

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น สำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง
โดยวิธีการออกแบบการทดลอง



นายวิชาญ วรรณมา

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ

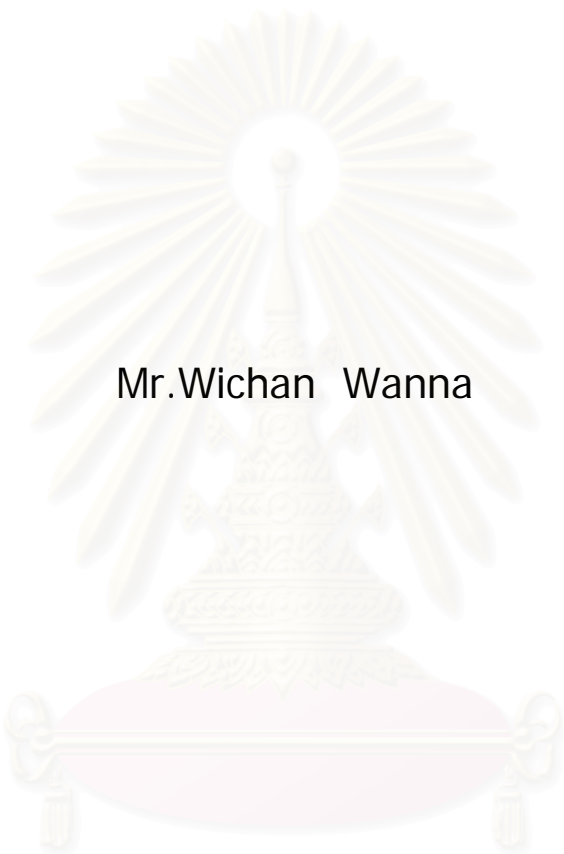
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-1794-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

FACTORS INFLUENCING CROP END BILLET FOR CONTINUOUS
CASTING PROCESS
VIA EXPERIMENTAL DESIGN TECHNIQUE



Mr. Wichan Wanna

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Industrial Engineering
Department of Industrial Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2002
ISBN 974-17-1794-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์

โดย

สาขาวิชา

อาจารย์ที่ปรึกษา

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นสำหรับกระบวนการหล่อ
เหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง โดยวิธีการออกแบบการทดลอง

นายวิชาญ วรรณ

วิศวกรรมอุตสาหการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ธิวัชรินทร์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรา ฐักิจการพานิช)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิชาญ วรรณ : ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น สำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง โดยวิธีการออกแบบการทดลอง. (FACTORS INFLUENCING CROP END BILLET FOR CONTINUOUS CASTING PROCESS VIA EXPERIMENTAL DESIGN TECHNIQUE) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร, 249 หน้า. ISBN 974-17-1794-6.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น และเสนอเงื่อนไขที่เหมาะสม (Suitable Condition) ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดภายใต้เงื่อนไขที่เป็นไปได้ งานวิจัยนี้เริ่มต้นจากการพิจารณาหาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นโดยใช้การระดมสมอง ทำให้สามารถเลือกปัจจัยทั้งหมด 3 ปัจจัยที่น่าจะมีผลอย่างมากต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น สำหรับกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง ปัจจัยเหล่านี้ประกอบด้วย (1) อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่หนึ่ง (2) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง และ (3) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช โดยใช้แผนการทดลอง 2^k แฟคทอเรียลในการทดลองเบื้องต้นโดยทุกระดับของปัจจัย 2 ระดับ เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อสิ่งที่ต้องการศึกษาออกไป จากผลการทดลองพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ชนิดมีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น การทดลองแบบแฟคทอเรียลได้ถูกนำมาใช้อีกครั้ง โดยเพิ่มระดับของปัจจัยเป็น 3 ระดับ เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด

ผลการทดลอง พบว่าสภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition) ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดคือ (1) อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่หนึ่ง 200 ลิตรต่อนาที (2) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง 0.9 เมตรต่อนาที และ (3) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช 1,530 องศาเซลเซียส จากสภาวะดังกล่าวข้างต้น พบว่าสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลงได้ 158 มิลลิเมตร จากความยาวเดิม 681±17 มิลลิเมตร และยังพบว่าสามารถลดความยาวเผื่อตัดของเหล็กปลายสั้นลงได้ 264 มิลลิเมตร จากความยาวเดิม 349 มิลลิเมตร ดังนั้นสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลงได้ทั้งหมด 422 มิลลิเมตร หรือคิดเป็นมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นเท่ากับ 629,856 บาทต่อปี อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ภาควิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่อนิสิต.....
สาขาวิชา.....วิศวกรรมอุตสาหการ..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา....2545..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....-

4371479021 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEY WORD: Crop End Billet Length / 2^k Factorial Design / 3^k Factorial Design with Fixed Effect Model / Analysis of Variance / Model Adequacy Checking / Multiple Range Test / Test of Two Parameters / Regression Model.

WICHAN WANNA : FACTORS INFLUENCING CROP END BILLET FOR CONTINUOUS CASTING PROCESS VIA EXPERIMENTAL DESIGN TECHNIQUE THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D. , 249 pp. ISBN 974-17-1794-6.

The objective of this research was to (1) study of factors influencing on crop end billet, and (2) propose the suitable condition for minimize of crop end billet length under practical condition. The research was initiated by considering of various factors effecting on crop end billet with brainstorming. Selected 3 factors that were probably significantly in crop end billet for continuous casting process were (1) flow rate of billet cooling water zone 1, (2) casting speed, and (3) liquid steel temperature in tundish. These factors were varied in the screening experiments using 2^k Factorial Design in 2 level of each factor in order to screen nonsignificant factors. From the experimental results showed that these 3 factors were significant to crop end billet length. Factorial experiment was reconducted using 3 levels of factor in order to find out the suitable condition for minimize of crop end billet length.

The experimental results showed that the suitable conditions provided minimum crop end billet length were (1) flow rate of billet cooling water zone 1 of 200 litre per minute, (2) casting speed of 0.90 metre per minute, and (3) liquid steel temperature in tundish of 1,530 degree Celsius. According to the above conditions, the crop end billet length was decreased with 158 millimetre of the existing length of 681*17 millimetre, and the cutting allowance was decreased with 264 millimetre of the existing length of 349 millimetre. Therefore, the crop end billet length was saved on 422 millimetre or cost saving of 629,856 Baht per year. The experimental results provided significantly 95% of confidence level.

Department.....Industrial Engineering..... Student's signature.....
Field of study....Industrial Engineering..... Advisor's signature.....
Academic year...2002..... Co-advisor's signature.....-

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ต้องขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ เป็นอย่างสูงซึ่งท่านได้ชี้แนะแนวทาง และให้คำปรึกษาในการทำวิทยานิพนธ์เป็นอย่างดี หากไม่มีท่านคอยช่วยเหลือในเรื่องต่าง ๆ แล้ว วิทยานิพนธ์ฉบับนี้คงจะไม่สำเร็จลุล่วงได้ และขอกราบขอบพระคุณประธานและกรรมการในการสอบ วิทยานิพนธ์ ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย ริจิรวณิช ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุทัศน์ รัตนเกื้อกังวาน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรา ฐักิจการพานิช ที่ได้คอยช่วยเหลือให้คำแนะนำ ต่าง ๆ และตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอกราบขอบพระคุณนายบาง วรรณานางบัญญัติ วรรณานาง บิดามารดาของผู้วิจัยและครูบาอาจารย์ที่ช่วยอบรมให้การศึกษแก่ผู้วิจัยตลอดมา นอกจากนี้ขอขอบคุณนางยุ พิณ วรรณานาง พี่สาว นายสายัณห์ วรรณานาง พี่ชาย นางสาวเกศิญาณี อนุศรีและครอบครัวที่คอยให้ กำลังใจเสมอ รวมถึงเพื่อนนิสิตที่คอยให้ความช่วยเหลือเสมอมา

ท้ายนี้ หวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับผู้สนใจที่จะนำไปเป็น แนวทางการออกแบบการทดลอง เพื่อประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการหล่อเหล็กแท่ง.....	5
2.1.1 สภาพทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง.....	5
2.1.2 หลักการพื้นฐานการหล่อเหล็กแท่ง.....	11
2.2 หลักการเป็นตัวเป็นของแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน.....	13
2.3 หลักการออกแบบการทดลอง.....	17
2.3.1 ปัจจัยในกระบวนการผลิต.....	19
2.3.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง.....	20
2.3.3 คำจำกัดความ.....	20
2.3.4 หลักในการออกแบบการทดลอง.....	21
2.3.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง.....	22
2.3.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง.....	24
2.3.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ.....	24
2.3.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง.....	28
2.3.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	31
2.3.10 การทดสอบพหุพหุพหุพหุของดินแดน.....	37
2.3.11 การทดสอบพหุพหุพหุพหุของสองประชากร.....	38
2.3.12 แบบจำลองการถดถอย.....	41

2.3.13 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง.....	43
2.4 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	44
2.5 สภาพปัญหาการผลิตเหล็กแท่งในโรงงานตัวอย่าง.....	47
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	53
3.1 การศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	53
3.2 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	53
3.2.1 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย.....	54
3.2.2 การไม่เลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย.....	55
3.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย.....	55
3.2.4 การเลือกตัวแปรตอบสนอง.....	56
3.2.5 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง.....	56
3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	58
3.3.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	58
3.3.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูล.....	83
3.3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบความยาวเหล็กปลายสั้น.....	84
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ.....	86
3.4.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล.....	86
3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น.....	86
3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม..	92
3.5 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก.....	98
3.6 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	99
บทที่ 4 ผลการวิจัยและการวิเคราะห์.....	103
4.1 ผลการศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	103
4.2 ผลการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	109
4.2.1 ปัจจัยหลักที่ถูกเลือกใช้ในการวิจัย.....	109
4.2.2 ปัจจัยที่ไม่ถูกเลือกใช้ในการวิจัย.....	109
4.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย.....	115
4.2.4 การเลือกตัวแปรตอบสนอง.....	118
4.2.5 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง.....	118

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัย ที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	131
4.3.1 ผลการทดลองในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	131
4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	133
4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัย ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด.....	141
4.4.1 ผลการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	141
4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม..	145
4.5 ผลการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก.....	167
4.5.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก.....	167
4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก.....	169
4.6 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	171
บทที่ 5 บทวิจารณ์ผลการวิจัย.....	176
5.1 บทวิจารณ์ผลการวิจัย.....	176
บทที่ 6 บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	179
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	179
6.2 ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น.....	182
รายการอ้างอิง.....	183
ภาคผนวก.....	184
ภาคผนวก ก.....	185
ภาคผนวก ข.....	192
ภาคผนวก ค.....	200
ภาคผนวก ง.....	203
ภาคผนวก จ.....	212
ภาคผนวก ฉ.....	221
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	249

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน.....	34
2.2 แสดงจำนวนการหล่อเหล็กต่อเนื่องต่อวันในการหล่อเหล็กแท่ง.....	50
2.3 แสดงความยาวของเหล็กปลายสั้นต่อเดือนในการหล่อเหล็กแท่ง.....	51
3.1 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	86
3.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	92
3.3 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย.....	101
4.1 แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในการเกิดเหล็กปลายสั้น.....	104
4.2 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการการเกิดเหล็กปลายสั้นทั้งหมด.....	105
4.3 แสดงการสรุปเหตุผลที่ใช้ในการเลือกปัจจัยต่างๆ.....	110
4.4 แสดงการสรุปเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ.....	111
4.5 แสดงปัจจัยที่ถูกเลือกในการทดลอง.....	114
4.6 แสดงปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลอง.....	114
4.7 แสดงการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง.....	117
4.8 แสดงแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น.....	119
4.9 แสดงเมตริกการออกแบบการทดลองในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	121
4.10 แสดงการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	122
4.11 แสดงการบันทึกผลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	123
4.12 แสดงแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	124
4.13 เมตริกการออกแบบการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม...	126
4.14 การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	127
4.15 แสดงการบันทึกผลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	128
4.16 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	132
4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	133
4.18 แสดงส่วนตกค้างที่ถูกเรียงจากมากไปหาน้อยและ Probability Plot ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	134
4.19 แสดงส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น..	136

ตารางที่	หน้า
4.20 แสดงส่วนตกค้าง ปัจจัยระดับต่างๆและความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	138
4.21 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม...	142
4.22 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.	145
4.23 แสดงส่วนตกค้างที่ถูกเรียงจากมากไปหาน้อยและ Probability Plot ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	147
4.24 แสดงส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	150
4.25 แสดงส่วนตกค้าง ปัจจัยระดับต่างๆและความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	153
4.26 แสดงระดับของปัจจัยที่ใช้ในสภาวะปัจจุบันและสภาวะที่เหมาะสม.....	167
4.27 แสดงผลการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก.....	168
4.28 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน...	171
4.29 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย เชิงเส้นและกำลังสอง.....	172
4.30 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย เชิงเส้นและอันตรกิริยา.....	173
4.31 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย เส้นโค้งโพลิโนเมียล (Polynomial) ดีกรี 2 ที่มี 3 ตัวแปรอิสระ.....	174
5.1 แสดงมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่สภาวะปัจจุบัน (Current Condition) กับสภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition).....	177
5.2 แสดงมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นที่เผื่อตัดความยาว.....	178

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงเตาหลอมเหล็ก (Electric Arc Furnace : EAF).....	8
2.2 แสดงเตาปรุงแต่งน้ำเหล็ก (Ladle Refining Furnace : LRF).....	8
2.3 แสดงเครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine : CCM).....	9
2.4 แสดงกระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่าง.....	9
2.5 แสดงกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง.....	11
2.6 แสดงรูปแบบของกระบวนการหรือระบบ.....	18
2.7 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์.....	19
2.8 แสดงการออกแบบเชิงแพคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	29
2.9 แสดงการออกแบบเชิงแพคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย.....	29
2.10 แสดงเหล็กปลายสั้น.....	49
3.1 แสดงระบบน้ำหล่อเย็น (Pass Through Water) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1.....	59
3.2 แสดงหัวฉีด (Spray Nozzle) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1.....	60
3.3 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ของ น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1.....	61
3.4 แสดงวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ของ น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1.....	62
3.5 แสดงเหล็กหล่อตัวนำเหล็กแท่ง (Dummy Bar).....	63
3.6 แสดงชุดกดเหล็กแท่ง (Withdrawal Unit).....	64
3.7 แสดงชุดประมวลผลความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง.....	65
3.8 แสดงปลอกวัดอุณหภูมิ.....	66
3.9 แสดงด้ามวัดอุณหภูมิ.....	67
3.10 แสดงเครื่องแสดงผลอุณหภูมิ.....	68
3.11 แสดงเครื่องตรวจสอบอุณหภูมิ.....	69
3.12 แสดงระบบน้ำหล่อเย็น (Circulate Water) ของน้ำหล่อโมลด์.....	70
3.13 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ของน้ำหล่อโมลด์.....	71
3.14 แสดงวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ของน้ำหล่อโมลด์....	72
3.15 แสดงระบบน้ำหล่อเย็น (Pass Through Water) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2.....	73
3.16 แสดงหัวฉีด (Spray Nozzle) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2.....	74
3.17 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ของ น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2.....	75

รูปที่	หน้า
3.18 แสดงวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ของ น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2.....	76
3.19 แสดงน้ำมันที่ใช้ในการหล่อโมลด์.....	77
3.20 แสดงชุดปั๊มน้ำมันหล่อโมลด์.....	78
3.21 แสดงโมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง ขนาด 120x120 mm ² และขนาด 130x170 mm ²	79
3.22 แสดงเครื่องวิเคราะห์ทางเคมี.....	80
3.23 แสดงสายผลิตในการหล่อ (Casting Strand).....	81
3.24 แสดงพนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator) ที่มี อุปกรณ์ความปลอดภัยส่วนบุคคล.....	82
3.25 แสดงการวัดความยาวของรูกกลวงตามแนว Center Line.....	85
3.26 แสดงการวัดความยาวเหล็กปลายสั้นทั้งชิ้นตลอดความยาวตามแนว Center Line.....	85
3.27 แสดงตัวอย่าง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	88
3.28 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ใน部分ของการทดลองเบื้องต้น.....	89
3.29 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตใน部分ของการทดลองเบื้องต้น.....	91
3.30 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับระดับของปัจจัยใน部分ของการทดลองเบื้องต้น.....	91
3.31 แสดงตัวอย่าง Normal Probability Plot ใน部分ของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	95
3.32 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลใน部分ของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	96
3.33 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกพิตใน部分ของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	97
3.34 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับระดับของปัจจัยใน部分ของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	97
4.1 แสดง Normal Probability Plot ใน部分ของการทดลองเบื้องต้น.....	135
4.2 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลใน部分ของการทดลองเบื้องต้น.....	137
4.3 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความยาวเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย ใน部分ของการทดลองเบื้องต้น.....	139
4.4 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ใน部分ของการทดลองเบื้องต้น.....	139

รูปที่	หน้า
4.5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	140
4.6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอุณหภูมินำเหล็กในทันดิช ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น.....	140
4.7 แสดง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	149
4.8 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	152
4.9 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความยาวเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	156
4.10 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	156
4.11 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	157
4.12 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอุณหภูมินำเหล็กในทันดิช ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม.....	157
4.13 แสดงปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นกับค่าเฉลี่ยของ ความยาวเหล็กปลายสั้น.....	159
4.14 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับ ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น.....	159
4.15 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับ ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ทั้งสองกราฟ...160	160
4.16 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็ว ในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,530 °c....	160
4.17 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็ว ในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,550 °c....	161
4.18 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็ว ในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,570 °c... 161	161
4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร.....	170
5.1 แสดงเหล็กปลายสั้นที่เผื่อตัดความยาว.....	178

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ในอุตสาหกรรมการผลิตเหล็กเส้นเหล็กก่อสร้าง ที่ใช้เตาหลอมเหล็ก (Electrical Arc Furnace : EAF) หลอมเศษเหล็ก (Scrap) ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตให้ละลายผ่านเครื่องปรงแต่งน้ำเหล็ก (Ladle Relining Furnace : LF) ผ่านเครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine : CCM) หล่อน้ำเหล็กให้เป็นเหล็กแท่ง (Billet) ก่อนที่จะส่งไปยังแท่นรีด รีดเป็นเหล็กเส้นเหล็กก่อสร้างต่อไปนั้น ในปัจจุบันได้มีบริษัทผู้ผลิตเหล็กจำนวนมาก ประกอบธุรกิจนี้ ทำให้มีการแข่งขันทางการตลาดค่อนข้างสูง ประกอบกับภาวะเศรษฐกิจที่ชะลอตัวในธุรกิจก่อสร้างและอสังหาริมทรัพย์ ซึ่งบริโภคเหล็กเส้นเหล็กก่อสร้างนี้โดยตรง เป็นผลให้ปริมาณความต้องการในการใช้เหล็กเส้นเหล็กก่อสร้างลดลง ทำให้ยอดขายสินค้าลดลงตามไปด้วย และหลังจากที่รัฐบาลประกาศให้ค่าเงินบาทลอยตัวเป็นผลให้อัตราแลกเปลี่ยนเงินบาทต่อเงินดอลลาร์ซบตัวสูงขึ้นเป็นเท่าตัว ส่งผลให้หนี้สินและดอกเบี้ยที่เกิดจากการกู้ยืมเงินตราต่างประเทศเพิ่มเป็นทวีคูณ ดังนั้นบริษัทผู้ผลิตเหล็กต้องมีกลยุทธ์ในการดำเนินธุรกิจเพื่อให้สามารถอยู่รอดได้ภายใต้ภาวะวิกฤตเช่นนี้ โรงงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นบริษัทที่ผลิตเหล็กเส้นเหล็กก่อสร้างรายใหญ่ที่สุดแห่งหนึ่งของประเทศก็ได้รับผลกระทบเช่นเดียวกัน

สืบเนื่องจากภาวะเศรษฐกิจที่ชะลอตัว ทำให้โรงงานตัวอย่าง จึงได้วางกลยุทธ์ในการที่จะทำให้โรงงานตัวอย่างอยู่รอดได้ภายใต้ภาวะวิกฤต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น กลยุทธ์ที่ผู้บริหารระดับสูงของโรงงานตัวอย่าง ได้ให้ความสำคัญ ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดต้นทุนการผลิต การส่งของตรงตามลูกค้าต้องการ และการให้บริการหลังการขาย เพื่อสร้างความพึงพอใจให้ลูกค้าสูงสุด หรือเป็นไปตามหลัก Q C D S (Quality , Cost , Delivery , Service) เพื่อสนองนโยบายของโรงงานตัวอย่าง จึงได้ทำการศึกษาเพื่อลดต้นทุนการผลิตเหล็กแท่ง ซึ่งจากการเก็บข้อมูลพบว่ามีในหลายๆ จุดที่สามารถทำให้ต้นทุนการผลิตเหล็กแท่งลดลงได้ จุดหนึ่งที่น่าสนใจ ได้แก่ การเพิ่ม ผลผลิต (Yield) ในการผลิตเหล็กแท่งด้วยการลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง ของเสียที่พิจารณาคือเหล็กปลายสั้น (Crop End Billet) เป็นเหล็กแท่งช่วงปลายการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง ซึ่งมีรูปร่างภายใน ไม่สามารถนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ได้ ผลผลิต (Yield) ในปัจจุบันอยู่ที่ 88% เป็นของเสีย (Loss) จากเหล็กปลายสั้น อยู่ที่ 1.35% และเป็นของเสีย (Loss) ของปริมาณน้ำยา (Slag) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตและอื่นๆ อยู่ที่ 10.65% ซึ่งไม่สามารถทำให้ลดลงได้มากนัก

จะเห็นได้ว่า การลดต้นทุนการผลิตเหล็กแท่ง ด้วยการ เพิ่ม CCM Yield ด้วยวิธีการลดของเสียของเหล็กปลายสั้น ที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง ก็เป็นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถทำให้โรงงานตัวอย่าง สามารถดำเนินธุรกิจต่อไปได้ ด้วยเหตุนี้ การลดของเสียของเหล็กปลายสั้น ที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง ต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้น เพื่อให้สามารถทราบความยาวที่แน่นอนได้ จึงได้ประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) และการวิเคราะห์ (Analytical Studies) เข้ามาการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นและปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

1.2.2 เพื่อศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตการวิจัยนี้คือ

1.3.1 ศึกษากระบวนการการเกิดเหล็กปลายสั้น ของเหล็กแท่ง Type M15 ซึ่งมีส่วนผสมทางเคมี (ร้อยละ) ดังต่อไปนี้ C:0.11-0.18,Si:0.25 max,Mn:0.63 max,P:0.045 max,S:0.045 max,Cu:0.40 max,Cr:0.30 max,Ni:0.25 max,Mo:0.025 max,Sn:0.05 max,Al:0.35 max เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม

1.3.2 ศึกษาปัจจัยที่ควบคุมได้และเกี่ยวข้องกับกระบวนการการเกิดเหล็กปลายสั้น โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษาเบื้องต้นดังนี้

1.3.2.1 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)

1.3.2.2 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed)

1.3.2.3 อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)

1.3.3 ทำการออกแบบ วิเคราะห์ผล ตลอดจนสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลาย
สั้น และเสนอเงื่อนไขที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นมีความยาวน้อยที่สุด ภายใต้ปัจจัยที่ควบคุมได้ดังข้อที่
1.3.2 เพื่อให้ทราบถึงความยาวของเหล็กปลายสั้น

1.3.4 ในการศึกษาครั้งนี้ จะใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงสถิติเพื่อ
วิเคราะห์ข้อมูลและการทดลองจะกระทำซ้ำ 2 ครั้ง โดยการสุ่มการทดลอง

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การวิจัยนี้มีขั้นตอนการดำเนินงานคือ

- 1.4.1 สัมภาษณ์งานวิจัยและศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
- 1.4.2 ศึกษากระบวนการการหล่อเหล็กแท่ง และการเกิดขึ้นของเหล็กปลายสั้นใน
ปัจจุบัน
- 1.4.3 วิเคราะห์ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น
- 1.4.4 ศึกษาการออกแบบการทดลอง
- 1.4.5 วางแผนการออกแบบการทดลอง
- 1.4.6 ดำเนินการทดลองตามแผนการออกแบบการทดลอง
- 1.4.7 วิเคราะห์ผลการทดลองตามหลักสถิติเชิงวิศวกรรม
- 1.4.8 พิจารณาปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด
- 1.4.9 สรุปผลการออกแบบการทดลองและข้อเสนอแนะ
- 1.4.10 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์และนำเสนอผลงาน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้คือ

- 1.5.1 ทราบถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดขึ้นของเหล็กปลายสั้น
- 1.5.2 ทราบถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวนานน้อยที่สุด
- 1.5.3 ลดของเสียที่เกิดจากเหล็กปลายสั้น
- 1.5.4 เพิ่ม CCM Yield
- 1.5.5 ช่วยลดต้นทุนในการผลิต
- 1.5.6 เป็นข้อมูลสำหรับใช้เป็นมาตรฐานการปฏิบัติงาน และเป็นแนวทางในการวิจัยและพัฒนากระบวนการหล่อเหล็กแห่งต่อไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการหล่อเหล็กแบ่ง

2.1.1 สภาพทั่วไปของโรงงานตัวอย่าง

โรงงานตัวอย่าง ซึ่งเป็นโรงงานหลอมและรีดเหล็กด้วยเตาหลอมไฟฟ้าแบบอาร์คเพื่อผลิตเหล็กเส้นกลม เหล็กข้ออ้อย และเหล็กถวด

ภายใต้ปรัชญาที่ยึดมั่นในการผลิตสินค้าคุณภาพสูง การพัฒนาเทคโนโลยีด้วยตนเองตลอดจนการมีส่วนร่วมรับผิดชอบต่อสังคมนั้น โรงงานตัวอย่าง มีส่วนในการยกระดับการผลิตและการตลาดของอุตสาหกรรมเหล็กเส้นเหล็กก่อสร้างในประเทศ

2.1.1.1 ผลิตรภัณฑ์การตลาดและบริการ

ผลิตรภัณฑ์ที่โรงงานตัวอย่าง ผลิตนั้น แบ่งออกเป็น 2 ผลิตรภัณฑ์หลัก ได้แก่ ผลิตรภัณฑ์กิ่งสำเร็จรูป และผลิตรภัณฑ์สำเร็จรูป

2.1.1.1.1 ผลิตรภัณฑ์กิ่งสำเร็จรูป

ผลิตรภัณฑ์กิ่งสำเร็จรูป ได้แก่ เหล็กแบ่ง (Billet) เป็นผลิตรภัณฑ์ที่นำไปรีดเป็นผลิตรภัณฑ์สำเร็จรูป โดยมีส่วนผลิตเหล็กแบ่งเป็นผู้ผลิต ซึ่งจะส่งต่อไปยังส่วนผลิตเหล็กรีด รีดเป็นผลิตรภัณฑ์สำเร็จรูปต่อไป และยังสามารถจำหน่ายให้ลูกค้าภายนอกได้ โดยลูกค้าเหล่านี้ไม่มีกระบวนการผลิตเหล็กแบ่ง มีเฉพาะกระบวนการรีดเหล็กเป็นผลิตรภัณฑ์สำเร็จรูปอย่างเดียว เหล็กแบ่งนี้สามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.1.1.1.1.1 เหล็กแบ่งชนิด SS คือ เหล็กแบ่งที่มีหน้าตัด 120 x 120 มิลลิเมตร ความยาว 4.6 เมตร น้ำหนัก 112 kg/m น้ำหนักต่อแบ่ง 490 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตรภัณฑ์ เหล็กฉาก , เหล็กวาง น้ำ ได้แก่ Type SS400 และ SS540

2.1.1.1.1.2 เหล็กแบ่งชนิด D คือ เหล็กแบ่งที่มีหน้าตัด 120 x 120 มิลลิเมตร ความยาว 4.6 เมตร น้ำหนัก 112 kg/m น้ำหนักต่อแบ่ง 490 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตรภัณฑ์ เหล็กเส้นกลม , เหล็กข้ออ้อย ได้แก่ Type D40T และ D40

2.1.1.1.1.3 เหล็กแท่งชนิด M คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 130 x 170 มิลลิเมตร ความยาว 12 เมตร น้ำหนัก 172 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 2,000 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กลวด ได้แก่ Type M8,M10,M12 และ M15

2.1.1.1.1.4 เหล็กแท่งชนิด S คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 130 x 170 มิลลิเมตร ความยาว 12 เมตร น้ำหนัก 172 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 2,000 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กเพลลา ได้แก่ Type S35C และ S45C

2.1.1.1.1.5 เหล็กแท่งชนิด H คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 130 x 170 มิลลิเมตร ความยาว 12 เมตร น้ำหนัก 172 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 2,000 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กลวดเกรดคาร์บอนสูง ได้แก่ Type H62A,H62B,H67B และ H82B

2.1.1.1.2 ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป

ผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป แบ่งเป็น

2.1.1.1.2.1 กลุ่มผลิตภัณฑ์เหล็กลวด (Wire Rod) ได้แก่

2.1.1.1.2.1.1 เหล็กลวด ใช้ผลิตตะปูและลวดต่าง ๆ เช่น ตะปู ,ลวด อาบสังกะสี ,ลวดผูกเหล็ก ,เพลลาขาว ,ตะแกรงเหล็ก ,ลวดเหล็ก ฯลฯ

2.1.1.1.2.1.2 เหล็กลวดเกรดคาร์บอนสูง ใช้ผลิต ลวดเหล็กตีเกลียว สำหรับคอนกรีตอัดแรง และลวดเหล็กแรงดึงสูง

2.1.1.1.2.2 กลุ่มผลิตภัณฑ์เหล็กโครงสร้าง (Section Line) ได้แก่

2.1.1.1.2.2.1 เหล็กฉาก เหล็กรางน้ำ สำหรับใช้ในงานโครงสร้างขนาดเล็ก เช่น รถไถ ,รถเข็น ,งานเฟอร์นิเจอร์ ฯลฯ

2.1.1.1.2.2.2 เหล็กเส้นกลม สำหรับงานก่อสร้างขนาดเล็กและขนาดกลาง ทั่วไป เช่น บ้าน ,อาคารพาณิชย์ ,ถนน ,โรงงาน ฯลฯ

2.1.1.1.2.2.3 เหล็กข้ออ้อย สำหรับงานก่อสร้างขนาดกลางและขนาดใหญ่ เช่น อาคารหลายชั้น ,เขื่อน ,สะพาน ฯลฯ

2.1.1.1.3 การตลาดและการบริการ

มีกิจกรรมหลายอย่างที่ให้บริการแก่ลูกค้า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพแก่ผู้ใช้ผลิตภัณฑ์มากที่สุด ได้แก่

2.1.1.1.3.1 มีการบริการกระจายทั่วทุกภูมิภาค เพื่อตอบสนองความต้องการได้ครบถ้วนและตามเวลาที่กำหนด

2.1.1.1.3.2 ให้ความสะดวกในการขนถ่ายสินค้าถึงผู้บริโภค

2.1.1.1.3.3 ให้คำแนะนำเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์โดยวิศวกร

2.1.1.1.3.4 การออกเยี่ยมเยียน และให้คำปรึกษา แก่หน่วยงานและโรงงาน เป็นต้น

2.1.1.2 ส่วนการผลิตและกระบวนการผลิต

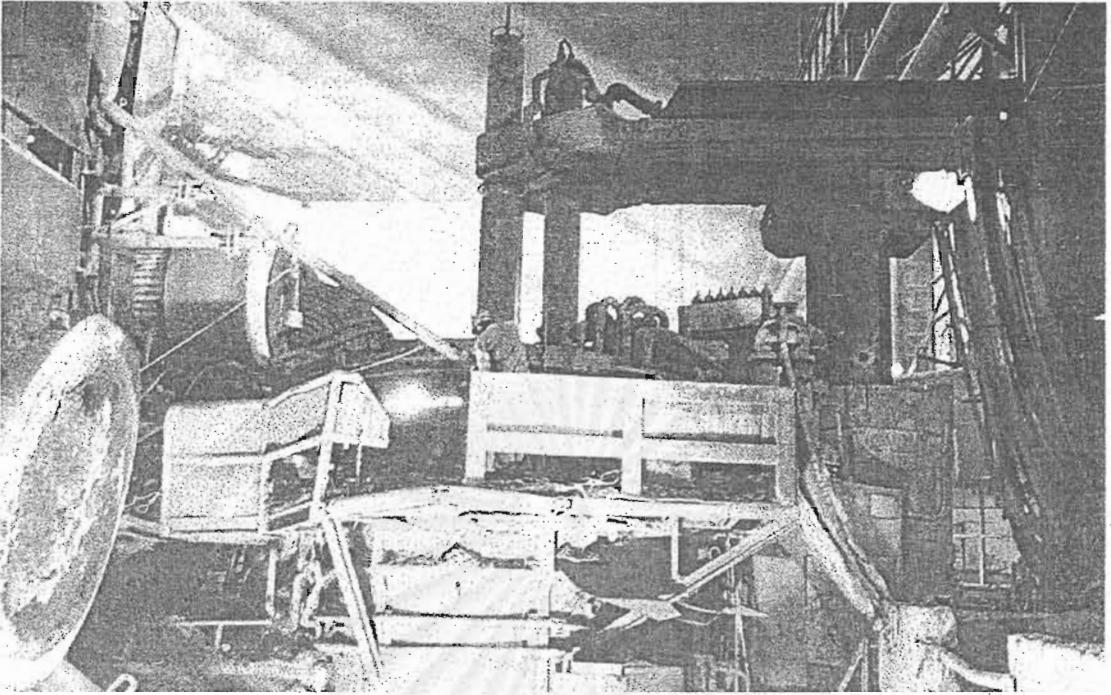
กระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่าง นั้นประกอบด้วยการผลิต 2 ส่วน คือ ส่วนการผลิตเหล็กแท่ง และส่วนการผลิตเหล็กรีด

2.1.1.2.1 ส่วนผลิตเหล็กแท่ง

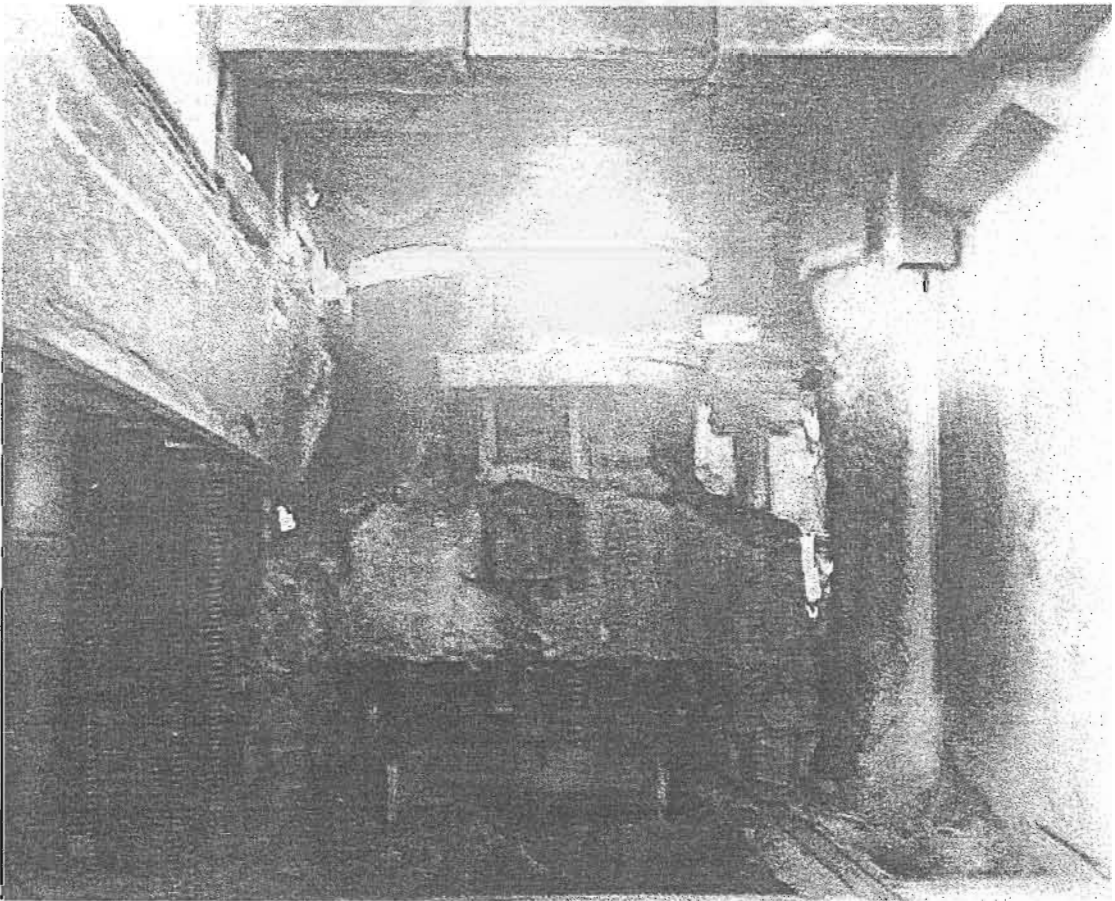
ส่วนการผลิตเหล็กแท่ง มีกระบวนการผลิต โดยนำเศษเหล็กเข้าเตาหลอมเหล็ก (Electric Arc Furnace : EAF) แสดงดังรูปที่ 2.1 หลอมเหล็กให้เป็นน้ำเหล็ก แล้วส่งน้ำเหล็กไปที่เตาปรุงแต่งน้ำเหล็ก (Ladle Refining Furnace : LRF) แสดงดังรูปที่ 2.2 ให้ได้ส่วนผสมทางเคมีที่ต้องการ หลังจากนั้นส่งขึ้นที่เครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine : CCM) แสดงดังรูปที่ 2.3 หล่อเหล็กเป็นเหล็กแท่ง (Billet) หลังจากนั้นนำไปเก็บที่ลานกองเก็บเพื่อส่งให้ส่วนผลิตเหล็กรีดทำการรีดเป็นผลิตภัณฑ์ต่อไป

2.1.1.2.2 ส่วนผลิตเหล็กรีด

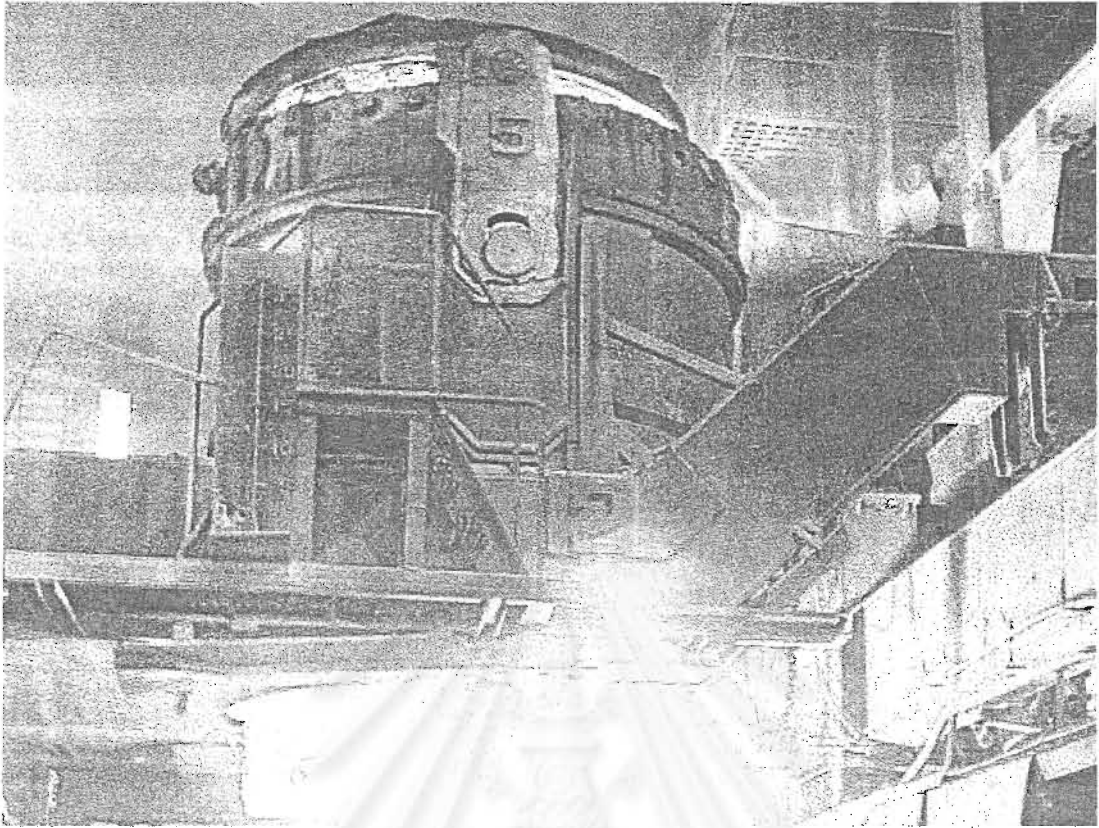
ส่วนผลิตเหล็กรีด มีกระบวนการผลิต โดยนำเหล็กแท่ง (Billet) เข้าเตาอบ (Reheating Furnace) อบให้ได้อุณหภูมิตามต้องการ แล้วนำเหล็กแท่ง (Billet) เข้าแท่นรีด รีดเป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่ เหล็กหลอด , เหล็กเส้นกลม , เหล็กข้ออ้อยและเหล็กก่อสร้างรูปพรรณขนาดเล็ก หลังจากนั้นนำไปเก็บที่ลานกองเก็บ รอส่งให้ลูกค้าต่อไป แสดงดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.1 แสดงเตาหลอมเหล็ก (Electric Arc Furnace : EAF)

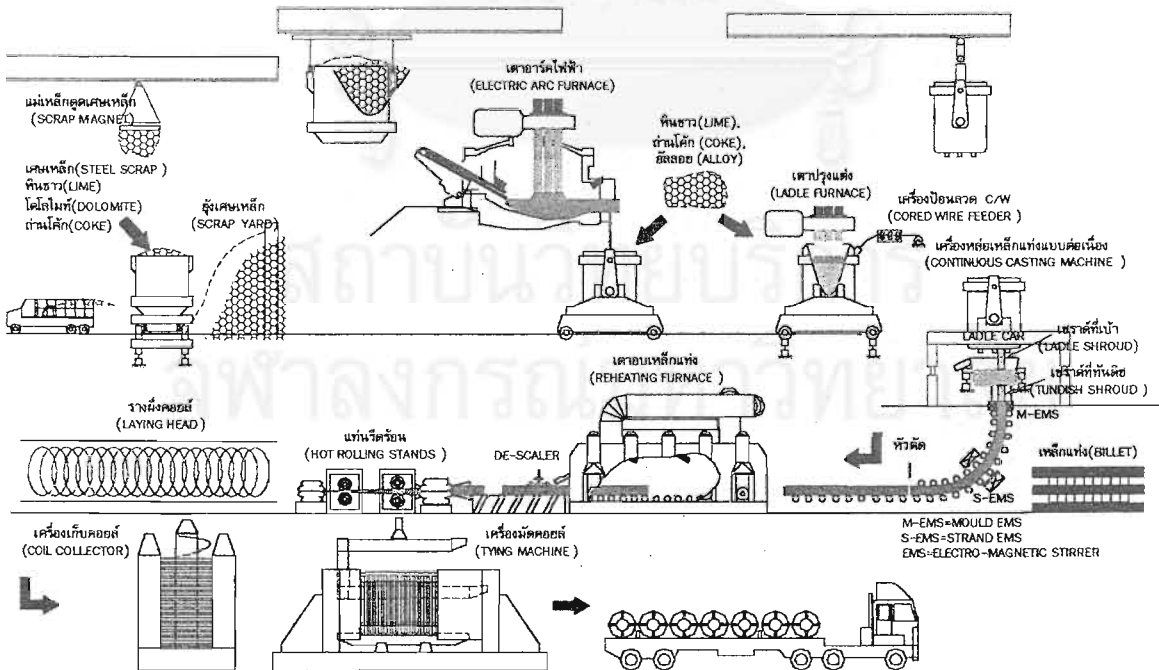


รูปที่ 2.2 แสดงเตาปรุงแต่งน้ำเหล็ก (Ladle Refining Furnace : LRF)



รูปที่ 2.3 แสดงเครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine : CCM)

กระบวนการผลิตเหล็กถลุง (PROCESS OF WIRE ROD PRODUCTION)



รูปที่ 2.4 แสดงกระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่าง

2.1.1.2.3 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตของโรงงานตัวอย่าง จะมุ่งเน้นไปที่กระบวนการผลิตของส่วนการผลิตเหล็กแท่ง ซึ่งเป็นส่วนที่จะทำการวิจัย กระบวนการผลิตของส่วนการผลิตเหล็กแท่ง มีดังต่อไปนี้

2.1.1.2.3.1 การนำเศษเหล็กในถังเศษเหล็ก ใสลงในถังเศษเหล็ก (Bucket) จำนวน 3 ถัง ถังละ 20 ตัน , 13 ตัน และ 12 ตัน ตามลำดับ น้ำหนักรวม 45 ตัน ต่อหนึ่งกระบวนการผลิต (1 Heat)

2.1.1.2.3.2 บรรทุกบนรถถังเศษเหล็ก (Bucket Car) นำเข้าวางไว้ในอาคารส่วนเหล็กแท่ง

2.1.1.2.3.3 ปั่นจั่น 80 ตัน (Overhead Crane 80 Tons) ยกถังเศษเหล็กมาที่เตาหลอม (Electric Arc Furnace : EAF) เพื่อใส่เศษเหล็ก

2.1.1.2.3.4 ทำการหลอมเศษเหล็ก โดยพนักงานควบคุม จำนวน 1 คน จะควบคุมกระบวนการผลิตในห้องควบคุมและพนักงานหน้าเตาจะทำงานอยู่หน้าเตาหลอม จำนวน 4 คน

2.1.1.2.3.5 เมื่อหลอมเหล็กได้ส่วนผสมทางเคมีตามข้อกำหนดแล้ว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 60 นาที หลังจากนั้นจะเทลงเข้ารับน้ำเหล็กในบ่อเท

2.1.1.2.3.6 พนักงานขับปั้นจั่นยกเข้าจากบ่อเทไปที่ เตาปรุงแต่งน้ำเหล็ก (Ladle Furnace : LF) เพื่อปรุงแต่งน้ำเหล็ก

2.1.1.2.3.7 ทำการปรุงแต่งน้ำเหล็ก โดยพนักงานควบคุม จำนวน 1 คน จะควบคุมกระบวนการผลิตในห้องควบคุมและพนักงานหน้าเตาจะทำงานอยู่หน้าเตาปรุงแต่งน้ำเหล็ก จำนวน 1 คน

2.1.1.2.3.8 เมื่อปรุงแต่งน้ำเหล็ก ได้ส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามข้อกำหนดของเหล็กแท่ง (Billet) แล้ว ซึ่งใช้เวลาประมาณ 30 นาที หลังจากนั้นจะยกเข้ารับน้ำเหล็กไปที่เครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine : CCM) เพื่อทำการหล่อเหล็กแท่ง

2.1.1.2.3.9 ทำการหล่อเหล็กแท่ง โดยพนักงานควบคุม จำนวน 1 คน จะควบคุมกระบวนการผลิตในห้องควบคุมและพนักงานหล่อเหล็กแท่ง จะทำงานอยู่หน้าเครื่องหล่อเหล็กแท่ง จำนวน 3 คน

2.1.1.2.3.10 เมื่อหล่อเหล็กแท่งเสร็จ โดยส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามข้อกำหนด ตามที่เตาปรุงแต่งน้ำเหล็กส่งมา ซึ่งใช้เวลาในการหล่อ 60 นาที หลังจากนั้นรถตักเหล็กแท่ง (Transfer Car) จะตักเหล็กแท่งไปฝั่งความร้อนที่ลานฝั่ง (Cooling Bed)

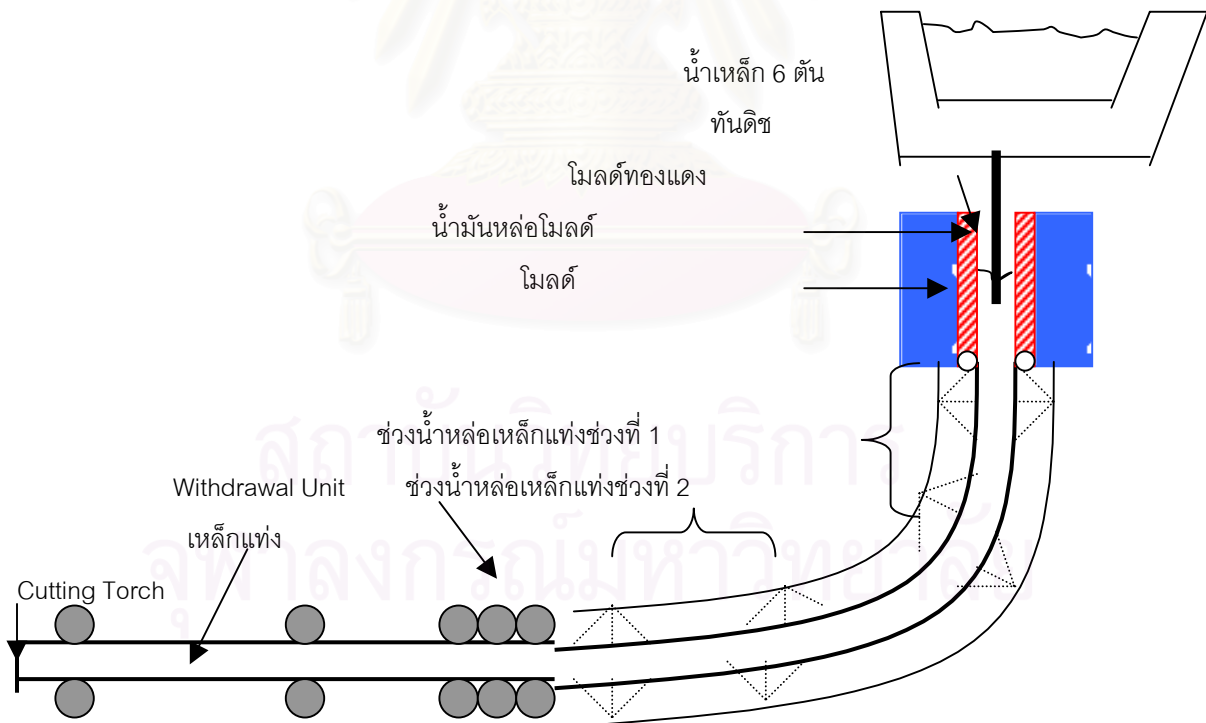
2.1.1.2.3.11 ปั่นจั่นดูดเหล็กแท่ง จะมาดูดเหล็กแท่งไปกองเก็บที่ ลานกองเก็บ

2.1.1.2.3.12 หลังจากนั้น ปั่นจั่นดูดเหล็กแท่งจะมาดูดเหล็กแท่งส่งให้ส่วนผลิตเหล็กรีดทำการรีดเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต่อไป

2.1.2 หลักการพื้นฐานการหล่อเหล็กแท่ง

หลักการพื้นฐานในการหล่อเหล็กแท่ง มีดังต่อไปนี้

2.1.2.1 ทำการหล่อเหล็กแท่ง โดยพนักงานควบคุม จำนวน 1 คน จะควบคุมกระบวนการผลิตในห้องควบคุมและพนักงานหล่อเหล็กแท่ง จะทำงานอยู่หน้าเครื่องหล่อเหล็กแท่ง จำนวน 3 คน โดยกระบวนการหล่อเหล็กแท่ง แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง

2.1.2.2 เปิดน้ำเหล็กจากเบ้ารับน้ำเหล็กให้ไหลลงมาที่ทันดิช (Tundish : อุปกรณ์รับน้ำเหล็กอีกชนิดหนึ่งเพื่อเป็น Buffer สำหรับ cast Billet) เปิดให้เต็มทันดิช ซึ่งมีความจุประมาณ 6 ตัน

2.1.2.3 หลังจากนั้น จึงเปิดน้ำเหล็กจากทันดิชลงสู่โม่ลัดหล่อเหล็กแท่ง ซึ่งมีทั้งหมด 3 Line โดยมีอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อโม่ลัดสำหรับหล่อเป็นเหล็กแท่งขนาดหน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ $130 \times 170 \text{ mm}^2$ โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 1,600-2,000 Ltr/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 1,800-2,200 Ltr/min เมื่อน้ำเหล็กลงโม่ลัด โม่ลัดจะเขย่าด้วยอัตราคางที่ และจะเปิดน้ำมันหล่อโม่ลัดซึ่งเป็นน้ำมันที่ใช้ในการหล่อโม่ลัด ฉีดเข้าที่ผนังโม่ลัดทองแดง เพื่อไม่ให้ผิวของเหล็กแท่งติดกับโม่ลัดทองแดงในขณะที่หล่อ โดยอัตราการไหลของน้ำมันที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ เท่ากันคือ $70-90 \text{ cm}^3/\text{min}$ และในขณะที่น้ำเหล็กอยู่ในโม่ลัดจะมีการวัดอุณหภูมิทุก ๆ 15 นาที เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้เหมาะสม โดยให้อยู่ที่อุณหภูมิ Liquidus Temperature + 30°C และควบคุมความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ซึ่งเป็นความเร็วที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง โดยความเร็วที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 2.00-3.00 m/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 0.90-1.70 m/min

2.1.2.4 หลังจากนั้นน้ำเหล็กที่ออกจากโม่ลัดหล่อเหล็กแท่ง จะเย็นตัวเป็นเหล็กแท่ง โดยผิวภายนอกทั้ง 4 ด้านจะเป็นของแข็งแต่ภายในจะเป็นน้ำเหล็ก เมื่อพื้นช่วงโม่ลัดหล่อเหล็กแท่งแล้วจะเข้าสู่ช่วงน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 80-160 Ltr/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 100-200 Ltr/min จะฉีดผิวเหล็กแท่งทั้ง 4 ด้าน เพื่อให้เหล็กเย็นตัวเป็นของแข็ง โดยช่วงนี้เหล็กแท่งจะมีอัตราการเย็นตัวเป็นของแข็ง 90 % ของพื้นที่หน้าตัด

2.1.2.5 เมื่อผ่านพื้นช่วงน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 แล้วจะเข้าสู่ช่วงน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นน้ำที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 40-80 Ltr/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 60-100 Ltr/min จะฉีดผิวเหล็กแท่งทั้ง 4 ด้าน เพื่อให้เหล็กเย็นตัวเป็นของแข็ง เพื่อให้เหล็กเย็นตัวเป็นของแข็ง โดยช่วงนี้เหล็กแท่งจะมีอัตราการเย็นตัวเป็นของแข็ง 95 % ของพื้นที่หน้าตัด

2.1.2.6 เมื่อผ่านช่วงผ่านพื้นช่วงนำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 แล้วจะเข้าสู่ช่วงตัดเหล็กแท่ง แท่งให้ตรง โดยมีชุดกดเหล็กแท่ง (Withdrawal Unit) ทำหน้าที่ตัดตรง หลังจากนั้นเข้าสู่ช่วงตัดความยาว โดยมี Cutting Torch ทำหน้าที่ตัดความยาว สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ ตัดความยาว 4.6 เมตร และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ ตัดความยาว 12 เมตร และที่หัวเหล็กแท่งจะตัดเหล็กแท่ง ความยาวประมาณ 1 นิ้ว โดยจะตัดแท่งที่ 2,4, และ 6 ของแต่ละ Line เพื่อวิเคราะห์ส่วนผสมทางเคมีว่าตรงตามข้อกำหนดหรือไม่

2.1.2.7 เมื่อหล่อเหล็กแท่งเสร็จ โดยส่วนผสมทางเคมีเป็นไปตามข้อกำหนด ตามที่เตาปรุงแต่งนำเหล็กส่งมา โดยเวลาที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่งประมาณ 60 นาที หลังจากนั้นรถตักเหล็กแท่ง (Transfer Car) จะตักเหล็กแท่งไปฝั่งความร้อนที่ลานฝั่ง (Cooling Bed)

2.1.2.8 บันจันดูดเหล็กแท่งจะมาดูดเหล็กแท่งไปกองเก็บที่ลานกองเก็บ หลังจากนั้น บันจันดูดเหล็กแท่งจะมาดูดเหล็กแท่งส่งให้ส่วนผลิตเหล็กรีดทำการรีดเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปต่อไป หากส่วนผสมทางเคมีเป็นไม่เป็นไปตามข้อกำหนด บันจันดูดเหล็กแท่งก็จะดูดเหล็กแท่งไปที่ลานกองเก็บแยกไว้ เพื่อทำการแก้ไขหรือเปลี่ยนชนิดเหล็กแท่งในภายหลังต่อไป

2.2 หลักการเป็นตัวเป็นของแข็งของเหล็กกล้าคาร์บอน [1] มนัส สติริจินดา

ก่อนที่จะนำชิ้นงานทางโลหะไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ชิ้นงานทางโลหะจะถูกหล่อ (cast) ดังนั้นธรรมชาติของการแข็งตัวจึงมีความสำคัญทางโลหะอย่างมาก

2.2.1 The Liquid Phase

ถึงแม้การศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของของเหลวยังไม่ละเอียดพอ ก็พอสามารถสรุปได้ว่า โครงสร้างของของเหลวคล้ายกับของแข็ง แต่จะต่างกันที่ของเหลวจะเต็มไปด้วย defect ต่าง ๆ มากมายทำให้การการเคลื่อนที่ของอะตอมง่ายมาก ดังนั้นของเหลวจึงมีคุณสมบัติไหลตัวได้และไม่สามารถทนแรงเฉือนแม้จะน้อยเพียงใดก็ตาม จึงแปลความหมายได้ว่า คุณสมบัติของของเหลวขึ้นกับ defect ที่อยู่ในของเหลวมากกว่าลักษณะของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอม ในขณะที่สมบัติของของแข็งขึ้นกับการยึดตัวของอะตอมมากกว่า

2.2.2 Nucleation

การเกิด solidification เป็นการเกิด Nucleation และ growth การ Nucleate Phase ของแข็ง ระหว่างการแข็งตัวจะยากกว่าการเกิด Nuclei ของ Phase ของเหลวระหว่างการละลายมาก ผลก็คือ โลหะไม่จำเป็นต้อง Superheat มากมายเพื่อที่จะละลาย แต่การแข็งตัวจะต้องมี Supercooling เกือบทุกครั้ง และถ้า Nucleation จะต้องเป็น Homogeneous แล้ว ของเหลวจะต้องเย็นตัวลงไม่ต่ำกว่าจุดเยือกแข็งมาก จึงจะเกิดการแข็งตัวขึ้น

2.2.3 Crystal Growth from the Liquid Phase

การเคลื่อนที่ของ Boundaries ที่แบ่งของเหลวจากของแข็ง ที่มี Temperature Gradient ตั้งฉากกับ Boundaries เป็นผลจากการเคลื่อนที่ของอะตอม 2 แบบ คือถ้าอะตอมวิ่งจากของเหลวมาของแข็ง Interface จะเคลื่อนจากของแข็งไปของเหลว จึงเป็นการกำหนดอัตราการแข็งตัว แต่ถ้าอะตอมเคลื่อนจากของแข็งไปของเหลว ก็ทำให้ Interface เคลื่อนที่ย้อนกลับ ก็จะเป็นอัตราการละลาย

2.2.4 Stable Interface Freezing

กรณีที่สมมติว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น เมื่อเราเคลื่อนจาก Interface Liquid (Temperature Gradient เป็น +) และการเพิ่มอุณหภูมินี้เป็นเส้นตรงและตั้งฉากกับ Interface สภาพนี้ Interface จะรักษารูปร่างที่แน่นอนและมีการเคลื่อนไหวไปพร้อม ๆ กัน และถ้าเกิดมี Close-pack plane วางตั้งฉากกับ Heat flow ก็จะได้ระนาบที่เรียบเกิดขึ้น แต่โอกาสที่จะมี Close-pack plane ในลักษณะนี้ เป็นไปได้้น้อยมาก จึงต้องพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ กรณีที่ 1 Close-pack plane เกือบจะขนานกับ Interface และ กรณีที่ 2 Interface ไม่มีพวก Close-pack plane เลย

2.2.5 Dendritic Growth

การโตของผลึกชนิดที่สำคัญก็คือ เมื่อ Interface เคลื่อนไปในของเหลวที่มีอุณหภูมิลดลง (Temperature Gradient เป็น -) การจะเกิดเช่นนี้ได้เป็นไปได้หลายสาเหตุ สาเหตุหนึ่งก็คือ ความร้อนจะไหลจากขวาไปซ้าย ขณะเดียวกัน สมมติว่าเกิด Supercooling ขึ้นมาพอควร ทำให้อุณหภูมิจากของเหลวต่ำกว่าจุดแข็งตัวมาก แต่เนื่องจากการคายความร้อนออกมาตอนที่ของเหลวแข็งตัว จึงทำให้บริเวณ Interface มีอุณหภูมิต่ำกว่า Solid และ Liquid จึงเห็นได้ว่า อุณหภูมิจะลดลงในด้าน Solid (เพราะเป็นทิศทางการไหลของความร้อน) และในของเหลว

(เพราะธรรมชาติของความร้อนที่ไหลจาก Interface ไปที่ Supercooled Liquid) ลักษณะของอุณหภูมินี้เรียกว่า Temperature Inversion เมื่ออุณหภูมิของ Liquid หน้า Interface ลดลง ก็จะทำให้ Interface ไม่ stable และเกิดเป็นผลึกที่เป็นแขน (Spike) ยื่นออกมาจาก Primary Spike หรืออาจมี Tertiary Spike จาก Secondary ก็ได้ ผลที่ได้ก็คือจะได้ผลึกที่มีลักษณะเหมือนกับต้นสนที่เรียกว่า Dendrite

2.2.6 Dendritic Freezing in Alloys

การเกิด Dendrite เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้บ่อยในโลหะผสมหลายชนิด กรณีนี้ Supercooling ที่เกิดขึ้นจะต่างไปจากแบบที่ได้อธิบายไว้แล้ว แต่อีกแบบหนึ่ง เรียกว่า Constitutional Supercooling จะมีความสำคัญมากกว่าในเรื่องของ Alloy การเกิด Constitutional Supercooling จะพบเมื่อของแข็งที่เกิดขึ้นมีส่วนผสมทางเคมีต่างจากของเหลวที่มันเกิดขึ้น

2.2.7 Freezing in Ingots

การหล่อ Ingot มีความสำคัญในการผลิต Wrought Product เช่น แผ่น คาน เส้นโลหะ ซึ่งเป็นการทำ Plastic Working ของ Ingot ให้เป็นรูปร่างต่าง ๆ ขนาดของ Ingot นี้ ขึ้นอยู่กับโลหะและการใช้งานใน Steel อาจมีขนาดใหญ่ถึง 6-8 ตัน ได้ เมื่อ Ingot แข็งตัว จะเกิดผลึกต่าง ๆ ขึ้น 3 Zone โดยแถบเล็กไปตามแนวของผนัง Mould เรียกว่า Chill Zone ซึ่งประกอบด้วยผลึกเล็กแบบ Equiaxed (ขนาดเท่ากัน) จะมี Random Orientation ในส่วนนอกของ Zone นี้ ผลึกจะมีขนาดใหญ่และยาวขึ้น โดยมีความยาวขนานไปกับทิศทางการไหลของความร้อน (กับผนัง Mould) ผลึกพวกนี้จะมี Strong Preferred Orientation โดยมีทิศทางของ Dendritic Growth ขนานไปกับแกนยาวของมัน เนื่องจากรูปร่างที่เป็นแบบยาวของมัน จึงเรียกว่า Zone นี้ว่า Columnar Zone ส่วน Zone สุดท้ายจะอยู่ที่ตรงกลางของ Ingot และเป็น Random Orientation

2.2.8 The Grain Size of Casting

ถ้าชิ้นงานหล่อมีผลึกขนาดเล็ก ก็จะมีความแข็งแรงมากขึ้น การเกิดผลึกขนาดเล็กก็สามารถทำได้ โดยการเพิ่ม Nucleation Rate ซึ่งทำได้ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ

2.2.8.1 เพิ่ม Nucleation Rate โดยวิธีธรรมชาติ

การเพิ่ม Nucleation Rate โดยวิธีธรรมชาติ คือกำหนดให้เกิด Supercooling มาก ๆ

2.2.8.2 Break Dendrite

การ Break Dendrite ที่มีอยู่เพื่อให้เป็นผลึกใหม่ที่จะโตต่อไปได้ เรียกว่า Grain Multiplication

2.2.9 Segregation

โลหะหลอมเหลวที่จะแข็งตัวในทางอุตสาหกรรม มักจะมี Solute Elements อยู่ ไม่ว่าจะเป็นการเติมอย่างจงใจหรือมีอยู่ด้วยความบังเอิญก็ตาม Solute Elements เหล่านี้อาจจะเป็น Impurities ซึ่งมาได้จากหลายสาเหตุ หรือเป็น Alloying Elements ก็ได้ เมื่อโลหะผสมแข็งตัว โดยปกติแล้ว Solute Elements จะละลายได้ดีใน Liquid มากกว่าใน Solid จึงทำให้เกิด Segregation ของ Solute Elements ในชิ้นงานหล่อที่ได้ ความไม่สม่ำเสมอของ Solute Elements ในชิ้นงานหล่อนี้ จะมีได้ 2 ลักษณะ คือ Macro-Segregation และ Micro-Segregation

2.2.9.1 Macro-Segregation

Macro-Segregation หมายถึง ความแตกต่างของส่วนผสมตามส่วนต่างๆ ของชิ้นงานเกิดขึ้นเพราะการที่ Solute Element มักจะอยู่ในของเหลว ทำให้ส่วนที่แข็งตัวทีหลังมีความเข้มข้นสูงกว่าส่วนที่แข็งตัวที่แรก เช่นที่ Center ของ Ingot จะมีพวก Solute อะตอม มากกว่าที่ด้านติดผนัง Mould เป็นต้น

2.2.9.2 Micro-Segregation

Micro-Segregation หมายถึง ความแตกต่างของส่วนผสมที่เกิดในระดับผลึก นั่นคือ ภายในผลึกจะมีส่วนผสมไม่เท่ากัน แบบแรกคือ Cellular-structure และอีกแบบที่พบบ่อยคือ Coring-structure ซึ่งเกิดโดย Dendritic Freezing ของ Alloy โดยที่ Dendrite ที่ออกมาที่แรกค่อนข้างจะเป็น Pure Metal แต่ Liquid ที่อยู่รอบๆ Dendrite นี้ก็จะมี Solute สูง เมื่อ Liquid ส่วนนี้แข็งตัว ช่องว่างระหว่าง Dendrite ก็จะมี Solute Concentration สูง

2.2.10 Inverse Segregation

การเกิด Dendritic Freezing ใน Columnar Zone ของ Ingot บางครั้งอาจทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Inverse Segregation ได้ ในการแข็งตัวปกติ ส่วนกลางและด้านบนของ Ingot ซึ่งแข็งตัวทีหลัง มักจะมี Solute อะตอมสูงกว่า ส่วนผิวของ Ingot ที่แข็งตัวก่อน ในโลหะบางอย่าง Dendrite อาจจะถูกดันออกไปยาวมากกว่า ช่องว่างระหว่างแขนของ Dendrite จะแข็งตัว ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม ช่องว่างระหว่าง Dendrite นี้จะเป็นทางให้ Liquid จากส่วนกลางไหลกลับไปที่ Surface ได้ ปรากฏการณ์นี้ เกิดเพราะว่าการหดตัวของ Solid ทั้งหมด จาก Mould ทำให้เกิดแรงดูดให้ของเหลวไหลกลับคืนมาได้ อีก Factor หนึ่งก็คือ ความดันภายใน Ingot เอง จาก Gas ที่คายออกมาระหว่างการแข็งตัว จะดันเอาของเหลวจากภายในออกมา

2.2.11 Porosity

ถ้าตัดเรื่องรอยแตกจากการหดตัวที่ไม่สม่ำเสมอของส่วนต่าง ๆ ของชิ้นงานออกไป Porosity ในชิ้นงานหล่อจะมีสาเหตุการเกิดได้ 2 แบบ คือ

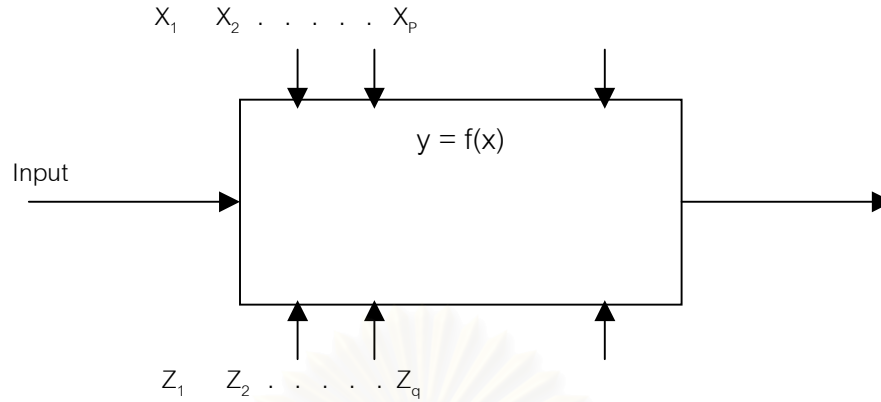
2.2.11.1 Gas ที่คายออกมาระหว่างการแข็งตัว

2.2.11.2 การหดตัวของปริมาตรโลหะเมื่อมีการแข็งตัวเกิดขึ้น

ซึ่งจะเป็นไปได้ในโลหะทั่ว ๆ ไป

2.3 หลักการออกแบบการทดลอง

การทดลองถูกสร้างขึ้นโดยผู้ทดลอง ซึ่งมาจากหลายสาขาอาชีพที่ต้องการค้นหาคำตอบจากกระบวนการหรือระบบที่ผู้ทดลองมีความสนใจ การทดลองในที่นี้อาจหมายถึงการทดสอบหรือชุดของการทดสอบที่คาดหมายว่าเมื่อเปลี่ยนตัวแปรป้อนเข้าของกระบวนการหรือระบบ จะเป็นผลให้ตัวแปรตอบสนองมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น ในงานทางด้านวิศวกรรม การทดลองมีบทบาทสำคัญในการออกแบบผลิตภัณฑ์ใหม่ การพัฒนากรรมวิธีการผลิตของกระบวนการและการปรับปรุงกระบวนการผลิต บางกรณีอาจต้องการพัฒนากระบวนการที่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจากแหล่งภายนอกกระบวนการจะมีผลกระทบไม่มากต่อกระบวนการ (Robust Design)



y คือ ตัวแปรตามหรือผลิตภัณฑ์

X, Z คือ ตัวแปรอิสระหรือปัจจัย

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \epsilon_{ij}$$

ซึ่ง μ คือ ค่าเฉลี่ย

τ คือ อิทธิพลที่เกิดจากปัจจัย

ϵ คือ ความคลาดเคลื่อน

รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของกระบวนการหรือระบบ

โดยทั่วไป การทดลองถูกใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหรือระบบ (Process or System) รูปที่ 2.6 แสดงรูปแบบของกระบวนการหรือระบบ ส่วนใหญ่จะสามารถมองเห็นภาพของกระบวนการเป็นการรวมกันของเครื่องจักร วิธีการ คน และทรัพยากรอื่น ๆ และเมื่อมีสิ่งป้อนเข้า (Input) สู่วกระบวนการจะถูกเปลี่ยนรูปออกมาได้เป็นผลลัพธ์ (Output) ซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวอาจมีได้ตั้งแต่หนึ่งค่าหรือมากกว่าหนึ่งค่า

จากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่ากระบวนการหรือระบบยังประกอบด้วยปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) คือ X_1, X_2, \dots, X_p และปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) คือ Z_1, Z_2, \dots, Z_q

2.3.1 ปัจจัยในกระบวนการผลิต

ปัจจัยในกระบวนการผลิตสามารถแบ่งปัจจัยออกเป็น 2 ประเภท คือ

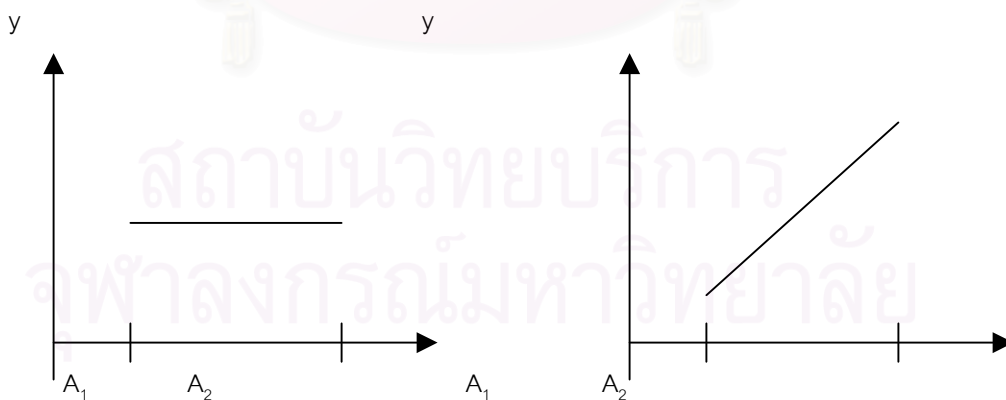
2.3.1.1 ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors)

ปัจจัยที่ควบคุมได้ (Controllable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ ซึ่งเป็นผลดีต่อการทดลองเพราะโดยส่วนใหญ่ผู้ทำการทดลองต้องการกำหนดค่าต่าง ๆ ที่คิดว่ามีผลต่อค่าตอบสนองที่สนใจ

2.3.1.2 ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors)

ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable Factors) หมายถึง ปัจจัยที่ไม่สามารถกำหนดค่าของปัจจัยนั้นได้ในกระบวนการ อันเนื่องมาจากเทคโนโลยีไม่ทันสมัยพอหรือต้นทุนในการควบคุมสูงมาก หรือมีความรู้ไม่เพียงพอ ฯลฯ ซึ่งอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างมาก ผู้ทำการทดลองควรพยายามกำจัดปัจจัยลักษณะนี้เพื่อให้เปลี่ยนเป็นปัจจัยที่ควบคุมได้ จึงจะเป็นประโยชน์ต่อการทดลอง

การออกแบบการทดลองเพื่อวิเคราะห์ให้ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อผลิตภัณฑ์หรือไม่ ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยอย่างน้อย 2 ระดับแล้วทำการทดลอง จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลอง ตัวอย่างเช่น ให้ y เป็นความยาวของเหล็กปลายสั้นที่มีรูกลวง A เป็นความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ซึ่งจะสรุปผลเมื่อได้กราฟ แสดงดังรูปที่ 2.7



ปัจจัย A ไม่มีผลต่อผลิตภัณฑ์

ปัจจัย A มีผลต่อผลิตภัณฑ์

รูปที่ 2.7 แสดงอิทธิพลที่ไม่มีผลและอิทธิพลที่มีผลของปัจจัยต่อผลิตภัณฑ์

2.3.2 วัตถุประสงค์ของการออกแบบการทดลอง

วัตถุประสงค์ในการออกแบบการทดลอง มีดังต่อไปนี้

2.3.2.1 หาตัวแปรที่มีผลต่อค่าตอบสนอง y มากที่สุด

2.3.2.2 กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y ใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ

2.3.2.3 กำหนดค่า x ที่ทำให้ค่า y มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก

2.3.2.4 กำหนดค่า x ที่ทำให้ปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ (Uncontrollable

Factors) Z_1, Z_2, \dots, Z_q มีผลน้อยมาก

2.3.3 คำจำกัดความ

คำจำกัดความ มีดังต่อไปนี้

2.3.3.1 อิทธิพลหรือผล (Effect) หมายถึง ผลของตัวแปรต้นที่มีตัวแปรตาม

2.3.3.2 ปัจจัย (Factor) หมายถึง สิ่ง que คิดว่ามีอิทธิพลต่อผลการทดลองของคุณสมบัติ

ในตัวผลิตภัณฑ์

2.3.3.3 ระดับของปัจจัย (Level of Factor) หมายถึง สภาวะต่างๆ ของปัจจัยหนึ่ง ๆ ที่

ทำการกำหนดในการทดลอง

2.3.3.4 ปัจจัยรบกวน (Noise Factor) หมายถึง ปัจจัยที่ก่อให้เกิดจากผลกระทบเล็ก

ๆ น้อย ๆ และไม่สามารถควบคุมได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.4 หลักในการออกแบบการทดลอง [2] Montgomery

การออกแบบการทดลองเป็นกระบวนการวางแผนของการทดลองซึ่งข้อมูลในการทดลองนั้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ จนได้ข้อสรุปของวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการออกแบบการทดลองเพื่อทำความเข้าใจในข้อมูล และหาผลสรุปออกมานั่นเอง หลักในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

2.3.4.1 การทำซ้ำ (Replication)

การทำซ้ำคือการทำการทดลองซ้ำในแต่ละข้อมูลเพื่อกำจัดผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ออกไป การทำซ้ำมีความสำคัญ 2 ประการ คือ เพื่อการประมาณค่าความผิดพลาดของการทดลอง และเพื่อการประมาณค่าเฉลี่ยนั้นให้มีความมั่นใจมากขึ้น

2.3.4.2 การทำแบบสุ่ม (Randomization)

การทำแบบสุ่ม คือการให้โอกาสในการเก็บข้อมูลของข้อมูลแต่ละตัวให้เท่ากันเพื่อกระจายผลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ให้กับข้อมูลทุกระดับในการทดลองให้เท่า ๆ กัน การทำแบบสุ่มสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 วิธีดังนี้

2.3.4.2.1 การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ (Complete Randomization)

2.3.4.2.2 การทำแบบสุ่มอย่างง่าย (Simple Randomization)

2.3.4.2.3 การทำแบบสุ่มสมบูรณ์ภายในบล็อก (Complete Randomization within Blocks)

2.3.4.3 การบล็อก (Blocking)

การบล็อก คือการจัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ทำให้การทดลองนั้นมีความเที่ยงตรงมากขึ้น การบล็อกส่วนใหญ่เกิดขึ้นกับวัสดุที่ใช้ในการทดลองนั้นไม่มีความสม่ำเสมอ จึงจำเป็นต้องแยกเอาผลของวัสดุที่แตกต่างกันออกไปจะสนใจผลของการทดลองที่เกิดขึ้นในแต่ละบล็อกเท่านั้น

2.3.5 ขั้นตอนการออกแบบการทดลอง [2]

การใช้หลักการทางสถิติในการออกแบบ และวิเคราะห์การทดลองเป็นสิ่งจำเป็น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจวิธีการในการเก็บข้อมูลตลอดจนการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มา

2.3.5.1 การนิยามปัญหา

การนิยามปัญหา เป็นการระบุว่าความต้องการในการผลิตคืออะไร และต้องการรู้อะไรบ้างในการผลิต ซึ่งการนิยามปัญหานี้จะเกี่ยวข้องไปถึงวัตถุประสงค์ของการทดลอง

2.3.5.2 การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย

การเลือกปัจจัยที่มีผลและระดับของปัจจัย เป็นการที่ใช้หลักการทางทฤษฎีและประสบการณ์ที่เคยปฏิบัติมาในการผลิต เพื่อระบุว่าปัจจัยใดบ้างที่น่าจะมีผลต่อการทดลอง และในแต่ละปัจจัยนั้นควรมีช่วงในการทดลองอย่างไร เพื่อระบุระดับของปัจจัยในการทดลองสุดท้ายคือระบุระดับที่ใช้เป็นแบบกำหนด (Fixed Levels) , แบบสุ่ม (Random Levels) หรือแบบผสม (Mixed Levels)

2.3.5.2.1 แบบกำหนด (Fixed Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าได้แน่นอน

2.3.5.2.2 แบบสุ่ม (Random Levels) หมายถึง ระดับของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมหรือกำหนดค่าของปัจจัยได้แน่นอน

2.3.5.2.3 แบบผสม (Mixed Levels) หมายถึง การผสมผสานระดับของปัจจัยที่เป็นทั้งแบบกำหนดได้และแบบสุ่ม

2.3.5.3 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)

ในการเลือกตัวแปรตอบสนองผู้ทำการทดลองต้องมั่นใจว่าเลือกตัวแปรที่สามารถให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการที่ทำการศึกษา ค่าเฉลี่ยหรือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าวัดจะใช้เป็นตัวแปรตอบสนอง โดยทั่วไปจะเก็บข้อมูลของตัวแปรตอบสนองเพียงค่าเดียว แต่ก็มีบางการทดลองที่ทำการวัดค่าตัวแปรตอบสนองหลายค่า การวัดค่าจะต้องมีความแม่นยำรวมทั้งความถูกต้องของเครื่องมือวัดด้วย

2.3.5.4 การเลือกแบบการทดลอง

การเลือกแบบการทดลองจะต้องพิจารณาถึงขนาดของข้อมูลหรือจำนวนที่ใช้ในการทำซ้ำ (Replicate) ความเหมาะสมของลำดับในการทดลอง ข้อจำกัดในการสุ่ม (Randomization) และการบล็อก (Blocking) ที่จำเป็น ทั้งนี้ต้องนำมาเกี่ยวโยงกันในด้านความเสี่ยงและต้นทุนที่ใช้ในการทดลอง

2.3.5.5 การดำเนินการทดลอง

เมื่อทำการทดลอง ต้องทำการตรวจสอบการทดลองอย่างระมัดระวังว่ามีการดำเนินการตามที่วางไว้ ข้อควรระวังในการทำการทดลองคือความถูกต้องของกระบวนการเครื่องมือวัด และความสม่ำเสมอในการทดลองเพื่อให้เกิดความผิดพลาด (Error) น้อยที่สุด เพราะความผิดพลาดในขั้นตอนนั้นมักจะทำให้การทดลองล้มเหลวได้

2.3.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

หลักการทางสถิติถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล และสรุปผลจากการทดลอง การวิเคราะห์ข้อมูลอาจใช้ซอฟต์แวร์ (Software) เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ด้วย ซึ่งปัจจุบันมีซอฟต์แวร์อยู่หลายประเภทที่สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ได้ วิธีการถูกนำมาใช้อย่างได้ผลคือกราฟอย่างง่ายโดยช่วยในการวิเคราะห์และตีความข้อมูลจากการทดลอง การตรวจสอบความเพียงพอของโมเดล (Model Adequacy Checking) เป็นสิ่งที่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์เพื่อเชื่อมั่นของข้อมูลที่เก็บมาจากการทดลอง จึงจำไว้ว่าวิธีการทางสถิติไม่สามารถพิสูจน์ได้ว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลได้แน่นอน เพียงแต่เป็นเครื่องมือที่ให้แนวทางในการวิเคราะห์ภายใต้ความเชื่อมั่นโดยระบุเป็นเปอร์เซ็นต์ในการสรุปผลการทดลอง แต่อย่างไรก็ดีการใช้หลักการทางสถิติช่วยให้การตัดสินใจเป็นนามธรรมมากขึ้น

2.3.5.7 สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เมื่อข้อมูลถูกวิเคราะห์ จะต้องสรุปผลของการวิเคราะห์ซึ่งอาจแสดงในรูปแบบกราฟ ตาราง แผนภูมิ ฯลฯ ตลอดจนให้ข้อเสนอแนะจากการทดลอง เมื่อสรุปผลแล้ว ควรมีการทดสอบเพื่อยืนยันผลจากการทดลองอีกครั้งหนึ่ง

2.3.6 การใช้หลักการทางสถิติในการทดลอง [2]

การใช้หลักการทางสถิติในการทดลองนั้น ผู้ทำการทดลองต้องมีความเข้าใจในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

2.3.6.1 ผู้ทำการทดลอง ต้องมีความรู้เกี่ยวกับงานในสาขาที่จะทำการทดลอง โดยใช้ความรู้ที่ไม่ใช่วิธีการทางสถิติในการพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้น

2.3.6.2 ผู้ทำการทดลอง ควรเลือกการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ที่ง่ายและไม่ซับซ้อน

2.3.6.3 ผู้ทำการทดลอง ควรเข้าใจถึงความแตกต่างระหว่างนัยสำคัญในทางปฏิบัติและนัยสำคัญทางสถิติ เพราะว่าความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในการทดลอง ซึ่งเรียกว่าความแตกต่างทางด้านสถิตินั้นไม่สามารถประกันได้ว่า จะมีความแตกต่างมากเพียงพอที่จะใช้ในทางปฏิบัติ และจะต้องคำนึงถึงต้นทุนว่าคุ้มค่าในการลงทุนหรือไม่

2.3.6.4 ผู้ทำการทดลอง ควรทำการทดลองซ้ำๆ หลายครั้งเพื่อให้มั่นใจได้ว่าผลที่ได้ถูกต้อง

2.3.7 การตั้งสมมติฐานในการตรวจสอบ (Hypothesis Testing)

2.3.7.1 ความหมายของสมมติฐานทางสถิติ [3] กัลยา วานิชย์บัญชา

สมมติฐาน คือ ความเชื่อของบุคคลใดบุคคลหนึ่งหรือของกลุ่มบุคคลใดๆ หรืออาจกล่าวได้ว่าสมมติฐานเป็นสิ่งที่บุคคลหรือองค์กรคาดว่าจะเกิดขึ้น ความเชื่อหรือสิ่งที่คาดนั้นอาจเป็นจริงหรือไม่ก็ได้

2.3.7.2 ชนิดของสมมติฐาน [4] ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, จันทนา จันทโร

สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

2.3.7.2.1 สมมติฐานหลัก (Null Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_0

2.3.7.2.2 สมมติฐานอื่นๆ (Alternative Hypothesis) ใช้สัญลักษณ์ H_1

สมมติฐานหลักที่ตั้งขึ้น เพื่อทดสอบว่าจะยอมรับหรือไม่ว่าเป็นจริง การปฏิเสธไม่ยอมรับสมมติฐานหลักก็คือการยอมรับสมมติฐานอื่นๆ ว่าเป็นจริง

2.3.7.3 ประเภทของสมมติฐาน [4]

สมมติฐานแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

2.3.7.2.1 สมมติฐานเดี่ยว (Simple Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่กำหนดค่าเฉพาะของพารามิเตอร์เจาะจงลงไปว่ามีค่าเท่ากับเท่าใด

2.3.7.2.2 สมมติฐานรวม (Composite Hypothesis) คือ สมมติฐานประเภทที่มีค่าพารามิเตอร์หลายๆค่า

สมมติฐานหลักและสมมติฐานอื่นๆ อาจเป็นสมมติฐานประเภทสมมติฐานเดี่ยวหรือสมมติฐานรวมก็ได้ แสดงตามตัวอย่างดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1

$$H_0 : \mu = 72$$

$$H_1 : \mu = 75$$

ในตัวอย่างนี้ สมมติฐานหลักคือค่าเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 72 ซึ่งเป็นค่าเฉพาะเจาะจง เพราะฉะนั้นสมมติฐานหลักจึงเป็นสมมติฐานเดี่ยว การทดสอบกระทำเพื่อพิสูจน์ว่า \square มีค่าเท่ากับ 72 หรือไม่ ส่วนสมมติฐานอื่นๆ เป็นเช่นเดียวกับสมมติฐานหลัก คือเป็นประเภทสมมติฐานเดี่ยว

ตัวอย่างที่ 2

$$H_0 : \mu \geq 72$$

$$H_1 : \mu < 72$$

ในตัวอย่างนี้ ทั้งสมมติฐานหลักและสมมติฐานอื่นๆ เป็นประเภทสมมติฐานรวม กล่าวคือค่าเฉลี่ยที่จะทดสอบในสมมติฐานหลักนั้นมีค่าใดๆ ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 72 ส่วนค่าเฉลี่ยในสมมติฐานอื่นๆ มีค่าใดๆ ก็ได้ที่น้อยกว่า 72

ตัวอย่างที่ 3

$$H_0 : \mu = 72$$

$$H_1 : \mu \neq 72$$

ในตัวอย่างนี้ สมมติฐานหลักเป็นประเภทสมมติฐานเดียว ส่วนสมมติฐานอื่นๆ เป็นประเภทสมมติฐานรวม

2.3.7.4 ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน [4]

ความผิดพลาดในการทดสอบสมมติฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังต่อไปนี้

2.3.7.4.1 ความผิดพลาดประเภทที่ 1 (Type I Error) หรือเรียกโดยทั่วไปว่า ระดับนัยสำคัญ (Level of Significance) ใช้สัญลักษณ์ α เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการปฏิเสธสมมติฐานหลักและยอมรับสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานหลักเป็นจริง

2.3.7.4.2 ความผิดพลาดประเภทที่ 2 (Type II Error) ใช้สัญลักษณ์ β เป็นความผิดพลาดที่เกิดจากการยอมรับสมมติฐานหลักและปฏิเสธสมมติฐานอื่นๆ โดยที่สมมติฐานอื่นๆ เป็นจริง

ในการทดสอบแต่ละครั้ง ผู้ทดสอบย่อมต้องการให้มีความผิดพลาดทั้งสองประเภท (α และ β) น้อยที่สุด แต่เมื่อค่าของ α ลดลง ค่าของ β จะเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียวกัน เมื่อค่าของ α เพิ่มขึ้น ค่าของ β จะลดลง ดังนั้นเมื่อต้องการลดค่าความผิดพลาดทั้งสองประเภทให้ลดลงได้พร้อมๆ กัน ทำได้ด้วยการเพิ่มจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้มากขึ้น

2.3.7.5 การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง [5] ปารเมศ ชูติมา

การตั้งสมมติฐานในการออกแบบการทดลอง สามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณี ดังต่อไปนี้

2.3.7.5.1 การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่าปัจจัยต่างๆ มีผลกระทบต่อกระบวนการหรือไม่ สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อกระบวนการ

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อกระบวนการ

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ μ เมื่อ μ คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

H_0 : $\mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_\alpha$

H_1 : $\mu_i \neq \mu_j$; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งคู่ (i,j)

หรือสามารถเขียนอยู่ในรูปสัญลักษณ์ τ เมื่อ τ คือค่าเฉลี่ยของปัจจัย

H_0 : $\tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_\alpha = 0$

H_1 : $\tau_i \neq 0$; อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า i

2.3.7.5.2 การออกแบบการทดลองแบบผลกระทบบแบบสุ่ม (Random Effects Model) จะทำการตรวจสอบว่า ความแปรปรวน (σ^2_τ) จะมีค่าเท่ากับ 0 หรือไม่ เพราะไม่สามารถหาค่าของอิทธิพล (Effect) ของระดับของปัจจัยที่เกิดขึ้นแน่นอน สามารถตั้งสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

H_0 : $\sigma^2_\tau = 0$

H_1 : $\sigma^2_\tau > 0$

2.3.7.5.3 การออกแบบการทดลองแบบผสม (Mixed Effects Model) เมื่อปัจจัยในการทดลองมีลักษณะเป็นแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Levels) และแบบสุ่ม (Random Levels) รวมกันอยู่ จะต้องใช้การตั้งสมมติฐานของ 2 กรณีที่กล่าวข้างต้น โดยแยกตามลักษณะรูปแบบของปัจจัยนั้นๆ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.8 ชนิดของแผนการออกแบบการทดลอง

แผนการออกแบบการทดลองสามารถแบ่งออกได้ ดังต่อไปนี้

2.3.8.1 แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว (Single Factor Design) [3]

แผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียวจะต้องเก็บข้อมูลโดยระดับของปัจจัยหรือทรีทเมนต์ (Treatment) เพื่อทดสอบว่าระดับของปัจจัยต่างๆ มีผลต่อค่าตอบสนองหรือไม่ โดยแผนการออกแบบการทดลองแบบปัจจัยเดียว สามารถแบ่งออกเป็น 2 แบบใหญ่ๆ คือ

2.3.8.1.1 การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD)

เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียว แต่จะทำการเปรียบเทียบระหว่างระดับของปัจจัย มีปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ มีผลกระทบน้อย และไม่มีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) โดยการทดลองจะใช้หลักการสุ่ม (Randomization) และการทำซ้ำ (Replication)

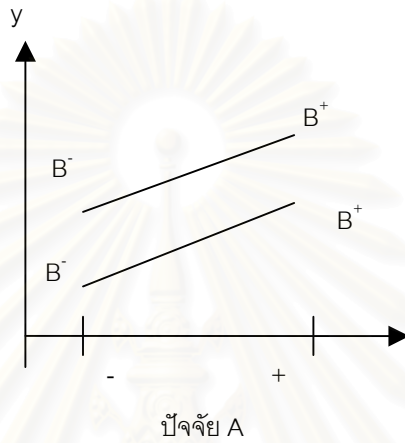
2.3.8.1.2 การทดลองแบบสุ่มโดยสมบูรณ์ภายในบล็อก (Completely Randomized Block Design)

เป็นการทดลองที่มีปัจจัยเดียวและมีปัจจัยรบกวน (Nuisance Factor) ที่มีผลกระทบต่อค่าตอบสนอง และต้องทำการกำจัดปัจจัยรบกวนดังกล่าวทิ้ง บางครั้งปัจจัยรบกวนนั้นไม่ทราบและไม่สามารถควบคุมได้ จึงใช้วิธีการบล็อก (Blocking) ในการกำจัดผลของปัจจัยรบกวนออกได้

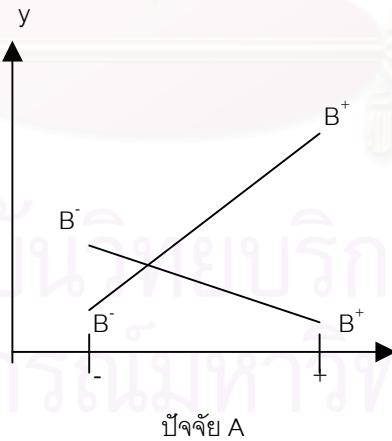
2.3.8.2 แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Design) [5]

แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเป็นการทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้นๆ จึงเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยใช้ในการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ตัวอย่างเช่น กรณี 3 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 3 ระดับ ปัจจัย B ประกอบด้วย 3 ระดับ และปัจจัย C ประกอบด้วย 3 ระดับ ในการทดลองทำซ้ำ (Replicate) 2 ครั้ง จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด $3 \times 3 \times 3 \times 2 = 54$ การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟคทอเรียล จึงกล่าวได้ว่าปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

ผลที่เกิดจากปัจจัยหนึ่ง หมายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับผลตอบสนอง (Response) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงระดับของปัจจัยนั้นๆ ซึ่งเรียกว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) และหากผลตอบสนองของปัจจัยหนึ่งขึ้นกับระดับของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าการมีอันตรกิริยา (Interaction) ต่อกันระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้อง แนวคิดดังกล่าว สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.8 และ 2.9



รูปที่ 2.8 แสดงการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่ไม่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย



รูปที่ 2.9 แสดงการออกแบบเชิงแฟคทอเรียลที่มีอันตรกิริยาระหว่างปัจจัย

จากรูปที่ 2.8 จะเห็นได้ว่า เส้นของ B^- และ B^+ จะประมาณได้ว่าขนานกัน ซึ่งลักษณะของกราฟเช่นนี้จะบ่งบอกถึงการไม่มีอันตรกิริยาซึ่งกันและกันของปัจจัยทั้งสอง ในทำนองเดียวกัน จากรูปที่ 2.9 จะเห็นได้ว่า เส้นของ B^- และ B^+ ไม่ขนานกัน และสามารถกล่าวได้ว่าปัจจัยทั้งสองมีอันตรกิริยาต่อกัน บ่อยครั้งที่กราฟลักษณะเช่นนี้จะถูกนำมาใช้เพื่อแสดงถึงการมีนัยสำคัญ (Significant) ของอันตรกิริยา อย่างไรก็ตามกราฟเช่นนี้ไม่ควรนำมาใช้แทนเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลในทางสถิติ เพราะว่าการตีความจากกราฟค่อนข้างที่จะขึ้นกับความคิดเห็นส่วนบุคคล ซึ่งอาจทำให้เกิดการเข้าใจผิดหรือวิเคราะห์ผิดพลาดได้

รูปแบบของแผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลยังแบ่งย่อยในกรณีที่แผนการทดลองมีลักษณะเฉพาะตัวอีกดังต่อไปนี้

2.3.8.2.1 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k (2^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 2^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 2 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ $(-)$ และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ $(+)$ การทดลองแบบนี้เหมาะสำหรับการทดลองที่มีปัจจัยมากๆ เป็นการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่มีอิทธิพลเบื้องต้นจะช่วยให้การทดลองที่เจาะลึกต่อไป

2.3.8.2.2 การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k (3^k Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล 3^k เป็นการทดลองที่มี k ปัจจัย แต่ละปัจจัยจะมีระดับของปัจจัยอยู่ 3 ระดับ คือ ระดับต่ำ ใช้สัญลักษณ์ -1 หรือ $(-)$ ระดับกลาง ใช้สัญลักษณ์ 0 หรือ (0) และระดับสูง ใช้สัญลักษณ์ 1 หรือ $(+)$ การทดลองแบบนี้เหมาะสมเมื่อผู้ทดลองกำลังสนใจกับผลตอบสนองที่มีลักษณะเป็น ส่วนโค้ง

2.3.8.2.3 การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล (Fractional Factorial Design)

การออกแบบการทดลองเศษส่วนเชิงแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่ใช้ในกรณีเมื่อการทดลองมีหลายปัจจัย ทำให้ต้องเสียเวลาในการเก็บข้อมูลมาก ดังนั้นจะทำให้ความสัมพันธ์ของทรีทเม้นต์ (Treatment Combination) บางตัวถูกตัดออกไปโดยอาศัยหลักการของการคอนฟาวด์ (Confound) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองนั้นลดลง

2.3.8.3 แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ

แผนการออกแบบการทดลองอื่นๆ มีดังต่อไปนี้

2.3.8.3.1 แผนการออกแบบการทดลองลาตินสแควร์ (Latin Square Design)

2.3.8.3.2 แผนการออกแบบการทดลองเนสเต็ด (Nested Design)

2.3.8.3.3 แผนการออกแบบการทดลองสปีทพล็อต (Split-Plot Design)

2.3.8.3.4 แผนการออกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบ (Response Surface Design)

2.3.9 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA)[4]

การวิเคราะห์ความแปรปรวนคือเทคนิคที่ใช้ในการจัดสรรความแปรปรวนหรือความแปรผัน (Variance) ที่เกิดขึ้นในข้อมูลออกเป็นส่วนย่อยๆ ตามแหล่งที่คาดว่าทำให้เกิดความแปรผัน ความแปรผันที่เกิดขึ้นในข้อมูล เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

สมการดังกล่าวได้จากข้อคิดที่ว่า ความแตกต่างกันของข้อมูลนั้นไม่น่าจะมาจากสาเหตุของความแปรผันโดยธรรมชาติ หรือที่เรียกว่าความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) ของข้อมูลแต่เพียงอย่างเดียว แต่น่าจะมาจากปัจจัย (Factor) หนึ่งปัจจัยใดหรือหลายปัจจัยทำให้เกิดความแปรผัน ดังนั้นความแปรผันทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับข้อมูลจึงเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยและธรรมชาติของข้อมูล

ปัจจัยที่คาดว่าจะมีอิทธิพลต่อความแปรผันของข้อมูลถือได้ว่าเป็นตัวแปรอิสระซึ่งมีผลต่อตัวแปรตาม โดยเป็นข้อมูลที่วัดผลหรือเก็บรวบรวมมา ตัวแปรอิสระดังกล่าวมักจะได้มีแค่ค่าเดียวแต่จะมีหลายๆค่าซึ่งเรียกว่าระดับ (Level) ของปัจจัย ถ้าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อตัวแปรตามจริงๆ แต่ระดับก็จะมีผลต่อตัวแปรตามไม่เหมือนกัน การวิเคราะห์จึงทำโดยการทำการทดลอง (Treatment) กำหนดค่าตัวแปรอิสระที่ระดับต่างๆ เพื่อหาตัวแปรตามที่เกิดขึ้นจากการทดลองนั้นๆ แล้วนำไปวิเคราะห์ดูว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นจากความแตกต่างของการทดลองนั้นมีความสำคัญหรือไม่เมื่อเทียบกับความแปรผันโดยธรรมชาติของตัวแปรตาม และเพื่อที่จะช่วยให้ผู้วิเคราะห์มีความเชื่อมั่นในผลการวิเคราะห์ที่ได้จากการทดลอง จึงมักจะต้องการทำการทวนซ้ำ (Replicated) ให้ได้จำนวนข้อมูลที่แต่ละการทดลองมากพอ การเลือกระดับของปัจจัย

ถ้าเป็นการเจาะจง รูปแบบของการทดลองจะถูกเรียกว่าแบบผลกระทบบคงที่ (Fixed Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปได้เฉพาะอิทธิพลของปัจจัยที่ระดับที่นำมาทดสอบ แต่ถ้าเลือกระดับของปัจจัยเป็นการเลือกแบบสุ่ม รูปแบบของการทดสอบจะเป็นแบบสุ่ม (Random Effect Model) ผลที่ได้จากการทดสอบจะสรุปอิทธิพลโดยรวม (in General) ของปัจจัย

จาก ความแปรผันทั้งหมด = ความแปรผันเนื่องจากปัจจัย + ความแปรผันโดยธรรมชาติของข้อมูล

หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$SS_T = SS_{Tr} + SS_E$$

โดยที่ SS_T คือ ผลบวกกำลังสองทั้งหมด

SS_{Tr} คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากอิทธิพลของปัจจัย

SS_E คือ ผลบวกกำลังสองเนื่องจากความผิดพลาดแบบสุ่ม

การวัดความแปรผันจากข้อมูลในการทดลองนั้น จะใช้ตัวประมาณค่าของความแปรผัน (Variance) ที่ดีที่สุดคือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (Mean Square : MS) โดยที่ค่า MS สามารถคำนวณได้จาก

$$MS = SS/DF$$

เมื่อ SS คือ ผลบวกกำลังสอง (Sum of Square)

และ DF คือ ชั้นของความอิสระ

สถิติทดสอบ (Test Statistic) ที่นำมาเปรียบเทียบค่าความแปรผันคือ

$$F = MS_{Tr}/MS_E$$

เมื่อ MS_{Tr} คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของปัจจัย

MS_E คือ ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสองของความผิดพลาดแบบสุ่ม

เปรียบเทียบค่าสถิติสำหรับทดสอบ F กับค่า F_{α, V_1, V_2}

ถ้า $F \geq F_{\alpha, V_1, V_2}$ ปฏิเสธ H_0

ถ้า $F < F_{\alpha, V_1, V_2}$ ยอมรับ H_0

เมื่อ α คือระดับนัยสำคัญ (Level of Significance)

V_1 คือ ชั้นของความอิสระของปัจจัย

V_2 คือ ชั้นของความอิสระของความผิดพลาดแบบสุ่ม

2.3.9.1 รูปแบบเชิงเส้นทางสถิติ (Linear Statistical Model) [2]

ในการวิเคราะห์ความแปรปรวนนั้นจำเป็นต้องมีการสร้างรูปแบบเชิงเส้นขึ้นด้วย ซึ่งลักษณะรูปแบบเชิงเส้นจะขึ้นอยู่กับรูปแบบของแผนการออกแบบการทดลอง จะแสดงดังตัวอย่างต่อไปนี้

การวิเคราะห์ความแปรปรวนกรณีที่มี 3 ปัจจัย รูปแบบเชิงเส้นคือ

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \gamma_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\tau\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, a$ (ระดับของปัจจัย A)

$j = 1, 2, 3, \dots, b$ (ระดับของปัจจัย B)

$k = 1, 2, 3, \dots, c$ (ระดับของปัจจัย C)

$l = 1, 2, 3, \dots, n$ (จำนวนซ้ำ)

และ y_{ijkl} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย A

β_j คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย B

γ_k คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย C

$(\tau\beta)_{ij}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ B

$(\tau\gamma)_{ik}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A และ C

$(\beta\gamma)_{jk}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย B และ C

$(\tau\beta\gamma)_{ijk}$ คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของอันตรกิริยาของปัจจัย A, B และ C

ε_{ijkl} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยข้อมูลจะถูกนำมาคำนวณและใส่ไว้ในตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัย

แสดงดังตารางที่ 2.1

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀
A	SS _A	a-1	SS _A /DF	MS _A /MS _E
B	SS _B	b-1	SS _B /DF	MS _B /MS _E
C	SS _C	c-1	SS _C /DF	MS _C /MS _E
AB	SS _{AB}	(a-1)(b-1)	SS _{AB} /DF	MS _{AB} /MS _E
AC	SS _{AC}	(a-1)(c-1)	SS _{AC} /DF	MS _{AC} /MS _E
BC	SS _{BC}	(b-1)(c-1)	SS _{BC} /DF	MS _{BC} /MS _E
ABC	SS _{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	SS _{ABC} /DF	MS _{ABC} /MS _E
Error	SS _E	abc(n-1)	SS _E /DF	
Total	SS _T	abcn-1		

ตารางที่ 2.1 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวน

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{\cdot j \cdot}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{\dots k}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b y_{ij \cdot}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i \cdot k}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C$$

b c

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^a \sum_{k=1}^c y_{jk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijk}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

การทดสอบสมมติฐานของการทดลอง จะใช้ค่าสถิติทดสอบที่มีการกระจายแบบเอฟ (F-Distribution) โดยกำหนดค่า α ก่อน หากค่า $F < F_{\alpha, V_1, V_2}$ ยอมรับ H_0 นั่นคือปัจจัยนั้นไม่มีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)\%$ แต่ถ้าหาก $F \geq F_{\alpha, V_1, V_2}$ ปฏิเสธ H_0 นั่นคือปัจจัยนั้นมีผลต่อค่าตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น $(1-\alpha)\%$

2.3.9.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) [5]

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยอาศัยข้อสมมติฐานที่สำคัญซึ่งอธิบายได้โดยใช้แบบจำลองดังต่อไปนี้

$$\text{สมการเชิงเส้นตรง} : y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

โดยที่ y_{ij} คือ ค่าตัวแปรตอบสนองหรือตัวแปรตาม

μ คือ ค่าเฉลี่ยซึ่งเป็นค่าคงที่

τ_i คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของปัจจัย

ε_{ij} คือ ค่าที่เกิดจากอิทธิพลของความผิดพลาดแบบสุ่ม หรือความผิดพลาดแบบสุ่ม

โดยความผิดพลาดแบบสุ่ม (Random Error) จะต้องมีการแจกแจงแบบปกติและเป็นอิสระต่อกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0 และ σ^2 มีค่าคงตัวแต่ไม่ทราบค่า ซึ่งเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้ $\square_{ij} \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$ ถ้าสมมติฐานเหล่านี้เป็นจริง กระบวนการวิเคราะห์ความแปรปรวนนี้ก็จะเป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับการไม่มี

ความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของระดับที่ถูกต้อง

ในทางปฏิบัติ สมมติฐานมักจะไม่เป็นเช่นนี้ ซึ่งจะเชื่อถือผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ก็ต่อเมื่อสามารถตรวจสอบความถูกต้องของสมมติฐานว่าเป็นจริงเสียก่อน โดยสามารถตรวจสอบสมมติฐานขั้นต้นและความถูกต้องของแบบจำลองได้โดยการตรวจสอบส่วนตกค้าง (Residual) สำหรับค่าสังเกต j ของระดับที่ i ส่วนตกค้างจะมีค่าเป็น

$$e_{ij} = y_{ij} - \hat{y}_{ij}$$

โดยที่ \hat{y}_{ij} คือค่าประมาณของค่าสังเกต y_{ij} ซึ่งหาได้จาก

$$\begin{aligned}\hat{y}_{ij} &= \hat{\mu} + \hat{\tau}_i \\ &= \bar{y}_{..} + (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..}) \\ &= \bar{y}_{i.}\end{aligned}$$

จากสมการ ค่าประมาณของค่าสังเกตใดๆ ในระดับที่ i ก็คือค่าเฉลี่ยของระดับนั้นๆ ดังนั้นการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

2.3.9.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยนำค่าส่วนตกค้าง (Residual) ไปทดสอบ ใช้วิธีการดังต่อไปนี้

2.3.9.2.1.1 การทดสอบแบบไครส์แคร์ (χ^2 -Goodness of Fit Test)

2.3.9.2.1.2 การทดสอบแบบโคลโกโมรอฟ-สเมอร်นอฟ (Kolgomorov-Smirnov Test)

2.3.9.2.1.3 การทดสอบโดยใช้กระดาษตรวจสอบการแจกแจงแบบปกติ (NOPP)

2.3.9.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แล้วดูลักษณะของข้อมูลว่ามีการกระจายเป็นอิสระหรือมีลักษณะเป็นรูปแบบใดๆ

2.3.9.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยใช้แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) ระหว่างค่าส่วนตกค้าง

$$R_p = r_{\square(p,r)} S_{y_i} \text{ สำหรับ } p = 2,3,4,\dots,a$$

หลังจากนั้นจะทดสอบความแตกต่างระหว่างมัธยฐานของค่าสังเกต เริ่มจากค่ามากที่สุดกับค่าเล็กสุด ซึ่งควรจะเปรียบเทียบด้วยพิสัยสำคัญต่ำสุด R_a ถัดมาให้หาความแตกต่างระหว่างค่ามากที่สุดกับค่าน้อยสุดอันดับสองซึ่งคำนวณและเปรียบเทียบโดยพิสัยสำคัญต่ำสุด R_{a-1} การเปรียบเทียบเหล่านี้ทำอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งมัธยฐานทุกตัวถูกเปรียบเทียบกับมัธยฐานที่มีขนาดใหญ่สุด ในที่สุดให้คำนวณค่าความแตกต่างระหว่างมัธยฐานที่ใหญ่ที่สุดเป็นอันดับสองและค่าที่เล็กที่สุด แล้วเปรียบเทียบกับพิสัยนัยสำคัญต่ำสุด R_{a-1} กระบวนการนี้จะดำเนินไปจนกระทั่งความแตกต่างของ $a(a-1)/2$ คู่ทั้งหมดที่เป็นไปได้ของมัธยฐานได้ถูกพิจารณา ถ้าความแตกต่างของค่าสังเกตมีค่ามากกว่าพิสัยนัยสำคัญน้อยสุดที่ตรงกัน จะสรุปว่าคู่ของมัธยฐานที่พิจารณาอยู่นั้น มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เพื่อป้องกันความขัดแย้งที่อาจเกิดขึ้น ข้อกำหนดให้ว่าจะไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างคู่ของมัธยฐาน ถ้าหากมัธยฐานทั้งคู่ที่เกี่ยวข้องตกอยู่ระหว่างมัธยฐานอื่น ๆ 2 ค่าซึ่งไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

2.3.11 การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร (Test of Two Parameters) [4]

การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร เป็นการทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับพารามิเตอร์ของสองประชากร โดยการหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าพารามิเตอร์กับค่าความน่าจะเป็นของการยอมรับสมมติฐานหลัก สมมติฐานสำหรับการทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร มีดังต่อไปนี้

กรณีการทดสอบสองด้าน

$$H_0 : \mu_\xi = \mu_\psi$$

$$H_1 : \mu_\xi \neq \mu_\psi$$

กรณีการทดสอบด้านเดียว

$$\text{ก. } H_0 : \mu_\xi = \mu_\psi \quad \text{หรือ} \quad \mu_\xi \leq \mu_\psi$$

$$H_1 : \mu_\xi > \mu_\psi$$

$$\begin{aligned} \text{ข. } H_0 : \mu_x &= \mu_y & \text{หรือ} & & \mu_x &\geq \mu_y \\ H_1 : \mu_x &< \mu_y \end{aligned}$$

การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร สามารถแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.3.11.1 การทดสอบสมมติฐานว่า ค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการแจกแจงของความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีค่าเท่ากัน โดยที่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากร (Test of the hypothesis that the means of two normal distributions are equal when both standard deviations are known.)

ในการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของสองประชากรมีค่าเท่ากันหรือไม่ โดยทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากร สถิติสำหรับการทดสอบก็คือ U ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

$$U = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{(\sigma_x^2/n_x + \sigma_y^2/n_y)^{1/2}}$$

โดยที่ \bar{X} คือค่าเฉลี่ยของค่าของตัวแปรแบบสุ่มที่มาจากประชากรแรก ซึ่งมี σ_x^2 เป็นค่าความแปรปรวน โดยมีจำนวนประชากร n_x

\bar{Y} คือ ค่าเฉลี่ยของค่าของตัวแปรแบบสุ่ม ที่มาจากประชากรที่สอง ซึ่งมี σ_y^2 เป็นค่าความแปรปรวน โดยมีจำนวนประชากร n_y

2.3.11.2 การทดสอบสมมติฐานว่า ค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการแจกแจงของความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีค่าเท่ากัน โดยที่ไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน (Test of the hypothesis that the means of two normal distributions are equal, assuming that the standard deviations are unknown but equal.)

ในการทดสอบว่าค่าเฉลี่ยของสองประชากรมีค่าเท่ากันหรือไม่ โดยไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน สถิติสำหรับการทดสอบก็คือ t ซึ่งคำนวณได้จากสูตร

เมื่อทราบแบบจำลองการถดถอยแล้ว จะต้องตรวจสอบขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square)

ค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) แสดงโดยใช้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ต่อความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตาม ดังนั้น R-Square จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 0 เช่น R-Square = 0.1 แสดงว่า 10% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 90% ที่เหลือควรจะเป็นองมาจากปัจจัยอื่นๆ

ถ้า R-Square มีค่าเข้าใกล้ 1 เช่น R-Square = 0.9 แสดงว่า 90% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 10% ที่เหลือควรจะเป็นองมาจากปัจจัยอื่นๆ

ถ้า R-Square มีค่าเท่ากับ 0 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

ถ้า R-Square มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่า ความแปรปรวนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ

2.3.13 การประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง [2]

การออกแบบการทดลอง เป็นเครื่องมือสำคัญในระบบงานของด้านวิศวกรรม สำหรับการเพิ่มสมรรถนะของกรรมวิธีการผลิตของกระบวนการ ซึ่งมักจะทำให้เกิดการพัฒนานวัตกรรมใหม่ การประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบการทดลองในการพัฒนากระบวนการ สามารถพิจารณาในรูปแบบต่อไปนี้

2.3.6.1 การเพิ่มผลผลิตของกระบวนการ

2.3.6.2 การลดความผันแปรของกระบวนการ และกระบวนการมีค่าใกล้เคียงกับเป้าหมายที่ต้องการ

2.3.6.3 การลดเวลาที่ต้องใช้ในการพัฒนา

2.3.6.4 การลดต้นทุนโดยรวมของกระบวนการ

วิธีการออกแบบการทดลอง มีบทบาทอย่างมากในการออกแบบทางวิศวกรรม ทำให้มีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ออกมา การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการออกแบบทางวิศวกรรม จะรวมถึงดังต่อไปนี้

- การประเมินและเปรียบเทียบของพื้นฐานการออกแบบ
- การประเมินทางเลือกของวัสดุ

-เลือกพารามิเตอร์ของการออกแบบที่เมื่อพารามิเตอร์นั้นมีการเปลี่ยนแปลงจะไม่มีผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์

- หาพารามิเตอร์ในการออกแบบที่มีผลต่อสมรรถภาพของผลิตภัณฑ์

การใช้การออกแบบการทดลองในลักษณะนี้ สามารถส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์คือ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีกรรมวิธีการผลิตที่ง่ายกว่า มีความน่าเชื่อถือ มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่า และระยะเวลาในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ใหม่สั้นกว่า

2.4 การสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.4.1 กฎหมาย วิศวกรรม (ปี พ.ศ.2542) [6]

การวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้หลักการการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัย 5 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบในการตัดความลึกของใบมีดในการตัด อัตราการป้อนตัด จำนวนครั้งในการเดินลับมีด และทิศทางในการตัดที่มีผลต่อการเกิดรอยบิ่นและรอยร้าว ในกระบวนการตัดขั้นตอนสุดท้ายของการตัดหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ และหาเงื่อนไขและวิธีปรุงที่เหมาะสม โดยใช้แผนการทดลองแฟรคชันนอลแบบครึ่งหนึ่งของวิธีแฟคทอเรียลโดยทุกปัจจัยมีระดับของปัจจัย 2 ระดับ

จากการทดลองพบว่าสภาวะการตัดที่เหมาะสมในการตัดคือ ความเร็วรอบในการตัด 8,500 รอบต่อนาที และทิศทางการตัดจากด้านโพลสู่อด้านเทเปอร์ แต่สัดส่วนของเสียไม่ได้ลดลงตามต้องการ จึงได้เลือกปัจจัยความถี่ในการลับใบมีดระหว่างการใช้งาน ซึ่งกำหนดให้มีระดับของปัจจัย 3 ระดับแล้วใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนของปัจจัยเดียว หลังจากทำการทดลองพบว่าใช้ความถี่ในการลับมีดทุกๆ การตัด 1 ครั้ง จะทำให้จำนวนรอยบิ่นและรอยร้าวต่ำสุด

2.4.2 คำรณ พิทักษ์ (ปี พ.ศ.2527) [7]

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะและวิธีการที่เหมาะสมในการนำไปใช้กะเทาะเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยเครื่องเหยียง การวิจัยได้ทดลองหาอิทธิพลของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกะเทาะเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ เช่น ขนาดของเมล็ด ความชื้นของเมล็ดก่อนจะมีการกะเทาะ ความเร็วของเมล็ด และอุณหภูมิในการทอด เป็นต้น

จากการวิเคราะห์ผลการวิจัยโดยวิธีการทางสถิติและกราฟ ก็จะทำให้ได้สภาวะที่เหมาะสมในการกะเทาะเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ และได้สภาวะที่เหมาะสมไปใช้ในการกะเทาะด้วยเครื่องเหวี่ยงจริงๆ จะได้เปอร์เซ็นต์ในการประกบคู่ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

2.4.3 ทรงพล พิเชษฐวัฒนา (ปี พ.ศ.2541) [8]

การวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้หลักการการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัย 4 ปัจจัย คือ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบ เวลาในการอบและชนิดน้ำหนักรัดที่มีผลต่อแรงดึงระหว่าง Slider และ Hexure ของหัวอ่านเขียนข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งพบว่าเมื่อปัจจัยเพียง 3 ชนิด ที่มีผลต่อแรงดึงคือ อัตราส่วนผสมของสารยึดเหนี่ยว อุณหภูมิในการอบและเวลาในการอบ การทดลองแฟคทอเรียลถูกนำมาใช้อีกครั้ง โดยมีการทำซ้ำ (Replication) ของแต่ละปัจจัยเพิ่มเติม

จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้หัวอ่านเขียนมีค่าแรงดึงสูงสุดคือ อัตราส่วนผสม 4:1 อุณหภูมิในการอบ 300 องศาฟาเรนไฮต์ และเวลาในการอบ 16 นาที และเมื่อนำค่าแรงดึงที่ได้ไปเปรียบเทียบกับเชิงสถิติกับค่าแรงดึงหัวอ่านเขียนในปัจจุบันพบว่า ค่าแรงดึงเฉลี่ยที่สภาวะใหม่ที่มีค่าสูงกว่าแรงดึงที่เป็นอยู่ในสภาวะปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.4.4 ทศพล เกียรติเจริญผล (ปี พ.ศ.2537) [9]

การวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้หลักการการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัย 4 ปัจจัย คือ ชนิดของแล็กเกอร์ น้ำหนักแล็กเกอร์ต่อพื้นที่ อุณหภูมิบ่ม เวลาที่ใช้ในการบ่มที่มีผลต่อลักษณะของผิวเคลือบแล็กเกอร์ โดยทำการทดสอบลักษณะของผิวเคลือบแล็กเกอร์ 6 ลักษณะคือ การทดสอบความยืดหยุ่น การทดสอบการทนต่อการขีดข่วน การทดสอบการทนต่อการขัดถู การทดสอบการทนต่อการแทรกซึมของไอน้ำ การทดสอบความแข็งแรงในการยึดเกาะระหว่างแล็กเกอร์กับเนื้อเหล็ก และการทดสอบการหลุดลอกของแล็กเกอร์จากการฆ่าเชื้อ และทำการศึกษาวิเคราะห์ปัจจัยและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลอง

จากการทดลองโดยอาศัยผลการทดสอบลักษณะผิวเคลือบแล็กเกอร์ทั้ง 6 ด้าน หาเงื่อนไขที่เหมาะสมได้ดังนี้คือ แล็กเกอร์ชนิด Z น้ำหนักแล็กเกอร์ต่อพื้นที่ 8-9 กรัมต่อตารางเมตร อุณหภูมิบ่ม 205 องศาเซลเซียส และเวลาที่ใช้ในการบ่ม 13 นาที

2.4.5 ศักรินทร์ อินทปัญญา (ปี พ.ศ.2543) [10]

การวิจัยครั้งนี้ ได้ใช้หลักการการออกแบบและวิเคราะห์การทดลองเพื่อศึกษาถึงปัจจัย 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิกระจกก่อนเคลือบเงิน ปริมาณของเหลวบนกระจกซึ่งสัมพันธ์กับความดันน้ำ DI เข้า Console และความดันน้ำเข้า Rinse bar โดยใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล ซึ่งพบว่าปัจจัยทั้ง 3 ชนิด ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเคลือบเงิน การทดลองแฟคทอเรียลถูกนำมาใช้อีกครั้ง โดยมีการทำซ้ำ (Replication) ของแต่ละปัจจัยเพิ่มเติม

จากการทดลองพบว่า สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพการเคลือบเงินมีค่าสูงสุด คือ อุณหภูมิกระจกก่อนเคลือบเงิน 95 องศาฟาเรนไฮต์ ความดันน้ำ DI เข้า Console 40 ปอนด์ต่อตารางนิ้วและความดันน้ำเข้า Rinse bar 5 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว และเมื่อนำประสิทธิภาพการเคลือบเงินที่ได้ไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพการเคลือบเงินในปัจจุบันพบว่า ค่าประสิทธิภาพการเคลือบเงินโดยเฉลี่ยที่สภาวะใหม่ที่มีค่าสูงกว่าแรงดึงที่เป็นอยู่ในสภาวะปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2.4.6 *สุทธิวัฒน์ มหัทธขปกรณ์ (ปี พ.ศ.2538) [11]*

การศึกษาปัจจัยของกรรมวิธีการเชื่อมระบบ TIG ที่มีอิทธิพลต่อคุณสมบัติของรอยเชื่อมสำหรับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกชนิด SUS 436L โดยการทดลองเชื่อมตามหลักการออกแบบการทดลอง กำหนดค่าของปัจจัยที่ระดับสูงและระดับต่ำลงในเงื่อนไขการทดลองจำนวน 8 เงื่อนไข เพื่อทำการทดลองเชื่อมโดยใช้ค่าของปัจจัยตามที่กำหนดไว้ นำท่อที่ได้จากการทดลองเชื่อมมาทำการทดสอบทางกล วัดค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของตะเข็บเชื่อม และเส้นผ่านศูนย์กลางขยายของชิ้นงานทดสอบการบานท่อ ประกอบกับการดูภาพโครงสร้างทางโลหะบริเวณแนวเชื่อม จากนั้นนำผลการทดสอบมาวิเคราะห์พร้อมก็นำค่าของปัจจัยไปลองใช้งาน

2.4.7 *สมเจตน์ สิงห์พันธุ์ (ปี พ.ศ.2532) [12]*

การวิจัยครั้งนี้ ได้ผลของเงื่อนไขการทำงานที่สภาวะการทำงานต่างๆของกระบวนการแปรรูปโลหะ ด้วยวิธีอีทีเอ็มที่มีต่อลักษณะเฉพาะที่สำคัญของกรรมวิธี 4 ประการคือ อัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความหยابของผิวงานและระยะดิสชาร์จ การทดลองโดยการแปรค่ากระแสดิสชาร์จในช่วง 9.85-30.5 A และระยะพัลส์ 50-1,000 μ s โดยการใช้ทองแดงและอลูมิเนียมเป็นอิเล็กโทรดกัดชิ้นงานซึ่งเป็นเหล็กกล้า AISI 4140 ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มของกระแสดิสชาร์จ มีผลต่อการเพิ่มของทั้งอัตราการกัดเนื้อโลหะ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ความหยابของผิวงาน และระยะดิสชาร์จ ส่วนการเพิ่มระยะพัลส์มีผลต่อการเพิ่มความหยابของผิวงานและระยะดิสชาร์จ อัตราการกัดเนื้อโลหะจะมีค่าสูงสุดเมื่อระยะพัลส์อยู่ในช่วง 200-500 μ s อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดเมื่อใช้ทองแดงเป็นอิเล็กโทรดจะลดลงเมื่อระยะพัลส์มีค่าสูงขึ้น

2.5 สภาพปัญหาการผลิตเหล็กแท่งในโรงงานตัวอย่าง

สืบเนื่องจากภาวะเศรษฐกิจที่ชะงักงัน ทำให้โรงงานตัวอย่าง จึงได้วางกลยุทธ์ในการที่จะทำให้บริษัทอยู่รอดได้ภายใต้ภาวะวิกฤต ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น กลยุทธ์ที่ผู้บริหารระดับสูงของโรงงานตัวอย่าง ได้ให้ความสำคัญ ได้แก่ การปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การลดต้นทุนการผลิต การส่งของตรงตามที่ถูกความต้องการ และการให้บริการหลังการขาย เพื่อสร้างความพึงพอใจให้ลูกค้าสูงสุด หรือเป็นไปตามหลัก Q C D S (Quality , Cost , Delivery , Service) เพื่อสนองนโยบายของบริษัท จึงได้ทำการศึกษาเพื่อลดต้นทุนการผลิตเหล็กแท่ง ซึ่งจากการเก็บข้อมูลพบว่า มีในหลายๆ จุดที่สามารถทำให้ต้นทุนการผลิตเหล็กแท่งลดลงได้ จุดหนึ่งที่น่าสนใจ ได้แก่การเพิ่ม Yield ในการผลิตเหล็กแท่งด้วยการลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง

2.5.1 Yield ในการผลิตเหล็กแท่ง

Yield ในการผลิตเหล็กแท่ง แบ่งเป็น

2.5.1.1 EAF Yield (%) คือ ผลผลิต (Yield) ที่เกิดจากการนำเศษเหล็ก (Scrap) เข้าเตาหลอมเหล็ก (Electrical Arc Furnace:EAF) ผ่านกระบวนการหลอมเหล็กได้เป็นน้ำเหล็ก (Liquid Steel)

$$\text{EAF Yield (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของน้ำเหล็ก(kg)}}{\text{น้ำหนักของเศษเหล็ก(kg)}} \times 100$$

EAF Yield (%) อยู่ที่ประมาณ 90 %

2.5.1.2 CCM Yield (%) คือ ผลผลิต (Yield) ที่เกิดจากการนำน้ำเหล็ก(Liquid Steel) ขึ้นหล่อที่เครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine:CCM) ผ่านกระบวนการหล่อเหล็กได้เป็นเหล็กแท่ง (Billet)

$$\text{CCM Yield (\%)} = \frac{\text{น้ำหนักของเหล็กแท่ง(kg)}}{\text{น้ำหนักของน้ำเหล็ก(kg)}} \times 100$$

CCM Yield (%) อยู่ที่ประมาณ 97.5 %

2.5.1.3 Overall Yield (%) คือ ผลผลิต (Yield) ที่เกิดจากการนำเศษเหล็ก (Scrap) เข้าเตาหลอมเหล็ก (Electrical Arc Furnace:EAF) ผ่านกระบวนการหลอมเหล็กได้เป็นน้ำเหล็ก (Liquid Steel) แล้วนำขึ้นหล่อที่เครื่องหล่อเหล็กแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Machine:CCM) ผ่านกระบวนการหล่อเหล็กได้เป็นเหล็กแท่ง (Billet)

$$\begin{aligned} \text{Overall Yield (\%)} &= \frac{\text{น้ำหนักของเหล็กแท่ง(kg)}}{\text{น้ำหนักของเศษเหล็ก(kg)}} \times 100 \\ &= \text{EAF Yield (\%)} \times \text{CCM Yield (\%)} \end{aligned}$$

Overall Yield (%) อยู่ที่ประมาณ 88 %

พิจารณา EAF Yield (%) อยู่ที่ประมาณ 90 % ส่วนอีก 10 % เป็น Loss ของปริมาณน้ำยา (Slag) ที่เกิดขึ้น ซึ่งไม่สามารถทำให้ลดลงได้มากนัก

พิจารณา CCM Yield (%) อยู่ที่ประมาณ 97.5 % ส่วนอีก 2.5 % เป็น Loss ที่เกิดขึ้นจากการหล่อเหล็กแท่ง

2.5.2 Loss ที่เกิดขึ้นจากการหล่อเหล็กแท่ง

Loss ที่เกิดขึ้นจากการหล่อเหล็กแท่ง แบ่งเป็น

2.5.2.1 Loss ของ Scale คือ Loss ของอ็อกไซด์ของเหล็กที่ติดที่ผิวเหล็กแท่ง มีประมาณ 0.6%

2.5.2.2 Loss ของ น้ำเหล็กที่ค้างอยู่ที่ เบ้ารับน้ำเหล็ก มีประมาณ 0.5%

2.5.2.3 Loss ของ น้ำเหล็กที่ค้างอยู่ที่ทันดิช มีประมาณ 0.25%

2.5.2.4 Loss ของ เหล็กปลายสั้น ที่เกิดขึ้นช่วงสุดท้ายของการหล่อเหล็กแท่ง ซึ่งไม่สามารถรับเป็นเหล็กแท่งได้เนื่องจาก เหล็กปลายสั้นนี้มีรูพรุนและกลวง หากนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์จะทำให้เหล็กแตกเป็นของเสียได้ มีประมาณ 1.35%

พิจารณาเหล็กปลายสั้น แสดงดังรูปที่ 2.10 ที่มีรูพรุนและกลวง ซึ่งจะถูกตัดทิ้งช่วงสุดท้ายจากการหล่อเหล็กแท่ง จากการเก็บข้อมูลในรอบเดือนที่ผ่านมา พบว่าเหล็กปลายสั้น ที่เกิดขึ้น แสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.10 แสดงเหล็กปลายสั้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วันที่	จำนวนการหล่อเหล็กต่อเนื่องต่อวัน (ครั้ง/วัน) พ.ศ. 2544												
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	รวม
1	-	1	1	2	1	1	2	1	3	2	1	2	17
2	-	2	1	1	1	2	1	1	4	1	2	3	19
3	1	3	2	2	2	2	2	1	1	3	2	1	22
4	1	1	2	1	1	1	3	3	2	1	3	1	20
5	2	2	3	1	2	3	4	3	1	2	1	3	27
6	1	2	1	2	3	1	2	2	3	1	2	2	22
7	2	2	2	6	3	2	2	2	2	3	1	1	28
8	2	2	1	3	2	2	2	1	2	1	2	1	21
9	2	2	1	1	2	2	1	1	2	1	1	2	18
10	2	1	1	2	1	1	4	1	3	1	3	2	22
11	1	3	3	1	3	2	3	3	2	1	2	3	27
12	2	2	3	1	2	1	3	2	1	1	2	1	21
13	2	2	1	1	1	3	5	2	2	1	1	1	22
14	2	2	2	2	2	1	3	1	1	3	3	3	25
15	1	1	2	4	2	2	6	3	2	1	2	2	28
16	1	3	1	3	3	3	3	1	2	1	-	3	24
17	3	2	3	1	2	3	3	3	2	2	-	1	25
18	1	2	2	2	1	1	5	2	1	2	-	-	19
19	2	1	1	1	2	1	2	2	1	1	-	-	14
20	1	1	1	3	2	3	3	2	2	2	-	-	20
21	3	2	1	3	4	1	3	1	1	2	-	-	22
22	1	2	1	1	2	1	2	1	3	1	-	-	15
23	2	2	1	1	1	2	2	3	2	2	1	-	19
24	2	5	2	2	2	1	2	2	1	2	2	-	23
25	2	1	2	1	1	2	2	2	1	1	3	-	18
26	2	1	1	1	2	1	3	3	1	1	1	-	17
27	2	2	3	2	1	1	2	2	2	2	2	-	21
28	1	2	3	3	1	3	3	2	1	2	1	-	22
29	2	-	2	2	1	1	3	3	2	2	1	-	19
30	2	-	2	3	1	1	3	2	2	2	2	-	20
31	2	-	2	-	2	-	2	2	-	1	-	-	11
รวม(จำนวนครั้ง)	50	54	54	59	56	51	86	60	55	49	41	32	647
เฉลี่ย(ครั้ง/เดือน)	54+/-13												
รวม (ครั้ง/ปี)	647												

หมายเหตุ เครื่องหมาย “ - ” หมายถึงหยุดผลิตตามแผนหรือไม่มีวันผลิตในเดือนนั้น ๆ ทำให้ไม่มีจำนวนการหล่อเหล็กต่อเนื่องต่อวัน

ตารางที่ 2.2 แสดงจำนวนการหล่อเหล็กต่อเนื่องต่อวันในการหล่อเหล็กแท่ง

เดือน (2544)	เหล็ก ปลายสั้น (m) (1)	น้ำหนัก (kg) (2) = (1)x165	ต้นทุน เหล็กแท่ง (บาท/kg) (3)	ต้นทุน เศษเหล็ก (บาท/kg) (4)	ผลต่าง (บาท/kg) (5) = (3) – (4)	ต้นทุน (บาท) (6) = (2) x (5)	ต้นทุน ทั้งหมด (บาท/ปี) (7) = (AVG x 12)	มูลค่า การลดของ เสีย (บาท/ปี) (8)=(7)/2
ม.ค.	161.33	26,619	7.50	3.00	4.50	119,786	1,486,724	743,362
ก.พ.	166.12	27,410	7.50	3.00	4.50	123,345		
มี.ค.	189.54	31,274	7.50	3.00	4.50	140,733		
เม.ย.	188.73	31,140	7.50	3.00	4.50	140,130		
พ.ค.	171.11	28,233	7.50	3.00	4.50	127,049		
มิ.ย.	154.93	25,563	7.50	3.00	4.50	115,034		
ก.ค.	242.77	40,057	7.50	3.00	4.50	180,257		
ส.ค.	182.94	30,185	7.50	3.00	4.50	135,833		
ก.ย.	169.95	28,042	7.50	3.00	4.50	126,189		
ต.ค.	151.41	24,983	7.50	3.00	4.50	112,424		
พ.ย.	126.69	20,904	7.50	3.00	4.50	94,068		
ธ.ค.	95.79	15,805	7.50	3.00	4.50	71,123		
AVG	166.86	27,532	7.50	3.00	4.50	123,894		
SD	35.83	5,911	0.00	0.00	0.00	26,600		

หมายเหตุ 1. น้ำหนักโดยเฉลี่ยของเหล็กแท่งทั้งสองขนาด เท่ากับ 165 kg/m

2. มูลค่าการลดของเสีย เกิดจากการลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลง 50%

ตารางที่ 2.3 แสดงความยาวของเหล็กปลายสั้นต่อเดือนในการหล่อเหล็กแท่ง

การผลิตเหล็กแท่งของโรงงานตัวอย่าง จะผลิตเป็น 2 ช่วงเวลา คือ

- ผลิตตั้งแต่ 20.00-9.00 น. ในวันจันทร์ถึงศุกร์
- ผลิต 24 ชั่วโมง ในวันเสาร์-อาทิตย์ และวันหยุดนักขัตฤกษ์

ในการหล่อเหล็กแท่ง จะมี Line ที่ใช้ในการหล่อ 3 Line จะเกิดเหล็กปลายสั้น โดยเฉลี่ยยาว 1.03 m ในการหล่อต่อ 1 Sequence จะเกิดเหล็กปลายสั้นเท่ากับ $3 \times 1.03 = 3.09$ m ใน 1 เดือนจะเกิดการหล่อ 1 Sequence โดยเฉลี่ยเท่ากับ 54 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 2.2

ในหนึ่งเดือนจะมีเหล็กปลายสั้น โดยเฉลี่ยยาวเท่ากับ $54 \times 3.09 = 166.86$ m/เดือน คิดเป็นน้ำหนักเท่ากับ $166.86 \text{ m} \times 165 \text{ kg/m} = 27,532 \text{ kg}$

ในหนึ่งปีจะมีเหล็กปลาย Strand ทั้งหมดเท่ากับ $166.86 \times 12 = 2,002.32$ m คิดเป็นน้ำหนักเท่ากับ $2,002.32 \text{ m} \times 165 \text{ kg/m} = 330,383 \text{ kg}$

เหล็กแท่ง ราคา 7.50 บาท/kg เหล็กที่เสียหมุนเวียนกลับไปใช้เป็นเศษเหล็กใหม่ราคา 3 บาท/kg ผลต่างของราคา เท่ากับ 4.50 บาท/kg

เพราะฉะนั้นเหล็กปลายสั้น ทั้งหมด คิดเป็นมูลค่าเท่ากับ $330,383 \times 4.50 = 1,486,724$ บาท/ปี

หากสามารถ ลดเหล็กปลายสั้นลงได้ ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่าย ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น หรือได้ CCM Yield เพิ่มขึ้นนั่นเอง

หากสามารถลดเหล็กปลายสั้นลงได้ 50 % ก็จะสามารถลดค่าใช้จ่ายลงได้เท่ากับ $0.5 \times 1,486,724 = 743,362$ บาท แสดงดังตารางที่ 2.3

หนึ่งในการเกิดเหล็กปลายสั้น จะมีทั้งเหล็กเสียที่มีรูพรุน มีรูกว้าง ซึ่งไม่สามารถนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ได้ และส่วนที่เป็นเหล็กดีที่สามารถนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ได้ ทั้งนี้เพราะพนักงานซึ่งเป็นคนตัดเหล็กปลายสั้น ไม่สามารถทราบถึงความยาวของเหล็กเสียที่มีรูพรุน มีรูกว้างยาวมากน้อยเท่าไร จึงทำการตัดเผื่อไว้ เพื่อให้มั่นใจว่าเหล็กแท่งที่ได้ จะไม่มีรูพรุน รูกว้าง ทั้งนี้ถ้าทราบถึงความยาวของเหล็กที่มีรูพรุน รูกว้างยาวเท่าไร ก็สามารถตัดเหล็กปลายสั้นที่มีรูพรุน รูกว้างออกไปได้ ทำให้ได้เหล็กดีเพิ่มขึ้น สามารถทำให้ CCM Yield เพิ่มขึ้นได้

จะเห็นได้ว่า การลดต้นทุนการผลิตเหล็กแท่ง ด้วยการ เพิ่ม CCM Yield ด้วยวิธีการลดของเสียของเหล็กปลายสั้น ที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง ก็เป็นวิธีหนึ่งซึ่งสามารถทำให้โรงงานตัวอย่าง สามารถดำเนินธุรกิจต่อไปได้ ด้วยเหตุนี้ การลดของเสียของเหล็กปลายสั้น ที่เกิดจากกระบวนการผลิตเหล็กแท่ง ต้องพิจารณาถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้น เพื่อให้สามารถทราบความยาวที่แน่นอนได้ จึงได้ประยุกต์ใช้หลักการการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) และการวิเคราะห์ (Analytical Studies) เข้ามาศึกษาผลกระทบของปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นดังกล่าว

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 การศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

ในการทำการทดลองเบื้องต้นเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น จะใช้การระดมสมอง (Brainstorming) จากผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม ข้อมูลจากการทดลองในอดีต รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

เมื่อพิจารณาปัจจัยการผลิตของกระบวนการการผลิตเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง จะพบว่า มีปัจจัยมากมายเข้ามาเกี่ยวข้อง และมีอิทธิพลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น ดังนั้นขั้นต้น จึงควรพิจารณาถึงปัจจัยในการจัดการการผลิตของกระบวนการที่เกี่ยวข้องของการเกิดเหล็กปลายสั้น โดยสามารถจำแนกปัจจัยออกได้เป็น 4 ปัจจัยหลักๆ ตามหลักการ 4M ดังต่อไปนี้

- ปัจจัยที่เกิดจากคน (Man)
- ปัจจัยที่เกิดจากเครื่องจักร (Machine)
- ปัจจัยที่เกิดจากวัตถุดิบ (Material)
- ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ (Method)

3.2 การศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

หลังจากที่ทำการศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นในหัวข้อที่ 3.1 ขั้นต่อไปจะทำการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น โดยการเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยและปัจจัยที่ไม่เลือกใช้ในการวิจัยหรือปัจจัยที่ถูกควบคุมให้คงที่ แล้วนำปัจจัยที่ถูกเลือกเหล่านี้มาทำการออกแบบการทดลอง เพื่อพิสูจน์ยืนยันถึงสมมติฐานที่ตั้งไว้ว่าปัจจัยเหล่านั้น น่าจะมีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น ในกระบวนการการผลิตเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง ซึ่งในการทดลองนี้จะใช้หลักการทางสถิติวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบการทดลอง เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลในเชิงสถิติแล้ว จะต้องทำการตีความหมายออกมาเพื่อใช้ในการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยผลสรุปที่ได้จากการทดลอง จะสามารถบอกได้ว่า ปัจจัยใดบ้างที่มีอิทธิพลต่อตัวแปรตอบสนองที่สนใจในกระบวนการที่ทำการศึกษาดังด้วยความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญตามที่ต้องการ

ในการทำการทดลองเพื่อยืนยันสมมติฐานที่ตั้งไว้ นั้น ควรจะมีการออกแบบแผนการทดลองตามลำดับขั้นตอนเพื่อสามารถนำไปปฏิบัติได้อย่างถูกต้อง ตามหลักการของการออกแบบการทดลองซึ่งสามารถดำเนินการได้ตามขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.2.1 การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย

การเลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย มีหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

3.2.1.1 ปัจจัยที่จะถูกเลือกนั้นต้องสามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ โดยไม่เสียค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้นและไม่สร้างความเสียหายต่อกระบวนการการผลิต

3.2.1.2 ปัจจัยที่ถูกเลือกนั้น จะต้องไม่มีผลกระทบต่อรอบเวลาในการผลิต (Cycle Time) มากนัก

3.2.1.3 ปัจจัยที่ถูกเลือกนั้น จะต้องไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพของเหล็กแท่ง

3.2.1.4 ปัจจัยที่ถูกเลือกนั้นสามารถวัดค่าได้โดยง่าย ไม่ยุ่งยากซับซ้อน โดยใช้เครื่องมือที่ได้มาตรฐานผ่านการสอบเทียบมาเรียบร้อยแล้ว

3.2.1.5 ปัจจัยที่ถูกเลือก จะพิจารณาโดยใช้ข้อมูลการทดลองที่ได้ทำแล้วในอดีตหรือความรู้เชิงวิศวกรรมประกอบด้วย

3.2.1.6 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน จะเลือกใช้พนักงานที่มีความชำนาญทำงานได้ถูกต้องเพื่อลดข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นและกำหนดเป็นปัจจัยควบคุม

3.2.1.7 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร ซึ่งเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของเครื่องจักร จะไม่นำมาพิจารณาและกำหนดเป็นปัจจัยควบคุม

3.2.1.8 ปัจจัยที่ถูกเลือก ควรจะให้ผลในการลดความยาวของเหล็กปลายสั้นได้อย่างเป็นรูปแบบ

จากการระดมสมอง (Brainstorming) จากผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม ได้สรุปเลือกปัจจัยหลักเบื้องต้น 3 ปัจจัยมาทำการทดลอง

3.2.2 การไม่เลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัย

การไม่เลือกปัจจัยที่ใช้ในการวิจัยหรือการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ให้คงที่ เพื่อป้องกันปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นจากการเก็บข้อมูลที่คลาดเคลื่อน มีหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาดังต่อไปนี้

3.2.2.1 ปัจจัยที่ถูกควบคุมนั้นต้องไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้ ซึ่งอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายในการผลิตเพิ่มขึ้นและอาจสร้างความเสียหายต่อกระบวนการการผลิต

3.2.2.2 ปัจจัยที่ถูกควบคุมนั้น มีผลกระทบต่อรอบเวลาในการผลิต (Cycle Time)

3.2.2.3 ปัจจัยที่ถูกควบคุมนั้น มีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์

3.2.2.4 ปัจจัยที่ถูกควบคุมนั้น ไม่สามารถวัดค่าได้โดยง่าย มีความยุ่งยากซับซ้อนในการวัด

3.2.2.5 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับคน จะถูกควบคุมเพื่อลดข้อผิดพลาดที่อาจจะเกิดในการเก็บข้อมูล

3.2.2.6 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจักร จะถูกควบคุมเพราะว่าเป็นลักษณะที่เกี่ยวข้องกับความสามารถของเครื่องจักร

3.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

การกำหนดระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยที่ควบคุมในการทดลองนี้ จะกำหนดระดับของปัจจัย (Levels) เป็นแบบกำหนดคงที่ (Fixed Level) เนื่องจากเป็นปัจจัยที่กำหนดค่าได้แน่นอน โดยอาศัยความรู้พื้นฐานในกระบวนการการผลิตและประสบการณ์จากพนักงานที่มีความชำนาญทำการกำหนดระดับของปัจจัยที่ควรใช้ในการทดลองเบื้องต้นออกเป็น 2 ระดับและทำการกำหนดระดับเพิ่มอีก 1 ระดับ เพื่อใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม โดยใช้สภาวะในการผลิตในปัจจุบันไว้ที่ระดับกลางและกำหนดค่าที่เพิ่มขึ้นและลดลงของแต่ละปัจจัยในระดับที่สูงกว่าและต่ำกว่าเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นและเปรียบเทียบกับสภาวะการผลิตในปัจจุบัน ซึ่งช่วง (Ranges) ที่ศึกษาของตัวแปรแต่ละตัวแปรจะเป็นจุดสนใจในกระบวนการการผลิตและเป็นช่วงที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การกำหนดช่วงจะต้องอาศัยความรู้ในกระบวนการผลิตเป็นหลักแบบต่อเนื่องช่วยในการตัดสินใจกำหนดระดับของปัจจัย

3.2.4 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)

การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) หรือตัวแปรอิสระ จะกำหนดตามปัญหาที่สนใจที่พิจารณาในหัวข้อที่ 2.5 โดยมีความสนใจเพื่อที่จะศึกษาการเกิดตัวแปรตอบสนองและลดตัวแปรตอบสนองให้เกิดน้อยที่สุด

3.2.5 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง

การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง จะใช้ปัจจัยหลักทั้งหมด 3 ปัจจัย และมีระดับของปัจจัย 3 ระดับ โดยปัจจัยระดับที่ 1 กับระดับที่ 3 ใช้ในการทดลองเบื้องต้น และใช้ปัจจัยทั้ง 3 ระดับ ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม ดังนั้นแผนการทดลองที่เหมาะสมกับการทดลองนี้ จึงมี 2 แบบ คือ การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) เมื่อมี 2 ระดับ ซึ่งจะถูกใช้ในการทดลองเบื้องต้น และการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบคงที่ (Factorial Design with Fixed Effect Model) ซึ่งจะถูกใช้ในการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

3.2.5.1 การทดลองเบื้องต้น

ในการทดลองเบื้องต้น ผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเมื่อปัจจัยมี 2 ระดับ (2^k Factorial Design) ซึ่งวิธีนี้เหมาะสมที่จะเป็นการทดลองเบื้องต้น (Factor Screening Experiment) เพื่อที่จะตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์ออกไป และข้อดีของการทดลองแบบนี้คือใช้ตัวอย่างน้อยที่สุด (Smallest Number of Runs) ทำให้ประหยัดเวลาในการทดลอง และใช้ทรัพยากรต่างๆไม่มาก ส่วนข้อเสียคือให้สารสนเทศไม่มากพอ เพราะเป็นการกำหนดปัจจัยไว้เพียง 2 ระดับเท่านั้น โดยจะกำหนดให้ระดับของปัจจัยเป็นค่าสูงสุด (+) และค่าต่ำสุด (-)

3.2.5.2 การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

หลังจากผู้วิจัยได้ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผลิตภัณฑ์แล้วก็จะทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่มีความยาวนานน้อยที่สุดโดย

ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบคงที่ เมื่อปัจจัยมี 3 ระดับ (3^k Factorial Design with Fixed Effect Model) ซึ่งเทอมที่สำคัญของการทดลองแบบนี้ประกอบด้วย

- อิทธิพลหลัก (Main Effect) หมายถึงอิทธิพลของปัจจัยที่ศึกษา
- ปฏิกริยาสัมพันธ์ (Interaction Effect) หมายถึงการแสดงผลออกของระดับต่างๆในปัจจัยหนึ่งไม่เท่ากัน เมื่อเปรียบเทียบจากระดับหนึ่งไปอีกระดับหนึ่งของอีกปัจจัย

ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล สามารถแบ่งการทดลองออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

- การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบผลกระทบบคงที่ (Factorial Design with Fixed Effect Model) เป็นการทดลองที่มีระดับของปัจจัยที่คงที่และแน่นอน
- การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล แบบผลกระทบบแบบสุ่ม (Factorial Design with Random Effect Model) เป็นการทดลองที่มีระดับของปัจจัยได้ถูกสุ่มมาจากระดับทั้งหมด

ซึ่งการทดลองในขั้นตอนนี้ ผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบคงที่ (Factorial Design with Fixed Effect Model) ทั้งนี้เนื่องจากสามารถที่จะควบคุมระดับของปัจจัยที่คงที่และแน่นอนได้ และช่วงที่ศึกษาของตัวแปรแต่ละตัวแปรจะเป็นจุดที่สนใจในกระบวนการการผลิต

หลักการที่ใช้ในการออกแบบการทดลองได้แก่

- การทำแบบสุ่ม (Randomization) เป็นการทำให้การเก็บข้อมูลนั้นมีการกระจายอิทธิพลของปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ ซึ่งจะได้ข้อมูลทุกตัวอย่างเท่าเทียมกัน โดยในการทดลองนี้ได้เลือกใช้การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization)
- การทดลองซ้ำ (Replication) เป็นการกำหนดจำนวนครั้งในการทดลอง ซึ่งควรมีการทำซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง ที่ระดับของปัจจัยต่างๆ เหมือนกันเพื่อให้ได้ข้อมูลที่จะนำไปวิเคราะห์ให้ได้ถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น

การทดลองเบื้องต้นและการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จะใช้การทดลองแบบสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) เพื่อป้องกันความไม่สม่ำเสมอของ

เครื่องจักร ผู้ทำการตรวจสอบ และผู้ทำการทดลองรวมถึงอคติที่น่าจะเกิดขึ้นในผู้ทำการทดลอง โดยใช้แผนการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเพื่อศึกษาถึงอิทธิพลร่วม (Interaction) ของปัจจัยด้วย ซึ่งในการทดลองต้องพยายามดำเนินการทดลองให้เป็นไปตามแผนที่ออกแบบไว้อย่างเคร่งครัด

3.3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นในหัวข้อที่ 3.2 นั้นจะนำไปใช้เป็นหลักในการดำเนินการทดลอง โดยมีประเด็นหลักๆที่จะต้องพิจารณาอย่างเคร่งครัด เช่น การเก็บข้อมูลต้องทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม เพื่อให้กระจายของข้อมูลมีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน การกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติและมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล การทดลองต้องควบคุมให้เป็นไปตามแผนที่ได้วางไว้ ปัจจัยที่ถูกควบคุมต้องทำการควบคุมตามที่ได้กำหนดไว้ในแผนการทดลอง ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัยสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

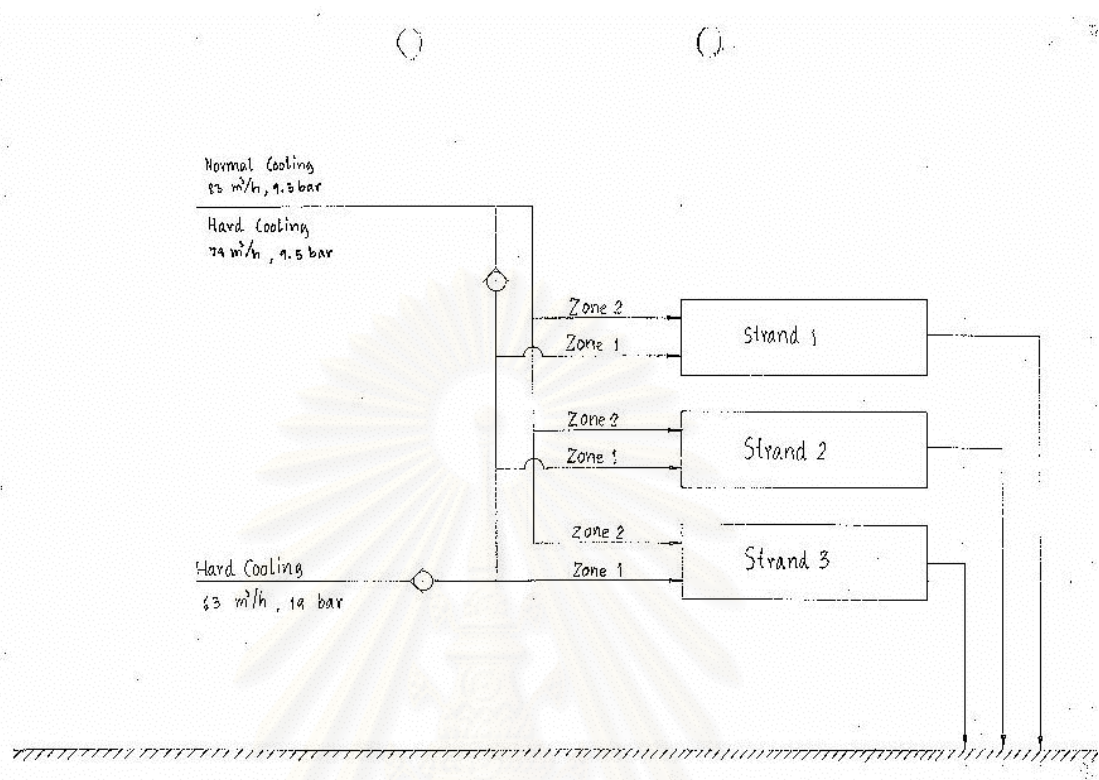
3.3.1 การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

การเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย แบ่งประเภทตามปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง เบื้องต้นและปัจจัยที่ถูกควบคุม ซึ่งได้จากผลการศึกษาตามหัวข้อที่ 4.2 ได้ดังต่อไปนี้

3.3.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น มีดังต่อไปนี้

3.3.1.1.1 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ได้แก่

3.3.1.1.1.1 ระบบน้ำหล่อเย็น (Pass Through Water) ทำหน้าที่หล่อเย็นเหล็กแห่งให้แข็งตัว แสดงดังรูปที่ 3.1 การเตรียมระบบน้ำหล่อเย็นเป็นหน้าที่ของพนักงานประจำ ซึ่งจะคอยตรวจสอบปริมาณน้ำและคุณภาพของน้ำเป็นประจำทุกวัน เพื่อให้ น้ำหล่อเย็นได้ปริมาณเพียงพอและมีคุณภาพตรงตามข้อกำหนด



รูปที่ 3.1 แสดงระบบน้ำหล่อเย็น (Pass Through Water) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1

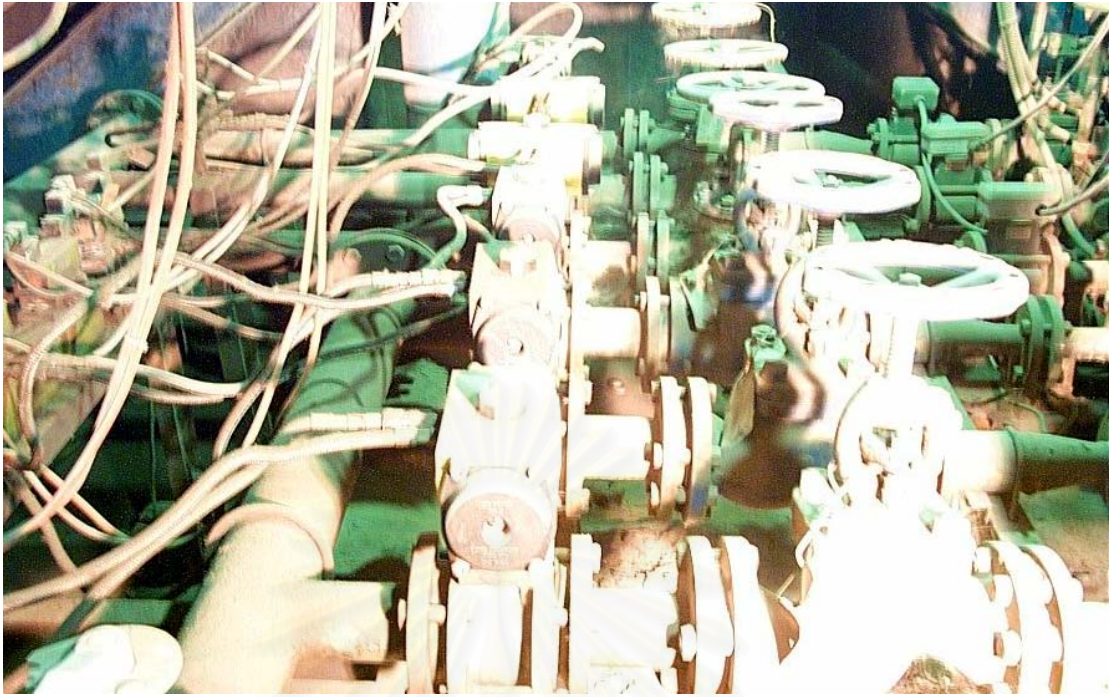
3.3.1.1.1.2 หัวฉีด (Spray Nozzle) ทำหน้าที่ฉีดน้ำให้เป็นฝอยเพื่อทำการหล่อเหล็กแท่ง ทั้ง 4 ด้าน หลังจากเหล็กแท่งออกจากโมลด์แล้ว แสดงดังรูปที่ 3.2 หัวฉีดมีขนาดความโตของรูพ่น 3 mm มี 4 หัวต่อด้าน ทั้งหมด 16 หัว มีระยะห่างเท่ากันคือ 350 mm การเตรียมหัวฉีดให้พร้อมใช้งานได้โดย ตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของหัวฉีดว่าชำรุดเสียหายเนื่องจากความร้อนหรือไม่และตรวจสอบสิ่งสกปรกที่พบในหัวฉีดหลังจากที่หยุดผลิตแล้ว หากพบหัวฉีดชำรุดเสียหายหรืออุดตันเนื่องจากสิ่งสกปรกให้ทำการเปลี่ยนหัวฉีดใหม่ทันที



รูปที่ 3.2 แสดงหัวฉีด (Spray Nozzle) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1

3.3.1.1.1.3 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) แสดงดังรูปที่ 3.3 จะติดตั้งที่ท่อส่งน้ำหล่อเย็นขนาด 2 1/2 นิ้ว เมื่อมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำจะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปที่ระบบควบคุม แล้วประมวลผลส่งค่าอัตราการไหลที่วัดได้มาแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ในห้องควบคุม ซึ่งพนักงานควบคุมจะสามารถทราบได้ว่า อัตราการไหลเป็นเท่าใด ซึ่งระบบควบคุมสามารถตั้งค่าได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบแมนนวล ทั้งนี้เครื่องวัดอัตราการไหลจะถูกสอบเทียบทุกๆ 3 เดือน โดยช่างไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวัดค่าอัตราการไหลได้ถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.2 %

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ของ
น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1

3.3.1.1.1.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) แสดงดังรูปที่ 3.4 จะติดตั้งที่ท่อส่งน้ำหล่อเย็นขนาด 2 1/2 นิ้ว ตำแหน่งก่อนถึงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน จะรับสัญญาณทางไฟฟ้าจากเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ แล้วมาสั่งให้ก้านวาล์วเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงเพื่อทำการเปิดวาล์วมากหรือน้อยตามต้องการ ให้ได้ค่าอัตราการไหลตามที่ตั้งไว้ ซึ่งระบบควบคุมสามารถตั้งค่าได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบแมนนวล ทั้งนี้วาล์วควบคุมอัตราการไหลจะถูกสอบเทียบทุกๆ 3 เดือน โดยช่างไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าตั้งค่าได้ถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.2 %



รูปที่ 3.4 แสดงวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ของ
น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1

3.3.1.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง
(Casting Speed) ได้แก่

3.3.1.1.2.1 เหล็กหล่อตัวนำเหล็กแท่ง (Dummy Bar) ทำหน้าที่
พาเหล็กแท่งให้เคลื่อนที่ออกจากโมลด์ แสดงดังรูปที่ 3.5 วัสดุทำจากเหล็กหล่อแข็งทนต่อการ
เสียดสี ขนาดหน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ สำหรับโมลด์ขนาด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และขนาดหน้าตัด
 $130 \times 170 \text{ mm}^2$ สำหรับโมลด์ขนาด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ โดยมีรัศมีความโค้ง (Radius) 4 เมตร ซึ่งจะ
มีพนักงานประกอบโมลด์เป็นผู้ตรวจสอบสภาพการสึกหรอของผิว ทุกๆ 2 อาทิตย์ หากพบว่า
สภาพผิวเกิดการสึกหรอ จะทำการเปลี่ยนชิ้นใหม่ทันที เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาขณะหล่อเหล็ก
แท่ง



รูปที่ 3.5 แสดงเหล็กหล่อตัวนำเหล็กแท่ง (Dummy Bar)

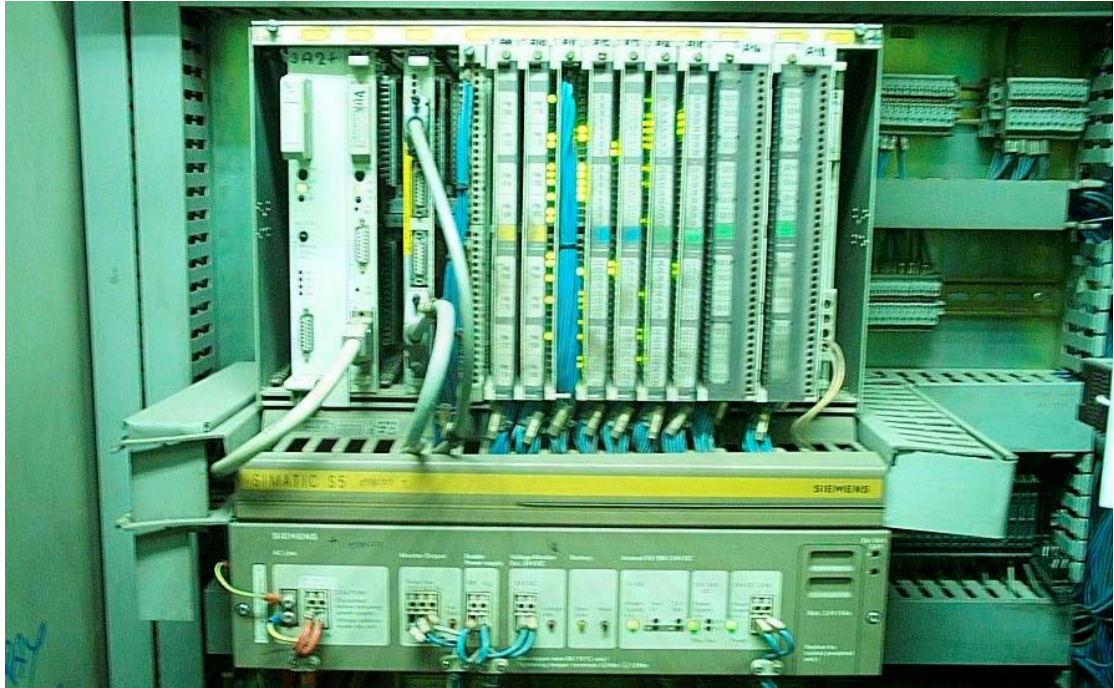
3.3.1.1.2.2 ชุดกดเหล็กแท่ง (Withdrawal Unit) ทำหน้าที่กดและพาเหล็กหล่อตัวนำเหล็กแท่งให้เคลื่อนที่ เมื่อเริ่มหล่อเหล็กแท่ง และทำหน้าที่กดและพาเหล็กแท่งให้เคลื่อนที่ ขณะหล่อเหล็กแท่ง แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยชุดกดเหล็กแท่งประกอบด้วย มอเตอร์ส่งกำลังขนาด 45 kW ชุดเฟืองทดกำลัง เพลาขับเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์กับลูกกลิ้ง ชุดลูกกลิ้งสำหรับกดเหล็กแท่งซึ่งมี 6 ลูก ด้านบน 3 ลูก ด้านล่าง 3 ลูกและชุดกระบอกลมสำหรับนำลูกกลิ้งชุดบนให้เคลื่อนที่ขึ้นลงเพื่อกดและไม่กดเหล็กแท่ง โดยมีพนักงานประกอบโมลด์ทำหน้าที่ตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของชุดกดเหล็กแท่ง เป็นประจำทุกวัน หากพบข้อบกพร่องที่ชุดกดเหล็กแท่งจะแจ้งให้ช่างพิตมาทำการซ่อมแซมแก้ไขหรือเปลี่ยนชุดใหม่ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขณะกดเหล็กแท่ง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.6 แสดงชุดกดเหล็กแท่ง (Withdrawal Unit)

3.3.1.1.2.3 ชุดประมวลผลความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ทำหน้าที่วัดความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง แสดงดังรูปที่ 3.7 โดยนับจำนวนรอบของลูกกิ้งของชุดกดเหล็กแท่ง แล้วประมวลผลเป็นความเร็ว ซึ่งความเร็วจะปรับเปลี่ยนตลอดเวลา (Variable Speed) ขึ้นอยู่กับระดับน้ำเหล็กในโมลด์ เมื่อระดับน้ำเหล็กในโมลด์สูง ชุดกดเหล็กแท่งก็จะได้รับคำสั่งให้มีความเร็วเพิ่มขึ้น หรือเมื่อระดับน้ำเหล็กในโมลด์ต่ำ ชุดกดเหล็กแท่งก็จะได้รับคำสั่งให้มีความเร็วลดลง ทั้งนี้เพื่อรักษาระดับน้ำเหล็กในโมลด์ให้คงที่ โดยระดับน้ำเหล็กในโมลด์ระยะเคลื่อนที่อยู่ภายในช่วง ± 5 mm และความเร็วสามารถปรับตั้งค่าได้ (Fixed Speed) โดยทำการปรับตั้งค่าความเร็วได้ที่แกนปรับความเร็ว (Potentiometer) ซึ่งจะเลือกปรับตั้งค่าความเร็วได้ตามต้องการ ทั้งนี้จะใช้ในกรณีที่เริ่มหล่อเหล็กแท่งและช่วงสุดท้ายในการหล่อเหล็กแท่ง การดูแลรักษาจะมีช่างไฟฟ้าคอยตรวจสอบและจัดช่วงเวลาเข้ามาทำความสะอาดชุดประมวลผล เป็นประจำทุกเดือน หากพบข้อบกพร่องที่ชุดประมวลผล จะทำการซ่อมแซมแก้ไขหรือเปลี่ยนชุดใหม่ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการประมวลผล



รูปที่ 3.7 แสดงชุดประมวลผลความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง

3.3.1.1.3 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) ได้แก่

3.3.1.1.3.1 ปลอกวัดอุณหภูมิ ทำหน้าที่วัดอุณหภูมิของน้ำเหล็กในทันดิช แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยปลอกทำจากกระดาษแข็ง รูปทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลางนอก 30 mm เส้นผ่านศูนย์กลางใน 20 mm ความยาว 750 mm ที่หัวปลอกเป็นเซ็นเซอร์ (Sensor) สำหรับวัดค่าของอุณหภูมิ



รูปที่ 3.8 แสดงปลอกวัดอุณหภูมิ

3.3.1.1.3.2 ด้ามวัดอุณหภูมิ ทำหน้าที่จับปลอกวัดอุณหภูมิในขณะจุ่มวัดอุณหภูมิในทันดิซ แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยด้ามทำจากท่อเหล็กขนาด $\frac{3}{4}$ นิ้ว ปลายด้ามเป็นก้านเซ็นเซอร์เพื่อให้วงจรไฟฟ้าถึงกันในขณะใส่ปลอก โดยมีสายไฟฟ้าอยู่ด้านในด้ามวัด และจะออกมาที่หัวด้ามวัด เพื่อจะไปต่อกับเครื่องแสดงผลอุณหภูมิต่อไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แสดงด้ามวัดคุณภาพน้ำ

3.3.1.1.3.3 เครื่องแสดงผลคุณภาพน้ำ ทำหน้าที่ประมวลผลและแสดงผลการวัดคุณภาพน้ำออกมาเป็นตัวเลขแสดงที่เครื่อง แสดงดังรูปที่ 3.10 โดยรับสัญญาณจากหัวเซ็นเซอร์ที่ปลอกขณะจุ่มวัดคุณภาพน้ำของน้ำเหล็กในทันดิชผ่านก้านเซ็นเซอร์ที่ด้ามวัดมายังสายไฟฟ้าแล้วต่อมาที่เครื่อง เครื่องก็จะแสดงผลการวัดคุณภาพน้ำของน้ำเหล็กในทันดิช

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องแสดงผลอุณหภูมิ

3.3.1.1.3.4 เครื่องตรวจสอบอุณหภูมิ ทำหน้าที่ตรวจสอบความถูกต้องของหัวเซ็นเซอร์ที่ปลอกและก้านเซ็นเซอร์ที่ด้ามวัด แสดงดังรูปที่ 3.11 โดยจะให้ความผิดพลาดได้ไม่เกิน 1°C

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



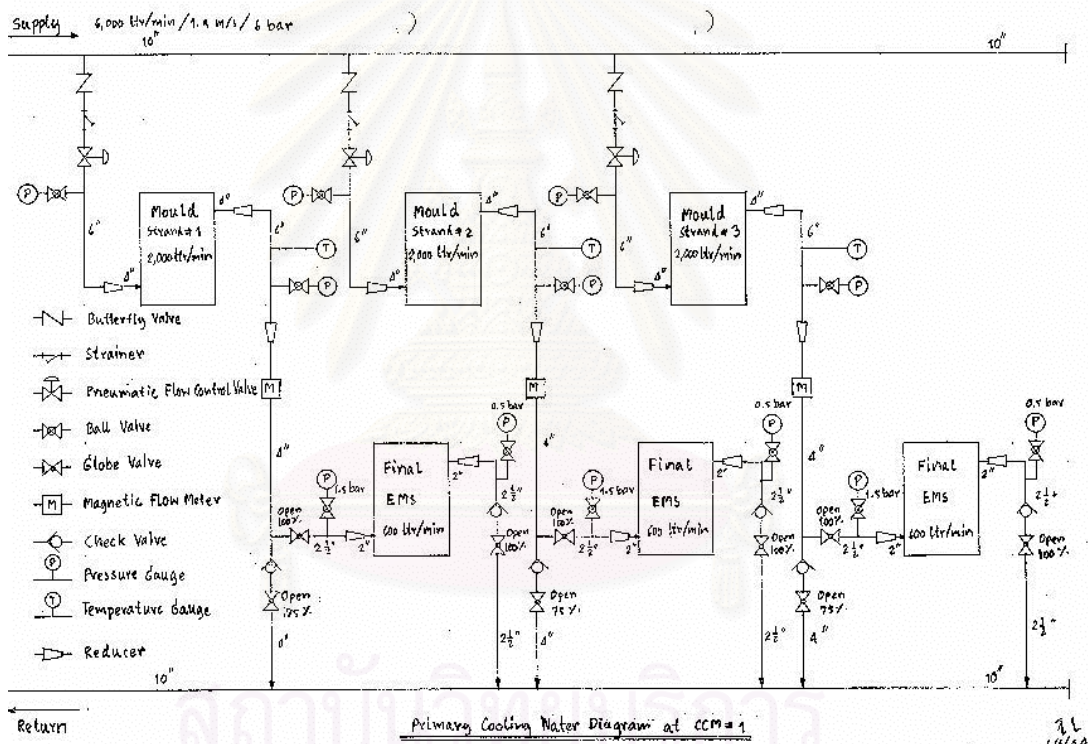
รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องตรวจสอบอุณหภูมิ

วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิน้ำเหล็กไนทันดิช ดังที่กล่าวมานี้ พนักงานประกอบโมลด์จะเป็นผู้ใช้งาน และจะคอยดูแลชุดอุปกรณ์เหล่านี้ให้พร้อมใช้งานเป็นประจำทุกวัน หากพบข้อบกพร่องที่ชุดอุปกรณ์ จะแจ้งให้ช่างไฟฟ้ามาทำการซ่อมแซมแก้ไขหรือเปลี่ยนชุดใหม่ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขณะวัดอุณหภูมิ

3.3.1.2 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยที่ถูกควบคุม มีดังต่อไปนี้

3.3.1.2.1 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water) ได้แก่

3.3.1.2.1.1 ระบบน้ำหล่อเย็น (Circulate Water) ทำหน้าที่ที่หล่อโมลด์สำหรับหล่อเป็นเหล็กแท่ง แสดงดังรูปที่ 3.12 การเตรียมระบบน้ำหล่อเย็นเป็นหน้าที่ของพนักงานประจำ ซึ่งจะคอยตรวจสอบปริมาณน้ำและคุณภาพของน้ำเป็นประจำทุกวัน เพื่อให้ น้ำหล่อเย็นได้ปริมาณเพียงพอและมีคุณภาพตรงตามข้อกำหนด



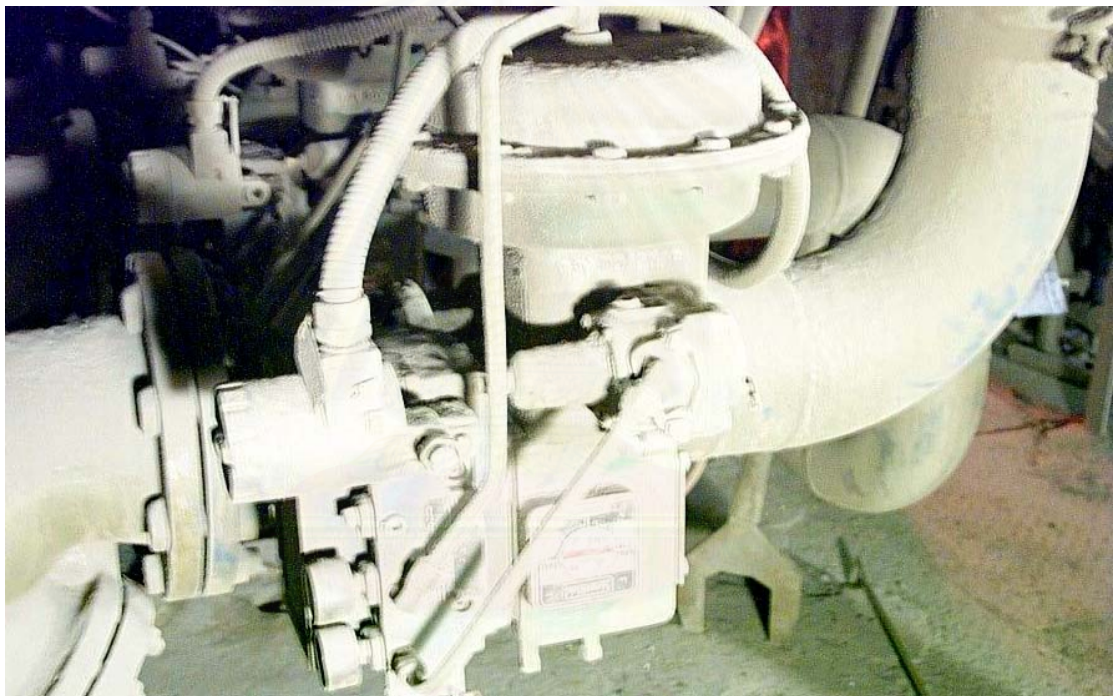
รูปที่ 3.12 แสดงระบบน้ำหล่อเย็น (Circulate Water) ของน้ำหล่อโมลด์

3.3.1.2.1.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) แสดงดังรูปที่ 3.13 จะติดตั้งที่ท่อส่งน้ำหล่อเย็นขนาด 4 นิ้ว เมื่อมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำจะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปที่ระบบควบคุม แล้วประมวลผลส่งค่าอัตราการไหลที่วัดได้มาแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ในห้องควบคุม ซึ่งพนักงานควบคุมจะสามารถทราบได้ว่า อัตราการไหลเป็นเท่าใด ซึ่งระบบควบคุมสามารถตั้งค่าได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบแมนนวล ทั้งนี้เครื่องวัดอัตราการไหลจะถูกสอบเทียบทุกๆ 3 เดือน โดยช่างไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวัดค่าอัตราการไหลได้ถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.2 %



รูปที่ 3.13 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ของน้ำหล่อโมลด์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

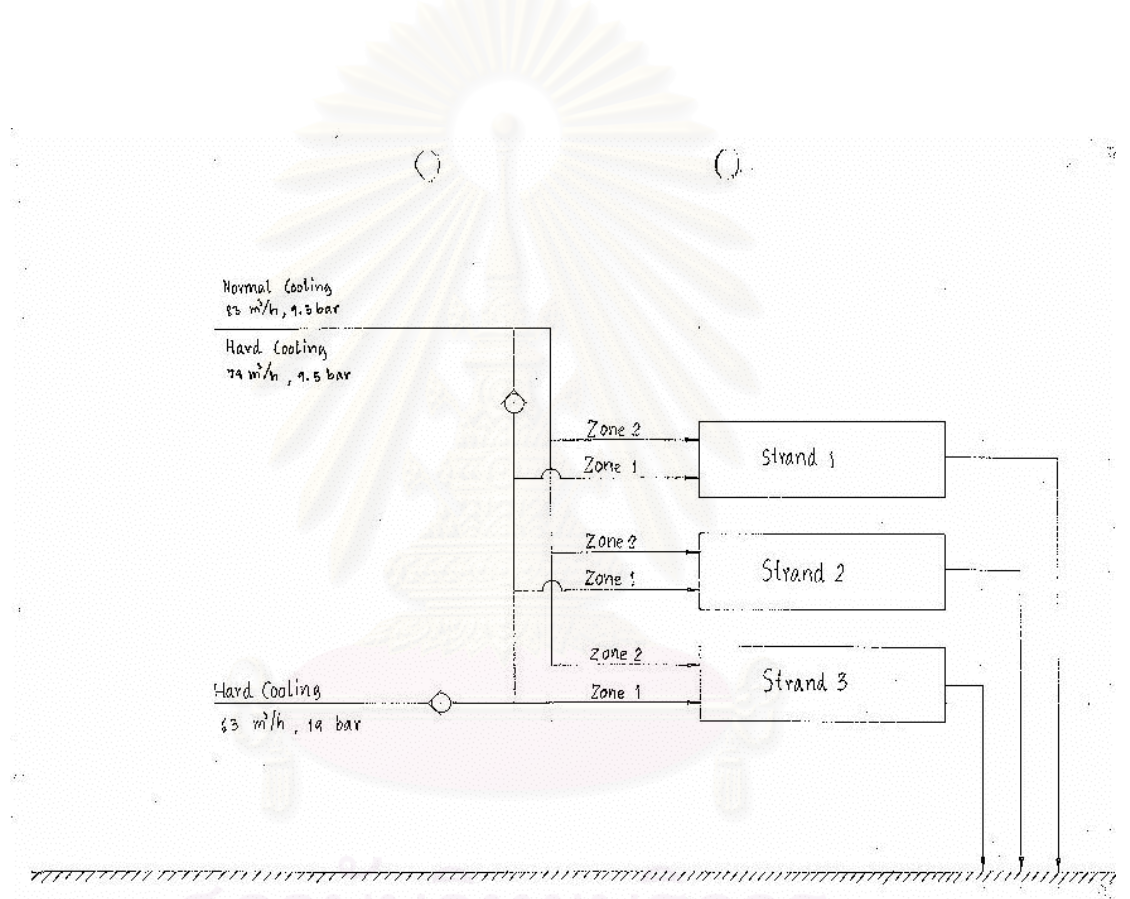
3.3.1.2.1.3 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) แสดงดังรูปที่ 3.14 จะติดตั้งที่ท่อส่งน้ำหล่อเย็นขนาด 4 นิ้ว ตำแหน่งก่อนถึงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่านจะรับสัญญาณทางไฟฟ้าจากเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ แล้วมาสั่งให้ก้านวาล์วเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงเพื่อทำการเปิดวาล์วมากหรือน้อยตามต้องการ ให้ได้ค่าอัตราการไหลตามที่ตั้งไว้ ซึ่งระบบควบคุมสามารถตั้งค่าได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบแมนนวล ทั้งนี้วาล์วควบคุมอัตราการไหลจะถูกสอบเทียบทุกๆ 3 เดือน โดยช่างไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าตั้งค่าได้ถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.2 %



รูปที่ 3.14 แสดงวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ของน้ำหล่อเย็น

3.3.1.2.2 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่ง
ช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2) ได้แก่

3.3.1.2.2.1 ระบบน้ำหล่อเย็น (Pass Through Water) ทำหน้าที่หล่อเย็นเหล็กแท่งให้แข็งตัว แสดงดังรูปที่ 3.15 การเตรียมระบบน้ำหล่อเย็นเป็นหน้าที่ของพนักงานประจำ ซึ่งจะคอยตรวจสอบปริมาณน้ำและคุณภาพของน้ำเป็นประจำทุกวัน เพื่อให้ น้ำหล่อเย็นได้ปริมาณเพียงพอและมีคุณภาพตรงตามข้อกำหนด



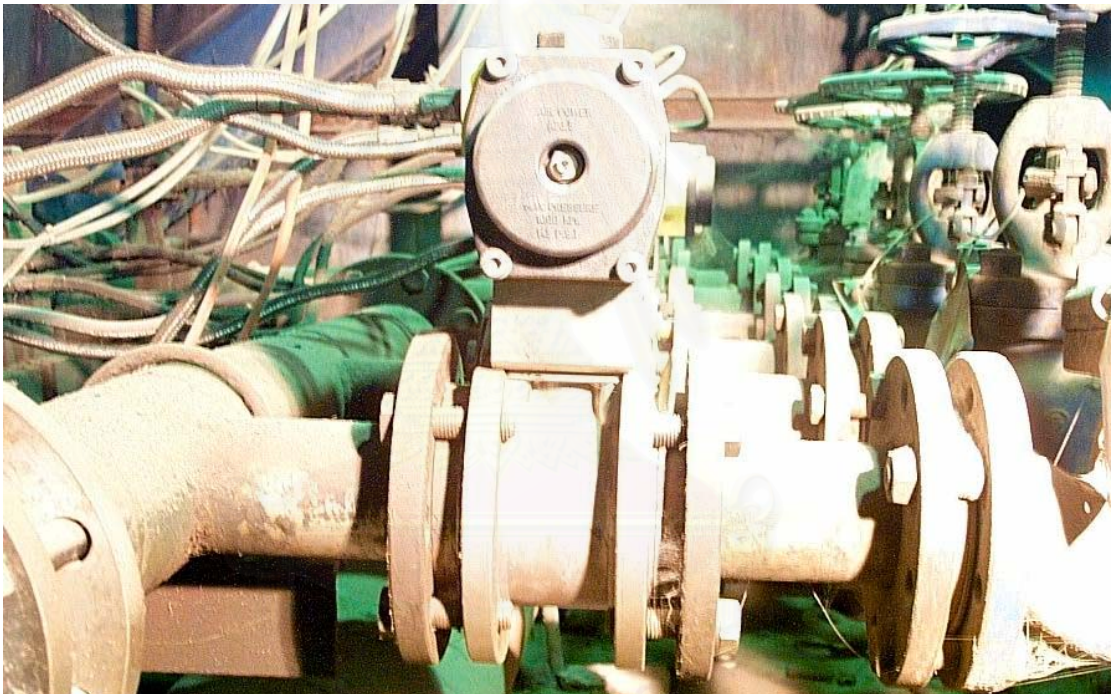
รูปที่ 3.15 แสดงระบบน้ำหล่อเย็น (Pass Through Water) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2

3.3.1.2.2.2 หัวฉีด (Spray Nozzle) ทำหน้าที่ฉีดน้ำให้เป็นฝอย เพื่อทำการหล่อเหล็กแท่ง ทั้ง 4 ด้าน หลังจากที่เหล็กแท่งออกมาจากช่องน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 แล้ว แสดงดังรูปที่ 3.16 หัวฉีดมีขนาดความโตของรูพ่น 3 mm มี 6 หัวต่อด้าน ทั้งหมด 24 หัว มีระยะห่างเท่ากันคือ 500 mm การเตรียมหัวฉีดให้พร้อมใช้งานได้โดย ตรวจสอบสภาพโดยทั่วไปของหัวฉีดว่าชำรุดเสียหายเนื่องจากความร้อนหรือไม่และตรวจสอบสิ่งสกปรกที่พบในหัวฉีดหลังจากที่หยุดผลิตแล้ว หากพบหัวฉีดชำรุดเสียหายหรืออุดตันเนื่องจากสิ่งสกปรกให้ทำการเปลี่ยนหัวฉีดใหม่ทันที



สถาบันวิทยบริการ
รูปที่ 3.16 แสดงหัวฉีด (Spray Nozzle) ของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1.2.2.3 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ทำหน้าที่วัดอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) แสดงดังรูปที่ 3.17 จะติดตั้งที่ท่อส่งน้ำหล่อเย็นขนาด 2 1/2 นิ้ว เมื่อมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่าน เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำจะส่งสัญญาณทางไฟฟ้าไปที่ระบบควบคุม แล้วประมวลผลส่งค่าอัตราการไหลที่วัดได้มาแสดงที่หน้าจอคอมพิวเตอร์ในห้องควบคุม ซึ่งพนักงานควบคุมจะสามารถทราบได้ว่า อัตราการไหลเป็นเท่าใด ซึ่งระบบควบคุมสามารถตั้งค่าได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบแมนนวล ทั้งนี้เครื่องวัดอัตราการไหลจะถูกสอบเทียบทุกๆ 3 เดือน โดยช่างไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวัดค่าอัตราการไหลได้ถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.2 %



รูปที่ 3.17 แสดงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Magnetic Flow Meter) ของ
น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2

3.3.1.2.2.4 วาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Rate) แสดงดังรูปที่ 3.18 จะติดตั้งที่ท่อส่งน้ำหล่อเย็นขนาด 2 1/2 นิ้ว ตำแหน่งก่อนถึงเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ เมื่อมีน้ำหล่อเย็นไหลผ่านจะรับสัญญาณทางไฟฟ้าจากเครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ แล้วมาสั่งให้ก้านวาล์วเคลื่อนที่ขึ้นหรือลงเพื่อทำการเปิดวาล์วมากหรือน้อยตามต้องการ ให้ได้ค่าอัตราการไหลตามที่ตั้งไว้ ซึ่งระบบควบคุมสามารถตั้งค่าได้ทั้งระบบอัตโนมัติและระบบแมนนวล ทั้งนี้วาล์วควบคุมอัตราการไหลจะถูกสอบเทียบทุกๆ 3 เดือน โดยช่างไฟฟ้า เพื่อให้มั่นใจได้ว่าตั้งค่าได้ถูกต้อง โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 0.2 %



รูปที่ 3.18 แสดงวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำ (Flow Control Valve) ของ
น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2

3.3.1.2.3 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil) ได้แก่

3.3.1.2.3.1 น้ำมันที่ใช้ในการหล่อโมลด์ ทำหน้าที่หล่อเส้นโมลด์ เพื่อไม่ให้ผิวของเหล็กแท่งติดกับโมลด์ทองแดงในขณะที่หล่อ แสดงดังรูปที่ 3.19 คุณสมบัติโดยทั่วไป ทำจากไขมันพืช จะไม่ติดไฟ ไม่มีตะกอน และมีอายุการใช้งานที่จำกัด ซึ่งในขั้นตอนการตรวจรับจะต้องมีปริมาณและคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนด หากไม่ตรงตามข้อกำหนดจะไม่รับสินค้า และเมื่อนำไปใช้งาน พนักงานประกอบโมลด์จะทำการตรวจสอบและจะสูบน้ำมันหล่อโมลด์จากถังเก็บมาเข้าสู่ตู้ปั๊มน้ำมันหล่อโมลด์ เป็นประจำทุกวัน เพื่อให้เตรียมพร้อมในการปั๊มน้ำมันหล่อโมลด์ต่อไป หากพบข้อบกพร่องที่น้ำมันหล่อโมลด์ จะแจ้งให้พนักงานพัสดุทราบ มาทำการเปลี่ยนถังเก็บใหม่ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาในการนำไปใช้งาน



รูปที่ 3.19 แสดงน้ำมันที่ใช้ในการหล่อโมลด์

3.3.1.2.3.2 ชุดปั๊มน้ำมันหล่อโมลด์ ทำหน้าที่พาน้ำมันหล่อโมลด์เข้าหล่อชิ้นผิวโมลด์ แสดงดังรูปที่ 3.20 โดยชุดปั๊มน้ำมันหล่อโมลด์ประกอบด้วย มอเตอร์สำหรับปั๊มน้ำมันขนาด 0.15 kW ถึงพักน้ำมันขนาด 100 ลิตร ทำหน้าที่เก็บน้ำมันหล่อโมลด์ ท่อส่งน้ำมันขนาด รูโต 5 mm วัสดุทำด้วยทองแดง มีทั้งหมด 4 สาย ความยาว 5 เมตร ต่อสาย และหัวฉีดน้ำมัน ขนาดรูโต 3 mm ติดตั้งที่ปากโมลด์ทั้ง 4 ด้าน ทำหน้าที่ฉีดน้ำมันหล่อโมลด์เข้าหล่อชิ้นผิวโมลด์ โดยมีพนักงานประกอบโมลด์ทำการสูบน้ำมันหล่อโมลด์จากถังพักผ่านท่อส่งและหัวฉีดฉีดน้ำมันหล่อโมลด์เข้าหล่อชิ้นผิวโมลด์ เป็นประจำทุกวัน หากพบข้อบกพร่องที่ชุดปั๊มน้ำมันหล่อโมลด์ จะแจ้งให้ช่างพิตมาทำการซ่อมแซมแก้ไขหรือเปลี่ยนชุดใหม่ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขณะหล่อชิ้นผิวโมลด์



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.20 แสดงชุดปั๊มน้ำมันหล่อโมลด์

3.3.1.2.4 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould) ก็คือ โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง ทำหน้าที่หล่อเหล็กแท่ง แสดงดังรูปที่ 3.21 โดยวัสดุทำจากทองแดง มีความยาว 780 mm ความหนา 12 mm รัศมีความโค้ง 4 เมตร ซึ่งอายุของโมลด์ทองแดง คือ 500 ครั้งที่ใช้ในการหล่อ โดยมีพนักงานประกอบโมลด์ ทำหน้าที่ตรวจสอบสภาพผิวโดยทั่วไป ตรวจสอบหน้าตัด และตรวจสอบรัศมีความโค้ง ให้ตรงตามข้อกำหนด หากพบข้อบกพร่องที่โมลด์ทองแดง จะทำการเปลี่ยนชุดใหม่ เพื่อไม่ให้เกิดปัญหาขณะหล่อเหล็กแท่ง



รูปที่ 3.21 แสดงโมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง ขนาด $120 \times 120 \text{ mm}^2$
และขนาด $130 \times 170 \text{ mm}^2$

3.3.1.2.5 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type) ได้แก่ เครื่องวิเคราะห์ทางเคมี ทำหน้าที่วิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี แสดงดังรูปที่ 3.22 เพื่อให้สามารถแยกชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type) ในแต่ละชนิดได้ โดยเครื่องวิเคราะห์ทางเคมี จะทำการสอบเทียบกับตัวอย่างมาตรฐาน ทุกๆครั้งที่มีการเปลี่ยนแผนผลิต และจะทำการซ่อมแซมตามแผนการซ่อมบำรุง ทุก ๆ 6 เดือน เพื่อให้มั่นใจได้ว่ากรวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมีเป็นไปอย่างถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 3.22 แสดงเครื่องวิเคราะห์ทางเคมี
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.1.2.6 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand) ก็คือ เครื่องจักรในสายการผลิตนั้นๆ มีทั้งหมด 3 สายการผลิต เรียงกัน ซึ่งทำหน้าที่หล่อ น้ำเหล็กให้เป็นเหล็กแท่งที่สมบูรณ์จนจบกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง แสดงดังรูปที่ 3.23 ประกอบด้วย โมลด์ น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 ชุดกดเหล็กแท่ง ชุดลูกกลิ้งลำเลียง ชุดยกเหล็กแท่ง และลานผึ่งเย็น ซึ่งเครื่องจักรในสายการผลิตนี้สายผลิตนี้จะได้รับ การตรวจสอบ ซ่อมแซมแก้ไข หรือเปลี่ยนชุดใหม่ให้พร้อมใช้งานอยู่เสมอ โดยเป็นความรับผิดชอบ ของหน่วยงานซ่อมบำรุง หากพนักงานหล่อเหล็กแท่งพบข้อบกพร่องที่เครื่องจักรในสายการผลิต นั้นๆ จะแจ้งให้หน่วยงานซ่อมบำรุง มาทำการซ่อมแซมแก้ไขหรือเปลี่ยนชุดใหม่ เพื่อไม่ให้เกิด ปัญหาขณะหล่อเหล็กแท่งทั้งกระบวนการ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รูปที่ 3.23 แสดงสายผลิตในการหล่อ (Casting Strand)

3.3.1.2.7 วัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator) ก็คือ อุปกรณ์ความปลอดภัยส่วนบุคคล แสดงดังรูปที่ 3.24 ได้แก่ หมวกความปลอดภัย หน้ากันน้ำเหล็ก แว่นตาดูแสง ชุดหนังคลุมกันน้ำเหล็ก สนับแข้ง ถุงมือหนังและรองเท้าความปลอดภัย ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งในการหล่อเหล็กแท่ง เพราะจะอยู่ใกล้กับน้ำเหล็กและความร้อนที่เกิดจากน้ำเหล็กตลอดเวลา หากพบข้อบกพร่องมีอุปกรณ์ความปลอดภัยส่วนบุคคลไม่ครบ จะไม่ให้หล่อเหล็กแท่ง และต้องหาอุปกรณ์ความปลอดภัยส่วนบุคคลให้ครบตามข้อ เพื่อสร้างความปลอดภัยในการทำงานและไม่ให้เกิดปัญหาขณะหล่อเหล็กแท่ง



สถาบันวิทยบริการ
รูปที่ 3.24 แสดงพนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator) ที่มี
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
อุปกรณ์ความปลอดภัยส่วนบุคคล

3.3.2 ขั้นตอนการเก็บข้อมูล

เมื่อจัดเตรียมวัสดุอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับ ปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้นและ ปัจจัยที่ถูกควบคุมเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือขั้นตอนการเก็บข้อมูล ซึ่งสามารถปฏิบัติได้ดังต่อไปนี้

3.3.2.1 ลำดับแรกพิจารณาจากการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) ในการทดลอง ตามแผนการทดลอง เช่น จากแผนการทดลองเบื้องต้น การสุ่มอย่างสมบูรณ์ ตามตารางที่ 4.10 ครั้งแรกเกิดขึ้นที่ Run ที่ 5 ซึ่งจะได้เมตริกการออกแบบการทดลองคือ ปัจจัย A เป็นค่าต่ำ (-) ปัจจัย B เป็นค่าต่ำ (-) และปัจจัย C เป็นค่าสูง (+) ตามตารางที่ 4.9 ซึ่งการเก็บข้อมูล จะได้ว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 คือ 100 Ltr/min ความเร็วในการหล่อเหล็กแห่ง คือ 0.90 m/min และอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช คือ 1,570°C จะได้ความยาวของเหล็กปลายสั้นเป็นเท่าใด ตามตารางที่ 4.11

3.3.2.2 เมื่อมีการผลิตเหล็กแห่ง ชนิด M15 และทราบว่ากระบวนการหล่อเหล็กแห่งจะหยุดหล่อเหล็กแห่งแบบต่อเนื่องแล้ว เช่นหยุดหล่อเหล็กแห่งเป็นบ้ำที่ 10 ให้พนักงานควบคุมที่เครื่องหล่อเหล็กแห่งแบบต่อเนื่อง แจ้งพนักงานควบคุมที่เตาปรงแต่งน้ำเหล็กว่า จะขออุณหภูมิในการเริ่มหล่อ ที่ 1,630°C (เวลาในการหล่อเหล็กแห่ง 60 นาที อุณหภูมิจะลดลง นาทีละ 1°C อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจะได้อุณหภูมิตามที่ต้องการที่ 1,570°C)

3.3.2.3 เมื่อหล่อเหล็กแห่งตามกระบวนการผลิต จนเมื่อน้ำเหล็กในทันดิชเหลือประมาณ 2 ตัน ให้พนักงานหล่อเหล็กแห่งวัดอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช แล้วบันทึกค่าในตารางบันทึกผล

3.3.2.4 เมื่อหล่อเหล็กแห่งตามกระบวนการผลิต จนเมื่อน้ำเหล็กในทันดิชเหลือประมาณ 2 ตัน ให้ปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 และช่วงที่ 2 เป็น Manual คือ 100 Ltr/min และ 80 Ltr/min ตามลำดับ แล้วบันทึกค่าในตารางบันทึกผล

3.3.2.5 เมื่อหล่อเหล็กแห่งตามกระบวนการผลิต จนเมื่อน้ำเหล็กในทันดิชเหลือประมาณ 2 ตัน ให้ปรับความเร็วในการหล่อเหล็กแห่ง เป็น Manual คือ 0.90 m/min แล้วบันทึกค่าในตารางบันทึกผล

3.3.2.6 เมื่อหล่อเหล็กแห่งตามกระบวนการผลิต จนเมื่อน้ำเหล็กในทันดิชเหลือประมาณ 2 ตัน ให้ปรับอัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ เป็น Manual คือ 2,000 Ltr/min แล้วบันทึกค่าในตารางบันทึกผล

3.3.2.7 ลำดับการหล่อเหล็กแห่ง (Heating No.) ให้บันทึกค่าในตารางบันทึกผล

3.3.2.8 ชนิดของเหล็กแห่ง (M15) ให้บันทึกค่าในตารางบันทึกผล

3.3.2.8 สายผลิตในการหล่อ (St#3) ให้บันทึกค่าในตารางบันทึกผล

3.3.2.9 ตัดเหล็กปลายสั้นความยาวปกตินับจากท้ายสุดเข้ามา เฉพาะที่ St#3 ที่จะนำไปวิเคราะห์

3.3.2.10 การทดลองลำดับต่อไป ก็ทำได้ตามข้อ 3.4.2.1-3.4.2.9 ทั้ง แผนการทดลองเบื้องต้นและแผนการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จนครบจำนวนตาม ต้องการ

หลังจากที่ได้เหล็กปลายสั้นครบจำนวนตามที่ต้องการแล้ว จึงนำไปฝั่งเย็นที่ลาน ฝั่งเย็น แล้วทำการผ่าวัดความยาวของเหล็กปลายสั้นต่อไป

3.3.3 ขั้นตอนการตรวจสอบความยาวเหล็กปลายสั้น

เมื่อได้เหล็กปลายสั้นครบจำนวนตามที่ต้องการแล้ว นำไปฝั่งเย็นที่ลานฝั่งเย็น เรียบร้อยแล้ว จึงทำการผ่าวัดความยาวของเหล็กปลายสั้น โดยนำเหล็กปลายสั้นคล้องตามแนว Center Line ตลอดความยาว (ส่งให้ผู้รับเหมาะภายนอกคล้องเหล็กปลายสั้น) เพื่อดูความยาวรูกลวง ของเหล็กปลายสั้น แล้วใช้ตลับเมตรที่ผ่านการสอบเทียบเรียบร้อยแล้ววัดความยาวของรูกลวงตาม แนว Center Line แสดงดังรูปที่ 3.25 บันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล พร้อมทั้งวัดความยาวเหล็ก ปลายสั้นทั้งชิ้นตลอดความยาวตามแนว Center Line แสดงดังรูปที่ 3.26 บันทึกค่าลงในตาราง บันทึกผล เพื่อเป็นข้อมูลว่ายังมีเหล็กปลายสั้นส่วนที่ดีที่สามารถนับเป็นผลผลิตได้ หลังจากนั้น วัด ความยาวรูกลวงของเหล็กปลายสั้นตามแนว Center Line พร้อมทั้งวัดความยาวเหล็กปลายสั้นทั้ง ชิ้นตลอดความยาวตามแนว Center Line แห่งอื่นๆ ให้ครบทั้งหมด บันทึกค่าลงในตารางบันทึกผล

เมื่อได้ข้อมูลตามแผนการทดลองเบื้องต้นและแผนการทดลองเพื่อหาสภาวะที่ เหมาะสมครบหมดแล้ว จึงจะนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์เพื่อพิจารณาว่าปัจจัยใดที่มีผลต่อการ เกิดเหล็กปลายสั้นและปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด ต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.25 แสดงการวัดความยาวของรูกวางตามแนว Center Line



รูปที่ 3.26 แสดงการวัดความยาวเหล็กปลายสั้นทั้งชิ้นตลอดความยาวตามแนว Center Line

3.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติจะใช้หลักการทางสถิติ เข้าช่วยในการวิเคราะห์ เพื่อให้การวิเคราะห์มีความน่าเชื่อถือ ซึ่งสามารถดำเนินการได้ตามหลักการต่างๆ ดังต่อไปนี้

3.4.1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลนี้ จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปชื่อ Minitab Release 13.20 ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลจากการออกแบบการทดลอง โดยการวิจัยนี้จะใช้วิเคราะห์ผลทั้งในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม และการทดลองเพื่อยืนยันผล

3.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น จะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งมีปัจจัย 2 ระดับ (2^k Factorial Design) ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

3.4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) [4]

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งสามารถแสดงวิธีการคำนวณได้ตามตารางที่ 3.1 ดังต่อไปนี้

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	a-1	SS_A/DF	MS_A/MS_E
B	SS_B	b-1	SS_B/DF	MS_B/MS_E
C	SS_C	c-1	SS_C/DF	MS_C/MS_E
Error	SS_E	Abcn-(a+b+c-2)	SS_E/DF	
Total	SS_T	Abcn-1		

ตารางที่ 3.1 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{.j\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{\dots k}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น จะพิจารณาจากค่า F-Ratio ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยที่ในทางทฤษฎีจะทำการเปรียบเทียบค่า F-Ratio กับค่า F วิกฤติ ที่หาได้จากการเปิดตาราง F โดยที่

ถ้า F-Ratio มากกว่าค่า F วิกฤติ แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

ถ้า F-Ratio น้อยกว่าค่า F วิกฤติ แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

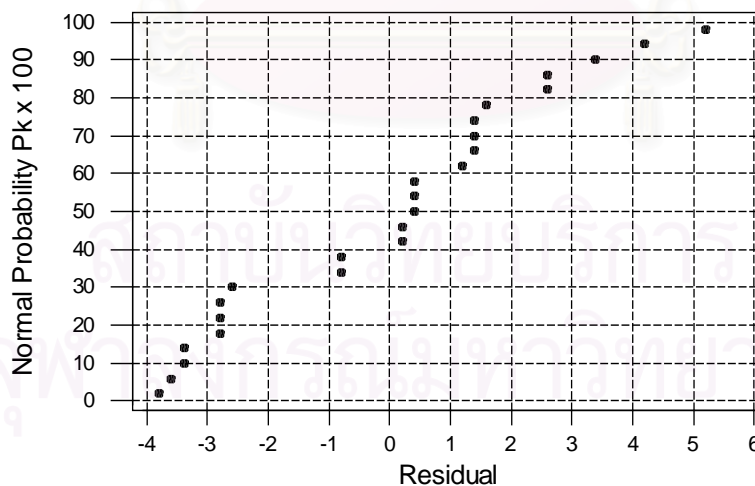
ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น แต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น โดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05

3.4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) [5]

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

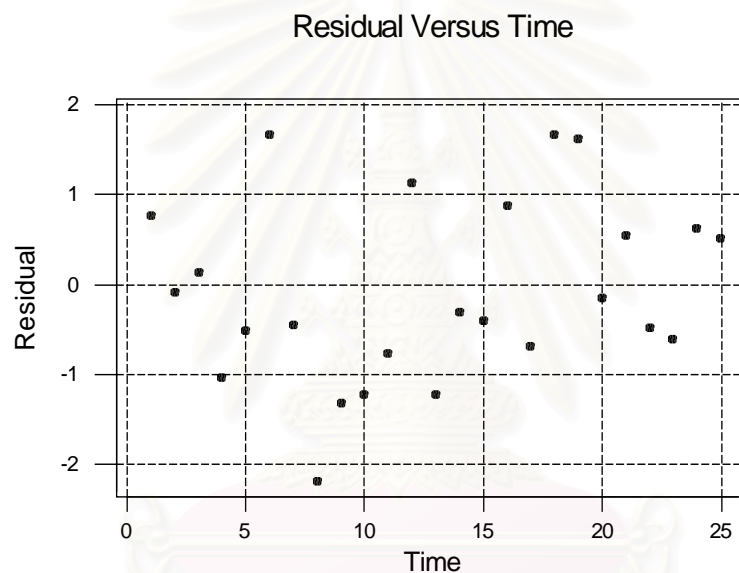
3.4.2.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) เป็นการพล็อตค่าส่วนตกค้าง ลงบนกราฟที่เรียกว่า Normal Probability Paper ซึ่งพล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 3.27 ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากการกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติ รูปที่พล็อตขึ้นมาจะเห็นเป็นเส้นตรง นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

Normal Probability Plot of the Residuals



รูปที่ 3.27 แสดงตัวอย่าง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

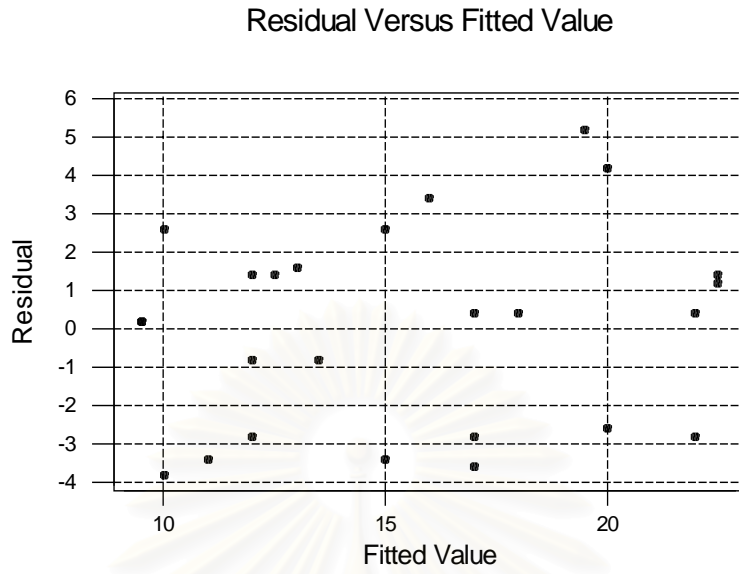
3.4.2.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ซึ่งทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งค่าส่วนตกค้างแต่ละค่าควรเป็นอิสระซึ่งกันและกันทั้งนี้ต้องได้จากการทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม โดยจะทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอนแสดงดังรูปที่ 3.28 ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากข้อมูลมีความเป็นอิสระรูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไปไม่เป็นแนวโน้ม (Trend) นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน



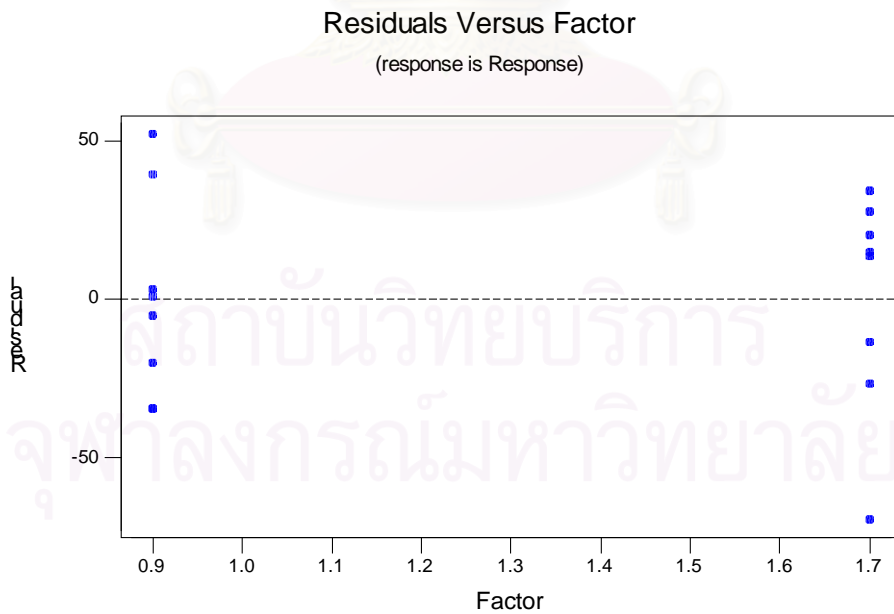
รูปที่ 3.28 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล
ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.4.2.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอนดังแสดง แสดงดังรูปที่ 3.29 ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และระดับของปัจจัยอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 3.30 ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาี้มีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลรูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะการกระจายดังกล่าวข้างต้น นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์



รูปที่ 3.29 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 3.30 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับระดับของปัจจัยในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

3.4.3 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมนี้จะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบางที่ ซึ่งปัจจัยมี 3 ระดับ (3^k Factorial Design with Fixed Effect Model) ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

3.4.3.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) [4]

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งสามารถแสดงวิธีการคำนวณได้ตามตารางที่ 3.2 ดังต่อไปนี้

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
A	SS_A	a-1	SS_A/DF	MS_A/MS_E
B	SS_B	b-1	SS_B/DF	MS_B/MS_E
C	SS_C	c-1	SS_C/DF	MS_C/MS_E
AB	SS_{AB}	(a-1)(b-1)	SS_{AB}/DF	MS_{AB}/MS_E
AC	SS_{AC}	(a-1)(c-1)	SS_{AC}/DF	MS_{AC}/MS_E
BC	SS_{BC}	(b-1)(c-1)	SS_{BC}/DF	MS_{BC}/MS_E
ABC	SS_{ABC}	(a-1)(b-1)(c-1)	SS_{ABC}/DF	MS_{ABC}/MS_E
Error	SS_E	Abc(n-1)	SS_E/DF	
Total	SS_T	Abcn-1		

ตารางที่ 3.2 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_A = \frac{1}{bcn} \sum_{i=1}^a y_{i\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_B = \frac{1}{acn} \sum_{j=1}^b y_{.j\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

$$SS_C = \frac{1}{abn} \sum_{k=1}^c y_{\dots k}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn}$$

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

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c y_{i.k\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_C$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{.jk\dots}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_B - SS_C$$

$$SS_{ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c y_{ijkl}^2 - \frac{y^2 \dots}{abcn} - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC}$$

$$SS_E = SS_T - SS_{ABC}$$

ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น จะพิจารณาจากค่า F-Ratio ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยที่ในทางทฤษฎีจะทำการเปรียบเทียบค่า F-Ratio กับค่า F วิฤติ ที่หาได้จากการเปิดตาราง F โดยที่

ถ้า F-Ratio มากกว่าค่า F วิฤติ แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อการเกิด
เหล็กปลายสั้น

ถ้า F-Ratio น้อยกว่าค่า F วิฤติ แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อการเกิด
เหล็กปลายสั้น

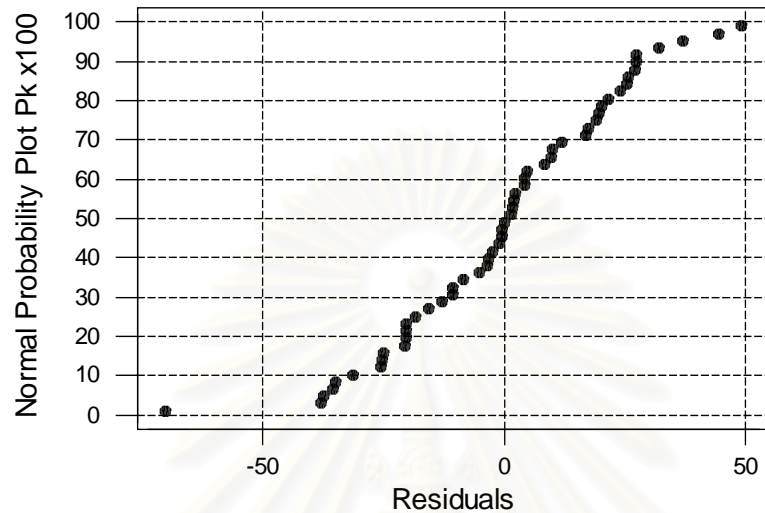
ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นที่ได้จากการ
วิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P Value ออกมาให้ ซึ่ง
ในการพิจารณาค่า P Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ใน
แต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น แต่ถ้าค่า P
Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าปัจจัยนั้นๆ ไม่มีผลต่อการเกิดเหล็ก
ปลายสั้น โดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05

3.4.3.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking) [5]

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้
ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติ
หรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

3.4.3.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบ
ปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง
(Residual) เป็นการพล็อตค่าส่วนตกค้าง ลงบนกราฟที่เรียกว่า Normal Probability Paper ซึ่งพ
ล็อตระหว่างส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง
ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 3.31 ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อ
ถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากการกระจายของข้อมูลเป็นแบบปกติ รูปที่พล็อตขึ้นมาจะ
เป็นเส้นตรง นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

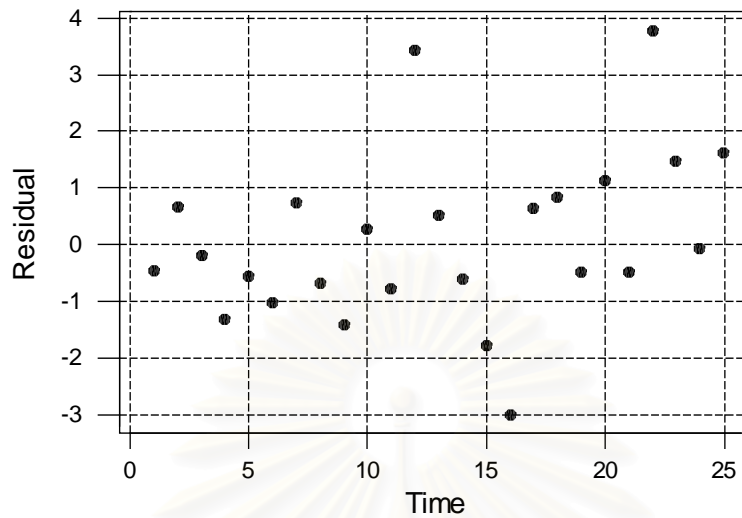
Normal Probability Plot of the Residuals



รูปที่ 3.31 แสดงตัวอย่าง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

3.4.3.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ ซึ่งทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) ซึ่งค่าส่วนตกค้างแต่ละค่าควรเป็นอิสระซึ่งกันและกันทั้งนี้ต้องได้จากการทำการทดลองแบบสุ่มที่เหมาะสม โดยจะทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอนแสดงดังรูปที่ 3.32 ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากข้อมูลมีความเป็นอิสระรูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไปไม่เป็นแนวโน้ม (Trend) นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งาน

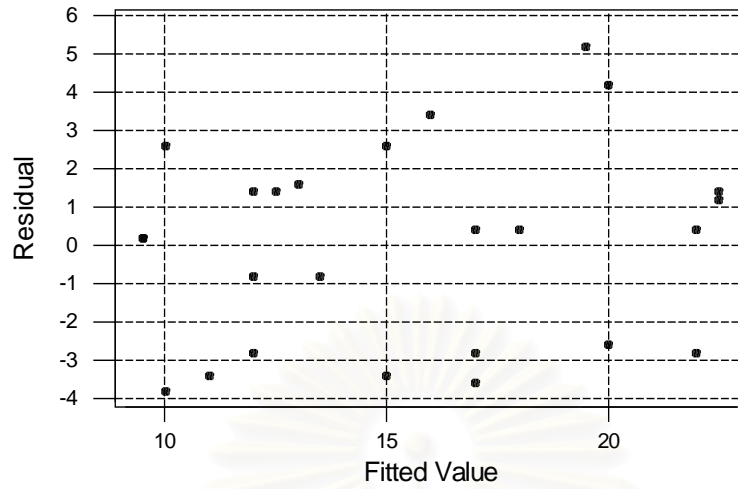
Residual Versus Time



รูปที่ 3.32 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในส่วนของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

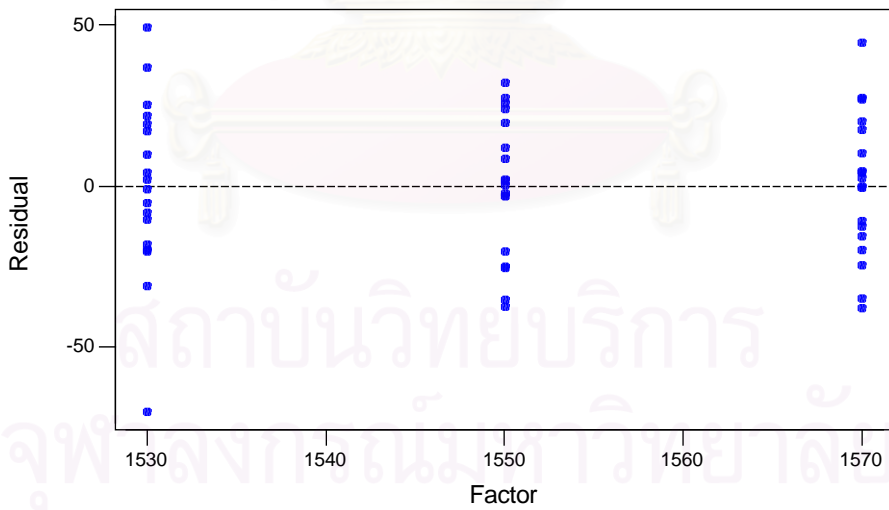
3.4.3.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 3.33 ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะกระจายอยู่ทั่วไป ไม่มีรูปแบบหรือโครงสร้างใดๆทั้งสิ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งไม่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรอื่นใด และทดสอบโดยทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และระดับของปัจจัยอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 3.34 ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล รูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก แต่ถ้ารูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะเป็นการเพิ่มขึ้นหรือลดลงเป็นลำดับ (Megaphone) แสดงว่าข้อมูลนั้นไม่มีความเสถียรของความแปรปรวนหรือไม่มีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล ทั้งนี้เพื่อให้มั่นใจได้ว่าข้อมูลมีความน่าเชื่อถือก่อนที่จะนำไปใช้งาน ถ้าหากข้อมูลมีความเสถียรของความแปรปรวนหรือมีความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูลรูปที่พล็อตขึ้นมาจะมีลักษณะการกระจายดังกล่าวข้างต้น นั่นก็หมายความว่าข้อมูลมีความเหมาะสมที่จะนำไปวิเคราะห์

Residual Versus Fitted Value



รูปที่ 3.33 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับค่าที่ถูกฟิตในส่วนของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Residuals Versus Factor
(response is Response)



รูปที่ 3.34 แสดงตัวอย่างค่าส่วนตกค้างกับระดับของปัจจัยในส่วนของการทดลอง เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

3.5 การประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก

ในการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลักนี้ จะใช้การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร (Test of Two Parameters) โดยทดสอบสมมติฐานว่า ค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการแจกแจงของความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีค่าเท่ากัน โดยที่ไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน (Test of the hypothesis that the means of two normal distributions are equal, assuming that the standard deviations are unknown but equal.)

การวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการแจกแจงของความน่าจะเป็นแบบปกติให้ x และ y คือประชากรที่ให้ความสนใจ 2 ชุด ซึ่งมีการแจกแจงแบบปกติ โดยมีค่าเฉลี่ยคือ μ_x และ μ_y และมีความแปรปรวนคือ σ_x^2 และ σ_y^2 ตามลำดับ โดยที่ x และ y มีความเป็นอิสระต่อกัน และ $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ ซึ่งสามารถกำหนดวิธีการตัดสินใจในการทดสอบสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

โดยเป็นกรณีการทดสอบสองด้าน

$$H_0 : \mu_x = \mu_y$$

$$H_1 : \mu_x \neq \mu_y$$

ในการวิเคราะห์นี้จะใช้การทดสอบ t-test โดยจะทำการหาค่า t critical ซึ่งหาได้จาก

$$t \text{ critical} = \frac{\bar{X} - \bar{Y}}{S_p(1/n_x + 1/n_y)^{1/2}}$$

$$\text{โดยที่ } S_p = \frac{(n_x - 1)^{1/2} S_x + (n_y - 1)^{1/2} S_y}{(n_x + n_y - 2)^{1/2}}$$

โดยที่ค่า $t_{\alpha/2, n_x + n_y - 2}$ สามารถหาได้จากตาราง t แต่ในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร มีค่าแตกต่างกัน แต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ในแต่ละปัจจัย มีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร มีค่าไม่แตกต่างกัน โดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05

3.6 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น จะใช้แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) [4] ในการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab Release 13.20 มาช่วยในการวิเคราะห์ แบบจำลองการถดถอยที่ใช้วิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

3.6.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน (Multiple Linear Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon$$

3.6.2 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและกำลังสอง (Linear and Square Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและกำลังสอง เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นโค้งเชิงเส้นและกำลังสอง ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \varepsilon$$

3.6.3 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและอันตรกิริยา (Linear and Interactions Regression Model)

แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและอันตรกิริยา เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นโค้งเชิงเส้นและอันตรกิริยา ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon$$

3.6.4 แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งพหุนาม (Polynomial) ดีกรี 2 ที่มี 3 ตัวแปรอิสระ หรือ Full Quadratic เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระ ซึ่งในการวิจัยนี้ใช้ตัวแปรอิสระ 3 ตัวแปร โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นโค้งพหุนาม ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{33} x_3^2 + \varepsilon$$

หลังจากได้แบบจำลองการถดถอยในรูปแบบต่างๆ ดังกล่าวข้างต้น จะทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย [5] เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอย โดยตรวจสอบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม y และตัวแปรอิสระ x_1, x_2 และ x_3 หรือไม่ โดยมีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 ; \text{ อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า } j$$

การวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย แสดงดังตารางที่ 3.3

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F_0
Regression	SS_R	k	SS_R/DF	MS_R/MS_E
Error	SS_E	n-k-1	SS_E/DF	
Total	SS_T	n-1		

ตารางที่ 3.3 แสดงการคำนวณการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย

ในการพิจารณาความมีนัยสำคัญของการถดถอย จะพิจารณาจากค่า F-Ratio ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยที่ในทางทฤษฎีจะทำการเปรียบเทียบค่า F-Ratio กับค่า F วิกฤติ ที่หาได้จากการเปิดตาราง F โดยที่

ถ้า F-Ratio มากกว่าค่า F วิกฤติ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญของการถดถอย

ถ้า F-Ratio น้อยกว่าค่า F วิกฤติ แสดงว่าแบบจำลองการถดถอย ไม่มีนัยสำคัญของการถดถอย

ในการพิจารณาความมีนัยสำคัญของการถดถอย ที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งในโปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ จะคำนวณค่า P Value ออกมาให้ ซึ่งในการพิจารณาค่า P Value นั้น จะทำการเปรียบเทียบกับค่า α ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ มีค่าน้อยกว่าค่า α แสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญของการถดถอย แต่ถ้าค่า P Value ที่คำนวณได้ มีค่ามากกว่าค่า α แสดงว่าแบบจำลองการถดถอย ไม่มีนัยสำคัญของการถดถอย โดยในการวิจัยนี้ได้กำหนดให้ค่า α มีค่าเท่ากับ 0.05

เมื่อทราบแบบจำลองการถดถอยแล้ว จะต้องตรวจสอบขนาดของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ที่เรียกว่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square) แสดงโดยใช้ค่าสัดส่วนของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ต่อความแปรปรวนที่เกิดขึ้นทั้งหมดในตัวแปรตาม เขียนเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$R\text{-Square} = SS_R/SS_T$$

โดยที่ SS_R คือผลรวมกำลังสองของการถดถอยแบบ

SS_T คือผลรวมกำลังสองทั้งหมด

$SS_T = SS_R + SS_E$; SS_E คือผลรวมกำลังสองของค่าผิดพลาดแบบสุ่ม

R-Square ควรมีค่าเข้าใกล้ 1 เช่น R-Square = 0.9 แสดงว่า 90% ของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นในตัวแปรตามที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระ ส่วนอีก 10% ที่เหลือควรจะเนื่องมาจากปัจจัยอื่นๆ ซึ่งทำให้แบบจำลองการถดถอยมีความน่าเชื่อถือ

การเลือกรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด จะพิจารณาที่ค่า R-Square ที่สูงที่สุด จากทั้ง 4 รูปแบบของแบบจำลองการถดถอย และพิจารณาตามหลักการ [4] ดังนี้

- เป็นสมการที่สามารถพยากรณ์ค่าตัวแปรตามได้แม่นยำที่สุด โดยต้องการที่จะมีตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อ y ให้มากที่สุด ในสมการ เพื่อให้สมการมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด
- ไม่ต้องการใช้ตัวแปรอิสระในสมการมากเกินไป

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการวิเคราะห์

4.1 ผลการศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

จากการศึกษาการคัดเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น เมื่อพิจารณาโดยการระดมสมอง (Brainstorming) จากผู้เชี่ยวชาญ ผู้มีประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องโดยอ้างอิงตามหลักการทางวิศวกรรม ข้อมูลจากการทดลองในอดีต รวมทั้งข้อจำกัดในทางปฏิบัติต่างๆ มาพิจารณาร่วมกันเพื่อหาปัจจัยที่จะนำมาใช้ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นซึ่งสรุปได้ดังตารางที่ 4.1 และพบว่าปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นในกระบวนการหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่องนั้น มีทั้งหมด 10 ปัจจัย ซึ่งสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นเบื้องต้น ได้ดังตารางที่ 4.2



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับ	ปัจจัยที่เกี่ยวข้อง	ระดับอิทธิพลของปัจจัย					
		5	4	3	2	1	0
1	ตัวเสื้อโมลด์ (Mould Jacket)						x
2	ชุดเขย่าโมลด์ (Mould Oscillation Unit)						x
3	ชุดควบคุมระดับน้ำเหล็กในโมลด์ (Mould Level Control)						x
4	ชุดลูกกลิ้งใต้โมลด์ (Foot Roller)						x
5	อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water)				**		
6	อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)	*****					
7	อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2)			***			
8	อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil)					*	
9	ความเร็วในการหล่อเหล็กแ่ง (Casting Speed)		****				
10	อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)		****				
11	โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould)					*	
12	ชนิดของเหล็กแ่ง (Billet Type)				**		
13	สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand)				**		
14	พนักงานหล่อเหล็กแ่ง (Casting Operator)			***			
15	ชุดกดเหล็กแ่ง (Withdrawal Unit)						x
<p>ผู้เชี่ยวชาญประกอบด้วย : 1. ผู้จัดการส่วนผลิตเหล็กแ่ง 1 คน (มีอายุงานด้านงานหล่อ 2. วิศวกรอาวุโส 1 คน เหล็กแ่งตั้งแต่ 10 ปีขึ้นไป) 3. วิศวกร 3 คน 4. ผู้จัดการแผนกหลอมเหล็ก 1 คน 5. ผู้จัดการแผนกหล่อเหล็กแ่ง 1 คน 6. หัวหน้างานประจำกะ 4 คน 7. พนักงานหล่อเหล็กแ่งประจำกะ 4 คน รวมทั้งสิ้น 15 คน</p>							

ตารางที่ 4.1 แสดงปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในการเกิดเหล็กปลายสั้น

Item	Factor	Specification	Measurement
1	อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water)	1. Billet หน้าตัด 120x120 mm ² : 1,600-2,000 Ltr/min 2. Billet หน้าตัด 130x170 mm ² : 1,800-2,200 Ltr/min	Magnetic Flow Meter -Flow Range : 0-2,500 tr/min Ltr/min
2	อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็ก แห่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)	1. Billet หน้าตัด 120x120 mm ² : 80-160 Ltr/min 2. Billet หน้าตัด 130x170 mm ² : 100-200 Ltr/min	Magnetic Flow Meter -Flow Range : 0-250 Ltr/min Ltr/min
3	อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็ก แห่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2)	1. Billet หน้าตัด 120x120 mm ² : 40-80 Ltr/min 2. Billet หน้าตัด 130x170 mm ² : 60-100 Ltr/min	Magnetic Flow Meter -Flow Range : 0-150 Ltr/min Ltr/min
4	อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil)	1. Billet หน้าตัด 120x120 mm ² : 70-90 cc/min 2. Billet หน้าตัด 130x170 mm ² : 70-90 cc/min	Oil Flow Meter -Flow Range : 0-120 cc/min cm ³ /min
5	ความเร็วในการหล่อเหล็กแห่ง (Casting Speed)	1. Billet หน้าตัด 120x120 mm ² : 2.00-3.00 m/min 2. Billet หน้าตัด 130x170 mm ² : 0.90-1.70 m/min	Casting Speed Meter -Speed Range : 0-4 m/min m/min
6	อุณหภูมิเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)	Liquidus Temperature + 30°c	Measure Temperature Device Temp. Range:150-1,800°c
7	โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould)	Max. 500 Times	Counting
8	ชนิดของเหล็กแห่ง (Billet Type)	Low Carbon, Midium Carbon And High Carbon Billet	Qvac Lab
9	สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand)	3 Lines	Observation
10	พนักงานหล่อเหล็กแห่ง (Casting Operator)	Skill	Learning Curve

ตารางที่ 4.2 แสดงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นทั้งหมด

4.1. อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water)

อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water) คืออัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อโมลด์สำหรับหล่อเป็นเหล็กแท่งขนาดหน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ $130 \times 170 \text{ mm}^2$ โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 1,600-2,000 Ltr/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 1,800-2,200 Ltr/min

4.1.2 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)

อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) คือ อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 หลังจากที่เหล็กแท่งออกมาจากโมลด์แล้ว โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 80-160 Ltr/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 100-200 Ltr/min

4.1.3 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2)

อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2) คือ อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 หลังจากที่เหล็กแท่งออกมาจากช่วงน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 แล้ว โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 40-80 Ltr/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 60-100 Ltr/min

4.1.4 อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil)

อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil) คือ อัตราการไหลของน้ำมันที่ใช้ในการหล่อโมลด์ เพื่อไม่ให้ผิวของเหล็กแท่งติดกับโมลด์ทองแดงในขณะที่หล่อ โดยอัตราการไหลของน้ำมันที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ เท่ากันคือ $70-90 \text{ cm}^3/\text{min}$

4.1.5 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed)

ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) คือ ความเร็วที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง โดยความเร็วที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 2.00-3.00 m/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 0.90-1.70 m/s

4.1.6 อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)

อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) คืออุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิชในขณะหล่อ โดยอุณหภูมิน้ำเหล็กที่เหมาะสม สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ อุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ 30 องศาเซลเซียส (Liquidus Temperature + 30c)

4.1.7 โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould)

โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould) คือ โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง โดยอายุของโมลด์ทองแดง สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ เท่ากันคือ 500 ครั้งที่ใช้ในการหล่อ

4.1.8 ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type)

ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type) คือเหล็กแท่งที่โรงงานตัวอย่างผลิต ที่มี Chemical Composition ต่างกัน ประกอบด้วยประเภทต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

4.1.8.1 เหล็กแท่งชนิด SS

เหล็กแท่งชนิด SS คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 120×120 มิลลิเมตร ความยาว 4.6 เมตร น้ำหนัก 112 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 490 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กฉาก ,เหล็กวางน้ำ ได้แก่ Type SS400 และ SS540

4.1.8.2 เหล็กแท่งชนิด D

เหล็กแท่งชนิด D คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 120 x 120 มิลลิเมตร ความยาว 4.6 เมตร น้ำหนัก 112 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 490 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กเส้นกลม ,เหล็กข้ออ้อย ได้แก่ Type D40T และ D40

8.1.8.3 เหล็กแท่งชนิด M

เหล็กแท่งชนิด M คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 130 x 170 มิลลิเมตร ความยาว 12 เมตร น้ำหนัก 172 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 2,000 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กหลอด ได้แก่ Type M8,M10,M12 และ M15

8.1.8.4 เหล็กแท่งชนิด S

เหล็กแท่งชนิด S คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 130 x 170 มิลลิเมตร ความยาว 12 เมตร น้ำหนัก 172 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 2,000 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กเพลลา ได้แก่ Type S35C และ S45C

8.1.8.5 เหล็กแท่งชนิด H

เหล็กแท่งชนิด H คือ เหล็กแท่งที่มีหน้าตัด 130 x 170 มิลลิเมตร ความยาว 12 เมตร น้ำหนัก 172 kg/m น้ำหนักต่อแท่ง 2,000 kg สำหรับนำไปรีดเป็นผลิตภัณฑ์ เหล็กหลอดเกรดคาร์บอนสูง ได้แก่ Type H62A,H62B,H67B และ H82B

4.1.9 สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand)

สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand) คือสายการผลิตที่ใช้ในการหล่อ มีทั้งหมด 3 สายการผลิต เรียงกัน

4.1.10 พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator)

พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator) คือ พนักงานที่ทำหน้าที่หล่อเหล็กแท่ง โดยจะมีความชำนาญในการหล่อเหล็กแท่ง

4.2 ผลการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

4.2.1 ปัจจัยหลักที่ถูกเลือกใช้ในการวิจัย

จากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น เมื่อพิจารณาโดยการระดมสมอง (Brainstorming) โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกปัจจัยหลักคือ ปัจจัยหลักนั้นจะต้องมีระดับอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่ระดับ 4 ขึ้นไป ซึ่งจากตารางที่ 4.1 พบว่าปัจจัยที่มีระดับอิทธิพลของปัจจัยตั้งแต่ ระดับ 4 ขึ้นไป มี 3 ปัจจัย ซึ่งจะนำมาใช้ในการวิจัย ได้แก่

4.2.1.1 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)

4.2.1.2 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed)

4.2.1.3 อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)

4.2.2 ปัจจัยที่ไม่ถูกเลือกใช้ในการวิจัย

ปัจจัยที่ไม่ถูกเลือกใช้ในการวิจัย มีดังต่อไปนี้

4.2.2.1 อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water)

4.2.2.2 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2)

4.2.2.3 อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil)

4.2.2.4 โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould)

4.2.2.5 ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type)

4.2.2.6 สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand)

4.2.2.7 พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator)

ทั้งในส่วน of ปัจจัยที่ถูกเลือกและไม่ได้ถูกเลือกในการวิจัย ผู้วิจัยได้สรุปเหตุผลไว้ดังตารางที่ 4.3 และตารางที่ 4.4 ตามลำดับ

ปัจจัย	เหตุผลที่เลือกใช้ปัจจัย
<p>1. อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็ก แห่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)</p>	<p>อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) คือ อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 หลังจากหล่อเหล็กแห่งออกจากโมลด์แล้ว โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้สำหรับ Billet หน้าตัด 120x120 mm² คือ 80-160 Ltr/min และ Billet หน้าตัด 130x170 mm² คือ 100-200 Ltr/min หากอัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงไป ก็จะทำให้เหล็กแห่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับสูงมาก ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อเหล็กปลายสั้น</p>
<p>2. ความเร็วในการหล่อเหล็กแห่ง (Casting Speed)</p>	<p>ความเร็วในการหล่อเหล็กแห่ง (Casting Speed) คือ ความเร็วที่ใช้ในการหล่อเหล็กแห่ง โดยความเร็วที่ใช้สำหรับ Billet หน้าตัด 120x120 mm² คือ 2.00-3.00 m/min และ Billet หน้าตัด 130x170 mm² คือ 0.90-1.70 m/min หากความเร็วเปลี่ยนแปลงไป ก็จะทำให้เหล็กแห่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับสูง ดังนั้น ความเร็วในการหล่อเหล็กแห่ง (Casting Speed) จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อเหล็กปลายสั้น</p>
<p>3. อุณหภูมิเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)</p>	<p>อุณหภูมิเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) คือ อุณหภูมิเหล็กในทันดิชในขณะที่หล่อ โดยอุณหภูมิเหล็กที่เหมาะสมสำหรับ Billet หน้าตัด 120x120 mm² และ Billet หน้าตัด 130x170 mm² คือ อุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ 30 องศาเซลเซียส (Liquidus Temperature + 30c) อุณหภูมิเหล็กในทันดิชจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของเหล็กแห่ง หากอุณหภูมิเหล็กในทันดิชเปลี่ยนแปลงไป ก็จะทำให้เหล็กแห่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับสูง ดังนั้น อุณหภูมิเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อเหล็กปลายสั้น</p>

ตารางที่ 4.3 แสดงการสรุปเหตุผลที่เลือกใช้ปัจจัยต่างๆ

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
<p>1. อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water)</p>	<p>อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water) คืออัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อโมลด์สำหรับหล่อเป็นเหล็กแท่งขนาดหน้าตัด 120 x 120 mm² และ 130 x170 mm² โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด 120x120 mm² คือ 1,600-2,000 Ltr/min และ Billet หน้าตัด 130x170 mm² คือ 1,800-2,200 Ltr/min หากอัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนไป ก็จะทำให้เหล็กแท่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับต่ำ เนื่องจากไม่ได้สัมผัสกับเหล็กแท่งโดยตรง และเนื่องจากเมื่อมีการเพิ่มหรือลดอัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์อาจสร้างความเสียหายต่อกระบวนการการผลิตเหล็กแท่งได้ จึงควบคุมให้คงที่ซึ่งสามารถควบคุมได้ ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water) จึงไม่เป็นปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้</p>
<p>2. อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2)</p>	<p>อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2) คือ อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 หลังจากที่เหล็กแท่งออกมาจากช่วงน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 แล้ว โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด 120x120 mm² คือ 40-80 Ltr/min และ Billet หน้าตัด 130x170 mm² คือ 60-100 Ltr/min หากอัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนไป ก็จะทำให้เหล็กแท่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับปานกลาง แต่เนื่องจากสถานะเหล็กแท่งในช่วงนี้เกิดการแข็งตัวเกือบเต็มหน้าตัดแล้ว ซึ่งอาจส่งผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นไม่ชัดเจนนัก จึงควบคุมให้คงที่ซึ่งสามารถควบคุมได้ ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2) จึงไม่เป็นปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้</p>

ตารางที่ 4.4 แสดงการสรุปเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
<p>3. อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil)</p>	<p>อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil) คือ อัตราการไหลของน้ำมันที่ใช้ในการหล่อโมลด์ เพื่อไม่ให้ผิวของเหล็กแท่งติดกับโมลด์ทองแดงในขณะที่หล่อ โดยอัตราการไหลของน้ำมันที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ เท่ากันคือ $70-90 \text{ cm}^3/\text{min}$ หากอัตราการไหลของน้ำมันเปลี่ยนไป จะมีผลทำให้เหล็กแท่งเกิดการเย็นตัวที่ต่างกัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับต่ำมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดเหล็กปลายสั้นไม่ชัดเจนนัก จึงควบคุมให้คงที่ซึ่งสามารถควบคุมได้ ดังนั้น อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil) จึงไม่เป็นปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้</p>
<p>4. โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould)</p>	<p>โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould) คือ โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง โดยอายุของโมลด์ทองแดง สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ เท่ากันคือ 500 ครั้งที่ใช้ในการหล่อ หากอายุของโมลด์ทองแดงเปลี่ยนไป จะทำให้เหล็กแท่งมีโอกาสแตกขณะหลอมมากขึ้น หากอายุของโมลด์ทองแดงมากขึ้น จะมีผลทำให้เหล็กแท่งเกิดการเย็นตัวที่ต่างกัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับต่ำมาก ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อเกิดการเกิดเหล็กปลายสั้นไม่ชัดเจนนัก จึงควบคุมให้คงที่ซึ่งสามารถควบคุมได้ ดังนั้น โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould) จึงไม่เป็นปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้</p>
<p>5. ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type)</p>	<p>ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type) คือเหล็กแท่งที่โรงงานตัวอย่างผลิต ที่มี Chemical Composition ต่างกัน เนื่องจากเหล็กแท่งเหล็กแท่งแต่ละชนิด มี Chemical Composition ที่ต่างกัน หากชนิดของเหล็กแท่งเปลี่ยนไป ก็จะทำให้เหล็กแท่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้น ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type) จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อเหล็กปลายสั้น แต่การศึกษานี้ จะศึกษาเฉพาะเหล็กแท่ง Type M15 ชนิดเดียว ดังนั้น ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type) จึงไม่เป็นปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้</p>

ตารางที่ 4.4 แสดงการสรุปเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ (ต่อ)

ปัจจัย	เหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัย
<p>6. สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand)</p>	<p>สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand) คือสายการผลิตที่ใช้ในการหล่อ มีทั้งหมด 3 สายการผลิต เรียงกัน ในขณะที่หล่อ สายการผลิตที่ 2 จะได้รับอิทธิพลของอุณหภูมิภายนอกมากกว่าสายการผลิตที่ 1 และ 3 เนื่องจากสายการผลิตที่ 2 อยู่ตรงกลาง หากสายผลิตในการหล่อต่างกัน ก็จะทำให้เหล็กแท่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับต่ำ ดังนั้น สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand) จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อเหล็กปลายสั้น แต่การศึกษานี้ จะศึกษาเฉพาะเหล็กแท่ง ที่สายการผลิตที่ 3 สายการผลิตเดียว ดังนั้น สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand) จึงไม่เป็นปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์</p>
<p>7. พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator)</p>	<p>พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator) คือ พนักงานที่ทำหน้าที่หล่อเหล็กแท่ง โดยจะมีความชำนาญในการหล่อเหล็กแท่ง หากพนักงานที่ทำหน้าที่หล่อเหล็กแท่ง มีความชำนาญในการหล่อเหล็กแท่งไม่เท่ากัน อาจจะทำให้เหล็กแท่งเกิดการเย็นตัวไม่เท่ากัน มีผลให้เกิดเหล็กปลายสั้นความยาวไม่เท่ากัน โดยมีระดับอิทธิพลของปัจจัยอยู่ในระดับปานกลาง ดังนั้น พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator) จึงเป็นปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อเหล็กปลายสั้น แต่การศึกษานี้ พนักงานหล่อเหล็กแท่งเป็นปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้ เพราะพนักงานหล่อเหล็กแท่งมีหลายคน ทำงานหลายกะ ดังนั้นจึงทำการบล็อก จัดกลุ่มทำการเก็บข้อมูลเป็นช่วงเพื่อลดผลจากปัจจัยที่ควบคุมไม่ได้นี้ ดังนั้น พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator) จึงไม่เป็นปัจจัยที่นำมาวิเคราะห์ในการทดลองนี้</p>

ตารางที่ 4.4 แสดงการสรุปเหตุผลที่ไม่เลือกปัจจัยต่างๆ (ต่อ)

จากการพิจารณาปัจจัยทั้งหมดข้างต้น สามารถสรุปปัจจัยที่ถูกเลือกและปัจจัยที่ควบคุมพร้อมทั้งค่าที่ใช้ในปัจจุบัน แสดงดังตารางที่ 4.5 และตารางที่ 4.6 ตามลำดับ

ปัจจัย	หน่วย	ค่าปัจจุบัน
1. อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)	Ltr/min	150
2. ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed)	m/min	1.30
3. อุณหภูมิของน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)	°c	1,550

ตารางที่ 4.5 แสดงปัจจัยที่ถูกเลือกในการทดลอง

ปัจจัย	หน่วย	ค่าปัจจุบัน
1. อัตราการไหลของน้ำหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Water)	Ltr/min	2,000
2. อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 2)	Ltr/min	80
3. อัตราการไหลของน้ำมันหล่อโมลด์ (Flow Rate of Mould Cooling Oil)	cm ³ /min	80
4. โมลด์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Copper Mould)	ชนิดวัสดุ	ทองแดง
5. ชนิดของเหล็กแท่ง (Billet Type)	Type	1
6. สายผลิตในการหล่อ (Casting Strand)	Strand	1
7. พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (Casting Operator)	คน	1

ตารางที่ 4.6 แสดงปัจจัยที่ถูกควบคุมในการทดลอง

4.2.3 การกำหนดระดับของปัจจัย

จากการวิเคราะห์ในหัวข้อที่ 4.2.1 และ 4.2.2 ได้แสดงผลต่างๆในการเลือกปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นในกระบวนการการผลิตเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง ตลอดจนการพิจารณาถึงการควบคุมปัจจัยอื่นๆ ที่จะมีผลกระทบต่อ การเกิดเหล็กปลายสั้น โดยได้เลือกปัจจัยที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) และ อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) ซึ่งสามารถกำหนดระดับของปัจจัยได้ดังต่อไปนี้

4.2.3.1 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)

อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) คือ อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 หลังจากที่เหล็กแท่งออกมาจากโม่แล้ว โดยอัตราการไหลของน้ำที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 80-160 Ltr/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 100-200 Ltr/min โดยการวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการการเกิดเหล็กปลายสั้น ของเหล็กแท่ง Type M15 ซึ่งมีหน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ ดังนั้นปริมาณน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 100 ถึง 200 Ltr/min ซึ่งในสภาวะการผลิตปัจจุบัน กำหนดไว้ที่ 150 Ltr/min และกำหนดระดับของอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 เพิ่มขึ้นและลดลง 50 Ltr/min เนื่องจากหากใช้อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 เพิ่มขึ้นหรือลดลง จะมีผลทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวไม่เท่ากัน ซึ่งการปรับค่าอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 สามารถปรับค่าที่แมงควบคุมอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ได้โดยง่าย ดังนั้นจึงแบ่งอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 คือ 100 Ltr/min

ระดับที่ 2 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 คือ 150 Ltr/min

ระดับที่ 3 อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 คือ 200 Ltr/min

โดยปัจจัยระดับที่ 1 กับระดับที่ 3 ใช้ในการทดลองเบื้องต้น หลังจากนั้นใช้ปัจจัยทั้ง 3 ระดับ ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม

4.2.3.2 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed)

ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) คือ ความเร็วที่ใช้ในการหล่อเหล็กแท่ง โดยความเร็วที่ใช้ สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ คือ 2.00-3.00 m/min และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ 0.90-1.70 m/min โดยการวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการการเกิดเหล็กปลายสั้น ของเหล็กแท่ง Type M15 ซึ่งมีหน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ ดังนั้นความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ที่ใช้จะอยู่ในช่วง 0.90 ถึง 1.70 m/min ซึ่งในสภาวะการผลิตปัจจุบัน กำหนดไว้ที่ 1.30 m/min และกำหนดระดับของความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง เพิ่มขึ้นและลดลง 0.40 m/min เนื่องจากหากใช้ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง เพิ่มขึ้นหรือลดลง จะมีผลทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวไม่เท่ากัน ซึ่งการปรับค่าความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง สามารถปรับค่าที่แผงควบคุมความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งได้โดยง่าย ดังนั้นจึงแบ่งความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง คือ 0.90 m/min

ระดับที่ 2 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง คือ 1.30 m/min

ระดับที่ 3 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง คือ 1.70 m/min

โดยปัจจัยระดับที่ 1 กับระดับที่ 3 ใช้ในการทดลองเบื้องต้น หลังจากนั้นใช้ปัจจัยทั้ง 3 ระดับ ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม

4.2.3.3 อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)

อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) คืออุณหภูมิ น้ำเหล็กในทันดิชในขณะที่หล่อ โดยอุณหภูมิที่น้ำเหล็กที่เหมาะสม สำหรับ Billet หน้าตัด $120 \times 120 \text{ mm}^2$ และ Billet หน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ คือ อุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวอยู่ 30 องศาเซลเซียส (Liquidus Temperature + 30°C) โดยการวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการการเกิดเหล็กปลายสั้น ของเหล็กแท่ง Type M15 ซึ่งมีหน้าตัด $130 \times 170 \text{ mm}^2$ มีอุณหภูมิหลอมเหลว $1,520^\circ\text{C}$ โดยอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช ที่ใช้จะอยู่ในช่วง $1,530$ ถึง $1,570^\circ\text{C}$ ซึ่งในสภาวะการผลิตปัจจุบัน กำหนดไว้ที่ $1,550^\circ\text{C}$ และกำหนดระดับของอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช เพิ่มขึ้นและลดลง 20°C เนื่องจากหากอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช เพิ่มขึ้นหรือลดลง จะมีผลทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวไม่เท่ากัน ซึ่งการปรับค่าอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช สามารถปรับค่าได้โดยการขออุณหภูมิ น้ำเหล็กในบ้ำที่เตาปรงแตงน้ำเหล็ก (Ladle Furnace : LF) ก่อนที่จะส่งมาให้เครื่องหล่อเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง

(Continuous Casing Machine : CCM) จากข้อมูลในเชิงสถิติในระบบการการผลิตเหล็กแท่งอย่างต่อเนื่องของโรงงานตัวอย่าง อุณหภูมิในเบ้าจะลดลง (Drop) นาทึละ 1 องศาเซลเซียส ที่ระดับความเชื่อมั่นอย่างมีนัยสำคัญ โดยการหล่อเหล็กจะใช้เวลาประมาณ 60 นาที ดังนั้นจึงสามารถกำหนดอุณหภูมิหน้าเหล็กในทันดิชได้ง่าย ดังนั้นจึงแบ่งอุณหภูมิหน้าเหล็กในทันดิช ออกเป็น 3 ระดับ คือ

ระดับที่ 1 อุณหภูมิหน้าเหล็กในทันดิช คือ 1,530°c

ระดับที่ 2 อุณหภูมิหน้าเหล็กในทันดิช คือ 1,550°c

ระดับที่ 3 อุณหภูมิหน้าเหล็กในทันดิช คือ 1,570°c

โดยปัจจัยระดับที่ 1 กับระดับที่ 3 ใช้ในการทดลองเบื้องต้น หลังจากนั้นใช้ปัจจัยทั้ง 3 ระดับ ในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม

สามารถสรุปปัจจัยและระดับของปัจจัยได้ดังตารางที่ 4.7

ปัจจัย	สัญลักษณ์	ระดับของปัจจัย		
		-(ต่ำ)	0(กลาง)	+(สูง)
1. อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) (Ltr/min)	A	100	150	200
2. ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) (m/min)	B	0.90	1.30	1.70
3. อุณหภูมิหน้าเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) (°c)	C	1,530	1,550	1,570

ลดาบหน่วยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.7 แสดงการกำหนดปัจจัยและระดับของปัจจัยในการทดลอง

4.2.4 การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response Variables)

จากการกำหนดปัญหาที่สนใจในหัวข้อที่ 2.5 ผู้วิจัยมีความสนใจในการลดความยาวของเหล็กปลายสั้นในกระบวนการการผลิตเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง ดังนั้นตัวแปรตอบสนอง (Response Variables) คือความยาวของเหล็กปลายสั้น ซึ่งตัวแปรตอบสนองนี้จะมีลักษณะเป็นเชิงปริมาณ (Quantitative) โดยใช้ตัววัดที่ผ่านการสอบเทียบเรียบร้อยแล้ว วัดความยาวของเหล็กปลายสั้น โดยใช้ผู้วัดคนเดียวเพื่อลดปัญหาการเกิดความผิดพลาดเนื่องจากคน (Human Error) ซึ่งเมื่อได้ข้อมูลจากการตรวจสอบความยาวแล้ว ก็จะนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อมูลในขั้นตอนต่อไป

4.2.5 การเลือกแผนการออกแบบการทดลอง

4.2.5.1 การทดลองเบื้องต้น

สำหรับแผนการทดลองเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 4.8

4.2.5.2 การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

สำหรับแผนการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.12

แผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น		
1. วัตถุประสงค์ เพื่อตัดปัจจัยที่ไม่มีอิทธิพลต่อการเกิดขึ้นของเหล็กปลายสั้นออกไป และยังช่วยลดเวลาและทรัพยากรในการทดลอง เนื่องจากไม่สามารถทำการทดลองทุกค่าของแต่ละปัจจัยได้		
2. ข้อมูลพื้นฐาน ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดขึ้นของเหล็กปลายสั้นเบื้องต้น		
3. ตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลอง		
3.1 ตัวแปรตอบสนอง ความยาวของเหล็กปลายสั้น	ค่าที่วัด	
	mm	
3.2 ปัจจัย 3.2.1 น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min) 3.2.2 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (m/min) 3.2.3 อุณหภูมิน้ำเหล็กในถังดิซ (°c)	ระดับ	
	-(ต่ำ)	+(สูง)
	100	200
	0.90	1.70
	1,530	1,570
3.3 ปัจจัยที่ควบคุม 3.3.1 น้ำหล่อโมลต์ (Ltr/min) 3.3.2 น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Ltr/min) 3.3.3 น้ำมันหล่อโมลต์ (cm ³ /min) 3.3.4 โมลต์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Type) 3.3.5 ชนิดของเหล็กแท่ง (Type) 3.3.6 สายผลิตในการหล่อ (Strand No.) 3.3.7 พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (คน)	ค่าที่ควบคุม	
	2,000	
	80	
	80	
	CU Mould	
	M15	
	3	
	1	
4. จำนวนซ้ำ การทดลองทั้งหมด $2^3 = 8$ ทำซ้ำ 2 ครั้ง ทั้ง 16 การทดลอง		
5. เมตริกการออกแบบการทดลอง เมตริกการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.9		
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.10		
7. ตารางบันทึกผล ตารางบันทึกผล แสดงดังตารางที่ 4.11		

ตารางที่ 4.8 แสดงแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น

8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง
8.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)
8.2 กราฟตัวแปรตอบสนอง (Response Plot)
8.3 กราฟค่า Residual (Residual Plot)
8.4 อื่นๆ
9. ระยะเวลาการทดลอง
ตุลาคม 2545
10. เวลาทำการทดลอง
เบ้าสุดท้ายในรอบ Sequence ช่วงปลาย cast
11. การตัดตัวอย่าง
พนักงานห้องเชียร์ตัดเหล็กปลายสั้นที่ Strand No.3
12. การตรวจสอบความยาวตัวอย่าง
พนักงาน QVAC รับเหล็กปลายสั้นจาก พนักงานห้องเชียร์ แล้วนำเหล็กปลายสั้นกึ่งตามแนว Center Line ตลอดความยาว (ส่งให้ผู้รับเหมาภายนอกกึ่งเหล็กปลายสั้น) เพื่อดูความยาวรูกลวงของเหล็กปลายสั้น
13. อื่นๆ

ตารางที่ 4.8 แสดงแผนการออกแบบการทดลองเบื้องต้น (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2 ³ Factorial Design					
Run	ปัจจัย			ความยาวเหล็กปลายสั้น (mm)	
	A	B	C	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	-	-	-		
2	+	-	-		
3	-	+	-		
4	+	+	-		
5	-	-	+		
6	+	-	+		
7	-	+	+		
8	+	+	+		

ระดับต่ำ -

ระดับสูง +

A=อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)

B=ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (m/min)

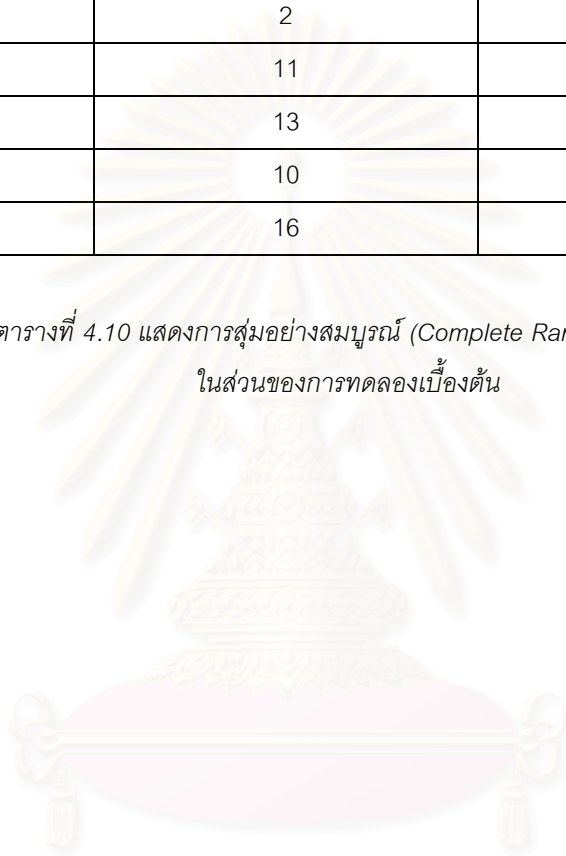
C=อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันที (c)

ตารางที่ 4.9 แสดงเมตริกการออกแบบการทดลองในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	หมายเลขลำดับที่	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2
1	8	6
2	4	9
3	5	3
4	2	7
5	11	1
6	13	14
7	10	12
8	16	15

ตารางที่ 4.10 แสดงการสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization)
 ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	ปัจจัย			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในทันที (c)	
1	100	0.90	1,570	
2	200	1.70	1,530	
3	100	1.70	1,530	
4	200	0.90	1,530	
5	100	1.70	1,530	
6	100	0.90	1,530	
7	200	1.70	1,530	
8	100	0.90	1,530	
9	200	0.90	1,530	
10	100	1.70	1,570	
11	100	0.90	1,570	
12	100	1.70	1,570	
13	200	0.90	1,570	
14	200	0.90	1,570	
15	200	1.70	1,570	
16	200	1.70	1,570	

ตารางที่ 4.11 แสดงการบันทึกผลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

แผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม			
1. วัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้น ที่มีความยาวน้อยที่สุด			
2. ข้อมูลพื้นฐาน ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเกิดขึ้นของเหล็กปลายสั้นเบื้องต้น			
3. ตัวแปรต่าง ๆ ในการทดลอง			
3.1 ตัวแปรตอบสนอง ความยาวของเหล็กปลายสั้น	ค่าที่วัด		
	mm		
3.2 ปัจจัย 3.2.1 น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min) 3.2.2 ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (m/min) 3.2.3 อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (c)	ระดับ		
	-(ต่ำ)	0(กลาง)	+(สูง)
	100	150	200
	0.90	1.30	1.70
	1,530	1,550	1,570
3.3 ปัจจัยที่ควบคุม 3.3.1 น้ำหล่อโมลต์ (Ltr/min) 3.3.2 น้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 2 (Ltr/min) 3.3.3 น้ำมันหล่อโมลต์ (cm ³ /min) 3.3.4 โมลต์ทองแดงที่ใช้ในการหล่อ (Type) 3.3.5 ชนิดของเหล็กแท่ง (Type) 3.3.6 สายผลิตในการหล่อ (Strand No.) 3.3.7 พนักงานหล่อเหล็กแท่ง (คน)	ค่าที่ควบคุม		
	2,000		
	80		
	80		
	CU Mould		
	M15		
	3		
	1		
4. จำนวนซ้ำ การทดลองทั้งหมด $3^3 = 27$ ทำซ้ำ 2 ครั้ง ทั้ง 54 การทดลอง			
5. เมตริกการออกแบบการทดลอง เมตริกการออกแบบการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.13			
6. วิธีการสุ่ม การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization) ในการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.14			
7. ตารางบันทึกผล ตารางบันทึกผล แสดงดังตารางที่ 4.15			

ตารางที่ 4.12 แสดงแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

<p>8. การวิเคราะห์ผลการทดลอง</p> <p>8.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)</p> <p>8.2 กราฟตัวแปรตอบสนอง (Response Plot)</p> <p>8.3 กราฟค่า Residual (Residual Plot)</p> <p>8.4 อื่นๆ</p>
<p>9. ระยะเวลาการทดลอง</p> <p>พฤศจิกายน 2545 ถึง มกราคม 2546</p>
<p>10. เวลาทำการทดลอง</p> <p>เบ้าสุดท้ายในรอบ Sequence ช่วงปลาย cast</p>
<p>11. การตัดตัวอย่าง</p> <p>พนักงานห้องเชียร์ตัดเหล็กปลายสั้นที่ Strand No.3</p>
<p>12. การตรวจสอบความยาวตัวอย่าง</p> <p>พนักงาน QVAC รับเหล็กปลายสั้นจาก พนักงานห้องเชียร์ แล้วนำเหล็กปลายสั้นกึ่งตามแนว Center Line ตลอดความยาว (ส่งให้ผู้รับเหมาภายนอกกึ่งเหล็กปลายสั้น) เพื่อดูความยาวรูกลวงของเหล็กปลายสั้น</p>
<p>13. อื่นๆ</p>

ตารางที่ 4.12 แสดงแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A	C	-			0			+		
	B	-	0	+	-	0	+	-	0	+
-	1	1*	2	3	4	5	6	7	8	9
	2	28	29	30	31	32	33	34	35	36
0	1	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	2	37	38	39	40	41	42	43	44	45
+	1	19	20	21	22	23	24	25	26	27
	2	46	47	48	49	50	51	52	53	54

ระดับต่ำ -

ระดับกลาง 0

ระดับสูง +

A=อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)

B=ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (m/min)

C=อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันที (c)

1* หมายเลขสภาวะการทดลอง

ตารางที่ 4.13 เมตริกการออกแบบการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ลำดับ การทดลอง	หมายเลข สภาวะ การทดลอง	ลำดับ การทดลอง	หมายเลข สภาวะ การทดลอง	ลำดับ การทดลอง	หมายเลข สภาวะ การทดลอง
1	19	19	7	37	49
2	47	20	43	38	22
3	29	21	46	39	40
4	12	22	41	40	24
5	37	23	50	41	10
6	2	24	27	42	44
7	38	25	21	43	51
8	13	26	3	44	16
9	20	27	6	45	45
10	48	28	26	46	54
11	23	29	34	47	25
12	8	30	1	48	42
13	53	31	52	49	32
14	14	32	17	50	39
15	33	33	35	51	30
16	5	34	4	52	28
17	15	35	36	53	11
18	31	36	9	54	18

ตารางที่ 4.14 การสุ่มอย่างสมบูรณ์ (Complete Randomization)

ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	Factor			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในทันที (c)	
1	200	0.90	1,530	
2	200	1.30	1,530	
3	100	1.30	1,530	
4	150	1.70	1,530	
5	150	0.90	1,530	
6	100	1.30	1,530	
7	150	1.30	1,530	
8	150	0.90	1,550	
9	200	1.30	1,530	
10	200	1.70	1,530	
11	200	1.30	1,550	
12	100	1.30	1,570	
13	200	1.30	1,570	
14	150	1.30	1,550	
15	100	1.70	1,550	
16	100	1.30	1,550	
17	150	1.70	1,550	
18	100	0.90	1,550	

ตารางที่ 4.15 แสดงการบันทึกผลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	Factor			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในต้นดีช (c)	
19	100	0.90	1,570	
20	150	0.90	1,570	
21	200	0.90	1,530	
22	150	1.30	1,550	
23	200	1.30	1,550	
24	200	1.70	1,570	
25	200	1.70	1,530	
26	100	1.70	1,530	
27	100	1.70	1,550	
28	200	1.30	1,570	
29	100	0.90	1,570	
30	100	0.90	1,530	
31	200	0.90	1,570	
32	150	1.30	1,570	
33	100	1.30	1,570	
34	100	0.90	1,550	
35	100	1.70	1,570	
36	100	1.70	1,570	

ตารางที่ 4.15 แสดงการบันทึกผลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	Factor			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในต้นดิส (c)	
37	200	0.90	1,550	
38	200	0.90	1,550	
39	150	0.90	1,550	
40	200	1.70	1,550	
41	150	0.90	1,530	
42	150	1.30	1,570	
43	200	1.70	1,550	
44	150	0.90	1,570	
45	150	1.70	1,570	
46	200	1.70	1,570	
47	200	0.90	1,570	
48	150	1.70	1,550	
49	100	1.30	1,550	
50	150	1.70	1,530	
51	100	1.70	1,530	
52	100	0.90	1,530	
53	150	1.30	1,530	
54	150	1.70	1,570	

ตารางที่ 4.15 แสดงการบันทึกผลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

4.3.1 ผลการทดลองในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของการทดลองเบื้องต้น สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.16 โดยที่

ปัจจัย A คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1
(Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)

ปัจจัย B คือ ความเร็วในการหล่อเหล็กแ่ง
(Casting Speed)

ปัจจัย C คือ อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช
(Liquid Steel Temperature in Tundish)



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	ปัจจัย			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในทันที (c)	
1	100	0.90	1,570	765
2	200	1.70	1,530	522
3	100	1.70	1,530	831
4	200	0.90	1,530	544
5	100	1.70	1,530	845
6	100	0.90	1,530	706
7	200	1.70	1,530	578
8	100	0.90	1,530	691
9	200	0.90	1,530	495
10	100	1.70	1,570	927
11	100	0.90	1,570	765
12	100	1.70	1,570	913
13	200	0.90	1,570	581
14	200	0.90	1,570	620
15	200	1.70	1,570	653
16	200	1.70	1,570	695

ตารางที่ 4.16 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.3.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น จะใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งมีปัจจัย 2 ระดับ (2^k Factorial Design) ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

4.3.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) [4]

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งสามารถแสดงผลวิเคราะห์ได้ แสดงดังตารางที่ 4.17 ดังต่อไปนี้

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0	P-Value
A	192,502	1	192,502	147.75	0.000
B	39,701	1	39,701	30.47	0.000
C	31,241	1	31,241	23.98	0.000
Error	15,635	12	1,303		
Total	279,077	15			

ตารางที่ 4.17 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าไม่มีปัจจัยตัวใดที่มีค่ามากกว่า 0.05 นั้นแสดงว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) และอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น ซึ่งก่อนที่จะนำผลการวิเคราะห์ไปใช้งาน จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.3.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

[5]

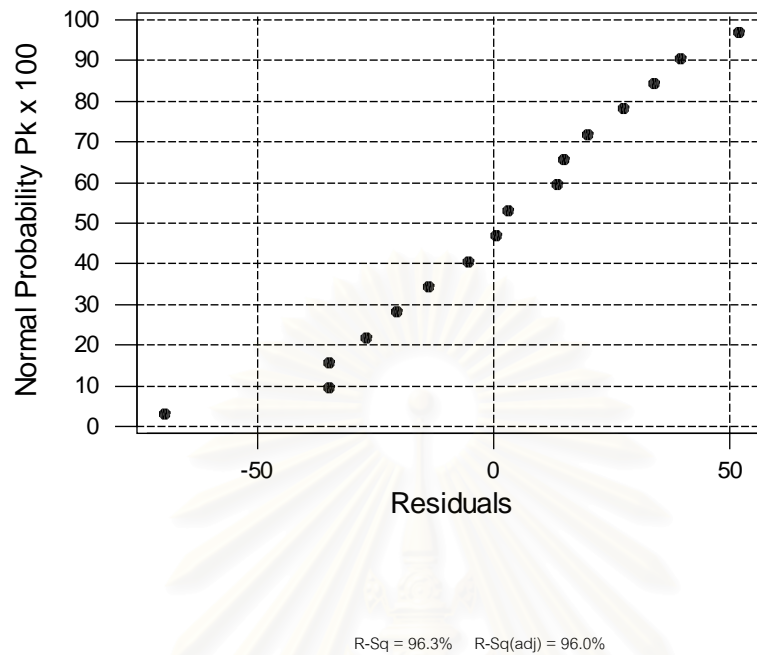
การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

4.3.2.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ แสดงดังตารางที่ 4.18 นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.1

Order (k)	$P_k = (k-1/2)/n \times 100$	y_{ijk}	\hat{y}_{ijk}	$\square_{ijk} = y_{ijk} - \hat{y}_{ijk}$
1	3.125	522	591.625	-69.625
2	9.375	765	799.750	-34.750
3	15.625	765	799.750	-34.750
4	21.875	653	680.000	-27.000
5	28.125	691	711.375	-20.375
6	34.375	578	591.625	-13.625
7	40.625	706	711.375	-5.375
8	46.875	581	580.375	0.625
9	53.125	495	492.000	3.000
10	59.375	913	899.375	13.625
11	65.625	695	680.000	15.000
12	71.875	831	811.000	20.000
13	78.125	927	899.375	27.625
14	84.375	845	811.000	34.000
15	90.625	620	580.375	39.625
16	96.875	544	492.000	52.000

ตารางที่ 4.18 แสดงส่วนตกค้างที่ถูกเรียงจากมากไปหาน้อยและ Probability Plot ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

Normal Probability Plot of the Residuals



รูปที่ 4.1 แสดง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

4.3.2.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แสดงดังตารางที่ 4.19 มาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.2

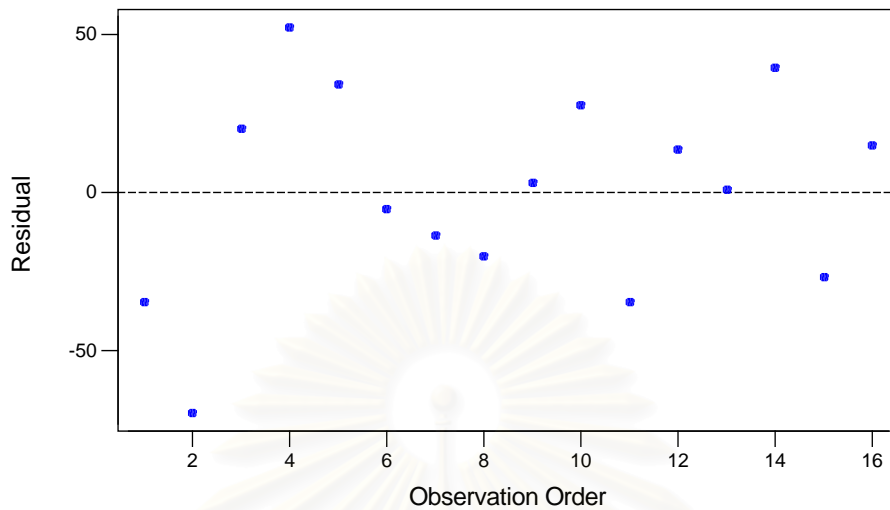
ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	Y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\square_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
1	765	799.750	-34.750
2	522	591.625	-69.625
3	831	811.000	20.000
4	544	492.000	52.000
5	845	811.000	34.000
6	706	711.375	-5.375
7	578	591.625	-13.625
8	691	711.375	-20.375
9	495	492.000	3.000
10	927	899.375	27.625
11	765	799.750	-34.750
12	913	899.375	13.625
13	581	580.375	0.625
14	620	580.375	39.625
15	653	680.000	-27.000
16	695	680.000	15.000

ตารางที่ 4.19 แสดงส่วนตกค้างและลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล
ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Residuals Versus the Order of the Data

(response is B Length)



รูปที่ 4.2 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

4.3.2.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ในที่นี้คือค่าความยาวเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย (Predicted Response) แสดงดังตารางที่ 4.20 มาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง กับค่าที่ถูกฟิต ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.3 และทดสอบโดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ในที่นี้คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) และอุณหภูมิเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) แสดงดังตารางที่ 4.20 มาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย แสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

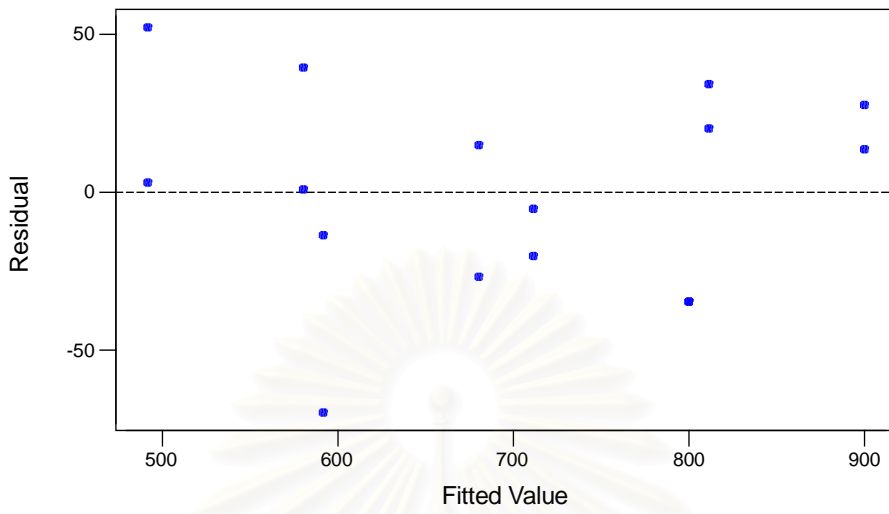
อัตราการไหล ของน้ำหล่อ เหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วใน การหล่อ เหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิ น้ำเหล็กใน ทันที (c)	y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\epsilon_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
100	0.90	1,570	765	799.750	-34.750
200	1.70	1,530	522	591.625	-69.625
100	1.70	1,530	831	811.000	20.000
200	0.90	1,530	544	492.000	52.000
100	1.70	1,530	845	811.000	34.000
100	0.90	1,530	706	711.375	-5.375
200	1.70	1,530	578	591.625	-13.625
100	0.90	1,530	691	711.375	-20.375
200	0.90	1,530	495	492.000	3.000
100	1.70	1,570	927	899.375	27.625
100	0.90	1,570	765	799.750	-34.750
100	1.70	1,570	913	899.375	13.625
200	0.90	1,570	581	580.375	0.625
200	0.90	1,570	620	580.375	39.625
200	1.70	1,570	653	680.000	-27.000
200	1.70	1,570	695	680.000	15.000

ตารางที่ 4.20 แสดงส่วนตกค้าง ปัจจัยระดับต่างๆ และ ความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนายในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Residuals Versus the Fitted Values

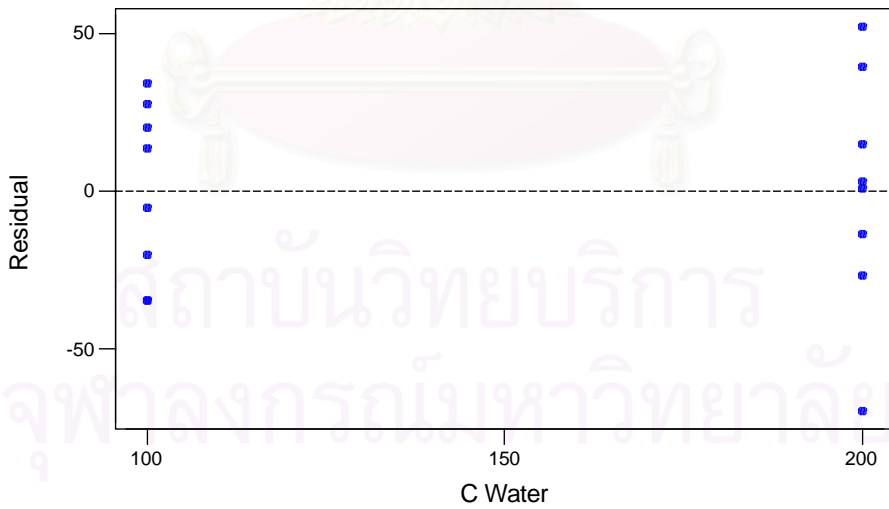
(response is B Length)



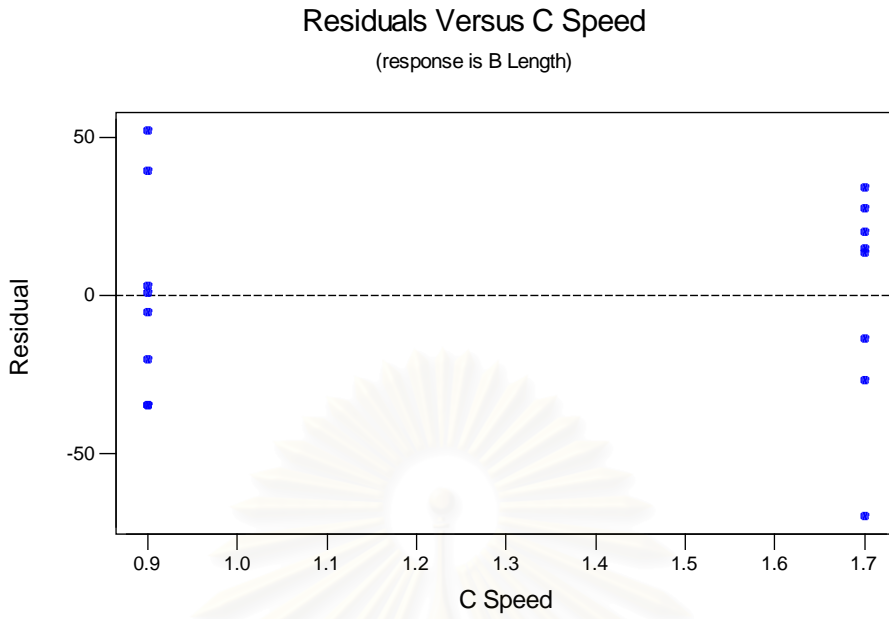
รูปที่ 4.3 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย
ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

Residuals Versus C Water

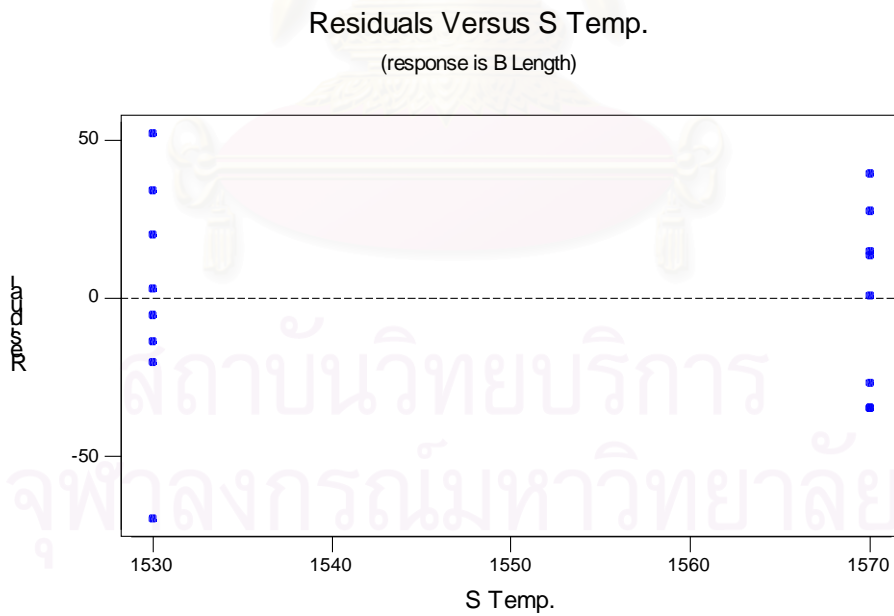
(response is B Length)



รูปที่ 4.4 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1
ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 4.5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 4.6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอุณหภูมิหน้าเหล็กในทันทีในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

โดยที่

C Water คือ ปัจจัย A : อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) มีหน่วยเป็น Ltr/min

C Speed คือ ปัจจัย B : ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) มีหน่วยเป็น m/min

S Temp. คือ ปัจจัย C : อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) มีหน่วยเป็น °c

B Length คือ ตัวแปรตอบสนอง : ความยาวของเหล็กปลายสั้น (Billet Crop End Length) มีหน่วยเป็น mm

เมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวข้างต้น พบว่าข้อมูลการทดลองเบื้องต้นมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวนสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์เชื่อถือได้ กล่าวคือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) และอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

4.4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ในการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด

4.4.1 ผลการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.21 โดยที่

ปัจจัย A คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1
(Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1)

ปัจจัย B คือ ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง
(Casting Speed)

ปัจจัย C คือ อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช
(Liquid Steel Temperature in Tundish)

Run	Factor			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแต่ละช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแต่ละ (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในทันที (c)	
1	200	0.90	1,530	545
2	200	1.30	1,530	512
3	100	1.30	1,530	780
4	150	1.70	1,530	700
5	150	0.90	1,530	595
6	100	1.30	1,530	760
7	150	1.30	1,530	655
8	150	0.90	1,550	650
9	200	1.30	1,530	565
10	200	1.70	1,530	525
11	200	1.30	1,550	594
12	100	1.30	1,570	845
13	200	1.30	1,570	655
14	150	1.30	1,550	670
15	100	1.70	1,550	875
16	100	1.30	1,550	800
17	150	1.70	1,550	775
18	100	0.90	1,550	720

ตารางที่ 4.21 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Run	Factor			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแต่ละครั้งที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแต่ละ (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในทันที (c)	
19	100	0.90	1,570	763
20	150	0.90	1,570	695
21	200	0.90	1,530	500
22	150	1.30	1,550	692
23	200	1.30	1,550	587
24	200	1.70	1,570	655
25	200	1.70	1,530	575
26	100	1.70	1,530	830
27	100	1.70	1,550	881
28	200	1.30	1,570	615
29	100	0.90	1,570	760
30	100	0.90	1,530	705
31	200	0.90	1,570	625
32	150	1.30	1,570	727
33	100	1.30	1,570	830
34	100	0.90	1,550	735
35	100	1.70	1,570	915
36	100	1.70	1,570	925

ตารางที่ 4.21 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	Factor			ความยาวเหล็กปลาย สั้น (mm)
	อัตราการไหลของน้ำ หล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วในการ หล่อเหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิน้ำเหล็ก ในทันที (c)	
37	200	0.90	1,550	570
38	200	0.90	1,550	562
39	150	0.90	1,550	648
40	200	1.70	1,550	612
41	150	0.90	1,530	631
42	150	1.30	1,570	740
43	200	1.70	1,550	600
44	150	0.90	1,570	670
45	150	1.70	1,570	810
46	200	1.70	1,570	690
47	200	0.90	1,570	580
48	150	1.70	1,550	745
49	100	1.30	1,550	815
50	150	1.70	1,530	685
51	100	1.70	1,530	850
52	100	0.90	1,530	695
53	150	1.30	1,530	663
54	150	1.70	1,570	794

ตารางที่ 4.21 แสดงข้อมูลที่ได้จากการทดลองในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

สถาบันวิจัยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม ได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล ซึ่งมีปัจจัย 3 ระดับ (3^k Factorial Design) ซึ่งการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถทำได้ดังต่อไปนี้

4.4.2.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance : ANOVA) [4]

การวิเคราะห์ข้อมูลในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ซึ่งสามารถแสดงผลวิเคราะห์ได้ แสดงดังตารางที่ 4.22 ดังต่อไปนี้

Source of Variation	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F_0	P-Value
A	426,205	2	213,103	632.84	0.000
B	89,362	2	44,681	132.69	0.000
C	64,431	2	32,216	95.67	0.000
AB	16,483	4	4,121	12.24	0.000
AC	1,353	4	338	1.00	0.422
BC	1,859	4	465	1.38	0.267
ABC	823	8	103	0.31	0.957
Error	9,092	27	337		
Total	609,609	53			

ตารางที่ 4.22 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าปัจจัยที่มีค่า P-Value น้อยกว่า 0.05 ได้แก่ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) และปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง) จึงสรุปได้ว่า ทั้ง 4 ปัจจัยดังกล่าวข้างต้น มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นซึ่งก่อนที่จะนำผลการวิเคราะห์ไปใช้งาน จะต้องตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.4.2.2 การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ (Model Adequacy Checking)

[5]

การตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบ เป็นวิธีการตรวจสอบที่ทำให้ทราบว่าผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนมีความน่าเชื่อถือเป็นไปตามหลักการทางสถิติหรือไม่ โดยการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบมีอยู่ 3 ประเภท คือ

4.4.2.2.1 การตรวจสอบการแจกแจงของข้อมูลว่าเป็นการแจกแจงแบบปกติ (Normal Distribution) หรือไม่ โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง (Residual) ที่ถูกเรียงลำดับจากน้อยไปหามาก กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ แสดงดังตารางที่ 4.23 นำมาสร้าง Normal Probability Plot ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับค่าความน่าจะเป็นสะสม $P_k = (k-1/2)/n$ โดย $P_k \times 100$ อยู่บนแกนตั้ง ส่วนแกนนอนจะเป็นค่าส่วนตกค้าง แสดงดังรูปที่ 4.7



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

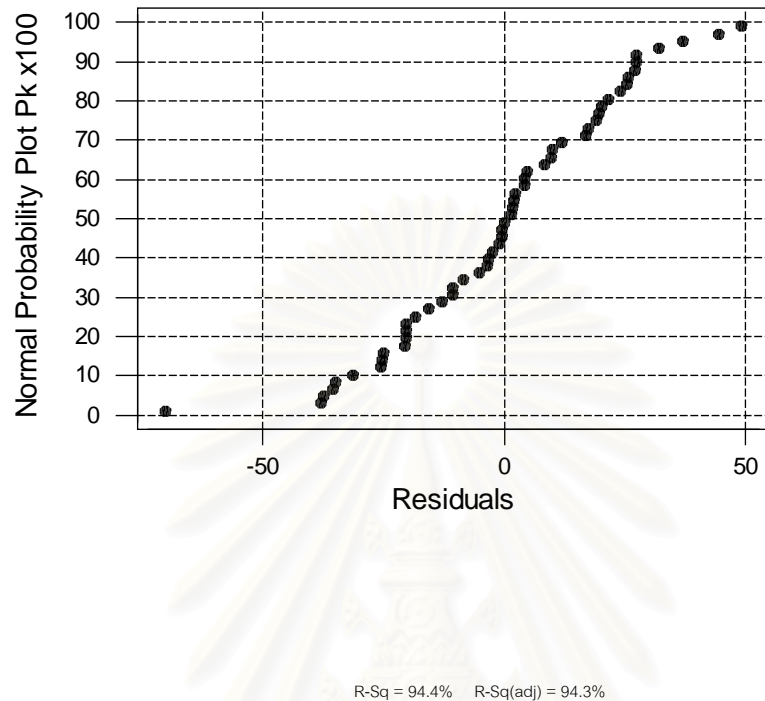
Order (k)	$P_k = (k-1/2)/n \times 100$	Y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\hat{\epsilon}_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
1	0.926	525.00	595.33	-70.33
2	2.778	760.00	797.94	-37.94
3	4.630	600.00	637.56	-37.56
4	6.481	720.00	755.56	-35.56
5	8.333	763.00	797.94	-34.94
6	10.185	512.00	543.28	-31.28
7	12.037	612.00	637.56	-25.56
8	13.889	670.00	695.39	-25.39
9	15.741	655.00	679.94	-24.94
10	17.593	735.00	755.56	-20.56
11	19.444	575.00	595.33	-20.33
12	21.296	670.00	690.22	-20.22
13	23.148	685.00	705.22	-20.22
14	25.000	695.00	713.33	-18.33
15	26.852	830.00	845.50	-15.50
16	28.704	615.00	627.89	-12.89
17	30.556	595.00	605.61	-10.61
18	32.407	727.00	737.78	-10.78
19	34.259	705.00	713.33	-8.33
20	36.111	700.00	705.22	-5.22
21	37.963	692.00	695.39	-3.39
22	39.815	800.00	803.11	-3.11
23	41.667	745.00	747.44	-2.44
24	43.519	760.00	760.89	-0.89
25	45.370	845.00	845.50	-0.50
26	47.222	580.00	580.33	-0.33
27	49.074	648.00	647.83	0.17

ตารางที่ 4.23 แสดงส่วนตกค้างที่ถูกเรียงจากมากไปหาน้อยและ Probability Plot
 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Order (k)	$P_k = (k-1/2)/n \times 100$	Y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\square_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
28	50.926	587.00	585.50	1.50
29	52.778	655.00	653.17	1.83
30	54.630	650.00	647.83	2.17
31	56.481	740.00	737.78	2.22
32	58.333	794.00	789.83	4.17
33	60.185	500.00	495.72	4.28
34	62.037	695.00	690.22	4.78
35	63.889	594.00	585.50	8.50
36	65.741	663.00	653.17	9.83
37	67.593	690.00	679.94	10.06
38	69.444	815.00	803.11	11.89
39	71.296	830.00	812.94	17.06
40	73.148	915.00	897.56	17.44
41	75.000	780.00	760.89	19.11
42	76.852	875.00	855.17	19.83
43	78.704	810.00	789.83	20.17
44	80.556	565.00	543.28	21.72
45	82.407	562.00	537.94	24.06
46	84.259	631.00	605.61	25.39
47	86.111	881.00	855.17	25.83
48	87.963	655.00	627.89	27.11
49	89.815	925.00	897.56	27.44
50	91.667	775.00	747.44	27.56
51	93.519	570.00	537.94	32.06
52	95.370	850.00	812.94	37.06
53	97.222	625.00	580.33	44.67
54	99.074	545.00	495.72	49.28

ตารางที่ 4.23 แสดงส่วนตกค้างที่ถูกเรียงจากมากไปหาน้อยและ Probability Plot
 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

Normal Probability Plot of the Residuals



รูปที่ 4.7 แสดง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

4.4.2.2.2 การตรวจสอบความเป็นอิสระของข้อมูล เป็นการตรวจสอบข้อมูลว่ามีความเป็นอิสระซึ่งกันหรือไม่ เป็นการทดสอบถึงความสัมพันธ์ของค่าส่วนตกค้าง (Residual) โดยการใช้ค่าส่วนตกค้าง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล แสดงดังตารางที่ 4.24 มาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.8

ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\varepsilon_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
1	545	495.72	49.28
2	512	543.28	-31.28
3	780	760.89	19.11
4	700	705.22	-5.22
5	595	605.61	-10.61
6	760	760.89	-0.89
7	655	653.17	1.83
8	650	647.83	2.17
9	565	543.28	21.72
10	525	595.33	-70.33
11	594	585.50	8.50
12	845	845.50	-0.50
13	655	627.89	27.11
14	670	695.39	-25.39
15	875	855.17	19.83
16	800	803.11	-3.11
17	775	747.44	27.56
18	720	755.56	-35.56
19	763	797.94	-34.94
20	695	690.22	4.78
21	500	495.72	4.28
22	692	695.39	-3.39
23	587	585.50	1.50
24	655	679.94	-24.94
25	575	595.33	-20.33
26	830	812.94	17.06
27	881	855.17	25.83

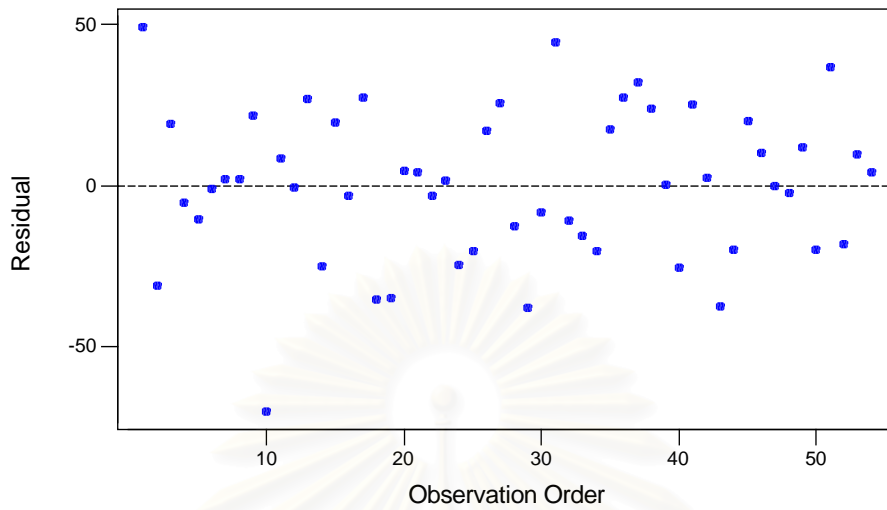
ตารางที่ 4.24 แสดงส่วนตกค้างและ ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล
 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล	y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\epsilon_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
28	615	627.89	-12.89
29	760	797.94	-37.94
30	705	713.33	-8.33
31	625	580.33	44.67
32	727	737.78	-10.78
33	830	845.50	-15.50
34	735	755.56	-20.56
35	915	897.56	17.44
36	925	897.56	27.44
37	570	537.94	32.06
38	562	537.94	24.06
39	648	647.83	0.17
40	612	637.56	-25.56
41	631	605.61	25.39
42	740	737.78	2.22
43	600	637.56	-37.56
44	670	690.22	-20.22
45	810	789.83	20.17
46	690	679.94	10.06
47	580	580.33	-0.33
48	745	747.44	-2.44
49	815	803.11	11.89
50	685	705.22	-20.22
51	850	812.94	37.06
52	695	713.33	-18.33
53	663	653.17	9.83
54	794	789.83	4.17

ตารางที่ 4.24 แสดงส่วนตกค้างและ ลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล
 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

Residuals Versus the Order of the Data

(response is B Length)



รูปที่ 4.8 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล
ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

4.4.2.2.3 การตรวจสอบความเสถียรของความแปรปรวน เป็นการทดสอบความสม่ำเสมอของการกระจายของข้อมูล โดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และค่าที่ถูกฟิต (fitted Value) ในที่นี้คือ ค่าความยาวเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย (Predicted Response) แสดงดังตารางที่ 4.25 มาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง กับค่าที่ถูกฟิต ซึ่งค่าส่วนตกค้างอยู่บนแกนตั้ง และค่าที่ถูกฟิตอยู่บนแกนนอน แสดงดังรูปที่ 4.9 และทดสอบโดยการใช้ข้อมูลค่าส่วนตกค้าง (Residual) และระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย ในที่นี้คือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) และอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) แสดงดังตารางที่ 4.25 มาทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) กับระดับของปัจจัยแต่ละปัจจัย แสดงดังรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการไหล ของน้ำหล่อ เหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วใน การหล่อ เหล็กแท่ง (m/sec)	อุณหภูมิ น้ำเหล็กใน ทันที (°c)	y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\epsilon_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
200	0.90	1,530	545	495.72	49.28
200	1.30	1,530	512	543.28	-31.28
100	1.30	1,530	780	760.89	19.11
150	1.70	1,530	700	705.22	-5.22
150	0.90	1,530	595	605.61	-10.61
100	1.30	1,530	760	760.89	-0.89
150	1.30	1,530	655	653.17	1.83
150	0.90	1,550	650	647.83	2.17
200	1.30	1,530	565	543.28	21.72
200	1.70	1,530	525	595.33	-70.33
200	1.30	1,550	594	585.50	8.50
100	1.30	1,570	845	845.50	-0.50
200	1.30	1,570	655	627.89	27.11
150	1.30	1,550	670	695.39	-25.39
100	1.70	1,550	875	855.17	19.83
100	1.30	1,550	800	803.11	-3.11
150	1.70	1,550	775	747.44	27.56
100	0.90	1,550	720	755.56	-35.56

ตารางที่ 4.25 แสดงส่วนตกค้าง ปัจจัยระดับต่างๆ และ ความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนายในส่วนของกา
ทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัตราการไหล ของน้ำหล่อ เหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วใน การหล่อ เหล็กแท่ง (m/sec)	อุณหภูมิ น้ำเหล็กใน ทันที (c)	y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\epsilon_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
100	0.90	1,570	763	797.94	-34.94
150	0.90	1,570	695	690.22	4.78
200	0.90	1,530	500	495.72	4.28
150	1.30	1,550	692	695.39	-3.39
200	1.30	1,550	587	585.50	1.50
200	1.70	1,570	655	679.94	-24.94
200	1.70	1,530	575	595.33	-20.33
100	1.70	1,530	830	812.94	17.06
100	1.70	1,550	881	855.17	25.83
200	1.30	1,570	615	627.89	-12.89
100	0.90	1,570	760	797.94	-37.94
100	0.90	1,530	705	713.33	-8.33
200	0.90	1,570	625	580.33	44.67
150	1.30	1,570	727	737.78	-10.78
100	1.30	1,570	830	845.50	-15.50
100	0.90	1,550	735	755.56	-20.56
100	1.70	1,570	915	897.56	17.44
100	1.70	1,570	925	897.56	27.44

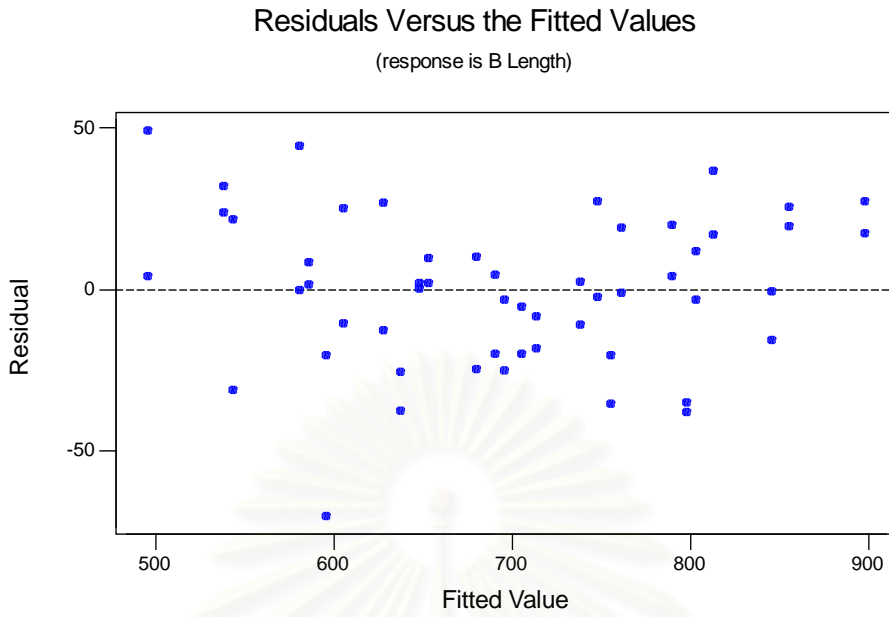
ตารางที่ 4.25 แสดงส่วนตกค้าง ปัจจัยระดับต่างๆ และ ความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนายในส่วนของกา
ทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

สถาบันวิจัยการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

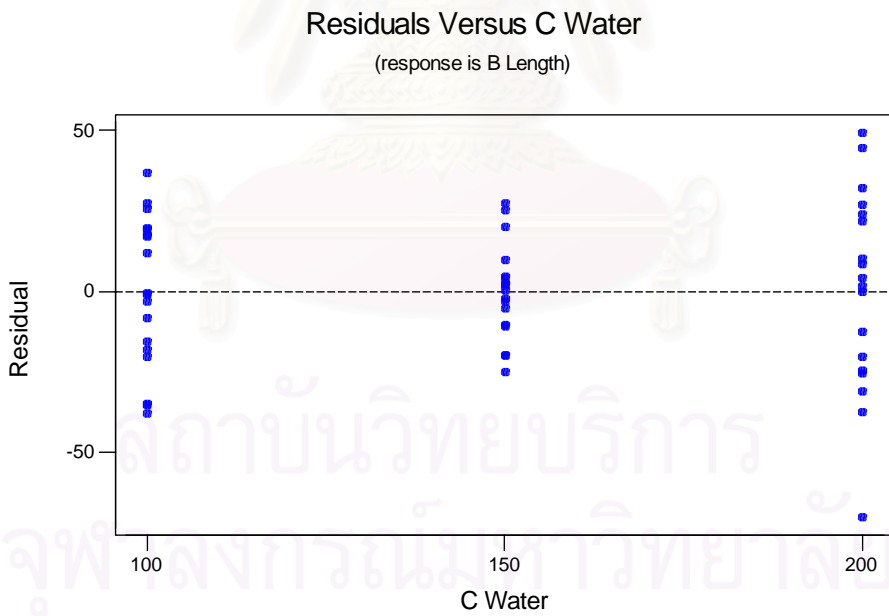
อัตราการไหล ของน้ำหล่อ เหล็กแท่งช่วงที่ 1 (ltr/min)	ความเร็วใน การหล่อ เหล็กแท่ง (m/sec)	อุณหภูมิ น้ำเหล็กใน ทันที (c)	y_{ijkl}	\hat{y}_{ijkl}	$\epsilon_{ijkl} = y_{ijkl} - \hat{y}_{ijkl}$
200	0.90	1,550	570	537.94	32.06
200	0.90	1,550	562	537.94	24.06
150	0.90	1,550	648	647.83	0.17
200	1.70	1,550	612	637.56	-25.56
150	0.90	1,530	631	605.61	25.39
150	1.30	1,570	740	737.78	2.22
200	1.70	1,550	600	637.56	-37.56
150	0.90	1,570	670	690.22	-20.22
150	1.70	1,570	810	789.83	20.17
200	1.70	1,570	690	679.94	10.06
200	0.90	1,570	580	580.33	-0.33
150	1.70	1,550	745	747.44	-2.44
100	1.30	1,550	815	803.11	11.89
150	1.70	1,530	685	705.22	-20.22
100	1.70	1,530	850	812.94	37.06
100	0.90	1,530	695	713.33	-18.33
150	1.30	1,530	663	653.17	9.83
150	1.70	1,570	794	789.83	4.17

ตารางที่ 4.25 แสดงส่วนตกค้าง ปัจจัยระดับต่างๆ และ ความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนายในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม (ต่อ)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



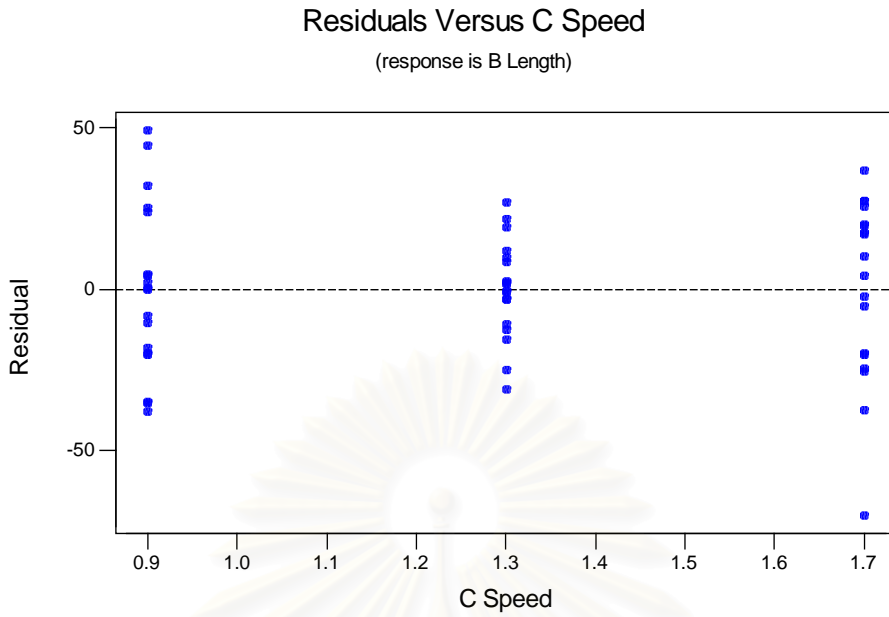
รูปที่ 4.9 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนายน



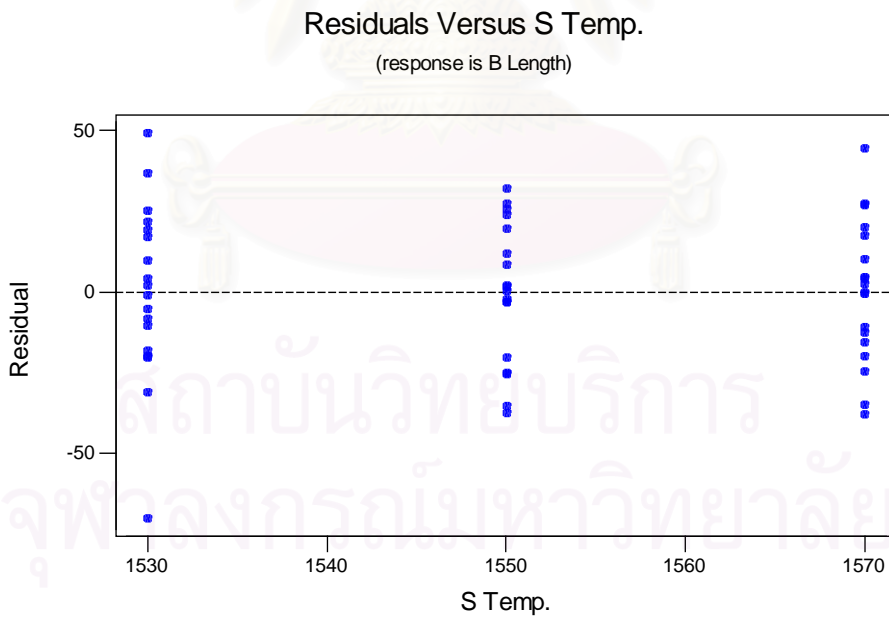
ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

รูปที่ 4.10 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1

ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ 4.11 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง
 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ 4.12 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในถังดีซ
 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

โดยที่

C Water คือ ปัจจัย A : อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) มีหน่วยเป็น Ltr/min

C Speed คือ ปัจจัย B : ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) มีหน่วยเป็น m/min

S Temp. คือ ปัจจัย C : อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) มีหน่วยเป็น °c

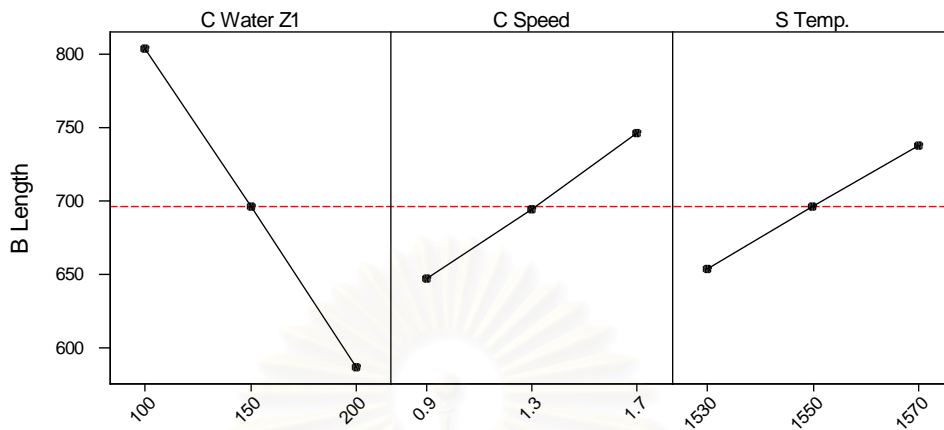
B Length คือ ตัวแปรตอบสนอง : ความยาวของเหล็กปลายสั้น (Billet Crop End Length) มีหน่วยเป็น mm

เมื่อพิจารณาจากรูปดังกล่าวข้างต้น พบว่าข้อมูลการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมมีการแจกแจงแบบปกติ มีความเป็นอิสระซึ่งกันและกัน และมีความสม่ำเสมอของความแปรปรวนสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์เชื่อถือได้ กล่าวคือ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) และปัจจัยร่วมระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง) มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

4.4.2.3 การหาสภาวะที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด

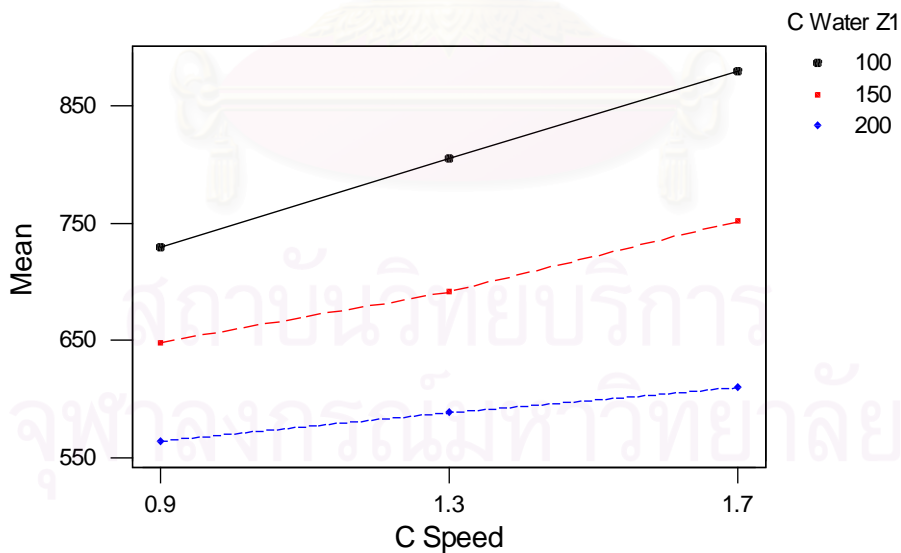
จากผลการทดลองข้างต้น สามารถกำหนดสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดความยาวเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดระหว่างระดับของปัจจัยหลักกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.13 อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.14 อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ทั้งสองกราฟ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.15 อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,530 °c ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.16 อันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,550 °c ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.17 และอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,570 °c ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.18

Main Effects Plot-Data Means for Billet Crop End Length



รูปที่ 4.13 แสดงปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดความเหล็กลายสั้น
กับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กลายสั้น

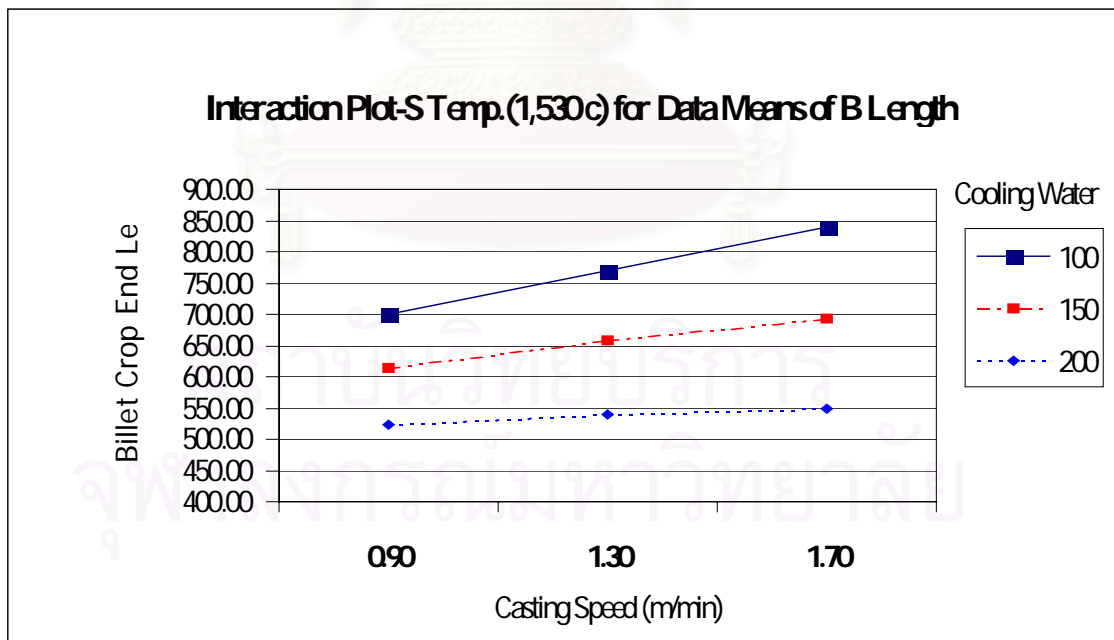
Interaction Plot-Data Means for Billet Crop End Length



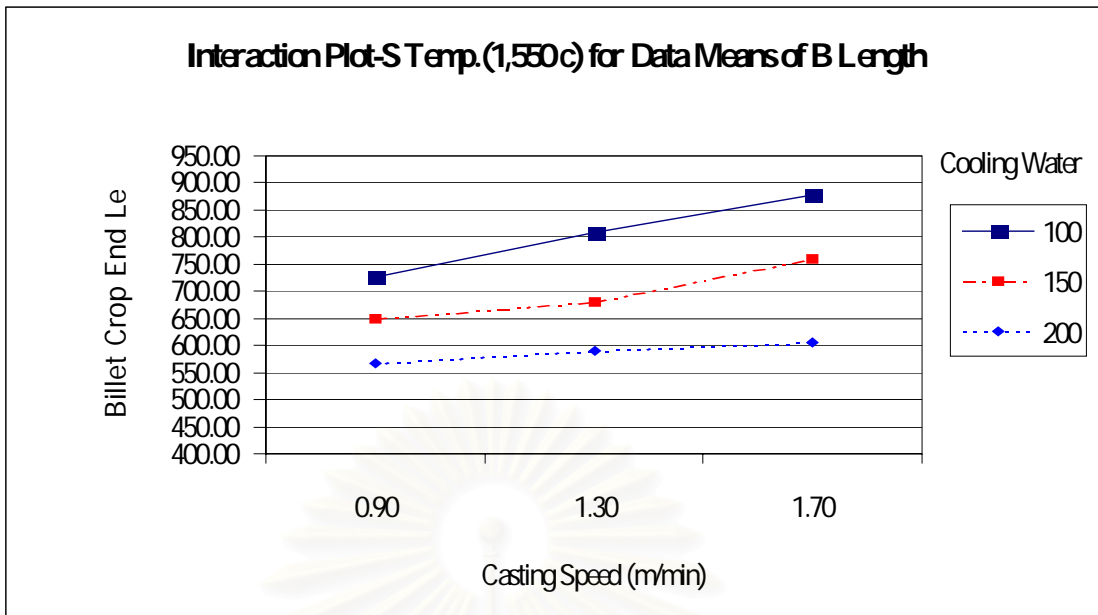
รูปที่ 4.14 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็ว
ในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กลายสั้น



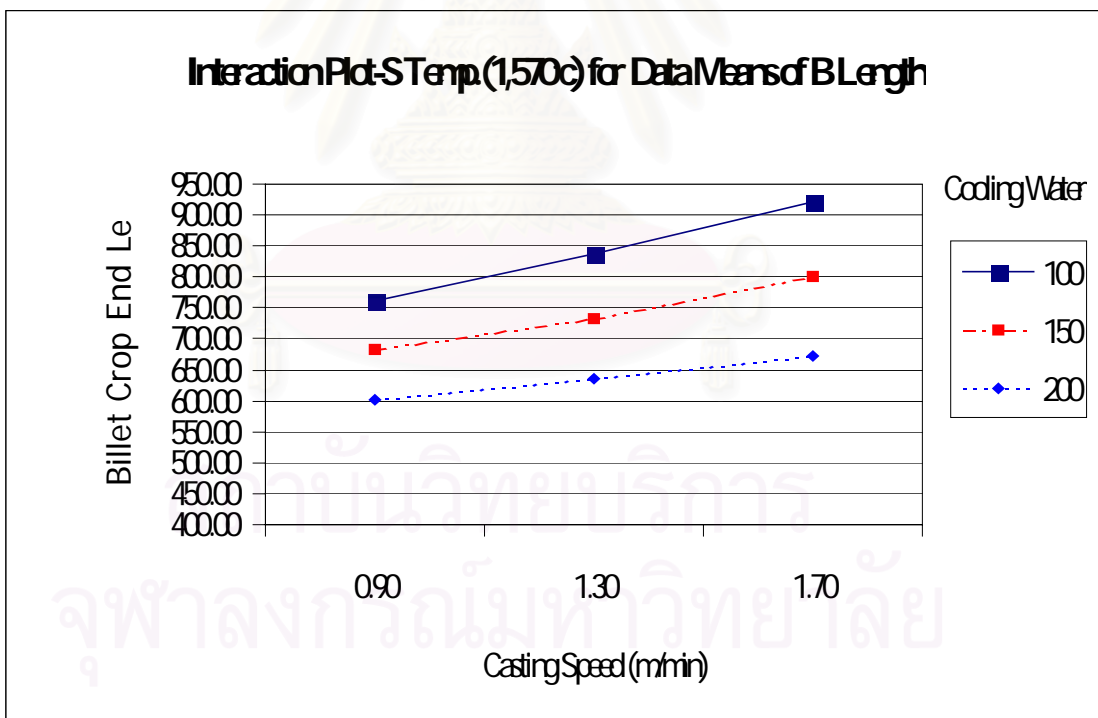
รูปที่ 4.15 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ทั้งสองกราฟ



รูปที่ 4.16 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,530 °c



รูปที่ 4.17 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็ก
 แห่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,550 °c



รูปที่ 4.18 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแห่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็ก
 แห่งกับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ที่ อุณหภูมิ 1,570 °c

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13 , 4.14 , 4.15 , 4.16 , 4.17 และ 4.18 พบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) อยู่ในระดับสูง (+) ที่ 200 Ltr/min จะทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด เมื่อความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) อยู่ในระดับต่ำ (-) ที่ 0.90 m/min จะทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด และเมื่ออุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) อยู่ในระดับต่ำ (-) ที่ 1,530 °c จะทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด แต่เนื่องจากระดับของปัจจัยของความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) เป็นอันตรกิริยาของอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง ดังนั้นเพื่อทดสอบว่าที่ระดับของปัจจัยดังกล่าวของความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดนั้น จะใช้การทดสอบว่าความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งที่สัมพันธ์กับปริมาณน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ระดับต่ำ (-) ที่ 0.90 m/min ที่ระดับกลาง (0) ที่ 1.30 m/min และ ที่ระดับสูง (+) ที่ 1.70 m/min แต่ละระดับมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญหรือไม่ โดยใช้วิธีการทดสอบพหุพหุพิสัยของดันแคน (Duncan's Multiple Range Test) [5]

จากตารางที่ 4.10 ค่า $MS_E = 337$

$N = 54$

$n = 6$

สามารถทำการทดสอบได้ดังต่อไปนี้

4.4.2.3.1 การเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ระดับสูง (+) ที่ 200 Ltr/min

การเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ระดับสูง (+) ที่ 200 Ltr/min โดยมีสมมติฐานว่ามี Error Variance เท่ากันในทุก Treatment Combination นำค่าผลตอบสนองจากความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ทั้ง 3 ระดับ มาเรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังต่อไปนี้

$$4.4.2.3.1.1 \quad \bar{y}_{B1} = \frac{(545+500+562+570+580+625)}{6} = 563.67 \text{ mm} \quad (0.90 \text{ m/min})$$

$$4.4.2.3.1.2 \quad \bar{y}_{B2} = \frac{(565+512+594+587+615+655)}{6} = 588.00 \text{ mm} \quad (1.30 \text{ m/min})$$

$$4.4.2.3.1.3 \quad \bar{y}_{B3} = \frac{(575+525+612+600+655+690)}{6}$$

$$= 610.00 \text{ mm} \quad (1.70 \text{ m/min})$$

จะได้ค่า Standard Error ของค่าเฉลี่ยการทดลอง (Treatment Mean) ดังต่อไปนี้

$$S_{yB} = \frac{\sqrt{MS_E}}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{337}}{\sqrt{6}} = 7.49$$

หาค่า Least Significant Range ได้ดังต่อไปนี้

$$R_2 = r_{0.05(2,27)} S_{yB} = (2.91)(7.49) = 21.80$$

$$R_3 = r_{0.05(3,27)} S_{yB} = (3.06)(7.49) = 22.92$$

โดยที่ใช้ $\alpha = 0.05$ เปิดตาราง Significant Ranges for Duncan's Multiple

Range Test หา $r_{0.05(2,27)} = 2.91$ และ $r_{0.05(3,27)} = 3.06$

จากข้อมูลข้างต้น สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ดังต่อไปนี้

$$3 \text{ VS } 1 : 610.00 - 563.67 = 46.33 > 22.92 (R_3)$$

$$3 \text{ VS } 2 : 610.00 - 588.00 = 22.00 > 21.80 (R_2)$$

$$2 \text{ VS } 1 : 588.00 - 563.67 = 24.33 > 21.80 (R_2)$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า คู่ของค่าเฉลี่ย 3 VS 1 , 3 VS 2 และ 2 VS 1 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

4.4.2.3.2 การเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ระดับ
กลาง (0) ที่ 150 Ltr/min

การเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ระดับกลาง (0) ที่
150 Ltr/min โดยมีสมมติฐานว่ามี Error Variance เท่ากันในทุก Treatment Combination นำค่าผลตอบสนอง
จากความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ทั้ง 3 ระดับ มาเรียง
ลำดับจากน้อยไปมากได้ดังต่อไปนี้

$$4.4.2.3.2.1 \quad y_{B1} = \frac{(631+595+650+648+670+695)}{6}$$

$$= 648.17 \text{ mm} \quad (0.90 \text{ m/min})$$

$$4.4.2.3.2.2 \quad y_{B2} = \frac{(663+655+670+692+727+740)}{6}$$

$$= 691.17 \text{ mm} \quad (1.30 \text{ m/min})$$

$$4.4.2.3.2.3 \quad y_{B3} = \frac{(700+685+775+745+794+810)}{6}$$

$$= 751.50 \text{ mm} \quad (1.70 \text{ m/min})$$

จะได้ค่า Standard Error ของค่าเฉลี่ยการทดลอง (Treatment Mean) ดังต่อไปนี้

$$S_{yB} = \frac{\sqrt{MS_E}}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{337}}{\sqrt{6}} = 7.49$$

หาค่า Least Significant Range ได้ดังต่อไปนี้

$$R_2 = r_{0.05(2,27)} S_{yB} = (2.91)(7.49) = 21.80$$

$$R_3 = r_{0.05(3,27)} S_{yB} = (3.06)(7.49) = 22.92$$

โดยที่ใช้ $\alpha = 0.05$ เปิดตาราง Significant Ranges for Duncan's Multiple
Range Test หา $r_{0.05(2,27)} = 2.91$ และ $r_{0.05(3,27)} = 3.06$

จากข้อมูลข้างต้น สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ดังต่อไปนี้

$$3 \text{ VS } 1 : 751.50 - 648.17 = 103.33 > 22.92 (R_3)$$

$$3 \text{ VS } 2 : 751.50 - 691.17 = 60.33 > 21.80 (R_2)$$

$$2 \text{ VS } 1 : 691.17 - 648.17 = 43.00 > 21.80 (R_2)$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า คู่ของค่าเฉลี่ย 3 VS 1 , 3 VS 2 และ 2 VS 1 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

4.4.2.3.3 การเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ระดับต่ำ (-) ที่ 100 Ltr/min

การเปรียบเทียบที่อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ที่ระดับต่ำ (-) ที่ 100 Ltr/min โดยมีสมมติฐานว่ามี Error Variance เท่ากันในทุก Treatment Combination นำค่าผลตอบสนองจากความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 ทั้ง 3 ระดับ มาเรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} 4.4.2.3.3.1 \quad \bar{y}_{B1} &= \frac{(705+695+735+720+763+760)}{6} \\ &= 729.67 \text{ mm} \quad (0.90 \text{ m/min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4.4.2.3.3.2 \quad \bar{y}_{B2} &= \frac{(760+780+800+815+845+830)}{6} \\ &= 805.00 \text{ mm} \quad (1.30 \text{ m/min}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 4.4.2.3.3.3 \quad \bar{y}_{B3} &= \frac{(830+850+881+875+925+915)}{6} \\ &= 879.33 \text{ mm} \quad (1.70 \text{ m/min}) \end{aligned}$$

จะได้ค่า Standard Error ของค่าเฉลี่ยการทดลอง (Treatment Mean) ดังต่อไปนี้

$$S_{\bar{y}_B} = \frac{MS_E}{n} = \frac{337}{6} = 7.49$$

หาค่า Least Significant Range ได้ดังต่อไปนี้

$$R_2 = r_{0.05(2,27)} S_{yB} = (2.91)(7.49) = 21.80$$

$$R_3 = r_{0.05(3,27)} S_{yB} = (3.06)(7.49) = 22.92$$

โดยที่ใช้ $\alpha = 0.05$ เปิดตาราง Significant Ranges for Duncan's Multiple Range Test หา $r_{0.05(2,27)} = 2.91$ และ $r_{0.05(3,27)} = 3.06$

จากข้อมูลข้างต้น สามารถนำมาเปรียบเทียบได้ดังต่อไปนี้

$$3 \text{ VS } 1 : 879.33 - 729.67 = 149.66 > 22.92 (R_3)$$

$$3 \text{ VS } 2 : 879.33 - 805.00 = 74.33 > 21.80 (R_2)$$

$$2 \text{ VS } 1 : 805.00 - 729.67 = 75.33 > 21.80 (R_2)$$

จากการวิเคราะห์ พบว่า คู่ของค่าเฉลี่ย 3 VS 1 , 3 VS 2 และ 2 VS 1 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากข้อมูลทั้งหมดดังกล่าวข้างต้น สรุปได้ว่าทุกระดับของอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 จะให้ผลตอบสนองต่อความเร็วในการหล่อเหล็กแ่งที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 ที่ระดับสูง (+) ที่ 1.70 m/min กับที่ระดับต่ำ (-) ที่ 0.90 m/min ที่ระดับสูง (+) ที่ 1.70 m/min กับที่ระดับกลาง (0) ที่ 1.30 m/min และที่ระดับกลาง (0) ที่ 1.30 m/min กับที่ระดับต่ำ (-) ที่ 0.90 m/min แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition) ที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดคือ

1. อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1
(Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) 200 Ltr/min
2. ความเร็วในการหล่อเหล็กแ่ง
(Casting Speed) 0.90 m/min
3. อุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช
(Liquid Steel Temperature in Tundish) 1,530 °c

4.5 ผลการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุดแล้ว จะต้องทำการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลักเพื่อให้มั่นใจได้ว่าวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างถูกต้อง สามารถทำการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลักได้ดังต่อไปนี้

4.5.1 ข้อมูลที่ได้จากการทดลองการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก

ระดับของปัจจัยที่สภาวะปัจจุบันและที่สภาวะที่เหมาะสมแสดงดังตารางที่ 4.26 โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 4.27

สภาวะ	อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Ltr/min)	ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (m/min)	อุณหภูมิ (c)
ปัจจุบัน (Current)	150	1.30	1,550
เหมาะสม (Suitable)	200	0.90	1,530

ตารางที่ 4.26 แสดงระดับของปัจจัยที่สภาวะปัจจุบันและที่สภาวะที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Run	ความยาวของเหล็กปลายสั้น (mm)	
	สภาวะปัจจุบัน (Current Condition)	สภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition)
1	700	520
2	690	535
3	665	515
4	677	505
5	715	540
6	668	500
7	685	544
8	683	525
9	655	518
10	695	528
11	660	532
12	664	541
13	687	513
14	697	510
15	705	507
16	662	529
17	674	523
18	683	517
19	691	544
20	659	517
เฉลี่ย	681 ± 17	523 ± 13

ตารางที่ 4.27 แสดงผลการทดลองการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.4.2 การวิเคราะห์ข้อมูลการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก

จากข้อมูลที่ได้จากการทดลองการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก นำมาวิเคราะห์โดยใช้การทดสอบพารามิเตอร์ของสองประชากร (Test of Two Parameters) [4] โดยทดสอบสมมติฐานว่า ค่าเฉลี่ยของสองประชากรซึ่งมีการแจกแจงของความน่าจะเป็นแบบปกติที่มีค่าเท่ากัน โดยที่ไม่ทราบค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของทั้งสองประชากรแต่ทราบว่าเท่ากัน (Test of the hypothesis that the means of two normal distributions are equal, assuming that the standard deviations are unknown but equal.) ซึ่งสามารถกำหนดวิธีการตัดสินใจในรูปการทดสอบสมมติฐานได้ดังต่อไปนี้

โดยเป็นกรณีการทดสอบสองด้าน

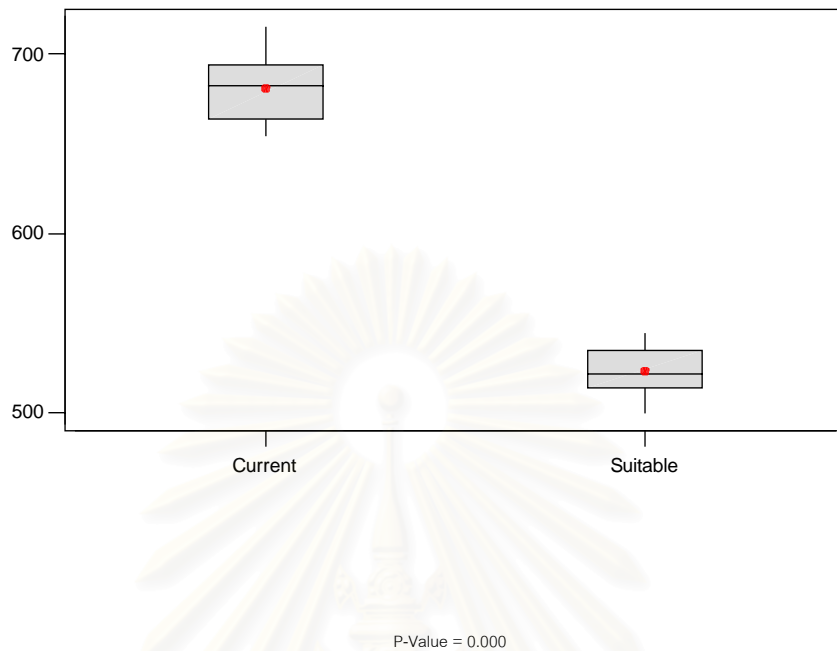
$$H_0 : \mu_x = \mu_y$$

$$H_1 : \mu_x \neq \mu_y$$

หลังจากนั้นนำมาพล็อตกราฟระหว่างที่สภาวะปัจจุบัน (Current Condition) และที่สภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition) กับความยาวโดยเฉลี่ยของเหล็กปลายสั้น (mm) เพื่อหาค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร แสดงได้ดังรูปที่ 4.19

Boxplots of Current and Suitable

(means are indicated by solid circles)



รูปที่ 4.19 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร

ผลการทดสอบความมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ของค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ พบว่าค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.000 ซึ่งเมื่อเทียบกับค่าวิกฤตคือ 0.05 พบว่า ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่าค่าวิกฤต จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองสภาวะมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นั่นก็หมายความว่าที่สภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition) ให้ค่าความยาวของเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยกว่าที่สภาวะปัจจุบัน (Current Condition) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.6 ผลการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น

การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น จะใช้แบบจำลองการถดถอย (Regression Model) [4] ในการวิเคราะห์ โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab Release 13.20 มาช่วยในการวิเคราะห์ ซึ่งผลการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยมีดังต่อไปนี้

4.6.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน (Multiple Linear Regression Model)

เขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = -2,979.99 - 0.0435222x_1 + 311.285x_2 + 0.105764x_3$$

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย [5] เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอย โดยมีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 ; \text{อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า } j$$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย แสดงดังตารางที่ 4.28

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P Value
Regression	579,924	3	193,308	325.60	0.000
Error	29,685	50	594		
Total	609,609	53			

ตารางที่ 4.28 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square) เท่ากับ 95.1 %

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั้นแสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญของการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

4.6.2 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและกำลังสอง (Linear and Square Regression Model)

เขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = -2,148.01 - 0.0408702x_1 - 8.63715x_2 + 0.0718576x_3 - 1.7333 \cdot 10^{-7} x_1^2 + 87.8906x_2^2 + 5.208333 \cdot 10^{-7} x_3^2$$

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย [5] เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอย โดยมีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 ; \text{อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า } j$$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย แสดงดังตารางที่ 4.29

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P Value
Regression	579,999	6	96,666.50	153.44	0.000
Error	29,610	47	630.01		
Total	609,609	53			

ตารางที่ 4.29 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและกำลังสอง

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square) เท่ากับ 95.1 %

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั้นแสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญของการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

4.6.3 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและอันตรกิริยา (Linear and Interactions Regression Model)

เขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = 5,774.83 - 0.169537x_1 - 3,472.93x_2 - 0.190960x_3 - 0.0648958x_1x_2 + 7.5000 \cdot 10^{-6}x_1x_3 + 0.131510x_2x_3$$

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย [5] เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอย โดยมีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 ; \text{อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า } j$$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย แสดงดังตารางที่ 4.30

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P Value
Regression	599,146	6	99,857.72	448.56	0.000
Error	10,463	47	222.62		
Total	609,609	53			

ตารางที่ 4.30 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและอันตรกิริยา

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square) เท่ากับ 98.3 %

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั่นแสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญของการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

4.6.4 แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งพหุนาม (Polynomial) ดีกรี 2 ที่มี 3 ตัวแปรอิสระ หรือ Full Quadratic ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = 6,606.81 - 0.166885x_1 - 3,792.85x_2 - 0.224866x_3 - 0.0648958x_1x_2 + 7.5000 \cdot 10^{-6}x_1x_3 + 0.131510x_2x_3 - 1.73333 \cdot 10^{-7}x_1^2 + 87.8906x_2^2 + 5.208333 \cdot 10^{-7}x_3^2$$

ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย [5] เพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของการถดถอย โดยมีสมมติฐาน ดังต่อไปนี้

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0 ; \text{อย่างน้อยที่สุดหนึ่งค่า } j$$

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอย แสดงดังตารางที่ 4.31

Source of Variation	Sum of Square	Degree of Freedom	Mean Square	F ₀	P Value
Regression	599,221	9	66,580.13	282.01	0.000
Error	10,388	44	6,407.40		
Total	609,609	53			

ตารางที่ 4.31 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของแบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งพหุนาม (Polynomial) ดีกรี 2 ที่มี 3 ตัวแปรอิสระ

โดยมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (The Coefficient of Determination : R-Square) เท่ากับ 98.3 %

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เมื่อพิจารณาค่า P-Value พบว่าแบบจำลองการถดถอยมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 ซึ่งน้อยกว่า 0.05 นั้นแสดงว่าแบบจำลองการถดถอยมีนัยสำคัญของการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

การเลือกรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด จะพิจารณาที่ค่า R-Square ที่สูงที่สุด จากทั้ง 4 รูปแบบของแบบจำลองการถดถอย และพิจารณาตามหลักการ [4] ดังนี้

- เป็นสมการที่สามารถพยากรณ์ค่าตัวแปรตามได้แม่นยำที่สุด โดยต้องการที่จะมีตัวแปรอิสระที่มีอิทธิพลต่อ y ให้มากที่สุด ในสมการ เพื่อให้สมการมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด
- ไม่ต้องการใช้ตัวแปรอิสระในสมการมากเกินไปจนความจำเป็น

จะเห็นได้ว่า รูปแบบของแบบจำลองการถดถอยที่มีค่า ค่า R-Square ที่สูงที่สุดและเป็นไปตามหลักการดังกล่าวข้างต้น คือ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและอันตรกิริยา (Linear and Interactions Regression Model)

เขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้ดังต่อไปนี้

$$y = 5,774.83 - 0.169537x_1 - 3,472.93x_2 - 0.190960x_3 - 0.0648958x_1x_2 + 7.5000 \cdot 10^{-6}x_1x_3 + 0.131510x_2x_3$$

สรุปได้ว่าสหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น คือ

$$y = 5,774.83 - 0.169537x_1 - 3,472.93x_2 - 0.190960x_3 - 0.0648958x_1x_2 + 7.5000 \cdot 10^{-6}x_1x_3 + 0.131510x_2x_3$$

โดยที่

x_1 คือ ปัจจัย A : อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1

(Flow Rate of Billet Cooling Water Zone 1) มีหน่วยเป็น Ltr/min

x_2 คือ ปัจจัย B : ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง

(Casting Speed)

มีหน่วยเป็น m/min

x_3 คือ ปัจจัย C : อุณหภูมิของน้ำเหล็กในทันดิช

(Liquid Steel Temperature in Tundish)

มีหน่วยเป็น c

y คือ ตัวแปรตอบสนอง : ความยาวของเหล็กปลายสั้น

(Billet Crop End Length)

มีหน่วยเป็น mm

บทที่ 5

บทวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 บทวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1.1 จากการศึกษาปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น โดยการระดมสมอง (Brainstorming) ผ่านการวิเคราะห์ทำให้สามารถเลือกปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น 3 ปัจจัย ซึ่งได้แก่ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแ่ง (Casting Speed) และอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) หลังจากนั้นนำปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย มาวางแผนการออกแบบแบบการทดลอง พบว่าปัจจัยทั้ง 3 ปัจจัย เป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการคัดเลือกปัจจัยตั้งแต่นั้น

5.1.2 ในการทดลองครั้งนี้ได้กำหนดค่าสูง ค่ากลางและค่าต่ำของปัจจัยที่ได้จากการศึกษา ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้น อาจอยู่นอกขอบเขตที่ทำการศึกษา เช่น อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone1) จากการทดลองพบว่า อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 ที่ระดับสูง (+) ที่ 200 Ltr/min ทำให้เกิดความยาวเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด แต่อาจเป็นไปได้ที่อาจมีปริมาณน้ำหล่อเย็นช่วงที่ 1 นอกขอบเขตการศึกษาที่ทำให้เกิดความยาวเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยกว่า

5.1.3 สำหรับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone1) จะกำหนดขอบเขตของปัจจัยให้ต่ำกว่า 100 Ltr/min ไม่ได้ เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 ต่ำเกินไป จะทำให้มีปัญหาในการหล่อเหล็กแ่ง เหล็กแ่งเย็นตัวช้า จะเกิดการแตกขณะหล่อ (Break Out) และจะกำหนดขอบเขตของปัจจัยให้สูงกว่า 200 Ltr/min ไม่ได้ เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแ่งช่วงที่ 1 สูงเกินไป เหล็กแ่งเย็นตัวเร็วจะทำให้มีปัญหาในการตัดตรงของเหล็กแ่งที่ชุดกดเหล็กแ่ง (Withdrawal Unit) มีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการผลิตเหล็กแ่งแบบต่อเนื่อง

5.1.4 สำหรับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) จะกำหนดขอบเขตของปัจจัยให้ต่ำกว่า 0.90 m/min ไม่ได้ เนื่องจากเมื่อความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งต่ำเกินไป จะทำให้มีปัญหาในการหล่อเหล็กแท่ง เหล็กแท่งจะหล่อไม่ได้ และจะกำหนดขอบเขตของปัจจัยให้สูงกว่า 1.70 m/min ไม่ได้ เนื่องจากเมื่อความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งสูงเกินไป จะทำให้มีปัญหาในการหล่อเหล็กแท่ง เหล็กแท่งจะเกิดการแตกขณะหล่อ (Break Out) มีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการผลิตเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง

5.1.5 สำหรับอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish) จะกำหนดขอบเขตของปัจจัยให้ต่ำกว่า 1,530 °c ไม่ได้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิชต่ำเกินไป จะทำให้มีปัญหาในการหล่อเหล็กแท่ง เหล็กแท่งจะหล่อไม่ได้ เหล็กจะแข็งตัวเป็นของแข็งก่อนที่จะทำการหล่อ และจะกำหนดขอบเขตของปัจจัยให้สูงกว่า 1,570 °c ไม่ได้ เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิน้ำเหล็กในทันดิชสูงเกินไป จะทำให้มีปัญหาในการหล่อเหล็กแท่ง เหล็กแท่งจะเกิดการแตกขณะหล่อ (Break Out) มีผลกระทบโดยตรงต่อกระบวนการผลิตเหล็กแท่งแบบต่อเนื่อง

5.1.6 ผลจากการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก สามารถสรุปมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปัจจุบัน (Current Condition) กับที่สภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition) คิดเป็นมูลค่า 236,196 บาท/ปี แสดงดังตารางที่ 5.1

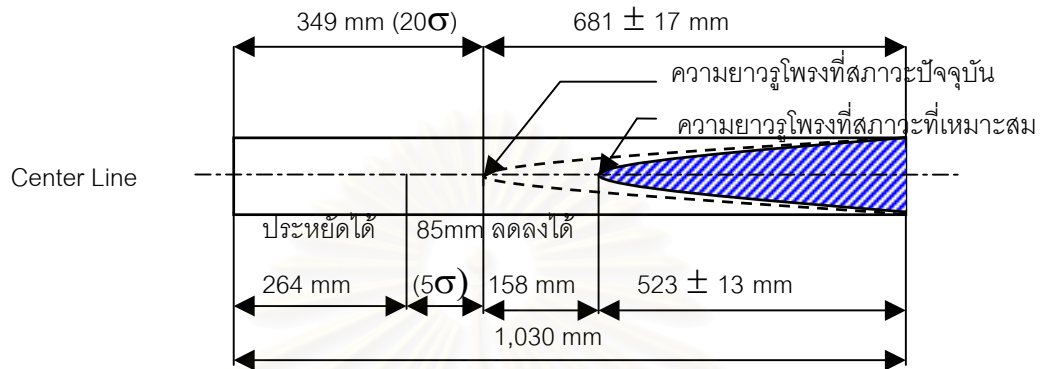
สภาวะ	เหล็กปลายสั้น(m)	น้ำหนัก (kg/ครั้ง)	น้ำหนัก (kg/ปี)	ต้นทุนเหล็กแท่ง (บาท/kg)	ต้นทุนเศษเหล็ก (บาท/kg)	ผลต่าง (บาท/kg)	มูลค่าของเสีย (บาท/ปี)	มูลค่าการลดของเสีย (บาท/ปี)
	(1)	(2) = (1)x172	(3) = (2)x1,944	(4)	(5)	(6) = (4) – (5)	(7) = (3) x (6)	(8)=(A)-(B)
ปัจจุบัน	0.681	117	227,448	7.50	3.00	4.50	1,023,516 ^(A)	236,196
เหมาะสม	0.523	90	174,960	7.50	3.00	4.50	787,320 ^(B)	

หมายเหตุ 1. น้ำหนักเหล็กแท่งเนื้อดีที่นับเป็นผลผลิตเท่ากับ 172 kg/m

2. จำนวนเหล็กปลายสั้นที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1 Pc/(ครั้งxLine) x 3 Line x 54 ครั้ง/Month x 12 Months/Year = 1,944 Pcs/Year

ตารางที่ 5.1 แสดงมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสภาวะปัจจุบัน (Current Condition) กับสภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition)

นอกจากนี้ สามารถสรุปมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นที่เมื่อตัดความยาว คิดเป็นมูลค่า 393,660 บาท/ปี แสดงดังตารางที่ 5.2 จากเดิมเมื่อตัดที่ 349 mm (20 σ) คงเหลือที่ 85 mm (5 σ) แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แสดงเหล็กปลายสั้นที่เมื่อตัดความยาว

การตัด	เหล็กปลายสั้นเนื้อดี(m)	น้ำหนัก (kg/ครั้ง) (2) = (1)x172	น้ำหนัก (kg/ปี) (3) = (2)x1,944	ต้นทุนเหล็กแท่ง (บาท/kg) (4)	ต้นทุนเศษเหล็ก (บาท/kg) (5)	ผลต่าง (บาท/kg) (6) = (4) – (5)	มูลค่าของเสีย (บาท/ปี) (7) = (3) x (6)	มูลค่าการลดของเสีย (บาท/ปี) (8)=(A)-(B)
เดิม	0.349	60	116,640	7.50	3.00	4.50	524,880 ^(A)	393,660
ใหม่	0.085	15	29,160	7.50	3.00	4.50	131,220 ^(B)	

- หมายเหตุ 1. น้ำหนักเหล็กแท่งเนื้อดีที่นับเป็นผลผลิตเท่ากับ 172 kg/m
2. จำนวนเหล็กปลายสั้นที่เกิดขึ้นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1 Pc/(ครั้งxLine) x 3 Line x 54 ครั้ง/Month x 12 Months/Year = 1,944 Pcs/Year

ตารางที่ 5.2 แสดงมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นที่เมื่อตัดความยาว

บทที่ 6

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

6.1.1 ในการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น ปัจจัยต่างๆ ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยการระดมสมอง (Brainstorming) ซึ่งทำให้เราสามารถแยกแยะปัจจัยต่างๆ ออกได้เป็น 4 ปัจจัยหลัก ซึ่งได้แก่ ปัจจัยที่เกิดเนื่องจากคน ปัจจัยที่เกิดเนื่องจากวัตถุดิบ ปัจจัยที่เกิดเนื่องจากเครื่องจักรและอุปกรณ์ และปัจจัยที่เกิดเนื่องจากวิธีการ ซึ่งภายหลังจากการวิเคราะห์ทำให้สามารถเลือกปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น 3 ปัจจัย ซึ่งได้แก่ อัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) และอุณหภูมิเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)

6.1.2 หลังจากได้ปัจจัยที่น่าจะมีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นทั้ง 3 ปัจจัยแล้ว จึงได้วางแผนการออกแบบแบบการทดลอง ซึ่งสามารถวางแผนการออกแบบการทดลองออกได้เป็น 2 แบบคือ แผนการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น และแผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

6.1.2.1 แผนการออกแบบการทดลองที่ใช้ในการทดลองเบื้องต้น ได้ใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเมื่อปัจจัยมี 2 ระดับ (2^k Factorial Design) เพื่อที่จะตัดปัจจัยที่ไม่น่าจะมีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นออกไป และจะได้ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นจริงๆ ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองเบื้องต้นพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นคืออัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 (Flow Rate of Billet Cooling Water Zone1) ความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง (Casting Speed) และอุณหภูมิเหล็กในทันดิช (Liquid Steel Temperature in Tundish)

6.1.2.2 แผนการออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม หลังจากได้ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นแล้วก็จะทดลองหาสภาวะที่เหมาะสม เพื่อให้ทราบถึงปัจจัยที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวนานที่สุด โดยใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบคงที่ เมื่อปัจจัยมี 3 ระดับ (3^k Factorial Design with Fixed Effect Model) เข้ามาวิเคราะห์อย่างละเอียด ซึ่งในการทดลองดัง

6.1.6 จากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น โดยใช้แบบจำลองการถดถอย 4 แบบ คือ

6.1.6.1 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นเชิงซ้อน (Multiple Linear Regression Model)

6.1.6.2 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและกำลังสอง (Linear and Square Regression Model)

6.1.6.3 แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นและอันตรกิริยา (Linear and Interactions Regression Model)

6.1.6.4 แบบจำลองการถดถอยเส้นโค้งโพลิโนเมียล (Polynomial) ดีกรี 2 ที่มี 3 ตัวแปรอิสระ หรือ Full Quadratic

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่าทุกแบบจำลองการถดถอยทั้ง 4 แบบ มีนัยสำคัญของการถดถอยที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

จากการเลือกรูปแบบของแบบจำลองการถดถอยที่เหมาะสมที่สุด ซึ่งพิจารณาที่ค่า R-Square ที่สูงที่สุด จากทั้ง 4 แบบและพิจารณาตามหลักการการเลือกรูปแบบของแบบจำลองการถดถอย สรุปได้ว่าสหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น คือ

$$y = 5,774.83 - 0.169537x_1 - 3,472.93x_2 - 0.190960x_3 - 0.0648958x_1x_2 + 7.5000 \cdot 10^{-6}x_1x_3 + 0.131510x_2x_3$$

6.1.7 ผลจากการวิเคราะห์การประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก พบว่าที่สภาวะปัจจุบัน (Current Condition) เกิดความยาวของเหล็กปลายสั้นมีความยาวโดยเฉลี่ย 681 ± 17 mm และเมื่อนำความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ได้จากสภาวะที่เหมาะสม (Suitable Condition) ซึ่งเกิดความยาวของเหล็กปลายสั้นมีความยาวโดยเฉลี่ย 523 ± 13 mm พบว่าค่าเฉลี่ยของความยาวของเหล็กปลายสั้นที่สภาวะที่เหมาะสมนี้มีความยาวน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ได้จากสภาวะปัจจุบันเท่ากับ 158 mm สามารถลดของเสียคิดเป็นมูลค่าเท่ากับ 236,196 บาทต่อปี นอกจากนี้ยังพบว่าสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นที่เผื่อตัดความยาว จากเดิมเผื่อตัดที่ 349 mm (20 σ) คงเหลือที่ 85 mm (5 σ) ลดลงได้เท่ากับ 264 mm สามารถลดของเสียคิดเป็นมูลค่าเท่ากับ 393,660 บาทต่อปี ดังนั้นสามารถลดความยาวของเหล็กปลายสั้นลงได้ทั้งหมด 422 mm หรือคิดเป็นมูลค่าการลดของเสียจากเหล็กปลายสั้นเท่ากับ 629,856 บาทต่อปี อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

6.2 ข้อเสนอแนะและข้อคิดเห็น

6.2.1 ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้น และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด โดยในการวิเคราะห์ไม่ได้พิจารณาเปรียบเทียบถึงค่าใช้จ่ายแต่ละเงื่อนไขว่าเหมาะสมหรือไม่ ดังนั้นในการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการการผลิตเหล็กแท่งแบบต่อเนื่องจึงควรทำการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายต้นทุนมาประกอบการตัดสินใจในการกำหนดสภาวะที่เหมาะสม

6.2.2 ในกรณีที่ระดับของปัจจัยที่ทำการศึกษามีช่วงกว้างแต่ไม่สามารถจะทดลองทุกระดับของปัจจัยได้ ดังนั้นจึงควรกำหนดแผนการออกแบบการทดลองเป็นแบบการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบแบบสุ่ม (Factorial Design with Random Effect Model) ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นตัวแทนของระดับของปัจจัยทั้งหมดแทนที่จะกำหนดแผนการออกแบบการทดลองเป็นแบบการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบผลกระทบบคงที่ (Factorial Design with Fixed Effect Model) ซึ่งเป็นตัวแทนของระดับที่ทำการศึกษาเท่านั้น

6.2.3 งานวิจัยฉบับนี้ควรได้รับการวิจัยและพัฒนาต่อไปกับเหล็กแท่งชนิดอื่นๆที่ทำการผลิตทั้งหมด ซึ่งไม่ได้เจาะจงเฉพาะเหล็กแท่งชนิด M15 เท่านั้น เพื่อที่จะให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดเหล็กปลายสั้นและสภาวะที่เหมาะสมที่ทำให้เกิดเหล็กปลายสั้นที่มีความยาวน้อยที่สุด ซึ่งจะสามารถทราบความยาวของเหล็กปลายสั้นที่แน่นอนอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ได้ทั้งหมด ทั้งนี้จะเป็นการลดต้นทุนการผลิตเหล็กแท่ง ด้วยการ เพิ่ม CCM Yield ด้วยวิธีการลดของเสียของเหล็กปลายสั้นได้ทั้งหมดเป็นประโยชน์ต่อโรงงานตัวอย่างต่อไป

รายการอ้างอิง

1. มนัส สติรจินดา. วิศวกรรมงานหล่อเหล็ก. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2530.
2. Montgomery, D.C. Design and Analysis of Experiments. 5th edition (n.p.) : John Wiley and Son, 2001.
3. กัลยา วานิชย์บัญชา. หลักสถิติ. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
4. ศิริจันทร์ ทองประเสริฐ, จันทนา จันทโร. สถิติสำหรับงานวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
5. ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
6. กฤษดา อัครรุ่งแสงกุล. การปรับปรุงคุณภาพของหัวอ่านข้อมูลของฮาร์ดดิสต์โดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
7. คำรณ พิทักษ์. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการกะเทาะเมล็ดมะม่วงหิมพานต์โดยใช้เครื่องเหวี่ยง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
8. ทงพล พิเศษฐ์วัฒนา. การประยุกต์การออกแบบการทดลองในการปรับปรุงคุณภาพของแรงดึงของหัวอ่านเขียนข้อมูลในฮาร์ดดิสต์ไดรฟ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.
9. ทศพล เกียรติเจริญผล. การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการเคลือบแลกเกอร์บนแผ่นเหล็กดีบุกโดยวิธีการออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2537.
10. ศักรินทร์ อินทปัญญา. การวิเคราะห์พารามิเตอร์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเคลือบเงินของกระจกเงาโดยประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
11. สมเจตน์ สิงห์พันธุ์. ผลของเงื่อนไขการแปรรูปโลหะที่ใช้วิธีตีเค็มที่มีต่อลักษณะเฉพาะของกรรมวิธี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2532..
12. สุทธิวัฒน์ มหัทธปกกรณ์. การศึกษาปัจจัยของกรรมวิธีเชื่อมระบบ TIG สำหรับท่อเหล็กกล้าไร้สนิมเฟอร์ริติกชนิด SUS436L. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลการทดสอบทางสถิติ รวมถึงกราฟต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป
ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

General Linear Model: B Length versus C Water Z1, C Speed, S Temp.

Factor Type Levels Values

C Water fixed 2 100 200

C Speed fixed 2 0.9 1.7

S Temp. fixed 2 1530 1570

Analysis of Variance for B Length, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
C Water	1	192502	192502	192502	147.75	0.000
C Speed	1	39701	39701	39701	30.47	0.000
S Temp.	1	31241	31241	31241	23.98	0.000
Error	12	15635	15635	1303		
Total	15	279077				

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	695.688	9.024	77.09	0.000
C Water				
100	109.687	9.024	12.16	0.000
C Speed				
0.9	-49.812	9.024	-5.52	0.000
S Temp.				
1530	-44.188	9.024	-4.90	0.000

R denotes an observation with a large standardized residual.

โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของตารางทดลองเบื้องต้น

Regression Analysis: Normal Probability Pk x 100 versus Residuals

The regression equation is

$$\text{Normal Probability Pk x 100} = 50.0 + 0.904 \text{ Residuals}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	50.000	1.488	33.59	0.000
Residual	0.90429	0.04761	18.99	0.000

S = 5.953 R-Sq = 96.3% R-Sq(adj) = 96.0%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	12785	12785	360.72	0.000
Residual Error	14	496	35		
Total	15	13281			

Unusual Observations

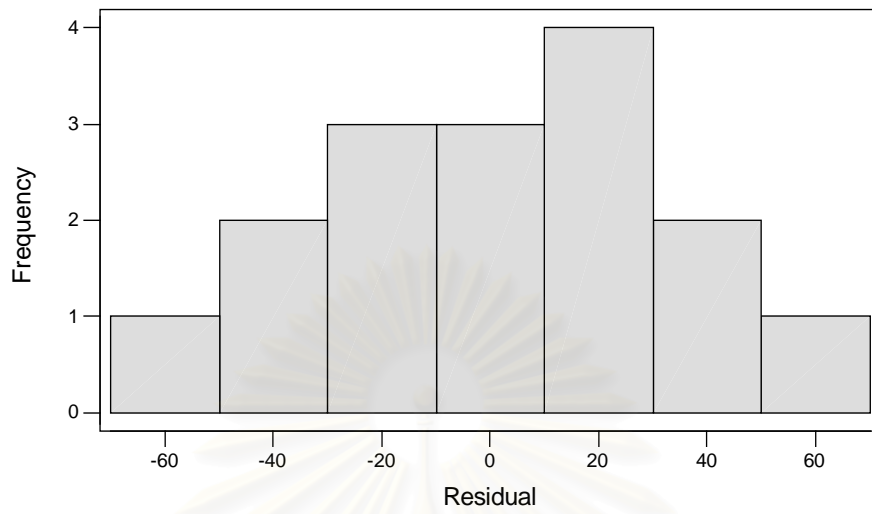
Obs	Residual	Normal P	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	-69.6	3.13	-12.96	3.63	16.09	3.41R

R denotes an observation with a large standardized residual

โปรแกรมแสดงผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ของกราฟส่วนตกค้างกับค่า
ความน่าจะเป็นสะสม P_k ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

Histogram of the Residuals

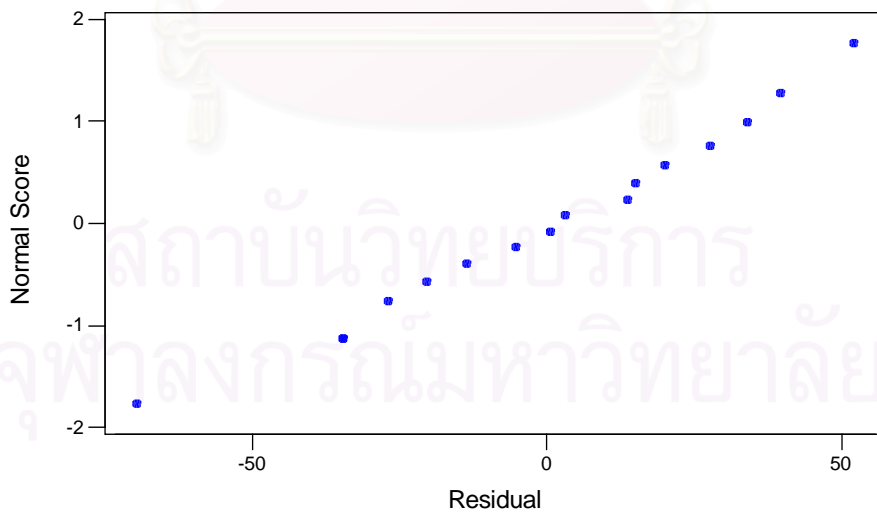
(response is B Length)



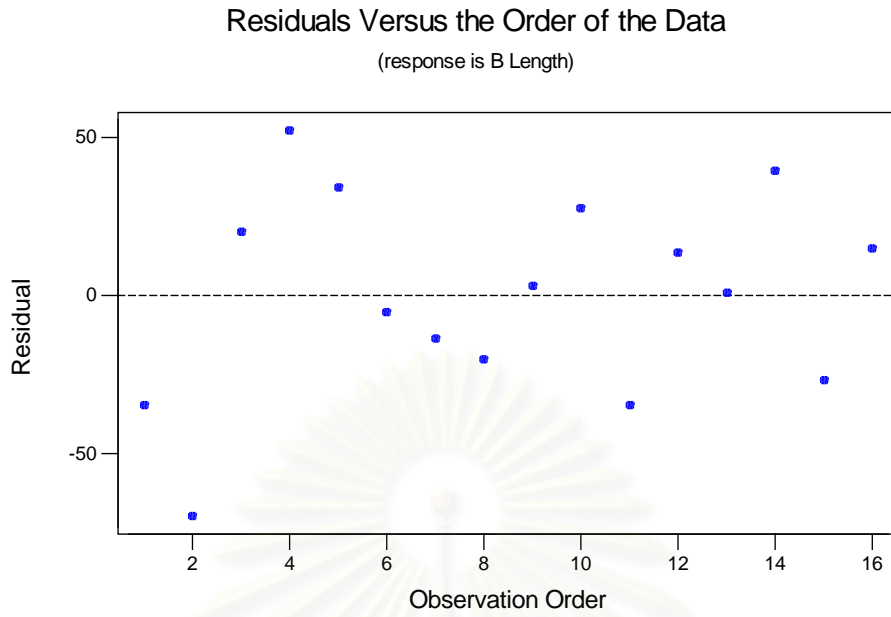
รูปที่ 1 แสดงฮิสโตแกรมของส่วนตกค้างในส่วนของการทดลองเบื้องต้น

Normal Probability Plot of the Residuals

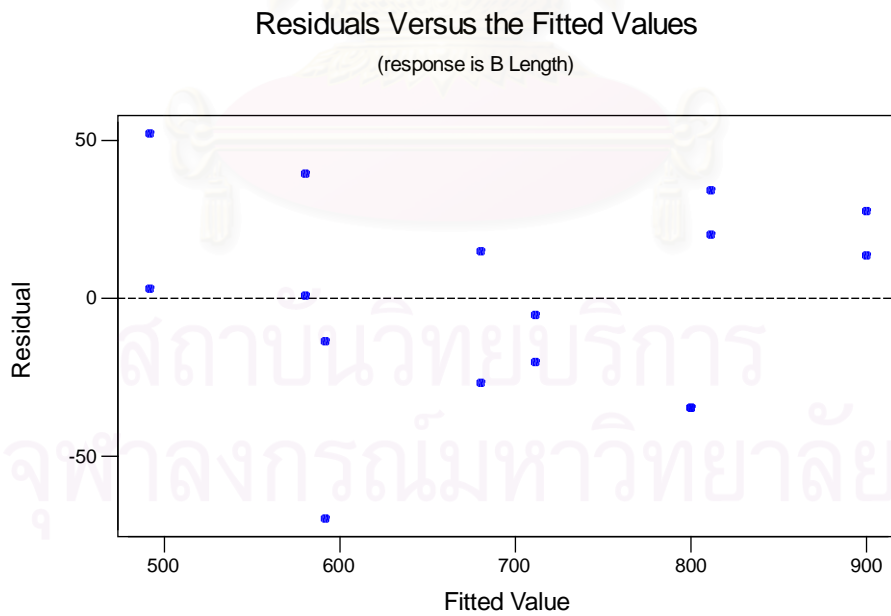
(response is B Length)



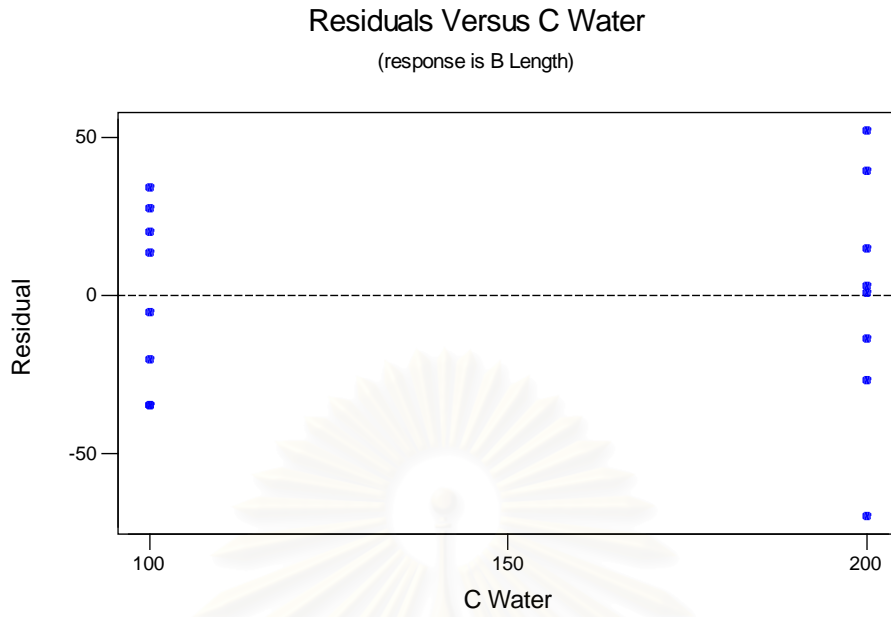
รูปที่ 2 แสดง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



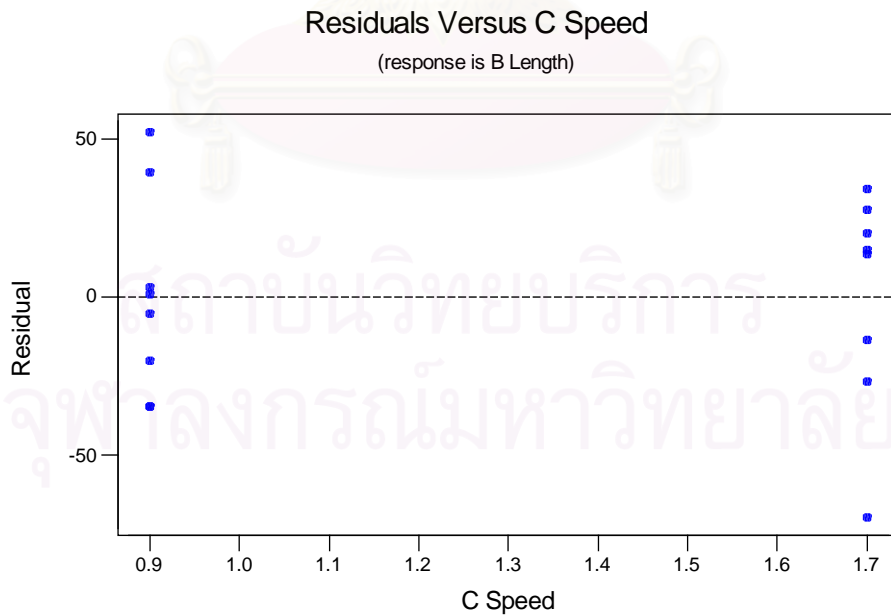
รูปที่ 3 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูลในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



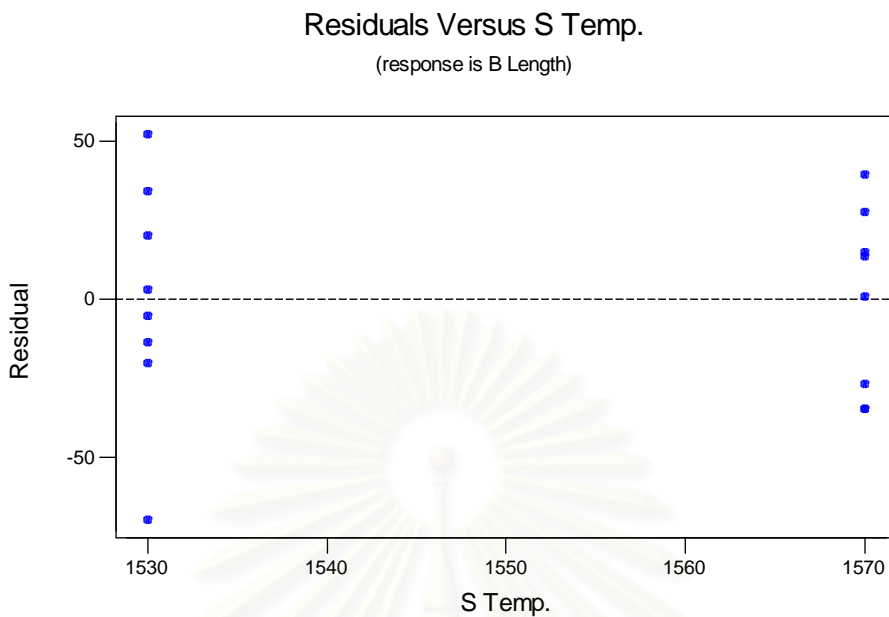
รูปที่ 4 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย
ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1
ในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่งในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



รูปที่ 7 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันทีในส่วนของ การทดลองเบื้องต้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ผลการทดสอบทางสถิติ รวมถึงกราฟต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป
ในส่วนของกรทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

General Linear Model: B Length versus C Water Z1, C Speed, S Temp.

Factor	Type	Levels	Values
C Water	fixed	3	100 150 200
C Speed	fixed	3	0.9 1.3 1.7
S Temp.	fixed	3	1530 1550 1570

Analysis of Variance for B Length, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
C Water	2	426205	426205	213103	632.84	0.000
C Speed	2	89362	89362	44681	132.69	0.000
S Temp.	2	64431	64431	32216	95.67	0.000
C Water*C Speed	4	16483	16483	4121	12.24	0.000
C Water*S Temp.	4	1353	1353	338	1.00	0.422
C Speed*S Temp.	4	1859	1859	465	1.38	0.267
C Water*C Speed*S Temp.	8	823	823	103	0.31	0.957
Error	27	9092	9092	337		
Total	53	609609				

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	696.222	2.497	278.80	0.000
C Water				
100	108.444	3.532	30.71	0.000
150	0.722	3.532	0.20	0.839
C Speed				
0.9	-49.056	3.532	-13.89	0.000
1.3	-1.500	3.532	-0.42	0.674
S Temp.				
1530	-42.278	3.532	-11.97	0.000
1550	-0.056	3.532	-0.02	0.988
C Water*C Speed				
100 0.9	-25.944	4.994	-5.19	0.000
100 1.3	1.833	4.994	0.37	0.716
150 0.9	0.278	4.994	0.06	0.956
150 1.3	-4.278	4.994	-0.86	0.399
C Water*S Temp.				
100 1530	7.611	4.994	1.52	0.139
100 1550	-0.278	4.994	-0.06	0.956
150 1530	0.167	4.994	0.03	0.974
150 1550	-0.222	4.994	-0.04	0.965
C Speed*S Temp.				
0.9 1530	6.944	4.994	1.39	0.176
0.9 1550	0.389	4.994	0.08	0.939
1.3 1530	3.389	4.994	0.68	0.503
1.3 1550	-1.667	4.994	-0.33	0.741
C Water*C Speed*S Temp.				
100 0.9 1530	-1.944	7.063	-0.28	0.785
100 0.9 1550	-2.222	7.063	-0.31	0.755
100 1.3 1530	-3.722	7.063	-0.53	0.603
100 1.3 1550	4.500	7.063	0.64	0.529
150 0.9 1530	-0.000	7.063	-0.00	1.000
150 0.9 1550	0.722	7.063	0.10	0.919
150 1.3 1530	6.556	7.063	0.93	0.362
150 1.3 1550	-8.222	7.063	-1.16	0.255

R denotes an observation with a large standardized residual.

โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Regression Analysis: Normal Probability Plot Pk x100 versus Residuals

The regression equation is

$$\text{Normal Probability Plot Pk x100} = 50.0 + 1.20 \text{ Residuals}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	49.9991	0.9450	52.91	0.000
Residual	1.19769	0.04035	29.68	0.000

S = 6.944 R-Sq = 94.4% R-Sq(adj) = 94.3%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	42476	42476	880.89	0.000
Residual Error	52	2507	48		
Total	53	44983			

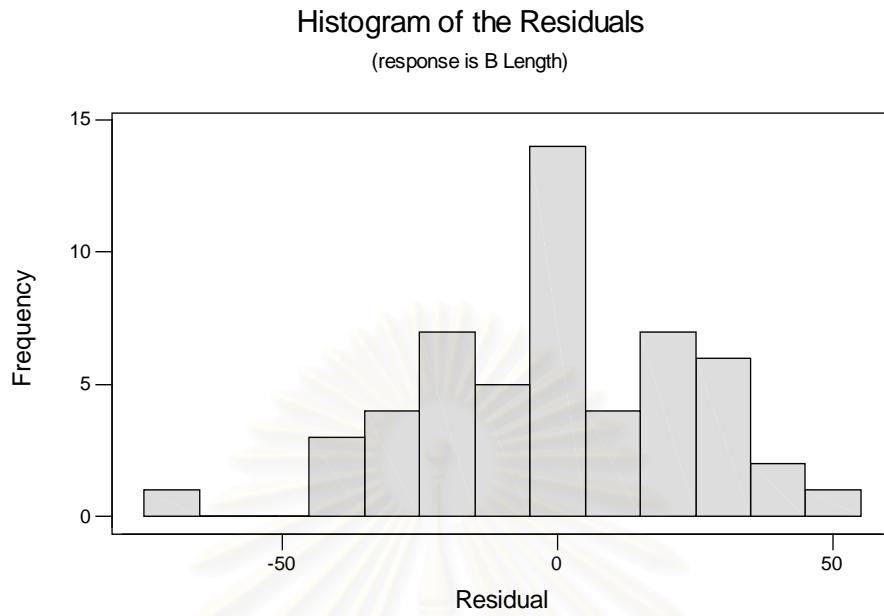
Unusual Observations

Obs	Residual	Normal P	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	-70.3	0.930	-34.235	2.991	35.165	5.61RX

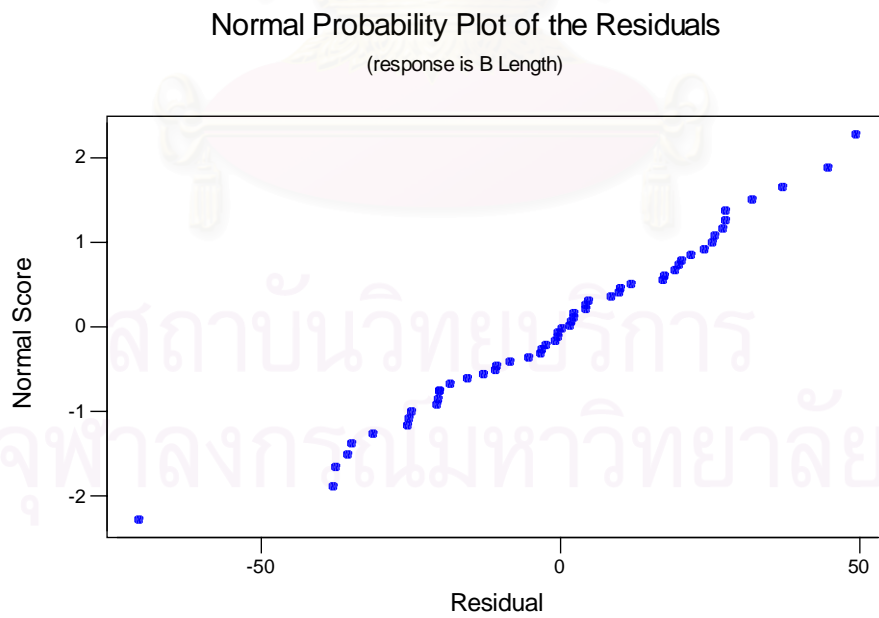
R denotes an observation with a large standardized residual

X denotes an observation whose X value gives it large influence.

โปรแกรมแสดงผลการหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R-Square) ของกราฟส่วนตกค้างกับค่าความน่าจะเป็น
สะสม P_k ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



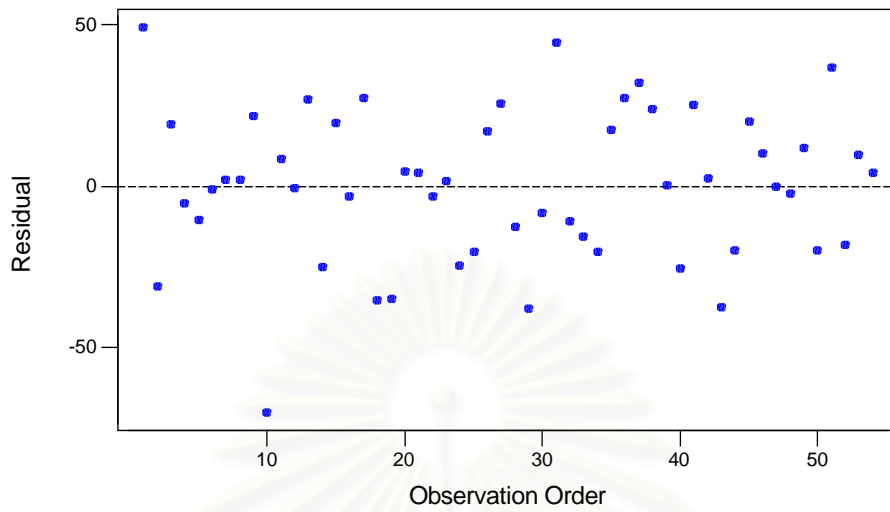
รูปที่ 1 แสดงฮิสโตแกรมของส่วนตกค้างในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



รูปที่ 2 แสดง Normal Probability Plot ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Residuals Versus the Order of the Data

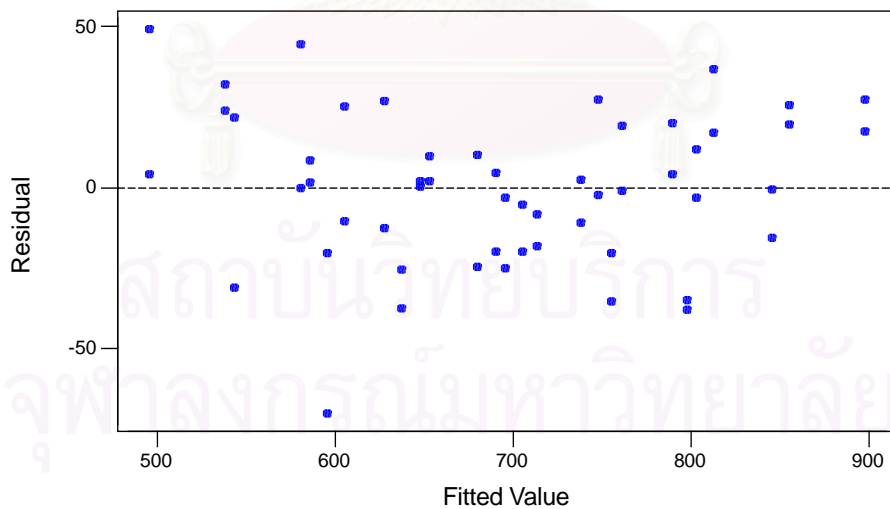
(response is B Length)



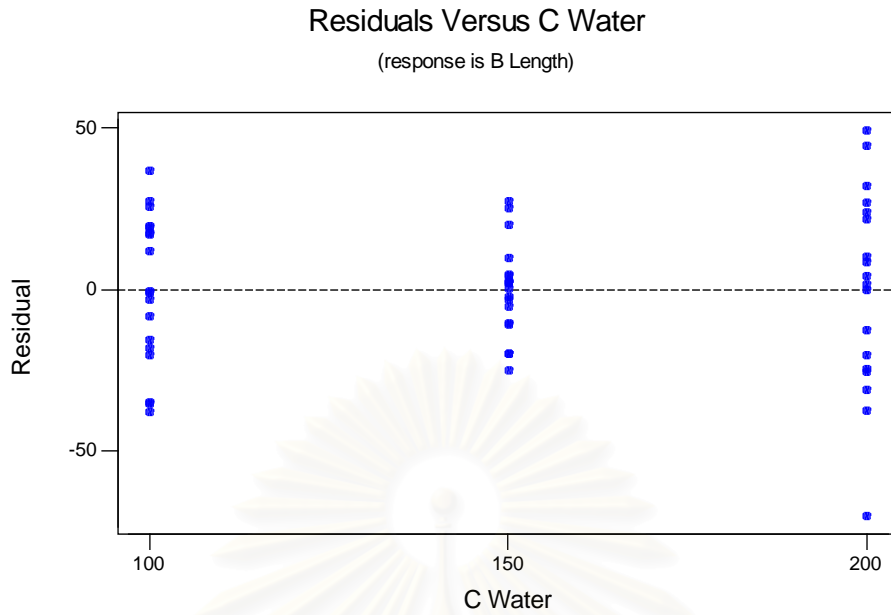
รูปที่ 3 แสดงค่าส่วนตกค้างกับลำดับเวลาของการเก็บข้อมูล
ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Residuals Versus the Fitted Values

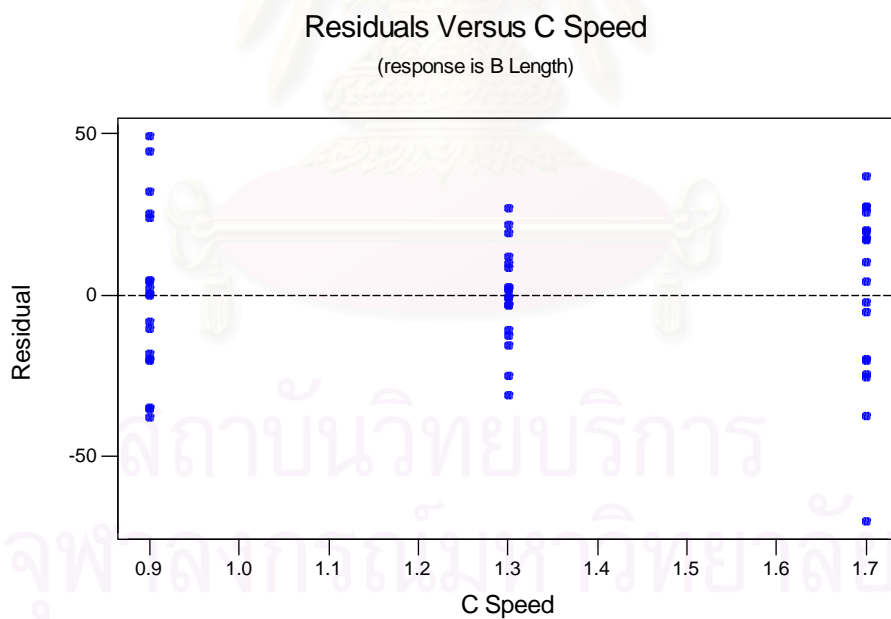
(response is B Length)



รูปที่ 4 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความยาวของเหล็กปลายสั้นที่ถูกทำนาย
ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

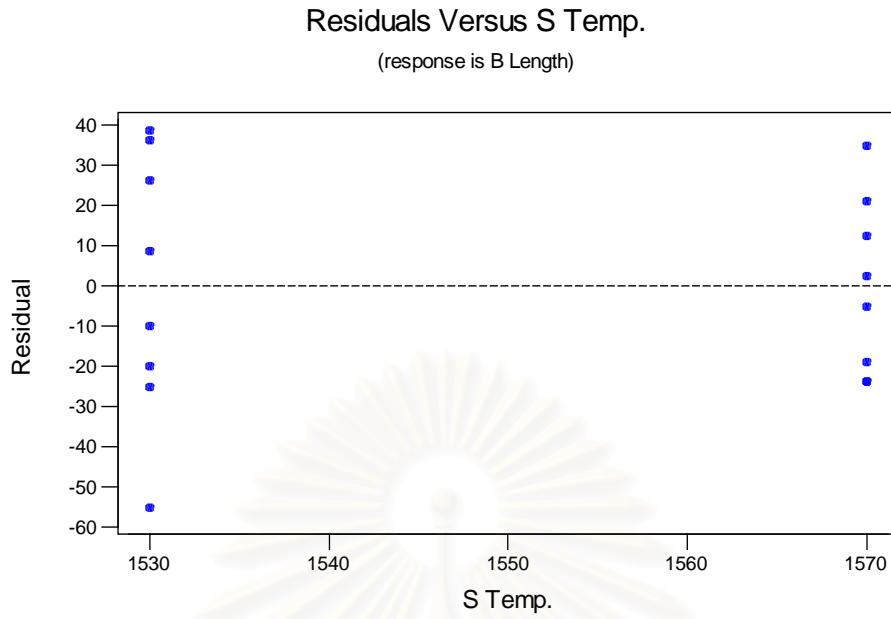


รูปที่ 5 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1



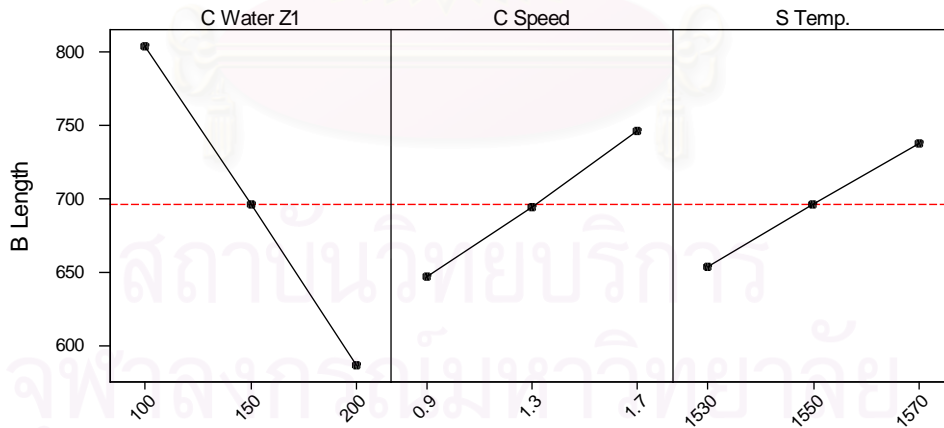
ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

รูปที่ 6 แสดงค่าส่วนตกค้างกับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง
ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



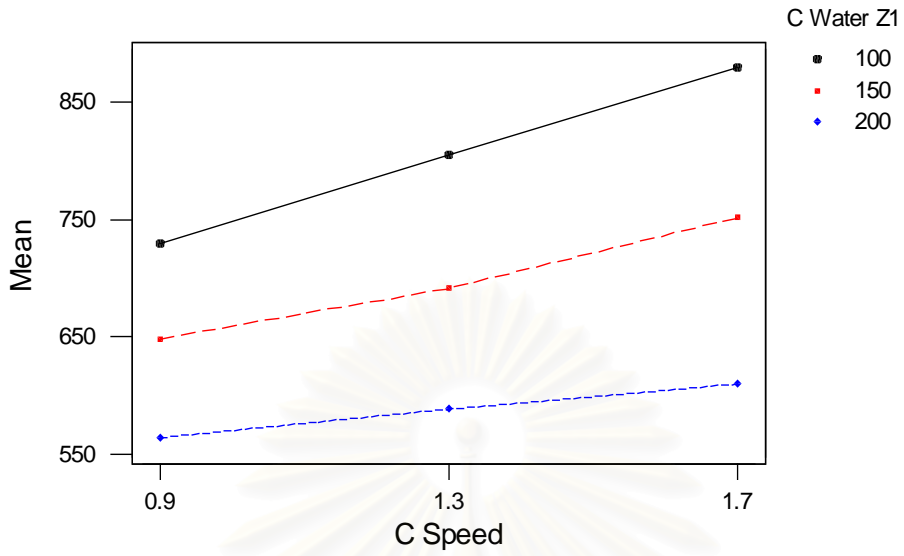
รูปที่ 7 แสดงค่าส่วนตกค้างกับอุณหภูมิน้ำเหล็กในทันที
 ในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม

Main Effects Plot-Data Means for Billet Crop End Length



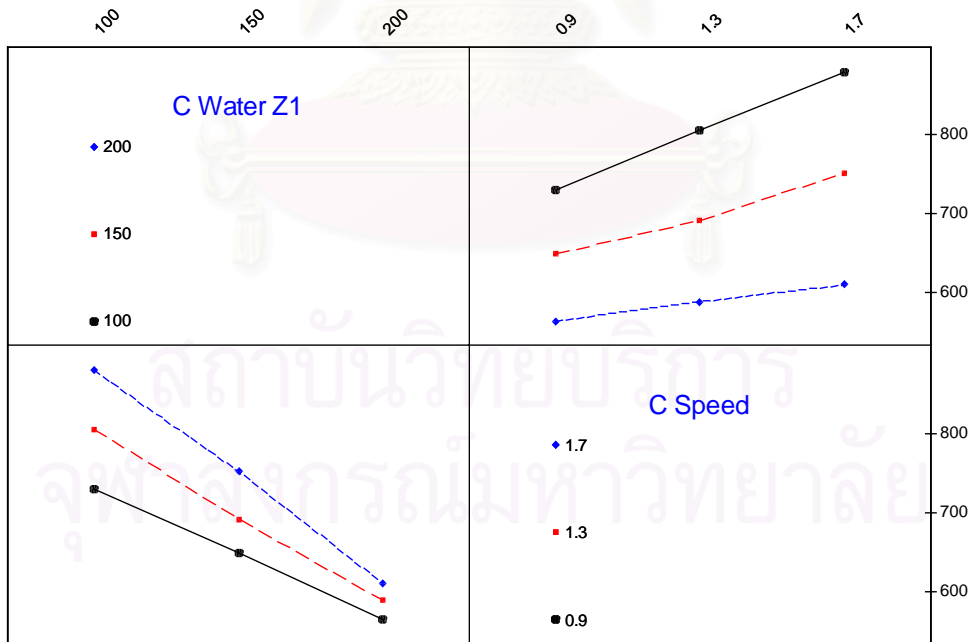
รูปที่ 8 แสดงปัจจัยหลักกับค่าเฉลี่ยของความยาวของเหล็กปลายสั้น

Interaction Plot-Data Means for Billet Crop End Length



รูปที่ 9 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง กับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น

Interaction Plot-Data Means for Billet Crop End Length



รูปที่ 10 แสดงอันตรกิริยาระหว่างอัตราการไหลของน้ำหล่อเหล็กแท่งช่วงที่ 1 กับความเร็วในการหล่อเหล็กแท่ง กับค่าเฉลี่ยของความยาวเหล็กปลายสั้น ทั้งสองกราฟ

ภาคผนวก ค

ผลการทดสอบทางสถิติ รวมถึงกราฟต่างๆ ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป
ในส่วนของการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Two-Sample T-Test and CI: Current, Propose

Two-sample T for Current vs Suitable

	N	Mean	StDev	SE Mean
Current	20	680.8	17.1	3.8
Suitable	20	523.2	13.2	3.0

Difference = μ Current - μ Suitable

Estimate for difference: 157.60

95% CI for difference: (147.80, 167.40)

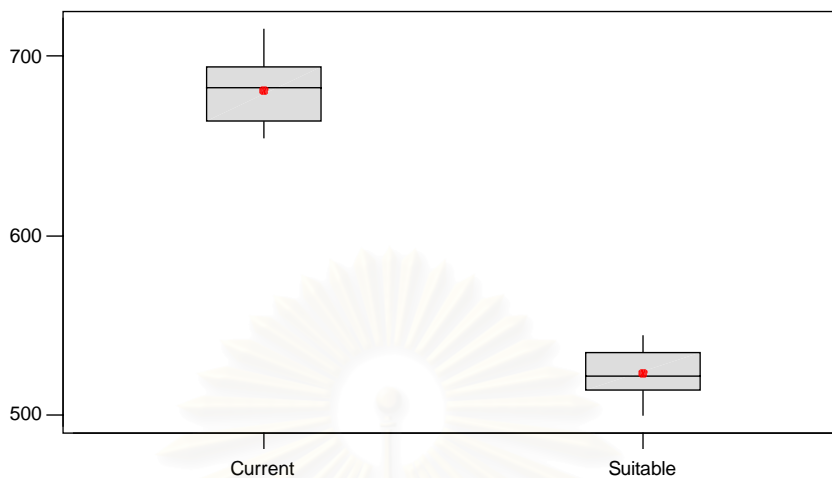
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 32.64 P-Value = 0.000 DF = 35

โปรแกรมแสดงผลการทดสอบความมีนัยสำคัญของสองประชากร
 ในส่วนของการประยุกต์ใช้เงื่อนไขของปัจจัยหลัก

สถาบันวิทยบริการ
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Boxplots of Current and Suitable

(means are indicated by solid circles)



รูปที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของทั้งสองประชากร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง

ผลการทดสอบทางสถิติ ที่ได้จากโปรแกรมสำเร็จรูป
ในส่วนของการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ของปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิด
เหล็กปลายสั้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Response Surface Regression (Linear): B Length versus C Water Z1, C Speed, ...

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for B Length

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-2980	333.925	-8.924	0.000
C Water	-0	0.002	-26.793	0.000
C Speed	311	25.381	12.264	0.000
S Temp.	0	0.010	10.417	0.000

S = 24.37 R-Sq = 95.1% R-Sq(adj) = 94.8%

Analysis of Variance for B Length

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	3	579924	579924	193308	325.60	0.000
Linear	3	579924	579924	193308	325.60	0.000
Residual Error	50	29685	29685	594		
Lack-of-Fit	23	20593	20593	895	2.66	0.008
Pure Error	27	9092	9092	337		
Total	53	609609				

Observation	B Length	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	545.000	495.306	7.776	49.694	2.15R
2	512.000	545.111	6.632	-33.111	-1.41
3	780.000	762.722	6.632	17.278	0.74
4	700.000	703.722	6.632	-3.722	-0.16
5	595.000	604.111	6.632	-9.111	-0.39
6	760.000	762.722	6.632	-2.722	-0.12
7	655.000	653.917	5.243	1.083	0.05
8	650.000	646.417	5.243	3.583	0.15
9	565.000	545.111	6.632	19.889	0.85
10	525.000	594.917	7.776	-69.917	-3.03R
11	594.000	587.417	5.243	6.583	0.28
12	845.000	847.333	6.632	-2.333	-0.10
13	655.000	629.722	6.632	25.278	1.08
14	670.000	696.222	3.316	-26.222	-1.09
15	875.000	854.833	6.632	20.167	0.86
16	800.000	805.028	5.243	-5.028	-0.21
17	775.000	746.028	5.243	28.972	1.22
18	720.000	755.222	6.632	-35.222	-1.50
19	763.000	797.528	7.776	-34.528	-1.50
20	695.000	688.722	6.632	6.278	0.27
21	500.000	495.306	7.776	4.694	0.20
22	692.000	696.222	3.316	-4.222	-0.17
23	587.000	587.417	5.243	-0.417	-0.02
24	655.000	679.528	7.776	-24.528	-1.06
25	575.000	594.917	7.776	-19.917	-0.86
26	830.000	812.528	7.776	17.472	0.76
27	881.000	854.833	6.632	26.167	1.12
28	615.000	629.722	6.632	-14.722	-0.63
29	760.000	797.528	7.776	-37.528	-1.63
30	705.000	712.917	7.776	-7.917	-0.34
31	625.000	579.917	7.776	45.083	1.95
32	727.000	738.528	5.243	-11.528	-0.48
33	830.000	847.333	6.632	-17.333	-0.74
34	735.000	755.222	6.632	-20.222	-0.86
35	915.000	897.139	7.776	17.861	0.77
36	925.000	897.139	7.776	27.861	1.21
37	570.000	537.611	6.632	32.389	1.38
38	562.000	537.611	6.632	24.389	1.04
39	648.000	646.417	5.243	1.583	0.07
40	612.000	637.222	6.632	-25.222	-1.08
41	631.000	604.111	6.632	26.889	1.15

42	740.000	738.528	5.243	1.472	0.06
43	600.000	637.222	6.632	-37.222	-1.59
44	670.000	688.722	6.632	-18.722	-0.80
45	810.000	788.333	6.632	21.667	0.92
46	690.000	679.528	7.776	10.472	0.45
47	580.000	579.917	7.776	0.083	0.00
48	745.000	746.028	5.243	-1.028	-0.04
49	815.000	805.028	5.243	9.972	0.42
50	685.000	703.722	6.632	-18.722	-0.80
51	850.000	812.528	7.776	37.472	1.62
52	695.000	712.917	7.776	-17.917	-0.78
53	663.000	653.917	5.243	9.083	0.38
54	794.000	788.333	6.632	5.667	0.24

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for B Length using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2979.99
C Water	-0.0435222
C Speed	311.285
S Temp.	0.105764

โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลองการถดถอยเชิง
เส้นเชิงซ้อน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Response Surface Regression (Linear+Squares): B Length versus C Water Z1, C Speed, ...

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for B Length

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-2148	47985.9	-0.045	0.964
C Water	-0	0.0	-2.294	0.026
C Speed	-9	1030.6	-0.008	0.993
S Temp.	0	2.9	0.024	0.981
C Water *C Water	-0	0.0	-0.150	0.882
C Speed*C Speed	88	283.0	0.311	0.758
S Temp.*S Temp.	0	0.0	0.012	0.991

S = 25.10 R-Sq = 95.1% R-Sq(adj) = 94.5%

Analysis of Variance for B Length

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	579999	579999.0	96666.50	153.44	0.000
Linear	3	579924	3315.7	1105.24	1.75	0.169
Square	3	75	74.9	24.97	0.04	0.989
Residual Error	47	29610	29610.3	630.01		
Lack-of-Fit	20	20518	20518.3	1025.92	3.05	0.004
Pure Error	27	9092	9092.0	336.74		
Total	53	609609				

Observation	B Length	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	545.000	495.722	9.037	49.278	2.10R
2	512.000	543.278	9.037	-31.278	-1.34
3	780.000	760.889	9.037	19.111	0.82
4	700.000	705.222	9.037	-5.222	-0.22
5	595.000	605.611	9.037	-10.611	-0.45
6	760.000	760.889	9.037	-0.889	-0.04
7	655.000	653.167	9.037	1.833	0.08
8	650.000	647.833	9.037	2.167	0.09
9	565.000	543.278	9.037	21.722	0.93
10	525.000	595.333	9.037	-70.333	-3.00R
11	594.000	585.500	9.037	8.500	0.36
12	845.000	845.500	9.037	-0.500	-0.02
13	655.000	627.889	9.037	27.111	1.16
14	670.000	695.389	9.037	-25.389	-1.08
15	875.000	855.167	9.037	19.833	0.85
16	800.000	803.111	9.037	-3.111	-0.13
17	775.000	747.444	9.037	27.556	1.18
18	720.000	755.556	9.037	-35.556	-1.52
19	763.000	797.944	9.037	-34.944	-1.49
20	695.000	690.222	9.037	4.778	0.20
21	500.000	495.722	9.037	4.278	0.18
22	692.000	695.389	9.037	-3.389	-0.14
23	587.000	585.500	9.037	1.500	0.06
24	655.000	679.944	9.037	-24.944	-1.07
25	575.000	595.333	9.037	-20.333	-0.87
26	830.000	812.944	9.037	17.056	0.73
27	881.000	855.167	9.037	25.833	1.10
28	615.000	627.889	9.037	-12.889	-0.55
29	760.000	797.944	9.037	-37.944	-1.62
30	705.000	713.333	9.037	-8.333	-0.36
31	625.000	580.333	9.037	44.667	1.91
32	727.000	737.778	9.037	-10.778	-0.46
33	830.000	845.500	9.037	-15.500	-0.66
34	735.000	755.556	9.037	-20.556	-0.88
35	915.000	897.556	9.037	17.444	0.74
36	925.000	897.556	9.037	27.444	1.17
37	570.000	537.944	9.037	32.056	1.37

38	562.000	537.944	9.037	24.056	1.03
39	648.000	647.833	9.037	0.167	0.01
40	612.000	637.556	9.037	-25.556	-1.09
41	631.000	605.611	9.037	25.389	1.08
42	740.000	737.778	9.037	2.222	0.09
43	600.000	637.556	9.037	-37.556	-1.60
44	670.000	690.222	9.037	-20.222	-0.86
45	810.000	789.833	9.037	20.167	0.86
46	690.000	679.944	9.037	10.056	0.43
47	580.000	580.333	9.037	-0.333	-0.01
48	745.000	747.444	9.037	-2.444	-0.10
49	815.000	803.111	9.037	11.889	0.51
50	685.000	705.222	9.037	-20.222	-0.86
51	850.000	812.944	9.037	37.056	1.58
52	695.000	713.333	9.037	-18.333	-0.78
53	663.000	653.167	9.037	9.833	0.42
54	794.000	789.833	9.037	4.167	0.18

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for B Length using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	-2148.01
C Water	-0.0408702
C Speed	-8.63715
S Temp.	0.0718576
C Water *C Water	-1.73333E-07
C Speed*C Speed	87.8906
S Temp.*S Temp.	5.208333E-07

โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลอง
การถดถอยเชิงเส้นและกำลังสอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Response Surface Regression (Linear+Interactions): B Length versus C Water Z1, C Speed, ...

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for B Length

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5775	2928.44	1.972	0.055
C Water	-0	0.10	-1.694	0.097
C Speed	-3473	1550.15	-2.240	0.030
S Temp.	-0	0.09	-2.124	0.039
C Water *C Speed	-0	0.01	-8.523	0.000
C Water *S Temp.	0	0.00	2.463	0.018
C Speed*S Temp.	0	0.05	2.764	0.008

S = 14.92 R-Sq = 98.3% R-Sq(adj) = 98.1%

Analysis of Variance for B Length

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	6	599146	599146	99857.72	448.56	0.000
Linear	3	579924	6363	2121.04	9.53	0.000
Interaction	3	19222	19222	6407.40	28.78	0.000
Residual Error	47	10463	10463	222.62		
Lack-of-Fit	20	1371	1371	68.55	0.20	1.000
Pure Error	27	9092	9092	336.74		
Total	53	609609				

Observation	B Length	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	545.000	522.181	7.106	22.819	1.74
2	512.000	537.611	5.076	-25.611	-1.83
3	780.000	770.222	5.076	9.778	0.70
4	700.000	695.306	5.076	4.694	0.33
5	595.000	612.528	5.076	-17.528	-1.25
6	760.000	770.222	5.076	-10.222	-0.73
7	655.000	653.917	3.210	1.083	0.07
8	650.000	646.417	3.210	3.583	0.25
9	565.000	537.611	5.076	27.389	1.95
10	525.000	553.042	7.106	-28.042	-2.14R
11	594.000	587.417	3.210	6.583	0.45
12	845.000	839.833	5.076	5.167	0.37
13	655.000	637.222	5.076	17.778	1.27
14	670.000	696.222	2.030	-26.222	-1.77
15	875.000	880.792	5.076	-5.792	-0.41
16	800.000	805.028	3.210	-5.028	-0.35
17	775.000	746.028	3.210	28.972	1.99
18	720.000	729.264	5.076	-9.264	-0.66
19	763.000	755.653	7.106	7.347	0.56
20	695.000	680.306	5.076	14.694	1.05
21	500.000	522.181	7.106	-22.181	-1.69
22	692.000	696.222	2.030	-4.222	-0.29
23	587.000	587.417	3.210	-0.417	-0.03
24	655.000	669.486	7.106	-14.486	-1.10
25	575.000	553.042	7.106	21.958	1.67
26	830.000	837.569	7.106	-7.569	-0.58
27	881.000	880.792	5.076	0.208	0.01
28	615.000	637.222	5.076	-22.222	-1.58
29	760.000	755.653	7.106	4.347	0.33
30	705.000	702.875	7.106	2.125	0.16
31	625.000	604.958	7.106	20.042	1.53
32	727.000	738.528	3.210	-11.528	-0.79
33	830.000	839.833	5.076	-9.833	-0.70
34	735.000	729.264	5.076	5.736	0.41
35	915.000	924.014	7.106	-9.014	-0.69
36	925.000	924.014	7.106	0.986	0.08
37	570.000	563.569	5.076	6.431	0.46

38	562.000	563.569	5.076	-1.569	-0.11
39	648.000	646.417	3.210	1.583	0.11
40	612.000	611.264	5.076	0.736	0.05
41	631.000	612.528	5.076	18.472	1.32
42	740.000	738.528	3.210	1.472	0.10
43	600.000	611.264	5.076	-11.264	-0.80
44	670.000	680.306	5.076	-10.306	-0.73
45	810.000	796.750	5.076	13.250	0.94
46	690.000	669.486	7.106	20.514	1.56
47	580.000	604.958	7.106	-24.958	-1.90
48	745.000	746.028	3.210	-1.028	-0.07
49	815.000	805.028	3.210	9.972	0.68
50	685.000	695.306	5.076	-10.306	-0.73
51	850.000	837.569	7.106	12.431	0.95
52	695.000	702.875	7.106	-7.875	-0.60
53	663.000	653.917	3.210	9.083	0.62
54	794.000	796.750	5.076	-2.750	-0.20

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for B Length using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	5774.83
C Water	-0.169537
C Speed	-3472.93
S Temp.	-0.190960
C Water *C Speed	-0.0648958
C Water *S Temp.	7.500000E-06
C Speed*S Temp.	0.131510

โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลอง
การถดถอยเชิงเส้นและอันตรกิริยา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Response Surface Regression (Full Quadratic): B Length versus C Water Z1, C Speed, ...

The analysis was done using uncoded units.

Estimated Regression Coefficients for B Length

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6607	29529.0	0.224	0.824
C Water	-0	0.1	-1.610	0.115
C Speed	-3793	1716.4	-2.210	0.032
S Temp.	-0	1.8	-0.124	0.902
C Water *C Water	-0	0.0	-0.244	0.808
C Speed*C Speed	88	173.3	0.507	0.615
S Temp.*S Temp.	0	0.0	0.019	0.985
C Water *C Speed	-0	0.0	-8.276	0.000
C Water *S Temp.	0	0.0	2.391	0.021
C Speed*S Temp.	0	0.0	2.684	0.010

S = 15.37 R-Sq = 98.3% R-Sq(adj) = 97.9%

Analysis of Variance for B Length

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Regression	9	599221	599221.2	66580.13	282.01	0.000
Linear	3	579924	1756.7	585.56	2.48	0.073
Square	3	75	74.9	24.97	0.11	0.956
Interaction	3	19222	19222.2	6407.40	27.14	0.000
Residual Error	44	10388	10388.1	236.09		
Lack-of-Fit	17	1296	1296.1	76.24	0.23	0.999
Pure Error	27	9092	9092.0	336.74		
Total	53	609609				

Observation	B Length	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	545.000	522.597	7.753	22.403	1.69
2	512.000	535.778	6.359	-23.778	-1.70
3	780.000	768.389	6.359	11.611	0.83
4	700.000	696.806	6.359	3.194	0.23
5	595.000	614.028	6.359	-19.028	-1.36
6	760.000	768.389	6.359	-8.389	-0.60
7	655.000	653.167	5.532	1.833	0.13
8	650.000	647.833	5.532	2.167	0.15
9	565.000	535.778	6.359	29.222	2.09R
10	525.000	553.458	7.753	-28.458	-2.15R
11	594.000	585.500	5.532	8.500	0.59
12	845.000	838.000	6.359	7.000	0.50
13	655.000	635.389	6.359	19.611	1.40
14	670.000	695.389	5.532	-25.389	-1.77
15	875.000	881.125	6.359	-6.125	-0.44
16	800.000	803.111	5.532	-3.111	-0.22
17	775.000	747.444	5.532	27.556	1.92
18	720.000	729.597	6.359	-9.597	-0.69
19	763.000	756.069	7.753	6.931	0.52
20	695.000	681.806	6.359	13.194	0.94
21	500.000	522.597	7.753	-22.597	-1.70
22	692.000	695.389	5.532	-3.389	-0.24
23	587.000	585.500	5.532	1.500	0.10
24	655.000	669.903	7.753	-14.903	-1.12
25	575.000	553.458	7.753	21.542	1.62
26	830.000	837.986	7.753	-7.986	-0.60
27	881.000	881.125	6.359	-0.125	-0.01
28	615.000	635.389	6.359	-20.389	-1.46
29	760.000	756.069	7.753	3.931	0.30
30	705.000	703.292	7.753	1.708	0.13
31	625.000	605.375	7.753	19.625	1.48
32	727.000	737.778	5.532	-10.778	-0.75
33	830.000	838.000	6.359	-8.000	-0.57

34	735.000	729.597	6.359	5.403	0.39
35	915.000	924.431	7.753	-9.431	-0.71
36	925.000	924.431	7.753	0.569	0.04
37	570.000	563.903	6.359	6.097	0.44
38	562.000	563.903	6.359	-1.903	-0.14
39	648.000	647.833	5.532	0.167	0.01
40	612.000	611.597	6.359	0.403	0.03
41	631.000	614.028	6.359	16.972	1.21
42	740.000	737.778	5.532	2.222	0.16
43	600.000	611.597	6.359	-11.597	-0.83
44	670.000	681.806	6.359	-11.806	-0.84
45	810.000	798.250	6.359	11.750	0.84
46	690.000	669.903	7.753	20.097	1.51
47	580.000	605.375	7.753	-25.375	-1.91
48	745.000	747.444	5.532	-2.444	-0.17
49	815.000	803.111	5.532	11.889	0.83
50	685.000	696.806	6.359	-11.806	-0.84
51	850.000	837.986	7.753	12.014	0.91
52	695.000	703.292	7.753	-8.292	-0.63
53	663.000	653.167	5.532	9.833	0.69
54	794.000	798.250	6.359	-4.250	-0.30

R denotes an observation with a large standardized residual.

Estimated Regression Coefficients for B Length using data in uncoded units

Term	Coef
Constant	6606.81
C Water	-0.166885
C Speed	-3792.85
S Temp.	-0.224866
C Water *C Water	-1.73333E-07
C Speed*C Speed	87.8906
S Temp.*S Temp.	5.208333E-07
C Water *C Speed	-0.0648958
C Water *S Temp.	7.500000E-06
C Speed*S Temp.	0.131510

โปรแกรมแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของแบบจำลอง
การถดถอยเส้นโค้งพหุนามเมียดีกรี 2 ที่มี 3 ตัวแปรอิสระ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ

รูปภาพแสดงหลักปลายสั้นในส่วนของการทดลองเบื้องต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 1



รูปที่ 2 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 2



รูปที่ 3 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 3



รูปที่ 4 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 4



รูปที่ 5 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 5



รูปที่ 6 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 6



รูปที่ 7 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 7



รูปที่ 8 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 8



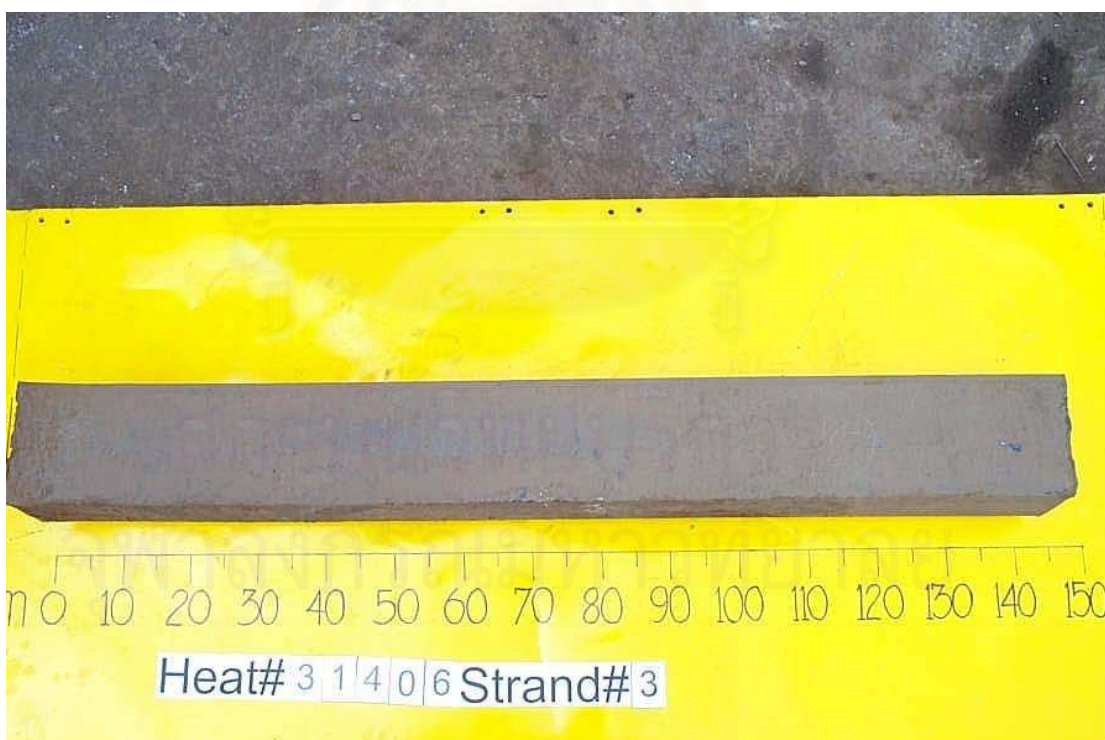
รูปที่ 9 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 9



รูปที่ 10 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 10



รูปที่ 11 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 11



รูปที่ 12 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 12



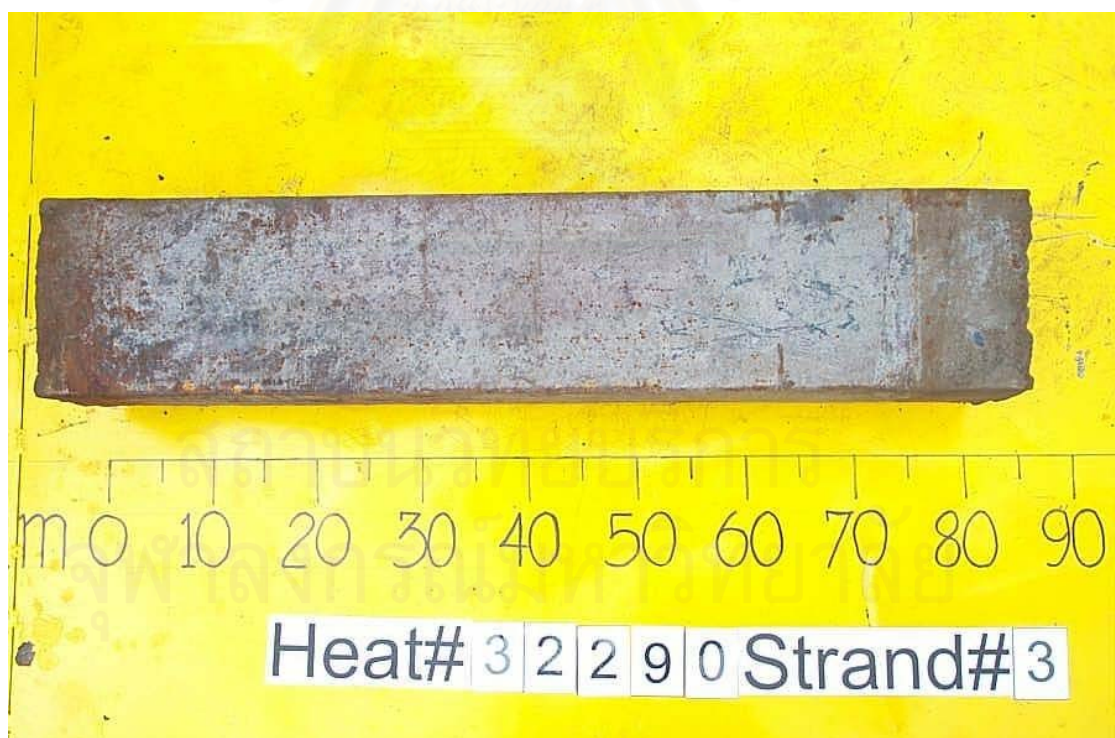
รูปที่ 13 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 13



รูปที่ 14 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 14



รูปที่ 15 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 15



รูปที่ 16 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเบื้องต้นลำดับการทดลองที่ 16

ภาคผนวก จ

รูปภาพแสดงหลักปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 1



รูปที่ 2 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 2



รูปที่ 3 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 3



รูปที่ 4 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 4



รูปที่ 5 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 5



รูปที่ 6 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 6



รูปที่ 7 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 7



รูปที่ 8 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 8



รูปที่ 9 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 9



รูปที่ 10 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 10



รูปที่ 11 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 11



รูปที่ 12 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 12



รูปที่ 13 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 13



รูปที่ 14 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 14



รูปที่ 15 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 15



รูปที่ 16 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 16



รูปที่ 17 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 17



รูปที่ 18 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 18



รูปที่ 19 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 19



รูปที่ 20 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 20



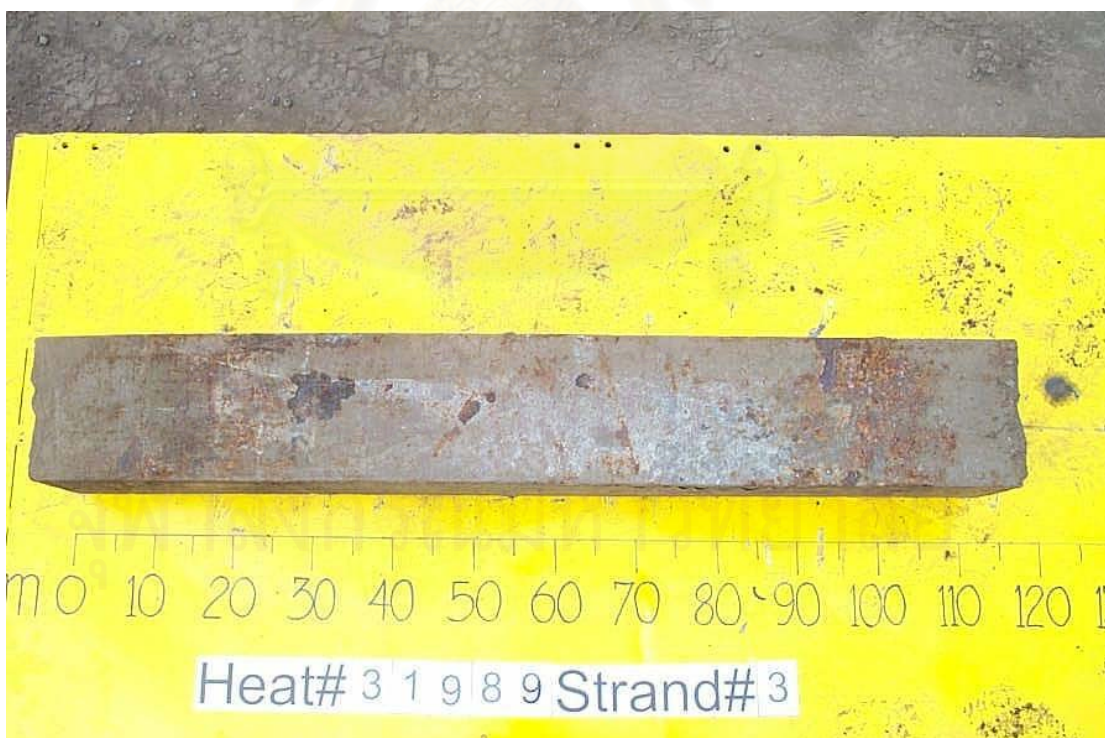
รูปที่ 21 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 21



รูปที่ 22 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 22



รูปที่ 23 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 23



รูปที่ 24 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 24



รูปที่ 25 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 25



รูปที่ 26 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 26



รูปที่ 27 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 27



รูปที่ 28 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 28



รูปที่ 29 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 29



รูปที่ 30 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 30



รูปที่ 31 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 31



รูปที่ 32 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 32



รูปที่ 33 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 33



รูปที่ 34 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 34



รูปที่ 35 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 35



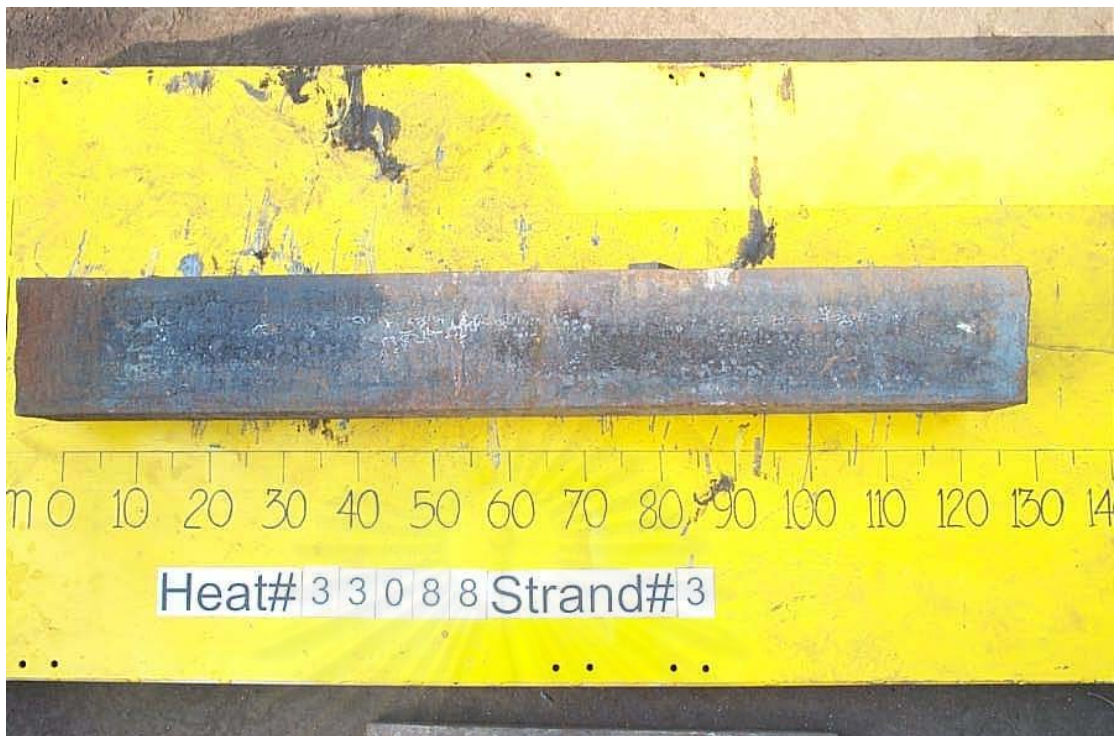
รูปที่ 36 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 36



รูปที่ 37 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 37



รูปที่ 38 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 38



รูปที่ 39 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 39



รูปที่ 40 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 40



รูปที่ 41 แสดงเหล็กปลายน้ในส่วนของกาทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 41



รูปที่ 42 แสดงเหล็กปลายน้ในส่วนของกาทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 42



รูปที่ 43 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 43



รูปที่ 44 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 44



รูปที่ 45 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 45



รูปที่ 46 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 46



รูปที่ 47 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 47



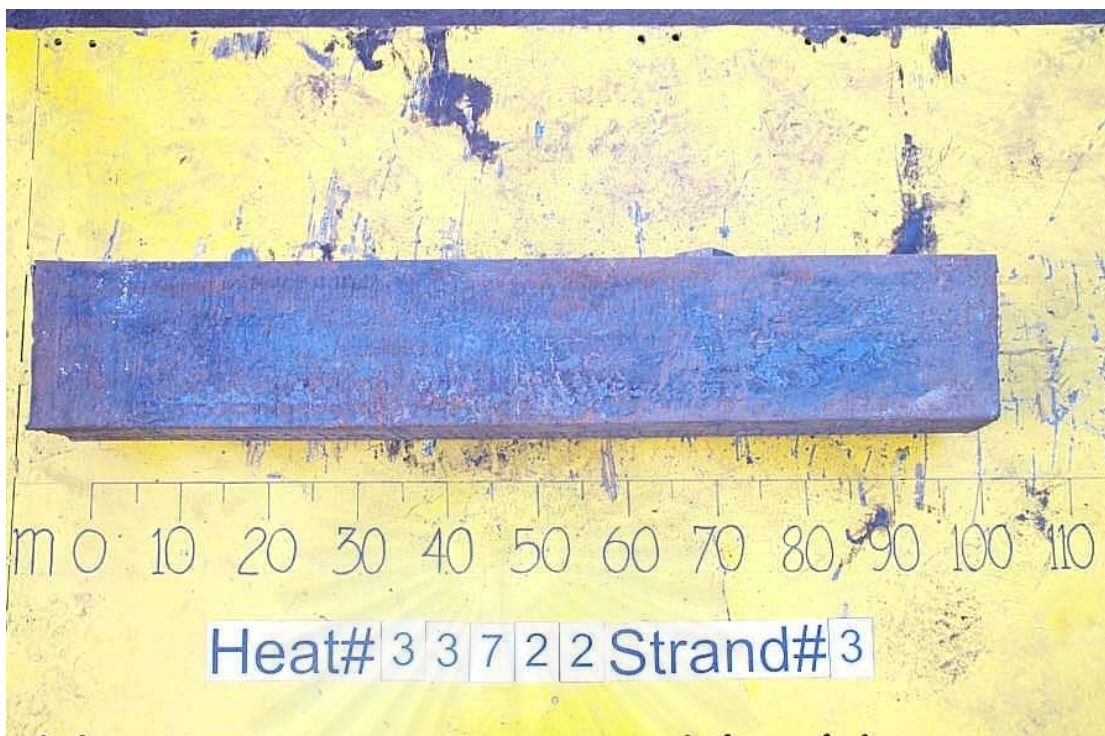
รูปที่ 48 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 48



รูปที่ 49 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 49



รูปที่ 50 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 50



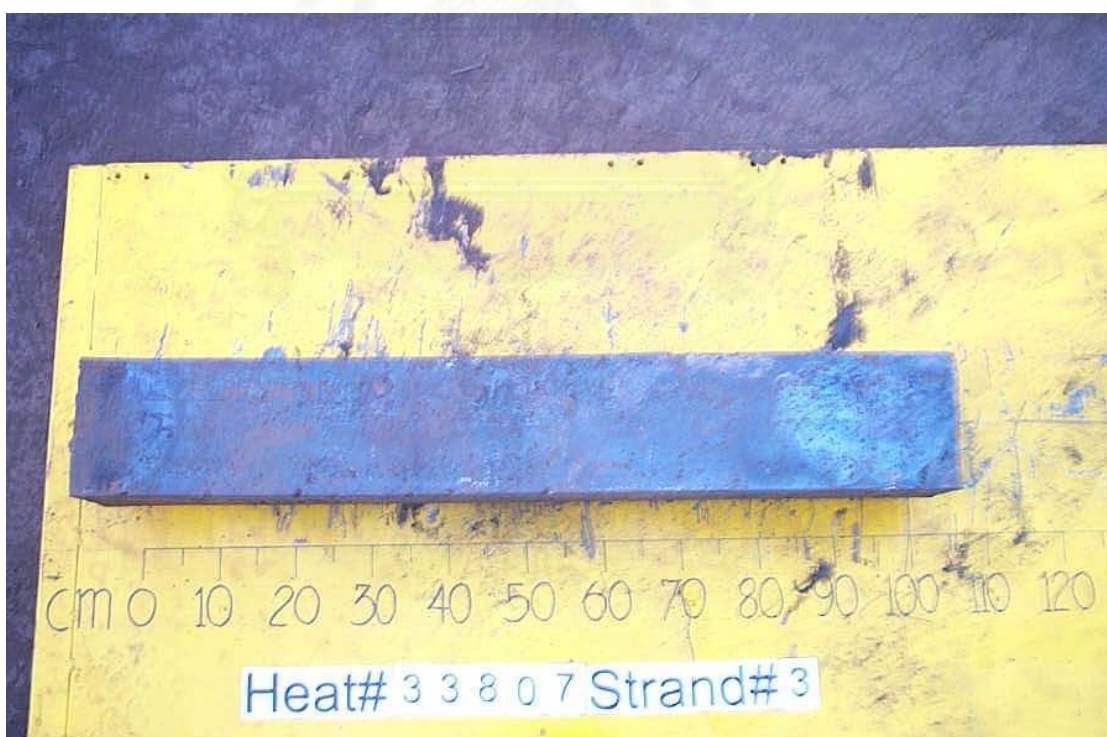
รูปที่ 51 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 51



รูปที่ 52 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของ การทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 52



รูปที่ 53 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 53



รูปที่ 54 แสดงเหล็กปลายสั้นในส่วนของการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสม
ลำดับการทดลองที่ 54

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายวิชาญ วรรณา เกิดเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2515 ที่จังหวัดสระบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล จากมหาวิทยาลัยมหิดล หลังจากนั้นได้เข้าทำงานในตำแหน่งวิศวกร บริษัทเหล็กสยาม จำกัด เครือซิเมนต์ไทย ผู้เขียนได้เข้าศึกษาในระดับปริญญาโท หลักสูตรนอกเวลาราชการ ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย