สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนในหม้อแปลงไฟฟ้า ในขั้นตอน Re–tightening และ Tanking

A STUDY OF FACTORS AFFECTING MOISTURE CONTENT IN POWER TRANSFORMER INSULATION IN RE-TIGHTENING AND TANKING PROCESS

T119479

นางสาวพรกมล คำหล้า
MISS PORNKAMON KHUMLA
นางสาวสุกัญญา เจริญสุข
MISS SUKANYA CHAROENSUK
นางสาวสุมาพร ตันพิชัย
MISS SUMAPORN TUNPHICHAI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 119479
วัน,เดือน,ปี - 8 S.A. 2554

b.19262422
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF FACTORS AFFECTING MOISTURE CONTENT IN POWER TRANSFORMER INSULATION IN RE-TIGHTENING AND TANKING PROCESS

MISS PORNKAMON KHUMLA

MISS SUKANYA CHAROENSUK

MISS SUMAPORN TUNPHICHAI

THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2010

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในขั้นตอน Re-tightening และ Tanking

A Study of Factors Affecting Moisture Content in Power Transformer Insulation in Re-tightening and Tanking Process

นักศึกษา	นางสาวพรกมล คำหล้า	รหัสประจำตัว	50011032
	นางสาวสุกัญญา เจริญสุข	รหัสประจำตัว	50011693
	นางสาวสุมาพร ตันพิชัย	รหัสประจำตัว	50011750

หลักสูตร วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

ชุมพล ยวงใย

(ดร.ชุมพล ยวงใย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในขั้นตอน Re–tightening และ Tanking
นักศึกษา	นางสาวพรกมล คำหล้า นางสาวสุกัญญา เจริญสุข นางสาวสุมาพร ตันพิชัย
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	ดร.ชุมพล ยวงใย

บทคัดย่อ

โครงงานปริญญานิพนธ์นี้จัดทำขึ้นเพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า เพื่อนำมาวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในขั้นตอนการขันน็อต (Re-tightening) และในขั้นตอนการนำหม้อแปลงไฟฟ้าลงถัง (Tanking) สำหรับกรณีศึกษาบริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด เนื่องมาจากในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้านั้น เมื่อนำหม้อแปลงไปอบไล่ความชื้น น็อตต่างๆ ที่อยู่บนหม้อแปลงจะเกิดการหลวมต้องทำการขันน็อตให้แน่น ซึ่งปัญหาของทางบริษัท คือ หากใช้เวลาในการทำการ Re-tightening มากกว่าช่วงที่กำหนดไว้จะต้องนำหม้อแปลงไปอบใหม่ และหลังการอบก็ต้องทำการ Re-tightening ซ้ำอีกรอบก่อนที่จะนำหม้อแปลงลงถัง ซึ่งการนำหม้อแปลงไปอบใหม่จะทำให้เสียเวลา เสียโอกาสที่จะผลิตหม้อแปลงในยูนิตอื่นๆ และทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบการทดลองศึกษาตัวแปร 3 ตัว ได้แก่ 1) ระยะเวลาในขั้นตอน Re-tightening 2) ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ 3) ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ ส่วนตัวแปรตอบสนอง คือ ความชื้นในเนื้อกระดาษฉนวน จึงได้ทำการวางแผนการทดลองโดยใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปทั่วไป และบันทึกผลการทดลองเพื่อนำมาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมินิแทบ 16 (MINITAB 16) และทำการสร้างสมการพื้นผิวตอบสนองแบบยกกำลัง เพื่อทำนายค่าความชื้นในกระดาษฉนวน และได้ทำการวิเคราะห์ต้นทุน โดยคาดว่าทางบริษัทสามารถลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	A Study of Factors Affecting Moisture Content in Power Transformer Insulation in Re-tightening and Tanking Process
Student	Miss Pornkamon Khamla Miss Sukanya Charoensuk Miss Sumaporn Tunphichai
Degree	Bachelor of Engineering in Industrial Engineering
Academic Year	2010
Thesis Advisor	Dr. Chumpol Yuangyai

ABSTRACT

One of the most important issues of power transformer production is to maintain the minimum moisture content of insulation paper because the high level of the moisture content requires an re-tightening process to ensure that all transformer characteristics are met. This additional process results in productivity problems such as lost time, unplanned cost, lost sales. Therefore, this study aims to investigate the effect of three factors, namely, time in re-tightening, relative humidity, and location, to the moisture content in insulating paper by employing statistical experimental designs. These experiments were conducted at ABB (Thailand) Co. Ltd. The experimental results reveal the relationship among those factors and the moisture content. In addition, cost analysis of using the relationship potentially leads to company cost reduction.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในขั้นตอน Re–tightening และ Tanking สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณครอบครัว รวมถึงผู้อุปการะทุกท่านเป็นอย่างสูง สำหรับการดูแลเอาใจใส่ คอยให้กำลังใจ ให้ความช่วยเหลือด้านต่างๆ ตลอดเวลาที่ผ่านมาจนปริญญานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วง

ดร.ชุมพล ยวงใย อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือ ความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้าน ตลอดเวลาที่ผ่านมา

รศ.ดร.กรรณชัย กัลยาศิริ อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งคำแนะนำ ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คุณเจษฎา คูณมี คุณสุทธิ แสงอรุณศิริ คุณธนชาติ ไชยพูล และบริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งคำแนะนำ ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลผลการทดลอง ความเอาใจใส่และทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการศึกษาระดับปริญญาตรี ในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ

กราบขอบพระคุณอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการทุกท่านและขอบคุณเพื่อนทุกคนสำหรับความช่วยเหลือจนทำให้ปริญญานิพนธ์สำเร็จลุล่วง และคอยเป็นกำลังใจที่ดีตลอดมา

นางสาวพรกมล คำหล้า
นางสาวสุกัญญา เจริญสุข
นางสาวสุมาพร ตันพิชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ก

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ช

สารบัญรูป ..... ซ

บทที่ 1 บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์ 2

1.2 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์ 2

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของกระดาษฉนวนเซลลูโลส 3

2.2 การออกแบบการทดลอง 7

2.2.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง 8

2.2.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง 8

2.2.3 คำศัพท์พื้นฐานที่ควรทราบ 8

2.2.4 ประเภทของการทดลอง (Type of Experiment) 9

2.2.5 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง 9

2.2.6 การลดค่าอคติในการทดลอง 11

2.2.6.1 การลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง 11

2.2.6.2 การสุ่มการทดลอง 11

2.2.6.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง 11

2.2.7 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง 12

2.3 การวิเคราะห์การทดลอง 12

2.3.1 การจัดการข้อมูล 12

2.3.1.1 ข้อมูลสูญหาย (Missing Data) 12

2.3.1.2 การแปลงข้อมูล 14

2.3.2 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง 16

2.3.2.1 การวิเคราะห์โดยใช้กราฟ 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) 17
2.3.3 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment) 25
2.3.3.1 ข้อดีของการทดลองแบบแฟคทอเรียล 25
2.3.3.2 ข้อเสียของการทดลองแบบแฟคทอเรียล 26
2.3.3.3 ตัวแบบทางสถิติ 26
2.3.3.4 ค่าประมาณพารามิเตอร์ 26
2.3.3.5 สมมติฐานของการทดสอบ 27
2.3.3.6 การทดสอบสมมติฐาน 27
2.3.3.7 การตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลองสำหรับทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ 27
2.3.3.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยโปรแกรม MINITAB 30
2.3.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis) 31
2.3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย (Step in Regression Analysis) 31
2.3.4.2 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ 32
2.3.5 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง 33
2.3.5.1 วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ 33
2.3.5.2 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง 35
2.4 การวิเคราะห์ต้นทุน 41
2.4.1 ต้นทุนการผลิต (Cost of Production) 41
2.4.2 ต้นทุนกับระยะเวลา (Cost and Time Period) 41
2.4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนในระยะสั้น (The Short – Run Cost Analysis) 41
2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนผันแปรเฉลี่ยกับต้นทุนเพิ่มและต้นทุนเพิ่มกับต้นทุนเฉลี่ย 43
2.4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนในระยะยาว (Long – Run Cost Analysis) 44
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 45

บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลอง

3.1 ขั้นตอนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า 47
3.1.1 ขั้นตอนการพันขดลวด 47
3.1.2 ขั้นตอนการประกอบขดลวด 48
3.1.3 ขั้นตอนการอบ 48
3.1.4 ขั้นตอน Re-tightening 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.5 ขั้นตอน Tanking 50
3.1.6 ขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน 50
3.1.7 ขั้นตอนการตรวจสอบ 51
3.1.8 ขั้นตอน Packaging 51
3.2 ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Design of Factorial Experiment) 51
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 53
3.4 ขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง 53
3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ 56

บทที่ 4 ผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลอง 57
4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ 58
4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคัดเลือกปัจจัย 58
4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่แปลงค่า 61
4.2.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Analysis) ของข้อมูลที่แปลงค่า 64
4.3 การวิเคราะห์ต้นทุน 68

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป 70
5.2 ข้อเสนอแนะ 70

บรรณานุกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 แผนการเก็บข้อมูลแบบสุ่มสมบูรณ์ 18
ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ CRD 20
ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ RBD 21
ตารางที่ 2.4 วิเคราะห์ความแปรปรวน กรณีสุ่มอย่างสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (RBD) กรณี $r \geq 1$ หรือ $N = abr$ 24
ตารางที่ 3.1 ระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา 52
ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตารางที่ใช้ในการบันทึกผลการทดลอง 53
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการเก็บค่าความชื้นในกระดาษฉนวน 57
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่แปลงค่า 63
ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า 66
ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของการถดถอยในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า 67
ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนปี 2552 69
ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนปี 2553 69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า 1
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของกระดาษเซลลูโลส 4
รูปที่ 2.2 กระดาษฉนวน (กระดาษเซลลูโลส) 4
รูปที่ 2.3 แบบจำลองความชื้น 6
รูปที่ 2.4 รูปแบบการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า 7
รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ 7
รูปที่ 2.6 ผังขั้นตอนการออกแบบการทดลอง 10
รูปที่ 2.7 การแปลงโดยใช้ล็อกฐาน e 14
รูปที่ 2.8 การแปลงโดยใช้ค่ารากที่สอง 15
รูปที่ 2.9 Main Effect Plot 16
รูปที่ 2.10 Interaction Plot 17
รูปที่ 2.11 ลักษณะของ Normal Probability Plot ที่ข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ 28
รูปที่ 2.12 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต 29
รูปที่ 2.13 กราฟระหว่างส่วนตกค้างและลำดับการทดลอง ที่มีลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน 30
รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย 32
รูปที่ 2.15 พื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ 34
รูปที่ 2.16 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง 34
รูปที่ 2.17 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง 35
รูปที่ 2.18 ภาพแสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด) 36
รูปที่ 2.19 ภาพแสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองต่ำสุด) 37
รูปที่ 2.20 ภาพแสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสองที่เรียกว่า จุดอานม้า (Saddle Point) .. 38
รูปที่ 2.21 รูปแบบบัญญัติของแบบจำลองกำลังสอง 40
รูปที่ 2.22 เส้นต้นทุนรวม ต้นทุนผันแปร และต้นทุนคงที่ 43
รูปที่ 2.23 เส้นต้นทุนการผลิตระยะสั้นประเภทต่างๆ 43
รูปที่ 2.24 เส้นต้นทุนเฉลี่ยระยะยาว 44
รูปที่ 2.25 วงจรเงินสดหมุนเวียน 46
รูปที่ 3.1 พนักงานพันขดลวด 47
รูปที่ 3.2 พนักงานประกอบขดลวด 48
รูปที่ 3.3 นำขดลวดเข้าไปอบในเตาอบ 48
รูปที่ 3.4 ขันน็อตตามจุดต่างๆ บนหม้อแปลงไฟฟ้า 49
รูปที่ 3.5 น็อตที่ทำการขันแล้วจะทำเครื่องหมายไว้ 49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

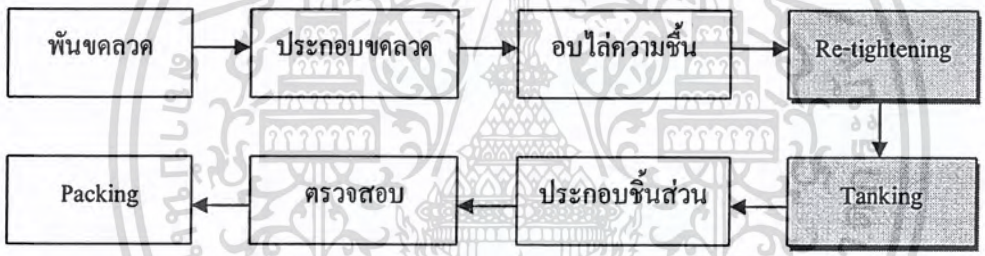
หน้า

รูปที่ 3.6 นำไส้ในหม้อแปลงไฟฟ้าใส่ลงในถัง 50
รูปที่ 3.7 ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน 50
รูปที่ 3.8 บริเวณทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า 51
รูปที่ 3.9 แยกชิ้นส่วนต่างๆ ก่อนส่งให้ลูกค้า 51
รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ 52
รูปที่ 3.11 นำชิ้นงานตัวอย่างเข้าไปอบในเตาอบ 54
รูปที่ 3.12 เจาะชิ้นงานทดสอบเพื่อนำไปวัดค่าความชื้น 55
รูปที่ 3.13 เครื่อง Coulometer (วัดปริมาณความชื้นในเนื้อฉนวน) 55
รูปที่ 3.14 Humidity meter 56
รูปที่ 4.1 กราฟความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบปกติในการทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัย 59
รูปที่ 4.2 ฮิสโตแกรมแสดงความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างในการทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัย 60
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวนในการทดสอบสมมติฐาน เพื่อคัดเลือกปัจจัย 60
รูปที่ 4.4 กราฟความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลที่แปลงค่า 61
รูปที่ 4.5 ฮิสโตแกรมแสดงความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่แปลงค่า 62
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวนของข้อมูลที่แปลงค่า 62
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความชื้นในกระดาษฉนวนกับระยะเวลาขันน็อต และความชื้นในกระดาษฉนวนกับตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบของข้อมูลที่แปลงค่า 63
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการขันน็อตกับตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ ของข้อมูลที่แปลงค่า 64
รูปที่ 4.9 กราฟความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบปกติในการทดสอบสมมติฐานรูปแบบ Full Quadratic ของข้อมูลที่แปลงค่า 65
รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมแสดงความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างในการทดสอบสมมติฐานรูปแบบ Full Quadratic ของข้อมูลที่แปลงค่า 65
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวน ในการทดสอบ สมมติฐานรูปแบบ Full Quadratic ของข้อมูลที่แปลงค่า 66
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงโครงร่าง (Contour Plot) ของปัจจัยเทียบกับค่าความชื้นในกระดาษฉนวน ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า 67
รูปที่ 4.13 พื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟสามมิติ ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า 68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

หม้อแปลงไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าชนิดหนึ่งในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าจากระดับหนึ่งไปสู่อีกระดับหนึ่ง เพื่อทำให้การส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าเป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ อีกทั้งหม้อแปลงไฟฟ้านั้นต้องสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่องและทนทาน การที่จะทำให้หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพจำเป็นต้องผ่านกระบวนการผลิตต่างๆ ซึ่งการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้ามีขั้นตอนดังนี้ 1) พันขดลวด 2) ประกอบขดลวด 3) อบไล่ความชื้น 4) Re-tightening 5) Tanking 6) ประกอบชิ้นส่วน 7) ตรวจสอบ 8) Packaging ดังแสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กระบวนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า

ขั้นตอน Re-tightening เป็นการตรวจสอบและขันน็อตหลังจากผ่านขั้นตอนการอบ เนื่องจากไส้ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผ่านการอบจะทำให้น็อตที่ใช้ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันเกิดการหลวมต้องมีการขันให้แน่น ส่วนขั้นตอน Tanking เป็นขั้นตอนการนำไส้ในหม้อแปลงไฟฟ้าลงในถัง แล้วใส่น้ำมัน จากนั้นทำให้เป็นสุญญากาศ แล้วปิดฝาถัง ซึ่งในช่วงของขั้นตอน Re-tightening และ Tanking นี้ เป็นขั้นตอนที่ไส้ในหม้อแปลงมีการสัมผัสกับอากาศทำให้มีความชื้นเข้าไปในเนื้อฉนวน จึงต้องมีการจำกัดเวลาในการทำ ซึ่งเวลาที่ใช้คือ 6-8 ชั่วโมง ถ้าความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศน้อยกว่าหรือเท่ากับ 60% ใช้เวลาไม่เกิน 8 ชั่วโมง และความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศมากกว่า 60% ใช้เวลาไม่เกิน 6 ชั่วโมง ซึ่งหากใช้เวลาในขั้นตอนนี้มากกว่าช่วงที่กำหนดไว้จะต้องนำหม้อแปลงไปอบใหม่ ซึ่งการอบใหม่ทำให้เสียเวลา เสียโอกาสที่จะผลิตหม้อแปลงในยูนิตอื่นๆ และทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น ดังนั้น บริษัท เอบีบี (ประเทศไทย) จำกัด จึงต้องการทราบว่า ณ ชั่วโมงที่ 6 และ 8 มีค่าความชื้นในเนื้อฉนวนเป็นเท่าไหร่ และหลังจากช่วงเวลานี้ไปมีค่าความชื้นในเนื้อฉนวนเป็นเท่าไหร่ มีแนวโน้มเป็นอย่างไร สามารถที่จะเพิ่มระยะเวลาในขั้นตอนนี้ได้หรือไม่

กลุ่มผู้วิจัยต้องการศึกษาว่าสามารถเพิ่มเวลาสำหรับขั้นตอน Re-tightening และ Tanking ขึ้นได้หรือไม่เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการผลิตของบริษัท ปริญญานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาและออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมของขั้นตอน Re-tightening และ Tanking โดยความชื้นที่อยู่ในกระดาษฉนวนมีค่าไม่เกิน 0.5% ซึ่งเป็นค่าที่บริษัท เอบีบี กำหนด เพราะความชื้นของกระดาษฉนวนส่งผลต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

1.1 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า
2. เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในขั้นตอนการทำ Re-tightening และ Tanking

1.2 ขอบเขตของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาในช่วงของขั้นตอน Re–tightening และ Tanking
2. ศึกษาเฉพาะปัจจัย ดังนี้
    1) ระยะเวลาที่ใช้หลังจากเปิดเตาอบจนถึงการปิดฝาถังในขั้นตอน Tanking (ระยะเวลาขันน็อต)
    2) ระดับความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ
    3) ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทำให้ทราบผลกระทบของแต่ละปัจจัยต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า
2. ให้ทราบถึงเวลาที่เหมาะสมในขั้นตอน Re-tightening และ Tanking โดยสามารถเพิ่มเวลาในขั้นตอน Re-tightening และ Tanking ได้
3. เพื่อลดต้นทุนในการนำหม้อแปลงไฟฟ้าไปอบใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวความคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์ โดยจะแบ่งเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ ทฤษฎีเกี่ยวกับกระดาษฉนวน ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบและการวิเคราะห์ผลการทดลอง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

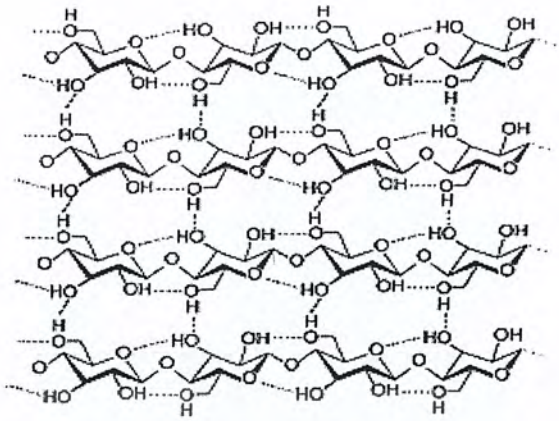
2.1 โครงสร้างและคุณสมบัติของกระดาษฉนวนเซลลูโลส

ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าโดยทั่วไปจะใช้กระดาษเซลลูโลสเป็นกระดาษฉนวน กระดาษชนิดนี้ประกอบไปด้วยเซลลูโลส (Cellulose) 90%, ลิกนิน (Lignin) 3-7% ที่เหลือเป็นโครงสร้างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (โมเลกุลของกลูโคส) ซึ่งมีส่วนประกอบของกลุ่มไฮดรอกไซด์ (-OH) ต่อกันเป็นโซ่ยาว เมื่อมีการดูดซับน้ำเข้ามาในกระดาษจะเกิดความชื้นขึ้น เพราะกลุ่มไฮดรอกไซด์มีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงและเป็นโมเลกุลที่มีขั้ว สามารถดูดโมเลกุลของน้ำด้วยแรงวานเดอร์วาลส์ (Van Der Waals) เข้ามาเชื่อมกับโมเลกุลของกลูโคสจนกลายเป็น –OOH ดังรูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างภายในของกระดาษเซลลูโลส ซึ่งการแลกเปลี่ยนความชื้นในกระดาษกับสิ่งแวดล้อมจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 23 °C โดย 50% ของความชื้นจะมีน้ำอยู่ประมาณ 5-8%โดยน้ำหนัก ดังนั้นในสภาวะปกติกระดาษเซลลูโลสจะมีความชื้นอยู่ประมาณ 2-10% โดยน้ำหนัก และกระดาษที่นำมาใช้ในการผลิตหม้อแปลงแต่ละครั้งต้องมีค่าความกรอบของกระดาษ (Degree of Polymerization) ประมาณ 1,000-1,200 ซึ่งค่าความกรอบของกระดาษนี้หมายถึงจำนวนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เป็นโครงสร้างของกระดาษเซลลูโลส (ทิพสุดนธ์, ธนา และศุภามน, 2553)

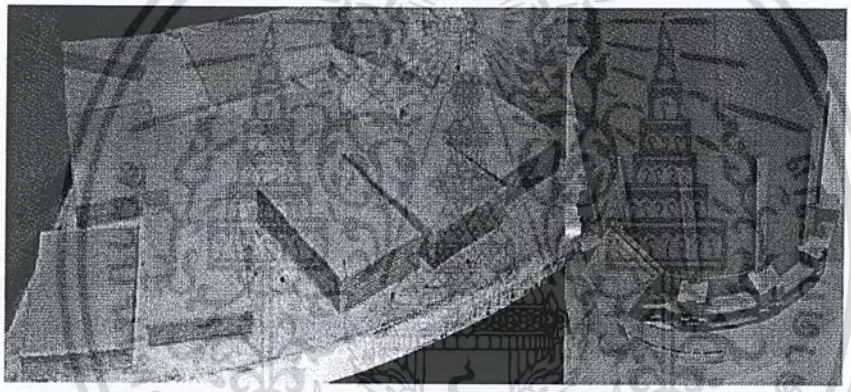
ความชื้นที่เกิดขึ้นส่งผลต่อกระดาษฉนวน ดังนี้

- ทำให้กระดาษมีความเป็นฉนวนน้อยลง
- หม้อแปลงไฟฟ้าเกิดความเสียหาย เมื่อความชื้นภายในกระดาษเกิดความเสียสมดุลกับน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า
- เป็นสาเหตุทำให้เกิดอัตราเร่งในการเสื่อมสภาพของกระดาษและหม้อแปลง
- ทำให้บางส่วนของหม้อแปลงเริ่มเกิดการไม่จ่ายไฟ (Discharge)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในของกระดาษเซลลูโลส
(ที่มา http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose)



รูปที่ 2.2 กระดาษฉนวน (กระดาษเซลลูโลส)

การแพร่ความชื้น

พิจารณาในทางคณิตศาสตร์ การแพร่ของความชื้นผ่านฉนวนของแข็ง อาจคำนวณได้จากสมการด้านล่างนี้

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}\left\{ D(c)\text{grad}\, c \right\} \qquad (2.1)$$

โดย t = เวลา

C = moisture concentration

D = สัมประสิทธิ์การแพร่

สมการนี้ไม่สามารถนำมาคำนวณเพื่อหาการส่งผ่านจากฉนวนหนึ่งไปยังอีกฉนวนหนึ่งได้ เพราะศักยอุณหพลศาสตร์ของไอน้ำควบแน่นในวัสดุแต่ละชนิดแตกต่างกัน ข้อจำกัดนี้อาจถูกยกเว้นได้ ถ้าสมการนี้ถูกเขียนใหม่ในเทอมของความดันไอน้ำ ซึ่งมีสมการเป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\partial C}{\partial p} * \frac{\partial p}{\partial t} = \text{div}\left\{D(p)\frac{\partial C}{\partial p} * \text{grad}\, p\right\} \qquad (2.2)$$

โดย p = ขอบเขตของการแพร่

สมการนี้ไม่สนใจการเกิดน้ำจากปฏิกิริยาเคมี ผลกระทบนี้อาจพิจารณาจากการเพิ่มเทอมพิเศษเข้าไปทางด้านขวาของสมการ เทอมนี้เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลา แต่ไม่ขึ้นกับระยะทาง (Howe, 1978)

การเสื่อมสภาพของฉนวน

ปัญหาการเสื่อมสภาพของฉนวนในทางทฤษฎีมีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ ดังนี้

1. ปัจจัยด้านอายุ

อายุผลิตภัณฑ์ของน้ำ ออกซิเจน น้ำมัน (โดยเฉพาะกรด) และอนุภาคต้นกำเนิดแตกต่างกัน เป็นตัวที่ทำให้เกิดการย่อยสลาย ทำให้อายุของหม้อแปลงไฟฟ้าสั้นลงภายใต้ผลกระทบของความเครียดทางความร้อน ไฟฟ้า แม่เหล็กไฟฟ้า และอิเล็กโทรไดนามิกส์

ในความเป็นจริง ของเหลวเป็นส่วนสำคัญของหม้อแปลงไฟฟ้า และมีกฎไดนามิกส์ในสภาพระบบทั้งหมด สิ่งเจือปน (น้ำ, แก๊ส และอายุผลิตภัณฑ์) ทั้งหมดในน้ำมันคือคุณสมบัติของระบบไม่นำไฟฟ้าทั้งหมด การเสื่อมสภาพของผลิตภัณฑ์เริ่มต้นจากการดูดซึมของฉนวน ซึ่งทำลายเซลลูโลสและส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของน้ำมันใหม่หลังการเติม การปรับสภาพน้ำมันเป็นขั้นตอนสำคัญในการยืดอายุหม้อแปลงไฟฟ้า

2. การปนเปื้อนของน้ำ

สาเหตุหลักที่ทำให้มีน้ำปนเปื้อนในฉนวนหม้อแปลงมากเกินไป มีอยู่ 3 สาเหตุ ดังนี้

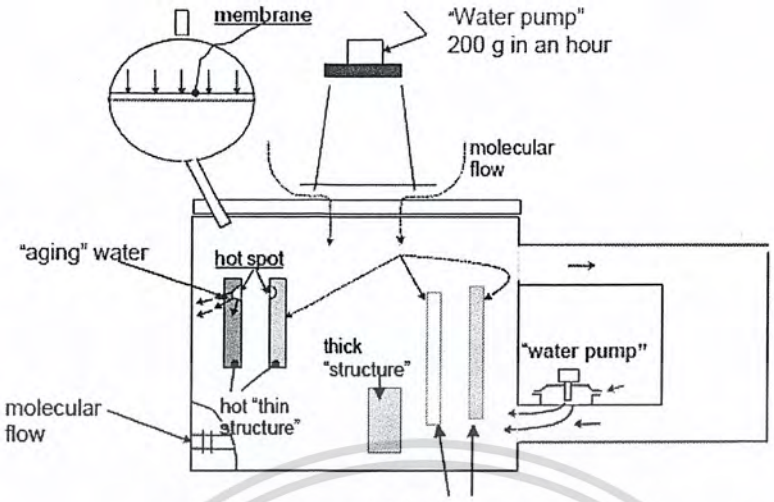
1) ความชื้นตกค้างในส่วนที่มีโครงสร้างหนา ซึ่งไม่สามารถเอาออกได้ในกระบวนการอบ

2) น้ำที่มาจากบรรยากาศ

3) การเสื่อมสภาพของเซลลูโลสและน้ำมัน

รูปแบบความชื้นของหม้อแปลง แสดงดังรูปที่ 2.3 สาเหตุสำคัญของการปนเปื้อนน้ำคือ ความชื้นในบรรยากาศ และกลไกหลักของการซึมของน้ำคือ ความหนืดการไหลของอากาศเปียกหรือน้ำอิสระที่ผ่านจากการปิดผนึกไม่ดีภายใต้การกระทำของการไล่ระดับความดัน ปริมาณน้ำฝนจำนวนมากสามารถถูกดูดเข้าไปในหม้อแปลงในเวลาอันสั้น เมื่อแรงดันหยุดกะทันหันรวมกับการปิดผนึกที่ไม่ดีพอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แบบจำลองความชื้น

(ที่มา: Life Management of Transformers, 2002)

การกระจายของความชื้นในกระบวนการเสื่อมสภาพของหม้อแปลงไฟฟ้าเป็นแบบไม่สม่ำเสมอ โดยส่วนใหญ่น้ำจะถูกกักเก็บในบริเวณที่มีโครงสร้างบาง (20-30% ของมวลรวมของฉนวนหม้อแปลง)

ตัวแปรของสมดุลความชื้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างของเซลลูโลส อุณหภูมิ การมีอยู่แก๊ส น้ำในน้ำมัน และการละลาย

ปริมาณน้ำรอบฉนวนต่ำกว่าในเพรสบอร์ดมาก เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่า แต่อย่างไรก็ตามอิทธิพลของอุณหภูมิส่งผลต่อการกระจายของน้ำในแต่ละชั้นไม่สม่ำเสมอ ฉนวนของแข็งเป็นที่สะสมของน้ำและเป็นที่หลักของสิ่งปนเปื้อนในน้ำมันในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า

3. การปนเปื้อนของอนุภาค

ต้นกำเนิดของอนุภาคมีมากมาย ได้แก่ เส้นใยเซลลูโลส เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง และอนุภาคอื่นๆ ที่เกิดจากกระบวนการผลิตจะเกิดในน้ำมันหม้อแปลงไฟฟ้า

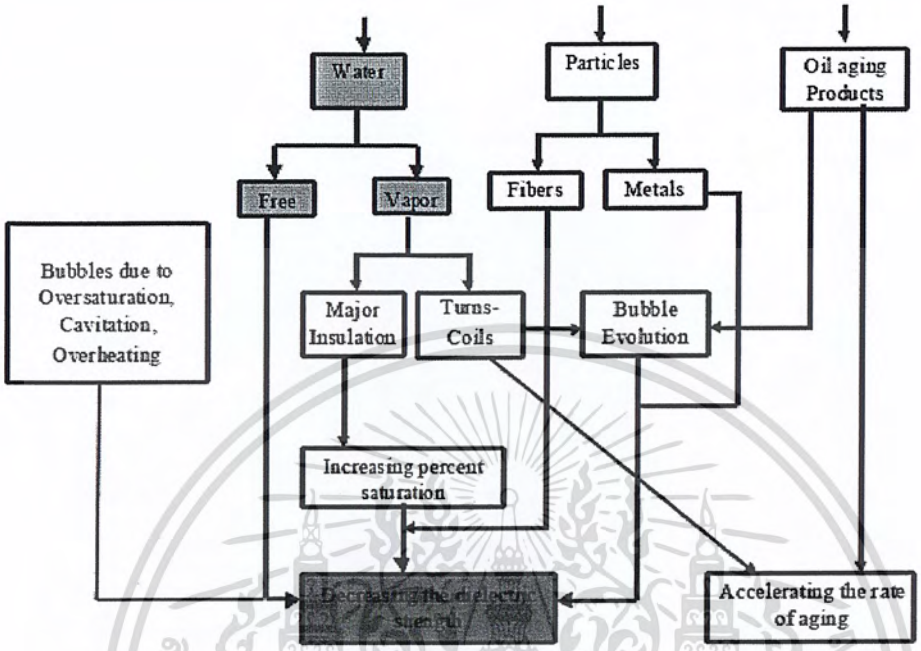
การปนเปื้อนของอนุภาคเป็นปัจจัยหลักของการเสื่อมสภาพความแข็งแรงของฉนวนหม้อแปลง เพราะฉะนั้นการขจัดอนุภาคเป็นเป้าหมายสำคัญของการประมวลผลน้ำมัน ซึ่งอนุภาคที่อันตรายที่สุด คือ อนุภาคที่นำไฟฟ้า (เหล็กคาร์บอน เส้นใยเปียก)

4. การเสื่อมสภาพของอายุกระดาษ

การสลายตัวของฉนวนเป็นปรากฏการณ์ทางเคมี โดยการย่อยสลายจะมีอยู่ 3 กลไก คือ ไฮโดรไลซิส ไพโรไลซิส และออกซิเดชัน ซึ่งทั้ง 3 กลไกนี้จะเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน โดยไฮโดรไลซิส คือ การย่อยสลายของสารประกอบทางเคมีโดยทำปฏิกิริยากับน้ำ ไพโรไลซิส คือ การย่อยสลายหรือการเปลี่ยนรูปของสารประกอบเนื่องมาจากความร้อน และออกซิเดชัน คือ การรวมกันของสารกับออกซิเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิ น้ำ และออกซิเจนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เซลลูโลสเกิดการย่อยสลาย ตลอดจนการออกซิเดชันของน้ำมัน

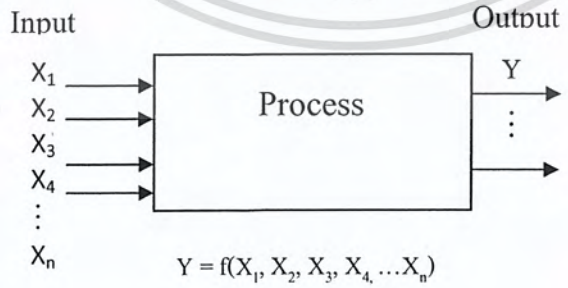


รูปที่ 2.4 รูปแบบการเสื่อมสภาพของฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า

(ที่มา: Life Management of Transformers, 2002)

2.2 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองเป็นวิธีการเก็บข้อมูลที่มีประสิทธิภาพโดยการเปลี่ยนแปลงหรือปรับค่าของ ตัวแปรนำเข้า (Input) อย่างมีจุดมุ่งหมายที่จะสังเกตการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ (Response) ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่ากระบวนการมีปัจจัย (Factor) หรือ Input (X_1, X_2, X_3, X_4,...X_n) ต่างๆ ที่ส่งผลต่อค่า Y ซึ่งเป็นคุณลักษณะด้านคุณภาพ (Quality Characteristic) ของกระบวนการ ในการออกแบบการทดลองเราต้องการที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองอย่างเป็นระบบเพื่อที่จะหาความสัมพันธ์เชิงสถิติของ Y และ X ต่างๆ โดยที่พยายามใช้ทรัพยากรในการทดลองให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ความสัมพันธ์เชิงสถิติที่ได้จะทำให้เรามีความรู้เกี่ยวกับกระบวนการ (Process Knowledge) เพื่อนำไปปรับปรุงกระบวนการต่อไป

2.2.1 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

1. หาปัจจัยที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์มากที่สุด
2. หาวิธีการปรับตั้งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ
3. หาวิธีการปรับตั้งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความแปรปรวนน้อยที่สุด
4. หาวิธีการปรับตั้งปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์ เพื่อทำให้ผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้มีค่าน้อยที่สุด

2.2.2 หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบการทดลอง

1. การทำการทดลองแบบสุ่ม (Randomization) หมายถึง การทดลองที่มีลำดับของการทดลองและการใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทดลองแบบสุ่ม เนื่องจากวิธีการเชิงสถิติกำหนดว่าข้อมูลหรือความผิดพลาดจะต้องมีการกระจายอย่างอิสระ การที่เราได้ทำการทดลองแบบสุ่มจะทำให้เราลดผลของปัจจัยภายนอกที่อาจปรากฏในการทดลองได้

2. การทำการทดลองซ้ำ (Replication) มีคุณสมบัติที่สำคัญสองประการ คือ ทำให้ผู้ทดลองสามารถหาค่าประมาณของความผิดพลาดในการทดลองได้ และถ้าค่าเฉลี่ยถูกนำมาใช้เพื่อประมาณผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่งในการทดลองแล้ว การทำการทดลองซ้ำจะสามารถทำให้ผู้ทดลองหาค่าประมาณที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้นในการประมาณผลกระทบนี้

3. การทำการทดลองแบบบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้สำหรับเพิ่มความเที่ยงตรง (Precision) ให้แก่การทดลอง บล็อกอันหนึ่งอาจหมายถึงส่วนหนึ่งของวัสดุที่ใช้ในการทดลองที่ควรจะมีความเป็นอันหนึ่งอันเดียวกันมากกว่าเซตทั้งหมดของวัสดุ

2.2.3 คำศัพท์พื้นฐานที่ควรทราบ

1. หน่วยทดลอง (Experimental Unit) หมายถึง หน่วยของวัสดุหรือวัตถุทดลองที่ได้สิ่งทดลองเดียวกันและพร้อมกัน ซึ่งในการทดลองครั้งหนึ่งๆ หน่วยทดลองจะได้รับหลายๆ สิ่งทดลองในการกระทำครั้งหนึ่งๆ พร้อมกันไม่ได้ เช่น ในแปลงทดลองพืช 1 แปลงจะให้ปุ๋ยชนิด A ก็จะต้องให้ปุ๋ยชนิด A หมดทั้งแปลง จะให้ปุ๋ยหลายๆ ชนิดพร้อมกันในการทดลองครั้งหนึ่งๆ ไม่ได้

2. ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) คือ ผลลัพธ์หรือลักษณะทางคุณภาพ ที่ต้องการควบคุมให้เป็นตามมาตรฐานที่ต้องการ

3. ปัจจัย (Factor) คือ ตัวแปรนำเข้า ที่ใช้ในระบบหรือกระบวนการแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ ปัจจัยที่ควบคุมได้และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้

4. ระดับปัจจัย (Levels of Factor) คือ จำนวนค่าของปัจจัยที่เปลี่ยนไปในการทดลองหนึ่ง เช่น อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 100 °C, 200 °C และ 300 °C นั่นคือ ปัจจัยอุณหภูมิทำการศึกษาที่ 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. วิธีปฏิบัติ (Treatment) คือ ข้อกำหนดสำหรับทุกปัจจัยที่ศึกษาในการทดลองนั้นๆ เช่น ถ้าในการทดลองทำการศึกษาปัจจัย A 2 ระดับ ปัจจัย B 3 ระดับ จะมีวิธีปฏิบัติที่เป็นไปได้แตกต่างกันเท่ากับ $2\times3 = 6$ วิธี

6. จำนวนครั้งที่ทดลอง (Runs or Experimental Runs) คือ จำนวนการทดลองทั้งหมดที่ทำต่อหนึ่งแผนการทดลอง มีค่าเท่ากับผลคูณของจำนวนวิธีปฏิบัติกับจำนวนครั้งที่ทำการทดลองซ้ำ (Replicates)

2.2.4 ประเภทของการทดลอง (Type of Experiment)

ในการทดลองสามารถจะจำแนกประเภท (ชนิด) ของการทดลองได้เป็น 5 ประเภทหลักตามข้อมูลที่ทราบเกี่ยวกับระบบและวัตถุประสงค์ของการทดลอง ดังนี้

1. การทดลองเดียวหรือการทดลองเพียงครั้งเดียว (Single Experiment) คือ การทดลองในกรณีที่ผู้ทดลองมีความรู้ความเข้าใจในระบบหรือกระบวนการที่ต้องการศึกษาเป็นอย่างดี ทราบถึงปัจจัยที่มีความสำคัญในกระบวนการเบื้องต้น แต่ต้องการทราบและชี้บ่งถึงสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย

2. การทดลองอย่างต่อเนื่อง (Continuous Experiment) คือ การทำการทดลองเพื่อที่จะลดค่าการเปลี่ยนแปลง (Variation) ในกระบวนการโดยมีเป้าหมายในการปรับปรุงกระบวนการอย่างชัดเจน เช่น ต้องการปรับปรุงดัชนีวัดสมรรถภาพกระบวนการ (C_p, C_{pk}, C_{pm}) ให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ผู้ทดลองไม่มีความรู้ในกระบวนการหรือระบบที่ต้องการปรับปรุงมากนัก แต่ทราบว่ากระบวนการยังไม่ได้มาตรฐาน มีของเสียทั้งที่ต้องทำลายทิ้ง (Scrap) และของเสียที่นำกลับมาแก้ไขได้ (Rework) มากเกินไป

3. การทดลองแบบคัดทิ้ง (Screening Experiment) คือ การทดลองที่ทำขึ้นสำหรับศึกษาระบบ หรือกระบวนการใหม่ที่เพิ่งทำการติดตั้ง หรือจะติดตั้งพัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใหญ่หรือซับซ้อนและผู้ทำการทดลองมีความเข้าใจในกระบวนการน้อย

4. การทดลองแบบเจาะจง (Focusing Experiment) คือ การทดลองที่ทำขึ้นโดยมีเป้าหมายกำหนดจากความต้องการในการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นโดยการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับปัจจัยที่เลือกศึกษานั้นๆ

5. การทดลองเชิงลำดับ (Sequential Experiment) คือ การทดลองที่ทำขึ้นเนื่องจากกระบวนการที่สนใจศึกษาสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหรือกระบวนการย่อยๆ เป็นจำนวนมาก ทำให้มีปัจจัยที่ศึกษาในภาพรวมในแต่ละขั้นตอนมากจึงจำเป็นต้องแบ่งกระบวนการออกเป็นส่วนๆ และทำการทดลองกำหนดปัจจัย จากนั้นจึงนำมารวมเป็นข้อกำหนดของกระบวนการในภาพรวมเพื่อให้สามารถทำการศึกษากระบวนการหรือระบบที่มีขนาดใหญ่มากได้จริงในทางปฏิบัติ เช่น การทำโต๊ะไม้ อาจแบ่งขั้นตอนคร่าวๆได้คือ 1) การตัดไม้ให้ได้ขนาด 2) การกลึงให้ได้รูป 3) การเจาะเพื่อการประกอบ 4) การประกอบ 5) การขัดและพ่นสี เป็นต้น ในการทดลองจะทำการวิเคราะห์ขั้นตอนแต่ละขั้นและนำมาเป็นข้อกำหนดในภาพรวม

2.2.5 ขั้นตอนในการออกแบบการทดลอง

ในการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง มีขั้นตอนในการดำเนินการดังต่อไปนี้

1. ทำความเข้าใจถึงปัญหา โดยการศึกษาและทำความเข้าใจในกระบวนการ เพื่อกำหนดปัญหาและวัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลองได้อย่างชัดเจน

2. การเลือกปัจจัย (Factor) และการกำหนดระดับของปัจจัย จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้นๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดระดับของปัจจัยด้วย

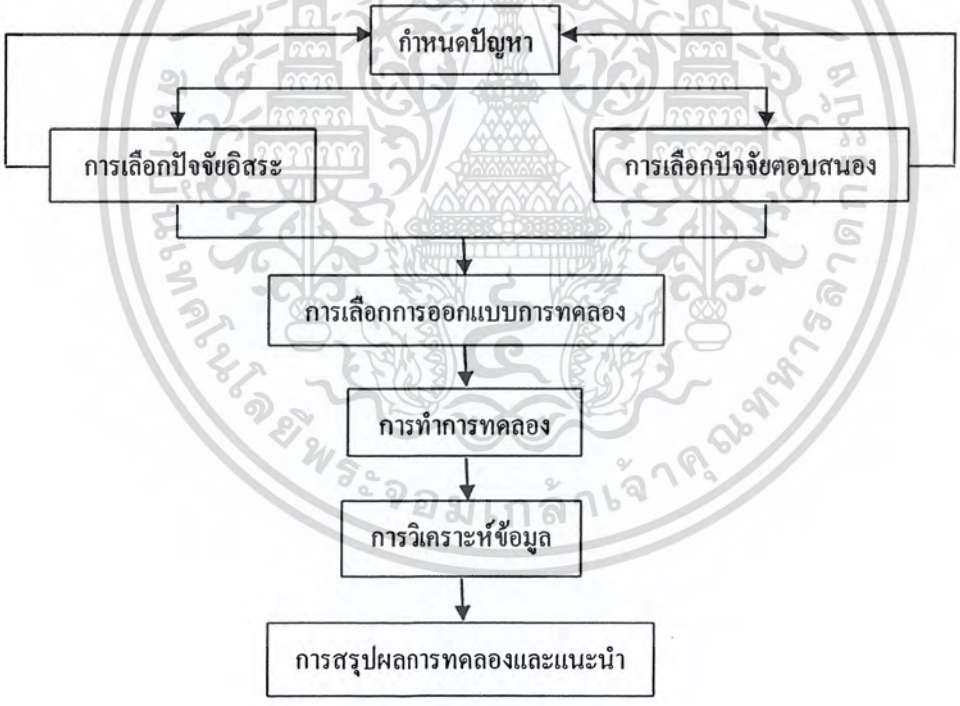
3. เลือกตัวแปรตอบสนอง ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้ในการวัดผลของกระบวนการ โดยจะเลือกตัวแปรตอบสนองที่ให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการที่ทำการทดลองอยู่

4. เลือกวิธีการออกแบบการทดลอง เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น ในการเลือกวิธีการออกแบบการทดลอง จะต้องคำนึงถึงวัตถุประสงค์ของการทดลองเสมอ เนื่องจากการออกแบบการทดลองมีมากมายหลายรูปแบบล้วนแต่มีรูปแบบเฉพาะ และมีความเหมาะสมกับการทดลองที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขนาดของตัวอย่าง จำนวนการทดลองซ้ำและการบล็อกด้วย

5. ทำการทดลอง ติดตามดูการทำงานของกระบวนการอย่างระมัดระวัง เพื่อให้แน่ใจว่าการดำเนินการทุกอย่างเป็นไปตามแผน ถ้ามีอะไรผิดพลาดเกี่ยวกับการทดลองในขั้นนี้ จะทำให้การทดลองนี้ใช้ไม่ได้

6. วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้หลักการทางสถิติ คือ การนำเอาวิธีการทางสถิติมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อหาข้อสรุปว่าเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการทดลองหรือไม่

7. สรุปผลการทดลองและทำข้อเสนอแนะ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปใช้ตั้งกระบวนการคราวต่อไป



รูปที่ 2.6 ผังขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.6 การลดค่าอคติในการทดลอง

2.2.6.1 การลดค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลอง สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ

1) ความคลาดเคลื่อนหลัก เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความคลาดเคลื่อนระหว่างการทดลองซึ่งความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นขณะที่มีการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองหนึ่ง โดยทั่วไปเกิดจากการเปลี่ยนกรรมวิธีการทดลอง ค่าความคลาดเคลื่อนนี้ สามารถลดได้โดยการลดจำนวนครั้งในการเปลี่ยนรูปแบบการทดลองให้น้อยที่สุด

2) ความคลาดเคลื่อนรอง หรือที่เรียกอีกอย่างหนึ่งว่า ความคลาดเคลื่อนภายในการทดลอง ซึ่งเกิดจากการทำการทดลองหลายครั้งในรูปแบบการทดลองเดิม ซึ่งค่าของการคลาดเคลื่อนรองนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยของความคลาดเคลื่อนของระบบการวัดและความคลาดเคลื่อนตามธรรมชาติของการวัด โดยที่ธรรมชาติของการวัดแก้ไขโดยการหาค่าเฉลี่ยจากการทำการวัดหลายๆ ครั้ง ส่วนความคลาดเคลื่อนของระบบ แก้ไขโดยการฝึกฝนการทำการทดลองและใช้เครื่องมือทำการทดลองที่มีความเที่ยงตรงสูง

2.2.6.2 การสุ่มการทดลอง ความคลาดเคลื่อนในการทดลองเกิดจากลำดับการทดลองที่มีค่าเสื่อมสภาพในตัวเองในการทำการทดลองหลายครั้งหรือการรวมตัวเมื่อมีการทำการทดลองหลายครั้งซึ่งไม่สามารถแก้ไขทางกายภาพได้ สามารถทำการลดปัญหาความคลาดเคลื่อนนี้ โดยการสุ่มการทดลองเพื่อการกระจายความคลาดเคลื่อนออกไปอย่างทั่วถึง แต่ก็อาจจะเพิ่มความคลาดเคลื่อนในรูปแบบความคลาดเคลื่อนหลัก อาจใช้การทดลองแบบเป็นกลุ่มของข้อมูลแทนการสุ่มการทดลองของแต่ละลำดับการทดลอง

2.2.6.3 รูปแบบของการออกแบบการทดลอง

รูปแบบในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งได้กว้างๆ ดังต่อไปนี้

1) การออกแบบการทดลองเมื่อมีปัจจัยเดียว ในการออกแบบการทดลองนี้จะเป็นการเปรียบเทียบผลของตัวแปรที่สนใจเมื่อมีเพียงปัจจัยเดียวที่สนใจ และระดับของปัจจัยมีมากกว่า 2 ระดับ โดยที่สามารถอธิบายการทดลองนี้โดยใช้สมการทางสถิติเชิงเส้นตรงได้ดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + \tau + \varepsilon_{ij} \tag{2.3}$$

2) การออกแบบการทดลองหลายปัจจัยแบบแฟคทอเรียล (Factorial Design Experiment) ในการออกแบบการทดลองพบว่าหลายๆ การทดลองจำเป็นต้องศึกษาปัจจัยมากกว่า 2 ปัจจัย ในการศึกษาดังกล่าวจะทำให้สามารถทราบถึงอิทธิพลหลัก (Main Effect) ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ถึงความแตกต่างของผลกระทบระหว่างระดับของปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบกับระดับหนึ่งของอีกหนึ่งปัจจัย ตัวแบบทางสถิติของการทดลองเมื่อมีปัจจัย 2 ปัจจัย สามารถแสดงได้ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \tag{2.4}$$

3) การออกแบบการทดลองหลายปัจจัยเมื่อแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ (2^k Factorial Design Experiment) การออกแบบการทดลองนี้ เป็นการทดลองที่มีจำนวนของปัจจัย k ปัจจัย ซึ่งในแต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ จึงเรียกการออกแบบการทดลองชนิดนี้ว่า 2^k แฟคทอเรียล โดยปกติแล้วการออกแบบการทดลองแบบนี้จะใช้จำนวนตัวอย่างที่น้อยเมื่อเทียบกับแบบแฟคทอเรียล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.7 ประโยชน์ของการออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลองจะช่วยให้นักวิจัยสามารถที่จะวางแผนการวิจัยได้อย่างรัดกุม การออกแบบการทดลองมีประโยชน์ ดังนี้

1. ช่วยให้สามารถวางแผนการวัดตัวแปรต่างๆได้อย่างรัดกุม
2. ช่วยให้กำหนดกลุ่มประชากรเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูลได้เหมาะสม
3. ช่วยให้กำหนดและสร้างเครื่องมือการวิจัยเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล
4. ช่วยให้กำหนดและวิเคราะห์ทางสถิติได้อย่างถูกต้อง
5. ช่วยให้วางแผนเกี่ยวกับทรัพยากรคน งบประมาณ และเวลาในการทำวิจัย
6. ช่วยให้ตรวจสอบความเชื่อมั่นและความเที่ยงตรงของการทดลอง

2.3 การวิเคราะห์การทดลอง

การวิเคราะห์การทดลอง มีส่วนสำคัญดังต่อไปนี้

2.3.1 การจัดการข้อมูล

2.3.1.1 ข้อมูลสูญหาย (Missing Data)

ข้อมูลสูญหาย คือ ค่าสังเกตที่ต้องการทราบค่าแต่ไม่สามารถทราบค่าได้ โดยที่ค่านั้นควรจะสามารถทราบค่าได้หากวิธีการที่ใช้ในการรวบรวมข้อมูลหรือในการวัดค่ามีประสิทธิภาพดีขึ้นหรือมีความเหมาะสมมาก ข้อมูลสูญหายเป็นกรณีที่พบได้บ่อยในงานวิจัยทุกสาขา และนักวิจัยจำเป็นต้องพิจารณาถึงแนวทางที่เหมาะสมสำหรับใช้จัดการกับข้อมูลสูญหายในทุกๆ ครั้งที่พบกับปัญหานี้ ซึ่งวิธีการที่ใช้สำหรับจัดการกับข้อมูลสูญหายมีทางเลือกให้พิจารณาค่อนข้างหลากหลาย หากเลือกใช้วิธีจัดการกับข้อมูลสูญหายที่ไม่เหมาะสมย่อมส่งผลทำให้เกิดการบิดเบือนผลการวิเคราะห์

1. ผลกระทบจากข้อมูลสูญหาย

ข้อมูลสูญหายที่เกิดขึ้นอาจไม่ก่อผลกระทบใดๆ ต่อผลการวิจัยหรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบที่รุนแรงต่องานวิจัยก็ย่อมได้ทั้งนี้สามารถจำแนกผลกระทบจากข้อมูลสูญหายได้ดังนี้

- ข้อมูลสูญหายสามารถทำให้เกิดการสูญเสียกำลังในการทดสอบ (Power of the Test) เนื่องจากขนาดตัวอย่างที่ใช้ลดลงอันเป็นผลจากการตัดข้อมูลสูญหายออกจากการศึกษา หากทำการวิเคราะห์ในกลุ่มตัวอย่างที่มีขนาดเล็กลงย่อมส่งผลต่อการสูญเสียระดับความเชื่อมั่นและการเพิ่มขึ้นของความแปรผันในการศึกษา
- ข้อมูลสูญหายอาจก่อให้เกิดความเอนเอียงของค่าประมาณ
- ข้อมูลสูญหายก่อให้เกิดความยากลำบากในการตรวจสอบอิทธิพลหรือความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ซึ่งอาจจะส่งผลให้การสรุปผลผิดเพี้ยนไป

ทั้งนี้จะเห็นได้ว่า ข้อมูลสูญหายสามารถส่งผลต่อการวิจัยทั้งในส่วนของการวิเคราะห์และการสรุปผล โดยที่ระดับความรุนแรงของผลกระทบนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบจากหลายส่วน แต่ที่สำคัญก็คือ ขนาดของข้อมูลสูญหาย ประเภทของข้อมูลสูญหายที่เกิดขึ้น และวิธีการจัดการกับข้อมูลสูญหาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตรวจเช็คข้อมูลสูญหาย

วิธีการตรวจเช็คข้อมูลสูญหายสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

- การตรวจเช็คด้วยสายตา (Visual Scanning)

- โดยใช้โปรแกรมนำเข้าข้อมูล (Data Entry Program) เช่น MINITAB หรือ SPSS ช่วยในการตรวจเช็ค

- โดยใช้วิธีการแจกแจงความถี่ของคำตอบในตัวแปรแต่ละตัว

- สำหรับในการวิเคราะห์ตัวแปรคู่ (Bivariate Analysis) ใช้วิธีการสร้างตารางไขว้ (Crosstabulation) ระหว่างตัวแปรทั้งคู่

3. วิธีการจัดการกับข้อมูลสูญหาย

การจัดการกับข้อมูลสูญหายมีหลายวิธีการให้เลือกใช้ การพิจารณาเลือกใช้วิธีการใดขึ้นอยู่กับลักษณะของข้อมูลสูญหายที่เกิดขึ้น หากเลือกวิธีการที่ไม่เหมาะสมมาใช้อาจเป็นการเพิ่มค่าความคลาดเคลื่อนและทำลายผลลัพธ์ที่ควรจะได้ สำหรับวิธีการจัดการกับข้อมูลสูญหายที่มักถูกเลือกนำมาใช้มีดังนี้

- Listwise Data Deletion: เป็นวิธีการจัดการกับข้อมูลสูญหายที่ง่ายมาก คือไม่สนใจข้อมูลสูญหายที่เกิดขึ้น โดยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากข้อมูลเฉพาะส่วนที่สมบูรณ์ แนวทางนี้จะมีความเหมาะสมในกรณีที่ข้อมูลสูญหายมีจำนวนน้อยมากหรือผลจากการวิเคราะห์มีความชัดเจนมาก ซึ่งวิธีการนี้มักถูกกำหนดให้ใช้เป็นหลัก (by Default) สำหรับจัดการกับข้อมูลสูญหายในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทางสถิติทั่วๆ ไป หากไม่เจาะจงเลือกใช้วิธีการอื่นในการจัดการกับข้อมูลสูญหาย

- Pairwise Data Deletion: เป็นวิธีการจัดการกับข้อมูลสูญหายสำหรับกรณีที่ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรคู่โดยจะทำการวิเคราะห์ข้อมูลจากข้อมูลส่วนที่มีค่าสมบูรณ์ทั้งสองตัวแปร

- Mean Substitution: เป็นวิธีการแทนค่าข้อมูลสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทราบค่าในแต่ละกลุ่มย่อยของตัวแปรอื่น ซึ่งเป็นวิธีที่พัฒนามาจากการแทนค่าข้อมูลสูญหายด้วยค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ทราบค่า ทั้งนี้เนื่องจากข้อสมมติที่ว่าค่าของข้อมูลสูญหายควรจะต้องขึ้นอยู่กับลักษณะของหน่วยตัวอย่าง โดยลักษณะของหน่วยตัวอย่างที่ใกล้เคียงกันควรจะมีค่าข้อมูลที่สนใจคล้ายคลึงกัน

- Regression Method: ทำการสร้างสมการถดถอยระหว่างตัวแปรใดๆ ที่ต้องการจากข้อมูลที่สมบูรณ์ โดยกำหนดให้ตัวแปรตามเป็นตัวแปรที่มีข้อมูลไม่สมบูรณ์ จากนั้นใช้สมการถดถอยที่ได้ทำการประมาณค่าของข้อมูลที่ไม่สมบูรณ์

- Hot Deck Imputation: เป็นวิธีการพิจารณาเลือกหน่วยตัวอย่างที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมากที่สุดกับหน่วยตัวอย่างที่เกิดค่าสูญหายจากนั้นแทนค่าที่สูญหายด้วยค่าของหน่วยตัวอย่างที่คล้ายคลึงนั้น

- Expectation Maximization (EM) Approach: วิธีการนี้เป็นการอาศัยหลักของกระบวนการวนซ้ำ (Iterative Procedurc) ระหว่าง 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรก เป็นขั้นตอนที่เรียกว่า Expectation (E) Step ซึ่งจะทำการประมาณค่าคาดหวังจากฟังก์ชัน Likelihood ภายใต้ข้อมูลที่สมบูรณ์ สำหรับขั้นตอนที่สอง เป็นขั้นตอนที่เรียกว่า Maximization (M) Step เพื่อทำการแทนค่าคาดหวังของข้อมูลสูญหายด้วยค่าที่ได้จาก E step และทำการประมาณค่าคาดหวังจากฟังก์ชัน Likelihood ในกรณีถ้าไม่เกิดข้อมูลสูญหาย โดยจะทำการวนซ้ำระหว่าง 2 ขั้นตอนจนกว่าจะเกิดค่าที่ลู่เข้า (Convergence)หรือค่าที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากใช้ค่านั้นแทนค่าข้อมูลสูญหายที่เกิดขึ้น

- Raw Maximum Likelihood Methods: เป็นวิธีการที่อาศัยข้อมูลสมบูรณ์ในการสร้างค่า Maximum Likelihood ภายใต้ตัวแบบทางสถิติที่เหมาะสม ไม่ว่าจะเป็น Structural Equation Model, Regression Model, ANOVA และ ANCOVA Models

ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 การแปลงข้อมูล

ในการทดสอบสมมติฐานโดยใช้สถิติต่างๆ ส่วนใหญ่มักจะมีข้อตกลงเบื้องต้นเกี่ยวกับลักษณะของประชากร เช่น กลุ่มตัวอย่างต้องสุ่มมาจากประชากรที่มีการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งบางสภาวการณ์ ลักษณะของประชากรที่สนใจศึกษาไม่เป็นไปตามข้อตกลงเบื้องต้น จึงต้องนำการแปลงข้อมูลมาช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูล

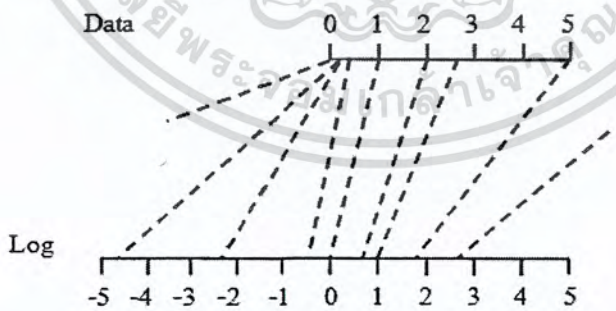
Single (1988) กล่าวไว้ว่า สำหรับกลุ่มของตัวเลข 1 กลุ่ม การแปลงข้อมูลจะหมายถึงการแทนที่ค่าของข้อมูลเดิมที่มีอยู่ด้วยค่าอื่น ซึ่งวัตถุประสงค์ของการแปลงข้อมูล คือ ใช้ในการแสดงลักษณะของข้อมูลและเพื่อให้การแจกแจงนั้นมีรูปแบบที่สมมาตร

รูปแบบสมการทั่วไปที่เราสนใจคือ การแจกแจงปกติ ในการที่จะเปลี่ยนรูปแบบการแจกแจงนั้น การแปลงข้อมูลจะต้องทำมากกว่าการบวกหรือการคูณด้วยค่าคงที่ธรรมดาและจะทำการแปลงข้อมูลเฉพาะค่าที่เป็นบวก โดยส่วนใหญ่แล้ววิธีการที่ง่ายที่สุด คือวิธีการยกกำลัง ½ ยกกำลัง -1 ซึ่งการยกกำลังด้วยเลขที่เป็นค่าลบนั้น มักจะใช้ในการแปลงข้อมูลจากเล็กให้ใหญ่ขึ้น

1. วิธีการแปลงโดยใช้ล็อก (Logarithm Transformation)

เป็นการแปลงข้อมูลโดยใช้ค่าล็อกกาลิทึม โดยอาจเรียกสั้นๆว่า ล็อก สามารถคำนวณได้จากการยึดตัวเลขบวกจำนวนหนึ่งเป็นฐาน (Base) ค่าล็อกของข้อมูลเป็นค่าที่เมื่อยกกำลังด้วยค่าฐานแล้วจะได้ค่าของข้อมูลเดิมกลับคืนมา ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ล็อกฐาน 10 และล็อกฐาน e เราพบว่า ล็อกฐาน e สามารถหาได้จากล็อกฐาน 10 โดยการคูณ 2.3026 เข้ากับค่าล็อกของฐาน 10 ซึ่งหมายความว่า เมื่อเราใช้การแปลงทั้งสองแบบนี้จะให้ผลของรูปแบบการแจกแจงที่เหมือนกัน

ความสามารถของการใช้ค่าล็อกในการแปลงข้อมูล : ถ้าค่าของข้อมูลมีค่าน้อยกว่า 0 เมื่อใช้ล็อกในการแปลงข้อมูลจะไม่สามารถทำได้เพราะค่าล็อกไม่สามารถติดลบได้ สำหรับข้อมูลที่ค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง1 เมื่อใช้ล็อกในการแปลงข้อมูลจะได้ค่าที่ติดลบและมีค่าที่น้อยลงอย่างมากเมื่อค่าของข้อมูลมีค่าเข้าใกล้ 0 ส่วนข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 1 นั้น การใช้การแปลงแบบนี้จะทำให้ค่าที่มีค่ามากอยู่นั้นมีค่าลดลงอย่างมาก



รูปที่ 2.7 การแปลงโดยใช้ล็อกฐาน e

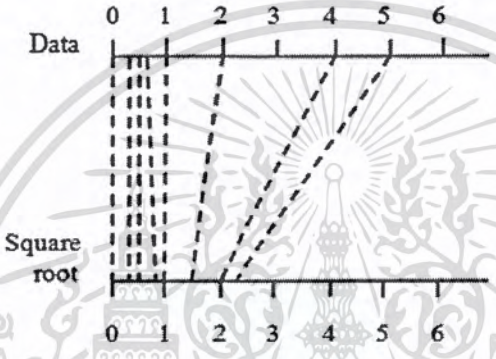
(ที่มา: นพรัตน์, 2542)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. วิธีการแปลงโดยใช้รากที่สอง (Square Root Transformation)

เป็นการแปลงโดยใช้ค่ารากที่สอง ซึ่งค่ารากที่สองของข้อมูลเป็นค่าที่ถ้าเรานำค่าของตัวมันเองคูณเข้าไป จะได้ค่าของข้อมูลเดิมกลับคืนมา การหาค่ารากที่สองจะกระทำได้ด้วยการคิดจากการหารที่ยุ่งยากและซับซ้อน จึงมีผู้เสนอตารางรากที่สองเพื่อให้ดูง่ายขึ้น

ความสามารถของการใช้ค่ารากที่สองในการแปลงข้อมูล ถ้าค่าของข้อมูลมีค่าน้อยกว่า 0 จะไม่สามารถใช้การแปลงค่านี้ได้ สำหรับข้อมูลที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 นั้น เมื่อใช้การแปลงโดยใช้ค่ารากที่สองแล้วจะทำให้ได้ค่าที่มากขึ้น โดยจะมีค่าเข้าใกล้ 1 มากขึ้น เมื่อค่าของข้อมูลเริ่มต้นมีค่าเข้าใกล้ 1 และสำหรับข้อมูลที่มีค่ามากกว่า 1 นั้น จะทำให้ค่าของข้อมูลที่มีค่ามากนั้นมีค่าลดลง



รูปที่ 2.8 การแปลงโดยใช้ค่ารากที่สอง

(ที่มา: นพรัตน์, 2542)

3. วิธีการแปลงโดยใช้การกลับเศษส่วน (Recipocal Transformation)

เป็นการแปลงข้อมูลโดยใช้วิธีกลับเศษส่วน ซึ่งการกลับเศษส่วนหมายถึงการให้ค่า 1 ถูกหารด้วยค่าของข้อมูล ความสามารถของการใช้วิธีกลับเศษส่วนในการแปลงข้อมูล: ถ้าค่าของข้อมูลเดิมที่มีอยู่นั้นมีค่าน้อยกว่า 0 แล้ว การแปลงแบบนี้จะทำให้ได้ข้อมูลที่มีค่าเข้าใกล้ 0 มากขึ้นเมื่อค่าของข้อมูลเดิมมีค่าน้อยมาก แต่ถ้าข้อมูลเดิมมีค่ามากกว่า 0 วิธีการแปลงนี้จะทำให้ข้อมูลมีค่าน้อยลงเมื่อข้อมูลเดิมมีค่ามาก

ข้อเสียของการแปลงแบบวิธีนี้คือ เมื่อแปลงแล้วลำดับที่ของข้อมูลจะเปลี่ยนไป ถ้าเรียงจากน้อยไปหามากเมื่อเป็นข้อมูลเดิม แต่จะเปลี่ยนเป็นการเรียงจากมากไปหาน้อยเมื่อทำการแปลงข้อมูลด้วยวิธีนี้

ข้อมูล	-2	-1.5	-1	-0.5	0.5	1	1.5	2
การกลับเศษส่วน	-0.5	-0.67	-1	-2	2	1	0.67	0.5

4. วิธีการแปลงโดยใช้เลขยกกำลัง (Power Transformations)

เป็นการแปลงด้วยเลขยกกำลังอื่น ๆ เราสามารถที่จะนำเลขจำนวนจริงใด ๆ ที่นอกเหนือจากเลขยกกำลังดังวิธีข้างต้นมายกกำลังเพื่อที่จะทำการแปลงข้อมูลนั้น ๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการใช้รากที่สองก็คือการยกกำลังด้วยเลข ½ หรือวิธีการกลับเศษส่วนคือการยกกำลังด้วยเลข -1 ดังนั้น เราจึงสามารถที่ใช้เลขยกกำลังตัวอื่นๆ ในการแปลงข้อมูลได้

การแปลงแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

1. x^p

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. $\frac{x^P - 1}{P}$

เมื่อ P เป็นเลขจำนวนจริงใดๆ และเมื่อ P มีค่าเท่ากับ 0 เราจะให้การแปลงนี้มีรูปแบบการแปลงแบบล็อกการิ-ทึม รูปแบบการแปลงในแบบแรกจะเป็นการยกกำลังง่ายๆ แบบทั่วไป ซึ่งภายหลังได้มีการปรับปรุงรูปแบบการแปลในแบบที่หนึ่งให้เป็นรูปแบบการแปลงในแบบที่สองโดย Box & Cox รูปแบบการแปลงในแบบที่สองนี้ถูกพูดถึงในการแก้ปัญหาเกี่ยวกับข้อตกลงเบื้องต้นอื่นๆด้วย นอกเหนือจากเรื่องของการแจกแจง เช่น ข้อตกลงเบื้องต้นเรื่องความแปรปรวน

ความสามารถของการใช้เลขยกกำลังอื่นๆ ในการแปลงข้อมูล สำหรับวิธีการแปลงแบบนี้จะใช้เลขยกกำลังที่มีค่าน้อยกว่า 1 กับข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบเบ้ขวา และในทางตรงกันข้ามจะใช้เลขยกกำลังที่มีค่ามากกว่า 1 เมื่อข้อมูลมีการแจกแจงแบบเบ้ซ้าย สำหรับการแปลงในรูปแบบที่สอง คือ $\frac{x^P - 1}{P}$ ถ้าเลขยกกำลังเป็น 0 ค่าที่แปลงได้จะมีค่าเข้าใกล้ค่าที่ได้จากการแปลงโดยใช้ค่าล็อกฐาน e

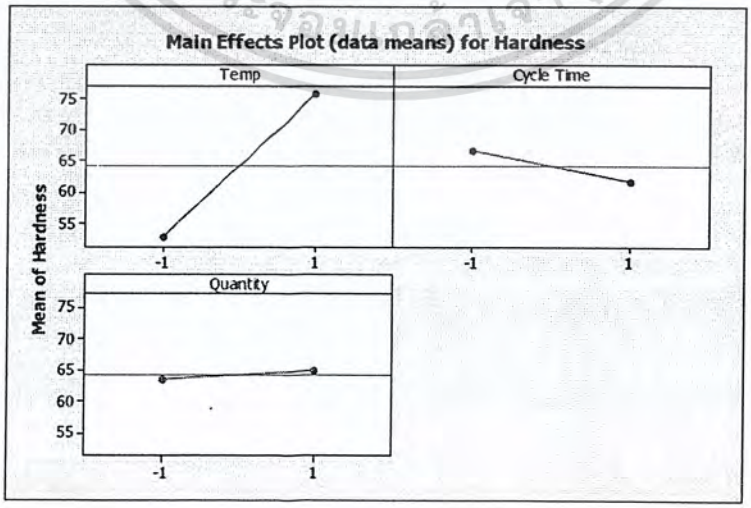
2.3.2 วิธีวิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลองสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี ดังนี้

2.3.2.1 การวิเคราะห์โดยใช้กราฟ (Graphical Analysis)

ประเภทของกราฟ แบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

1. Mean Plot หรือ Main Effect คือ กราฟค่าเฉลี่ยหรือกราฟผลกระทบหลัก เป็นกราฟที่ใช้แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนองในกรณีปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญ (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย ($\bar{y}$) แกนนอน ปัจจัยที่สนใจ) โดยจะใช้กราฟนี้ในการพิจารณาหาจุดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยหลักนั้นๆ (Main Effect) การวิเคราะห์วิธีนี้ โดยการใช้ค่าเฉลี่ยค่าในค่าระดับที่ต่ำและสูงแล้วนำมาพล็อตกราฟ เช่น การพล็อตค่าความแข็งที่ระดับอุณหภูมิต่ำกับอุณหภูมิสูง ซึ่งค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิต่ำเท่ากับค่าเฉลี่ยที่อุณหภูมิสูง (ผลต่างคือค่า Effect) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิมีความสำคัญที่สุด

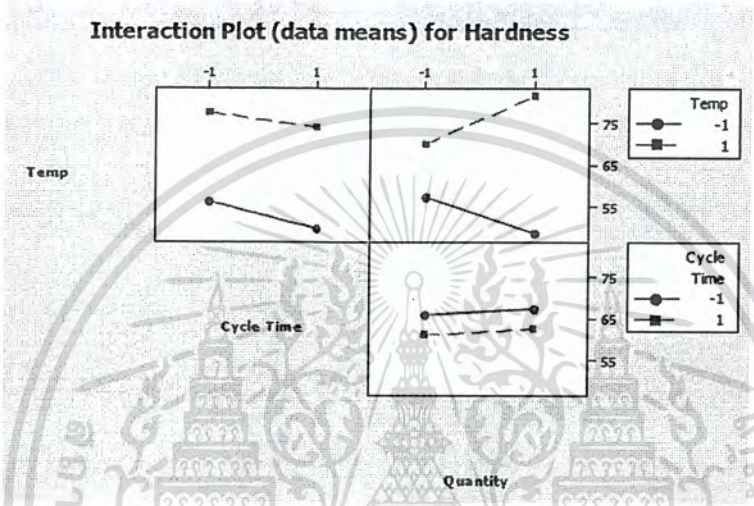


รูปที่ 2.9 Main Effect Plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2. Interaction Plot คือ อันตรกิริยาหรือกราฟผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย เป็นกราฟที่ใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนอง (แกนตั้ง: ค่าเฉลี่ย แกนนอน: ปัจจัยที่หนึ่ง และค่า Label ในกราฟจะชี้ถึงระดับของปัจจัยที่สอง) และใช้ในการกำหนดที่เหมาะสมสำหรับอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยเท่านั้น ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งจากรูประหว่างอุณหภูมิและปริมาณนั้น เส้นที่ได้จากการพล็อตนั้นไม่ขนานกันแสดงว่ามีอันตรกิริยาระหว่าง 2 ปัจจัยนี้ ในขณะที่อันตรกิริยาระหว่างปัจจัยอื่นๆ นั้น เส้นกราฟค่อนข้างขนานกันแสดงว่ามีอันตรกิริยาน้อย ซึ่งในการวิเคราะห์ผลการทดลองนั้นจะใช้วิธี Mean Plot และ Interaction Plot ทั้งสองวิธีประกอบกัน เพื่อให้มีความเข้าใจได้ดีขึ้น



รูปที่ 2.10 Interaction Plot

2.3.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

การวิเคราะห์ความแปรปรวน นี้จัดเป็นวิธีการพื้นฐานทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าตอบสนอง หรือลักษณะทางคุณภาพ สนใจศึกษาหรือปรับปรุงของผลิตภัณฑ์ (ผลลัพธ์) จากระบบหรือกระบวนการ ในการวิเคราะห์จะแยกสาเหตุของความแตกต่างออกเป็น 2 ส่วนหลักๆ คือ

- ความแตกต่างที่สามารถอธิบายได้ (Explained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัย หรือวิธีปฏิบัติ ที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง บางครั้งอาจถูกเรียกว่า ความแตกต่างระหว่างกลุ่ม (Between groups variation)

- ความแตกต่างที่ไม่สามารถอธิบายได้ (Unexplained Variation) คือ ความแตกต่างหรือการเปลี่ยนแปลงที่ไม่สามารถอธิบายได้ เนื่องจากขาดความรู้หรือความรู้เกี่ยวกับระบบยังมีไม่มากพอ ซึ่งในบางครั้งอาจเกิดจากกรณีที่ผู้ศึกษาทราบถึงปัจจัยที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่สามารถควบคุมได้ในการทดลอง (Noise Factors) ซึ่งในการวิเคราะห์ความแปรปรวนกล่าวถึงความแตกต่างในส่วนนี้ในรูปแบบของความผิดพลาดหรือส่วนที่ยังไม่สามารถอธิบายได้ (Error or Residuals) ถ้าผู้ทดลองมีความรู้หรือความสามารถในการควบคุมการทดลองมากขึ้น ความผิดพลาดในส่วนนี้ก็จะลดลง

119479

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. การทดลองอย่างสุ่มสมบูรณ์หรือการจำแนกทางเดียว (Complete Randomized Design: CRD หรือ One-Way ANOVA)

เป็นการสนใจศึกษาปัจจัยเพียงปัจจัยเดียว ซึ่งจำนวนระดับที่สนใจศึกษาของปัจจัยนี้เท่ากับ a ระดับ เพื่อดูว่าระดับที่แตกต่างกันของปัจจัยนั้นจะมีผลกระทบต่อค่าเฉลี่ยของตัวแปรตอบสนอง อย่างมีนัยสำคัญหรือไม่อย่างไร ซึ่งมีลักษณะข้อมูลเป็นดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แผนการเก็บข้อมูลแบบสุ่มสมบูรณ์

ลำดับที่	วิธีปฏิบัติ						
	1	2	3	4	...*i*...	*A*	
1	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	Y_{41}	... Y_{i1} ...	Y_{a1}	
2	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	Y_{42}	... Y_{i2} ...	Y_{a2}	
3	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	Y_{43}	... Y_{i3} ...	Y_{a3}	
.	.	.					
.	.	.					
J	Y_{1j}	Y_{2j}				Y_{aj}	
.	.	.					
.	.	.					
n	Y_{1n}	Y_{2n} *d.f.=?*	Y_{3n}	Y_{4n}	... Y_{in} ...	Y_{an}	
ผลรวม (T_i)	T_1	T_2	T_3	T_4	... T_i ...	T_a	T...
ผลรวมกำลังสอง (T_i^2)	T_1^2	T_2^2	T_3^2	T_4^2	... T_i^2 ...	T_a^2	$\sum T_i^2$

โดย T_i คือ ผลรวมของข้อมูลจากวิธีที่ปฏิบัติที่ $i : i = 1,2,...a$

$= \sum_{j=1}^{ni} Y_{ij}$; n_i = จำนวนข้อมูลในวิธีปฏิบัติที่ i

T คือ ผลรวมของข้อมูลทั้งหมด $= \sum\sum Y_{ij}$

N คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด $= \sum_{i=1}^{a} n_i$

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองแบบ CRD นี้จะทำการวิเคราะห์ส่วนของความแปรปรวนได้จากสมการต้นแบบ ดังนี้คือ

จาก $$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \qquad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(y_{ij} - \mu) = \tau_i + \varepsilon_{ijk} \tag{2.6}$$

$$v(y_{ij} - \mu) = v(\tau_i) + v(\varepsilon_{ij}) \tag{2.7}$$

$$\sum_i^a \sum_j^n (y_{ij} - \bar{y})^2 = \sum_i^a \left[n_i (y_{ij} - \bar{y}^2) \right] + \sum_i^a \sum_j^n (y_{ij} - \bar{y_i})^2 \tag{2.8}$$

ความแปรปรวนทั้งหมดที่ปรับแล้วด้วยค่าเฉลี่ย = ความแปรปรวนจากปัจจัย + ความแปรปรวนจากค่าผิดพลาด

จะเห็นได้ว่าแหล่งที่มา (Source) ของความแปรปรวนแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ซึ่งจะเขียนในตาราง ANOVA ต่อไป และสามารถเขียนแทนด้วย

$$SST = SSA + SSE \tag{2.9}$$

โดย SST คือ ผลบวกกำลังสองของทั้งหมดที่ปรับแล้ว (Sum Square of Total)

SSA คือ ผลบวกกำลังสองของปัจจัย A หรือวิธีปฏิบัติ (Sum Square of Factor A Effect or Treatment)

SSE คือ ผลบวกกำลังสองของค่าผิดพลาดหรือสิ่งที่อธิบายไม่ได้ (Sum Square Error or Residuals)

$$SST = \sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y}..)^2 \tag{2.10}$$

$$\bar{y} = \frac{\sum \sum y_{ij}}{N} \quad \text{หรือค่าเฉลี่ยรวม (Grand Mean)} \tag{2.11}$$

$$SST = \sum_i \sum_j y_{ij}^2 - \frac{T_{..}^2}{N} \tag{2.12}$$

โดยที่ T คือ ผลรวมทั้งหมด (Grand Total)

N คือ จำนวนการทดลองทั้งหมด

$$SSA = \sum_{i=1}^a \frac{T_i^2}{n_i} - \frac{T_{..}^2}{N} \quad \text{หรือ} \quad \sum_{i=1}^a [n_i (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2] \tag{2.13}$$

$$SSE = SST - SSA \tag{2.14}$$

สามารถสรุปและนำไปเขียนตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการจำแนกทางเดียว (CRD) ได้ดังตาราง ที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ CRD

Source (แหล่งที่มา)	d.f. (องศาเสรี)	Sum Square (ผลบวกกำลังสอง)	Mean Square (ค่าเฉลี่ย SS)	F (ค่าสถิติ)
Treatment (วิธีปฏิบัติ)	$a-1$	SSA	$MSE = \frac{SSA}{a-1}$	$F = \frac{MSA}{MSE}$
Error (ความผิดพลาด)	$N-a$	$SSA = SST - SSA$	$MSE = \frac{SSE}{N-a}$	
Total (adj) (ทั้งหมดที่ปรับแล้ว)	$N-1$	SST		

จากตารางสามารถนำข้อมูลมาใช้ในการทดสอบสมมติฐาน กรณี CRD หรือการทดลองแบบจำแนกทางเดียว โดยมีขั้นตอนสมมติฐาน ดังนี้คือ

(i) $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = ... = \mu_4$

(ปัจจัยที่ทำการศึกษาไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง)

$H_1 : \mu_i \neq \mu_j ; \exists_{ij}$ (มีอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน) $\mu_i \neq \mu_j$

(ปัจจัยที่ทำการศึกษามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง)

แต่เนื่องจาก $Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$

$= \mu_i + \varepsilon_{ij} ; \therefore \mu_i = \mu + \tau_i$

จะเห็นได้ว่า ถ้า $\tau_i = 0 ; \forall i$ ค่าเฉลี่ยของทุกวิธีปฏิบัติจะเท่ากันหมดจึงสามารถเขียนสมมติฐานได้อีกรูปแบบหนึ่ง คือ

$H_0 : \tau_i = 0; \forall_i$ (ปัจจัยไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง)

$H_1 : \tau_i \neq 0; \exists_i$ (ปัจจัยมีผลต่อค่าตอบสนอง)

โดยที่ τ_i = ผลกระทบของปัจจัยที่ระดับที่ i ; $i = 1,2,..,a$

(ii) กำหนดระดับนัยสำคัญ (α)

(iii) คำนวณตัวสถิติที่ใช้ทดสอบ

$F_0 \frac{MSA}{MSE}$; $y = (a-1, N-a)$

(iv) สรุปผล จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ p-value $= P(F > F_0) < \alpha$

หรือ จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ $F_0 > F_{\alpha,(a-1,N-a)}$

ข้อสังเกต การทดสอบเป็นการทดสอบทางเดียวด้านบนเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การออกแบบแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่มหรือการจำแนกสองทาง (Randomized block Design: RBD หรือ Two–Way ANOVA)

เป็นการสนใจศึกษาผลกระทบของปัจจัยสองปัจจัยต่อตัวแปรตอบสนองที่ระดับต่างกัน โดยเรียกปัจจัยหนึ่งว่า วิธีปฏิบัติ ปัจจัยที่สอง คือ ปัจจัยกลุ่ม (ลักษณะของข้อมูลที่สำคัญคือ ภายในกลุ่มเดียวกันต้องมีความคล้ายกันมากที่สุดและต่างกลุ่มกันมีความแตกต่างกันมากที่สุด)

ตารางที่ 2.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับ RBD

ลำดับที่	วิธีปฏิบัติ					T_j รวม	ค่าเฉลี่ย
	1	2	3	...i...	a		
1	Y_{11}	Y_{21}	Y_{31}	$...Y_{i1}...$	Y_{a1}	$T_{.1}$	$\bar{y}_{.1}$
2	Y_{12}	Y_{22}	Y_{32}	$...Y_{i2}...$	Y_{a2}	$T_{.2}$	$\bar{y}_{.2}$
3	Y_{13}	Y_{23}	Y_{33}	$...Y_{i3}...$	Y_{a3}	$T_{.3}$	$\bar{y}_{.3}$
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.
b	Y_{1b}	Y_{2b}	Y_{3b}	$...Y_{ib}...$	Y_{ab}	$T_{.b}$	$\bar{y}_{.b}$
รวม $T_{i.}$	$T_{1.}$	$T_{2.}$	$T_{3.}$	$...T_{i.}...$	$T_{a.}$	$T..$	
ค่าเฉลี่ย	$\bar{y}_{1.}$	$\bar{y}_{2.}$	$\bar{y}_{3.}$	$...\bar{y}_{i.}...$	$\bar{y}_{a.}$		$\bar{y}_{..}$

$\bar{y}_{1.}$ = ค่าเฉลี่ยของวิธีปฏิบัติที่ 1 (i^{th} Treatment Mean)

$\bar{y}_{..}$ = ค่าเฉลี่ยทั้งหมด (Grand Mean)

$\bar{y}_{.j}$ = ค่าเฉลี่ยกลุ่มที่ j (j^{th} Block Mean)

กรณีที่ไม่ทำซ้ำ ($r = 1$) $\bar{y}_{ij}$ = ข้อมูลจากการทดลองที่วิธีปฏิบัติระดับที่ i ; i = 1,2,...,a

j = 1,2,...,b

$$T_{i.} = \text{ผลรวมข้อมูลวิธีปฏิบัติที่ } i = \sum_{j=1}^{b} y_{ij} \qquad (2.15)$$

$$T_{j} = \text{ผลรวมข้อมูลกลุ่มที่ } j = \sum_{i=1}^{a} y_{ij} \qquad (2.16)$$

$$T_{..} = \text{ผลรวมข้อมูลทั้งหมด} = \sum_{i}^{a}\sum_{j}^{b} y_{ij} \qquad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\bar{y}_{i.}$ = ค่าเฉลี่ยข้อมูลวิธีปฏิบัติที่ $i = \frac{T_i}{b} = \frac{\sum_{j=1}^{b} y_{ij}}{b}$ (2.18)

$\bar{y}_{.j}$ = ค่าเฉลี่ยข้อมูลกลุ่มที่ $j = \frac{T.j}{a} = \frac{\sum_{i=1}^{a} y_{ij}}{a}$ (2.19)

$\bar{y}_{..}$ = ค่าเฉลี่ยรวม $= \frac{T_{..}}{N}$ (2.20)

กรณีไม่ทำซ้ำ ($r = 1$); N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด = ab

กรณีที่ $r > 1$; y_{ijk} = ข้อมูลจากการทดลองวิธีปฏิบัติที่ I กลุ่มที่ j ทำซ้ำครั้งที่ k

โดยที่ i = 1,2,...,a

j = 1,2,...,b

k = 1,2,...,r

ผลรวมข้อมูลวิธีปฏิบัติที่ $i = T_i = \sum_j \sum_k y_{ijk}$ (2.21)

ผลรวมข้อมูลกลุ่มที่ $j = T_i = \sum_j \sum_k y_{ijk}$ (2.22)

ผลรวมข้อมูลทั้งหมด $= T = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}$ (2.23)

ค่าเฉลี่ยรวม $= \bar{y}_{..} = \frac{T_{..}}{N}$ (2.24)

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด = abr

สมการต้นแบบของการออกแบบสุ่มสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่มกรณีทั่วไป ไม่สนใจอันตรกิริยาสามารถเขียนได้ดังนี้ คือ

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.25)$$

โดยที่ i = 1,2,...,a ; a = จำนวนวิธีปฏิบัติที่ศึกษา

j = 1,2,...,b ; b = จำนวนกลุ่ม (block)

k = 1,2,...,r ; r = จำนวนครั้งที่ทำซ้ำในแต่ละวิธีปฏิบัติที่ i กลุ่มที่ j

$$y_{ijk} - \mu = \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ijk} \quad (2.26)$$

$$v(y_{ijk} - \mu) = v(y_{ijk}) \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$v(y_{ijk} - \mu) = v(\tau_i) + v(\beta_j) + v(\varepsilon_{ijk}) \tag{2.28}$$

ความแปรปรวนของทั้งหมดที่ปรับแล้ว = ความแปรปรวนจากวิธีปฏิบัติ + ความแปรปรวนปัจจัยกลุ่ม
+ ความแปรปรวนจากค่าผิดพลาด

$$\sum\sum(y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 = br\sum_i(\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 + ar\sum_j(\bar{y}_{j..} - \bar{y}_{...})^2 + \sum_i\sum_j\sum_k(y_{ijk} - \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{.j.} + \bar{y}_{...})^2 \tag{2.29}$$

หรือสามารถเขียนแทนด้วย $SST = SSA + SSB + SSE$

โดยที่ SST คือ Sum Square Total

SST คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมดที่ปรับแล้ว

$$SST = \sum_i\sum_j\sum_k(y_{ijk} - \bar{y}_{...})^2 \tag{2.30}$$

$$SST = \sum_i\sum_j\sum_k y^2_{ijk} - \frac{T^2_{...}}{N} \tag{2.31}$$

SSA คือ Sum Square Treatment

SSA คือ ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่ i (วิธีปฏิบัติ)

$$SSA = \sum_{i=1}^{a}\frac{T^2_{i..}}{br} - \frac{T^2_{...}}{N} = br\sum_{i=1}^{a}(\bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...})^2 \tag{2.32}$$

SSB = Sum Square Block

SSB = ผลบวกกำลังสองของปัจจัยที่ 2 (กลุ่ม; Block)

$$SSB = \sum_{i=1}^{b}\frac{T^2_{.j.}}{ar} - \frac{T^2_{...}}{N} = ar\sum_{j=1}^{b}(\overline{y}_{.j.} - \overline{y}_{...})^2 \tag{2.33}$$

สามารถสรุปเป็นตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดังตารางที่ 2.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 วิเคราะห์ความแปรปรวน กรณีสุ่มอย่างสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (RBD) กรณี $r \geq 1$ หรือ $N = abr$

Source (แหล่งที่มา)	d.f. (องศาเสรี)	SS (ผลบวกกำลังสอง)	MS (ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง)	F (ค่าสถิติ)
Treatment (วิธีปฏิบัติ)	$a-1$	SSA	MSA	$F_A = \frac{MSA}{MSE}$
Block (กลุ่ม)	$b-1$	SSB	MSB	$F_B = \frac{MSB}{MSE}$
Error (ความคลาดเคลื่อน)	$N-a-b+1$	SSE	MSE	
Total (adj) (ทั้งหมดที่ปรับแล้ว)	$N-1$	SST		

จากตารางสามารถนำมาวิเคราะห์สมมติฐานได้ดังนี้ คือ

$H_0 : \tau_i = 0; \forall_i$ (วิธีปฏิบัติไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง)

$H_1 : \tau_i \neq 0; \exists_i$ (วิธีปฏิบัติมีผลต่อค่าตอบสนอง)

ตัวสถิติที่ใช้ทดลอง คือ $F_A = \frac{MSA}{MSE}$; $v_A = (a-1, N-a-b+1)$

จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ p-value $< \alpha$ หรือ $F_A > F_{\alpha} v_A$

$H_0 : : \beta_j = 0; \forall_j$ (ปัจจัยกลุ่มไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง)

$H_1 : : \beta_j \neq 0; \exists_j$ (ปัจจัยกลุ่มมีผลต่อค่าตอบสนอง)

ตัวสถิติทดลองที่ใช้ คือ $F_B = \frac{MSB}{MSE}$; $v_B = (b-1, N-a-b+1)$

จะปฏิเสธ H_0 เมื่อ p-value $< \alpha$

หรือ $F_B > F_{\alpha, V_B F_B}$

ความแตกต่างของการวิเคราะห์โดยใช้ ANOVA กับการใช้กราฟ

ANOVA เป็นการพิสูจน์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ย (Mean) โดยจะวิเคราะห์ความแตกต่างโดยใช้ค่าความแปรปรวน ซึ่งเป็นการวิเคราะห์หาความแตกต่างของค่ากลางระหว่างประชากรโดยการวิเคราะห์ผ่านค่าความแปรปรวน โดย ANOVA มีข้อกำหนดคือ ข้อมูลของทุกๆ ประชากร จะต้องมีการกระจายของข้อมูลแบบปกติและค่าความผันแปรของข้อมูล แต่ละประชากรจะต้องไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเท่านั้น ดังนั้นก่อนทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ ANOVA ผู้วิเคราะห์จำเป็นต้องทำการทดสอบการกระจายแบบปกติของข้อมูลว่าข้อมูลทุกประชากรมีการกระจายแบบปกติและทดสอบความความแตกต่างของค่าความผันแปรเพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีความแตกต่างกันทุกประชากร ANOVA ใช้สำหรับสถิติเชิงอนุมาน ซึ่งเป็นสถิติเชิงทดสอบสมมติฐาน ว่าสมมติฐานที่ตั้งไว้เป็นจริงหรือไม่ อาจแสดงเป็นตารางสรุปผลเพื่อใช้สรุปว่ายอมรับหรือปฏิเสธสมมติฐานของ H_0 และ H_1 ซึ่งการตั้งค่าสมมติฐานนี้ขึ้นอยู่กับเรื่องที่เรากำลังวิเคราะห์ ได้แก่ การประเมินค่าพารามิเตอร์ในประชากร (Estimation) และการทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าต่างที่อยู่ในตาราง ANOVA ก็ได้มาจากการคำนวณของวิธีปฏิบัติต่างๆ ซึ่งมีสูตรแตกต่างกันในการออกแบบการทดลองของแต่ละแบบ ค่าที่อยู่ใน ANOVA เช่น ค่า SST SSt SSE ค่า df และค่า F ที่จะเอามาเปรียบเทียบในการปฏิเสธหรือยอมรับสมมติฐาน ส่วนวิธีวิเคราะห์โดยใช้กราฟโดยหลักๆ ใช้ 2 กราฟ คือ กราฟ Main Effect เป็นกราฟที่ใช้แสดงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนองในกรณีปัจจัยหลักมีผลอย่างมีนัยสำคัญโดยจะใช้กราฟนี้ในการพิจารณาหาจุดที่เหมาะสมสำหรับปัจจัยหลักนั้นๆ และกราฟ Interaction Plot จะแสดงผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย เป็นกราฟที่ใช้พิจารณาการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยตัวแปรตอบสนอง ใช้ในการกำหนดค่าที่เหมาะสมสำหรับอันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยเท่านั้น เมื่อเราสรุปผลการทดสอบสมมติฐานนั้น จะเห็นว่าเราค่อนข้างจะมองเห็นภาพหรือผลกระทบจากแต่ละปัจจัยได้ยาก ส่วนการวิเคราะห์ Main Effect จะสามารถทำให้เรามองเห็นภาพดังกล่าวได้ง่ายขึ้น

2.3.3 การทดลองแบบแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

การทดลองแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในการออกแบบแผนการทดลอง เนื่องจากสามารถศึกษาปัจจัยได้หลายปัจจัยพร้อมกัน โดยมีวัตถุประสงค์หลัก คือ ศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย หรือที่เรียกว่า "อันตรกิริยา" เช่น กรณีที่ศึกษา 3 ปัจจัย คือ ปัจจัย A, B และ C ผลกระทบที่เกิดขึ้นสามารถจำแนกได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ผลกระทบหลัก หรือผลกระทบปัจจัยเดี่ยว (Main effect) คือ ผลกระทบกรณีที่สนใจพิจารณาปัจจัยเดี่ยว ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัย A ผลกระทบของปัจจัย B และผลกระทบของปัจจัย C

2. ผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Two–Factors or Two–Ways Interaction) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยพร้อมกันเป็นคู่ (ครั้งละ 2 ปัจจัย) ได้แก่ ผลกระทบของปัจจัยร่วม (อันตรกิริยา) AB, BC และ AC

3. ผลกระทบร่วม 3 ปัจจัย (Three–Factors or Three–Ways Interaction) คือ ผลกระทบที่เกิดจากการพิจารณาปัจจัยสามปัจจัยพร้อมกัน ในที่นี้ได้แก่ ผลกระทบร่วม ABC

โดยทั่วไปผู้ทดลองจะให้ความสำคัญแก่การศึกษา ผลกระทบหลักและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัยเท่านั้น เนื่องจากผลกระทบร่วมตั้งแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป โดยทั่วไปแล้วจะมีค่าน้อยมากจึงไม่นิยมนำมาพิจารณา วัตถุประสงค์หลักของการทดลองแฟคทอเรียลนั้น คือ การสำรวจศึกษาผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย

อันตรกิริยาหรือผลกระทบร่วม คือ ความล้มเหลวของผลต่างของค่าตอบสนอง ที่จะมีค่าต่างเท่ากัน เมื่อทำการเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยที่หนึ่ง (จากระดับที่ 1 ไปสู่ระดับที่ 2 เป็นต้น) ภายใต้ของแต่ละระดับในปัจจัยที่สอง

2.3.3.1 ข้อดีของการทดลองแบบแฟคทอเรียล

1. ผู้ทดลองสามารถศึกษาผลกระทบปัจจัยหลัก และผลกระทบร่วมของปัจจัยหรืออันตรกิริยาระหว่างปัจจัยได้พร้อมกันในการทดลอง ซึ่งแตกต่างจากการออกแบบการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในแต่ละกลุ่ม (Complete Randomized Block Design: RBD) ซึ่งทำการวิเคราะห์ 2 ปัจจัยแต่ไม่สามารถพิจารณาผลกระทบร่วมได้

2. กรณีที่ไม่พบผลกระทบร่วม (อันตรกิริยา) ผู้ทดลองสามารถใช้ผลยืนยันได้ว่าในการทดลองมีแต่ปัจจัยหรือผลกระทบหลักเท่านั้นที่มีผล เมื่อทดลองครั้งต่อไปจะสามารถลดจำนวนการทดลองโดยใช้วิธีการทดลองเปลี่ยนค่าปัจจัยครั้งละ 1 ปัจจัย (One-Factor-At-A-Time) ได้

3. กรณีที่ผลกระทบร่วม (Interactions) จะทำให้ผู้ทดลองสามารถทราบถึงรูปแบบและอิทธิพลของผลกระทบนั้น เพื่อจะได้แนวทางในการควบคุมให้ได้จุดที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3.2 ข้อเสียของการทดลองแบบแฟคทอเรียล

1. การทดลองที่เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัยและหลายระดับ ทำให้มีจำนวนทรีทเมนต์มากเป็นผลให้การทดลองมีขนาดใหญ่และยุ่งยาก เช่น ปัจจัย 7 ปัจจัย 3 ระดับ ทำให้มีทรีทเมนต์ถึง 2,187 ทรีทเมนต์

2. ปัจจัยหลายปัจจัยทำให้ยากถึงการอธิบายอิทธิพลร่วม

2.3.3.3 ตัวแบบทางสถิติ

สำหรับ 2 ปัจจัย

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \qquad (2.34)$$

โดยที่ y_{ijk} ค่าสังเกตจากหน่วยทดลองที่ k ซึ่งได้รับปัจจัย A ที่ระดับ i และปัจจัย B ที่ระดับ j

μ ค่าเฉลี่ยประชากร

τ_i อิทธิพลของระดับที่ i ของปัจจัย A $\quad i = 1, 2, ..., a$

β_j อิทธิพลของระดับที่ j ของปัจจัย B $\quad j = 1, 2, ..., b$

$(\tau\beta)_{ij}$ อิทธิพลร่วมของระดับที่ i ของ A และระดับปัจจัย j ของ B $\quad k = 1, 2, ..., r$

ε_{ijk} ความคลาดเคลื่อนของ y_{ijk} โดยที่ $\varepsilon_{ijk} \sim NID(0, \sigma^2)$

2.3.3.4 ค่าประมาณพารามิเตอร์

ให้ $m, a_i, b_r (ab)_{ij}$ และ e_{ijk} เป็นค่าประมาณพารามิเตอร์ $\mu, \tau_i, \beta_j, (\tau\beta)_{ij}$ และ ε_{ijk} แบบจำลองของตัวอย่างจะเป็นดังนี้

$$y_{ijk} = m + a_i + b_j + (ab)_{ij} + e \ ; \qquad (2.35)$$

โดยที่ $i = 1,2,...,a$

$j = 1,2,...,b$

สูตรคำนวณ $k = 1,2,...,r$

$$SST = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{r} X_{ijk}^2 - \frac{X_{...}^2}{abr} \qquad df = abr - 1 \qquad (2.36)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^{a} \frac{X_{i..}^2}{br} - \frac{X_{...}^2}{abr} \qquad df = a - 1 \qquad (2.37)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^{b} \frac{X_{.j.}^2}{ar} - \frac{X_{...}^2}{abr} \qquad df = abr - 1 \qquad (2.38)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} \frac{X_{ij.}^2}{r} - \frac{X_{...}^2}{abr} - SS_A - SS_B \qquad df = (a-1)(b-1) \qquad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$SSE = SST - SS_A - SS_B - SS_{AB} \qquad df = ab(r-1) \tag{2.40}$$

2.3.3.5 สมมติฐานของการทดสอบ

$H_0 : \tau_1 = \tau_2 = ... = \tau_a = 0$ (ไม่มีอิทธิพลหลักของปัจจัย A)

$H_a : \tau_i \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = ... = \beta_b = 0$ (ไม่มีอิทธิพลหลักของปัจจัย B)

$H_a : \beta_j \neq 0$ อย่างน้อย 1 ค่า

$H_0 : (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = ... = (\tau\beta)_{ab} = 0$ (ไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยAและ B)

$H_0 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0$ (อย่างน้อย 1 ค่า)

2.3.3.6 การทดสอบสมมติฐาน

ปฏิเสธ $H_0 : \tau_1 = \tau_2 = ... = \tau_a = 0$ ถ้า $F_{(a-1),ab(r-1)} = \dfrac{MS_A}{MSE}$ มากกว่าค่าจากตาราง F ที่องศาความเป็นอิสระ $(a-1)$ และ $ab(r-1)$ ระดับสำคัญตามที่กำหนด

ปฏิเสธ $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = ... = \beta_b = 0$ ถ้า $F_{(b-1),ab(r-1)} = \dfrac{MS_B}{MSE}$ มากกว่าค่าจากตาราง F ที่องศาความเป็นอิสระ $(b-1)$ และ $ab(r-1)$ ระดับสำคัญตามที่กำหนด

ปฏิเสธ $H_0 : (\tau\beta)_{11} = (\tau\beta)_{12} = ... = (\tau\beta)_{ab} = 0$ ถ้า $F_{(a-1)(b-1),ab(r-1)} = \dfrac{MS_{AB}}{MSE}$ มากกว่าค่าจากตาราง F ที่องศาความเป็นอิสระ $(a-1)(b-1)$ และ $ab(r-1)$ ระดับสำคัญตามที่กำหนด

2.3.3 7 การตรวจสอบรูปแบบเหมาะสมของรูปแบบจำลองสำหรับทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ

ข้อสมมติฐานสำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลอง กรณีหลายปัจจัย ประกอบไปด้วย 3 ข้อ คือ ส่วนตกค้าง (Residual: ε_{ij}) มีการกระจายตัวแบบปกติเป็นอิสระต่อกัน และความแปรปรวนมีค่าคงที่แต่ไม่ทราบค่า โดยถ้ามีข้อมูลมีความถูกต้องตามสมมติฐาน ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนก็สามารถนำไปใช้ได้

อย่างไรก็ตามข้อสมมติฐานสำหรับการทดลองอาจมีความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นที่จะต้องมีการทดสอบสมมติฐานดังกล่าว นอกจากนี้ยังสามารถศึกษาหาความเหมาะสมของตัวแบบจำลองของค่าความผิดพลาดสามารถพิจาณาได้จากสมการดังนี้

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \tag{2.41}$$

$$\varepsilon_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij} \tag{2.42}$$

โดยที่ $\hat{y}_{ij}$ คือ ค่าประมาณของค่าสังเกต y_{ij} ซึ่งหาได้จาก

$$\hat{y}_{ij} = \hat{\mu} + \hat{\tau} = \bar{y} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) = \bar{y}_{i.} \tag{2.43}$$

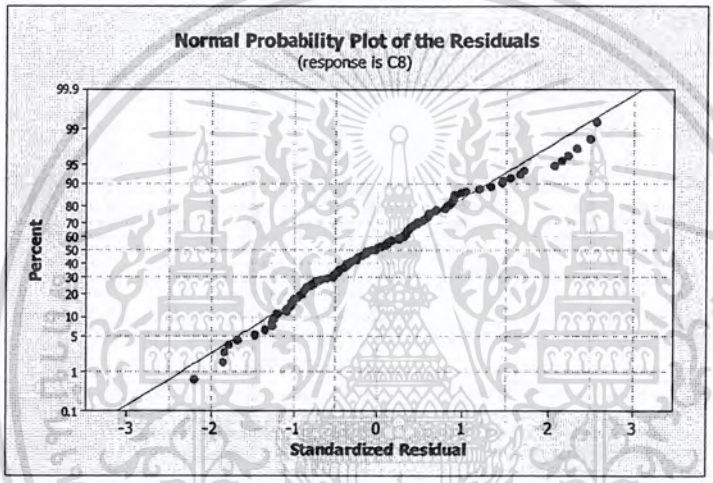
สมการที่ 2.43 แสดงถึงค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆในระดับที่ i คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การตรวจสอบการแจกแจงปกติ

การตรวจสอบสมมติฐานความเป็นปกติสามารถทำได้โดยการพล็อตฮิสโตแกรม (Histogram) ของส่วนตกค้าง ถ้าสมมติฐานที่ว่าความผิดพลาดมีการแจกแจงแบบ NID $(0, \sigma^2)$ เป็นจริงแล้ว รูปแบบของส่วนตกค้างที่พล็อตออกมาควรจะมีลักษณะคล้ายกับตัวอย่างที่ได้จากการแจกแจงแบบปกติ ซึ่งจะมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 แต่ในกรณีที่มีตัวอย่างขนาดเล็ก พบว่ามักจะเกิดการแกว่งของข้อมูลบ่อยครั้ง ดังนั้นการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติในระดับกลางไม่ได้หมายถึงการละเมิดสิ่งที่กล่าวอยู่ในสมมติฐาน แต่ในกรณีที่มีการเบี่ยงเบนของข้อมูลจากความเป็นปกติอย่างมากจะมีผลกระทบอย่างรุนแรงและจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์ในขั้นต่อไป

ขั้นตอนที่สำคัญอย่างหนึ่ง คือ การสร้าง Normal Probability Plot ของส่วนตกค้าง ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน ถ้าการแจกแจงของความผิดพลาดเป็นปกติ รูปที่พล็อตขึ้นมานี้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ลักษณะของ Normal Probability Plot ที่ข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวแบบปกติ

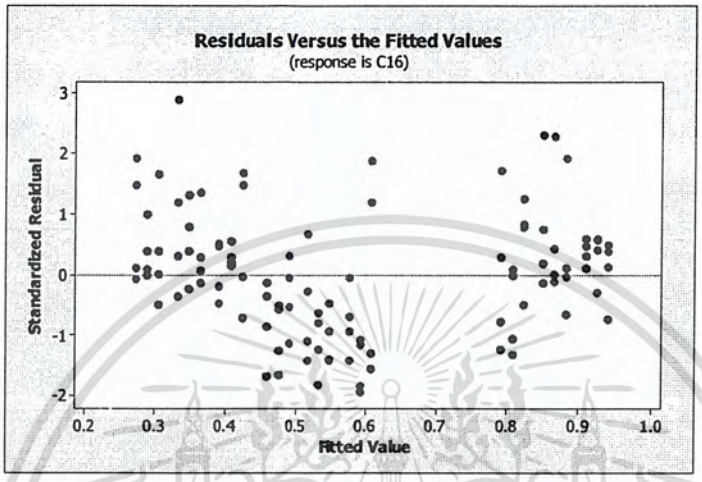
2. การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่

การตรวจสอบความแปรปรวนคงที่เป็นการพล็อตส่วนตกค้าง กับค่าประมาณการทดลองที่ระดับที่ i ใดๆ ส่วนตกค้างดังกล่าวควรมีแนวโน้มที่มีการกระจายแบบสุ่ม (ไม่มีรูปแบบ) เมื่อพิจารณาที่ค่าประมาณการทดลองที่ระดับต่างๆ ดังรูปที่ 2.12 แสดงกราฟที่มีการกระจายแบบสุ่ม ซึ่งถ้ารูปแบบของกราฟมีลักษณะผิดปกติจะหมายความว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าไม่คงที่ บางครั้งความแปรปรวนของค่าสังเกตเพิ่มขึ้น กรณีเช่นนี้จะเกิดขึ้นหากเกิดความผิดพลาดหรือสิ่งรบกวนที่อยู่เบื้องหลังในการทดลองมีขนาดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่คงที่เป็นจำนวนเท่าของขนาดของค่าสังเกต (ซึ่งเหตุการณ์นี้เกิดขึ้นบ่อยในกรณีของเครื่องมือวัด คือ ค่าความผิดพลาดจะคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของการอ่านสเกล) ถ้าเป็นเช่นนี้ค่าของส่วนตกค้างจะมากขึ้นเมื่อ y_{ij} เพิ่มขึ้น และกราฟของส่วนตกค้างกับ $\hat{y}_{ij}$ จะมีรูปร่างเหมือนกรวยปลายเปิด ความแปรปรวนที่ไม่มีค่าคงที่จะเกิดในกรณีที่ข้อมูลนั้นไม่มีการแจกแจงแบบปกติ และบิดเบี้ยว เพราะว่าการแจกแจงที่บิดเบี้ยวจะทำให้ความแปรปรวนมีแนวโน้มที่จะเป็นฟังก์ชันของค่าเฉลี่ย

ถ้าสมมติฐานในข้อนี้ไม่ถูกต้อง ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบคงที่แบบได้ดุล การทดสอบ F จะถูกกระทบเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตามในการออกแบบที่ไม่ได้ดุลหรือกรณีที่ความแปรปรวนค่าหนึ่งมากกว่าค่าอื่นๆ มาก ปัญหานี้จะมีความรุนแรงขึ้น ในกรณีของแบบจำลองผลกระทบแบบสุ่ม ความไม่เท่ากันของความแปรปรวนของส่วนตกค้างจะมีผลกระทบต่อส่วนประกอบของความแปรปรวนอย่างมาก ถึงแม้ว่าจะมีการออกแบบที่ได้ดุลก็ตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการจัดการเกี่ยวกับความแปรปรวนไม่คงตัวเมื่อเกิดขึ้นกับกรณีในข้างต้น คือ การประยุกต์ใช้ "การแปลงความแปรปรวนให้คงที่ (Variance stabilizing transformation)" และจากนั้นจะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนกับข้อมูลที่ทำการแปลงเรียบร้อยแล้ว โดยวิธีนี้ข้อสรุปของการวิเคราะห์ความแปรปรวนจะใช้ได้กับประชากรที่ถูกแปลงแล้วเท่านั้น



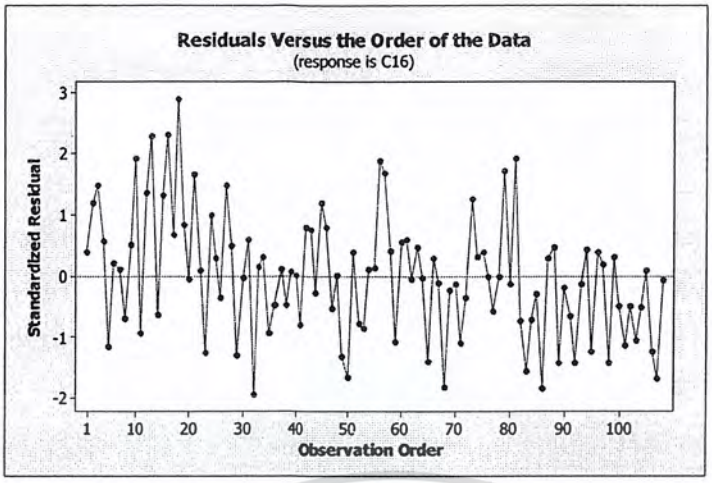
รูปที่ 2.12 กราฟของส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิต

3. การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล

การพิจารณาความเป็นอิสระของข้อมูลสามารถพิจารณาได้จากกราฟการพล็อตส่วนตกค้างตามลำดับเวลาหรือตามลำดับการทดลอง แนวโน้มของค่ารันของส่วนตกค้างที่เป็นบวกและลบจะเป็นตัวบ่งชี้ว่าสมมติฐานของความเป็นอิสระถูกละเมิดหรือไม่ ซึ่งถ้ามีการละเมิดสมมติฐานในข้อนี้จะถือว่าเป็นปัญหาที่สำคัญและทำการแก้ไขได้ยาก ดังนั้นจึงจำเป็นจะต้องมีการป้องกันปัญหานี้ โดยการเก็บรวบรวมข้อมูลที่ทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม ถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่เป็นอิสระ

ในบางครั้งผู้ทำการทดลองอาจจะเปลี่ยนไปตามจำนวนของเวลาการทำงานหรือกระบวนการที่กำลังทำการศึกษาอาจจะกลับไปกลับมาอย่างหาที่แน่นอนไม่ได้ ซึ่งบ่อยครั้งทำให้ค่าความแปรปรวนของความผิดพลาดเวลาเปลี่ยนไปตามเวลา พฤติกรรมเช่นนี้เมื่อนำส่วนตกค้างไปพล็อตกับเวลาจะพบว่ากราฟที่ได้จะมีการกระจายที่ปลายข้างหนึ่งมากกว่าปลายอีกข้างหนึ่ง โดยรูปที่ 2.13 แสดงกราฟระหว่างค่าของส่วนตกค้างตามเวลาที่เก็บข้อมูล ซึ่งไม่มีการละเมิดสมมติฐานความเป็นอิสระของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟระหว่างส่วนตกค้างและลำดับการทดลอง ที่มีลักษณะของข้อมูลเป็นอิสระต่อกัน

2.3.3.8 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลด้วยโปรแกรม MINITAB

การทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ก่อนที่จะทำการใช้ MINITAB ในการออกแบบการทดลอง จะต้องมีการทำการทดลองเบื้องต้นมาก่อนเพื่อการวางแผน เช่น จะต้องทำการหาปัจจัยที่คาดว่ามีอิทธิพลต่อค่าตอบสนอง (ดูเรื่องภาพรวมการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล)

2. ใน MINITAB สามารถใช้เพื่อสร้างตัวแบบการทดลองใหม่หรือใช้กับเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว

1) ใช้คำสั่ง Create Factorial Design เพื่อสร้างตัวแบบ Full หรือ Fraction Factorial และ Plackett-Burman

2) ใช้คำสั่ง Define Custom Factorial Design เพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบกรณีที่มีเวิร์คชีทที่มีข้อมูลอยู่แล้ว ซึ่งคุณสามารถที่จะปรับเปลี่ยนและกำหนดคอลัมน์ของปัจจัยและค่าต่างๆ เพื่อให้เหมาะกับตัวแบบและการวิเคราะห์ต่อไป

3. ใช้คำสั่ง Modify Design เพื่อทำการแก้ไขชื่อปัจจัย เปลี่ยนค่าระดับปัจจัย การสร้างค่าซ้ำ (Replicate) การทำการสุ่มลำดับการทดลอง (Randomization) สำหรับ Two-Level Design สามารถใช้สร้าง Fold Design เพิ่มรันที่จุด Axial Points และเพิ่มรันที่ Center Point

4. ใช้คำสั่ง Display Design เพื่อทำการเปลี่ยนลำดับการทดลองของแต่ละรันและหน่วย ทั้งแบบที่เป็นค่าจริง (Uncoded) หรือค่ารหัส (Code) ซึ่ง MINITAB ได้แสดงค่าไว้ของแต่ละปัจจัยในเวิร์คชีท

5. ทำการทดลองและเก็บค่าข้อมูล จากนั้นใส่ค่าข้อมูลในเวิร์คชีทของ MINITAB

6. ใช้คำสั่ง Analyze Factorial Design เพื่อวิเคราะห์ค่าตอบสนอง ใช้คำสั่ง Analyze Variability เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) สำหรับกรณีที่มีการทำซ้ำ

7. ในกรณีที่จะทำการพล็อตกราฟเพื่อดูอิทธิพล (Effects) ใช้คำสั่ง Factorial Plots เพื่อทำการสร้างกราฟที่แสดงได้ทั้ง อิทธิพลหลัก อิทธิพลร่วมและ Cube Plot สำหรับตัวแบบ Two-Level สามารถใช้คำสั่ง Contour/Surface Plots เพื่อแสดงกราฟ Contour และ Surface

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ถ้าต้องการทำการหาค่าที่ดีที่สุดของค่าตอบสนอง ใช้คำสั่ง Response Optimizer หรือคำสั่ง Overlaid Contour Plot เพื่อช่วยในการหาค่าที่ดีที่สุดโดยทำทั้งแบบตัวเลขและพิจารณาจากกราฟ

หมายเหตุ: ในแต่ละการทดลอง อาจจะมีลำดับของขั้นตอนต่างกัน หรืออาจจะมีการทำซ้ำที่ขั้นตอนใดเพิ่ม หรือบางขั้นตอนอาจจะไม่ต้องทำ

2.3.4 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น เป็นการศึกษาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรปัจจัยหรือตัวแปรอิสระกับค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม ว่ามีความสัมพันธ์กันในลักษณะใด เพื่อประโยชน์ในด้านการพยากรณ์ค่าตัวแปรตาม (ค่าตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพที่สนใจ) ซึ่งในทางวิศวกรรมจะนำไปใช้เพื่อการวางแผนกระบวนการผลิต ปรับปรุงกระบวนการผลิต และกำหนดค่าตัวปัจจัยเพื่อให้ค่าตอบสนองที่ดีที่สุดซึ่งงานส่วนใหญ่อยู่ในส่วนของการออกแบบพารามิเตอร์ (Parameter Design)

ถ้าจะเปรียบเทียบการวิเคราะห์การถดถอยกับการออกแบบการทดลอง ทั้งสองวิธีสามารถวิเคราะห์ปัจจัย (ตัวแปรอิสระ) ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนอง (ตัวแปรตาม) ได้เช่นเดียวกัน เพียงแต่รูปผลลัพธ์สำหรับการวิเคราะห์การถดถอยจะออกมาในรูปสมการการพยากรณ์ ($\hat{Y} = f(x)$) เพื่อพยากรณ์ค่าในอนาคต ส่วนการออกแบบการทดลองผลลัพธ์ที่ได้จะทราบว่าปัจจัยหรือตัวแปรอิสระใดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงค่าตอบสนองหรือลักษณะทางคุณภาพที่สนใจศึกษา จากนั้นผู้ศึกษาจะทำการกำหนดค่าที่เหมาะสมให้กับระบบ ข้อแตกต่างของวิธีการทั้งสองที่สำคัญแบ่งได้เป็นลักษณะใหญ่ๆ 2 ประการ คือ

1. การเก็บรวบรวมข้อมูล โดยการวิเคราะห์การถดถอยนั้นสามารถใช้ข้อมูลจริง (ข้อมูลเดิม) ที่รวบรวมในระดับปฏิบัติการได้ โดยไม่ต้องแยกส่วนตัวแปรที่ควบคุมได้กับตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ แต่สำหรับการออกแบบแผนการทดลองนั้น ข้อมูลจะเป็นข้อมูลจากการทดลอง ซึ่งถ้าเป็นระบบหรือกระบวนการที่ดำเนินการแล้วจะมีความยุ่งยากในการที่จะหยุดกระบวนการเพื่อทำการทดลอง และยังไม่สามารถทดลองตัวแปรกลุ่มที่สอง คือ ตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ด้วย ซึ่งทำได้มากที่สุดคือ ตัดค่าของตัวแปรเหล่านั้นขณะทดลองจริง

2. ประเภทของข้อมูล ทั้งการวิเคราะห์การถดถอยและการออกแบบการทดลอง ตัวแปรตามหรือค่าตอบสนองเป็นข้อมูลต่อเนื่องหรือข้อมูลเชิงปริมาณ แต่สำหรับตัวแปรอิสระหรือตัวแปรปัจจัยนั้น ในการออกแบบการทดลองจะเป็นตัวแปรชี้บ่ง (Indicator Variable) ส่วนการวิเคราะห์การถดถอยนั้น ตัวแปรอิสระจะเป็นตัวแปรต่อเนื่องหรือตัวแปรที่เป็นค่าวัดหรือตัวแปรชี้บ่งก็ได้

จะเห็นได้ว่าขอบเขตของการวิเคราะห์การถดถอยนั้นกว้างกว่าการออกแบบการทดลอง อาจกล่าวได้ว่า การออกแบบการทดลองเป็นส่วนหนึ่งของการวิเคราะห์การถดถอยและมักจะใช้ร่วมกันเสมอ โดยเริ่มจากการศึกษาว่าตัวแปรปัจจัยใดนั้นมีผลต่อตัวแปรตอบสนอง โดยการเปรียบเทียบด้วย ANOVA จากนั้นทำการสร้างสมการพยากรณ์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนอง และตัวแปรปัจจัยที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง เพื่อหาค่าที่ดีที่สุดสำหรับกระบวนการหรือระบบนั้น

2.3.4.1 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย (Step in Regression Analysis)

การวิเคราะห์การถดถอยแบ่งเป็น 5 ขั้นตอนหลักดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดข้อสมมติฐานเกี่ยวกับรูปแบบความสัมพันธ์ (Hypothesized the Form) สำหรับค่าเฉลี่ยของ Y (E(Y)) เนื่องจากค่าตอบสนองหรือตัวแปรตามสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่อธิบายได้ระบุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ (Deterministic Component) และส่วนที่อธิบายไม่ได้ (Random Component) ซึ่งสรุปเป็นสมการได้ดังนี้

$$y = \mu_{Y/X} + \varepsilon \tag{2.44}$$

$\mu_{Y/X}$ = E(Y) เป็นค่าเฉลี่ยของ Y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ X

ε = ส่วนที่อธิบายไม่ได้หรือค่าผิดพลาด (Residuals or Error)

= Random Component

การกำหนดรูปแบบความสัมพันธ์ทำได้โดยใช้กราฟ "แผนภาพการกระจาย" (Scatter Plot or XY Plot)

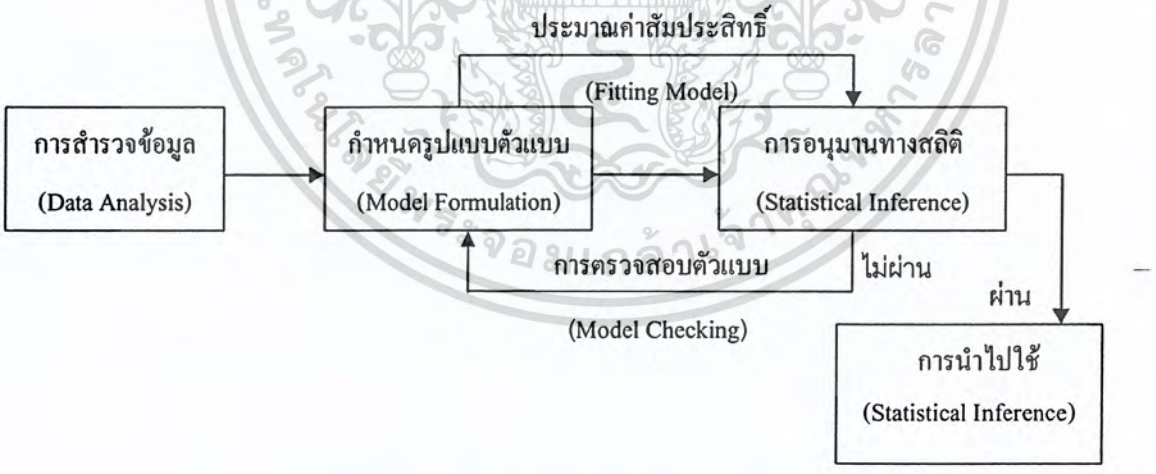
ขั้นตอนที่ 2 เก็บรวบรวมข้อมูลตัวแปรอิสระ (X's) และตัวแปรตาม (Y's) และทำการประมาณค่าสัมประสิทธิ์ในสมการค่าเฉลี่ยของ $Y(\mu_{Y/X})$ จะได้สมการ $\hat{Y} = \hat{f}(X) = \hat{\mu}_{Y/X}$ โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Square Method)

ขั้นตอนที่ 3 ตรวจสอบข้อสมมติฐานเกี่ยวกับข้อผิดพลาด (ε) เพื่อดูว่า $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ หรือไม่

ขั้นตอนที่ 4 ตรวจสอบความเหมาะสมของสมการ (Method Adequacy Checking) ได้แก่ การทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์ หรือทำการประมาณค่าแบบช่วงสำหรับค่าสัมประสิทธิ์ ทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit Test) กรณีที่มีตัวแปรอิสระ ที่เหมือนกัน แต่ให้ค่าตัวแปรตาม ต่างกัน

ขั้นตอนที่ 5 เมื่อผ่านขั้นตอนการตรวจสอบความเหมาะสมในขั้นตอนที่ 3 และ 4 แล้ว จึงนำสมการไปใช้ได้ ในทางตรงข้ามถ้าไม่ผ่านขั้นตอนที่ 3 และ 4 กลับไปทบทวนขั้นตอนที่ 1 อีกครั้ง

ขั้นตอนการวิเคราะห์ดังกล่าว สามารถสรุปเป็นไดอะแกรมได้ ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการวิเคราะห์การถดถอย

2.3.4.2 การทดสอบความเหมาะสมของสมการต้นแบบ

1. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2)

ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ เป็นค่าที่ใช้อธิบายความสามารถของสมการถดถอยหรือตัวแปรอิสระในสมการถดถอยว่าสามารถจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าตอบสนองหรือตัวแปรตาม ได้ในสัดส่วนเท่าใด ดังนั้นค่า R^2 ยิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากสมการก็ยิ่งมีความเหมาะสมมาก โดย R^2 มีค่าตั้งแต่ 0-1

ในทางปฏิบัติ เนื่องจาก R^2 มีความไวในการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระในสมการค่า R^2 จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวแปรที่เพิ่มมานั้นอาจจะมีผลหรือไม่มีผลต่อค่าตอบสนอง ดังนั้นจึงใช้ค่า R^2 ที่ทำการปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) แทน ซึ่งจะอธิบายเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงของ Y ที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระในสมการถดถอยเช่นกัน

2. การทดสอบการขาดความเหมาะสมของสมการ (Lack-of-Fit Test)

การทดสอบ Lack-of-Fit เป็นการทดสอบว่าฟังก์ชันถดถอยหรือแบบการจำลองถดถอยที่ใช้มีความเหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% จะทำขึ้นเฉพาะกรณีที่มีการเก็บข้อมูลค่า X ซ้ำ แต่ผลลัพธ์ที่ได้ของค่า Y ต่างกัน มักจะเป็นข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เนื่องจากต้องทำการเก็บค่าซ้ำ (ทำการทดลองซ้ำ)

สมมติฐานคือ H_0 : สมการเหมาะสมแล้ว

H_1 : สมการขาดความเหมาะสม

โดยจะปฏิเสธ H_0 เมื่อค่า P-Value $< \alpha$

2.3.5 วิธีการพื้นผิวตอบสนอง

<u>2.3.5.1วิธีการพื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการ</u>

วิธีการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology: RSM) เป็นการรวบรวมเอาเทคนิคทั้งทางคณิตศาสตร์และทางสถิติที่มีประโยชน์ต่อการสร้างแบบจำลอง และการวิเคราะห์ปัญหา โดยที่ผลตอบสนองที่สนใจจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ ตัว และต้องการที่จะหาค่าที่ดีที่สุดของผลการตอบสนองเหล่านี้ เช่น มีวิศวกรคนหนึ่งต้องการที่จะหาระดับของอุณหภูมิ (x_1) และความดัน (x_2) ที่จะส่งผลให้ผลผลิตของกระบวนการมีค่ามากที่สุด ซึ่งผลผลิตของกระบวนการนี้เป็นฟังก์ชันของระดับของอุณหภูมิและความดัน คือ

$$y = f(x_1, x_2) + \varepsilon \qquad (2.45)$$

โดยที่ ε คือ ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนอง y ที่เป็นผลมาจากการทดลอง

ถ้ากำหนดให้ $E(y) = f(x_1, x_2) = \eta$ ดังนั้นสามารถเขียนสมการของพื้นผิวได้ดังนี้

$$\eta = f(x_1, x_2) \qquad (2.46)$$

ซึ่งเรียกว่า พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) โดยมากแล้วจะทำการแสดงพื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟ ดังรูปที่ 2.15 โดยที่ η จะถูกพล็อตกับระดับของ x_1 และ x_2 เพื่อที่จะช่วยให้มองรูปร่างของพื้นผิวตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น ส่วนใหญ่แล้วจะทำการพล็อต (Plot) เป็นเส้นโครงร่าง (Contour Plot) ของพื้นผิวตอบสนอง ดังรูปที่ 2.16 ในการสร้างเส้นโครงร่างนี้ เส้นที่มีค่าของผลตอบสนองคงที่จะถูกวาดอยู่บนระนาบ x_1 และ x_2 ซึ่งเส้นโครงร่างแต่ละเส้นจะมีความสูงของพื้นผิวตอบสนองที่เท่ากันอยู่ค่าหนึ่ง ในปัญหาต่างๆ ที่เกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองส่วนมากจะไม่ทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างผลตอบสนองและตัวแปรอิสระ ดังนั้นขั้นตอนแรกคือ จะต้องหาตัวประมาณที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นตัวแทนสำหรับแสดงความสัมพันธ์ที่แท้จริงระหว่าง y และของตัวแปรอิสระ ซึ่ง

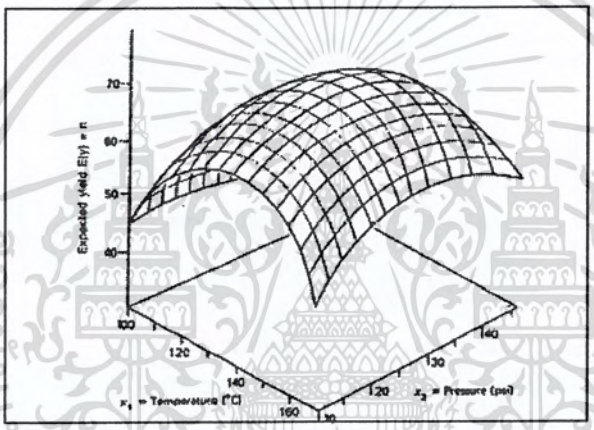
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามปกติแล้วจะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่กำลังต่ำๆ ที่อยู่ภายใต้อาณาเขตบางส่วนของตัวแปรอิสระ ถ้าแบบจำลองของผลตอบสนองมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับตัวแปรอิสระ ฟังก์ชันที่จะใช้ในการประมาณความสัมพันธ์นี้คือแบบจำลองกำลังหนึ่ง

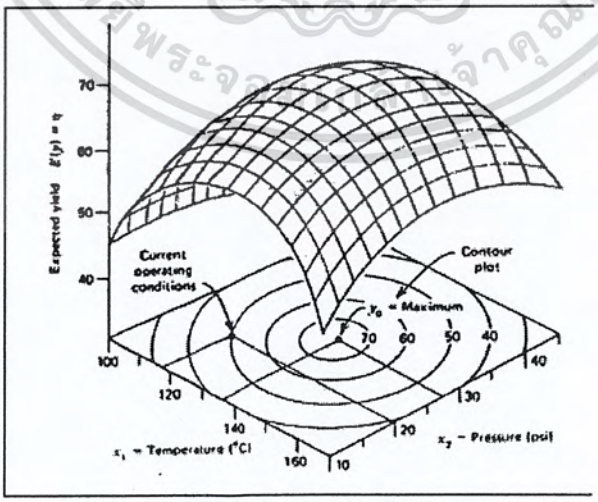
$$Y = \beta_0 + \beta_{1x_1} + \beta_{2x_2} + \ldots \beta_{kx_k} + \varepsilon \qquad (2.47)$$

แต่ถ้ามีส่วนโค้งเข้ามาเกี่ยวข้องในระบบ จะใช้ฟังก์ชันพหุนามที่มีกำลังสูงขึ้น เช่น พหุนามกำลังสอง

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \Sigma \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (2.48)$$



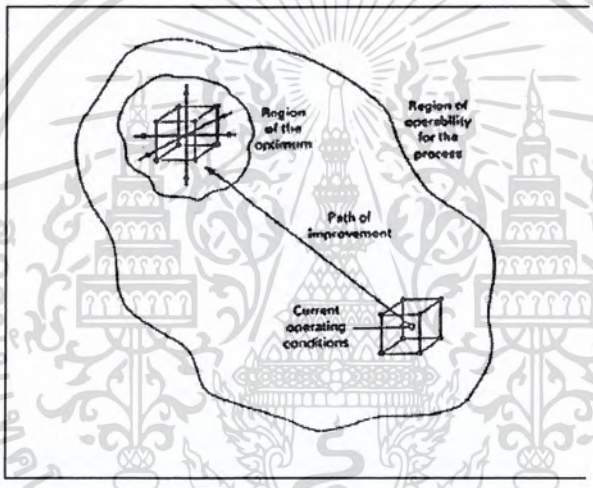
รูปที่ 2.15 พื้นผิวผลตอบสนองในรูปแบบของกราฟ 3 มิติ



รูปที่ 2.16 กราฟเส้นโครงร่างของพื้นผิวตอบสนอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์พื้นผิวเป็นวิธีการแบบมีลำดับขั้นตอน บ่อยครั้งที่อยู่ที่จุดบนพื้นผิวตอบสนองที่ห่างไกลออกไปจากจุดที่ดีที่สุด ตัวอย่างเช่น ณ เงื่อนไขการทำงานปัจจุบัน ดังรูปที่ 2.17 ซึ่งจะพบว่าผลตอบสนองของระบบนี้ไม่ค่อยเป็นส่วนโค้ง และแบบจำลองกำลังหนึ่งก็พอเพียงในการสร้างแบบจำลองแล้ว วัตถุประสงค์คือ การนำการทดลองไปใช้เป็นแนวทางที่มีการปรับปรุงมากที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อที่จะเป็นการค้นพบกับจุดที่ดีที่สุดได้อย่างรวดเร็วที่สุด และเมื่อค้นพบค่าอาณาเขตที่ดีที่สุดแล้ว จะนำเอาแบบจำลองที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เช่น แบบจำลองกำลังสอง เป็นต้นเข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ และการทดลองเช่นนี้จะทำเพื่อที่จะสามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ จากรูปที่ 2.18 จะพบว่าการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเปรียบเหมือนการปีนภูเขา ซึ่งยอดของภูเขามักจะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด หรือกรณีถ้าค่าที่ดีที่สุดคือค่าที่ต่ำที่สุด จะคิดเสมือนการเคลื่อนที่ลงสู่หุบเขา วัตถุประสงค์สุดท้ายของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองคือ การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดสำหรับระบบ หรือเพื่อที่จะหาอาณาเขตของปัจจัยที่จะก่อให้เกิดการทำงานที่น่าพอใจที่สุด



รูปที่ 2.17 วิธีการอย่างมีลำดับขั้นตอนของการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง

2.3.5.2 การวิเคราะห์พื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง

เมื่อผู้ทำการทดลองอยู่ใกล้เคียงกับจุดที่ดีที่สุดแล้ว แบบจำลองที่สามารถแสดงส่วนโค้งจะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าของผลตอบสนอง ส่วนใหญ่แบบจำลองกำลังสองจะมีรูปแบบดังนี้

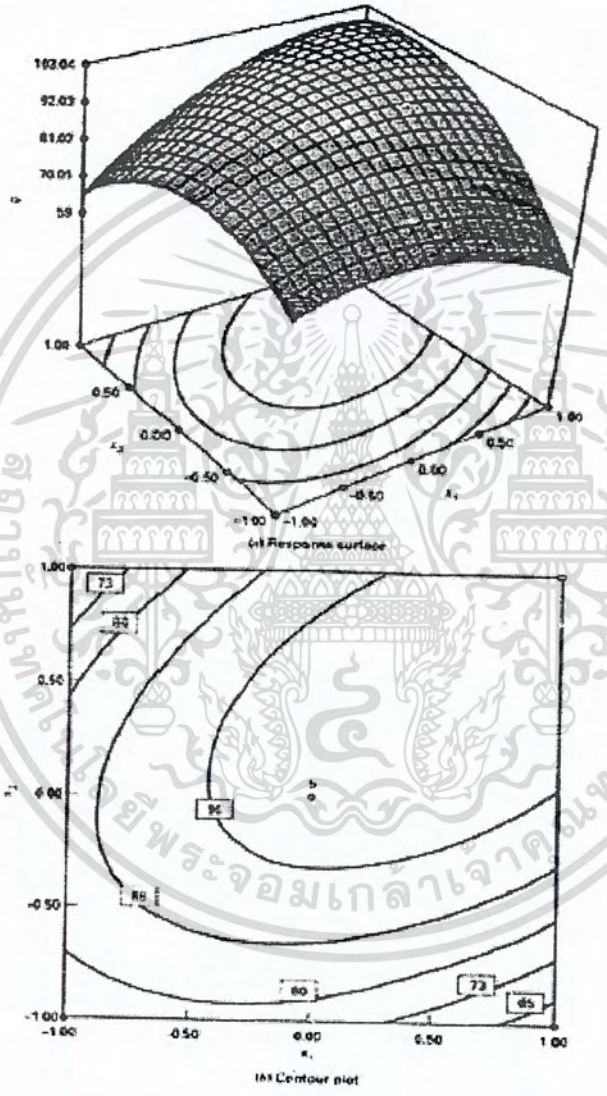
$$y = \beta_0 + \sum_{i-1}^{k} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{k} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \qquad (2.49)$$

ซึ่งแบบจำลองนี้จะมีความพอเพียง ในส่วนต่อไปนี้จะแสดงให้เห็นถึงการสร้างแบบจำลองกำลังสอง เพื่อจะนำไปสู่การหาเงื่อนไขในการทำงานที่ดีที่สุดต่อไป

1.ตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง

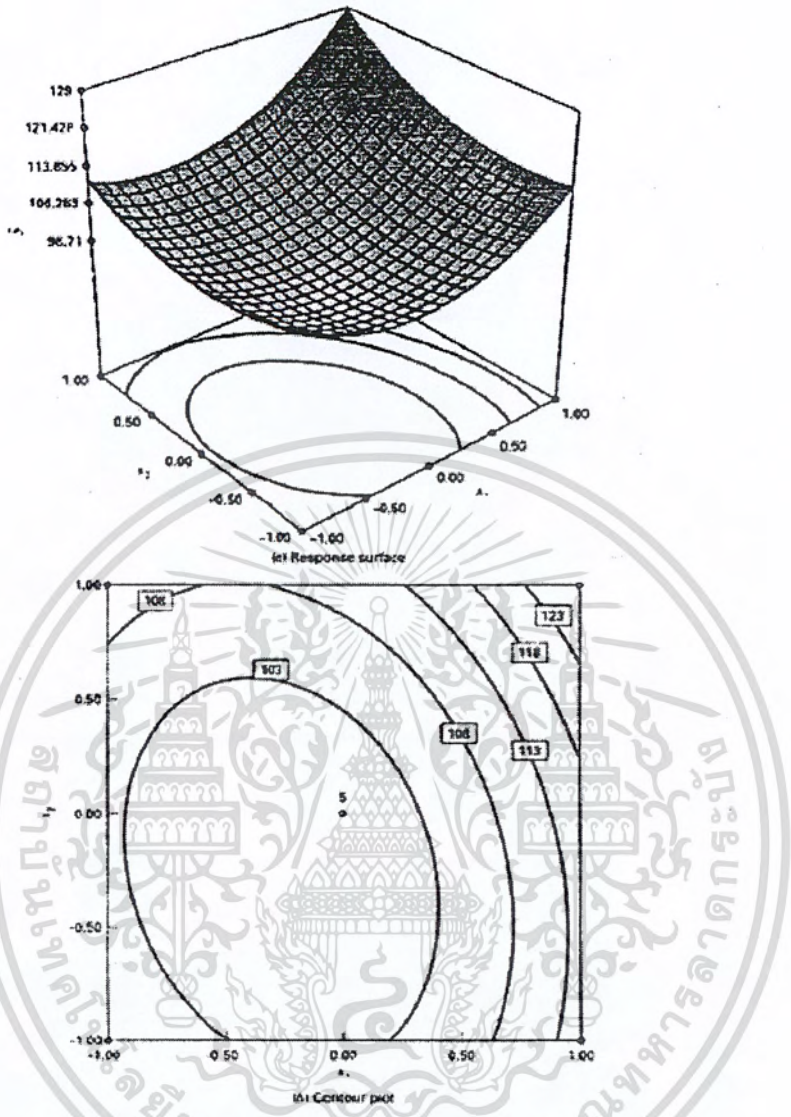
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่าต้องการที่จะหาระดับของ $x_1, x_2, ..., x_k$ ที่ทำให้ผลตอบสนองมีค่าที่ดีที่สุด จุดนี้ถ้าหากมีอยู่จริงจะหมายถึง เงื่อนไขของจุด $x_1, x_2, ..., x_k$ ที่มีค่าของอนุพันธ์แบบบางส่วน (partial Derivative) $\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = ... = \frac{\partial \hat{y}}{\partial x_k}$ และจะเรียกตำแหน่งของจุด $x_1, x_2, ..., x_{k,s}$ เหล่านี้ว่า จุดหยุดนิ่ง (Stationary Point) จุดหยุดนิ่งนี้สามารถใช้ในการแทน (1) จุดที่มีค่าผลตอบสนองสูงสุด (2) จุดที่มีค่าผลตอบสนองต่ำสุด หรือ (3) จุดอานม้า (Saddle Point) ซึ่งทั้ง 3 ทาง ที่มีความเป็นไปได้ แสดงในรูปที่ 2.18 ถึงรูปที่ 2.20



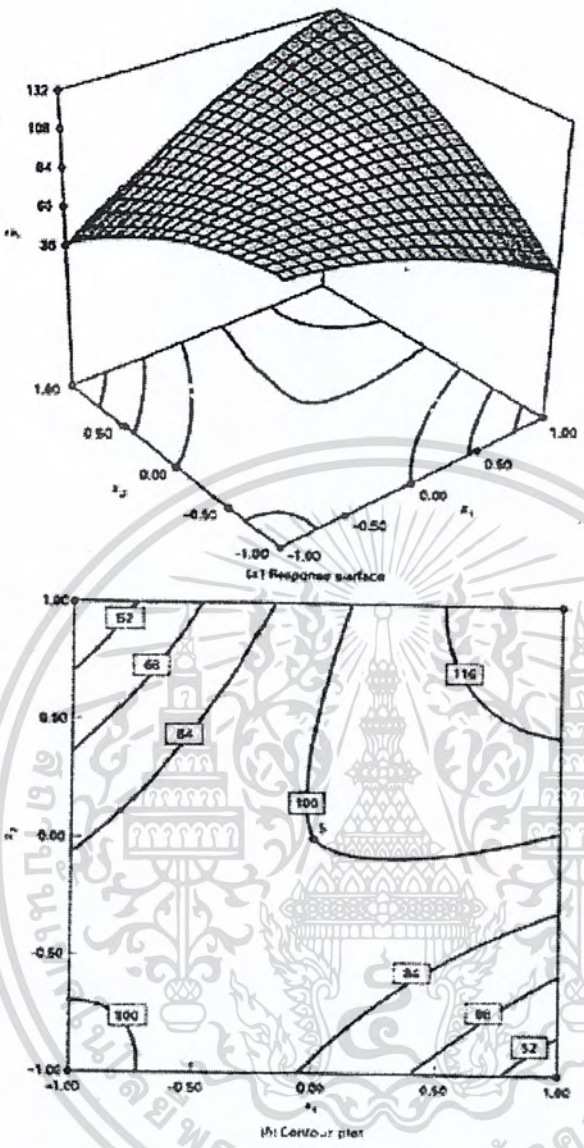
รูปที่ 2.18 ภาพแสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองสูงสุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 ภาพแสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสอง (จุดที่มีผลตอบสนองต่ำสุด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 ภาพแสดงจุดหยุดนิ่งที่ถูกสร้างขึ้นจากพื้นผิวผลตอบสนองกำลังสองที่เรียกว่า จุดอานม้า (Saddle Point)

กราฟโครงร่างมีความสำคัญอย่างมากในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง การใช้ซอฟท์แวร์สำหรับการสร้างกราฟโครงร่างของพื้นผิวตอบสนองขึ้นมา จะทำให้ทราบถึงรูปร่างของพื้นผิวและตำแหน่งของจุดที่ดีที่สุดได้ค่อนข้างแม่นยำ

บางครั้งอาจจะสามารถหาคำตอบทั่วไปทางคณิตศาสตร์สำหรับตำแหน่งของจุดหยุดนิ่ง ได้ โดยการเขียนแบบจำลองกำลังสองในรูปเมทริกซ์ (Matrix) ได้ คือ

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + x'b + x'B_x \qquad (2.50)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$x=\begin{bmatrix}x_1\\x_2\\\vdots\\x_k\end{bmatrix} \qquad b=\begin{bmatrix}\hat{\beta}_1\\\hat{\beta}_2\\\vdots\\\hat{\beta}_k\end{bmatrix} \qquad \text{และ} \qquad B=\begin{bmatrix}\hat{\beta}_{11} & \hat{\beta}_{12}/2,\ldots, & \hat{\beta}_{1k}/2\\ & \hat{\beta}_{22},\ldots, & \hat{\beta}_{2k}/k\\ & \vdots & \vdots\\ & sym. & \hat{\beta}_{kk}\end{bmatrix}$$

ซึ่ง b คือเวกเตอร์ขนาด $(k\times 1)$ ของสัมประสิทธิ์การถดถอยกำลังหนึ่ง และ B คือเมทริกซ์แบบสมมาตร ขนาด $(k\times k)$ ซึ่งมีส่วนประกอบในเส้นทแยงมุมหลักเป็นสัมประสิทธิ์ของกำลังสองบริสุทธิ์ $\hat{\beta}_{ii}$ และส่วนประกอบที่ไม่ได้อยู่ในแนวเส้นทแยงมุมเป็นครึ่งหนึ่งของสัมประสิทธิ์กำลังสองผสม $\left(\hat{\beta}_{ii}, i\neq j\right)$ ค่าอนุพันธ์ของ $\hat{y}$ เทียบกับส่วนประกอบของเวกเตอร์ x มีค่าเท่ากับศูนย์ คือ

$$\frac{\partial\hat{y}}{\partial x}=b+2Bx=0 \tag{2.51}$$

จุดหยุดนิ่ง คือ คำตอบของสมการที่ 2.49 คือ

$$x_s=\frac{1}{2}B^{-1}b \tag{2.52}$$

และเมื่อแทนค่าสมการที่ 2.50 ในสมการที่ 2.48 จะพบค่าผลตอบสนองที่คาดหมาย ณ จุดหยุดนิ่ง

$$\hat{y}=\bar{\beta}_0+\frac{1}{2}x_s'b \tag{2.53}$$

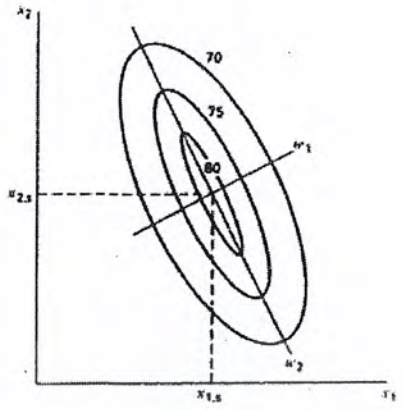
2. ลักษณะคุณสมบัติของพื้นผิวตอบสนอง

เมื่อค้นพบจุดหยุดนิ่งแล้ว มีความจำเป็นที่จะต้องหาลักษณะคุณสมบัติของพื้นผิวตอบสนองในบริเวณใกล้เคียงกับจุดนี้ นั่นคือ จะต้องหาว่าจุดหยุดนิ่งนี้เป็นจุดสูงสุด จุดต่ำสุดหรือเป็นจุดอานม้า นอกจากนั้น ยังต้องศึกษาถึงความไวผลตอบสนองกับตัวแปร $x_1, x_2 \ldots x_k$

เหมือนที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ว่า วิธีการแบบตรงไปตรงมาที่จะหาจุดเหล่านี้ คือ การดูกราฟจากโครงร่างของแบบจำลอง ถ้าในการทดลองนั้นมีตัวแปรของกระบวนการเพียง 2 หรือ 3 ตัว การสร้างและการตีความหมายของกราฟโครงร่างนี้จะค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะมีตัวแปรเพียงแค่ 2 หรือ 3 ตัวก็ตาม การวิเคราะห์อย่างเป็นทางการที่เรียกว่า การวิเคราะห์แบบบัญญัติ (Canonical Analysis) ก็สามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน

จะเป็นการช่วยในการวิเคราะห์เป็นอย่างมาก ถ้ามีการแปลงรูปของแบบจำลองไปสู่พิกัดที่มีจุดเริ่มต้นอยู่ที่จุดหยุดนิ่ง x_s และหลังจากนั้นก็หมุนแกนของระบบนี้จนกระทั่งมันขนานกับแกนหลัก (Principle Axis) ของพื้นผิวตอบสนองที่สร้างขึ้นมา การแปลงรูปอย่างนี้ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 รูปแบบบัญญัติของแบบจำลองกำลังสอง

ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นได้ว่า ผลของการแปลงรูปนี้ จะสามารถทำให้ได้แบบจำลองขึ้นมา นั่นคือ

$$\hat{y} = \hat{y}_s + \lambda_1 w_1^2 + \lambda_2 w_2^2 + ...\lambda_k w_k^2 \qquad (2.54)$$

โดยที่ $\{w_i\}$ คือ ตัวแปรอิสระที่ถูกแปลงรูป และ $\{\lambda_i\}$ คือค่าคงตัว สมการที่ 2.54 เรียกว่า รูปแบบบัญญัติของแบบจำลอง นอกจากนั้น $\{\lambda_i\}$ จะหมายถึงค่าเฉพาะหรือรากลักษณะ (Characteristic Roots) ของเมตริกซ์ B

ธรรมชาติของพื้นผิวตอบสนอง สามารถที่จะหาได้จากจุดหยุดนิ่งและเครื่องหมาย และขนาดของ $\{\lambda_i\}$ อันดับแรก สมมติว่าจุดหยุดนิ่งอยู่ภายใต้ของบริเวณสำรวจเพื่อที่จะสร้างสมการกำลังสอง ถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมีค่าเป็นบวก ดังนั้น x_s จะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองมากที่สุด และถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมีค่าเป็นลบ ดังนั้น x_s จะเป็นจุดที่มีผลตอบสนองน้อยที่สุด และถ้า $\{\lambda_i\}$ ทั้งหมดมีเครื่องหมายแตกต่างกัน ดังนั้น x_s จะเป็นจุดอานม้า นอกจากนี้ พื้นผิวจะมีความชันสูงสุดในทิศทางของ w_i ซึ่งทำให้ มีค่าสูงสุด เช่น ในรูปที่ 2.17 ซึ่งแสดงระบบที่มี x_s อยู่ที่จุดสูงสุด (λ_1 และ λ_2 มีค่าเป็นลบ) ที่มี $|\lambda_1| > |\lambda_2|$

3. ผลตอบสนองหลายตัว

ปัญหาเกี่ยวกับพื้นผิวตอบสนองจำนวนมากเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลตอบสนองหลายตัว การพิจารณาผลตอบสนองหลายตัวพร้อมๆ กัน ทำได้โดยการสร้างแบบจำลองของพื้นผิวตอบสนองที่เหมาะสมสำหรับผลตอบแต่ละตัว และหลังจากนั้นจะทำการกำหนดเงื่อนไขการทำงานที่จะทำให้ผลตอบสนองทั้งหมดมีค่าดีที่สุด หรืออย่างน้อยที่สุดให้ผลตอบสนองทั้งหมดอยู่ภายใต้ขอบเขตที่ยอมรับได้

การวิเคราะห์เรื่องต้นทุนการผลิตมีรากฐานมาจากการวิเคราะห์เรื่องการผลิต ทั้งนี้เพราะในการผลิตสินค้าผู้ผลิตได้รวบรวมปัจจัยการผลิตจากเจ้าของปัจจัยการผลิตมาใช้ในการผลิต ดังนั้น จึงต้องจ่ายค่าผลตอบแทนให้เจ้าของปัจจัยการผลิตนั้นๆ ในรูปของค่าเช่า ค่าจ้าง ดอกเบี้ย และกำไร ซึ่งค่าใช้จ่ายต่างๆที่จ่ายให้กับเจ้าของปัจจัยการผลิตรวมเรียกว่า ต้นทุนการผลิต (ปารเมศ, 2545)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 การวิเคราะห์ต้นทุน

การวิเคราะห์ต้นทุน เป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของต้นทุน เพื่อประโยชน์ในการตัดสินใจเกี่ยวกับเรื่องการกำหนดปริมาณการขายที่ไม่ทำให้กิจการขาดทุน และการขายจำนวนเท่าใด จึงจะมีผลกำไรตามเป้าหมายที่วางไว้

2.4.1 ต้นทุนการผลิต (Cost of Production)

ต้นทุนการผลิต หมายถึง ค่าใช้จ่ายต่างๆ ที่เกิดขึ้นในการผลิตสินค้าและบริการในจำนวนที่ต้องการ ต้นทุนการผลิตสามารถจำแนกได้หลายแบบ ดังนี้

1. ต้นทุนที่เห็นได้ชัด (Explicit Cost) และต้นทุนโดยปริยาย (Implicit Cost)

- ต้นทุนที่เห็นได้ชัด หมายถึง ต้นทุนที่จ่ายออกไปจริงสามารถบันทึกลงในบัญชีได้ เช่น ค่าแรงงาน ค่าวัตถุดิบ ค่าโฆษณา เป็นต้น

- ต้นทุนโดยปริยาย หมายถึง ต้นทุนที่ไม่ได้จ่ายออกไปเป็นเงินจริงแต่เป็นค่าเสียโอกาสที่จะใช้ปัจจัยการผลิตไปทำประโยชน์อื่น เรียกว่า "ต้นทุนค่าเสียโอกาส (Opportunity Cost)" เช่น ค่าจ้างตัวเอง หรือค่าเช่าอาคารของตนเอง สิ่งเหล่านี้ถือเป็นต้นทุนการผลิตเพราะเจ้าของปัจจัยการผลิตเสียโอกาสได้รับผลตอบแทน

2. ต้นทุนทางบัญชี (Accounting Cost) และต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ (Economics Cost)

- ต้นทุนทางบัญชี หมายถึง ต้นทุนที่รวมเฉพาะ ต้นทุนที่เห็นได้ชัดส่วนที่มีหลักฐานการรับ-จ่ายเงินที่สามารถบันทึกบัญชีได้ และอาจรวมต้นทุนโดยปริยายบางรายการที่อาจประเมินมูลค่าได้ตามกฎหมายภาษีเงินได้นิติบุคคลอนุญาตไว้ (ต้นทุนทางบัญชีจึงเป็นต้นทุนที่คำนวณขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อการเสียภาษี)

- ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ หมายถึง ค่าตอบแทนปัจจัยการผลิตทั้งหมด รวมกำไรปกติ ที่ผู้ประกอบการได้รับทั้งที่จ่ายเป็นตัวเงินหรือเป็นสิ่งของ หรือที่ไม่ได้จ่าย สรุปแล้วต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ประกอบด้วย ต้นทุนที่เห็นได้ชัดและต้นทุนโดยปริยาย

ด้วยเหตุนี้ ต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์จึงสูงกว่าต้นทุนทางบัญชี ทำให้กำไรทางเศรษฐศาสตร์น้อยกว่ากำไรทางบัญชี

ค่าเสียโอกาส คือ มูลค่าหรือคุณค่าของทางเลือกที่ดีที่สุดในบรรดาทางเลือกทั้งหลายที่ต้องสละไป เมื่อมีการตัดสินใจเลือกทางใดทางหนึ่งในการใช้ทรัพยากร

2.4.2 ต้นทุนกับระยะเวลา (Cost and Time Period)

1. การผลิตในระยะสั้น (Short–Run Period) เป็นการผลิตในระยะเวลาที่ประกอบด้วยปัจจัยคงที่ (Fixed Factors) และปัจจัยผันแปร (Variable Factors) ต้นทุนการผลิตในระยะสั้นจึงประกอบด้วยต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร โดยต้นทุนคงที่จะไม่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนผลผลิต ส่วนต้นทุนผันแปรจะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนผลผลิต

2. การผลิตในระยะยาว (Long–Run Period) เป็นการผลิตในระยะเวลาที่ผู้ผลิตสามารถเปลี่ยนแปลงปัจจัยการผลิตทุกชนิดได้ตามต้องการ ดังนั้น การผลิตในระยะยาวปัจจัยการผลิตทุกชนิดจะเป็นปัจจัยผันแปร ต้นทุนการผลิตในระยะยาวจะประกอบด้วยต้นทุนผันแปรเพียงอย่างเดียว

2.4.3 การวิเคราะห์ต้นทุนในระยะสั้น (The Short–Run Cost Analysis)

การผลิตในระยะสั้นใช้ปัจจัยการผลิต 2 ชนิดคือ ปัจจัยคงที่ และปัจจัยผันแปร ดังนั้น ต้นทุนการผลิตในระยะสั้นจึงมี 2 ชนิดคือ ต้นทุนคงที่ และต้นทุนผันแปร สามารถคำนวณหาต้นทุนชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost: FC) ต้นทุนชนิดนี้จะมีจำนวนคงที่ตลอดไม่ว่าปริมาณการผลิตจะมากหรือน้อย แม้จะไม่ทำการผลิตเลยก็จะเกิดต้นทุนคงที่ ต้นทุนประเภทนี้ เช่น ค่าเสื่อมของเครื่องจักร เป็นต้น

2. ต้นทุนผันแปร (Variable Cost: VC) ต้นทุนนี้จะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนสินค้าที่ผลิต ถ้าผลิตมากจะเสียต้นทุนชนิดนี้มาก และถ้าไม่ผลิตก็ไม่เสียเลย ต้นทุนประเภทนี้ เช่น ค่าจ้างแรงงาน เป็นต้น

3. ต้นทุนรวม (Total Cost: TC) เป็นต้นทุนทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการใช้ปัจจัยการผลิตชนิดต่างๆ ในการผลิตสินค้าและบริการจำนวนหนึ่ง ในระยะสั้น ต้นทุนรวมสามารถแสดงได้ดังนี้

$$TC = TFC + TVC \tag{2.55}$$

4. ต้นทุนคงที่เฉลี่ย (Average Fixed Cost: AFC) เป็นต้นทุนคงที่ทั้งหมดเฉลี่ยต่อปริมาณผลผลิต 1 หน่วย หรือ

$$AFC = \frac{TFC}{Q} \tag{2.56}$$

5. ต้นทุนผันแปรเฉลี่ย (Average Variable Cost: AVC) เป็นต้นทุนผันแปรทั้งหมดเฉลี่ยต่อปริมาณผลผลิต 1 หน่วย หรือ

$$AVC = \frac{TVC}{Q} \tag{2.57}$$

6. ต้นทุนเฉลี่ย (Average Cost: AC) เป็นต้นทุนทั้งหมดเฉลี่ยต่อปริมาณผลผลิต 1 หน่วย หรือ

$$AC = \frac{TC}{Q} \tag{2.58}$$

นอกจากนี้ยังสามารถหาได้จาก $AC = AFC + AVC$

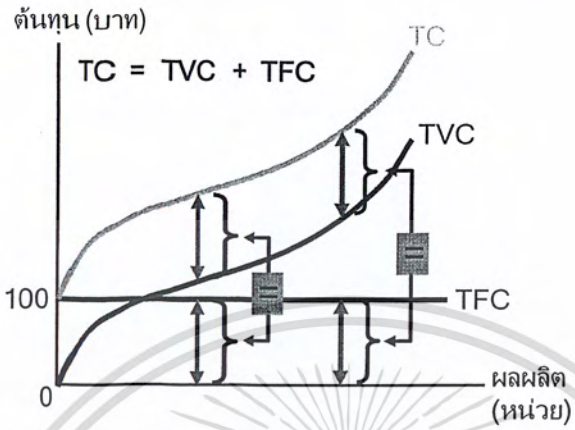
7. ต้นทุนเพิ่มหรือต้นทุนหน่วยสุดท้าย (Marginal Cost: MC) เป็นการเปลี่ยนแปลงของต้นทุนรวมเมื่อปริมาณผลผลิตเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย หรือ

$$MC = \frac{\Delta TC}{\Delta Q} \tag{2.59}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

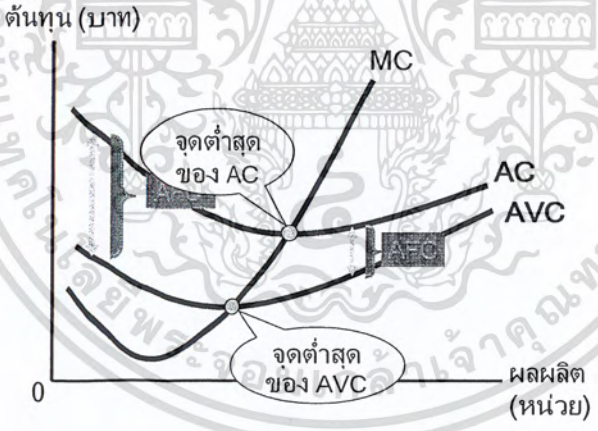
เส้นต้นทุนในระยะสั้น

ความสัมพันธ์ของต้นทุนประเภทต่างๆ ในการผลิตระยะสั้น แสดงได้ดังนี้



รูปที่ 2.22 เส้นต้นทุนรวม ต้นทุนผันแปร และต้นทุนคงที่

(ที่มา http://msci.chandra.ac.th/econ/ch6costrevenue.doc)



รูปที่ 2.23 เส้นต้นทุนการผลิตระยะสั้นประเภทต่างๆ

(ที่มา http://msci.chandra.ac.th/econ/ch6costrevenue.doc)

2.4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนผันแปรเฉลี่ยกับต้นทุนเพิ่มและต้นทุนเพิ่มกับต้นทุนเฉลี่ย

1. ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนผันแปรเฉลี่ย (AVC) กับต้นทุนเพิ่ม (MC)

- ตราบที่ MC มีค่าน้อยกว่า AVC, AVC จะมีค่าลดลงเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป
- ตราบที่ MC มีค่ามากกว่า AVC, AVC จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป
- MC จะมีค่าเท่ากับ AVC ณ จุดที่ AVC มีค่าต่ำสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ความสัมพันธ์ระหว่างต้นทุนเพิ่มกับต้นทุนเฉลี่ย

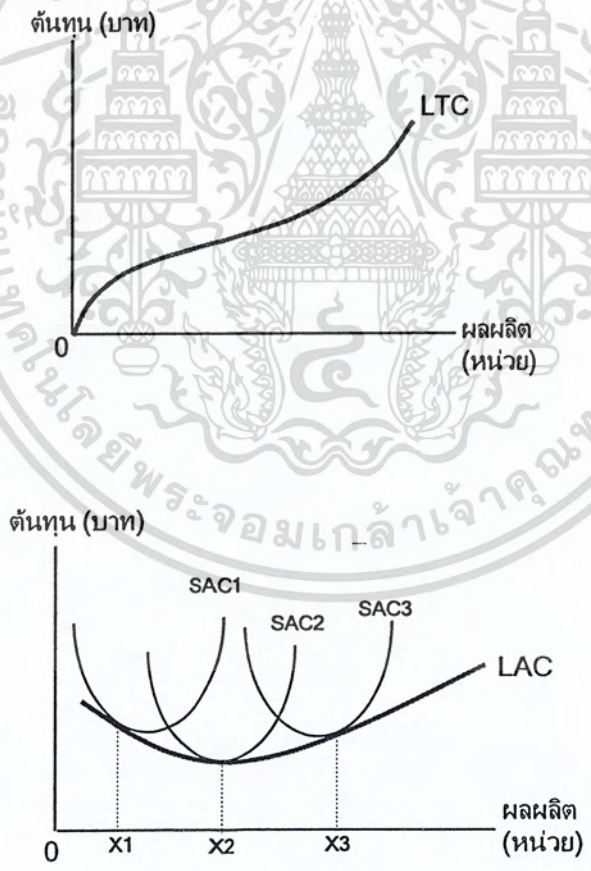
- ตราบที่ MC มีค่าน้อยกว่า AC, AC จะมีค่าลดลงเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป
- ตราบที่ MC มีค่ามากกว่า AC, AC จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อผู้ผลิตขยายการผลิตออกไป
- MC จะมีค่าเท่ากับ AC ณ จุดที่ AC มีค่าต่ำสุด

2.4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนในระยะยาว (Long–Run Cost Analysis)

ในระยะยาวผู้ผลิตสามารถเปลี่ยนแปลงขนาดการผลิตให้เหมาะสมกับที่ต้องการได้ ปัจจัยทุกชนิดที่ใช้ในการผลิตเป็นปัจจัยผันแปร ดังนั้น ต้นทุนการผลิตในระยะยาวจึงมีเฉพาะแต่ต้นทุนผันแปรเท่านั้น

1.ต้นทุนเฉลี่ยในระยะยาว

ในระยะยาวผู้ผลิตสามารถปรับปรุงขนาดของโรงงานให้เหมาะสมกับระดับผลผลิตได้ ดังนั้น จึงสามารถเลือกขนาดของโรงงานที่เสียต้นทุนเฉลี่ยต่ำสุดโดยใช้วิธีการสร้างโรงงานใหม่ให้ใหญ่กว่าเดิมหรือสร้างเพิ่มเติมจากโรงงานเดิม



รูปที่ 2.24 เส้นต้นทุนเฉลี่ยระยะยาว

(ที่มา http://msci.chandra.ac.th/econ/ch6costrevenue.doc)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.24 ให้มีโรงงาน 3 ขนาด แต่ละขนาดเหมาะสมสำหรับการผลิตระดับต่างๆ และแต่ละโรงงานมีต้นทุนเฉลี่ยระยะสั้น (Short-Run Average Cost: SAC) คือ SAC1 SAC2 และ SAC3 ตามลำดับ ในระยะยาวขนาดของโรงงานที่เหมาะสมในการผลิตจะพิจารณาจากปริมาณผลผลิตที่ต้องการคือ ถ้าต้องจำนวนผลผลิต OX1 ต้องสร้างโรงงานที่มีขนาดของต้นทุน SAC1 เพราะจะเสียค่าใช้จ่ายต่ำกว่าการใช้โรงงานในขนาดอื่นๆ เป็นต้น จะเห็นได้ว่าในโรงงานขนาดต่างๆ นั้นจะมีอยู่ขนาดหนึ่งซึ่งเหมาะสมที่สุด (Optimum Scale of Plant) คือ เสียต้นทุนเฉลี่ยต่อหน่วยต่ำสุดเมื่อเปรียบเทียบกับโรงงานในขนาดต่างๆ ขนาดของโรงงานขนาดที่เหมาะสมนี้จะอยู่ ณ จุดต่ำสุดของเส้น SAC ที่สัมผัสกับจุดต่ำสุดของเส้น LAC ดังนั้น โรงงานที่มีต้นทุน SAC2 ผลผลิตที่เหมาะสม (Optimum Output) คือ OX2 หรือเส้นต้นทุนเฉลี่ยในระยะยาว (LAC) ได้มาจากเส้น SAC ของโรงงานขนาดต่างๆ แต่อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตไม่จำเป็นจะต้องสร้างโรงงานที่มีขนาดเหมาะสมที่สุดและทำการผลิต ณ ระดับที่เหมาะสมนั้น ยกเว้นในกรณีที่มีการแข่งขันสมบูรณ์ (Perfect Competition)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนในขั้นตอนการอบหม้อแปลงไฟฟ้า ได้แก่ เวลาในการอบ อุณหภูมิในการอบ และความหนาของกระดาษฉนวน (ทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้) โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวน ได้แก่ อุณหภูมิในการอบ และความหนาของกระดาษฉนวน ส่วนเวลาในการอบและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยไม่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวน ซึ่งอุณหภูมิ 125 °C เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ความชื้นในกระดาษฉนวนเหลือน้อยที่สุด และเวลาในการอบที่ 24 ชั่วโมงยังคงมีความชื้นเฉลี่ยในกระดาษน้อยกว่า 0.5% โดยน้ำหนัก ดังนั้นจึงสามารถลดเวลาในการอบจาก 48 ชั่วโมง เป็น 24 ชั่วโมงได้ และทำการสร้างสมการถดถอยรูปแบบเส้นตรง (Linear) โดยสมการที่ได้ คือ $\sin(\hat{y}) = 1.4161 - 0.00605A - 0.02051C$ มีการให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มากที่สุด คือ 78.1% และไม่มีการละเมิดสมมติฐานทั้งสามข้อของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ได้แก่ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ และส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน เมื่อวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตพบว่า สามารถลดต้นทุนได้ 2,467,000 บาทต่อปี (ทิพสุดนธ์, ธนา และศุภามน, 2553)

จากการศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการทำให้เกิดเม็ดพีวีซีไม่หลอมละลายที่เกิดขึ้นบนผิวผลิตภัณฑ์ โดยการใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบสองระดับ (2^k Factorial Design) เพื่อค้นหาปัจจัยและลดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออก พบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดจุดบกพร่องบนผิวผลิตภัณฑ์คือ อุณหภูมิในการหลอม PVC ที่ Mixing Roll และปริมาณเศษพลาสติกพีวีซีแผ่น (Scrap) ที่นำกลับมาหลอมใหม่ และได้นำปัจจัยนี้ไปศึกษาต่อเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม โดยการศึกษาพื้นผิวตอบสนองของตัวแปร (Response Surface Methodology) ซึ่งใช้แบบจำลองสมการถดถอยที่อยู่ในรูปแบบเทอม Full Quadratic ได้สมการคือ $y = 567.972 + 6.55667\,x_1 + 2.42167\,x_2 - 0.01867x_1^2 + 0.00633x_2^2 - 0.015x_1x_2$ ระดับปัจจัยที่เหมาะสมคือ คือ อุณหภูมิในการหลอมพีวีซี ที่ Mixing Roll ประมาณ 180 องศาเซลเซียส และปริมาณเศษพลาสติกพีวีซีแผ่น (Scrap) ที่นำกลับมาหลอมใหม่ประมาณ 30 กิโลกรัมต่อBatch เมื่อนำผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ผลการทดลองไปใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิตจริงพบว่า สามารถลดจำนวนจุดบกพร่องได้ 36.20 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดค่าใช้จ่ายได้ประมาณ 1,455,480 บาทต่อปี (โสภิดา และอรรถกร, 2551)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการศึกษารูปแบบการแปลงข้อมูลที่สามารถแปลงข้อมูลจากการแจกแจงแบบไม่ปกติให้เป็นการแจกแจงแบบปกติได้ โดยพิจารณารูปแบบการแปลงข้อมูลทั้งหมด 4 รูปแบบด้วยกัน คือ การแปลงโดยใช้ล็อกการิทึม การแปลงโดยใช้รากที่สอง การแปลงโดยใช้การกลับเศษส่วน และการแปลงโดยใช้เลขยกกำลัง ซึ่งทำการแปลงข้อมูลจากข้อมูลที่มีระดับความเบ้และความโด่งแตกต่างกันไปพบว่าการแจกแจงเบ้ขวาที่ระดับความเบ้น้อยกว่า 0.9 จะกระทำได้ดีที่ความโด่งระดับหนึ่งเหมือนกันในทุกขนาดตัวอย่าง แต่เมื่อความเบ้มีค่าเพิ่มขึ้นจากนี้ความสามารถในการแปลงข้อมูลจะกระทำได้ดีที่ระดับความโด่งสูงขึ้นจากเดิม และจะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดตัวอย่างเพิ่มขึ้นด้วย แต่ที่การแจกแจงเบ้ซ้ายนั้นค่าเปอร์เซ็นต์ของการแจกแจงแบบปกติจะไม่แตกต่างกันมากนักเมื่อขาดตัวอย่างเพิ่มขึ้น (นพรัตน์, 2542)

จากการศึกษาการเสื่อมสภาพของกระดาษฉนวนและฉนวนน้ำมันในหม้อแปลงไฟฟ้าขึ้นอยู่กับทั้งการเสื่อมสภาพของกระดาษและการเสื่อมสภาพของน้ำมัน การเสื่อมสภาพของกระดาษในน้ำมันค่อนข้างจะแตกต่างจากกระดาษในอากาศ โดยทั่วไปมักจะคาดว่าอุณหภูมิคือปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับการเสื่อมสภาพ แต่อิทธิพลของอุณหภูมิไม่เพียงส่งผลต่อการเสื่อมสภาพในอากาศ แต่ยังมีผลต่อการเสื่อมสภาพในน้ำมันอีกด้วย อาจสรุปได้ดังนี้ (Höhlein และ Kachler, 2005)

1) การพัฒนาความร้อนและการเสื่อมสภาพของฉนวนของแข็งมีอิทธิพลมากขึ้น ภายใต้เงื่อนไขการบำรุงรักษาปกติ (75-95 องศาเซลเซียส)

2) หม้อแปลงไฟฟ้าแบบเปียกมักจะมีระดับของความร้อนที่สูงขึ้นและลดค่าของ Polymerization ของกระดาษได้มากกว่าหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแห้ง ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน

3) การมุ่งมั่นพัฒนาในการทดสอบความร้อนและความชื้นมีความสำคัญต่อการเสื่อมอายุ เพื่อประเมินอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

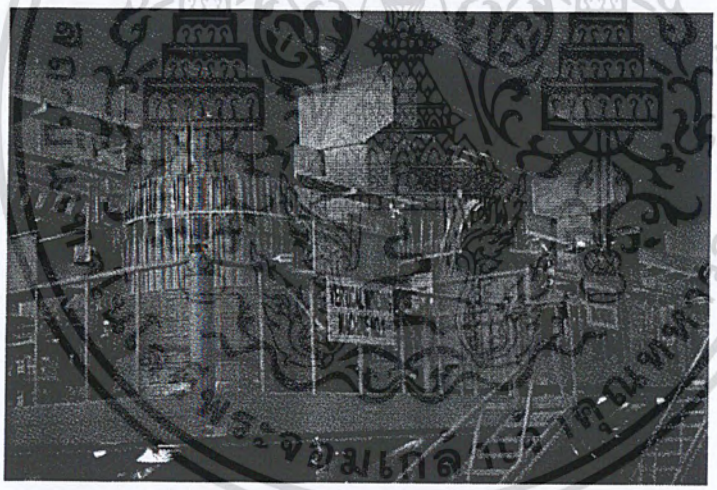
บทที่ 3
ขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลอง

ในขั้นตอนการดำเนินงานและการทดลองนี้ได้แบ่งออกเป็น 5 ส่วน ประกอบไปด้วย 1) ขั้นตอนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า 2) การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3) วัสดุที่ใช้ในการทดลอง 4) ขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง 5) การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

3.1 ขั้นตอนการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า

การผลิตหม้อแปลงไฟฟ้าประกอบไปด้วย 8 ขั้นตอน ดังนี้

3.1.1 ขั้นตอนการพันขดลวด



รูปที่ 3.1 พนักงานพันขดลวด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ขั้นตอนการประกอบขดลวด

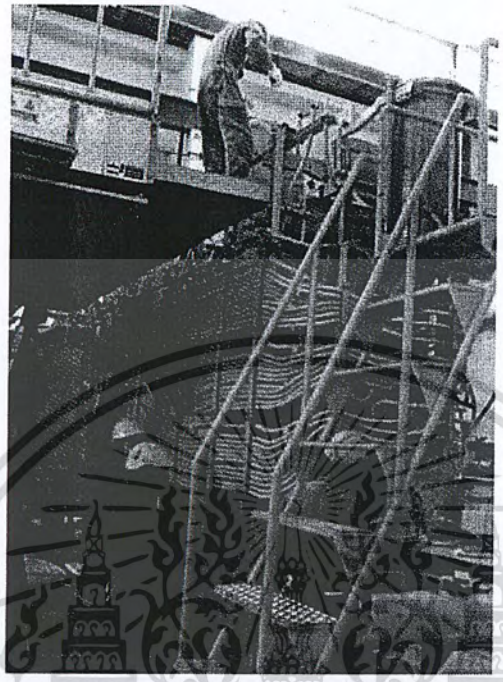
รูปที่ 3.2 พนักงานประกอบขดลวด

3.1.3 ขั้นตอนการอบ ในระหว่างที่ทำการพันและประกอบขดลวดจะมีความชื้นแทรกเข้าไปในฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้า จำเป็นต้องมีการอบเพื่อไล่ความชื้นออกไป

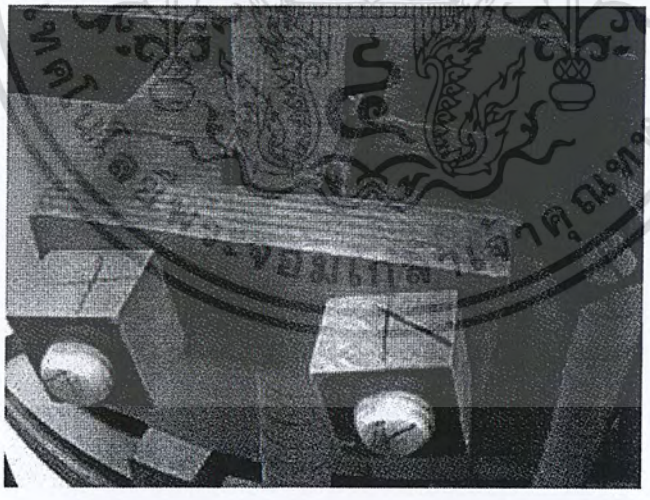
รูปที่ 3.3 นำขดลวดเข้าไปอบในเตาอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.4 ขั้นตอน Re-tightening เป็นการตรวจสอบและขันน็อตหลังจากผ่านขั้นตอนการอบ เนื่องจากไส้ในหม้อแปลงไฟฟ้าที่ผ่านการอบจะทำให้น็อตที่ใช้ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกันเกิดการหลวมต้องมีการขันให้แน่น



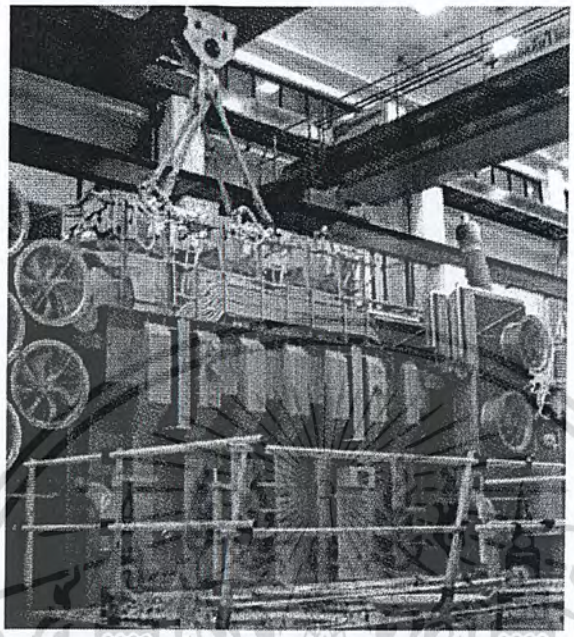
รูปที่ 3.4 ขันน็อตตามจุดต่างๆ บนไส้ในหม้อแปลงไฟฟ้า



รูปที่ 3.5 น็อตที่ทำการขันแล้วจะทำเครื่องหมายไว้

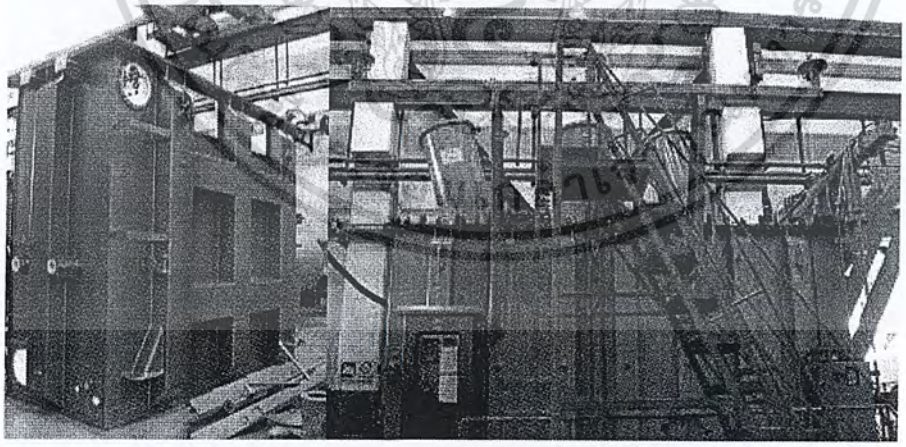
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.5 ขั้นตอน Tanking เป็นขั้นตอนการนำไส้ในหม้อแปลงไฟฟ้าลงในถัง แล้วใส่น้ำมัน จากนั้นทำให้เป็นสุญญากาศ แล้วปิดฝาถัง



รูปที่ 3.6 นำไส้ในหม้อแปลงไฟฟ้าใส่ลงในถัง

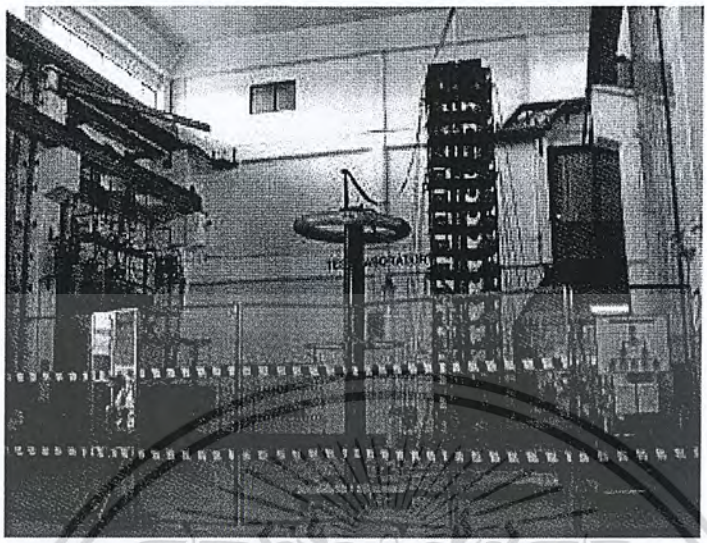
3.1.6 ขั้นตอนการประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.7 ประกอบชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน

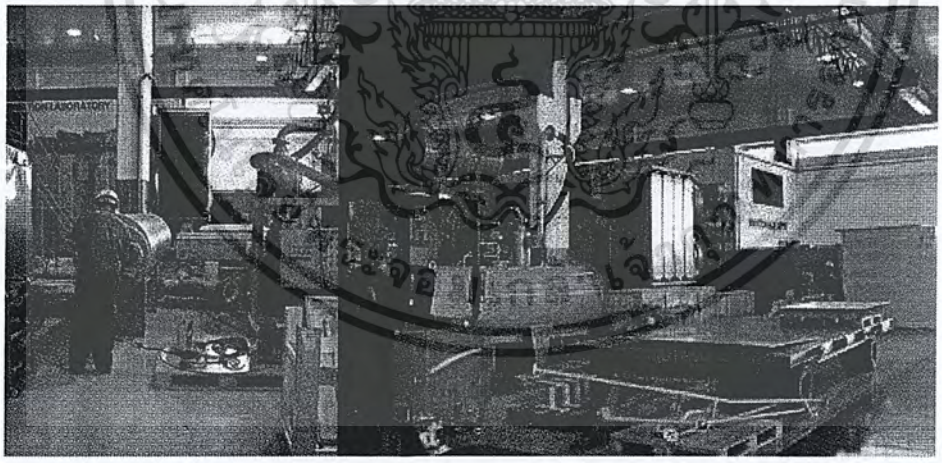
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.7 ขั้นตอนการตรวจสอบ



รูปที่ 3.8 บริเวณทดสอบหม้อแปลงไฟฟ้า

3.1.8 ขั้นตอน Packaging เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า เป็นการทำความสะอาดและแยกชิ้นส่วนต่างๆ เพื่อเตรียมที่จะขนย้ายไปติดตั้งให้แก่ลูกค้า



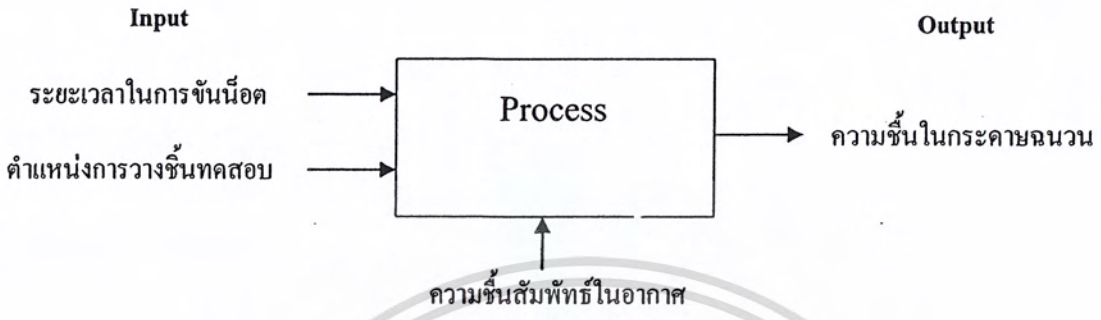
รูปที่ 3.9 แยกชิ้นส่วนต่างๆ ก่อนส่งให้ลูกค้า

3.2 ออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล (Design of Factorial Experiment)

ปริญญานิพนธ์นี้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปทั่วไป (General Full Factorial) โดยทดลองในช่วงของกระบวนการ Re-tightening และ Tanking ซึ่งปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วย 3 ปัจจัย คือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ โดยกำหนดให้เป็นตัวแปรร่วม (Covariate Variable) เนื่องจากเป็นตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้, ระยะเวลาในการขันน็อต ซึ่งกำหนดระดับปัจจัย คือ ชั่วโมงที่ 4, 5.5, 7, 8.5, 10 และอีกปัจจัย คือ ตำแหน่งการวางชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทดสอบ โดยกำหนดให้วางชิ้นทดสอบไว้ด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของหม้อแปลงไฟฟ้าในขณะเข้าเตาอบ ซึ่งตัวแปรตอบสนองที่ทำการวัดค่า คือ ความชื้นในกระดาษฉนวน โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.10 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการหรือระบบที่สนใจ

ตารางที่ 3.1 ระดับปัจจัยที่ทำการศึกษา

ปัจจัย	จำนวนระดับปัจจัย	ค่าระดับปัจจัย	หน่วย
ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ	ไม่กำหนด	ไม่กำหนด	เปอร์เซ็นต์
ระยะเวลาขันน็อต	5	4, 5.5, 7, 8.5, 10	ชั่วโมง
ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ	2	Top, Bottom	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 รายละเอียดของตารางที่ใช้ในการบันทึกผลการทดลอง

วัน เดือน ปี	ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาในการขันน็อต (ชม.)	ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ	
			Top	Bottom

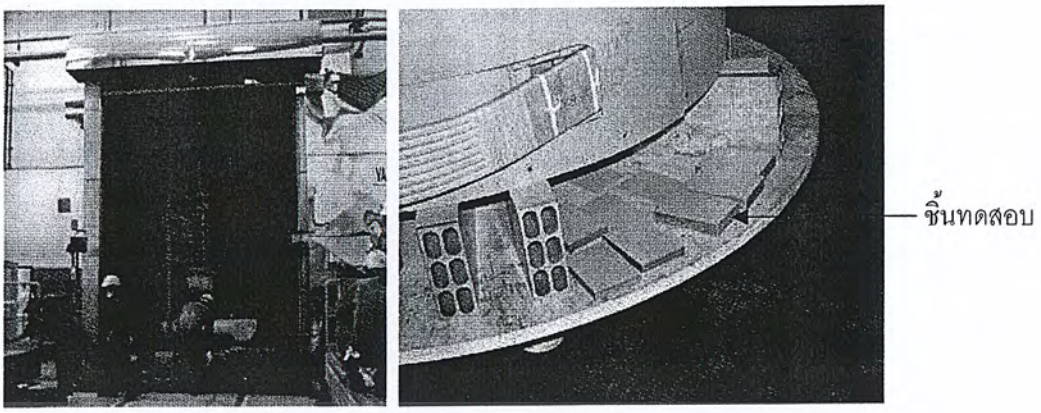
3.3 วัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุที่นำมาใช้เป็นชิ้นทดสอบคือ กระดาษเซลลูโลส (Cellulose Paper) โดยความหนาของกระดาษฉนวนที่ใช้ในขดลวดหม้อแปลงไฟฟ้านั้นมีความหนา 2, 3, 4, 5, 7, 10, 20, และ 30 มิลลิเมตร แต่ในการทดลองความหนาของกระดาษฉนวนไม่ได้เป็นปัจจัยที่ทำการศึกษา จึงเลือกขนาดตัวอย่างมาตรฐานมาใช้ในการทดลอง ซึ่งมีขนาด 150 × 250 × 30 มิลลิเมตร

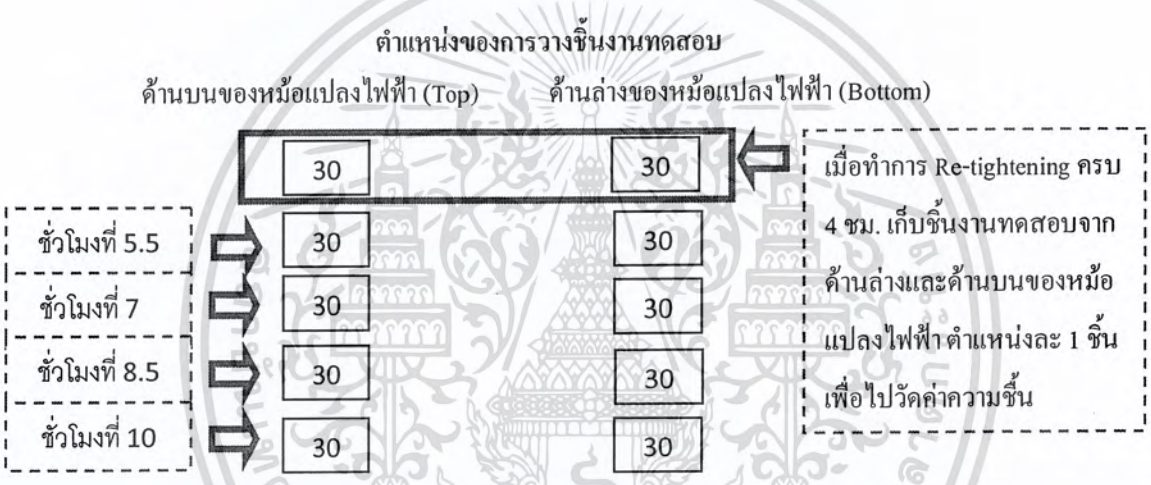
3.4 ขั้นตอนการทดลองและเก็บผลการทดลอง

1. นำกระดาษฉนวนขนาดกว้าง 150 มิลลิเมตร ยาว 250 มิลลิเมตร ที่ความหนา 30 มิลลิเมตร เข้าไปอบในเตาพร้อมกับไส้ในหม้อแปลง โดยวางไว้ที่ตำแหน่งด้านบน (Top) และด้านล่าง (Bottom) ของไส้ในหม้อแปลง ตำแหน่งละ 5 ชิ้น รวมทั้งหมด 10 ชิ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

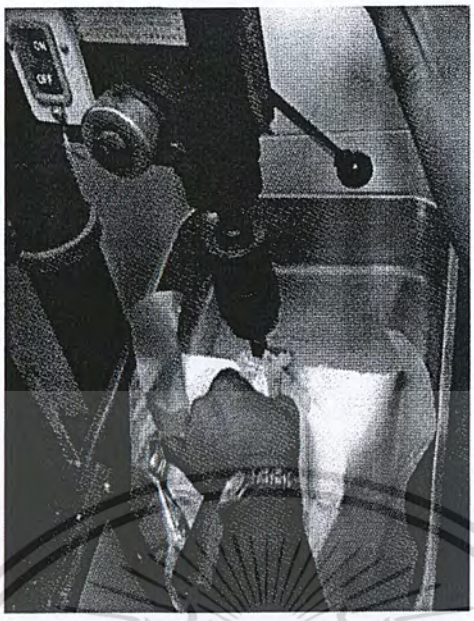


รูปที่ 3.11 นำชิ้นงานตัวอย่างเข้าไปอบในเตาอบ

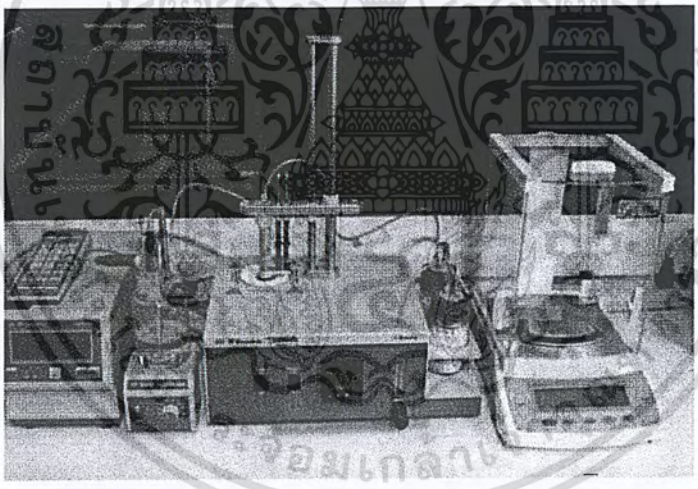


2. เมื่อเสร็จขั้นตอนการอบแล้วนำไส้ในหม้อแปลงออกมาเพื่อเข้าสู่ขั้นตอน Re-tightening โดยวางชิ้นทดสอบให้กับสัมผัสอากาศไปพร้อมๆ กับชิ้นงานจริง เมื่อทำการ Re-tightening ครบ 4 ชั่วโมง จะนำชิ้นงานทดสอบจากด้านล่างและด้านบนของหม้อแปลงไฟฟ้า ตำแหน่งละ 1 ชิ้น (ด้านบน 1 ชิ้น และด้านล่าง 1 ชิ้น) มาเจาะแล้วเอาเศษที่ได้จากการเจาะไปทดสอบหาค่าความชื้นด้วยเครื่อง Coulometer ผลของความชื้นที่ได้จะออกมาในรูปแบบของค่าเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 เจาะชิ้นงานทดสอบเพื่อนำไปวัดค่าความชื้น

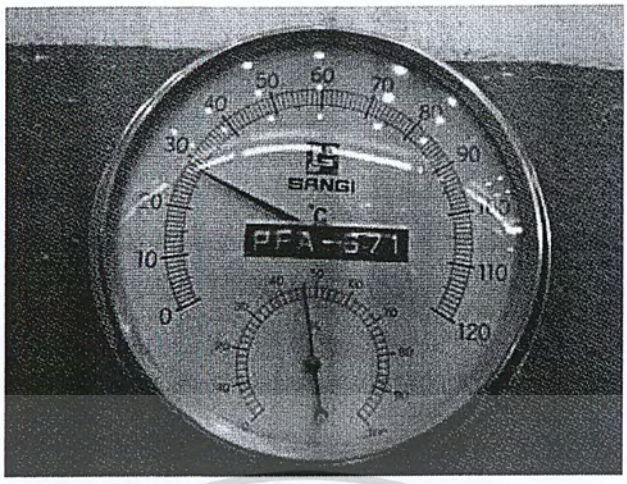


รูปที่ 3.13 เครื่อง Coulometer (วัดปริมาณความชื้นในกระดาษฉนวน)

3. เมื่อเวลาผ่านไปเป็นชั่วโมงที่ 5.5, 7, 8.5 และ 10 นำชิ้นงานทดสอบมาทำการวัดค่าความชื้นเช่นเดียวกับการวัดในครั้งแรก (หยิบมารอบละ 2 ชิ้น ทั้งหมด 5 รอบ รวมเป็นทั้งหมด 10 ชิ้น)

หมายเหตุ เครื่องมือที่ใช้ในการวัดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศคือ Humidity Meter ซึ่งจะถูกติดไว้ที่ผนังห้องในบริเวณที่ต้องการทราบค่าความชื้นสัมพัทธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 Humidity Meter

3.5 การวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติ

เมื่อทำการทดลองครบตามที่ต้องการและทำการเก็บรวบรวมผลการทดลองทั้งหมดแล้ว จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางสถิติโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เพื่อพิจารณาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในกระดาษฉนวน และทำการวิเคราะห์สมการพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับการทำ Re-tightening และ Tanking โดยใช้โปรแกรม MINITAB 16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

เนื้อหาในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงรายละเอียดเกี่ยวกับ 1) ผลการทดลอง 2) การวิเคราะห์ผลทางสถิติ 3) การวิเคราะห์ต้นทุน โดยได้ดำเนินการทดลองตามขั้นตอนในบทที่ 3 ใช้การทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปทั่วไปในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์และคัดเลือกปัจจัย และใช้การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมกับการทำ Re-tightening และ Tanking ซึ่งได้ทำการทดลองทั้งหมด 6 ครั้ง และได้นำข้อมูลมาวิเคราะห์ผล ดังนี้

4.1 ผลการทดลอง

หลังจากทำการทดลองและได้เก็บผลการทดลองโดยทำการเก็บบันทึก วันเดือนปี ที่ทำการทดลอง, ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศขณะเปิดเตา และบันทึกค่าความชื้นในกระดาษฉนวน ณ ชั่วโมงที่ 4 - 10 (หน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์) ในตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบที่ต่างกัน คือ Top และ Bottom ซึ่งผลการทดลองที่ได้เป็นไปตามตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการเก็บค่าความชื้นในกระดาษฉนวน

วัน เดือน ปี	ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาในการขันน็อต (ชม.)	ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ	
			Top	Bottom
23 สิงหาคม 2553 13:45 น.	57%	4	0.0855%	0.0727%
		5.5	0.1110%	0.1204%
		7	0.1225%	0.1300%
		8.5	0.1569%	0.1827%
		10	0.2013%	0.2353%
1 กันยายน 2553 13:00 น.	55%	4	0.0837%	0.0712%
		5.5	0.0847%	0.0842%
		7	0.0856%	0.0971%
		8.5	0.1181%	0.1394%
		10	0.1863%	0.1387%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองเก็บค่าความชื้นในกระดาษฉนวน (ต่อ)

วัน เดือน ปี	ความชื้นสัมพัทธ์	ระยะเวลาในการขันน็อต (ชม.)	ตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ	
			Top	Bottom
4 กันยายน 2553 13:45 น.	57%	4	0.1610%	0.1386%
		5.5	0.1676%	0.1775%
		7	0.1741%	0.2163%
		8.5	0.3252%	0.3858%
		10	0.4680%	0.4744%
8 กันยายน 2553 13:00 น.	59%	4	0.1584%	0.1868%
		5.5	0.2213%	0.2303%
		7	0.2842%	0.2737%
		8.5	0.3164%	0.3209%
		10	0.3485%	0.3681%
5 ตุลาคม 2553 10:15 น.	65%	4	0.1277%	0.1007%
		5.5	0.2277%	0.1255%
		7	0.3277%	0.3208%
		8.5	0.4689%	0.4228%
		10	0.4895%	0.4781%
12 ตุลาคม 2553 09:45 น.	65%	4	0.1409%	0.1254%
		5.5	0.2384%	0.1803%
		7	0.2662%	0.2578%
		8.5	0.4324%	0.4319%
		10	0.7448%	0.7642%

4.2 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

จากตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองการเก็บค่าความชื้นในกระดาษฉนวน จากนั้นในการวิเคราะห์ผลการทดลองทางสถิติได้ใช้โปรแกรม MINITAB 16 ดังนี้

4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคัดเลือกปัจจัย

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์และทำการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในฉนวน และการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลที่ได้ว่ามีความถูกต้องและเหมาะสม (Model Adequacy Checking) ผ่านการวิเคราะห์เศษเหลือ (Residual Analysis)

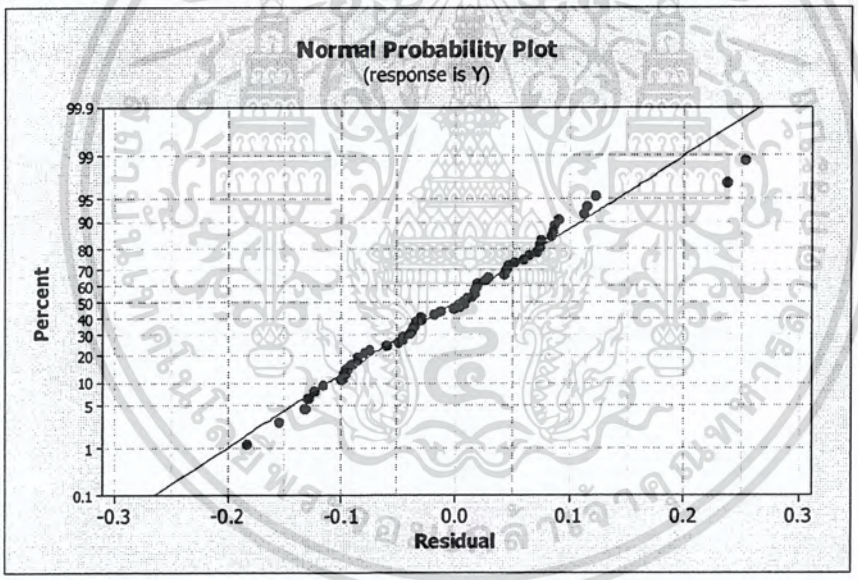
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อคัดเลือกปัจจัย

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นการตรวจสอบคุณภาพข้อมูลที่ได้ว่ามีความถูกต้องและเหมาะสมหรือไม่ (Model Adequacy Checking) ซึ่งประกอบไปด้วย การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง และการตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานสามารถพิจารณาได้จากกราฟ ดังนี้

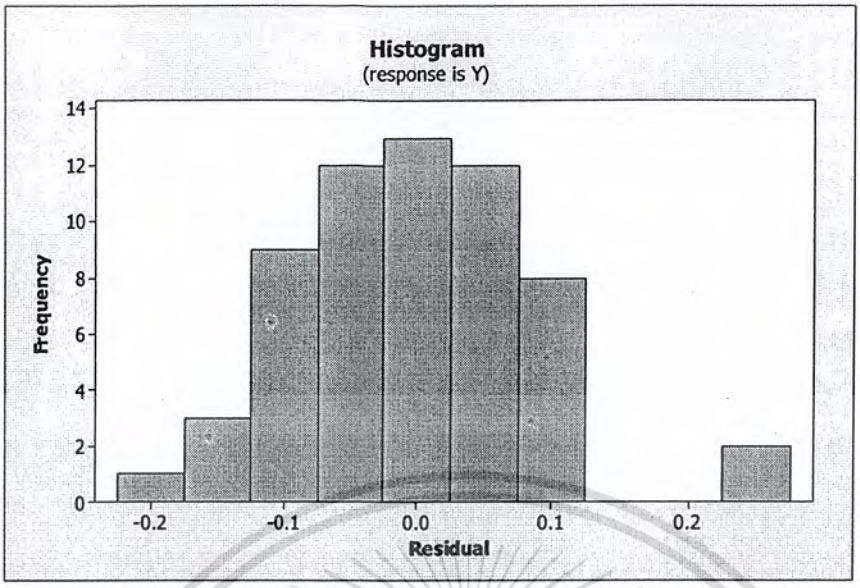
1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง

การตรวจสอบค่าส่วนตกค้างว่ามีการแจกแจงแบบปกติหรือไม่ พิจารณาได้จากกราฟการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน หากข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งจากรูปที่ 4.1 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของส่วนตกค้างที่มีการแจกแจงแบบปกติ พบว่ามีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นส่วนตกค้างจึงมีการแจกแจงแบบปกติ และอาจพิจารณาได้ฮิสโตแกรมการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน หากข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ พื้นที่กราฟจะเป็นเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ และมีความสมมาตร ซึ่งจากรูปที่ 4.2 พบว่าพื้นที่กราฟมีลักษณะเป็นเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ และค่อนข้างสมมาตร จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.1 กราฟความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบปกติในการทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัย

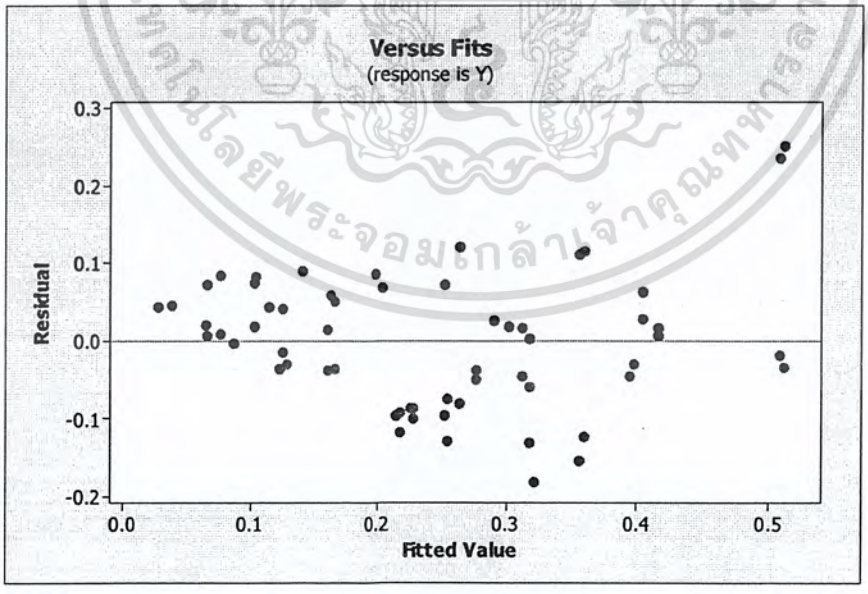
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ฮิสโตแกรมแสดงความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างในการทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัย

2. การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่

พิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนายจากสมการ ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลมีค่าคงที่ ลักษณะของกราฟจะต้องไม่ปรากฏรูปแบบที่แน่นอน ซึ่งจากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวน พบว่าลักษณะของกราฟมีรูปแบบคล้ายลำโพง แสดงว่าความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าไม่คงที่



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวนในการทดสอบสมมติฐานเพื่อคัดเลือกปัจจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่ามีการละเมิดสมมติฐาน 1 ข้อ คือ ความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าไม่คงที่ ดั้งนั้นจึงทำการแปลงค่าผลการทดลองเพื่อให้เป็นไปตามสมมติฐาน (นพรัตน์, 2552)

4.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่แปลงค่า

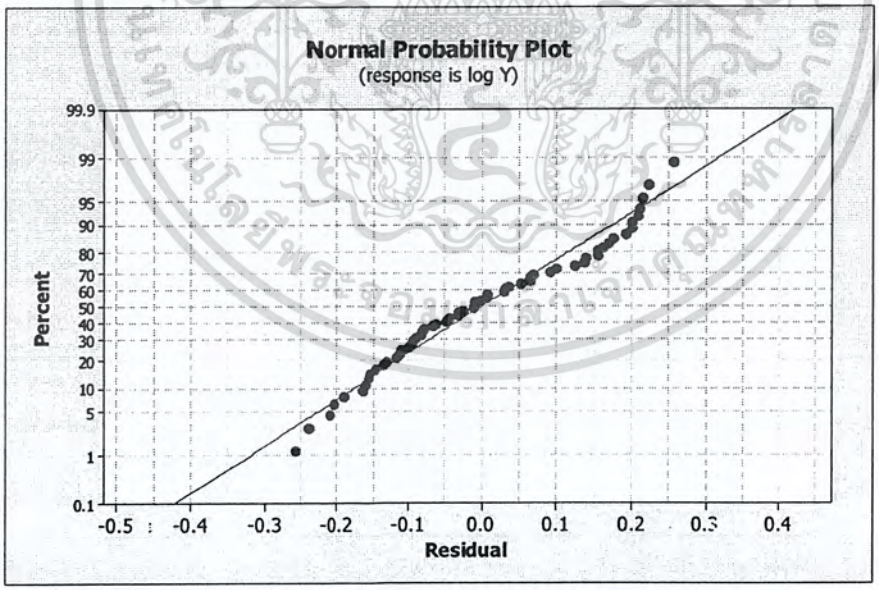
จากการแปลงค่าผลการทดลองในรูปแบบต่างๆ พบว่าการแปลงค่าผลการทดลองโดยใช้ค่า log (log ฐาน 10) แล้วนำไปสร้างสมการถดถอยในรูปแบบกำลังสอง (Quadratic) มีการให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) ที่มีค่ามากที่สุด คือ 85.51% และ 84.17% ตามลำดับ โดยไม่มีการละเมิดสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ประกอบไปด้วย การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง และการตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานสามารถพิจารณาได้จากกราฟ ดังนี้

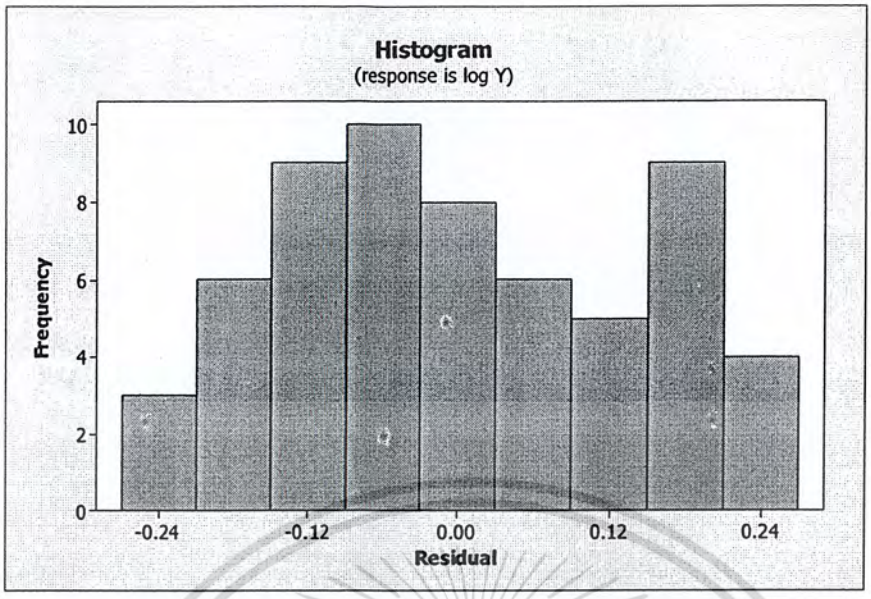
1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง

จากรูปที่ 4.4 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของส่วนตกค้างที่มีการแจกแจงแบบปกติ พบว่ามีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นส่วนตกค้างจึงมีการแจกแจงแบบปกติ และอาจพิจารณาได้ฮิสโตแกรมการแจกแจงแบบปกติของค่าความคลาดเคลื่อน ซึ่งจากรูปที่ 4.5 พบว่าพื้นที่กราฟมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ และค่อนข้างสมมาตร จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 4.4 กราฟความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบปกติของข้อมูลที่แปลงค่า

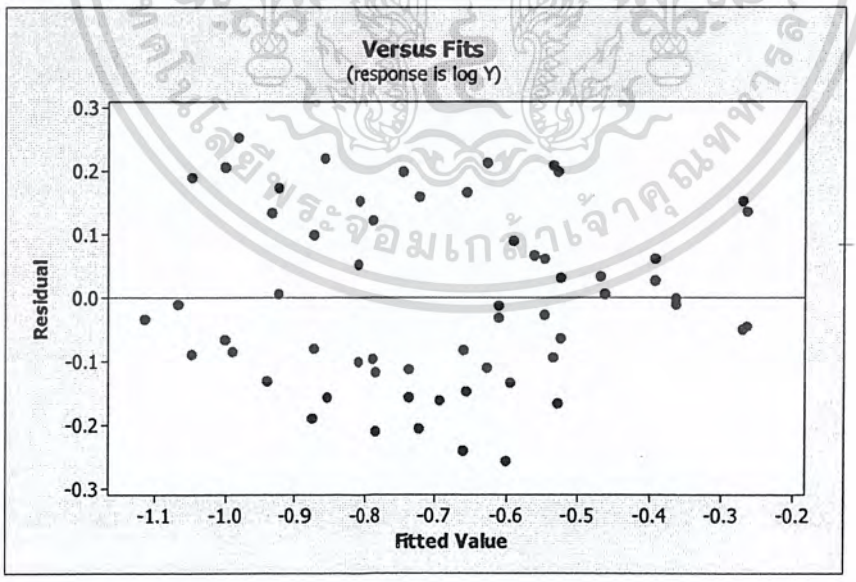
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ฮิสโตแกรมแสดงความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างของข้อมูลที่แปลงค่า

2. การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่

พิจารณาได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้าง และค่าตอบสนองที่ได้จากการทำนายจากสมการ ดังรูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในฉนวน พบว่าลักษณะของกราฟมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ความแปรปรวนของส่วนตกค้างจึงมีค่าคงที่



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวนของข้อมูลที่แปลงค่า

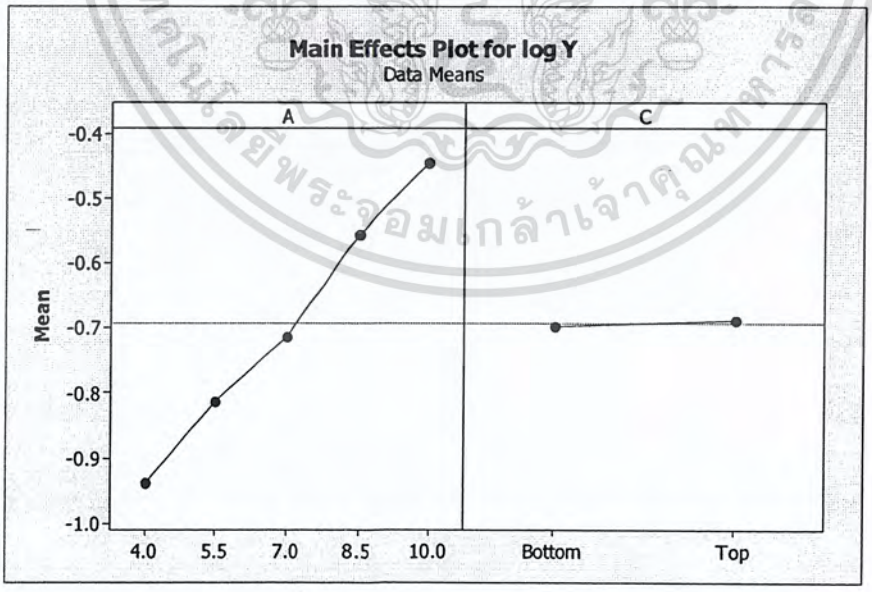
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลที่แปลงค่า

Source	DF	SS	MS	F	P
A	4	1.86814	0.46704	20.74	0.000
B	1	1.01484	1.01484	45.08	0.000
C	1	0.00165	0.00165	0.07	0.788
AC	4	0.01711	0.00428	0.19	0.943
Error	49	1.10319	0.02251		
Total	59	4.00492			

จากตารางที่ 4.2 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของผลการทดลองที่ทำการแปลงค่าโดยใช้ค่า log โดยกำหนดให้ A, B และ C คือ ระยะเวลาในการขันน็อต ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ และตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบตามลำดับ ซึ่งกำหนดค่าระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 เมื่อพิจารณาค่า P-value พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อความชื้น คือ ระยะเวลาในการขันน็อตและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ เนื่องจากมีค่า P-value น้อยกว่า 0.05 (P-Value < α) ส่วนตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบและผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อความชื้นในกระดาษฉนวน (P-Value > α)

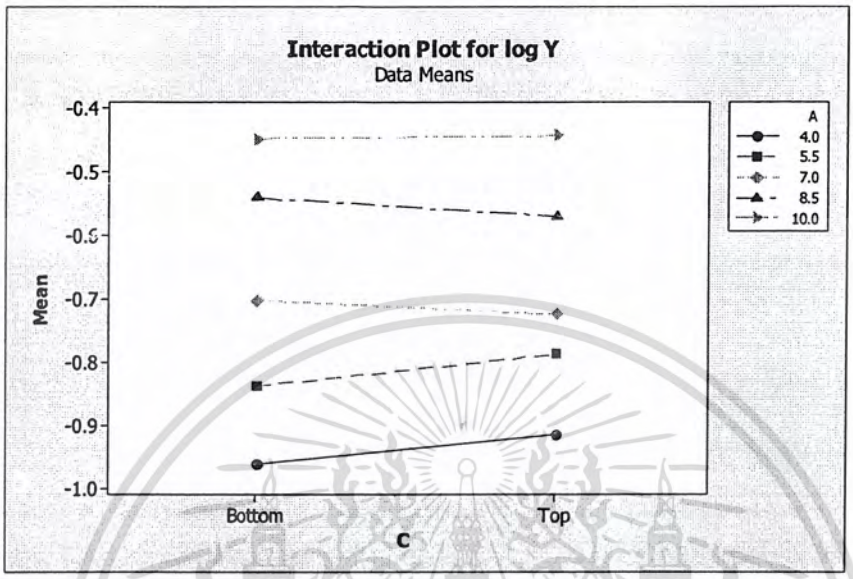
เมื่อพิจารณารูปที่ 4.7 แสดงถึงผลกระทบจากปัจจัยหลัก พบว่าระยะเวลาในการขันน็อตเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อความชื้นในกระดาษฉนวน เนื่องจากกราฟที่ได้มีลักษณะชันอย่างเห็นได้ชัด ส่วนตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบไม่เป็นปัจจัยหลัก เนื่องจากกราฟมีความชันน้อยมากจนแทบจะเป็นศูนย์



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยของความชื้นในกระดาษฉนวนกับระยะเวลาขันน็อต และความชื้นในกระดาษฉนวนกับตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบของข้อมูลที่แปลงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณารูปที่ 4.7 แสดงถึงผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาขันน็อต กับตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบ พบว่าไม่มีผลกระทบร่วมระหว่างปัจจัย



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาในการขันน็อตกับตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบของข้อมูลที่แปลงค่า

4.2.3 การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Analysis) ของข้อมูลที่แปลงค่า

การวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองเพื่อหาสมการต้นแบบ โดยใช้โปรแกรม MINITAB 16 ได้มีการเลือกใช้รูปแบบสมการกำลังสอง (Full Quadratic)

จากผลการวิเคราะห์เพื่อคัดเลือกปัจจัย พบว่าตำแหน่งการวางชิ้นทดสอบไม่มีผลต่อความชื้นในกระดาษฉนวน ดังนั้นจึงสามารถตัดตัวแปรนี้ออกไปได้

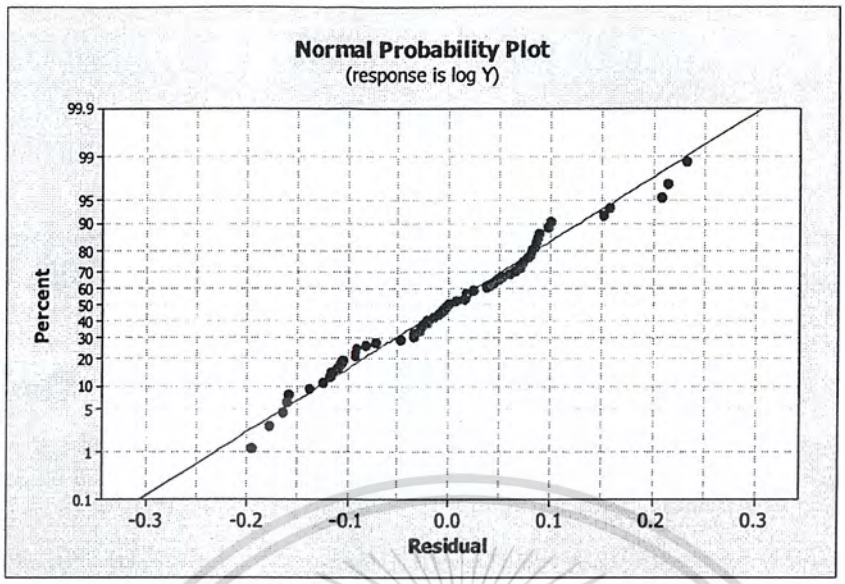
การทดสอบสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบ Full Quadratic

การสมมติฐานของการวิเคราะห์ความแปรปรวนของรูปแบบ Full Quadratic ประกอบไปด้วย การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง และการตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่ ซึ่งการตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานสามารถพิจารณาได้จากกราฟ ดังนี้

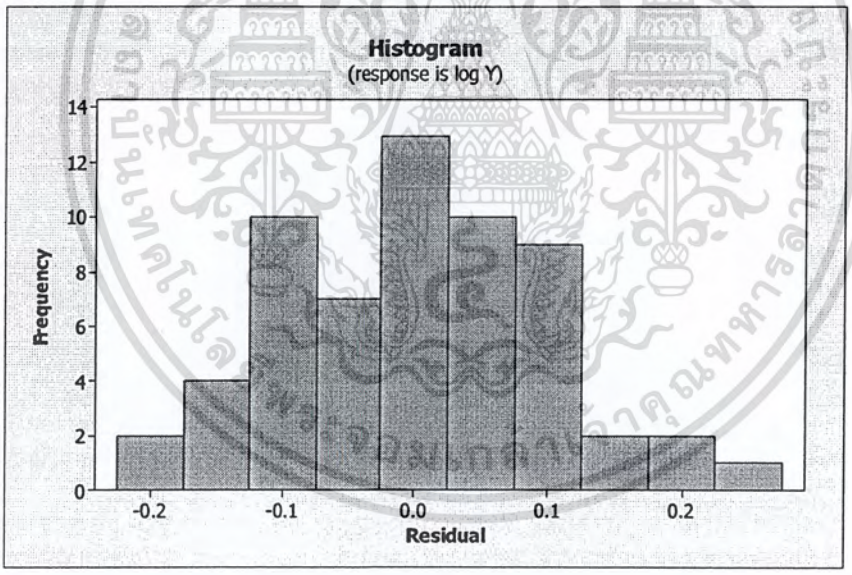
1. การตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติของส่วนตกค้าง

พิจารณาจากรูปที่ 4.9 กราฟแสดงความน่าจะเป็นของส่วนตกค้างที่มีการแจกแจงแบบปกติ พบว่ากราฟมีลักษณะค่อนข้างจะเป็นเส้นตรง ดังนั้นส่วนตกค้างจึงมีการแจกแจงแบบปกติ และจากรูปที่ 4.10 พบว่าพื้นที่กราฟมีลักษณะคล้ายเส้นโค้งรูประฆังคว่ำ และค่อนข้างสมมาตร จึงสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟความน่าจะเป็นที่มีการแจกแจงแบบปกติในการทดสอบสมมติฐานรูปแบบ Full Quadratic ของข้อมูลที่แปลงค่า

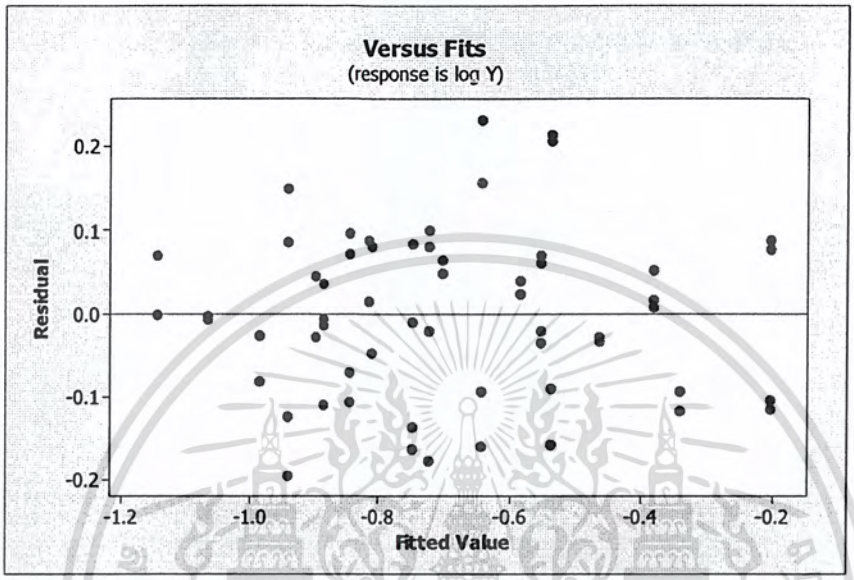


รูปที่ 4.10 ฮิสโตแกรมแสดงความน่าจะเป็นของค่าส่วนตกค้างในการทดสอบสมมติฐานรูปแบบ Full Quadratic ของข้อมูลที่แปลงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การตรวจสอบความแปรปรวนของส่วนตกค้างมีค่าคงที่

พิจารณาจากรูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวน พบว่าลักษณะของกราฟมีรูปแบบที่ไม่แน่นอน ความแปรปรวนของส่วนตกค้างจึงมีค่าคงที่



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างส่วนตกค้างและค่าความชื้นในกระดาษฉนวน ในการทดสอบสมมติฐานรูปแบบ Full Quadratic ของข้อมูลที่แปลงค่า

จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีพื้นผิวตอบสนอง ซึ่งได้ตารางวิเคราะห์ความแปรปรวนของการถดถอย กราฟแสดงความสัมพันธ์ และสัมประสิทธิ์ของการถดถอยแบบ Full Quadratic ออกมาดังนี้

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ความแปรปรวนในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	5	3.42452	0.684904	63.72	0.000
Linear	2	2.87542	0.245061	22.80	0.000
Square	2	0.40939	0.204697	19.04	0.000
Interaction	1	0.13970	0.139704	13.00	0.001
Residual Error	5	0.58040	0.010748		
Lack-of-Fit	14	0.08017	0.005726	0.46	0.942
Pure Error	40	0.50024	0.012506		
Total	59	4.00492			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 การวิเคราะห์สัมประสิทธิ์ของการถดถอยในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า

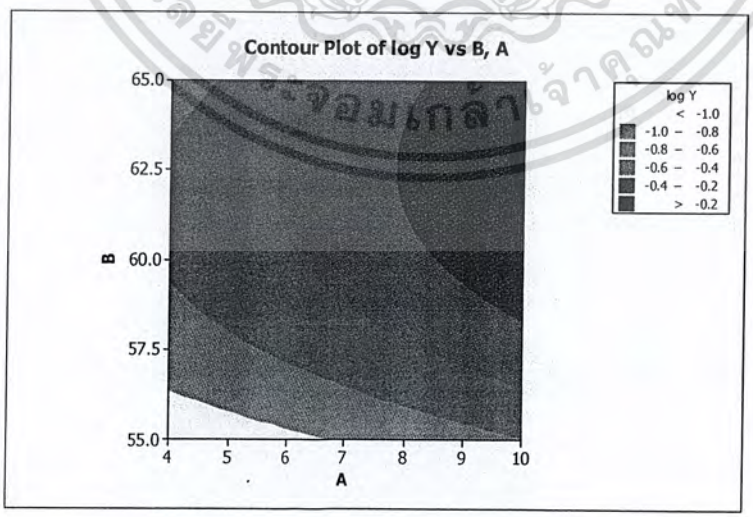
Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-35.3670	5.65230	-6.257	0.000
A	-0.2735	0.10783	-2.536	0.014
B	1.1398	0.18641	6.115	0.000
AA	0.0009	0.00355	0.248	0.805
BB	-0.0095	0.00154	-6.167	0.000
AB	0.0058	0.00160	3.605	0.001

จากสัมประสิทธิ์ของการถดถอยแบบ Full Quadratic ในตารางที่ 4.4 สามารถนำมาสร้างสมการถดถอย (สมการต้นแบบ) ได้ดังสมการที่ 4.1 และมีสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2 เท่ากับ 85.51% ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) เท่ากับ 84.17%

$$\log Y = -35.3670 - 0.2735A + 1.1398B - 0.0095B^2 + 0.0058AB \quad (4.1)$$

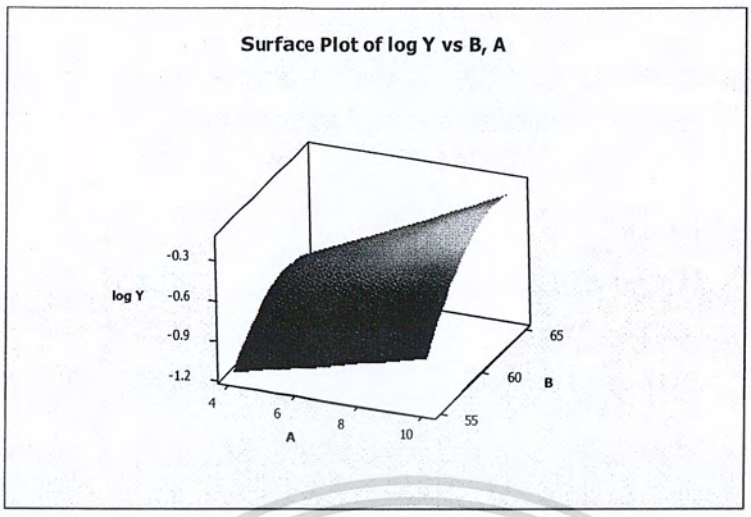
กำหนดให้ log Y คือ ความชื้นในฉนวน

พิจารณาค่า Lack of Fit ในตารางที่ 4.3 เพื่อเป็นการทดสอบว่ารูปแบบการถดถอยที่ใช้เหมาะสมกับข้อมูลหรือไม่ พบว่า ค่า P มีค่าเท่ากับ 0.942 ซึ่งมากกว่าค่า α นั่นแสดงว่ารูปแบบสมการถดถอยแบบ Full Quadratic ที่ได้มีความเหมาะสมกับข้อมูล



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงโครงร่าง (Contour Plot) ของปัจจัยเทียบกับค่าความชื้นในกระดาษฉนวน ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 พื้นผิวตอบสนองในรูปแบบของกราฟสามมิติ ในการวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนองของข้อมูลที่แปลงค่า

4.3 การวิเคราะห์ต้นทุน

ถ้าไม่มีการนำหม้อแปลงไฟฟ้าไปอบใหม่อีกรอบก็จะสามารถลดต้นทุนในการผลิตได้ โดยพิจารณาจากข้อมูลการอบใหม่ในปี พ.ศ. 2552 และ พ.ศ. 2553 สามารถนำมาวิเคราะห์ต้นทุนได้ดังนี้

จำนวนคนที่ใช้ในการอบใหม่	2 คน
จำนวนชั่วโมงที่ใช้ในการอบใหม่	24 ชั่วโมงต่อครั้ง
ค่าแรงพนักงาน	500 บาทต่อชั่วโมงต่อคน
พลังงานไฟฟ้าที่ใช้	400 kW
ค่าไฟฟ้า	4 บาทต่อหน่วย
ในการผลิตหม้อแปลงไฟฟ้า ใช้งบประมาณเงินกู้	50 ล้านบาทต่อลูก

ค่าแรงงาน = จำนวนคน × จำนวนชั่วโมงที่อบ × ค่าแรง

= 2 คน × 24 ชั่วโมง × 500 บาท/ชั่วโมง/คน

= 24,000 บาท

ค่าไฟฟ้า = พลังงานที่ใช้ × จำนวนชั่วโมงที่อบ × ค่าไฟฟ้า

= 400 kW × 24 ชั่วโมง × 4 บาทต่อหน่วย

= 38,400 บาท

ปี 2552 มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องทำการอบใหม่ทั้งหมด 10 ลูก

อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของโรงงาน (MLR) 6.5% ต่อปี (ปี 2552)

ค่าดอกเบี้ย หากไม่ต้องทำการอบใหม่จะประหยัดค่าดอกเบี้ย 1 วัน (24 ชั่วโมง)

กู้เงิน 100 บาท ต้องจ่ายคืน 106.5 บาท

กู้เงิน 50,000,000 บาท ต้องจ่ายคืน $\frac{50,000,000 \times 106.5}{100}$ = 53,250,000 บาท

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิดเป็นดอกเบี้ย 3,250,000 บาท/ปี = 8,904 บาทต่อวัน

คาดว่าทางบริษัทสามารถลดต้นทุนลงได้ = 24,000 + 38,400 + 8,904

= 71,304 บาทต่อลูก

เพราะฉะนั้นในปี 2552 คาดว่าสามารถลดต้นทุนลงได้ = 71,304 × 10

= 713,040 บาทต่อปี

ปี 2553 มีหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องทำการอบใหม่ทั้งหมด 9 ลูก

อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ของโรงงาน (MLR) 6.75% ต่อปี (ปี 2553)

ค่าดอกเบี้ย หากไม่ต้องทำการอบใหม่จะประหยัดค่าดอกเบี้ย 1 วัน (24 ชั่วโมง)

กู้เงิน 100 บาท ต้องจ่ายคืน 106.75 บาท

กู้เงิน 50,000,000 บาท ต้องจ่ายคืน $\frac{50,000,000 \times 106.75}{100}$ = 53,375,000 บาท

คิดเป็นดอกเบี้ย 3,375,000 บาท/ปี = 9,246 บาท/วัน

เพราะฉะนั้น คาดว่าทางบริษัทสามารถลดต้นทุนลงได้ = 24,000 + 38,400 + 9,246

= 71,646 บาทต่อลูก

เพราะฉะนั้นในปี 2553 คาดว่าสามารถลดต้นทุนลงได้ = 71,646 × 9

= 644,814 บาทต่อปี

จากการวิเคราะห์ต้นทุนในปี 2552 มีการนำหม้อแปลงไฟฟ้าไปอบใหม่ 10 ลูก และปี 2553 อบใหม่ 9 ลูก สามารถสรุปต้นทุนที่คาดว่าจะลดได้จากการลดจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าไปอบใหม่ ได้ดังตารางที่ 4.5 และ ตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.5 การวิเคราะห์ต้นทุนปี 2552

ต้นทุน	บาทต่อลูก
ค่าแรงงาน	24,000
ค่าไฟฟ้า	38,400
ดอกเบี้ย	8,904
คาดว่าลดต้นทุนได้	71,304

ตารางที่ 4.6 การวิเคราะห์ต้นทุนปี 2553

ต้นทุน	บาทต่อลูก
ค่าแรงงาน	24,000
ค่าไฟฟ้า	38,400
ดอกเบี้ย	9,246
คาดว่าลดต้นทุนได้	71,646

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

ปริญญานิพนธ์เรื่องการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในขั้นตอน Re-tightening และ Tanking ได้ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปทั่วไป (General Full Factorial) เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความชื้นในกระดาษฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าและหาปริมาณความชื้นในกระดาษฉนวน เพื่อนำมาวิเคราะห์หาเวลาที่เหมาะสมในขั้นตอนการทำ Re-tightening และ Tanking โดยสามารถเพิ่มเวลาในขั้นตอนนี้ เพื่อลดจำนวนหม้อแปลงไฟฟ้าที่ต้องนำไปอบใหม่ ซึ่งคาดว่าจะทำให้สามารถลดต้นทุนในการผลิตของบริษัทลงได้ ซึ่งจากการออกแบบการทดลอง ดำเนินการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม MINITAB 16 ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ปัจจัยที่ส่งผลต่อความชื้นในเนื้อฉนวนหม้อแปลงไฟฟ้าในขั้นตอน Re-tightening และ Tanking คือ ความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศและระยะเวลาในการขันน็อต จากนั้นนำไปวิเคราะห์พื้นผิวตอบสนอง (Response Surface) และสร้างสมการถดถอยแบบกำลังสอง (Quadratic Regression Equation) โดยสมการที่ได้คือ คือ $\log Y = -35.3670 - 0.2735A + 1.1398B - 0.0095B^2 + 0.0058AB$ กำหนดให้ y คือ ความชื้นในเนื้อฉนวน (เปอร์เซ็นต์) A คือ ระยะเวลาในการขันน็อต (ชั่วโมง) และ B คือ ความชื้นสัมพันธ์ในอากาศ (เปอร์เซ็นต์) ให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 85.51% และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2_{adj}) เท่ากับ 84.17% ถ้าบริษัทนำเอาสมการนี้ไปใช้ จะทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการอบใหม่ได้ ซึ่งคาดว่าสามารถลดต้นทุนให้บริษัทได้ประมาณ 70,000 บาทต่อลูก หรือประมาณ 600,000-700,000 บาทต่อปี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองครอบคลุมช่วงค่าความชื้นสัมพัทธ์ตั้งแต่ 55-65% ซึ่งไม่ได้ครอบคลุมไปถึงช่วงของฤดูฝนที่มีค่าความชื้นสัมพัทธ์สูงประมาณ 75% ดังนั้นจึงควรทำการทดลองให้ครอบคลุมค่าความชื้นสัมพัทธ์ในช่วงดังกล่าวด้วยสำหรับการวิจัยต่อไป

2. ถ้าบริษัทสามารถทำห้อง Re-tightening และ Tanking ควบคุมความชื้นในกระบวนการ Re-tightening และ Tanking บริษัทก็จะสามารถยืดเวลาในกระบวนการนี้ได้ เพราะปัจจุบันกระบวนการนี้กระทำในห้องเปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ทิพสุคนธ์ มงคลสาตร์, ธนา ฉัตรบูรภานันท์ และศุภามน ศิริมหาธรรม. "การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ, ความหนา และ เวลา ที่มีผลต่อการอบขดลวดในหม้อแปลงไฟฟ้า." ปริญญานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, 2553.

นพรัตน์ กระต่ายทอง. "การแปลงข้อมูลให้มีการแจกแจงแบบปกติ." วิทยานิพนธ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542

บริษัท โซลูชั่นเซ็นเตอร์ จำกัด. "คู่มือการใช้ Minitab หัวข้อ Design of Experiments." ม.ป.ป.

ประไพศรี สุทัศน์ ณ อยุธยา และพงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์. "การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง." กรุงเทพฯ: ท้อป, 2551.

ปารเมศ ชุติมา. "การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม." กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.

รังสรรค์ เนียมสนิท. "การวางแผนการทดลอง." ครั้งที่ 2. ขอนแก่น: คลังนานาวิทยา, 2541.

โสภิดา ท้วมมี และอรรถกร เก่งพล. "การลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตพลาสติกแผ่นโดยการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง." วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (2551): 1-10.

CIGRE 12.18. "Guidelines for life management techniques for power transformers." Draft final report. 2002.

Höhlein, I. and A.J. Kachler. "Aging of Cellulose at Transformer Service Temperatures. Part 2. Influence of Moisture and Temperature on Degree of Polymerization and Formation of Furanic Compounds in Free-Breathing Systems." IEEE Electrical Insulation Magazine. 2005.

Howe, A.F. "Diffusion of moisture through power-transformer insulation." PROC. IEE (1978): 978-986.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้