

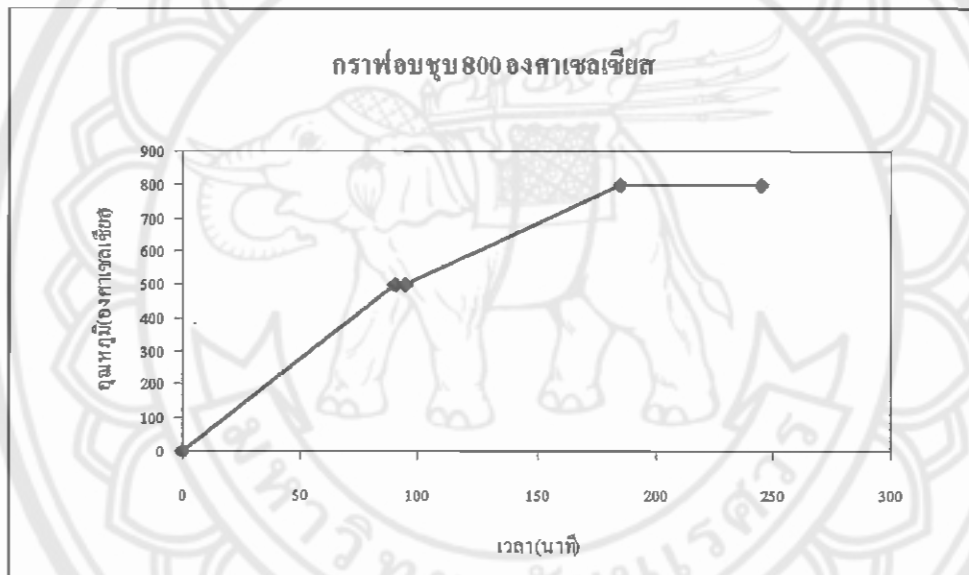
## บทที่ 4

### การวิจัยและผลของการวิจัย

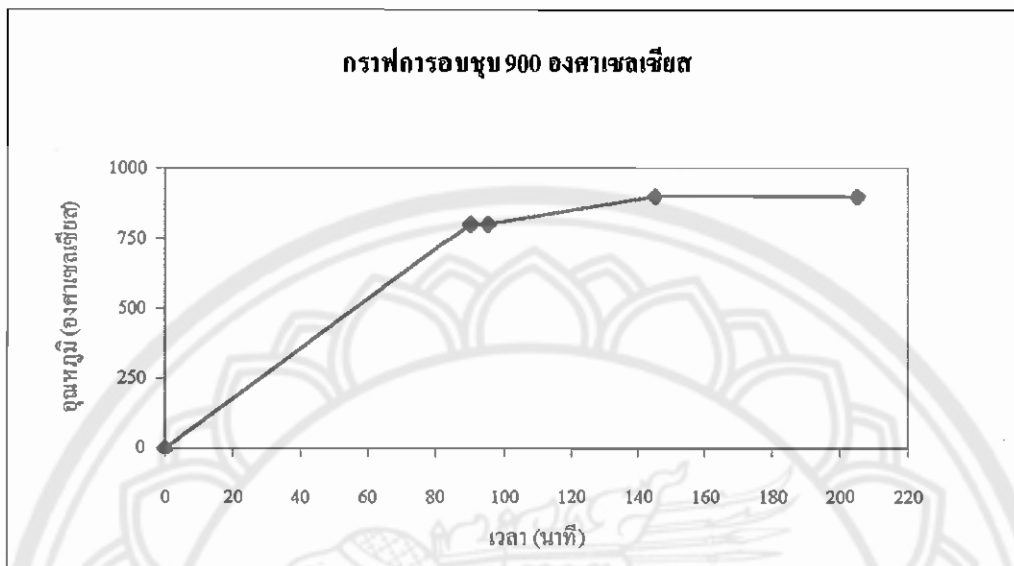
#### 4.1 การหุบแข็ง

##### 4.1.1 วิธีการหุบแข็ง

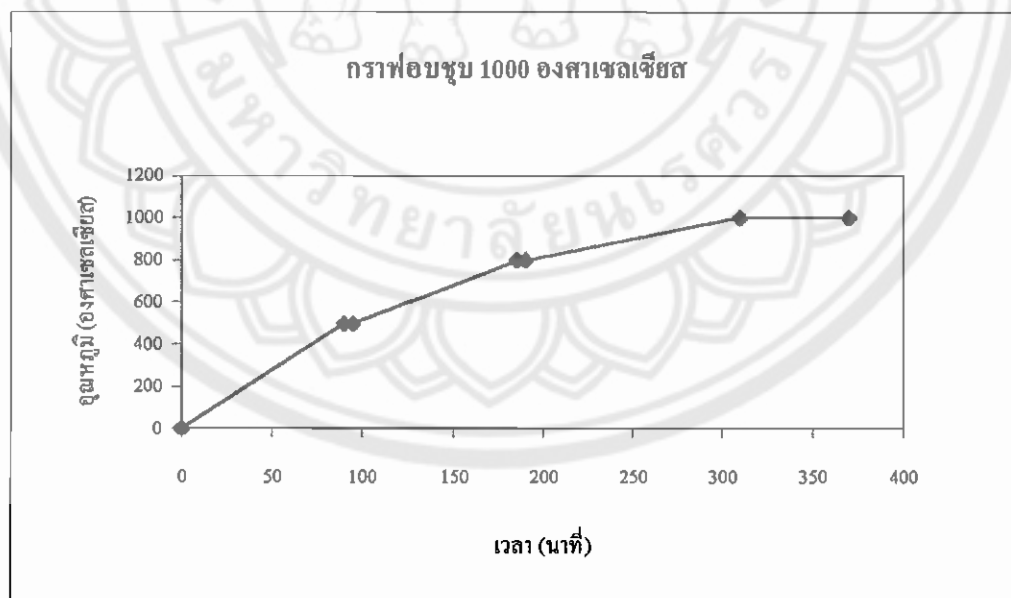
##### 4.1.1.1 ตั้งโปรแกรมการอบหุบ ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 กราฟการอบหุบ 800 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.2 กราฟการอบชุบ 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.3 กราฟการอบชุบ 1,000 องศาเซลเซียส

4.1.1.2 ใส่ชิ้นงานเข้าเตา ปิดเตาให้สนิทและถูกต้อง และเริ่มโปรแกรมการอบชุบ

4.1.1.3 เตรียมน้ำ , น้ำเกลือ (ความเข้มข้น 10%) และน้ำมัน เพื่อใช้ในการเย็นตัวของชิ้นงาน

4.1.1.4 เมื่อเตาเผาเหล็กจนถึงอุณหภูมิที่ต้องการตามโปรแกรมที่ตั้งไว้ ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ นั้นเวลาหนึ่ง แล้วจึงนำเหล็กมาทำการชุบแข็งในน้ำ , น้ำเกลือ หรือน้ำมัน ต่อไปตามประเภทของการอบชุบ

ขั้นตอนการเตรียม

ก) นำป๊อบที่เหมือนกันมา 3 ใบ แล้วตัดฝาป๊อบออกด้านหนึ่ง ทั้ง 3 ใบ

ข) เตรียมน้ำเกลือความเข้มข้น 10%

ค) ควางน้ำ , น้ำมัน และน้ำเกลือ (ใช้บีกเกอร์) ใส่ในแต่ละป๊อบ ให้ได้ปริมาตรเท่ากันทั้ง 3 ป๊อบ

4.1.1.5 ปลดปล่อยให้เหล็กเย็นตัวลงในตัวกลางเป็นเวลา 1 วัน แล้วนำไปทดสอบคุณสมบัติของวัสดุ

หมายเหตุ : ต่อไปทำซ้ำเช่นเดียวโดยเปลี่ยนการตั้งโปรแกรมการอบชุบ เป็นดังรูปที่ 4.2 และ 4.3

## 4.2 การศึกษาโครงสร้างจุลภาค

### 4.2.1 จุดประสงค์

4.2.1.1 เพื่อทราบหลักการทำงานและวิธีการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของโลหะ

4.2.1.2 เพื่อศึกษาขนาด รูปร่าง และการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกของเหล็กทั้งก่อนและหลังจากผ่านการอบชุบ

### 4.2.2 อุปกรณ์

4.2.2.1 ชิ้นงานทดสอบ

4.2.2.2 กระจกทราย

4.2.2.3 พงอลูมิน่า

4.2.2.4 เครื่องขัดชิ้นงาน

4.2.2.5 กรด ( $\text{HNO}_3$  5% และ Methand 95%)

4.2.2.6 กล้องทางโลหะวิทยา

4.2.2.7 ทีวี, วีดีโอ และฟิล์ม

4.2.3 วิธีการทดสอบ

4.2.3.1 ขัดชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 180 หลังจากนั้นเปลี่ยนเป็น 360 , 600 , 800 และ 1,000 ตามลำดับ

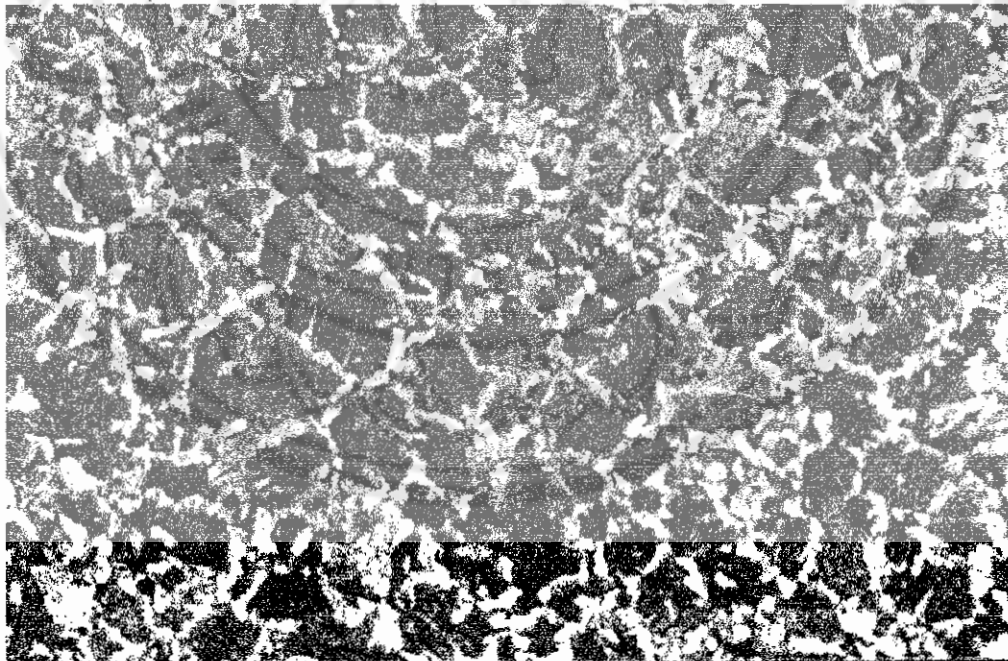
4.2.3.2 ขัดมันด้วยผ้ากำมะหยี่ ผงที่ใช้ขัดมันคือ อลูมิน่า ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) โดยละลายในน้ำก่อนการใช้งาน

4.2.3.3 กัดผิวชิ้นงานกรด ( $\text{HNO}_3$  5% + Methand 95%)

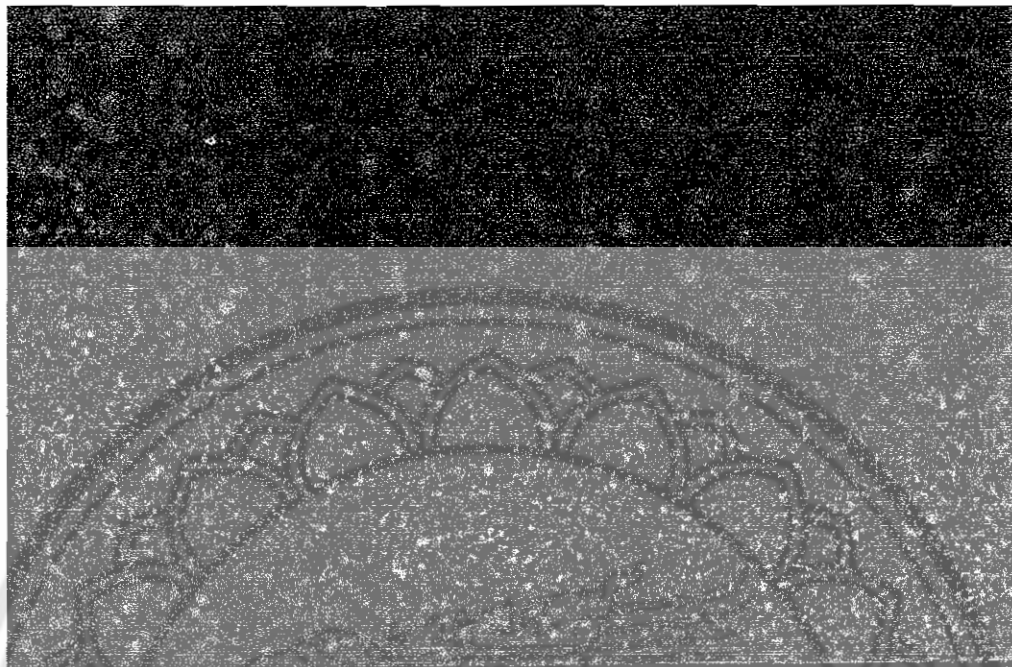
4.2.3.4 เช็ดชิ้นงานด้วยกระดาษทิชชู

4.2.3.5 นำชิ้นงานไปส่องดูโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์

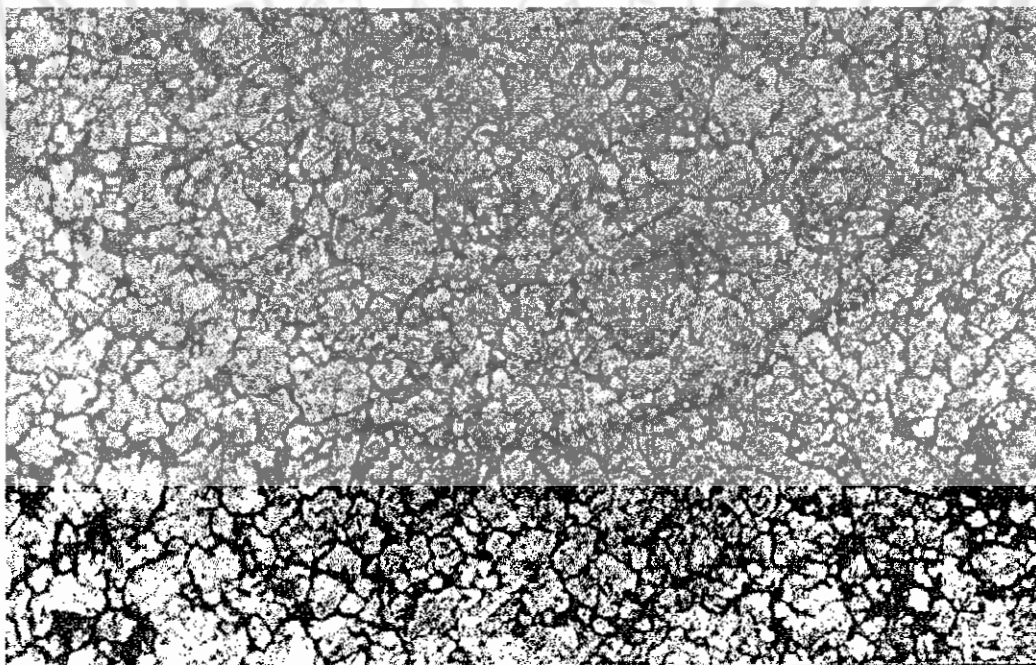
4.2.4 ผลการทดสอบ



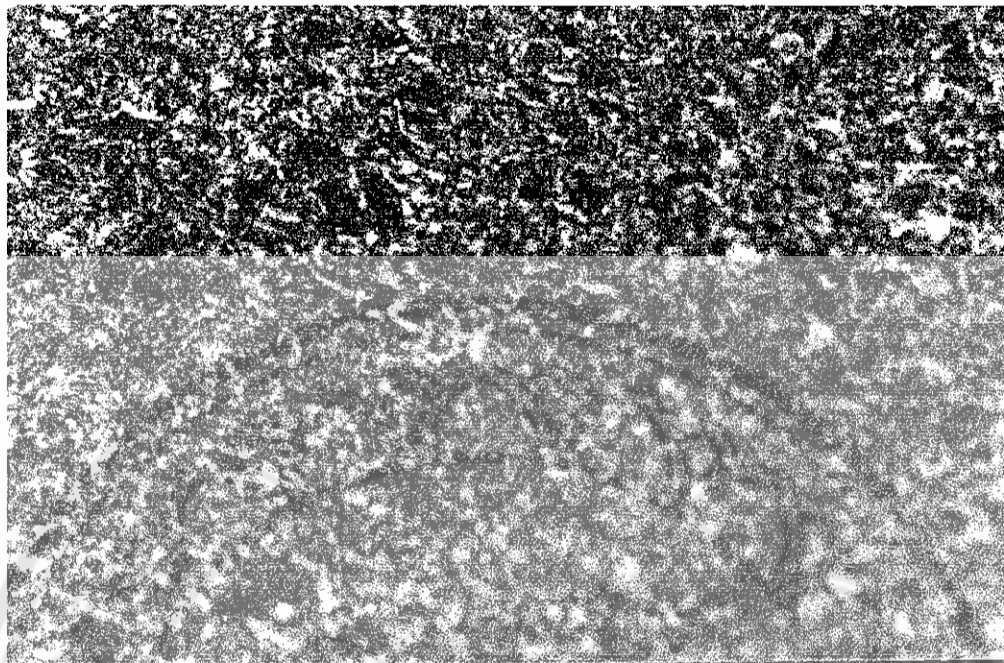
รูปที่ 4.4 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ไม่ได้ทำการชุบแข็ง



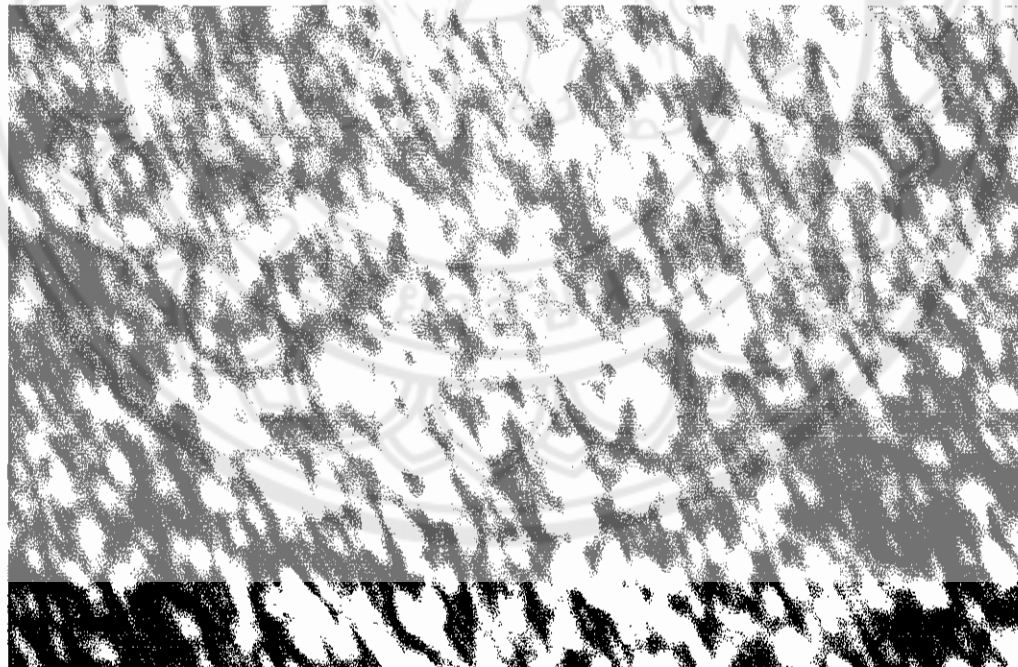
รูปที่ 4.5 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 800 °C ในน้ำมัน



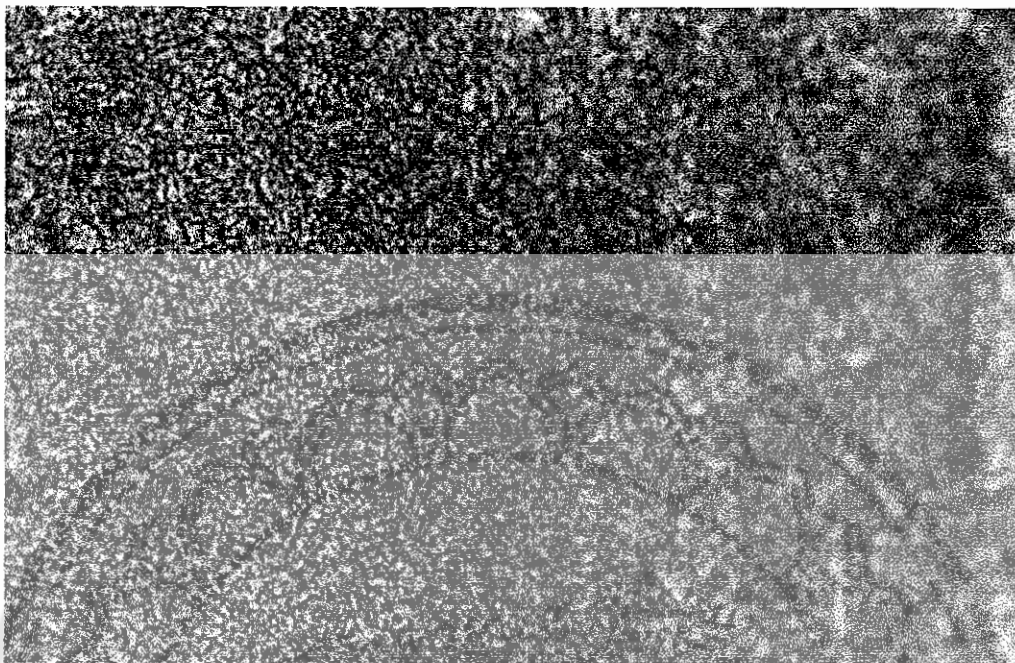
รูปที่ 4.6 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C ในน้ำมัน



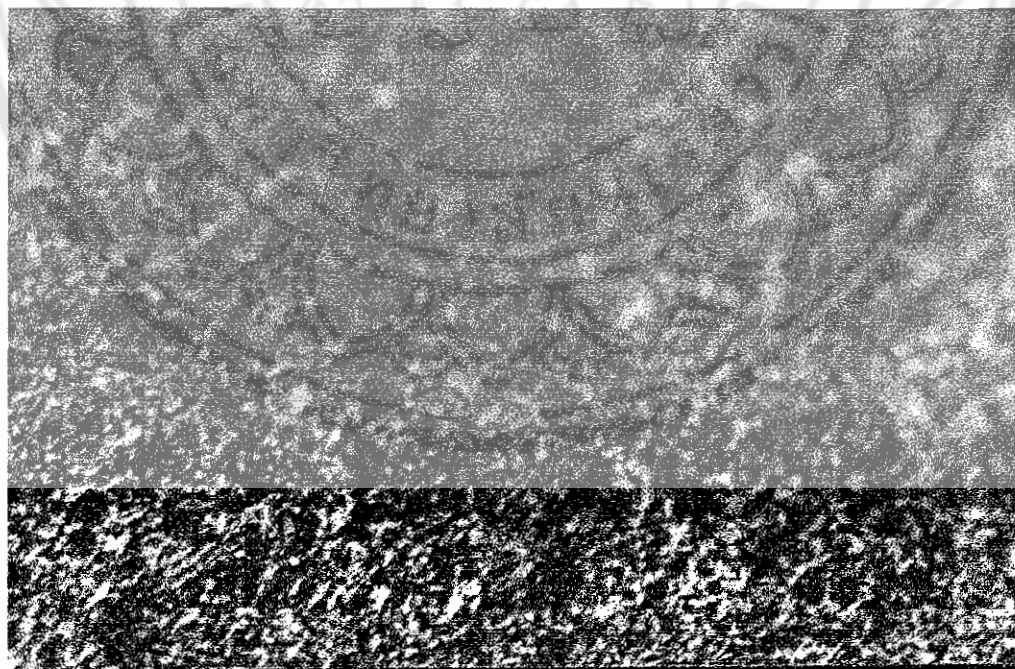
รูปที่ 4.7 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 °C ในน้ำมัน



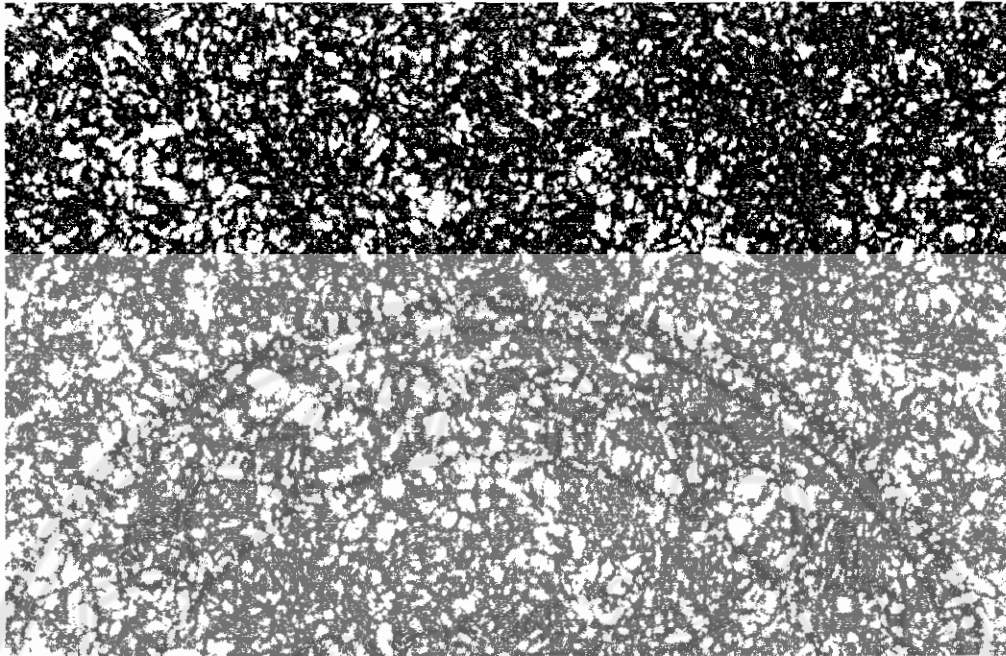
รูปที่ 4.8 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 800 °C ในน้ำ



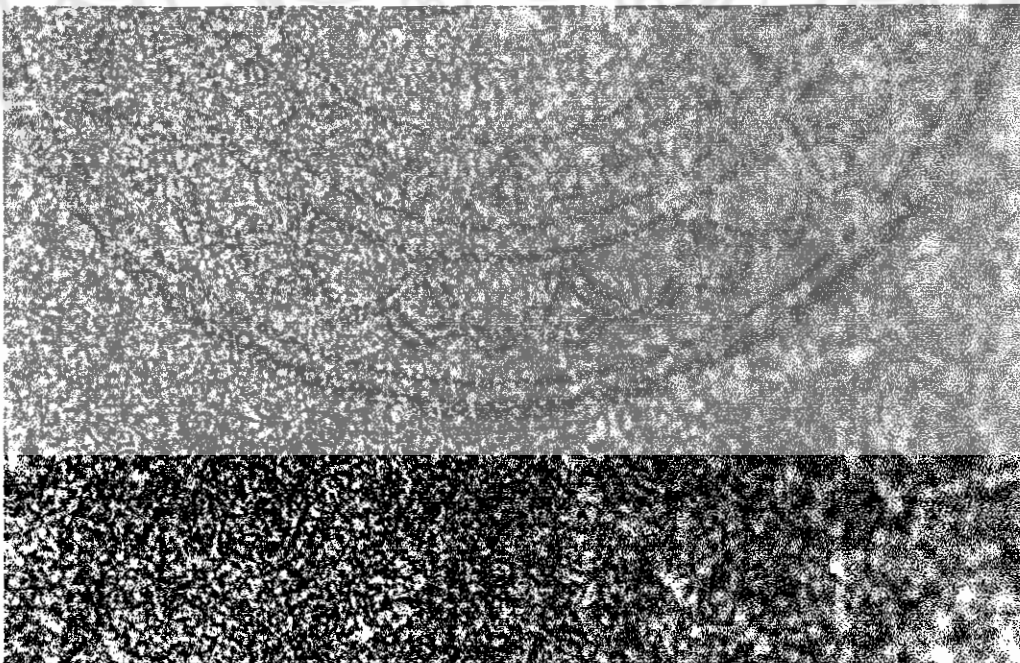
รูปที่ 4.9 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C ในน้ำ



รูปที่ 4.10 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 °C ในน้ำ

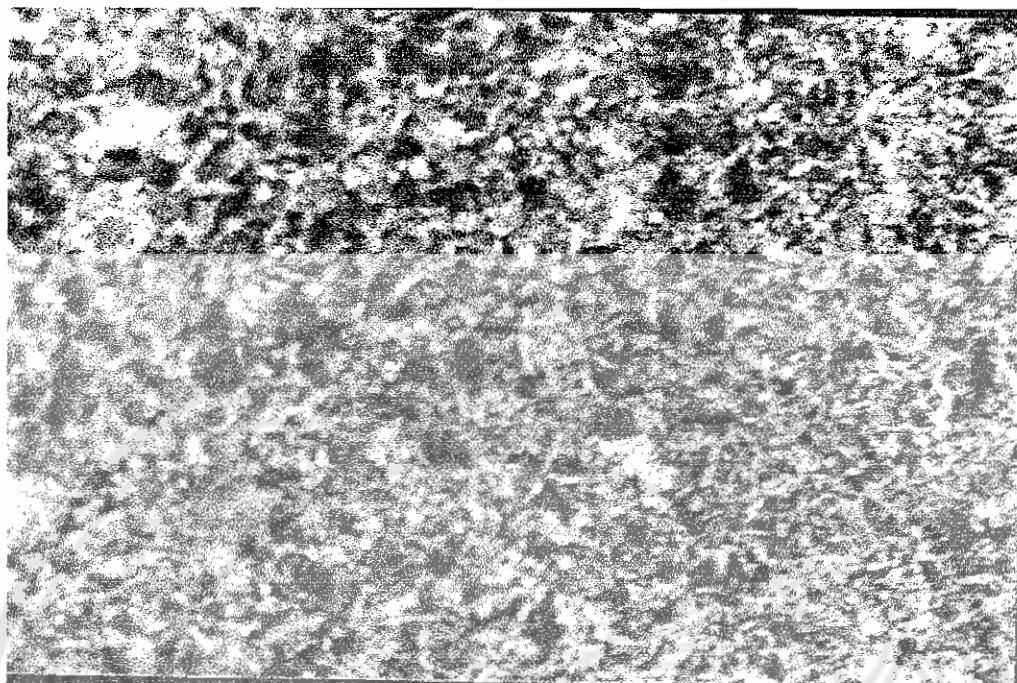


รูปที่ 4.11 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 800 °C ในน้ำเกลือ



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C ในน้ำเกลือ

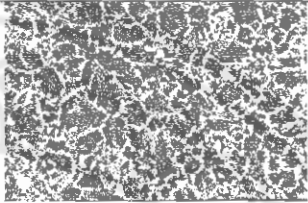
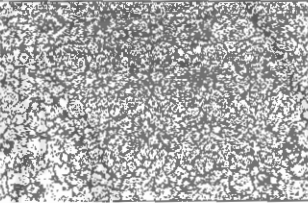
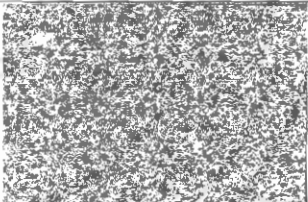
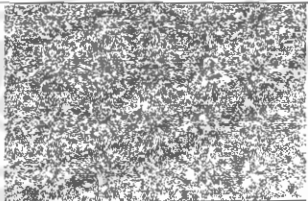
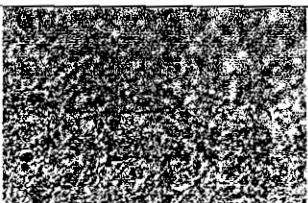






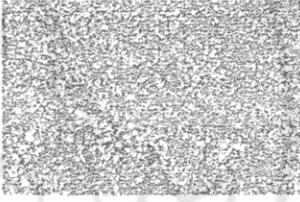
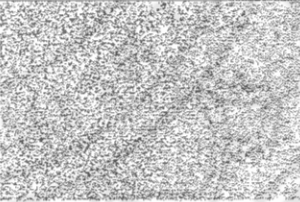

รูปที่ 4.13 โครงสร้างจุลภาคเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 °C ในน้ำเกลือ  
หมายเหตุ ทุกรูปถ่ายที่ค่าตั้งขยาย 200 เท่า

## 4.2.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.1 ขนาดของเม็ดเกรน เรียงตามลำดับจากขนาดใหญ่ที่สุด ไปจนถึงเล็กที่สุด

รูปที่	ภาวะการชุบแข็ง	ภาพ
4.4	ไม่ได้ทำการชุบแข็ง	
4.6	900 °C ในน้ำมัน	
4.13	1,000 °C ในน้ำเกลือ	
4.10	1,000 °C ในน้ำ	
4.7	1,000 °C ในน้ำมัน	

ตารางที่ 4.1 (ต่อ)

ภาพที่	ภาวะการชุบแข็ง	ภาพ
4.5	800 °C ในน้ำมัน	
4.8	800 °C ในน้ำ	
4.11	800 °C ในน้ำเกลือ	
4.9	900 °C ในน้ำ	
4.12	900 °C ในน้ำเกลือ	

- ที่อุณหภูมิอบชุบ 800 °C ขนาดของเกรนที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำเกลือ มีขนาดเล็กที่สุด รองลงมาคือ น้ำ และน้ำมัน ตามลำดับ

- ที่อุณหภูมิอบชุบ 900 °C ขนาดของเกรนที่ได้จากการชุบแข็งในตัวอย่างน้ำเกลือ มีขนาดเล็กที่สุด รองลงมาคือ น้ำ และน้ำมัน ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิอบชุบ 1,000 °C ขนาดของเกรนที่ได้จากการชุบแข็งในตัวอย่างน้ำมัน มีขนาดเล็กที่สุด รองลงมาคือ น้ำ และน้ำเกลือ ตามลำดับ

สรุปในตารางที่ 4.2 ลำดับขนาดของเกรน เทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ในตัวอย่างแต่ละชนิด

- การชุบแข็งในตัวอย่างน้ำมัน ขนาดของเกรนที่เล็กที่สุด คือ อบชุบที่อุณหภูมิ 800 °C รองลงมาคือ 1000 °C และ 900 °C ตามลำดับ
- การชุบแข็งในตัวอย่างน้ำ ขนาดของเกรนที่เล็กที่สุด คือ อบชุบที่อุณหภูมิ 900 °C รองลงมาคือ 800 °C และ 1,000 °C ตามลำดับ
- การชุบแข็งในตัวอย่างน้ำเกลือ ขนาดของเกรนที่เล็กที่สุด คือ อบชุบที่อุณหภูมิ 1,000 °C รองลงมาคือ 800 °C และ 900 °C ตามลำดับ

สรุปในตารางที่ 4.3 ลำดับขนาดของเกรน ใน ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ลำดับขนาดของเกรน เทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ในตัวอย่างแต่ละชนิด

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับขนาดของเกรน เทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	3	2	1
900	3	2	1
1,000	1	2	3

ตารางที่ 4.3 ลำดับขนาดของเกรน ใน ตัวอย่าง ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวอย่าง	ลำดับขนาดของเกรน เทียบในตัวอย่างเดียวกัน		
	800 °C	900 °C	1000 °C
น้ำมัน	1	3	2
น้ำ	3	2	1
น้ำเกลือ	2	1	3

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงเล็กที่สุด

เลข 2 หมายถึงเล็กมาก

เลข 3 หมายถึงเล็ก

ที่อุณหภูมิอบชุบเหล็ก 800 °C และ 900 °C สังเกตได้ว่าขนาดของเกรนเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ในตัวกลางแต่ละชนิด จะขึ้นอยู่กับอัตราการเย็นตัวของตัวกลาง โดยตัวกลางใดที่มีอัตราการเย็นตัวสูง จะให้เกรนที่มีขนาดเล็กละเอียดมากกว่าตัวกลางที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ

ตารางที่ 4.4 ลำดับขนาดของเกรน

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับขนาดของเกรน		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	5	4	3
900	9	2	1
1,000	6	7	8

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงเล็กที่สุด เรียงลงมาจนถึง เลข 9 หมายถึงใหญ่ที่สุด

จากภาพถ่ายผลการทดสอบที่ได้ สามารถแบ่งกลุ่มภาวะการชุบแข็ง ตามเกณฑ์ขนาดของเกรนออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่มีเกรนขนาดค่อนข้างเล็กละเอียด ซึ่งหมายถึง ภาวะการชุบแข็งที่ให้ผลขนาดของเกรน อยู่ในลำดับที่ 1 – 4 กลุ่มนี้จะมีลำดับขนาดของเกรนภายในกลุ่มเรียงจากขนาดเล็กที่สุด คือ 900 °C ในน้ำเกลือ , 900 °C ในน้ำ , 800 °C ในน้ำเกลือ และ 800 °C ในน้ำ ดูจากตารางที่ 4.4 คือเขตพื้นที่ที่เรงแรงนั่นเอง สังเกตได้ว่า

- ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 900 °C จะให้เกรนเล็กละเอียดกว่า 800 °C และที่อุณหภูมิ 1,000 °C ไม่เกิดเกรนขนาดเล็กละเอียดเท่า

- การชุบแข็งในตัวกลางน้ำเกลือ จะให้เกรนเล็กละเอียดกว่า ชุบแข็งในน้ำ และการชุบแข็งในตัวกลางน้ำมัน ไม่ทำให้เกิดเกรนเล็กละเอียดเท่า

เหตุผลคือ

- ที่อุณหภูมิ 800 °C อาจมีบางส่วนของโครงสร้างของเกรนที่ยังไม่เปลี่ยนเป็นออสเทนไนท์

ซึ่งทำให้หลังจากการชุบแข็งแล้ว ยังได้เกรนที่มีขนาดใหญ่อยู่

- ที่อุณหภูมิ 900°C โครงสร้างของเกรนเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์มากกว่า 800°C ดังนั้น

หลังจากการชุบแข็งแล้วจึงได้เกรนที่มีขนาดเล็กลง

- ที่อุณหภูมิ 1,000°C โครงสร้างของเกรนเปลี่ยนเป็นออสเตนไนท์ที่ขยายขนาดมาก

ดังนั้นหลังจากการชุบแข็งแล้วจึงได้เกรนที่มีขนาดใหญ่ อาจเนื่องจากหัตถ์ไม้ทัน

- น้ำเกลือ และน้ำมีอัตราการเย็นตัวค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับน้ำมัน ดังนั้นการชุบในดัวกลาง น้ำเกลือ และน้ำ จึงให้เกรนที่มีขนาดเล็กละเอียดมากกว่า การชุบแข็งในดัวกลางน้ำมัน (ดูอัตราการเย็นตัวของดัวกลางแต่ละชนิดได้จากตารางที่ 4.5 ช่อง Cooling rate ค่าที่ใช้จะเต็มสิ่วเป็นคู่ๆ เพื่อให้่ายแก่การมอง )

ตารางที่ 4.5 The H coefficient or severity of the quench :

Medium	H – Coefficient	Cooling rate at the center of a 1” bar (°C/s)
น้ำมัน (ไม่กวน)	0.25	18
น้ำมัน (กวน)	1.0	45
น้ำ (ไม่กวน)	1.0	45
น้ำ (กวน)	4.0	190
น้ำเกลือ (ไม่กวน)	2.0	90
น้ำเกลือ (กวน)	5.0	230

2. กลุ่มที่มีเกรนขนาดค่อนข้างใหญ่หยาบ ซึ่งหมายถึง ภาวะการชุบแข็งที่ให้ผลขนาดของเกรนอยู่ในลำดับที่ 5 – 9 กลุ่มนี้จะมีลำดับขนาดของเกรนภายในกลุ่มเรียงจากขนาดเล็กที่สุด คือ 800 °C ในน้ำมัน , 1,000 °C ในน้ำมัน , 1,000 °C ในน้ำ , 1,000 °C ในน้ำเกลือ , 900 °C ในน้ำมัน ดูจากตารางที่ 4.4 คือเขตพื้นที่ที่ไม่ได้แรเงา นั่นเอง สังเกตได้ว่า

- ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 800°C จะให้เกรนเล็กละเอียดกว่า 1,000°C และ 900 °C ตามลำดับ

#### 4.2.6 วิจัยรณัผลการทดสอบ

4.2.6.1 กลุ่มที่มีเกรนขนาดค่อนข้างเล็กละเอียด ลำดับขนาดของเกรนที่ได้จากการศึกษาโครงสร้างจุลภาค สอดคล้องกับหลักการ

### สรุปหลักการเกี่ยวกับขนาดของเกรน

ก) ขณะที่มีการเพิ่มของอุณหภูมิที่ผ่านจุดวิกฤตจะมีการเปลี่ยนแปลงของเฟอไรต์และเพิร์ลไรต์จำนวนมากไปเป็นออสเตนไนต์ ซึ่งมีขนาดของเกรนโดยเฉลี่ยเล็กที่สุดที่จุดวิกฤตนี้ถ้ายังมีการเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป ขนาดเกรนของออสเตนไนต์จะมีขนาดใหญ่มากขึ้น ซึ่งอาจมีผลในการควบคุมขนาดสุดท้ายของเกรนเมื่อโลหะเย็นตัวลงด้วย

ข) การทำให้เย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว จะทำให้เกรนมีขนาดหยาบขึ้น

หมายเหตุ : จุดวิกฤต ( หมายถึง จุดที่อุณหภูมิค่าสุดท้ายที่เหล็กเปลี่ยนเริ่มโครงสร้างเป็นออสเตนไนต์ ) ของเหล็ก 0.4 %C คือ ที่อุณหภูมิประมาณ 780 °C

ดังนั้นยิ่งอุณหภูมิในการชุบแข็งสูงขึ้น ขนาดของเกรน จึงควรจะใหญ่ขึ้นด้วย จากทฤษฎีแล้ว ตั้งสมมติฐานได้ว่า

เหล็กที่อบชุบที่อุณหภูมิ 800 และ 900 ควรจะมีขนาดของเกรนเล็กละเอียดกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งจากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่ให้โครงสร้างเล็กละเอียดอยู่ที่ 800 และ 900 องศาเซลเซียส เป็นส่วนมาก ส่วนการอบชุบที่อุณหภูมิ 1,000 ได้โครงสร้างใหญ่หยาบ ซึ่งตรงกับทฤษฎี

สมมติฐานอีกข้อหนึ่งที่ตั้งได้ จากทฤษฎีที่กล่าวมาข้างต้น คือ อัตราการเย็นตัวของตัวกลางที่ใช้ในการชุบแข็ง แปรผกผันกับขนาดของโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังการชุบแข็ง

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าตัวกลางที่ให้อัตราการเย็นตัวมากที่สุด คือ น้ำเกลือ รองลงมาคือ น้ำ และน้ำมัน ตามลำดับ นั่นคือ เหล็กที่ชุบแข็งในตัวกลางน้ำเกลือควรมีโครงสร้างจุลภาคเล็กละเอียดที่สุด และรองลงมา คือ น้ำ และน้ำมัน ควรมีโครงสร้างจุลภาคที่ใหญ่และหยาบขึ้น ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลอง เห็นได้ว่าโครงสร้างจุลภาคที่ได้ภายหลังการชุบที่มีขนาดเล็กนั้นเป็นน้ำเกลือ และน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 และ 900 °C แต่ถ้าอุณหภูมิสูงถึง 1,000 °C ขนาดของเกรนที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำมันจะมีขนาดเล็กที่สุด รองลงมา คือ น้ำ และน้ำเกลือ ตามลำดับ

4.2.6.2 กลุ่มที่มีเกรนขนาดค่อนข้างใหญ่หยาบ ได้ผลที่ไม่สอดคล้องกับหลักการเกี่ยวกับขนาดของเกรน เช่น การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C ควรจะมีขนาดเกรนเล็กละเอียดกว่าที่อุณหภูมิ 800 °C และ 1,000 °C แต่ผลการทดสอบไม่ออกมาเป็นตามนี้ เป็นต้น ซึ่งสังเกตได้ว่าขนาดของเกรนในกลุ่มนี้ ค่อนข้างใกล้เคียงกัน ดังนั้นการสลับลำดับขนาดของเกรนที่เกิดขึ้นในกลุ่มนี้ จึงอาจเกิดขึ้นได้

#### 4.2.7 สรุปผลการทดลอง

4.2.7.1 การชูบแข็งภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิพอดีไม่สูงเกินไป และในตัวอย่างที่มีอัตราการเย็นตัวไม่ต่างกันมากนัก สามารถคาดคะเนขนาดเปรียบเทียบขนาดกันภายในกลุ่มได้ โดยใช้หลักอัตราการเย็นตัวสูงจะให้ขนาดเกรนที่เล็กละเอียดกว่าการชูบแข็งในตัวอย่างที่มีอัตราเย็นตัวต่ำ

4.2.7.2 ขนาดของเกรนภายหลังจากชูบแข็งมีขนาดเล็กกว่าก่อนการชูบแข็ง

### 4.3 การทดสอบความแข็ง

#### 4.3.1 จุดประสงค์

4.3.1.1 เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องทดสอบความแข็ง

4.3.1.2 เพื่อให้ทราบและทำการวิเคราะห์ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง

4.3.1.3 เพื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งของชิ้นงาน กับอุณหภูมิ และตัวอย่างที่ใช้ในการชูบแข็ง

#### 4.3.2 อุปกรณ์

4.3.2.1 เครื่องทดสอบความแข็ง

4.3.2.2 ชิ้นงานทดสอบ

4.3.2.3 ระบบทดสอบที่ใช้

4.3.2.4 หัวกดทดสอบความแข็ง

4.3.2.5 ฐานรองชิ้นงาน

#### 4.3.3 วิธีการทดสอบ

4.3.3.1 ใส่ฐานรองชิ้นงานที่เครื่องทดสอบความแข็ง ทำความสะอาดและตรวจสอบระดับฐาน

4.3.3.2 ถอดการ์ดหัวทดสอบ

4.3.3.3 ใส่หัวทดสอบความแข็ง กดให้แน่น และใส่การ์ด

4.3.3.4 วางชิ้นงานลงบนฐานรอง และเลือกตำแหน่งการทดสอบ

4.3.3.5 หมุนแท่นฐานรองขึ้นไปชนกับหัวทดสอบความแข็ง จนกระทั่งใน Scale อยู่ที่ 0

4.3.3.6 ตั้งแรงและเวลาที่ใช้ในการทดสอบ

4.3.3.7 กดคันโยกขึ้นเริ่มทำการทดสอบ

4.3.3.8 เริ่มจับเวลาหลังจากเข็มหยุดนิ่ง จนประมาณ 10 วินาที จึงดันคันโยกลงมา แล้วอ่านค่าความแข็งที่ได้

4.3.3.9 บันทึกค่าการทดลอง



## 4.3.3.10 มาตรฐานรองลง และเอาชิ้นงานออก

## 4.3.4 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.6 ตารางผลการทดสอบความแข็ง (Rockwell – C)

อุณหภูมิ ตัวกลาง	น้ำมัน			น้ำ			น้ำเกลือ		
	800	19.0	19.5	20.2	51.6	55.1	51.9	53.8	55.0
900	16.1	18.0	19.1	47.8	50.3	46.8	62.0	62.9	61.0
1000	12.1	12.6	12.3	8.0	12.1	9.8	12.1	12.6	11.9

หมายเหตุ : ค่าความแข็งที่วัดได้จากเหล็กที่ไม่ได้ผ่านการชุบแข็ง มีค่าดังนี้ 9.9 , 9.0 และ 11.0 HRC ( Rockwell – C ) ค่าเฉลี่ย คือ 9.97

## 4.3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.7 ค่าเฉลี่ยของความแข็ง (Rockwell – C)

อุณหภูมิ (°C) ตัวกลาง	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
	800	19.57	53.03
900	17.73	48.3	61.97
1,000	12.33	9.97	12.2

ตารางที่ 4.8 ตารางลำดับผลความแข็งจากมากไปน้อย

ลำดับที่	ความแข็ง	สภาวะการอบชุบ
1	61.97	น้ำเกลือ 900 °C
2	53.03	น้ำ 800 °C
3	52.93	น้ำเกลือ 800 °C
4	48.3	น้ำ 900 °C
5	19.57	น้ำมัน 800 °C
6	17.73	น้ำมัน 900 °C
7	12.33	น้ำมัน 1,000 °C
8	12.2	น้ำเกลือ 1,000 °C
9	9.97	น้ำ 1,000 °C
	9.97	ธรรมดา

- ที่อุณหภูมิอบชุบ 800 °C ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำ มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ น้ำเกลือ และน้ำมัน ตามลำดับ

- ที่อุณหภูมิอบชุบ 900 °C ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำเกลือ มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ น้ำ และน้ำมัน ตามลำดับ

- ที่อุณหภูมิอบชุบ 1,000 °C ค่าความแข็งเฉลี่ยที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำมัน มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ น้ำเกลือ และน้ำ ตามลำดับ

สรุปในตารางที่ 4.9 ลำดับค่าความแข็งเฉลี่ยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ในตัวกลางแต่ละชนิด

- การชุบแข็งในตัวกลางน้ำมัน ค่าความแข็งเฉลี่ยที่มากที่สุด คือ อบชุบที่อุณหภูมิ 800 °C รองลงมาคือ 900 °C และ 1,000 °C ตามลำดับ

- การชุบแข็งในตัวกลางน้ำ ค่าความแข็งเฉลี่ยที่มากที่สุด คือ อบชุบที่อุณหภูมิ 800 °C รองลงมาคือ 900 °C และ 1,000 °C ตามลำดับ

- การชุบแข็งในตัวกลางน้ำเกลือ ค่าความแข็งเฉลี่ยที่มากที่สุด คือ อบชุบที่อุณหภูมิ 900 °C รองลงมาคือ 800 °C และ 1,000 °C ตามลำดับ

สรุปในตารางที่ 4.10 ลำดับค่าความแข็งเฉลี่ยเปรียบเทียบใน ตัวกลางเดียวกัน ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.9 ลำดับค่าความแข็งแรงเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ในตัวกลางแต่ละชนิด

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับค่าความแข็งแรงเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	3	1	2
900	3	2	1
1,000	1	3	2

ตารางที่ 4.10 ลำดับค่าความแข็งแรงเทียบในตัวกลางเดียวกัน ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตัวกลาง	ลำดับค่าความแข็งแรงเทียบในตัวกลางเดียวกัน		
	800 °C	900 °C	1000 °C
น้ำมัน	1	2	3
น้ำ	1	2	3
น้ำเกลือ	2	1	3

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงค่าความแข็งแรงมากที่สุด

เลข 2 หมายถึงค่าความแข็งแรงมาก

เลข 3 หมายถึงค่าความแข็งแรงน้อย

- ที่อุณหภูมิต่ำสุด 800 °C และ 900 °C สังเกตได้ว่าค่าความแข็งแรงเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน ในตัวกลางแต่ละชนิด การชุบแข็งในน้ำมันจะให้ค่าความแข็งแรงน้อย

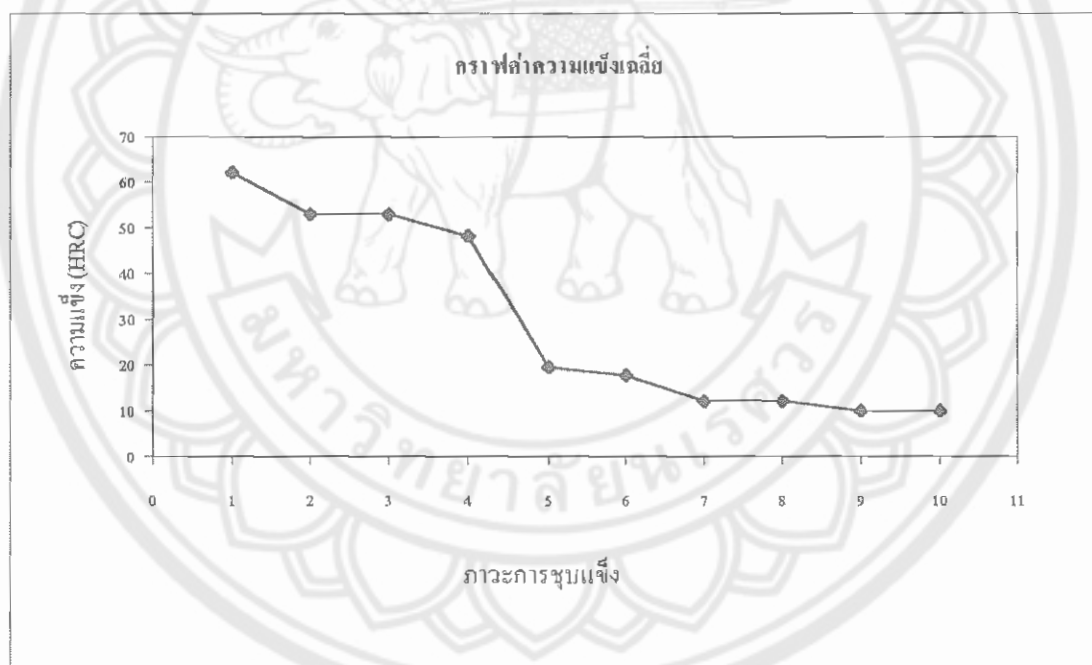
- การชุบแข็งในน้ำมัน และน้ำ ที่อุณหภูมิ 800 °C จะให้ค่าความแข็งแรงมากที่สุด รองลงมาคือ 900 °C และ 1,000 °C ตามลำดับ

- การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 °C จะให้ค่าความแข็งแรงน้อย เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่างๆ ในตัวกลางชนิดเดียวกัน

ตารางที่ 4.11 ลำดับค่าความแข็งเฉลี่ย

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับค่าความแข็งเฉลี่ย		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	5	2	3
900	6	4	1
1,000	7	9	8

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด เรียงลงมาจนถึง เลข 9 หมายถึงค่าความแข็งเฉลี่ยน้อยที่สุด



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างภาวะการชุบแข็งกับความแข็ง

ตารางที่ 4.12 อธิบายหมายเลขภาวะชุบแข็งในกราฟค่าความแข็งเฉลี่ย

ลำดับ	ภาวะชุบแข็ง
1	น้ำเกลือ 900 °C
2	น้ำ 800 °C
3	น้ำเกลือ 800 °C
4	น้ำ 900 °C
5	น้ำมัน 800 °C
6	น้ำมัน 900 °C
7	น้ำมัน 1,000 °C
8	น้ำเกลือ 1,000 °C
9	น้ำ 1,000 °C
10	ธรรมดาไม่ชุบแข็ง

จากค่าความแข็งเฉลี่ย สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยค่อนข้างสูง ซึ่งหมายถึง ภาวะการชุบแข็งที่ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ในลำดับที่ 1 – 4 คือมีค่าความแข็งเฉลี่ย 0 – 50 HRC ได้แก่ 900 °C ในน้ำเกลือ , 900 °C ในน้ำ , 800 °C ในน้ำเกลือ และ 800 °C ในน้ำ ดูจากตารางที่ 4.11 คือเขตพื้นที่ที่แร่เจานั่นเอง สังเกตได้ว่า

- ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 800 °C และ 900 °C ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยค่อนข้างสูง ส่วน 1,000 °C ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ
- การชุบแข็งในน้ำเกลือ และน้ำ ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยค่อนข้างสูง ส่วนในน้ำมัน ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งค่อนข้างต่ำ

เหตุผล คือ

ปัจจัยที่มีผลต่อความแข็ง คือ

- อุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบ ควรสูงกว่าเส้น  $A_3$  ประมาณ 50 – 75 °C ( ดูภาพที่ 2.1 แผนภาพสมดุลย์ของเหล็กกับคาร์บอน ) เพื่อรักษาซีเมนไคต์ไว้ไม่ให้เปลี่ยนไปเป็นออสเทนไนต์ เพราะซีเมนไคต์มีความแข็งสูงอยู่แล้ว

จากภาพที่ 2.1 ที่ปริมาณคาร์บอน 0.4% อุณหภูมิต่ำสุดที่เป็นออสเทนไนต์ คือ 780 °C เพราะฉะนั้นอุณหภูมิที่ใช้ในการอบชุบควรอยู่ที่ 830 °C – 855 °C จึงจะได้ความแข็งมาก

- อัตราความเร็วในการชุบ กล่าวคือ ถ้าทำให้เหล็กเย็นเร็ว ๆ โอกาสที่ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนเป็นมาร์เทนไซต์ก็มีมาก ในทางตรงข้าม ถ้าปล่อยให้เหล็กเย็นช้า ๆ ออสเตนไนท์จะเปลี่ยนเป็นเฟอร์ไรท์กับซีเมนไตต์หมด ไม่เกิดมาร์เทนไซต์ เหล็กก็ไม่แข็ง

2. กลุ่มที่มีค่าความแข็งเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ซึ่งหมายถึง ภาวะการชุบแข็งที่ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยอยู่ในลำดับที่ 5-9 รวมถึงเหล็กที่ไม่ได้ทำการชุบแข็งด้วย คือมีค่าความแข็งเฉลี่ย 51 – 80 HRC ได้แก่ 800 °C ในน้ำมัน, 1,000 °C ในน้ำมัน, 1,000 °C ในน้ำ, 1,000 °C ในน้ำเกลือ, 900 °C ในน้ำมัน ดูจากตารางที่ 4.11 คือเขตพื้นที่ที่ไม่ได้แรงงา นั้นเอง สังเกตได้ว่า

- การชุบแข็งในน้ำมัน ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดในกลุ่มนี้ รองลงมาคือ น้ำเกลือ และน้ำคาล์ดัม

- ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,000 °C ให้ค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำสุดในกลุ่มนี้

#### 4.3.6 วิจัยผลการทดลอง

4.3.6.1 ค่าความแข็งเฉลี่ยสอดคล้องกับหลักการ คือ กลุ่มที่อบชุบที่อุณหภูมิไม่สูงเกินไป ในตัวกลางที่มีอัตราการเย็นตัวสูง จะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูง ส่วนกลุ่มที่อบชุบที่อุณหภูมิสูงเกินไป ในตัวกลางที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ จะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยต่ำ

4.3.6.2 ค่าความแข็งเฉลี่ยของเหล็กภายหลังการชุบแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.3.7 สรุปผลการทดลอง

4.3.7.1 การชุบแข็งภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิพอดีไม่สูงเกินไป และในตัวกลางที่มีอัตราการเย็นตัวสูงจะให้ค่าความแข็งเฉลี่ยสูงกว่าการชุบแข็งในตัวกลางที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ

4.3.7.2 ค่าความแข็งเฉลี่ยภายหลังการชุบแข็งมากกว่าก่อนการชุบแข็ง

### 4.4 การทดสอบแรงกระแทก

#### 4.3.1 จุดประสงค์

4.3.1.1 เพื่อศึกษาการทำงานของเครื่องทดสอบแรงกระแทก

4.3.1.2 เพื่อให้ทราบและทำการวิเคราะห์ค่าความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลง

4.3.1.3 เพื่อทราบความสัมพันธ์ระหว่างความทนต่อแรงกระแทกของชิ้นงาน กับอุณหภูมิ และตัวกลางที่ใช้ในการชุบแข็ง

### 4.3.2 อุปกรณ์

#### 4.3.2.1 เครื่องทดสอบแรงกระแทก

#### 4.3.2.2 ชิ้นงานทดสอบ

### 4.3.3 วิธีการทดสอบ

#### 4.3.1.1 ทำการวัดมิติ (Dimensions) ของตัวอย่างเหล็กทั้งหมดแล้ววัดรอยบาก

4.3.1.2 ยกตุ้มน้ำหนักขึ้นเล็กน้อย โดยหมุนกว่านลงไปหาแล้วให้ไถกระเดื่องสื่อกับตุ้มน้ำหนักเสียก่อน

#### 4.3.1.3 วางตัวอย่างเหล็กซึ่งเป็นวัสดุทดสอบลงบนจูดวาง

4.3.1.4 ลดตุ้มน้ำหนักลงจนเกือบสัมผัสกับวัสดุทดสอบเพื่อดูว่าจะได้ตำแหน่งที่กะ ตามต้องการหรือไม่

4.3.1.5 ยกตุ้มน้ำหนักขึ้นไปใหม่ไปตั้งไว้ที่แนวระนาบหรือ 90 องศา โดยหมุนเข็มดัชนีให้ตามขึ้นไปด้วย

#### 4.3.1.6 ยก้านผ้าเบรคขึ้นเพื่อมิให้ผ้าเบรคสัมผัสกับตุ้มน้ำหนักที่กำลังคมนา

4.3.1.7 ปลดไถกระเดื่องให้ตุ้มน้ำหนักและเข็มดัชนีตกลงไปกระแทกวัสดุทดสอบจนหักกระเด็นออกไป ตุ้มน้ำหนักจะวิ่งต่อไป เข็มดัชนีจะขึ้นไปข้างบอของศาสูงสุดที่เหลือ

#### 4.3.1.8 อ่านค่าพลังงานที่วัดได้

### 4.3.4 ผลการทดสอบ

ตารางที่ 4.13 ตารางผลการทดสอบความทนต่อแรงกระแทก ( kJ)

ตุ้มน้ำหนัก ควักกลาง	น้ำมัน			น้ำ			น้ำเกลือ		
	800	199.7	199.7	199.7	73.4	192.7	49.6	93.8	115
900	199.7	199.7	199.7	68.2	56.2	178.2	173.6	103.6	105.8
1000	199.7	199.7	138.4	153.7	105.8	193.8	167.7	174.1	172.2

หมายเหตุ : ค่าความทนต่อแรงกระแทกที่วัดได้จากเหล็กที่ไม่ได้ผ่านการชุบแข็ง เท่ากับ 199.9 kJ ทั้งสามค่า

## 4.3.5 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ตารางที่ 4.14 ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย (MJ)

อุณหภูมิ (°C) \	ตัวกลาง	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800		199.7	105.23	97.07
900		199.7	100.87	127.67
1,000		179.27	151.1	171.33

ตารางที่ 4.15 ตารางลำดับผลความทนต่อแรงกระแทกจากมากไปน้อย

ลำดับที่	ความแข็ง	สภาวะการอบชุบ
1	199.9	ธรรมดา
2	199.7	น้ำมัน 800 °C
	199.7	น้ำมัน 900 °C
3	179.27	น้ำมัน 1,000 °C
4	171.33	น้ำเกลือ 1,000 °C
5	151.1	น้ำ 1,000 °C
6	127.67	น้ำเกลือ 900 °C
7	105.23	น้ำ 800 °C
8	100.87	น้ำ 900 °C
9	97.07	น้ำเกลือ 800 °C

- ที่อุณหภูมิอบชุบ 800 °C ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำมัน มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ น้ำและน้ำเกลือ ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิอบชุบ 900 °C ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำมัน มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ น้ำเกลือและน้ำ ตามลำดับ
- ที่อุณหภูมิอบชุบ 1,000 °C ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยที่ได้จากการชุบแข็งในตัวกลางน้ำมัน มีค่ามากที่สุด รองลงมาคือ น้ำเกลือและน้ำ ตามลำดับ



สรุปในตารางที่ 4.16 ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน  
ในตัวกลางแต่ละชนิด

- การชุบแข็งในตัวกลางน้ำมัน ค่าความทนแรงกระแทกเฉลี่ยที่มากที่สุด คือ ออบชุบที่  
อุณหภูมิ 800 °C และ 900 °C รองลงมาคือ 1,000 °C

- การชุบแข็งในตัวกลางน้ำ ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยที่มากที่สุด คือ ออบชุบที่อุณหภูมิ  
1,000 °C รองลงมาคือ 800 °C และ 900 °C ตามลำดับ

- การชุบแข็งในตัวกลางน้ำเกลือ ค่าความแข็งแรงเฉลี่ยที่มากที่สุด คือ ออบชุบที่อุณหภูมิ  
1,000 °C รองลงมาคือ 900 °C และ 800 °C ตามลำดับ

สรุปในตารางที่ 4.17 ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเปรียบเทียบใน ตัวกลางเดียวกัน  
ที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.16 ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันในตัวกลางชนิด

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับค่าความแข็งแรงเฉลี่ย เทียบที่อุณหภูมิเดียวกัน		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	1	2	3
900	1	3	2
1,000	1	3	2

ตารางที่ 4.17 ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเปรียบเทียบใน ตัวกลางเดียวกัน ที่อุณหภูมิ  
ต่างๆ

ตัวกลาง	ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยเทียบใน ตัวกลางเดียวกัน		
	800 °C	900 °C	1000 °C
น้ำมัน	1	1	2
น้ำ	2	3	1
น้ำเกลือ	3	2	1

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยมากที่สุด

เลข 2 หมายถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยมาก

เลข 3 หมายถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยน้อย

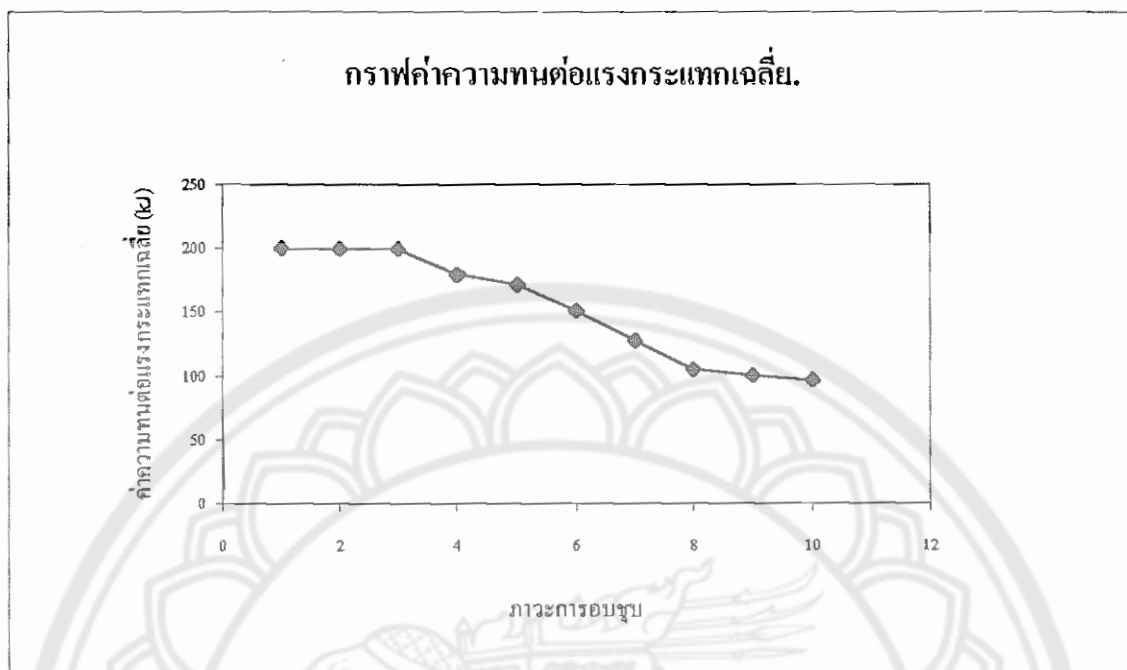
ที่ทุกอุณหภูมิการชุบแข็ง การชุบแข็งในน้ำมันให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยสูงสุด  
ที่อุณหภูมิการชุบแข็ง 800 °C การชุบแข็งในน้ำให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยสูง กว่า  
ในน้ำเกลือ แต่ที่ 900 °C และ 1,000 °C ในน้ำเกลือสูงกว่าในน้ำ

ตารางที่ 4.18 ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	1	6	8
900	1	7	5
1,000	2	4	3

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยมากที่สุด เรียงลงมาจนถึง เลข 9

หมายถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยน้อยที่สุด



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงภาวะชุบแข็งกับความทนต่อแรงกระแทก

ตารางที่ 4.19 อธิบายหมายเลขภาวะชุบแข็งในกราฟค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย

ลำดับ	ภาวะชุบแข็ง
1	น้ำมัน 800 °C
2	น้ำมัน 900 °C
3	น้ำมัน 1,000 °C
4	น้ำเกลือ 1,000 °C
5	น้ำ 1,000 °C
6	น้ำเกลือ 900 °C
7	น้ำ 800 °C
8	น้ำ 900 °C
9	น้ำเกลือ 800 °C
10	ธรรมดาไม่ชุบแข็ง

จากค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

1. กลุ่มที่มีค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยค่อนข้างสูง ซึ่งหมายถึง ภาวะการชุบแข็งที่ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย อยู่ในลำดับที่ 1 – 4 รวมถึงเหล็กกรรมดาที่ไม่ได้ชุบแข็งด้วย คือมีค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย 150 – 200 kJ ได้แก่ 800 °C ในน้ำมัน , 1,000 °C ในน้ำมัน , 1,000 °C ในน้ำ , 1,000 °C ในน้ำเกลือ , 900 °C ในน้ำมัน ดูจากตารางที่ 4.18 คือเขตพื้นที่ที่ไม่ได้แรงงาสังเกตได้ว่า

- เหล็กกรรมดาที่ยังไม่ได้ผ่านการชุบแข็ง มีค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยสูงที่สุด รองลงมา คือ การชุบแข็งในน้ำ , น้ำเกลือ และน้ำ ดามลำดับ

- ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 1,000 °C ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยต่ำสุดในกลุ่มนี้

2. กลุ่มที่มีค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ซึ่งหมายถึง ภาวะการชุบแข็งที่ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย อยู่ในลำดับที่ 5–9 คือมีค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย 0 – 150 kJ ได้แก่ 900 °C ในน้ำเกลือ , 900 °C ในน้ำ , 800 °C ในน้ำเกลือ และ 800 °C ในน้ำ ดูจากตารางที่ 4.18 คือเขตพื้นที่ที่แรงงานั้น นั่นเอง สังเกตได้ว่า

- ที่อุณหภูมิชุบแข็ง 800 °C และ 900 °C ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ส่วน 1,000 °C ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยค่อนข้างสูง

- การชุบแข็งในน้ำเกลือ และน้ำ ให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ ส่วนในน้ำมัน ให้ค่าเฉลี่ยความแข็งแรงค่อนข้างสูง

#### 4.3.6 วิเคราะห์ผลการทดลอง

4.3.6.1 สอดคล้องกับหลักการ คือ ขนาดของเกรนที่เล็ก จะมีความทนต่อแรงกระแทกต่ำกว่าเกรนที่ใหญ่ โดยกลุ่มที่มีขนาดเกรนค่อนข้างเล็ก จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยต่ำ ส่วนกลุ่มที่มีเกรนค่อนข้างใหญ่ จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยสูงค่า

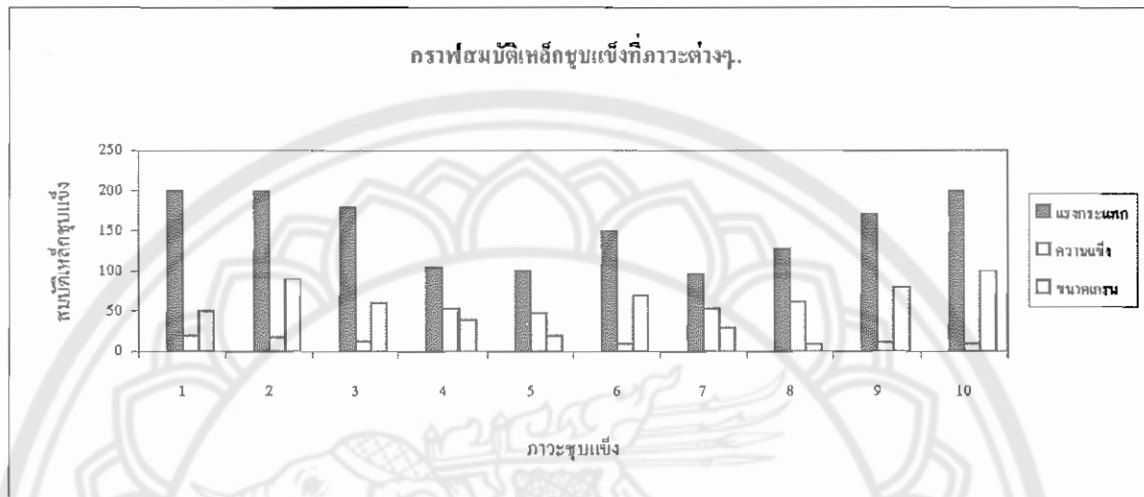
4.3.6.2 ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยของเหล็กภายหลังการชุบแข็งมีค่าลดลง

#### 4.3.7 สรุปผลการทดลอง

4.3.7.1 การชุบแข็งภายใต้ภาวะที่อุณหภูมิพอดีสูง และในตัวกลางที่มีอัตราการเย็นตัวต่ำ จะให้ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยสูงกว่าการชุบแข็งในตัวกลางที่มีอัตราเย็นตัวสูง

4.3.7.2 ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยของเหล็กภายหลังการชุบแข็งมีค่าลดลง

#### 4.4 สมบัติของเหล็กกรรม ( ขนาด , ค่าความแข็งเฉลี่ย และค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย )



ภาพที่ 4.16 กราฟสมบัติเหล็กชุบแข็งที่ภาวะต่างๆ

ตารางที่ 4.20 อธิบายหมายเลขภาวะชุบแข็งในกราฟสมบัติเหล็กชุบแข็งที่ภาวะต่างๆ

ลำดับ	ภาวะชุบแข็ง
1	น้ำมัน 800 °C
2	น้ำมัน 900 °C
3	น้ำมัน 1,000 °C
4	น้ำ 800 °C
5	น้ำ 900 °C
6	น้ำ 1,000 °C
7	น้ำเกลือ 800 °C
8	น้ำเกลือ 900 °C
9	น้ำเกลือ 1,000 °C
10	กรรมคาไม่ชุบแข็ง

หมายเหตุ : ขนาดเกรนในกราฟเป็นเพียงขนาดที่สมมติตามลำดับของขนาดเกรนเท่านั้น โดยเริ่ม

จาก 10, 20, ..., 100

ตารางที่ 4.21 ลำดับขนาดของเกรน

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับขนาดของเกรน		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	5	4	3
900	9	2	1
1,000	6	7	8

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงเล็กที่สุด เรียงลงมาจนถึง เลข 9 หมายถึงใหญ่ที่สุด

ตารางที่ 4.22 ลำดับค่าความแข็งเฉลี่ย

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับค่าความแข็งเฉลี่ย		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	5	2	3
900	6	4	1
1,000	7	9	8

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงค่าความแข็งเฉลี่ยมากที่สุด เรียงลงมาจนถึง เลข 9 หมายถึงค่าความแข็งเฉลี่ยน้อยที่สุด

ตารางที่ 4.23 ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย

อุณหภูมิ (°C)	ลำดับค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ย		
	น้ำมัน	น้ำ	น้ำเกลือ
800	1	6	8
900	1	7	5
1,000	2	4	3

หมายเหตุ เลข 1 หมายถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยมากที่สุด เรียงลงมาจนถึง เลข 9  
หมายถึงค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยน้อยที่สุด

จะเห็นได้ว่าผลการทดสอบแบ่งสมบัติของเหล็กออกเป็นสองกลุ่ม

1. กลุ่มพื้นที่ที่แรงงา สมบัติของกลุ่มนี้ คือ

- 1) ขนาดเกรนค่อนข้างเล็ก
- 2) ค่าความแข็งเฉลี่ยค่อนข้างสูง
- 3) ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ

ภาวะการชุบแข็งนี้ ได้แก่

- 1) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 800 °C ในตัวกลาง น้ำ
- 2) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 800 °C ในตัวกลาง น้ำเกลือ
- 3) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C ในตัวกลาง น้ำ
- 4) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C ในตัวกลาง น้ำเกลือ

2. กลุ่มพื้นที่ที่ไม่ได้แรงงา สมบัติของกลุ่มนี้ คือ

- 1) ขนาดเกรนค่อนข้างใหญ่
- 2) ค่าความแข็งเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ
- 3) ค่าความทนต่อแรงกระแทกเฉลี่ยค่อนข้างสูง

ภาวะการชุบแข็งนี้ ได้แก่

- 1) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 800 °C ในตัวกลาง น้ำมัน
- 2) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 900 °C ในตัวกลาง น้ำมัน
- 3) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 °C ในตัวกลาง น้ำมัน
- 4) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 °C ในตัวกลาง น้ำ
- 5) การชุบแข็งที่อุณหภูมิ 1,000 °C ในตัวกลาง น้ำเกลือ
- 6) เหล็กธรรมชาติไม่ชุบแข็ง

#### 4.4 วิเคราะห์ความแปรปรวนการทดสอบความแข็ง

กำหนดค่า  $H_0 : (\tau\beta)_{ij} = 0_k$  อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง

$H_1 : (\tau\beta)_{ij} \neq 0_k$  อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวมีผลกระทบต่อค่าความแข็ง

อย่างน้อยหนึ่งค่า

ระดับนัยสำคัญ  $\alpha = 0.05$

บริเวณวิกฤต เมื่อ  $F > f$   
 $> f_{0.05, 2, 26}$   
 $> 3.37$

ตารางที่ 4.24 การคำนวณค่าความแปรปรวน

อุณหภูมิ	อัตราเย็นตัว (C/s)						$y_{i..}$
	น้ำมัน (R = 45)	น้ำ		น้ำเกลือ			
		(R = 190)		(R = 230)			
800	19		51.6		53.8		$y_{1..}=377$
	19.5	$y_{11.}=58.5$	55.1	$y_{12.}=158.6$	55	$y_{13.}=159.7$	
	20.2		51.9		50.9		
900	16.1		47.8		62		$y_{2..}=384$
	18	$y_{21.}=53.2$	50.3	$y_{22.}=144.9$	62.9	$y_{23.}=185.9$	
	19.1		46.8		61		
1000	12.1		8		12.1		$y_{3..}=103.5$
	12.6	$y_{31.}=37$	12.1	$y_{32.}=29.9$	12.6	$y_{33.}=36.6$	
	12.3		9.8		11.9		
$y_{.j.}$		$y_{.1.}=148.9$		$y_{.2.}=333.4$		$y_{.3.}=382.2$	$y_{...}=864.5$

$$SS_T = \sum \sum \sum y_{ij.}^2 - [y^2 \dots / N] = [19.0^2 + \dots + 11.9^2] - [864.5^2 / 27] = 11056.00$$

$$SS_A = \left[ \frac{1}{ln} \right] \sum y_{i..}^2 - [y^2 \dots / N] = \frac{1}{3 \times 3} [377^2 + 384^2 + 103.5^2] - [864.5^2 / 27] = 5686.35$$

$$SS_B = \left[ \frac{1}{kn} \right] \sum y_{.j.}^2 - [y^2 \dots / N] = \frac{1}{3 \times 3} [148.9^2 + 333.4^2 + 382.2^2] - [864.5^2 / 27] = 3364.84$$

$$SS_{\text{subtotal}} = \left[ \frac{1}{n} \right] \sum \sum y_{ij.}^2 - [y^2 \dots / N] = \frac{1}{3} [58.7^2 + \dots + 36.6^2] - [864.5^2 / 27] = 11017.11$$



$$SS_{AB} = SS_{\text{subtotal}} - SS_A - SS_B = 11017.11 - 5686.35 - 3364.84 = 1965.92$$

$$SS_E = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} = 11056 - 5686.35 - 3364.84 - 1965.92 = 38.89$$

ตารางที่ 4.25 ANOVA

แหล่งความแปรปรวน ( Source )	ผลบวกกำลัง สอง ( SS )	องศาเสรี ( df )	ค่าเฉลี่ยของผลบวก กำลังสอง ( MS )	F จากการ คำนวณ
อุณหภูมิ, A	5686.35	2	2843.18	1316.29
อัตราการเย็นตัว, B	3364.84	2	1682.42	778.54
ค่าปฏิสัมพันธ์, AB	1965.92	4	491.48	227.54
ความคลาดเคลื่อน, Error	38.89	18	2.16	
ผลรวม, Total	11056	26		

จากตาราง  $F_{0.05,2,18} = 3.55$

$F_{0.05,4,18} = 2.93$

จะได้ว่า  $F_{\text{อุณหภูมิ (คำนวณ)}} > F_{\text{ตาราง}}$  นั่นคือ  $1316.29 > 3.55$

$F_{\text{อัตราการเย็นตัว (คำนวณ)}} > F_{\text{ตาราง}}$  นั่นคือ  $778.54 > 2.93$

แสดงว่า อุณหภูมิและอัตราการเย็นตัวมีผลต่อความแข็งอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

สมการถดถอยเชิงเส้นของค่าความแข็ง

กำหนดให้  $Y =$  อุณหภูมิ ( C )

$X_1 =$  อัตราการเย็นตัว ( C/s )

$X_2 =$  ค่าความแข็ง ( HRC )

ตารางที่ 4.26 การคำนวณสมการถดถอยของค่าความแข็ง

Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> Y	X <sub>2</sub> Y
800	45	19.57	800.65	2025	382.9849	36000	15656
800	190	52.87	10045.3	36100	2795.237	152000	42296
800	230	53.23	12242.9	52900	2833.433	184000	42584
900	45	17.73	797.85	2025	314.3529	40500	15957
900	190	48.3	9177	36100	2332.89	171000	43470
900	230	61.63	14174.9	52900	3798.257	207000	55467
1000	45	12.3	553.5	2025	151.29	45000	12300
1000	190	9.97	1894.3	36100	99.4009	190000	9970
1000	230	12.2	2806	52900	148.84	230000	12200
8100	1395	287.8	52572.4	273075	12856.69	1255500	249900

จะได้สมการปกติจากความสัมพันธ์  $X'X = X'Y$

โดยที่

$$XX = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 9 & 1395 & 287.8 \\ 1395 & 27307 & 52572.4 \\ 287.8 & 52572.4 & 12856.6854 \end{bmatrix}$$

$$XY = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8100 \\ 1255500 \\ 249900 \end{bmatrix}$$

สมการปกติเขียนในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$9b_0 + 1395b_1 + 287.8b_2 = 8100 \quad (4.1)$$

$$1395b_0 + 27307b_1 + 52572.4b_2 = 1255500 \quad (4.2)$$

$$287.8b_0 + 52572.4b_1 + 12856.6854b_2 = 249900 \quad (4.3)$$

$$(4.1) \times 401481 \quad 3613329b_0 + 560065995b_1 + 115546231.8b_2 = 3251996100 \quad (4.4)$$

$$(4.2) \times 2590.2 \quad 3613329b_0 + 707318865b_1 + 136173030.5b_2 = 3251996100 \quad (4.5)$$

$$(4.3) \times 12555 \quad 3613329b_0 + 660046482b_1 + 161415685.2b_2 = 3137494500 \quad (4.6)$$

$$(4.5) - (4.4) \quad 147252870b_1 + 20626798.7b_2 = 0 \quad (4.7)$$

$$(4.5) - (4.6) \quad 4727383b_1 - 25242654.7b_2 = 114501600 \quad (4.8)$$

$$(4.7) \times 47272383 \quad 6.960994068 \times 10^{15}b_1 + 9.750779282 \times 10^{14}b_2 = 0 \quad (4.9)$$

$$(4.8) \times 147252870 \quad 6.960994068 \times 10^{15}b_1 - 3.717053351 \times 10^{15}b_2 = 1.683068922 \times 10^{16} \quad (4.10)$$

$$(4.10) - (4.9) \quad -4.692131279 \times 10^{15}b_2 = 1.686068922 \times 10^{16}$$

$$b_2 = -3.593396735$$

แทน  $b_2$  ใน (4.7)  $147252870b_1 + [(20626798.7)(-3.593396735)] = 0$

$$b_1 = 0.5033536603$$

แทนค่า  $b_1, b_2$  ใน (4.1)  $9b_0 + 1395(0.5033536603) + [(287.8)(-3.593396735)] = 8100$

$$b_0 = 936.8890249$$

ดังนั้น สมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณของค่าประมาณอุมหุมิเฉลี่ยอยู่ในรูปของ

$$y = 936.89 + 0.50x_1 - 3.59x_2$$

หาค่าความแปรปรวนของ  $\beta \quad v(\beta) = \sigma^2(X'X)^{-1}$

จาก  $\sigma^2 = s^2 = \text{MSE} = [Y'Y - \beta'XY] / (n - k - 1)$

$$\beta'XY = [936.8890 \quad 0.5034 \quad -3.5934] \begin{bmatrix} 8100 \\ 1255500 \\ 249900 \end{bmatrix}$$

$$= 7322828.94$$

$$n[\bar{y}]^2 = 9[8100/9]^2 = 7290000 \quad Y'Y = \sum y_i^2 = 7350000$$

$$\text{SSR} = \beta'XY - n\bar{y}^2 = 7322828.94 - 7290000 = 32828.94$$

$$\text{SSE} = Y'Y - \beta'XY = 7350000 - 7322828.94 = 27171.06$$

ตารางที่ 4.27 การคำนวณค่าสถิติ F ของค่าความแข็ง

แหล่งที่มา	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง ( SS )	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง ( MS )	ค่าสถิติ F
สมการถดถอย ( R )	2	32828.94	16414.47	3.62
ความผิดพลาด ( E )	6	27171.06	4528.51	
ทั้งหมด	8	60000		

$$r^2 = SSR / SST : 0 < r^2 < 1$$

$$r^2 = 32828.94 / 60000 = 0.5471 : 0 < 0.5471 < 1$$

แสดงว่าตัวแปรสุ่ม X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์

ความแปรผันของค่าตัวแปรสุ่ม Y ที่เป็นผลเนื่องมาจากความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรสุ่ม X คิดเป็น 54.71%

จากสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณของค่าประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในรูปของ

$$y = 936.89 + 0.50x_1 - 3.59x_2$$

สามารถสรุปได้ว่า อัตราการเย็นตัวแปรผันตรงกับค่าความแข็ง คือ ถ้าอัตราการเย็นตัวเพิ่มขึ้น ค่าความแข็งก็จะเพิ่มขึ้นไปด้วย ส่วนอุณหภูมิแปรผกผันกับค่าความแข็ง คือ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความแข็งจะลดลง เนื่องจากว่าเมื่อทำการอบชุบชิ้นงานภายใต้อุณหภูมิที่สูง จะทำให้โครงสร้างของชิ้นงานเปลี่ยนไป

#### 4.5 สมการถดถอยเชิงเส้นของค่าความทนต่อแรงกระแทก

กำหนดให้  $Y =$  อุณหภูมิ ( C )

$X_1 =$  อัตราการเย็นตัว ( C/s )

$X_2 =$  ค่าความทนต่อแรงกระแทก

ตารางที่ 4.28 การคำนวณสมการถดถอยค่าความทนต่อแรงกระแทก

Y	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> Y	X <sub>2</sub> Y
800	190	105.23	19993.7	36100	11073.35	152000	84184
800	230	97.07	22326.1	52900	9422.585	184000	77656
900	190	100.87	19165.3	36100	10174.76	171000	90783
900	230	127.67	29364.1	52900	16299.63	207000	114903
1000	190	151.1	28709	36100	22831.21	190000	151100
1000	230	171.33	39405.9	52900	29353.97	230000	171330
5400	1260	753.27	158964.1	267000	99155.5	1134000	689956

จะได้สมการปกติจากความสัมพันธ์  $X'X = X'Y$

โดยที่

$$XX = \begin{bmatrix} n & \sum x_{1i} & \sum x_{2i} \\ \sum x_{1i} & \sum x_{1i}^2 & \sum x_{1i}x_{2i} \\ \sum x_{2i} & \sum x_{1i}x_{2i} & \sum x_{2i}^2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} 6 & 1260 & 753.27 \\ 1260 & 267000 & 158964.1 \\ 753.27 & 158964.1 & 99155.5 \end{bmatrix}$$

$$XY = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum x_{1i}y_i \\ \sum x_{2i}y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5400 \\ 1134000 \\ 689956 \end{bmatrix}$$

สมการปกติเขียนในรูปอย่างง่ายได้ดังนี้

$$6b_0 + 1260b_1 + 753.27b_2 = 5400 \quad (4.11)$$

$$1260b_0 + 267000b_1 + 158964.1b_2 = 1134000 \quad (4.12)$$

$$753.27b_0 + 158964.1b_1 + 99155.5b_2 = 689956 \quad (4.13)$$

$$(4.11) \times 949120.2 \quad 5694721.2b_0 + 1195891452b_1 + 714943773.1b_2 = 5125249080 \quad (4.14)$$

$$(4.12) \times 4519.62 \quad 5694721.2b_0 + 1206738540b_1 + 718457325.6b_2 = 5125249080 \quad (4.15)$$

$$(4.13) \times 7560 \quad 5694721.2b_0 + 1201768596b_1 + 749615580b_2 = 5216067360 \quad (4.16)$$

$$(4.15) - (4.14) \quad 7088b_1 + 3513552.5b_2 = 0 \quad (4.17)$$

$$(4.15) - (4.16) \quad 4969944b_1 - 31158254.4b_2 = -90818280 \quad (4.18)$$

$$(4.17) \times 4969944 \quad 5.390941992 \times 10^{13} b_1 + 1.746215917 \times 10^{13} b_2 = 0 \quad (4.19)$$

$$(4.18) \times 1084708 \quad 5.390941992 \times 10^{13} b_1 - 3.379763274 \times 10^{14} b_2 = -9.851138752 \times 10^{14} \quad (4.20)$$

$$(4.19) - (4.20) \quad 3.554384866 \times 10^{14} b_2 = 9.851138752 \times 10^{14}$$

$$b_2 = 2.771545323$$

$$\text{แทน } b_2 \text{ ใน (4.17)} \quad 10847088b_1 + [(3513552.5)(2.771545323)] = 0$$

$$b_1 = -0.8977497$$

$$\text{แทนค่า } b_1, b_2 \text{ ใน (4.11)} \quad 6b_0 + 1260(-0.8977497) + [(753.27)(2.771545323)] = 5400$$

$$b_0 = 740.5737795$$

ดังนั้น สมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณของค่าประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในรูปของ

$$y = 740.5738 - 0.8977x_1 + 2.7715x_2$$

หาค่าความแปรปรวนของ  $\beta$   $v(\beta) = \sigma^2 (XX)^{-1}$

จาก  $\sigma^2 = s^2 = \text{MSE} = [YY - \beta XY] / (n - k - 1)$

$$\beta XY = [740.5738 \quad -0.8977 \quad 2.7715] \begin{bmatrix} 5400 \\ 1134000 \\ 689956 \end{bmatrix}$$

$$= 4893319.774$$

$$n[\bar{y}]^2 = 9[5400/9]^2 = 3240000 \quad Y'Y = \sum Y_i^2 = 4900000$$

$$\text{SSR} = \beta XY - n\bar{y}^2 = 4893319.774 - 3240000 = 1653319.774$$

$$\text{SSE} = Y'Y - \beta XY = 4900000 - 4893319.774 = 6680.226$$

ตารางที่ 4.29 การคำนวณหาค่าสถิติ F ของค่าความทนต่อแรงกระแทก

แหล่งที่มา	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง (SS)	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง (MS)	ค่าสถิติ F
สมการถดถอย (R)	2	1653319.774	826659.887	742.48
ความผิดพลาด (E)	6	6680.226	1113.371	
ทั้งหมด	8	1660000		

$$r^2 = SSR / SST : 0 < r^2 < 1$$

$$r^2 = 1653319.774 / 1660000 = 0.9960 : 0 < 0.9960 < 1$$

แสดงว่าตัวแปรสุ่ม X และ Y มีความสัมพันธ์เชิงเส้นอย่างสมบูรณ์  
 ความแปรผันของค่าตัวแปรสุ่ม Y ที่เป็นผลเนื่องมาจากความสัมพันธ์เชิงเส้นกับตัวแปรสุ่ม  
 X คิดเป็น 99.60%

จากสมการถดถอยเชิงเส้นแบบพหุคูณของค่าประมาณอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ในรูปของ

$$y = 740.5738 - 0.8977x_1 + 2.7715x_2$$

สามารถสรุปได้ว่า อัตราการเย็นตัวแปรผกผันกับค่าความทนต่อแรงกระแทก คือ ถ้าอัตราการ  
 เย็นตัวเพิ่มขึ้น ค่าความทนต่อแรงกระแทกก็จะน้อยลง ส่วนอุณหภูมิแปรผันตรงกับค่าความทนต่อ  
 แรงกระแทก คือ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความทนต่อแรงกระแทกก็จะสูงขึ้นด้วย