีค่าสูงขึ้น และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่าต่ำสุดถ้า ความผันแปรที่ไม่สามารถอธิบายได้มีค่าเท่ากับความผันแปรรวม ซึ่งแสดงให้เห็นว่างานประมาณค่าแบบจำลองดังกล่าวล้มเหลวโดยสิ้นเชิง และจากที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดนี้แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 กล่าวคือ

$$0 \leq \text{สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ} \leq 1$$

สำหรับในงานวิจัยนี้จะขอแนะนำสมการการหาสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่นิยมใช้ในงานวิเคราะห์ความถดถอยสำหรับแบบจำลองเชิงเส้นรูปทั่วไปมาใช้ โดยจะไม่แสดงการพิสูจน์ให้เห็นไว้ ณ ที่นี้ ดังนี้คือ

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}^T X^T Y - n\bar{Y}^2}{Y^T Y - n\bar{Y}^2} \quad (3.33)$$

โดยที่  $R^2$  คือ สัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

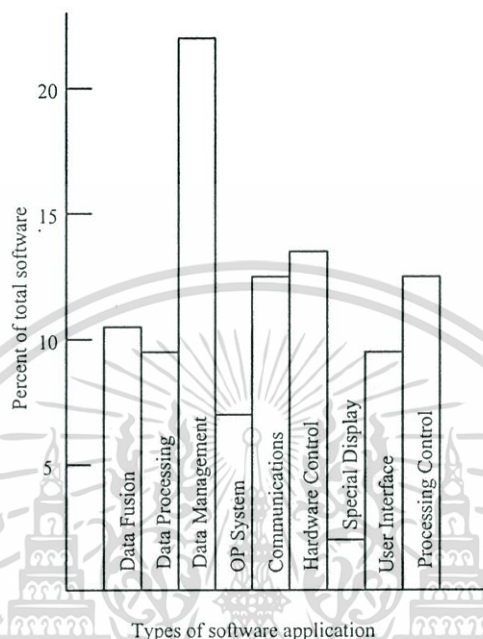
$\hat{\beta}$  คือ ค่าที่ได้จากการประมาณของ  $\beta$

n คือ จำนวนข้อมูล

### 3.4 แบบจำลองทางสถาปัตยกรรม

การแปลงรูปจากฟังก์ชันโมเดลที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อ 3.2 ให้อยู่ในรูปแบบของข้อมูลที่เป็นรูปธรรมให้กับระบบการหลอมรวมจะต้องใช้ทั้งส่วนของฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของคอมพิวเตอร์ และวิธีการในการแก้ปัญหาในหลาย ๆ แนวทาง ฟังก์ชันการทำงานที่จะเข้ามาช่วยเหลือหรือสนับสนุนไม่ว่า การสร้างระบบที่เป็นระบบเฉพาะทางได้แก่ การจัดการทางด้านฐานข้อมูล (Database Management) ใช้

การติดต่อระหว่างคนกับระบบกลไกต่าง ๆ (Man/Machine Interfaces) ซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับการติดต่อสื่อสาร (Communications Software) และฟังก์ชันการทำงานที่เป็นประโยชน์ต่าง ๆ เป็นต้น สำหรับระบบการหลอมรวมข้อมูลที่ถูกสร้างขึ้นจะใช้ซอฟต์แวร์ โดยในบางส่วนของระบบที่ถูกสร้างขึ้นนี้ซึ่งเป็นส่วนเฉพาะของอัลกอริทึมสำหรับการหลอมรวมข้อมูล โดยในส่วนนี้จะใช้ซอฟต์แวร์น้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์ของซอฟต์แวร์รวม



รูปที่ 3.11 แสดงข้อมูลโดยรวมของซอฟต์แวร์ที่ถูกนำมาใช้กับระบบการหลอมรวมข้อมูล

(ที่มา Hall, 1992)

จากรูปที่ 3.11 จะเห็นว่าฟังก์ชันหลักที่ต้องการในระบบจะเป็นการจัดการกับฐานข้อมูล ข้อมูลจำนวนมากจะต้องถูกเก็บรักษาไว้ในระบบการหลอมรวม รวมถึงข้อมูลอินพุตที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ ข้อมูลที่สอดคล้องกับเซนเซอร์และแบบจำลองไดนามิกต่าง ๆ ข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบสภาพแวดล้อม และรวมไปถึงองค์ความรู้ต่าง ๆ ที่จะถูกนำมาใช้ในระบบ เหล่านี้ล้วนแต่ต้องการฟังก์ชันการจัดการกับข้อมูลรวมถึงการเก็บข้อมูล การดึงข้อมูลมาแสดง สถานที่ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล และการแปลงรูปข้อมูลจากที่มีอยู่ในระบบเพื่อนำออกมาแสดงในรูปแบบที่มีความเหมาะสม การจัดการเกี่ยวกับฐานข้อมูลสำหรับระบบการหลอมรวมข้อมูลก่อนข้างจะมีความซับซ้อนเนื่องจากทั้งจำนวนและชนิดของข้อมูลที่จะถูกนำเข้ามาให้กับระบบ ซอฟต์แวร์ฐานข้อมูลจะต้องมีประสิทธิภาพสูงในการจัดเก็บข้อมูลและทำงานให้ทันกับปริมาณข้อมูลที่จะถูกนำเข้ามาโดยเซนเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนติดต่อผู้ใช้ (User Interface) สำหรับระบบการหลอมรวมข้อมูลจะเป็นส่วนที่ใช้สำหรับให้ผู้ใช้สามารถใส่ฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ให้แก่ระบบ โดยข้อมูลที่แสดงออกมาจะเป็นข้อมูลแบบกราฟิก หรือข้อมูลเชิงตัวเลขก็ได้ หรืออาจจะเป็นการตั้งค่าต่าง ๆ เพื่อให้ระบบทำงานได้ตามที่ผู้ใช้ต้องการ

สำหรับฟังก์ชันการทำงานอื่น ๆ ที่จะถูกนำเข้ามาใช้ในระบบจะเป็นฟังก์ชันที่เข้ามาช่วยในการปรับปรุงให้ระบบการหลอมรวมมีประสิทธิภาพสูงขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการวิจัย

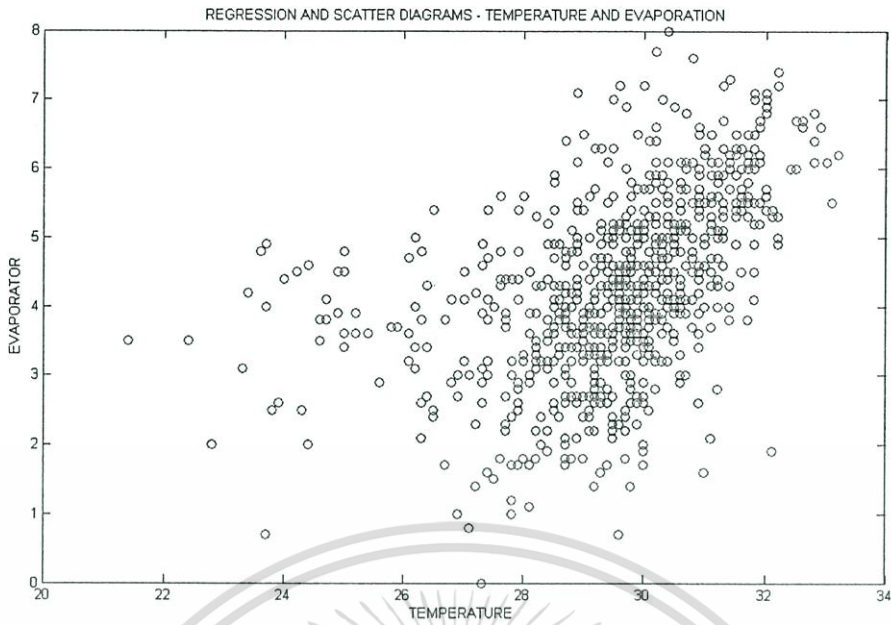
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงผลการวิจัยที่ได้จากระบบการหลอมรวมข้อมูล โดยในขั้นแรกจะทำการค้นหาตัวแปรที่มีผลกับการระเหยของน้ำ จากนั้นจะทำการหาสมการหลักที่จะใช้ในการประมาณค่าการระเหยของน้ำจากข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาที่ถูกจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลด้วยวิธีทางสถิติที่เรียกว่าการวิเคราะห์ความถดถอยแบบหลายตัวแปร ซึ่งผลที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับค่าการระเหยที่วัดได้จากถาดวัดการระเหย และค่าการระเหยที่คำนวณได้จากสมการทางอุทกวิทยาเพื่อดูประสิทธิภาพของการประมาณค่าของแบบจำลอง

#### 4.1 การประมาณค่าการระเหยจากระบบการหลอมรวมข้อมูล

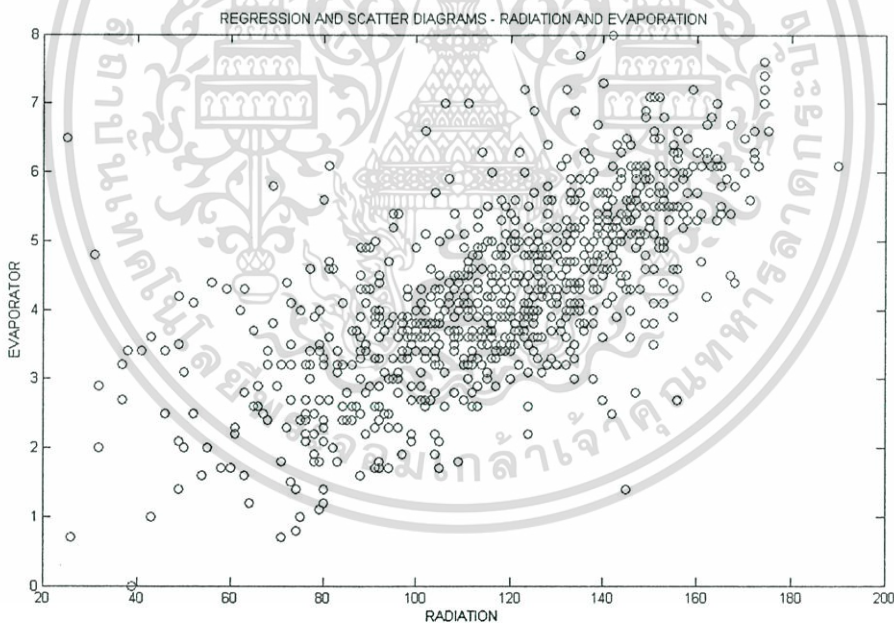
สำหรับในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงการประมาณค่าการระเหยโดยใช้ระบบการหลอมรวมข้อมูล ซึ่งในงานวิจัยนี้จะใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา ที่กรมอุตุนิยมวิทยา สถานีบางนาได้ทำการวัดและจัดเก็บไว้แล้ว ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2548 ถึง วันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2550 มาจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล (Database) เพื่อทำการวิเคราะห์ โดยหลังจากที่เราได้ข้อมูลแล้วในขั้นตอนแรกจะเป็นการคัดกรองข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่องานการวิเคราะห์การหลอมรวมข้อมูลมาใช้ โดยในขั้นนี้จะเป็นการนำข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยามาพล็อตลงในแผนภาพการกระจายเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระต่าง ๆ กับค่าการระเหยจากถาดวัดการระเหยดังรูปที่ 4.1 – 4.7 ซึ่งจากแผนภาพการกระจายจะเห็นว่าตัวแปรทางอุตุนิยมวิทยาที่มีความสัมพันธ์กันค่าของการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหยจะมีอยู่ 3 ตัวคือ 1. รังสีแสงอาทิตย์ 2. อุณหภูมิ และ 3. ลม และเมื่อเราได้ตัวแปรอิสระมาแล้ว เราจะต้องทำการหาสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้ง 3 ตัวเสียก่อน เพื่อที่จะได้ดูว่าระหว่างตัวแปรเหล่านี้จะมีความสัมพันธ์ต่อกันหรือไม่ โดยสมการที่จะใช้ในการหาความสัมพันธ์จะเห็นดังสมการที่ (4.1)

$$r_{ij} = \frac{\sum (x_{ii} - \bar{x}_i)(x_{ji} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum (x_{ii} - \bar{x}_i)^2 \sum (x_{ji} - \bar{x}_j)^2}} \quad (4.1)$$

จากสมการที่ (4.1) เราจะได้ค่า  $-1 \leq r_{ij} \leq 1$  โดยผลที่ได้จะเป็นดังตารางที่ 4.1

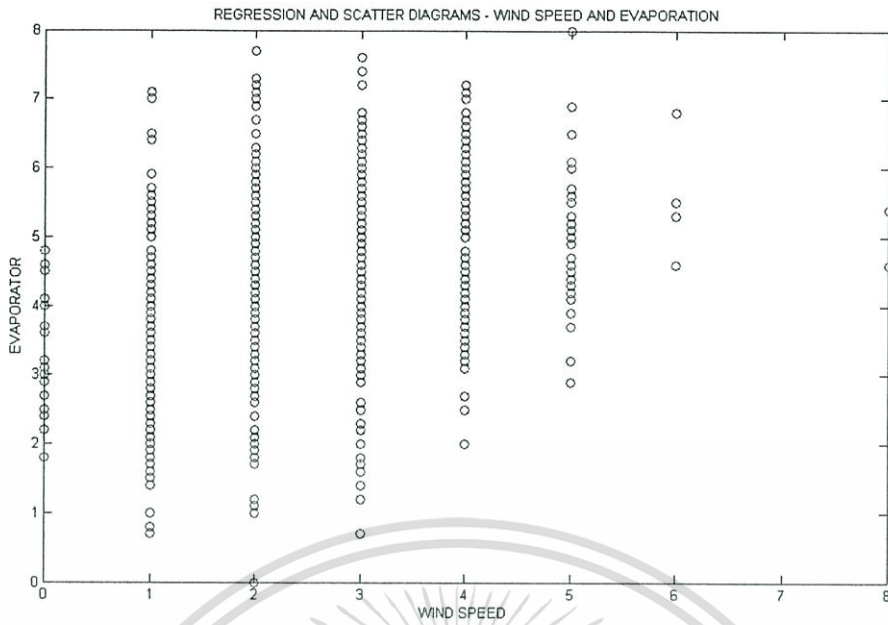


รูปที่ 4.1 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างอุณหภูมิกับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย

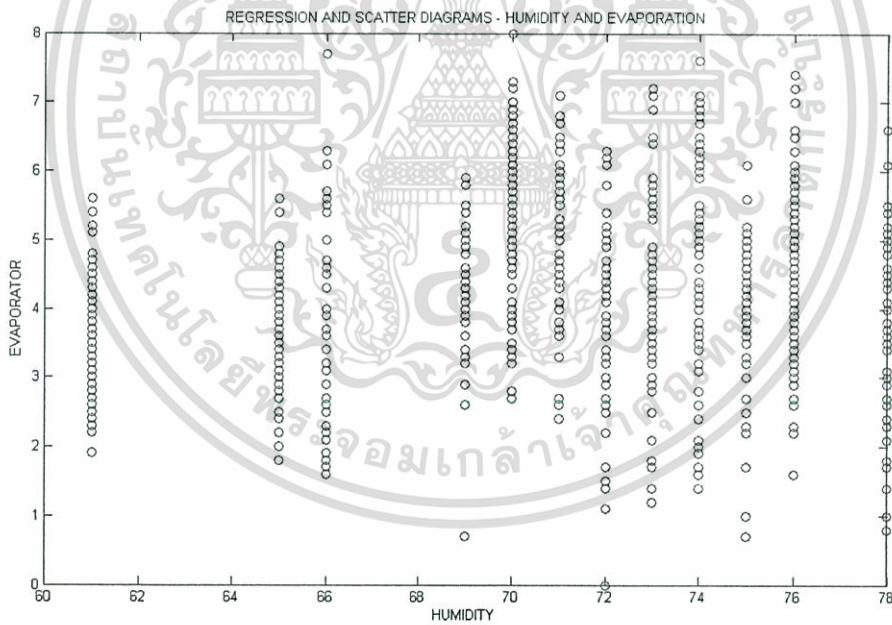


รูปที่ 4.2 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างรังสีแสงอาทิตย์กับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

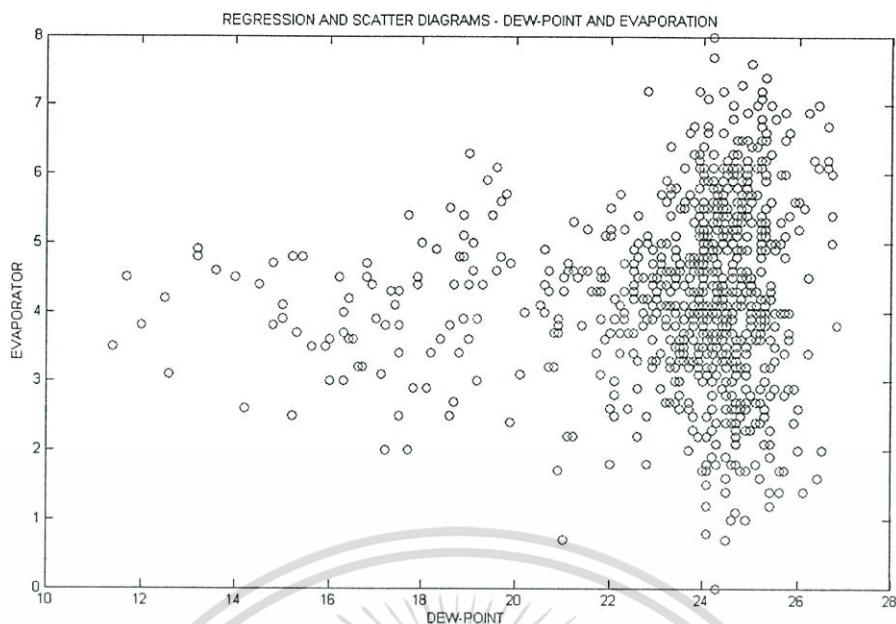


รูปที่ 4.3 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างความเร็วลมกับค่าการระเหยที่ได้จากดาวัดการระเหย

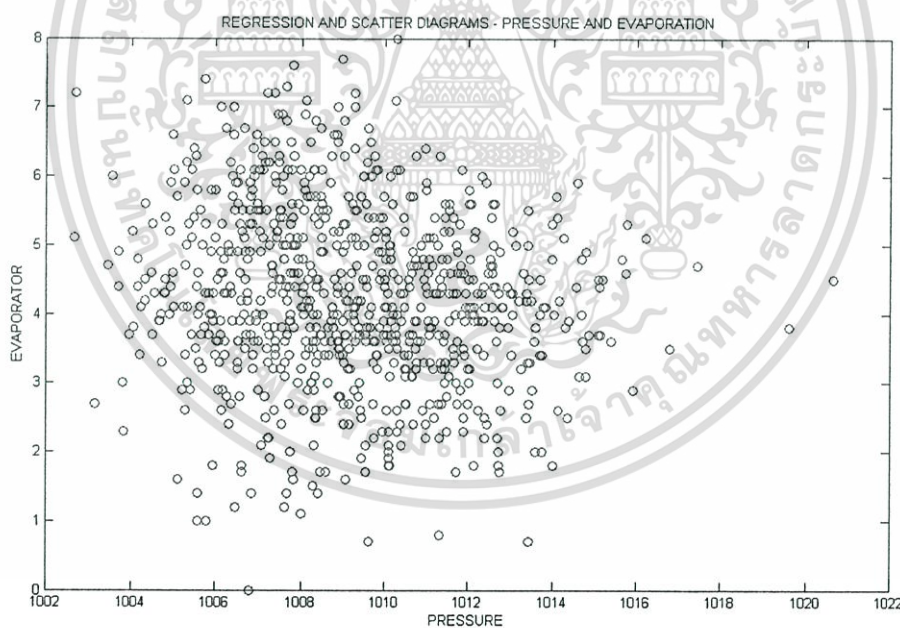


รูปที่ 4.4 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างความชื้นกับค่าการระเหยที่ได้จากดาวัดการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

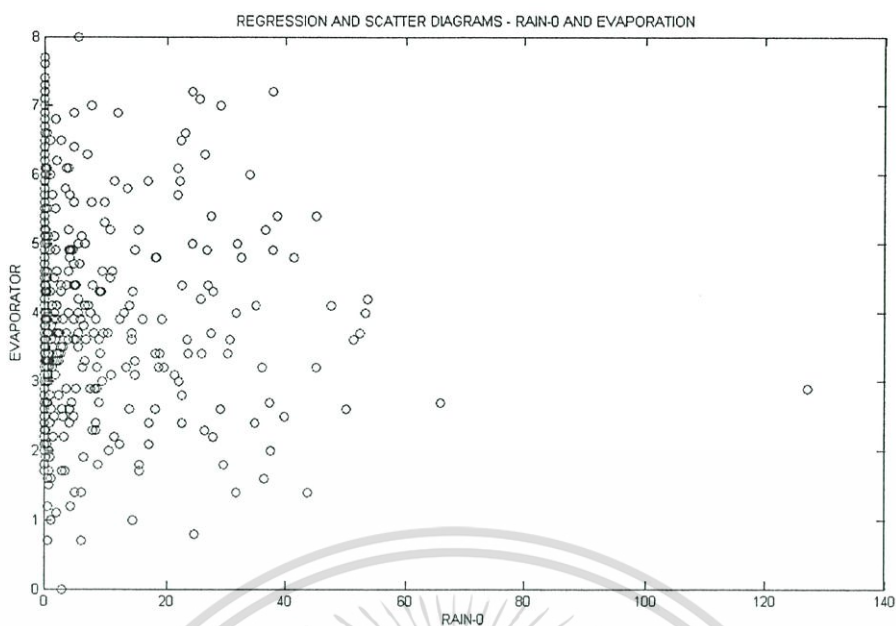


รูปที่ 4.5 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างอุณหภูมิจุดน้ำค้างกับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย



รูปที่ 4.6 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างความดันอากาศกับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 แสดงแผนภาพการกระจายระหว่างปริมาณน้ำฝนกับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ทางอุตุนิยวิทยา

ตัวแปรอิสระตัวที่ 1	ตัวแปรอิสระตัวที่ 2	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
รังสีแสงอาทิตย์	อุณหภูมิ	0.5905
รังสีแสงอาทิตย์	ความเร็วลม	0.3624
อุณหภูมิ	ความเร็วลม	0.3716

จากตารางที่ 4.1 เราจะเห็นว่าระหว่างตัวแปรอิสระแต่ละตัวจะมีสหสัมพันธ์ต่อกันอยู่ในช่วง 0.6 – 0.3 ซึ่งทำให้ทราบว่าตัวแปรแต่ละตัวไม่มีสหสัมพันธ์ต่อกันอย่างสมบูรณ์ จึงทำให้เราสามารถนำตัวแปรเหล่านี้ไปใช้ในการประมาณค่าการระเหยได้

สำหรับในขั้นตอนต่อไปจะเป็นการประมาณค่าการระเหยโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ความถดถอยดังสมการที่ (4.2)

$$Y = X\hat{\beta} + e \quad (4.2)$$

ซึ่งจากสมการที่ (4.2) จะเห็นว่าเราจะต้องทำการประมาณค่า  $\hat{\beta}$  ก่อน ด้วยสมการที่ (4.3)

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (4.3) ทำการนำข้อมูลที่มีอยู่มาหาค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$X^T X = \begin{bmatrix} 775 & 91797 & 23077 & 1958 \\ 91797 & 1.1472e+7 & 2.7493e+6 & 2.4143e+5 \\ 23077 & 2.7493e+6 & 6.8836e+5 & 58741 \\ 1958 & 2.4143e+5 & 58741 & 6098 \end{bmatrix}$$

$$(X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.95707 & 0.00064208 & -0.035153 & 0.0058993 \\ 0.00064208 & 2.6617e-6 & -3.1297e-5 & -1.0066e-5 \\ -0.035153 & -3.1297e-5 & 0.001326 & -0.00024682 \\ 0.0058993 & -1.0066e-5 & -0.00024682 & 0.0010459 \end{bmatrix}$$

$$X^T Y = \begin{bmatrix} 3333.3 \\ 4.1375e+5 \\ 99959 \\ 8918.2 \end{bmatrix}$$

จากสมการที่ (4.3) จะได้

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} -5.3897 \\ 0.02332 \\ 0.21952 \\ 0.15514 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\beta}_1 \\ \hat{\beta}_2 \\ \hat{\beta}_3 \\ \hat{\beta}_4 \end{bmatrix}$$

ดังนั้นสมการถดถอยที่ใช้ประมาณค่าการระเหย  $E(Y) = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4$  คือ

$$E(Y) = -5.3897 + 0.02332X_2 + 0.21952X_3 + 0.15514X_4$$

เมื่อเราได้สมการถดถอยที่จะใช้ในการประมาณค่าการระเหยแล้วเราจะต้องทำการหาค่าความแปรปรวน  $\hat{V}(\hat{\beta})$  ของสมการที่ได้จากสมการที่ (4.4)

$$\hat{V}(\hat{\beta}) = \sigma^2 (X^T X)^{-1} \quad (4.4)$$

โดยที่

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{Y^T Y - \hat{\beta}^T X^T Y}{n - k} \quad (4.5)$$

จะได้  $Y^T Y = 15635$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\hat{\beta}^T X^T Y = [-5.3897 \quad 0.02332 \quad 0.21952 \quad 0.15514] \begin{bmatrix} 3333.3 \\ 4.1375e+5 \\ 99959 \\ 8918.2 \end{bmatrix} = 15010$$

ดังนั้น 
$$\hat{\sigma}^2 = \frac{1}{775-4}(15635-15010) = 0.810635538$$

นั่นคือ

$$\hat{V}(\hat{\beta}) = \sigma^2 (X^T X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.77583 & 0.00052049 & -0.028496 & 0.0047822 \\ 0.00052049 & 2.1577e-6 & -2.5371e-5 & -8.1596e-6 \\ -0.028496 & -2.5371e-5 & 0.0010749 & -0.00020008 \\ 0.0047822 & -8.1596e-6 & -0.00020008 & 0.00084786 \end{bmatrix}$$

จะได้  $\hat{V}(\hat{\beta}_1) = 0.77583$ ,  $\hat{V}(\hat{\beta}_2) = 2.1577e-6$ ,  $\hat{V}(\hat{\beta}_3) = 0.0010749$ ,  $\hat{V}(\hat{\beta}_4) = 0.00084786$

จากค่าความแปรปรวนเราสามารถหาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error) ได้จากสมการที่ (4.6)

$$s_{\hat{\beta}_j} = \sqrt{\hat{V}(\hat{\beta}_j)} \quad (4.6)$$

จะได้  $s_{\hat{\beta}_1} = 0.8808121$ ,  $s_{\hat{\beta}_2} = 0.0014689$ ,  $s_{\hat{\beta}_3} = 0.0327856$ ,  $s_{\hat{\beta}_4} = 0.0291180$

เราจึงสามารถเสนอสมการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = -5.3897 + 0.02332X_2 + 0.21952X_3 + 0.15514X_4$$

[0.8808121]    [0.0014689]    [0.0327856]    [0.0291180]

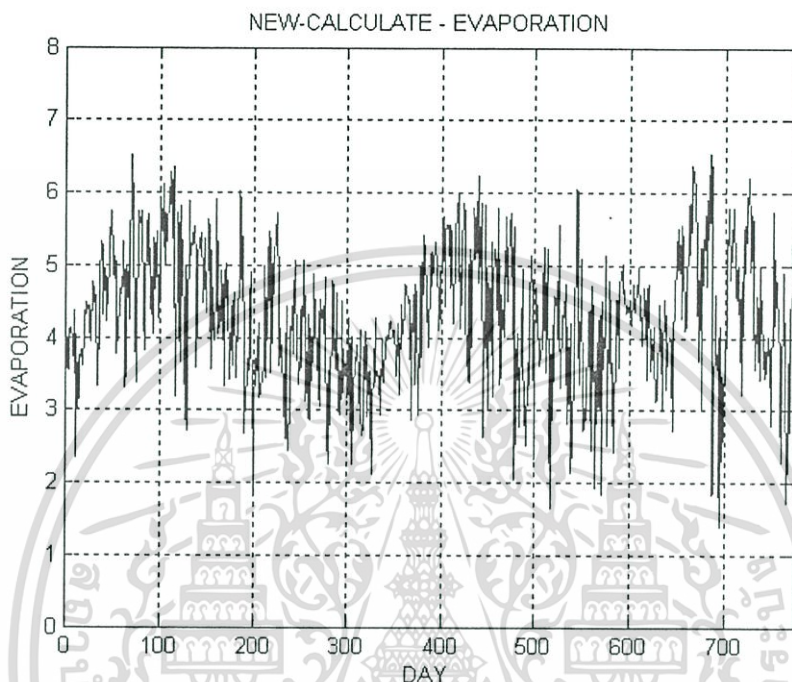
ทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ) ของสมการการประมาณค่าการระเหยได้จากสมการที่ (4.7)

$$R^2 = \frac{\hat{\beta}^T X^T Y - n\bar{Y}^2}{Y^T Y - n\bar{Y}^2} \quad (4.7)$$

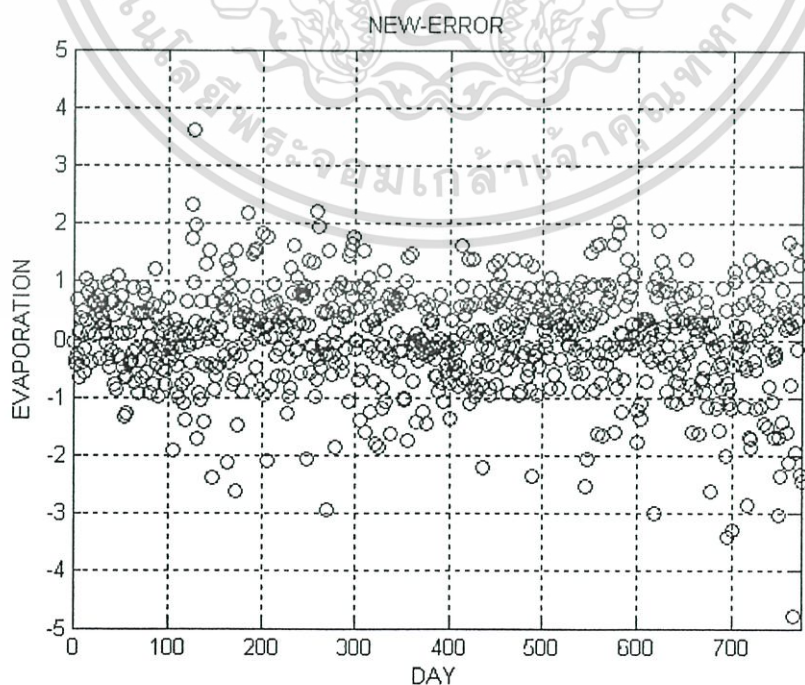
จะได้  $R^2 = 0.5186$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำสมการการประมาณค่าการระเหยที่ได้ไปทำการประมาณค่าการระเหยจากข้อมูล  
 อุตุนิยมวิทยาที่มีอยู่ ซึ่งแสดงผลการประมาณค่าการระเหยได้ดังรูปที่ 4.8 และในรูปที่ 4.9 แสดงส่วน  
 ของความแปรปรวนของ  $Y$  ที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง หรืออาจเรียกส่วนนี้ว่าส่วนเหลือ  
 (Residuals)



รูปที่ 4.8 แสดงค่าการระเหยที่ประมาณค่าได้จากระบบการหลอมรวมข้อมูล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากท่านนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



$$ET_p = C[WR_n + (1 - W)f(U)(e_a - e_d)] \quad (4.8)$$

จากสมการที่ (4.8) จะเห็นว่าประกอบไปด้วยหลาย ๆ เทอมรวมอยู่ โดยค่า C ซึ่งเป็นค่าปรับแก้ (Adjustment Factor) ซึ่งในที่นี้จะใช้ค่า  $C = 1$  [7], [8] เทอมของ W ซึ่งเป็นเทอมของค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor) ในเทอมของรังสีจากดวงอาทิตย์ซึ่งสามารถดูได้จากตารางที่ ส่วนเทอมของ  $R_n$  ซึ่งเป็นเทอมของค่ารังสีแสงแดดสุทธิ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.9)

$$R_n = Q_A(1 - r)(0.26 + 0.50n/N) - \sigma T^4(0.56 - 0.0797\sqrt{e_d})(0.10 + 0.90n/N) \quad (4.9)$$

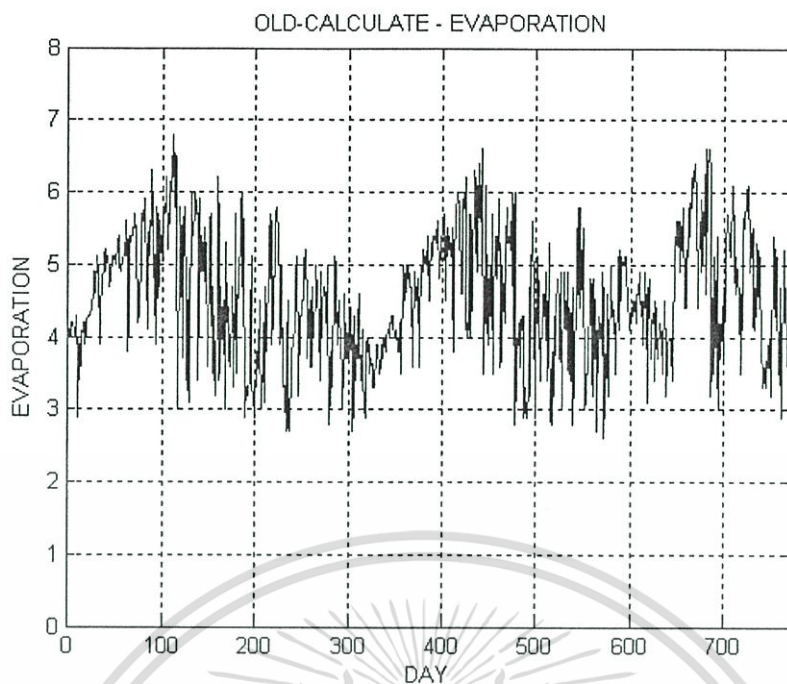
จากสมการที่ (4.9) สามารถหาค่าของ  $Q_A$  ได้จากตารางที่ สำหรับค่า r ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับของรังสีจากดวงอาทิตย์ (Reflection Coefficient) จะเลือกใช้ค่า  $r = 0.23$  ซึ่งเป็นค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของหญ้าซึ่งเป็นพืชอ้างอิงตามข้อกำหนดขององค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO) [7],[12] ส่วนค่า n ซึ่งเป็นค่าจำนวนชั่วโมงที่มีแสงแดดจะได้จากข้อมูลที่กรมอุตุนิยมวิทยาได้ทำการวัดและจัดเก็บไว้แล้ว สำหรับค่า N ในสมการที่ (4.9) ดูได้จากตารางที่ ค่าของ  $\sigma T^4$  ดูได้จากตารางที่ และค่าของ  $e_d$  สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.10)

$$e_d = (R.H. \times e_a) / 100 \quad (4.10)$$

สำหรับค่า  $e_a$  สามารถดูได้จากตารางที่ และเทอมของ  $f(U)$  ซึ่งเป็นเทอมของลมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4.11) โดยที่  $U_2$  ซึ่งเป็นค่าของความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตรจะเป็นค่าที่ได้จากการวัดและจัดเก็บโดยกรมอุตุนิยมวิทยา สถานีบางนา

$$f(U) = 0.27 \left( 1 + \frac{U_2}{100} \right) \quad (4.11)$$

จากวิธีการคำนวณของสมการ Penman ข้างต้นจะทำให้ได้ปริมาณการระเหยของน้ำดังรูปที่ 4.11 ซึ่งค่าการระเหยที่ได้จากสมการของ Penman นี้จะถูกนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าการระเหยที่ได้จากระบบการหลอมรวมข้อมูลต่อไป



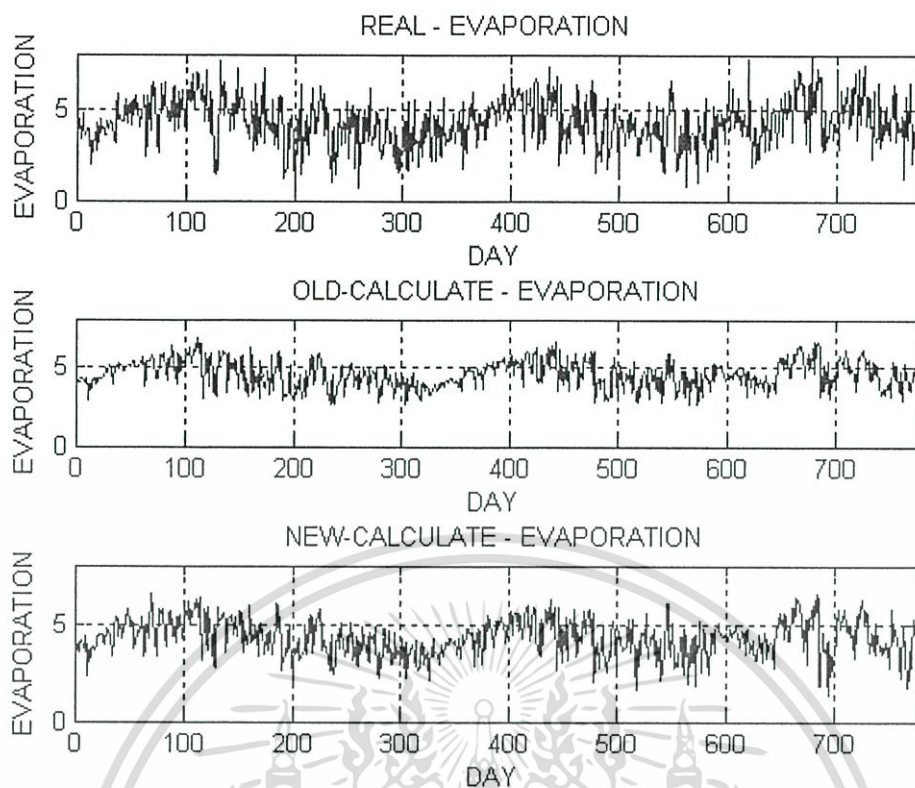
รูปที่ 4.11 แสดงค่าการระเหยที่ได้จากสมการ Modified Penman

#### 4.4 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการประมาณค่าการระเหย

จากผลการวิจัยจะได้ว่า ค่าการระเหยที่ได้จากระบบการหลอมรวมข้อมูลจะมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.30 mm/day โดยมีค่าความไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับถาดวัดการระเหยอยู่ที่  $\pm 0.65429$  mm ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และมีค่าความไม่แน่นอนเมื่อเทียบกับสมการ Penman อยู่ที่  $\pm 0.41141$  mm ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% สำหรับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหยจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.30 mm/day และค่าการระเหยเฉลี่ยที่ได้คำนวณได้จากสมการ Penman จะอยู่ที่ 4.55 mm/day สำหรับในตารางที่ 4.2 จะแสดงค่าการระเหยสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละปีที่ได้จากวิธีการต่าง ๆ ส่วนในรูปที่ 4.12 จะแสดงค่าการระเหยของน้ำที่ได้จากวิธีต่าง ๆ

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าการระเหยสูงสุดและต่ำสุดในแต่ละปีจากการประมาณค่าด้วยวิธีต่าง ๆ

		พ.ศ. 2548		พ.ศ. 2549		พ.ศ. 2550	
ถาดวัดการระเหย	max.	22 พ.ค.	7.6 mm	21 พ.ย.	7.7 mm	11 เม.ย.	8 mm
	min.	1 ส.ค.	0 mm	20 ก.ย.	0.8 mm	18 ก.ค.	1.2 mm
สมการ Penman	max.	3 พ.ค.	6.8 mm	3 พ.ค.	6.6 mm	22 เม.ย.	6.6 mm
	min.	4 ก.ย.	2.7 mm	2 ต.ค.	2.6 mm	17 ก.ค.	2.9 mm
ระบบการหลอมรวมข้อมูล	max.	6 พ.ค.	7 mm	3 พ.ค.	6.6 mm	22 เม.ย.	7.5 mm
	min.	1 ส.ค.	0.6 mm	1 ส.ค.	0.4 mm	10 พ.ค.	1.6 mm



- รูปที่ 4.12 แสดงค่าการระเหยของน้ำที่ได้จากวิธีต่างๆ โดย
- แสดงค่าการระเหยจริงที่ได้จากภาควัดการระเหย
  - แสดงค่าการระเหยที่ได้จากแบบจำลอง Penman
  - แสดงค่าการระเหยที่ได้ระบบการหลอมรวมข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับวิธีการหลอมรวมข้อมูล โดยใช้การระเหยของน้ำเป็นกรณีศึกษา ซึ่งวิธีการหลอมรวมข้อมูลจะทำให้ได้ข้อสรุปที่นำไปสู่การตัดสินใจที่มีความแม่นยำมากขึ้น เนื่องมาจากวิธีการนี้จะต้องการข้อมูลแวดล้อมที่มีความเกี่ยวข้องกับข้อสรุปเข้ามาใช้ประกอบในการตัดสินใจด้วย โดยข้อมูลเหล่านี้อาจจะได้มาด้วยวิธีการสำรวจหรือวิธีการวัดด้วยเซนเซอร์ชนิดต่าง หรืออาจจะได้มาจากผู้ที่มีความชำนาญในด้านนั้น ๆ ก็ได้ ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกนำมาจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูล จากนั้นระบบหลอมรวมจะทำการคัดกรองข้อมูลที่มีอยู่เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์โดยเทคนิคใดเทคนิคหนึ่งที่เหมาะสมกับข้อมูลเหล่านั้น ยกตัวอย่างเช่น ปัญญาประดิษฐ์ นิวรอลเน็ตเวิร์ค หรือทฤษฎีสำหรับการตัดสินใจ เป็นต้น

สำหรับในงานวิจัยนี้จะนำเอาข้อมูลทางอุณหภูมิมิวิทยามาใช้ในการประมาณค่าการระเหยของน้ำ โดยข้อมูลที่จะถูกนำมาจัดเก็บไว้ในฐานข้อมูลจะมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่ รังสีแสงอาทิตย์ อุณหภูมิอากาศ ความชื้น ความกดอากาศ ความเร็วลม ค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหย เป็นต้น จากนั้นเมื่อทำการค้นหาปัจจัยทางอุณหภูมิมิวิทยาที่มีความเกี่ยวข้องกับการระเหย ด้วยเครื่องมือทางสถิติที่เรียกว่าแผนภาพการกระจายแล้วจะทำให้ทราบว่าปัจจัยทางอุณหภูมิมิวิทยาที่มีผลต่อการระเหยในที่นี่มีอยู่ 3 ปัจจัย ได้แก่ 1. รังสีแสงอาทิตย์ 2. อุณหภูมิอากาศ และ 3. ความเร็วลม ในงานวิจัยนี้จึงได้นำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัยไปทำการวิเคราะห์เพื่อหาสมการหลักที่จะใช้ในการประมาณค่าการระเหย โดยใช้เทคนิคทางสถิติที่เรียกว่าการวิเคราะห์การถดถอยแบบหลายตัวแปร โดยเมื่อเราทำการประมาณค่าการระเหยที่ได้จากวิธีการหลอมรวมข้อมูลแล้ว ทดลองนำไปเปรียบเทียบกับค่าการระเหยที่ได้จากถาดวัดการระเหยและค่าการระเหยที่ได้จากสมการ Penman พบว่าค่าเฉลี่ยของการระเหยมีค่าใกล้เคียงกันโดยมีค่าความไม่แน่นอนในการเปรียบเทียบอยู่ที่  $\pm 0.65429$  mm และ  $\pm 0.41141$  mm ตามลำดับ และช่วงที่มีการระเหยมากที่สุดที่ประมาณค่าได้จากวิธีการหลอมรวมข้อมูลได้แก่ช่วงเดือนเมษายนถึงเดือนพฤษภาคมในแต่ละปี และช่วงที่มีการระเหยมีค่าต่ำจะอยู่ในช่วงเดือนสิงหาคมของแต่ละปี ซึ่งใกล้เคียงกับผลที่ได้จากถาดวัดการระเหยและค่าการระเหยที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการ Penman ดังนั้นจะเห็นว่าการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการหลอมรวมข้อมูลจะทำให้ได้ข้อสรุปที่มีความถูกต้องแม่นยำใกล้เคียงกับความเป็นจริง เมื่อเทียบกับสมการ Penman ที่มีการคำนวณที่ยุ่งยากซับซ้อนและมีโอกาสผิดพลาดได้สูง

อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้เลือกเอาการระเหยของน้ำเป็นกรณีศึกษา เพื่อแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องของการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการหลอมรวมข้อมูลเท่านั้น ซึ่งในการนำไปใช้งานจริง ผู้ใช้ควรที่จะทำการปรับปรุงและประยุกต์ให้เหมาะสมกับงานของตน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. “สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1 (ประมวลผลด้วย MINITAB)” พิมพ์ครั้งที่ 8 กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545
- [2] กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. “สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2 (ประมวลผลด้วย MINITAB)” พิมพ์ครั้งที่ 7 กรุงเทพฯ : สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), 2545
- [3] กิรติ ลีวัจกุล. “อุทกวิทยา” ภาควิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต พิมพ์โดย SPEC
- [4] นฤา แสนราษฎร์. “การประยุกต์ใช้การระเหยของน้ำโดยไม่เพิ่มความชื้นเพื่อลดอุณหภูมิอากาศภายในห้อง” วิทยานิพนธ์ปริญญาสถาปัตยกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาสถาปัตยกรรม, ภาควิชาสถาปัตยกรรมศาสตร์, คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
- [5] มนตรี พิริยะกุล. “เทคนิคการวิเคราะห์สมการถดถอย Regression Analysis” พิมพ์ครั้งที่ 1 (ฉบับปรับปรุง) กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2545
- [6] รสสุคนธ์ หังสพฤกษ์. “แบบจำลองเชิงเส้นประยุกต์ Applied Linear Model” พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2536
- [7] สถาพร เตมีพัฒน์พงษ์. “แบบจำลองสำหรับประมาณค่าการคายระเหยของหญ้าอ้างอิงและการคายระเหยจริง โดยเทียบจากข้อมูลที่วัดได้ในภาคสนาม” วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2547
- [8] สายสุนีย์ พุทธาคณเจริญ. “วิศวกรรมอุทกวิทยา Engineering Hydrology” กรุงเทพฯ : ไลบรารี นายน์ พับลีขิง, 2546
- [9] Ducan Smith and Sameer Singh, “Approaches to Multisensor Data Fusion in Target Tracking : A Survey” IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 18, No. 12, December 2006
- [10] “Earth’s Energy Budget.” [Online] Available: <http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/all98invProject.Site/Pages/trl/inv2-1.abstract.html>
- [11] “Evaporation, Transpiration and Evapotranspiration.” [Online] Available: [http://pirun.ku.ac.th/~fengesk/209241/04\\_Evaporation.pdf](http://pirun.ku.ac.th/~fengesk/209241/04_Evaporation.pdf)
- [12] Food and Agriculture Organization of the United Nations and World Meteorological Organization, “Application of Climatic Data for Effective Irrigation Planning and

- [13] Hall, David L., “Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion” Artech House, Boston, MA, 1992
- [14] P. Roengruen, V. Tipsuwannaporn, A. Numsomran and Sh. Harnnarong, “Evaporative Estimation Union Data Fusion” SICE Annual Conference 2008, page 1692-1697
- [15] Rajive Joshi and Arthur C Sanderson, “Multisensor Fusion A Minimal Representation Framework” Series in Intelligent Control and Inerlligent Automaion , Vol. 11, Singapore: World Scientific, 1999
- [16] “Scatter Diagram.” [Online] Available: <http://www.kmitl.ac.th/~kbkittic/exdesign/scatter.html>
- [17] Waltz, Edward and Llinas, James, “Multisensor data fusion” Artech House, Boston, MA, 1990
- [18] Wendy L. Martinez and Angel R. Martinez “Computational Statistics handbook with MATLAB” Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida, 2002



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1 รังสีจากดวงอาทิตย์ที่ตกกระทบผิวโลกเมื่อไม่มีบรรยากาศปกคลุมสำหรับซีกโลก  
เหนือเมื่อเทียบเป็นค่าการระเหยของน้ำที่ 20°C (หน่วย: มม./วัน)(สายสุนีย์, 2546)

เส้นรุ้ง	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
50°N	3.8	6.1	9.4	12.7	15.8	17.1	16.4	14.1	10.9	7.4	4.5	3.2
48°N	4.3	6.6	9.8	13.0	15.9	17.2	16.5	14.3	11.2	7.8	5.0	3.7
46°N	4.9	7.1	10.2	13.3	16.0	17.2	16.6	14.5	11.5	8.3	5.5	4.3
44°N	5.3	7.6	10.6	13.7	16.1	17.2	16.6	14.7	11.9	8.7	6.0	4.7
42°N	5.9	8.1	11.0	14.0	16.2	17.3	16.7	15.0	12.2	9.1	6.5	5.2
40°N	6.4	8.6	11.4	14.3	16.4	17.3	16.7	15.2	12.5	9.6	7.0	5.7
38°N	6.9	9.0	11.8	14.5	16.4	17.2	16.7	15.3	12.8	10.0	7.5	6.1
36°N	7.4	9.4	12.1	14.7	16.4	17.2	16.7	15.4	13.1	10.6	8.0	6.6
34°N	7.9	9.8	12.4	14.8	16.5	17.1	16.8	15.5	13.4	10.8	8.5	7.2
32°N	8.3	10.2	12.8	15.0	16.5	17.0	16.8	15.6	13.6	11.2	9.0	7.8
30°N	8.8	10.7	13.1	15.2	16.5	17.0	16.8	15.7	13.9	11.6	9.5	8.3
28°N	9.3	11.1	13.4	15.3	16.5	16.8	16.7	15.7	14.1	12.0	9.9	8.8
26°N	9.8	11.5	13.7	15.3	16.4	16.7	16.6	15.7	14.3	12.3	10.3	9.3
24°N	10.2	11.9	13.9	15.4	16.4	16.6	16.5	15.8	14.5	12.6	10.7	9.7
22°N	10.7	12.3	14.2	15.5	16.3	16.4	16.4	15.8	14.6	13.0	11.1	10.2
20°N	11.2	12.7	14.4	15.6	16.3	16.4	16.3	15.9	14.8	13.3	11.6	10.7
18°N	11.6	13.0	14.6	15.6	16.1	16.1	16.1	15.8	14.9	13.6	12.0	11.1
16°N	12.0	13.3	14.7	15.6	16.0	15.9	15.9	15.7	15.0	13.9	12.4	11.6
14°N	12.4	13.6	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7	15.7	15.1	14.1	12.8	12.0
12°N	12.8	13.9	15.1	15.7	15.7	15.5	15.5	15.6	15.2	14.4	13.3	12.5
10°N	13.2	14.2	15.3	15.7	15.5	15.3	15.3	15.5	15.3	14.7	13.6	12.9
8°N	13.6	14.5	15.3	15.6	15.3	15.0	15.1	15.4	15.3	14.8	13.9	13.3
6°N	13.9	14.8	15.4	15.4	15.1	14.7	14.9	15.2	15.3	15.0	14.2	13.7
4°N	14.3	15.0	15.5	15.5	14.9	14.4	14.6	15.1	15.3	15.1	14.5	14.1
2°N	14.7	15.3	15.6	15.3	14.6	14.2	14.3	14.9	15.3	15.3	14.8	14.4
0°N	15.0	15.5	15.7	15.3	14.4	13.9	14.1	14.8	15.3	15.4	15.1	14.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 ค่า N หรือค่าประจำวันเฉลี่ยของชั่วโมงที่มีแสงแดดยาวนานที่สุดที่สามารถจะเกิดขึ้นได้ในซีกโลกเหนือ (หน่วย: ชั่วโมง/วัน) (สายศูนย์, 2546)

เส้นรุ้ง	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
20°N	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15°N	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10°N	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5

ตารางที่ ก.3 ค่า  $\sigma T^4$  หรือรังสีที่สะท้อนจากวัตถุผิวสีดำ (หน่วย: มม./วัน) (สายศูนย์, 2546)

T°C	$\sigma T^4$ (มม./วัน)	T°C	$\sigma T^4$ (มม./วัน)	T°C	$\sigma T^4$ (มม./วัน)
0	11.21	17	14.28	34	17.93
1	11.38	18	14.48	35	18.17
2	11.55	19	14.68	36	18.41
3	11.72	20	14.88	37	18.64
4	11.89	21	15.08	38	18.89
5	12.06	22	15.29	39	19.13
6	12.23	23	15.50	40	19.38
7	12.41	24	15.71	41	19.63
8	12.59	25	15.92	42	19.88
9	12.77	26	16.14	43	20.13
10	12.95	27	16.35	44	20.39
11	13.13	28	16.57	45	20.65
12	13.32	29	16.79	46	20.91
13	13.51	30	17.02	47	21.17
14	13.70	31	17.24	48	21.44
15	12.89	32	17.47	49	21.70
16	14.08	33	17.70	50	21.98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4  $e_a$  หรือค่าความดันไออิ่มตัวที่เหนือผิวน้ำ (หน่วย: มิลลิบาร์) (สายสุญญ์, 2545)

T°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0	6.11	6.15	6.20	6.24	6.29	6.33	6.38	6.42	6.47	6.52
1	6.57	6.61	6.66	6.71	6.76	6.81	6.85	6.90	6.95	7.00
2	7.05	7.10	7.16	7.21	7.26	7.31	7.36	7.41	7.47	7.52
3	7.57	7.63	7.68	7.74	7.79	7.85	7.90	7.96	8.01	8.07
4	8.13	8.19	8.24	8.30	8.36	8.42	8.48	8.54	8.60	8.66
5	8.72	8.78	8.84	8.90	8.96	9.03	9.09	9.15	9.22	9.28
6	9.35	9.41	9.48	9.54	9.61	9.67	9.74	9.81	9.88	9.94
7	10.01	10.08	10.15	10.22	10.29	10.36	10.43	10.50	10.58	10.65
8	10.72	10.79	10.87	10.94	11.02	11.09	11.17	11.24	11.32	11.40
9	11.47	11.55	11.63	11.71	11.79	11.87	11.95	12.03	12.11	12.19
10	12.27	12.35	12.44	12.52	12.61	12.69	12.77	12.86	12.95	13.03
11	13.19	13.21	13.29	13.38	13.47	13.56	13.65	13.74	13.83	13.92
12	14.02	14.11	14.20	14.30	14.39	14.49	14.58	14.68	14.77	14.87
13	14.97	15.07	15.17	15.27	15.36	15.47	15.57	15.67	15.77	15.87
14	15.98	16.08	16.19	16.29	16.40	16.50	16.61	16.72	16.83	16.93
15	17.04	17.15	17.26	17.38	17.49	17.60	17.71	17.83	17.94	18.06
16	18.17	18.29	18.41	18.52	18.64	18.76	18.88	19.00	19.12	19.24
17	19.37	19.49	19.61	19.74	19.86	19.99	20.12	20.24	20.37	20.50
18	20.63	20.76	20.89	21.02	21.15	21.29	21.42	21.56	21.69	21.83
19	21.96	22.10	22.24	22.38	22.52	22.66	22.80	22.94	23.08	23.23
20	23.37	23.52	23.66	23.81	23.96	24.11	24.26	24.41	24.56	24.71
21	24.86	25.01	25.17	25.32	25.48	25.63	25.79	25.95	26.11	26.27
22	26.43	26.59	26.75	26.92	27.08	27.25	27.41	27.58	27.75	27.92
23	28.09	28.26	28.43	28.60	28.77	28.95	29.12	29.30	29.47	29.65
24	29.83	30.01	30.19	30.37	30.55	30.74	30.92	31.11	31.29	31.48
25	31.67	31.86	32.05	32.24	32.43	32.63	32.82	33.02	33.21	33.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.4 (ต่อ)

T°C	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
26	33.61	38.81	34.01	34.21	34.41	34.61	34.82	35.02	35.23	35.44
27	35.65	35.86	36.07	36.28	36.49	36.71	36.92	37.14	37.36	37.58
28	37.80	38.02	38.24	38.46	38.69	38.91	39.14	39.36	39.56	39.82
29	40.05	40.29	40.52	40.75	40.99	41.23	41.47	41.70	41.94	42.19
30	42.43	42.67	42.92	43.17	43.41	43.66	43.91	44.16	44.42	44.67
31	44.93	45.18	45.44	45.70	45.96	46.22	46.49	46.75	47.02	47.28
32	47.55	47.82	48.09	48.36	48.64	48.91	49.19	49.47	49.74	50.02
33	50.31	50.59	50.87	51.16	51.45	51.74	52.03	52.32	52.61	52.90
34	53.20	53.50	53.80	54.10	54.40	54.70	55.00	55.31	55.62	55.93
35	56.24	56.55	56.86	57.18	57.49	57.81	58.13	58.45	58.77	59.10
36	59.42	59.75	60.08	60.41	60.74	61.07	61.41	61.74	62.08	62.42
37	62.76	63.10	63.45	63.80	64.14	64.49	64.84	65.20	65.55	65.91
38	66.26	66.62	66.98	67.35	67.71	68.08	68.45	68.81	69.19	69.56
39	69.93	70.31	70.69	71.07	71.45	71.83	72.22	72.60	72.99	73.38
40	73.78	74.17	74.57	74.97	75.36	75.77	76.17	76.57	76.98	77.39
41	77.80	78.21	78.63	79.05	79.46	79.88	80.31	80.73	81.16	81.58
42	82.01	82.45	82.88	83.32	83.75	84.19	84.64	85.08	85.52	85.97
43	86.42	86.87	87.33	87.78	88.24	88.70	89.16	89.63	90.09	90.56
44	91.03	91.51	91.98	92.46	92.94	93.42	93.90	94.39	94.87	95.36
45	95.85	96.35	96.84	97.34	97.84	98.35	98.85	99.36	99.87	100.38
46	100.9	101.4	101.9	102.5	103.0	103.5	104.03	104.56	105.09	105.62
47	106.16	106.70	107.24	107.78	108.33	108.88	109.43	109.98	110.54	111.10
48	111.66	112.22	112.79	113.36	113.93	114.50	115.07	115.65	116.23	116.81
49	117.40	117.99	118.58	119.17	119.77	120.37	120.97	121.57	122.18	122.79
50	123.40	124.01	124.63	125.25	125.87	126.49	127.12	127.75	128.38	129.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ค่าถ่วงน้ำหนัก (Weighting Factor, W) (สายสุณีย์, 2546)

T°C	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
W	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84

ตารางที่ ก.6 ค่า n/N (สายสุณีย์, 2546)

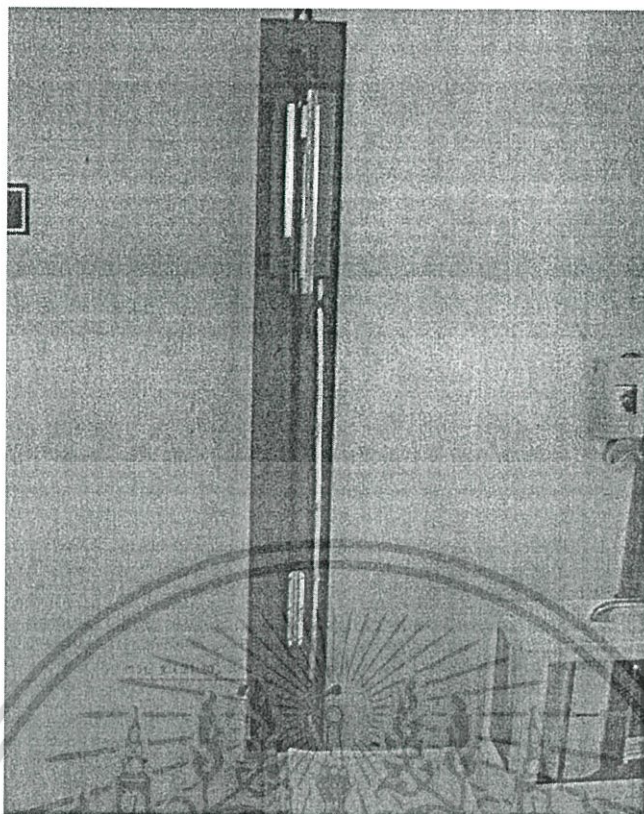
ความครึ้ม (Oktas)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	
n/N	0.95	0.85	0.75	0.65	0.55	0.45	0.30	0.15	-	
ความครึ้ม (Tenth)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n/N	0.95	0.85	0.80	0.75	0.65	0.55	0.50	0.40	0.30	0.15



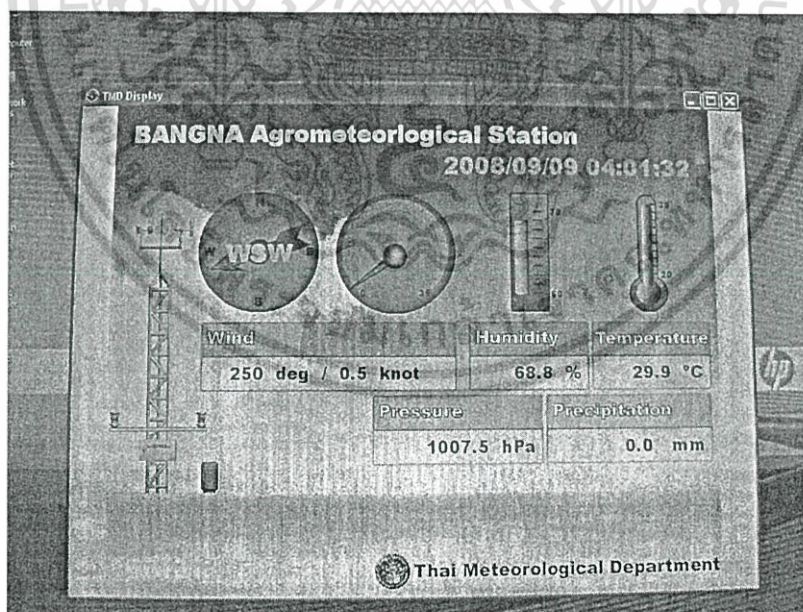
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข  
 เซนเซอร์ชนิดต่าง ๆ ที่ใช้ในการตรวจวัดข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยา  
 (ที่มา กรมอุตุนิยมวิทยา สถานีบางนา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.1 เซนเซอร์สำหรับวัดความดันบรรยากาศ



รูปที่ ข.2 โปรแกรมที่ใช้สำหรับแสดงข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

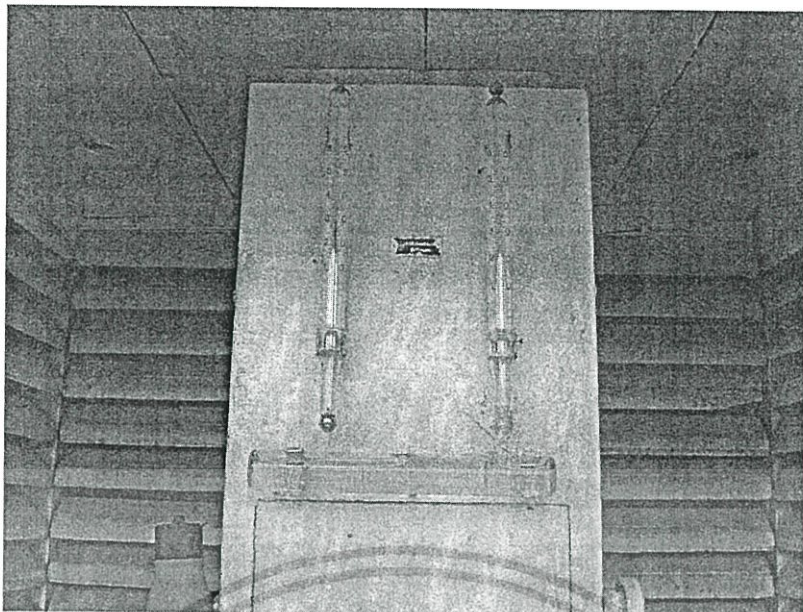


รูปที่ ข.3 เซนเซอร์สำหรับวัดความเร็วลม



รูปที่ ข.4 เซนเซอร์สำหรับวัดอุณหภูมิสูงสุดและต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

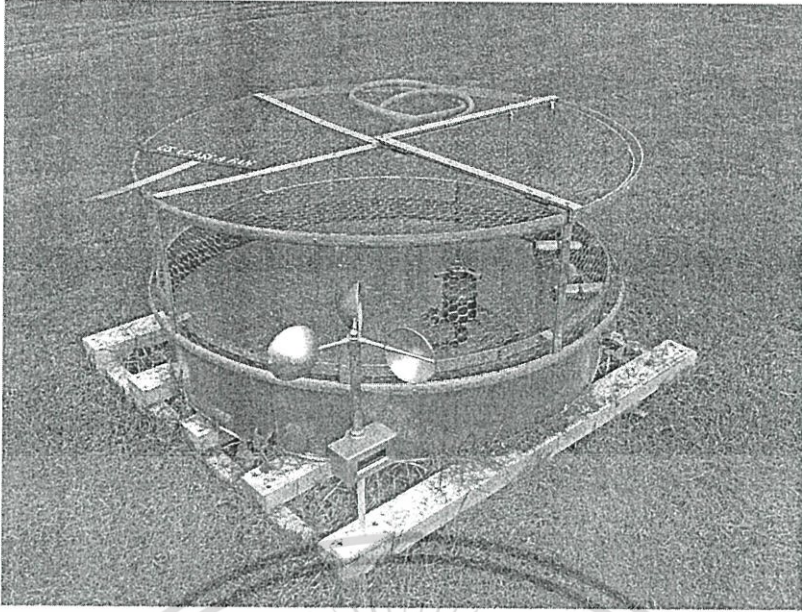


รูปที่ ข.5 เซนเซอร์สำหรับวัดความชื้นในอากาศ



รูปที่ ข.6 เซนเซอร์สำหรับวัดความยาวนานของแสงแดด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข.7 ถาดวัดการระเหยแบบกลาสเอ



รูปที่ ข.8 เซนเซอร์สำหรับวัดปริมาณน้ำฝน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ค

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

1. P. Roengruen, V. Tipsuwannaporn, A. Numsomran and Sh. Hamnarong, "Evaporative Estimation Usion Data Fusion," The Society of Instrument and Control Engineers (SICE), International Conference on Instrumentation, Control and Information Technology, pp. 1692-1697, Tokyo, Japan, Aug.20 - 22, 2008.

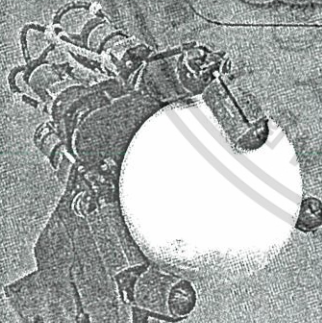
<http://www.sice.or.jp/sice2008/>

# SICE Annual Conference 2008

International Conference on Instrumentation  
Control and Information Technology

**Aug. 20 (Wed.) ~ 22 (Fri.)**  
The University of Electro-Communications (UEC),  
Chofu, Tokyo, JAPAN

**click to start**



## Proceedings of SICE Annual Conference 2008

### Organized by

The Society of Instrument and Control Engineers  
(SICE), Japan

### Supported by

Chofu City, The Univ. of Electro-Communications,  
Japan

### Technically Co-Sponsored by

IEEE/IES, IEEE/RAS, IEEE/CSS, IEEE/SMC,  
The Instrumentation, Systems and Automation  
Society (ISA), Institute of Control, Robotics and  
Systems (ICROS).

### In association with

China Instrument and Control Society (CIS),  
Chinese Association of Automation (CAA),  
Chinese Automatic Control Society (CACSS),  
International Measurement Confederation  
(IMEKO), IEEE Japan Council, IFAC NMO-Japan

SICE.    

Copyright  
The Society of Instrument and Control Engineers (SICE)  
1-35-28-303 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-0033, Japan  
SICE (Kaisoku Jidou-Seigy Gakkai) administration office  
Tel +81-3-3814-4121, Fax +81-3-3814-4699  
E-mail [sice2008@sice.or.jp](mailto:sice2008@sice.or.jp)  
Date of publication: August 19, 2008  
IEEE Catalog Number: GFP08765-CDR  
ISBN: 978-4-907764-29-6  
SICE Catalog Number: 08PR0001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Evaporative Estimation Using Data Fusion

P. Roengruen, V. Tipsuwannaporn, A. Numsomran and Sh. Hamnarong

Department of Instrumentation Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand  
(Tel: +66 2326 7347 Ext. 102, E-mail: [kivutay@kmitl.ac.th](mailto:kivutay@kmitl.ac.th))

**Abstract:** This paper present evaporative estimation of water using data fusion technique. There are many factors in evaporative locating process that provided for consideration together. So this paper will be study about factors with concerning in meteorology that influential to evaporation and explained about relation of these factors by statistical method. The used data obtained from Thai Meteorological Department which collects daily data for the environment with various sensors. The results of data fusion process will be shown value of daily evaporation that provided to comparing between the evaporative value of pan evaporation and calculated by hydrology formula.

**Keywords:** Evaporative, Estimation, Data fusion

### 1. INTRODUCTION

The means seek for evaporation of water we will use data fusion technique to provide and combine the data from various sensors. Data from different sensors and many type of sensors are combined these techniques from several disciplines: signal processing, statistics, artificial intelligence, pattern recognition, cognitive psychology and information theory [2, 7]. Inputs of a sensor to data fusion system include three basic components: 1. data observed by sensor, 2. data and commands input by human operators or users and 3. a priori data from a preestablished database. Outputs from a fusion system represent the combined or fused data [2]. Data fusion refers to the combination of sensory data from multiple sensors into a common representational format. The focus is on combination of data from various sensors into a single inference or organized [5]. Here we assume that an appropriate sensing architecture and sensing plan has been devised to collect data. In this paper will seek for water evaporation by data fusion analysis and locating the main influential factors of evaporation and establishing an explanatory equation to clarify the relationship of the influential factors. When we know influential factors of evaporation then we will collect data of each factors into the database for analyze these data later

### 2. EVAPORATION

In Hydrology provided definition of evaporation is net rate of moved vapor that arise from water molecule receives such as enough heat energy that will be these molecule transferred from land and water masses to the atmosphere in vapor form [6, 8]. Generally this transference must be used latent heat of vaporization approximately 2.45 kilojoules per gram [4] that in the nature, heat energy will be receive from solar energy and furthermore, there is important factor of transport of vapor away from the surface which will effect to evaporation perform continuously [6]. Then quantity of vapor in the atmosphere will be received from process

of transpiration by plant also which in hydrology will call combination of evaporation of water and transpiration by plants that evapotranspiration [6, 8]. As evaporation and transpiration are mechanism that takes the water return to the atmosphere for produced hydrologic cycle and it will be difficult to classify that the quantity of water in vapor form transfer from evaporation or transpiration. So the studies about water balance and water budget are often considered with evaporation and transpiration together. Though evaporation process will be differ from transpiration process. However the both processes are diffusion of vapor to the atmosphere as well as depend on factors of climate also [8]. The factors of climate that influential to evaporation are solar energy, wind speed and air temperature. This paper will be used mathematical model of evapotranspiration estimate such as using meteorological data to compute evaporative value for compare with result of evaporation that received from data fusion technique. Through the used model of hydrology in this paper is Modified Penman Model that modified from Penman formula. Due to equation of Penman is provided to collect all basic element that effect to evaporation completely [6].

Modified Penman Model

$$ET_p = C[WR_n + (1-W)f(U)(e_a - e_d)] \quad (1)$$

where

$ET_p$  is evapotranspiration value.

$C$  is adjustment factor, here we use  $C = 0.85$

$W$  is weighting factor in term of solar radiation (Table 1).

$e_a$  is saturation vapor pressure above water surface, Millibar.

$e_d$  is actual vapor pressure (saturation vapor pressure at dew point temperature), Millibar.

$f(U)$  is wind function and can compute in equation (2).

$$f(U) = 0.27 \left( 1 + \frac{U_2}{100} \right) \quad (2)$$

where

$U_2$  is wind speed at 2 m above ground surface. Kilometers per day.

$R_n$  is net radiation and can compute in equation (3).

$$R_n = Q_4(1 - r)(0.26 + 0.50n/N) - \sigma T^4 \cdot (0.56 - 0.0797\sqrt{e_d})(0.10 + 0.90n/N) \quad (3)$$

where

$Q_4$  is extraterrestrial radiation, mm per day

$r$  is reflection coefficient which

$r = 0.05$  for water surface

$r = 0.10$  for wet soil surface when have not plant

$r = 0.20$  for soil when have plant.

$n$  is actual means sunshine hour, Hour per day

$N$  is average of day of maximum possible sunshine hour (Table 2).

$\sigma T^4$  is radiation that reflect from black body surface, mm/day.

$e_d$  is actual vapor pressure, Millibar.

$$e_d = (R.H. \times e_s) / 100 \quad (4)$$

R.H. is relative humidity.

$e_s$  is saturation vapor pressure above water surface, Millibar.

### 3. DATA FUSION

Data fusion is analogous to the ongoing cognitive process used by humans to integrate data continually from their senses to make inferences about the external world [1, 2]. The inputs of a sensor to data fusion system include three basic components: 1. data observed by sensors, 2. data and command input by human operators or users and 3 a priori data from a preestablished data base. Several views can be developed to represent the data fusion process. A functional model can illustrate the primary functions, relevant database, and interconnectivity to perform data fusion. An architectural model can specify hardware and software components, associated data flows, and external interfaces. A mathematical model can describe algorithms and logical processes [2]. Figure 1 show model for data fusion process. When the data fusion process received data from various sources. The first category of fusion system is process of data selection and data alignment which used in fusion process. Then, data cleaning for make it to suitable data and confident

data. Completed data will be guarantee that fusion process can be success.

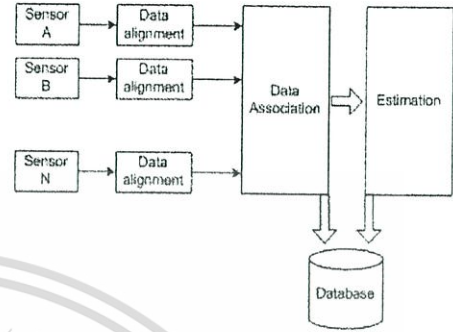


Figure 1 Show model of data fusion system.

### 4. DATA ASSOCIATION

Parametric association seeks to associate observations to other observations. This is accomplished by defining a measure of association that quantifies the closeness of observation pairs [6]. In this paper we will plot data of evaporative value that measured from pan evaporation and meteorological data into the scatter diagram for seek to associate briefly. From Figure 2 – 4 we will perceive that the both factors in axis-X and axis-Y have associated in positive trend. But, in Figure 5 we cannot be describe association of axis-X and axis-Y. So, when we have plot scatter diagram between evaporative value and each meteorological data. Then, we will comprehend the factors that effect to evaporation which there have three factors: 1. Solar Radiation 2. Air Temperature and 3. Wind Speed. After that, we will used correlation data to associate analyze of three factors for seek as show in equation (5).

$$\rho = \frac{S_{(xy)}}{\sqrt{S_{(xx)} \cdot S_{(yy)}}} \quad (5)$$

where

$\rho$  is correlation coefficient.

$$S_{(xx)} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \sum_{i=1}^n X_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n X_i \right)^2}{n}$$

$$S_{(yy)} = \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}{n}$$

$$S_{(xy)} = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})$$

$$= \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n Y_i\right)}{n}$$

where  
 n is number of pair of XY data.  
 $S_{(xx)}$  is sum of square of difference between X and  $\bar{X}$   
 $S_{(yy)}$  is sum of square of difference between Y and  $\bar{Y}$   
 $S_{(xy)}$  is covariation.

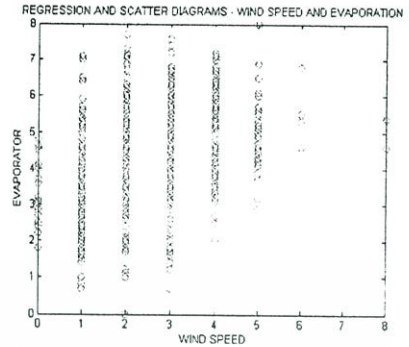


Figure 4 Show scatter diagram between evaporative value and wind speed.

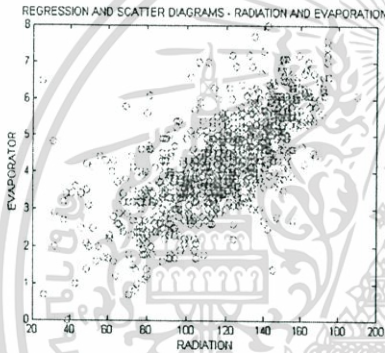


Figure 2 Show scatter diagram between evaporative value and solar radiation.

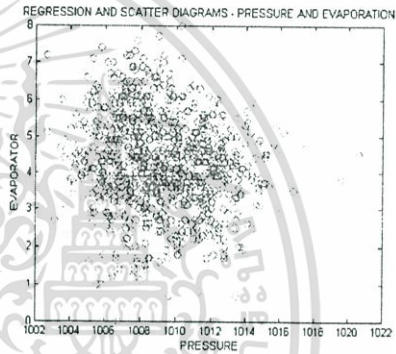


Figure 5 Show scatter diagram between evaporative value and pressure.

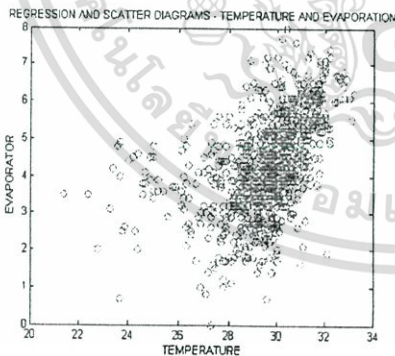


Figure 3 Show scatter diagram between evaporative value and air temperature.

### 5. DATA ESTIMATION

Estimation of each meteorological data in this paper we will seek to regression line into the scatter diagram for use to estimate evaporation. The method which seeks to regression line is least squares. Least squares method is provided the result that linear unbiased estimator which minimum variance. So, this method is high accuracy [3, 9]. Model of regression analysis is shown in equation (6)

$$Y_i = a + bX_i + e_i \quad (6)$$

where  
 $Y_i$  is evaporative value of pan evaporation.  
 $X_i$  is meteorological factor.  
 a is compensation value (Y-Intercept).  
 b is regression coefficient.  
 $e_i$  is error or residual of regression line.

Equation of least squares method is shown in (7)

$$\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 = 0 \quad (7)$$

where

$\hat{Y}_i$  is value of evaporative estimation of regression line.

So we received evaporative estimation value of each meteorological factor. Then, we will already take each value of evaporation to combine together as shown in equation (8)

$$E_i = \sum_{i=1}^n W_i \hat{Y}_i \quad (8)$$

where

$E_i$  is total evaporation of three meteorology factors.

$W_i$  is weighting factor that can be received from correlation coefficient.

$\hat{Y}_i$  is value of evaporative estimation of each meteorological factor: 1. solar radiation, 2. air temperature and 3. wind speed.

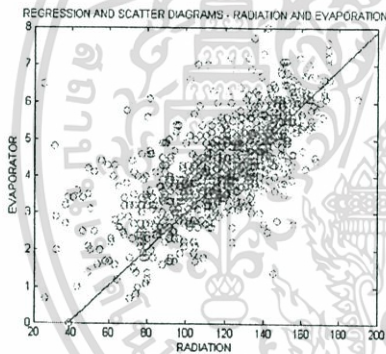


Figure 6 Show regression line of least squares method of evaporative value and solar radiation.

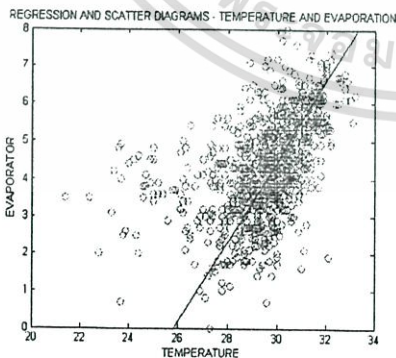


Figure 7 Show regression line of least squares method of evaporative value and air temperature.

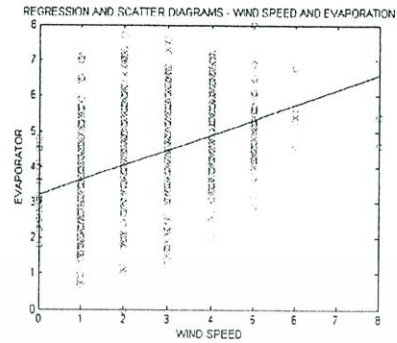


Figure 8 Show regression line of least squares method of evaporative value and wind speed.

## 6. EXPERIMENTATION RESULTS

From the correlation analysis of meteorological factor that shown in table 3. This result will be used to seek the weighting factor of each meteorological factor also. Figure 9 show result of daily estimation from data fusion technique of evaporation in 2005 – 2007 by comparing between measured value from pan evaporation and evaporative value that can compute from Modified Penman.

## 7. CONCLUSIONS

From experimental results we find that evaporative value of computation from Modified Penman method which has average error value equal to 0.73 mm per day when compare with measured value from pan evaporation. The estimation value of evaporation from data fusion technique has average error value equal to 0.79 mm per day when compare with measured value from pan evaporation. However, computation from Modified Penman will more complicate than method from data fusion. In addition, Modified Penman is requiring knowledge about hydrology also. So data fusion technique is more conveniently.

## REFERENCES

1. Duncan Smith and Sameer Singh, Approaches to Multisensor Data Fusion in Target Tracking : A Survey, IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 18, No. 12, December 2006.
2. Hall, David L., Mathematical techniques in multisensor data fusion, Artech House, Boston, MA, 1992.
3. Kitisk Ploypanichcharoen, Statistics for Engineering Book 2 (Process with Minitab), Technology Promotion Association (Thailand-Japan), Bangkok, 2002.

4. Nada Sanrat, An Application of Indirect Evaporative Cooling to Reduce Room Temperature, Master thesis of Architecture, Department of Architecture, Faculty of Architecture, Chulalongkorn University, Bangkok, 2002.
5. Rajive Joshi and Arthur C Sanderson, Multisensor fusion A Minimal Representation Framework, Series in Intelligent Control and Intelligent Automation Vol.11, Singapore: World Scientific, 1999.
6. Saisunee Budhakooncharoen, Engineering Hydrology, Library Nine Publishing, Bangkok, 2003.
7. Waltz, E., and Llinas, J., Multisensor data fusion, Artech House, Boston, MA, 1990.
8. Sathaporn Temeeppattanapongsa, Model for Estimating Grass-reference and Actual Evapotranspiration, Master thesis of Civil Engineering, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai, 2004.
9. Chaleaw Chartkeaw, Statistics for Economists, Ramkhamhaeng University Publishing, Ramkhamhaeng University, Bangkok, 1992.

Table 1 Weighting Factor (W).

T ( $^{\circ}$ C)	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38
W	0.69	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78	0.80	0.82	0.83	0.84

Table 2 Value of N or average of day of maximum possible sunshine hour, Hour per day.

Latitude	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
20 $^{\circ}$ N	11.0	11.5	12.0	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
15 $^{\circ}$ N	11.3	11.6	12.0	12.5	12.8	13.0	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
10 $^{\circ}$ N	11.6	11.8	12.0	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5

Table 3 Show correlation analysis of meteorological factor.

Meteorological Factor	Correlation Coefficient
Solar Radiation	0.6818
Air Temperature	0.4849
Wind Speed	0.3963

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

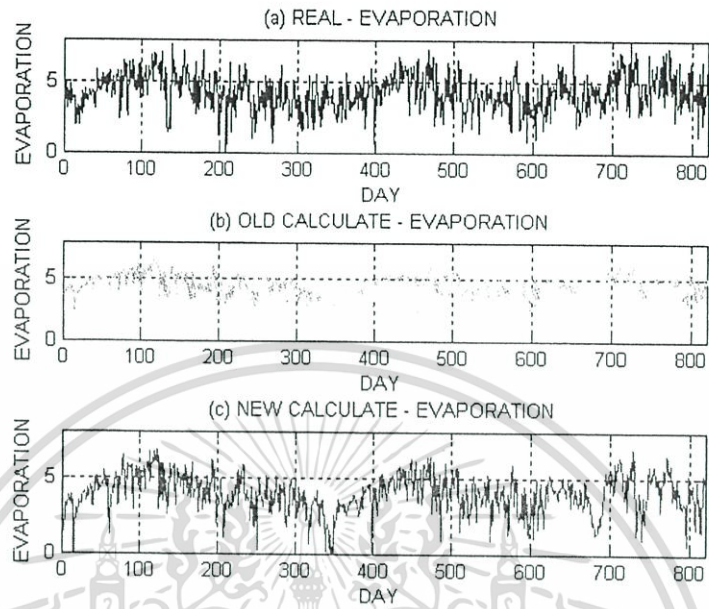


Figure 9 Show daily evaporative value in 2005 -2007  
 (a) Measured value from pan evaporation  
 (b) Evaporative value that can compute from Modified Penman  
 (c) Estimation value of evaporation from data fusion technique

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวมานิน หาญณรงค์ เกิดเมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ.2523 ที่จังหวัดนครสวรรค์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์อุตสาหกรรม จากภาควิชาฟิสิกส์อุตสาหกรรม และอุปกรณ์การแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการวัดคุม ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้