สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องจักรผลิตเทียนไขอัตโนมัติ

Project Planning of Automatic Candle Making Machine

T042427

นางสาวปถวี คงสาธิตพร

Miss Patawee Kongsatitporn

นางสาวปัทมา กรีสุธา

Miss Pattama Kreesutha

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 42427
วัน, เดือน, ปี 23 พ.ค. 2545

.b.....
.i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องจักรผลิตเทียนไขอัตโนมัติ		
	Project Planning of Automatic Candle Making Machine		
นักศึกษา	นางสาวปถวี คงสาธิตพร	รหัสประจำตัว	40010423
	นางสาวปัทมา กรีสุธา	รหัสประจำตัว	40010456
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ		
ปีการศึกษา	2543		

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์

(อ.เอกพงน์ ตันตราภิวัฒน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องจักรผลิตเทียนไขอัตโนมัติ
นักศึกษา	นางสาว ปถวี คงสาธิตพร
	นางสาว ปัทมา กรีสุธา
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต
	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
สาขาวิชา	วิศวกรรมอุตสาหการ
ปีการศึกษา	2543
อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญานิพนธ์	อ. เอกพจน์ ตันตราภิวัฒน์

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการศึกษา, วิเคราะห์และภาคปฏิบัติที่เกี่ยวกับ การศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องจักรผลิตเทียนไขอัตโนมัติ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการสร้างเครื่องจักรจริงในอนาคต ตามหลักการที่ได้กล่าวไว้ในตัวปริญญานิพนธ์

ในส่วนของปริญญานิพนธ์ ได้ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีการออกแบบการทดลอง และการออกแบบเครื่องจักรกล เพื่อใช้เป็นแนวทางนำไปสู่การทดลองหาค่าตัวแปรที่มีอิทธิพลต่อการผลิตเทียน โดยนำผลการทดลองที่ได้ไปวิเคราะห์หาสาเหตุและความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องจักรกล ซึ่งในส่วนของการออกแบบเครื่องจักรจริงจะนำข้อมูลจากการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น มาประกอบการออกแบบแบบจำลอง

ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวกับการออกแบบได้นำความรู้ ในเรื่อง Design And Analysis Of Experiments มาใช้ซึ่งจะมีส่วนของ การวิเคราะห์และคำนวณทางสถิติต่างๆมาใช้เป็นเครื่องมือ แสดงผลการทดลองออกมา และในด้านการออกแบบเครื่องจักรกล ได้ใช้ความรู้ในเรื่อง Machine Designซึ่งจะมีส่วนวิเคราะห์ผลในด้าน กลศาสตร์และพลศาสตร์ มาใช้ประยุกต์กับการสร้างเครื่องจักร แล้วใช้ความรู้ในด้าน AUTOMATION มาปรับปรุงและแก้ไขเครื่องจักรให้ทำงานได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis title	Project Planning Of Automatic Candle Making Machine
Student	Miss Patawee Kongsatitporn
	Miss Pattama Kreesutha
Degree	Bechelor of Engineering
	King Mongkut' s Institute of Technology Ladkrabang
Major	Industrial Engineer
Year	2000
Thesis Advisor	Mr. Akapot Tantrapiwat

ABSTRACT

This Thesis presents the study, analysis and practice about Project Planning of Automatic Candle Making Machine which conduct to invent the verity in the future, according to the maxim that is contained inside.

The thesis contains the study of Design of Experiment (DOE) and Machine Design theory leading to the experiment of factor determination by taking the result to the analysis in causes and feasibility as a component of model design.

The section of designing theory consists DOE which about statistical calculation as a tool to perform the result of experiment. In this section of Machine Design, it contains the Machine Design knowledge that involves on mechanical analysis to be applied on machine invention. In addition, the automation knowledge is used to improve and develop machine to be realistic.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของบุคคลหลายท่าน ทางผู้จัดทำจึงขอขอบคุณ

ขอขอบคุณสมาชิกทุกคนในครอบครัว ที่เป็นกำลังและห่วงใยมาตลอดทั้งชีวิต

ขอขอบคุณพี่เป้า อ. เอกพจน์ ตันตราภิวัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยหาอุปกรณ์ประกอบการทำปริญญานิพนธ์ ให้คำแนะนำต่างๆ ตลอดจนตรวจทานแก้ไขปริญญานิพนธ์จนสมบูรณ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ วัฒน์, ตั้ม เพื่อนที่ช่วยวาด CAD จนได้รูปออกมาอย่างสวยงาม

ขอขอบคุณ ครอบครัว วิศวกรรมอุตสาหการลาดกระบัง อันประกอบไปด้วย

อาจารย์พรศักดิ์ อาจารย์สรรพสิทธิ์ อาจารย์พลชัย อาจารย์สกนธ์ อาจารย์อุดม อาจารย์เอกพจน์ อาจารย์วิภู ที่เป็นทั้งอาจารย์และพี่ที่หวังดีและจริงใจเสมอมา

พี่นาฏ พี่ที่แสนดีรอยยิ้มของพี่ทำให้น้องๆมีกำลังใจอีกเยอะเลย

น้องๆ ที่แวะเวียนมาถามไถ่และป่วน น้องๆทำให้ภาคเรามีชีวิตชีวามาก

และเพื่อนๆที่แสนดีเสมอไม่ว่าเวลาจะเปลี่ยนไปก็ไม่ทำให้ความของเราเป็นเพื่อนเปลี่ยนแปลง

และสุดท้ายขอบคุณคู่โปรเจค ที่สู้,ให้กำลังใจและปลอบโยนกันเองยามที่เราท้อแท้ และยืนหยัดที่จะทำโปรเจคนี้จนสำเร็จออกมาได้

ปณวี คงสาธิตพร

ปัทมา กรีสุธา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	จ
สารบัญรูปภาพ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 จุดมุ่งหมาย/วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 ขอบเขตการทำงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา	2
บทที่ 2 ทฤษฎี/หลักการ	3
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับสถิติประยุกต์	3
2.2 การออกแบบการทดลอง	9
2.3 การถ่ายเทความร้อน	30
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	31
3.1 การออกแบบวิธีการทดลอง	31
3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง	32
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	32
3.4 วิธีการทดลอง	33
3.5 ขั้นตอนการทดลอง	38
บทที่ 4 วิเคราะห์ผลการทดลอง	40
4.1 การวิเคราะห์การเทลงโมลด์	40
4.2 การวิเคราะห์ผลการเย็นตัว	43
4.3 การวิเคราะห์ผลการถอดโมลด์	46
4.4 การวิเคราะห์เทียนที่ได้จากการถอด	49
4.5 สรุปผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติและทฤษฎีการออกแบบการทดลอง	53
บทที่ 5 การประยุกต์ออกแบบเครื่องจักรทำเทียนไขอัตโนมัติ	55
5.1 แผนภูมิการไหลของการออกแบบ	55
5.2 แบบจำลอง	56
บทที่ 6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	66
6.1 สรุปผล	66
6.2 ข้อเสนอแนะ	67
บรรณานุกรม	68
ภาคผนวก	69

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการอธิบายการออกแบบสองตัวแปร	13
2.2 แสดงตาราง ANOVA สำหรับปัจจัยสองกรณี	13
2.3 แสดงวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง TWO-FACTOR ,การสังเกตการณ์ 1 ครั้งต่อหนึ่งเซลล์	14
2.4 แสดงลักษณะการออกแบบ 3 มิติ	15
2.5 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองผล THREE-FACTOR	15
2.6 แสดงค่าExpected Mean Square Derivation, Two-Factor Effects Model	28
2.7 แสดงค่า Expected Mean Square Derivation, Two-Factor Random Effects Model	29
2.8 แสดงค่าExpected Mean Square Derivation, Two-Factor Mixed Model	29
4.1 แสดงค่าต่างๆของอุณหภูมิที่ใช้ในการเทน้ำเทียนลงโมลด์	40
4.2 แสดงค่าต่างๆของเวลาที่ใช้ในการเทน้ำเทียนลงโมลด์	41
4.3 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของการเทน้ำเทียนลงโมลด์	43
4.4 แสดงค่าต่างๆของอุณหภูมิที่ใช้ในการเย็นตัวของแต่ละการทดลอง	44
4.5 แสดงค่าต่างๆของเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของแต่ละการทดลอง	44
4.6 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของการเย็นตัว	46
4.7 แสดงค่าต่างๆของอุณหภูมิในการถอดโมลด์ของแต่ละการทดลอง	46
4.8 แสดงค่าต่างๆของเวลาในการถอดโมลด์	47
4.9 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของการถอดโมลด์	49
4.10แสดงค่าต่างๆของน้ำหนักที่ได้จากเทียน	49
4.11 แสดงค่าต่างๆของความยาวที่ได้จากเทียน	50
4.12 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของเทียนที่ได้	52
4.13 สรุปผลของกระบวนการทั้งหมด	53
4.14 สรุปผลของเทียนต่อน้ำหนักและความยาว	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงถึงการได้มาซึ่งข้อมูลทางสถิติ 3
รูปที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบถึงอิทธิพลทั้งเชิงเส้นตรงและไม่ใช่เส้นตรงของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ที่มีต่อข้อมูล 5
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะสมบัติของข้อมูลในแต่ละสภาวการณ์ 5
รูปที่ 2.4 แสดงความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูล 6
รูปที่ 2.5 แบบจำลองทั่วๆไปของกระบวนการหรือระบบ 9
รูปที่ 2.6 อธิบายผลกระทบของ Interaction 12
รูปที่ 2.7 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบที่มีผลต่อ interaction ใน 2^3 dedign 17
รูปที่ 3.1 ทำความสะอาดโมลด์ 33
รูปที่ 3.2 โมลด์ร้อยด้ายเรียบร้อยเตรียมเทน้ำเทียน 33
รูปที่ 3.3 ส่วนผสมต่างๆ 34
รูปที่ 3.4 ผสมส่วนผสมต่างๆลงในหม้อต้ม 34
รูปที่ 3.5 หลอมน้ำเทียนจนเป็นเนื้อเดียวกัน 34
รูปที่ 3.6 แสดงการวัดอุณหภูมิขณะทำการหลอมเทียน 35
รูปที่ 3.7 แสดงการเทน้ำก่อนลงในโมลด์ 35
รูปที่ 3.8 รอเทียนแข็งตัว 36
รูปที่ 3.9 ตัดด้ายออกเพื่อทำการถอด 36
รูปที่ 3.10 เป่าลมร้อนเพื่อให้เทียนถอดง่าย 37
รูปที่ 3.11 ดันเทียนออกจากโมลด์ 37
รูปที่ 3.12 เทียนสำเร็จ 37
รูปที่ 5.1 แสดงแผนภูมิการไหลของการออกแบบ 55
รูปที่ 5.2 แสดงแบบจำลองของเครื่องจักร 56
รูปที่ 5.3 แสดงกลไกของการเปิด-ปิดฐานใส่ด้าย 57
รูปที่ 5.4 แสดงแท้งค์หลอมเหลวส่วนผสม (Melting Pot) 58
รูปที่ 5.5 แสดงภาพภายในของหม้อต้ม(Melting Pot) 59
รูปที่ 5.6 แสดงตัวใส่ด้าย 60
รูปที่ 5.7 แสดงภาพ 3 มิติของตัวใส่ด้าย 61
รูปที่ 5.8 แสดงระบบลมเย็น 62
รูปที่ 5.9 แสดงระบบลมร้อน 63
รูปที่ 5.10 แสดงระบบกระทุ้งเทียนออกจากโมลด์ 64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ (Introduction)

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา (Statement and Significant of Problem)

ในปัจจุบันความต้องการทางการตลาดของเทียนไขได้เพิ่มมากขึ้น เครื่องจักรอัตโนมัติจึงเข้ามามีบทบาทสำคัญที่ใช้ผลิตสินค้าให้ทันกับความต้องการของท้องตลาด เหตุผลดังกล่าวเหล่านี้จึงเป็นที่มาของ "ศึกษาความเป็นไปได้ในการสร้างเครื่องจักรอัตโนมัติ"

ซึ่งการผลิตสินค้าใดชนิดหนึ่ง ควรจะมีพื้นฐานความรู้ที่จะนำไปสู่กระบวนการผลิตจริง การทำการทดลองจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น ที่จะนำไปใช้ในกระบวนการแต่ละกระบวนการที่จะนำไปสู่การผลิตสินค้าให้ได้คุณภาพดีตามไปด้วย ในเบื้องต้นการทดลองจึงเป็นสิ่งที่สำคัญ เมื่อได้ผลการทดลองที่จะนำไปสู่การผลิตจริงแล้ว ก็สามารถทำให้มุ่งสู่เป้าหมายหลักคือ การสร้างเครื่องจักรอัตโนมัติ โดยการออกแบบเครื่องจักรเป็นส่วนสำคัญที่สุดของการสร้างและทำให้เครื่องจักรผลิตเทียนได้อย่างอัตโนมัติเช่นกัน

1.2 จุดมุ่งหมาย / วัตถุประสงค์ของการศึกษา (Goal and Objectives)

1.2.1 ศึกษาและสืบค้นข้อมูลเบื้องต้นและความรู้ในด้านวิทยาศาสตร์เพื่อนำมาใช้ในการผลิตเทียนได้ เช่น ส่วนผสม, กระบวนการผลิต, เครื่องจักร, ข้อดีข้อเสียและข้อจำกัดในส่วนต่างๆได้

1.2.2 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเทียนและระบบการทำงานได้ เช่น อัตราส่วนผสมของสารแต่ละชนิด, ผลของเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในการเย็นตัว เป็นต้น

1.2.3 นำข้อมูลที่ได้จากผลการทดลองมาออกแบบทำแบบจำลองระบบและเครื่องจักรทำเทียนไขอัตโนมัติ

1.3 ขอบเขตของการศึกษา (Scope of the Study)

ทำการสืบค้นข้อมูลการทำเทียนไขในด้านต่างๆ เช่น วัตถุดิบ, ส่วนผสม, กระบวนการผลิตรวมถึงเครื่องจักรและข้อจำกัดต่างๆเพื่อนำมาทดลองทำเทียนไขโดยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม แล้วนำมาใช้ในกระบวนการผลิตจริง โดยประกอบด้วยการเตรียมวัตถุดิบส่วนผสมและสูตรของเทียนไข, การหล่อ, ชนิดและขนาดของแบบหล่อ (molds), ระบบหล่อเย็น, การแกะแบบ เป็นต้น แล้วจึงนำมาหาข้อสรุปของเทียนชนิดต่างๆที่ได้จากการทดลอง เพื่อใช้ทำแบบจำลอง (Model) ของเครื่องจักรในระบบส่วนประกอบต่างๆที่ใช้ในกระบวนการผลิตจริง แล้วหารูปแบบที่เหมาะสมที่ใช้ทำเครื่องจักรผลิตเทียนไขอัตโนมัติจริงในอนาคตได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา (Advantage from Study)

1.4.1 พัฒนาและสร้างเครื่องจักรอัตโนมัติที่ใช้ในการผลิตเทียนไขที่จะเป็นประโยชน์โดยตรงต่อภาครัฐบาลและเอกชน

1.4.2 สร้างทักษะในการวางแผนและดำเนินงานและโครงการที่ต้องเป็นไปอย่างต่อเนื่อง

1.4.4 พัฒนาความรู้ที่เกิดจากการทดลอง , ศึกษาในส่วนที่ลึกและแคบลง ทำให้นำไปสู่การวิจัยที่แท้จริง

1.4.4 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการศึกษาด้านอื่นๆ ซึ่งต้องมีการปฏิบัติจริงควบคู่กันไป

1.4.5 เพิ่มประสบการณ์ในการดำเนินงานที่นำการประยุกต์ใช้ในรูปแบบสถิติประยุกต์

1.4.6 ส่งเสริมความคิดสร้างสรรค์ในการทำงาน

1.4.7 ฝึกทักษะการทำงานเป็นทีมและเป็นระบบ ภายใต้ความกดดัน

1.4.8 ฝึกฝนความละเอียดรอบคอบในการระคมความคิดและปรึกษาหารือ

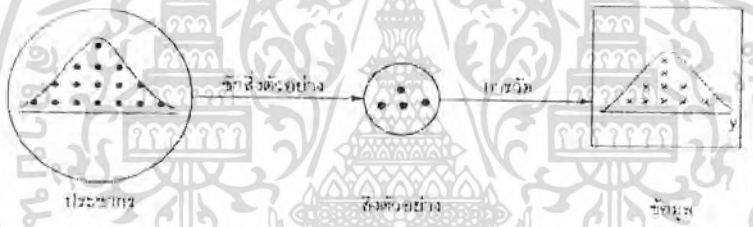
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎี / หลักการ

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับสถิติประยุกต์

2.1.1 ลักษณะสมบัติของข้อมูล

ผู้วิเคราะห์จะต้องมีความเข้าใจในเบื้องต้นก่อนว่าลักษณะสมบัติของข้อมูลเกิดมาจากสาเหตุอะไร หากมีการนิยามประชากรอย่างถูกต้องแล้ว ข้อมูลที่ได้มาจากการชักสิ่งตัวอย่างจากประชากรนั้น จะต้องมีลักษณะสมบัติที่เป็นค่าไม่เท่ากัน แต่มีอิสระต่อกัน โดยมีแนวโน้มเข้าหาค่าค่าหนึ่งที่ควรจะเป็น ด้วยตัวแบบที่คงที่เสมอ ทั้งนี้เพื่อให้สามารถตีความหมายผลของการวิเคราะห์ได้ และโดยสรุปแล้วสามารถแสดงถึงที่มาของข้อมูลได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงถึงการได้มาซึ่งข้อมูลทางสถิติ

จากรูปที่ 2.1 จะพบว่าข้อมูลที่ได้จากประชากรหนึ่งๆ จะมีความเบี่ยงเบน ที่มีลักษณะสมบัติคล้ายๆกับความเบี่ยงเบนของประชากร กล่าวคือ จะประกอบด้วย

1. ลักษณะสมบัติที่ข้อมูลอยู่ภายใต้ความไม่แน่นอน ที่เป็นอิสระต่อกัน
2. ข้อมูลจะมีแนวโน้มลู่เข้าหาค่าค่าหนึ่งซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็นตามลักษณะสมบัติของประชากร
3. รูปแบบความเบี่ยงเบนของข้อมูลจะมีรูปแบบที่คงที่

ดังนั้น อาจจะสรุปลักษณะสมบัติของข้อมูลทางสถิติ (สมมติให้เป็น y) ได้ว่า

$$y = \text{ค่าที่ควรจะเป็น} + \text{ค่าความเบี่ยงเบน} \qquad (2.1)$$

ในทางวิศวกรรม "ค่าที่ควรจะเป็น" จะหมายถึงค่าสัญญาณ (Signal) ที่ได้มาจากการตั้ง (Setting) พารามิเตอร์ของกระบวนการหรือคือ ค่าจริง ของงานที่ทำการวัด และ "ค่าความเบี่ยงเบน" จะหมายถึงคลื่นรบกวน (Noise) ที่เกิดจากปัจจัยที่มิได้รับการควบคุมในขณะรวบรวมข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับทางสถิติ "ค่าที่ควรจะเป็น" นี้ จะสื่อความหมายถึงค่าเฉลี่ยของประชากรภายใต้ค่าตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ค่าหนึ่งๆในขณะรวบรวมข้อมูล (ให้แทนด้วย μ_i) และ"ค่าความเบี่ยงเบน"จะสื่อความหมายถึงค่าความคลาดเคลื่อนในข้อมูล (ให้ได้ด้วยค่า ε)

ดังนั้นอาจแสดงสารสนเทศในข้อมูลตามสมการที่ (2.1) ได้ด้วยความหมายทางคณิตศาสตร์ คือ

$$y = \mu_i + \varepsilon \qquad (2.2)$$

ถ้าให้ $\mu_i = \mu + \tau_i$

โดยที่ $\tau_i = \mu_i - \mu$ คือ ค่าเบี่ยงเบนของค่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ หรือ อิทธิพลของตัวแปรที่ได้รับการควบคุม (Controlled Effect)

อาจเขียนสมการที่ (2.2) ได้ใหม่ว่า

$$y = \mu_i + \tau_i + \varepsilon \qquad (2.3)$$

จากสมการที่ (2.3) จึงพบว่า หากมีการเก็บรวบรวมข้อมูลจากประชากรภายใต้การควบคุม กล่าวคือ ไม่มีการปรับค่าตั้งของพารามิเตอร์ของกระบวนการแล้ว จะทำให้ค่าความเบี่ยงเบนจากการปรับค่า (τ_i) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น อาจจะยุบสมการที่ (2.3) ได้เป็น

$$y = \mu + \varepsilon \qquad (2.4)$$

สำหรับค่าความเบี่ยงเบนที่แทนได้ด้วย ε (ในทางวิศวกรรม คือ คลื่นรบกวน) นี้ จะเป็นผลที่ได้รับจากสิ่งที่ไม่ได้รับการควบคุมในขณะรวบรวมข้อมูล ซึ่งจะประกอบด้วย (noise, z)

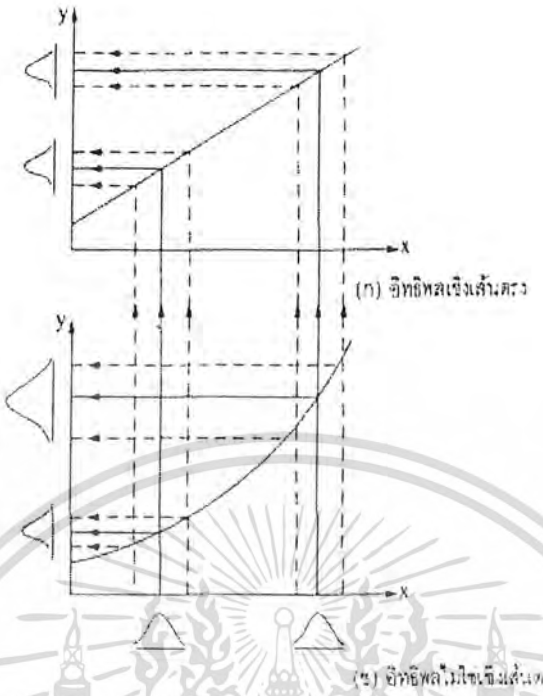
1. กระบวนการ หรือประชากร ซึ่งจะประกอบด้วยอิทธิพลจากวัตถุดิบ เครื่องจักร พนักงาน และวิธีการ
2. ระบบการวัด ซึ่งประกอบด้วยพนักงานวัดและอุปกรณ์วัด
3. ระบบการชักสิ่งตัวอย่างซึ่งประกอบด้วยขนาดของสิ่งตัวอย่างและความถี่ของการชักสิ่งตัวอย่าง

ในกรณีที่มีการรวบรวมข้อมูลจากประชากรภายใต้การควบคุมแล้ว ความเบี่ยงเบนที่เกิดขึ้นในข้อมูลนี้จะเกิดขึ้นจากปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยธรรมชาติในองค์ประกอบทั้ง 3 ข้อข้างต้นนั้น โดยข้อมูลภายใต้การควบคุมนี้ จะมีลักษณะความเบี่ยงเบนอยู่ในรูปแบบที่สามารถทำนายได้ (Predictable Pattern)

อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่มิได้รวบรวมข้อมูลภายใต้การควบคุม(เป็นต้นว่า เครื่องมือวัดมิได้ทำการสอบเทียบหรือปรับเทียบมาก่อน พนักงานทำงานผิดพลาดผู้รวบรวมข้อมูลทำการบันทึกผิดหรือพารามิเตอร์ของกระบวนการมีการเลื่อนไปจากค่าที่ตั้งไว้จะมีผลทำให้ข้อมูลมีรูปแบบของความเบี่ยงเบนที่ไม่สามารถทำนายได้ (Unpredictable Pattern)

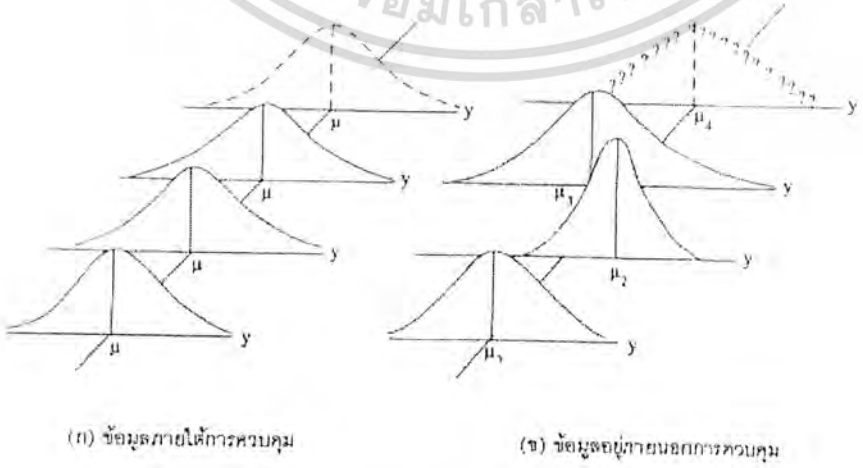
ในกรณีที่ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มีอิทธิพลเชิงเส้นตรง (Linear Effect) ต่อข้อมูล แล้ว รูปแบบของความเบี่ยงเบนของข้อมูลจะมีค่าที่ควรจะเป็น (μ_i) แปรเปลี่ยนไป และไม่สามารถทำนายได้ แต่ขนาดของความเบี่ยงเบนจะยังคงที่เสมอ และสามารถคาดเดาได้ กล่าวคือ มีขนาดเท่ากับอิทธิพลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยธรรมชาติ ดังรูปที่ 2.2 ก) สำหรับในกรณีที่ปัจจัยที่สามารถควบคุมได้มีอิทธิพลไม่ใช่เชิงเส้นตรงต่อข้อมูลแล้ว รูปแบบของความเบี่ยงเบนของข้อมูลจะมีทั้งค่าที่ควรจะเป็น (μ_i) และขนาดของความเบี่ยงเบน (ε) ที่ไม่สามารถทำนายได้ทั้งคู่ ดังรูปที่ 2.2 ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงเปรียบเทียบถึงอิทธิพลทั้งเชิงเส้นตรงและไม่ใช่เชิงเส้นตรงของปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ที่มีต่อข้อมูล

ดังนั้น ก่อนจะมีการวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิเคราะห์มีความจำเป็นต้องพิจารณาก่อนเสมอว่าลักษณะสมบัติของข้อมูลที่พิจารณาเป็นประการใด โดยข้อมูลที่มีคุณภาพสำหรับการวิเคราะห์จะต้องเป็นข้อมูลภายใต้กระบวนการควบคุมในขณะที่กระบวนการอยู่ภายนอกการควบคุมนั้นจะถือเป็นข้อมูลที่ไร้คุณภาพไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ เนื่องจากมีรูปแบบที่ไม่สามารถทำนายได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.3

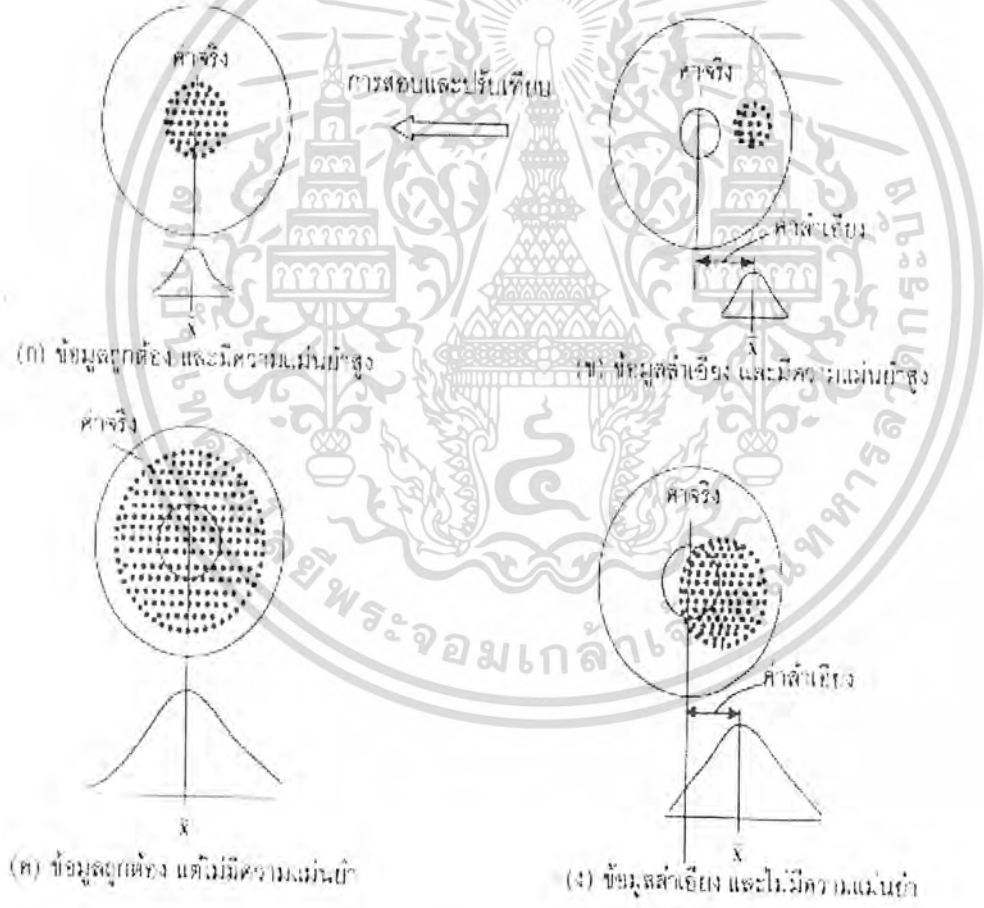


รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะสมบัติของข้อมูลในแต่ละสภาวการณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ความถูกต้องและความแม่นยำของข้อมูล

ข้อมูลในทางสถิติจะอยู่ภายใต้คุณสมบัติความไม่เท่ากันเสมอ โดยจะวัดขนาดของความไม่เท่ากันด้วยความคลาดเคลื่อน (Error) ซึ่งจะสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนโดยธรรมชาติหรือความคลาดเคลื่อนเนื่องจากการสุ่ม (Random Error) และความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ (Systematic Error) โดยความคลาดเคลื่อนโดยธรรมชาติ จะหมายถึงความผันแปรของข้อมูลรอบค่าที่ควรจะเป็นและจะเรียกความเบี่ยงเบนของค่าคงที่ควรจะเป็นจากค่าจริงว่า ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ ในการศึกษาความผันแปรนี้ โดยจะเรียกขนาดของความผันแปร ซึ่งหมายถึงความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) นี้ว่า "ความแม่นยำ (Precision)" โดยข้อมูลใดยิ่งมีความผันแปรน้อย ก็อาจกล่าวได้ว่า ข้อมูลชุดนั้นมีความแม่นยำสูง(High Precision) และจะเรียกความเบี่ยงเบนของค่าที่ควรเป็นของข้อมูลชุดนั้นที่เบี่ยงไปจากค่ามาตรฐานหรือค่าที่แท้จริงว่า "ค่าลำเอียง (Bias)" โดยที่ถือว่า ข้อมูลจะมีความถูกต้อง(Accuracy)ก็เมื่อมีค่าลำเอียงเป็นศูนย์



รูปที่ 2.4 แสดงความถูกต้องและแม่นยำของข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.4 พบว่าข้อมูลที่มีคุณภาพสำหรับการวิเคราะห์ทางสถิติ จะต้องเป็นข้อมูลตามรูป (ก) คือข้อมูลมีความถูกต้องและมีความแม่นยำสูงเท่านั้น สำหรับในกรณี (ข) ข้อมูลมีความลำเอียง ซึ่งส่วนมากมักเกิดจากความเสื่อมของอุปกรณ์วัด ซึ่งจำเป็นต้องแก้ให้ถูกต้องด้วยการสอบและปรับเทียบ (Calibration) สำหรับในกรณี (ค) และ (ง) ซึ่งข้อมูลไม่มีความแม่นยำนั้น มีความจำเป็นที่จะต้องพิจารณาเปลี่ยนแปลงระบบการวัดเสียใหม่ให้มีความแม่นยำนั้น มีความจำเป็นที่จำต้องพิจารณาเปลี่ยนแปลงระบบการวัดเสียใหม่ให้มีความแม่นยำยิ่งขึ้น มิฉะนั้นจะไม่สามารถวิเคราะห์ทางสถิติได้

2.1.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

สารสนเทศเพื่อการตัดสินใจที่ผู้วิเคราะห์ต้องการสรุปจากข้อมูล ได้แก่ ค่าควรจะเป็น หรือสัญญาณจากข้อมูล ทั้งนี้เนื่องจากว่าค่าดังกล่าวแปรเปลี่ยนไปเพราะปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ ซึ่งสามารถทำให้ผู้วิเคราะห์ดำเนินการปฏิบัติการกับกระบวนการหรือประชากรได้ และเนื่องจากค่าที่ควรจะเป็นดังกล่าวนี้ จะเป็นค่าที่ข้อมูลมีแนวโน้มลู่เข้าหา ดังนั้น จึงเรียกลักษณะสมบัติประเภทนี้ของข้อมูลว่า "ค่าแนวโน้มสู่ศูนย์กลาง(Central Tendency)" ซึ่งสามารถวัดได้ด้วยสถิติ (Statistic) หลายตัวด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันเนื่องจากสามารถประยุกต์ใช้ได้มากมี 3 ตัวด้วยกันคือ ค่าเฉลี่ย(Average) ค่ามัธยฐาน (Median) และค่าฐานนิยม(Mode)

ในการวิเคราะห์คุณภาพของข้อมูลนั้น จะพิจารณาถึงขนาดของความเบี่ยงเบนที่เรียกว่า "การกระจาย(Dispersion)" นอกจากนี้ยังจำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงรูปทรงของรูปแบบความเบี่ยงเบนด้วย โดยคำนึงถึงลักษณะสมบัติ 2 ประการด้วยกันคือ ค่าความเบ้ (Skewness) และค่าความโด่ง(Kurtosis)ของข้อมูลการวิเคราะห์การกระจายของข้อมูล

2.1.3.1 พิสัย (Range)

โดยนิยามได้ว่า

$$R = X_{max} - X_{min} \tag{2.5}$$

เมื่อ R คือ ค่าพิสัย

X_{max}, X_{min} คือ ค่าที่สูงที่สุดและค่าที่ต่ำที่สุดของข้อมูลโดยลำดับ

โดยทั่วไปควรใช้พิสัยในการวัดความเบี่ยงเบนเมื่อข้อมูลไม่เกิน 10 ตัว

2.1.3.2 ความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์โดยเฉลี่ย (Mean Absolute Deviation)

คือการวัดค่าความเบี่ยงเบน (Deviation) ของข้อมูลแต่ละตัวจากค่าที่ควรจะเป็น

ดังนั้น ความเบี่ยงเบน = $\sum_{i=1}^{n}$ (y_i − ค่าที่ควรจะเป็น) (2.6)

"ค่าที่ควรจะเป็น"ที่นิยมใช้กันมากคือ ค่าเฉลี่ย ($\bar{y}$)

จะได้ ความเบี่ยงเบน = $\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})$ (2.7)

อย่างไรก็ดี ผลจากสมการที่ 2.7 จะมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ด้วยเหตุผลทางคณิตศาสตร์ที่มีปัญหาเรื่องเครื่องหมายบวกลบ มาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องแก้ไขปัญหาทางคณิตศาสตร์ด้วยวิธีการใช้เครื่องหมายสัมบูรณ์ (Absolute Value) หรือยกกำลังสอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น

$$\text{ความเบี่ยงเบนสัมบูรณ์โดยเฉลี่ย(MAD)} = \frac{\sum_{i=1}^{n} |y_i - \bar{y}|}{n} \qquad (2.8)$$

2.1.3.3 รากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square; RMS)

จากสมการที่ (2.6) จะหาค่าความเบี่ยงเบนกำลังสอง ที่เรียกว่า ผลรวมกำลังสอง (Sum of Square; SS) ได้

$$\text{ผลรวมกำลังสอง} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \text{ค่าที่ควรจะเป็น})^2$$

$$= \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2 \qquad (2.9)$$

จะได้

$$\text{ค่าเฉลี่ยกำลังสอง} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n} \qquad (2.10)$$

ดังนั้น

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n}} \qquad (2.11)$$

2.1.3.4 ความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; S)

$$\text{ความแปรปรวน (Variance)} = \frac{\text{ผลรวมกำลังสอง(SS)}}{\text{องศาแห่งความอิสระ(df)}} \qquad (2.12)$$

ในที่นี้

$$\text{ความแปรปรวน } (S^2) = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \qquad (2.13)$$

จะได้

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2}{n-1}} \qquad (2.14)$$

2.1.3.5 สัมประสิทธิ์แห่งความผันแปร (Coefficient of Variance)

ค่า COV มีความเหมาะสมกับการเปรียบเทียบการกระจายของข้อมูลภายใต้อิทธิพลแบบมิใช่เชิงเส้นตรงหรือกับข้อมูลที่จะทำการเปรียบเทียบกันด้วยฐานคะแนนที่ต่างกัน

$$\text{COV} = \frac{s}{y}\ 100\,\% \qquad (2.15)$$

ซึ่ง Taguchi ได้แนะนำให้ใช้ค่า COV นี้ในการวิเคราะห์การกระจายข้อมูล โดย ได้เสนอสถิติที่เป็นส่วนกลับของค่า COV เพื่อให้สอดคล้องกับหน่วยวัดทางวิศวกรรม และเรียกว่า "สัดส่วน Signal to Noise (S/N)"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.6 ดัชนีความสามารถ (Capability Index)

ตัวสถิติที่ใช้เป็นตัววัดความเบี่ยงเบนของข้อมูลจากประชากร เมื่อเทียบกับขนาดของความเบี่ยงเบนที่ยอมให้เกิดแล้ว เรียกว่า "ดัชนีแสดงความสามารถของกระบวนการ (Process Capability Index) หรือ C_p โดยนิยามได้ว่า

$$C_p = \frac{\text{ความเบี่ยงเบนที่ยอมให้เกิด}}{\text{ความเบี่ยงเบนของประชากร}} \qquad (2.16)$$

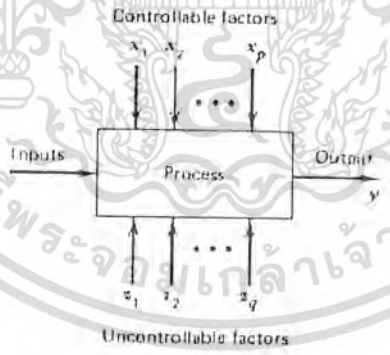
2.2 การออกแบบการทดลอง (DESIGN OF EXPERIMENT)

2.2.1 กลยุทธ์ของการทดสอบ (Strategy Of Experimentation)

การกำหนดขอบเขตของการทดลองทำได้โดยการทดสอบหรือทดสอบอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจุดมุ่งหมาย คือการเปลี่ยนตัวแปรนำเข้า (input variables) ของกระบวนการ หรือระบบเพื่อที่จะได้สังเกตและระบุเหตุผลของการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองของตัวนำออก (output response)

2.2.1.1 ลักษณะเฉพาะของกระบวนการ (Characteristic Of Process)

โดยทั่วๆไป การทดลองจะนำมาใช้ศึกษาพฤติกรรมของกระบวนการและระบบ กระบวนการ หรือระบบจะถูกแสดงโดยแบบจำลอง (ในรูปที่ 1) ซึ่งจะสามารถทำให้เห็นภาพกระบวนการเหมือนกับการนำเครื่องจักรหลายๆเครื่อง, วิธีการ, คน และทรัพยากรอื่นๆมารวมกัน ซึ่งเปลี่ยนสภาพตัวนำเข้า (input) แล้วนำไปสู่ตัวนำออก (output) โดยมีหนึ่งหรือผลตอบสนองเด่นชัดที่มากกว่าหนึ่ง บางตัวแปรของกระบวนการ $x_1, x_2, x_3, \ldots\ldots, x_p$ คือตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ ในขณะที่ตัวแปรของกระบวนการ $z_1, z_2, z_3, \ldots\ldots, z_q$ คือตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้



รูปที่ 2.5 แบบจำลองทั่วๆไปของกระบวนการหรือระบบ

(General model of a process or system)

2.2.1.2 จุดประสงค์ของการออกแบบ (The objective of the experiment)

1. พิจารณาตัวแปรที่มีอิทธิพลมากที่สุด ในผลตอบสนอง y
2. พิจารณาที่ตั้งตัวแปร x หลายๆตัวที่มีอิทธิพล ซึ่งตัวแปร y คือค่าที่ต้องดูผล
3. พิจารณาที่ตั้งตัวแปร x หลายตัวที่มีอิทธิพล ซึ่งตัวแปร y ที่เปลี่ยนแปลได้ต้องมีค่าเล็กมาก
4. พิจารณาที่ตั้งตัวแปร x หลายตัวที่มีอิทธิพล ซึ่งผลกระทบของตัวแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ $z_1, z_2, z_3, \ldots\ldots, z_q$ ต้องน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 กลยุทธ์การทดลองอื่นๆ (Another Strategy of experimentation)

2.2.2.1 กลยุทธ์ ONE-FACTOR-AT-A-TIME (ONE-FACTOR-AT-A-TIME)

วิธีนี้ประกอบด้วยการเลือกจุดเริ่มต้น หรือ เส้นที่อ้างอิง(baseline) ซึ่งตั้งระดับแต่ละปัจจัย และได้แปรผันกันอย่างต่อเนื่อง โดยแต่ละปัจจัย (factors)อยู่นอกเหนือขอบเขตของการลำดับกับปัจจัยต่างๆที่มีเส้นอ้างอิงที่แน่นอน (constant) และหลังจากการทดสอบทั้งหมดถูกแสดงออกมา เป็นอันดับแผนภูมิเส้นอย่างต่อเนื่อง (series of graphs) ซึ่งตัวแปรที่ตอบสนอง (response variable) ได้ถูกโน้มเอียงโดยผันแปรแต่ละ factors กับ factors อื่นๆทั้งหมด

2.2.2.1.1 การออกแบบการทดลองเมื่อมีปัจจัยเดียว (single-factor)

ตัวอย่าง วิศวกรต้องการทดลองหาเปอร์เซ็นต์ฝ้ายที่ผสมในการทอผ้าเพื่อให้ผ้ามีความสามารถในการทนแรงดึง (Strength) ได้สูงสุด

- กำหนดเปอร์เซ็นต์ฝ้าย 5 ระดับ คือ 15, 20, 25, 30 และ 35
- แต่ละระดับมีการทอผ้าเพื่อการทดลอง 5 ชิ้น

ดังนั้น จำนวนระดับ a = 5 (Level or Treatment = 5)

จำนวนครั้งต่อระดับ n = 5 (Replicate = 5)

แผนการทดลอง

COTTON PERCENTAGE	EXPERIMENT RUN NUMBER				
15	1	2	3	4	5
20	6	7	8	9	10
25	11	12	13	14	15
30	16	17	18	19	20
35	21	22	23	24	25

ผลการทดลอง

TEST SEQUENCE	RUN NUMBER	PERCENTAGE OF COTTON	TEST SEQUENCE	RUN NUMBER	PERCENTAGE OF COTTON
1	8	20	14	7	20
2	18	30	15	1	15
3	10	20	16	24	35
4	23	35	17	21	35
5	17	30	18	11	25
6	5	15	19	2	15
7	14	25	20	13	25
8	6	20	21	22	35
9	15	25	22	16	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10	20	30	23	25	35
11	9	20	24	19	30
12	4	15	25	3	15
13	12	25			

<u>สรุปผลการทดลอง</u>

COTTON PERCENTAGE	OBSERVATION TENSILE STRENGTH					TOTAL	AVERAGE
	1	2	3	4	5		
15	7	7	15	11	9	49	9.8
20	12	17	12	18	18	77	15.4
25	14	18	18	19	19	88	17.6
30	19	25	22	19	23	108	21.6
35	7	10	11	15	11	54	10.8
						376	15.04

ข้อสังเกตจากการทดลอง

จากผลการทดลองที่ได้มีข้อสังเกตดังต่อไปนี้ได้ดังนี้

- เราไม่อาจจะสรุปได้ทันทีว่าเปอร์เซ็นต์ของ COTTON มีผลต่อ STRENGTH ของผ้า หรือไม่อาจบอกได้ว่าที่เปอร์เซ็นต์ COTTON 30 % จะมีผลต่อ STRENGTH ของผ้าสูงสุด
- เนื่องจากในทางสถิติค่าตัวเลขเฉลี่ยของ STRENGTH ที่ได้ในแต่ละ LEVEL อาจจะเป็นค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันในเชิงสถิติ
- การที่จะบอกว่าค่าเฉลี่ยตัวใดที่มีความแตกต่างกัน ใช้วิธีทางสถิติที่เรียกว่า ANALYSIS OF VARIANCE: ANOVA

ข้อเสียของวิธีนี้ คือข้อผิดพลาดในการพิจารณาการตอบโต้ (interaction) ที่เป็นไปได้ในบางกรณีระหว่าง factors ซึ่ง interaction เป็นข้อผิดพลาดข้อหนึ่งใน factor ที่ได้สร้างผลกระทบที่เหมือนกันบนการตอบสนอง ที่ระดับต่างกันของ factor อื่นๆ และวิธี ONE-FOCTOR-AT-TIME นี้ก็ได้สร้างผลอย่างหยาบๆเท่านั้น ซึ่งมีบุคคลหลายกลุ่มไม่ได้ตระหนักถึงผลในข้อมูลเหล่านี้ ซึ่งยังคงใช้วิธีการนี้ทดสอบในการทดลองอย่าง สม่ำเสมอ แต่การทดลองด้วยวิธีนี้ยังคงมีอิทธิพลน้อยกว่าวิธีอื่นๆซึ่งขึ้นอยู่กับการยอมรับค่าทางสถิติเพื่อใช้ในการออกแบบ

วิธีการที่ถูกยอมรับกับ factors หลายตัวนำไปสู่การทดลองแล้วนำไปขยายด้วยผลคูณ (factorial experiment) นี้คือกลยุทธ์หนึ่ง (experimental strategy) ซึ่งมีหลาย factors ผันแปรไปด้วยกันในเวลาเดียวกัน โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2 กลยุทธ์ TWO-FACTOR-FACTORIAL (TWO-FACTOR- FACTORIAL STRATEGY)

จะต้องมีการดำเนินการประมวลผล ถึง 4 ครั้ง (2^2 runs form the corners) วิธีการนี้เป็นรูปแบบแบบพิเศษของ factorial experiment มีชื่อเรียกว่า " 2^2 factorial design " ระดับวิธีการของ factors อาจจะไม่ถูกเจาะจง เป็นตัวเลขว่าอยู่ในระดับที่เท่าใด ซึ่งจะมีเพียงแค่ " low " กับ " high " เท่านั้น

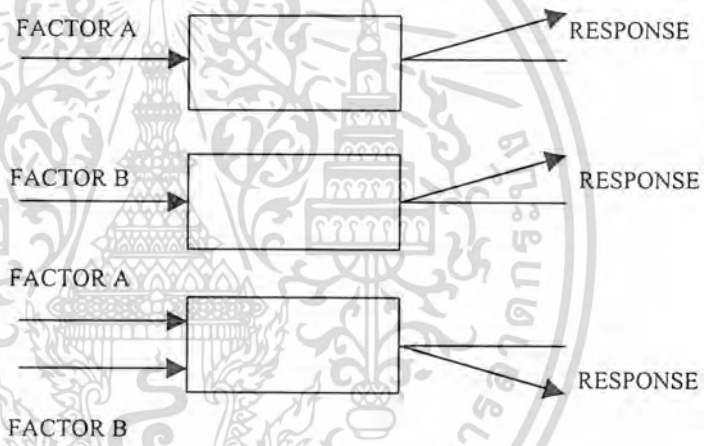
2.2.2.2.1 การออกแบบที่มีหลายปัจจัย (FACTORIAL DESIGN)

เป็นการออกแบบการทดลองเมื่อมีมากกว่า 1 ปัจจัย (FACTOR)

ประโยชน์

1. ใช้วิเคราะห์หาผลกระทบของปัจจัยได้หลายๆปัจจัยพร้อมกัน
2. มีประสิทธิภาพมากกว่าการทดลองทีละปัจจัย (ใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้นๆ)
3. สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ร่วม (INTERACTION) ระหว่างปัจจัยได้

2.2.2.2.2 ผลกระทบของ INTERACTION (INTERACTION EFFECT)



รูปที่ 2.6 อธิบายผลกระทบของ Interaction

2.2.2.2.3 การออกแบบเมื่อมี 2 ปัจจัย (TWO-FACTOR FACTORIAL DESIGN)

การออกแบบการทดลองเมื่อมีสองปัจจัย A และ B

- ปัจจัย A มี a ระดับ
- ปัจจัย B มี b ระดับ
- ทำการทดลอง n ครั้งสำหรับแต่ละระดับ
- จำนวนครั้งของการทดลอง = a x b x n ครั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.2.4 ตารางการแจกแจงทั่วๆไปสำหรับการออกแบบชนิด 2 ตัวแปร(GENERAL ARRANGEMENT FOR TWO FACTORY DESIGN

ตารางที่ 2.1 แสดงการอธิบายการออกแบบ 2 ตัวแปร

FACTOR B

		1	2	.....	b
FACTOR A	1	Y111,Y112,..Y11n	Y121,Y122,..Y12n	.....	Y1b1,Y1b2,..Y1bn
	2	Y211,Y212,..Y21n	Y221,Y222,..Y22n		Y22b,Y222,..Y2bn
	.				
	a	Ya11,Ya12,..Ya1n	Ya21,Ya22,...Ya2n		Yab1,Yab2,..Yabn

ตารางที่ 2.2 แสดงตาราง ANOVA สำหรับปัจจัยสองกรณี

(The analysis of variance table for the two-factor factorial, Fixed effects model)

Source of Vairation	Sum of square	Degree of Freedom	Mean Squares	FD
A TREATMENT	SS_A	a-1	$MS_A=SS_A/(a-1)$	MS_A/MS_B
B TREATMENT	SS_B	b-1	$MS_B=SS_B/(b-1)$	MS_B/MS_E
INTERACTION	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	$MS_{AB}=SS_{AB}/(a-1)(b-1)$	MS_{AB}/MS_g
ERROR	SS_E	an(a-1)	$MS_B=SS_B/ab(n-1)$	
TOTAL	SS_T	N-1		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แสดงวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลอง TWO-FACTOR ,การสังเกตการณ์ 1 ครั้ง ต่อ หนึ่งเซลล์ (Analysis of Variance for a TWO-Factor Model, One Observation per Cell)

Source of Variation	Sum of Squares	Degrees of Freedom	Mean Square	Expected Mean Square
A	$\sum_{i=1}^{a} \frac{y_{i.}^2}{b} - \frac{y_{..}^2}{ab}$	$a-1$	MS_A	$\sigma^2 + \frac{b\sum \tau_i^2}{a-1}$
B	$\sum_{j=1}^{b} \frac{y_{j.}^2}{a} - \frac{y_{..}^2}{ab}$	$b-1$	MS_B	$\sigma^2 + \frac{a\sum \beta_j^2}{b-1}$
AB	Subtraction	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	$\sigma^2 + \frac{\sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$
Total	$\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{ab}$	$ab-1$		

<u>ตัวอย่าง</u> การออกแบบแบตเตอรี่รถยนต์

ปัจจัยที่มีผลต่ออายุการใช้งานของแบตเตอรีมี 2 ปัจจัยหลัก คือ

A = ประเภทวัสดุที่ใช้ทำแผ่นธาตุ

กำหนดให้มี 3 ชนิด (3 ระดับ)

B = อุณหภูมิการใช้งาน

กำหนดให้มี 3 ระดับ (15 °F, 70 °F,125 °F)

ทำการทดลองกลุ่มละ 4 ตัวอย่าง (n=4)

<u>**ข้อมูลของอายุการใช้งาน (ชั่วโมง) เพื่อใช้ออกแบบการทดลองสำหรับแบตเตอรี่**</u>

<u>(Life data for the battery design experiment)</u>

นำข้อมูล มาคำนวณวิเคราะห์ผล

MATERIAL TYPE	TEMPERATURE						Y.i.
	15		70		125		
1	130 155 74 180	(539)	34 40 80 75	(229)	20 70 82 58	(230)	998
2	150 188 159 126	(623)	136 122 106 115	(479)	25 70 58 45	(196)	1300
3	138 110 168 160	(576)	174 120 150 139	(583)	96 104 82 60	(342)	1501
Y.j.	1738		1291		770		3799 = Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.3 กลยุทธ์ THREE-FACTOR-FACTORIAL STRATEGY (THREE-FACTOR-FACTORIAL STRATEGY)

จะต้องประมวลผลถึง 8 ครั้งเป็นในลักษณะ 3 มิติ เป็นอยู่ในรูปแบบ (2^3 factorial design) มีการใช้ 2 เครื่องหมายที่แตกต่างกันไปโดยจะมีเพียงแค่ +,- เท่านั้น ซึ่งสามารถแสดงได้ในตารางที่ 2.4 ตามระดับได้ดังนี้

ตารางที่ 2.4 แสดงลักษณะการออกแบบ 3 มิติ

RUN	A	B	C	LABELS	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

ตารางที่ 2.5 ตารางแสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองผล THREE-FACTOR

(The Analysis of Variance Table for the Three-Factor Fixed Effects Model)

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	Expected Mean Square	F_0
A	SS_A	$a-1$	MS_A	$\sigma^2 + \frac{bcn\sum \tau_i^2}{a-1}$	$\frac{MS_A}{MS_E}$
B	SS_B	$b-1$	MS_B	$\sigma^2 + \frac{acn\sum \beta_j^2}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c-1$	MS_C	$\sigma^2 + \frac{abn\sum \gamma_k^2}{c-1}$	$\frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	$\sigma^2 + \frac{cn\sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MS_{AC}	$\sigma^2 + \frac{bn\sum (\tau\gamma)_i^2}{(a-1)(c-1)}$	$\frac{MS_{AC}}{MS_E}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MS_{BC}	$\sigma^2 + \frac{an \sum(\beta\gamma)}{(b-1)(c-1}$	$\frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1$	MS_{ABC}	$\sigma^2 + \frac{n \sum(\tau\beta}{(a-1)(b-1)($	$\frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
Error Total	SS_E SS_T	$abc(n-1)$ $abcn-1$	MS_E	σ^2	-

เมื่อ

$$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{i=1}^{b}\sum_{i=1}^{c}\sum_{i=1}^{n} y_{ijkl}^2 - \frac{y^2...}{abcn} \quad (2.17)$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a} y_i^2... - \frac{y^2...}{abcn} \quad (2.18)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{i=1}^{b} y_j^2.. - \frac{y^2...}{abcn} \quad (2.19)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{i=1}^{c} y^2_{..k.} - \frac{y^2...}{abcn} \quad (2.20)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{i=1}^{b} y^2_{ij..} - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$= SS_{subtotal(AB)} - SS_A - SS_B \quad (2.21)$$

$$SS_{AC} = SS_{subtotal(AC)} - SS_A - SS_C \quad (2.22)$$

$$SS_{BC} = SS_{subtotal(BC)} - SS_B - SS_C \quad (2.23)$$

$$SS_{ABC} = SS_{subtotal(ABC)} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (2.24)$$

$$SS_E = SS_T - SS_{subtotal(ABC)} \quad (2.25)$$

จากตารางจะมี 7 degree of freedom ระหว่าง การรวมวิธีการ 8 วิธี (The eight treatment combinations in the 2^3 design) 3 degrees of freedom ถูกเข้ารวมกับผลกระทบหลักของ A,B และ C

3 degrees of freedom ถูกเข้ารวมกับ interactions ซึ่งมี AB, AC, BC และ ABC

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รูปที่ 2.7 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของการออกแบบที่มีผลต่อ interaction ใน 2^3 design (Geometric presentation of contrasts corresponding to the main effects and interaction in the 2^3 design.)

2.2.2.3.1 การออกแบบ TREE - FACRTOR FACTORIAL DESIGN (THREE - FACTOR FACTORIAL DESIGN)

การออกแบบการทดลองเมื่อมีสองปัจจัย A B และ C

- ปัจจัย A มี a ระดับ
- ปัจจัย B มี b ระดับ
- ปัจจัย C มี c ระดับ
- ทำการทดลอง n ครั้งสำหรับแต่ละระดับ
- จำนวนครั้งของการทดลอง = a x b x c x n ครั้ง

ตัวอย่าง : การบรรจุน้ำอัดลม

ความสูงหรือปริมาตรของน้ำอัดลมขึ้นกับปัจจัย 3 ปัจจัย คือ

A = เปอร์เซ็นต์คาร์บอนเนตในน้ำอัดลม

กำหนด 10% 12% และ 14%

B = แรงอัดระหว่างในการบรรจุ

กำหนด 25 psi และ 30 psi

C = ความเร็วของสายพาน

กำหนด 200 bpm และ 250 bpm

ผลการทดลอง

RUN	A	B	C	REP1	REP2
1	10	25	200	-3	-1
2	10	25	250	-1	0
3	10	30	200	-1	0
4	10	30	250	1	1
5	12	25	200	0	1
6	12	25	250	2	1
7	12	30	200	2	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

42427

8	12	30	250	6	5
9	14	25	200	5	4
10	14	25	250	7	6
11	14	30	200	7	9
12	14	30	250	10	10

จากสมการที่ (2.19), (2.20), (2.21)

$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a} y_i^{\ 2} - \frac{y^2}{abcn}$	$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{i=1}^{b} y_i^2 - \frac{y^2}{abcn}$	$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{i=1}^{c} y_k^2 - \frac{y^2}{abcn}$

สามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

	A	REP1	REP2		B	REP1	REP2		C	REP1	REP2	
I=1	10	3	-1	j=1	25	3	-1	k=1	200	3	-1	
	10	-1	0		25	-1	0		200	-1	0	
	10	-1	0		25	0	1		200	0	1	
	10	1	1	16	25	2	1		200	2	3	
I=2	12	0	1		25	5	4		200	5	4	
	12	2	1		25	7	6	441	200	7	9	676
	12	2	3	j=2	30	-1	0	k=2	250	-1	0	
	12	6	5	400	30	1	1		250	1	1	
I=3	14	5	4		30	2	3		250	2	1	
	14	7	6		30	6	5		250	6	5	
	14	7	9		30	7	9		250	7	6	
	14	10	11	3481	30	10	11	2916	250	10	11	2401
			SS_A	2528			SS_B	4538			SS_C	2204

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{i=1}^{b} \frac{y_i^{\ 2}}{cn} - \frac{y^2}{abcn} - SS_A - SS_B$$

จากสมการที่ (2.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

		A	B	REP1	REP2	
i =1	j= 1	10	25	-3	-1	
		10	25	-1	0	25
i=2	j=2	10	30	-1	0	
		10	30	1	1	1
		12	25	0	1	
		12	25	2	1	16
		12	30	2	3	
		12	30	6	5	256
		14	25	5	4	
		14	25	7	6	484
		14	30	7	9	
		14	30	10	11	1369
					SS_{AB}	**5.25**

9	1
1	0
1	0
1	1
0	1
4	1
4	9
36	25
25	16
49	36
49	81
100	121
SS_T	**3066**

$$SS_{CB} = \sum_{i=1}^{b}\sum_{i=1}^{c}\frac{y_r^{\,2}}{an} - \frac{y^2}{abcn} - SS_B - SS_C$$

จากสมการที่ (2.23)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถคำนวณหาค่าได้ดังนี้

		B	C	REP1	REP2	
j=1	k=1	25	200	-3	-1	
j=1	k=1	25	200	0	1	
j=1	k=1	25	200	5	4	36
j=2	k=2	25	250	-1	0	
j=2	k=2	25	250	2	1	
j=2	k=2	25	250	7	6	225
j=1	k=1	30	200	-1	0	
j=1	k=1	30	200	2	3	
j=1	k=1	30	200	7	9	400
j=2	k=2	30	250	1	1	
j=2	k=2	30	250	6	5	
j=2	k=2	30	250	10	11	1156
					SS_{CB}	**1.042**

2.2.3 การใช้บางประเภทของการออกแบบทดลอง (SOME TYPICAL PPLICATIONS OF EXPERIMENTAL DESIGN)

ได้พบวิธีการออกแบบการทดลองซึ่งถูกใช้อย่างกว้างขวางในหลายๆพฤติกรรมของสิ่งที่ต้องการจะศึกษา ตามความจริงอาจจะเห็นการทดลองในส่วนหนึ่งของกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ และหนึ่งในหลายๆ ทาง ที่ได้เรียนรู้จากระบบและกระบวนการทำงาน โดยทั่วๆไปการเรียนรู้กิจกรรมต่างๆในกระบวนการผลิตมาจากการคาดคะเนกระบวนการผลิต, พฤติกรรมของกระบวนการทดลองร่วมกับข้อมูลในกระบวนการผลิต, ถูกคาดเดาจากกระบวนการอื่นๆซึ่งถูกคาดเดาต่อๆกันมา และอื่นๆ

<u>การนำไปใช้ของเทคนิคการออกแบบการทดลองในกระบวนการที่พัฒนาแล้วสามารถเป็นผลจาก</u>

1. การปรับปรุงผลในกระบวนการผลิต
2. ลดตัวแปรและลดขนาดตัวแปรอื่นให้มีผลน้อยที่สุดเพื่อให้ได้เป้าหมายตามที่ต้องการ
3. ลดเวลาที่เพิ่มขึ้น

2.2.4 พื้นฐานเบื้องต้น (BASIC PRINCIPLES)

ข้อพื้นฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง 3 ข้อ ได้แก่ Replication ,Randomization และ Blocking

2.2.4.1 Replicates

จะประกอบด้วย 2 สิ่งที่สำคัญ

1. คือยอมให้การทดลองได้รับการประเมินค่าที่ผิดพลาด (An estimates of the experimental error.)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประเมินค่าที่ผิดพลาดจะกลายเป็นส่วนพื้นฐานของการวัดเพื่อพิจารณา ว่าข้อสังเกตของจำนวนที่แตกต่างในข้อมูล เป็นข้อแตกต่างเชิงสถิติ

2. ถ้าค่าเฉลี่ยของตัวอย่างที่ถูกใช้ประเมินผลกระทบต่อ factor ในการทดลองแล้ว Replicationจะ ยินยอมให้การทดลองมีความเที่ยงตรงในการประเมินผล

ตัวอย่างเช่น

ถ้า σ^2 คือ ความแปรปรวนของข้อสังเกตเฉพาะ

n คือ จำนวน Replicate

แล้วความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยตัวอย่างคือ

$$\sigma^2_{\bar{y}} = \frac{\sigma^2}{n}$$

ถ้า n = I

$y_1 = 145$,$y_2 = 147$ แล้วผลที่ทำการทดลองได้ $y = 146$ ถือว่าเป็นค่าที่อยู่ในช่วงเป็นที่ยอมรับได้

2.2.4.2 Randomization

คือ ส่วนที่ต้องนำวิธีการทางสถิติมาใช้ในการออกแบบทดลอง ซึ่งหมายถึงการกำหนดวัสดุที่ใช้ในการทดลอง และลำดับขั้นซึ่งประมวลผลแยกจากกัน หรือลองการทดลองที่จะเกิดผลแสดงขึ้นว่ามีการสุ่มเกิดขึ้น (randoms) ซึ่งวิธีการทางสถิติต้องทราบถึงข้อสังเกต (หรือข้อผิดพลาด) ที่เป็นการกระจายตัวแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกัน และผลที่จะได้มาคือสมมุติฐาน การทดลองว่าจะสุ่มกี่ครั้งอย่างเหมาะสม ต้องมีการเฉลี่ยค่า แล้วจะมีผลกระทบต่อ factors ภายนอก ตัวอย่างเช่นการคาดเดาตัวอย่างในการทดลองเบื้องต้นจะต้องมีข้อแตกต่างที่ต่างกันน้อยมาก และจะต้องมีผลกระทบต่อสิ่งที่ต้องการที่สนใจน้อยมาก

2.2.4.3 Blocking

คือ เทคนิคที่ใช้เพิ่มความแม่นยำของการทดลอง ซึ่งการ block เป็นอัตราส่วนของวัสดุในการทดลอง ซึ่งมีลักษณะอย่างเดียวกัน หรือเนื้อเดียวกัน (Homogeneous) มากกว่าที่จะเป็นปริมาณทั้งหมดของวัสดุ Blocking จะเกี่ยวกับการเปรียบเทียบเงื่อนไขที่กำลังจะสนใจในการทดลองโดยไม่นำ block อื่นมาคิด

2.2.5 แนวทางสำหรับการทดลองออกแบบ (GUIDELINES FOR DESIGNING EXPERIMENTS)

2.2.5.1 การจำแนกและการรายงานปัญหา (Recognition of and statement of the problem)

- พัฒนาการรายงานทั่วๆไปและให้กระจ่างในปัญหา (Develop a clear and generally statement of problem)
- วิธีทำงานเป็นทีมที่จะแนะนำการออกแบบ (Team approach to designing is recommended)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5.2 ทางเลือกของปัจจัย ,ระดับ และพิสัย (Choice of factors, levels and range)

- ต้องมีความรู้ในกระบวนการ (Process knowledge is required)
- สำหรับการป้องกัน, ขอบเขตที่สนใจควรจะมีความสัมพันธ์มาก (For factors screening, the region of interest should be relatively large)

2.2.5.3 การเลือกตัวแปรที่ตอบสนอง (Selection of the response variable)

- .ตัวแปรที่ได้ถูกแบ่งข้อมูลที่ได้ใช้จริงเกี่ยวกับกระบวนการภายใต้การผลิต (Variable really provides useful information about the process under study)

2.2.5.4 ทางเลือกของการออกแบบการทดลอง (Choice of experimental design)

- เลือกการออกแบบการทดลองที่เหมาะสมสำหรับปัญหาที่กว้างและหลากหลาย (Selection an appropriate experiment design for a wide variety of problems.)
- การพิจารณาของขนาดตัวอย่าง (จำนวนของ Replicates) (Consideration of sample size)
- การเลือกลำดับการประมวลผลที่เหมาะสม สำหรับการลองผลการทดลอง (The selection of suitable run order for the experimental trials)

2.2.5.5 การแสดงผลการทดลอง (Perfoming the experiment)

- ทุกอย่างพร้อมที่จะทำตามแผน (Ensure that everthing is being done according to plan)
- ข้อผิดพลาดของหัวข้อย่อยของการทดลองในกรณีที่การทดลองผิดพลาด (Errors in experimental procedure at this stage will usually destroy experimental valiidity)

2.2.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ (Statistical analysis of the data)

- วิธีการทางสถิติที่รวมจุดมุ่งหมาย (Statistical methods add objective rather than judgment to the decision-making
- วิธีทางกราฟฟิคแสดงการทำงานในข้อมูลที่วิเคราะห์และตีความ (Simple graphical methods play and important role in data analysis and interpretation)

2.2.5.7 ข้อสรุปและข้อคิดเห็น (Conclusions and recommendations)

- วาดข้อสรุปเกี่ยวกับผลที่ได้ (Draw a practical conclusion about the results)
- วิธีทางกราฟฟิคที่ถูกใช้ในช่วงนี้ (Graphical methods are often useful in this stage)
- ดำเนินการตามประมวลผลและยืนยันในการทดสอบที่จะถูกแสดง (Follow up runs and confirmation testing should be performed)

2.2.6 การทดลองที่มีปัจจัยขึ้นอยู่กับตัวแปรสุ่ม (Factorial Experiments with Random Factors)

Factor ในการที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้คือ fixed factor คือผู้ที่ทำการทดลองเลือกทดลองเฉพาะระดับ factor ที่น่าสนใจเท่านั้น ทำให้ข้อสรุปทางสถิตศาสตร์ที่ได้จำกัดอยู่เฉพาะระดับที่ศึกษาด้วย การเปลี่ยนแปลงของสิ่งนี้จะเกิดขึ้นเมื่อเป็น factor เกี่ยวกับปริมาณ ในสถานการณ์เช่นนี้ เราจะใช้โมเดลถดถอยที่เกี่ยวข้องกับการตอบสนองของ factor เพื่อทำนายการตอบสนองภายใต้ขอบเขตระดับ factor ที่ขยายมากขึ้นด้วย fixed effect นั้นคือผลสรุปของการทดลองจะอยู่ในระดับ factor ที่ตรวจสอบเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บางการทดลอง ระดับ factor จะเลือกโดยการสุ่มจากจำนวนประชากรที่มากๆ ในระดับ(level) ที่เป็นไปได้และผู้ทำการทดลองก็พยายามจะให้ได้ข้อสรุปจากระดับประชากรทั้งหมด นอกจากนี้ก็ยังใช้ในการออกแบบการทดลองด้วย ซึ่งสถานการณ์เช่นนี้ factor จะเป็น random factor

2.2.6.1 The two-factor factorial with random factor

สมมติว่า มี 2 factor A, B ซึ่งทั้ง 2 ตัวมีจำนวนระดับที่น่าสนใจมาก เราจะเลือกสุ่มระดับ a ของ Factor A และระดับ b ของ Factor B จากนั้นก็จัดระดับ factor ในการออกแบบการทดลอง ถ้าทำการทดลอง n ครั้ง สามารถแสดงได้ดังสมการเชิงเส้น

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \qquad (2.26)$$

โดย $I = 1,2,\ldots,a$

$j = 1,2,\ldots,b$

$k = 1,2,\ldots,n$

ซึ่ง model parameter τ_i , β_j , $(\tau\beta)_{ij}$ และ $(\tau\beta)_{ij}$ เป็นตัวแปรจากการสุ่มอย่างอิสระ โดยเราสมมติว่าตัวแปรเหล่านี้มีการ กระจาย แบบปกติ โดยมีค่าเบี่ยงเบนเป็น

$$V(Y_{ijk}) = \sigma^2_\tau + \sigma^2_\beta + \sigma^2_{\tau\beta} + \sigma^2 \qquad (2.27)$$

ซึ่ง σ^2_τ ,σ^2_β,$\sigma^2_{\tau\beta}$และσ^2 คือ องค์ประกอบที่เบี่ยงเบน(variance component) โดย hypotheses testing คือ H_0: σ^2_τ=0, $H_{0:}$: σ^2_β=0 และ H_0 : $\sigma^2_{\tau\beta}$ = 0 จะเห็นว่าคล้ายกับ the single –factor random effects model

สำหรับค่าของความเบี่ยงเบนเราสามารถคำนวณเหมือนเป็น fixed effect model โดยค่า expected mean square ได้ดังนี้

$$E(MS_A) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\tau\beta} + bn\,\sigma^2_\tau \qquad (2.28)$$

$$E(MS_B) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\tau\beta} + an\sigma^2_\beta \qquad (2.39)$$

$$E(MS_{AB}) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\tau\beta} \qquad (2.30)$$

และ $$E(MS_E) = \sigma^2 \qquad (2.31)$$

จากค่า expected mean square จะเห็นว่า ค่าทางสถิติที่เหมาะสม สำหรับการทดสอบ no-interaction hypotensis H_0 : $\sigma^2_{\tau\beta}$ = 0 คือ

$$F_0 = MS_{AB}/MS_E$$

เพราะว่าภายใต้ H_0 ทั้งเศษและส่วนของ F_0 มีผลต่อ σ^2 ถ้า ค่า H_0 มีค่าเป็น false คือ $E(MS_{AB})$ มากกว่า $E(MS_E)$ ค่าratio ของ F_0 กระจายได้เป็น $F_{(a-1)(b-1),ab(n-1)}$ ซึ่งการทดสอบ H_0: σ^2_τ=0 และ $H_{0:}$: σ^2_β=0 จะได้ผลเช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการทดสอบแบบ หางเดียว จะสังเกตได้ว่า การทดสอบทางสถิตินี้ ไม่เหมือนกับ การทดสอบที่ ทั้ง Factor A และ Factor B เป็นแบบ fixed ทั้งคู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองที่มีrandom factor จะสนใจในการประมาณ variance component โดย hypotensis testing จาก วิธี **analysis of variance method** ซึ่งมีค่า yield ดังนี้

$$\sigma^2 = MS_E \tag{2.32}$$

$$\hat{\sigma}^2_{\tau\beta} = \frac{MS_{AB} - MS_E}{n} \tag{2.33}$$

$$\hat{\sigma}^2_{\beta} = \frac{MS_B - MS_{AB}}{an} \tag{2.34}$$

$$\hat{\sigma}^2_{\tau} = \frac{MS_A - MS_{AB}}{bn} \tag{2.35}$$

2.2.6.2 The two-factor mixed model

สมมติว่า Factor A: fixed

Factor B: Random

ซึ่งเรียกว่า mixed model analysis โดยมีสมการสถิติเชิงเส้น ดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \tag{2.36}$$

โดย i=1,2,....,a

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

k = 1,2,....,n

ซึ่ง τ_i เป็น fixed effect และ β_j เป็น random effect โดยสมมติว่า $(\tau\beta)_{ij}$ เป็น random effect และ ε_{ijk} เป็น random error อย่างไรก็ตาม ผลรวมของ องค์ประกอบเหล่านี้ ภายใต้ fixed factor เท่ากับ 0 นั่นคือ

$$\sum_{i=1}^{a} (\tau\beta)_{ij} = (\tau\beta)_j = 0 \quad , j = 1,2,...b \tag{2.37}$$

ซึ่งส่วนที่สัมพันธ์กันที่ระดับต่างกันของ fixed factor จะไม่เป็นอิสระ

$$COV[(\tau\beta)_{ij}, (\tau\beta)_{i'j}] = \frac{-1}{a}\sigma^2_{\tau\beta}, \quad i \quad i' \tag{2.38}$$

ความเบี่ยงเบนร่วมของ $(\tau\beta)_{ij}$ และ $(\tau\beta)_{i'j}$ สำหรับ $j \neq j'$ เท่ากับ 0 ซึ่งมี random error ε_{ijk} คือ NID(0, σ^2) เพราะผลรวมของ effect ภายใต้ระดับของ fixed factor =0 ซึ่งโมเดลนี้เรียกว่า **Restriction model** ซึ่งโมเดลนี้ ค่าเบี่ยงเบนของ$(\tau\beta)_{ij} = \frac{(a-1)}{a}\sigma^2_{\tau\beta}$ ผลรวมของ $(\tau\beta)_j$=0 จะมีผลต่อ expect mean squares จาก

$$E(MS_A) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\tau\beta} + \frac{bn\sum_{i=1}^{a}\tau_i^2}{a-1} \tag{2.39}$$

$$E(MS_B) = \sigma^2 + an\sigma^2_{\beta} \tag{2.40}$$

$$E(MS_{AB}) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\tau\beta} \tag{2.41}$$

และ $$E(MS_E) = \sigma^2 \tag{2.42}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใน mixed model เราสามารถประมาณ fixed factor effect ได้ว่า

$$\mu = \bar{y}...$$

$$\tau_i = \bar{y}_i.. - \bar{y}, i = 1,2...,a$$

องค์ประกอบของความเบี่ยงเบน $\sigma^2_\beta, \sigma^2_{\tau\beta}$ และ σ^2 สามารถกำจัดได้โดยใช้ วิธี **analysis of variance method** จะได้ดังสมการ (2.33), (2.34), (2.35)

ใน mixed model ผู้ทำการทดลองควรจะให้ความสำคัญของ hypothesis หรือ constructing

$$\left[\frac{\text{Mean Square for testing the fixed effect}}{\text{Number of observation in earth treatment mean}}\right]^{1/2} = \sqrt{\frac{MS_{AB}}{bn}}$$

2.2.6.3 Alternate Mixed Model

มีสมการสถิติเชิงเส้น ดังนี้

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \gamma_i + (\alpha\gamma)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

ซึ่ง α_i เป็น fixed effect และ $\gamma_i, (\alpha\gamma)_{ij}$ และ ε_{ijk} ไม่ได้เป็นrandom factor แต่มีการกระจายแบบปกติ จะสังเกตได้ว่า โมเดลแบบนี้จะแตกต่างจาก restriction model โดยrestriction model จะใช้สมมติฐานของ องค์ประกอบ ที่เป็น random โดยเรียกโมเดลนี้ว่า **Unrestricted mixed model** ซึ่งค่า expected mean square ได้แก่

$$E(MS_A) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\alpha\gamma} + \frac{bn\sum_{i=1}^{a}\alpha_i^2}{a-1} \quad (2.43)$$

$$E(MS_B) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\alpha\gamma} + an\sigma^2_{\gamma} \quad (2.44)$$

$$E(MS_{AB}) = \sigma^2 + n\sigma^2_{\alpha\gamma} \quad (2.45)$$

และ $$E(MS_E) = \sigma^2 \quad (2.46)$$

เปรียบเทียบค่า expected mean square กับของ restriction model จะต่างกันที่ $\sigma^2_{\alpha\gamma}$ ซึ่งเป็นค่า expected mean squareของ random effect เราสามารถทดสอบ test hypotensis ของ องค์ประกอบที่เบี่ยงเบน(variance component) ได้ โดยให้ random effect เท่ากับ 0 เช่นเคย นอกจากนี้เรายังสามารถใช้วิธี analysis of variance method ประมาณค่าเบี่ยงเบนขององค์ประกอบ จะได้

$$\hat{\sigma}^2_{\gamma} = \frac{MS_B - MS_{AB}}{an} \quad (2.47)$$

ส่วนใหญ่ restricted mixed model นิยมใช้มากกว่า เพราะค่าเบี่ยงเบนร่วมกันระหว่าง การสังเกต 2 ครั้ง จาก ระดับเดียวกันของ random factor สามารถ เป็น positive หรือ negative ในขณะที่ unrestricted mixed model เป็น positive เท่านั้น หากโครงสร้างของ random component ไม่ใหญ่มาก สามารถใช้ mixed model ได้และ มีข้อแตกต่างเล็กน้อยเท่านั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2.7 Rules for expected mean squares

ปัญหาส่วนใหญ่ของการออกแบบการทดลองคือ การวิเคราะห์การเบี่ยงเบน ซึ่งเกี่ยวข้องกับ ผลรวมกำลังสอง(Sum of square)ของแต่ละ component และจำนวน degree of freedom จากนั้นก็ การวิเคราะห์หา expected mean square ในการออกแบบที่ซับซ้อนโดยเฉพาะในกรณีที่เป็น random หรือ mixed model การสร้างการทดสอบทางสถิติที่เหมาะสมจะช่วยได้มากขึ้น

ดังนั้นจึงเกิดกฎซึ่งช่วยในการหา expected mean square สำหรับการทดลองทั่วๆไปขึ้นมากมาย ซึ่งคิดค้นโดย Scheff'e(1959), Bennett และ Franklin (1954),Hicks(1973)และ Searle(1971a,1971b)

แต่วิธีต่อไปนี้ เรียกว่า **Brute force method**

Rule 1 เทอมของค่าผิดพลาด $\varepsilon_{ij\ldots m}$ แปลงให้อยู่ในรูป $\varepsilon_{(ij\ldots)m}$ สำหรับ two-factor model นี่คือกฎว่า ต้องเปลี่ยนจาก ε_{ijk} เป็น $\varepsilon_{(ij)k}$

Rule 2 สำหรับค่า overall mean (μ) และ เทอมของค่าผิดพลาดในข้อแรก $\varepsilon_{(ij\ldots)m}$ ซึ่งจะมีอยู่ในทุกโมเดล ถ้ามีปฏิกิริยา (interaction) ระหว่าง k foctor จะได้ $\binom{k}{2}$ two-factor interaction, $\binom{k}{3}$ three-factor interaction,.....,1 k-factor interaction ถ้า มี factor ตัวใด ในเทอม เกิดแทรกขึ้น ก็จะไม่มี interaction ระหว่าง factorนั้น และตัวอื่นๆ ในเทอม

Rule 3 แบ่ง ตัวห้อย เป็นระดับ โดย (a)live-แสดงถึงไม่มีfactorเกิดแทรกในเทอม,(b)dead-แสดงถึงมีการแทรกเกิดขึ้นในเทอม และ(c)absent-แสดงถึงมีอยู่ในโมเดลแต่ไม่มีอยู่ในเทอมเฉพาะเจาะจง เช่น $(\tau\beta)_{ij}$, i และ j เป็น live และ k- absent และ $\varepsilon_{(ij)k}$, k เป็น live และ i, j -dead

Rule 4จำนวนของ degree of freedom ของเทอมใดๆ ในโมเดล คือproduct ของจำนวนของระดับ (level)ซึ่งมีตัวห้อยที่เป็น dead และระดับลบด้วย1 ของตัวห้อยที่เป็น live เช่น C มี degree of freedomเท่ากับ (a-1)(b-1)และ $\varepsilon_{(ij)k}$ มีdegree of freedom เป็น ab(n-1)

Rule 5 ในแต่ละเทอมของโมเดลอาจจะมี องค์ประกอบที่เบี่ยงเบน(variance component)ซึ่งเป็น random effect หรือ fixed factor (fixed effect) ถ้า interactionมีอย่างน้อย 1 random effect ซึ่งinteraction ที่จะเกิดขึ้นมา จะ random โดย variance component จะมีตัวห้อยกำกับอยู่ว่าเป็น random effect ใน two-factor mixed model ซึ่ง factor A : fixed และ factor B :random ซึ่งค่า variance component ของ B คือ σ^2_βส่วนของAB คือ $\sigma^2_{\tau\beta}$ โดยที่ fixed effect จะสามารถหาค่า ผลรวมกำลังสองของโมเดลได้ เช่น effect ของA คือ $\frac{\sum_{i=1}^{a}\tau_i^2}{a-1}$

Rule 6 ทำตามตารางเพื่อหาค่า expected mean square โดยแถวแทน แต่ละองค์ประกอบของโมเดล ในคอลัมภ์จะแทนตัวห้อยและ factor ซึ่ง fixed(F) หรือ random(R) ทำตามตาราง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(a) ในแต่ละแถว ใส่เลข 1 ถ้ามีตัวห้อยเป็น dead ในแถวของcomponent ซึ่งพอดีกับตัวห้อยในคอลัมภ์

	F	F	R
	a	b	n
factor	i	j	k
τ_i			
β_j			
$(\tau\beta)_{ij}$			
$\varepsilon_{(ij)k}$	1	1	

(b) ในแต่ละแถว ถ้าตัวห้อยใน แถวตรงกับ ตัวห้อยในคอลัมภ์ ใส่ 0 ถ้าที่หัวคอลัมภ์บอกว่าเป็น fixed factor และใส่ 1 ถ้าเป็น random factor

	F	F	R
	a	b	n
factor	i	j	k
τ_i	0		
β_j		0	
$(\tau\beta)_{ij}$	0	0	
$\varepsilon_{(ij)k}$	1	1	

(c) ในตำแหน่งที่ยังว่าง ใส่จำนวนของระดับที่แสดงไว้ที่หัวตาราง

	F	F	R
	a	b	n
factor	i	j	k
τ_i	0	b	n
β_j	a	0	n
$(\tau\beta)_{ij}$	0	0	n
$\varepsilon_{(ij)k}$	1	1	1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(d) บรรจุค่า expected mean square ของแต่ละโมเดล ตอนแรกที่หัวตารางในแถวคอลัมภ์ใส่ ตัวห้อยที่เป็น live ในแต่ละ component หลังจากนั้นในแต่ละแถวซึ่งมี ตัวห้อยที่เหมือนกันเป็นอย่างน้อยกับ component ที่เกี่ยวข้อง ใส่product ของตัวเลขที่เห็นและคูณด้วย fixed หรือ random factor จาก rule 1 ผลรวมนี้คือ expected mean square ที่ต้องการ เช่น ที่ column i product ของตัวเลขที่มองเห็นซึ่งบรรจุด้วยตัวห้อยi เป็นอย่างน้อย คือ bn(row1),0(row3) และ 1(row 4) จะเห็นว่าi หายไปในแถวที่ 2 ดังนั้นค่า expected mean square คือ $E(MS_A) = \sigma^2 + \dfrac{bn\sum_{i=1}^{a} \tau_i^2}{a-1}$

ตารางที่ 2.6 แสดงค่าExpected Mean Square Derivation, Two-Factor Effects Model

	F	F	R	Expected Mean Square
	a	b	n	
factor	i	j	k	
τ_i	0	b	n	$\sigma^2 + \dfrac{bn\sum_{i=1}^{a} \tau_i^2}{a-1}$
β_j	a	0	n	$\sigma^2 + \dfrac{an\sum \beta_j^2}{b-1}$
$(\tau\beta)_{ij}$	0	0	n	$\sigma^2 + \dfrac{n\sum (\tau\beta)_{ij}^2}{(a-1)(b-1)}$
$\varepsilon_{(ij)k}$	1	1	1	σ^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 แสดงค่า Expected Mean Square Derivation, Two-Factor Random Effects Model

	F	F	R	Expected Mean Square
	a	b	n	
factor	i	j	k	
τ_i	0	b	n	$\sigma^2 + n\sigma^2_{\tau\beta} + bn\sigma^2_{\psi}$
β_j	a	0	n	
$(\tau\beta)_{ij}$	0	0	n	
$\varepsilon_{(ij)k}$	1	1	1	

ตารางที่ 2.8 แสดงค่าExpected Mean Square Derivation, Two-Factor Mixed Model

	F	F	R	Expected Mean Square
	a	b	n	
factor	i	j	k	
τ_i	0	b	n	$\sigma^2 + n\sigma^2_{\tau\beta} + bn\sigma^2_{\psi}$
β_j	a	0	n	
$(\tau\beta)_{ij}$	0	0	n	
$\varepsilon_{(ij)k}$	1	1	1	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer)

2.3.1 ลักษณะและประเภทของการถ่ายเทความร้อน

ความร้อน คือพลังงานซึ่งส่งผ่านขอบเขตระหว่าง ระบบ และ สิ่งแวดล้อม โดยเป็นผลมาจากความต่างของอุณหภูมิ และการถ่ายเทความร้อน คือ การส่งถ่ายพลังงาน ซึ่งมีผลเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ ดังนั้นเห็นได้ว่าจะมีการถ่ายเทความร้อนขึ้นเสมอ เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิในตัวกลาง หรือระหว่างตัวกลางใด ๆ การถ่ายเทความร้อนสามารถ แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ การนำความร้อน (Conduction) ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนในตัวกลางที่อยู่กับที่ ซึ่งอาจจะเป็นของแข็ง หรือของไหล การพาความร้อน (Convection) ใช้สำหรับการถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิว และของไหลที่เคลื่อนที่ เมื่อทั้งสองมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน การแผ่รังสีความร้อน (Thermal radiation) วัตถุทุกชนิด ณ อุณหภูมิหนึ่ง ๆ จะส่งพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจะมีการแผ่รังสีความร้อนระหว่างวัตถุ 2 ชนิดที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันเสมอแม้ว่าจะไม่มีตัวกลางก็ตาม

2.3.2 การนำความร้อน (Conduction)

กระบวนการสำคัญที่ทำให้เกิดการนำความร้อนได้แก่ การเคลื่อนที่ของโมเลกุลในตัวกลางหนึ่ง ๆ การนำความร้อนนั้นสามารถมองได้ว่า เป็นการส่งถ่ายพลังงานจากอนุภาคของสารที่มีพลังงานสูงกว่าไปยังอนุภาคที่มีพลังงานต่ำกว่า เมื่ออนุภาคทั้งสองมากระทบกัน หรือสัมผัสกัน การนำความร้อนสามารถอธิบายได้โดยการพิจารณาก๊าซจำนวนหนึ่ง ซึ่งแต่ละอนุภาคของก๊าซมีอุณหภูมิต่างกัน สมมติว่าก๊าซนี้ไม่มีการเคลื่อนที่เป็นกลุ่มก้อน และก๊าซนี้อาจจะครอบคลุมบริเวณระหว่างพื้นผิวสองแห่งซึ่งมีอุณหภูมิต่างกัน ที่จุดใด ๆ ในบริเวณดังกล่าวก๊าซมีอุณหภูมิค่าหนึ่ง และโมเลกุลของก๊าซ ณ จุดนี้จะมีพลังงานอยู่ระดับหนึ่ง พลังงานนี้สัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ซึ่งไม่เป็นแบบแผน และกับการสั่นสะเทือนของโมเลกุล โมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงจะมีพลังงานสูง การเคลื่อนที่ซึ่งไม่เป็นแบบแผนของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลของก๊าซกระทบกันอย่างสม่ำเสมอ และเมื่อเกิดการกระทบกันก็จะเกิดการส่งผ่านพลังงานระหว่าโมเลกุลขึ้น ถ้าโมเลกุลมีอุณหภูมิต่างกัน กระบวนการนี้เรียกว่า การนำความร้อน

2.3.3 การนำความร้อนผ่านผนังทรงกระบอก (Cylinder)

ตัวอย่างระบบทรงกระบอกที่พบบ่อย ได้แก่ การนำความร้อนผ่านผนังท่อรูปทรงกระบอกกลวง ซึ่งผิวใน และนอกของทรงกระบอกสัมผัสกับของเหลวที่มีอุณหภูมิต่างกัน ถ้าทรงกระบอกความยาวมากเมื่อเทียบกับความหนาของผนัง การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในแนวรัศมี และประมาณได้ว่า เป็นการนำความร้อนมิติเดียวตามแนวรัศมี ในกรณีนี้เมื่อเป็นสภาวะคงตัว และไม่มีการกำเนิดพลังงานภายในทรงกระบอก ซึ่งมีลักษณะการกระจายความร้อนตามรัศมีของทรงกระบอกเป็นแบบ Logarithmic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

3.1 การออกแบบวิธีการทดลอง

จากการศึกษาสืบค้นข้อมูลและการไปขอเข้าชมกระบวนการผลิตของโรงงานผลิตเทียนไขและสัมภาษณ์ผู้ดำเนินกิจการโรงงานทำให้สามารถทราบถึงส่วนผสมและวิธการผลิตเทียนไขได้ ดังนี้

3.1.1 วัตถุดิบและคุณสมบัติ

วัสดุที่ใช้ในการทำเทียนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันมีหลากหลายชนิดดังนี้

3.1.1.1 พาราฟิน (Parafin)

เป็นวัตถุดิบที่ได้มาจากขบวนการกลั่นน้ำมัน ใช้เป็นเชื้อเพลิงได้อย่างดีคุณภาพของพาราฟิน แบ่งตามชนิดของพาราฟินในที่นี้จะอธิบายถึงพาราฟินที่นำมาใช้ในการทำเทียนเท่านั้น

3.1.1.1.1 Normal Parafin

เป็นส่วนที่เหลือของจากการกลั่นน้ำมัน หรือเรียกว่ากากน้ำมัน มีลักษณะเป็นของแข็ง มีสีขาวขุ่น บางครั้งจะมีสีเหลือง มีจุดหลอมเหลวต่ำที่ 40-50 องศาเซลเซียส โดยประมาณ พาราฟินชนิดนี้จะมีควันมาก ตัวเทียนอ่อนคดงอได้ง่าย

3.1.1.1.2 Fully Parafin

สกัดได้มาจาก Normal Parafin เป็นของแข็งสีขาวใส ไม่มีกลิ่นมีจุดหลอมเหลวที่ 60-70 องศาเซลเซียส โดยประมาณ มีอยู่ 2 ชนิด

- ชนิดเป็นเกล็ด ชนิดนี้จะมีความใส แววววาวและเกร็งกว่าชนิดแผ่นแต่มีราคาสูงและหาซื้อได้ยากกว่า
- ชนิดแผ่น มีราคาต่ำกว่าชนิดเกล็ด นิยมใช้กันมากที่สุด

3.1.1.2 กรดสเตียริก (Stearic Acid)

มีลักษณะเป็นเกล็ด สีขาวขุ่น ใช้ผสมในการทำเทียนประมาณ 1-2 ช้อนโต๊ะ สำหรับเทียน 500 กรัม ช่วยทำให้เทียนเหนียวแน่นไม่แตกหักง่าย แกะจากพิมพ์ง่าย และทำให้ผิวเทียนมีความเงามัน

3.1.1.3 โพลีเอททีลีน (Polyester Esterin : P.E)

มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาวขุ่น เกล็ดจะมีลักษณะเป็นแผ่นบางๆ เล็กๆ กรอบ ใช้ผสมในการทำเทียนประมาณ 5-10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักพาราฟิน ช่วยทำให้เทียนแข็งมากขึ้น จุดไฟติดนานขึ้น และมีควันน้อยลง

3.1.1.4 ไส้เทียน (Wick Tabs)

ต้องทำจากเส้นด้าย 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีใยสังเคราะห์ใดๆเจือปน การคำนวณหาขนาดของไส้เทียนให้ใช้สูตร $\frac{1}{15}$ x เส้นผ่าศูนย์กลางของเทียน เช่น แบบเทียนมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทียนยาว 6 นิ้ว ความหนาของไส้เทียนจะเท่ากับ $\frac{1}{15}\ \ 3 = \frac{1}{5}$ นิ้ว จะใช้ไส้เทียนเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ $\frac{1}{5}$ นิ้ว ยาว 7 นิ้ว เหตุที่ต้องใช้ไส้เทียนยาว 7 นิ้วเพราะความยาวของเทียน 6 นิ้ว ไส้เทียนต้องยาวกว่าเพื่อไว้สำหรับจุด

3.1.2 กรรมวิธีเบื้องต้นในการทำเทียน

หลังจากนำส่วนผสมต่างๆมาผสมแล้วหลอมจนเป็นเนื้อเดียวกันโดยการหลอมจะไม่สามารถนำส่วนผสมไปหลอมผ่านความร้อนโดยตรงได้ แล้วจึงนำมาเทลงแบบ ซึ่งเป็นการหล่อเทียนจากแบบ โดยกรรมวิธีนี้เรียกว่าการหล่อแบบถอดแบบ ใช้แบบพิมพ์จากวัสดุชนิดต่างๆ ได้แก่ พลาสติก สังกะสี อลูมิเนียม สเตนเลส ยางพารา หรือ ซิลิโคน ฯลฯ เป็นแม่พิมพ์ในการหล่อเทียน การใส่ไส้จะใส่ในแม่พิมพ์ก่อนเทเทียนลงในพิมพ์ เมื่อเทียนแข็งตัว จึงถอดเทียนออกจากแบบ วิธีการถอดออกจากแบบถ้าเป็นแม่พิมพ์โลหะจะถอดจากพิมพ์ด้วยความร้อนหรือความเย็นวิธีใดวิธีหนึ่งขึ้นอยู่กับรูปทรงของแม่พิมพ์ ถ้าเป็นแม่พิมพ์พลาสติกจะถอดแบบด้วยความร้อน และถ้าเป็นแม่พิมพ์ยางพารา และซิลิโคนจะดึงแม่พิมพ์ออกจากแบบได้เลย

3.2 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

3.2.1 พาราฟินบริสุทธิ์
3.2.2 กรดสเตียริก
3.2.3 โพลีเอททีลีน
3.2.4 ไส้เทียน
3.2.5 น้ำ
3.2.6 น้ำมันพืช

3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

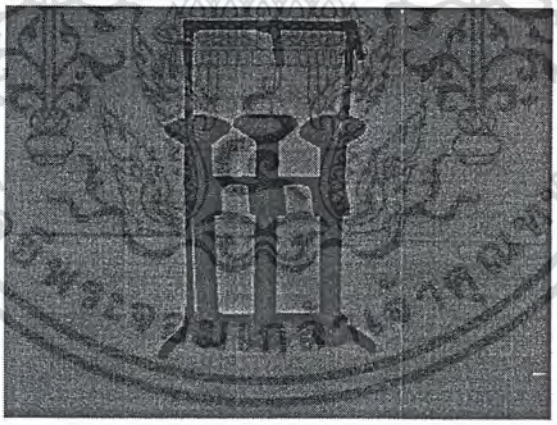
3.3.1 โมลด์อลูมิเนียมทรงกระบอกกรวง เส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 มม. ยาว 160 มม.
3.3.2 เทอร์โมมิเตอร์
3.3.3 นาฬิกาจับเวลา
3.3.4 จุกอลูมิเนียมเจาะรูตรงกลาง
3.3.5 หม้อต้มมีด้ามจับ
3.3.6 กะทะไฟฟ้า
3.3.7 เครื่องเป่าลมร้อน
3.3.8 แท่งเหล็กทรงกลมตัน เส้นผ่านศูนย์กลาง ซม.
3.3.9 กรวยสังกะสี
3.3.10 แท่งพันด้าย
3.2.11 อุปกรณ์ตักน้ำเทียน
3.3.12 ถ้วยชั่งตวง
3.3.13 มีดตัด
3.3.14 หม้อต้มโมลด์เพื่อทำความสะอาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิธีการทดลอง

3.4.1 เตรียมโมลด์โดยทำความสะอาดโมลด์ให้สะอาดด้วยแปรงล้างหลอดทดลอง ทำการร้อยด้ายผ่านจุกอลูมิเนียมด้านล่างสุด จากนั้นก็ผ่านโมลด์, กรวย แล้วจึงไปพันด้ายที่แท่งพันด้ายด้านบน จะได้เป็นชุดโมลด์ที่เตรียมจะใส่เทียน

รูปที่ 3.1 ทำความสะอาดโมลด์

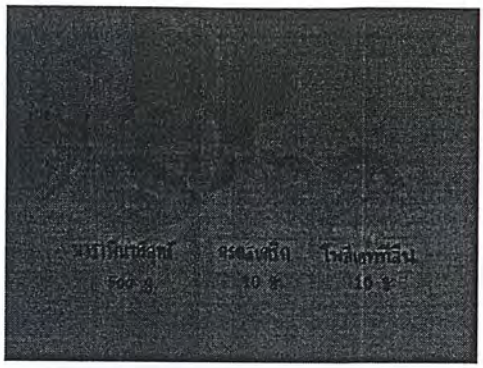


รูปที่ 3.2 โมลด์ร้อยด้ายเรียบร้อยเตรียมเทน้ำเทียน

3.4.2 ชั่งตวงส่วนผสมโดยใช้ส่วนผสมมีอัตราส่วนดังนี้

- พาราฟินบริสุทธิ์ 500 กรัม
- กรดสเตริก 10 กรัม
- โพลีเอททีลีน 10 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

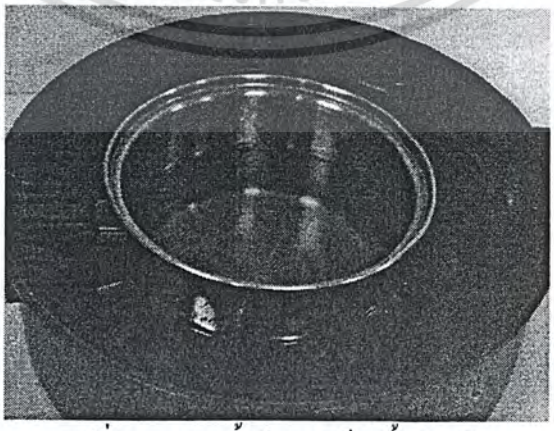


รูปที่ 3.3 ส่วนผสมต่างๆ

3.4.3 นำส่วนผสมทั้งหมดมาผสมกันในหม้อต้มที่ผ่านความร้อนด้วยตัวนำความร้อนที่อาจเป็นน้ำหรือน้ำมันพืช

รูปที่ 3.4 ผสมส่วนผสมต่างๆลงในหม้อต้ม

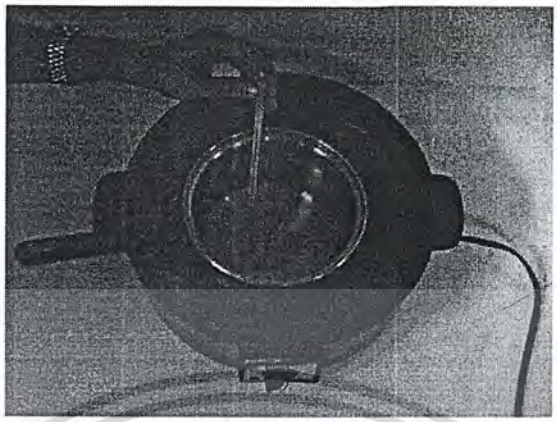
3.4.4 หลอมส่วนผสมทั้งหมดจนเป็นเนื้อเดียวกันจนอุณหภูมิสูงพอ



รูปที่ 3.5 หลอมน้ำเทียนจนเป็นเนื้อเดียวกัน

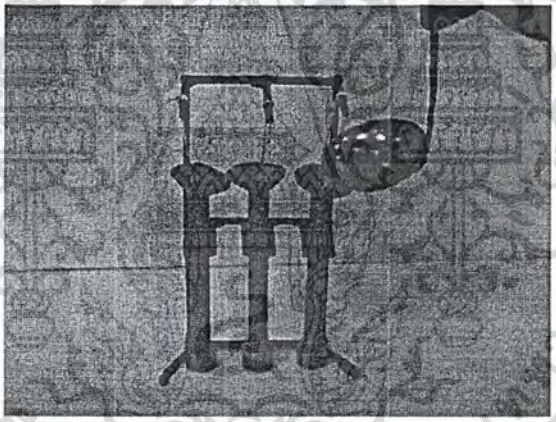
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 วัดอุณหภูมิจนถึงอุณหภูมิที่ 130 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.6 แสดงการวัดอุณหภูมิขณะทำการหลอมเทียน

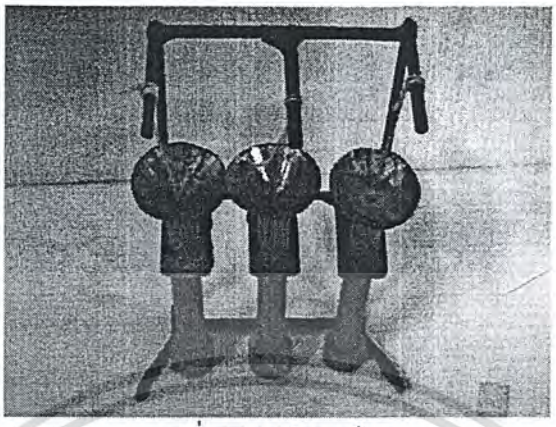
3.4.6 เทส่วนผสมที่หลอมละลายจนเป็นเนื้อเดียวกันและอุณหภูมิสูงพอแล้วลงในโมลด์ที่จัดเตรียมไว้



รูปที่ 3.7 แสดงการเทน้ำเทียนลงในโมลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7 รอให้เนื้อเทียนเย็นโดยการปล่อยทิ้งไว้หรือหล่อเย็น



รูปที่ 3.8 รอเทียนแข็งตัว

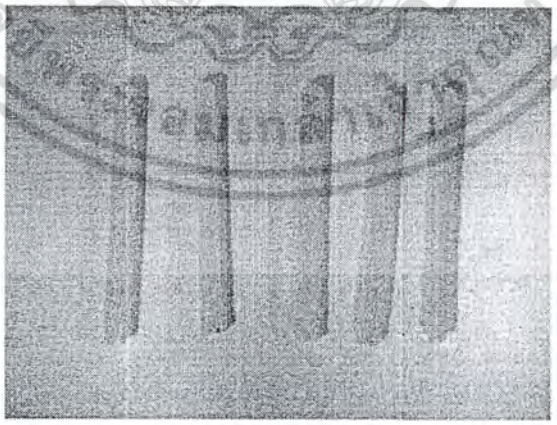
3.4.8 นำเทียนที่เย็นแล้วออกจากโมลด์โดยตัดด้ายที่พันไว้ที่แท่งพันด้าย ดึงเอากรวยและจุกออก จะเหลือแต่แท่งโมลด์ที่มีเทียนอยู่ภายใน ให้ความร้อนแก่โมลด์นั้นโดยการเป่าลมร้อนซึ่งส่ายหัวเป่าไปตลอดความยาวโดยไม่เป่าหยุดนิ่งอยู่กับที่ หรือจุ่มในน้ำอุ่น จึงใช้แท่งเหล็กดันออก ก็จะได้เทียนที่เสร็จสมบูรณ์

รูปที่ 3.9 ตัดด้ายออกเพื่อทำการถอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.10 เป่าลมร้อนเพื่อให้ถอดง่าย

รูปที่ 3.11 ดันเทียนออกจากโมลด์



รูปที่ 3.12 เทียนสำเร็จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ขั้นตอนการทดลอง

3.5.1 การทดลองที่ 1 การเทน้ำเทียนลงโมลด์

ตัวแปรที่ต้องศึกษา คือ A : อุณหภูมิ

B : เวลา

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.5.1.1 ทำความสะอาดโมลด์และเตรียมโมลด์

3.5.1.2 ผสมส่วนผสมตามวิธีการทดลอง

3.5.1.3 หลอมเทียนจนเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.1.4 เทลงโมลด์

- ทำการวัดอุณหภูมิของเนื้อเทียนขณะก่อนจะเทลงโมลด์
- จับเวลาที่ใช้ในการเทลงโมลด์

3.5.1.5 รอเทียนแข็งด้วยการปล่อยทิ้งไว้

3.5.1.6 เอาเทียนออก โดยการใช้ลมร้อนเป่าแล้วดันออกมา

3.5.2 การทดลองที่ 2 การเย็นตัว

ตัวแปรที่ต้องศึกษา คือ A : อุณหภูมิ

B : เวลา

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.5.2.1 ทำความสะอาดโมลด์และเตรียมโมลด์

3.5.2.2 ผสมส่วนผสมตามวิธีการทดลอง

3.5.2.3 หลอมเทียนจนเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.2.4 เทลงโมลด์

3.5.2.5 เทียนเย็นตัวโดยการปล่อยทิ้งไว้

- วัดอุณหภูมิที่ใช้ในขณะเย็นตัวหรือที่ปล่อยทิ้งไว้
- จับเวลาที่ใช้ในการปล่อยให้เย็นตัว

3.4.2.6 ดันเทียนออกจากโมลด์ โดยการใช้ลมร้อนเป่าก่อนที่จะถอดจากโมลด์

3.5.3 การทดลองที่ 3 การถอดโมลด์

ตัวแปรที่ต้องศึกษา คือ A : อุณหภูมิ

B : เวลา

มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

3.5.3.1 ทำความสะอาดโมลด์และเตรียมโมลด์

3.5.3.2 ผสมส่วนผสมตามวิธีการทดลอง

3.5.3.3 หลอมเทียนจนเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.3.4 เทลงโมลด์

3.5.3.5 เทียนเย็นตัวโดยการตั้งทิ้งไว้ตามอุณหภูมิห้อง

3.5.3.6 การถอดโมลด์

3.5.3.6.1 ถอดโมลด์โดยการจุ่มในน้ำอุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.3.6.2 ถอดโมลด์โดยการเป่าลมร้อน

- วัดอุณหภูมิที่ใช้ลมร้อนเป่าเพื่อถอดโมลด์
- จับเวลาที่ใช้ในการเป่า

3.5.4 การทดลองที่ 4 เทียนที่ได้จากการทดลอง

ตัวแปรที่ต้องศึกษา คือ A : น้ำหนักเทียน

B : ความยาวเทียน

3.5.4.1 ทำความสะอาดโมลด์และเตรียมโมลด์

3.5.4.2 ผสมส่วนผสมตามวิธีการทดลอง

3.5.4.3 หลอมเทียนจนเป็นเนื้อเดียวกัน

3.5.4.4 เทลงโมลด์

3.5.4.5 เทียนเย็นตัวโดยการตั้งทิ้งไว้ตามอุณหภูมิห้อง

3.5.4.6 ถอดโมลด์ โดยการเป่าลมร้อน

3.5.4.7 นำเทียนที่ได้มา

- ชั่งน้ำหนัก
- วัดความยาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การวิเคราะห์การเทลงโมลด์

ให้ A เป็นตัวแปรอุณหภูมิ

B เป็นตัวแปร เวลา

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าต่างๆของอุณหภูมิที่ใช้ในการเทน้ำเทียนลงโมลด์

กลุ่ม / โมลด์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tj	Tj*Tj
1	78	103	103	103	130	130	130	130	130	130	1167	1361889
2	78	103	103	103	130	130	130	130	130	130	1167	1361889
3	78	103	103	103	130	130	130	130	130	130	1167	1361889
4	78	103	103	103	130	130	130	130	130	130	1167	1361889
5	78	103	103	103	130	130	130	130	130	130	1167	1361889
6	78	103	103	103	130	130	130	130	130	130	1167	1361889
Ti	468	618	618	618	780	780	780	780	780	780	7002	
Ti*Ti	219024	381924	381924	381924	608400	608400	608400	608400	608400	608400		

ค่าเฉลี่ย = 116.7

ค่าเบี่ยงเบน = 17.819

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าต่างๆของเวลาที่ใช้ในการเทน้ำเทียนลงโมลด์

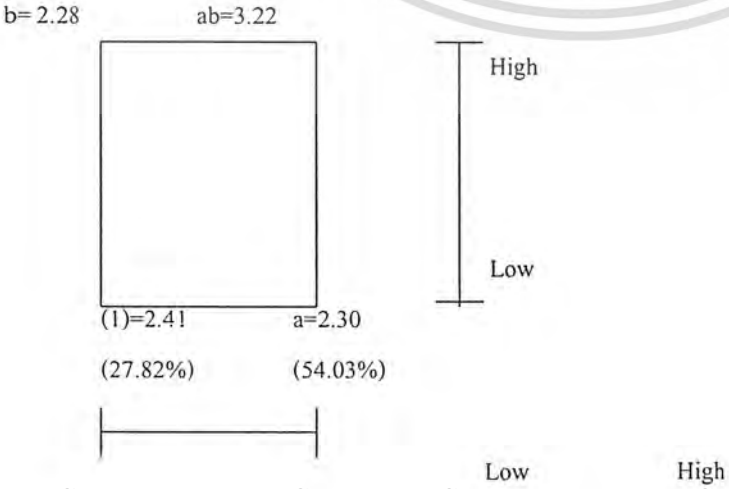
กลุ่ม / โมลด์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tj	Tj*Tj
1	5	7	5	6	6	6	6	6	6	6	59	3481
2	5	7	5	6	6	6	6	6	6	6	59	3481
3	5	7	5	6	6	6	6	6	6	6	59	3481
4	5	7	5	6	6	6	6	6	6	6	59	3481
5	5	7	5	6	6	6	6	6	6	6	59	3481
6	5	7	5	6	6	6	6	6	6	6	59	3481
Ti	30	42	30	36	36	36	36	36	36	36	354	
Ti*Ti	900	1764	900	1296	1296	1296	1296	1296	1296	1296		

ค่าเฉลี่ย = 5.9

ค่าเบี่ยงเบน = 0.5431

จากตารางทั้งสองสามารถวิเคราะห์ Factorial Design ได้ดังนี้

Factor A	Factor B	Treatment Combination	Replicate I	Replicate II	Total
-	-	A low, B low	1.22	1.19	2.41
+	-	A high, B low	1.12	1.18	2.30
-	+	A low, B high	1.21	1.07	2.28
+	+	A high, B high	1.61	1.61	3.22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก Main Effect

$$A = \frac{1}{2n}\left[ab + a + b + (1)\right] \tag{4.1}$$

$$B = \frac{1}{2n}\left[ab + b - a - (1)\right] \tag{4.2}$$

$$AB = \frac{1}{2n}\left[ab + (1) - a - b\right] \tag{4.3}$$

จะได้

$$A = \frac{1}{2(2)}\left[3.22 + 2.30 - 2.28 - 2.41\right] = 0.2075$$

$$B = \frac{1}{2(2)}\left[3.22 + 2.28 - 2.30 - 2.41\right] = 0.1975$$

$$AB = \frac{1}{2(2)}\left[3.22 + 2.41 - 2.30 - 2.28\right] = 0.2625$$

จากสมการ Sum of Square

$$SS_A = \frac{\left[ab + a - b - (1)\right]^2}{4n} \tag{4.4}$$

$$SS_B = \frac{\left[ab + b - a - (1)\right]^2}{4n} \tag{4.5}$$

$$SS_{AB} = \frac{\left[ab + (1) - a - b\right]^2}{4n} \tag{4.6}$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^{2}\sum_{i=1}^{2}\sum_{i=1}^{2} y_{ijk}^2 - \frac{y^2\cdots}{4n} \tag{4.7}$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \tag{4.8}$$

จะได้

$$SS_A = \frac{\left[3.22 + 2.30 - 2.28 - 2.41\right]^2}{4(2)} = 0.0861$$

$$SS_B = \frac{\left[3.22 + 2.28 - 2.30 - 2.41\right]^2}{4(2)} = 0.0780$$

$$SS_{AB} = \frac{\left[3.22 + 2.41 - 2.30 - 2.28\right]^2}{4(2)} = 0.1378$$

$$SS_T = 13.3445 - 13.0305 = 0.314$$

$$SS_E = 0.314 - 0.0861 - 0.0780 = 0.1499$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของการเทน้ำเทียนลงโมลด์

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	0.0861	1	0.0861	2.296
B	0.0780	1	0.0780	2.08
AB	0.1378	1	0.1378	3.6747
Error	0.1499	4	0.0375	
Total	0.314	7		

4.2 วิเคราะห์ผลของการเย็นตัว

ให้ A เป็นตัวแปรอุณหภูมิ

B เป็นตัวแปรเวลา

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าต่างๆของอุณหภูมิที่ใช้ในการเย็นตัวของแต่ละการทดลอง

กลุ่ม โมลด์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tj	Tj*Tj
1	27	32	27	36	36	30	30	30	30	30	308	94864
2	27	32	27	36	36	30	30	30	30	30	308	94864
3	27	32	27	36	36	30	30	30	30	30	308	94864
4	27	32	27	36	36	30	30	30	30	30	308	94864
5	27	32	27	36	36	30	30	30	30	30	308	94864
6	27	32	27	36	36	30	30	30	30	30	308	94864
Ti	162	192	162	216	216	180	180	180	180	180	1848	3415104
Ti*Ti	26244	36864	26244	46656	46656	32400	32400	32400	32400	32400	3415104	

ค่าเฉลี่ย = 30.8

ค่าเบี่ยงเบน = 2.985

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงค่าต่างๆของเวลาที่ใช้ในการเย็นตัวของแต่ละการทดลอง

กลุ่ม / เวลา	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tj	Tj*Tj
1	25	40	25	50	50	50	50	50	50	50	440	193600
2	25	40	25	50	50	50	50	50	50	50	440	193600
3	25	40	25	50	50	50	50	50	50	50	440	193600
4	25	40	25	50	50	50	50	50	50	50	440	193600
5	25	40	25	50	50	50	50	50	50	50	440	193600
6	25	40	25	50	50	50	50	50	50	50	440	193600
Ti	150	240	150	300	300	300	300	300	300	300	2640	
Ti*Ti	22500	57600	22500	90000	90000	90000	90000	90000	90000	90000		

ค่าเฉลี่ย = 44

ค่าเบี่ยงเบน = 10.034

จากตารางทั้งสองสามารถวิเคราะห์ Factorial Design ได้ดังนี้

กำหนดให้ 5 แทน เทียนที่ถอดได้แข็งมาก

4 แทน เทียนที่ถอดได้แข็ง

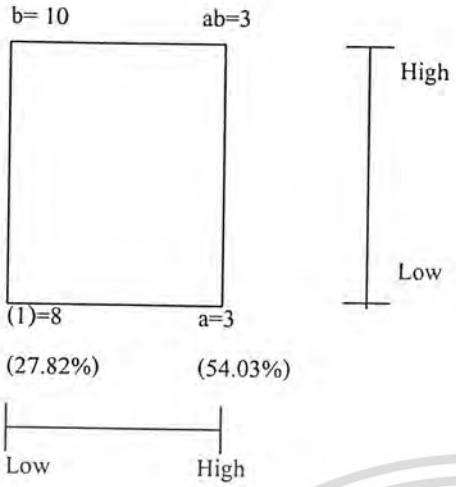
3 แทน เทียนที่ถอดได้แข็งปานกลาง

2 แทน เทียนที่ได้แข็งเล็กน้อย

1 แทนเทียนที่ได้ไม่แข็ง

Factor		Treatment	Replicate		
A	B	Combination	I	II	Total
-	-	A low, B low	4	4	8
+	-	A high, B low	1	2	3
-	+	A low, B high	5	5	10
+	+	A high, B high	2	1	3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการ Main Effect (4.1)-(4.3) จะได้

$$A = \frac{1}{2(2)}[3+3-10-8] = -3$$

$$B = \frac{1}{2(2)}[3+10-3-8] = 0.5$$

$$AB = \frac{1}{2(2)}[3+8-3-10] = -0.5$$

จากสมการ Sum of Square (4.4)-(4.8)

$$SS_A = \frac{[3+3-10-8]^2}{4(2)} = 18$$

$$SS_B = \frac{[3+10-3-8]^2}{4(2)} = 0.5$$

$$SS_{AB} = \frac{[3+8-3-10]^2}{4(2)} = 0.5$$

$$SS_T = 92 - 72 = 20$$

$$SS_E = 20 - 18 - 0.5 - 0.5 = 1$$

โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของการเย็นตัว

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	18	1	18	72
B	0.5	1	0.5	2
AB	0.5	1	0.5	2
Error	1	4	0.25	
Total	20	7		

4.3 การวิเคราะห์ผลของการถอดโมลด์

ให้ A เป็นตัวแปรอุณหภูมิ

B เป็นตัวแปรเวลา

ตารางที่4.7 แสดงค่าต่างๆของอุณหภูมิในการถอดโมลด์ของแต่ละการทดลอง

กลุ่ม / โมลด์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Tj	Tj*Tj
1	50	58	55	60	45	35	44	61	58	50	516	266256
2	50	58	55	60	40	40	44	59	60	50	516	266256
3	50	58	55	60	47	39	43	52	65	55	524	274576
4	50	58	55	60	45	39	44	69	55	48	523	273529
5	50	58	55	60	47	39	42	61	65	48	525	275625
6	50	58	55	60	44	40	43	49	58	55	512	262144
Ti	300	348	330	360	268	232	260	351	361	306	3116	
Ti*Ti	90000	121104	108900	129600	71824	53824	67600	123201	130321	93636		

ค่าเฉลี่ย = 51.93

ค่าเบี่ยงเบน = 7.835

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่าต่างๆของเวลาในการถอดโมลด์

กลุ่ม / โมล์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	5	3	10	10	10	10	10	10	10	10
2	5	3	10	10	10	10	10	10	10	10
3	5	3	10	10	10	10	10	10	10	10
4	5	3	10	10	10	10	10	10	10	10
5	5	3	10	10	10	10	10	10	10	10
6	5	3	10	10	10	10	10	10	10	10
T_i	30	18	60	60	60	60	60	60	60	60
T_i^2	900	324	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600	3600

ค่าเฉลี่ย = 8.8

ค่าเบี่ยงเบน = 2.462

จากตารางทั้งสองสามารถวิเคราะห์ Factorial Design ได้ดังนี้

กำหนดให้ 6 แทน เทียนหลอมใช้ไม่ได้หลังจากการถอดโมลด์

5 แทน ถอดออกง่ายมาก

4 แทน ถอดออกง่าย

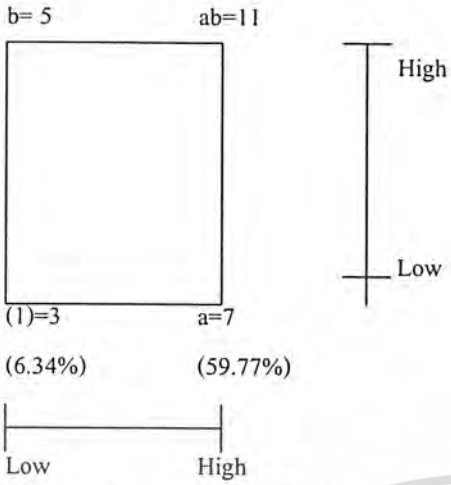
3 แทน ปานกลาง

2 แทน ถอดออกยาก

1 แทน ถอดยากมาก

Factor		Treatment	Replicate		
A	B	Combination	I	II	Total
-	-	A low, B low	1	2	3
+	-	A high, B low	3	4	7
-	+	A low, B high	2	3	5
+	+	A high, B high	6	5	11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการ Main Effect (4.1)-(4.3) จะได้

$$A = \frac{1}{2(2)}\left[11+7-5-3\right] = 2.5$$

$$B = \frac{1}{2(2)}\left[11+5-7-3\right] = 0.67$$

$$AB = \frac{1}{2(2)}\left[11+3-7-5\right] = 0.5$$

จากสมการ Sum of Square (4.4)-(4.8)
จะได้

$$SS_A = \frac{(10)^2}{4(2)} = 12.5$$

$$SS_B = \frac{(6)^2}{4(2)} = 4.5$$

$$SS_{AB} = \frac{(2)^2}{4(2)} = 0.5$$

$$SS_T = 104 - 84.5 = 19.5$$

$$SS_E = 19.5 - 12.5 - 4.5 - 0.5 = 2$$

โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของการถอดโมลด์

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	12.5	1	12.5	25
B	4.5	1	4.5	9
AB	0.5	1	0.5	1
Error	2	4	0.5	
Total	19.5	7		

4.4 การวิเคราะห์เทียนที่ได้จากการถอด

ให้ A เป็นตัวแปรน้ำหนักเทียน

B เป็นตัวแปรความยาว

ตารางที่ 4.10 แสดงค่าต่างๆของน้ำหนักที่ได้จากเทียน

กลุ่ม / โมลด์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tj	Tj*Tj
1	19	17	18	18	10	19	16.5	17	19	153.5	2356
2	19	18	18	18	15	19	16	17	18	158	2496
3	19	17.5	18.5	18	18	19	17	16	19	162	2624
4	19	17.5	19	18	14	19	16	16.5	18.5	157.5	2480
5	19	17	18	18.5	12	18	17	17	18.5	155	2402
6	18	17	18.5	17.5	11	19	16.5	16.5	17	151	2280
Ti	113	104	110	108	80	113	99	100	110	937	
Ti*Ti	12769	10816	12100	11664	6400	12769	9801	10000	12100		

ค่าเฉลี่ย = 17.352

ค่าเบี่ยงเบน = 1.9246

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.11 แสดงค่าต่างๆของความยาวที่ได้จากเทียน

กลุ่ม / โมลด์	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Tj	Tj*Tj
1	15	16	15.8	15.8	8.7	15.8	16	1.5	15.8	120.4	14496
2	16	15.8	16.1	15.8	13.5	15.8	16	17	15.6	141.6	20051
3	15.5	15.8	15.5	15.8	15.5	15.8	16	16	15.8	141.7	20079
4	16	16	15.5	15.8	13	15.8	16	15.8	15.5	139.4	19432
5	16	16.3	15.8	15.9	12	15.6	16	15.8	16	139.4	19432
6	15.8	15.5	15.6	15.5	11.3	15.8	16	15.5	15	136	18496
Ti	94.3	95.4	94.3	94.6	74	94.6	96	81.6	93.7	818.5	669942
Ti*Ti	8892.5	9101.2	8892.5	8949.2	5476	8949.2	9216	6658.6	8779.7	669942	

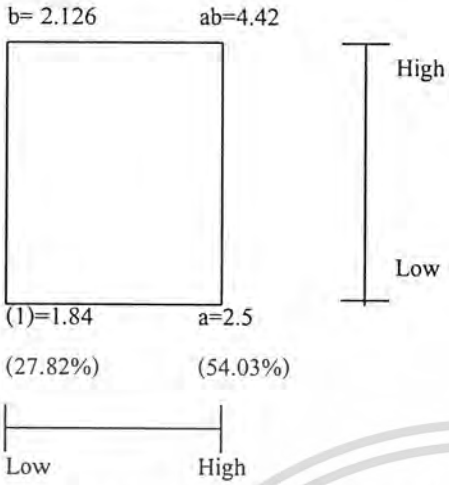
ค่าแฉลี่ย = 15.157

ค่าเบี่ยงเบน = 2.3183

จากตารางทั้งสองสามารถวิเคราะห์ Factorial Design ได้ดังนี้

Factor		Treatment	Replicate		
A	B	Combination	I	II	Total
-	-	A low, B low	0.87	0.97	1.84
+	-	A high, B low	1.22	1.28	2.50
-	+	A low, B high	1.076	1.05	2.126
+	+	A high, B high	1.20	1.22	2.42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



จากสมการ Main Effect (4.1)-(4.3) จะได้

$$A = \frac{1}{2(2)}\left[2.42 + 2.50 - 2.126 - 1.84\right] = 0.2385$$

$$B = \frac{1}{2(2)}\left[2.42 + 2.126 - 2.50 - 1.84\right] = 0.0515$$

$$AB = \frac{1}{2(2)}\left[2.42 + 1.84 - 2.50 - 2.126\right] = -0.0915$$

จากสมการ Sum of Square (4.4)-(4.8)

$$SS_A = \frac{\left[2.42 + 2.50 - 2.126 - 1.84\right]^2}{4(2)} = 0.1138$$

$$SS_B = \frac{\left[2.42 + 2.126 - 250 - 1.84\right]^2}{4(2)} = 0.0053$$

$$SS_{AB} = \frac{\left[2.42 + 1.84 - 2.50 - 2.126\right]^2}{4(2)} = 0.0186$$

$$SS_T = 10.0133 - 9.8701 = 0.1432$$

$$SS_E = 0.1432 - 0.1138 - 0.0053 - 0.0186 = 0.0055$$

โดยสามารถสรุปได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 แสดง Analysis of Variance for the Experiment ของเทียนที่ได้

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	0.1138	1	0.1138	81.2857
B	0.0053	1	0.0053	3.7857
AB	0.0186	1	0.0186	12.8571
Error	0.0055	4	0.0014	
Total	0.1432	7		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 สรุปผลการทดลองด้วยวิธีทางสถิติและทฤษฎีออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 4.13 สรุปผลของกระบวนการทั้งหมด

วิธีการทดลอง	อุณหภูมิที่ได้จากการทดลอง (T C)	เวลาที่ได้จากการทดลอง T(sec)	ความสัมพันธ์ (interaction)
1. นำน้ำเทียนที่หลอมเหลวลงโมลด์	100-134.52 ค่าเฉลี่ยประมาณ 116.7	5.36-6.44 ค่าเฉลี่ยประมาณ 5.9	อุณหภูมิที่นำน้ำเทียนหลอมเหลวลงโมลด์ เป็นปฏิสัมพันธ์ กับเวลาที่ใช้ทดลองน้อย เช่นเดียวกับเวลาที่น้ำเทียนหลอมเหลวลงโมลด์มีปฏิสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้อย
2. การเย็นตัวของเทียน	27.815-33.78 ค่าเฉลี่ยประมาณ 30.8	34.0.3-44.034 ค่าเฉลี่ยประมาณ 44	อุณหภูมิของการเย็นตัวของเทียนเป็นปฏิสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการทดลองมาก เช่นเดียวกับเวลาในการเย็นตัวของเทียนเป็นปฏิสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เทียนเย็นตัว
3. นำเทียนออกจากโมลด์	44.095-59.765 ค่าเฉลี่ยประมาณ 51.13	6.38-11.26 ค่าเฉลี่ยประมาณ 8.8	อุณหภูมิของการนำเทียนออกจากโมลด์เป็นปฏิสัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการทดลองมาก แต่เวลาที่ใช้ในการถอดโมลด์เป็นปฏิสัมพันธ์กับอุณหภูมิน้อย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ **14.14** สรุปผลของเทียนต่อน้ำหนักและความยาว

รายละเอียด	น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (เซนติเมตร)	ความสัมพันธ์ (interaction
1. เทียนที่ได้จากการถอด	15.43-19.27 ค่าเฉลี่ย 17.35	12.84-17.475 ค่าเฉลี่ย 15.16	น้ำหนักมีปฏิสัมพันธ์กับความยาว แต่ความยาวมีปฏิสัมพันธ์กับน้ำหนักน้อยมาก

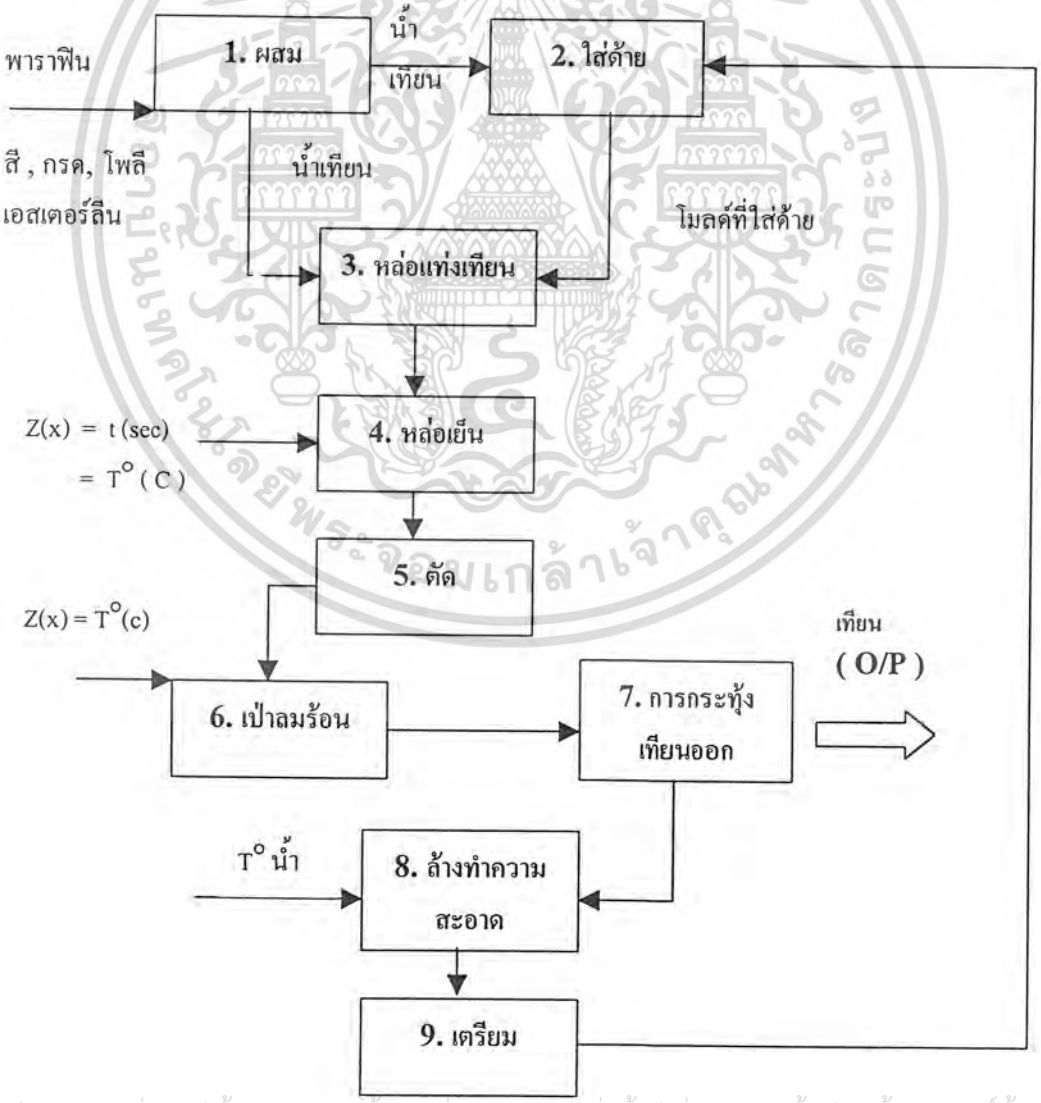
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
การประยุกต์การออกแบบเครื่องจักรทำเทียนไขอัตโนมัติ

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงการนำข้อมูลที่ได้จากการแปรผล นำมาใช้ประยุกต์ในการออกแบบแบบจำลอง (Model) ในการทำเครื่องจักร มีจุดประสงค์เพื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาประยุกต์ใช้ โดยเป็นการออกแบบขั้นพื้นฐานจากวิชาการออกแบบเครื่องจักรกล (Machine Design) มาอ้างอิง ดังนั้นแบบที่นำเสนออาจมีการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงได้ ถ้านำไปใช้ในการสร้างเครื่องจักรผลิตเทียนไขอัตโนมัติ

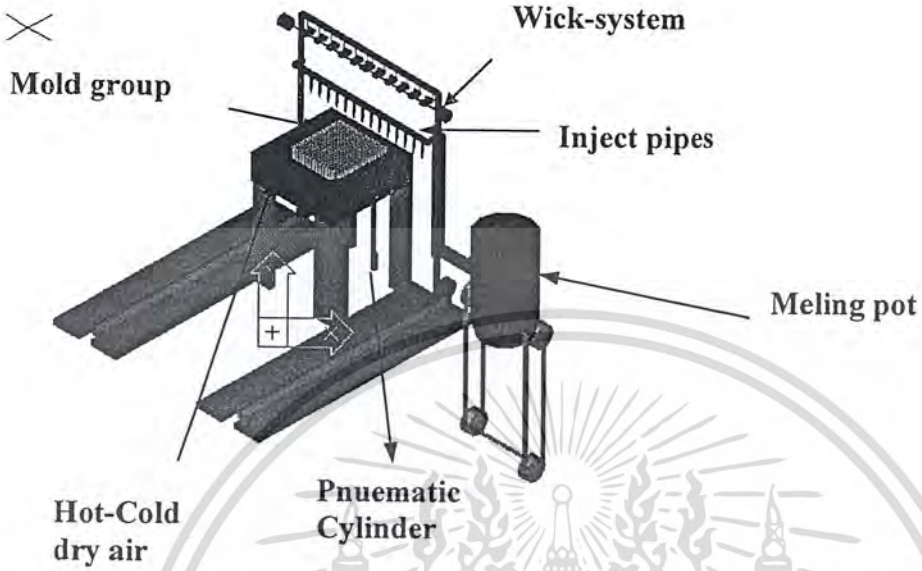
5.1 แผนภูมิการไหลของการออกแบบ (Flow-chat diagram of design)

รูปที่ 5.1 แสดงแผนภูมิการไหลของการออกแบบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 แบบจำลอง



รูปที่ 5.2 แสดงแบบจำลองของเครื่องจักร

5.2.1 ส่วนประกอบต่างๆ

5.2.1.1.1 แท้งค์หลอมเหลวส่วนผสม (Melting Tank)

5.2.1.1.2 กลไกลของฐาน ปิด-เปิด ใส่ด้าย

5.2.1.1.3 ระบบใส่ด้าย

5.2.1.1.4 ระบบกระทุ้งเทียนออกจากโมล์

5.2.1.1.5 ระบบลมร้อน-เย็น

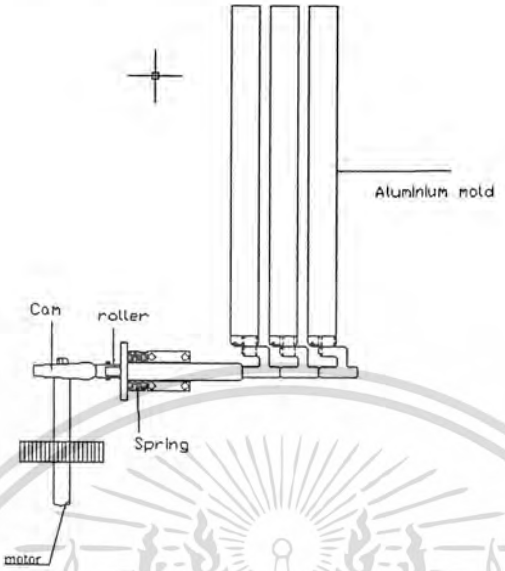
5.2.1.1.6 ระบบตัดด้าย

5.2.2 หลักการทำงานของเครื่องจักรพื้นฐานเบื้องต้น

มอเตอร์จะส่งกำลังมาที่ส่วน ปิด-เปิดของฐานใส่ด้ายเพื่อนำเส้นด้ายผ่านลงท่อโมลด์ จากนั้น แท้งค์หลอมเหลวส่วนผสมจะทำการหลอมเหลวส่วนผสมของเทียน(ประกอบด้วย พาราฟิน ,โพลีเอสเทอร์ลีน ,กรดสเตริก) เมื่อถึงสภาวะที่เหมาะสมพร้อมที่จะนำส่วนผสมโมลด์ จะมีปั๊มที่นำส่วนผสมของเทียนลำเลียงน้ำเทียนลงโมลด์ โดยระหว่างที่ฉีดส่วนผสมลงโมลด์ จะมีขดลวดพันอยู่รอบๆท่อส่งเทียนเพื่อไม่ให้น้ำเทียนอุดตัน ซึ่งระยะเวลาระหว่างรอเทียนเย็นตัวโดยจะเย็นตัวได้เร็วขึ้นโดยลมเย็น เมื่อถึงเวลาที่เทียนเย็นตัวจะมีลมร้อนเป่าเทียน จากนั้นตัวกระทุ้งจะทำการดันเทียนให้ออกจากโมลด์ ซึ่งต้นกำลังจะเป็นกระบอกนิวเมติกส่งกำลังผ่านระบบกระทุ้งเพื่อดันให้เทียนออกจากโมลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.3 กลไกของการเปิด-ปิด ฐานใส่ด้าย



รูปที่ 5.3 แสดง กลไกของการเปิด-ปิด ฐานใส่ด้าย

5.2.3.1 การคำนวณ

เมื่อกำหนดให้

V = ความเร็วของการเลื่อนในส่วนของฐานเทียน (100mm/sec)

F = แรงที่ใช้ในการเลื่อน (100 N.m)

P = กำลังขับมอเตอร์ (W)

จากสูตร

$$P = F \times V \qquad (5.1)$$

ดังนั้น กำลังที่ใช้ขับมอเตอร์ เท่ากับ

P = 100 N X 1 m/sec

P = 100 W

จากระบบกำหนดให้

การส่งกำลังของลูกเบี้ยวที่ส่งผ่านลูกกลิ้งมีประสิทธิภาพเท่ากับ 80%

ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของมอเตอร์ = 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น กำลังที่ใช้ขับมอเตอร์ จึงเท่ากับ

$$P = \frac{100W}{0.8} \times 2$$

$$P = 250 \text{ W}$$

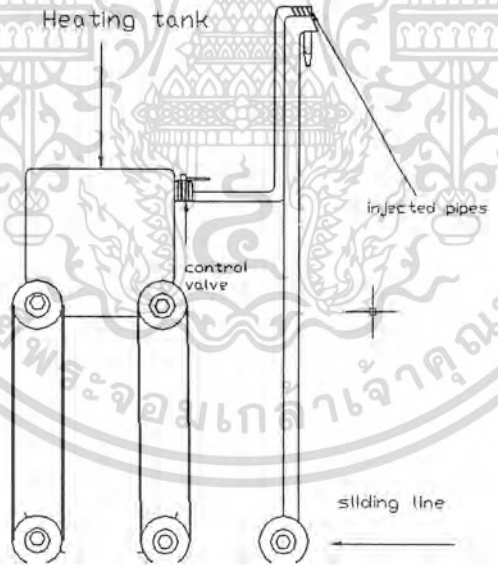
จากการคำนวณที่ได้มาจึงเลือกใช้มอเตอร์ ขนาด 250 W

5.2.3.2 หลักการทำงาน

ลูกเบี้ยว (Cam) จะหมุนไปถูกลูกลื่น (roller) โดยลูกเบี้ยวจะโดนลูกลื่น ณ จุดที่เป็นมุมสูงสุด จากนั้น roller จะดันสปริงให้ยุบตัวเข้าเพื่อให้ก้านเหล็กไปดันส่วนที่เป็นตัวปิด-เปิด รับด้ายเทียนและจะทำงานดันต่อๆกันไป ซึ่งการทำงานที่กล่าวไป จะใช้มอเตอร์ขนาด 250 W เป็นต้นกำลังขับ

สภาวะของตัวปิด-เปิด เพื่อรับด้ายจะถูกดันกลับด้วย ขนาดของรูที่ร้อยด้ายจะไม่มีเนื่องจากรูเจาะจะไม่ตรงกัน แต่จะมีขนาดใหญ่เมื่อมีตัวดันดันที่ตัวปิด-เปิดรับด้ายไปอีกทางหนึ่ง

5.2.4 แท้งค์หลอมเหลวส่วนผสม (Melting Tank)



รูปที่ 5.4 แสดง แท้งค์หลอมเหลวส่วนผสม (Melting Tank)

5.2.4.1 รายละเอียดของเครื่อง

จากข้อมูลที่ได้ทำการสืบค้นมา สามารถสรุปและกำหนดเครื่องได้ดังนี้

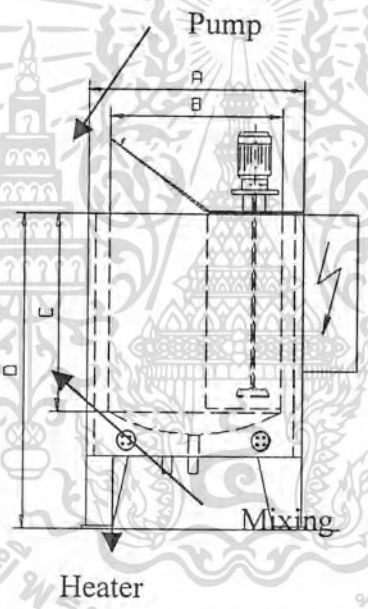
1. หัวฉีดน้ำเทียน จะมีอัตราการฉีดได้เท่ากับ 4.5oz/sec per head (maximumflow)
2. แท้งความร้อน (heater tank) ใช้กำลังไฟ 220 V_{ac} 50Hz 15 Amp
3. น้ำหนักและขนาดส่วนผสมที่รับได้ที่รับได้ 5 lbs 0.09-0.16 oz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ขนาดแท้งค์ เท่ากับ 30 cm x 30 cm X 40 cm. สามารถเติมน้ำเทียนใส่โมลด์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13.5 mm ยาว 160 mm. ได้สูงสุด 300-350 แท่ง/แท้งค์

5.2.4.2 หลักการทำงาน

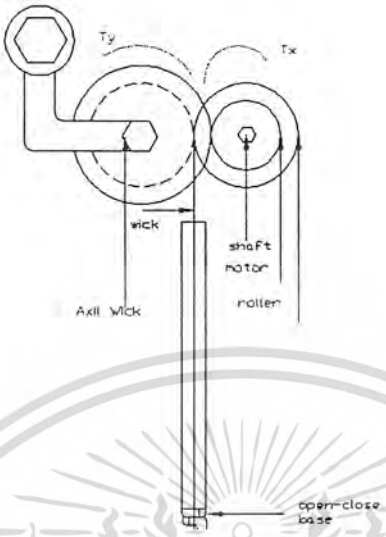
จะสามารถเทส่วนผสมที่เป็นวัตถุดิบในการทำเทียนไขได้ที่ด้านบนแท้งค์ โดยบนแท้งค์จะมีฝาเปิด-ปิด รับส่วนผสม และภายในจะมี heater ให้ความร้อน โดยความร้อนที่ใช้ในการหลอมเหลวน้ำเทียนจะมีอุณหภูมิที่ปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 100-150 องศาเซลเซียส (ข้อมูลได้มาจากการแปลผลการทดลอง) ภายในแท้งค์จะมีใบพัดกวนส่วนผสมให้เข้ากัน (ดังรูปที่ 5.4) และจะมีปั๊มดูดส่วนผสมที่ใช้ในการทำเทียนไขไปสู่หัวฉีด ที่ฉีดด้วยความเร็ว 4.5 oz/sec ต่อหัว เข้าสู่โมลด์ โดยจะมีโมลด์ที่ต่อกันเป็นชุดอยู่ทั้งหมด 11 ชุด ดังนั้นจึงเป็นผลให้หัวฉีดต่ออยู่ด้วยกันทั้งหมด 11 หัวฉีดต่อ1 รางเลื่อน ซึ่งระหว่างที่ฉีดน้ำเทียนเข้าสู่โมลด์จะมี คอยล์(coil) ให้ความร้อนต่อน้ำเทียนเพื่อไม่ให้หัวฉีดอุดตันอยู่ตลอดเวลา



รูปที่ 5.5 แสดงภาพภายในของหม้อต้ม (Melting Pot)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.5 ตัวใส่ด้าย



รูปที่ 5.6 แสดงตัวใส่ด้าย

5.2.5.1 การคำนวณ

เมื่อกำหนดให้

ω = ความเร็วเชิงมุมของ roller (10 rad/sec)

r = รัศมีของ roller (40 mm)

P = กำลังขับมอเตอร์ (W)

F = แรงเชิงเส้นระหว่างหลอดด้ายกับ roller (20 N)

จากสูตร

Torque = F X R (5.2)

ดังนั้นจึงได้ค่าทอร์กของ roller เท่ากับ

Torque = 20 N X 0.4 m

Torque = 8 N.m

จากสูตร

P = Torque X ω (5.3)

ดังนั้น กำลังที่ใช้ขับมอเตอร์ เท่ากับ

P = 8 N.m X 10 rad/sec

P = 80 W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากระบบกำหนดให้

กำลังที่ roller ส่งผ่านด้าย มีประสิทธิภาพเท่ากับ 90%

ค่าความปลอดภัย (Safety factor) ของมอเตอร์ = 2.5

ดังนั้น กำลังที่ใช้ขับมอเตอร์ จึงเท่ากับ

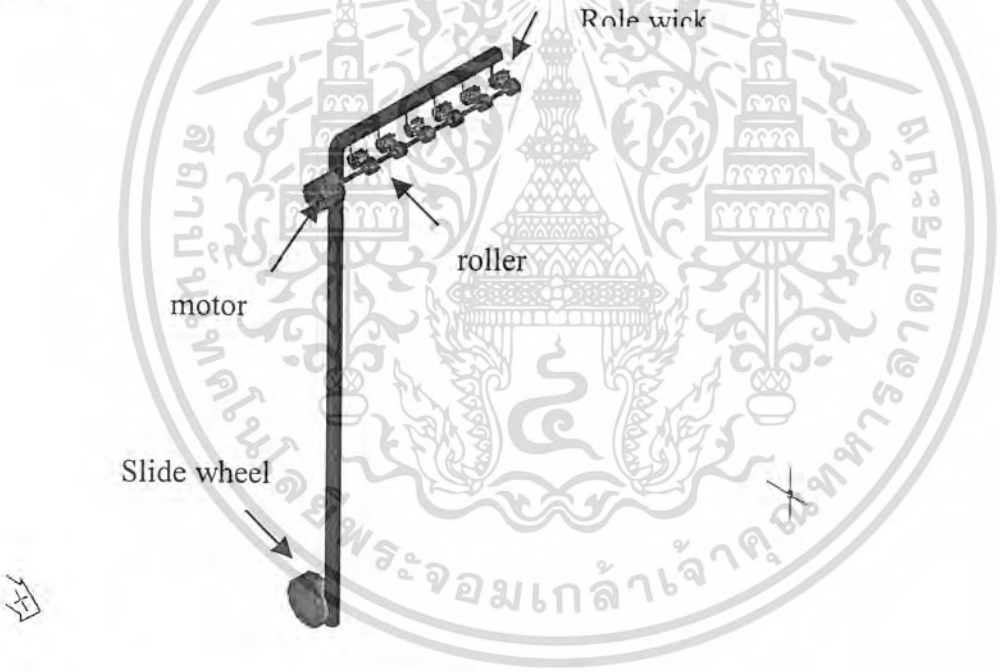
$$P = \frac{80W}{0.9} \times 2.5$$

$$P = 222.2 \text{ W}$$

จากผลของการคำนวณค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ ได้ 222.2 W จึงทำให้เลือกมอเตอร์ได้เท่ากับ 250 W

5.2.5.2 หลักการทำงาน

จากรูป

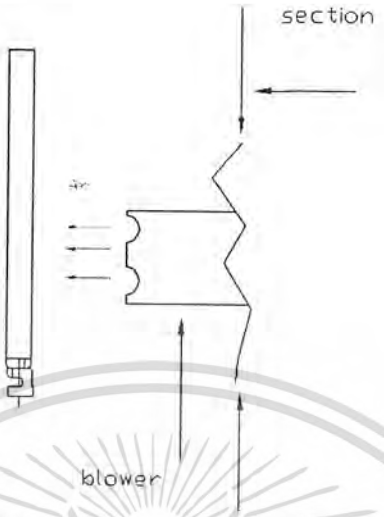


รูปที่ 5.7 แสดงภาพสามมิติของตัวใส่ด้าย

มอเตอร์จะขับเคลื่อนด้วยกำลัง 250 W โดยต่อแกนเพลาเพื่อหมุน roller ซึ่งจะกดทับกลุ่มด้าย ด้วยแรง 20 N ทำให้หลอดด้ายหมุนด้ายลงมาด้วยความเร็วเชิงมุม 10 rad/sec

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.6 การเย็นตัวของแท่งเทียน



รูปที่ 5.8 แสดงระบบลมเย็น (Cold Air)

5.2.6.1 การคำนวณ

เมื่อกำหนดให้

q = อัตราการถ่ายเทความร้อนต่อพื้นที่หน้าตัด (J/sec ,W)

h = สัมประสิทธิ์ของการแปรผัน (W/m^2.K)

T_s = อุณหภูมิสมบูรณ์ (K)

T = อุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม (K)

จากสมการหาอัตราการพาความร้อน

$$q = h(T_s - T) \quad (5.4)$$

$$q = \frac{h(T_S - T)}{t} \quad (5.5)$$

เพราะฉะนั้นจะได้หาอัตราการพาความร้อนออกจากโมลด์ได้จาก

$$q = 2\ (W/m^2.K)(\ 85.9\ (K) - 30\ (K)) \quad (5.6)$$

$$q = 111.8\ J/Sec$$

จากการทดลองเทียนไขใช้เวลาการเย็นตัว เท่ากับ 44 นาที

เพราะฉะนั้นอัตราการพาความร้อนทั้งหมดที่ได้ภายในเวลา 44 นาที จึงเท่ากับ

$$q = 111.8\ J/Sec\ X\ 44\ min\ X\ 60\ Sec/min$$

$$q = 295.152\ KJ$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบสู่การออกแบบที่ใช้ลมเย็น 10 องศาเซลเซียส

$$q = \frac{25(W/m^2.K)((85.9(^{\circ}C) \quad 10(^{\circ}C))}{}$$

q = 1897.5 J/sec

เพราะฉะนั้นจะใช้เวลาในการหล่อเย็นเท่ากับ

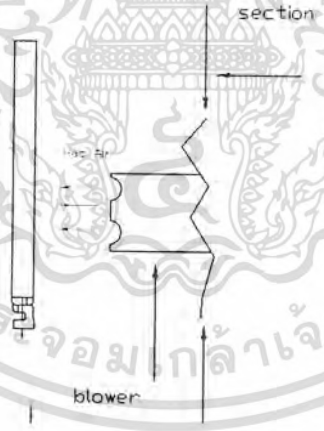
$$t = \frac{295152\ J}{1897.5\ J/\text{sec}}$$

t = 155 Sec หรือ 2.59 นาที

5.2.6.2 หลักการทำงาน

หลังจากเติมน้ำเทียนจนเต็มโมลด์ ลมเย็นที่ใช้ในการหล่อเย็น จะหล่อเย็นให้เทียนแข็งตัว ภายในระยะเวลา 2.59 นาที ด้วยอุณหภูมิ $10^{\circ}C$

5.2.7 ระบบเป่าลมร้อนเพื่อนำเทียนไขออกจากโมลด์



รูปที่ 5.9 แสดงระบบลมร้อน (Hot Air)

5.2.7.1 การคำนวณ

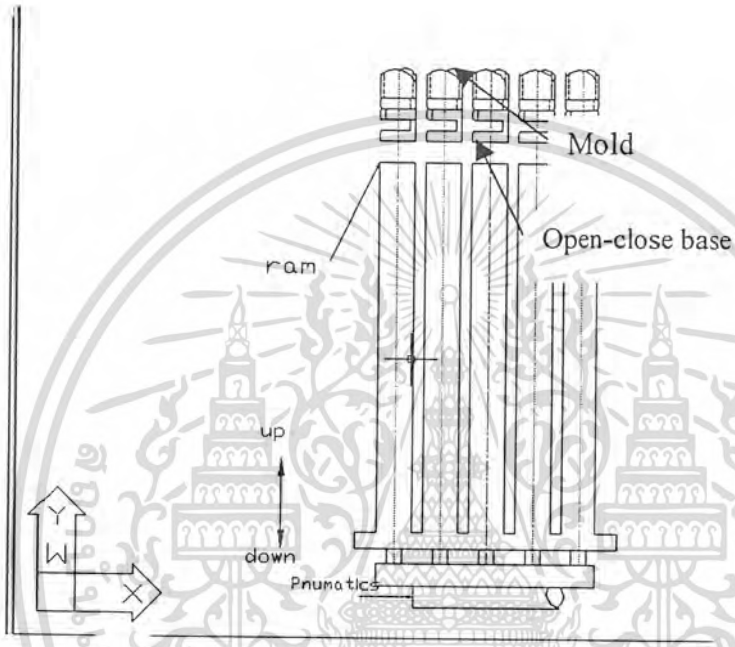
จากการออกแบบในส่วนของลมร้อนที่เป่า ออกแบบให้ใช้ลมร้อน 1,000 W. โดยเป่าให้ความร้อนแก่โมลด์ 5 อัน เป็นเวลา 10 วินาที จากแบบเครื่องจักร มีจำนวนโมลด์ 150 อัน ให้ความร้อน 5 kW.
ดังนั้นเวลาที่ใช้ทั้งหมดในการเป่า = 60 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2.7.2 หลักการ

หลังจากเทียนเย็นตัว ระบบเป่าลมร้อนจะพาลมร้อนเพื่อให้เทียนออกจากโมลด์ได้ ซึ่งหลักการต่อไปก็คือการกระทุ้ง

5.2.8 ระบบกระทุ้งเทียนออกจากโมลด์



รูปที่ 5.10 แสดงระบบกระทุ้งเทียนออกจากโมลด์

5.2.8.1 การคำนวณ

เมื่อกำหนดให้

Pnuematic = กระบอกสูบนิวเมติกใช้ความดันเท่ากับ 5 Bar

F = แรงน้อยที่สุดที่ต้องการให้เทียนหลุดออกจากโมลด์ (1×10^2 N)

A = พื้นที่หน้าตัดโมลด์ ($1.76\ mm^2$)

N = จำนวนเทียนทั้งหมด (225 แท่ง)

สามารถหาแรงทั้งหมดที่ใช้ในการถอดโมลด์ทั้งหมดจากสูตร

$$F_{all} = N \times F \qquad (5.7)$$

ดังนั้นแรงทั้งหมดที่ใช้ในการถอดโมลด์ทั้งหมดจึงเท่ากับ

F_{all} = 225 แท่ง $\times 1 \times 10^3$ N

F_{all} = 225×10^3 N

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสูตรสามารถหาค่าพื้นที่หน้าตัดนิวเมติกได้ดังนี้

$$P = \frac{F(N)}{A(m^2)} \quad (5.8)$$

ดังนั้นจึงได้ค่าพื้นที่หน้าตัดของนิวเมติกเท่ากับ

$$A = \frac{225 \upsilon 10^3 N}{5X10^5 \frac{N}{m^2}}$$

$$A = 0.45\ m^2$$

ค่ารัศมีกระบอกสูบนิวเมติกภายในกระบอกสูบหาได้จากสูตร

$$R = \sqrt{\frac{A}{3}}(m^2) \quad (5.9)$$

ดังนั้นจึงได้ค่ารัศมีกระบอกสูบภายในได้เท่ากับ

$$R = \sqrt{\frac{0.45}{\frac{22}{7}}}(m^2)$$

$$R = 0.143\ m.$$

5.2.8.2 หลักการทำงาน

เมื่อเทียนเย็นตัวพร้อมที่จะได้รับการนำออก กระบอกลมนิวเมติกเส้นผ่านศูนย์กลางภายขนาด 3 mm ส่งความดันขนาด 1 bar ไปที่ตัวกระทุ้งขนาดพื้นที่หน้าตัด $7.92 \times 10^{-8}\ m^2$ ซึ่งดันแท่งเทียนด้วยแรงอย่างน้อย 100 N ให้หลุดออกจากโมลด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผล

วิชาที่นำมาใช้ในการออกแบบการทดลองคือ Design Of Experiment ซึ่งใช้ความรู้ทางสถิติทางวิศวกรรมพื้นฐานมาประยุกต์ใช้กับการออกแบบเครื่องจักร มาจากการหาค่าพารามิเตอร์บางตัวที่ไม่ทราบค่า มาทำการวิเคราะห์ และนำมาวิเคราะห์ปัญหาของชิ้นงานได้ ในส่วนของการแปรผลการทดลองจากข้อมูล ได้ใช้ความรู้ทางด้านสถิติทางวิศวกรรมศาสตร์ ในส่วนการวิเคราะห์วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis Of Variable) แล้วนำค่าจากผลการทดลองที่ได้มาตีความหมาย เพื่อนำไปเป็นส่วนประกอบที่ใช้ความคิดสร้างสรรค์ในการออกแบบเครื่องจักรกล ซึ่งได้นำความรู้ในวิชา Machine Design, Heat Tranfer เบื้องต้น มาประยุกต์ใช้

จากวิธีการดำเนินทางวิชาการที่ได้กล่าวไป ณ เบื้องต้น สามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาบางปัญหาที่ต้องอาศัยข้อมูลได้ เช่น การเสียรูปร่างของชิ้นงาน, สาเหตุของความสูญเสีย, การปรับปรุงระบบการผลิตให้ได้ดีขึ้น เป็นต้น

การทดลองในโครงงานปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ใช้เทียนไขซึ่งเป็นส่วนที่สนใจมากที่สุด เพราะสภาวะของเทียนไข มีคุณสมบัติได้ทั้ง 3 สถานะ ในอุณหภูมิที่ต่างกันไม่เกิน 50 องศาเซลเซียส สามารถปรับปรุงและแสดงให้เห็นถึง การหลอมละลายโลหะ โดยมีส่วนมีสภาพใกล้เคียงกัน ตลอดจนการหล่อถึงการเย็นตัว

จากการคำนวณทางสถิติสามารถสรุปผลการทดลองได้ว่า

1. อุณหภูมิที่นำน้ำเทียนหลอมเหลวลงโมลด์มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 100-134.52 (^{o}C) ภายใต้เวลา 5.36-6.44 (Sec) ซึ่งมีความเป็นปฏิสัมพันธ์กันน้อยมาก
2. การเย็นตัวของเทียนมีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 27.81-33.78 (^{o}C) ภายใต้เวลา 34.03-44.034 (Sec) ซึ่งมีความเป็นปฏิสัมพันธ์กัน
3. การนำเทียนออกจากโมลด์มีค่าอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 44.095-59.765(^{o}C) ภายใต้เวลา 6.38- 11.26(Sec) ซึ่งมีความเป็นปฏิสัมพันธ์กัน

จากผลการทดลองซึ่งนำมาตีความ ได้ส่วนประกอบของเครื่องจักร เป็น 6 ส่วน คือ

1. แท้งค์หลอมเหลวส่วนผสม ใช้หลอมเหลมส่วนผสมต่างๆให้เข้ากัน
2. กลไกลของฐานปิด-เปิด ใส่ด้าย เป็นระบบร้อยด้ายผ่านโมลด์
3. ระบบกระทุ้งเทียนออกจากโมลด์
4. ระบบลมร้อน-เย็น เป็นระบบหล่อเย็นเพื่อทำให้เทียนเย็นตัว และระบบลมร้อนเพื่อเป่าให้เทียนออกจากโมลด์ได้ง่ายขึ้น
5. ระบบตัดด้าย จะเป็นใบมีดตัดด้ายเมื่อใส่ด้ายและเติมน้ำเทียนเรียบร้อยแล้ว

จากระบบที่ได้กล่าวไปได้มีการคำนวณตามหลัก Machine Design, Statics และ Heat tranfer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. ถ้าต้องการให้ข้อมูลมีประสิทธิภาพ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้วัดควรจะมีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากขึ้น

2. การใช้สถิติประยุกต์มีเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทั้งนี้เนื่องจาก เทคโนโลยีก้าวหน้าขึ้นมา ความซับซ้อนของปัญหาก็จะเพิ่มขึ้นด้วย ความจำเป็นต่อการประยุกต์สถิติจึงยิ่งมีมากขึ้นเรื่อย

3. หากผู้ที่ต้องการจะดำเนินการปริญญานิพนธ์นี้ต่อ ก็สามารถดำเนินการในส่วนของการสร้างเครื่องต่อได้เลย ซึ่งผู้ที่จะมาทำควรจะมีประสบการณ์หรือสนใจในด้านนี้โดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

1. Montgomery,Douglas C. "Design And Analysis of Experiment", John Wiley & sons, Vol.4, New york 1996
2. Norton,Robert L. "Machine Design An Integrated Approach", Prentice-Hall, Vol..2
3. กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ "สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 1", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), Vol. 2, 1997
4. กิติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ "สถิติสำหรับงานวิศวกรรม เล่ม 2", สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), Vol. 2, 1999
5. ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์,ชาญ ถนัดงาน "การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 1", ซีเอ็ด,Vol. 10
6. ดร.วริทธิ์ อึ้งภากรณ์,ชาญ ถนัดงาน "การออกแบบเครื่องจักรกล เล่ม 2", ซีเอ็ด
7. วันเพ็ญ พงษ์เก่า "เทียนหอมแฟนซี", ประดิดประดอย, Vol. 1
8. นต. สุทธิ์ ศรีบูรพา "เออร์กอนอมิส์ : วิศวกรรมมนุษยปัจจัย", Vol. 1

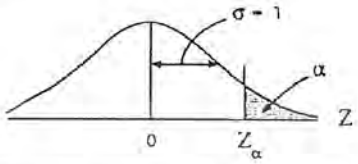
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก. แสดงค่า Z จากพื้นที่ใต้กราฟ

$$\int_{Z_\alpha}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} dz = \alpha$$



Z_α	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2297	0.2266	0.2236	0.2207	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0917	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0837	0.0822
1.4	0.0807	0.0792	0.0778	0.0763	0.0749	0.0735	0.0721	0.0707	0.0694	0.0681
1.5	0.06681	0.06552	0.06426	0.06301	0.06178	0.06057	0.05938	0.05821	0.05705	0.05592
1.6	0.05480	0.05370	0.05262	0.05155	0.05050	0.04947	0.04846	0.04746	0.04648	0.04551
1.7	0.04457	0.04363	0.04272	0.04182	0.04093	0.04006	0.03920	0.03836	0.03754	0.03673
1.8	0.03593	0.03515	0.03438	0.03363	0.03288	0.03216	0.03144	0.03074	0.03005	0.02938
1.9	0.02872	0.02807	0.02743	0.02680	0.02619	0.02559	0.02500	0.02442	0.02385	0.02330
2.0	0.02275	0.02222	0.02169	0.02118	0.02068	0.02018	0.01970	0.01923	0.01876	0.01831
2.1	0.01786	0.01743	0.01700	0.01659	0.01618	0.01578	0.01539	0.01500	0.01463	0.01426
2.2	0.01390	0.01355	0.01321	0.01287	0.01255	0.01222	0.01191	0.01160	0.01130	0.01101
2.3	0.01072	0.01044	0.01017	0.00990	0.00964	0.00938	0.00913	0.00889	0.00865	0.00842
2.4	0.00819	0.00797	0.00776	0.00754	0.00734	0.00714	0.00694	0.00675	0.00656	0.00638
2.5	0.0^26210	0.0^26036	0.0^25868	0.0^25703	0.0^25543	0.0^25386	0.0^25234	0.0^25085	0.0^24940	0.0^24799
2.6	0.0^24661	0.0^24527	0.0^24396	0.0^24269	0.0^24145	0.0^24024	0.0^23907	0.0^23792	0.0^23681	0.0^23572
2.7	0.0^23467	0.0^23364	0.0^23264	0.0^23167	0.0^23072	0.0^22980	0.0^22890	0.0^22803	0.0^22718	0.0^22635
2.8	0.0^22555	0.0^22477	0.0^22401	0.0^22327	0.0^22256	0.0^22186	0.0^22118	0.0^22052	0.0^21988	0.0^21926
2.9	0.0^21866	0.0^21807	0.0^21750	0.0^21695	0.0^21641	0.0^21589	0.0^21538	0.0^21489	0.0^21441	0.0^21395
3.0	0.0^21350	0.0^21306	0.0^21764	0.0^21223	0.0^21183	0.0^21144	0.0^21107	0.0^21070	0.0^21035	0.0^21001
3.1	0.0^39676	0.0^39354	0.0^39042	0.0^38740	0.0^38447	0.0^38163	0.0^37888	0.0^37622	0.0^37364	0.0^37114
3.2	0.0^36871	0.0^36637	0.0^36410	0.0^36190	0.0^35977	0.0^35770	0.0^35571	0.0^35378	0.0^35191	0.0^35010
3.3	0.0^34835	0.0^34665	0.0^34501	0.0^34343	0.0^34189	0.0^34041	0.0^33898	0.0^33759	0.0^33625	0.0^33495
3.4	0.0^33370	0.0^33249	0.0^33132	0.0^33019	0.0^32909	0.0^32804	0.0^32702	0.0^32603	0.0^32508	0.0^32416

* *ดัดแปลงจาก Harry and Lawson (1990)*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Z_α	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
3.5	$0.0^{3}2327$	$0.0^{3}2242$	$0.0^{3}2159$	$0.0^{3}2079$	$0.0^{3}2002$	$0.0^{3}1927$	$0.0^{3}1855$	$0.0^{3}1786$	$0.0^{3}1719$	$0.0^{3}1655$
3.6	$0.0^{3}1592$	$0.0^{3}1532$	$0.0^{3}1474$	$0.0^{3}1418$	$0.0^{3}1364$	$0.0^{3}1312$	$0.0^{3}1262$	$0.0^{3}1214$	$0.0^{3}1167$	$0.0^{3}1123$
3.7	$0.0^{3}1079$	$0.0^{3}1038$	$0.0^{4}9974$	$0.0^{4}9587$	$0.0^{4}9214$	$0.0^{4}8855$	$0.0^{4}8509$	$0.0^{4}8175$	$0.0^{4}7854$	$0.0^{4}7545$
3.8	$0.0^{4}7248$	$0.0^{4}6961$	$0.0^{4}6685$	$0.0^{4}6420$	$0.0^{4}6165$	$0.0^{4}5919$	$0.0^{4}5682$	$0.0^{4}5455$	$0.0^{4}5236$	$0.0^{4}5025$
3.9	$0.0^{4}4822$	$0.0^{4}4627$	$0.0^{4}4440$	$0.0^{4}4260$	$0.0^{4}4086$	$0.0^{4}3920$	$0.0^{4}3760$	$0.0^{4}3606$	$0.0^{4}3458$	$0.0^{4}3316$
4.0	$0.0^{4}3179$	$0.0^{4}3048$	$0.0^{4}2921$	$0.0^{4}2800$	$0.0^{4}2684$	$0.0^{4}2572$	$0.0^{4}2465$	$0.0^{4}2362$	$0.0^{4}2263$	$0.0^{4}2168$
4.1	$0.0^{4}2076$	$0.0^{4}1989$	$0.0^{4}1905$	$0.0^{4}1824$	$0.0^{4}1747$	$0.0^{4}1672$	$0.0^{4}1601$	$0.0^{4}1533$	$0.0^{4}1467$	$0.0^{4}1404$
4.2	$0.0^{4}1344$	$0.0^{4}1286$	$0.0^{4}1231$	$0.0^{4}1177$	$0.0^{4}1126$	$0.0^{4}1077$	$0.0^{4}1031$	$0.0^{5}9857$	$0.0^{5}9426$	$0.0^{5}9014$
4.3	$0.0^{5}8619$	$0.0^{5}8240$	$0.0^{5}7878$	$0.0^{5}7530$	$0.0^{5}7198$	$0.0^{5}6879$	$0.0^{5}6574$	$0.0^{5}6282$	$0.0^{5}6002$	$0.0^{5}5734$
4.4	$0.0^{5}5478$	$0.0^{5}5233$	$0.0^{5}4998$	$0.0^{5}4773$	$0.0^{5}4558$	$0.0^{5}4353$	$0.0^{5}4156$	$0.0^{5}3968$	$0.0^{5}3787$	$0.0^{5}3615$
4.5	$0.0^{5}3451$	$0.0^{5}3293$	$0.0^{5}3143$	$0.0^{5}2999$	$0.0^{5}2861$	$0.0^{5}2730$	$0.0^{5}2604$	$0.0^{5}2484$	$0.0^{5}2369$	$0.0^{5}2259$
4.6	$0.0^{5}2154$	$0.0^{5}2054$	$0.0^{5}1959$	$0.0^{5}1867$	$0.0^{5}1780$	$0.0^{5}1697$	$0.0^{5}1617$	$0.0^{5}1541$	$0.0^{5}1469$	$0.0^{5}1399$
4.7	$0.0^{5}1333$	$0.0^{5}1270$	$0.0^{5}1210$	$0.0^{5}1153$	$0.0^{5}1098$	$0.0^{5}1046$	$0.0^{5}9956$	$0.0^{6}9480$	$0.0^{6}9026$	$0.0^{6}8593$
4.8	$0.0^{6}8181$	$0.0^{6}7787$	$0.0^{6}7411$	$0.0^{6}7054$	$0.0^{6}6712$	$0.0^{6}6387$	$0.0^{6}6077$	$0.0^{6}5782$	$0.0^{6}5500$	$0.0^{6}5232$
4.9	$0.0^{6}4976$	$0.0^{6}4733$	$0.0^{6}4501$	$0.0^{6}4280$	$0.0^{6}4070$	$0.0^{6}3869$	$0.0^{6}3678$	$0.0^{6}3496$	$0.0^{6}3323$	$0.0^{6}3159$
5.0	$0.0^{6}3002$	$0.0^{6}2853$	$0.0^{6}2711$	$0.0^{6}2575$	$0.0^{6}2447$	$0.0^{6}2324$	$0.0^{6}2208$	$0.0^{6}2097$	$0.0^{6}1991$	$0.0^{6}1891$
5.1	$0.0^{6}1796$	$0.0^{6}1705$	$0.0^{6}1619$	$0.0^{6}1537$	$0.0^{6}1459$	$0.0^{6}1385$	$0.0^{6}1314$	$0.0^{6}1247$	$0.0^{6}1184$	$0.0^{6}1123$
5.2	$0.0^{6}1066$	$0.0^{6}1011$	$0.0^{7}9591$	$0.0^{7}9098$	$0.0^{7}8629$	$0.0^{7}8184$	$0.0^{7}7762$	$0.0^{7}7360$	$0.0^{7}6979$	$0.0^{7}6617$
5.3	$0.0^{7}6273$	$0.0^{7}5947$	$0.0^{7}5637$	$0.0^{7}5343$	$0.0^{7}5064$	$0.0^{7}4799$	$0.0^{7}4548$	$0.0^{7}4309$	$0.0^{7}4083$	$0.0^{7}3868$
5.4	$0.0^{7}3664$	$0.0^{7}3471$	$0.0^{7}3288$	$0.0^{7}3114$	$0.0^{7}2949$	$0.0^{7}2792$	$0.0^{7}2644$	$0.0^{7}2503$	$0.0^{7}2370$	$0.0^{7}2244$
5.5	$0.0^{7}2124$	$0.0^{7}2010$	$0.0^{7}1903$	$0.0^{7}1801$	$0.0^{7}1704$	$0.0^{7}1613$	$0.0^{7}1526$	$0.0^{7}1444$	$0.0^{7}1366$	$0.0^{7}1292$
5.6	$0.0^{7}1222$	$0.0^{7}1156$	$0.0^{7}1093$	$0.0^{7}1034$	$0.0^{8}9776$	$0.0^{8}9244$	$0.0^{8}8741$	$0.0^{8}8264$	$0.0^{8}7812$	$0.0^{8}7385$
5.7	$0.0^{8}6980$	$0.0^{8}6598$	$0.0^{8}6235$	$0.0^{8}5893$	$0.0^{8}5568$	$0.0^{8}5262$	$0.0^{8}4971$	$0.0^{8}4697$	$0.0^{8}4437$	$0.0^{8}4191$
5.8	$0.0^{8}3959$	$0.0^{8}3739$	$0.0^{8}3532$	$0.0^{8}3335$	$0.0^{8}3150$	$0.0^{9}2974$	$0.0^{8}2808$	$0.0^{8}2651$	$0.0^{8}2503$	$0.0^{8}2363$
5.9	$0.0^{8}2230$	$0.0^{8}2105$	$0.0^{8}1987$	$0.0^{8}1875$	$0.0^{8}1769$	$0.0^{8}1670$	$0.0^{8}1576$	$0.0^{8}1487$	$0.0^{8}1402$	$0.0^{8}1323$
6.0	$0.0^{8}1248$	$0.0^{8}1177$	$0.0^{8}1110$	$0.0^{8}1047$	$0.0^{9}9876$	$0.0^{9}9314$	$0.0^{9}8783$	$0.0^{9}8281$	$0.0^{9}7808$	$0.0^{9}7361$
6.1	$0.0^{9}6940$	$0.0^{9}6542$	$0.0^{9}6166$	$0.0^{9}5812$	$0.0^{9}5478$	$0.0^{9}5163$	$0.0^{9}4865$	$0.0^{9}4585$	$0.0^{9}4320$	$0.0^{9}4070$
6.2	$0.0^{9}3835$	$0.0^{9}3613$	$0.0^{9}3403$	$0.0^{9}3206$	$0.0^{9}3020$	$0.0^{9}2844$	$0.0^{9}2679$	$0.0^{9}2523$	$0.0^{9}2376$	$0.0^{9}2237$
6.3	$0.0^{9}2107$	$0.0^{9}1983$	$0.0^{9}1867$	$0.0^{9}1758$	$0.0^{9}1655$	$0.0^{9}1558$	$0.0^{9}1466$	$0.0^{9}1380$	$0.0^{9}1299$	$0.0^{9}1223$
6.4	$0.0^{9}1151$	$0.0^{9}1083$	$0.0^{9}1019$	$0.0^{10}9586$	$0.0^{10}9020$	$0.0^{10}8486$	$0.0^{10}7983$	$0.0^{10}7510$	$0.0^{10}7064$	$0.0^{10}6645$
6.5	$0.0^{10}6250$	$0.0^{10}5878$	$0.0^{10}5529$	$0.0^{10}5199$	$0.0^{10}4889$	$0.0^{10}4597$	$0.0^{10}4323$	$0.0^{10}4065$	$0.0^{10}3821$	$0.0^{10}3593$
6.6	$0.0^{10}3377$	$0.0^{10}3175$	$0.0^{10}2984$	$0.0^{10}2805$	$0.0^{10}2637$	$0.0^{10}2478$	$0.0^{10}2329$	$0.0^{10}2189$	$0.0^{10}2057$	$0.0^{10}1933$
6.7	$0.0^{10}1816$	$0.0^{10}1706$	$0.0^{10}1603$	$0.0^{10}1506$	$0.0^{10}1415$	$0.0^{10}1329$	$0.0^{10}1249$	$0.0^{10}1173$	$0.0^{10}1102$	$0.0^{10}1035$
6.8	$0.0^{11}9719$	$0.0^{11}9127$	$0.0^{11}8572$	$0.0^{11}8049$	$0.0^{11}7559$	$0.0^{11}7097$	$0.0^{11}6664$	$0.0^{11}6257$	$0.0^{11}5874$	$0.0^{11}5515$
6.9	$0.0^{11}5178$	$0.0^{11}4860$	$0.0^{11}4562$	$0.0^{11}4283$	$0.0^{11}4020$	$0.0^{11}3773$	$0.0^{11}3541$	$0.0^{11}3323$	$0.0^{11}3119$	$0.0^{11}2927$
7.0	$0.0^{11}2747$	$0.0^{11}2577$	$0.0^{11}2418$	$0.0^{11}2269$	$0.0^{11}2129$	$0.0^{11}1997$	$0.0^{11}1874$	$0.0^{11}1758$	$0.0^{11}1649$	$0.0^{11}1547$
7.1	$0.0^{11}1451$	$0.0^{11}1361$	$0.0^{11}1277$	$0.0^{11}1198$	$0.0^{11}1123$	$0.0^{11}1053$	$0.0^{12}9879$	$0.0^{12}9264$	$0.0^{12}8688$	$0.0^{12}8147$
7.2	$0.0^{12}7639$	$0.0^{12}7163$	$0.0^{12}6716$	$0.0^{12}6297$	$0.0^{12}5904$	$0.0^{12}5535$	$0.0^{12}5189$	$0.0^{12}4864$	$0.0^{12}4560$	$0.0^{12}4275$
7.3	$0.0^{12}4007$	$0.0^{12}3756$	$0.0^{12}3520$	$0.0^{12}3300$	$0.0^{12}3092$	$0.0^{12}2898$	$0.0^{12}2716$	$0.0^{12}2546$	$0.0^{12}2386$	$0.0^{12}2235$
7.4	$0.0^{12}2095$	$0.0^{12}1963$	$0.0^{12}1839$	$0.0^{12}1723$	$0.0^{12}1615$	$0.0^{12}1513$	$0.0^{12}1417$	$0.0^{12}1328$	$0.0^{12}1244$	$0.0^{12}1166$

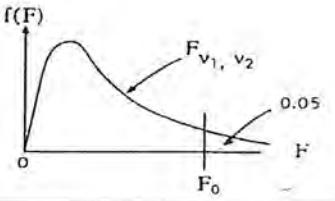
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1 (ต่อ)

Z_α	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
7.5	$0.0^{12}1092$	$0.0^{12}1023$	$0.0^{13}9581$	$0.0^{13}8975$	$0.0^{13}8407$	$0.0^{13}7874$	$0.0^{13}7375$	$0.0^{13}6908$	$0.0^{13}6470$	$0.0^{13}6060$
7.6	$0.0^{13}5675$	$0.0^{13}5315$	$0.0^{13}4977$	$0.0^{13}4661$	$0.0^{13}4365$	$0.0^{13}4087$	$0.0^{13}3827$	$0.0^{13}3584$	$0.0^{13}3356$	$0.0^{13}3142$
7.7	$0.0^{13}2942$	$0.0^{13}2755$	$0.0^{13}2579$	$0.0^{13}2415$	$0.0^{13}2261$	$0.0^{13}2116$	$0.0^{13}1981$	$0.0^{13}1855$	$0.0^{13}1736$	$0.0^{13}1625$
7.8	$0.0^{13}1522$	$0.0^{13}1424$	$0.0^{13}1333$	$0.0^{13}1248$	$0.0^{13}1168$	$0.0^{13}1093$	$0.0^{13}1023$	$0.0^{14}9579$	$0.0^{14}8965$	$0.0^{14}8391$
7.9	$0.0^{14}7853$	$0.0^{14}7349$	$0.0^{14}6878$	$0.0^{14}6437$	$0.0^{14}6024$	$0.0^{14}5637$	$0.0^{14}5275$	$0.0^{14}4937$	$0.0^{14}4620$	$0.0^{14}4323$
8.0	$0.0^{14}4045$	$0.0^{14}3785$	$0.0^{14}3542$	$0.0^{14}3314$	$0.0^{14}3101$	$0.0^{14}2901$	$0.0^{14}2715$	$0.0^{14}2540$	$0.0^{14}2376$	$0.0^{14}2223$
8.1	$0.0^{14}2080$	$0.0^{14}1946$	$0.0^{14}1821$	$0.0^{14}1703$	$0.0^{14}1593$	$0.0^{14}1491$	$0.0^{14}1395$	$0.0^{14}1305$	$0.0^{14}1220$	$0.0^{14}1142$
8.2	$0.0^{14}1068$	$0.0^{15}9991$	$0.0^{15}9346$	$0.0^{15}8742$	$0.0^{15}8177$	$0.0^{15}7649$	$0.0^{15}7155$	$0.0^{15}6692$	$0.0^{15}6260$	$0.0^{15}5855$
8.3	$0.0^{15}5477$	$0.0^{15}5122$	$0.0^{15}4791$	$0.0^{15}4481$	$0.0^{15}4191$	$0.0^{15}3920$	$0.0^{15}3666$	$0.0^{15}3429$	$0.0^{15}3207$	$0.0^{15}2999$
8.4	$0.0^{15}2805$	$0.0^{15}2624$	$0.0^{15}2454$	$0.0^{15}2295$	$0.0^{15}2146$	$0.0^{15}2007$	$0.0^{15}1877$	$0.0^{15}1755$	$0.0^{15}1642$	$0.0^{15}1535$
8.5	$0.0^{15}1436$	$0.0^{15}1342$	$0.0^{15}1255$	$0.0^{15}1174$	$0.0^{15}1098$	$0.0^{15}1027$	$0.0^{16}9601$	$0.0^{16}8978$	$0.0^{16}8395$	$0.0^{16}7851$
8.6	$0.0^{16}7341$	$0.0^{16}6865$	$0.0^{16}6419$	$0.0^{16}6003$	$0.0^{16}5613$	$0.0^{16}5249$	$0.0^{16}4908$	$0.0^{16}4589$	$0.0^{16}4291$	$0.0^{16}4013$
8.7	$0.0^{16}3752$	$0.0^{16}3508$	$0.0^{16}3281$	$0.0^{16}3068$	$0.0^{16}2868$	$0.0^{16}2682$	$0.0^{16}2508$	$0.0^{16}2345$	$0.0^{16}2193$	$0.0^{16}2050$
8.8	$0.0^{15}1917$	$0.0^{16}1792$	$0.0^{16}1676$	$0.0^{16}1567$	$0.0^{16}1465$	$0.0^{16}1370$	$0.0^{16}1281$	$0.0^{16}1198$	$0.0^{16}1120$	$0.0^{16}1047$
8.9	$0.0^{17}9792$	$0.0^{17}9155$	$0.0^{17}8560$	$0.0^{17}8004$	$0.0^{17}7484$	$0.0^{17}6998$	$0.0^{17}6543$	$0.0^{17}6118$	$0.0^{17}5720$	$0.0^{17}5349$
9.0	$0.0^{17}5001$	$0.0^{17}4676$	$0.0^{17}4372$	$0.0^{17}4088$	$0.0^{17}3823$	$0.0^{17}3574$	$0.0^{17}3342$	$0.0^{17}3125$	$0.0^{17}2922$	$0.0^{17}2732$
9.1	$0.0^{17}2555$	$0.0^{17}2389$	$0.0^{17}2234$	$0.0^{17}2089$	$0.0^{17}1953$	$0.0^{17}1826$	$0.0^{17}1707$	$0.0^{17}1597$	$0.0^{17}1493$	$0.0^{17}1396$
9.2	$0.0^{17}1305$	$0.0^{17}1221$	$0.0^{17}1141$	$0.0^{17}1067$	$0.0^{18}9979$	$0.0^{18}9332$	$0.0^{18}8726$	$0.0^{18}8160$	$0.0^{18}7630$	$0.0^{18}7135$
9.3	$0.0^{18}6672$	$0.0^{18}6239$	$0.0^{18}5834$	$0.0^{18}5456$	$0.0^{18}5102$	$0.0^{18}4771$	$0.0^{18}4462$	$0.0^{18}4172$	$0.0^{18}3902$	$0.0^{18}3649$
9.4	$0.0^{18}3412$	$0.0^{18}3191$	$0.0^{18}2984$	$0.0^{18}2791$	$0.0^{18}2610$	$0.0^{18}2441$	$0.0^{18}2283$	$0.0^{18}2135$	$0.0^{18}1996$	$0.0^{18}1867$
9.5	$0.0^{18}1746$	$0.0^{18}1633$	$0.0^{18}1527$	$0.0^{18}1428$	$0.0^{18}1336$	$0.0^{18}1250$	$0.0^{18}1169$	$0.0^{18}1093$	$0.0^{18}1022$	$0.0^{19}9562$
9.6	$0.0^{19}8943$	$0.0^{19}8365$	$0.0^{19}7824$	$0.0^{19}7318$	$0.0^{19}6845$	$0.0^{19}6402$	$0.0^{19}5988$	$0.0^{19}5601$	$0.0^{19}5240$	$0.0^{19}4901$
9.7	$0.0^{19}4584$	$0.0^{19}4288$	$0.0^{19}4011$	$0.0^{19}3752$	$0.0^{19}3510$	$0.0^{19}3284$	$0.0^{19}3072$	$0.0^{19}2873$	$0.0^{19}2688$	$0.0^{19}2515$
9.8	$0.0^{19}2352$	$0.0^{19}2201$	$0.0^{19}2059$	$0.0^{19}1926$	$0.0^{19}1802$	$0.0^{19}1686$	$0.0^{19}1577$	$0.0^{19}1476$	$0.0^{19}1381$	$0.0^{19}1292$
9.9	$0.0^{19}1209$	$0.0^{19}1131$	$0.0^{19}1058$	$0.0^{20}9898$	$0.0^{20}9262$	$0.0^{20}8666$	$0.0^{20}8108$	$0.0^{20}7587$	$0.0^{20}7099$	$0.0^{20}6643$
10.0	$0.0^{20}6216$	$0.0^{20}5817$	$0.0^{20}5443$	$0.0^{20}5093$	$0.0^{20}4766$	$0.0^{20}4460$	$0.0^{20}4174$	$0.0^{20}3906$	$0.0^{20}3655$	$0.0^{20}3421$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

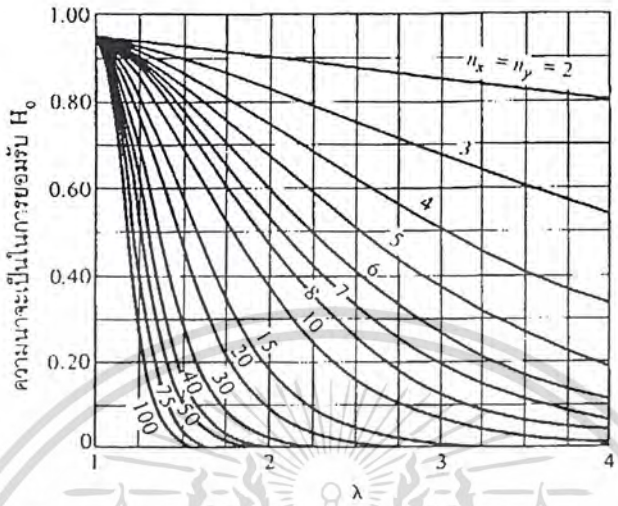
ตารางที่ ข. แสดงค่า F



v_2 \ v_1	DF ของตัวตั้ง: v_1																		
DF ของตัวหาร: v_2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
1	161.4	199.5	215.7	224.6	230.2	234.0	236.8	238.9	240.5	241.9	243.9	245.9	248.0	249.1	250.1	251.1	252.2	253.3	254.3
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.50
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.36
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.17	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.55	1.43	1.35	1.25
∞	3.84	3.00	2.60	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

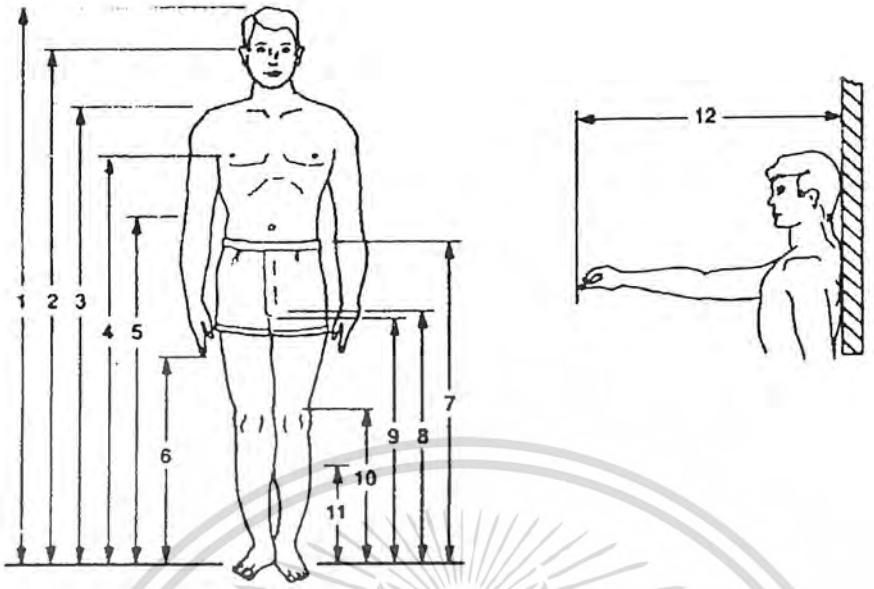
* *คัดจาก Hines and Montgomery (1990)*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

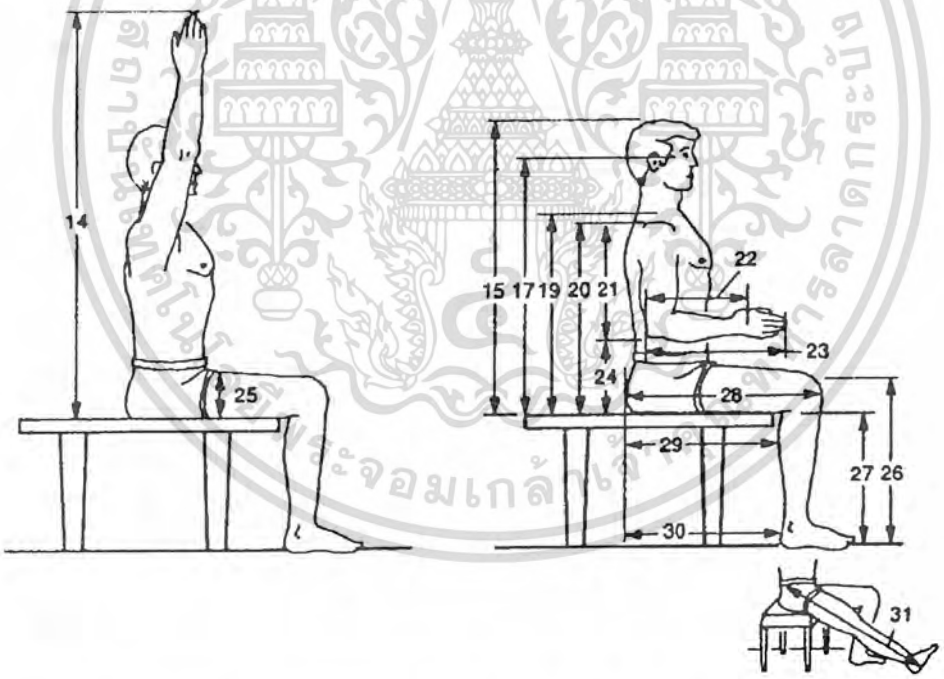


รูปที่ ก. แสดงค่าที่ยอมรับได้จากตาราง F

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ข. แสดงจุดตำแหน่งของการวัดมิติขนาดของร่างกายในท่ายืนซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ



รูปที่ ค. แสดงจุดตำแหน่งการวัดมิติขนาดของร่างกายในท่านั่งซึ่งใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้