

อิทธิพลของสัดส่วนอนุภาคนิยามหลอมซ้ำที่มีต่อการเกิดของเสียประเภทสิ่งปลอมปน
ในกระบวนการฉีดหล่อแรงดันสูง



บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2560
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

INFLUENCE OF REMELTING ALUMINUM RATIO ON INCLUSION DEFECTIVES IN
HIGH PRESSURE DIE CASTING PROCESS

Mr. Pahon Voradilokkul



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Industrial Engineering

Department of Industrial Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2017

Copyright of Chulalongkorn University

พหล วรดิลกกุล : อิทธิพลของสัดส่วนอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่มีต่อการเกิดของเสียประเภทสิ่ง
 ปลอมปนในกระบวนการฉีดหล่อแรงดันสูง (INFLUENCE OF REMELTING ALUMINUM
 RATIO ON INCLUSION DEFECTIVES IN HIGH PRESSURE DIE CASTING PROCESS)
 อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร, 124 หน้า.

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมของวัตถุดิบอลูมิเนียมใหม่
 วัตถุดิบอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) กับ วัตถุดิบอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่ผ่าน
 กระบวนการฉีดหล่อภายใน (R_2) ที่มีต่อคุณภาพน้ำอลูมิเนียม และชิ้นงานฉีดหล่อ โดยดำเนินการดังนี้
 1) ศึกษาสัดส่วนผสมที่ R_1 เท่ากับ 0, 100 และ 200 ส่วนต่อร้อยส่วนอลูมิเนียมใหม่ (Per hundred
 ingot ; phi) และ R_2 เท่ากับ 100, 150 และ 200 phi 2) ทดสอบและวิเคราะห์คุณภาพของน้ำ
 อลูมิเนียม ได้แก่ การตรวจสอบค่าเคโมลต์ (K) องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) แก๊สไฮโดรเจน (H_2)
 3) นำน้ำอลูมิเนียมมาขึ้นรูปด้วยกระบวนการฉีดหล่อแรงดันสูง และ 4) ตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ของเสีย
 ประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) จำนวนจุดของสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภท
 โพรงอากาศที่เกท (%BH) และจำนวนจุดโพรงอากาศที่เกท (BH)

ผลจากการศึกษาพบว่า 1) อิทธิพลของปัจจัยหลัก R_1 และ R_2 ที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อค่าเคโมลต์
 (K) เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทโพรงอากาศที่เกท
 (%BH) จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) จำนวนจุดโพรงอากาศที่เกท (BH) เพิ่มขึ้น แต่มีเพียงแก๊ส
 ไฮโดรเจน (H_2) ที่เพิ่มขึ้นจากอิทธิพลของปัจจัยหลัก R_1 ที่เพิ่มขึ้นเท่านั้น 2) ค่าเคโมลต์ (K) มีผลอย่าง
 มีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) และจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่เกท
 (IC) 3) แก๊สไฮโดรเจนมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อเปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทโพรงอากาศที่เกท (%BH)
 และจำนวนจุดโพรงอากาศที่เกท (BH) และ 4) เงื่อนไขการผสมที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือ $R_1=0$ phi,
 $R_2=100$ phi ให้ค่าเคโมลต์ (K) 0.45 คะแนน, แก๊สไฮโดรเจน (H_2) 0.11 ลบ.ซม.ต่อร้อยกรัมอลูมิเนียม
 , เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) 0.59%, จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่เกท (IC)
 32 จุด, เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทโพรงอากาศที่เกท (%BH) 0.07%, จำนวนจุดโพรงอากาศที่เกท
 (BH) 4 จุด

ภาควิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2560

5770942721 : MAJOR INDUSTRIAL ENGINEERING

KEYWORDS: RE-MELTING ALUMINUM, ALUMINUM INCLUSIONS, ALUMINUM HIGH PRESSURE DIE CASTING

PAHON VORADILOKKUL: INFLUENCE OF REMELTING ALUMINUM RATIO ON INCLUSION DEFECTIVES IN HIGH PRESSURE DIE CASTING PROCESS. ADVISOR: ASST. PROF. SOMCHAI PUAJINDANETR, Ph.D., 124 pp.

This research studied the influence of aluminum material proportion between aluminum ingot, re-melting aluminum scrap from external process (R_1) and re-melting aluminum scrap from internal process (R_2) that affect on quality of molten aluminum and casting sample by 1) Study mixing proportion of R_1 at 0, 100, 150, 200 per hundred aluminum ingot (ϕ) and R_2 at 100, 150 and 200 ϕ . 2) Experiment and analyze quality of molten aluminum by monitoring K-mold value (K), Magnesium composition (Mg) and Hydrogen gas (H_2). 3) Casting molten aluminum with high pressure die casting and 4) Monitoring result of Percent of gate inclusion defect (%IC), Amount of gate inclusion (IC), Percent of gate blowhole defect (%BH) and Amount of gate blowhole (BH).

Results of study found that 1) R_1 and R_2 have significantly effect on K-mold (K), Gate inclusion defect (%IC), Amount of gate inclusion (IC), Gate blowhole defect (%BH) and Amount of gate blowhole (BH) , only hydrogen (H_2) is affected by the R_1 factor. 2) K-mold (K) value has significant effect on Gate inclusion defect (%IC) and Amount of gate inclusion (IC). 3) Hydrogen gas (H_2) has significant effect on Gate blow hole defect (%BH) and Amount of gate blow hole (BH). and 4) The best proportion is $R_1=0 \phi$, $R_2=100 \phi$ which results are K-mold (K) is 0.45 point, Hydrogen (H_2) gas is 0.11 cc/100g of aluminum, Gate inclusion defect (%IC) is 0.59%, Amount of gate inclusion (IC) is 32 point, Gate blowhole defect (%BH) is 0.07% and Amount of gate blowhole (BH) is 4 point.

Department: Industrial Engineering Student's Signature

Field of Study: Industrial Engineering Advisor's Signature

Academic Year: 2017

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา และความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย พัวจินดาเนตร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ท่านได้ให้ข้อคิดคำแนะนำในการทำวิจัย ทั้งข้อเสนอแนะ และคอยให้ความช่วยเหลือมาตลอดระยะเวลาการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณท่านคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ คณาจารย์ และเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำสำหรับการจัดทำวิทยานิพนธ์อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษาที่ได้ให้การสนับสนุน ทั้งสถานที่ในการทำการศึกษ ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษา และความร่วมมือในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นอย่างดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดามารดา ทุกท่านในครอบครัว ตลอดจนเพื่อนๆ ที่ให้ความช่วยเหลือ ส่งเสริมสนับสนุน และเป็นกำลังใจที่ดีมาโดยตลอดการศึกษาวิจัยครั้งนี้จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ลงได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฐ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.1.1 ผลผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา.....	1
1.1.2 กระบวนการผลิต.....	4
1.1.3 ของเสียในกระบวนการผลิต.....	7
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย.....	10
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	10
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	11
1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับงานหล่ออลูมิเนียม.....	12
2.2 อลลอยดีในงานหล่ออลูมิเนียม.....	15
2.3 กระบวนการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียม.....	18
2.5 การออกแบบการทดลอง.....	19
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	23
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	25

3.1	วิธีดำเนินการศึกษา.....	25
3.2	การเตรียมวัตถุดิบและการเตรียมการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ	26
3.2.1	วัสดุที่ใช้ในการศึกษา	26
3.2.2	อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา	27
3.3	วิธีการทดลอง.....	27
3.3.1	การเตรียมสัดส่วนผสมน้ำอลูมิเนียม.....	27
3.3.2	การขึ้นรูปชิ้นงานฉีดยาและการเก็บชิ้นงานทดสอบคุณภาพ	29
3.4	การทดสอบคุณภาพ.....	30
3.4.1	การทดสอบคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมวัตถุดิบ	30
3.4.1.1	การตรวจสอบค่าเคโมลด์ (K-mold).....	30
3.4.1.2	การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม (Mg)	32
3.4.1.3	การตรวจสอบปริมาณ H ₂	33
3.4.2	การทดสอบคุณภาพของชิ้นงานฉีดยา	35
3.5	การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ	36
บทที่ 4	การวิเคราะห์ผลการทดลองและการอภิปราย.....	37
4.1	ผลการทดลองของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา.....	37
4.2	ผลของสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม	39
4.2.1	ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อค่าเคโมลด์ (K)	39
4.2.2	ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg).....	46
4.2.3	ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H ₂).....	53
4.3	ผลของสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดยา.....	59
4.3.1	ผลของสัดส่วนผสมที่มีต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกต (%IC).....	60
4.3.2	ผลของสัดส่วนผสมที่มีต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกต (IC).....	67

4.3.3 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH).....	74
4.3.4 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	81
4.4 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด	89
4.4.1 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)	89
4.4.2 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)	91
4.4.3 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH).....	93
4.4.4 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH).....	95
4.5 ผลของความสัมพันธ์ของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม.....	96
4.6 สรุปผลของสัดส่วนที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมและคุณภาพของชิ้นงานฉีด.....	97
4.7 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษา.....	99
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	101
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	101
5.2 ข้อเสนอแนะ	102
รายการอ้างอิง	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	124

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1.1 จำนวนที่ผลิตแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58.....	3
ตารางที่ 1.2 จำนวนงานเสียแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58.....	3
ตารางที่ 1.3 สัดส่วนงานเสียแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58.....	3
ตารางที่ 1.4 มูลค่าของงานเสียแต่ละผลิตภัณฑ์รวมทั้งตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58.....	3
ตารางที่ 1.5 จำนวนงานเสียแต่ละประเภทของผลิตภัณฑ์ A เดือน ก.ค.58 - ธ.ค.58.....	9
ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดองค์ประกอบธาตุของอลูมิเนียมเกรด ADC12.....	26
ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมวัตถุดิบอลูมิเนียมในสัดส่วนต่อร้อยละอลูมิเนียมใหม่ (ϕ).....	28
ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมวัตถุดิบอลูมิเนียมเป็นร้อยละจากอลูมิเนียมในเตาพักน้ำอลูมิเนียม.....	28
ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในสัดส่วนต่อร้อยละของแท่งอลูมิเนียม.....	38
ตารางที่ 4.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าเคโมลต์ (K) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย.....	43
ตารางที่ 4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าเคโมลต์ (K) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม.....	44
ตารางที่ 4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย.....	50
ตารางที่ 4.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม.....	51
ตารางที่ 4.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย.....	57

ตารางที่ 4.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม.....	58
ตารางที่ 4.8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย.....	64
ตารางที่ 4.9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม.....	65
ตารางที่ 4.10 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (IC) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย.....	71
ตารางที่ 4.11 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย.....	79
ตารางที่ 4.12 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม.....	80
ตารางที่ 4.13 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย.....	86
ตารางที่ 4.14 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม.....	88
ตารางที่ 4.15 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมอลูมิเนียมต่อคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม.....	98
ตารางที่ 4.16 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมและคุณภาพของชิ้นงานฉีด.....	98
ตารางที่ 4.17 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคโมลด์ (K) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2).....	98

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบผลก่อน ระหว่าง และหลังการศึกษา..... 100



สารบัญรูป

รูปที่ 1.1 ระบบการจ่ายน้ำมันแบบใช้รางคอมมอนเรล	2
รูปที่ 1.2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์งานเสียแต่ละผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58	2
รูปที่ 1.3 สัดส่วนมูลค่าของเสีย ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58	4
รูปที่ 1.4 แผนผังกระบวนการของผลิตภัณฑ์ A.....	7
รูปที่ 1.5 พารेटโตแสดงปริมาณของงานเสียของผลิตภัณฑ์ A แต่ละประเภท	10
รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Die casting แบบ Cold chamber และวิธีการขึ้นรูปด้วยการ ฉีดหล่ออลูมิเนียม	14
รูปที่ 2.2 อัตราส่วนการผลิตโดยแยกตาม Alloy ที่ผสมหลักในอลูมิเนียม.....	15
รูปที่ 2.3 สัดส่วนการผลิตของอลูมิเนียมอัลลอยด์แต่ละชนิดในการฉีดหล่ออลูมิเนียม.....	16
รูปที่ 2.4 K-mold และตัวอย่างสิ่งปลอมปนที่พบ.....	18
รูปที่ 2.5 สิ่งปลอมปนในอลูมิเนียม	19
รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการออกแบบการทดลอง	21
รูปที่ 3.1 การขึ้นรูปชิ้นงานฉีดและการเก็บชิ้นงานทดสอบคุณภาพ.....	30
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานฉีดและการเก็บชิ้นงานทดสอบคุณภาพ.....	30
รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นงานทดสอบ.....	31
รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานตรวจสอบเคโมลด์ (K).....	31
รูปที่ 3.5 กล้องเลนส์ขยายที่กำลังขยาย 10 เท่า.....	32
รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเคโมลด์.....	33
รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชิ้นงานตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม (Mg).....	33
รูปที่ 3.8 เครื่อง Spectrometer	33
รูปที่ 3.9 เครื่องทำสุญญากาศยี่ห้อ Aluvac	34
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานตรวจสอบแก๊สไฮโดรเจน (H ₂).....	34

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างของเสียประเภทสิ่งปดอมปนที่เกทขึ้นงาน	35
รูปที่ 3.12 ตัวอย่างของเสียประเภทโพรงอากาศที่บริเวณเกทขึ้นงาน	35
รูปที่ 3.13 ตัวแปรควบคุมและตัวแปรตามที่ทำกรวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ	36
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอุณหภูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1).....	39
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของค่าเคโมลด์ (K) โดยโปรแกรม Minitab ..	40
รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าเคโมลด์ (K).....	40
รูปที่ 4.4 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าเคโมลด์ (K)	41
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล	42
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและค่าเคโมลด์ (K).....	42
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง.....	43
รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าเคโมลด์ (K) โดยโปรแกรม Minitab.....	44
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของค่าเคโมลด์ (K) โดยโปรแกรม Minitab	45
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอุณหภูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1).....	46
รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดยโปรแกรม Minitab.....	47
รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)	47
รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg).....	48
รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล	49
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)	49
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง	50
รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดย โปรแกรม Minitab.....	51
รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดยโปรแกรม Minitab.....	52

รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1).....	53
รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยโปรแกรม Minitab	54
รูปที่ 4.21 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2).....	54
รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2).....	55
รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล	56
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2).....	56
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง	57
รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ Regression ของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยโปรแกรม Minitab.....	58
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยโปรแกรม Minitab	59
รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC).....	60
รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC).....	61
รูปที่ 4.30 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC).....	61
รูปที่ 4.31 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)	62
รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล	63
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC).....	63
รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง	64
รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ Regression ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยโปรแกรม Minitab	65
รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยโปรแกรม Minitab.....	66
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกทขึ้น (IC).....	67

รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเขต (IC).....	68
รูปที่ 4.39 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเขต (IC).....	68
รูปที่ 4.40 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเขต (IC)	69
รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล	70
รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเขต (IC).....	70
รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง	71
รูปที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเขต (IC) โดยโปรแกรม Minitab	72
รูปที่ 4.45 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเขต (IC) โดยโปรแกรม Minitab	74
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอนุภาคนิวเคลียสที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอนุภาคนิวเคลียสที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับโพรงอากาศที่บริเวณเขต (%BH).....	75
รูปที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของโพรงอากาศที่บริเวณเขต (%BH) โดยโปรแกรม Minitab	76
รูปที่ 4.48 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเขต (%BH)	76
รูปที่ 4.49 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเขต (%BH).....	77
รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล	77
รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและโพรงอากาศที่บริเวณเขต (%BH)	78
รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง	78
รูปที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์ Regression ของโพรงอากาศที่บริเวณเขต (%BH) โดยโปรแกรม Minitab	79
รูปที่ 4.54 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของโพรงอากาศที่บริเวณเขต (%BH) โดยโปรแกรม Minitab	81

รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณออกซิเจนที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณออกซิเจนที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	82
รูปที่ 4.56 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	83
รูปที่ 4.57 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH).....	83
รูปที่ 4.58 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH).....	84
รูปที่ 4.59 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล	85
รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	85
รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง	86
รูปที่ 4.62 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH).....	87
รูปที่ 4.63 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	89
รูปที่ 4.64 ผลการวิเคราะห์ Regression ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยโปรแกรม Minitab	90
รูปที่ 4.65 แสดงความสัมพันธ์ค่าเคโมลต์ (K) และสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC).....	91
รูปที่ 4.66 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)	92
รูปที่ 4.67 แสดงความสัมพันธ์ค่าเคโมลต์ (K) และจำนวนสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (IC).....	93
รูปที่ 4.68 ผลการวิเคราะห์ Regression ของโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยโปรแกรม Minitab	94
รูปที่ 4.69 แสดงความสัมพันธ์แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH).....	94
รูปที่ 4.70 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH).....	95
รูปที่ 4.71 แสดงความสัมพันธ์แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ...	96
รูปที่ 4.72 แสดงความสัมพันธ์ค่าเคโมลต์ (K) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2).....	97

บทที่ 1

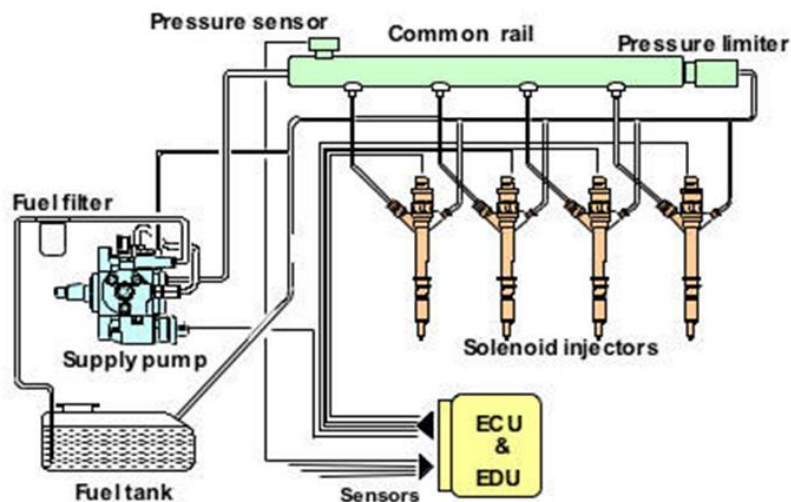
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์เป็นอุตสาหกรรมที่มีความสำคัญในประเทศไทย เป็นส่วนสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและความก้าวหน้าทางด้านเทคโนโลยี ก่อให้เกิดการจ้างงาน ส่งเสริมให้เกิดการลงทุนภายในประเทศมากยิ่งขึ้น ภายใต้การเติบโตดังกล่าวบริษัทต่างๆในอุตสาหกรรมนี้จำเป็นต้องมีการควบคุมต้นทุนในการผลิต เพื่อให้บรรลุเป้าหมายของการดำเนินการคือกำไร วัตถุดิบในการผลิตนับเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งที่ต้องใช้ในการผลิตชิ้นงานทุกชิ้น หากสามารถลดต้นทุนจากวัตถุดิบได้ย่อมส่งผลต่อต้นทุนการผลิตในทุกๆชิ้นเช่นกัน ดังนั้นต้นทุนของการผลิตที่มาจากวัตถุดิบย่อมเป็นสิ่งที่บริษัทผู้ผลิตพึงพิจารณาเป็นสำคัญ แต่ในการผลิตนั้นสิ่งที่มีความสำคัญเช่นกันคือคุณภาพของชิ้นงานที่ทำการผลิต หากเกิดของเสียขึ้นในกระบวนการผลิตแล้วนั้น ย่อมส่งผลต่อบริษัทผู้ผลิตทั้งด้านต้นทุนจากการเกิดของเสียในกระบวนการ และยังส่งผลไปถึงความเชื่อมั่นไว้วางใจของลูกค้าอันมีผลในทางธุรกิจในระยะยาวอีกด้วย จึงกล่าวได้ว่าการลดต้นทุนนั้นเป็นการสร้างโอกาสให้กับธุรกิจได้ ในขณะที่เดียวกันต้องพิจารณาถึงผลกระทบต่อในด้านคุณภาพควบคู่กันไปด้วย

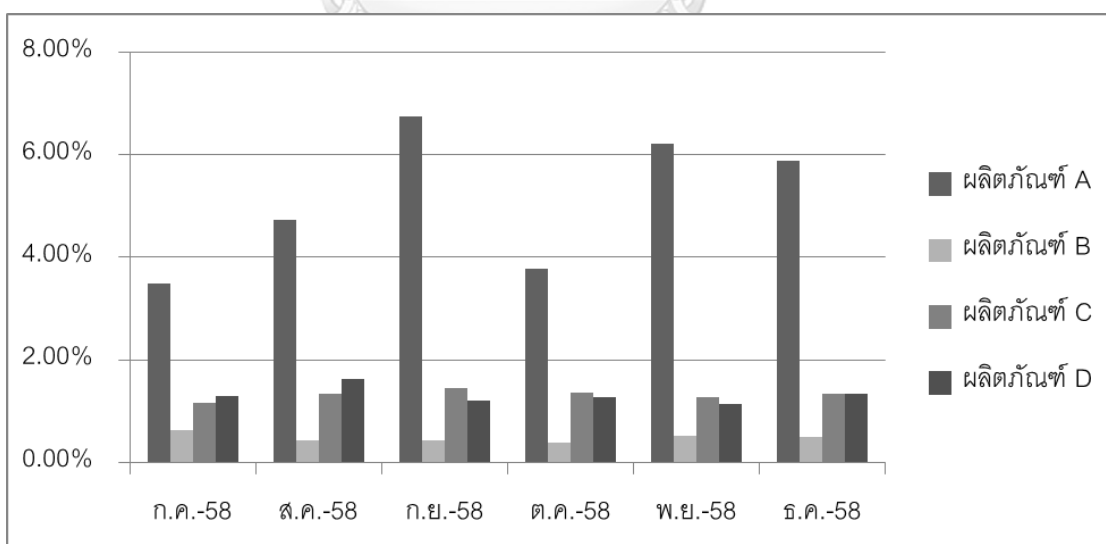
1.1.1 ผลผลิตภัณฑ์ของโรงงานกรณีศึกษา

โรงงานกรณีศึกษาเป็นบริษัทผู้ผลิตชิ้นส่วนรถยนต์ ทำการผลิตอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ารถยนต์ อุปกรณ์ในระบบการจ่ายน้ำมัน อุปกรณ์ด้านระบบปรับอากาศรถยนต์ และผลิตชิ้นส่วนสำหรับนำไปประกอบเป็นอุปกรณ์ของรถยนต์ โดยผลผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษานั้นเป็นชิ้นส่วนตัวเรือนของปั๊มจ่ายน้ำมันแรงดันสูง (Supply pump) สำหรับระบบการจ่ายน้ำมันแบบใช้รางคอมมอนเรลในเครื่องยนต์ระบบดีเซล โดยเป็นชิ้นส่วนที่มีหน้าที่เป็นโครงสร้างสำหรับประกอบชิ้นส่วนอื่นของปั๊มนี้ และมีหน้าที่เป็นตัวเรือนทางผ่านของน้ำมันแรงดันสูงที่จะส่งต่อไปยังรางคอมมอนเรลก่อนที่จะเข้าสู่หัวฉีดในห้องเผาไหม้เครื่องยนต์ระบบดีเซลต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ระบบการจ่ายน้ำมันแบบใช้รางคอมมอนเรล



รูปที่ 1.1 ระบบการจ่ายน้ำมันแบบใช้รางคอมมอนเรล

โดยเหตุผลในการเลือกศึกษาชิ้นส่วนตัวเรือนของปั๊มจ่ายน้ำมันแรงดันสูงนี้เนื่องจากเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสัดส่วนของเสียเป็นจำนวนมากกว่าผลิตภัณฑ์รุ่นอื่น จากรูปที่ 1.2 และตารางที่ 1.3 จะเห็นได้ว่ามีผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 4 ชนิดที่ทำการผลิตด้วยกระบวนการฉีดหล่อแรงดันสูง ผลิตภัณฑ์แต่ละรุ่นนั้นเป็นส่วนประกอบของปั๊มจ่ายน้ำมันแรงดันสูงสำหรับรางคอมมอนเรลทั้งหมด โดยผู้วิจัยขอ กำหนดให้ผลิตภัณฑ์ทั้ง 4 ชนิดคือ A, B, C และ D ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ A ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษานั้นมีสัดส่วนของเสียรวมทุกประเภทในแต่ละเดือนสูงกว่าผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นทุกเดือน



รูปที่ 1.2 ข้อมูลเปอร์เซ็นต์งานเสียแต่ละผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58

ตารางที่ 1.1 จำนวนที่ผลิตแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58

ชนิดผลิตภัณฑ์	ก.ค.-58	ส.ค.-58	ก.ย.-58	ต.ค.-58	พ.ย.-58	ธ.ค.-58	จำนวนรวม (ชิ้น)
ผลิตภัณฑ์ A	42,924	31,709	31,384	39,034	35,479	31,505	212,035
ผลิตภัณฑ์ B	87,291	86,710	88,141	89,010	88,274	87,427	526,853
ผลิตภัณฑ์ C	100,131	99,842	100,124	102,025	99,763	98,534	600,419
ผลิตภัณฑ์ D	29,380	28,934	31,384	28,405	28,998	29,385	176,486

ตารางที่ 1.2 จำนวนงานเสียแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58

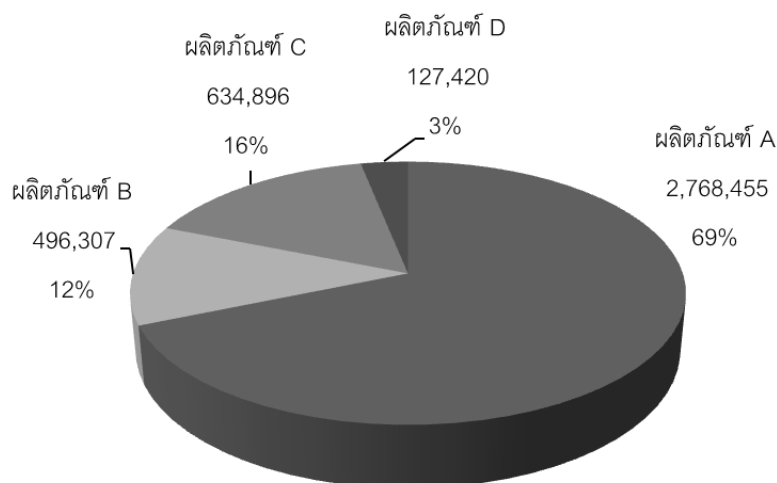
ชนิดผลิตภัณฑ์	ก.ค.-58	ส.ค.-58	ก.ย.-58	ต.ค.-58	พ.ย.-58	ธ.ค.-58	จำนวนรวม (ชิ้น)
ผลิตภัณฑ์ A	1,498	1,497	2,118	1,475	2,207	1,852	10,647.9
ผลิตภัณฑ์ B	550	373	388	347	459	428	2,545.2
ผลิตภัณฑ์ C	1,172	1,348	1,442	1,388	1,277	1,311	7,936.2
ผลิตภัณฑ์ D	379	471	382	361	333	391	2,316.7

ตารางที่ 1.3 สัดส่วนงานเสียแต่ละชนิดผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58

ชนิดผลิตภัณฑ์	ก.ค.-58	ส.ค.-58	ก.ย.-58	ต.ค.-58	พ.ย.-58	ธ.ค.-58
ผลิตภัณฑ์ A	3.49%	4.72%	6.75%	3.78%	6.22%	5.88%
ผลิตภัณฑ์ B	0.63%	0.43%	0.44%	0.39%	0.52%	0.49%
ผลิตภัณฑ์ C	1.17%	1.35%	1.44%	1.36%	1.28%	1.33%
ผลิตภัณฑ์ D	1.29%	1.63%	1.22%	1.27%	1.15%	1.33%

ตารางที่ 1.4 มูลค่าของงานเสียแต่ละผลิตภัณฑ์รวมตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58

ชนิดผลิตภัณฑ์	ราคาต้นทุนที่ผลิต (บาท/ชิ้น)	จำนวนที่ผลิต ก.ค.-ธ.ค.58 (ชิ้น)	จำนวนของเสียที่ ผลิต ก.ค.-ธ.ค.58 (ชิ้น)	สัดส่วนของเสีย เฉลี่ย ก.ค.-ธ.ค.58 (%)	มูลค่าของเสีย ก.ค.-ธ.ค.58 (บาท)
ผลิตภัณฑ์ A	260	212,035	10,648	5.02%	2,768,455
ผลิตภัณฑ์ B	195	526,853	2,545	0.48%	496,307
ผลิตภัณฑ์ C	80	600,419	7,936	1.32%	634,896
ผลิตภัณฑ์ D	55	176,486	2,317	1.31%	127,420



รูปที่ 1.3 สัดส่วนมูลค่าของเสีย ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 – ธ.ค.58

จากตารางที่ 1.4 จะเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ A มีสัดส่วนของเสียเฉลี่ยตั้งแต่เดือน ก.ค.2558 ถึง ธ.ค.2558 สูงที่สุดเท่ากับ 5.02% และมีมูลค่าของเสียเป็นเงินจำนวน 2,768,465 บาท โดยคำนวณจากมูลค่าของเสียต่อชิ้น ซึ่งเท่ากับราคาต้นทุนในการผลิตของผลิตภัณฑ์ A คือ 260 บาทต่อชิ้น คูณกับจำนวนของเสียทุกประเภทของผลิตภัณฑ์ A ตั้งแต่เดือน ก.ค.58 ถึง ธ.ค.58 คือ 10,648 ชิ้น รวมเป็นมูลค่าสูงที่สุดเทียบกับผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตด้วยกระบวนการฉีดหล่อแรงดันสูง ซึ่งดูได้จากกราฟในรูปที่ 1.3 ที่ผลิตภัณฑ์ A มีมูลค่าของงานเสียรวมทั้งตั้งแต่เดือน ก.ค.58 ถึง ธ.ค.58 เป็น 69% ของมูลค่างานเสียจากผลิตภัณฑ์ทั้งหมดที่ทำการผลิตด้วยกระบวนการฉีดหล่อแรงดันสูง จึงต้องทำการปรับปรุงที่ผลิตภัณฑ์ A เป็นอันดับแรก

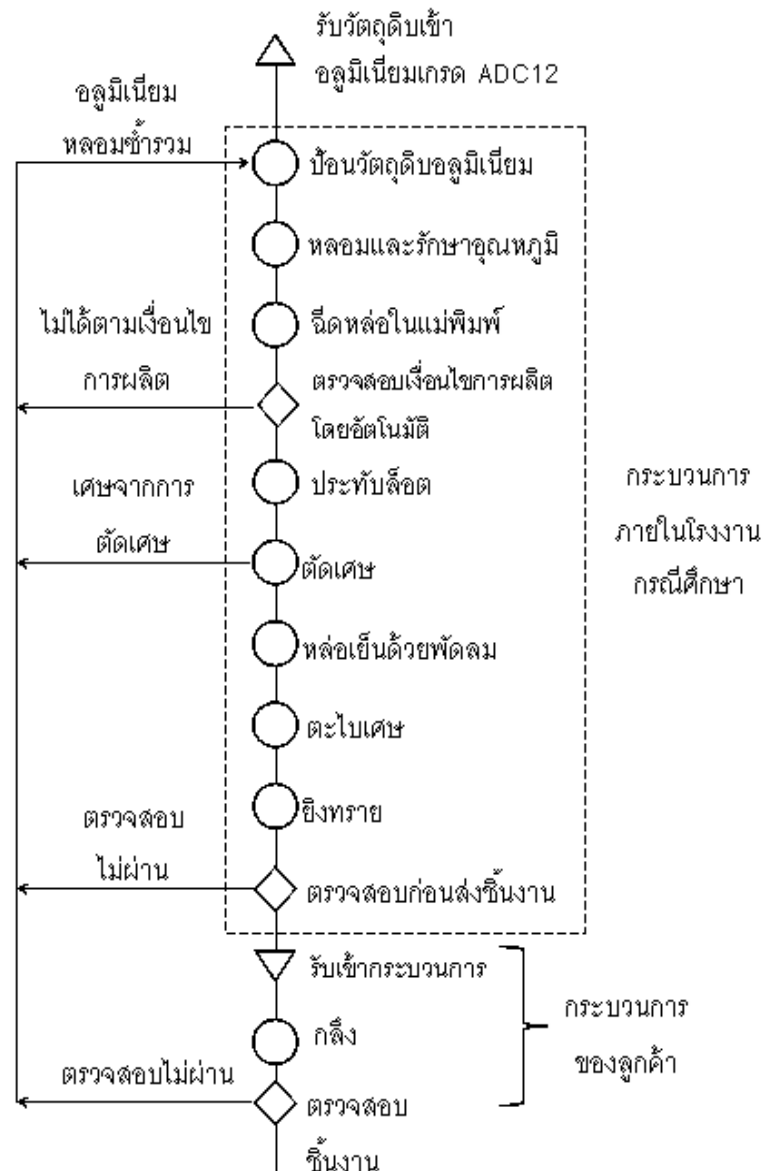
1.1.2 กระบวนการผลิต

กระบวนการผลิตชิ้นส่วนที่ทำการศึกษานั้นใช้กระบวนการฉีดหล่ออลูมิเนียมด้วยแรงดันสูง (High Pressure Die Casting) ซึ่งในปัจจุบันการผลิตชิ้นส่วนสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์นั้นได้มีการนำเอาวิธีการฉีดหล่ออลูมิเนียมแรงดันสูง มาใช้อย่างกว้างขวาง โดยกระบวนการผลิตในรูปแบบการฉีดหล่ออลูมิเนียมแรงดันสูงเป็นกระบวนการผลิตที่เหมาะสมกับการผลิตชิ้นงานที่มียอดการผลิตสูง มีความคงที่ในการดำเนินการผลิตต่อเนื่อง สามารถรองรับต่อการยอดการผลิตที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นได้ ทั้งนี้เหตุผลหลักก็คืออลูมิเนียมมีน้ำหนักเบาเหล็ก ไม่เกิดสนิม มีคุณสมบัตินำความร้อนได้ดี และยังสามารถนำอลูมิเนียมที่ใช้แล้วมาทำการหลอม เพื่อนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตได้ใหม่อีกครั้ง ทำให้ผู้ประกอบการสามารถลดต้นทุนการผลิตในด้านของวัตถุดิบได้ด้วย ดังที่แสดงรูปที่ 3 ซึ่งแสดงแผนผังกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ A และจุดที่มีการนำอลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่ โดยกระบวนการผลิตมีดังนี้

1. รับวัตถุดิบอลูมิเนียมเกรด ADC12 จากผู้ผลิตวัตถุดิบ และตรวจสอบตามมาตรฐาน
2. ป้อนวัตถุดิบ (Material Loading) โดยพนักงานนำวัตถุดิบอลูมิเนียมใส่ในเครื่องป้อนวัตถุดิบเพื่อป้อนเข้าสู่เตาหลอมอลูมิเนียม
3. หลอมและรักษาอุณหภูมิอลูมิเนียม (Melting & Holding) เมื่อวัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่เตาหลอมอลูมิเนียมที่บริเวณห้องหลอม เตาหลอมจะทำการหลอมอลูมิเนียมด้วยหัวเผาเชื้อเพลิงจากก๊าซธรรมชาติเพื่อให้อลูมิเนียมแปรสถานะจากของแข็งเป็นของเหลวและไหลเข้าสู่ห้องรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 680 องศาเซลเซียส ซึ่งเชื่อมต่อกับปากบ่อดักอลูมิเนียม
4. ฉีดหล่ออลูมิเนียมในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง (Die casting) โดยชุดกระสวยตักนำอลูมิเนียมจากบริเวณปากบ่อ แล้วนำมาเทลงในช่องฉีดอลูมิเนียม จากนั้นเครื่องฉีดหล่อจะอัดน้ำอลูมิเนียมเข้าสู่แม่พิมพ์ รอจนกระทั่งอลูมิเนียมเย็นตัวเป็นสถานะของแข็ง แล้วหุ่นยนต์จะหยิบชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ไปยังกระบวนการต่อไป แต่หากชิ้นงานที่ฉีดไม่เป็นไปตามค่าในช่วงที่กำหนดของเครื่องซึ่งตรวจสอบโดยอัตโนมัติ หุ่นยนต์จะนำชิ้นงานนั้นไปป้อนที่เครื่องป้อนอลูมิเนียมเพื่อนำไปหลอมใหม่
5. ประทับลวดการผลิต (Marking) หุ่นยนต์นำชิ้นงานมาที่เครื่องประทับลวดการผลิต โดยการใช้หัวเข็มขับเคลื่อนด้วยลมกระแทก โดยจะเขียนลวดการผลิตที่หน้าชิ้นงาน
6. ตัดเศษ (Trimming) หลังจากประทับลวด หุ่นยนต์จะนำชิ้นงานมาที่เครื่องตัดเศษ และทำการตัดเศษที่เป็นส่วนทางเข้าชิ้นงาน (Runner) และบริเวณรูล้นของชิ้นงาน (Overflow) ด้วยระบบไฮดรอลิกเพื่อให้เหลือเพียงชิ้นงานเท่านั้น และหุ่นยนต์จะนำภาครองเศษ ซึ่งมีเศษจากการตัดไปเทลงในเครื่องป้อนอลูมิเนียมเพื่อนำเศษนี้ไปหลอมใหม่
7. ระบายความร้อน (Cooling) หุ่นยนต์นำชิ้นงานที่ตัดเศษแล้วมาที่วางรางเพื่อลำเลียงชิ้นงาน โดยในรางลำเลียงจะมีพัดลมเป่าชิ้นงานเพื่อลดอุณหภูมิให้เหลือประมาณ 50 องศาเซลเซียสก่อนจะมาถึงจุดที่พนักงานในกระบวนการถัดไปอยู่
8. กำจัดครีบและตกแต่งผิว (De-burring) พนักงานหยิบงานจากรางลำเลียงมาตะไบครีบและตกแต่งผิวชิ้นงานเบื้องต้น
9. ยิงทราย (Shot blast) พนักงานนำชิ้นงานตกแต่งผิวแล้วใส่ในถาดป้อน จากนั้นหุ่นยนต์จะหยิบชิ้นงานเข้าไปในเครื่องยิงทราย เพื่อปรับผิวและกำจัดเศษครีบในบริเวณที่พนักงานไม่สามารถตกแต่งผิวได้
10. ตรวจสอบชิ้นงาน (Final inspection) หลังจากการยิงทรายแล้วหุ่นยนต์จะนำชิ้นงานออกมาใส่รางให้พนักงานเพื่อให้พนักงานทำการตรวจสอบผิวภายนอกชิ้นงานตามมาตรการที่กำหนดไว้

11. ส่งชิ้นงานให้กับลูกค้า และเข้าสู่กระบวนการผลิตของลูกค้า ก่อนจะนำไปประกอบเป็นชิ้นส่วนของลูกค้าในขั้นต่อไป จะทำการตรวจสอบชิ้นงานก่อน หากลูกค้าพบว่าชิ้นงานเสียที่เกิดจากกระบวนการฉีดหล่ออลูมิเนียม จะส่งชิ้นงานที่เป็นงานเสียกลับมายังโรงงานกรณีศึกษา

จากกระบวนการข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีหลายกระบวนการที่จะตรวจพบงานเสีย หรือมีเศษจากการตัดออกมา ซึ่งสามารถนำชิ้นงานเหล่านี้มาหลอมเป็นวัตถุดิบใหม่ได้ ซึ่งได้แก่กระบวนการฉีดหล่ออลูมิเนียมในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง (Die casting), กระบวนการตัดเศษ, กระบวนการตรวจสอบผิวภายนอก และงานเสียจากกระบวนการของลูกค้าซึ่งเกิดจากกระบวนการฉีดหล่อ แต่ในการนำอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการผลิตแล้วมาหลอมเพื่อเป็นวัตถุดิบใหม่นั้นอาจมีส่วนทำให้เกิดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการหลอมในปริมาณที่มากกว่าอลูมิเนียมแท่งใหม่ที่มาจากผู้ผลิตวัตถุดิบซึ่งมีกระบวนการกำจัดออกไซด์มาแล้ว จะส่งผลให้เกิดตะกรันของอลูมิเนียมที่ตกค้างภายในเตาหลอมแล้วเข้าไปสู่อุปกรณ์ที่นำไปฉีดหล่อในแม่พิมพ์ทำให้เกิดเป็นงานเสียจากสิ่งแปลกปลอมติดค้างอยู่ที่เนื้อชิ้นงานได้ รูป 1.3 แสดงแผนผังกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ A และจุดที่มีการนำอลูมิเนียมมาใช้เป็นวัตถุดิบใหม่



รูปที่ 1.4 แผนผังกระบวนการของผลิตภัณฑ์ A

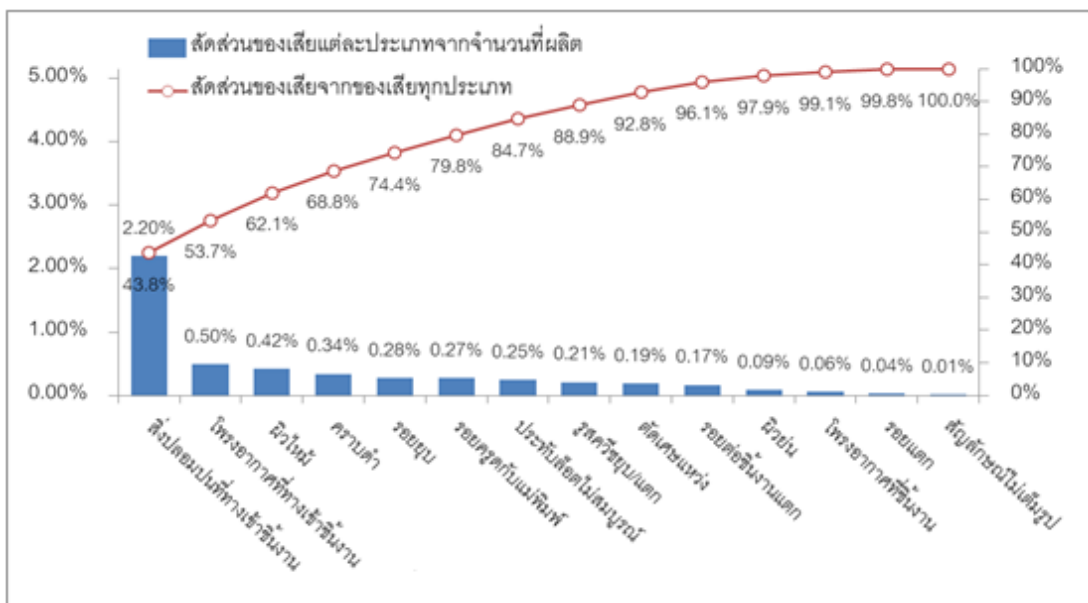
1.1.3 ของเสียในกระบวนการผลิต

ข้อมูลจากโรงงานกรณีศึกษาพบว่าชิ้นงานเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ A นั้นมีชิ้นงานเสียจากการพบสิ่งปลอมปนบริเวณทางเข้าชิ้นงาน (Gate) ซึ่งเป็นบริเวณที่ถูกออกแบบมาให้ดักจับเศษสิ่งปลอมปนขนาดใหญ่ก่อนจะเข้าสู่ภายในตัวชิ้นงาน โดยงานเสียประเภทนี้มีจำนวน 4,660 ชิ้น ตั้งแต่เดือนกรกฎาคม 2558 ถึงธันวาคม 2558 เป็นสัดส่วนของเสียเท่ากับ 2.20% ของจำนวนที่ผลิตทั้งหมดในช่วงเดือนกรกฎาคม 2558 ถึง ธันวาคม 2558 และมีมูลค่าของเสียเป็นเงินจำนวน 1,211,600 บาท เป็นประเภทของงานเสียที่มีจำนวนมากที่สุดดังที่แสดงในตารางที่ 1.5 และของเสียประเภทนี้อาจหลุดรอดไปถึงกระบวนการต่อไปของลูกค้าได้ ทางผู้บริหารและผู้มีส่วน

เกี่ยวข้องจึงต้องทำการปรับปรุงโดยเร่งด่วน โดยจากการประเมินในเบื้องต้นพบว่าสิ่งปลอมปนที่อยู่ในบริเวณทางเข้าของชิ้นงานนั้นคล้ายกับตะกรันอลูมิเนียม (dross) ที่เกิดขึ้นในเตาหลอมอลูมิเนียมซึ่งเกิดขึ้นจากออกไซด์ของอลูมิเนียม โดยสันนิษฐานว่าเกิดจากการเติมอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการฉีดหล่อและกระบวนการผลิตของลูกค้ำแล้วเป็นจำนวนมาก เนื่องจากไม่มีการควบคุมปริมาณการเติมอย่างเข้มงวด ซึ่งก่อให้เกิดออกไซด์ที่ปนอยู่กับชิ้นงานหลอมซ้ำภายในเตาเป็นปริมาณมาก จึงได้ให้ทางฝ่ายผลิตยกเลิกการใช้งานของอลูมิเนียมที่ผลิตออกมาเป็นชิ้นงานเสียแล้วจะนำมาหลอมใหม่ คงเหลือไว้แต่การเติมเศษอลูมิเนียมจากการตัดบริเวณรู้นของชิ้นงานที่ผลิตออกมา ซึ่งเป็นการเติมเข้าสู่เตาหลอมโดยอัตโนมัติด้วยหุ่นยนต์แขนกล ทั้งนี้หลังจากมีการทดลองดำเนินการดังกล่าวพบว่าปริมาณชิ้นงานเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่ทางเข้าชิ้นงานในเดือนมกราคมลดลงเหลือจำนวน 350 ชิ้น คิดเป็น 0.82% ของจำนวนที่ผลิตในเดือนมกราคม 2559 ทำให้ภาพรวมของงานเสียรวมทุกประเภทอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือ 3% ต่อเดือน แต่พบว่ามีอลูมิเนียมที่เก็บค้างเอาไว้เป็นจำนวนมาก ซึ่งมาจากชิ้นงานเสียในการผลิต ชิ้นงานที่ทดลองผลิตในช่วงติดตั้งสายการผลิตใหม่ ชิ้นงานเสียในกระบวนการของลูกค้ำที่ส่งกลับมา ทำให้สูญเสียพื้นที่เพื่อจัดเก็บเป็นจำนวนมากเพราะไม่สามารถนำชิ้นงานเต็มตัวไปทิ้งได้ เนื่องจากเป็นกฎด้านการรักษาความปลอดภัยด้านข้อมูลของทางบริษัท จำเป็นต้องมีการตัดทำลายก่อนนำไปทิ้ง ส่งผลให้เกิดค่าใช้จ่ายและสูญเสียทรัพยากรเพื่อดำเนินการ ดังนั้นทางผู้บริหารจึงต้องการให้มีการพิจารณานำชิ้นงานเสียเหล่านี้มาเป็นวัตถุดิบทำการหลอมอลูมิเนียมอีกครั้งโดยต้องมีการกำหนดสัดส่วนการเติมอลูมิเนียมให้เหมาะสม ส่งผลให้เกิดชิ้นงานเสียน้อยที่สุดหรือไม่เกินกว่าปริมาณที่ยอมรับได้ จากการใช้อลูมิเนียมหลอมซ้ำในการผลิตที่สัดส่วนต่างกัน ซึ่งประกอบด้วยอลูมิเนียมแท่งใหม่ (Aluminum Ingot) ชิ้นงานเสียในกระบวนการผลิต (Internal process scrap) และชิ้นงานเสียที่ส่งคืนจากลูกค้ำ (External process scrap) โดยมีสมมติฐานว่าหากใช้สัดส่วนของอลูมิเนียมหลอมซ้ำมากจะทำให้เกิดของเสียจากสิ่งปลอมปนที่ทางเข้าชิ้นงานมาก แต่หากใช้อลูมิเนียมแท่งใหม่เพียงอย่างเดียวจะทำให้เกิดของเสียจากสิ่งปลอมปนที่ทางเข้าชิ้นงานน้อยกว่า แต่เป็นต้นทุนจากค่าวัตถุดิบที่สูง และส่งผลให้ไม่มีพื้นที่จัดเก็บสำหรับอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่รอการทำลาย ซึ่งในการใช้งานนั้น จำเป็นต้องทราบสัดส่วนที่เหมาะสมที่ทำให้เป็นไปตามคุณภาพที่ต้องการ งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนการเติมอลูมิเนียมหลอมซ้ำ โดยวัดผลจากการเกิดสิ่งปลอมปนที่เกทชิ้นงาน ซึ่งประกอบด้วยของเสีย 2 ประเภทย่อยคือ 1.สิ่งปลอมปนที่เกทชิ้นงาน และ 2.โพรงอากาศที่เกทชิ้นงาน

ตารางที่ 1.5 จำนวนงานเสียแต่ละประเภทของผลิตภัณฑ์ A เดือน ก.ค.58 - ธ.ค.58

	ก.ค.58 (ชิ้น)	ส.ค.58 (ชิ้น)	ก.ย.58 (ชิ้น)	ต.ค.58 (ชิ้น)	พ.ย.58 (ชิ้น)	ธ.ค.58 (ชิ้น)	รวม (ชิ้น)
สิ่งปลอมปนที่เกท	554	628	917	653	975	933	4660
โพรงอากาศที่เกท	139	210	468	78	53	106	1054
รอยแตก	20	4	15	6	12	18	75
ตัดเศษแหวน	158	133	88	41	23	4	447
ประทับลือตไม่สมบูรณ์	177	1	61	34	112	206	591
โพรงอากาศที่ชิ้นงาน	42	0	9	3	64	7	125
รอยครูดกับแม่พิมพ์	12	9	105	63	144	20	353
ผิวย่น	121	1	5	3	49	12	191
ผิวไหม้	74	146	68	139	274	193	894
รอยยุบ	49	96	128	124	73	57	527
สัญลักษณ์ไม่เต็มรูป	1	0	0	8	17	0	26
คราบดำ	137	90	55	86	288	66	722
รูศควิชยุบ/แตก	13	178	199	0	0	186	576
รอยต่อชิ้นงานแตก	0	0	0	238	124	45	407
รวม (ชิ้น)	1,497	1,496	2,118	1,476	2,208	1,853	10,648
จำนวนผลิต (ชิ้น)	42,924	31,709	31,384	39,034	35,479	31,505	212,035
สัดส่วนงานเสีย (%)	3.49%	4.72%	6.75%	3.78%	6.22%	5.88%	5.02%



รูปที่ 1.5 พาเรโตแสดงปริมาณของงานเสียของผลิตภัณฑ์ A แต่ละประเภท

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่มีต่อการเกิดของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกทชิ้นงานฉีดในกระบวนการฉีดหล่อแรงดันสูง

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- ศึกษาที่เป็นปัญหาประเภทสิ่งปลอมปนที่เกิดบริเวณเกทของชิ้นงาน โดยมุ่งเน้นความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนการเติมอลูมิเนียมหลอมซ้ำกับการเกิดของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกทและของเสียประเภทโพรงอากาศที่เกท
- กำหนดให้เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท ที่ยอมรับได้คือน้อยกว่า 1.5%
- ศึกษาเฉพาะชิ้นงานผลิตภัณฑ์ A ในกรณีศึกษา
- ศึกษาเฉพาะเตาหลอมที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษาเท่านั้น
- อลูมิเนียมที่ศึกษาเป็นเกรด ADC12

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- ลดของเสียในกระบวนการ โดยควบคุมปัญหาจากการเกิดสิ่งปลอมปนที่ทางเข้าชิ้นงานได้
- ทราบแนวทางของการเติมอลูมิเนียมที่เหมาะสม ด้วยการใช้อลูมิเนียมหลอมซ้ำ
- ทราบถึงปัจจัยการเกิดของสิ่งปลอมปนที่เกิดในกระบวนการฉีดหล่ออลูมิเนียมแรงดันสูง

1.5 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูล ความเป็นไปได้ในการวิจัย
2. ศึกษาสภาพปัญหาปัจจุบัน ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเกิดของสิ่งปลอมปนในกระบวนการหลอมอลูมิเนียมสำหรับกระบวนการฉีดหล่ออลูมิเนียมด้วยแรงดันสูง
3. ทดลองศึกษาการเติมวัตถุดิบอลูมิเนียมแท่งใหม่และหลอมซ้ำตามสัดส่วนที่ต่างกัน เพื่อดูผลกระทบต่อด้านคุณภาพและการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการ
4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร และวิเคราะห์ทางสถิติ
5. อภิปรายและสรุปผลการดำเนินการวิจัย
6. จัดทำรูปเล่มของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับงานหล่ออลูมิเนียม

การหล่ออลูมิเนียมในแม่พิมพ์ (Die Casting)

การหล่อในแม่พิมพ์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมี 3 ลักษณะดังนี้

1. การหล่อในแม่พิมพ์โดยแรงโน้มถ่วง (Gravity Die Casting)

เป็นการหล่อในแม่พิมพ์โดยใช้แรงโน้มถ่วง (Gravity) และส่วนใหญ่จะใช้กับอัลลอยด์ของโลหะเบา, โลหะทองแดง ปัจจุบันวิธีนี้ยังสามารถใช้กับ casting iron นอกจากนี้ ยังใช้กับเหล็กหล่อที่ผสมธาตุพิเศษที่วัสดุของแม่พิมพ์

2. การฉีดหล่อในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง (High Pressure Die Casting)

เป็นวิธีผลิตชิ้นหล่อ โดยการเทโลหะหลอมลงแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง และหากจำกัดเรื่องวัตถุดิบในการหลอมวิธีนี้จะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตสูงมาก ซึ่งเป็นรูปแบบการหล่อที่มีการพัฒนาแล้ว ปัจจุบันขอบข่ายในการปรับชิ้นงานหล่อได้ขยายวงกว้างออกไปตามเครื่องฉีดหล่ออลูมิเนียมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น

ข้อดีของการฉีดหล่อในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง

- สามารถหล่อชิ้นงานที่มีลักษณะซับซ้อนได้
- ขนาดของชิ้นงานมีความแม่นยำ
- ผิวชิ้นงานหล่อเรียบมาก
- สามารถผลิตชิ้นงานหล่อที่มีความแข็งแรงสูง
- ประสิทธิภาพในการผลิตสูงมาก

ข้อเสียของการฉีดหล่อในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันสูง

- มีขีดจำกัดด้านขนาดของชิ้นงานที่หล่อ จำกัดตามขนาดของเครื่องจักร
- มีข้อจำกัดเรื่องวัตถุดิบที่ใช้ในการหลอม จะใช้อัลลอยด์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ
- เนื่องจากเครื่องฉีดหล่อ และแม่พิมพ์ราคาแพง ต้นทุนด้านเครื่องจักรสูง

3. การฉีดหล่อในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันต่ำ (Low-pressure Die Casting)

การฉีดหล่อในแม่พิมพ์ด้วยแรงดันต่ำนั้นเริ่มตั้งแต่สมัยหลังสงครามโลกครั้งที่สอง โดยวิธีการเทน้ำอลูมิเนียมลงในแม่พิมพ์ที่ติดกับของท่อเดินน้ำอลูมิเนียมนอกภาชนะด้านบน และส่งน้ำอลูมิเนียมผ่านท่อจ่ายน้ำอลูมิเนียมโดยการใช้ก๊าซเพิ่มแรงดัน

โครงสร้างของ High Pressure Die Casting

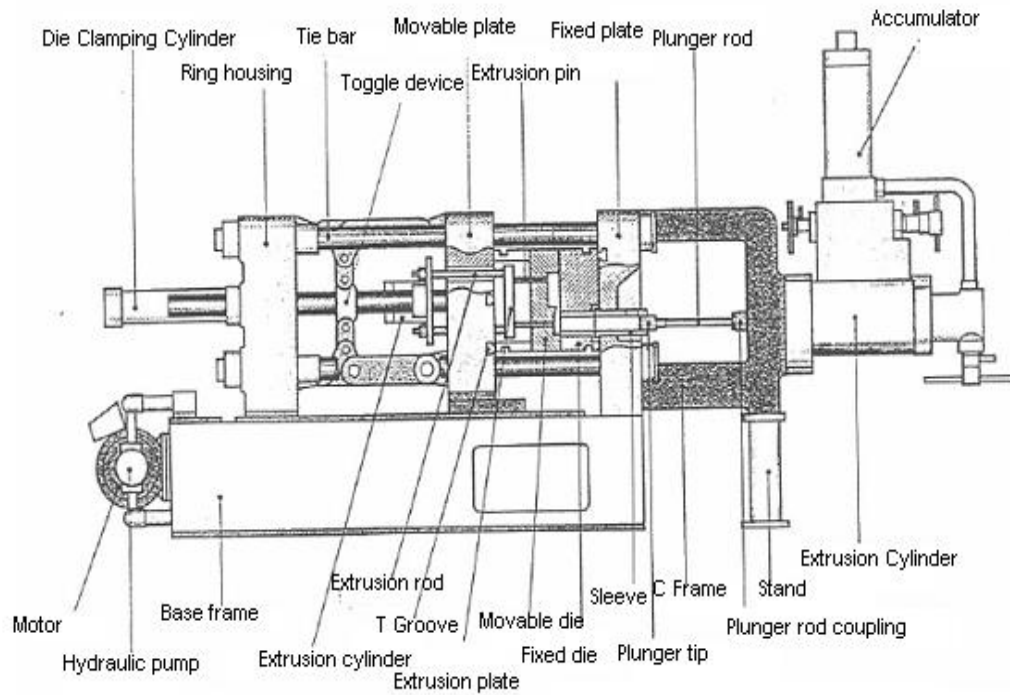
Die Cast เป็นวิธีการหลอมชิ้นงานให้ได้ผิวที่ดี ผลิตได้ปริมาณมากในระยะเวลาอันสั้นโดยการฉีดน้ำโลหะหลอมโดยอุณหภูมิสูง ซึ่งจะต้องสร้างแม่พิมพ์ที่มีความละเอียดสูง และต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับเปิด-ปิด และอุปกรณ์ฉีดโลหะหลอม รวมทั้งอุปกรณ์ Extrusion โลหะ ที่เครื่อง Die Cast และจะฉีดโลหะหลอมด้วยแรงดันสูงทำเข้าไปเข้ามา ก็จะเป็นวิธีที่ผลิตได้งาน casting นอกจากนี้ งานหลอมที่ผลิตด้วยวิธี Die cast วิธีนี้จะเรียกว่า งานหล่อ Die cast ปัจจุบันนี้ Die cast M/C แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1.) Hot chamber die cast M/C เป็นเครื่องจักรฉีดอลูมิเนียมที่หลอมละลายไว้ที่ Melting pot ในเตาที่แม่พิมพ์ที่ติดตั้งไว้ที่เครื่อง Die Cast โดยใช้ Plunger rod (Plunger tip) ซึ่งโดยทั่วๆ ไปแล้วจะใช้ หล่อ Zinc alloy, Tin alloy, Lead alloy กับ Hot chamber die cast M/C

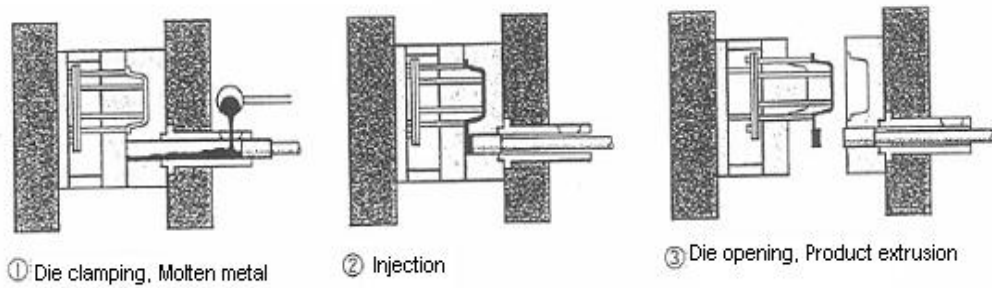
2) Cold chamber die cast M/C เป็นเครื่องที่ฉีดโลหะหลอมไว้ที่แม่พิมพ์โดยใช้ Plunger และ จะวางเตาไว้ใกล้ๆ Die Cast M/C และส่งโลหะที่หลอมแล้วที่รักษาอุณหภูมิไว้ในเตาไปที่ Sleeve โดยใช้ Automatic supply device โดยมากจะใช้หล่อ Aluminum alloy, Magnesium alloy, Copper alloy

สำหรับวิธีที่โรงงานการศึกษาใช้นั้นเป็นแบบ Cold chamber die cast M/C โดยการผลิตแบบ Die cast นั้นจะเดินเครื่อง Die cast ได้เร็ว เพื่อให้หลอมได้มากๆ ในระยะเวลาอันสั้น ซึ่งกลไกในการ Clamping die คือจะต้องเป็นแบบ Toggle ดังรูปที่แสดง และขณะที่โลหะหลอมถูกฉีดอัดเข้าที่แม่พิมพ์ และโลหะหลอมเป็นของเหลวไหลเข้าที่แม่พิมพ์จะเกิดแรงดันด้าน Casting pressure เนื่องจากจะเกิดแรงในการปิดแม่พิมพ์ ดังนั้นจะต้องใช้แรงในการ Clamp แม่พิมพ์เพื่อหลอมชิ้นงานขนาดใหญ่ และต้องมีเครื่อง Die Cast ที่มีแรง Clamp แม่พิมพ์หลายพันตัน ซึ่งมีการผลิตออกมาเป็นจำนวนหลายขนาดในปัจจุบัน และจะแสดงโดยชื่อของเครื่อง Die cast โดยใช้แรง Clamping die เช่นการเรียกว่าเครื่อง Die Cast 500 ตัน และจะต้องมีแรงสำหรับการเปิดแม่พิมพ์เพื่อนำชิ้นงาน Casting ออกจากแม่พิมพ์ ซึ่งเกิดแรงในการ Unclamp แม่พิมพ์มากขนาดเท่าขนาดงานหลอม

โครงสร้างของ Cold Chamber Die Cast M/C



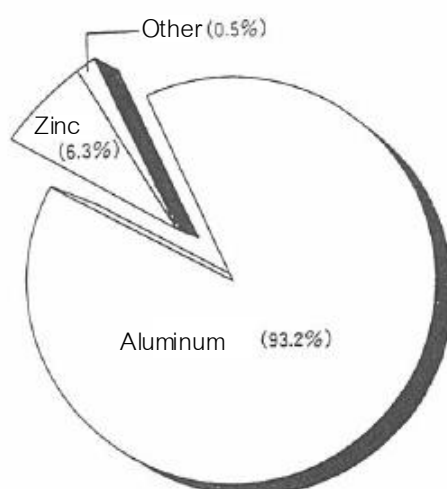
ลักษณะการทำงานของ Cold Chamber Die Cast M/C



รูปที่ 2.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Die casting แบบ Cold chamber และวิธีการขึ้นรูปด้วยการฉีดหล่ออลูมิเนียม

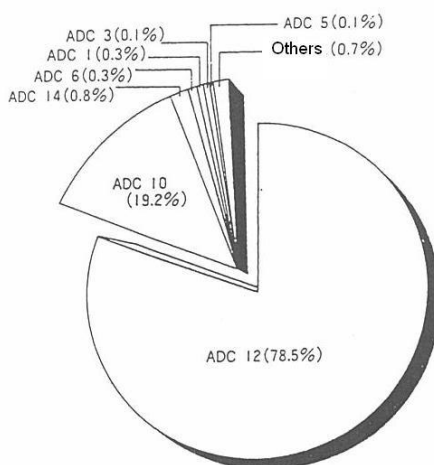
2.2 อัลลอยต์ในงานหล่ออลูมิเนียม

ในการผลิตจะมี Nonferrous alloy หลายประเภทจะใช้กับการ Casting ซึ่ง Aluminum Alloy และ Zinc Alloy จะใช้มากที่สุดในการผลิตภาพรวมทั้งหมด Die Cast มีประมาณ 99% และที่เหลืออีก 1 % คือ Magnesium, Lead, Tin, Copper เป็นต้น โดย Alloy ที่มีจุดหลอมเหลวสูงเช่น Aluminum, Magnesium, Copper ปกติแล้วจะใช้ Cold Chamber Die Cast M/C นอกจากนี้ Alloy ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำเช่น Zinc, Tin, Lead จะใช้ Hot Chamber Die Cast M/C



รูปที่ 2.2 อัตราส่วนการผลิตโดยแยกตาม Alloy ที่ผสมหลักในอลูมิเนียม

Aluminum Alloy เป็น Alloy ที่ถูกใช้ในงานฉีดหล่อแรงดันสูงมากที่สุด โดยจะมีอลูมิเนียม Alloy ที่ใช้งานหลักอยู่ 9 ชนิดที่ถูกระบุใน Japan Industrial Standard JIS H 5302 โดยในรูปที่ 2.3 เป็น Diagram แสดงสัดส่วนปริมาณการใช้ Alloy โดยจากรูปสามารถสรุปได้ว่า ADC10 และ 12 ใน Al-Si-Cu Alloy มีสัดส่วนรวมกันประมาณ 98% และ Alloy ชนิดอื่นรวมกันมีสัดส่วนประมาณ 2% โดยทั่วไปนั้นนิยมใช้ Alloy ADC10, 10Z, 12, 12Z และหากเป็นการใช้แบบพิเศษจะใช้ Alloy ADC1, 3, 5, 6 และ 14 ซึ่งใช้กันอย่างแพร่หลาย ส่วนประกอบของ Aluminum Alloy ใน Die Casting จำเป็นต้องพิจารณาถึงต้นทุนของ Alloy ingot และต้องพิจารณาถึงความยากง่ายในการทำ Surface treatment, Machine processing และการ Casting เป็นต้น เช่นเดียวกันกับคุณสมบัติทาง Physical, คุณสมบัติทางกล (Mechanical) และ Chemical component ของ Alloy



รูปที่ 2.3 สัดส่วนการผลิตของอลูมิเนียมอัลลอยด์แต่ละชนิดในการฉีดหล่ออลูมิเนียม

อัลลอยด์สำหรับ Die casting มีส่วนผสมหลักเป็น Al-Si และจะอธิบายผลกระทบของส่วนผสม หลักที่ใช้ผสมโดยมากดังนี้

1. ซิลิกอน (Silicon)

ซิลิกอนเป็นส่วนผสมหลักของ Alloy ที่ใช้ทั่วไป เราจึงต้องปรับปรุงเรื่องคุณสมบัติในการ Flow ให้โดดเด่น ซึ่งจะทำให้ Flow ของน้ำอลูมิเนียมดีที่สุดที่จุดเยือกแข็งต่ำที่สุด (Eutectic point) นอกจากนี้ latent heat สูง, shrinkage และ Heat expansion coefficient ก็ต่ำและจะสามารถป้องกันอุณหภูมิสูงๆ ได้และจะมีผลดีต่อน้ำอลูมิเนียม ดังนั้น ADC1 ที่มี Silicon ผสมอยู่ด้วยที่ใกล้จุดเยือกแข็งต่ำที่สุด (Eutectic point) จะมีคุณสมบัติทางด้านการไหลของอลูมิเนียมที่ดี และเนื่องจาก ถึงแม้จะเป็น Impurity ก็ตามก็ยังคงมีผลของสิ่งเหล่านี้อยู่ ดังนั้นเพื่อจะทำให้คุณสมบัติในการหลอมดีขึ้นจึงใช้กับ Al-Mg ในปริมาณที่น้อย แต่จะทำให้ Silicon มีคุณสมบัติในการ Cutting แยก

2. ทองแดง (Copper)

หากทองแดงถูกทำให้เป็น Solid ใน Aluminum alloy คุณสมบัติทางกลจะสูงขึ้น และคุณสมบัติในการตัด และการ Grinding จะดีขึ้น และ Al-Si-Cu Alloy คุณสมบัติในการหลอมจะค่อนข้างน้อยลงมากกว่า Al-Si Alloy แต่ Strength ที่มีอุณหภูมิสูงจะดีขึ้น นอกจากนี้ Additives ของ Copper จะลดคุณสมบัติในการป้องกันการกัดกร่อน (Anti-corrosion) แต่เนื่องจากความต่าง ศักย์ระหว่างเหล็กจะน้อยลงในสภาพที่ทองแดงแข็ง จึงทำให้ไฟฟ้าทางเคมีคงที่มากขึ้นกรณีที่ใช้ร่วมกับชิ้นงานที่เป็นเหล็กตัวอื่นๆ นอกจากนี้ระดับการหลอมโลหะในบ้าหลอมนั้น Al-Si-Cu Alloy จะต่ำกว่า Al-Si และประสิทธิภาพที่ได้จะเหมือนกันเพราะทองแดงก็เป็น Impurity เหมือนกัน จึงไม่ค่อยดีเพราะคุณสมบัติในการทนต่อความร้อนได้สูง และคุณสมบัติในการหดตัวจะเพิ่มขึ้น

3. แมกนีเซียม (Magnesium)

สำหรับ Al-Si Alloy นั้นเมื่อมีส่วนผสมของ Magnesium แล้ว Magnesium จะไป Molding เป็น Mg_2Si และมีข้อช่วยในการหลอมให้เป็นของแข็งที่ 1.85% ที่ 595 องศาเซลเซียส แต่ข้อช่วยในการทำให้เป็นของแข็งจะลดลงพร้อมกับอุณหภูมิที่ลดลง และจะเป็นการเสริมกำลังของ Base Material ของ Al-Si Alloy จากการ Formation ของของแข็ง และจะเป็นการเพิ่มคุณสมบัติในการ Anti-corrosion, Electric Plating, Anodic film และเมื่อทำ T-4 Treatment เพื่อให้ได้ Solid curve line ตามนี้ และ Hardness จะสูงขึ้นสำหรับ Magnesium ที่ทำหน้าที่เป็น Impurity กับ Al-Si-Cu Alloy นั้น Hardening Effect ของ Mg_2Si จะได้รับคุณสมบัติในการทนต่อความร้อนที่ต่ำ และการขยายตัว และ Impact value จะลดลง นอกจากนี้ คุณสมบัติในการทนต่อการแตกเปราะที่มีอุณหภูมิสูงจะเกิด Hot Tearing ได้ง่ายทางอเมริกาจึงกำหนดค่าของส่วนผสมของ Al-Si Alloy, Al-Si-Cu Alloy ไว้อย่างเข้มงวดโดยต้องต่ำกว่า 0.10% เราจะใช้ Al-Mg Alloy เป็น Alloy สำหรับป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion) แต่ Magnesium จะสร้าง Solid Solution ที่มีข้อช่วยที่กว้าง และ Coagulation range จะกว้างขึ้น นอกจากนี้ Heat Capacity จะน้อยลงและ Coefficient ของ Solidification Shrinkage และ Thermal Expansion จะมากขึ้น และคุณสมบัติของ Brittleness เพิ่มขึ้น และคุณสมบัติในการหลอมจะแยลงมาก ดังนั้นการหลอมของงานขนาดใหญ่ๆ จะทำได้ยาก

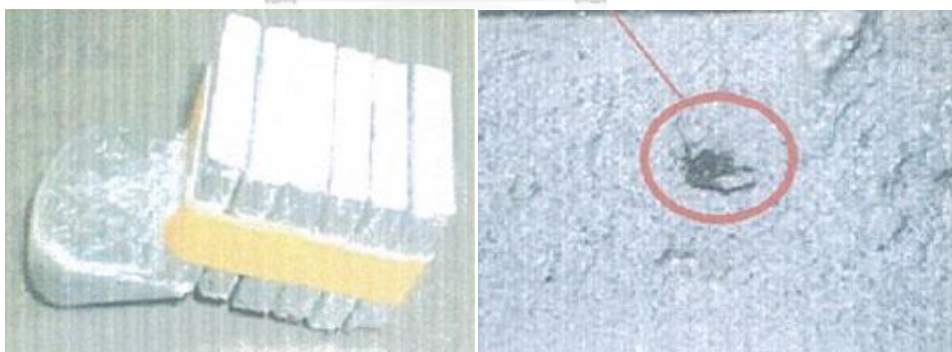
4. เหล็ก (Steel)

เหล็กที่ไม่บริสุทธิ์ (Impurities) จะช่วยลดปรากฏการณ์ในการที่เหล็กหล่อนั้นติดจับแม่พิมพ์ จึงต้องกำหนดให้อยู่ในระดับต่างๆ ไปคือ 0.8-1.0% โดยเหล็กจะสร้างผลึก $FeAl_3$ ที่แทบจะไม่ละลาย ในอลูมิเนียม และ $FeAl_3$ นี้ จะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Super-cool ขึ้นได้ง่าย และจะกลายเป็นผลึกขนาดเล็กมากๆ เนื่องจากความเร็วในการเย็นตัว และ Effect พื้นฐานที่ตามมาจะทำให้เหล็กมีความแข็งเพิ่มขึ้น และการขยายตัว หรือค่า Impact ลดลง แต่สำหรับ Die Casting แล้วสิ่งเหล่านี้จะไม่ค่อยส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางกล และเมื่อใน Al - Si Alloy, Al - Si -Cu Alloy มีส่วนผสมของเหล็กอยู่ในปริมาณมากๆ แล้วจะเกิด Intermetallic compound และยังมีความเป็นไปได้ที่จะกลายเป็น Hard Spot จึงต้องคงให้อยู่ในค่ามาตรฐาน

2.3 กระบวนการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียม

กระบวนการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียมเป็นขั้นตอนแรกของการผลิตชิ้นงาน ตรวจสอบเพื่อยืนยันคุณภาพน้ำอลูมิเนียม โดยแบ่งการตรวจสอบเป็น 2 ชนิด ได้แก่

- Composition check เป็นการตรวจสอบส่วนประกอบของวัตถุดิบว่าเป็นไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ (ADC12) หรือไม่ มีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้
 1. เตรียมตัวอย่างงานเพื่อทดสอบ
 2. ตรวจสอบส่วนประกอบของตัวอย่างโดยเครื่อง Spectrometer
 3. วิเคราะห์ผลการตรวจสอบว่าอยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดหรือไม่
- K-mold check คือ การตรวจสอบสิ่งปลอมปน สิ่งสกปรกที่ปนเปื้อนของวัตถุดิบที่อยู่ภายในเตาหลอม โดยมีขั้นตอนการตรวจสอบดังนี้
 1. เตรียมตัวอย่างงานเพื่อตรวจสอบ
 2. ตรวจสอบ(ตรวจนับ) จำนวนจุดสิ่งปลอมปน จากผิวหน้าตัด โดยใช้กล้อง Microscope กำลังขยาย 10 เท่า นับเฉพาะสิ่งปลอมปนที่เป็นจุดสีดำเท่านั้น (ไม่คำนึงถึงขนาดสิ่งปลอมปน)
 3. คำนวณค่า โดยนำจำนวนจุดสิ่งปลอมปนหารด้วยจำนวนผิวหน้าตัด (ค่าเฉลี่ย)
 4. ตรวจสอบผล จากมาตรฐาน จำนวนจุดสิ่งปลอมปนเฉลี่ยต้องน้อยกว่า
 5. บันทึกผล และจัดเก็บชิ้นงานตัวอย่าง



รูปที่ 2.4 K-mold และตัวอย่างสิ่งปลอมปนที่พบ

สิ่งปลอมปนในอลูมิเนียม

สิ่งปลอมปนในอลูมิเนียม โดยมากจะเกิดจากออกไซด์ของอลูมิเนียมทำปฏิกิริยาภายในห้องหลอม รวมถึงสิ่งปลอมปนที่มาจากวัตถุดิบที่ป้อนเข้าไปในเตาหลอม

ส่วนผสมของอลูมิเนียมที่มองไม่เห็น					
ผลกระทบที่เกิดขึ้น	ก๊าซ	สารที่ผสมอยู่ในวัตถุดิบ(Al)			
	<ul style="list-style-type: none"> - มี Porosity มาก - ความแข็งแรงต่ำ - จะทำให้งานบวมขึ้นเป็นรอยนูน 	<ul style="list-style-type: none"> - การไหลของอลูมิเนียมไม่ดี - มีฟองอากาศมาก - มีเนื้อโลหะจะไม่เข้ากัน (Hard spot) 	<ul style="list-style-type: none"> สิ่งแปลกปลอมที่ผสมอยู่(Al) อลูมิน่า spinel oxider silica chloride fluoride hydrogengas 	<ul style="list-style-type: none"> ความแข็ง (HV) 2,500-3,000 3,000-3,500 1,500 	<ul style="list-style-type: none"> การปะปนมาจากแหล่งการผลิต การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง Al - อีสูทไฟ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง Al-Mg แล้วรวมกับออกซิเจน การเกิดปฏิกิริยาทางเคมี Al-oxide อีสูทไฟผสมอยู่ การหลงเหลือของฟลักซ์ ก๊าซที่เกิดจากงานหลอมซ้ำ

รูปที่ 2.5 สิ่งปลอมปนในอลูมิเนียม

2.5 การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) คือ การดำเนินการทดลองอย่างเป็นระบบและมีการควบคุม มีวัตถุประสงค์เพื่อพิจารณาว่าวัตถุดิบที่ใส่เข้าไปในกระบวนการผลิต หรืออิทธิพลระหว่างกันของวัตถุดิบ (Interaction) มีความสัมพันธ์ต่อผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ หรือไม่ ประโยชน์ของ DOE คือ เป็นเครื่องมือที่ช่วยประหยัดเวลาและค่าใช้จ่าย ในขณะที่ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือสูง สามารถนำไปใช้ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของกระบวนการ เพื่อให้กระบวนการสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยขั้นตอนในการออกแบบการทดลองมีดังนี้

1. กำหนดหัวข้อปัญหา (Problem statement) จะต้องชัดเจน เข้าใจได้ง่ายและเป็นรูปธรรม ประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 อย่าง อะไรที่กำลังเป็นปัญหา (What) ลักษณะของปัญหาเป็นเช่นไรขนาดไหน (How) และพบปัญหานั้นที่ไหนช่วงเวลาใด (Where)

2. การเลือกปัจจัย (Factor) และการกำหนดระดับของปัจจัย (Treatment) จำเป็นที่จะต้องเลือกปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอย่างแท้จริง ซึ่งสามารถเลือกจากกรรมวิธีคัดกรองโดยเครื่องมือทางสถิติ จำพวก Univariate เช่น T-Test เป็นต้น ผู้ที่มีความรู้หรือเชี่ยวชาญในกระบวนการนั้นๆ ก็เป็นผู้ที่สามารถให้คำแนะนำที่ดีในการเลือกปัจจัย และการกำหนดระดับของปัจจัยด้วย

3. การเลือกตัวแปรตอบสนอง (Response) จะต้องเน้นตัวแปรที่สามารถวัดได้ ทั้งที่วัดด้วยเครื่องมือวัดและวัดด้วยกระบวนการวัดอื่นๆ เช่น การนับ และจะต้องเป็นตัวแปรที่สื่อถึงกระบวนการที่เราต้องการศึกษานั้นได้ดีด้วย

4. เลือกแบบทดลอง (Experiment design) เช่น การกำหนดจำนวนสิ่งตัวอย่าง วิธีการเลือกสิ่งตัวอย่าง วางแผนการทำการทดลอง วิธีการบันทึกผลการทดลอง และการกำหนดค่าใช้จ่ายในการดำเนินการ เป็นต้น

5. ดำเนินการทดลอง (Perform the Experiment) ให้เป็นไปตามแผนการ ทั้งวิธีการดำเนินการ ความถูกต้องในการวัด การควบคุมตัวแปรในการทดลอง และเก็บผลการทดลอง

6. การวิเคราะห์ข้อมูล (Data analysis) ไม่ใช่แค่การ Run computer program เพื่อให้ได้ผลออกมาเท่านั้น แต่รวมถึงการตรวจสอบ ลักษณะและคุณภาพของข้อมูลที่ได้จากการทดลอง การพิสูจน์ทราบความถูกต้องของ Model ที่ได้ (Model adequacy checking) หาค่าระดับนัยสำคัญของอิทธิพลของแต่ละปัจจัย โดยปกติ DOE จะใช้ ANOVA ในการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนั้นผู้วิเคราะห์ก็ต้องเข้าใจเงื่อนไข ของ ANOVA ด้วย

7. สรุปผลการทดลองและให้คำแนะนำ ผู้ดำเนินการทดลองจะเป็นผู้ที่เข้าใจที่ไปที่มาของข้อมูลดี และมองออกว่าผลที่ได้เป็นเช่นนั้นเพราะอะไร การดำเนินการมีข้อบกพร่องตรงไหน มีสาระสำคัญอะไรที่ผู้อ่านรายงานควรจะรับรู้ เพื่ออนาคตได้ดำเนินการทดลองบ้างก็จะเอาไปเป็นบรรทัดฐานได้ ผู้บริหารหน่วยงานอาจจะสนใจข้อวิเคราะห์ ความคิดเห็น ของผู้ดำเนินการมากกว่าผลที่ปรากฏก็เป็นได้

สิ่งที่ต้องยึดถือ 3 ประการ

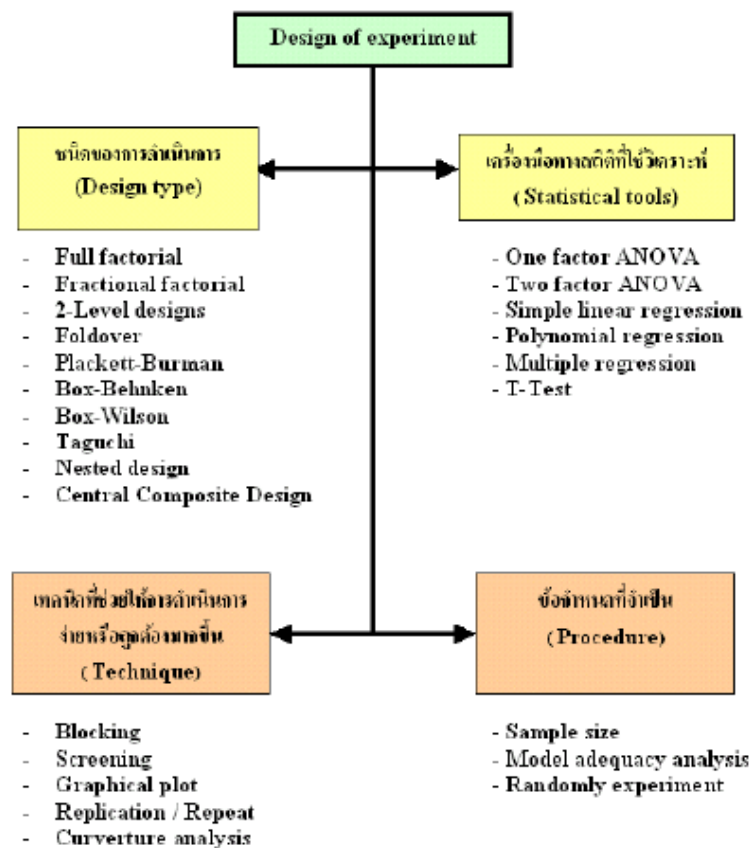
1. การสุ่ม (Randomization) การดำเนินการใดๆกับปัจจัยจะต้องอิสระ เพื่อให้ข้อมูลแต่ละตัวเป็นอิสระต่อกัน นอกจากนั้นจะต้องคำนึงถึง หลักการกระจายอย่างทั่วถึงสมดุล (Balance out) สำหรับปัจจัยอื่นที่เราไม่อาจควบคุมได้

2. การทำซ้ำ (Replication) หมายถึงการดำเนินการทดลองซ้ำอีกครั้ง เพื่อจุดประสงค์ 2 อย่างที่สำคัญคือ

- เพื่อให้สามารถมองเห็นและประเมินค่าความคลาดเคลื่อนจากการทดลองได้ การดำเนินการวิเคราะห์จะนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวไปประเมินว่าปัจจัยใดมีอิทธิพลต่อกระบวนการบ้าง

- เพื่อกำจัดทิ้งความคลาดเคลื่อน (Average out) อิทธิพลที่ไม่สามารถควบคุมได้ ที่มีต่อปัจจัยเปรียบดั่งเช่นการหาค่าเฉลี่ยนั่นเอง เป็นวิธีการในการประเมินค่าอิทธิพลของปัจจัยอีกอย่างหนึ่ง

3. การบล็อก (Blocking) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ของการทดลอง หรือคือเพื่อลดค่าความคลาดเคลื่อนในการทดลอง



รูปที่ 2.6 แสดงขั้นตอนการออกแบบการทดลอง

การวิเคราะห์การถดถอย

การวิเคราะห์การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ประเภท คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable) และตัวแปรอิสระ (Independent Variable) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพยากรณ์ตัวแปรตามด้วยค่าความสัมพันธ์ ซึ่งเรียกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression coefficient)

1. การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression)

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม กับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของทั้งสองเป็นเส้นตรง โดยให้ x เป็นตัวแปรอิสระ และ y เป็นตัวแปรตาม ซึ่งอาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างทั้งสองได้เป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e$$

β_0 คือ ค่าที่เท่ากับจุดตัดแกน y เมื่อกำหนดให้ $x = 0$

β_1 คือ ความชันของเส้นตรง

e คือ ค่าความแตกต่างของ y ที่เกิดขึ้นจริงกับ y บนเส้นถดถอย

2. การวิเคราะห์การถดถอยเชิงซ้อน (Multiple Regression Analysis)

ใช้ในกรณี ตัวแปรตามมีความสัมพันธ์กับตัวแปรอิสระมากกว่าหนึ่งตัวแปรขึ้นไป เขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$y = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + e \quad ; i = 1, 2, \dots, n$$

β_0 คือ ค่าที่เท่ากับค่าของ y เมื่อกำหนดให้ $x_i = 0 ; i = 1, 2, \dots, n$

β_i คือ ค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง y กับ x_i และดัชนีการเปลี่ยนแปลงใน y เมื่อ x_i เปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วย

e คือ ความแตกต่างของ y ที่เกิดขึ้นจริงกับ y บนเส้นถดถอย

i คือ ลำดับที่ของตัวแปรอิสระในสมการ

3. การถดถอยสำหรับสองตัวแปรที่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้ง

ในกรณีที่ความสัมพันธ์ไม่เป็นเส้นตรง แต่ลักษณะความสัมพันธ์มีรูปแบบที่แน่นอน เช่น เป็นเส้นโค้งแบบ Exponential ก็สามารถวิเคราะห์สมการถดถอยได้ โดยการแปลงลักษณะความสัมพันธ์ของตัวแปรให้อยู่ในรูปเส้นตรงก่อน จึงเปลี่ยนรูปความสัมพันธ์ของตัวแปรกลับไปสู่รูปเดิม เช่น ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันแบบเส้นโค้ง แบบ Exponential ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$Y = e^{a+bx}$$

a คือ ค่าที่เท่ากับจุดตัดแกน y เมื่อกำหนดให้ $x = 0$

b คือ ความชันของเส้นตรง

จากสมการข้างบนใส่ \ln ทั้งสองข้าง ได้เป็น

$$\ln(y) = a + bx$$

$$\ln(y) = y$$

ดังนั้น จึงแปลงสมการให้อยู่ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงได้ดังนี้

$$y = a + bx$$

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เจริญ สว่างวงศ์ (2555) , ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมการผลิตแบบโตแคสดีงต่อข้อบกพร่องของชิ้นงาน เป็นการศึกษาเพื่อหาเงื่อนไขการผลิตที่เหมาะสมที่สุด ในการผลิตแบบโตแคสดีงโดยทำการออกแบบการทดลอง ในเงื่อนไขด้านแรงดันฉีด ความเร็วในการเข้าที่บริเวณเกต และเวลาการหล่อเย็น แล้วทำการเปรียบเทียบผลที่ทำให้เกิดของเสียน้อยที่สุดและนำมาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยหลักการทางสถิติ ทำให้สามารถลดของเสียต่อหน่วยลงจาก 3.48 เป็น 2.45 และสามารถลดอัตราส่วนของเสียลงจาก 3.61% เป็น 2.32%

David V. Neff (2538) , ได้แนะนำวิธีการตรวจสอบคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมหลอมเหลวสำหรับกระบวนการหล่ออลูมิเนียม เพื่อปรับปรุงไม่ให้เกิดสิ่งแปลกปลอมและการเกิดของโพรงอากาศภายในน้ำโลหะ โดยวิธีการที่กล่าวถึงได้แก่ การทดสอบลดแรงดันเพื่อวัดปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ค้างอยู่ภายในน้ำโลหะ การตรวจสอบ K-mold เพื่อตรวจสอบสิ่งปลอมปนที่อาจเกิดขึ้นจากในเตาหลอม

Subodh K. Das (2549) , ทำการทดลองเพื่อศึกษาการเกิดออกซิเดชันของอลูมิเนียมหลอมเหลวที่ใช้ในอุตสาหกรรมหล่อขึ้นรูป โดยทำการศึกษาในห้องทดลองร่วมกับการทดสอบในโรงงานจริง พบว่าแมกนีเซียมจะพบในตะกั่วของอลูมิเนียม และเป็นปัจจัยเร่งให้เกิดการก่อตัวของตะกั่วอลูมิเนียม จากเฟสที่ 2 ไปสู่เฟสที่ 3 ซึ่งหากสามารถควบคุมการเกิดออกซิเดชันของแมกนีเซียมได้จะเป็นการลดความสูญเสียในการหลอมลงได้เช่นกัน ทั้งนี้ยังพบว่าอิทธิพลของอุณหภูมิที่สูงมีผลต่อการเกิดของตะกั่ว และการไม่เปิดประตูเตาจะลดการเกิดออกซิเดชันได้

ชัยยา ฉวยฉาย (2552) , แก้ไขปัญหาการฉีกชิ้นงานพลาสติกในงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยศึกษาความสัมพันธ์ของเงื่อนไขการผลิต โดยใช้แผนผังพาเรโต้ พบว่ามี 2 ปัจจัยสำคัญคือ การปรับค่าตัวแปร และความบกพร่องของแม่พิมพ์ จึงออกแบบการทดลอง (DOE) เพื่อตรวจสอบนัยสำคัญของตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กัน พบว่า p-value มากกว่า 0.05 สรุปได้ว่าไม่มีความสัมพันธ์กัน จึงได้กลับมาวิเคราะห์แม่พิมพ์จากการตรวจสอบสภาพของแม่พิมพ์ ความลึกของรอยประสานมีผลทำให้อากาศตกค้างอยู่ในตัวชิ้นงาน ซึ่งให้เกิดของเสีย จึงทำการปรับระยะ เพื่อระบายอากาศภายในแม่พิมพ์ให้ดีขึ้น ผลที่ได้ตามมาคือชิ้นงานเสียลดลงทำให้สามารถควบคุมปริมาณชิ้นงานเสียในการฉีดได้ตามเป้าหมาย

J.Wannasin et al (2550) งานวิจัยนี้เป็นการประเมินและความสะดวกของน้ำโลหะที่ใช้ในการผลิตโดยประเมินสามวิธีได้แก่ทดสอบ K-mold ทดสอบทางกล และวิธี PoDFA โดยผลการวิจัยพบว่า แต่ละวิธีอาจถูกใช้เพื่อวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกันและมีความเหมาะสมสำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน K-mold เป็นวิธีที่รวดเร็วและง่ายที่ให้ข้อมูลการตรวจสอบสิ่งปลอมปนขนาดใหญ่ และเป็นเครื่องมือในการควบคุมคุณภาพที่ดีสำหรับงานได้หล่อ ที่ไม่ต้องการการตรวจสอบคุณสมบัติทางกลโดยละเอียด ส่วน วิธีการแบบ PoDFA เหมาะสำหรับการตรวจสอบประเภทของสิ่งปลอมปนที่อยู่ในน้ำโลหะ

จิระเชษฐ์ บุญแก้ว (2552) , งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนผสมและอุณหภูมิในการหลอมของพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิโพรไพลีนใหม่ กับพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมใหม่ จากการศึกษาพบว่าพอลิโพรไพลีนที่ผ่านการหลอมไม่เกินสามครั้งสามารถนำมาผสมใหม่ได้โดยยังคงสภาพปกติ ค่าดัชนีการหลอมไหลจะเพิ่มขึ้นตามระดับจำนวนครั้งของการหลอมใหม่และสัดส่วนผสม โดยค่าความถ่วงจำเพาะ ความแข็ง และความทนต่อแรงกระแทก ไม่เปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของผสมที่ผ่านการหลอมครั้งที่หนึ่งที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วิธีดำเนินการศึกษา

ทำการศึกษามีจุดประสงค์เพื่อหาผลความสัมพันธ์ที่มีต่อค่าตอบสนองจากการบ่อนอลูมิเนียมที่มีสัดส่วนการผสมของอลูมิเนียมใหม่และอลูมิเนียมหลอมซ้ำหรือเรียกว่าอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการในสัดส่วนแตกต่างกัน โดยประเภทของอลูมิเนียมที่นำมาผสม กำหนดให้ตัวแปรเป็นดังต่อไปนี้

- I คือ อลูมิเนียมใหม่
- R₁ คือ อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก
- R₂ คือ อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน

โดยการศึกษาความสัมพันธ์ดังกล่าวนี้จะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ช่วง คือ การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของอลูมิเนียมใหม่กับอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองด้านคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม เพื่อศึกษาอิทธิพลจากส่วนผสมที่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนองได้แก่

- K คือ ค่าเคโมลต์ มีหน่วยเป็น คะแนน
- Mg คือ องค์กรประกอบธาตุแมกนีเซียม มีหน่วยเป็น %โดยน้ำหนัก
- H₂ คือ แก๊สไฮโดรเจน มีหน่วยเป็น ลบ.ซม.ต่ออลูมิเนียม 100 กรัม

การศึกษาคือความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมของอลูมิเนียมใหม่กับอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการที่มีอิทธิพลต่อผลตอบสนองด้านคุณภาพของชิ้นงานฉีด เพื่อการพยากรณ์ของเสียที่จะเกิดขึ้น จากผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียม มีตัวแปรตอบสนองได้แก่

- %IC คือ ร้อยละของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท มีหน่วยเป็น %
- IC คือ จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท มีหน่วยเป็น จำนวนจุด
- %BH คือ ร้อยละของเสียประเภทโพรงอากาศที่บริเวณเกท มีหน่วยเป็น %
- BH คือ จำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท มีหน่วยเป็น จำนวนจุด

โดยหน่วยจำนวนจุดของตัวแปรตอบสนอง IC และ BH ในการศึกษาครั้งนี้ หมายถึง จำนวนจุดบกพร่องที่ตรวจสอบพบ จากจำนวนชิ้นงานที่ฉีดขึ้นรูป 5,200 ชิ้น

3.2 การเตรียมวัตถุดิบและการเตรียมการขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบ

3.2.1 วัสดุที่ใช้ในการศึกษา

1) อลูมิเนียมใหม่ (I) ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัมต่อก้อน เป็นอลูมิเนียมเกรด ADC12 ที่ผลิตโดยบริษัทผู้ผลิตอลูมิเนียมก้อน โดยองค์ประกอบธาตุที่เป็นส่วนผสมของอลูมิเนียมของที่โรงงานกรณีศึกษาใช้งาน เปรียบเทียบกับมาตรฐานอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น (Japanese Industrial Standards ; JIS) แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ข้อกำหนดองค์ประกอบธาตุของอลูมิเนียมเกรด ADC12

Alloy	มาตรฐาน JIS	โรงงานผู้ผลิต วัตถุดิบ	โรงงาน กรณีศึกษา
Si	9.6-12.0	10.5-12.0	10.5-12.0
Fe	0.9 max	0.9 max	0.9 max
Cu	1.5-3.5	1.8-3.0	1.8-3.0
Mn	0.5 max	0.25 max	0.25 max
Mg	0.3 max	0.3 max	0.3 max
Ni	0.5 max	0.1 max	0.1 max
Zn	1.0 max	0.85 max	0.85 max
Sn	0.3 max	0.1 max	0.1 max

2) อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัมต่อชิ้น เป็นชิ้นงานผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการผลิตของลูกค้าแล้ว ที่ไม่ได้ตามเกณฑ์คุณภาพของลูกค้าและส่งกลับมาล้างทำความสะอาดนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต

3) อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ซึ่งมีดังนี้

- ชิ้นงานเสียในกระบวนการ ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัมต่อชิ้น เป็นงานผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้ตามเกณฑ์คุณภาพ นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต
- ชิ้นงานทดสอบช่วงเริ่มต้นการผลิต ที่มีน้ำหนัก 2.5 กิโลกรัมต่อชิ้น เป็นชิ้นงานผลิตภัณฑ์ที่ฉีดช่วงเริ่มการผลิตในระหว่างที่อุณหภูมิแม่พิมพ์ยังไม่คงที่ นำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต
- ชิ้นส่วนบริเวณรูล้นที่ถูกตัดออก ที่มีน้ำหนัก 1 กิโลกรัมต่อชิ้น เป็นชิ้นส่วนบริเวณที่ดักอากาศที่จะเข้าไปในผลิตภัณฑ์และถูกตัดออกในกระบวนการตัดเศษชิ้นงาน ซึ่งนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิต

3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

- 1) เตาหลอมอลูมิเนียมขนาดความจุ 250 กิโลกรัม
- 2) เครื่องฉีดหล่ออลูมิเนียมความดันสูงขนาดแรงบิดแม่พิมพ์ 1800 นิวตัน
- 3) แม่พิมพ์ขึ้นรูปชิ้นงาน
- 4) เครื่องตัดเศษชิ้นงาน

3.3 วิธีการทดลอง

3.3.1 การเตรียมสัดส่วนผสมน้ำอลูมิเนียม

ป้อนวัตถุดิบอลูมิเนียมลงในเตาหลอมอลูมิเนียมขนาดความจุ 250 กิโลกรัมตามส่วนผสมวัตถุดิบที่ได้ออกแบบการทดลองในสัดส่วนต่อร้อยละของอลูมิเนียมใหม่ (per hundred aluminum ingot ; phi) ได้แก่อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) ตั้งแต่ 0, 100, 200 phi และ อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ตั้งแต่ 100, 150, 200 PHI ดังแสดงในตาราง 3.1 โดยผู้ปฏิบัติงานในสายการผลิต จะป้อนวัตถุดิบอลูมิเนียมแต่ละประเภท ตามจำนวนและความถี่ตามที่กำหนด ต่อเนื่องเป็นช่วงเวลาการผลิตใน 1 วันหรือเท่ากับ 2 กะการทำงาน โดยเงื่อนไขการผสมดังกล่าวกำหนดจากเงื่อนไขในกระบวนการของโรงงานกรณีศึกษา ดังนี้

- ทุกเงื่อนไขการผสมจะต้องมีอลูมิเนียมใหม่ผสมอยู่ โดยสัดส่วนที่น้อยที่สุดคือ 20% ของน้ำอลูมิเนียมในเตาพักน้ำอลูมิเนียม
- ในกระบวนการที่ทำการศึกษา นั้นจะใช้หุ่นยนต์แขนกลในการหยิบชิ้นงานส่วนรูลันที่ตัดออกในทุกรอบการฉีด และชิ้นงานทดสอบช่วงเริ่มต้นการผลิตใส่ยังเตาหลอมโดยตรง ซึ่งทั้ง 2 ประเภทดังกล่าวอยู่ในตัวแปรประเภทอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) จึงส่งผลให้มีสัดส่วนขั้นต่ำของอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เป็น 50% ของน้ำอลูมิเนียมในเตาพักน้ำอลูมิเนียม

จากเงื่อนไขในกระบวนการดังกล่าวจึงทำให้สัดส่วนผสมของขั้นต่ำของ R_2 เป็น 100, 150 และ 200 phi ตามลำดับ และสัดส่วนที่มี 1 น้อยที่สุดตามเงื่อนไขคือ 20% โดยที่ R_1 และ R_2 มีสัดส่วนที่เท่ากันเป็นเงื่อนไขขอบเขตสุดท้าย จึงมี $R_1 = 200$ และ $R_2 = 200$ สัดส่วนการผสมในหน่วย phi ที่แสดงในตารางที่ 3.2 นั้น เมื่อแปลงเป็นสัดส่วนร้อยละจากปริมาณน้ำอลูมิเนียมในบ่อของเตาพักน้ำอลูมิเนียมโดยใช้สมการ

$$\begin{aligned} \text{ร้อยละของอลูมิเนียมใหม่ (I)} &= I / (I + R_1 + R_2) \\ \text{ร้อยละของอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R}_1\text{)} &= R_1 / (I + R_1 + R_2) \\ \text{ร้อยละของอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R}_2\text{)} &= R_2 / (I + R_1 + R_2) \end{aligned}$$

ตารางที่ 3.2 สัดส่วนผสมวัตถุดิบอลูมิเนียมในสัดส่วนต่อร้อยละอลูมิเนียมใหม่ (phi)

ลำดับที่ เงื่อนไข	อลูมิเนียมใหม่ (I) (phi)	อลูมิเนียมที่ผ่าน กระบวนการภายนอก (R_1) (phi)	อลูมิเนียมที่ผ่าน กระบวนการภายใน (R_2) (phi)
1	100	0	100
2	100	0	150
3	100	0	200
4	100	100	100
5	100	100	150
6	100	100	200
7	100	200	100
8	100	200	150
9	100	200	200

ตารางที่ 3.3 สัดส่วนผสมวัตถุดิบอลูมิเนียมเป็นร้อยละจากอลูมิเนียมในเตาพักน้ำอลูมิเนียม

ลำดับที่เงื่อนไข การผสม	ร้อยละของอลูมิเนียมจากเงื่อนไขการผสม		
	I (%)	R_1 (%)	R_2 (%)
1	50.0%	0.0%	50.0%
2	40.0%	0.0%	60.0%
3	33.3%	0.0%	66.7%
4	33.3%	33.3%	33.3%
5	28.6%	28.6%	42.9%
6	25.0%	25.0%	50.0%
7	25.0%	50.0%	25.0%
8	22.2%	44.4%	33.3%
9	20.0%	40.0%	40.0%

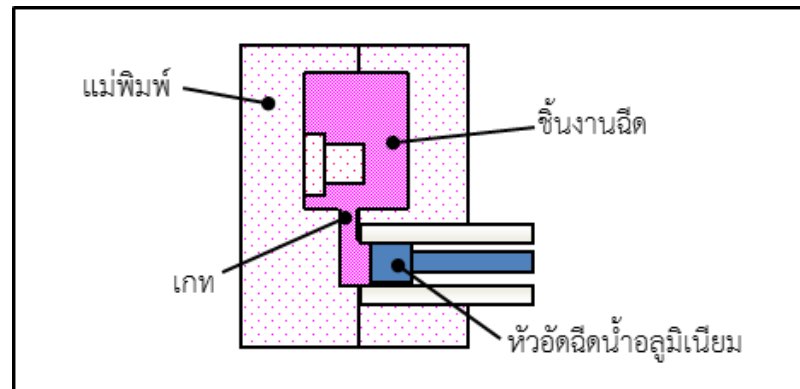
3.3.2 การขึ้นรูปชิ้นงานฉีดและการเก็บชิ้นงานทดสอบคุณภาพ

หลอมอลูมิเนียมในเตาหลอมที่อุณหภูมิเตา 700 องศาเซลเซียสและควบคุมอุณหภูมิของน้ำ อลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 680 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างชิ้นงานสำหรับทดสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียมจาก บริเวณบ่อเก็บน้ำโลหะอลูมิเนียมจำนวน 4 ครั้งต่อวันตามช่วงเวลา โดยโรงงานกรณีศึกษามีการทำงานเป็นลักษณะ 2 กะการทำงาน ซึ่งได้ทำการกำหนดช่วงในการเก็บตัวอย่างชิ้นงานสำหรับ ทดสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียมดังนี้

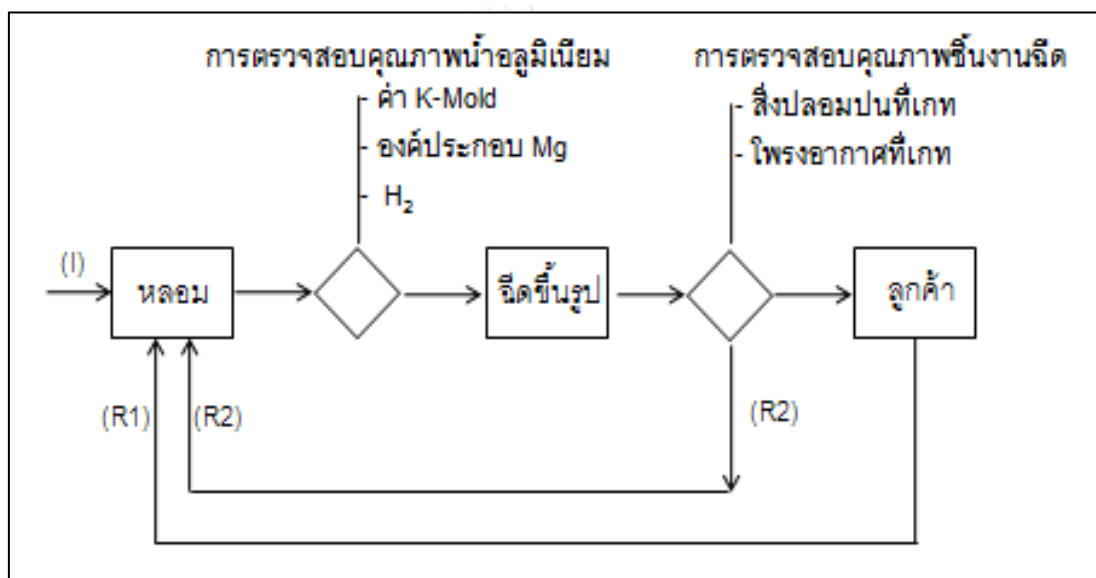
- 1) ก่อนเริ่มการผลิตกะกลางวัน
- 2) หลังพักกลางวันของกะกลางวัน
- 3) ก่อนเริ่มการผลิตกะกลางคืน
- 4) หลังพักกลางวันของกะกลางคืน

การขึ้นรูปชิ้นงานจะขึ้นรูปด้วยการฉีดหล่ออลูมิเนียมเข้าสู่ภายในแม่พิมพ์ผ่านเกตขึ้นงานซึ่ง ถูกออกแบบให้สามารถคัดกรองหรือเศษดักสิ่งปลอมปนที่จะเข้าสู่ชิ้นงานฉีดได้ ดังรูปที่ 3.1 ตำแหน่ง ของเกตขึ้นงาน โดยเครื่องฉีดหล่ออลูมิเนียมยี่ห้อ Toyo จากนั้นทำการตัดเศษชิ้นส่วนบริเวณรู้นอก โดยเครื่องตัดเศษและนำชิ้นงานไปยังทรายเพื่อขจัดครีบทที่เป็นอันตรายต่อการสัมผัสของผู้ปฏิบัติงาน หรืออาจส่งผลกระทบต่อกระบวนการต่อไปของลูกค้า จากนั้นผู้ปฏิบัติงานในสายการผลิตทำการ ตรวจสอบชิ้นงานบริเวณเกตตามมาตรฐานเกณฑ์การตรวจสอบคุณภาพผิวชิ้นงานภายนอกทุกชิ้นที่ ผลิต ดังรูปที่ 3.1 โดยในการศึกษาจะทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานเพื่อทดสอบคุณภาพชิ้นงานฉีดเป็น จำนวน 5,200 ชิ้นต่อหนึ่งเงื่อนไขการผสมอลูมิเนียม ซึ่งใช้เวลาในการศึกษาต่อหนึ่งเงื่อนไขเท่ากับ 10 กะการทำงาน

โดยในช่วงการเปลี่ยนเงื่อนไขการผสมใหม่ ซึ่งต้องมีการปรับเปลี่ยนส่วนผสมของน้ำ อลูมิเนียม ทางผู้วิจัยได้ให้ผู้ปฏิบัติงานทำการฉีดขึ้นรูปชิ้นงานโดยเปลี่ยนสัดส่วนการเติมอลูมิเนียมเป็น เงื่อนไขการผสมใหม่ที่จะทำการศึกษา โดยที่ยกเว้นการเก็บตัวอย่างชิ้นงานทดสอบคุณภาพน้ำ อลูมิเนียม และตัวอย่างชิ้นงานทดสอบคุณภาพชิ้นงานฉีด เป็นช่วงเวลาอย่างน้อย 2 กะการทำงาน หรือเท่ากับชิ้นงานจำนวน 1,040 ชิ้น เพื่อเป็นการปรับให้ส่วนผสมของน้ำอลูมิเนียมมีความเสถียรก่อน ทำการศึกษาตัวอย่างจากเงื่อนไขการผสมดังกล่าว



รูปที่ 3.1 การขึ้นรูปชิ้นงานฉีดและการเก็บชิ้นงานทดสอบคุณภาพ



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการขึ้นรูปชิ้นงานฉีดและการเก็บชิ้นงานทดสอบคุณภาพ

3.4 การทดสอบคุณภาพ

3.4.1 การทดสอบคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมวัตถุดิบ

3.4.1.1 การตรวจสอบค่าเคโมลด์ (K-mold)

การตรวจสอบเคโมลด์นั้นจะทำเพื่อประเมินปริมาณสิ่งปลอมปนในน้ำอลูมิเนียม โดยมีเกณฑ์การตรวจสอบคือหากพบสิ่งแปลกปลอมจำนวน 1 จุด จะคิดเป็น 0.1 คะแนน โดยพิจารณาจากหน้าตัดทั้ง 2 ฝั่งของชิ้นงานตัวอย่าง โดยขนาดของพื้นที่หน้าตัดรวมคือ 45 ตารางเซนติเมตร ซึ่งค่ามาตรฐานที่โรงงานกรณีศึกษาควบคุมคือ ค่าเคโมลด์ที่ควบคุมในการผลิตจะต้องน้อยกว่า 2.0 คะแนน หรือเทียบเท่ากับจำนวนจุดสิ่งปลอมปน 20 จุดต่อหน้าตัดรวม 45 ตารางเซนติเมตร

ขั้นตอนการตรวจสอบค่าเคโมลต์ มีดังนี้

- 1) ใช้กระบวยตักน้ำลูมิเนียมที่บริเวณปากบ่อเก็บน้ำลูมิเนียมของเตาหลอมลูมิเนียม โดยให้ตกลงไปที่ความลึกประมาณ 100 มิลลิเมตร จากผิวบนของระดับน้ำลูมิเนียม
- 2) เทน้ำลูมิเนียมที่ตักมาลงในแม่พิมพ์เคโมลต์ โดยแม่พิมพ์เคโมลต์ ด้านที่เทนั้นต้องยกขึ้นทำมุม 15 องศาจากแนวระดับเพื่อให้ น้ำลูมิเนียมไหลเข้าไปเต็มเบ้าหล่อ
- 3) รอให้น้ำลูมิเนียมเย็นตัว 2 นาที
- 4) นำตัวอย่างน้ำลูมิเนียมที่ได้มาหักตามรอยบากของชิ้นงานจะได้ชิ้นงานตัวอย่าง 6 ชิ้นแล้วนำมาวัดรวมกัน
- 5) นำชิ้นงานตัวอย่างไปตรวจสอบด้วยเลนส์ขยายที่กำลังขยาย 10 เท่า
- 6) บันทึกค่าการตรวจสอบเคโมลต์



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์สำหรับทำชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างชิ้นงานตรวจสอบเคโมลต์ (K)



รูปที่ 3.5 กล้องเลนส์ขยายที่กำลังขยาย 10 เท่า

3.4.1.2 การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม (Mg)

การตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในอลูมิเนียม ด้วยเครื่อง Spectrometer จะได้ผลเป็นเปอร์เซ็นต์ของธาตุประกอบที่อยู่ในน้ำอลูมิเนียมตัวอย่าง ซึ่งประกอบด้วยอลูมิเนียม(Al) ซิลิคอน (Si) ทองแดง (Cu) แมกนีเซียม (Mg) สังกะสี (Zn) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) นิกเกิล (Ni) และดีบุก (Sn) แต่เนื่องจากการศึกษานี้สนใจองค์ประกอบในการเกิดสิ่งปลอมปนอันเนื่องมาจากออกไซด์ของอลูมิเนียม ซึ่งคือ $MgAl_2O_4$ ตามที่ได้ทำการตรวจสอบวิเคราะห์ในตอนต้นแล้วนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกทำการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม (Mg) ซึ่งเป็นธาตุตั้งต้นที่ก่อให้เกิดสิ่งปลอมปนที่เกี่ยวข้องกับประเภทของเสียที่กำลังทำการทำการศึกษาในครั้งนี้

ขั้นตอนการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุในอลูมิเนียมมีดังนี้

- 1) ใช้กระบวยตักน้ำอลูมิเนียมที่บริเวณปากบ่อเก็บน้ำอลูมิเนียมของเตาหลอมอลูมิเนียม โดยให้ตกลงไปที่ความลึกประมาณ 100 มิลลิเมตร
- 2) เหน้ำอลูมิเนียมที่ตัดมาลงในแม่พิมพ์ชิ้นงานทดสอบ
- 3) รอให้อลูมิเนียมเย็นตัว 2 นาที
- 4) นำตัวอย่างอลูมิเนียมที่ได้มากลึงผิวฐานด้านล่าง ให้เป็นผิวเรียบ เพื่อให้เป็นชิ้นงานตัวอย่างสำหรับการทดสอบ
- 5) นำชิ้นงานตัวอย่างไปทำการตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Spectrometer
- 6) ตรวจสอบผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุในคอมพิวเตอร์
- 7) บันทึกค่าการตรวจสอบองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม ในน้ำอลูมิเนียมตัวอย่าง



รูปที่ 3.6 แม่พิมพ์สำหรับขึ้นรูปชิ้นงานทดสอบเคโมลด์



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างชิ้นงานตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุแมกนีเซียม (Mg)



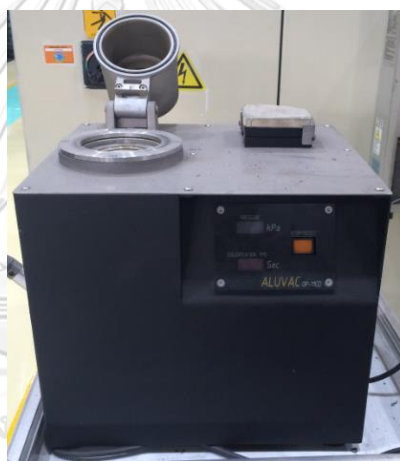
รูปที่ 3.8 เครื่อง Spectrometer

3.4.1.3 การตรวจสอบปริมาณ H_2

การตรวจสอบแก๊สไฮโดรเจนนั้นทำเพื่อตรวจสอบปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่อยู่ภายในน้ำอลูมิเนียม ซึ่งแก๊สไฮโดรเจนที่เจือปนอยู่นี้อาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของชิ้นงาน เกิดเป็นของเสียประเภทโพรงในชิ้นงานได้โดยการตรวจสอบแก๊สไฮโดรเจนจะนิยมทำโดยการทำสุญญากาศบริเวณบรรยากาศของชิ้นงาน ซึ่งจะทำให้โพรงอากาศที่เป็นแก๊สไฮโดรเจนภายในน้ำอลูมิเนียมขยายตัวขึ้น แล้วจะนำมาตัดเพื่อดูโพรงอากาศที่ตกค้างอยู่ภายในชิ้นงาน

ขั้นตอนการตรวจสอบปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มีดังนี้

- 1) ตักน้ำอะลูมิเนียมด้วยกระบวย จากบริเวณปากบ่อเก็บน้ำอะลูมิเนียมของเตาหลอมอะลูมิเนียม โดยตักลงไปที่มีความลึกประมาณ 100 มิลลิเมตร
- 2) เทน้ำอะลูมิเนียมที่ตักมาลงในถ้วยสำหรับเตรียมเข้าเครื่องทำสุญญากาศ
- 3) นำถ้วยใส่อะลูมิเนียมทดสอบเข้าไปในเครื่องทำสุญญากาศยี่ห้อ Aluvac ปิดฝาครอบแล้วเครื่องจะเริ่มทำสุญญากาศภายในเครื่อง โดยใช้เวลา 5 นาทีเครื่องจะมีสัญญาณดัง
- 4) นำถ้วยใส่ชิ้นงานออกจากเครื่อง แล้วนำชิ้นงานตัวอย่างออกจากถ้วยใส่ชิ้นงาน
- 5) นำชิ้นงานไปตัดผ่าครึ่ง เพื่อตรวจสอบชิ้นงานตัวอย่าง
- 6) ตรวจสอบปริมาณโพรงอากาศภายในชิ้นงาน เปรียบเทียบกับตัวอย่างกำหนดระดับแก๊สไฮโดรเจน ว่าชิ้นงานตัวอย่างอยู่ในระดับปริมาณแก๊สเท่าใด
- 7) บันทึกผลการตรวจสอบ



รูปที่ 3.9 เครื่องทำสุญญากาศยี่ห้อ Aluvac



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างชิ้นงานตรวจสอบแก๊สไฮโดรเจน (H₂)

3.4.2 การทดสอบคุณภาพของชิ้นงานฉีด

การตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานฉีด จะตรวจสอบผิวภายนอกของชิ้นงานโดยพนักงานฝ่ายผลิต ซึ่งงานวิจัยนี้ ทำการศึกษาของเสียที่เกิดเป็นสิ่งปลอมปนที่เกิดขึ้นบริเวณเกตของชิ้นงาน ซึ่งของเสียประเภทดังกล่าวที่โรงงานกรณีศึกษาได้แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะย่อยคือ

1. สิ่งปลอมปนที่เกต (Gate Inclusion ; IC) คือ สิ่งปลอมปนที่เป็นตะกัณอลูมิเนียม ซึ่งเจือปนในน้ำอลูมิเนียม แล้วถูกฉีดเข้ามาติดอยู่ที่บริเวณเกตชิ้นงาน
2. โพรงอากาศที่เกต (Gate Blow hole ; BH) คือ สิ่งปลอมปนที่เป็นแก๊ส ซึ่งเจือปนอยู่ในน้ำอลูมิเนียม แล้วถูกฉีดเข้ามาและเกิดการระเหยเกิดเป็นโพรงอากาศที่บริเวณเกตชิ้นงาน

โดยพนักงานจะตรวจสอบชิ้นงานเปรียบเทียบกับอ้างอิงกับมาตรฐานการตรวจสอบภายนอกของชิ้นงาน ซึ่งประเภทของเสียที่ทำการตรวจสอบสำหรับการศึกษานี้ จะมี 2 ประเภทดังที่ได้กล่าวข้างต้น แล้วนั้น โดยเกณฑ์มาตรฐานที่โรงงานกรณีศึกษาควบคุมอยู่นั้น จะต้องไม่พบสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกต และต้องไม่พบโพรงอากาศที่บริเวณเกต หากเกิดข้อบกพร่องดังกล่าวจะนับเป็นชิ้นงานเสีย

ขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของชิ้นงานฉีดมีดังนี้

- 1) พนักงานหยิบชิ้นงานมาตรวจสอบที่บริเวณเกตของชิ้นงาน
- 2) หากพนักงานพบชิ้นงานเสียดังกล่าว จะบันทึกจำนวนชิ้นงานเสีย
- 3) เมื่อพนักงานตรวจสอบพบว่าเป็นงานเสีย จะนับจำนวนจุดที่พบสิ่งปลอมปน และโพรงอากาศที่บริเวณเกตของชิ้นงาน และบันทึกจำนวนจุดที่พบของเสียแต่ละประเภทดังกล่าว



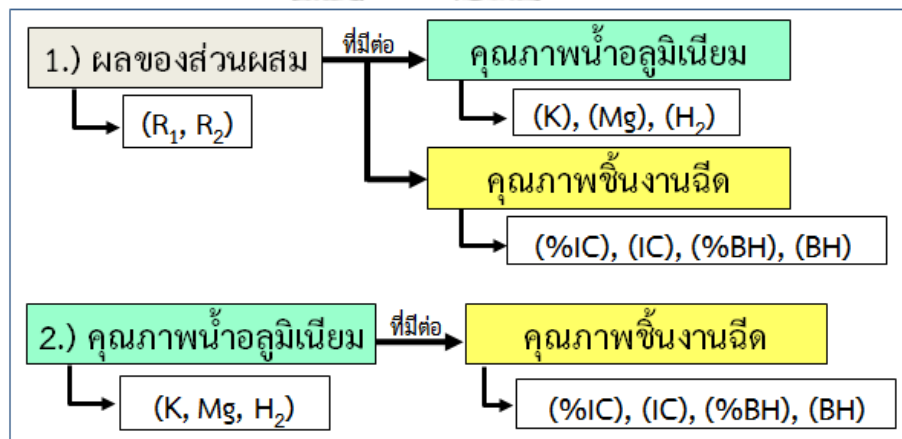
รูปที่ 3.11 ตัวอย่างของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกตชิ้นงาน



รูปที่ 3.12 ตัวอย่างของเสียประเภทโพรงอากาศที่บริเวณเกตชิ้นงาน

3.5 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ

การวิเคราะห์ผลการทดลองเชิงสถิติ จะวิเคราะห์จากผลการทดสอบคุณภาพของน้ำ อลูมิเนียม และผลจากคุณภาพชิ้นงานฉีด โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติสำเร็จรูป MINITAB และใช้ระดับนัยสำคัญทางสถิติเท่ากับ 0.05 ในการทดสอบ โดยในการศึกษานี้ลำดับแรกจะใช้ การวิเคราะห์แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (General Linear Model) ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่าง ตัวแปรควบคุมกับตัวแปรอิสระ ปัจจัยหลัก (Main effect) และอันตรปฏิกิริยา (Interaction) ลำดับ ต่อมาจะใช้ แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression Model) ในการสร้างสมการการ ถดถอยเชิงเส้น เพื่อพยากรณ์ค่าจากตัวแปร โดยจะหาความสัมพันธ์ และสมการพยากรณ์เป็น 2 ช่วง ดังแสดงในรูปที่ 3.13 และกล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 3.1



รูปที่ 3.13 ตัวแปรควบคุมและตัวแปรตามที่ทำกรวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติ

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลองและการอภิปราย

4.1 ผลการทดลองของส่วนผสมที่ใช้ในการศึกษา

จากการนำแท่งอลูมิเนียมใหม่ (I) มาผสมกับอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ในสัดส่วนต่อร้อยละของแท่งอลูมิเนียม (ϕ) โดยสัดส่วนดังกล่าวได้แก่ อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เป็น 0, 100, 200 ϕ และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เป็น 100, 150, 200 ϕ ซึ่งตัวแปรตอบสนองของการทดสอบแบ่งเป็น 2 ประเภทคือ คุณภาพน้ำอลูมิเนียม ประกอบด้วย เคโมลด์ (K) องค์กรประกอบธาตุแมกนีเซียม(Mg) แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และคุณภาพชิ้นงานฉีดยา ประกอบด้วย เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) จำนวนจุดของสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%BH) จำนวนจุดของสิ่งปลอมปนที่เกท (BH) เมื่อผสมอลูมิเนียมตามเงื่อนไขการผสมทั้ง 9 รูปแบบการผสมดังที่กล่าวข้างต้น และทำการศึกษาดทดลอง โดยแต่ละเงื่อนไขการผสมทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.1



ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองในสัดส่วนต่อร้อยละของแท่งอลูมิเนียม

สัดส่วนผสม R ₁ (phi)	สัดส่วนผสม R ₂ (phi)	การ ทดลอง	ผลคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม			ผลคุณภาพของชิ้นงานฉีด			
			K (คะแนน)	Mg (% โดย นน.)	H ₂ (cm ³ /100g Al)	%IC (%)	IC (จำนวนจุด)	%BH (%)	BH (จำนวนจุด)
0	100	1	0.45	0.163	0.10	0.53	29	0.06	3
		2	0.44	0.156	0.12	0.63	35	0.12	6
		3	0.46	0.161	0.12	0.61	32	0.04	2
		$\bar{X} \pm SD$	0.45±0.01	0.16±0	0.11±0.01	0.59±0.05	32±3	0.07±0.04	4±2
	150	1	0.47	0.177	0.16	0.77	42	0.02	1
		2	0.46	0.167	0.14	0.75	43	0.02	1
		3	0.49	0.175	0.16	0.69	39	0.10	6
		$\bar{X} \pm SD$	0.47±0.02	0.17±0.01	0.15±0.01	0.74±0.04	41±2	0.04±0.04	3±3
	200	1	0.50	0.165	0.14	0.84	44	0.04	2
		2	0.49	0.156	0.16	0.95	50	0.06	4
		3	0.48	0.158	0.13	0.88	47	0.02	1
		$\bar{X} \pm SD$	0.49±0.01	0.16±0	0.14±0.02	0.89±0.06	47±3	0.04±0.02	2±2
100	100	1	0.53	0.198	0.26	0.96	53	0.15	9
		2	0.52	0.174	0.23	0.94	53	0.10	6
		3	0.54	0.181	0.24	0.87	47	0.19	10
		$\bar{X} \pm SD$	0.53±0.01	0.18±0.01	0.24±0.02	0.92±0.05	51±3	0.15±0.05	8±2
	150	1	0.54	0.175	0.26	1.19	65	0.13	8
		2	0.53	0.159	0.24	1.09	58	0.04	2
		3	0.55	0.165	0.28	1.07	59	0.10	7
		$\bar{X} \pm SD$	0.54±0.01	0.17±0.01	0.26±0.02	1.12±0.06	61±4	0.09±0.05	6±3
	200	1	0.57	0.181	0.24	1.31	75	0.08	4
		2	0.54	0.162	0.26	1.25	70	0.10	6
		3	0.56	0.155	0.28	1.21	64	0.08	5
		$\bar{X} \pm SD$	0.56±0.02	0.17±0.01	0.26±0.02	1.26±0.05	70±6	0.08±0.01	5±1
200	100	1	0.59	0.158	0.34	1.35	70	0.25	17
		2	0.57	0.156	0.30	1.37	73	0.31	19
		3	0.59	0.172	0.32	1.46	80	0.33	19
		$\bar{X} \pm SD$	0.58±0.01	0.16±0.01	0.32±0.02	1.39±0.06	74±5	0.29±0.04	18±1
	150	1	0.63	0.172	0.32	1.54	80	0.19	13
		2	0.58	0.159	0.30	1.50	78	0.17	11
		3	0.56	0.169	0.30	1.61	81	0.23	13
		$\bar{X} \pm SD$	0.59±0.04	0.17±0.01	0.31±0.01	1.55±0.06	80±2	0.2±0.03	12±1
	200	1	0.64	0.184	0.28	1.98	92	0.17	9
		2	0.60	0.166	0.36	1.75	89	0.17	12
		3	0.60	0.161	0.32	1.71	90	0.19	11
		$\bar{X} \pm SD$	0.61±0.02	0.17±0.01	0.32±0.04	1.81±0.15	90±2	0.18±0.01	11±2

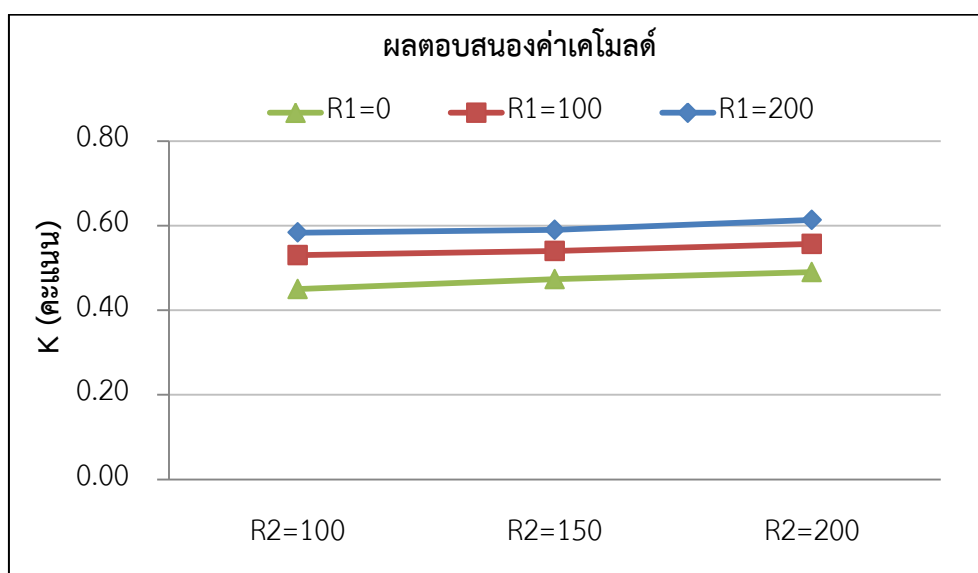
หมายเหตุ : phi (per hundred ingot) หมายถึง สัดส่วนต่อหนึ่งร้อยละของแท่งอลูมิเนียมใหม่

4.2 ผลของสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม

ทำศึกษาความสัมพันธ์ของผลจากสัดส่วนผสมอลูมิเนียม ได้แก่ อลูมิเนียมใหม่ (I) อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีต่อคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม ได้แก่ เคโมลต์ (K) องค์ประกอบแมกนีเซียม (Mg) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เพื่อศึกษาส่วนผสมที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณของน้ำอลูมิเนียม

4.2.1 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อค่าเคโมลต์ (K)

เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ค่าเคโมลต์ (K) เพิ่มสูงขึ้นด้วยเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.1



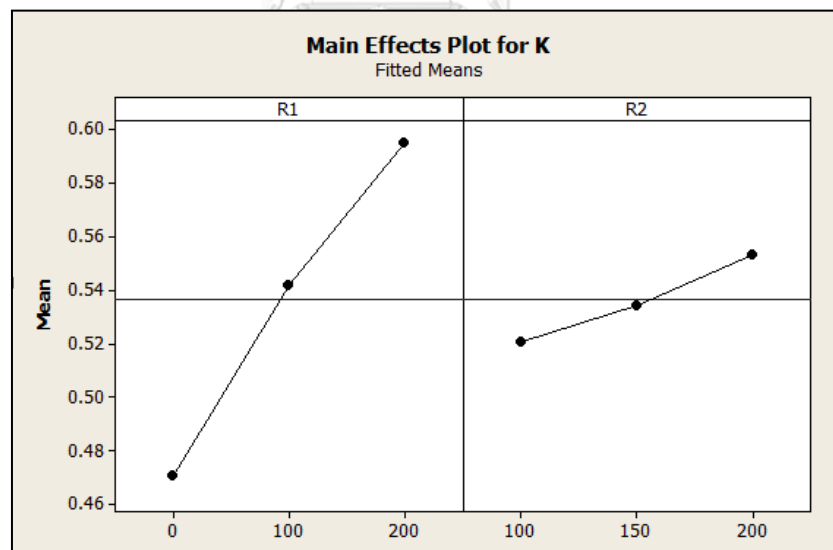
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าเคโมลต์ (K)

พิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีอิทธิพลต่อค่าเคโมลต์ (K) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) โดย P-value มีค่า <0.0005 และ 0.004 ตามลำดับ โดยค่าเคโมลต์ (K) จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.3 โดยอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีอิทธิพลมากกว่าอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณ

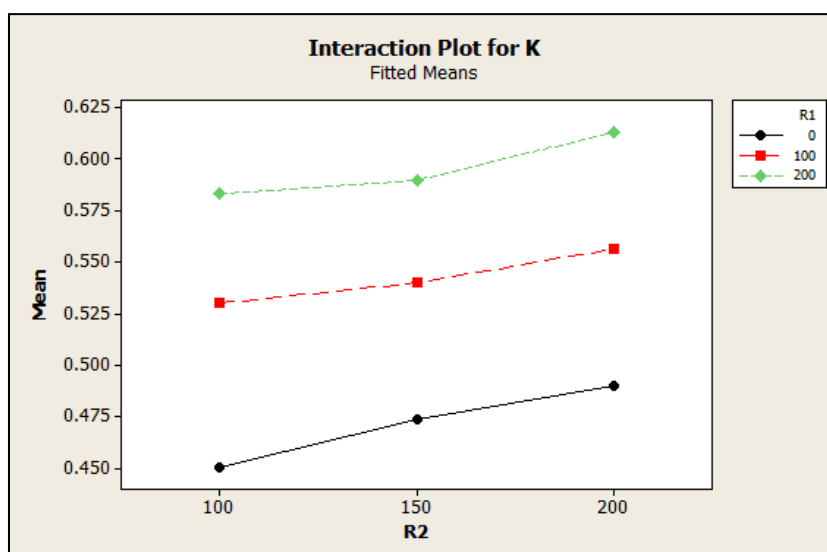
อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าเคโมลด์ (K) โดยที่ค่า P-value เท่ากับ 0.922 รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 92.99% และ R^2 (adj) เท่ากับ 89.87%

General Linear Model: K versus R1, R2						
Factor	Type	Levels	Values			
R1	fixed	3	0, 100, 200			
R2	fixed	3	100, 150, 200			
Analysis of Variance for K, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
R1	2	0.0701630	0.0701630	0.0350815	111.44	0.000
R2	2	0.0047185	0.0047185	0.0023593	7.49	0.004
R1*R2	4	0.0002815	0.0002815	0.0000704	0.22	0.922
Error	18	0.0056667	0.0056667	0.0003148		
Total	26	0.0808296				
S = 0.0177430 R-Sq = 92.99% R-Sq(adj) = 89.87%						

รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของค่าเคโมลด์ (K) โดยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.3 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าเคโมลด์ (K)



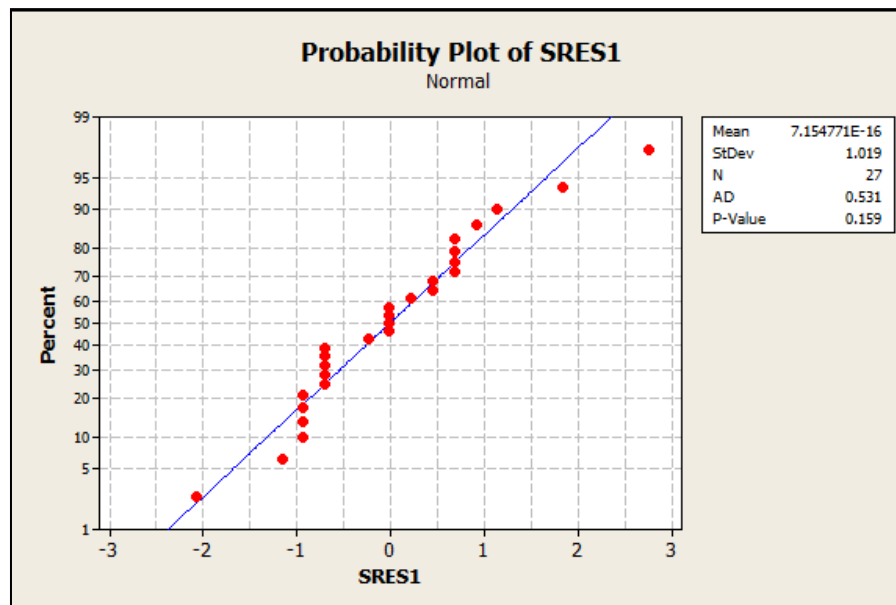
รูปที่ 4.4 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าเคโมลด์ (K)

จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐานยืนยันคุณสมบัติ 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2. ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์

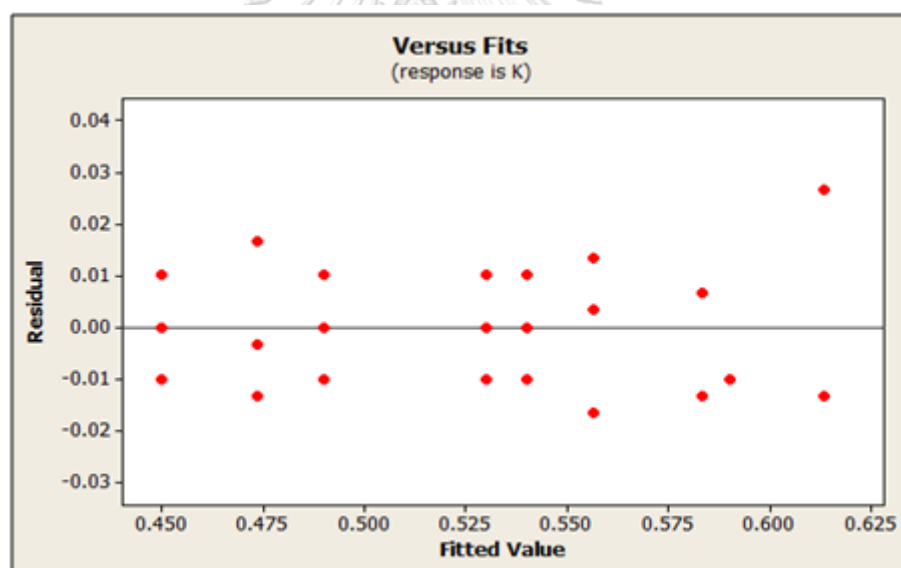
1.ทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ โดยค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD) พบว่า ลักษณะการเรียงตัว เป็นแบบกระจายโดยรอบๆเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.5 และค่า P-value เท่ากับ 0.159 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถยอมรับได้ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติ

2.ทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus fits พบว่ามีการกระจายตัวของค่าตกค้างเป็นค่าบวกและค่าลบด้วยจำนวนเท่าๆกัน ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งค่าตกค้างมีความแปรปรวนที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

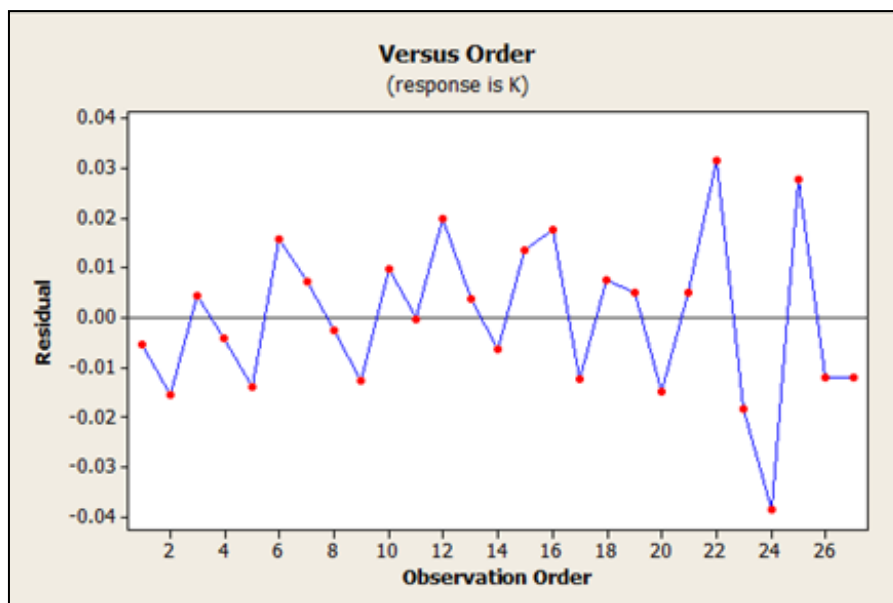
3.ทดสอบสมมติฐานความอิสระของข้อมูล เมื่อพิจารณากราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus Order การทดลองพบว่า เป็นรูปแบบอิสระต่อกันที่ไม่มีความเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและค่าเคโมลด์ (K)



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง

หลังจากพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และยืนยันว่า 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2.ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน ถัดจากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อค่าเคโมลต์ (K) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.2 เนื่องจากค่า R^2 เท่ากับ 92.10% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.2 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าเคโมลต์ (K) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
ค่าเคโมลต์ (K)	$K = 0.418 + 0.00697 R_1 + 0.000372 R_2 - 0.000001 R_1 * R_2$	92.10

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อค่าเคโมลต์ (K) ไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้นค่าเคโมลต์ (K) จะสูงขึ้นด้วย เป็นเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อค่าเคโมลต์ (K) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีผลต่อค่าเคโมลต์ (K) โดยที่ ค่า

P-value มีค่า <0.0005 และ 0.006 ตามลำดับ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าเคโมลต์ (K) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 92.1% และ R^2 (adj) เท่ากับ 91.1% แสดงดังรูปที่ 4.8

Regression Analysis: K versus R1, R2, R1*R2				
The regression equation is				
$K = 0.418 + 0.000697 R1 + 0.000372 R2 - 0.000001 R1*R2$				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.41824	0.01932	21.65	0.000
R1	0.0006972	0.0001496	4.66	0.000
R2	0.0003722	0.0001243	3.00	0.006
R1*R2	-0.00000050	0.00000096	-0.52	0.608
S = 0.0166727 R-Sq = 92.1% R-Sq(adj) = 91.1%				

รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าเคโมลต์ (K) โดยโปรแกรม Minitab

และพิจารณาโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุมที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ออก สามารถสรุปปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อค่าเคโมลต์ (K) ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าเคโมลต์ (K) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
ค่าเคโมลต์ (K)	$K = 0.4257 + 0.00062 R_1 + 0.00032 R_2$	92.00

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อค่าเคโมลต์ (K) ไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้นค่าเคโมลต์ (K) จะสูงขึ้นด้วย เป็นเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาผลหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าเคโมลต์ (K) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีผลต่อค่าเคโมลต์ (K) โดยที่ ค่า P-value ทั้ง 2 ตัว

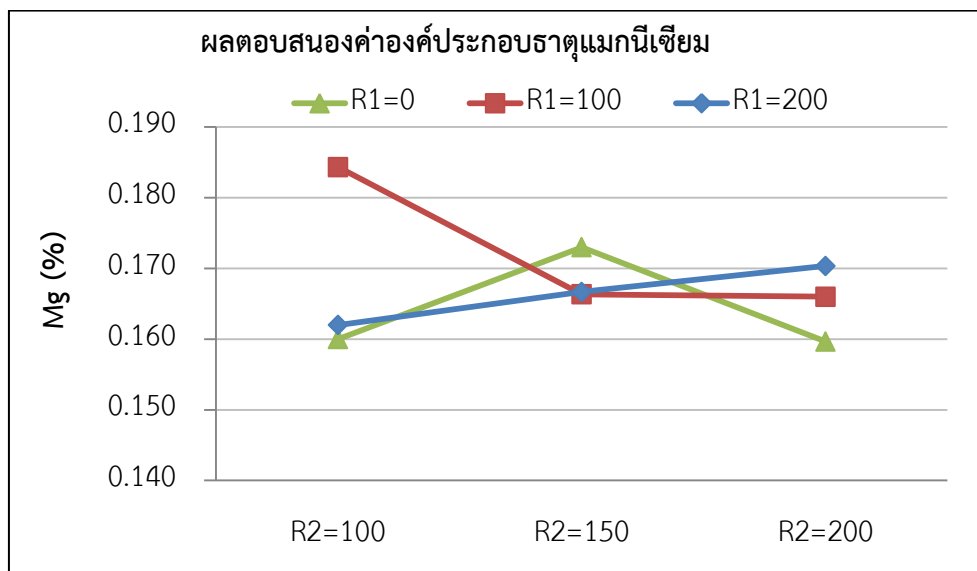
แปรมีค่า <0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าเคโมลต์ (K) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 92.00% และ R^2 (adj) เท่ากับ 91.33% ดังรูปที่ 4.9

Stepwise Regression: K versus R1, R2, R1*R2		
Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05		
Response is K on 3 predictors, with N = 27		
Step	1	2
Constant	0.4182	0.4257
R1	0.00070	0.00062
T-Value	4.66	16.08
P-Value	0.000	0.000
R2	0.00037	0.00032
T-Value	3.00	4.16
P-Value	0.006	0.000
R1*R2	-0.00000	
T-Value	-0.52	
P-Value	0.608	
S	0.0167	0.0164
R-Sq	92.09	92.00
R-Sq(adj)	91.06	91.33
Mallows Cp	4.0	2.3

รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของค่าเคโมลต์ (K) โดยโปรแกรม Minitab

4.2.2 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)

ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)

พิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีต่อองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ได้ดังรูป 4.11 คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มี P-value เท่ากับ 0.178 และ 0.660 ตามลำดับ ซึ่งไม่มีผลหลักโดยมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังรูปที่ 4.12 แต่มีความสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างปัจจัยทั้งสอง จึงส่งผลให้อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีอิทธิพลต่อองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดยที่ค่า P-value เท่ากับ 0.037 รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 49.30% และ R^2 (adj) เท่ากับ 26.77%

General Linear Model: Mg versus R1, R2

Factor	Type	Levels	Values
R1	fixed	3	0, 100, 200
R2	fixed	3	100, 150, 200

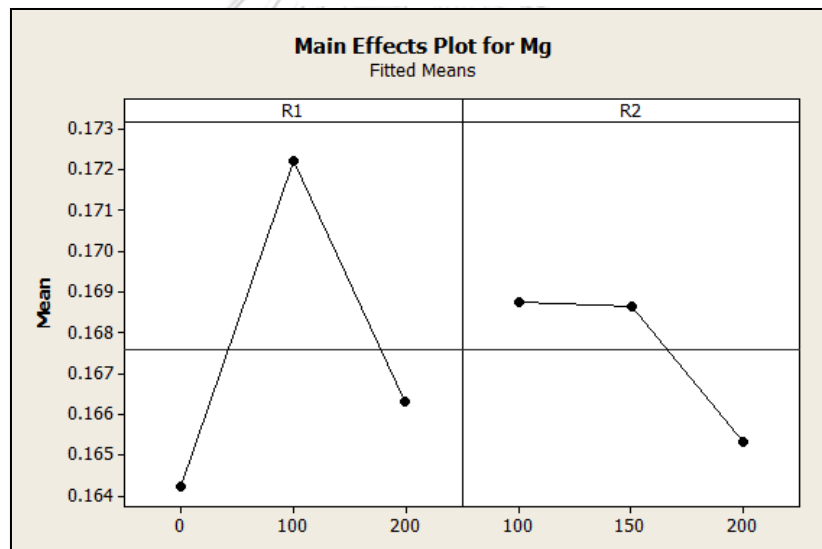
Analysis of Variance for Mg, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
R1	2	0.0003094	0.0003094	0.0001547	1.91	0.178
R2	2	0.0000690	0.0000690	0.0000345	0.42	0.660
R1*R2	4	0.0010428	0.0010428	0.0002607	3.21	0.037
Error	18	0.0014613	0.0014613	0.0000812		
Total	26	0.0028825				

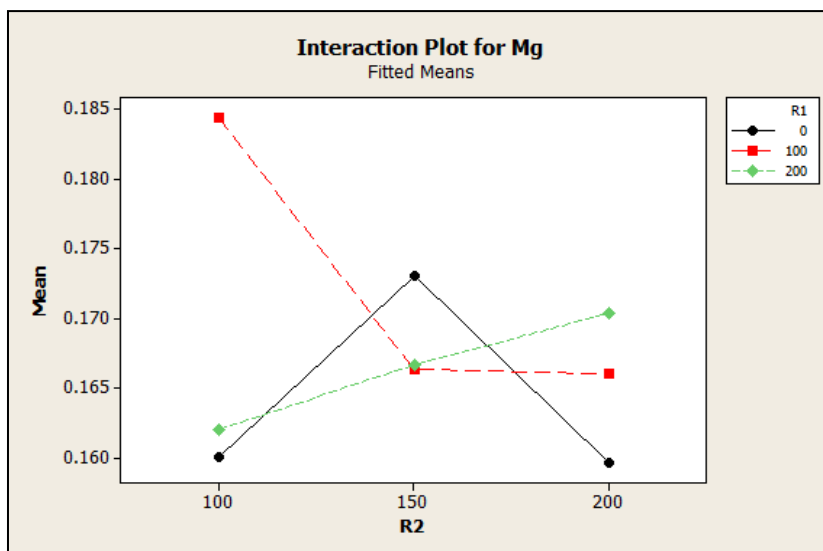
S = 0.00901028 R-Sq = 49.30% R-Sq(adj) = 26.77%

รูปที่ 4.11 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)

โดยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)



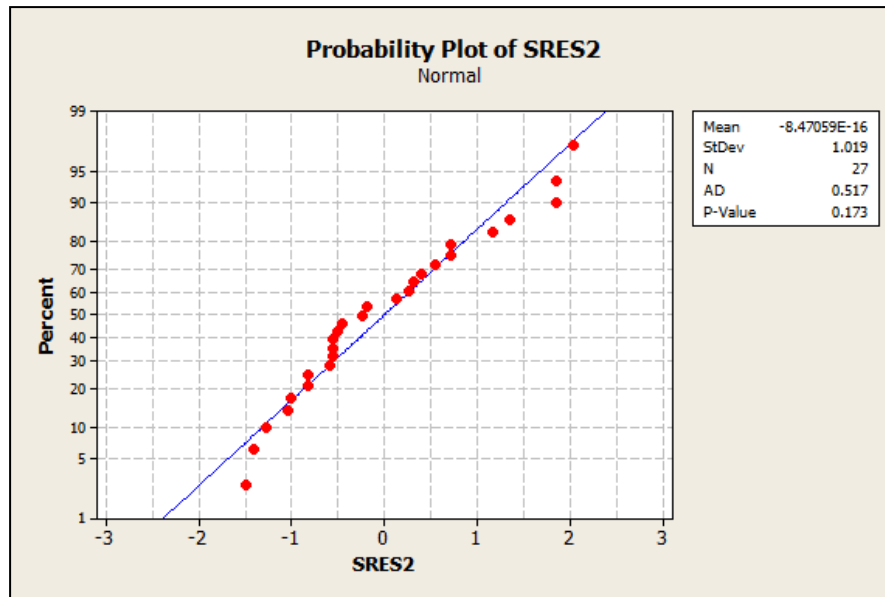
รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)

จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐานยืนยันคุณสมบัติ 1. ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2. ความแปรปรวนคงที่ 3. ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์

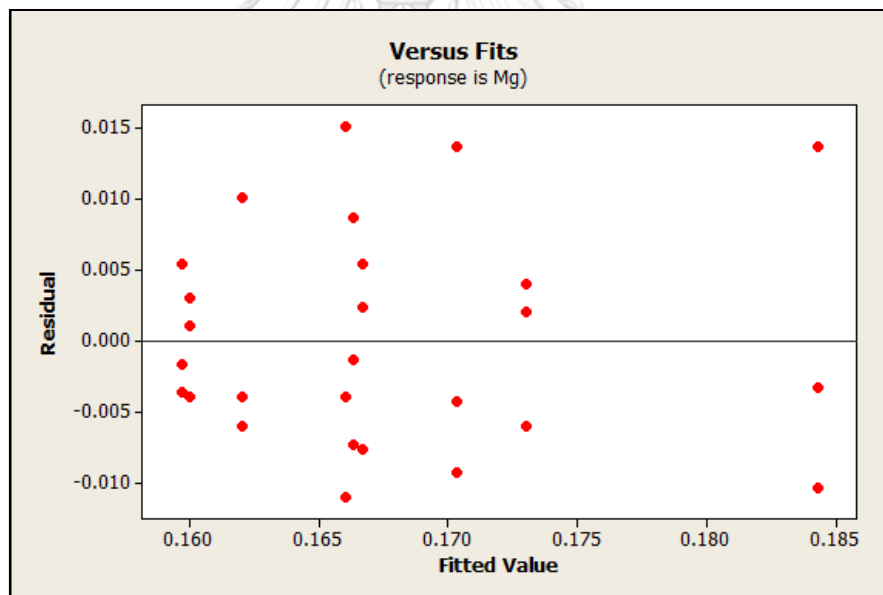
1. ทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ โดยค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD) พบว่าลักษณะการเรียงตัว เป็นแบบกระจายโดยรอบๆเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.14 และค่า P-value เท่ากับ 0.173 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถยอมรับได้ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติ

2. ทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus fits พบว่ามีการกระจายตัวของค่าตกค้างเป็นค่าบวกและค่าลบด้วยจำนวนเท่าๆกัน ดังรูปที่ 4.15 ซึ่งค่าตกค้างมีความแปรปรวนที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

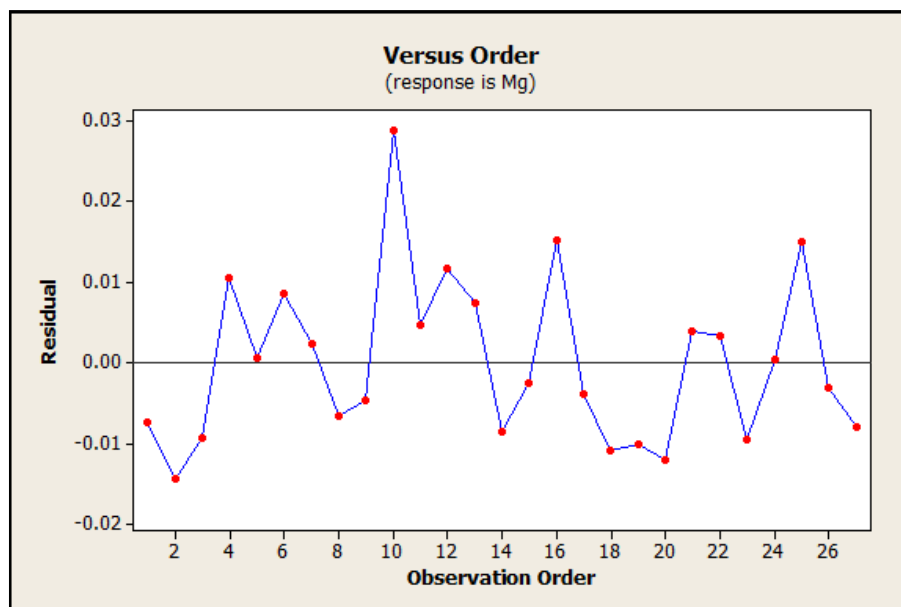
3. ทดสอบสมมติฐานความอิสระของข้อมูล เมื่อพิจารณากราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus Order การทดลองพบว่าเป็นรูปแบบอิสระต่อกันที่ไม่มีความเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง

หลังจากพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และยืนยันว่า 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2.ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน ถัดจากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4 เนื่องจากค่า R^2 เท่ากับ 49.3% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าไม่เข้าใกล้ 1 จึงใช้ในการอธิบายความผันแปรในข้อมูลได้ไม่มากนัก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)	$Mg = 0.178 - 0.000054 R_1 - 0.000078 R_2 + 0.000000 R_1 * R_2$	49.3

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ไปในทิศทางตรงข้าม คือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้น ค่า

องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) จะน้อยลง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีผลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดยที่ ค่า P-value เท่ากับ 0.585 และ 0.350 ตามลำดับ อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 4.5% และ R^2 (adj) เท่ากับ 0.0% ดังรูป 4.17

Regression Analysis: Mg versus R1, R2, R1*R2				
The regression equation is				
Mg = 0.178 - 0.000054 R1 - 0.000078 R2 + 0.000000 R1*R2				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.17820	0.01268	14.06	0.000
R1	-0.00005444	0.00009819	-0.55	0.585
R2	-0.00007778	0.00008154	-0.95	0.350
R1*R2	0.00000043	0.00000063	0.69	0.500
S = 0.0109400 R-Sq = 4.5% R-Sq(adj) = 0.0%				

รูปที่ 4.17 ผลการวิเคราะห์ Regression ของค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดยโปรแกรม



และพิจารณาโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุมที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ออก สามารถสรุปปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.5 โดยค่าความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ R^2 เท่ากับ -0.00% จึงใช้ในการอธิบายความผันแปรในข้อมูลไม่ได้

ตารางที่ 4.5 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)	Mg = 0.1676	-0.00

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีความสัมพันธ์ต่อองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)

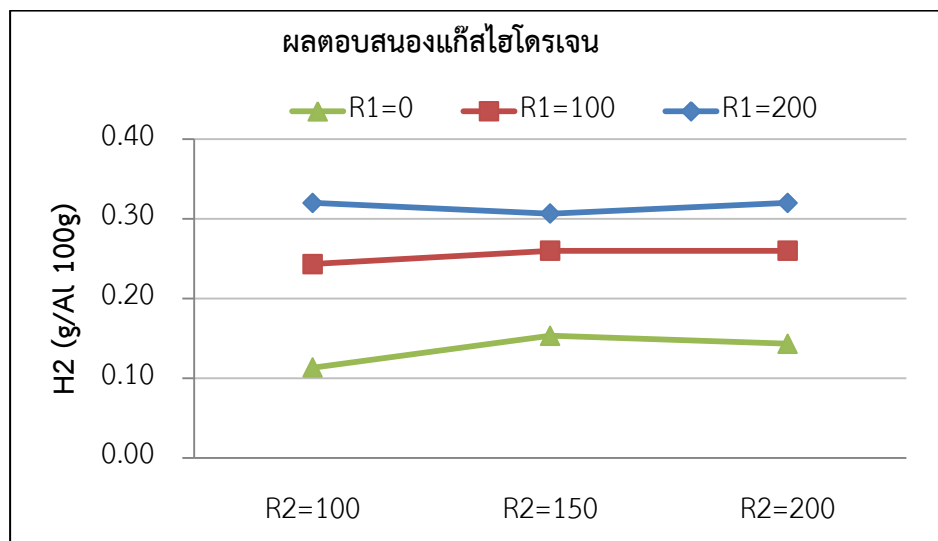
และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีผลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) และอันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 0.00% และ R^2 (adj) เท่ากับ 0.00% ดังรูปที่ 4.18

Stepwise Regression: Mg versus R1, R2, R1*R2				
Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05				
Response is Mg on 3 predictors, with N = 27				
Step	1	2	3	4
Constant	0.1782	0.1728	0.1728	0.1676
R1	-0.00005			
T-Value	-0.55			
P-Value	0.585			
R2	-0.00008	-0.00004	-0.00003	
T-Value	-0.95	-0.82	-0.69	
P-Value	0.350	0.418	0.498	
R1*R2	0.00000	0.00000		
T-Value	0.69	0.58		
P-Value	0.500	0.565		
S	0.0109	0.0108	0.0106	0.0105
R-Sq	4.50	3.23	1.85	-0.00
R-Sq(adj)	0.00	0.00	0.00	0.00
Mallows Cp	4.0	2.3	0.6	-0.9

รูปที่ 4.18 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของค่าองค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) โดยโปรแกรม Minitab

4.2.3 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2)

ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีความสัมพันธ์ แต่ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับแก๊สไฮโดรเจน (H_2)

พิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีอิทธิพลต่อแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 4.20 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) โดย P-value มีค่า <0.0005 โดยค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.21 โดยอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีอิทธิพลมากกว่าอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยที่ค่า P-value เท่ากับ 0.299 รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 95.41% และ R^2 (adj) เท่ากับ 93.37%

General Linear Model: H2 versus R1, R2

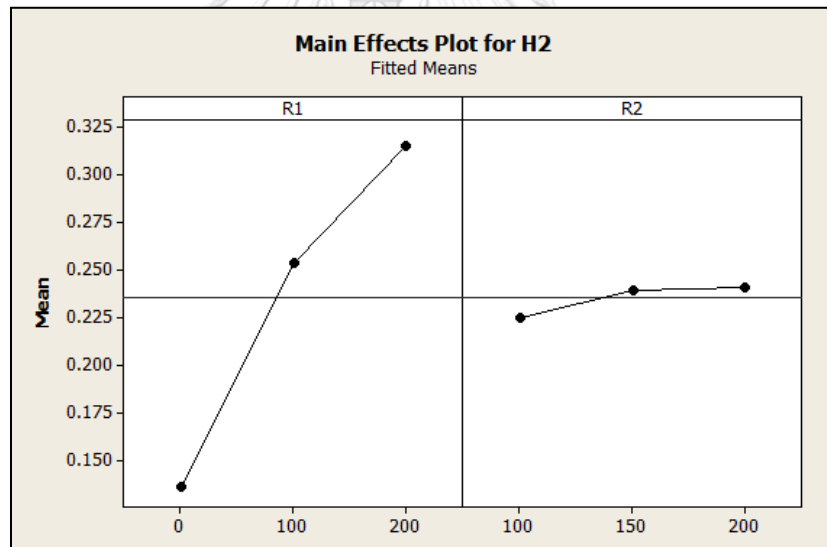
Factor	Type	Levels	Values
R1	fixed	3	0, 100, 200
R2	fixed	3	100, 150, 200

Analysis of Variance for H2, using Adjusted SS for Tests

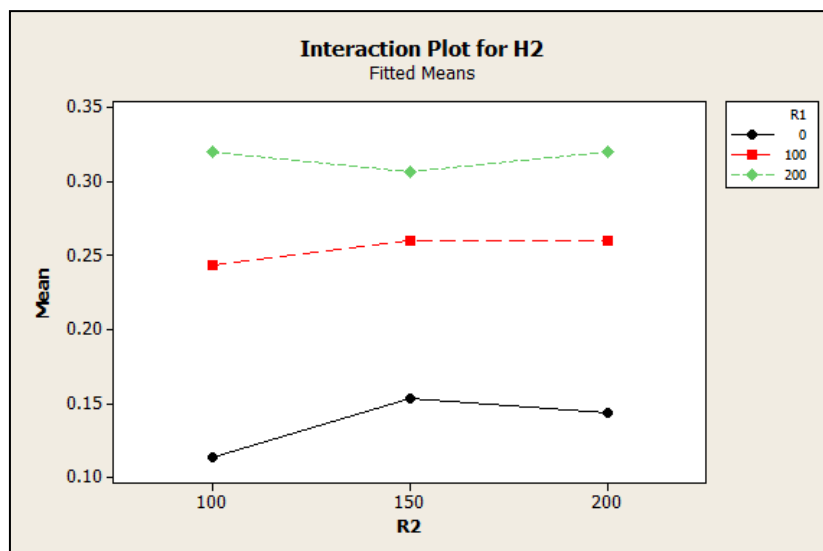
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
R1	2	0.148822	0.148822	0.074411	182.65	0.000
R2	2	0.001356	0.001356	0.000678	1.66	0.217
R1*R2	4	0.002156	0.002156	0.000539	1.32	0.299
Error	18	0.007333	0.007333	0.000407		
Total	26	0.159667				

S = 0.0201843 R-Sq = 95.41% R-Sq(adj) = 93.37%

รูปที่ 4.20 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของค่าแก๊สไฮโดรเจน (H₂) โดยโปรแกรม



รูปที่ 4.21 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H₂)



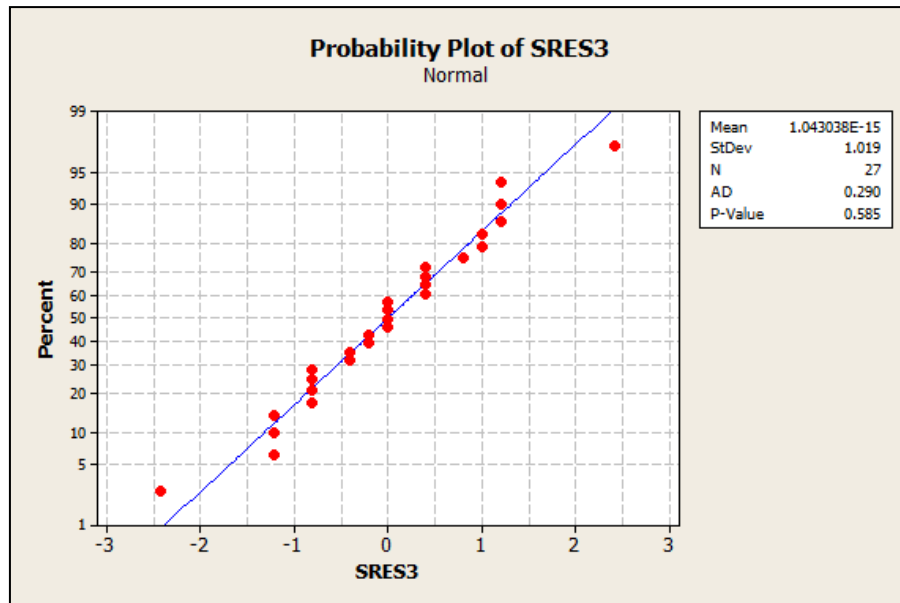
รูปที่ 4.22 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H₂)

จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐานยืนยันคุณสมบัติ 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2. ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์ต่อ

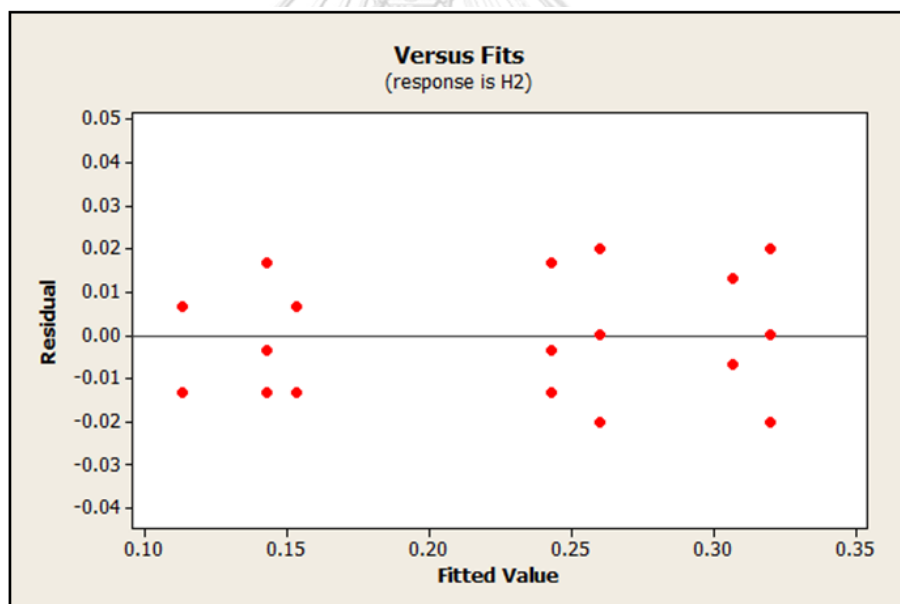
1.ทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ โดยค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD) พบว่า ลักษณะการเรียงตัว เป็นแบบกระจายโดยรอบๆเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.23 และค่า P-value เท่ากับ 0.585 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถยอมรับได้ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติ

2.ทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus fits พบว่ามีการกระจายตัวของค่าตกค้างเป็นค่าบวกและค่าลบด้วยจำนวนเท่าๆกัน ดังรูปที่ 4.24 ซึ่งค่าตกค้างมีความแปรปรวนที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

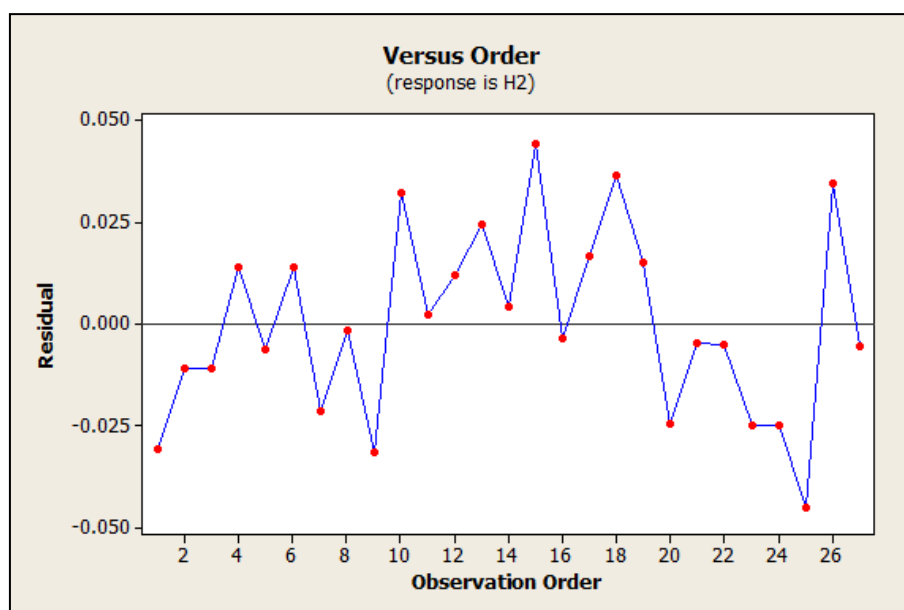
3.ทดสอบสมมติฐานความอิสระของข้อมูล เมื่อพิจารณากราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus Order การทดลองพบว่าเป็นรูปแบบอิสระต่อกันที่ไม่มีความเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.25



รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2)



รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง

หลังจากพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และยืนยันว่า 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2.ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน ถัดจากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.6 เนื่องจากค่า R^2 เท่ากับ 91.30% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้า 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.6 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
แก๊สไฮโดรเจน (H_2)	$H_2 = 0.100 + 0.00112 R_1 + 0.000306 R_2 - 0.000002 R_1 * R_2$	91.30

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้น ค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จะสูงขึ้นด้วย เป็นเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณ

อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยที่ ค่า P-value มีค่า <0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 91.30% และ R^2 (adj) เท่ากับ 90.20% เมื่อ เปรียบเทียบข้อมูล พบว่าข้อสรุปเหมือนกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี General Linear Model ดังรูปที่ 4.26

Regression Analysis: H2 versus R1, R2, R1*R2				
The regression equation is				
$H_2 = 0.100 + 0.00112 R_1 + 0.000306 R_2 - 0.000002 R_1 * R_2$				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.10028	0.02848	3.52	0.002
R1	0.0011194	0.0002206	5.07	0.000
R2	0.0003056	0.0001832	1.67	0.109
R1*R2	-0.00000150	0.00000142	-1.06	0.302
S = 0.0245810 R-Sq = 91.3% R-Sq(adj) = 90.2%				

รูปที่ 4.26 ผลการวิเคราะห์ Regression ของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยโปรแกรม Minitab

และพิจารณาโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุมที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ออก สามารถสรุปปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ได้ดังตารางที่ 4.7 โดยค่าความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ R^2 เท่ากับ 90.19% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้า 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.7 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
แก๊สไฮโดรเจน (H_2)	$H_2 = 0.1461 + 0.00089R_1$	90.19

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีความสัมพันธ์ต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ไปในทิศทาง

เดียวกันคือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มขึ้น ค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีผลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยที่ ค่า P-value มีค่า < 0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 90.19% และ R^2 (adj) เท่ากับ 89.80% ดังรูปที่ 4.27

Stepwise Regression: H2 versus R1, R2, R1*R2			
Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05			
Response is H2 on 3 predictors, with N = 27			
Step	1	2	3
Constant	0.1003	0.1228	0.1461
R1	0.00112	0.00089	0.00089
T-Value	5.07	15.40	15.16
P-Value	0.000	0.000	0.000
R2	0.00031	0.00016	
T-Value	1.67	1.34	
P-Value	0.109	0.193	
R1*R2	-0.00000		
T-Value	-1.06		
P-Value	0.302		
S	0.0246	0.0246	0.0250
R-Sq	91.30	90.87	90.19
R-Sq(adj)	90.16	90.11	89.80
Mallows Cp	4.0	3.1	2.9

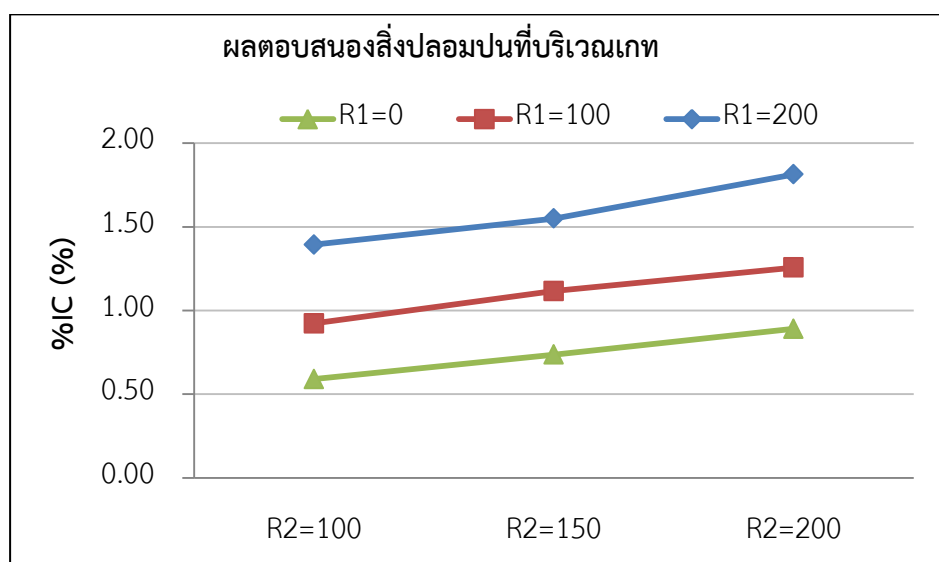
รูปที่ 4.27 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของแก๊สไฮโดรเจน (H_2) โดยโปรแกรม Minitab

4.3 ผลของสัดส่วนผสมที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด

ทำศึกษาความสัมพันธ์ของผลจากสัดส่วนผสมอลูมิเนียม ได้แก่ อลูมิเนียมใหม่ (I) อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด ได้แก่ สิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) โพรงอากาศที่เกท (%BH) และจำนวนจุดโพรงอากาศที่เกท (BH) เพื่อศึกษาส่วนผสมที่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด

4.3.1 ผลของสัดส่วนผสมที่มีต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)

เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้สิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) เพิ่มสูงขึ้นด้วย และมีแนวโน้มความสัมพันธ์แปรผันเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.28



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)

พิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.29 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) โดย P-value ทั้ง 2 ตัวแปร มีค่า <0.0005 โดยสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.30 โดยอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีอิทธิพลมากกว่าอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยที่ค่า P-value เท่ากับ 0.476 รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 97.74% และ R^2 (adj) เท่ากับ 96.73%

General Linear Model: %IC versus R1, R2

Factor	Type	Levels	Values
R1	fixed	3	0, 100, 200
R2	fixed	3	100, 150, 200

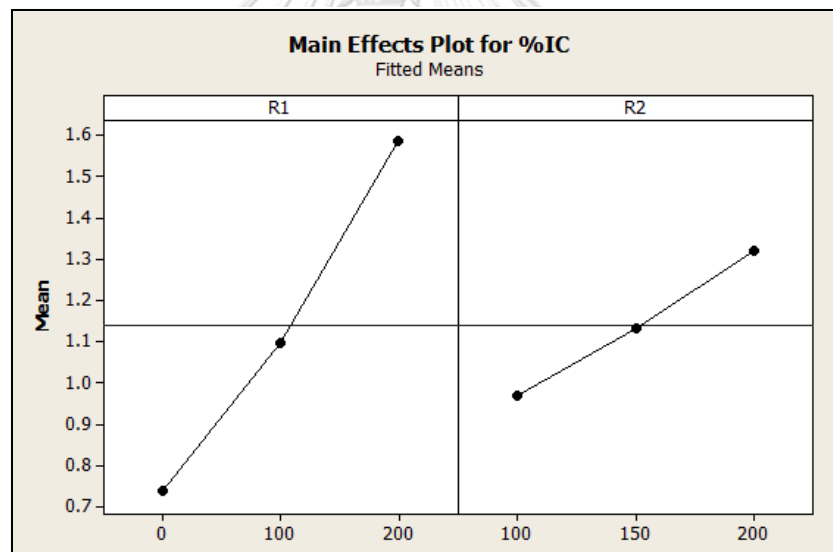
Analysis of Variance for %IC, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
R1	2	3.24987	3.24987	1.62493	330.12	0.000
R2	2	0.55536	0.55536	0.27768	56.41	0.000
R1*R2	4	0.01804	0.01804	0.00451	0.92	0.476
Error	18	0.08860	0.08860	0.00492		
Total	26	3.91187				

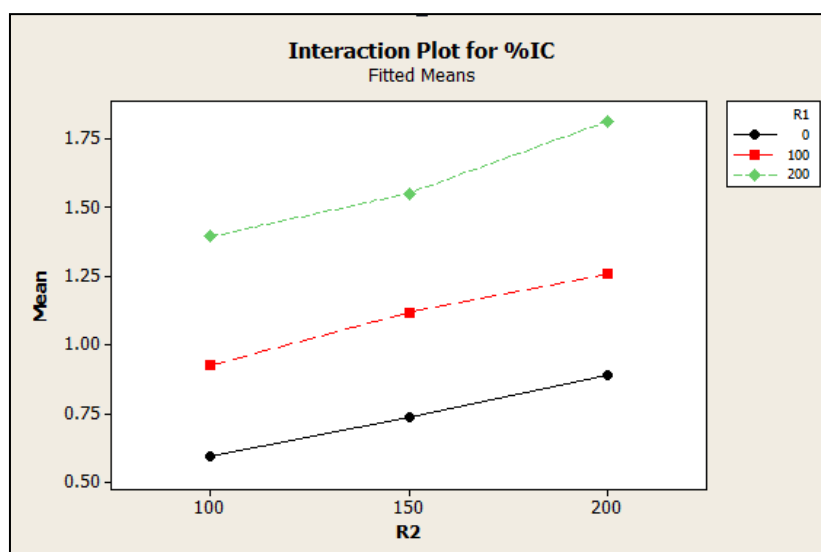
S = 0.0701586 R-Sq = 97.74% R-Sq(adj) = 96.73%

รูปที่ 4.29 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)

โดยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.30 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)



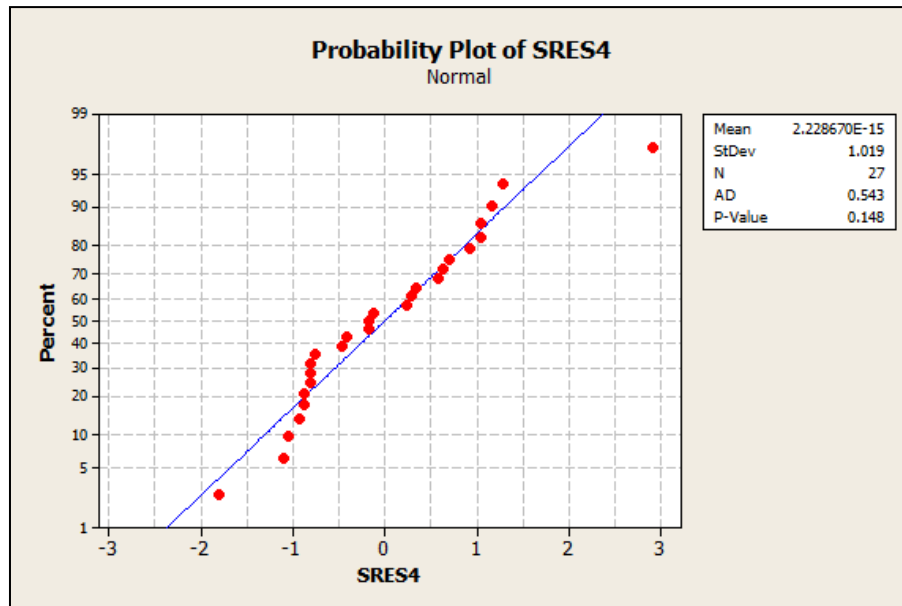
รูปที่ 4.31 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกต (%IC)

จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐานยืนยันคุณสมบัติ 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2. ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์ต่อ

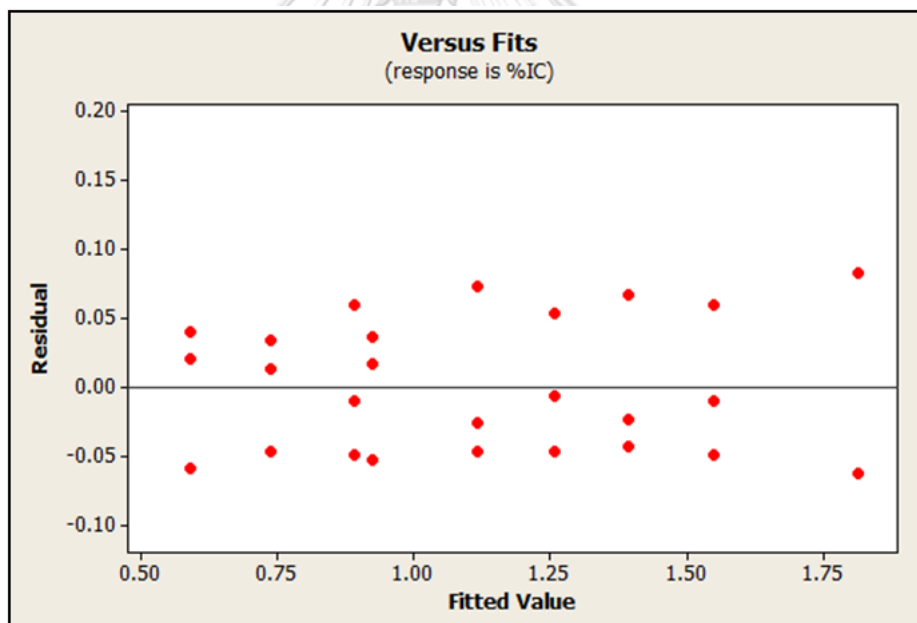
1.ทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ โดยค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD) พบว่า ลักษณะการเรียงตัว เป็นแบบกระจายโดยรอบๆเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.32 และค่า P-value เท่ากับ 0.148 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถยอมรับได้ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติ

2.ทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus fits พบว่ามีการกระจายตัวของค่าตกค้างเป็นค่าบวกและค่าลบด้วยจำนวนเท่าๆกัน ดังรูปที่ 4.33 ซึ่งค่าตกค้างมีความแปรปรวนที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

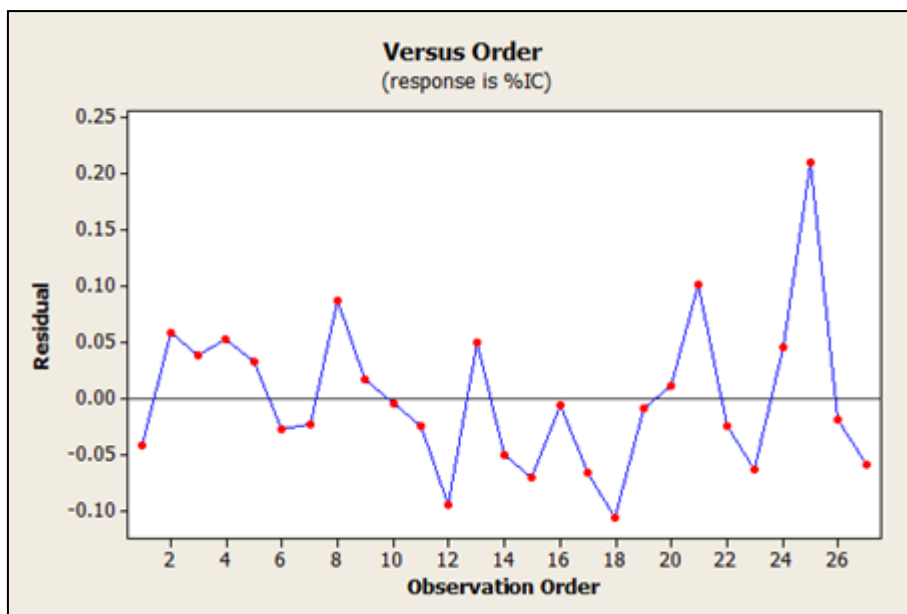
3.ทดสอบสมมติฐานความอิสระของข้อมูล เมื่อพิจารณากราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus Order การทดลองพบว่า เป็นรูปแบบอิสระต่อกันที่ไม่มีความเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.32 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง

หลังจากพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และยืนยันว่า 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2.ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน ถัดจากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.8 เนื่องจากค่า R^2 เท่ากับ 96.90% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.8 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
สิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)	$\%IC = 0.281 + 0.00333 R_1 + 0.00291 R_2 + 0.000006 R_1 * R_2$	96.90

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้นสิ่ง

ปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) จะสูงขึ้นด้วย เป็นเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยที่ ค่า ทั้ง 2 ตัวแปร มีค่า < 0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 96.90% และ R^2 (adj) เท่ากับ 96.50% ดังรูปที่ 4.35

Regression Analysis: %IC versus R1, R2, R1*R2				
The regression equation is				
%IC = 0.281 + 0.00333 R1 + 0.00291 R2 + 0.000006 R1*R2				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.28111	0.08387	3.35	0.003
R1	0.0033333	0.0006497	5.13	0.000
R2	0.0029111	0.0005395	5.40	0.000
R1*R2	0.00000600	0.00000418	1.44	0.165
S = 0.0723852 R-Sq = 96.9% R-Sq(adj) = 96.5%				

รูปที่ 4.35 ผลการวิเคราะห์ Regression ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยโปรแกรม Minitab

และพิจารณาโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุมที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ออก สามารถสรุปปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ได้ดังตารางที่ 4.9 โดยค่าความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ R^2 เท่ากับ 96.64% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.9 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
สิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)	%IC = 0.1911 + 0.00423 R_1 + 0.00351 R_2	96.64

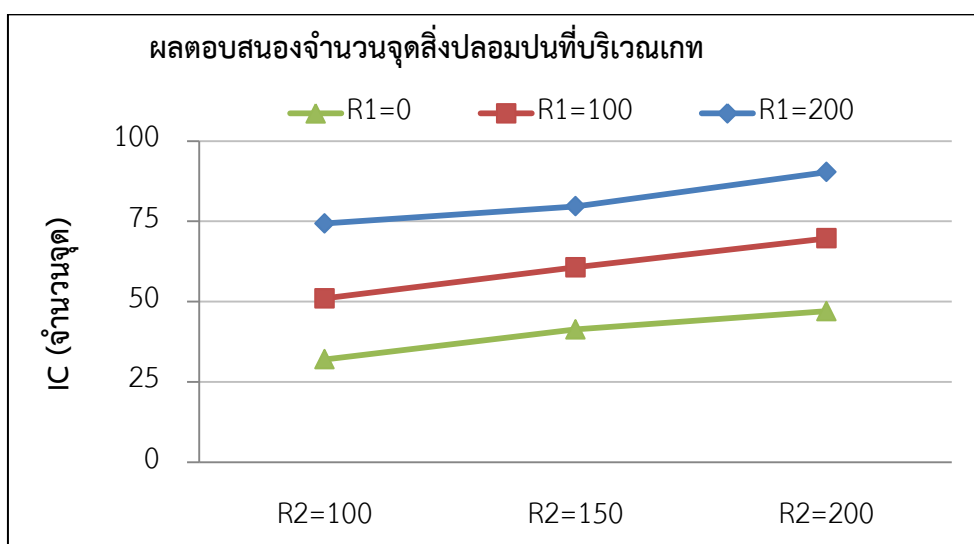
และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ไปในทิศทางเดียวกันคือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้นสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) จะสูงขึ้นด้วย เป็นเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยที่ ค่า P-value ทั้ง 2 ตัวแปร มีค่า < 0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 96.64% และ R^2 (adj) เท่ากับ 96.36% ดังรูปที่ 4.36

Stepwise Regression: %IC versus R1, R2, R1*R2		
Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05		
Response is %IC on 3 predictors, with N = 27		
Step	1	2
Constant	0.2811	0.1911
R1	0.00333	0.00423
T-Value	5.13	24.28
P-Value	0.000	0.000
R2	0.00291	0.00351
T-Value	5.40	10.07
P-Value	0.000	0.000
R1*R2	0.00001	
T-Value	1.44	
P-Value	0.165	
S	0.0724	0.0740
R-Sq	96.92	96.64
R-Sq(adj)	96.52	96.36
Mallows Cp	4.0	4.1

รูปที่ 4.36 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยโปรแกรม Minitab

4.3.2 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)

ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) เพิ่มสูงขึ้นด้วย มีความสัมพันธ์เช่นเดียวกับสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ดังรูปที่ 4.37



รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกทขึ้น (IC)

พิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ได้ดังรูปที่ 4.38 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลคือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) โดย ทั้ง 2 ตัวแปร มีค่า <0.0005 โดยจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.39 โดยอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีอิทธิพลมากกว่าอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) โดยที่ค่า P-value เท่ากับ 0.634 รูปที่ 4.40 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 97.6% และ R^2 (adj) เท่ากับ 96.54%

General Linear Model: IC versus R1, R2

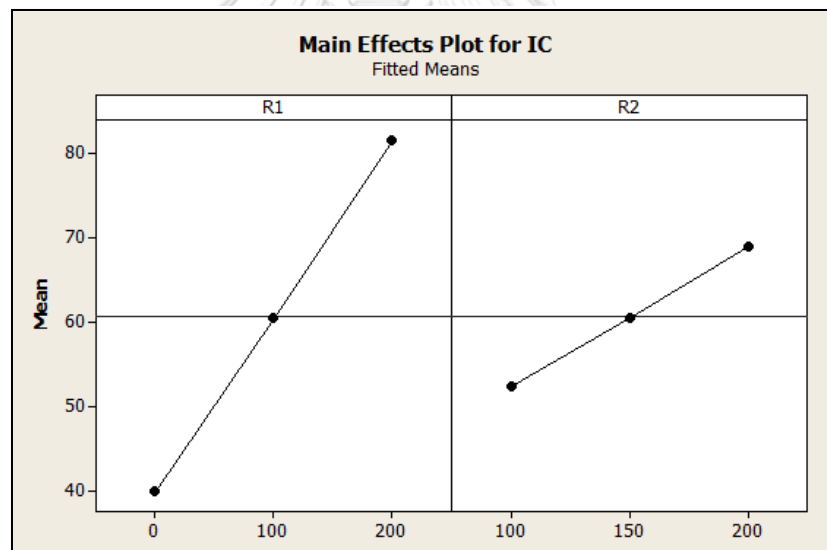
Factor	Type	Levels	Values
R1	fixed	3	0, 100, 200
R2	fixed	3	100, 150, 200

Analysis of Variance for IC, using Adjusted SS for Tests

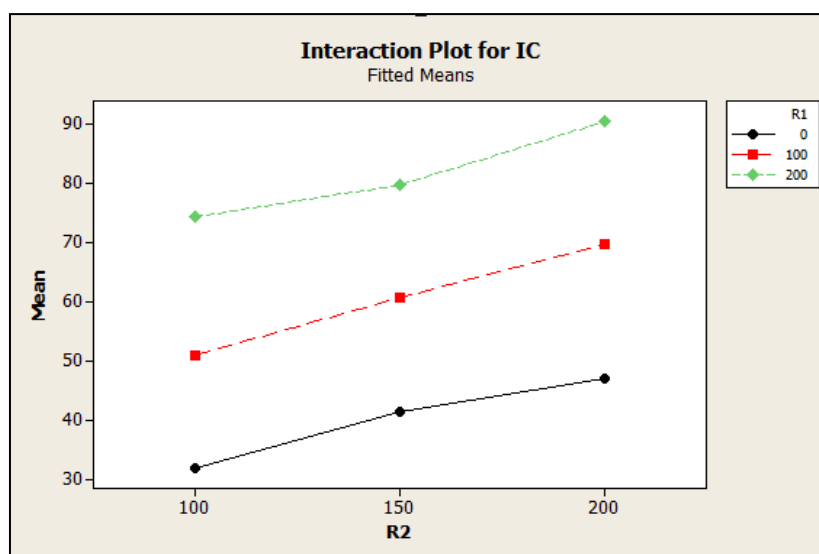
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
R1	2	7688.7	7688.7	3844.3	314.54	0.000
R2	2	1233.6	1233.6	616.8	50.46	0.000
R1*R2	4	31.8	31.8	7.9	0.65	0.634
Error	18	220.0	220.0	12.2		
Total	26	9174.0				

S = 3.49603 R-Sq = 97.60% R-Sq(adj) = 96.54%

รูปที่ 4.38 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) โดยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.39 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)



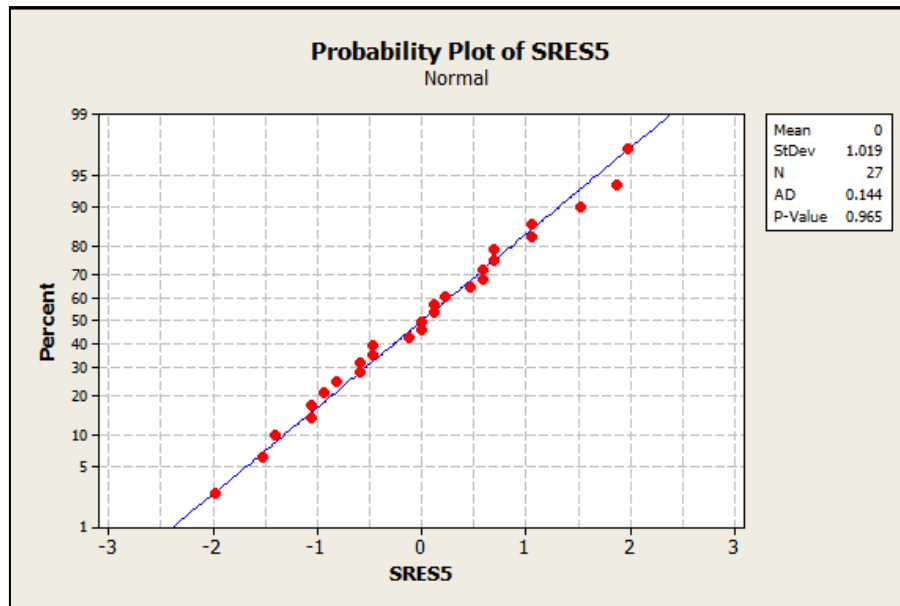
รูปที่ 4.40 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)

จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐานยืนยันคุณสมบัติ 1. ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2. ความแปรปรวนคงที่ 3. ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์ต่อ

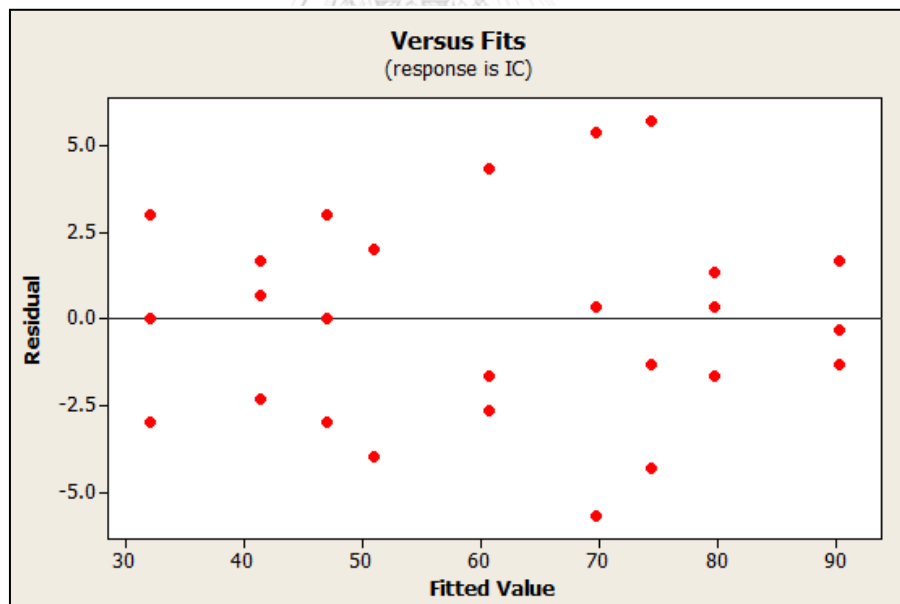
1. ทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ โดยค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD) พบว่าลักษณะการเรียงตัว เป็นแบบกระจายโดยรอบๆเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.41 และค่า P-value เท่ากับ 0.965 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถยอมรับได้ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติ

2. ทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus fits พบว่ามีการกระจายตัวของค่าตกค้างเป็นค่าบวกและค่าลบด้วยจำนวนเท่าๆกัน ดังรูปที่ 4.42 ซึ่งค่าตกค้างมีความแปรปรวนที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

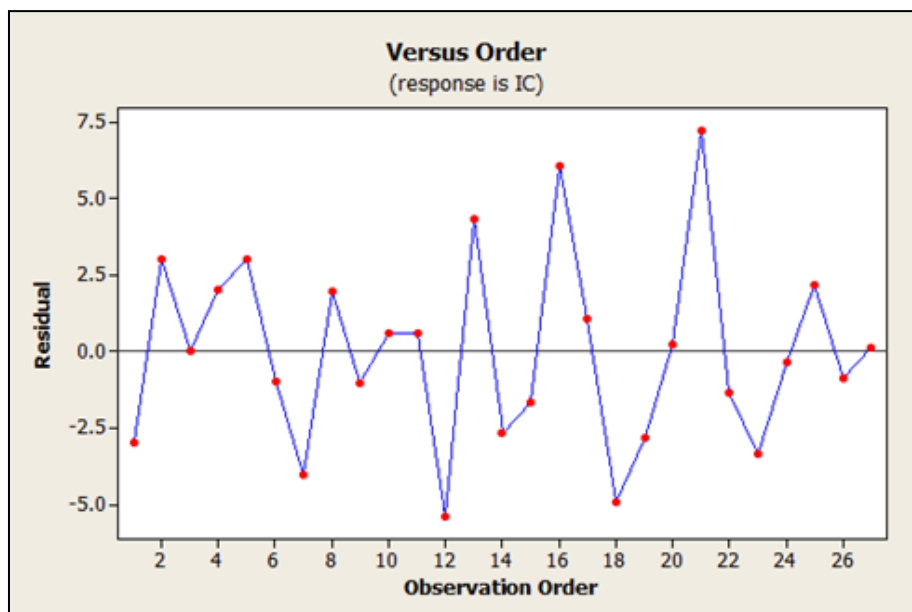
3. ทดสอบสมมติฐานความอิสระของข้อมูล เมื่อพิจารณากราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus Order การทดลองพบว่าเป็นรูปแบบอิสระต่อกันที่ไม่มีความเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.41 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกต (IC)



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง

หลังจากพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และยืนยันว่า 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2.ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน ถัดจากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (IC) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.10 เนื่องจากค่า R^2 เท่ากับ 97.30% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.10 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (IC) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
จุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)	$IC = 15.9 + 0.199 R_1 + 0.161 R_2 + 0.000050 R_1 * R_2$	97.30

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่ม

สูงขึ้น จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) จะสูงขึ้นด้วย เป็นเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) โดยที่ ค่า P-value ทั้ง 2 ตัวแปร มีค่า <0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 97.30% และ R^2 (adj) เท่ากับ 96.90% เมื่อ เปรียบเทียบ ดังรูปที่ 4.44

Regression Analysis: IC versus R1, R2, R1*R2				
The regression equation is				
IC = 15.9 + 0.199 R1 + 0.161 R2 + 0.000050 R1*R2				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	15.917	3.834	4.15	0.000
R1	0.19917	0.02970	6.71	0.000
R2	0.16056	0.02466	6.51	0.000
R1*R2	0.0000500	0.0001911	0.26	0.796
S = 3.30915 R-Sq = 97.3% R-Sq(adj) = 96.9%				

รูปที่ 4.44 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) โดยโปรแกรม

Minitab

และพิจารณาโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุมที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ออก สามารถสรุปปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ได้ดังตารางที่ 4.11 โดยค่าความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ R^2 เท่ากับ 97.25% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.11 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (IC) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
จุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)	$IC = 15.15 + 0.2067 R_1 + 0.166 R_2$	97.25

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มขึ้น จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) จะสูงขึ้นด้วย เป็นเช่นเดียวกับข้อสรุปที่ได้จากการทดลอง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) โดยที่ ค่า P-value ทั้ง 2 ตัวแปรมีค่า < 0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 97.25% และ R^2 (adj) เท่ากับ 97.02% เมื่อเปรียบเทียบข้อมูล พบว่าข้อสรุปเหมือนกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี General Linear Model ดังรูปที่ 4.45

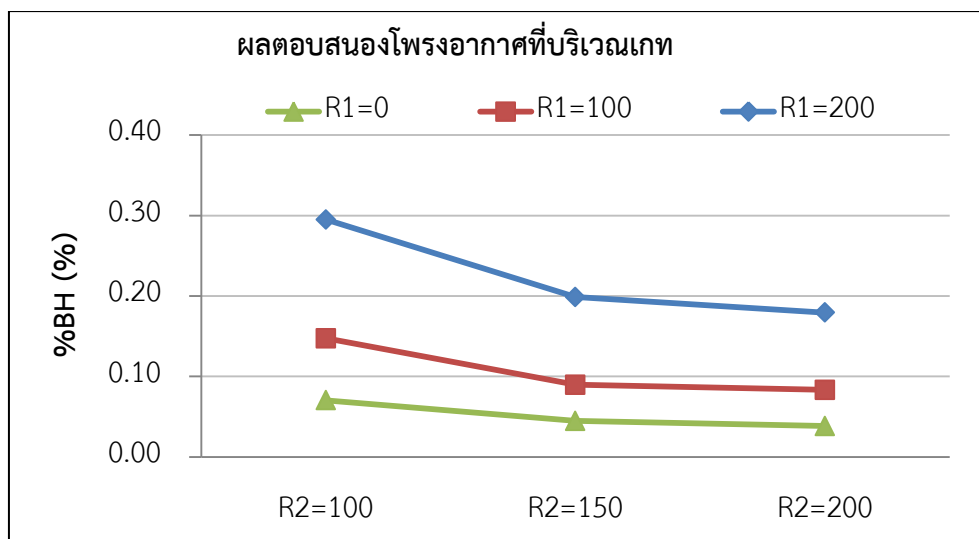
Stepwise Regression: IC versus R1, R2, R1*R2		
Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05		
Response is IC on 3 predictors, with N = 27		
Step	1	2
Constant	15.92	15.17
R1	0.1992	0.2067
T-Value	6.71	27.03
P-Value	0.000	0.000
R2	0.161	0.166
T-Value	6.51	10.83
P-Value	0.000	0.000
R1*R2	0.00005	
T-Value	0.26	
P-Value	0.796	
S	3.31	3.24
R-Sq	97.25	97.25
R-Sq(adj)	96.90	97.02
Mallows Cp	4.0	2.1

รูปที่ 4.45 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) โดยโปรแกรม Minitab

4.3.3 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)

ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) เพิ่มขึ้น แต่สัมพันธแปรผกผันปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ดังรูปที่

4.46



รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)

พิจารณาปัจจัยหลัก และอันตรกิริยาระหว่างอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 4.47 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพล คือ ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) โดย P-value มีค่า <0.0005 และ 0.001 ตามลำดับ โดยโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) จะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.48 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยที่ค่า P-value เท่ากับ 0.338 รูปที่ 4.49 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 88.39% และ R^2 (adj) เท่ากับ 83.23%

จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐานยืนยันคุณสมบัติ 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2. ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์

1.ทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ โดยค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD) พบว่าลักษณะการเรียงตัว เป็นแบบกระจายโดยรอบๆเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.50 และค่า P-value เท่ากับ 0.559 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถยอมรับได้ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติ

2.ทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus fits พบว่ามีการกระจายตัวของค่าตกค้างเป็นค่าบวกและค่าลบด้วยจำนวนเท่าๆกัน ดัง

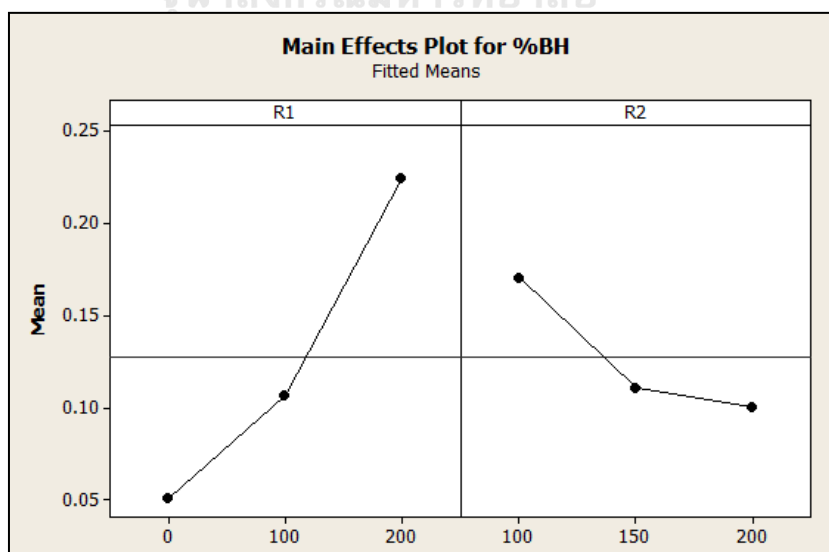
รูปที่ 4.51 ซึ่งค่าตกค้างมีความแปรปรวนที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

3.ทดสอบสมมติฐานความอิสระของข้อมูล เมื่อพิจารณารูประหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus Order การทดลองพบว่าเป็นรูปแบบอิสระต่อกันที่ไม่มีความเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่าข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.52

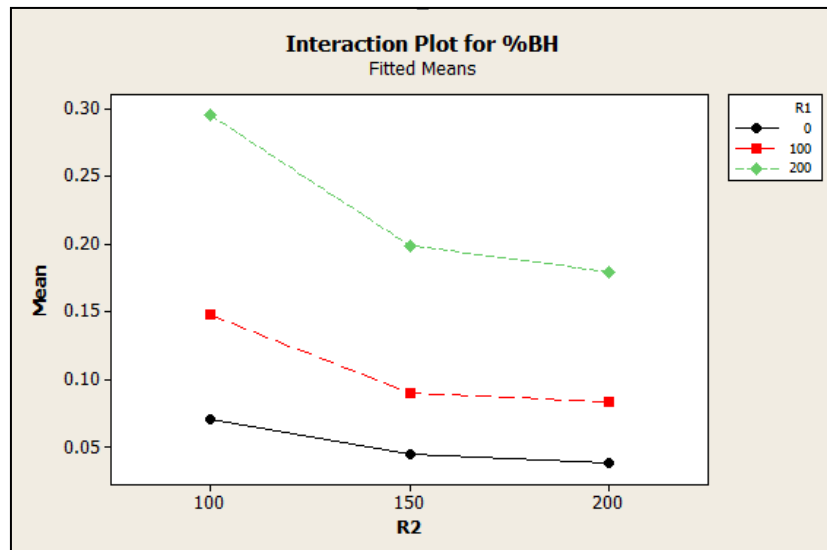
General Linear Model: %BH versus R1, R2						
Factor	Type	Levels	Values			
R1	fixed	3	0, 100, 200			
R2	fixed	3	100, 150, 200			
Analysis of Variance for %BH, using Adjusted SS for Tests						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
R1	2	0.140560	0.140560	0.070280	55.77	0.000
R2	2	0.025997	0.025997	0.012999	10.32	0.001
R1*R2	4	0.006136	0.006136	0.001534	1.22	0.338
Error	18	0.022682	0.022682	0.001260		
Total	26	0.195376				
S = 0.0354984 R-Sq = 88.39% R-Sq(adj) = 83.23%						

รูปที่ 4.47 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)

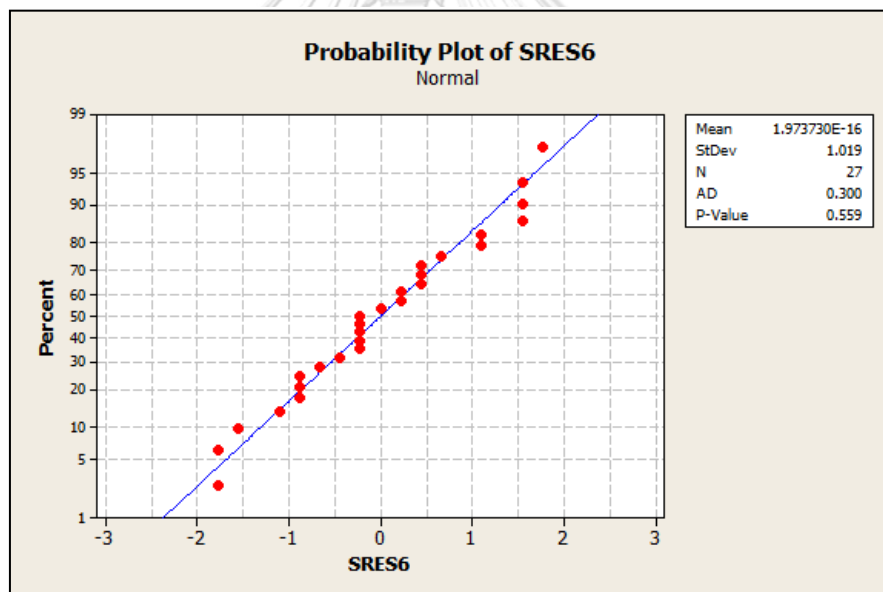
โดยโปรแกรม Minitab
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



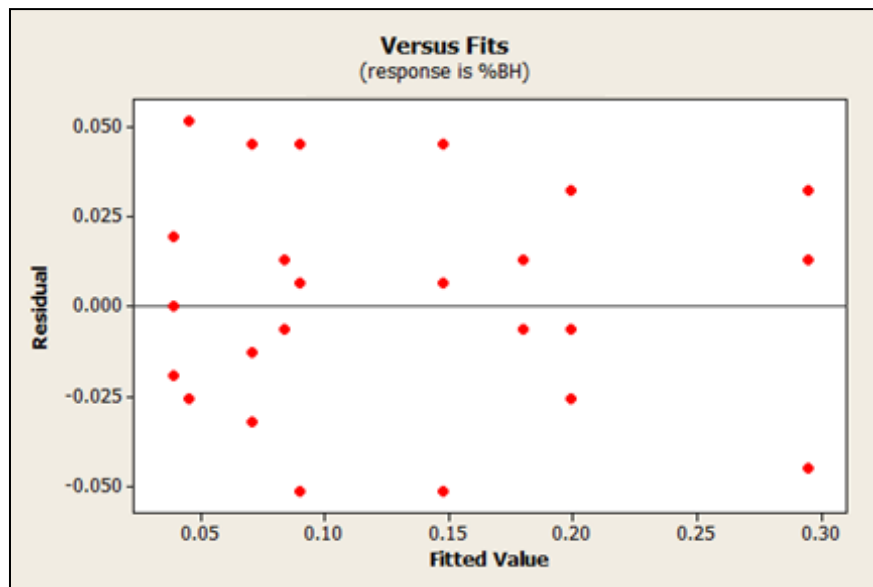
รูปที่ 4.48 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)



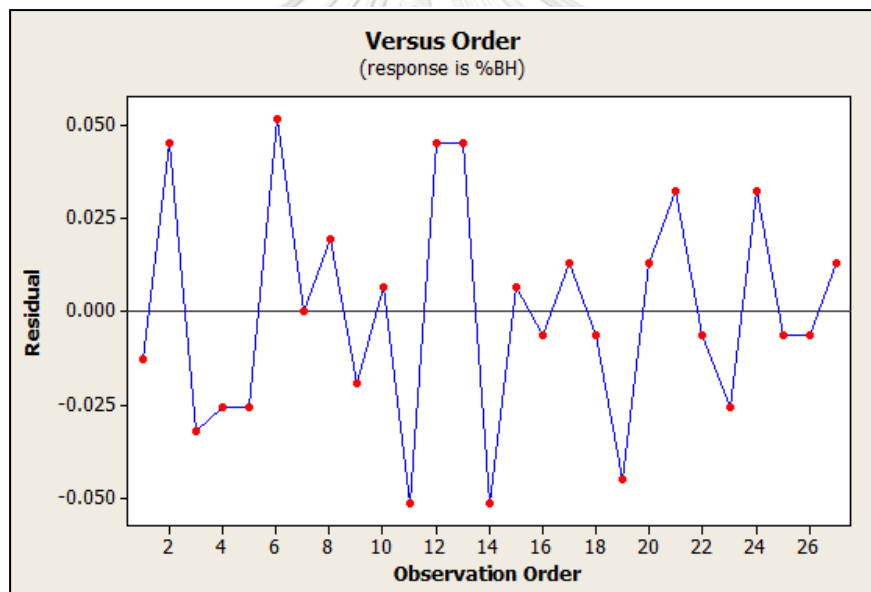
รูปที่ 4.49 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)



รูปที่ 4.50 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.51 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)



รูปที่ 4.52 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง

หลังจากพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และยืนยันว่า 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2.ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน ถัดจากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.11 เนื่องจากค่า

R^2 เท่ากับ 83.10% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.11 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)	$\%BH = 0.0842 + 0.00149 R_1 - 0.000288 R_2 - 0.000004 R_1 * R_2$	83.10

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีความสัมพันธ์ต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มสูงขึ้น โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) จะสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มสูงขึ้น โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) จะลดลง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยที่ ค่า P-value มีค่า <0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 83.10% และ R^2 (adj) เท่ากับ 80.90% ดังรูปที่ 4.53

Regression Analysis: %BH versus R1, R2, R1*R2				
The regression equation is				
%BH = 0.0842 + 0.00149 R1 - 0.000288 R2 - 0.000004 R1*R2				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.08422	0.04389	1.92	0.067
R1	0.0014904	0.0003399	4.38	0.000
R2	-0.0002885	0.0002823	-1.02	0.317
R1*R2	-0.00000417	0.00000219	-1.91	0.069
S = 0.0378745 R-Sq = 83.1% R-Sq (adj) = 80.9%				

รูปที่ 4.53 ผลการวิเคราะห์ Regression ของโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยโปรแกรม

Minitab

และพิจารณาโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุมที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ออก สามารถสรุปปริมาณอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ได้ดังตารางที่ 4.12 โดยค่าความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ R^2 เท่ากับ 82.35% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.12 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)	$\%BH = 0.04095 + 0.00175 R_1 - 0.00001 R_1 * R_2$	82.35

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีความสัมพันธ์ต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มสูงขึ้น โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยที่ ค่า P-value มีค่า <0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอนุภาคนิยมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยที่ค่า P-value มีค่า <0.0005 ซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์นี้ ไม่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองเส้นตรง (General linear model) โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในครั้งนี้จะใช้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่มีการคัดเลือกตัวแปรเป็นสมการการพยากรณ์

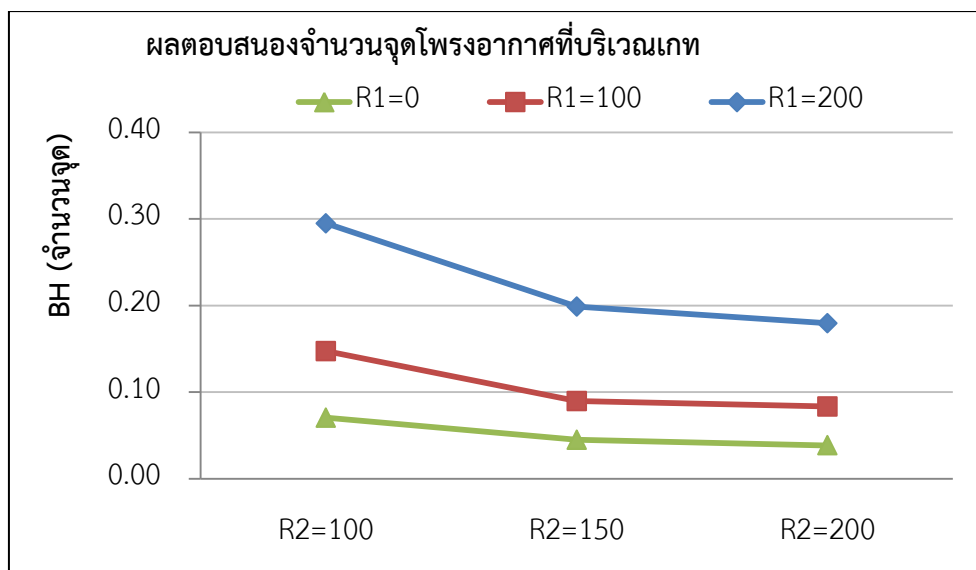
Stepwise Regression: %BH versus R1, R2, R1*R2		
Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05		
Response is %BH on 3 predictors, with N = 27		
Step	1	2
Constant	0.08422	0.04095
R1	0.00149	0.00175
T-Value	4.38	7.74
P-Value	0.000	0.000
R2	-0.00029	
T-Value	-1.02	
P-Value	0.317	
R1*R2	-0.00000	-0.00001
T-Value	-1.91	-4.26
P-Value	0.069	0.000
S	0.0379	0.0379
R-Sq	83.11	82.35
R-Sq(adj)	80.91	80.88
Mallows Cp	4.0	3.0

รูปที่ 4.54 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)

โดยโปรแกรม Minitab

4.3.4 ผลของสัดส่วนส่วนผสมที่มีต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

ปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มขึ้น มีผลทำให้จำนวนโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) เพิ่มขึ้น แต่สัมพันธ์แปรผกผันปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ความสัมพันธ์เช่นเดียวกับโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ดังรูปที่ 4.55



รูปที่ 4.55 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

พิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาระหว่างอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการวิเคราะห์ที่ได้ดังรูปที่ 4.56 สามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลคือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) โดย P-value มีค่า <0.0005 และ 0.001 ตามลำดับ โดยจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) จะมีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มสูงขึ้น ดังรูปที่ 4.57 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ไม่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) โดยที่ค่า P-value เท่ากับ 0.110 รูปที่ 4.58 แสดงความสัมพันธ์ของอันตรกิริยา โดยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มี ค่า R^2 เท่ากับ 90.46% และ R^2 (adj) เท่ากับ 86.22%

General Linear Model: BH versus R1, R2

Factor	Type	Levels	Values
R1	fixed	3	0, 100, 200
R2	fixed	3	100, 150, 200

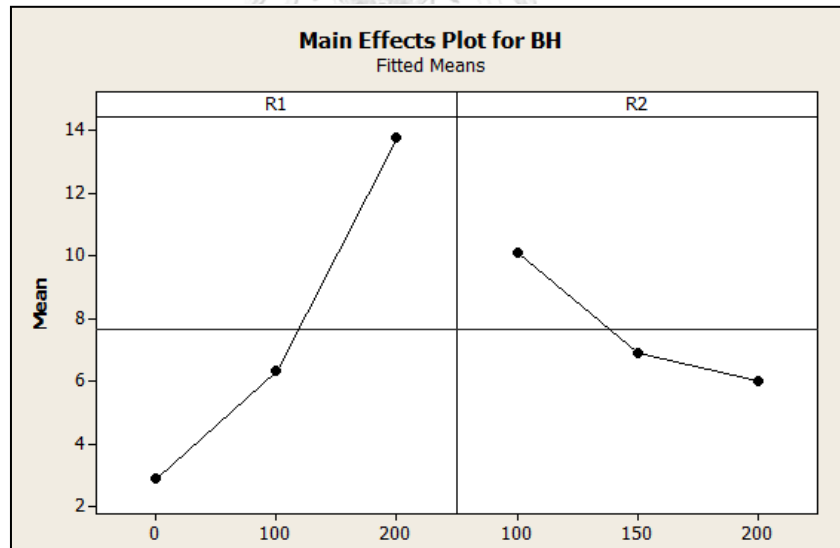
Analysis of Variance for BH, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
R1	2	557.556	557.556	278.778	70.35	0.000
R2	2	84.222	84.222	42.111	10.63	0.001
R1*R2	4	34.889	34.889	8.722	2.20	0.110
Error	18	71.333	71.333	3.963		
Total	26	748.000				

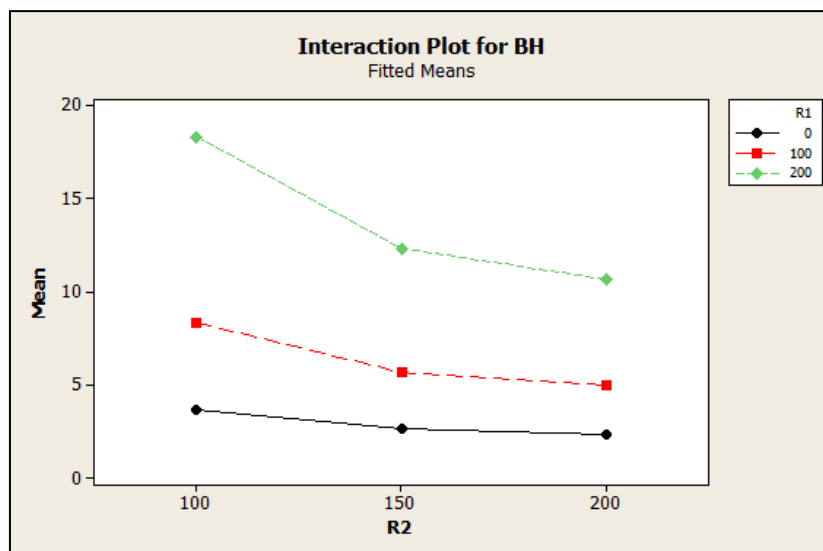
S = 1.99072 R-Sq = 90.46% R-Sq(adj) = 86.22%

รูปที่ 4.56 ผลการวิเคราะห์ General Linear Model ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

โดยโปรแกรม Minitab



รูปที่ 4.57 ผลวิเคราะห์สำหรับปัจจัยหลักที่มีผลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)



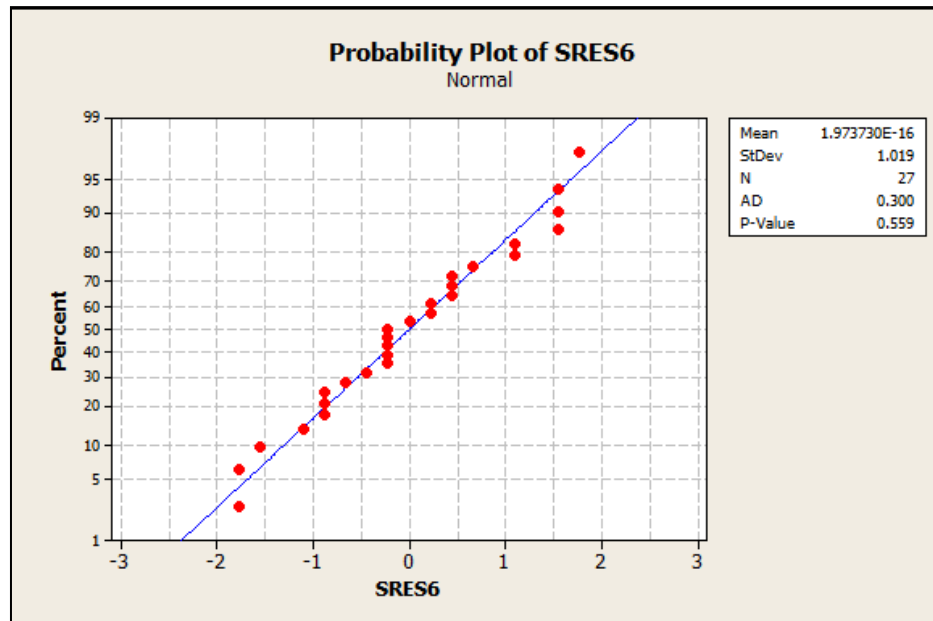
รูปที่ 4.58 ผลวิเคราะห์สำหรับอันตรกิริยาระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

จากนั้นนำข้อมูลมาทดสอบสมมติฐานยืนยันคุณสมบัติ 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2. ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน เพื่อนำไปวิเคราะห์สหสัมพันธ์ต่อ

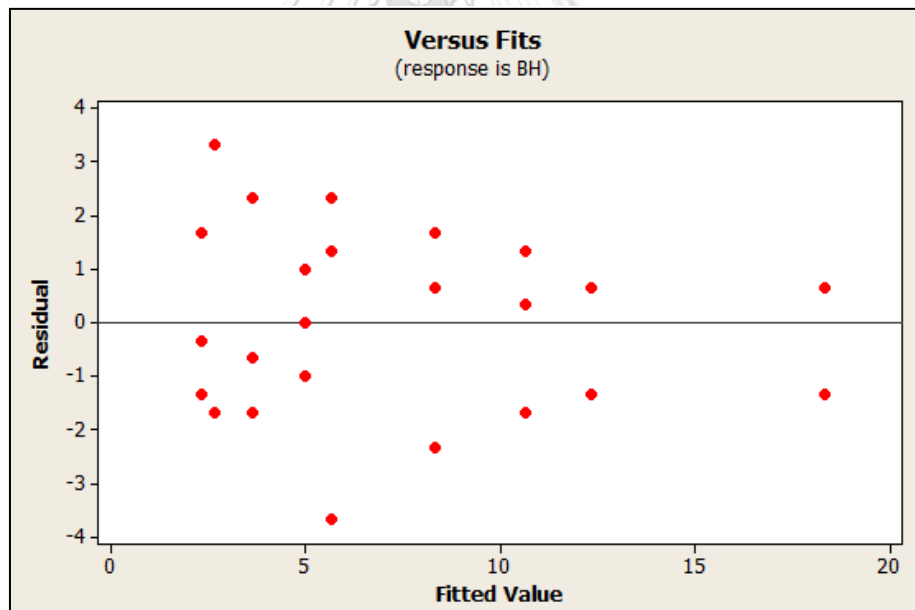
1.ทดสอบสมมติฐานการแจกแจงปกติ โดยค่าสถิติทดสอบ Anderson-Darling (AD) พบว่า ลักษณะการเรียงตัว เป็นแบบกระจายโดยรอบๆเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4.59 และค่า P-value เท่ากับ 0.559 ซึ่งมากกว่า 0.05 สามารถยอมรับได้ว่า เป็นการแจกแจงแบบปกติ

2.ทดสอบสมมติฐานความแปรปรวนคงที่ พิจารณาจากกราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus fits พบว่ามีการกระจายตัวของค่าตกค้างเป็นค่าบวกและค่าลบด้วยจำนวนเท่าๆกัน ดังรูปที่ 4.60 ซึ่งค่าตกค้างมีความแปรปรวนที่ไม่แตกต่างกัน จึงสามารถสรุปได้ว่า ค่าตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

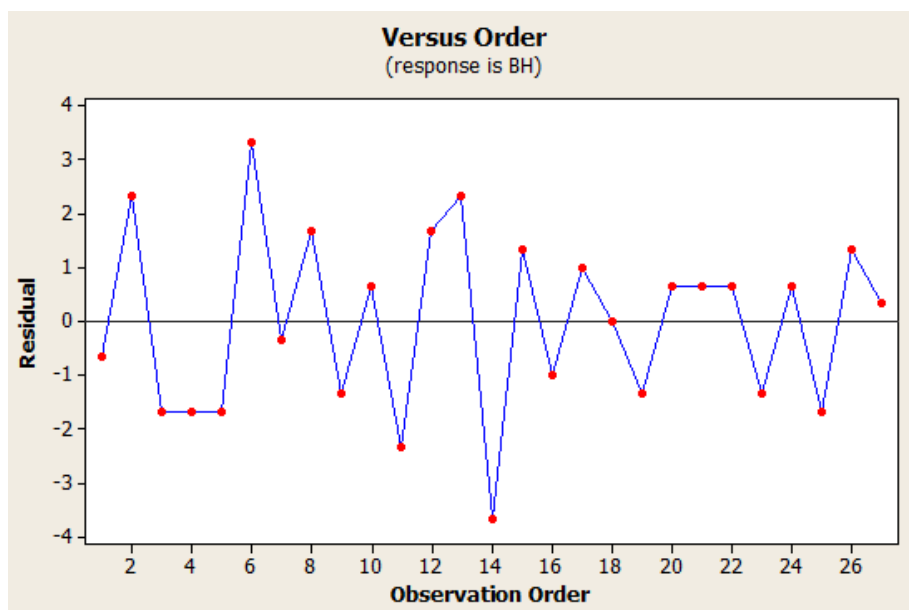
3.ทดสอบสมมติฐานความอิสระของข้อมูล เมื่อพิจารณากราฟระหว่างค่าตกค้าง (Residual) และ Versus Order การทดลองพบว่าเป็นรูปแบบอิสระต่อกันที่ไม่มีความเป็นแนวโน้ม จึงสรุปได้ว่า ข้อมูลมีความเป็นอิสระต่อกัน ดังรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.59 ผลการทดสอบการแจกแจงแบบปกติของข้อมูล



รูปที่ 4.60 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าตกค้างและจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)



รูปที่ 4.61 ความสัมพันธ์ของค่าตกค้างตามลำดับการทดลอง

หลังจากพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีผลต่อตัวแปรตอบสนอง ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และยืนยันว่า 1.ข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ 2.ความแปรปรวนคงที่ 3.ข้อมูลมีความอิสระต่อกัน ถัดจากนั้นทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยของปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.13 เนื่องจากค่า R^2 เท่ากับ 85.50% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอย

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
จำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	$BH = 3.64 + 0.102 R_1 - 0.0094 R_2 - 0.000317 R_1 * R_2$	85.50

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มสูงขึ้น

จำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) จะสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) เพิ่มสูงขึ้น จำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) จะลดลง และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักและอันตรกิริยาที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีผลต่อโพรงจำนวนโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) โดยที่ ค่า P-value มีค่า <0.0005 อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) โดยที่ ค่า P-value เท่ากับ 0.019 ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ มีค่า R^2 เท่ากับ 85.5% และ R^2 (adj) เท่ากับ 83.60% ดังรูปที่ 4.62

Regression Analysis: BH versus R1, R2, R1*R2

The regression equation is
 $BH = 3.64 + 0.102 R1 - 0.0094 R2 - 0.000317 R1*R2$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3.639	2.514	1.45	0.161
R1	0.10194	0.01948	5.23	0.000
R2	-0.00944	0.01617	-0.58	0.565
R1*R2	-0.0003167	0.0001253	-2.53	0.019

S = 2.17001 R-Sq = 85.5% R-Sq(adj) = 83.6%

รูปที่ 4.62 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

โดยโปรแกรม Minitab

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และพิจารณาโดยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุมที่มีความสัมพันธ์กับตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ โดยตัดปัจจัยที่ไม่มีความสัมพันธ์ออก สามารถสรุปปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีผลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ได้ดังตารางที่ 4.14 โดยค่าความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้ R^2 เท่ากับ 85.31% เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้

ตารางที่ 4.14 สมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) กับจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ด้วยวิธีการคัดเลือกตัวแปรควบคุม

ตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	R^2 (%)
จำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	$BH = 2.222 + 0.110 R_1 - 0.00037 R_1 * R_2$	85.31

และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้คือปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) เพิ่มสูงขึ้นจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) มีผลต่อโพรงจำนวนโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) โดยที่ ค่า P-value มีค่า <0.0005 ความสัมพันธ์อันตรกิริยาระหว่างปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และปริมาณอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) โดยที่ ค่า P-value มีค่า <0.0005 ความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 85.31% และ R^2 (adj) เท่ากับ 84.08% ดังรูปที่ 4.63 ซึ่งผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์นี้ ไม่สอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยวิธีแบบจำลองเส้นตรง (General linear model) โดยการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ในครั้งนี้จะใช้ผลการวิเคราะห์แบบจำลองการถดถอยที่มีการคัดเลือกตัวแปรเป็นสมการการพยากรณ์

Stepwise Regression: BH versus R1, R2, R1*R2		
Backward elimination. Alpha-to-Remove: 0.05		
Response is BH on 3 predictors, with N = 27		
Step	1	2
Constant	3.639	2.222
R1	0.102	0.110
T-Value	5.23	8.66
P-Value	0.000	0.000
R2	-0.009	
T-Value	-0.58	
P-Value	0.565	
R1*R2	-0.00032	-0.00037
T-Value	-2.53	-4.78
P-Value	0.019	0.000
S	2.17	2.14
R-Sq	85.52	85.31
R-Sq(adj)	83.63	84.08
Mallows Cp	4.0	2.3

รูปที่ 4.63 ผลการวิเคราะห์ Stepwise Regression ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)



4.4 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด

ทำศึกษาความสัมพันธ์ของผลจากการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียม ได้แก่ เคโมลต์ (K) องค์ประกอบแมกนีเซียม (Mg) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่มีต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีด ได้แก่ สิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) โพรงอากาศที่เกท (%BH) และจำนวนจุดโพรงอากาศที่เกท (BH) เพื่อใช้ผลของความสัมพันธ์ในการพยากรณ์ผลทางคุณภาพของชิ้นงานฉีดจากข้อมูลผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียมก่อนการฉีดขึ้นรูป ซึ่งส่งผลให้สามารถป้องกันการผลิตของเสียออกมาได้

4.4.1 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)

เมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม ได้แก่ค่าเคโมลต์ (K), องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.64 เนื่องจากค่า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้ และเมื่อทดลองแทนค่าเคโมลต์ (K) เท่ากับ 0.54

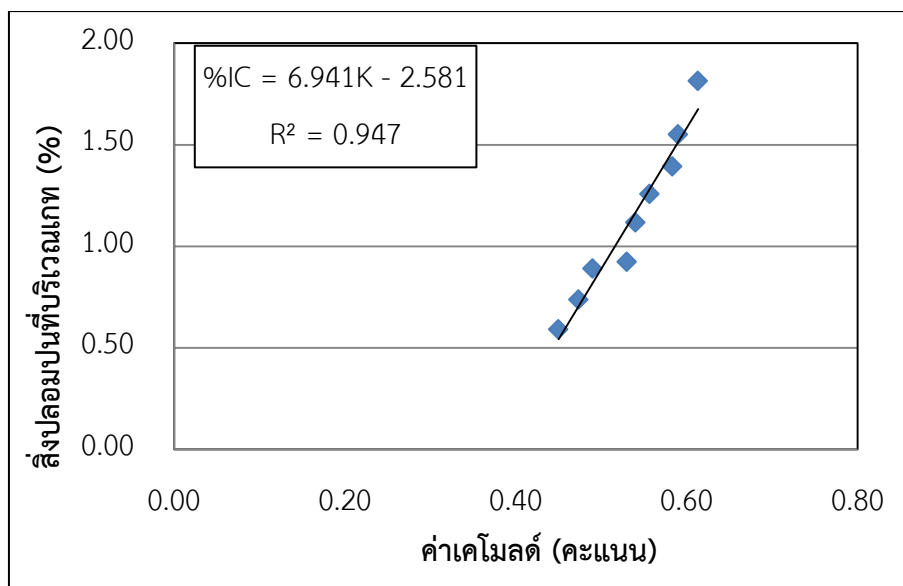
องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) เท่ากับ 0.166 และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) เท่ากับ 0.26 ผลลัพธ์เท่ากับ 1.18% นำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าทดลองจริง พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 4.98%

Regression Analysis: %IC versus K, Mg, H2					
The regression equation is					
%IC = - 1.79 + 6.66 K - 3.76 Mg - 0.025 H2					
Predictor	Coef	SE Coef	T	P	
Constant	-1.7938	0.6019	-2.98	0.007	
K	6.660	1.316	5.06	0.000	
Mg	-3.764	2.713	-1.39	0.179	
H2	-0.0251	0.9263	-0.03	0.979	
S = 0.141410 R-Sq = 88.2% R-Sq(adj) = 86.7%					

รูปที่ 4.64 ผลการวิเคราะห์ Regression ของสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยโปรแกรม

Minitab

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้ คือ ค่าเคโมลต์ (K) มีความสัมพันธ์ต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อค่าเคโมลต์ (K) เพิ่มสูงขึ้น สิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าเคโมลต์ (K) มีผลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) โดยที่ ค่า P-value มีค่า <0.0005 แสดงถึงค่าเคโมลต์ (K) มีอิทธิพลต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.65 แสดงความสัมพันธ์ค่าเคโมลต์ (K) และสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC)

และเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้แผนผังการกระจาย ระหว่างค่าเคโมลต์ (K) กับ สิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC) ดังรูปที่ 4.65 พบว่ามีความสัมพันธ์แปรผันตามกัน คือ เมื่อค่าเคโมลต์ (K) สูงขึ้น สิ่งปลอมปนบริเวณเกท (%IC) จะสูงขึ้นด้วย โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น คือ $\%IC = 6.941K - 2.581$ และมีค่า $R^2 = 0.947$

4.4.2 ผลของคุณภาพของน้ำอูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)

เมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของน้ำ อูมิเนียม ได้แก่ค่าเคโมลต์ (K), องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg), แก๊สไฮโดรเจน (H₂) ที่มีผลต่อ จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.66 เนื่องจากค่า R² มีค่าเข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณมีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้ และเมื่อทดลองแทนค่าเคโมลต์ (K) เท่ากับ 0.54 องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) เท่ากับ 0.166 และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) เท่ากับ 0.26 ผลลัพธ์เท่ากับ 63 นำผลรับที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าทดลองจริง พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 3.41%

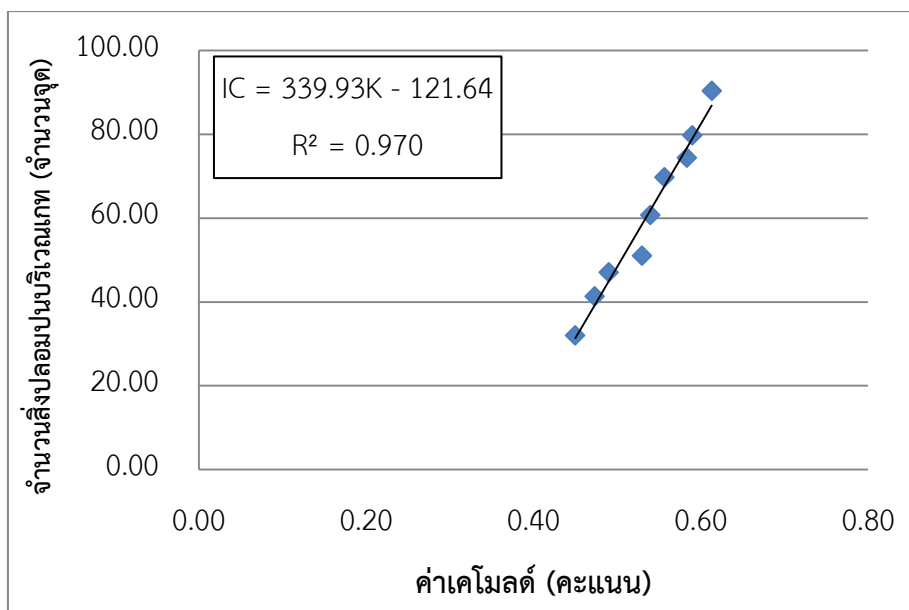
Regression Analysis: IC versus K, Mg, H2				
The regression equation is				
IC = - 66.1 + 267 K - 156 Mg + 41.9 H2				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-66.09	28.05	-2.36	0.027
K	266.56	61.34	4.35	0.000
Mg	-155.6	126.4	-1.23	0.231
H2	41.94	43.17	0.97	0.341
S = 6.58973 R-Sq = 89.1% R-Sq(adj) = 87.7%				

รูปที่ 4.66 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)

โดยโปรแกรม Minitab

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้ คือ ค่าเคโมลต์ (K) มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อค่าเคโมลต์ (K) เพิ่มสูงขึ้น จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าค่าเคโมลต์ (K) มีผลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) โดยที่ ค่า P-value มีค่า < 0.0005 แสดงถึงค่าเคโมลต์ (K) มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) อย่างมีนัยสำคัญ

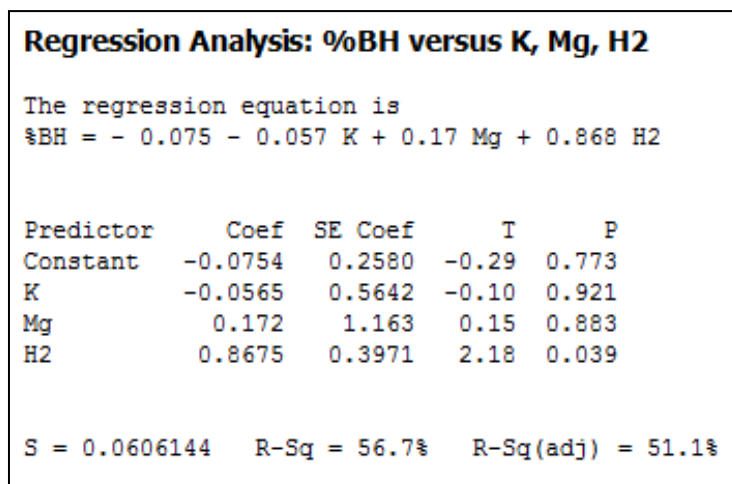
และเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้แผนผังการกระจาย ระหว่างค่าเคโมลต์ (K) กับจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) ดังรูปที่ 4.46 พบว่ามีความสัมพันธ์แปรผันตามกัน คือ เมื่อค่าเคโมลต์ (K) สูงขึ้น จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) จะสูงขึ้นด้วย โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น คือ $IC = 339.93K - 121.64$ และมีค่า $R^2 = 0.970$



รูปที่ 4.67 แสดงความสัมพันธ์ค่าเคโมลต์ (K) และจำนวนสิ่งปลอมปนบริเวณเกท (IC)

4.4.3 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)

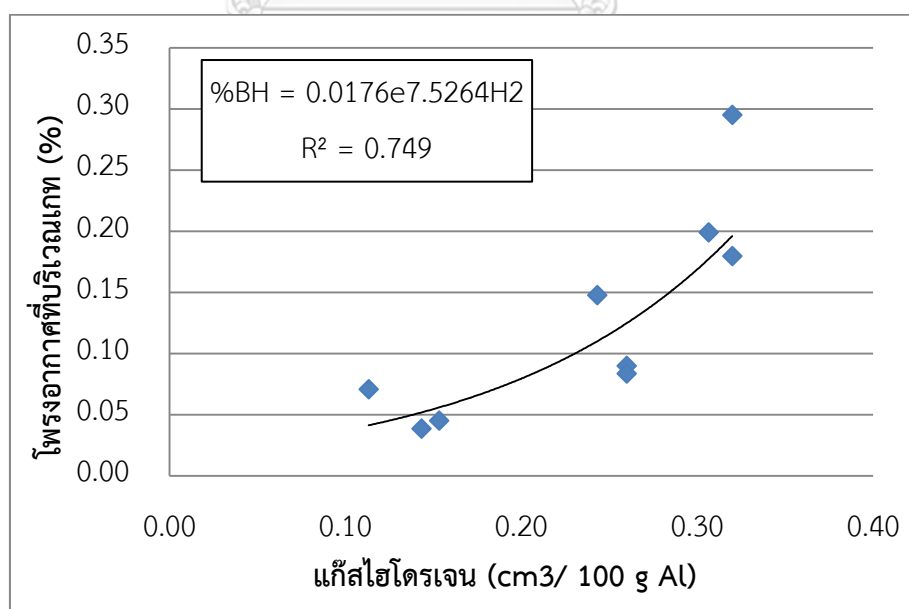
เมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม ได้แก่ค่าเคโมลต์ (K), องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.68 เนื่องจากค่า R^2 มีค่าไม่เข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณไม่มีความเหมาะสมนำไปใช้งานได้ และเมื่อทดลองแทนค่าเคโมลต์ (K) เท่ากับ 0.54 องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) เท่ากับ 0.166 และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เท่ากับ 0.26 ผลลัพธ์เท่ากับ 0.15% นำผลรับที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าทดลองจริง พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนแสดงดังเท่ากับ 64.58%



รูปที่ 4.68 ผลการวิเคราะห์ Regression ของโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยโปรแกรม

Minitab

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้ คือ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีความสัมพันธ์ต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ไปในทิศทางเดียวกัน คือเมื่อแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เพิ่มสูงขึ้น โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีผลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) โดยที่ ค่า P-value เท่ากับ 0.039 แสดงถึงแก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีอิทธิพลต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) อย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ 4.69 แสดงความสัมพันธ์แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)

และเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้แผนผังการกระจาย ระหว่างค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) กับ โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) ดังรูปที่ 4.69 พบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบเอ็กซีโพเนนเชียล โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ $\%BH = 0.0176e^{7.5264H_2}$ และมีค่า $R^2 = 0.749$

4.4.4 ผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมที่มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

เมื่อทำการวิเคราะห์สหสัมพันธ์และผลสรุปสมการความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม ได้แก่ค่าเคโมลด์ (K), องค์กรประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg), แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ที่มีผลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 4.70 เนื่องจากค่า R^2 มีค่าไม่เข้าใกล้ 1 จึงคาดว่าสมการการประมาณนี้ไม่เหมาะสมนำไปใช้งานได้ และเมื่อทดลองแทนค่าเคโมลด์ (K) เท่ากับ 0.54 องค์กรประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) เท่ากับ 0.166 และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เท่ากับ 0.26 ผลลัพธ์เท่ากับ 9 นำผลรับที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าทดลองจริง พิจารณาค่าความคลาดเคลื่อน เท่ากับ 51.25%

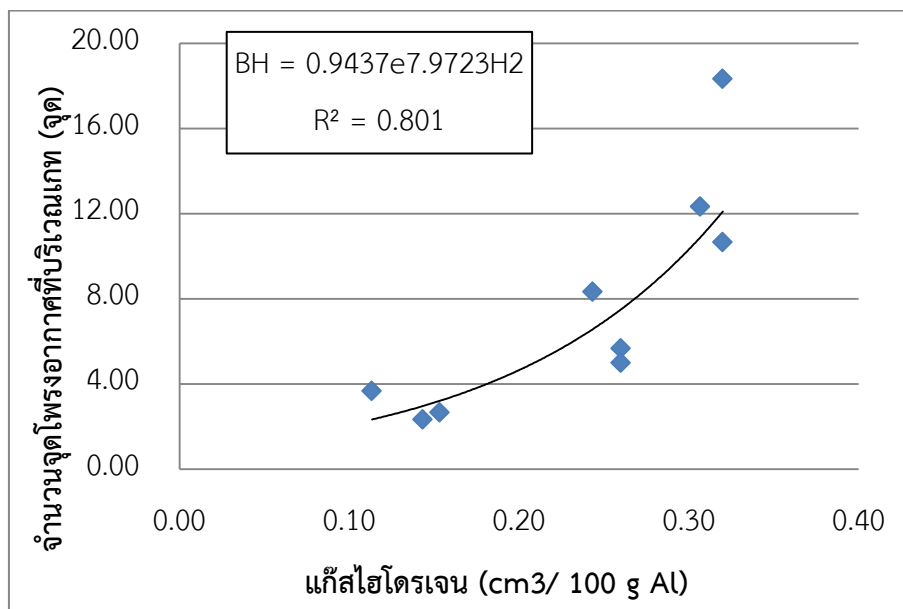
Regression Analysis: BH versus K, Mg, H2				
The regression equation is				
BH = 1.8 - 10.4 K - 18.2 Mg + 61.2 H2				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1.85	14.76	0.13	0.901
K	-10.38	32.28	-0.32	0.751
Mg	-18.17	66.53	-0.27	0.787
H2	61.25	22.72	2.70	0.013
S = 3.46826 R-Sq = 63.0% R-Sq(adj) = 58.2%				

รูปที่ 4.70 ผลการวิเคราะห์ Regression ของจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

โดยโปรแกรม Minitab

เมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การถดถอย (Regression Coefficient) สรุปได้ดังนี้ คือ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีความสัมพันธ์ต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อแก๊สไฮโดรเจน (H_2) เพิ่มสูงขึ้น จำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) จะสูงขึ้นด้วย และเมื่อพิจารณาปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อจำนวนโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีผลต่อจำนวนโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) โดยที่ ค่า P-value เท่ากับ 0.013 แสดงถึงแก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีอิทธิพลต่อจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) อย่างมีนัยสำคัญ

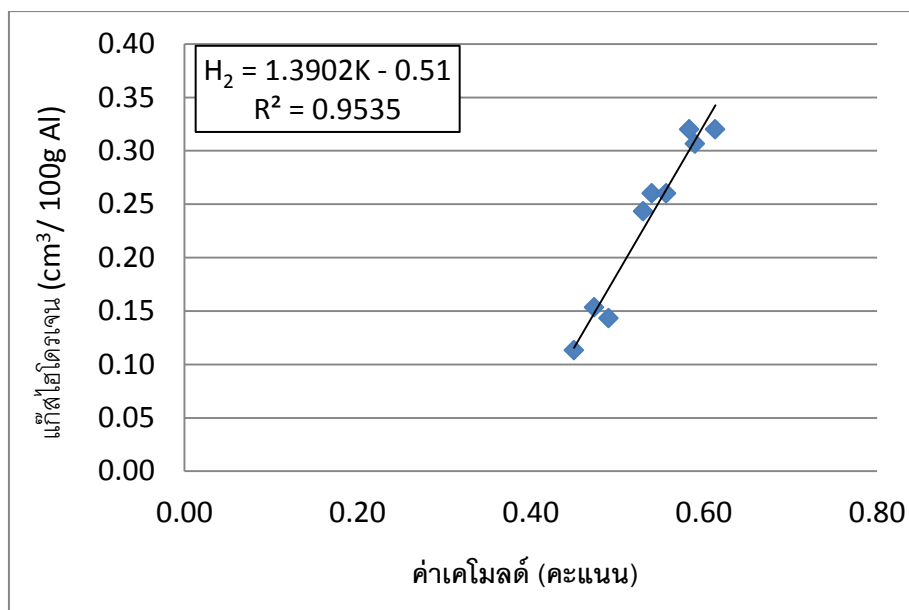
และเมื่อทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ โดยใช้แผนผังการกระจาย ระหว่างค่าแก๊สไฮโดรเจน (H_2) กับ จำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) ดังรูปที่ 4.71 พบว่ามีความสัมพันธ์ในรูปแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล โดยมีสมการความสัมพันธ์ คือ $BH = 0.9437e^{7.9723H_2}$ และมีค่า $R^2 = 0.801$



รูปที่ 4.71 แสดงความสัมพันธ์แก๊สไฮโดรเจน (H_2) และจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)

4.5 ผลของความสัมพันธ์ของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม

เมื่อพิจารณาผลของคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม ที่มีอิทธิพลต่อคุณภาพของชิ้นงานฉีดอย่างมีนัยสำคัญ คือ ค่าเคโมลต์ (K) และ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังนั้นจึงนำค่าทั้งสองนี้มาวิเคราะห์ความสัมพันธ์โดยใช้แผนผังการกระจาย ระหว่างค่าเคโมลต์ (K) และ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) ดังรูปที่ 4.72 พบว่ามีความสัมพันธ์แปรผันตามกัน คือ เมื่อค่าเคโมลต์ (K) สูงขึ้น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) จะสูงขึ้นด้วย โดยมีสมการความสัมพันธ์เชิงเส้น คือ $H_2 = 1.3902K - 0.51$ และมีค่า $R^2 = 0.936$



รูปที่ 4.72 แสดงความสัมพันธ์ค่าเคโมลต์ (K) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂)

4.6 สรุปผลของสัดส่วนที่มีผลต่อคุณภาพของน้ำอลูมิเนียมและคุณภาพของชิ้นงานฉีดยา

จากการวิเคราะห์ผลการทดลอง สามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนผสมอลูมิเนียม ที่มีต่อตัวแปรตอบสนองด้านคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม และด้านคุณภาพของชิ้นงานฉีดยา ได้จากสมการแสดงความสัมพันธ์ที่ตัดปัจจัยที่ไม่มีนัยสำคัญออกได้ดังตารางที่ 4.15 และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตอบสนองด้านคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม และตัวแปรตอบสนองด้านคุณภาพของชิ้นงานฉีดยา พบว่าค่าเคโมลต์ (K) มีความสัมพันธ์ต่อสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC) และจำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC) อย่างมีนัยสำคัญ แก๊สไฮโดรเจน (H₂) มีความสัมพันธ์ต่อโพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH) และจำนวนจุดโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH) อย่างมีนัยสำคัญ สามารถสรุปความสัมพันธ์ได้จากสมการดังตารางที่ 4.16 เมื่อค่าเคโมลต์ (K) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตอบสนองด้านคุณภาพของชิ้นงานฉีดยาอย่างมีนัยสำคัญ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคโมลต์ (K) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂) สามารถแสดงได้สมการดังตารางที่ 4.17

ตารางที่ 4.15 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างส่วนผสมลูมิเนียมต่อคุณภาพของน้ำลูมิเนียม และคุณภาพของชิ้นงานฉีดยุติ

ประเภทตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	ค่า R ² (adj) (%)
ค่าเคโมลต์ (K)	$K = 0.4257 + 0.0062R_1 + 0.00032 R_2$	91.3
องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg)	$Mg = 0.1676$	0
แก๊สไฮโดรเจน (H ₂)	$H_2 = 0.1461 + 0.00089 R_1$	89.8
สิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)	$\%IC = 0.1911 + 0.00423 R_1 + 0.00351 R_2$	96.4
จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)	$IC = 15.14 + 0.2067 R_1 + 0.166 R_2$	97.0
โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)	$\%BH = 0.04095 + 0.00175 R_1 - 0.000001 R_1 * R_2$	80.9
จำนวนโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	$BH = 2.222 + 0.110 R_1 - 0.00037 R_1 * R_2$	84.1

ตารางที่ 4.16 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างคุณภาพของน้ำลูมิเนียมและคุณภาพของชิ้นงานฉีดยุติ

ประเภทตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	ค่า R ² (adj) (%)
สิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (%IC)	$\%IC = 6.941K - 2.581$	94.7
จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่บริเวณเกท (IC)	$IC = 339.93K - 121.64$	97.0
โพรงอากาศที่บริเวณเกท (%BH)	$\%BH = 0.0176e^{7.5264H_2}$	74.9
จำนวนโพรงอากาศที่บริเวณเกท (BH)	$BH = 0.9437e^{7.9723H_2}$	80.1

ตารางที่ 4.17 สรุปความสัมพันธ์ระหว่างค่าเคโมลต์ (K) และแก๊สไฮโดรเจน (H₂)

ประเภทตัวแปรตอบสนอง	สมการความสัมพันธ์	ค่า R ² (adj) (%)
แก๊สไฮโดรเจน (H ₂)	$H_2 = 1.3902K - 0.51$	93.6

4.7 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการศึกษา

นำข้อมูลก่อนทำการศึกษาของโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งในขณะนั้นไม่มีการกำหนดควบคุม ส่วนผสมในการเติมอูมิเนียมที่ชัดเจนมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้ในระหว่างทำการศึกษา โดยใช้เกณฑ์พิจารณาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดจากการเกิดเปอร์เซ็นต์ของเสียที่น้อยที่สุด ซึ่งเงื่อนไขการผสมที่ได้ผลดีที่สุดในช่วงการศึกษา คือเงื่อนไขการผสมที่มี $I=100$, $R_1=0$, $R_2=100$ และผลหลังการศึกษา ซึ่งทางโรงงานกรณีศึกษาได้ทดลองใช้เงื่อนไขการผสม 2 รูปแบบ คือแบบแรก $I=100$, $R_1=0$, $R_2=100$ ซึ่งได้ผลการศึกษาที่เหมาะสมที่สุด และแบบที่ 2 คือ $I=100$, $R_1=0$, $R_2=150$ โดยผลการเปรียบเทียบข้อมูลแสดงในตารางที่ 4.18

ข้อมูลก่อนและหลังการศึกษานั้น เป็นข้อมูลผลจากที่โรงงานกรณีศึกษาใช้งาน โดยข้อมูลก่อนการศึกษาเป็นผลค่าเฉลี่ยจากช่วงเดือน ก.ค.-ธ.ค. 58 และข้อมูลหลังการศึกษาที่มีสัดส่วนผสมเป็น $I=100$, $R_1=0$, $R_2=100$ นั้นเป็นข้อมูลเฉลี่ยจากช่วงการผลิต 30 กะการทำงานในช่วงเดือน มิ.ย.60 กับข้อมูลหลังการศึกษาที่มีสัดส่วนผสมเป็น $I=100$, $R_1=0$, $R_2=150$ นั้นเป็นข้อมูลเฉลี่ยจากช่วงการผลิต 30 กะการทำงานในช่วงเดือน ต.ค.60 โดยการนำข้อมูลจำนวนจุดสิ่งปลอมปน และจำนวนจุดโพรงอากาศมาเปรียบเทียบนั้น เป็นผลการคำนวณจากการเฉลี่ยต่อการผลิตชิ้นงานจำนวน 5,200 ชิ้น ซึ่งเป็นเงื่อนไขเดียวกันกับจำนวนชิ้นงานฉีดยาที่ใช้ในการทำการศึกษา

ผลจากการเปรียบเทียบพบว่าผลก่อนการศึกษานั้นมีเปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปน ซึ่งประกอบด้วยสิ่งปลอมปนที่เกท และโพรงอากาศที่เกท รวมกันอยู่ที่ 2.25% และผลหลังการศึกษาของเสียประเภทสิ่งปลอมปนลดลงเหลือเพียง 0.49% ในเงื่อนไขที่พิจารณาว่าเหมาะสมที่สุด โดยในขณะที่ทำการศึกษาของเสียดังกล่าวมีเปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนทั้ง 2 ประเภทย่อยรวมกันเป็น 0.66% และมีของเสียรวมประเภทอื่นๆ เป็น 1.27% ซึ่งลดลงจาก 5.02%

ทั้งนี้โรงงานกรณีศึกษาได้ทดลองการใช้งานส่วนผสม $I=100$, $R_1=0$, $R_2=150$ ซึ่งให้ผลลัพธ์ในการทดลองที่เกิดของเสียน้อยที่สุดเป็นลำดับถัดมา โดยผลลัพธ์เป็นเปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปน และโพรงอากาศ รวมกันหลังการศึกษาเป็น 0.55% และมีของเสียรวมประเภทอื่นๆ เป็น 0.94%

ตารางที่ 4.18 เปรียบเทียบผลก่อน ระหว่าง และหลังการศึกษา

หัวข้อและรายการเปรียบเทียบ ผล ; หน่วย	ก่อนศึกษา	ผล การศึกษา	หลัง ศึกษา	ผล การศึกษา	หลัง ศึกษา
1. สัตส่วนผสม					
- อลูมิเนียมใหม่ (I) ; phi	ไม่มีการ กำหนด ชัดเจน	I = 100	I = 100	I = 100	I = 100
- อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการ ภายนอก (R ₁) ; phi		R ₁ = 0	R ₁ = 0	R ₁ = 0	R ₁ = 0
- อลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการ ภายใน (R ₂) ; phi		R ₂ = 100	R ₂ = 150	R ₂ = 150	R ₂ = 150
2. คุณภาพน้ำอลูมิเนียม					
- เคโมลต์ (K) ; คะแนน	0.55	0.47	0.44	0.47	0.45
- แก๊สไฮโดรเจน (H ₂) ; ลบ.ชม./ 100 กรัมของอลูมิเนียม	0.25	0.11	0.11	0.15	0.1
- ค่าองค์ประกอบแมกนีเซียม (Mg) ; %โดยน้ำหนัก	0.164	0.16	0.161	0.17	0.161
3. คุณภาพชิ้นงานฉีด					
- เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่ง ปลอมปนที่เกท (%IC) ; %	2.20	0.59	0.44	0.74	0.48
- เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภท โพรงอากาศที่เกท (%BH) ; %	0.5	0.07	0.05	0.04	0.07
- จำนวนจุดของสิ่งปลอมปนที่ เกท (IC) ; จำนวนจุด	128	32	23	41	27
- จำนวนจุดของโพรงอากาศที่ เกท (BH) ; จำนวนจุด	28	4	3	3	4
- เปอร์เซ็นต์ของเสียรวมประเภท อื่นๆ ; %	5.02	1.27	0.89	1.27	0.94

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนของอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) และอลูมิเนียมที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่มีต่อคุณภาพน้ำอลูมิเนียม และคุณภาพชิ้นงานฉีด ได้ผลสรุปดังต่อไปนี้

1. อิทธิพลของส่วนผสมอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่ผ่านกระบวนการภายนอก (R_1) ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อคุณภาพน้ำอลูมิเนียมได้แก่ ค่าเคโมลต์ (K) และปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H_2) และมีผลต่อคุณภาพชิ้นงานฉีด ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC), จำนวนจุดของสิ่งปลอมปนที่เกท (IC), เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทโพรงอากาศที่เกท (%BH) และจำนวนจุดของโพรงอากาศที่เกท (BH) ที่แปรผันตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

2. อิทธิพลของส่วนผสมอลูมิเนียมหลอมซ้ำที่ผ่านกระบวนการภายใน (R_2) ที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อคุณภาพน้ำอลูมิเนียมได้แก่ ค่าเคโมลต์ (K) และมีผลต่อคุณภาพชิ้นงานฉีด ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC), จำนวนจุดสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) ที่แปรผันตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

3. ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียมประเภทเคโมลต์ (K) มีความสัมพันธ์กับผลของคุณภาพชิ้นงานฉีด ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) และจำนวนจุดของสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

4. ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำอลูมิเนียมประเภทปริมาณแก๊สไฮโดรเจน (H_2) มีความสัมพันธ์กับผลของคุณภาพชิ้นงานฉีด ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทโพรงอากาศที่เกท (%IC) และจำนวนจุดของโพรงอากาศที่เกท (IC) โดยมีความสัมพันธ์ในลักษณะแปรผันตามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

5. เงื่อนไขการผสมจากการศึกษาที่ได้ผลดีที่สุดคือ $I=100$, $R_1=0$, $R_2=100$ ซึ่งได้ผลของคุณภาพน้ำอลูมิเนียม ได้แก่ เคโมลต์ (K) = 0.45 คะแนน, แก๊สไฮโดรเจน (H_2) = 0.11 ลบ.ซม./100 กรัมของอลูมิเนียม, องค์ประกอบธาตุแมกนีเซียม (Mg) = 0.160 %โดยน้ำหนัก และผลของคุณภาพชิ้นงาน ได้แก่ เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสิ่งปลอมปนที่เกท (%IC) = 0.07 %, จำนวนจุดของสิ่งปลอมปนที่เกท (IC) = 32 จุด, เปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทโพรงอากาศที่เกท (%BH) = 0.07 % และจำนวนจุดของโพรงอากาศที่เกท (BH) = 4 จุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษานี้ได้ทำการศึกษาถึงผลของคุณภาพน้ำอลูมิเนียม และคุณภาพชิ้นงานฉีดยา ซึ่งระหว่างการศึกษา ผลของค่าเคโมลต์ (K) และ แก๊สไฮโดรเจน (H_2) พบว่ามีลักษณะที่แปรตามกัน และมีความสัมพันธ์กัน ซึ่งสามารถนำไปศึกษาต่อได้ เพื่อลดขั้นตอนการตรวจสอบคุณภาพของน้ำอลูมิเนียม ซึ่งอาจทำการตรวจสอบเพียงค่าเคโมลต์ (K) และอาจสามารถนำมาอ้างอิง เพื่อการคาดการณ์ผลของคุณภาพน้ำอลูมิเนียมประเภทอื่นๆ เช่น แก๊สไฮโดรเจน (H_2) รวมถึงผลของคุณภาพของชิ้นงานฉีดยาได้



รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เจริญ สว่างวงศ์. (2555). การศึกษาอิทธิพลของปัจจัยควบคุมการผลิตแบบไดแคสติดต่อข้อบกพร่องของชิ้นงาน. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ไพลิน กระจ่างพิภพ. (2558). การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตของกระบวนการผลิตชิ้นส่วนขาเทียมได้เข้า. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- กิตติศักดิ์ พลอยพานิชเจริญ. (2550). หลักการการควบคุมคุณภาพ (พ. 1 Ed.). กรุงเทพมหานคร: สมาคม ส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย – ญี่ปุ่น).
- จิระเชษฐ์ บุญแก้ว. (2552). อิทธิพลของการผสมพอลิโพรพิลีนที่นำกลับมาหลอมใหม่ต่อคุณสมบัติเชิงกลและดัชนีการหลอมไหล. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัยยา ฉวยฉาย. (2552). การออกแบบการทดลองแก้ไขปัญหาการฉีดขึ้นงานพลาสติกในงานผลิตชิ้นส่วนรถจักรยานยนต์. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ณัฐธริญา ขาดิกานนท์ (2555). การทดสอบคุณลักษณะของปูนทนไฟที่พัฒนาขึ้น. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปารเมศ ชูติมา. การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม, ก. ส., 2545. (2545). การออกแบบการทดลองทางวิศวกรรม (พ. 1 Ed.). กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สันติ พุ่มกระจ่าง. (2552). การวิเคราะห์ทางสถิติสำหรับพื้นผิวตอบสนองคู่ของกระบวนการตีหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- สุพิชญา มหิทธิหาญ. (2559). การศึกษาการใช้แอปพลิเคชันการวินิจฉัยสีบนมือถือเพื่อปรับปรุงการวิเคราะห์ปริมาณแคลเซียมในน้ำตัวอย่าง. (วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต), ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Alchalabi, R., Meng, F., & Peel, A. (2002). *Furnace operation optimization via enhanced bath circulation: Technologies for production increase and dross reduction*. Paper presented at the LIGHT METALS-WARRENDALE-PROCEEDINGS-.
- Beichner, F. L. (2002). *Efficiency Evaluation of Melting Aluminum Furnaces*. Paper presented at the LIGHT METALS-WARRENDALE-PROCEEDINGS-.
- Cochran, C., Belitskus, D., & Kinosz, D. (1977). Oxidation of aluminum-magnesium melts in air, oxygen, flue gas, and carbon dioxide. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 8(1), 323-332.
- Das, S. K., & Ningileri, S. (2006). *Reduction of oxidative melt loss of aluminum and its alloys*. Retrieved from
- Moser, C. J. (2016). Furnace Dross—Its Formation and Recovery *Essential Readings in Light Metals* (pp. 150-156): Springer.
- Neff, D. V. (2014). Improving die casting melt quality and casting results with melt quality analysis and filtration: Metallics Systems Co., Solon, OH.
- Rossel, H. (1990). Fundamental investigations about metal loss during remelting of extrusion and rolling fabrication scrap. *Light Metals*, 721-729.
- Schneiderman, A. M. (1986). Optimum quality costs and zero defects: are they contradictory concepts. *Quality Progress*, 19(11), 28-31.
- Stewart, D. (2002). *Aluminum melting technology-current trends and future opportunities*. Paper presented at the LIGHT METALS-WARRENDALE-PROCEEDINGS-.
- Wannasin, J., Schwam, D., & Wallace, J. (2007). Evaluation of methods for metal cleanliness assessment in die casting. *Journal of materials processing technology*, 191(1), 242-246.



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

1-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยเงื่อนไขการผสมที่ l=100, R1=0, R2=100 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3								
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
K (คะแนน)	1	0.40	0.50	0.50	0.40	0.44	0.44	0.40	0.60	0.40	0.20	0.50	0.60	0.50	0.40	0.30	0.60	0.50	0.70	0.50
	2	0.50	0.40	0.40	0.40	0.42	0.42	0.20	0.40	0.20	0.50	0.40	0.34	0.50	0.40	0.30	0.40	0.30	0.30	0.38
	3	0.30	0.60	0.50	0.40	0.46	0.46	0.40	0.60	0.50	0.30	0.50	0.46	0.50	0.60	0.60	0.50	0.40	0.60	0.52
	4	0.40	0.40	0.50	0.60	0.48	0.48	0.50	0.50	0.60	0.50	0.20	0.46	0.46	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.44
	เฉลี่ย	0.40	0.48	0.48	0.45	0.45	0.45	0.38	0.53	0.43	0.43	0.45	0.44	0.50	0.43	0.48	0.40	0.50	0.50	0.46
Mg (%โดย นน.)	1	0.172	0.172	0.171	0.171	0.172	0.172	0.145	0.144	0.164	0.164	0.168	0.157	0.150	0.149	0.174	0.169	0.169	0.169	0.162
	2	0.155	0.155	0.155	0.154	0.155	0.155	0.165	0.148	0.148	0.148	0.145	0.151	0.174	0.173	0.149	0.175	0.152	0.152	0.165
	3	0.151	0.151	0.151	0.150	0.152	0.151	0.165	0.164	0.144	0.144	0.169	0.157	0.170	0.169	0.149	0.148	0.174	0.174	0.162
	4	0.176	0.176	0.176	0.175	0.177	0.176	0.149	0.148	0.168	0.168	0.169	0.160	0.154	0.153	0.170	0.153	0.153	0.153	0.156
	เฉลี่ย	0.163	0.164	0.163	0.163	0.164	0.163	0.156	0.151	0.156	0.156	0.163	0.156	0.162	0.161	0.160	0.161	0.162	0.162	0.161
H2 (ลบ.นม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	1	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.12	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.12	
	2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.12	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10	0.12	
	3	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.12	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.12	
	4	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.12	
	เฉลี่ย	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.15	0.13	0.13	0.10	0.12	0.13	0.13	0.10	0.13	0.13	0.12	

1-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=0, R2=100 หน่วย phi

กัะ	ครัั้งที่	การทลลองครัั้งที่ 1					การทลลองครัั้งที่ 2					การทลลองครัั้งที่ 3					
		รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	
%IC (%)	กลางวัน	0.58	0.58	0.38	0.58	0.54	0.58	0.58	0.77	0.58	0.77	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58	0.58
	กลางคืน	0.58	0.58	0.58	0.58	0.54	0.77	0.58	0.77	0.38	0.62	0.58	0.58	0.96	0.58	0.58	0.65
	เฉลี่ย	0.58	0.58	0.48	0.58	0.54	0.67	0.67	0.67	0.58	0.63	0.58	0.58	0.77	0.58	0.58	0.62
IC (จำนวนจุด)	ครัั้งที่	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รวม
	1	3	3	2	3	3	3	3	4	3	4	3	3	3	3	3	15
	2	4	3	3	3	2	3	4	3	4	4	3	3	5	3	3	17
รวม	7	6	5	6	5	29	6	7	7	7	8	6	6	8	6	6	32
%BH (%)	ครัั้งที่	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	เฉลี่ย
	1	0.19	0.00	0.19	0.00	0.00	0.19	0.19	0.00	0.00	0.19	0.12	0.00	0.19	0.00	0.00	0.04
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.19	0.00	0.19	0.19	0.12	0.00	0.00	0.00	0.19	0.04
รวม	0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.06	0.10	0.19	0.00	0.10	0.12	0.00	0.10	0.00	0.10	0.10	0.04
BH (จำนวนจุด)	ครัั้งที่	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รันทที่1	รันทที่2	รันทที่3	รันทที่4	รันทที่5	รวม
	1	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1
	2	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
รวม	1	0	1	0	1	3	1	2	0	1	2	0	1	0	1	2	2

2-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยเงื่อนไขการผสมที่ l=100, R1=0, R2=150 หน่วย phi

K (คะแนน)	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3							
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
K (คะแนน)	1	0.40	0.40	0.60	0.40	0.70	0.50	0.40	0.40	0.50	0.50	0.60	0.48	0.50	0.50	0.60	0.40	0.60	0.52
	2	0.60	0.50	0.50	0.40	0.50	0.50	0.60	0.40	0.40	0.40	0.40	0.44	0.50	0.40	0.70	0.50	0.40	0.50
	3	0.40	0.30	0.70	0.40	0.40	0.44	0.50	0.50	0.40	0.40	0.50	0.46	0.40	0.50	0.50	0.50	0.70	0.52
	4	0.30	0.40	0.50	0.50	0.50	0.44	0.50	0.30	0.60	0.50	0.40	0.46	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.42
	เฉลี่ย	0.43	0.40	0.58	0.43	0.53	0.47	0.50	0.40	0.48	0.45	0.48	0.46	0.45	0.55	0.45	0.45	0.55	0.49
Mg (%โดย นน.)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
	1	0.165	0.164	0.191	0.186	0.186	0.178	0.176	0.176	0.175	0.175	0.176	0.176	0.163	0.162	0.189	0.184	0.183	0.176
	2	0.191	0.190	0.164	0.192	0.167	0.181	0.159	0.159	0.158	0.158	0.159	0.159	0.189	0.188	0.162	0.190	0.166	0.179
	3	0.187	0.186	0.164	0.163	0.192	0.178	0.155	0.155	0.154	0.154	0.155	0.155	0.185	0.184	0.162	0.161	0.189	0.176
	4	0.169	0.168	0.187	0.168	0.168	0.172	0.180	0.181	0.180	0.180	0.181	0.180	0.167	0.166	0.185	0.167	0.166	0.170
	เฉลี่ย	0.178	0.177	0.176	0.177	0.178	0.177	0.167	0.168	0.167	0.167	0.168	0.167	0.176	0.175	0.174	0.175	0.176	0.175
H2 (ลบ.ขม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
	1	0.20	0.10	0.20	0.10	0.30	0.18	0.10	0.10	0.20	0.10	0.20	0.14	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.12
	2	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.12	0.10	0.10	0.10	0.30	0.20	0.16	0.20	0.10	0.20	0.30	0.10	0.18
	3	0.10	0.20	0.10	0.10	0.20	0.14	0.20	0.20	0.10	0.10	0.14	0.14	0.20	0.10	0.20	0.10	0.20	0.16
	4	0.30	0.10	0.20	0.10	0.30	0.20	0.10	0.10	0.20	0.10	0.10	0.12	0.30	0.30	0.10	0.10	0.18	
	เฉลี่ย	0.18	0.13	0.18	0.10	0.23	0.16	0.13	0.13	0.15	0.15	0.14	0.14	0.20	0.18	0.15	0.15	0.13	0.16

2-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=0, R2=150 หน่วย phi

	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3									
	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
%IC (%)	กลางวัน	1	0.77	0.77	0.58	0.77	0.65	0.77	0.58	0.77	0.77	0.58	0.69	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
	กลางคืน	2	0.77	0.96	0.77	1.15	0.88	0.58	0.77	1.35	0.77	0.58	0.81	0.77	0.58	0.58	0.38	0.77	0.62	0.62
	เฉลี่ย		0.77	0.87	0.67	0.96	0.77	0.67	0.67	1.06	0.77	0.58	0.75	0.77	0.67	0.67	0.58	0.77	0.69	0.69
IC (จำนวนจุด)	กลางวัน	1	4	4	5	4	19	4	3	4	4	3	18	4	4	4	5	4	21	21
	กลางคืน	2	4	5	4	6	23	6	5	7	4	3	25	4	4	3	3	4	18	18
	รวม		8	9	9	10	42	10	8	11	8	6	43	8	8	7	8	8	39	39
%BH (%)	กลางวัน	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.19	0.00	0.00	0.19	0.00	0.08	0.08
	กลางคืน	2	0.00	0.19	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.19	0.19	0.00	0.00	0.12	0.12
	เฉลี่ย		0.00	0.10	0.00	0.00	0.02	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.19	0.10	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10
BH (จำนวนจุด)	กลางวัน	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	2	2
	กลางคืน	2	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	4	4
	รวม		0	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	2	2	1	1	0	6	6

3-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยเงื่อนไขการผสมที่ l=100, R1=0, R2=200 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1										การทดลองครั้งที่ 2										การทดลองครั้งที่ 3									
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย						
		0.60	0.40	0.50	0.50	0.60	0.52	0.40	0.50	0.40	0.50	0.60	0.46	0.40	0.50	0.40	0.50	0.60	0.48	0.40	0.50	0.40	0.50	0.60	0.46						
K (คะแนน)	กลางวัน	2	0.50	0.60	0.40	0.60	0.40	0.50	0.40	0.50	0.70	0.40	0.50	0.60	0.40	0.50	0.40	0.50	0.48	0.40	0.50	0.40	0.50	0.60	0.50						
	กลางคืน	3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40	0.48	0.48	0.40	0.40	0.60	0.40	0.50	0.48	0.40	0.50	0.40	0.50	0.60	0.50						
		4	0.60	0.40	0.50	0.50	0.40	0.48	0.48	0.53	0.48	0.50	0.50	0.48	0.45	0.55	0.48	0.50	0.49	0.45	0.50	0.45	0.53	0.48	0.48						
	เฉลี่ย		0.55	0.48	0.48	0.53	0.48	0.50	0.48	0.53	0.48	0.50	0.49	0.48	0.45	0.55	0.48	0.50	0.49	0.45	0.50	0.45	0.53	0.48	0.48						
Mg (%โดย น.น.)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย						
	1	0.153	0.153	0.173	0.173	0.178	0.166	0.164	0.165	0.164	0.164	0.165	0.164	0.165	0.164	0.164	0.164	0.165	0.164	0.147	0.146	0.161	0.161	0.171	0.157						
	2	0.174	0.157	0.156	0.156	0.153	0.159	0.148	0.148	0.148	0.148	0.149	0.148	0.148	0.148	0.148	0.148	0.149	0.148	0.162	0.155	0.155	0.154	0.147	0.154						
	3	0.174	0.174	0.152	0.152	0.179	0.166	0.144	0.145	0.144	0.144	0.145	0.144	0.144	0.145	0.144	0.144	0.145	0.144	0.162	0.161	0.146	0.146	0.171	0.157						
4	0.157	0.157	0.178	0.177	0.179	0.170	0.168	0.169	0.168	0.168	0.169	0.168	0.168	0.169	0.168	0.168	0.169	0.168	0.155	0.155	0.170	0.170	0.171	0.164							
เฉลี่ย	0.165	0.160	0.165	0.165	0.172	0.165	0.156	0.157	0.156	0.156	0.157	0.156	0.156	0.157	0.156	0.156	0.157	0.156	0.156	0.154	0.158	0.158	0.165	0.158							
H2 (ลบ.ขม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย						
	1	0.20	0.10	0.30	0.10	0.10	0.16	0.20	0.30	0.10	0.10	0.10	0.16	0.20	0.30	0.10	0.10	0.10	0.16	0.10	0.30	0.10	0.10	0.10	0.14						
	2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.20	0.12	0.10	0.10	0.10	0.20	0.30	0.16	0.20	0.10	0.20	0.10	0.10	0.14						
	3	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.12	0.20	0.10	0.30	0.10	0.10	0.12	0.20	0.10	0.30	0.10	0.10	0.16	0.10	0.20	0.10	0.10	0.10	0.12						
4	0.30	0.10	0.20	0.10	0.10	0.16	0.10	0.30	0.10	0.10	0.10	0.16	0.10	0.30	0.10	0.10	0.20	0.16	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.12							
เฉลี่ย	0.18	0.13	0.18	0.10	0.13	0.14	0.15	0.20	0.15	0.13	0.18	0.16	0.15	0.20	0.15	0.13	0.18	0.16	0.13	0.18	0.13	0.13	0.10	0.13							

3-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=0, R2=200 หน่วย phi

	การทดลองครั้งที่ 1										การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3				
	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
%IC (%)	กะ																			
	กลางวัน	1	0.77	0.77	0.77	0.58	0.81	0.96	0.77	0.96	1.15	0.77	0.92	0.77	0.96	0.77	0.96	0.58	0.81	
	กลางคืน	2	0.58	0.96	1.15	0.77	0.88	0.77	1.15	0.96	0.77	1.35	1.00	0.96	0.96	0.77	1.15	0.96		
	เฉลี่ย		0.67	0.87	0.96	0.67	0.85	0.87	0.96	0.96	0.96	1.06	0.96	0.87	0.96	0.87	0.87	0.87	0.88	
IC (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม
	กลางวัน	1	4	4	4	3	6	21	5	4	5	6	4	24	4	5	4	5	3	21
	กลางคืน	2	3	5	6	4	5	23	4	6	5	4	7	26	5	5	5	5	6	26
	รวม		7	9	10	7	11	44	9	10	10	10	11	50	9	10	9	10	9	47
%BH (%)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
	กลางวัน	1	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	กลางคืน	2	0.00	0.19	0.00	0.00	0.00	0.04	0.19	0.00	0.00	0.00	0.19	0.08	0.00	0.00	0.19	0.00	0.00	0.04
	เฉลี่ย		0.00	0.10	0.10	0.00	0.04	0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.06	0.06	0.00	0.10	0.10	0.00	0.00	0.02
BH (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม
	กลางวัน	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	กลางคืน	2	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	2	3	0	0	1	0	0	1
	รวม		0	1	1	0	2	1	0	1	0	2	4	4	0	0	1	0	0	1

4-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยวิธีไนไตรต์ไนซัลไฟด์ I=100, R1=100, R2=100 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3								
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
K (คะแนน)	กลางวัน	1	0.50	0.40	0.50	0.40	0.60	0.48	0.50	0.60	0.50	0.50	0.56	0.50	0.70	0.60	0.50	0.50	0.50	0.56
		2	0.60	0.50	0.50	0.60	0.40	0.50	0.50	0.70	0.50	0.50	0.54	0.50	0.40	0.60	0.60	0.50	0.60	0.58
		3	0.50	0.50	0.70	0.60	0.50	0.56	0.60	0.70	0.50	0.50	0.54	0.50	0.40	0.60	0.60	0.50	0.60	0.50
		4	0.40	0.60	0.50	0.80	0.60	0.58	0.40	0.50	0.40	0.60	0.48	0.50	0.50	0.50	0.60	0.40	0.50	0.50
	เฉลี่ย	0.50	0.50	0.55	0.58	0.53	0.53	0.50	0.58	0.45	0.55	0.52	0.53	0.55	0.53	0.53	0.53	0.53	0.54	
Mg (%โดย น.)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
		1	0.208	0.208	0.184	0.183	0.214	0.199	0.162	0.161	0.183	0.182	0.188	0.175	0.168	0.168	0.190	0.167	0.196	0.178
		2	0.215	0.187	0.213	0.213	0.184	0.202	0.184	0.166	0.165	0.165	0.161	0.168	0.191	0.172	0.172	0.195	0.196	0.185
		3	0.183	0.214	0.209	0.208	0.183	0.200	0.184	0.183	0.161	0.160	0.188	0.175	0.191	0.191	0.167	0.190	0.195	0.187
	4	0.188	0.188	0.189	0.188	0.209	0.192	0.166	0.165	0.188	0.187	0.189	0.179	0.173	0.172	0.195	0.171	0.168	0.176	
	เฉลี่ย	0.198	0.199	0.199	0.198	0.197	0.198	0.174	0.169	0.174	0.174	0.182	0.174	0.181	0.176	0.181	0.181	0.181	0.189	0.181
H2 (ลบ.ขม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
		1	0.30	0.20	0.30	0.30	0.40	0.30	0.10	0.20	0.20	0.20	0.10	0.16	0.30	0.20	0.20	0.20	0.30	0.24
		2	0.10	0.40	0.40	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.20	0.22	0.20	0.30	0.10	0.20	0.20	0.20
		3	0.30	0.20	0.30	0.20	0.20	0.24	0.20	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.20	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30
	4	0.20	0.30	0.20	0.20	0.10	0.20	0.20	0.30	0.20	0.20	0.30	0.20	0.24	0.20	0.20	0.20	0.30	0.20	
	เฉลี่ย	0.23	0.28	0.30	0.25	0.25	0.26	0.18	0.30	0.23	0.25	0.25	0.20	0.23	0.28	0.20	0.25	0.25	0.24	

4-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=100, R2=100 หน่วย phi

	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3								
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
%IC (%)	กลางวัน	1	0.77	0.96	0.96	1.15	0.96	1.15	0.77	1.15	0.96	1.04	0.96	1.15	0.58	0.77	0.77	0.96	0.96	0.81
	กลางคืน	2	1.15	0.77	0.96	1.15	0.96	0.77	0.96	0.96	0.77	0.85	0.96	0.77	0.77	0.96	1.15	0.96	0.96	0.92
	เฉลี่ย		0.96	0.87	0.96	1.15	0.87	0.96	0.87	0.96	1.06	0.94	0.87	0.96	0.67	0.87	0.87	0.96	0.96	0.87
IC (จำนวนจุด)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	
	กลางวัน	1	4	5	6	5	25	6	4	6	6	5	27	5	3	5	4	5	22	
	กลางคืน	2	6	4	6	4	28	4	5	4	9	4	26	4	4	5	6	6	25	
รวม		10	9	13	12	9	53	10	9	10	15	9	53	9	7	10	10	11	47	
%BH (%)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
	กลางวัน	1	0.19	0.19	0.00	0.19	0.12	0.00	0.38	0.19	0.19	0.00	0.15	0.00	0.19	0.00	0.19	0.19	0.12	
	กลางคืน	2	0.00	0.19	0.38	0.38	0.19	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.04	0.00	0.19	0.19	0.58	0.19	0.27	
เฉลี่ย		0.10	0.19	0.19	0.29	0.00	0.15	0.00	0.19	0.19	0.10	0.10	0.10	0.10	0.19	0.10	0.38	0.19	0.19	
BH (จำนวนจุด)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	
	กลางวัน	1	1	1	1	0	3	0	2	1	1	0	4	0	1	0	1	1	3	
	กลางคืน	2	0	2	2	0	6	0	0	2	0	0	2	1	1	1	3	1	7	
รวม		1	3	2	3	9	0	2	3	1	0	6	1	2	1	4	2	10		

5-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยเงื่อนไขการผสมที่ l=100, R1=100, R2=150 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3				
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5
K (คะแนน)	1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.60	0.50	0.40	0.50	0.60	0.50	0.60	0.50
	2	0.60	0.40	0.60	0.50	0.54	0.50	0.40	0.60	0.40	0.60	0.50	0.60	0.60	0.50	0.58
	3	0.60	0.60	0.70	0.60	0.60	0.60	0.50	0.50	0.70	0.50	0.56	0.60	0.50	0.60	0.54
	4	0.40	0.60	0.50	0.60	0.52	0.50	0.70	0.60	0.50	0.50	0.56	0.60	0.50	0.50	0.54
	เฉลี่ย	0.53	0.53	0.58	0.55	0.54	0.53	0.58	0.53	0.50	0.53	0.58	0.53	0.55	0.53	0.55
Mg (%โดย นน.)	1	0.163	0.162	0.188	0.189	0.166	0.148	0.147	0.172	0.167	0.167	0.160	0.153	0.173	0.178	0.166
	2	0.189	0.184	0.167	0.189	0.162	0.171	0.171	0.148	0.172	0.150	0.163	0.174	0.156	0.153	0.159
	3	0.166	0.185	0.162	0.161	0.166	0.168	0.167	0.147	0.147	0.172	0.160	0.174	0.152	0.179	0.166
	4	0.167	0.185	0.183	0.184	0.190	0.152	0.151	0.168	0.151	0.151	0.155	0.157	0.178	0.179	0.170
	เฉลี่ย	0.171	0.179	0.175	0.181	0.171	0.160	0.159	0.158	0.159	0.160	0.159	0.165	0.165	0.172	0.165
H2 (ลบ. ชม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	1	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.20	0.30	0.20	0.20	0.22	0.30	0.30	0.40	0.32
	2	0.30	0.20	0.30	0.20	0.30	0.26	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.30	0.20	0.30	0.26
	3	0.30	0.20	0.20	0.30	0.30	0.26	0.40	0.30	0.30	0.30	0.32	0.20	0.20	0.30	0.24
	4	0.20	0.30	0.30	0.20	0.20	0.24	0.20	0.20	0.30	0.20	0.22	0.30	0.30	0.30	0.30
	เฉลี่ย	0.25	0.25	0.28	0.25	0.26	0.23	0.28	0.25	0.23	0.24	0.28	0.25	0.28	0.33	0.28

5-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=100, R2=150 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3							
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5			
%IC (%)	กลางวัน	1	0.96	0.96	1.35	0.77	0.96	0.77	0.96	0.96	1.35	0.96	0.96	0.96	1.35	0.96	1.04		
	กลางคืน	2	1.35	1.54	1.15	1.73	1.15	1.15	1.54	1.15	1.15	1.23	1.23	1.54	0.77	1.12			
	เฉลี่ย	เฉลี่ย	1.15	1.25	1.25	0.96	1.19	0.96	1.25	1.06	1.25	1.10	1.10	1.06	0.96	1.08			
IC (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5		
	กลางวัน	1	5	5	7	6	5	4	4	5	6	7	26	5	7	3	6	6	
	กลางคืน	2	8	8	6	6	9	6	6	8	6	6	32	7	6	4	7	32	
รวม	รวม	13	13	13	12	14	65	10	10	13	12	13	58	12	13	11	10	13	59
%BH (%)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5		
	กลางวัน	1	0.38	0.19	0.19	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.19	0.04	0.00	0.00	0.00	0.19	0.12	
	กลางคืน	2	0.00	0.00	0.19	0.38	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.19	0.00	0.00	0.08	
เฉลี่ย	เฉลี่ย	0.19	0.10	0.19	0.19	0.00	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.04	0.00	0.10	0.00	0.10	0.10	
BH (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5		
	กลางวัน	1	2	1	1	0	0	4	0	0	0	1	1	0	2	0	2	4	
	กลางคืน	2	0	0	2	2	0	4	0	0	0	1	1	0	2	1	0	3	
เฉลี่ย	เฉลี่ย	2	1	3	2	0	8	0	0	0	0	2	2	0	4	1	0	7	

6-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ $I=100, R1=100, R2=200$ หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3								
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
%IC (%)	กลางวัน	1.35	0.96	1.54	1.35	1.15	1.27	0.77	1.15	1.35	1.15	1.35	1.15	1.15	1.35	1.54	1.35	1.15	1.15	1.23
	กลางคืน	1.54	1.73	1.35	0.58	1.54	1.35	1.15	1.54	0.96	1.54	1.35	1.35	1.15	1.15	1.15	1.15	1.35	1.19	
	เฉลี่ย	1.44	1.35	1.44	0.96	1.35	1.31	0.96	1.35	1.15	1.35	1.44	1.25	1.25	1.35	1.35	1.25	1.25	1.21	
IC (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม
	กลางวัน	1	7	8	8	7	7	37	5	6	7	7	9	34	4	7	8	7	7	33
	กลางคืน	2	8	11	7	4	8	38	6	8	5	9	8	36	6	6	6	6	7	31
		รวม	15	19	15	11	75	75	11	14	12	16	17	70	10	13	14	13	14	64
%BH (%)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
	กลางวัน	1	0.00	0.00	0.19	0.19	0.00	0.08	0.19	0.00	0.00	0.19	0.19	0.12	0.00	0.00	0.19	0.00	0.38	0.12
	กลางคืน	2	0.00	0.00	0.00	0.38	0.00	0.08	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.04
		เฉลี่ย	0.00	0.00	0.10	0.29	0.00	0.08	0.10	0.19	0.00	0.10	0.10	0.10	0.00	0.00	0.10	0.10	0.19	0.08
BH (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม
	กลางวัน	1	0	0	1	1	0	2	1	0	0	2	1	4	0	0	2	0	2	4
	กลางคืน	2	0	0	0	2	0	2	0	2	0	0	0	2	0	0	0	1	0	1
		เฉลี่ย	0	0	1	3	0	4	1	2	0	2	1	6	0	0	2	1	2	5

7-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยเงื่อนไขการผสมที่ l=100, R1=200, R2=100 หน่วย phi

K (คะแนน)	กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3								
			วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
K (คะแนน)	กลางวัน	1	0.60	0.80	0.50	0.70	0.50	0.62	0.60	0.70	0.60	0.50	0.60	0.58	0.50	0.60	0.50	0.60	0.50	0.60	0.54
		2	0.60	0.70	0.60	0.50	0.70	0.62	0.50	0.60	0.50	0.60	0.56	0.60	0.60	0.50	0.60	0.60	0.50	0.50	0.56
		3	0.50	0.60	0.50	0.50	0.60	0.54	0.50	0.50	0.50	0.70	0.50	0.54	0.50	0.60	0.60	0.70	0.50	0.60	0.62
		4	0.70	0.50	0.50	0.50	0.70	0.58	0.60	0.50	0.70	0.60	0.60	0.60	0.60	0.70	0.50	0.70	0.50	0.70	0.64
Mg (%โดย นน.)	กลางคืน	เฉลี่ย	0.60	0.65	0.53	0.55	0.63	0.59	0.55	0.58	0.58	0.60	0.55	0.57	0.60	0.60	0.58	0.60	0.58	0.60	0.59
		ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
		1	0.150	0.146	0.170	0.171	0.149	0.157	0.145	0.165	0.144	0.148	0.144	0.149	0.160	0.181	0.159	0.163	0.159	0.164	
		2	0.170	0.166	0.147	0.171	0.147	0.160	0.145	0.168	0.164	0.149	0.164	0.158	0.160	0.186	0.181	0.164	0.181	0.174	
H2 (ลบ.นม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	กลางคืน	3	0.150	0.167	0.146	0.146	0.150	0.152	0.144	0.168	0.169	0.148	0.169	0.160	0.159	0.185	0.186	0.163	0.187	0.176	
		4	0.151	0.167	0.166	0.166	0.171	0.164	0.168	0.165	0.164	0.148	0.148	0.159	0.185	0.182	0.180	0.163	0.164	0.175	
		เฉลี่ย	0.155	0.161	0.157	0.163	0.154	0.158	0.150	0.167	0.160	0.148	0.156	0.156	0.166	0.184	0.177	0.163	0.172	0.172	
		ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
H2 (ลบ.นม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	กลางวัน	1	0.30	0.40	0.20	0.40	0.40	0.34	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.20	0.40	0.30	0.28	
		2	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.32	0.30	0.40	0.20	0.30	0.40	0.32	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.32	
		3	0.40	0.30	0.40	0.30	0.30	0.34	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30	0.28	0.30	0.30	0.40	0.40	0.30	0.34	
		4	0.30	0.40	0.30	0.40	0.40	0.36	0.20	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30	0.40	0.34	
H2 (ลบ.นม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	กลางคืน	เฉลี่ย	0.35	0.35	0.30	0.35	0.34	0.28	0.33	0.30	0.28	0.33	0.30	0.30	0.33	0.28	0.35	0.30	0.35	0.32	
		ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
		1	0.30	0.40	0.20	0.40	0.40	0.34	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30	0.28	0.30	0.30	0.40	0.40	0.30	0.34	
		2	0.40	0.30	0.30	0.30	0.30	0.32	0.30	0.40	0.20	0.30	0.40	0.32	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.32	

7-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=200, R2=100 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3								
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
%IC (%)	กลางวัน	1.15	0.77	1.73	1.73	1.54	1.38	1.15	1.15	1.73	1.73	1.73	1.15	1.38	0.96	1.35	1.54	1.92	1.54	1.46
	กลางคืน	0.96	1.35	1.15	1.73	1.35	1.31	0.96	1.35	1.15	1.92	1.35	1.35	1.73	1.54	1.54	1.35	1.15	1.46	
	เฉลี่ย	1.06	1.06	1.44	1.73	1.44	1.35	1.06	1.25	1.44	1.83	1.37	1.35	1.35	1.35	1.44	1.54	1.63	1.35	1.46
IC (จำนวนจุด)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	
	กลางวัน	6	4	9	9	8	36	6	6	9	9	6	36	5	7	8	10	9	39	
	กลางคืน	5	7	6	9	7	34	5	7	6	10	9	37	9	10	8	8	6	41	
รวม	11	11	15	18	15	70	11	13	15	19	15	73	14	17	16	18	15	80		
%BH (%)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
	กลางวัน	0.38	0.00	0.58	0.19	0.19	0.27	0.38	0.19	0.38	0.19	0.38	0.31	0.38	0.19	0.58	0.19	0.77	0.42	
	กลางคืน	0.19	0.38	0.19	0.00	0.38	0.23	0.19	0.38	0.19	0.58	0.19	0.31	0.19	0.38	0.00	0.38	0.19	0.23	
เฉลี่ย	0.29	0.19	0.38	0.10	0.29	0.25	0.29	0.29	0.29	0.38	0.29	0.31	0.29	0.29	0.29	0.29	0.48	0.33		
BH (จำนวนจุด)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	
	กลางวัน	3	0	3	1	2	9	2	2	2	2	3	11	2	2	3	2	4	13	
	กลางคืน	1	3	2	0	2	8	1	2	1	3	1	8	1	2	0	2	1	6	
เฉลี่ย	4	3	5	1	4	17	3	4	3	5	4	19	3	4	3	4	5	19		

8-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยเงื่อนไขการผสมที่ l=100, R1=200, R2=150 หน่วย phi

K (คะแนน)	การทดลองครั้งที่ 1										การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3				
	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
K (คะแนน)	1	0.60	0.60	0.70	0.70	0.50	0.62	0.50	0.60	0.50	0.60	0.50	0.54	0.60	0.70	0.60	0.70	0.60	0.64	
	2	0.70	0.50	0.60	0.80	0.60	0.64	0.50	0.70	0.70	0.60	0.60	0.62	0.70	0.50	0.50	0.50	0.50	0.54	
	3	0.80	0.70	0.60	0.60	0.50	0.64	0.70	0.50	0.60	0.60	0.50	0.58	0.60	0.60	0.50	0.40	0.50	0.52	
	4	0.70	0.70	0.50	0.50	0.70	0.62	0.60	0.60	0.60	0.50	0.60	0.58	0.50	0.40	0.60	0.60	0.60	0.54	
	เฉลี่ย	0.70	0.63	0.60	0.65	0.58	0.63	0.58	0.60	0.60	0.55	0.58	0.58	0.60	0.55	0.55	0.55	0.55	0.56	
Mg (%โดย นน.)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
	1	0.160	0.159	0.181	0.180	0.186	0.173	0.148	0.168	0.147	0.151	0.147	0.152	0.157	0.156	0.183	0.178	0.177	0.170	
	2	0.181	0.164	0.163	0.163	0.160	0.166	0.148	0.172	0.167	0.152	0.167	0.161	0.182	0.182	0.157	0.183	0.160	0.173	
	3	0.182	0.181	0.159	0.159	0.186	0.173	0.147	0.171	0.172	0.150	0.172	0.163	0.179	0.178	0.156	0.156	0.183	0.170	
	4	0.164	0.163	0.185	0.185	0.187	0.177	0.171	0.168	0.167	0.151	0.151	0.162	0.161	0.178	0.161	0.161	0.160	0.164	
	เฉลี่ย	0.172	0.167	0.172	0.172	0.179	0.172	0.153	0.170	0.163	0.151	0.159	0.159	0.170	0.169	0.168	0.169	0.170	0.169	
H2 (ลบ.นม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
	1	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30	0.32	0.30	0.40	0.20	0.30	0.20	0.28	0.30	0.20	0.40	0.30	0.40	0.32	
	2	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30	0.30	0.26	
	3	0.40	0.40	0.30	0.40	0.30	0.36	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	
	4	0.20	0.20	0.40	0.30	0.40	0.30	0.40	0.30	0.40	0.20	0.30	0.32	0.40	0.40	0.30	0.20	0.30	0.32	
	เฉลี่ย	0.30	0.30	0.35	0.33	0.33	0.32	0.30	0.33	0.30	0.28	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.28	0.33	0.30	

8-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=100, R2=150 หน่วย phi

	การทดลองครั้งที่ 1	การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3										
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	
%IC (%)	กะ	ครั้งที่ 1	1.73	1.15	1.92	1.15	1.35	2.12	1.73	1.35	1.54	1.54	1.54	1.35	1.35	1.35	1.58
	กลางวัน	2	1.35	1.73	1.54	1.54	1.35	1.54	1.35	1.54	1.46	1.73	1.54	1.73	1.54	1.54	1.54
	กลางคืน	เฉลี่ย	1.54	1.44	1.73	1.35	1.35	1.83	1.54	1.44	1.50	1.63	1.44	1.83	1.25	1.63	1.56
IC (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่ 1	9	6	10	6	7	11	9	7	40	8	10	7	7	9	41
	กลางวัน	2	7	9	8	8	7	8	7	40	9	9	8	6	8	40	
	กลางคืน	รวม	16	15	18	14	14	19	16	78	17	19	15	13	17	81	
%BH (%)	กะ	ครั้งที่ 1	0.19	0.00	0.38	0.19	0.38	0.19	0.38	0.19	0.23	0.19	0.38	0.00	0.19	0.19	0.27
	กลางวัน	2	0.00	0.19	0.19	0.19	0.19	0.00	0.00	0.12	0.19	0.00	0.38	0.00	0.19	0.19	
	กลางคืน	เฉลี่ย	0.10	0.10	0.29	0.19	0.29	0.10	0.19	0.17	0.19	0.19	0.38	0.19	0.19	0.23	
BH (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่ 1	1	0	2	2	2	2	2	7	1	3	2	0	1	7	
	กลางวัน	2	0	1	1	2	2	0	0	6	1	2	0	2	1	6	
	กลางคืน	เฉลี่ย	1	1	3	4	4	13	11	2	5	2	2	2	2	13	

9-1 ผลการตรวจคุณภาพน้ำออลูมิเนียมด้วยเงื่อนไขการผสมที่ l=100, R1=200, R2=200 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3						
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5		
K (คะแนน)	1	0.70	0.60	0.50	0.60	0.70	0.62	0.60	0.50	0.70	0.50	0.58	0.60	0.60	0.60	0.60	0.58	
	2	0.60	0.60	0.70	0.60	0.50	0.60	0.50	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	
	3	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.70	0.70	0.60	0.64	
	4	0.70	0.60	0.60	0.70	0.60	0.64	0.70	0.60	0.50	0.60	0.62	0.50	0.50	0.60	0.60	0.58	
	เฉลี่ย	0.68	0.63	0.63	0.65	0.63	0.64	0.65	0.60	0.58	0.60	0.58	0.60	0.60	0.58	0.63	0.60	
Mg (%โดย นน.)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5
	1	0.171	0.170	0.199	0.193	0.193	0.185	0.158	0.154	0.179	0.179	0.157	0.165	0.150	0.170	0.149	0.153	0.148
	2	0.198	0.198	0.171	0.200	0.174	0.188	0.179	0.174	0.154	0.180	0.154	0.168	0.149	0.174	0.169	0.154	0.169
	3	0.194	0.194	0.170	0.170	0.199	0.185	0.157	0.175	0.153	0.153	0.158	0.159	0.149	0.174	0.174	0.152	0.175
	เฉลี่ย	0.185	0.184	0.183	0.184	0.185	0.184	0.163	0.170	0.165	0.172	0.162	0.166	0.155	0.172	0.165	0.153	0.161
H2 (ลบ.ขม./ 100กรัม อลูมิเนียม)	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5
	1	0.30	0.30	0.30	0.30	0.20	0.28	0.30	0.40	0.40	0.40	0.40	0.38	0.30	0.30	0.20	0.30	0.40
	2	0.30	0.40	0.30	0.30	0.30	0.32	0.40	0.40	0.30	0.40	0.30	0.36	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
	3	0.20	0.20	0.20	0.30	0.30	0.24	0.30	0.30	0.40	0.40	0.40	0.36	0.30	0.30	0.40	0.30	0.30
	เฉลี่ย	0.28	0.30	0.25	0.28	0.30	0.28	0.35	0.38	0.35	0.38	0.35	0.36	0.33	0.33	0.33	0.33	0.30

9-2 ผลการตรวจคุณภาพชิ้นงานฉีดด้วยเงื่อนไขการผสมที่ I=100, R1=200, R2=200 หน่วย phi

กะ	ครั้งที่	การทดลองครั้งที่ 1					การทดลองครั้งที่ 2					การทดลองครั้งที่ 3								
		วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	
%IC (%)	กลางวัน	1	1.35	2.31	1.73	1.15	1.73	1.65	1.54	1.73	1.92	1.73	1.54	1.69	1.54	1.73	1.73	2.12	1.92	1.81
	กลางคืน	2	1.54	1.54	2.12	1.92	1.35	1.69	1.35	1.54	1.73	1.92	1.73	1.65	2.12	1.15	1.73	1.73	1.62	1.62
	เฉลี่ย	1.44	1.92	1.92	1.54	1.54	1.67	1.44	1.63	1.83	1.83	1.63	1.67	1.44	1.92	1.44	1.92	1.83	1.71	
IC (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม
	กลางวัน	1	7	12	10	7	11	47	8	10	10	9	9	46	8	9	10	11	10	48
กลางคืน	2	8	9	11	10	7	45	7	8	9	10	9	43	7	11	6	9	9	42	
	รวม	15	21	21	17	18	92	15	18	19	19	18	89	15	20	16	20	19	90	
%BH (%)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	เฉลี่ย
	กลางวัน	1	0.00	0.38	0.19	0.00	0.19	0.15	0.00	0.00	0.00	0.38	0.19	0.12	0.19	0.00	0.38	0.19	0.38	0.23
กลางคืน	2	0.19	0.00	0.19	0.19	0.38	0.19	0.38	0.00	0.00	0.19	0.58	0.00	0.23	0.00	0.38	0.00	0.19	0.15	
	เฉลี่ย	0.10	0.19	0.19	0.10	0.29	0.17	0.19	0.00	0.10	0.48	0.10	0.17	0.10	0.19	0.19	0.19	0.29	0.19	
BH (จำนวนจุด)	กะ	ครั้งที่	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม	วันที่1	วันที่2	วันที่3	วันที่4	วันที่5	รวม
	กลางวัน	1	0	2	1	0	1	4	0	0	0	2	2	4	1	0	2	1	3	7
กลางคืน	2	1	0	1	1	2	5	2	0	2	4	0	8	0	2	0	1	1	4	
	เฉลี่ย	1	2	2	1	3	9	2	0	2	6	2	12	1	2	2	2	4	11	

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายพหล วรดิลกกุล เกิดเมื่อวันที่ 23 พฤศจิกายน พ.ศ. 2531 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่ โรงเรียนราชวินิต มัธยม จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2555 และเข้ารับการศึกษาคู่ต่อ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ ใน ปีการศึกษา 2557





จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY