

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การทดสอบที่เหมาะสมของการชุบแข็ง

##### 4.1.1 ผลการทดลองการชุบแข็ง

สำหรับผลการทดลองการชุบแข็งที่ได้ดำเนินการทดลอง ตามแผนกรออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.1 เมื่อทำการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) แต่ละสภาวะของชิ้นทดสอบแล้วสามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการวัดค่าความแข็งจากการชุบแข็งในสภาวะต่าง ๆ

สารชุบ	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ความแข็ง (HRC)			ค่าเฉลี่ย	
		ชิ้นทดสอบ				
		1	2	3		
น้ำ	800	56.0	55.0	55.5	55.50	
	850	56.0	54.5	54.0	54.83	
	900	57.0	60.5	58.5	58.67	
น้ำมัน	800	51.0	51.0	52.5	51.50	
	850	50.5	52.5	52.0	51.67	
	900	50.0	49.5	51.0	50.17	

##### 4.1.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองการชุบแข็ง

จากการทดลองทดสอบที่เหมาะสมของการชุบแข็งเหล็กกล้าพสม AISI 4140 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งที่ 3 ระดับ คือ  $800^{\circ}\text{C}$ ,  $850^{\circ}\text{C}$  และ  $900^{\circ}\text{C}$  และชุบแข็งในสารชุบ 2 ประเภท คือน้ำ และน้ำมัน โดยความแข็งที่ต้องการของเหล็กกล้าพสมนี้คือ 54 HRC จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็ง คือที่ระดับอุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  ชุบแข็งในน้ำ แต่เมื่อสังเกตชิ้นทดสอบด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) จะพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำจะทำให้เกิดการแตกร้าว ดังนั้นจึง

วิเคราะห์ว่าสภาวะที่ใช้ในการชุบแข็งเหล็กกล้าพสม AISI ที่เหมาะสมคือ ที่ระดับอุณหภูมิ  $850^{\circ}\text{C}$  และชุบแข็งในน้ำมัน เนื่องจากจะได้ค่าความแข็งไกส์เคียงกับค่าที่ต้องการ

จากการทดลองนี้ค่าความแข็งที่คลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการอาจเกิดมาจากความชำนาญในการชุบแข็งของผู้ทดลอง หรือเนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิของเหล็กที่นำออกมากจากเตา ก่อนที่จะทำการชุบในน้ำมัน

#### 4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis)

ในการพิจารณาความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากการชุบและกระบวนการนี้ของความผันแปรจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ 2 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติค้านความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบการวัด และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ซึ่งหมายถึงความคลาดเคลื่อนที่ข้อมูลกระจายอย่างสุ่มรอบค่าแท้จริงค่าหนึ่ง

การวิเคราะห์ระบบการวัดนี้มีจุดประสงค์สำคัญในการวิเคราะห์ถึงแหล่งของความคลาดเคลื่อนในระบบการวัดด้วยการจำแนกค่าที่ได้รับการวัดออกเป็น ค่าจริง ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด ความคลาดเคลื่อนจากพนักงานวัด ความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของค่าวัดมีทั้งปริมาณที่สามารถกำจัดได้และกำจัดไม่ได้ เราจึงต้องดำเนินการกำจัดปริมาณที่ควบคุมได้ก่อน ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดด้วยการดำเนินการทำให้ระบบการวัดเป็นมาตรฐานก่อน จากนั้นจึงดำเนินการสอบเทียบเครื่องมือ เพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ

หลังจากกำจัดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบแล้วจะลดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มด้วยการประเมินถึงแหล่งความผันแปรต่าง ๆ ทั้งจากเครื่องมือวัด พนักงานวัด ตลอดทั้งสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อค่าวัดจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{ค่าวัด } (X_{ij}) &= \text{ค่าจริงของงาน } (\mu) + \text{ค่าไบอัส } (b) \\ &+ \text{ความแตกต่างเนื่องจากสาเหตุค้านชื้นงาน } (\alpha_i) \\ &+ \text{ความแตกต่างเนื่องจากสาเหตุค้านพนักงาน } (\beta_j) \\ &+ \text{ความแตกต่างเนื่องจากสาเหตุร่วมของชื้นงานกับพนักงาน } ((\alpha\beta)_{ij}) \\ &+ \text{ความแตกต่างเนื่องจากสาเหตุแบบสุ่ม } (\varepsilon_{ij}) \end{aligned}$$

$$\text{หรือ } X_{ij} = \mu + b + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ij} \quad (4.1)$$

และได้ค่าความผันแปรของค่าวัด (Measurement Variation) ว่า

$$\sigma_x^2 = \sigma_\alpha^2 + \sigma_\beta^2 + \sigma_{\alpha\beta}^2 + \sigma_e^2 \quad (4.2)$$

ดังนั้น การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) จะเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงสถิติของระบบการวัดที่ได้เพื่อแยกแยะความผันแปรออกเป็นชิ้นงาน (Part-to-Part Variation ; PV) พนักงานวัด (Appraiser Variation ; AV) ความผันแปรร่วม (Interaction Variation ; IV) และแยลลงความผันแปรอื่น ๆ ที่ไม่สามารถควบคุมได้โดยธรรมชาติ ซึ่งโดยปกติจะมีแยลลงความผันแปรหลักมาจากการอุปกรณ์วัด (Equipment Variation ; EV) ทั้งนี้การวิเคราะห์ระบบการวัดนี้จะอยู่ภายใต้ค่าที่ได้จากการประเมินผลระบบการวัด (Measurement System Evaluation)

#### 4.2.1 การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด

การวิเคราะห์ความแม่นยำนี้ จะมุ่งพิจารณาใน 2 ประเด็นหลัก คือ คุณสมบัติเชิงสถิติของค่าวัดมีความไวต่อเทคนิคของพนักงานวัดหรืออุปกรณ์วัดหรือไม่ และระบบการวัดที่พิจารณา มีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงความผันแปรของกระบวนการผลิตหรือไม่

คุณสมบัติด้านความแม่นยำนี้ หากจำแนกตามช่วงเวลาที่เกิดขึ้นแล้วจะได้รับการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความสามารถในการทำซ้ำ หรือ รีพีทเทบิลิตี้ (Repeatability) และความสามารถในการทำเหมือน หรือ รีโปรดิวซิบิลิตี้ (Reproducibility) โดยที่รีพีทเทบิลิตี้ของระบบการวัด หมายถึง ค่าความแตกต่างในการวัดอย่างต่อเนื่องกับงานชิ้นเดียวเครื่องมือเดียวกันและคุณภาพนักงานคนเดียวกัน ซึ่งโดยปกติจะใช้ค่ารีพีทเทบิลิตี้ในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะสั้น (Short-Term Measurement) ส่วนรีโปรดิวซิบิลิตี้ของระบบการวัด หมายถึง ค่าความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของการวัดกับงานชิ้นเดียวกันคุณภาพเครื่องมือเดียวกันแต่ต่างพนักงานกัน โดยปกติจะใช้ค่ารีโปรดิวซิบิลิตี้ในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะยาว (Long-Term Measurement) ดังนั้นการประเมินผลค่ารีพีทเทบิลิตี้และรีโปรดิวซิบิลิตี้ของระบบการวัด (Gage Repeatability and Reproducibility ; GR&R) จะหมายถึงการประเมินผลค่าผันแปรอันเนื่องมาจากการวัดค่าจริงของงานหนึ่งชิ้นแบบซ้ำ ๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันแล้วมีการเปลี่ยนเสื่อนไป

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด โดยอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือกลวิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยหลักการแยกความผันแปรในรูปความแปรปรวนออกเป็นความผันแปรย่อย ๆ ตามแยลลงผันแปรจากแหล่งใดมีนัยสำคัญ

ในการใช้วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการวิเคราะห์ความเม่นยำของระบบการวัดนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้มาจากการทดลองแบบบล็อก (Randomized Block Design ; RBD) โดยที่มีพนักงานวัดคือปัจจัยที่ทำการศึกษาและชิ้นงานคือบล็อก ซึ่งมีความจำเป็นต้องพยายามทำให้ความผันแปรภายในบล็อก (หรือ ชิ้นงาน) มีความใกล้เคียงกันในขณะที่ให้ความผันแปรระหว่างบล็อก (หรือ ชิ้นงาน) มีค่าสูง ๆ ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

- 1) เลือกพนักงานวัดในกระบวนการทดสอบมา 2 คน อายุ่งสูม
- 2) เลือกชิ้นงานมาอย่างสุ่มจากกระบวนการจำนวน 10 ชิ้น โดยพยายามให้ความผันแปรครอบคลุมความผันแปรของกระบวนการ แล้วทำการกำหนดตัวเลขแสดงชิ้นที่ของชิ้นงานโดยไม่ให้พนักงานทราบ
- 3) ทำการทดลองอย่างสุ่มภายในบล็อก (ชิ้นงาน) จนครบทุกชิ้นงานแล้วบันทึกผลลงตารางทดลอง แล้วทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ระบบการวัดพลังงานกระแสแทรกจากการอบคืนตัว

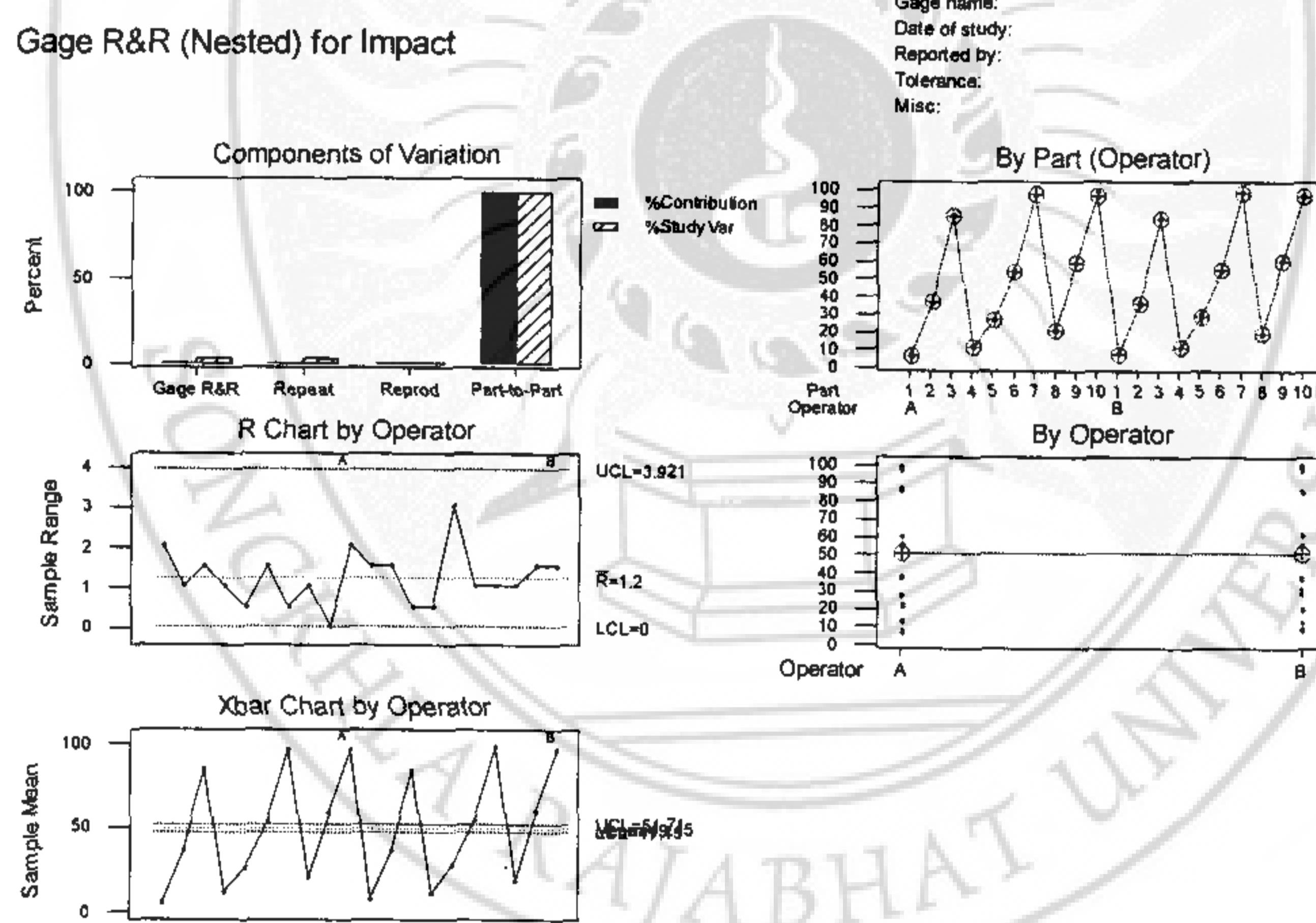
จากการทดลอง ทำการสุ่มเลือกพนักงานมา 2 คน และทำการสุ่มช้อน (Nested) ชิ้นงานจำนวน 10 ชิ้น ทำการวัดช้าชีนละ 2 ครั้ง ตามแผนการทดลองที่วางไว้จนครบทุกชิ้น โดยแผนการทดลองต้องเป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) แล้วบันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 4.2

ในการนี้จะต้องดำเนินการวิเคราะห์แบบสุ่มช้อน (Nested) เริ่มแรกเราต้องพิจารณาคุณภาพของข้อมูลจากระบบการวัดก่อน เนื่องจากคุณภาพส่งผลสำคัญต่อการวัดคือการพิจารณาสารสนเทศด้านความผันแปรของข้อมูลวัด เพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัดสำหรับการอธิบายถึงความผันแปรของกระบวนการ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องมีคุณสมบัติเฉพาะด้านความสามารถในการแยกความแตกต่าง (Discrimination) หรือเรโซลูชัน (Resolution) ได้

จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 เราสามารถวิเคราะห์ความสามารถในการแยกความแตกต่างของระบบการวัด ได้จากการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุม R ซึ่งพบว่าแผนภูมิควบคุม R แสดงค่าพิสัยที่มีความเป็นไปได้มากกว่า 3 ค่า และอยู่ภายใต้ค่าควบคุมของแผนภูมิ ดังนั้นลักษณะของระบบการวัดมีความสามารถในการแยกความแตกต่างของค่าวัดได้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดผลลัพธ์งานกระแทกจากการอบคึ่นตัว (หน่วย : จูด)

ชิ้นงานตัวอย่าง	พนักงานวัดคนที่ 1 (A)		พนักงานวัดคนที่ 1 (B)	
	1	2	1	2
1	7	5	6.5	8
2	36	37	37	35.5
3	86	84.5	84	84.5
4	12	11	11.5	11
5	26	26.5	30	27
6	53	54.5	54	55
7	97.5	97	99	98
8	20	21	19	18
9	59	59	59.5	61
10	96	98	96	97.5



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดผลลัพธ์งานกระแทก

จากนั้นเราพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจขับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างตัวต่อตัวนั้น สามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิควบคุม  $\bar{X}$  พิจารณาผลการทดสอบ

การวัดสำหรับพนักงานวัดแต่ละคนพบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มอยู่ (หมายถึง การกำจัดรีพีททะเบียนต่อไปแล้ว) จะอธิบายถึงความแตกต่างของสิ่งตัวอย่าง และเนื่องจากในแผนภูมิควบคุม X นั้น พิกัดควบคุมจะอธิบายถึงความแตกต่างโดยสารเหตุธรรมชาติของแต่ละสิ่งตัวอย่างมากกว่าการอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่าง ดังนั้นจากผลการทดลองฯ จุด X ส่วนใหญ่ออกนอกพิกัดควบคุม แสดงว่าความผันแปรส่วนใหญ่มาจากการความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่างและแสดงให้เห็นถึงว่าชิ้นงานที่เราเลือกมาทำการทดลองนั้นได้เลือกมาครอบคลุมช่วงความผันแปรของกระบวนการ

ในการพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างนั้น เราจะพิจารณาความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานควบคู่ไปด้วย โดยแนวคิดนี้มาจากในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการ โดยอาศัยสถิตินั้น จะนีข้อจำกัดหลายด้านทำให้ไม่สามารถทำการวัดคุณลักษณะที่สนใจของชิ้นงานทุกชิ้นตามการกระจายในกระบวนการผลิตได้ จึงมีความจำเป็นต้องรวมคุณลักษณะที่ได้รับจากการวัดที่ไม่มีความแตกต่างกัน (หรือแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ) อยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน และตีความหมายว่าชิ้นงานที่ได้รับการวัดที่มีข้อมูลอยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน จะมีคุณลักษณะที่เหมือนกัน ดังนั้นถ้าหากขาดคุณลักษณะในการแยกแยะความแตกต่างแล้วก็จะทำให้ขาดคุณลักษณะในการควบคุมและวิเคราะห์ผล แนวคิดในการวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นพิจารณาจากความผันแปรของกระบวนการหรือสิ่งที่ได้รับการวัดกับความละเอียดของค่าที่วัด ได้จากระบบการวัดที่หมายถึงหน่วยที่เล็กที่สุดของข้อมูลจากการวัดในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นข้อมูลจะต้องได้รับการจำแนกได้ไม่ต่ำกว่า 5 ประเภท ซึ่งจำนวนประเภทของข้อมูล (Number of Distinct Categories) สามารถประมาณได้จากสมการที่ 4.3

$$\text{จำนวนประเภทของข้อมูล} = \sqrt{2} \frac{PV}{GR \& R} \quad (4.3)$$

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ในส่วนของการประเมินผลกระทบการวัด (MSE) สามารถศึกษาได้ดังนี้  $ndc = 50$  แสดงว่าระบบการวัดที่ศึกษาทำการแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 50 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน และแสดงว่าข้อมูลที่ได้จะใช้ประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดได้ดังนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

ตารางที่ 4.3 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Gage R&R

ของระบบการวัดพัฒางานกระแสแก๊ส

**Gage R&R Study - Nested ANOVA**

Gage R&R (Nested) for Impact

**Nested ANOVA Table**

Source	DF	SS	MS	F	P
Operator	1	0.9	0.90	0.00	0.98477
Part (Operator)	18	43232.7	2401.82	2561.94	0.00000
Repeatability	20	18.7	0.94		
Total	39	43252.4			

**Gage R&R**

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	0.94	0.08
Repeatability	0.94	0.08
Reproducibility	0.00	0.00
Part-To-Part	1200.44	99.92
Total Variation	1201.38	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var ( $S_{\text{study}} \times \text{SD}$ )	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.9682	4.986	2.79
Repeatability	0.9682	4.986	2.79
Reproducibility	0.0000	0.000	0.00
Part-To-Part	34.6474	178.434	99.96
Total Variation	34.6609	178.504	100.00

Number of Distinct Categories = 50

จากตารางความแปรปรวนสามารถตีความหมายผลการวิเคราะห์ได้ โดยความผันแปรจากสิ่งตัวอย่าง จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลทดลองทั้งหมดคือ 34.6609 จูล จะมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากชั้นงานทดสอบ 34.6474 จูล และความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากระบบการวัด 0.9682 จูล นอกเหนือนี้ความผันแปรที่ประมาณค่าได้ของระบบการวัด จะมีความผันแปรของค่าวัด 178.504 จูล ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากกระบวนการผลิต 178.434 จูล และความผันแปรจากกระบวนการวัด 4.986 จูล

เมื่อประเมินผลกระทบการวัดเทียบกับความผันแปรของกระบวนการ (TV) หรือ P/TV แล้วจะพบว่า ถ้าความผันแปรของกระบวนการผลิตที่ประเมินได้จากค่าวัดทั้งหมด (TV) มีค่าเท่ากับ 100 จูลแล้ว จะเป็นความผันแปรจากสาเหตุของกระบวนการผลิต 99.96 จูล และความ

ผันแปรจากระบบการวัด 2.79 จูล ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากสาเหตุรีพีททะบิลิตี้ 2.79 จูล และความผันแปรจากพนักงานวัดหรือรีโปรดิวชิบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับรีพีททะบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์)

ในส่วนของการวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) สามารถตีความหมายได้ดังนี้ ค่า VarComp ที่หมายถึงองค์ประกอบของความแปรปรวนของการทดลองแบบตัวแปรสุ่ม จะพบว่า ความแปรปรวนจากข้อมูลทั้งหมดมีค่า 1201.38 จูล<sup>2</sup> ซึ่งมาจากความแปรปรวนจากการระบุการผลิต 1200.44 จูล<sup>2</sup> และความแปรปรวนจากระบบการวัด 0.94 จูล<sup>2</sup> ซึ่งส่วนใหญ่มาจากการสาเหตุด้านรีพีททะบิลิตี้ และสาเหตุด้านรีโปรดิวชิบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีพีททะบิลิตี้ จากองค์ประกอบของความแปรปรวน เมื่อทำการเทียบเป็นค่าร้อยละแล้วจะพบว่า ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดคือ 100 จูล<sup>2</sup> จะเป็นผลเนื่องจากความแปรปรวนของกระบวนการผลิต 99.92 จูล<sup>2</sup> และความแปรปรวนของระบบการวัด 0.08 จูล<sup>2</sup> ซึ่งมาจากสาเหตุด้านรีพีททะบิลิตี้ ส่วนสาเหตุด้านรีโปรดิวชิบิลิตี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีโปรดิวชิบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องตีความหมายจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เนื่องจากทราบว่า อิทธิพลของพนักงานวัดจะไม่มีนัยสำคัญต่อความผันแปรของข้อมูลในระบบการวัด

จากการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดพัฒนาการกระแทกสรุปได้ว่า ความแม่นยำของระบบการวัดของเครื่องทดสอบแรงกระแทกมีความเหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานในระบบการวัดได้

#### 4.2.4 การวิเคราะห์ระบบการวัดความแข็งจากการอบคืนตัว

จากการทดลอง ทำการสุ่มเลือกพนักงานมา 2 คน และทำการสุ่มเลือกชิ้นงานมาจำนวน 10 ชิ้น ทำการวัดชิ้นละ 2 ครั้ง ตามแผนการทดลองที่วางไว้ในครบทุกชิ้น โดยแผนการทดลองต้องเป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomization Design; CRD) แล้วบันทึกผลการทดลองในตารางที่ 4.4

จากการทดลองตามตารางที่ 4.4 จะทำการวิเคราะห์ระบบการวัดโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ได้ผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.2

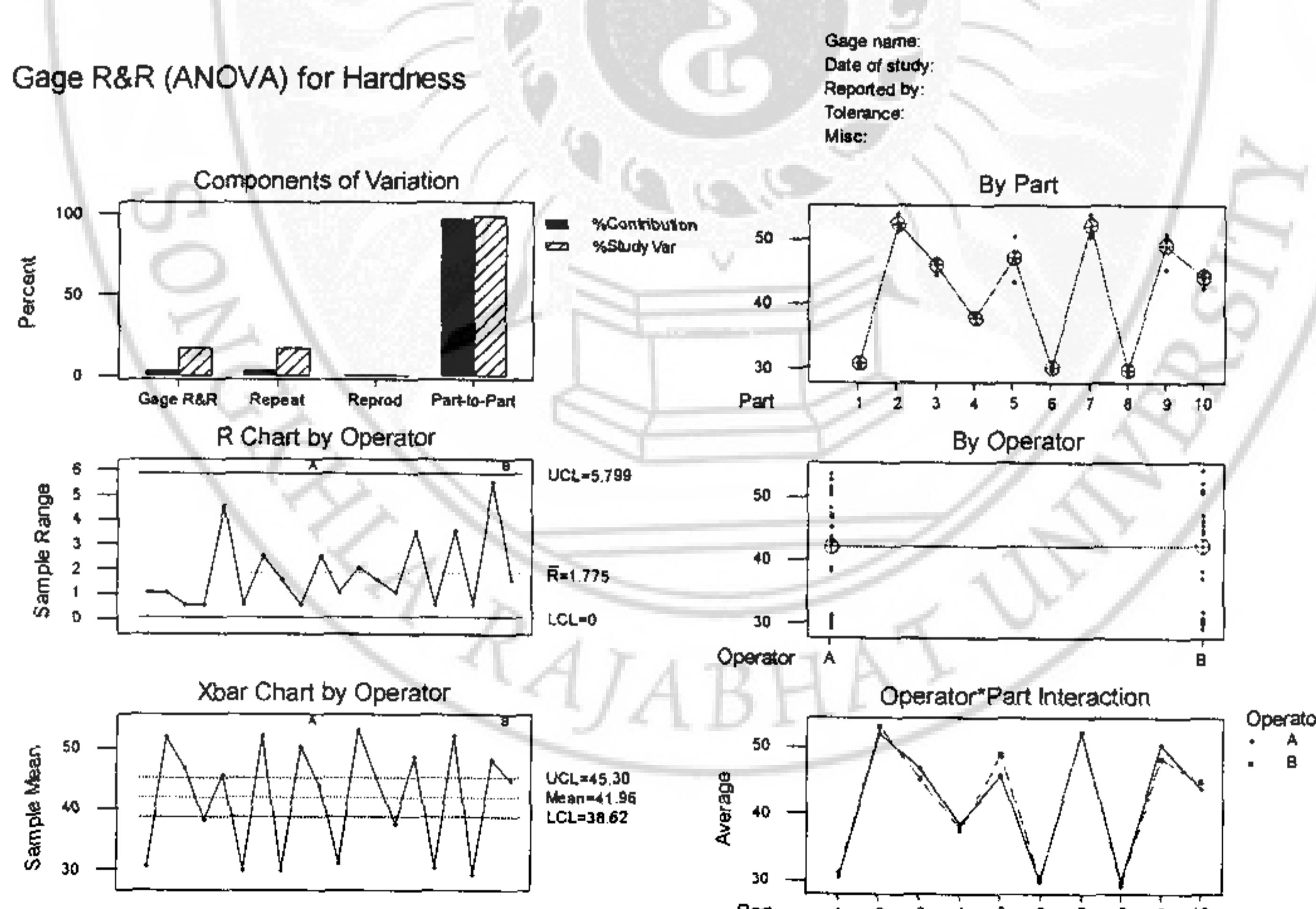
จากรูปที่ 4.2 เริ่มแรกเราต้องพิจารณาคุณภาพของข้อมูลจากระบบการวัดก่อน เนื่องจากคุณภาพส่วนใหญ่จะมีค่าความผันแปรสูงกว่า 30% ทำให้ระบบการวัดไม่สามารถใช้งานได้ แต่ในตารางที่ 4.4 แสดงค่าความผันแปรสูงกว่า 30% แต่ค่าความผันแปรของข้อมูลวัดเพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัด สำหรับการอธิบายถึงความผันแปรของข้อมูลวัด เพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัด สำหรับการอธิบายถึงความผันแปรของกระบวนการ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องมีคุณสมบัติเฉพาะด้านความสามารถในการแยกความแตกต่าง (Discrimination) หรือรีโซลูชัน (Resolution) ได้ ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์ความสามารถในการแยกความแตกต่างของระบบการวัดได้จากการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุม R ซึ่งพบว่าแผนภูมิควบคุม R แสดงค่าพิสัยที่มีความเป็นไปได้มากกว่า 3 ค่าและอยู่ภายใต้เส้นควบคุม UCL และ LCL แสดงว่าระบบการวัดมีความสามารถในการแยกความแตกต่างของข้อมูลที่ต้องการ

ของแผนภูมิ ดังนั้นลักษณะของระบบการวัดมีความสม่ำเสมอคือและมีความสามารถในการแยกความแตกต่างของค่าวัดได้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการวัดความแข็งจากการอบคีนตัว (หน่วย : HRC)

ชิ้นงานตัวอย่าง	พนักงานวัดคนที่ 1 (A)		พนักงานวัดคนที่ 1 (B)	
	1	2	1	2
1	30.0	31.0	30.5	31.5
2	52.5	51.5	54.0	52.0
3	47.0	46.5	44.5	46.0
4	38.5	38.0	38.0	37.0
5	43.5	48.0	47.0	50.5
6	29.5	30.0	30.0	30.5
7	53.5	51.0	54.0	50.5
8	29.0	30.5	29.0	29.5
9	50.0	50.5	51.0	45.5
10	45.0	42.5	45.5	44.0

Gage R&R (ANOVA) for Hardness



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดความแข็ง

จากนั้นพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างตัวต่อตัว ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิควบคุม X̄ พิจารณาผลการทดลองการวัดสำหรับพนักงานวัดแต่ละคนพบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มย่อย (หมายถึงการกำจัดรีพิกท์บล็อกต่อไปแล้ว) จะอธิบายถึงความแตกต่างของสิ่งตัวอย่าง และเนื่องจากในแผนภูมิควบคุม X̄ นั้น พิกัดควบคุมจะอธิบายถึงความแตกต่างโดยสาเหตุธรรมชาติของแต่ละสิ่งตัวอย่างมากกว่าการอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่าง ดังนั้นจากผลการทดลองฯ ดังนี้ให้เห็นถึงว่า แสดงว่าความผันแปรส่วนใหญ่มาจากการแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่างและแสดงให้เห็นถึงว่า ชิ้นงานที่เราเลือกมาทำการทดลองนั้น ได้เลือกมาครอบคลุมช่วงความผันแปรของกระบวนการ

พิจารณาจากอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างพนักงานวัดและชิ้นงานวัด โดยพิจารณาว่ากราฟที่เพลoitซึ่งแสดงถึงค่าวัดชิ้นงานที่วัดโดยพนักงานแต่ละคนตัดกันหรือไม่ ในกรณีกราฟไม่มีการตัดกันอย่างเด่นชัด แสดงว่าไม่มีอิทธิพลร่วม กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงชิ้นงานวัดไม่มีผลต่อค่าวัดที่พนักงานวัดได้

ในการพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างนั้น เราจะพิจารณาความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานควบคู่ไปด้วย โดยแนวคิดนั้นมาจากในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการโดยอาศัยสถิตินั้น จะมีข้อจำกัดหลายด้านทำให้ไม่สามารถทำการวัดคุณลักษณะที่สนใจของชิ้นงานทุกชิ้นตามการกระจายในกระบวนการผลิตได้ จึงมีความจำเป็นต้องรวมคุณลักษณะที่ได้รับจากการวัดที่ไม่มีความแตกต่างกัน (หรือแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ) อยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน และตีความหมายว่าชิ้นงานที่ได้รับการวัดที่มีข้อมูลอยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน จะมีคุณลักษณะที่เหมือนกัน ดังนั้นถ้าหากขาดคุณลักษณะในการแยกแยะความแตกต่างแล้วก็จะทำให้ขาดคุณลักษณะในการควบคุมและวิเคราะห์ผล แนวคิดในการวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นพิจารณาจากความผันแปรของกระบวนการหรือสิ่งที่ได้รับการวัดกับความละเอียดของค่าที่วัด ได้จากระบบการวัดที่หมายถึงหน่วยที่เลือกที่สุดของข้อมูลจาก การวัด ในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นข้อมูลจะต้องได้รับการจำแนกได้ไม่ต่ำกว่า 5 ประเภท ซึ่งจำนวนประเภทของข้อมูล (Number of Distinct Categories) สามารถประมาณได้ จากระยะที่ 4.3

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ในส่วนของการประเมินผลกระทบ การวัด (MSE) สามารถตีความหมายได้ดังนี้  $ndc = 8$  แสดงว่าระบบการวัดที่ศึกษาทำการแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 8 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าข้อมูลที่ได้จะใช้ประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดได้ ดังนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

ตารางที่ 4.5 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Gage R&R ของระบบการวัดความแข็ง

### Gage R&R Study - ANOVA Method

Gage R&R for Hardness

#### Two-Way ANOVA Table With Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	3041.26	337.917	165.230	0.00000
Operator	1	0.16	0.156	0.076	0.78848
Operator*Part	9	18.41	2.045	0.788	0.63008
Repeatability	20	51.88	2.594		
Total	39	3111.69			

#### Two-Way ANOVA Table Without Interaction

Source	DF	SS	MS	F	P
Part	9	3041.26	337.917	139.434	0.00000
Operator	1	0.16	0.156	0.064	0.80135
Repeatability	29	70.28	2.423		
Total	39	3111.69			

### Gage R&R

Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)
Total Gage R&R	2.423	2.81
Repeatability	2.423	2.81
Reproducibility	0.000	0.00
Operator	0.000	0.00
Part-To-Part	83.873	97.19
Total Variation	86.297	100.00

Source	StdDev (SD)	Study Var ( $5.15 \times SD$ )	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	1.55676	8.0173	16.76
Repeatability	1.55676	8.0173	16.76
Reproducibility	0.00000	0.0000	0.00
Operator	0.00000	0.0000	0.00
Part-To-Part	9.15825	47.1650	98.59
Total Variation	9.28962	47.8415	100.00

Number of Distinct Categories = 8

จากตารางความแปรปรวนสามารถตีความหมายผลการวิเคราะห์ได้ โดยความผันแปรจากสิ่งตัวอย่าง จะมีส่วนเป็นมาตรฐานของข้อมูลทดลองทั้งหมดมีค่า  $9.28962 \text{ HRC}$  จะมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากชิ้นงานทดสอบ  $9.18825 \text{ HRC}$  และความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากระบบการวัด  $1.55676 \text{ HRC}$  นอกจากนี้ความผันแปรที่ประมาณค่าได้ของระบบการวัด จะมีความผันแปรของค่าวัด  $47.8415 \text{ HRC}$  ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากกระบวนการผลิต  $47.1650 \text{ HRC}$  และความผันแปรจากกระบวนการวัด  $8.0173 \text{ HRC}$

เมื่อประเมินผลกระทบจากการวัดเทียบกับความผันแปรของกระบวนการ ( $TV$ ) หรือ  $P/TV$  แล้วจะพบว่า ถ้าความผันแปรของกระบวนการผลิตที่ประเมินได้จากค่าวัดทั้งหมด ( $TV$ ) มีค่าเท่ากับ  $100$  จุดแล้ว จะเป็นความผันแปรจากสาเหตุของกระบวนการผลิต  $98.59 \text{ HRC}$  และความผันแปรจากกระบวนการวัด  $16.76 \text{ HRC}$  ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากสาเหตุรีพีททะบิลิตี้  $16.76 \text{ HRC}$  และความผันแปรจากพนักงานวัดหรือรีโปรดิวชิบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับรีพีททะบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์)

ในส่วนของการวิเคราะห์ระบบการวัด ( $MSA$ ) สามารถตีความหมายได้ดังนี้ ค่า  $\text{VarComp}$  ที่หมายถึงองค์ประกอบของความแปรปรวนของการทดลองแบบตัวแปรสุ่ม จะพบว่า ความแปรปรวนจากข้อมูลทั้งหมดมีค่า  $86.297 \text{ HRC}^2$  จะมาจากการความแปรปรวนจากการกระบวนการผลิต  $83.873 \text{ HRC}^2$  และความแปรปรวนจากการวัด  $2.423 \text{ HRC}^2$  ซึ่งส่วนใหญ่มาจากสาเหตุด้านรีพีททะบิลิตี้ และสาเหตุด้านรีโปรดิวชิบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีพีททะบิลิตี้ จากองค์ประกอบของความแปรปรวน เมื่อทำการเทียบเป็นค่าร้อยละแล้วจะพบว่า ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดคือ  $100 \text{ HRC}^2$  จะเป็นผลเนื่องจากความแปรปรวนของการกระบวนการผลิต  $97.19 \text{ HRC}^2$  และความแปรปรวนของการวัด  $2.81 \text{ HRC}^2$  ซึ่งมาจากการสาเหตุด้านรีพีททะบิลิตี้ ส่วนสาเหตุด้านรีโปรดิวชิบิลิตี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีโปรดิวชิบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์) ส่วนการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเริ่มจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (*Interaction Effect*) ระหว่างพนักงานและชิ้นงานก่อนเสมอ โดยในการทดลองนี้แสดงว่าที่ระดับนัยสำคัญ  $5\%$  อิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานและชิ้นงานอย่างไม่มีนัยสำคัญ แล้วให้ทำการเพิ่มองค์ความอิสระ ( $DF$ ) กับรีพีททะบิลิตี้ ด้วยการรวมความผันแปรของอิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานและชิ้นงานเข้ากับความผันแปรจากรีพีททะบิลิตี้ในรูปของความแปรปรวนร่วมเป็นตัวแบบครุภูมของการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากตารางพิจารณาค่า  $P-Value$  ของพนักงานวัดได้ค่า  $0.80135$  และชิ้นงานได้ค่า  $0.0000$  ซึ่งแสดงว่าพนักงานทั้งสองคนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเนื่องจากเป็นเหตุผลที่เราจึงใจเลือกเก็บชิ้นงานให้มีความแตกต่างกัน ดังนั้นชิ้นงานทดสอบจึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดความแข็งสรุปได้ว่า ความแม่นยำของระบบการวัดของเครื่องทดสอบความแข็งมีความเหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานในระบบการวัดได้ดี

#### 4.3 ผลการทดลองของการอบคีนตัว

##### 4.3.1 ผลการทดลองการวัดค่าพลังงานการระแทกจากการอบคีนตัว

สำหรับผลการทดลองการอบคีนตัวของการทดสอบพลังงานการระแทกจากการอบคีนตัว ดำเนินการทดลอง ตามแผนการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.5 เมื่อทำการทดสอบวัดค่า พลังงานการระแทก (Impact Energy) แต่ละสภาวะของชั้นทดสอบแล้วสามารถสรุปผลการทดลอง ได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองการวัดค่าพลังงานการระแทกจากการอบคีนตัวที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	พลังงานการระแทก (จูล)			ค่าเฉลี่ย	
		ชั้นทดสอบ				
		1	2	3		
30	250	7.5	7	6	6.83	
	350	8	11	8.5	9.17	
	450	18	16	17	17	
	550	38	37	36	37	
	650	85	86	84.5	85.17	
60	250	9.5	11.5	12	11	
	350	11	11.5	13	11.83	
	450	28.5	26	26.5	27	
	550	54	55	55	54.67	
	650	98	98.5	97.5	98	
90	250	18.5	21	20	19.83	
	350	19	16.5	17	17.5	
	450	18.5	20.5	21	20	
	550	59	58	59	58.67	
	650	95	97	97.5	96.5	

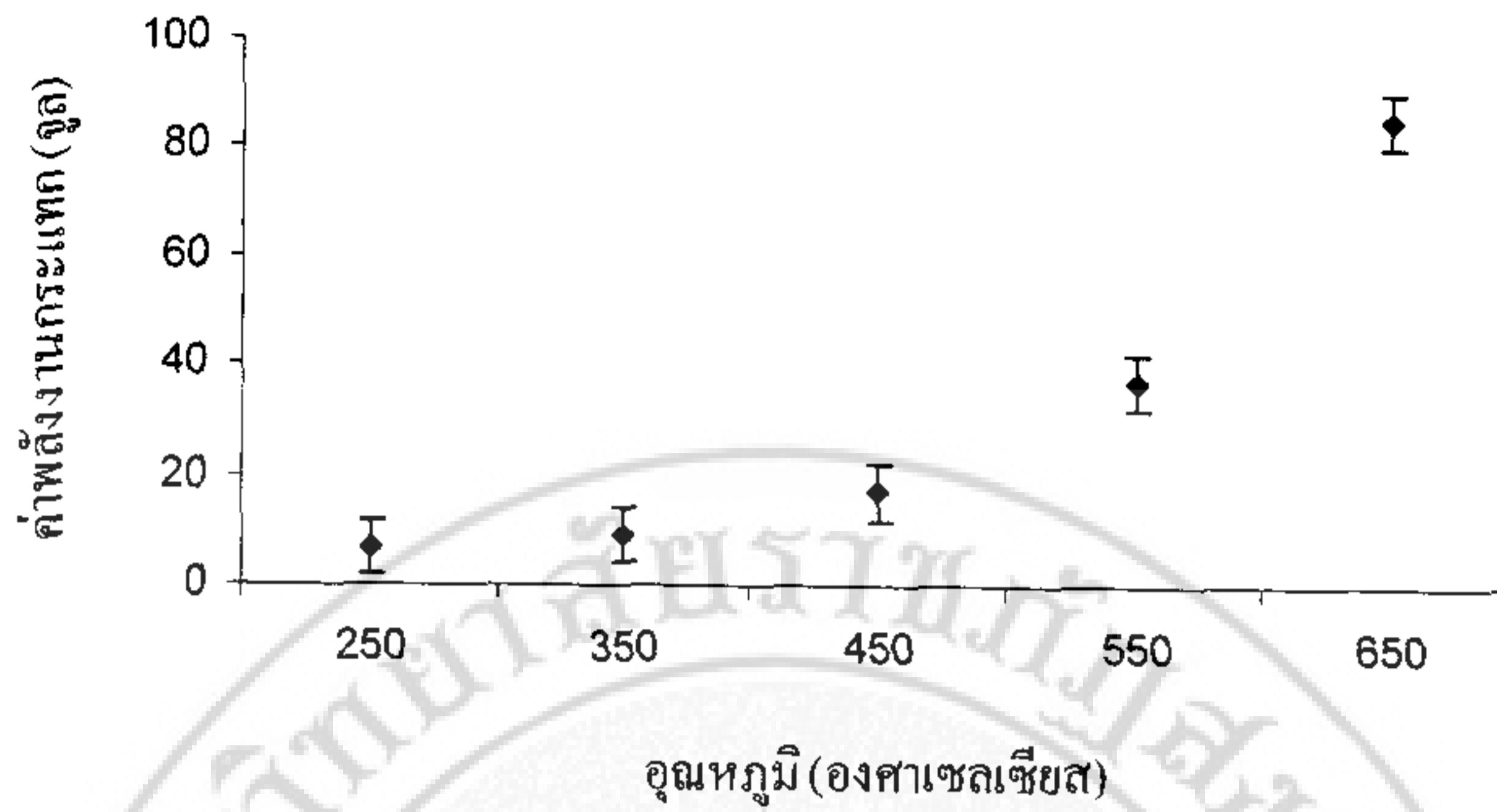
#### 4.3.2 ผลการทดสอบการวัดค่าความแข็งจากการอบคีนตัว

สำหรับผลการทดสอบการอบคีนตัวของการทดสอบความแข็งที่ได้ดำเนินการทดสอบ ตามแผนกรอ กแบบการทดสอบในตารางที่ 3.4 เมื่อทำการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) แต่ละสภาวะของชิ้นทดสอบแล้วสามารถสรุปผลการทดสอบได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7

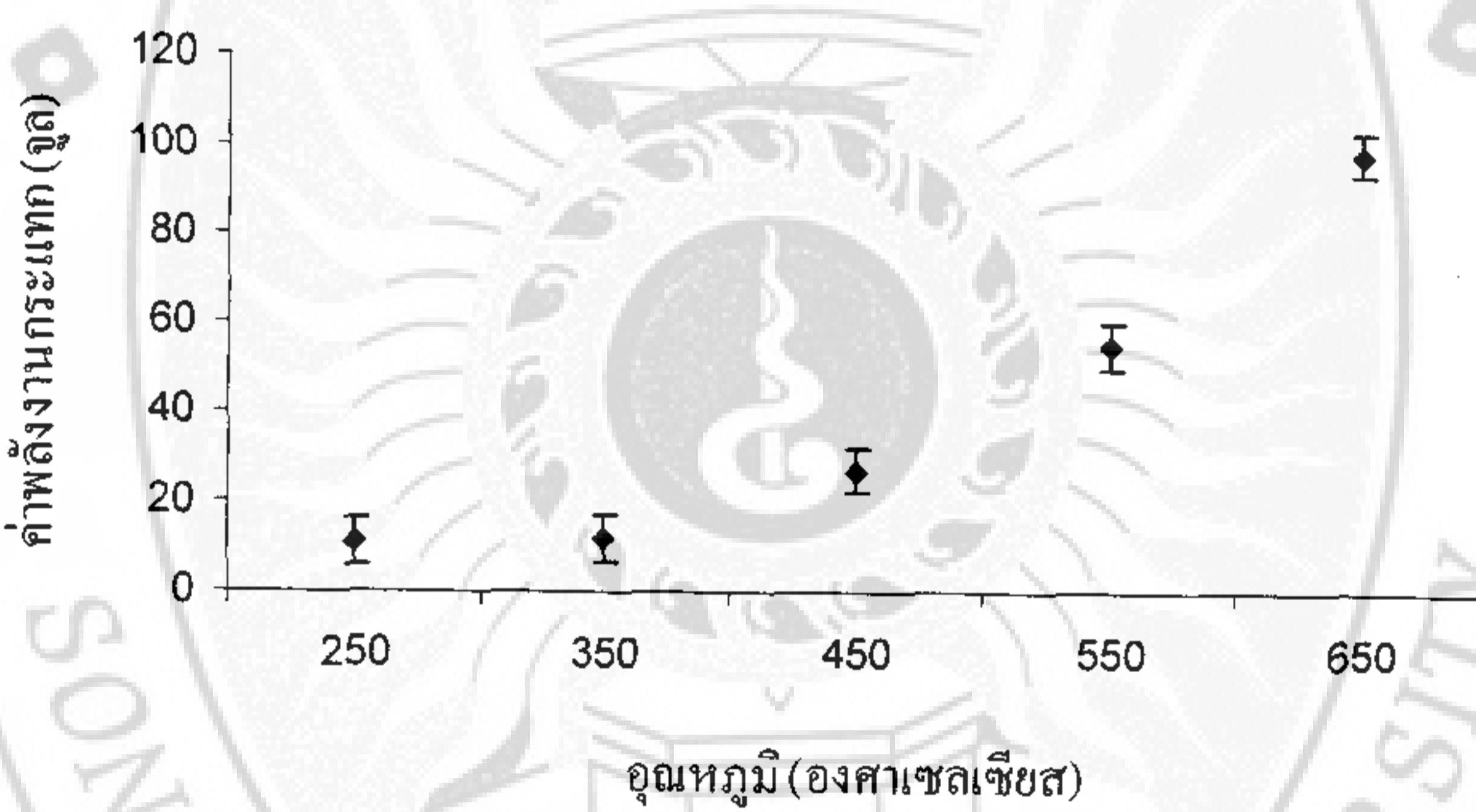
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบการวัดค่าความแข็งจากการอบคีนตัวที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ ( $^{\circ}\text{C}$ )	ความแข็ง (HRC)			ค่าเฉลี่ย	
		ชิ้นทดสอบ				
		1	2	3		
30	250	51.5	53.0	5.0	52.17	
	350	43.0	49.0	46.0	46.0	
	450	41.0	45.0	43.5	43.17	
	550	35.0	37.5	38.5	37.0	
	650	28.5	28.0	29.0	28.5	
60	250	49.0	48.5	52.0	49.83	
	350	46.0	50.5	51.5	49.33	
	450	43.5	45.5	45.0	44.67	
	550	36.0	37.5	37.0	36.83	
	650	28.5	29.0	29.5	29.0	
90	250	53.5	53.0	52.5	53.0	
	350	50.0	49.5	50.0	49.83	
	450	43.0	45.5	46.0	44.83	
	550	37.0	35.0	39.0	37.0	
	650	28.0	30.0	29.0	29.0	

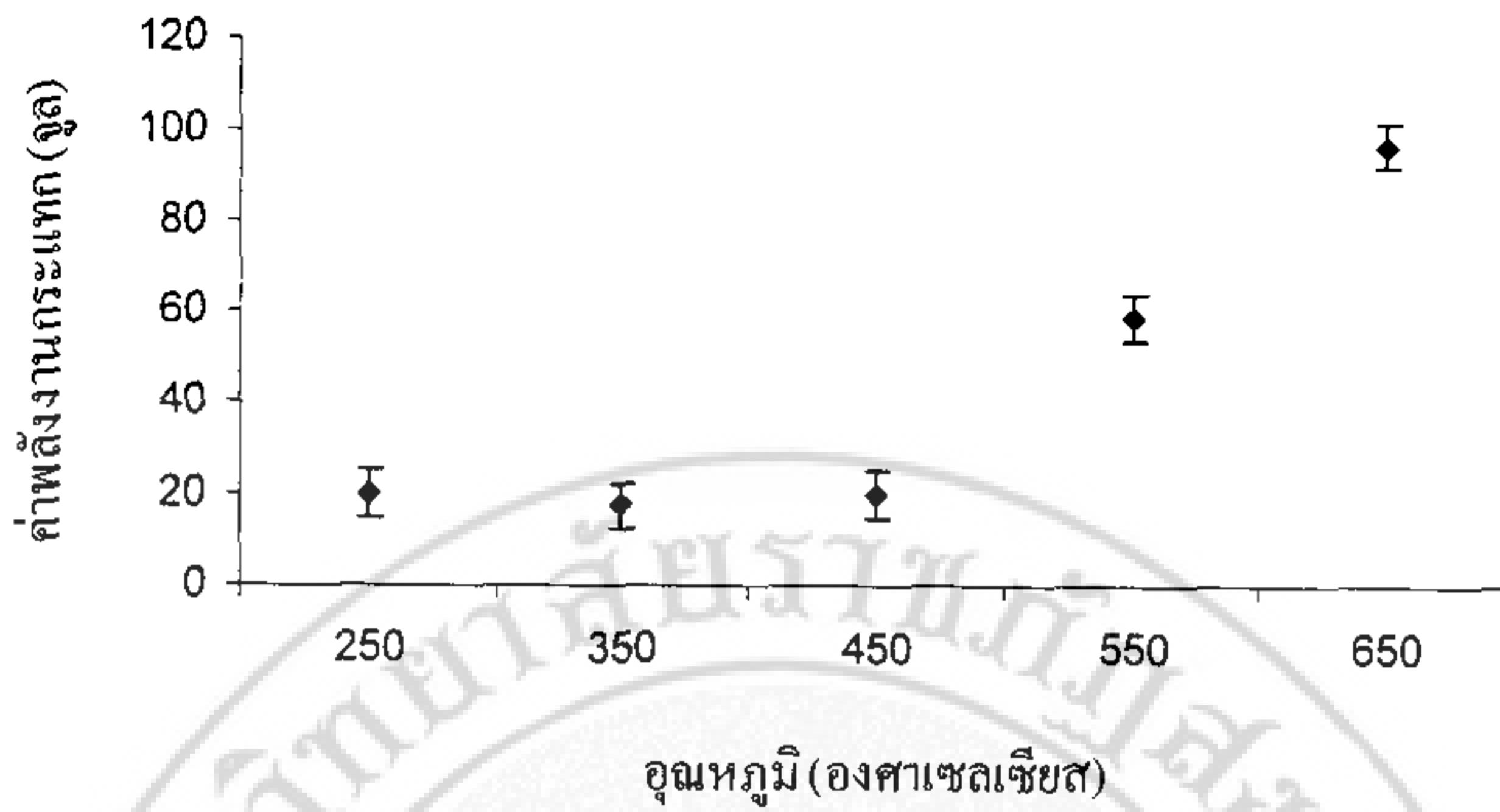
จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยนำเสนอด้วยกราฟแต่ละเวลา การอบคีนตัวได้ดังนี้



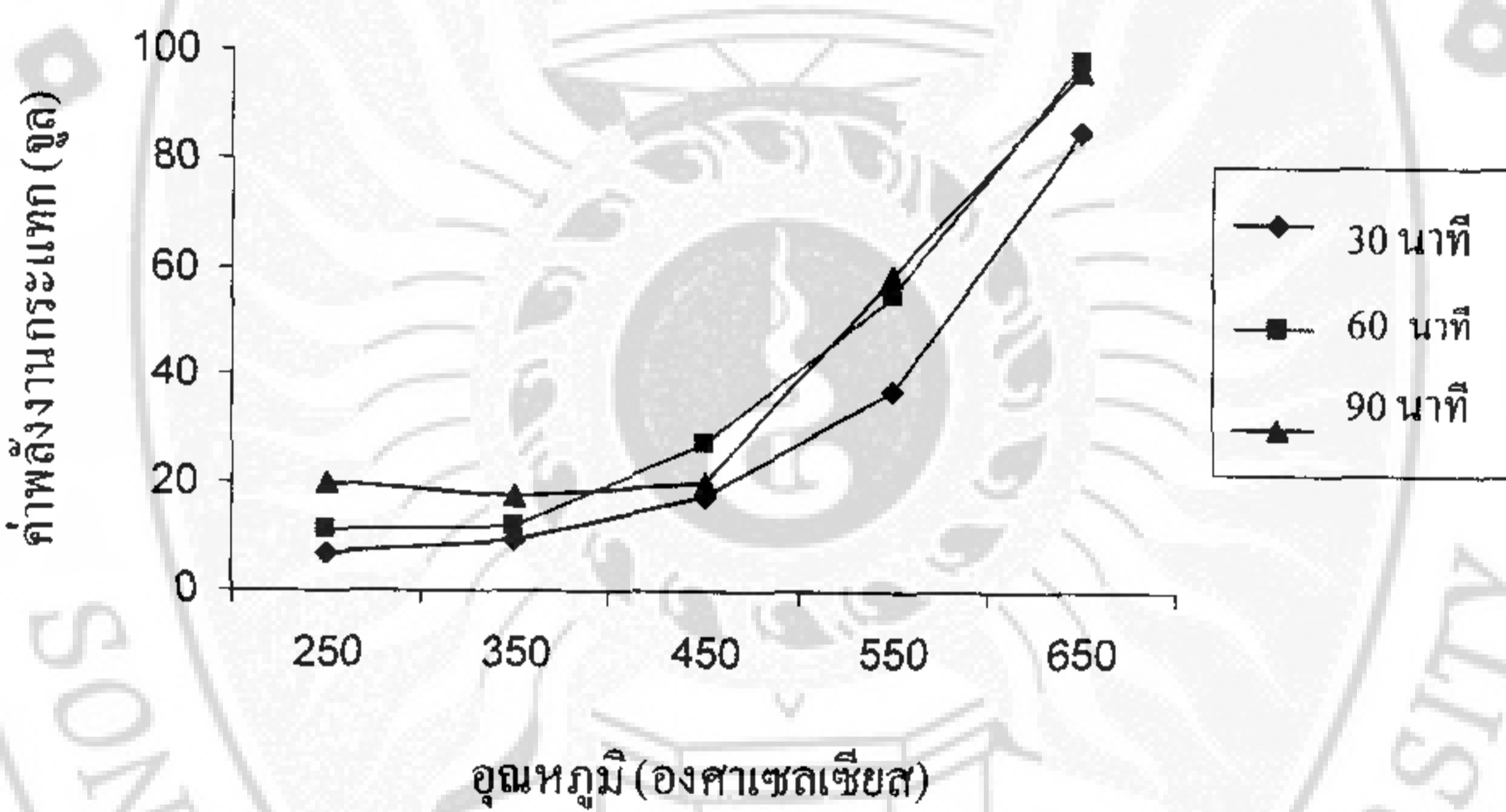
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระแทกกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคืนตัว 30 นาที  
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานการกระแทกจะมีค่าลดลงที่ระดับอุณหภูมิ  $250^{\circ}\text{C}$   
และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น



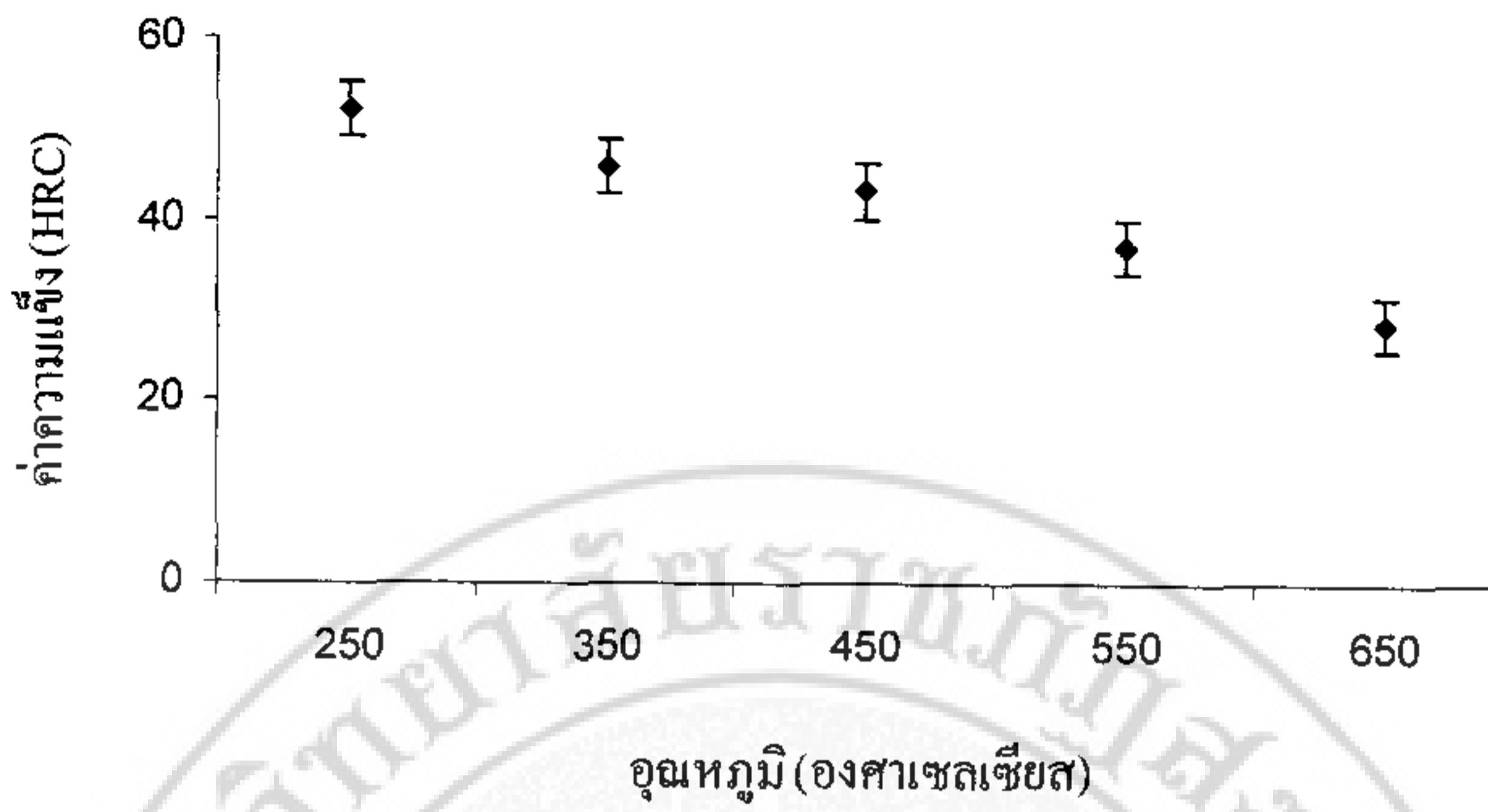
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระแทกกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคืนตัว 60 นาที  
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานการกระแทกจะมีค่าลดลงที่ช่วงอุณหภูมิ  $250 - 350^{\circ}\text{C}$   
และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพลิงงานกระแทกกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคืนตัว 90 นาที  
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าเพลิงงานการกระแทกจะมีค่าลดลงที่ระดับอุณหภูมิ  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$   
และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น

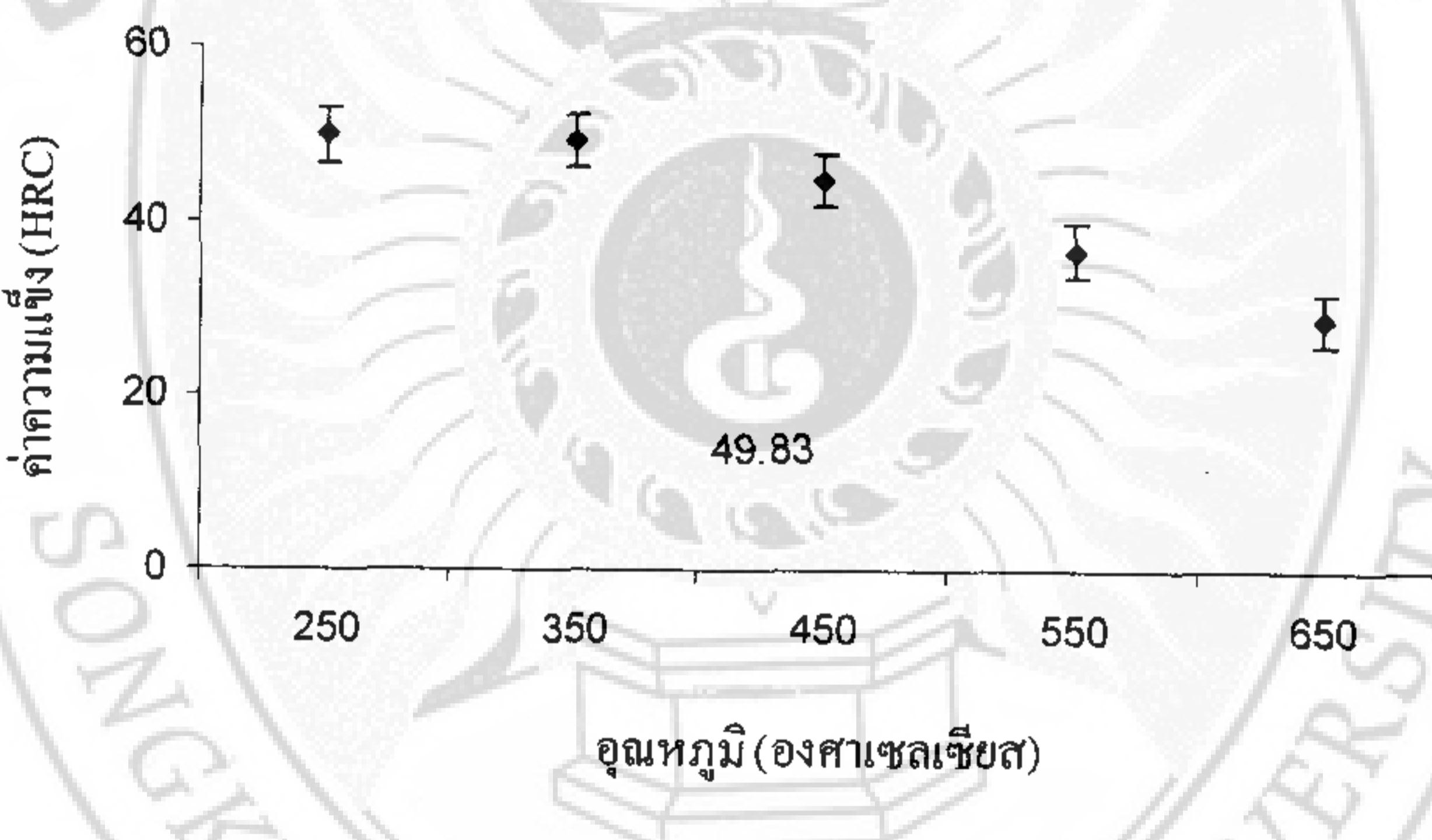


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพลิงงานกระแทกกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคืนตัวต่างๆ  
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าระดับอุณหภูมิ  $250\text{-}350\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาอบคืนตัว 90 นาทีจะให้ค่า  
เพลิงงานการกระแทกที่เหมาะสมกว่าเวลาการอบคืนตัวอื่น และที่ระดับอุณหภูมิ  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เวลาอบ  
คืนตัว 60 นาทีจะให้ค่าเพลิงงานการกระแทกที่เหมาะสม ส่วนระดับอุณหภูมิ  $550\text{-}650\text{ }^{\circ}\text{C}$  ที่เวลา  
อบคืนตัว 60 นาที และ 90 นาที จะให้ค่าเพลิงงานการกระแทกที่ใกล้เคียงกัน จึงเป็นเวลาการอบคืน  
ตัวที่เหมาะสม



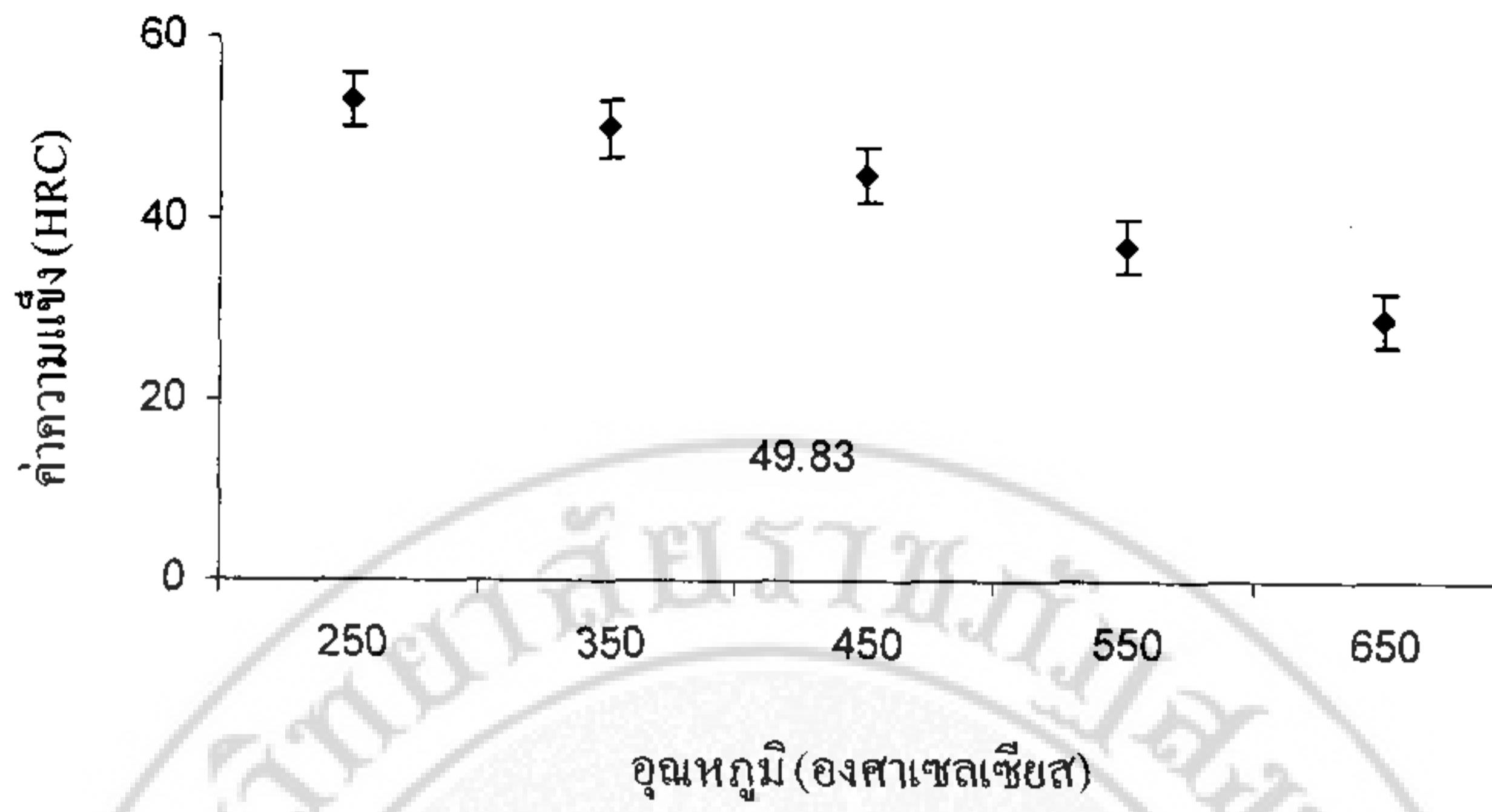
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคีนตัว 30 นาที

จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิในการอบคีนตัวเพิ่มสูงขึ้น

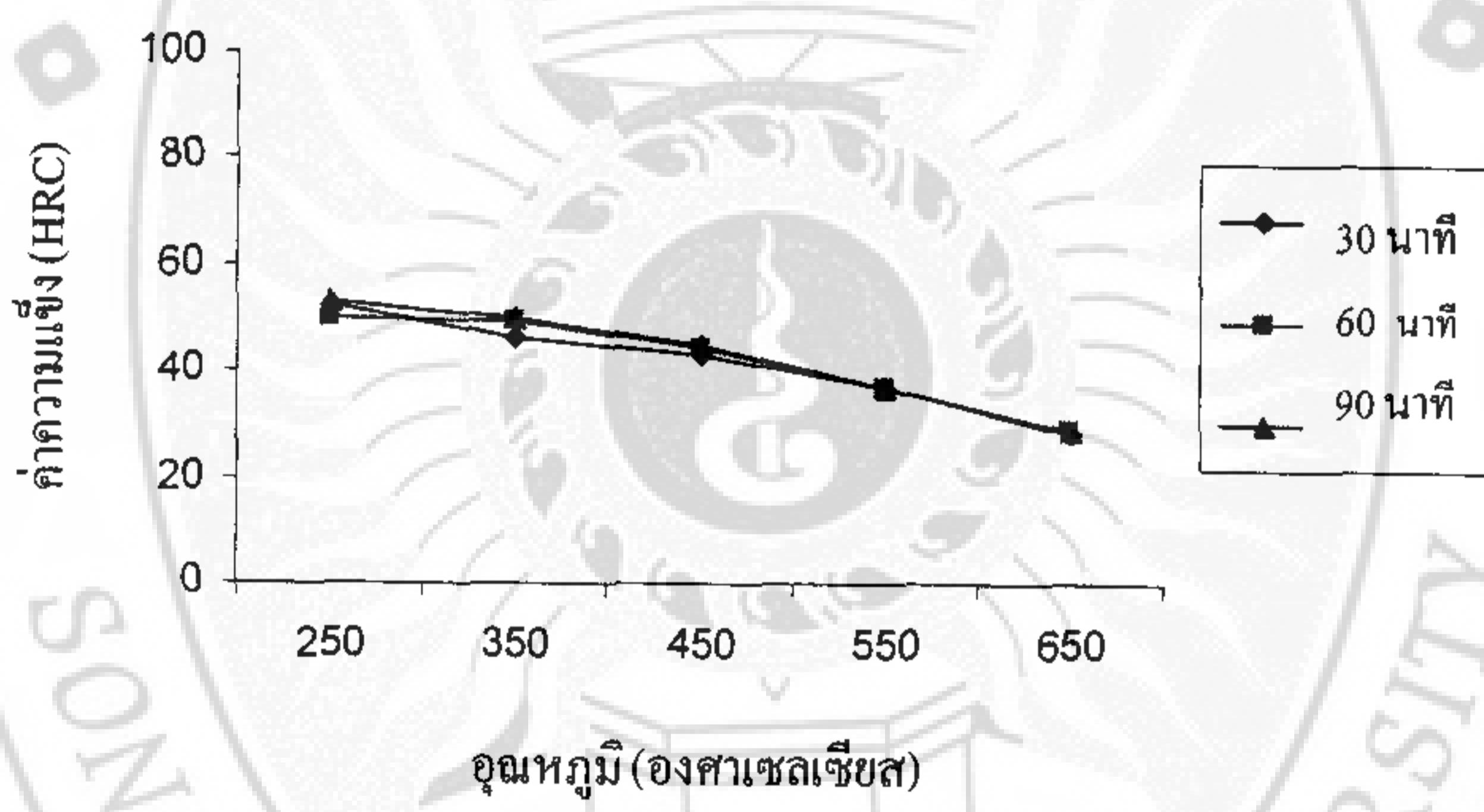


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคีนตัว 60 นาที

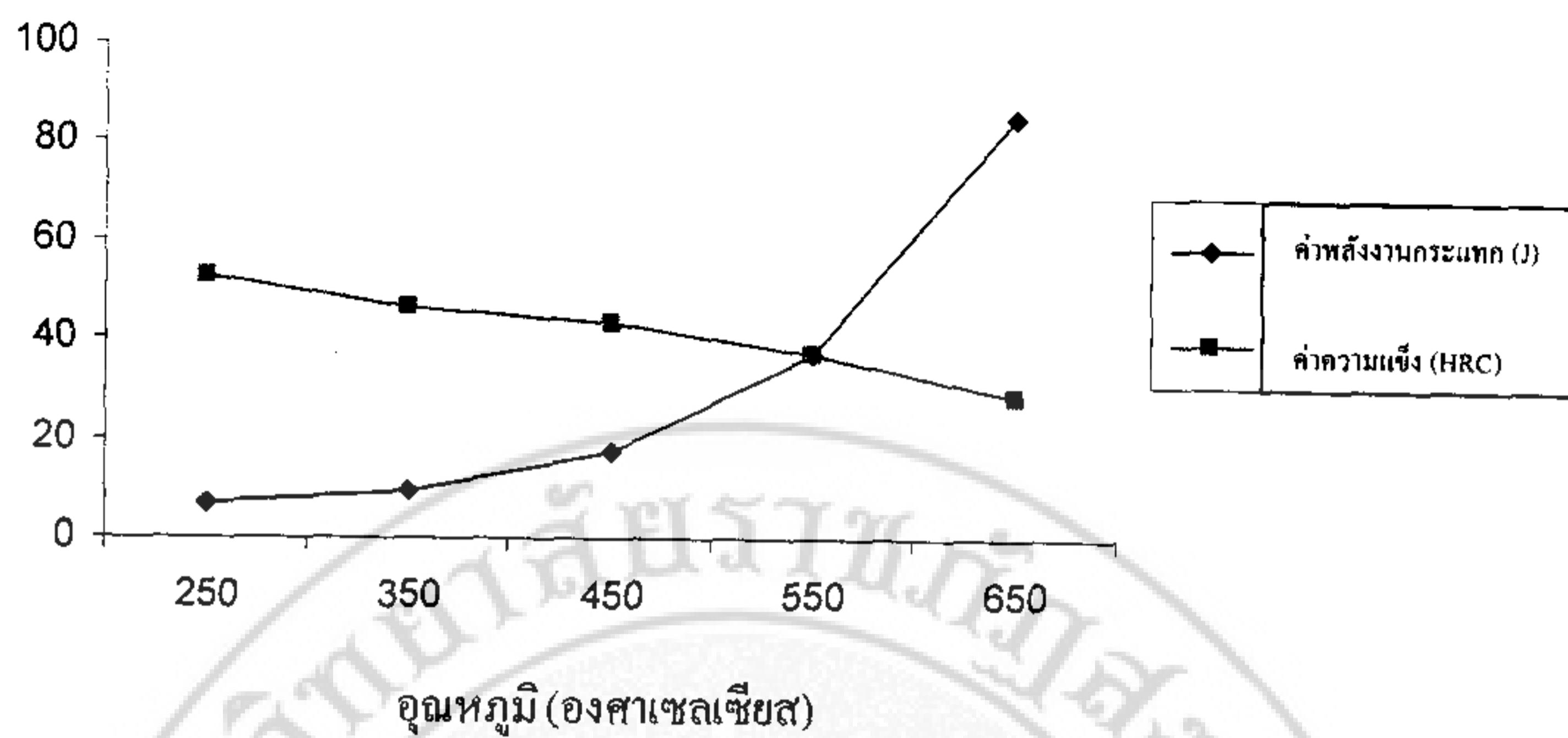
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งจะมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิที่  $250 - 350^{\circ}\text{C}$  และจะมีค่าความแข็งลดลงเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิในการอบคีนตัวเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคีนตัว 90 นาที จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิในการอบคีนตัวเพิ่มสูงขึ้น

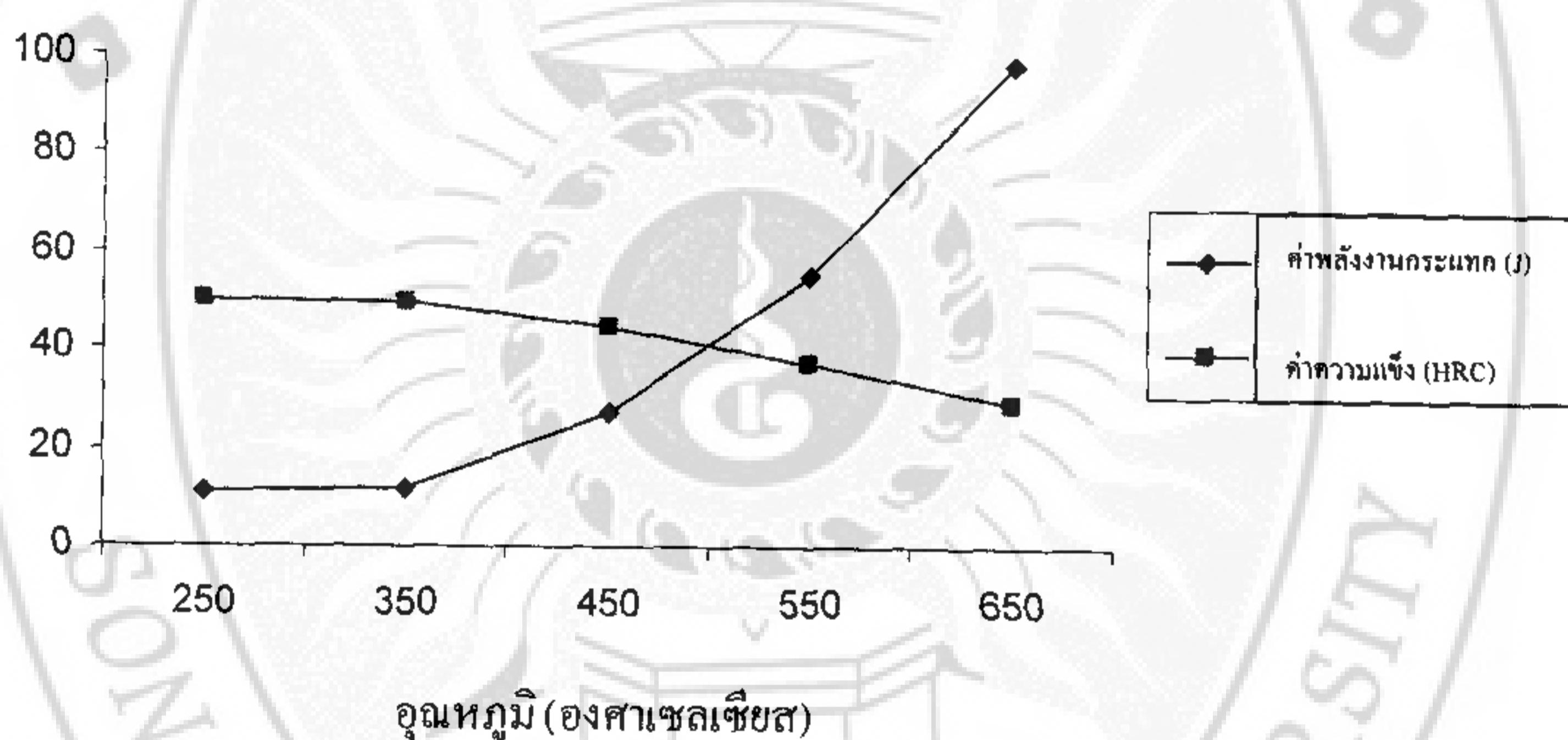


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคีนตัวต่างๆ จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าค่าความแข็งของแต่ละระยะเวลาการอบคีนตัวจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก แต่ระยะเวลาการอบคีนตัวที่เหมาะสมสมก็คือที่ระยะเวลาการอบคีนตัวที่ 60 นาที



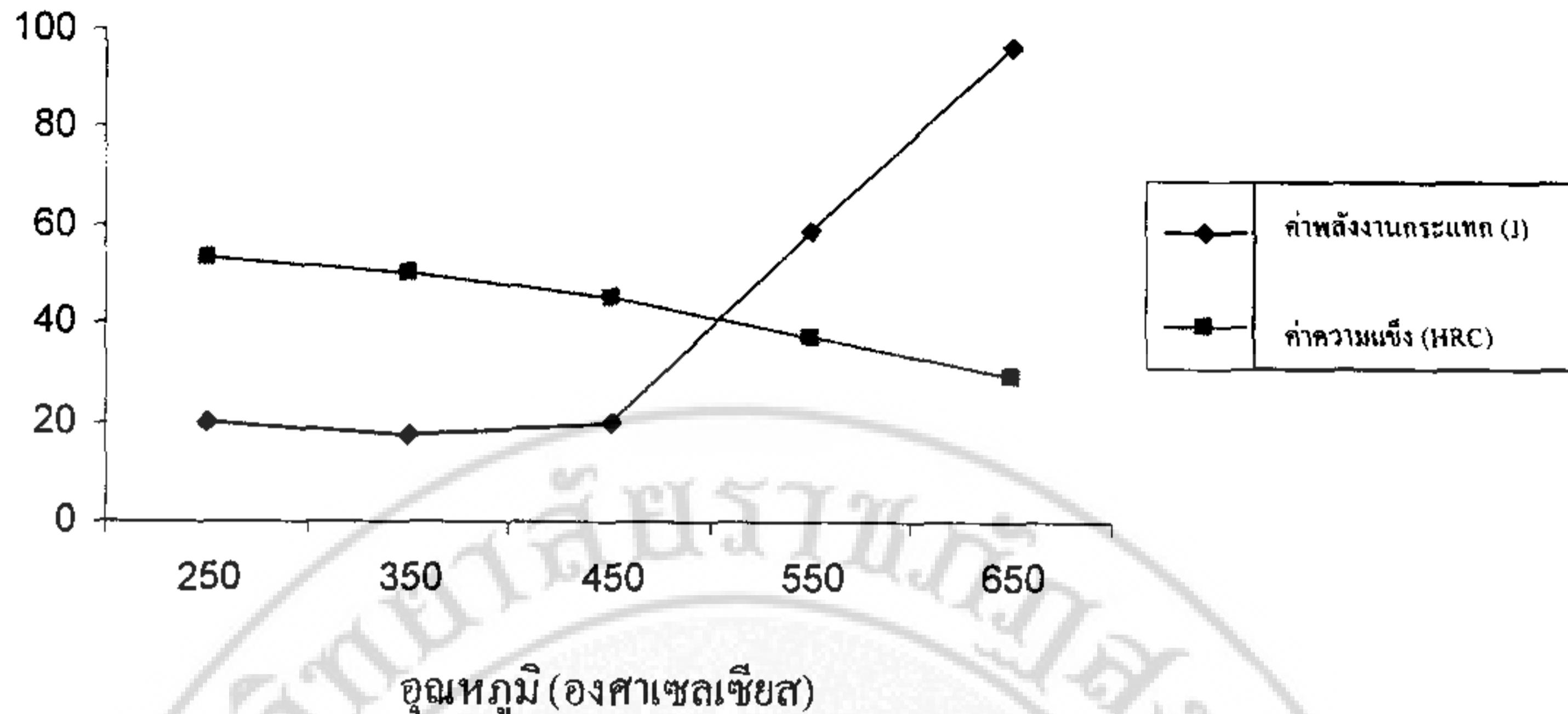
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าพลังงานกระแทก กับอุณหภูมิที่เวลาอบคืนตัว 30 นาที

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าพลังงานกระแทก กับอุณหภูมิที่เวลาอบคืนตัว 60 นาที

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



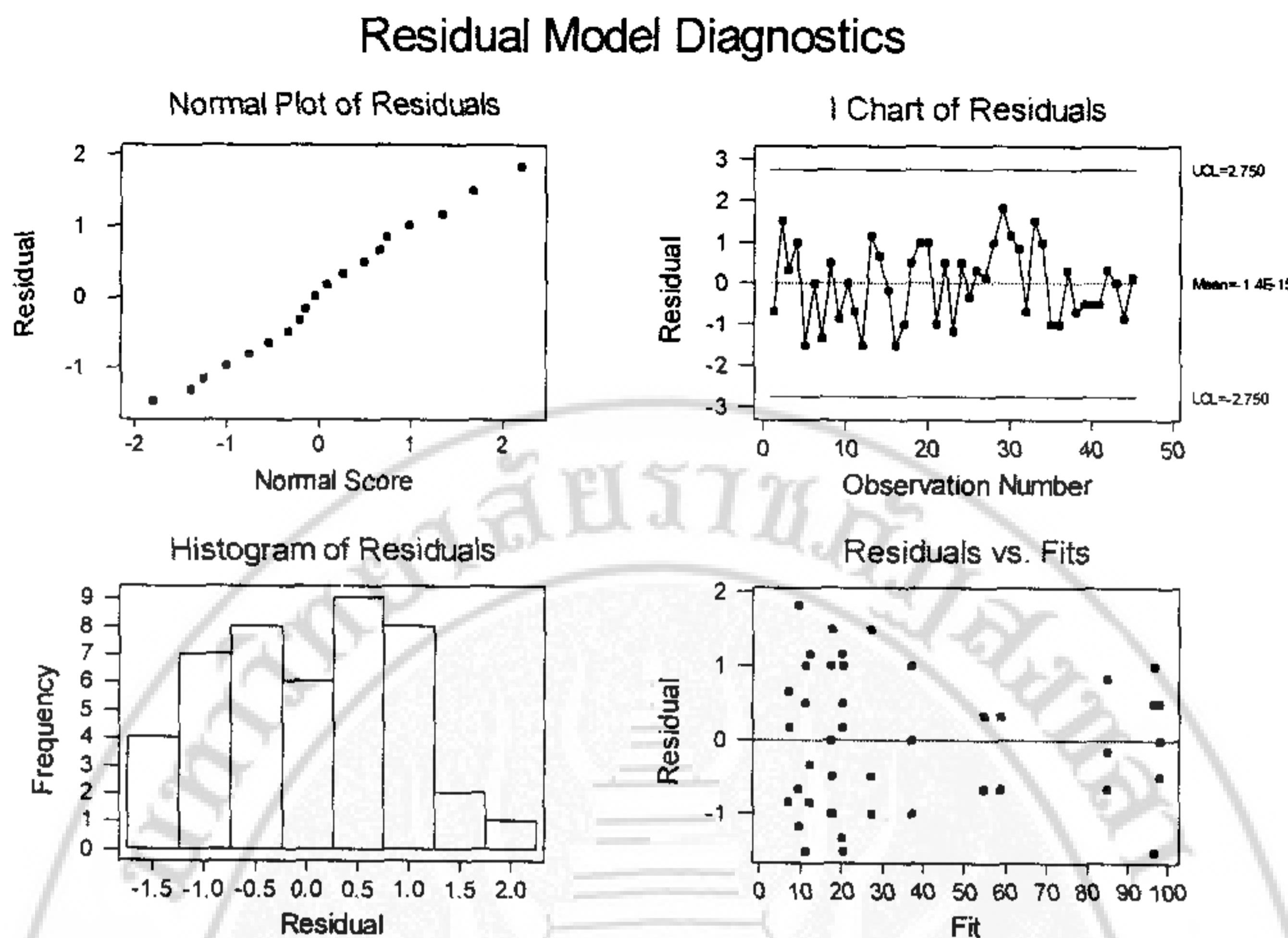
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าพลังงานกระแทก กับอุณหภูมิที่เวลาอบคืนตัว 90 นาที

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

#### 4.4 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล

เมื่อดำเนินการทดลองตามที่ได้ออกแบบไว้ ก็จะได้ค่าพลังงานการกระแทก ค่าความแข็ง และค่าแรงดึง แต่ก่อนที่จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ ต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมา้นั้น เป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ โดยมีความจำเป็นต้องพิสูจน์ถึงคุณสมบัติ (Model Adequacy Checking) ของข้อมูล 3 ประการด้วยกัน คือการทดสอบความอิสระของข้อมูล (Independent Test) การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test) และการทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูล (Variance Stability Test) ดังนั้นก่อนที่จะนำข้อมูลมาวิเคราะห์นั้นต้องทราบก่อนว่าข้อมูลนั้นเป็นข้อมูลที่มีคุณภาพหรือไม่ตามลักษณะสมบัติของข้อมูล แต่การตรวจสอบถึงคุณสมบัติของข้อมูล (Model Adequacy Checking) นั้นไม่สามารถนำข้อมูลที่ได้มาทดสอบคุณสมบัติทั้ง 3 ประการได้โดยทันทีเนื่องจากข้อมูลที่เก็บมา้นั้นมีผลของการปรับค่าของปัจจัยที่ได้กำหนดค่าไว้รวมอยู่ด้วย ดังนั้นในการทดสอบจึงจำเป็นต้องตัดผลของการเปลี่ยนค่าของปัจจัยเหล่านี้ให้หมดไปก่อนโดยวิธีการวิเคราะห์ค่าเศษเหลือ(Residual Analysis :  $\bar{\epsilon}_{m(jkl)}$ ) ตั้งสมการที่ 4.4

$$\bar{\epsilon}_{m(jkl)} = y_{ijkl} - \bar{y}_{ijkl} \quad (4.4)$$

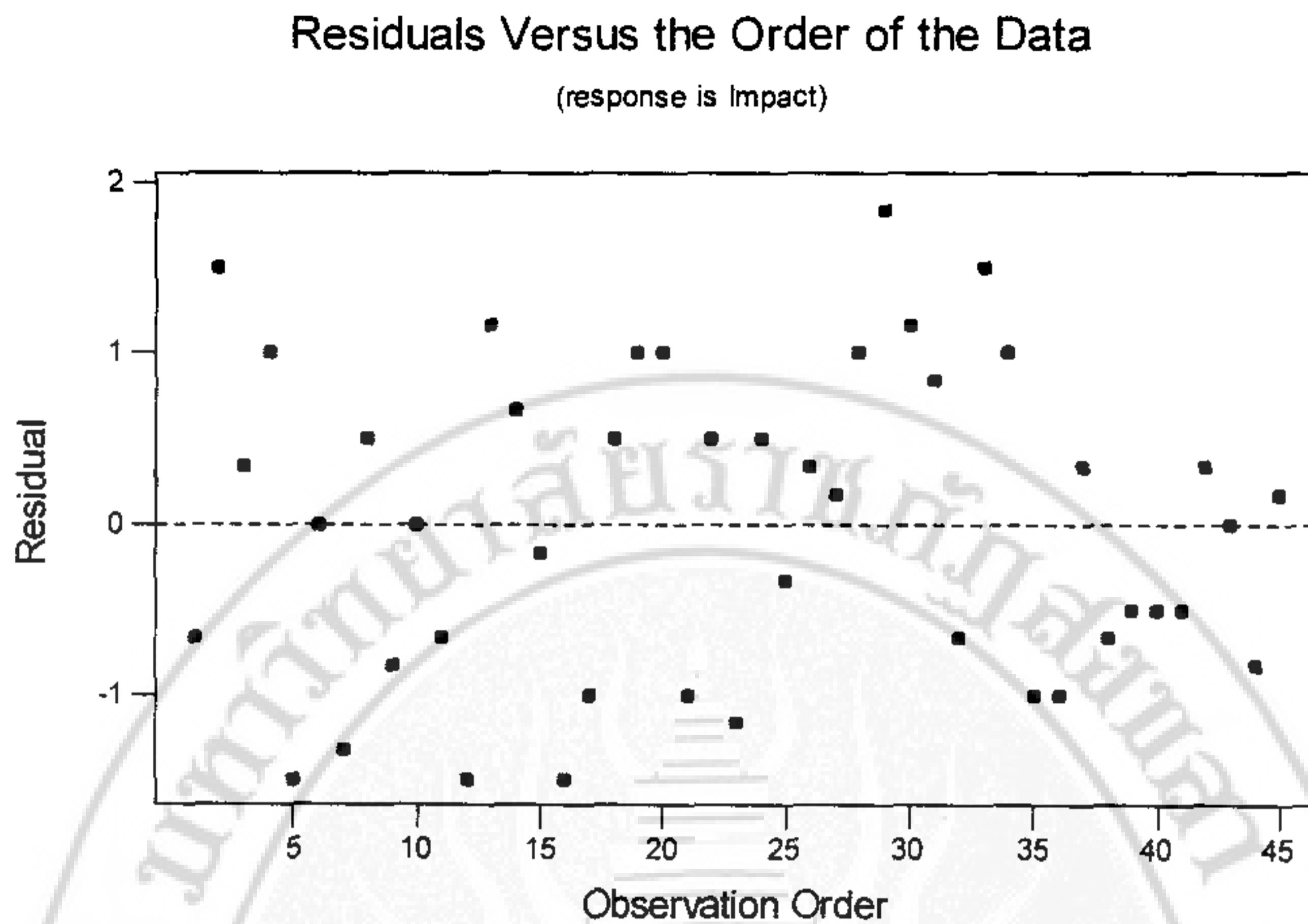


รูปที่ 4.14 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลพลังงานการกระแสไฟฟ้า

#### 4.4.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลจากการทดสอบพลังงานการกระแสไฟฟ้า

##### 4.4.1.1 การทดสอบความอิสระของข้อมูล (Independent Test)

เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากความสุ่ม เพื่อให้ข้อมูลมีการกระจายรอบค่าที่ควรจะเป็นเท่า ๆ กัน เนื่องจากผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Balance Out) เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ แผนภูมิการกระจาย (Scatter Plot) หรือแผนภูมิความคุณ I (I Chart of Residual) โดยแกน X คือลำดับการทดลองและแกน Y คือค่าเศษเหลือ (Residual) ถ้าข้อมูลที่เก็บมา มีความอิสระต่อกันนั้น ค่าเศษเหลือ (Residual) ที่นำมาใส่ลงในแผนภูมิการกระจายจะต้องกระจายตัวโดยรูปแบบ หรือกรณีแผนภูมิความคุณ I ดูว่าค่าเศษเหลือ ไม่มีแนวโน้มหรือออกนอกรีบบิล (Outlier) ถ้าข้อมูลมีรูปแบบหรือออกนอกรีบบิล (Outlier) แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมา มีได้เก็บมาอย่างสุ่ม ทั้งนี้หากข้อมูลไม่สุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่สุ่มแล้วแสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียง จำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

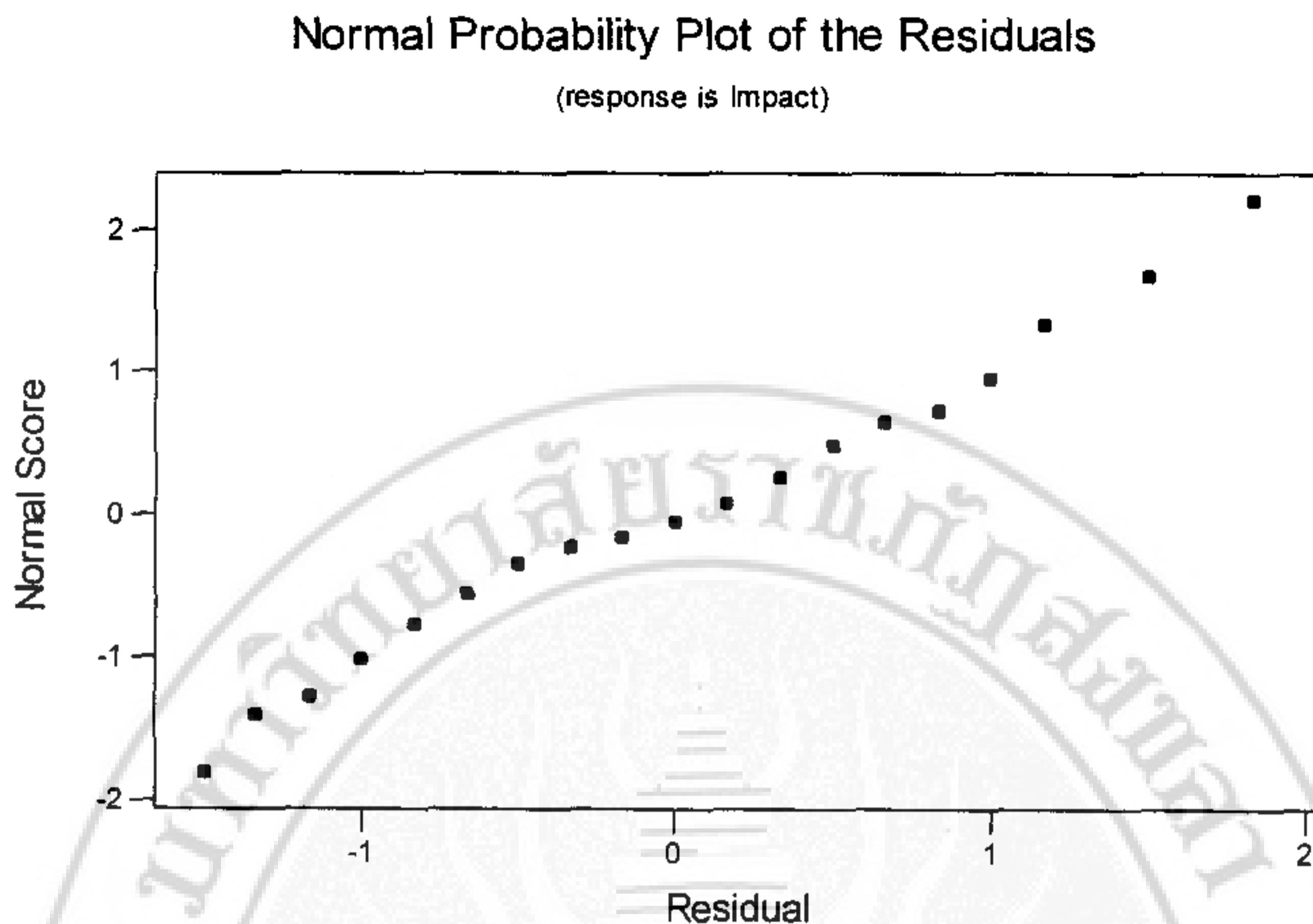


รูปที่ 4.15 แผนภาพทดสอบความอิสระของข้อมูลพลังงานการกระแสไฟฟ้า

จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบความอิสระของข้อมูล จะเห็นได้ว่าแผนภูมิ I ไม่พนจุดโดยยุ่นอยกแผนภูมิควบคุม และแผนภูมิการกระจายข้อมูลกระจายไว้รูปแบบ ตั้งนี้สรุปได้ว่ามีความอิสระของข้อมูลนั้นก็คือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม

#### 4.4.1.3 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test)

เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวแบบสุ่มจะต้องมีแนวโน้มเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากสาเหตุของการเฉลี่ยออก (Average Out) ของสิ่งที่มิได้รับการควบคุม แล้วมีการกระจายรอบค่าตั้งกล่าวในลักษณะสมมาตร เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ กระดาษทดสอบความเป็นปกติ (Normal Probability Plot; NOOP) โดยที่แกน X คือค่าเฉลี่ยเหลือ (Residual) และแกน Y คือค่าความเป็นปกติมาตรฐาน (Normal Score) ถ้าการแจกแจงของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลมิได้มีรูปแบบปกติแล้วก็จะทำให้ผู้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ดังนั้นถ้าหากข้อมูลมิได้เป็นตัวแบบสุ่มแบบปกติแล้ว แสดงว่าข้อมูลได้มาจากกระบวนการที่มิได้กำหนดเป็นมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

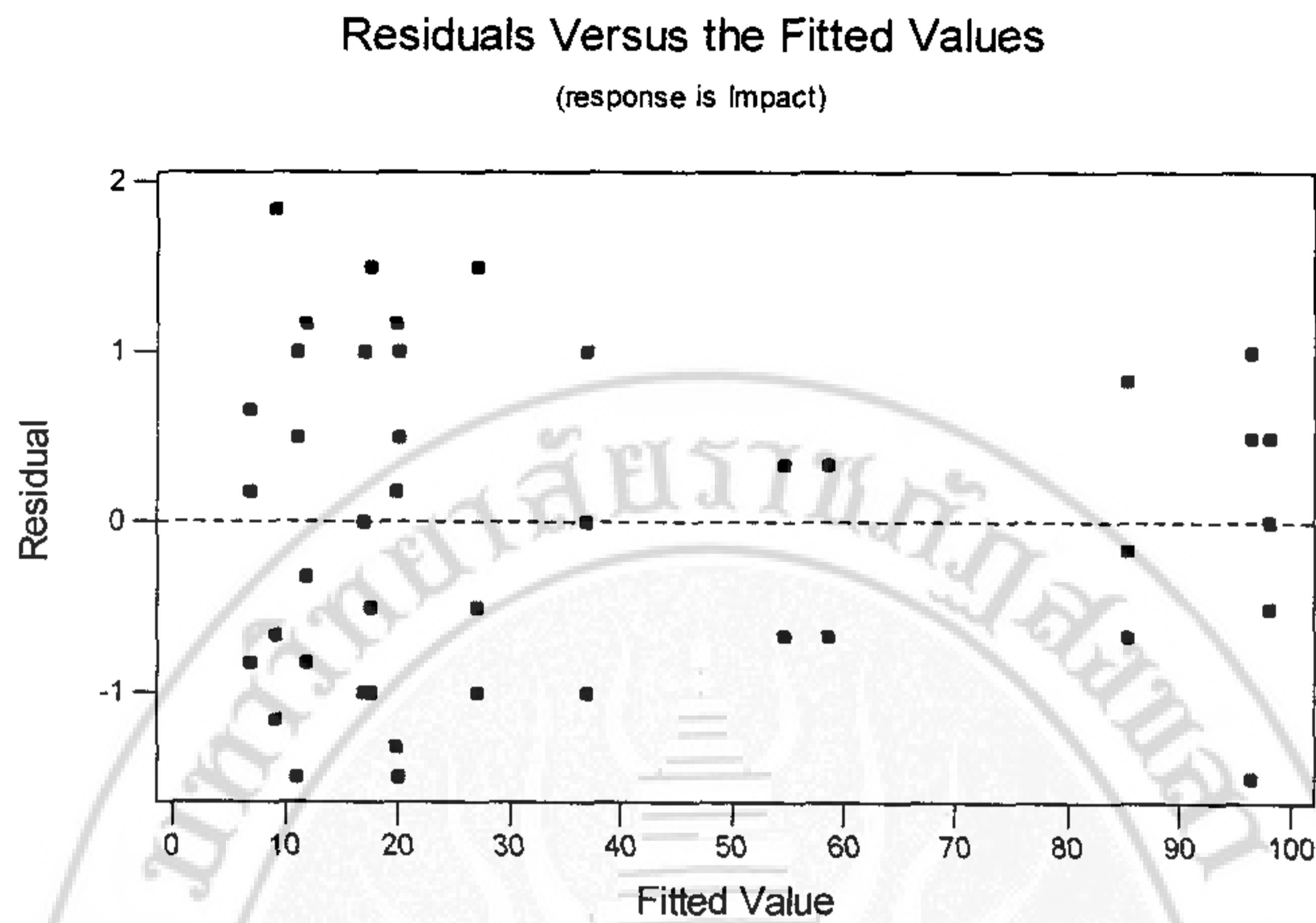


รูปที่ 4.16 กระดาษทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลพลังงานการกระแสไฟฟ้า

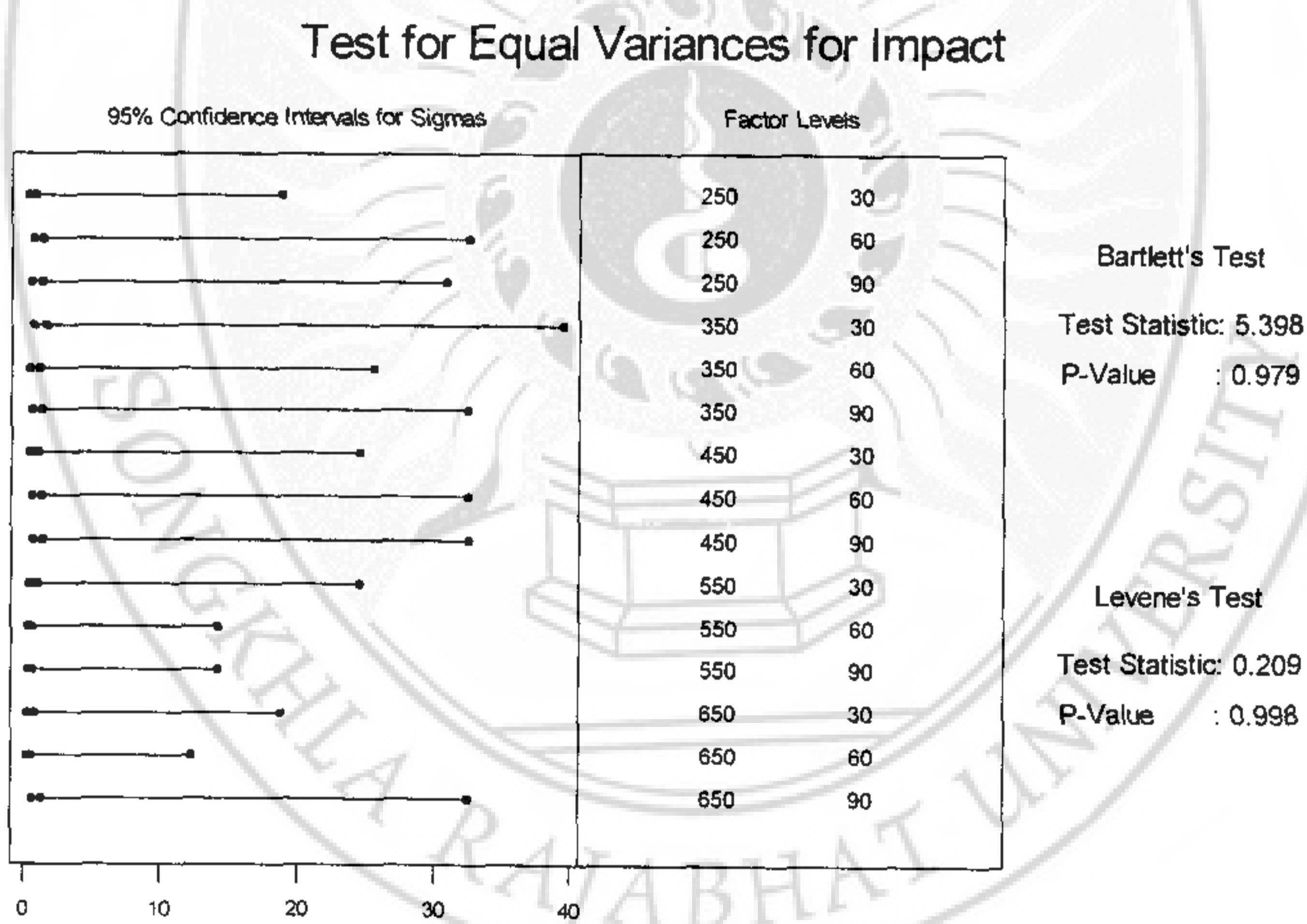
รูปที่ 4.16 เป็นรูปแบบของกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้จากการดำเนินการทดสอบ

#### 4.4.1.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละทรีตเม้นต์มีความผันแปรรอบค่าศูนย์หรือไม่ โดยข้อมูลจะต้องได้รับการเก็บมาจากการที่ไม่มีการจัดทำเป็นมาตรฐานแล้วจึงทำให้ความแตกต่างของข้อมูลเกิดมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Chance Cause) ในระบบที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น เครื่องมือในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ แผนภูมิการกระจาย ดังรูปที่ 4.17 โดยที่แกน X คือ ผลต่างของพลังงานการกระแสไฟฟ้า และแกน Y คือ ค่าเหลือ (Residual) ถ้าข้อมูลที่เก็บมา มีเสถียรภาพของความแปรปรวนค่าเสียงเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภูมิการกระจายต้องมีความยาวเท่า ๆ กัน นอกจากนี้ สามารถทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน ดังรูปที่ 4.18 โดยพิจารณาจากค่า P-Value เพื่อยกเว้นค่าอัลฟ่า ( $\alpha$ ) ที่ระดับ 0.05 ซึ่งกรณีค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่า ข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน ดังนั้นถ้าหากข้อมูลมีความแปรปรวนที่ไม่เสถียรภาพแล้ว แสดงว่า ข้อมูลเกิดจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุม (Assignable Cause) จึงมีความจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 4.17 แผนภาพทดสอบความนิเสถียรภาพของข้อมูลพลังงานการกระแทก



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความแปรปรวนของพลังงานการกระแทก

จากรูป 4.18 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.979 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้นข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน ตามที่ได้ออกแบบไว้

#### จากการประเมินคุณสมบัติทั้ง 3 ประการของข้อมูลจากการทดสอบ

พัฒนาการกระแทกสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ นั่นก็คือ มีความอิสระของข้อมูล มีความเป็นปกติของข้อมูล และมีความเสถียรภาพของข้อมูล

#### 4.4.2 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลจากการทดสอบความแข็ง

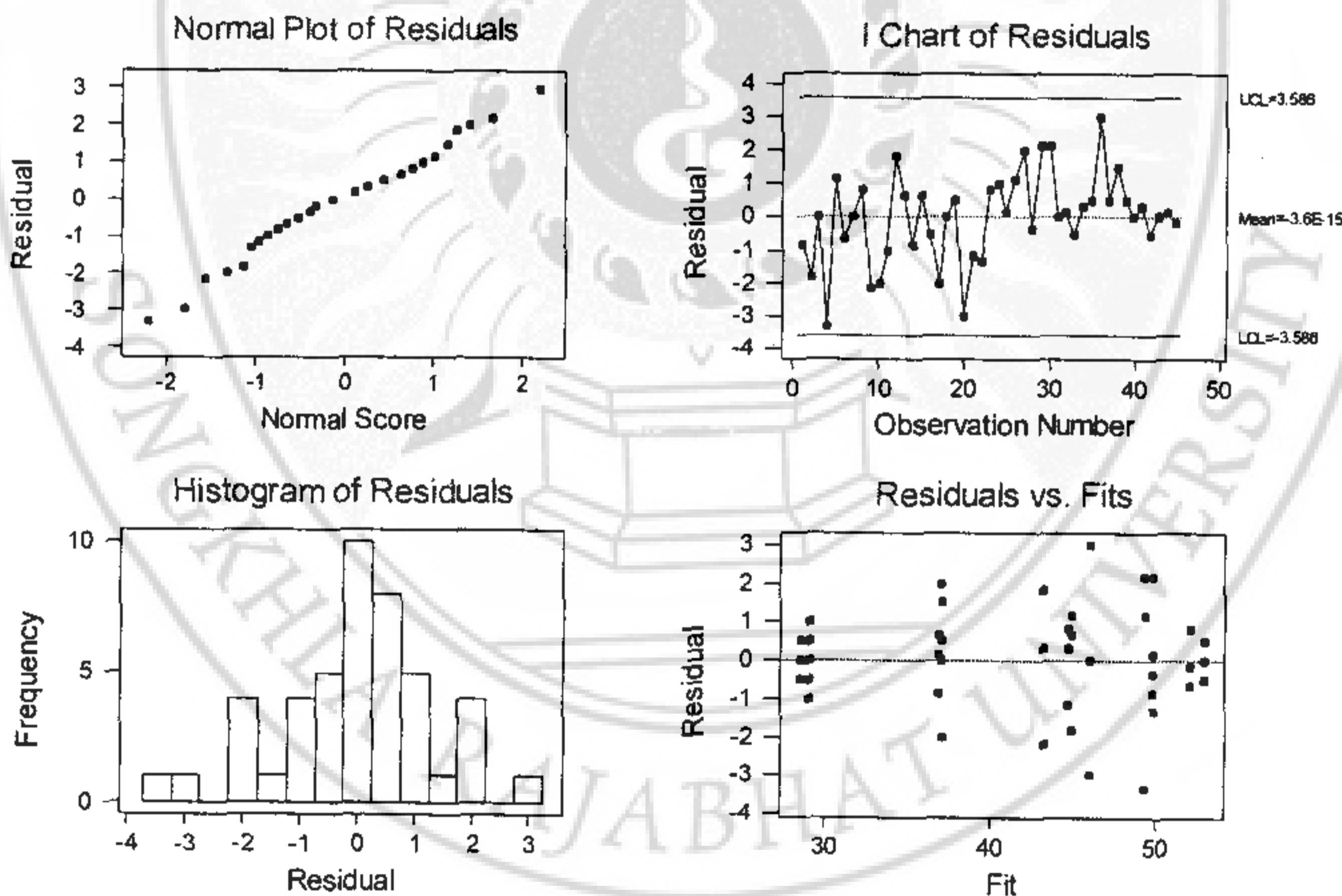
##### 4.4.2.1 การทดสอบความอิสระของข้อมูล (Independent Test)

จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบความอิสระของข้อมูล จะเห็นได้ว่าแผนภูมิ I ไม่พบจุดใดอยู่นอกแผนภูมิควบคุม และแผนภารการกระจายข้อมูลกระจายไว้รูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่ามีความอิสระของข้อมูล นั่นก็คือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม

##### 4.4.2.2 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test)

จากรูปที่ 4.21 เมื่อจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเป็นปกติของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณการทดสอบ

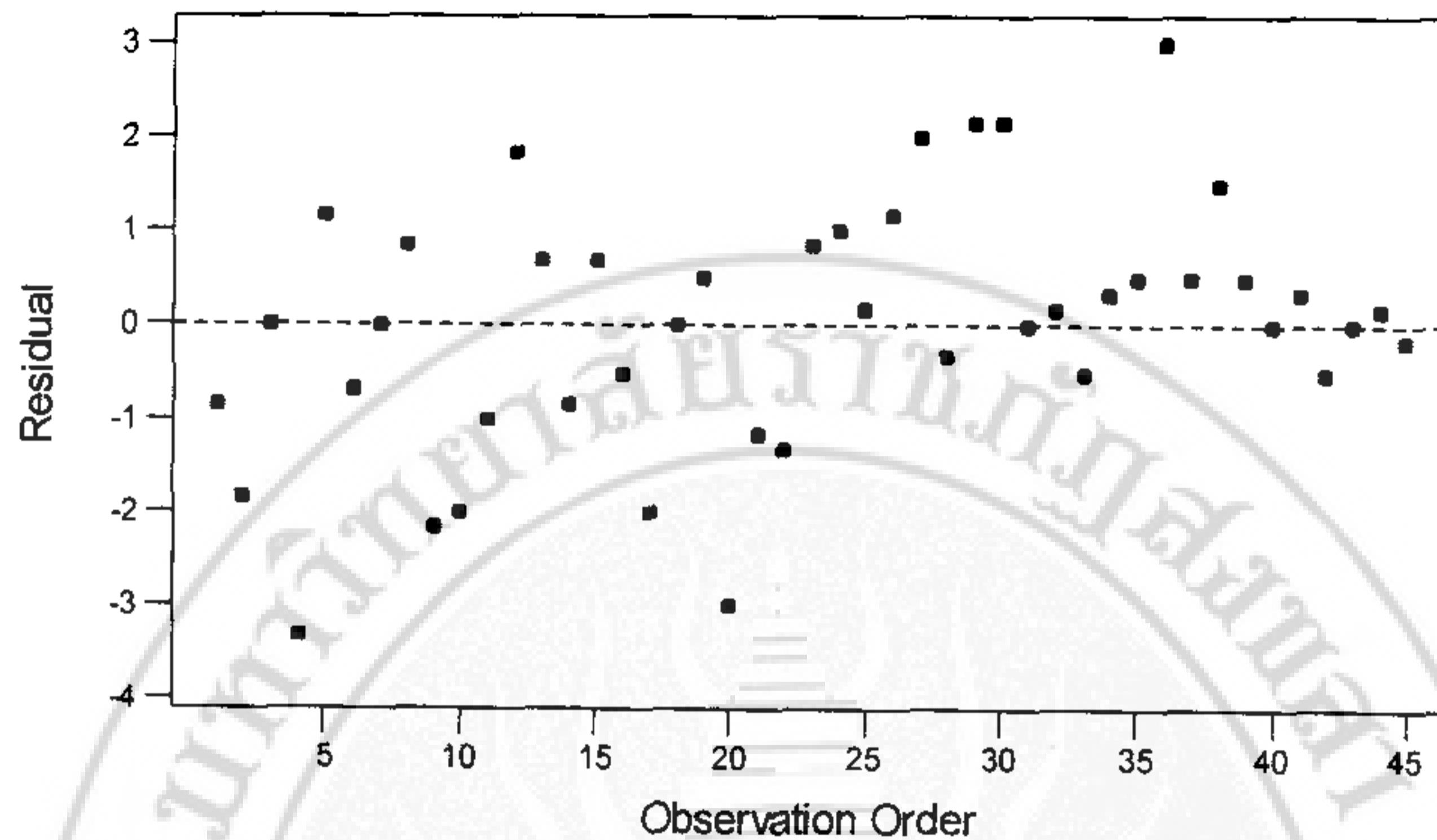
#### Residual Model Diagnostics



รูปที่ 4.19 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลความแข็ง

### Residuals Versus the Order of the Data

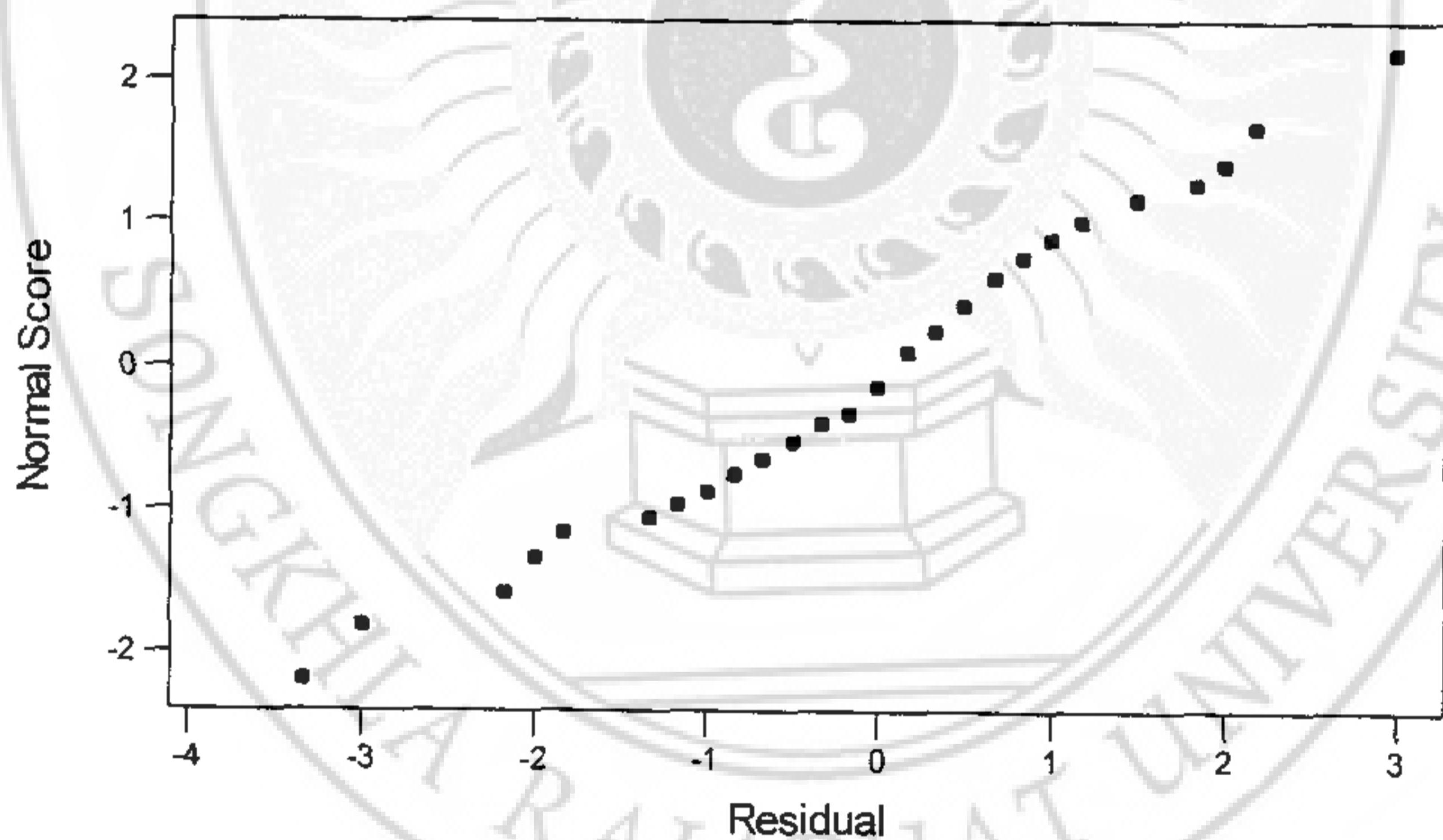
(response is Hardness)



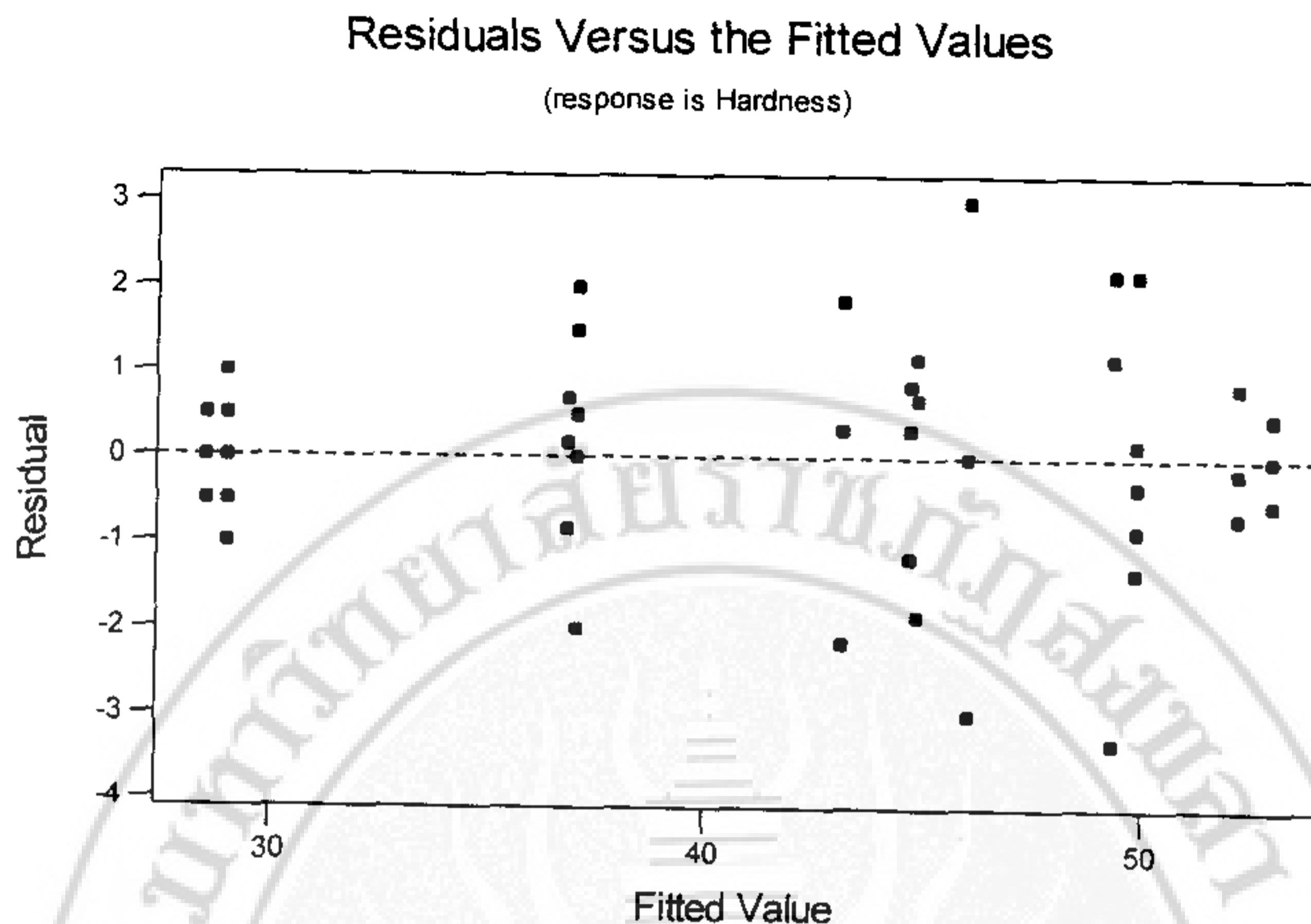
รูปที่ 4.20 แผนภูมิทดสอบความอิสระของข้อมูลความแข็ง

### Normal Probability Plot of the Residuals

(response is Hardness)



รูปที่ 4.21 กราฟทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความแข็ง



รูปที่ 4.22 แผนภาพทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูลความแข็ง

#### 4.3.2.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

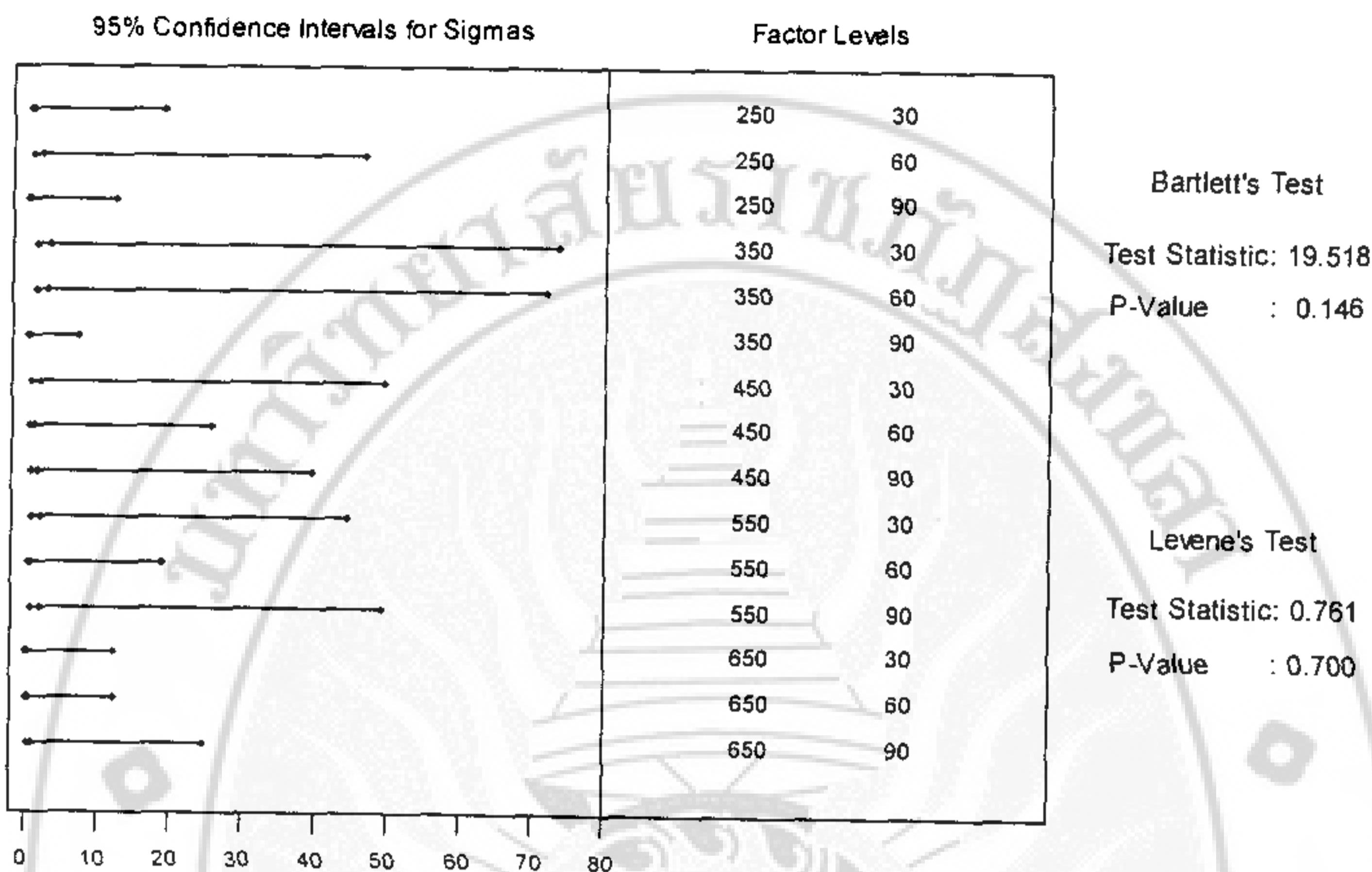
จากรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.146 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนตามที่ได้ออกแบบไว้

### 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Experiment Analysis)

หลังจากตรวจสอบคุณสมบัติของข้อมูล และข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการเรียบร้อยแล้ว ก่อนนำข้อมูลวิเคราะห์ต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เก็บมาภายใต้การออกแบบการทดลองมีความผิดพลาดมากน้อยเพียงใด โดยพิจารณาจากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ ( $R^2$ ; R Square) ถ้าหากสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูงแสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบสมการและสามารถนำข้อมูลเหล่านี้ไปวิเคราะห์ต่อไปได้ โดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) แต่ถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจต่ำ แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาเนื่องจากการออกแบบนั้นมีสิ่งที่ไม่สามารถอธิบายได้จำนวนมาก จำเป็นต้องวิเคราะห์ถึงความรู้ในเชิงวิศวกรรมใหม่ และจะต้องไปออกแบบการทดลองใหม่โดยเพิ่มหลักการบล็อก (Blocking) ในการกันเหลืองความผันแปรที่ไม่สามารถควบคุมได้ออกไป และภายหลังจากที่ได้วิเคราะห์ด้วย

วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อผลลัพธ์งานการกระแทก ค่าความแข็ง และค่าแรงดึง เพื่อนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ต่อไป

### Test for Equal Variances for Hardness



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบความแปรปรวนของค่าความแข็ง

$$R^2 = \frac{\text{ความผันแปรที่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบทดสอบ}}{\text{ความผันแปรทั้งหมดในข้อมูล}} \quad (4.5)$$

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T} = 1 - \frac{SS_E}{SS_T} \quad (4.6)$$

แต่เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตีความหมาย  $R^2$  จึงต้องใช้ตัวสถิติอีกด้วยในการประเมินเรียกว่า  $R^2$  ที่ได้รับการปรับค่า (Adjust  $R^2$ )

$$\text{Adjust } R^2 = 1 - \left( \frac{n-1}{n-p} \right) (1 - R^2) \quad (4.7)$$

เมื่อ  $p$  หมายถึง จำนวนตัวแปรที่แสดงถึงจำนวนเทอมในตัวแบบทดสอบ

#### 4.5.1 การวิเคราะห์ผลการทดสอบของการทดสอบแรงกระแทก

##### 4.5.1.1 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

จากการทดสอบพลังงานการกระแทกตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลว่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 82.1% และค่า Adjust  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 81.2% ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความผันแปรในข้อมูลมีค่า 100 ( $\text{mm}^2$ ) แล้วความผันแปร 82.1 ( $\text{mm}^2$ ) สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบทดสอบอย่าง ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุค้านรีพิกทะบลิตี

ดังนั้นจะได้ว่าความผันแปรของข้อมูลพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว ส่วนใหญ่ อธิบายได้ด้วยอุณหภูมิ เวลาในการอบคืนตัวดีแล้ว แสดงว่าการออกแบบการทดสอบนี้ถูกต้องและมีความเหมาะสม จึงสามารถทำการวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว  
**Two-way ANOVA: Impact versus Temperature, Time**

Analysis of Variance for Impact					
Source	DF	SS	MS	F	P
Temperat	4	42792.58	10698.14	8874.04	0.000
Time	2	1125.51	562.76	466.80	0.000
Interaction	8	498.49	62.31	51.69	0.000
Error	30	36.17	1.21		
Total	44	44452.74			

##### General Linear Model: Impact versus Temperature, Time

Factor	Type	Levels	Values
Temperat	fixed	5	250 350 450 550 650
Time	fixed	3	30 60 90

##### Analysis of Variance for Impact, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Temperat	4	42792.6	42792.6	10698.1	8874.04	0.000
Time	2	1125.5	1125.5	562.8	466.80	0.000
Temperat*Time	8	498.5	498.5	62.3	51.69	0.000
Error	30	36.2	36.2	1.2		
Total	44	44452.7				

##### Unusual Observations for Impact

Obs	Impact	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
29	11.0000	9.1667	0.6339	1.8333	2.05R

R denotes an observation with a large standardized residual.

##### Least Squares Means for Impact

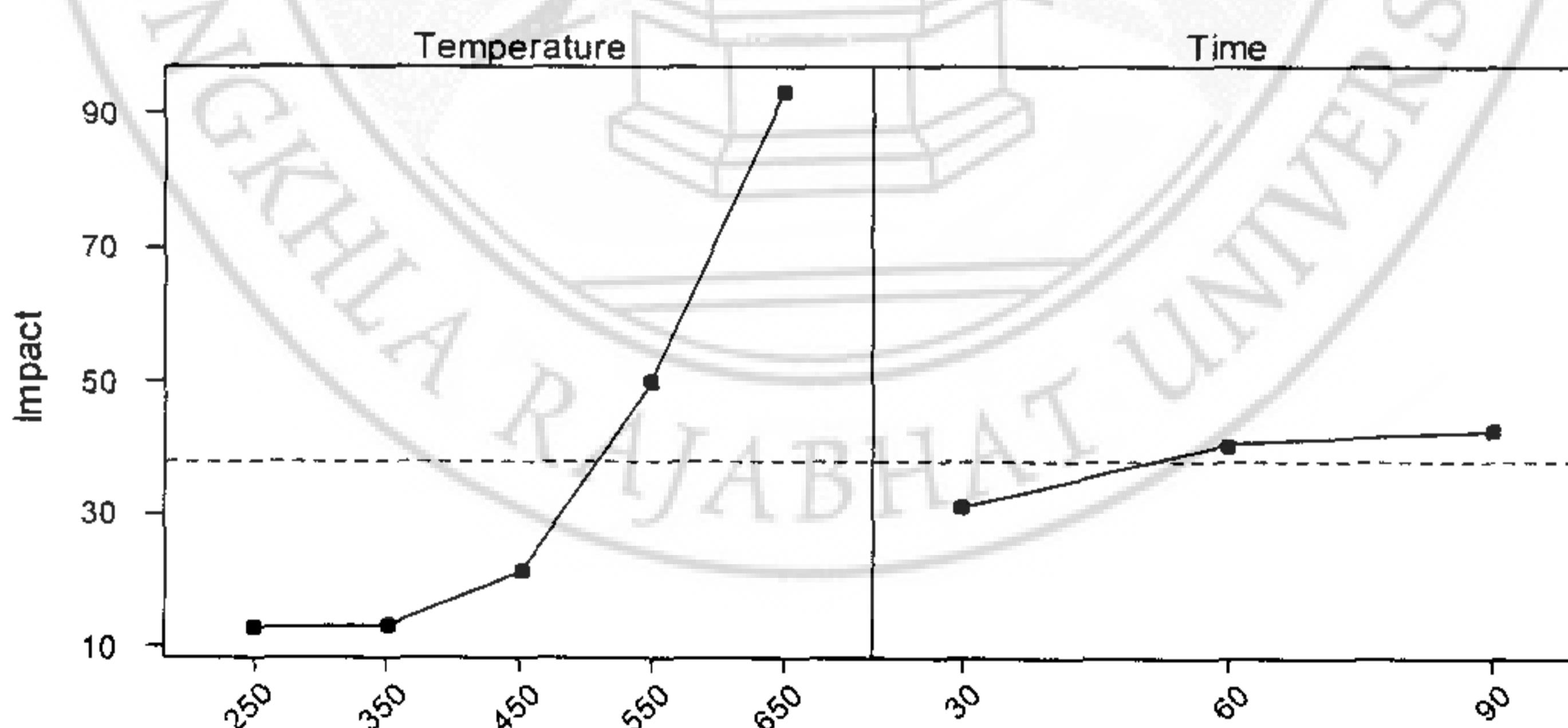
Temperat	Mean	SE Mean
250	12.556	0.3660
350	12.833	0.3660

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคีนตัว (ต่อ)

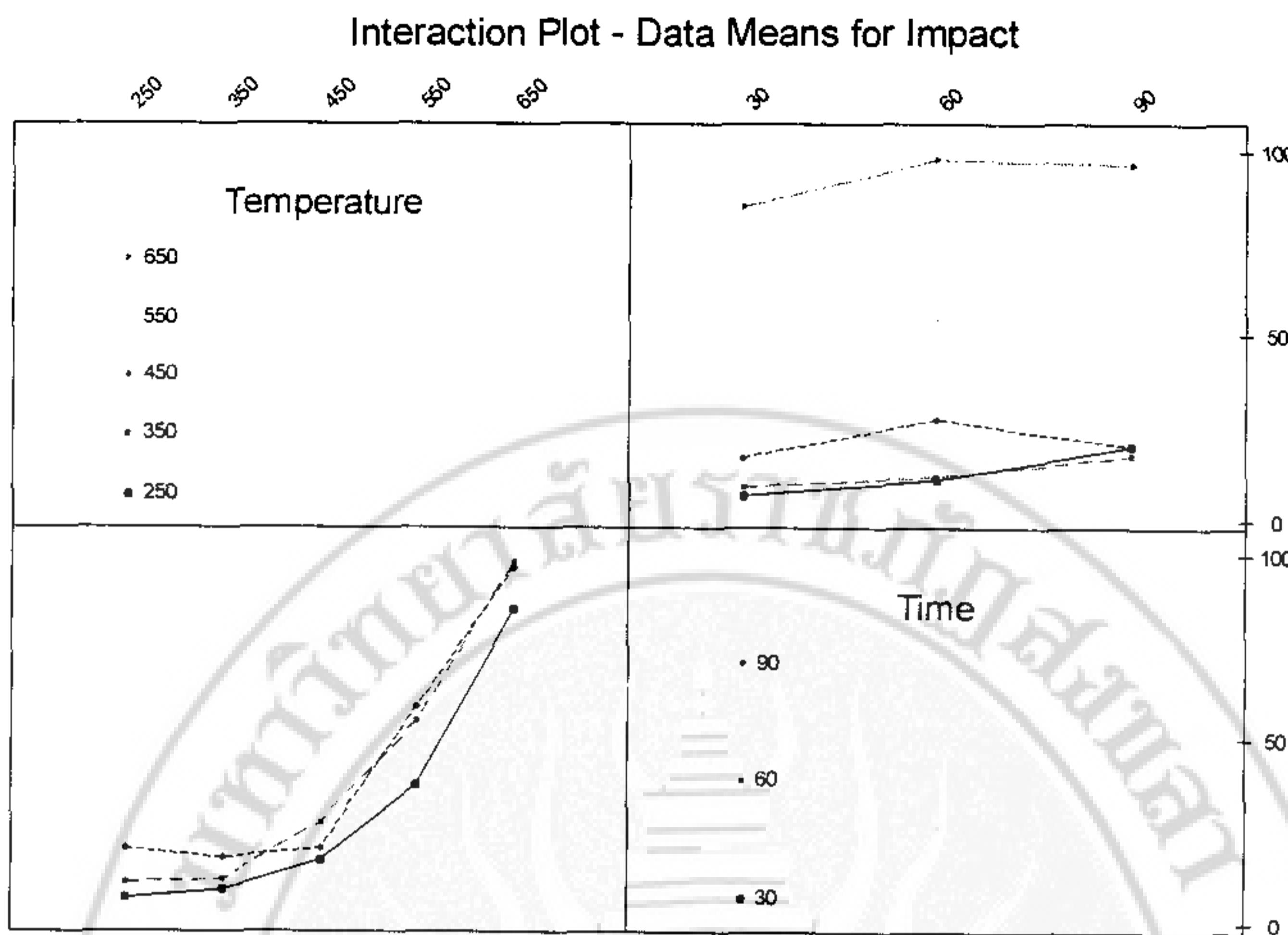
450		21.333	0.3660
550		50.111	0.3660
650		93.222	0.3660
Time			
30		31.033	0.2835
60		40.500	0.2835
90		42.500	0.2835
Temperat*Time			
250	30	6.833	0.6339
250	60	11.000	0.6339
250	90	19.833	0.6339
350	30	9.167	0.6339
350	60	11.833	0.6339
350	90	17.500	0.6339
450	30	17.000	0.6339
450	60	27.000	0.6339
450	90	20.000	0.6339
550	30	37.000	0.6339
550	60	54.667	0.6339
550	90	58.667	0.6339
650	30	85.167	0.6339
650	60	98.000	0.6339
650	90	96.500	0.6339

จากตารางที่ 4.8 ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยเริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ก่อนแล้วทำการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลหลักต่อ ดังรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 ซึ่งพิจารณาจากค่า P-Value พบว่ามีค่าต่ำกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าของความเสี่ยงในการไม่ยอมรับสมมติฐานทั้งที่สมมติฐานเป็นจริง ( $\alpha$ ) และคงว่าค่า F-Value มีค่ามาก ดังนั้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในการอบคีนตัว มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Significant) จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาในการอบคีนตัวมีผลต่อค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคีนตัว

Main Effects Plot - Data Means for Impact



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคีนตัว



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคีนตัว

จากรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 จะได้ว่าค่าพลังงานการกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากค่าพลังงานการกระแทกที่มาก ๆ เมน้ำที่จะนำไปใช้งานดังนั้นควรเลือกค่าพลังงานกระแทกที่มาก ๆ จึงควรเลือกอบคีนตัวที่เวลา 90 นาที และควรควบคุมระดับอุณหภูมิที่ช่วง  $550^{\circ}\text{C}$  -  $650^{\circ}\text{C}$  ให้มาก ๆ เนื่องจากเป็นเวลาที่มีผลต่อความไวของอุณหภูมน้อย ๆ (Robust) และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการทดลองด้วย

#### 4.5.1.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

นอกจากนี้สามารถนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์การถดถอยได้ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคีนตัว

#### Regression Analysis: Impact versus Temperature, Time

The regression equation is  
 $\text{Impact} = -62.8 + 0.199 \text{ Temperature} + 0.191 \text{ Time}$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-62.831	8.495	-7.40	0.000
Temperat	0.19861	0.01452	13.68	0.000
Time	0.19111	0.08381	2.28	0.028

S = 13.77      R-Sq = 82.1%      R-Sq(adj) = 81.2%

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์การทดสอบของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคีนตัว (ต่อ)

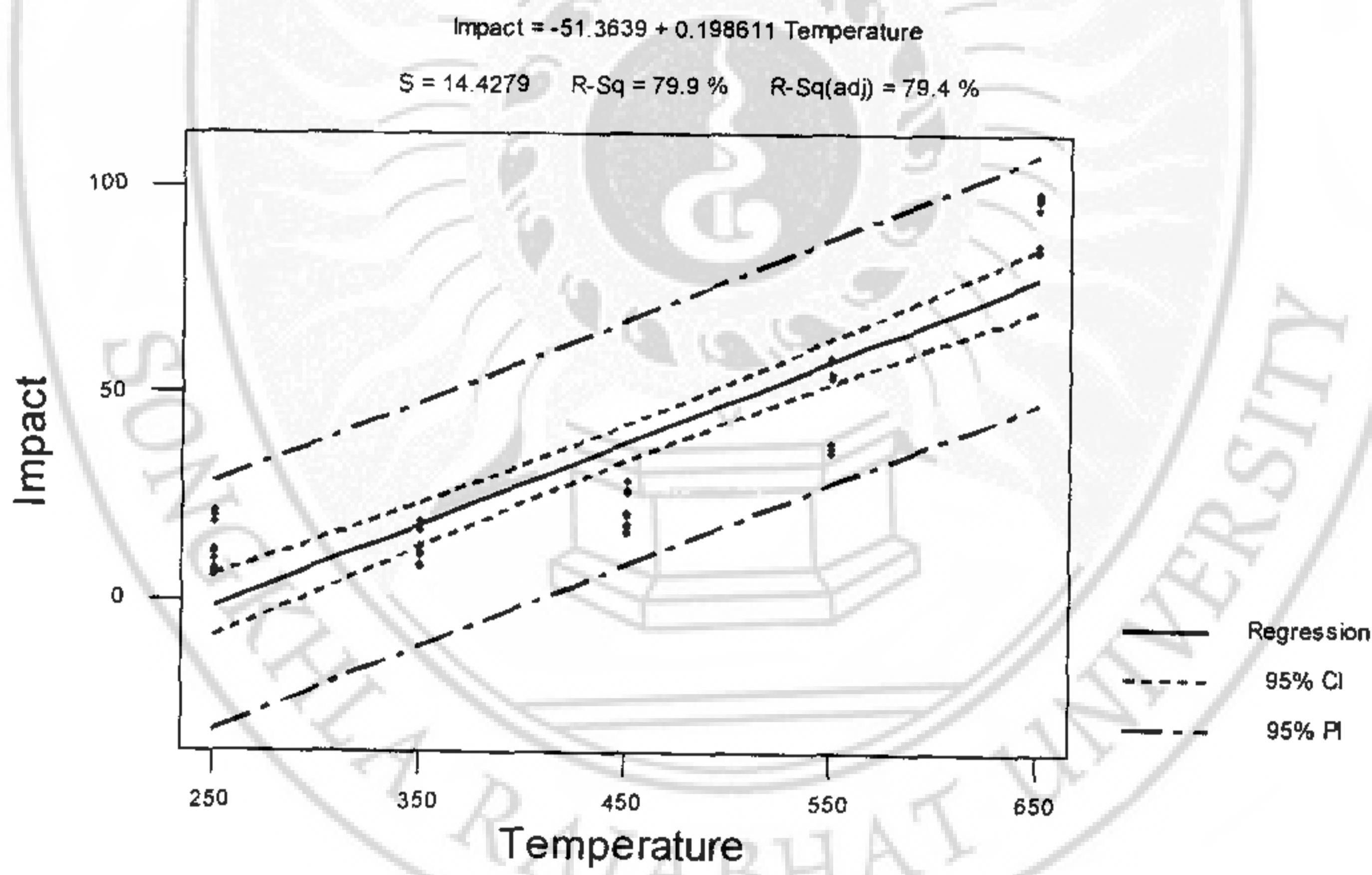
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	36488	18244	96.20	0.000
Residual Error	42	7965	190		
Lack of Fit	12	7929	661	548.07	0.000
Pure Error	30	36	1		
Total	44	44453			

Source	DF	Seq SS
Temperat	1	35502
Time	1	986

จากตารางที่ 4.9 สามารถอธิบายได้โดยความผันแปรของข้อมูลค่าพลังงานการกระแทก  $100 \text{ จูล}^2$  อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของอุณหภูมิกับเวลาเท่ากับ  $82.1\%$  โดยปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ว่ามาจากแหล่งความผันแปรใด แสดงว่าข้อมูลมีสารสนเทศในการวิเคราะห์ และ R-Sq. (adj) มีค่าใกล้กับ R-Sq. แสดงว่าจำนวนข้อมูลมีความเหมาะสม แต่ค่า P-Value ของการทดสอบ Lack of Fit มีค่าต่ำ และค่า F มีค่ามากแสดงว่าความสมรูปของตัวแบบกับข้อมูลไม่มีความเหมาะสม ดังนั้นไม่สามารถทำการตีความจากสมการการทดสอบได้

Regression Plot



รูปที่ 4.26 การประมาณค่าพลังงานการกระแทก

#### 4.5.2 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการทดสอบความแข็ง

##### 4.5.2.1 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA)

จากการทดลองค่าความแข็ง ตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลว่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 93.1% และค่า Adjust  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 92.7% ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความผันแปรในข้อมูลมีค่า 100 ( $\text{nm}^2$ ) แล้วความผันแปร 93.1 ( $\text{nm}^2$ ) สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบทดสอบ ส่วนประมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุด้านรีพิททะบลิตี

ดังนั้นจะได้ว่าความผันแปรของข้อมูลค่าความแข็งจากการอบคืนตัวส่วนใหญ่อธิบายได้ด้วยอุณหภูมิ เวลาในการอบคืนตัวคิดแล้ว แสดงว่าการออกแบบการทดลองนี้ถูกต้องและมีความเหมาะสม จึงสามารถทำการวิเคราะห์ต่อไปได้ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งจากการอบคืนตัว

##### General Linear Model: Hardness versus Temperature, Time

Factor	Type	Levels	Values
Temperat	fixed	5 250 350 450 550 650	
Time	fixed	3 30 60 90	

##### Analysis of Variance for Hardness, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Temperat	4	3043.08	3043.08	760.77	291.36	0.000
Time	2	14.14	14.14	7.07	2.71	0.083
Temperat*Time	8	33.69	33.69	4.21	1.61	0.163
Error	30	78.33	78.33	2.61		
Total	44	3169.24				

##### Unusual Observations for Hardness

Obs	Hardness	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	46.0000	49.3333	0.9329	-3.3333	-2.53R
20	43.0000	46.0000	0.9329	-3.0000	-2.27R
36	49.0000	46.0000	0.9329	3.0000	2.27R

R denotes an observation with a large standardized residual.

##### Least Squares Means for Hardness

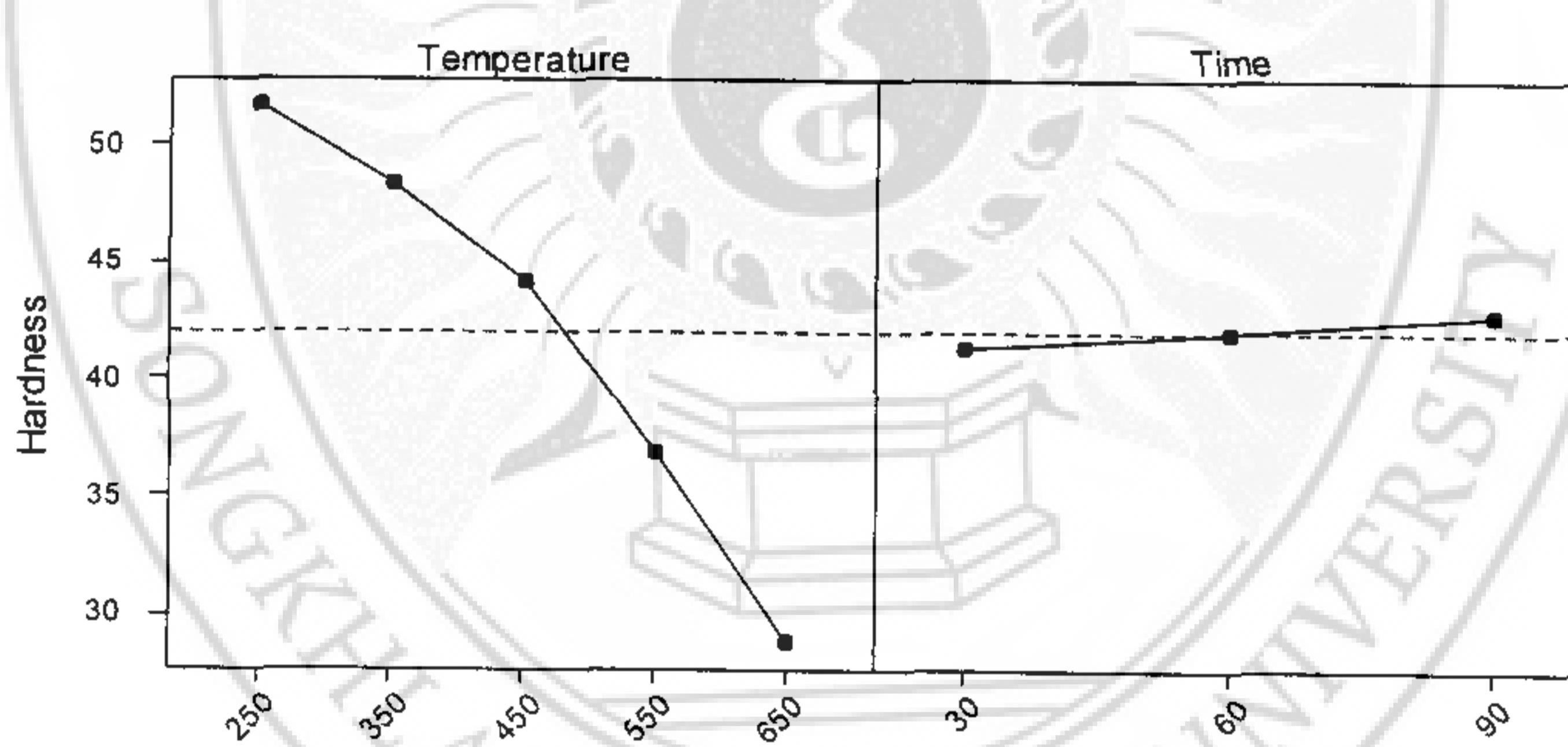
Temperat	Mean	SE Mean
250	51.67	0.5386
350	48.39	0.5386
450	44.22	0.5386
550	36.94	0.5386
650	28.83	0.5386
Time		
30	41.37	0.4172
60	41.93	0.4172
90	42.73	0.4172
Temperat*Time		
250 30	52.17	0.9329
250 60	49.83	0.9329
250 90	53.00	0.9329

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งจากการอบคีนตัว (ต่อ)

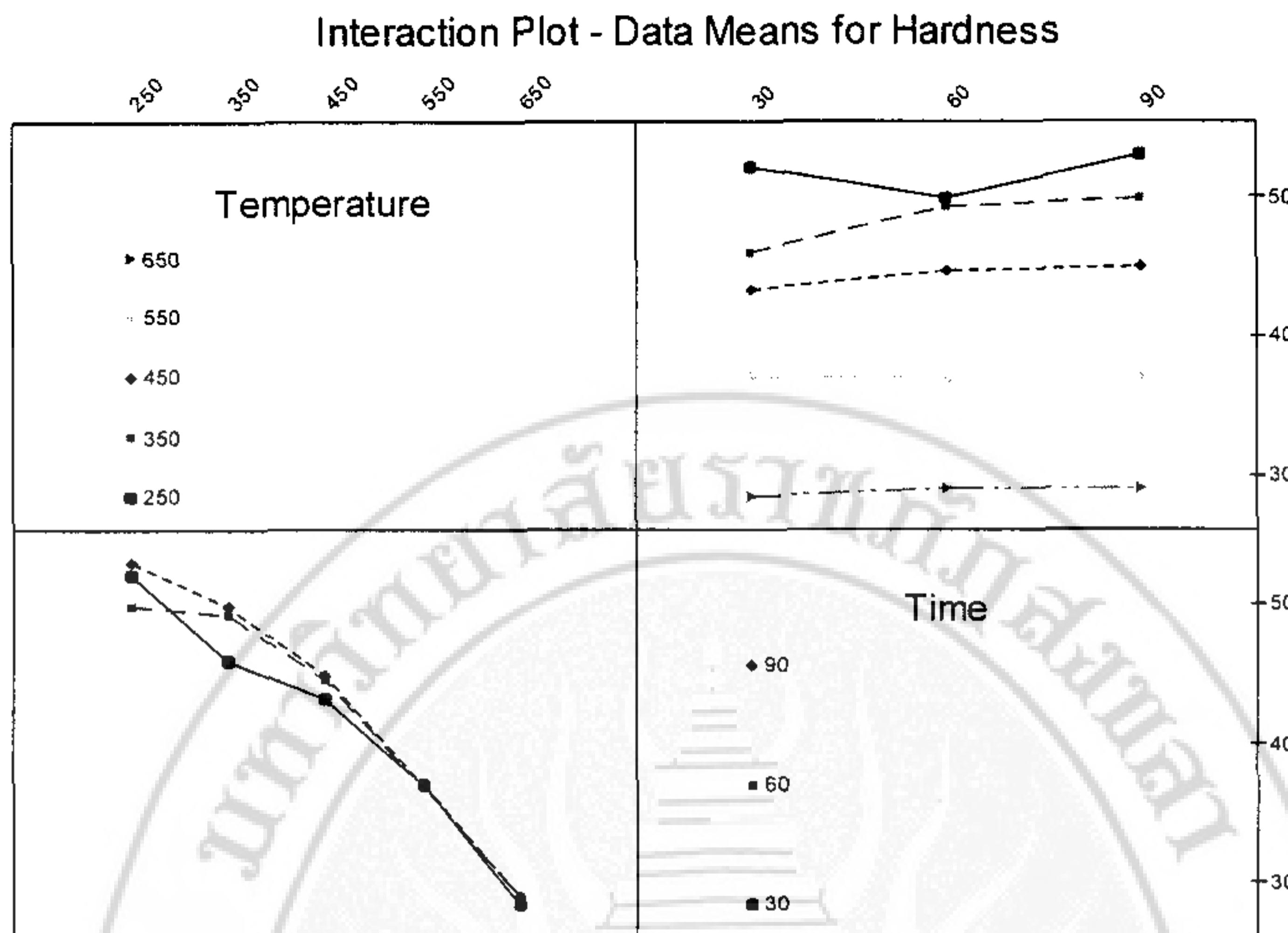
350	30	46.00	0.9329
350	60	49.33	0.9329
350	90	49.83	0.9329
450	30	43.17	0.9329
450	60	44.67	0.9329
450	90	44.83	0.9329
550	30	37.00	0.9329
550	60	36.83	0.9329
550	90	37.00	0.9329
650	30	28.50	0.9329
650	60	29.00	0.9329
650	90	29.00	0.9329

จากตารางที่ 4.10 เริ่มต้นจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ก่อนแล้วทำการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลหลักต่อ ซึ่งพิจารณาจากค่า P-Value พนวณว่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าของความเสี่ยงในการไม่ยอมรับสมมติฐานทั้งที่สมมติฐานเป็นจริง ( $\alpha$ ) แสดงว่าค่า F-Value มีค่ามาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิในการอบคีนตัว (Temperature) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Significant) จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน ดังนั้นอุณหภูมิในการอบคีนตัวมีผลต่อค่าความแข็งจากการอบคีนตัว

### Main Effects Plot - Data Means for Hardness



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของค่าความแข็งจากการอบคีนตัว



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมของค่าความแข็งจากการอบคีนตัว

พิจารณาอิทธิพลหลัก (Main Effect) ดังรูปที่ 4.27 และอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ดังรูปที่ 4.28 ของค่าความแข็งของปัจจัยต่าง ๆ ที่ระดับต่าง ๆ กัน

หลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แล้วจะเห็น ได้ว่า อิทธิพลหลักของอุณหภูมิในการอบคีนตัว มีผลกระแทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งส่วนอิทธิพลอื่นไม่มีผลกระแทบท่อค่าความแข็ง ดังนั้นจึงเพิ่มองศาสความอิสระ (Degree of Freedom; DF) กับรีพีททะบิลิตี้ด้วยการรวมอิทธิพลร่วม ให้กับรีพีททะบิลิตี้โดยการลดรูป (Reduce Model) ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการลดรูปของค่าความแข็งจากการอบคีนตัว  
**General Linear Model: Hardness versus Temperature**

Factor	Type	Levels	Values			
Temperat	fixed	5	250 350 450 550 650			
<b>Analysis of Variance for Hardness, using Adjusted SS for Tests</b>						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Temperat	4	3043.08	3043.08	760.77	241.20	0.000
Error	40	126.17	126.17	3.15		
Total	44	3169.24				

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการลดรูปของค่าความแข็งจากการอบคีนตัว (ต่อ)

Unusual Observations for Hardness

Obs	Hardness	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
20	43.0000	48.3889	0.5920	-5.3889	-3.22R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Least Squares Means for Hardness

Temperat	Mean	SE Mean
250	51.67	0.5920
350	48.39	0.5920
450	44.22	0.5920
550	36.94	0.5920
650	28.83	0.5920

จากรูปที่ 4.27 และรูปที่ 4.28 จะได้ว่าค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่อระดับอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากค่าความแข็งที่มาก ๆ หมายความว่าจะต้องใช้เวลา ดังนั้นควรเลือกค่าความแข็งที่มาก ๆ ซึ่งควรเลือกอบคีนตัวที่เวลา 90 นาทีและควบคุมอุณหภูมิที่ช่วง  $250^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$  ให้มาก ๆ เนื่องจากเป็นเวลาที่มีผลต่อความไวของอุณหภูมน้อย ๆ (Robust) และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการทดลองด้วย

#### 4.5.1.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

หลังจากทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว นอกจากนี้สามารถนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์การถดถอยได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งจากการอบคีนตัว

#### Regression Analysis: Hardness versus Temperature, Time

The regression equation is

$$\text{Hardness} = 66.3 - 0.0571 \text{ Temperature} + 0.0228 \text{ Time}$$

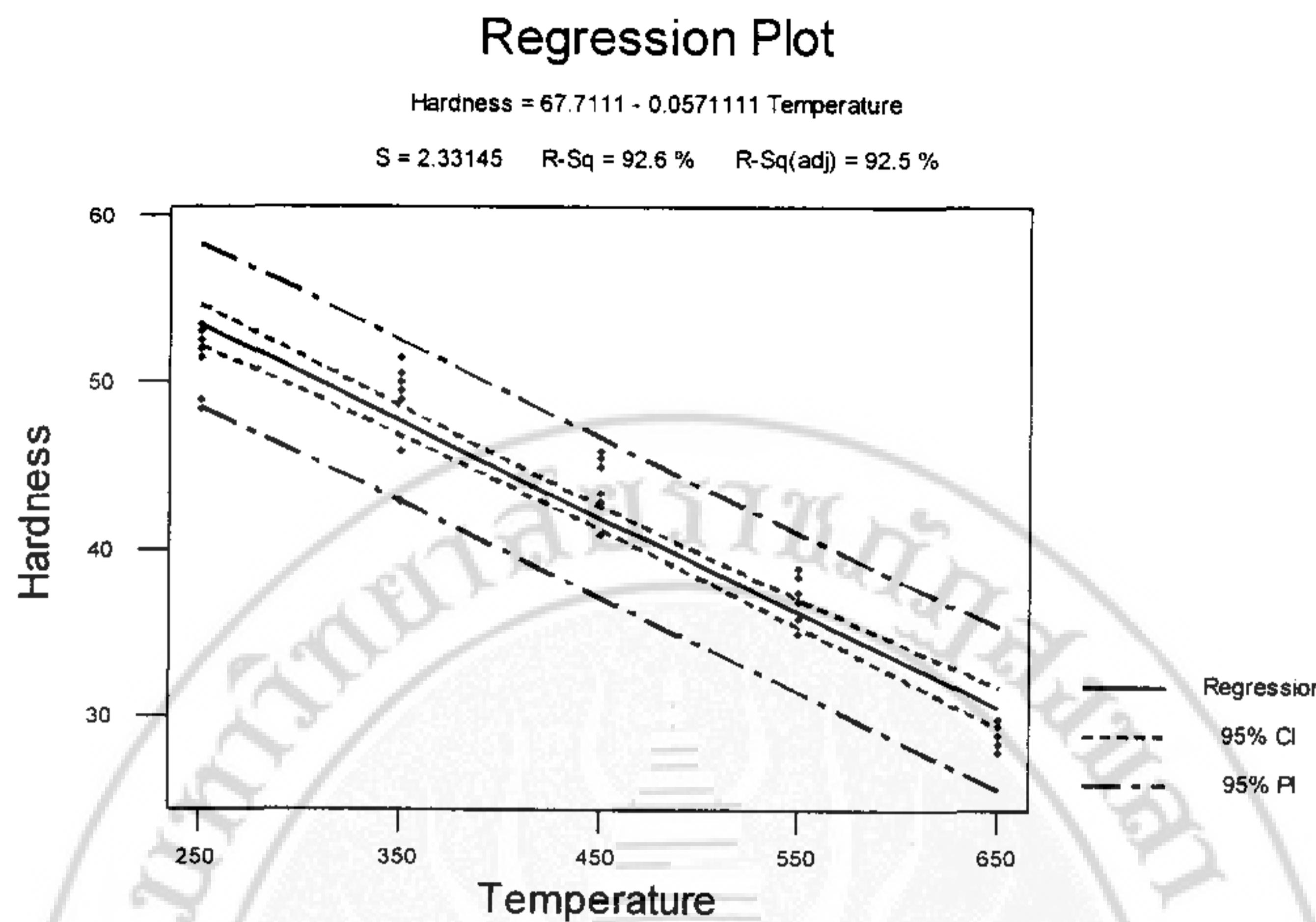
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	66.344	1.411	47.02	0.000
Temperature	-0.057111	0.002411	-23.69	0.000
Time	0.02278	0.01392	1.64	0.109

$$S = 2.287 \quad R-Sq = 93.1\% \quad R-Sq(\text{adj}) = 92.7\%$$

#### Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	2949.5	1474.8	281.90	0.000
Residual Error	42	219.7	5.2		
Lack of Fit	12	141.4	11.8	4.51	0.000
Pure Error	30	78.3	2.6		
Total	44	3169.2			

Source	DF	Seq SS
Temperature	1	2935.5
Time	1	14.0



รูปที่ 4.29 การประมาณค่าความแข็งจากการอบคีนตัว

จากตารางที่ 4.12 สามารถอธิบายได้โดยความผันแปรของข้อมูลค่าความแข็ง 100 HRC<sup>2</sup> อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของอุณหภูมิกับเวลาเท่ากับ 93.1% โดยปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้ว่ามาจากแหล่งความผันแปรใด แสดงว่าข้อมูลมีสารสนเทศในการวิเคราะห์ และ R-Sq.(adj) มีค่าใกล้กับ R-Sq. แสดงว่าจำนวนข้อมูลมีความเหมาะสม แต่ค่า P-Value ของการทดสอบ Lack of Fit มีค่าต่ำ และค่า F มีค่ามากแสดงว่าความสมรูปของตัวแบบ กับข้อมูลไม่มีความเหมาะสม ดังนั้นไม่สามารถทำการตีความจากสมการการทดลองได้