

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมของการชุบแข็ง

##### 4.1.1 ผลการทดลองการชุบแข็ง

สำหรับผลการทดลองการชุบแข็งที่ได้ดำเนินการทดลอง ตามแผนการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.1 เมื่อทำการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) แต่ละสภาวะของชิ้นทดสอบแล้วสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองการวัดค่าความแข็งจากการชุบแข็งในสภาวะต่าง ๆ

สารชุบ	อุณหภูมิ (°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

จากการทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมของการชุบแข็งเหล็กกล้าผสม AISI 4140 ซึ่งใช้อุณหภูมิในการชุบแข็งที่ 3 ระดับ คือ 800°C, 850°C และ 900°C และชุบแข็งในสารชุบ 2 ประเภท คือน้ำ และน้ำมัน โดยความแข็งที่ต้องการของเหล็กกล้าผสมนี้คือ 54 HRC จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 จะพบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการชุบแข็ง คือที่ระดับอุณหภูมิ 850°C ชุบแข็งในน้ำ แต่เมื่อสังเกตชิ้นทดสอบด้วยการวิเคราะห์โครงสร้างทางจุลภาค (Microstructure) จะพบว่าชิ้นทดสอบที่ผ่านการชุบแข็งด้วยน้ำจะทำให้เกิดการแตกร้าว ดังนั้นจึง

วิเคราะห์ว่าสภาวะที่ใช้ในการชุบแข็งเหล็กกล้าผสม AISI ที่เหมาะสมคือ ที่ระดับอุณหภูมิ 850°C และชุบแข็งในน้ำมัน เนื่องจากจะได้ค่าความแข็งใกล้เคียงกับค่าที่ต้องการ

จากการทดลองนี้ค่าความแข็งที่คลาดเคลื่อนจากค่าที่ต้องการอาจเกิดมาจากความชำนาญในการชุบแข็งของผู้ทดลอง หรือเนื่องจากการลดลงของอุณหภูมิของเหล็กที่นำออกมาจากเตาก่อนที่จะทำการชุบในน้ำมัน

#### 4.2 การวิเคราะห์ระบบการวัด (Measurement System Analysis)

ในการพิจารณาความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากสาเหตุธรรมชาติของความผันแปรจะมีความคลาดเคลื่อนอยู่ 2 ประเภท คือ ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติด้านความถูกต้อง (Accuracy) ของระบบการวัด และความคลาดเคลื่อนแบบสุ่ม ซึ่งหมายถึงความคลาดเคลื่อนที่ข้อมูลกระจายอย่างสุ่มรอบค่าแท้จริงค่าหนึ่ง

การวิเคราะห์ระบบการวัดนี้มีจุดประสงค์สำคัญในการวิเคราะห์ถึงแหล่งของความคลาดเคลื่อนในระบบการวัดด้วยการจำแนกค่าที่ได้รับการวัดออกเป็น ค่าจริง ความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ ความคลาดเคลื่อนจากเครื่องมือวัด ความคลาดเคลื่อนจากพนักงานวัด ความคลาดเคลื่อนอื่น ๆ เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของค่าวัดมีทั้งปริมาณที่สามารถกำจัดได้และกำจัดไม่ได้ เราจึงต้องดำเนินการกำจัดปริมาณที่ควบคุมได้ก่อน ได้แก่ ความคลาดเคลื่อนจากความผิดพลาดด้วยการดำเนินการทำให้ระบบการวัดเป็นมาตรฐานก่อน จากนั้นจึงดำเนินการสอบเทียบเครื่องมือเพื่อกำจัดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบ

หลังจากกำจัดความคลาดเคลื่อนเชิงระบบแล้วจะลดความคลาดเคลื่อนแบบสุ่มด้วยการประเมินถึงแหล่งความผันแปรต่าง ๆ ทั้งจากเครื่องมือวัด พนักงานวัด ตลอดทั้งสภาพแวดล้อมที่มีผลต่อค่าวัดจะได้ว่า

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

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

และได้ค่าความผันแปรของค่าวัด (Measurement Variation) ว่า

$$\sigma_x^2 = \sigma^2\alpha + \sigma^2\beta + \sigma^2\alpha\beta + \sigma^2 \quad (4.2)$$

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

#### 4.2.1 การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัด

การวิเคราะห์ความแม่นยำนี้ จะมุ่งพิจารณาใน 2 ประเด็นหลัก คือ คุณสมบัติเชิงสถิติของค่าวัดมีความไวต่อเทคนิคของพนักงานวัดหรืออุปกรณ์วัดหรือไม่ และระบบการวัดที่พิจารณามีความสามารถในการตรวจจับความผันแปรของผลิตภัณฑ์ที่แสดงถึงความผันแปรของกระบวนการผลิตหรือไม่

คุณสมบัติด้านความแม่นยำนี้ หากจำแนกตามช่วงเวลาที่เกิดขึ้นแล้วจะได้รับการแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ความสามารถในการทำซ้ำ หรือ รีพีทเทบิลิตี (Repeatability) และความสามารถในการทำเหมือน หรือ รีโพรดิวซิบิลิตี (Reproducibility) โดยที่รีพีทเทบิลิตีของระบบการวัด หมายถึง ค่าความแตกต่างในการวัดอย่างต่อเนื่องกับงานชิ้นเดียวด้วยเครื่องมือเดียวกันและด้วยพนักงานคนเดียวกัน ซึ่งโดยปกติจะใช้ค่ารีพีทเทบิลิตีในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะสั้น (Short-Term Measurement) ส่วนรีโพรดิวซิบิลิตีของระบบการวัด หมายถึง ค่าความแตกต่างในค่าเฉลี่ยของการวัดกับงานชิ้นเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกันแต่ต่างพนักงานกัน โดยปกติจะใช้ค่ารีโพรดิวซิบิลิตีในการประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดในระยะยาว (Long-Term Measurement) ดังนั้นการประเมินผลค่ารีพีทเทบิลิตีและรีโพรดิวซิบิลิตีของระบบการวัด (Gage Repeatability and Reproducibility ; GR&R) จะหมายถึงการประเมินผลค่าผันแปรอันเนื่องมาจากการวัดค่าจริงของงานหนึ่งชิ้นแบบซ้ำ ๆ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกันแล้วมีการเปลี่ยนเงื่อนไขไป

#### 4.2.2 การวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดโดยอาศัยการวิเคราะห์ความแปรปรวน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน คือกลวิธีทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลโดยอาศัยหลักการแยกความผันแปรในรูปความแปรปรวนออกเป็นความผันแปรย่อย ๆ ตามแหล่งผันแปรจากแหล่งใดมีนัยสำคัญ

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

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

#### 4.2.3 การวิเคราะห์ระบบการวัดพลังงานกระแทกจากการอบคืนตัว

จากการทดลอง ทำการสุ่มเลือกพนักงานมา 2 คน และทำการสุ่มซ้อน (Nested) ชิ้นงานมาจำนวน 10 ชิ้น ทำการวัดซ้ำชิ้นละ 2 ครั้ง ตามแผนการทดลองที่วางไว้จนครบทุกชิ้น โดยแผนการทดลองต้องเป็นการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) แล้วบันทึกผลการทดลองลงในตารางที่ 4.2

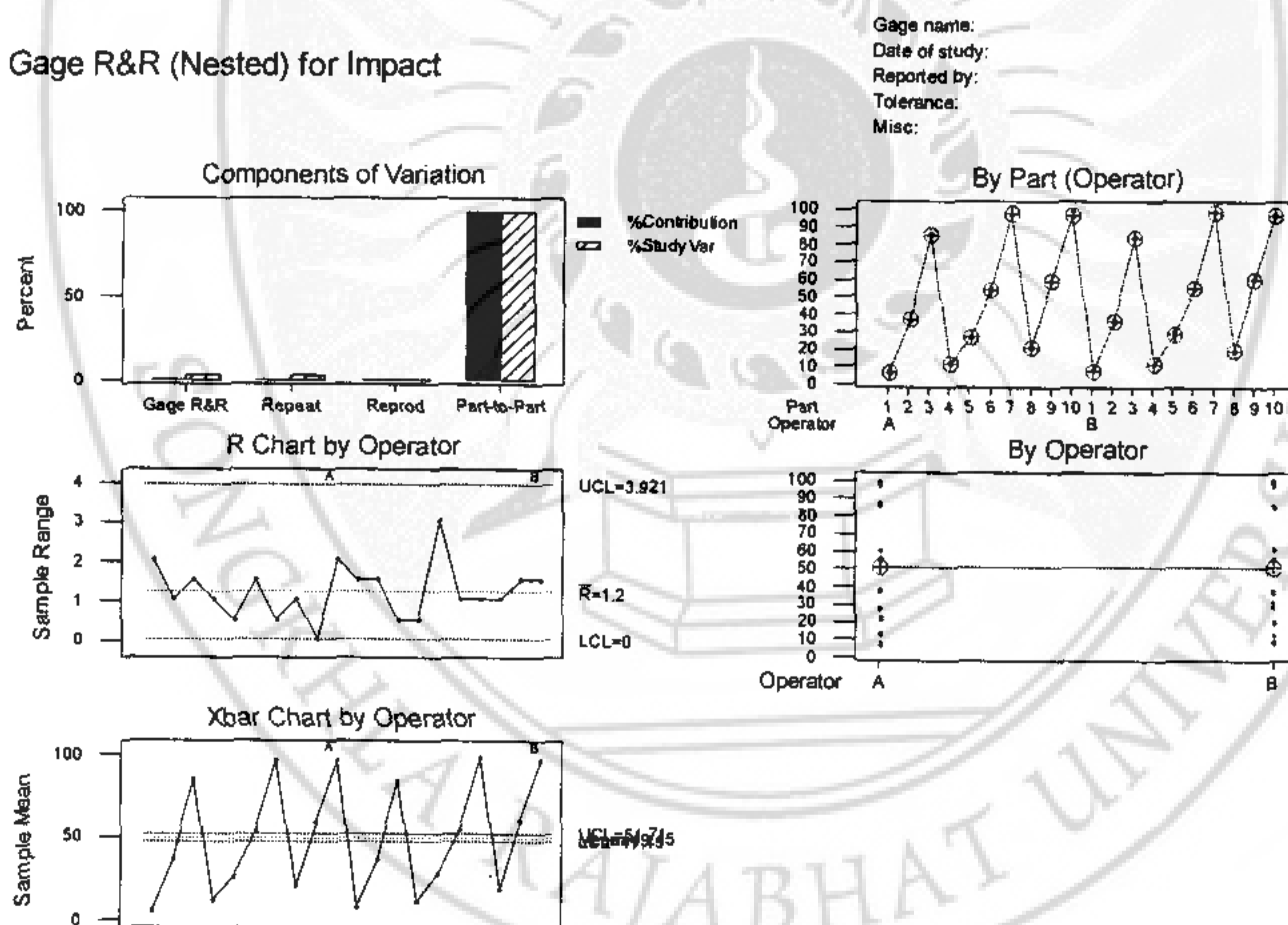
ในกรณีนี้จะต้องดำเนินการวิเคราะห์แบบสุ่มซ้อน (Nested) เริ่มแรกเราต้องพิจารณาคูณภาพของข้อมูลจากระบบการวัดก่อน เนื่องจากจุดประสงค์สำหรับการทำระบบการวัดคือการพิจารณาสารสนเทศด้านความผันแปรของข้อมูลวัด เพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัดสำหรับการอธิบายถึงความผันแปรของกระบวนการ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องมีคุณสมบัติเฉพาะด้านความสามารถในการแยกความแตกต่าง (Discrimination) หรือเรโซลูชัน (Resolution) ได้

จากผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.1 เราสามารถวิเคราะห์ความสามารถในการแยกความแตกต่างของระบบการวัดได้จากการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุม R ซึ่งพบว่าแผนภูมิควบคุม R แสดงค่าพิสัยที่มีความเป็นไปได้มากกว่า 3 ค่าและอยู่ภายในพิสัยควบคุมของแผนภูมิ ดังนั้นลักษณะของระบบการวัดมีความสามารถในการแยกความแตกต่างของค่าวัดได้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการวัดพลังงานกระแทกจากการอบกึ่งตัว (หน่วย : จูล)

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

Gage R&amp;R (Nested) for Impact



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดพลังงานกระแทก

จากนั้นเราพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างตัวต่อตัวนั้น สามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิควบคุม  $\bar{X}$  พิจารณาผลการทดลอง

การวัดสำหรับพนักงานวัดแต่ละคนพบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มย่อย (หมายถึง การกำจัดรีพีทเทบิลิตี้ออกไปแล้ว) จะอธิบายถึงความแตกต่างของสิ่งตัวอย่าง และเนื่องจากในแผนภูมิควบคุม  $\bar{X}$  นั้น พิกัดควบคุมจะอธิบายถึงความแตกต่างโดยสาเหตุธรรมชาติของแต่ละสิ่งตัวอย่างมากกว่าการอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่าง ดังนั้นจากผลการทดลองจุด  $\bar{X}$  ส่วนใหญ่อยู่นอกพิกัดควบคุม แสดงว่าความผันแปรส่วนใหญ่มาจากความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่างและแสดงให้เห็นถึงว่าชิ้นงานที่เราเลือกมาทำการทดลองนั้น ได้เลือกมาครอบคลุมช่วงความผันแปรของกระบวนการ

ในการพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างนั้น เราจะพิจารณาความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานควบคู่ไปด้วย โดยแนวคิดนี้มาจากการควบคุมคุณภาพของกระบวนการโดยอาศัยสถิติ นั่นจะมีข้อจำกัดหลายด้านทำให้ไม่สามารถทำการวัดคุณลักษณะที่สนใจของชิ้นงานทุกชิ้นตามการกระจายในกระบวนการผลิตได้ จึงมีความจำเป็นต้องรวมคุณลักษณะที่ได้รับจากการวัดที่ไม่มี ความแตกต่างกัน (หรือแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ) อยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน และตีความหมายว่าชิ้นงานที่ได้รับการวัดที่มีข้อมูลอยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน จะมีคุณลักษณะที่เหมือนกัน ดังนั้นถ้าหากขาดคุณลักษณะในการแยกแยะความแตกต่างแล้วก็จะทำให้ขาดคุณลักษณะในการควบคุมและวิเคราะห์ผล แนวคิดในการวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นพิจารณาจากความผันแปรของกระบวนการหรือสิ่งที่ได้รับการวัดกับความละเอียดของค่าที่วัดได้จากระบบการวัดที่หมายถึงหน่วยที่เล็กที่สุดของข้อมูลจากการวัดในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นข้อมูลจะต้องได้รับการจำแนกได้ไม่ต่ำกว่า 5 ประเภท ซึ่งจำนวนประเภทของข้อมูล (Number of Distinct Categories) สามารถประมาณได้จากสมการที่ 4.3

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

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.3 ในส่วนของการประเมินผลระบบการวัด (MSE) สามารถตีความหมายได้ดังนี้  $ndc = 50$  แสดงว่าระบบการวัดที่ศึกษาทำการแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 50 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าข้อมูลที่ได้จะใช้ประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดได้ ดังนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองโดยวิเคราะห์ความแปรปรวนต่อไป

ตารางที่ 4.3 ตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวนของ Gage R&R  
ของระบบการวัดพลังงานกระแทก

**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 (5.15*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 จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลทดลองทั้งหมดมีค่า 34.6609 จูล จะมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากชิ้นงานทดสอบ 34.6474 จูล และความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากระบบการวัด 0.9682 จูล นอกจากนี้ความผันแปรที่ประมาณค่าได้ของระบบการวัด จะมีความผันแปรของค่าวัด 178.504 จูล ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากระบวนการผลิต 178.434 จูล และความผันแปรจากระบบการวัด 4.986 จูล

เมื่อประเมินผลระบบการวัดเทียบกับความผันแปรของกระบวนการ (TV) หรือ P/TV แล้วจะพบว่า ถ้าความผันแปรของกระบวนการผลิตที่ประเมินได้จากค่าวัดทั้งหมด (TV) มีค่าเท่ากับ 100 จูลแล้ว จะเป็นการผันแปรจากสาเหตุของกระบวนการผลิต 99.96 จูล และความ

ผันแปรจากระบบการวัด 2.79 จูล ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากสาเหตุรีพีทอะบิลิตี้ 2.79 จูล และความผันแปรจากพนักงานวัดหรือรีโพรดิวซิเบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับรีพีทอะบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์)

ในส่วนของ การวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) สามารถตีความหมายได้ดังนี้ ค่า VarComp ที่หมายถึงองค์ประกอบของความแปรปรวนของการทดลองแบบตัวแปรสุ่ม จะพบว่า ความแปรปรวนจากข้อมูลทั้งหมดมีค่า 1201.38 จูล<sup>2</sup> จะมาจากความแปรปรวนจากระบวนการผลิต 1200.44 จูล<sup>2</sup> และความแปรปรวนจากระบบการวัด 0.94 จูล<sup>2</sup> ซึ่งส่วนใหญ่มาจากสาเหตุด้านรีพีทอะบิลิตี้ และสาเหตุด้านรีโพรดิวซิเบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีพีทอะบิลิตี้ จากองค์ประกอบของความแปรปรวน เมื่อทำการเทียบเป็นค่าร้อยละแล้วจะพบว่า ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดคือ 100 จูล<sup>2</sup> จะเป็นผลเนื่องจากความแปรปรวนของกระบวนการผลิต 99.92 จูล<sup>2</sup> และความแปรปรวนของระบบการวัด 0.08 จูล<sup>2</sup> ซึ่งมาจากสาเหตุด้านรีพีทอะบิลิตี้ ส่วนสาเหตุด้านรีโพรดิวซิเบิลิตี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีโพรดิวซิเบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์) ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องตีความหมายจากตารางวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) เนื่องจากทราบว่า อิทธิพลของพนักงานวัดจะไม่มีนัยสำคัญต่อความผันแปรของข้อมูลในระบบการวัด

จากการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดพลังงานการกระแทกสรุปได้ว่า ความแม่นยำของระบบการวัดของเครื่องทดสอบแรงกระแทกมีความเหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานในระบบการวัดได้ดี

#### 4.2.4 การวิเคราะห์ระบบการวัดความแข็งแรงจากการอบคืนตัว

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

จากผลการทดลองตามตารางที่ 4.4 จะทำการวิเคราะห์ระบบการวัด โดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ได้ผลการวิเคราะห์ในรูปที่ 4.2

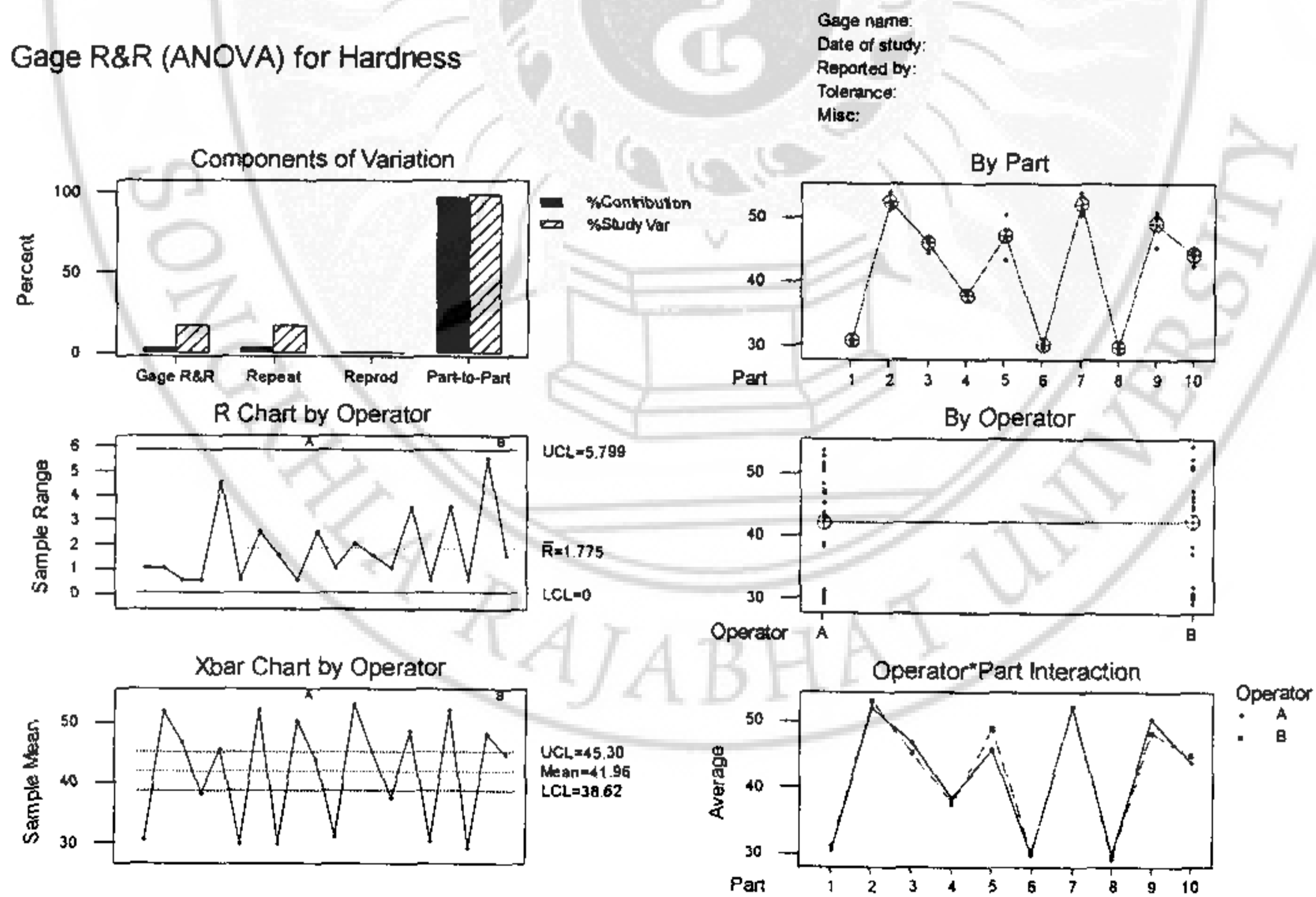
จากรูปที่ 4.2 เริ่มแรกเราต้องพิจารณาคุณภาพของข้อมูลจากระบบการวัดก่อน เนื่องจากจุดประสงค์สำหรับการทำระบบการวัดคือการพิจารณาสารสนเทศด้านความผันแปรของข้อมูลวัด เพื่อประเมินความสามารถของระบบการวัด สำหรับการอธิบายถึงความผันแปรของกระบวนการ ดังนั้นข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะต้องมีคุณสมบัติเฉพาะด้านความสามารถในการแยกความแตกต่าง (Discrimination) หรือรีโซลูชัน (Resolution) ได้ ซึ่งเราสามารถวิเคราะห์ความสามารถในการแยกความแตกต่างของระบบการวัดได้จากการวิเคราะห์แผนภูมิควบคุม R ซึ่งพบว่าแผนภูมิควบคุม R แสดงค่าพิสัยที่มีความเป็นไปได้มากกว่า 3 ค่าและอยู่ภายในพิสัยควบคุม



ของแผนภูมิ ดังนั้นลักษณะของระบบการวัดมีความสม่ำเสมอดีและมีความสามารถในการแยกความแตกต่างของค่าวัดได้

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองการวัดความแข็งจากการอบคืนตัว (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



รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดความแข็ง

จากนั้นพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างตัวต่อตัว ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแผนภูมิควบคุม  $\bar{X}$  พิจารณาผลการทดลองการวัดสำหรับพนักงานวัดแต่ละคนพบว่าค่าเฉลี่ยของกลุ่มย่อย (หมายถึงการกำจัดรีพีทเทบิลิตี้ออกไปแล้ว) จะอธิบายถึงความแตกต่างของสิ่งตัวอย่าง และเนื่องจากในแผนภูมิควบคุม  $\bar{X}$  นั้น พิกัดควบคุมจะอธิบายถึงความแตกต่างโดยสาเหตุธรรมชาติของแต่ละสิ่งตัวอย่างมากกว่าการอธิบายถึงความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่าง ดังนั้นจากผลการทดลองจุด  $\bar{X}$  ส่วนใหญ่อยู่นอกพิกัดควบคุม แสดงว่าความผันแปรส่วนใหญ่มาจากความแตกต่างระหว่างสิ่งตัวอย่างและแสดงให้เห็นถึงว่าชิ้นงานที่เราเลือกมาทำการทดลองนั้นได้เลือกมาครอบคลุมช่วงความผันแปรของกระบวนการ

พิจารณาจากอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างพนักงานวัดและชิ้นงานวัด โดยพิจารณาว่ากราฟที่พลอตซึ่งแสดงถึงค่าวัดชิ้นงานที่วัดโดยพนักงานแต่ละคนตัดกันหรือไม่ ในกรณีนี้กราฟไม่มีการตัดกันอย่างเด่นชัด แสดงว่าไม่มีอิทธิพลร่วม กล่าวคือการเปลี่ยนแปลงชิ้นงานวัดไม่มีผลต่อค่าวัดที่พนักงานวัดได้

ในการพิจารณาความสามารถของระบบการวัดในการตรวจจับความผันแปรของสิ่งตัวอย่างนั้น เราจะพิจารณาความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานควบคู่ไปด้วย โดยแนวคิดนั้นมาจากในการควบคุมคุณภาพของกระบวนการโดยอาศัยสถิติ นั้น จะมีข้อจำกัดหลายด้านทำให้ไม่สามารถทำการวัดคุณลักษณะที่สนใจของชิ้นงานทุกชิ้นตามการกระจายในกระบวนการผลิตได้ จึงมีความจำเป็นต้องรวมคุณลักษณะที่ได้รับจากการวัดที่ไม่มี ความแตกต่างกัน (หรือแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ) อยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน และตีความหมายว่าชิ้นงานที่ได้รับการวัดที่มีข้อมูลอยู่ในกลุ่มประเภทเดียวกัน จะมีคุณลักษณะที่เหมือนกัน ดังนั้นถ้าหากขาดคุณลักษณะในการแยกแยะความแตกต่างแล้วก็จะทำให้ขาดคุณลักษณะในการควบคุมและวิเคราะห์ผล แนวคิดในการวิเคราะห์ความสามารถในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นพิจารณาจากความผันแปรของกระบวนการหรือสิ่งที่ได้รับการวัดกับความละเอียดของค่าที่วัดได้จากระบบการวัดที่หมายถึงหน่วยที่เล็กที่สุดของข้อมูลจากการวัด ในการตรวจจับความแตกต่างของชิ้นงานนั้นข้อมูลจะต้องได้รับการจำแนกได้ไม่ต่ำกว่า 5 ประเภท ซึ่งจำนวนประเภทของข้อมูล (Number of Distinct Categories) สามารถประมาณได้จากสมการที่ 4.3

จากผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ในส่วนของการประเมินผลระบบการวัด (MSE) สามารถตีความหมายได้ดังนี้  $ndc = 8$  แสดงว่าระบบการวัดที่ศึกษาทำการแยกข้อมูลที่วัดได้ออกเป็น 8 ประเภทที่มีความแตกต่างกัน แสดงว่าข้อมูลที่วัดได้จะใช้ประมาณค่าความผันแปรของระบบการวัดได้ 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*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 จะมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลทดลองทั้งหมดมีค่า 9.28962 HRC จะมีความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากชิ้นงานทดสอบ 9.18825 HRC และความเบี่ยงเบนมาตรฐานจากระบบการวัด 1.55676 HRC นอกจากนี้ความผันแปรที่ประมาณค่าได้ของระบบการวัด จะมีความผันแปรของค่าวัด 47.8415 HRC ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากระบวนการผลิต 47.1650 HRC และความผันแปรจากระบบการวัด 8.0173 HRC

เมื่อประเมินผลระบบการวัดเทียบกับความผันแปรของกระบวนการ (TV) หรือ P/TV แล้วจะพบว่า ถ้าความผันแปรของกระบวนการผลิตที่ประเมินได้จากค่าวัดทั้งหมด (TV) มีค่าเท่ากับ 100 จุดแล้ว จะเป็นความผันแปรจากสาเหตุของกระบวนการผลิต 98.59 HRC และความผันแปรจากระบบการวัด 16.76 HRC ซึ่งแบ่งออกเป็นความผันแปรจากสาเหตุรีพิทเทบิลิตี้ 16.76 HRC และความผันแปรจากพนักงานวัดหรือรีโพรดิวซิบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับรีพิทเทบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์)

ในส่วนของการวิเคราะห์ระบบการวัด (MSA) สามารถตีความหมายได้ดังนี้ ค่า VarComp ที่หมายถึงองค์ประกอบของความแปรปรวนของการทดลองแบบตัวแปรสุ่ม จะพบว่าความแปรปรวนจากข้อมูลทั้งหมดมีค่า  $86.297 \text{ HRC}^2$  จะมาจากความแปรปรวนจากกระบวนการผลิต  $83.873 \text{ HRC}^2$  และความแปรปรวนจากระบบการวัด  $2.423 \text{ HRC}^2$  ซึ่งส่วนใหญ่มาจากสาเหตุด้านรีพิทเทบิลิตี้ และสาเหตุด้านรีโพรดิวซิบิลิตี้ จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีพิทเทบิลิตี้ จากองค์ประกอบของความแปรปรวน เมื่อทำการเทียบเป็นค่าร้อยละแล้วจะพบว่า ถ้าความแปรปรวนของข้อมูลทั้งหมดคือ  $100 \text{ HRC}^2$  จะเป็นผลเนื่องจากความแปรปรวนของกระบวนการผลิต  $97.19 \text{ HRC}^2$  และความแปรปรวนของระบบการวัด  $2.81 \text{ HRC}^2$  ซึ่งมาจากสาเหตุด้านรีพิทเทบิลิตี้ ส่วนสาเหตุด้านรีโพรดิวซิบิลิตี้จะมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับรีโพรดิวซิบิลิตี้ (ประมาณเท่ากับศูนย์) ส่วนการวิเคราะห์ความแปรปรวน ซึ่งเริ่มจากการวิเคราะห์ความมีนัยสำคัญของอิทธิพลร่วม (Interaction Effect) ระหว่างพนักงานและชิ้นงานก่อนเสมอ โดยในการทดลองนี้แสดงว่าที่ระดับนัยสำคัญ 5% อิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานและชิ้นงานอย่างไม่มีนัยสำคัญ แล้วให้ทำการเพิ่มองศาความอิสระ (DF) กับรีพิทเทบิลิตี้ ด้วยการรวมความผันแปรของอิทธิพลร่วมระหว่างพนักงานและชิ้นงานเข้ากับความผันแปรจากรีพิทเทบิลิตี้ในรูปของความแปรปรวนรวมเป็นตัวแทนลดรูปของการวิเคราะห์ความแปรปรวน จากตารางพิจารณาค่า P-Value ของพนักงานวัดได้ค่า 0.80135 และชิ้นงาน ได้ค่า 0.0000 ซึ่งแสดงว่าพนักงานทั้งสองคนมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ และเนื่องจากเป็นเหตุผลที่เราสนใจเลือกเก็บชิ้นงานให้มีความแตกต่างกัน ดังนั้นชิ้นงานทดสอบจึงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

จากการวิเคราะห์ความแม่นยำของระบบการวัดความแข็งแรงสรุปได้ว่า ความแม่นยำของระบบการวัดของเครื่องทดสอบความแข็งแรงมีความเหมาะสมอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถใช้งานในระบบการวัดได้ดี

#### 4.3 ผลการทดลองของการอบคืนตัว

##### 4.3.1 ผลการทดลองการวัดค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว

สำหรับผลการทดลองการอบคืนตัวของการทดสอบพลังงานการกระแทกที่ได้ดำเนินการทดลอง ตามแผนการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.5 เมื่อทำการทดสอบวัดค่าพลังงานการกระแทก (Impact Energy) แต่ละสภาวะของชิ้นทดสอบแล้วสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองการวัดค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัวที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	พลังงานการกระแทก (จูล)			ค่าเฉลี่ย
		ชิ้นทดสอบ			
		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

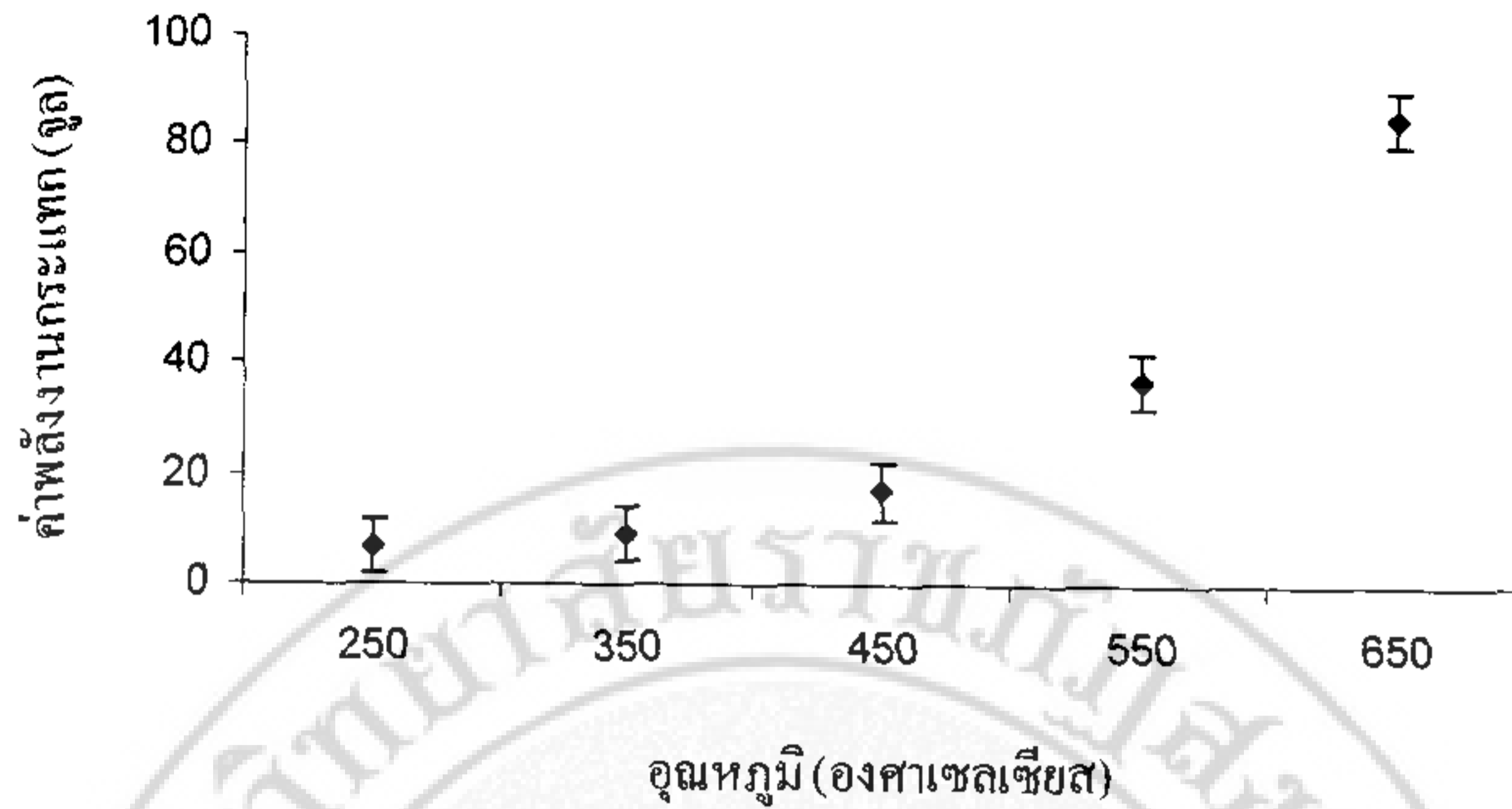
#### 4.3.2 ผลการทดลองการวัดค่าความแข็งจากการอบคืนตัว

สำหรับผลการทดลองการอบคืนตัวของการทดสอบความแข็งที่ได้ดำเนินการทดลอง ตามแผนการออกแบบการทดลองในตารางที่ 3.4 เมื่อทำการทดสอบวัดค่าความแข็ง (Hardness) แต่ละสถานะของชิ้นทดสอบแล้วสามารถสรุปผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 4.7

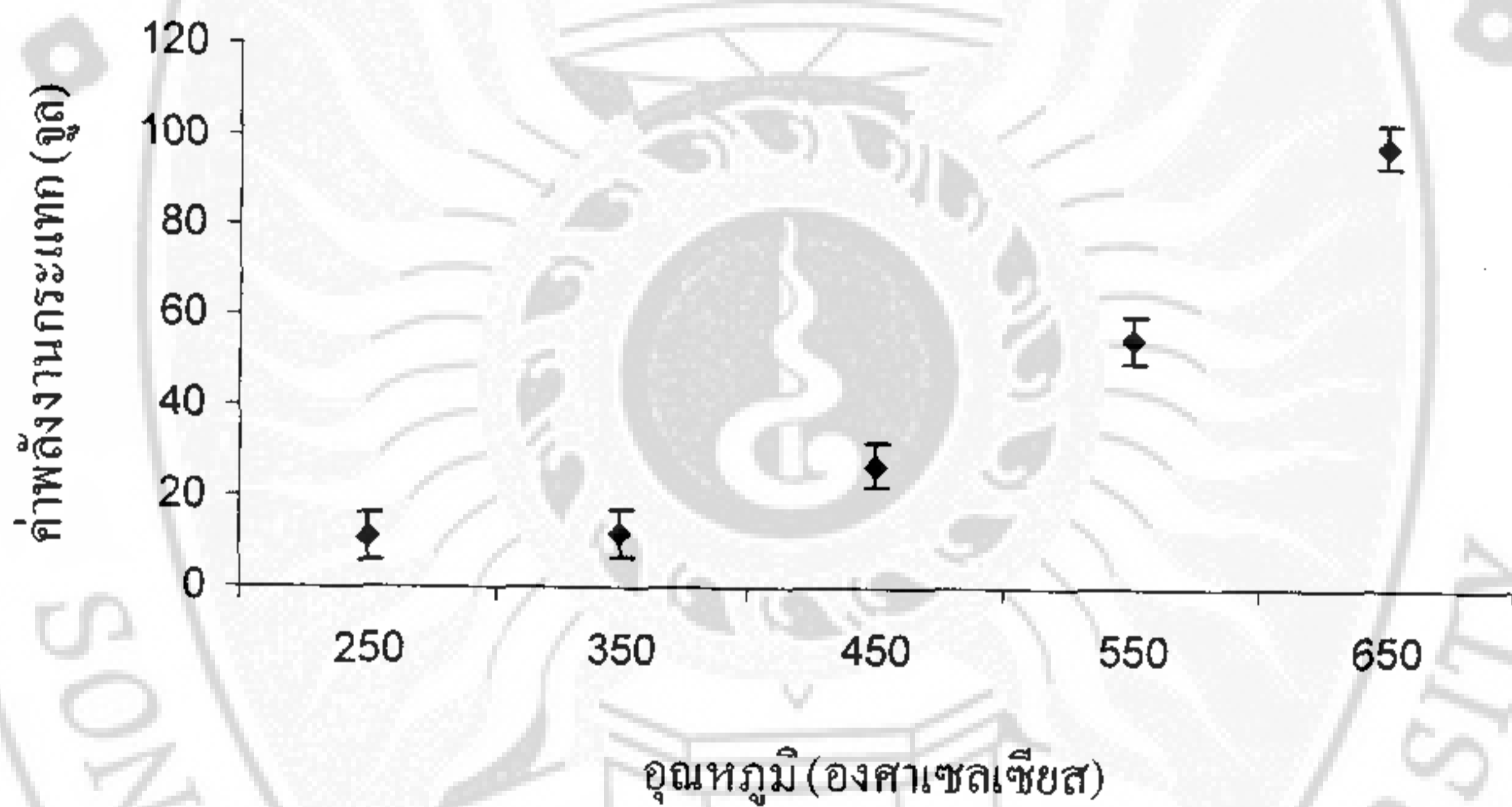
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองการวัดค่าความแข็งจากการอบคืนตัวที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (°C)	ความแข็ง (HRC)			
		ชิ้นทดสอบ			ค่าเฉลี่ย
		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

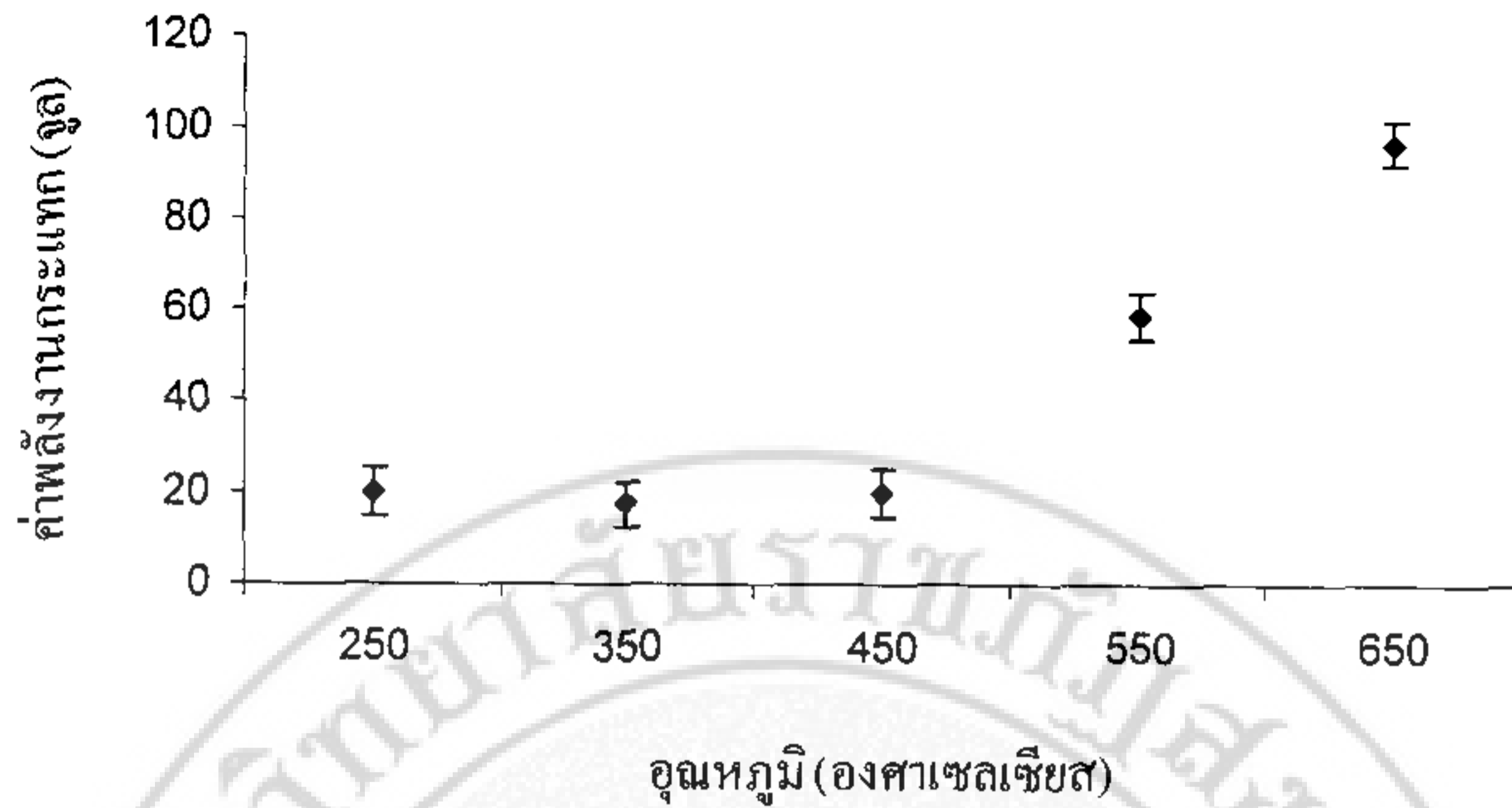
จากตารางที่ 4.6 และ 4.7 สามารถนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยนำเสนอด้วยกราฟแต่ละเวลาการอบคืนตัวได้ดังนี้



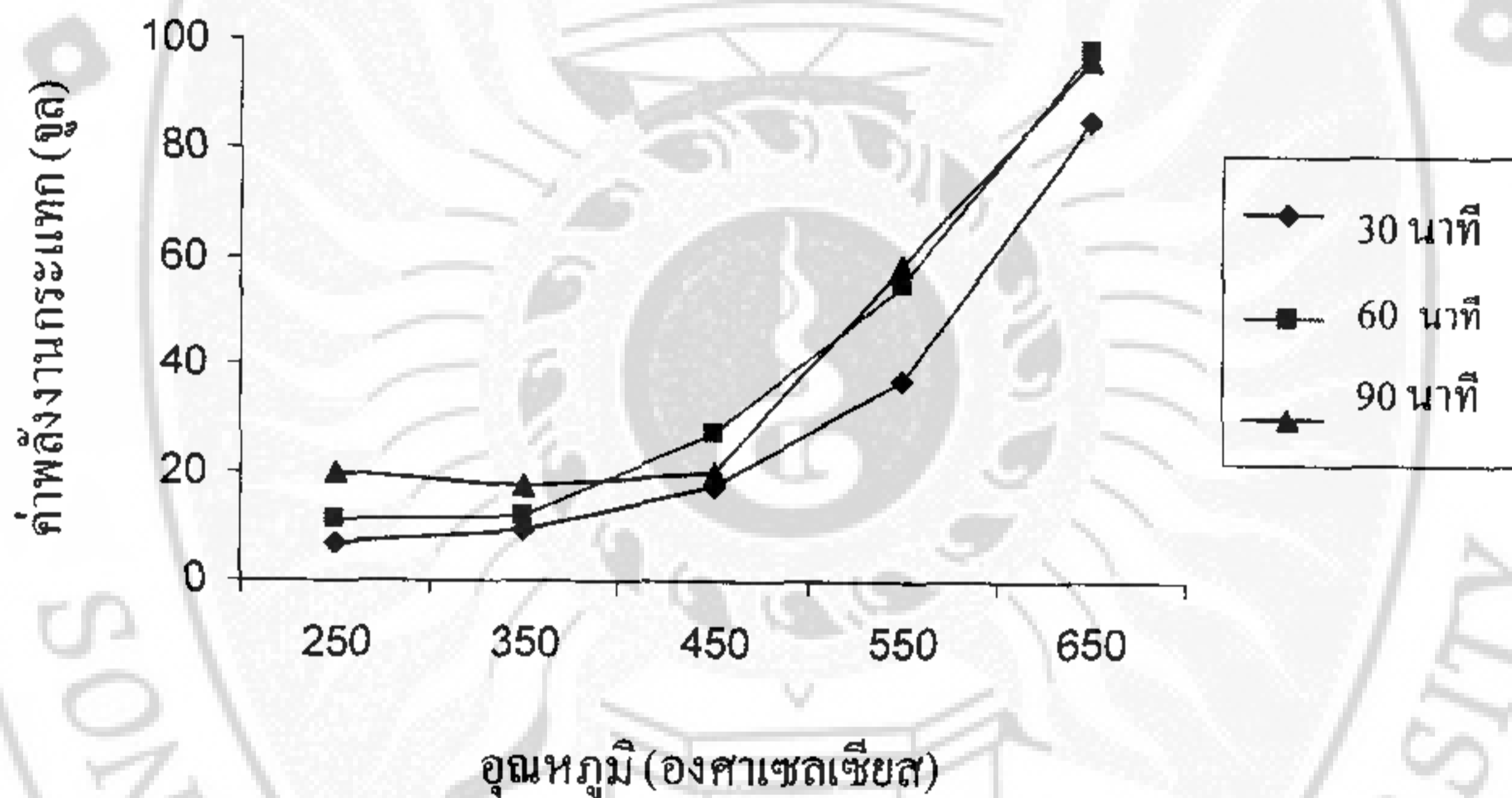
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระแสแตกกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคั้นตัว 30 นาที  
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานการกระแสแตกจะมีค่าลดลงที่ระดับอุณหภูมิ 250 °C  
และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระแสแตกกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคั้นตัว 60 นาที  
จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานการกระแสแตกจะมีค่าลดลงในช่วงอุณหภูมิ 250 – 350  
°C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น

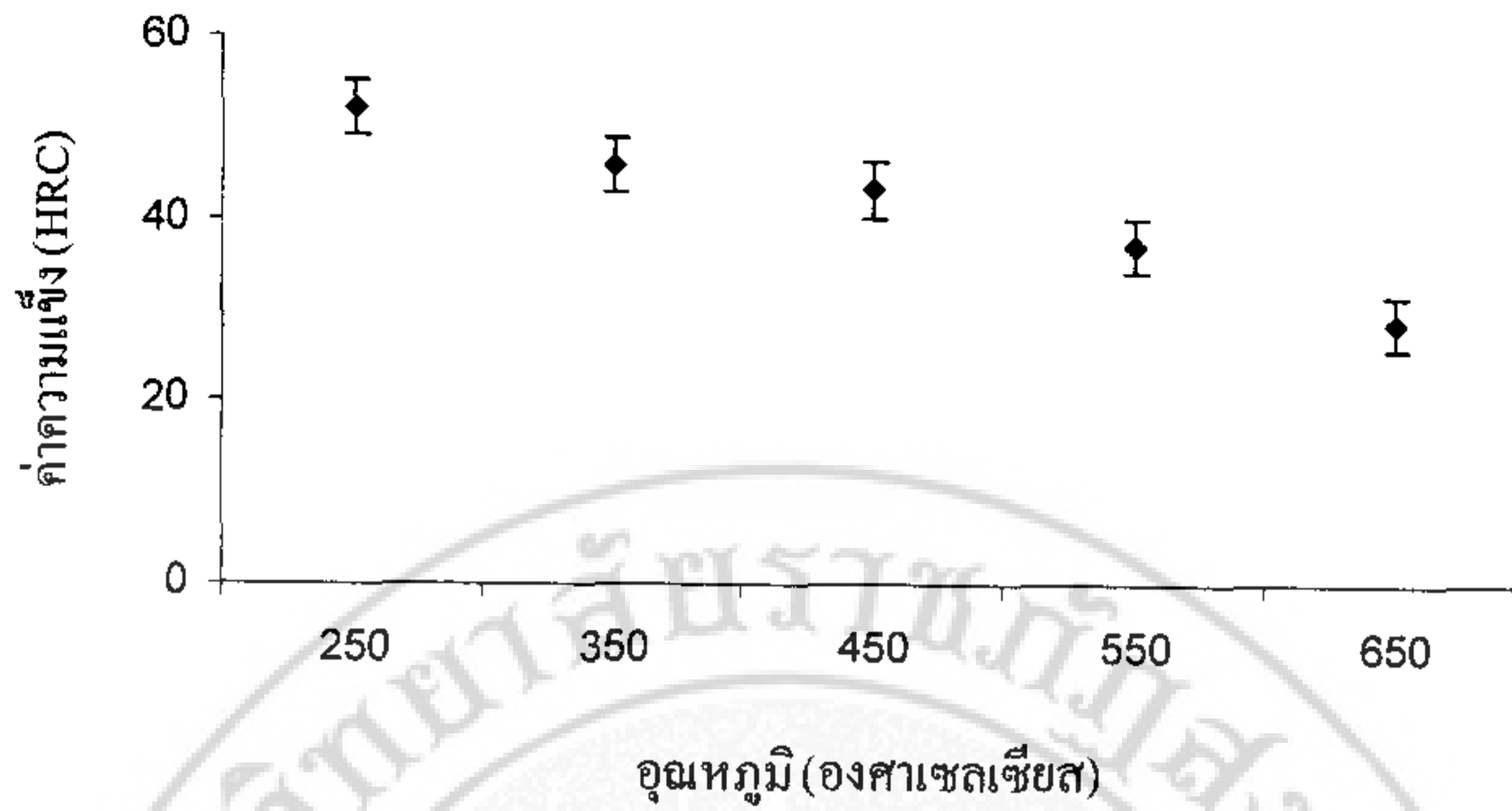


รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระแสแอมป์กับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคั้นตัว 90 นาที  
จากรูปที่ 4.5 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานการกระแสแอมป์จะมีค่าลดลงที่ระดับอุณหภูมิ 350 °C และจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น

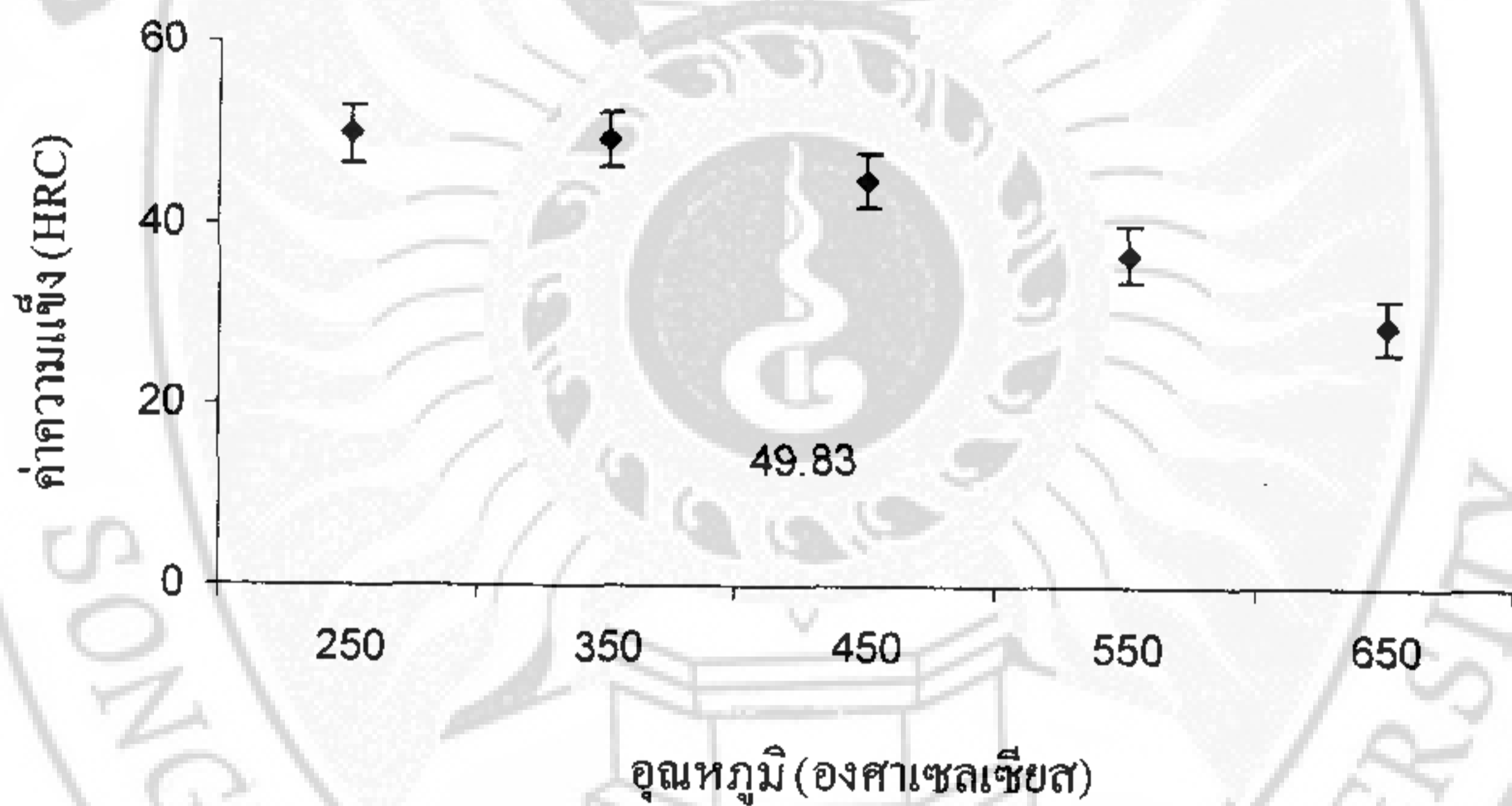


รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานกระแสแอมป์กับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบคั้นตัวต่าง ๆ  
จากรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าระดับอุณหภูมิ 250-350 °C ที่เวลาอบคั้นตัว 90 นาทีจะให้ค่าพลังงานการกระแสแอมป์ที่เหมาะสมกว่าเวลาการอบคั้นตัวอื่น และที่ระดับอุณหภูมิ 450 °C ที่เวลาอบคั้นตัว 60 นาทีจะให้ค่าพลังงานการกระแสแอมป์ที่เหมาะสม ส่วนระดับอุณหภูมิ 550-650 °C ที่เวลาอบคั้นตัว 60 นาที และ 90 นาที จะให้ค่าพลังงานการกระแสแอมป์ที่ใกล้เคียงกัน จึงเป็นเวลาการอบคั้นตัวที่เหมาะสม

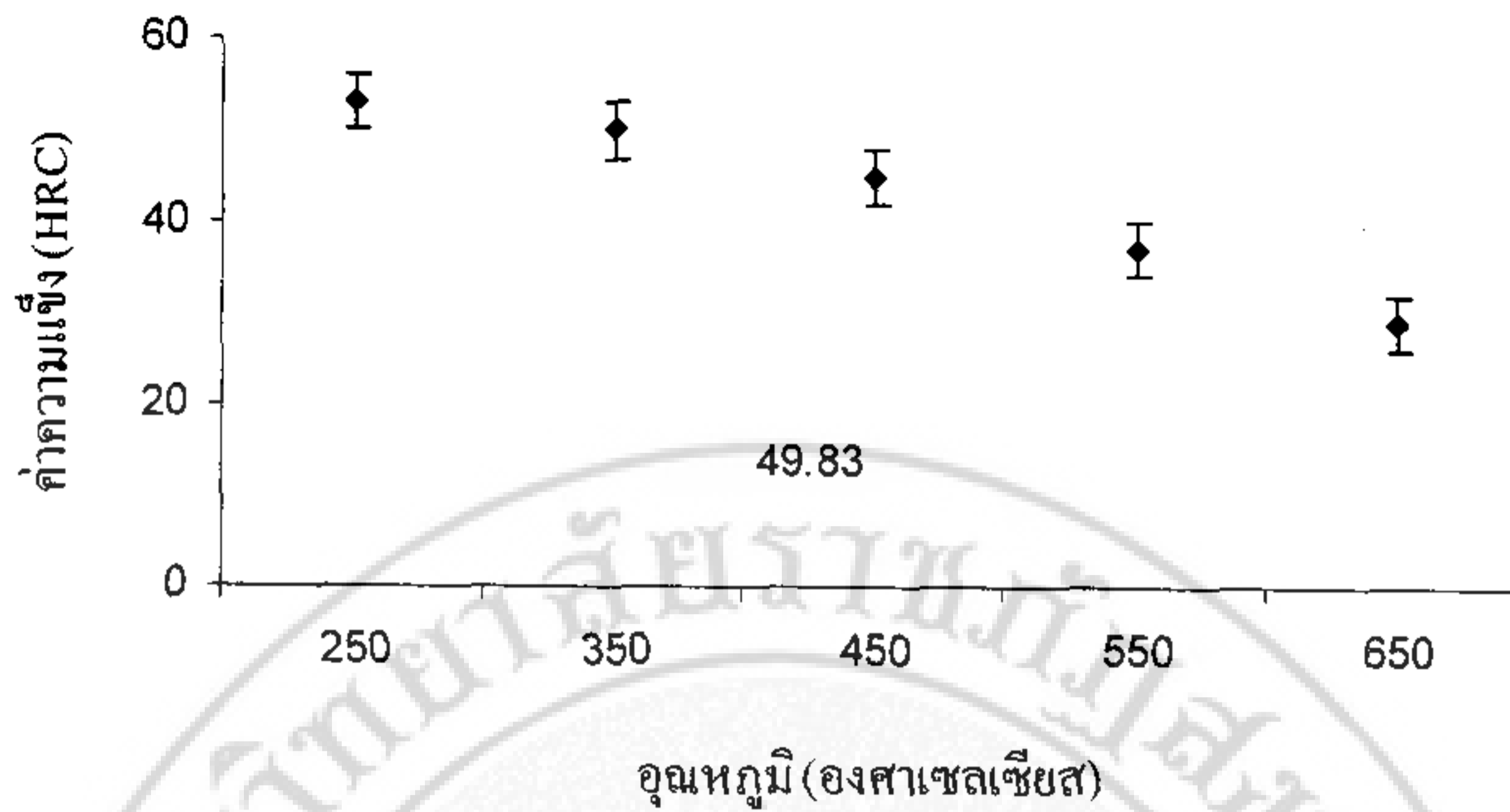




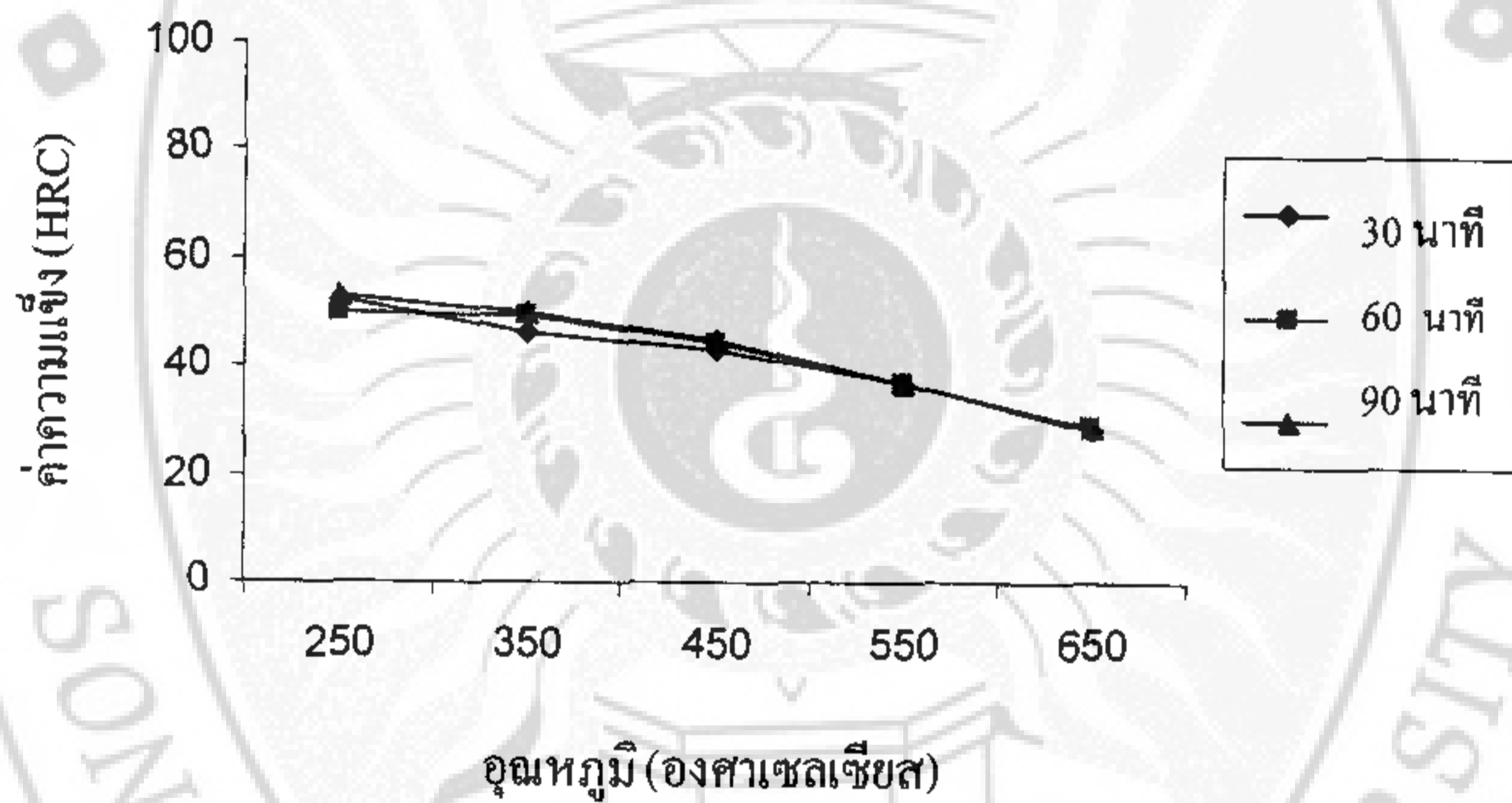
รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบค้อนตัว 30 นาที  
จากรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเมื่ออุณหภูมิในการอบค้อนตัว  
เพิ่มสูงขึ้น



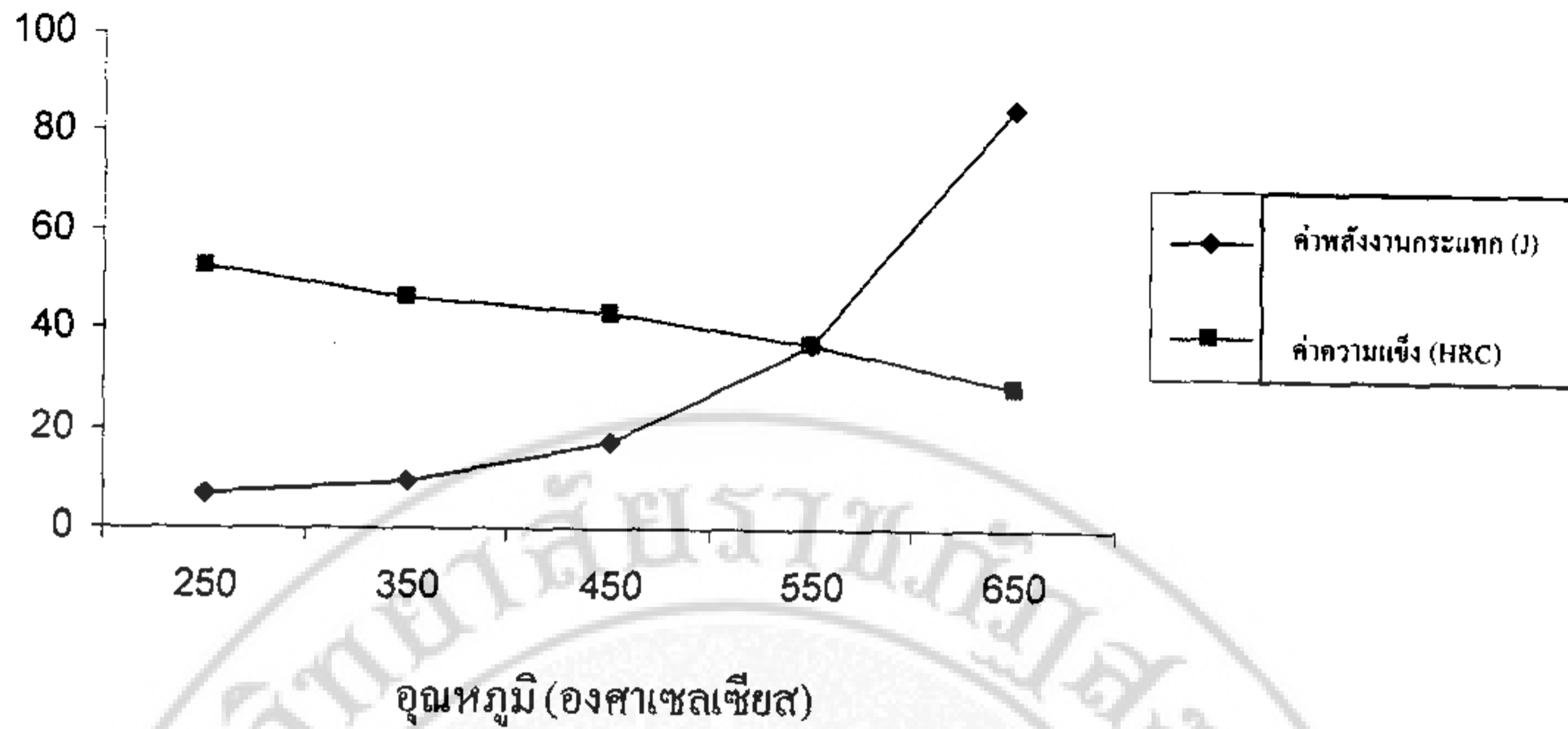
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับค่าอุณหภูมิที่เวลาอบค้อนตัว 60 นาที  
จากรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งจะมีค่าใกล้เคียงกันที่อุณหภูมิที่ 250 – 350 °C และ  
จะมีค่าความแข็งลดลงเรื่อยๆเมื่ออุณหภูมิในการอบค้อนตัวเพิ่มสูงขึ้น



รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับค่าอุณหภูมิที่เวลาออกกำลังกาย 90 นาที  
จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าค่าความแข็งแรงจะมีค่าลดลงเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิในการออกกำลังกาย  
เพิ่มสูงขึ้น

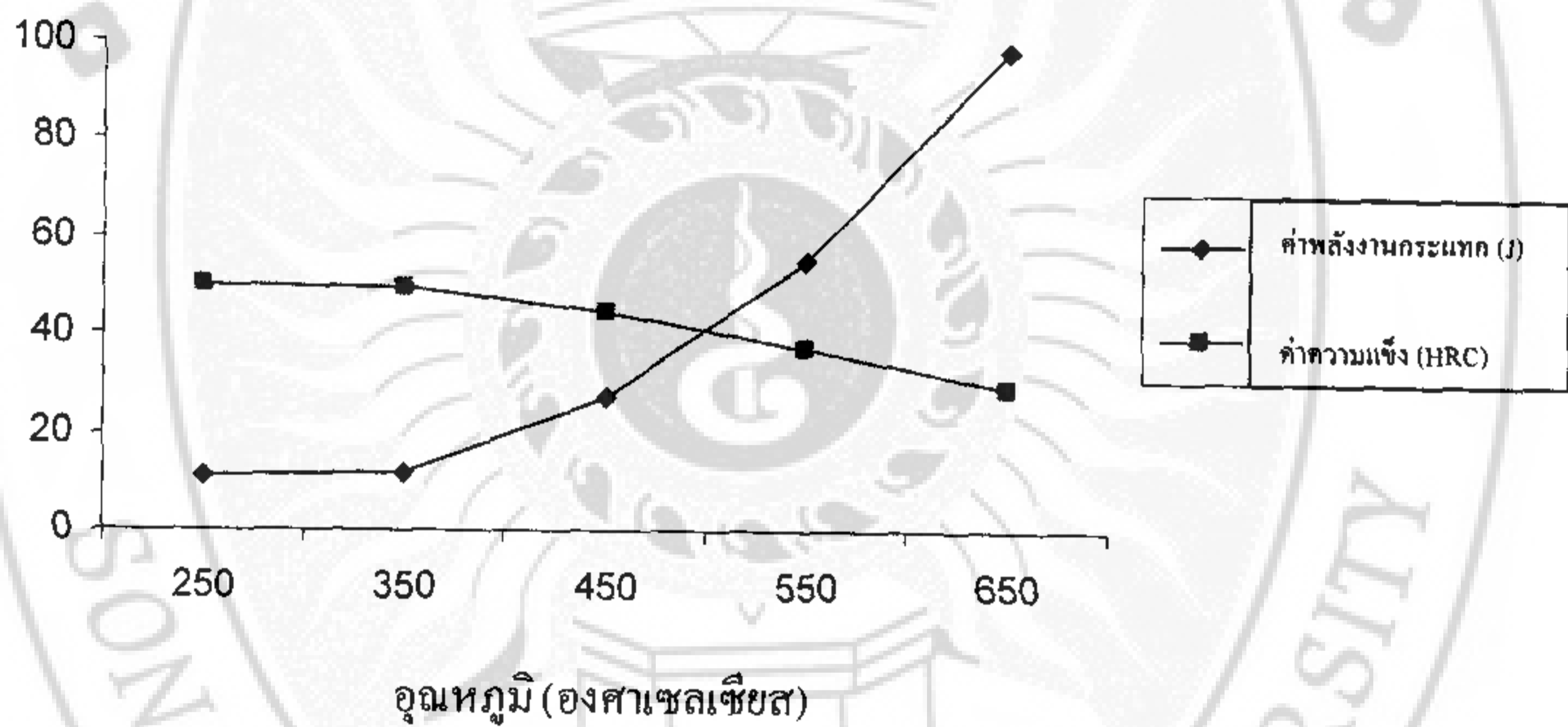


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งแรงกับค่าอุณหภูมิที่เวลาออกกำลังกายต่าง ๆ  
จากรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าค่าความแข็งแรงของแต่ละระยะเวลาการออกกำลังกายจะมีค่าใกล้เคียงกัน  
มาก แต่ระยะเวลาการออกกำลังกายที่เหมาะสมก็คือที่ระยะเวลาการออกกำลังกายที่ 60 นาที



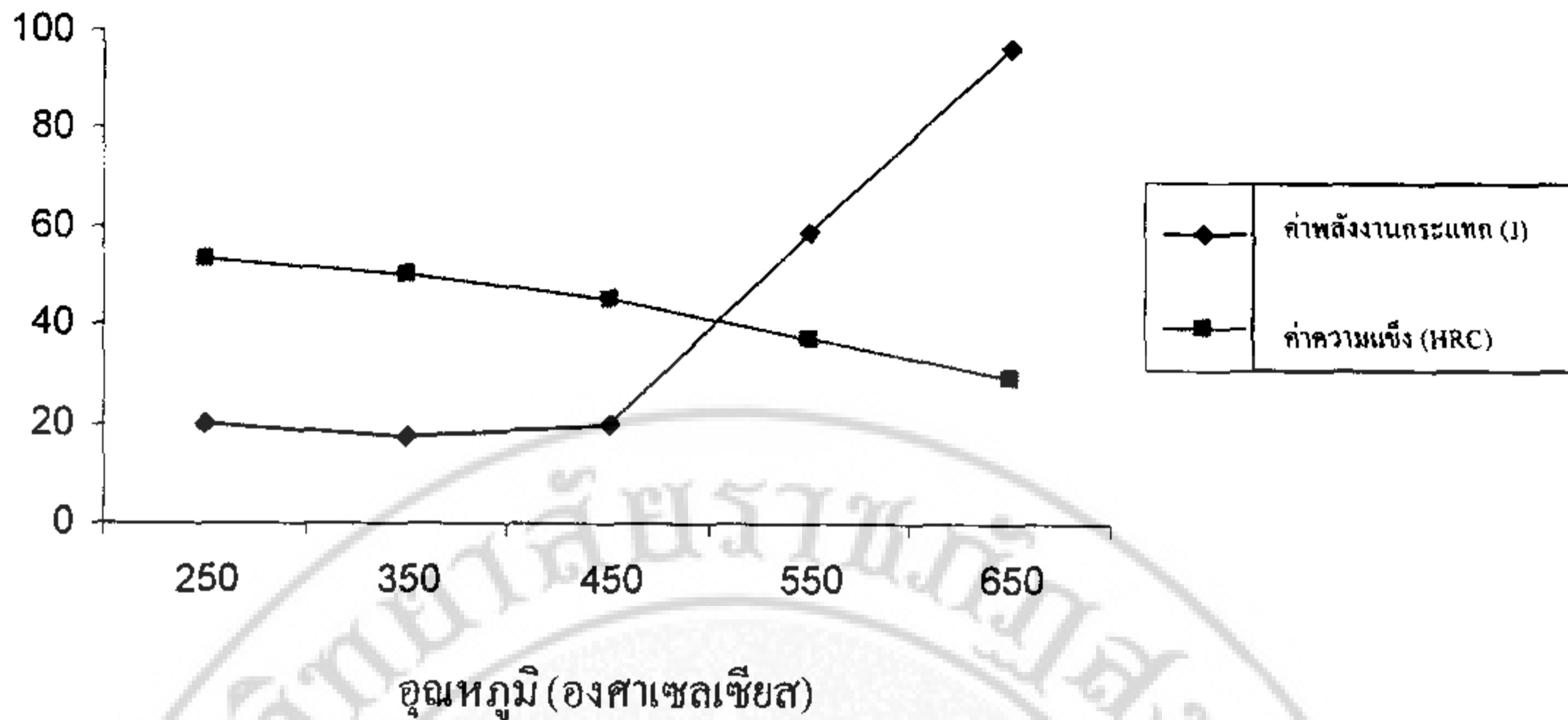
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าพลังงานกระแทก  
กับอุณหภูมิที่เวลาอบคืบตัว 30 นาที

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งจะมีค่า  
ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าพลังงานกระแทก  
กับอุณหภูมิที่เวลาอบคืบตัว 60 นาที

จากรูปที่ 4.12 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งจะมีค่า  
ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งและค่าพลังงานกระแทก  
กับอุณหภูมิตัวที่เวลาอบคั่ว 90 นาที

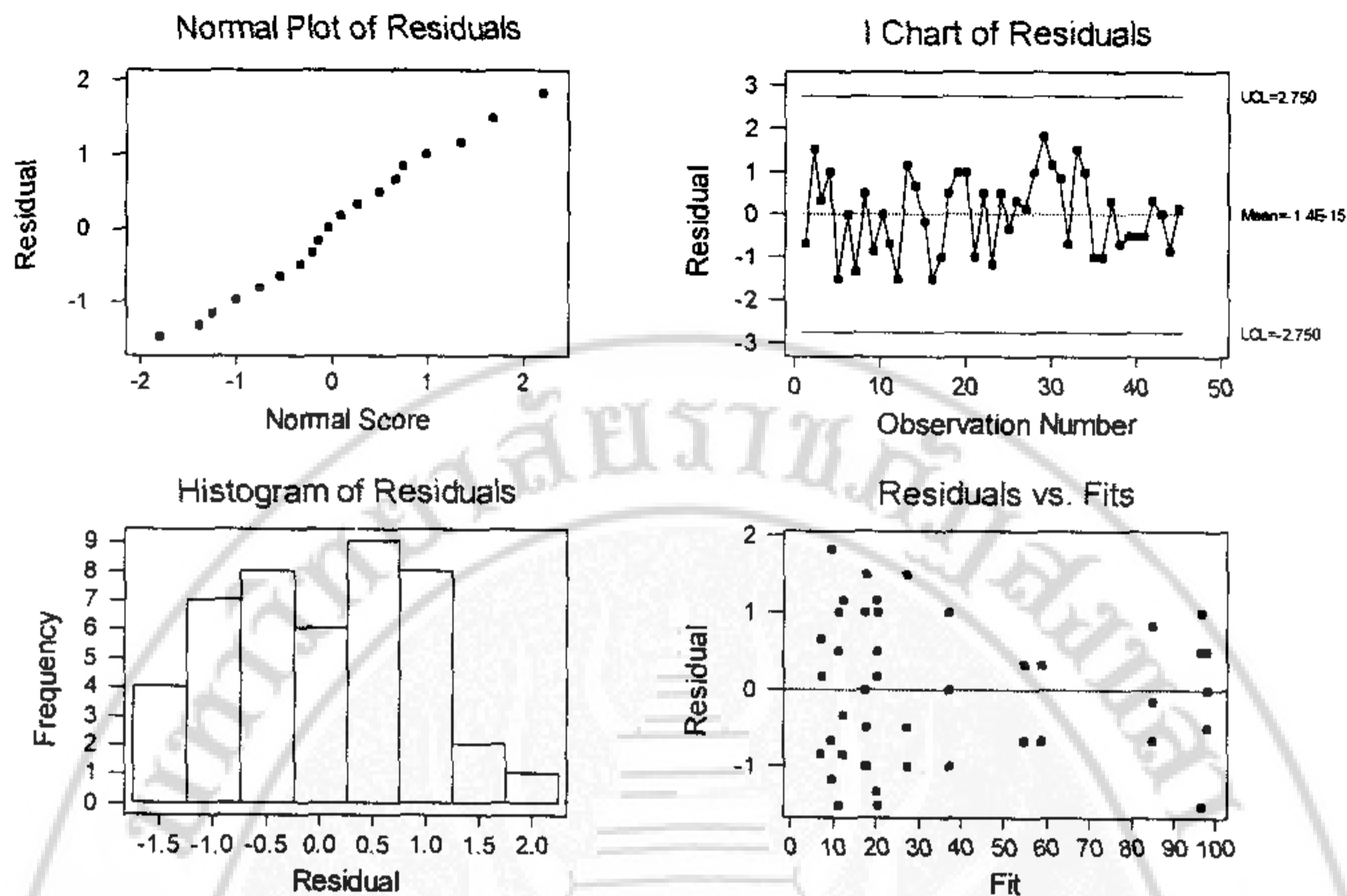
จากรูปที่ 4.13 จะเห็นได้ว่าค่าพลังงานกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าความแข็งจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิตัวสูงขึ้น

#### 4.4 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูล

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

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

## Residual Model Diagnostics



รูปที่ 4.14 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลพลังงานการกระแทก

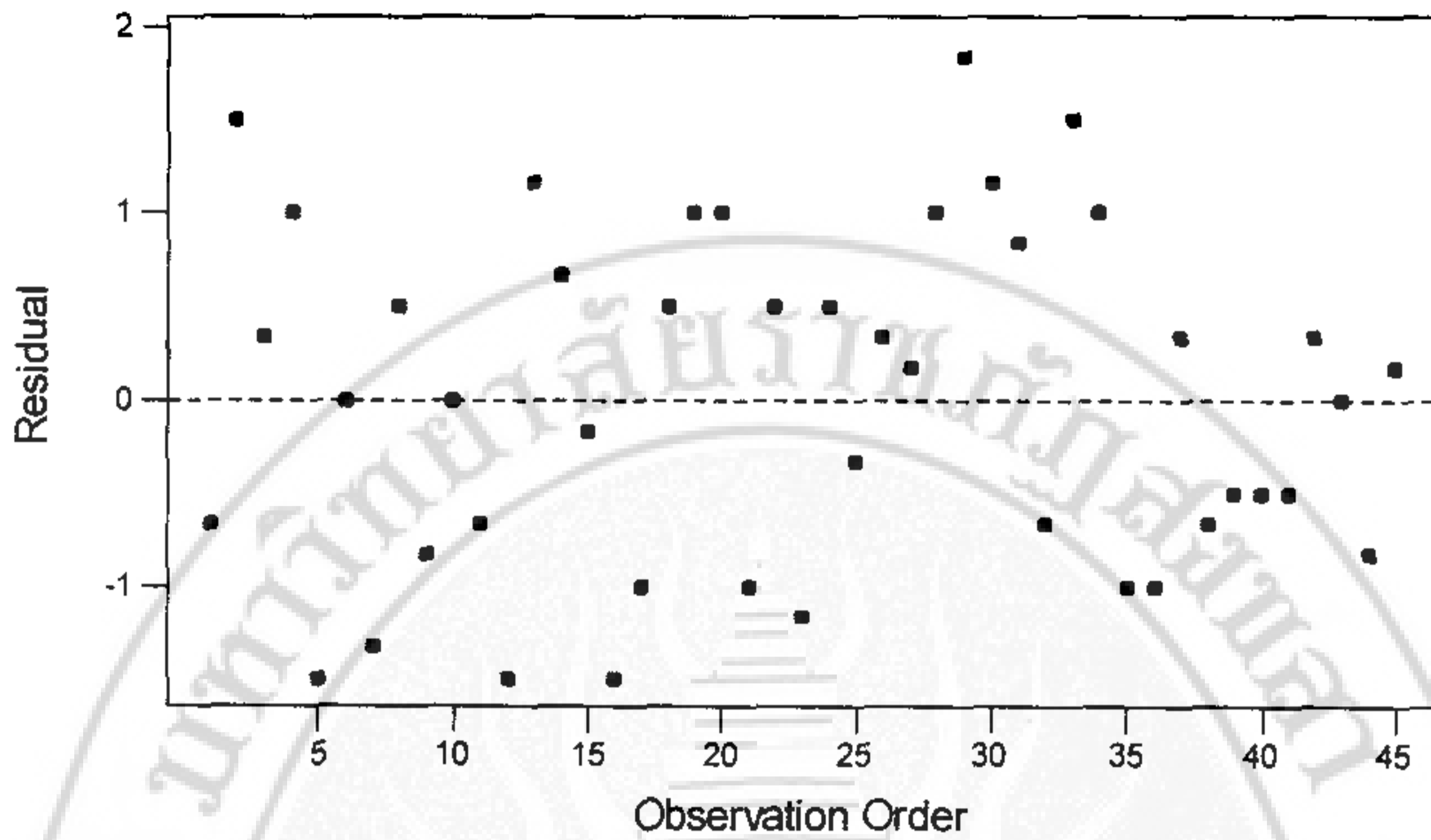
### 4.4.1 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลจากการทดสอบพลังงานการกระแทก

#### 4.4.1.1 การทดสอบความอิสระของข้อมูล (Independent Test)

เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลที่เก็บมานั้นเป็นอิสระต่อกันเนื่องจากความสุ่ม เพื่อให้ข้อมูลมีการกระจายรอบค่าที่ควรจะเป็นเท่า ๆ กัน เนื่องจากผลของปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Balance Out) เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ แผนภาพการกระจาย (Scatter Plot) หรือแผนภูมิควบคุม I (I Chart of Residual) โดยแกน X คือลำดับการทดลองและแกน Y คือค่าเศษเหลือ (Residual) ถ้าข้อมูลที่เก็บมามีความอิสระต่อกันนั้นค่าเศษเหลือ (Residual) ที่นำมาใส่ลงในแผนภาพการกระจายจะต้องกระจายไร้รูปแบบ หรือกรณีแผนภูมิควบคุม I ว่าคุณค่าเศษเหลือ ไม่มีแนวโน้มหรือออกนอกพิสัย (Outlier) ถ้าข้อมูลมีรูปแบบหรือออกนอกพิสัย (Outlier) แสดงว่าข้อมูลที่เก็บมาได้เก็บมาอย่างสุ่ม ทั้งนี้หากข้อมูลไม่สุ่มแล้วจะทำให้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ โดยเฉพาะการหาค่าเฉลี่ยหรือค่าคาดหมายของตัวแปรตอบสนอง ดังนั้นถ้าหากข้อมูลไม่สุ่มแล้วแสดงว่าข้อมูลมีความลำเอียงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

## Residuals Versus the Order of the Data

(response is Impact)



รูปที่ 4.15 แผนภาพทดสอบความอิสระของข้อมูลพลังงานการกระแทก

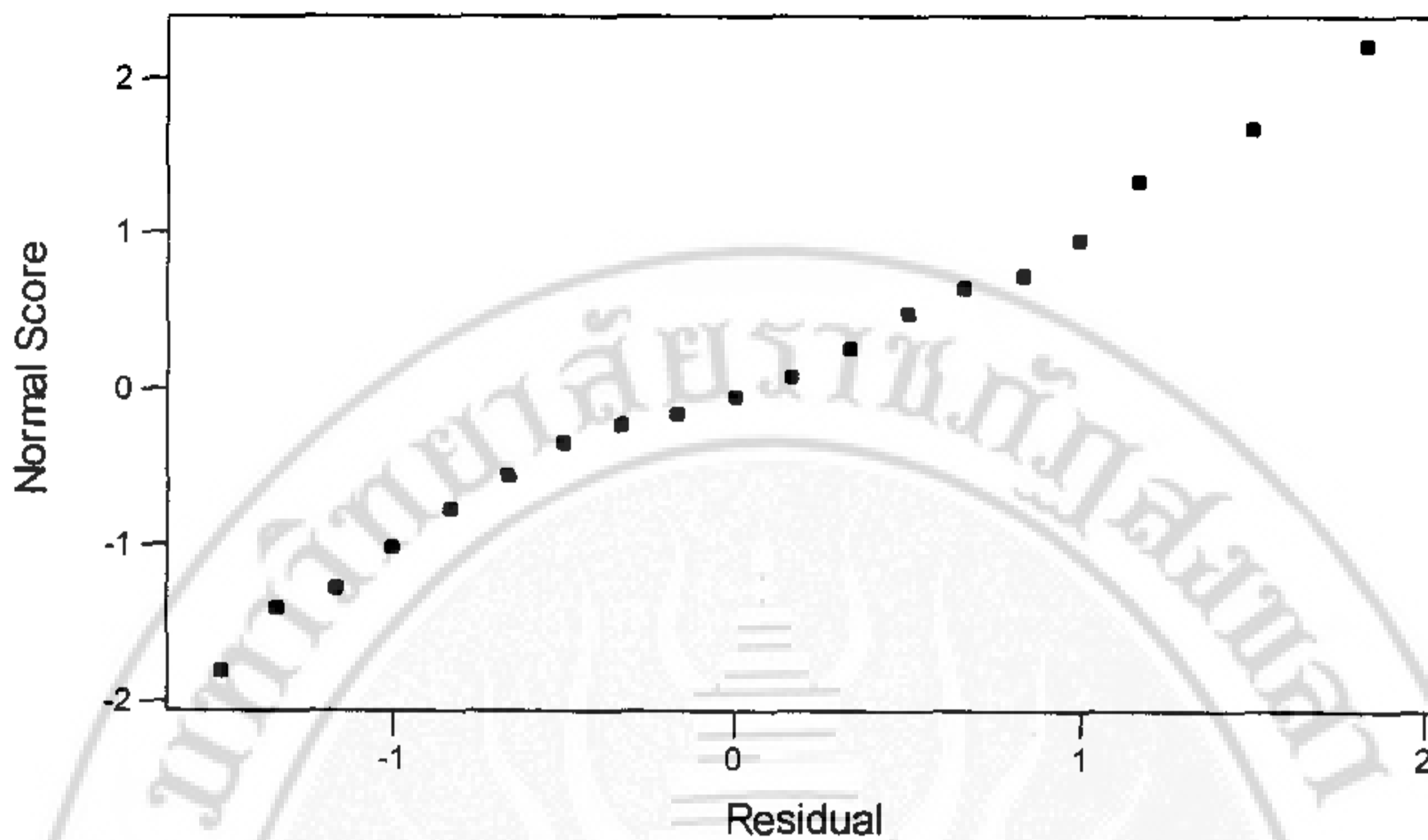
จากรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบความอิสระของข้อมูล จะเห็นได้ว่าแผนภูมิ I ไม่พบจุดใดอยู่นอกแผนภูมิควบคุม และแผนภาพการกระจายข้อมูลกระจายไร้รูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่ามีความอิสระของข้อมูลนั้นก็คือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม

## 4.4.1.3 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test)

เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละตัวที่เป็นตัวแบบสุ่มจะต้องมีแนวโน้มเข้าหาค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าที่ควรจะเป็นเนื่องจากสาเหตุของการเฉลี่ยออก (Average Out) ของสิ่งที่มีได้รับการควบคุม แล้วมีการกระจายรอบค่าดังกล่าวในลักษณะสมมาตร เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่ กระดาษทดสอบความเป็นปกติ (Normal Probability Plot ;NOOP) โดยที่แกน X คือค่าเศษเหลือ (Residual) และแกน Y คือค่าความเป็นปกติมาตรฐาน (Normal Score) ถ้าการแจกแจงของข้อมูลเป็นการแจกแจงแบบปกติกราฟจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ทั้งนี้ถ้าหากข้อมูลมิได้มีรูปแบบปกติแล้วก็จะทำให้ผู้วิเคราะห์ข้อมูลไม่ได้ ดังนั้นถ้าหากข้อมูลมิได้เป็นตัวแปรสุ่มแบบปกติแล้ว แสดงว่าข้อมูลได้มาจากกระบวนการที่มีได้กำหนดเป็นมาตรฐาน จึงจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์

### Normal Probability Plot of the Residuals

(response is Impact)



รูปที่ 4.16 กระดาษทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลพลังงานการกระแทก

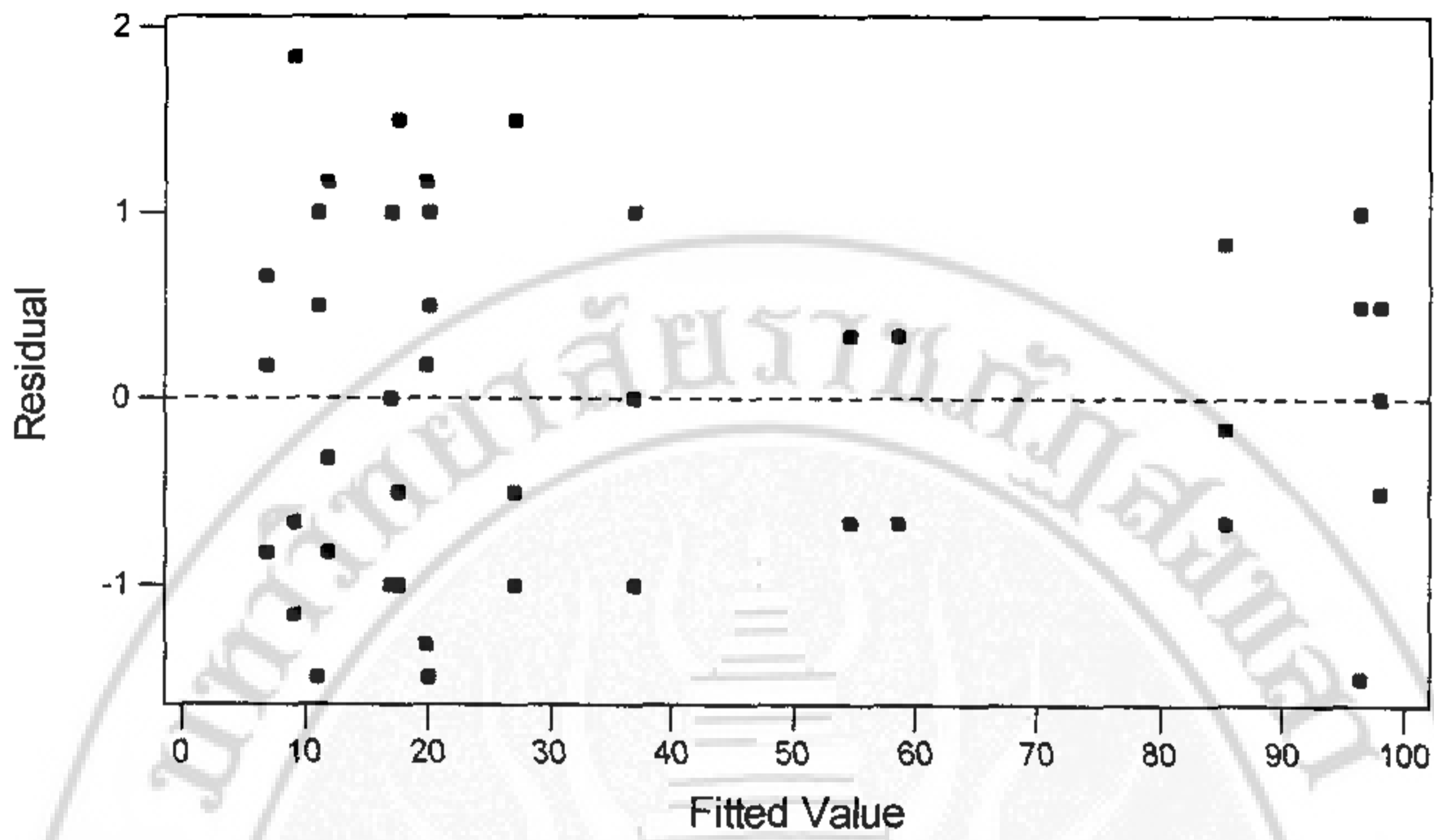
รูปที่ 4.16 เนื่องจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความปกติของข้อมูลที่ได้จากการดำเนินการทดลอง

#### 4.4.1.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

เป็นการตรวจสอบว่าข้อมูลแต่ละทริตเมนต์มีความผันแปรรอบค่าศูนย์หรือไม่ โดยข้อมูลจะต้องได้รับการเก็บมาจากกระบวนการที่ได้มีการจัดทำเป็นมาตรฐานแล้วจึงทำให้ความแตกต่างของข้อมูลเกิดมาจากสาเหตุที่ไม่สามารถควบคุมได้ (Chance Cause) ในระบบที่ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเท่านั้น เครื่องมือในการตรวจสอบคุณสมบัตินี้ได้แก่แผนภาพการกระจาย ดังรูปที่ 4.17 โดยที่แกน X คือ ผลต่างของพลังงานการกระแทก และแกน Y คือ ค่าเศษเหลือ (Residual) ถ้าข้อมูลที่เก็บมามีเสถียรภาพของความแปรปรวนค่าเศษเหลือที่นำมาใส่ลงในแผนภาพการกระจายต้องมีความยาวเท่า ๆ กัน นอกจากนี้สามารถทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน ดังรูปที่ 4.18 โดยพิจารณาจากค่า P-Value เทียบเทียบกับค่าอัลฟา ( $\alpha$ ) ที่ระดับ 0.05 ซึ่งกรณีค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีเสถียรภาพของความแปรปรวน ดังนั้นถ้าหากข้อมูลมีความแปรปรวนที่ไม่เสถียรภาพแล้ว แสดงว่าข้อมูลเกิดจากสาเหตุที่สามารถควบคุมได้ แต่ไม่ได้รับการควบคุม (Assignable Cause) จึงมีความจำเป็นต้องค้นหาสาเหตุเพื่อการแก้ไขก่อนการวิเคราะห์ต่อไป

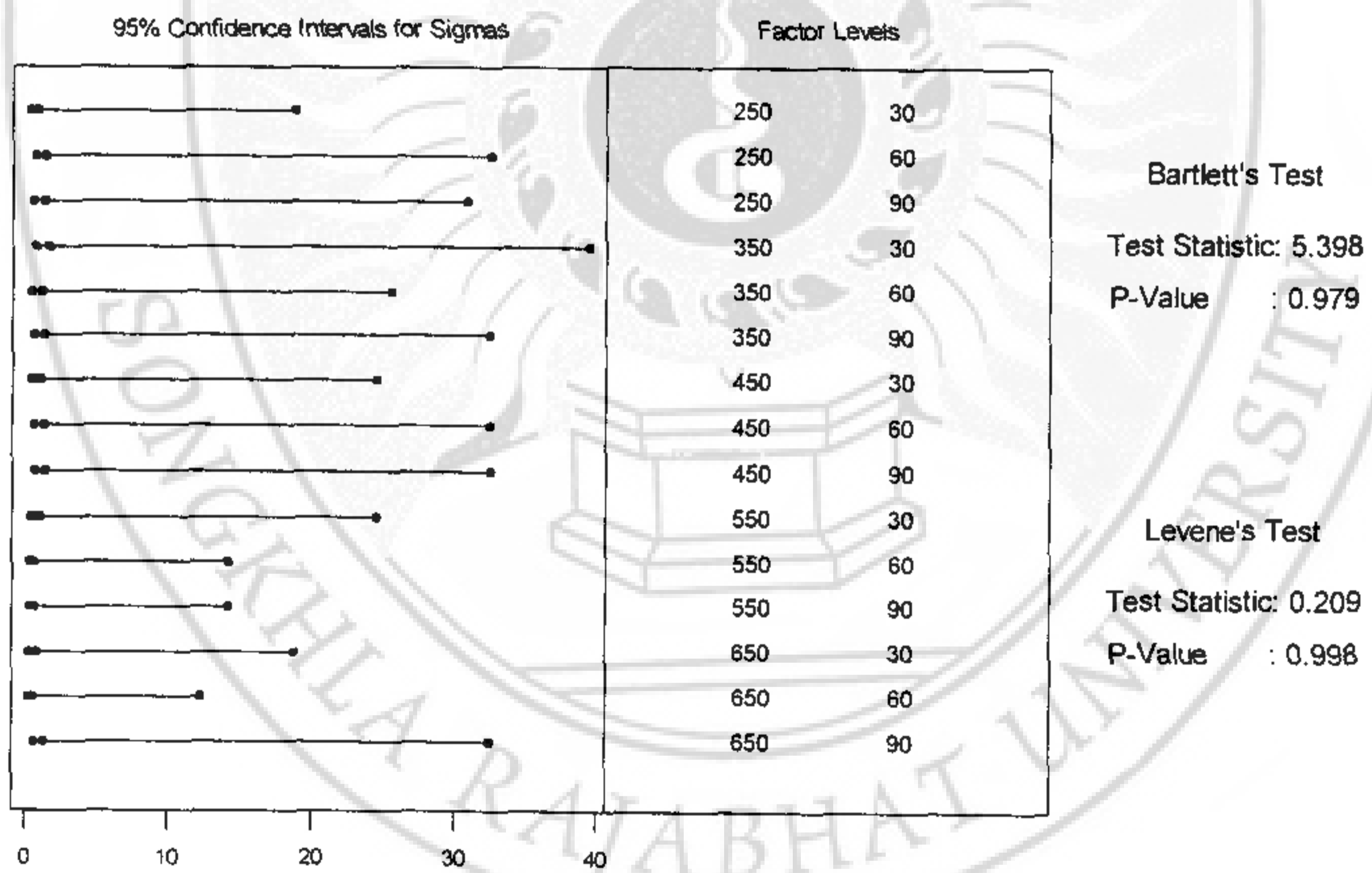
### Residuals Versus the Fitted Values

(response is Impact)



รูปที่ 4.17 แผนภาพทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูลพลังงานการกระแทก

### Test for Equal Variances for Impact



รูปที่ 4.18 การเปรียบเทียบความแปรปรวนของพลังงานการกระแทก



จากรูป 4.18 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.979 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 ดังนั้น ข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวน ตามที่ได้ออกแบบไว้

จากการประเมินคุณสมบัติทั้ง 3 ประการของข้อมูลจากการทดสอบ พลังงานการกระแทกสามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีคุณสมบัติทั้ง 3 ประการ นั่นก็คือ มีความอิสระของข้อมูล มีความเป็นปกติของข้อมูล และมีความเสถียรภาพของข้อมูล

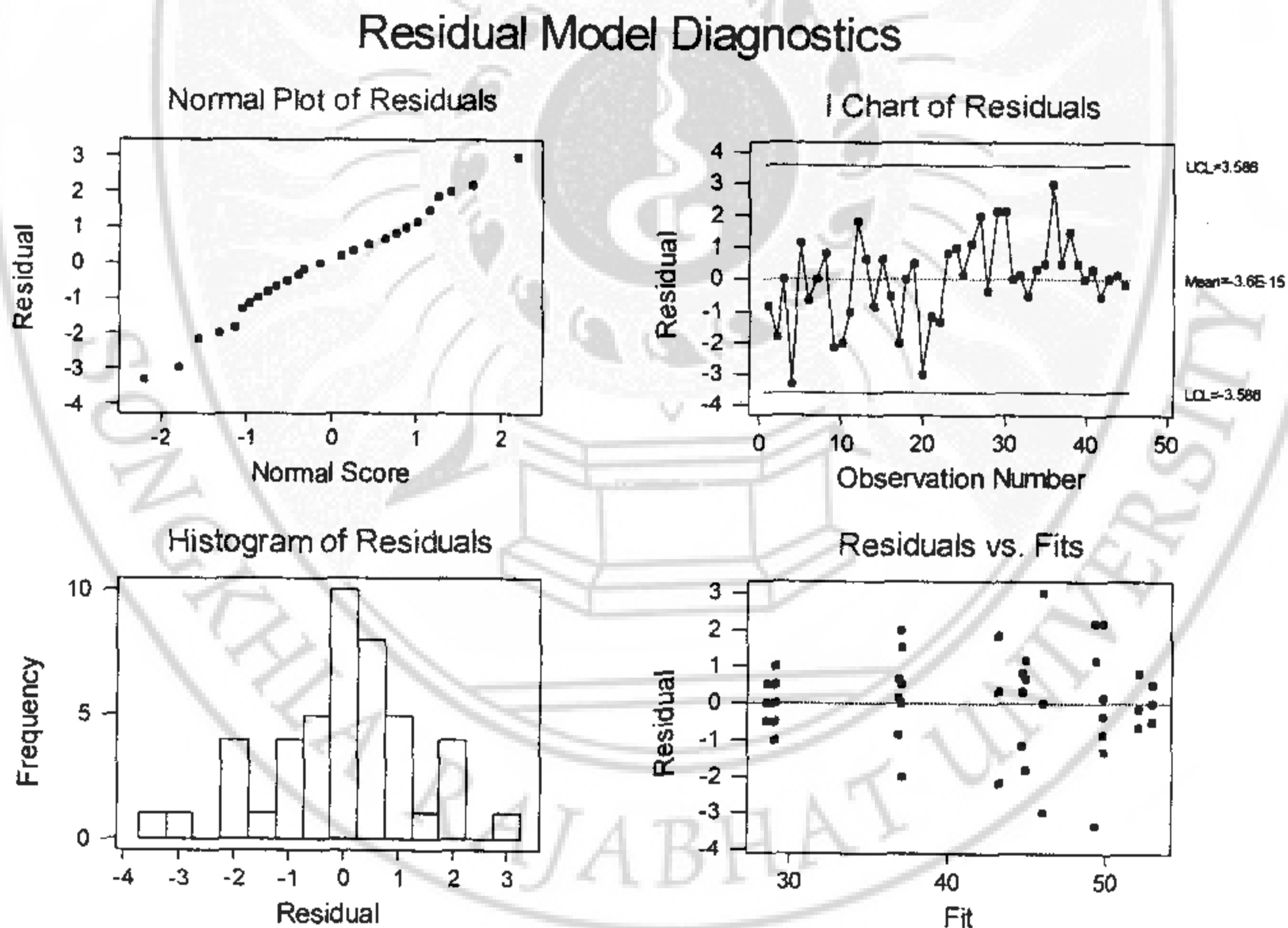
#### 4.4.2 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลจากการทดสอบความแข็ง

##### 4.4.2.1 การทดสอบความอิสระของข้อมูล (Independent Test)

จากรูปที่ 4.19 และรูปที่ 4.20 แสดงให้เห็นถึงการทดสอบความอิสระของข้อมูล จะเห็นได้ว่าแผนภูมิ I ไม่พบจุดใดอยู่นอกแผนภูมิควบคุม และแผนภาพการกระจายข้อมูลกระจายไร้รูปแบบ ดังนั้นสรุปได้ว่ามีความอิสระของข้อมูล นั่นก็คือข้อมูลเก็บมาอย่างสุ่ม

##### 4.4.2.2 การทดสอบความเป็นปกติของข้อมูล (Normality Test)

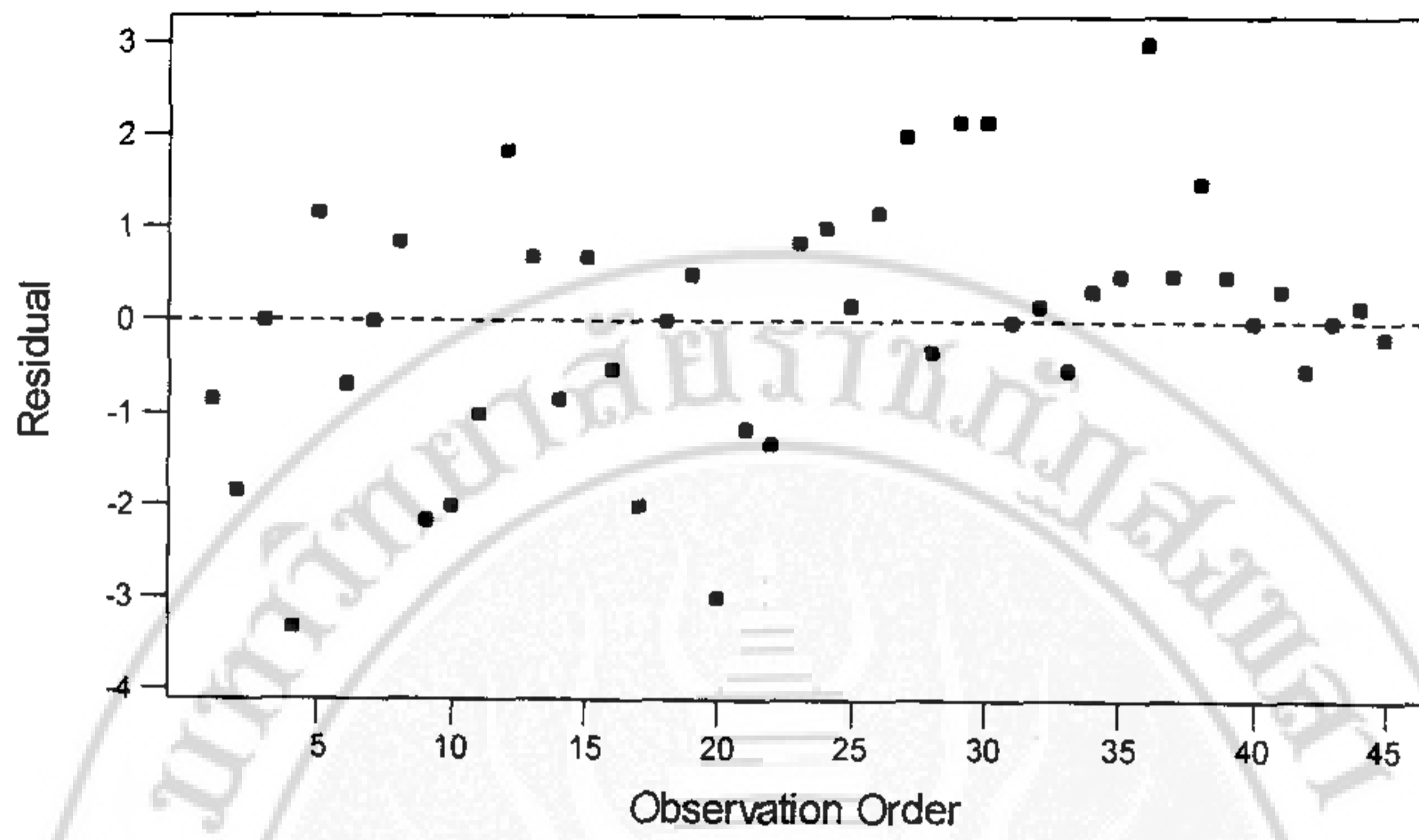
จากรูปที่ 4.21 เนื่องจากกราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความปกติของข้อมูลที่ได้จากการดำเนินการทดลอง



รูปที่ 4.19 การตรวจสอบคุณภาพของข้อมูลความแข็ง

## Residuals Versus the Order of the Data

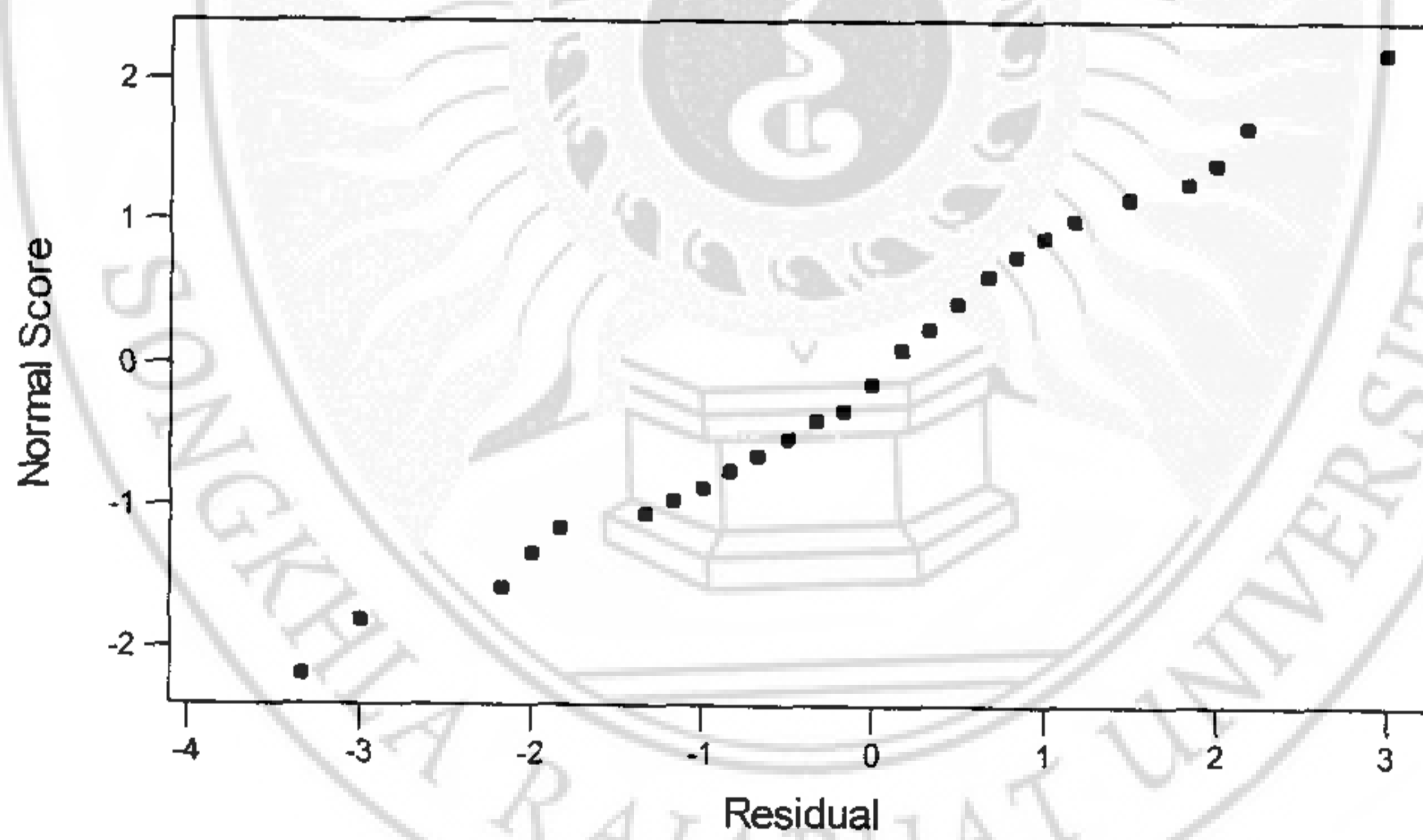
(response is Hardness)



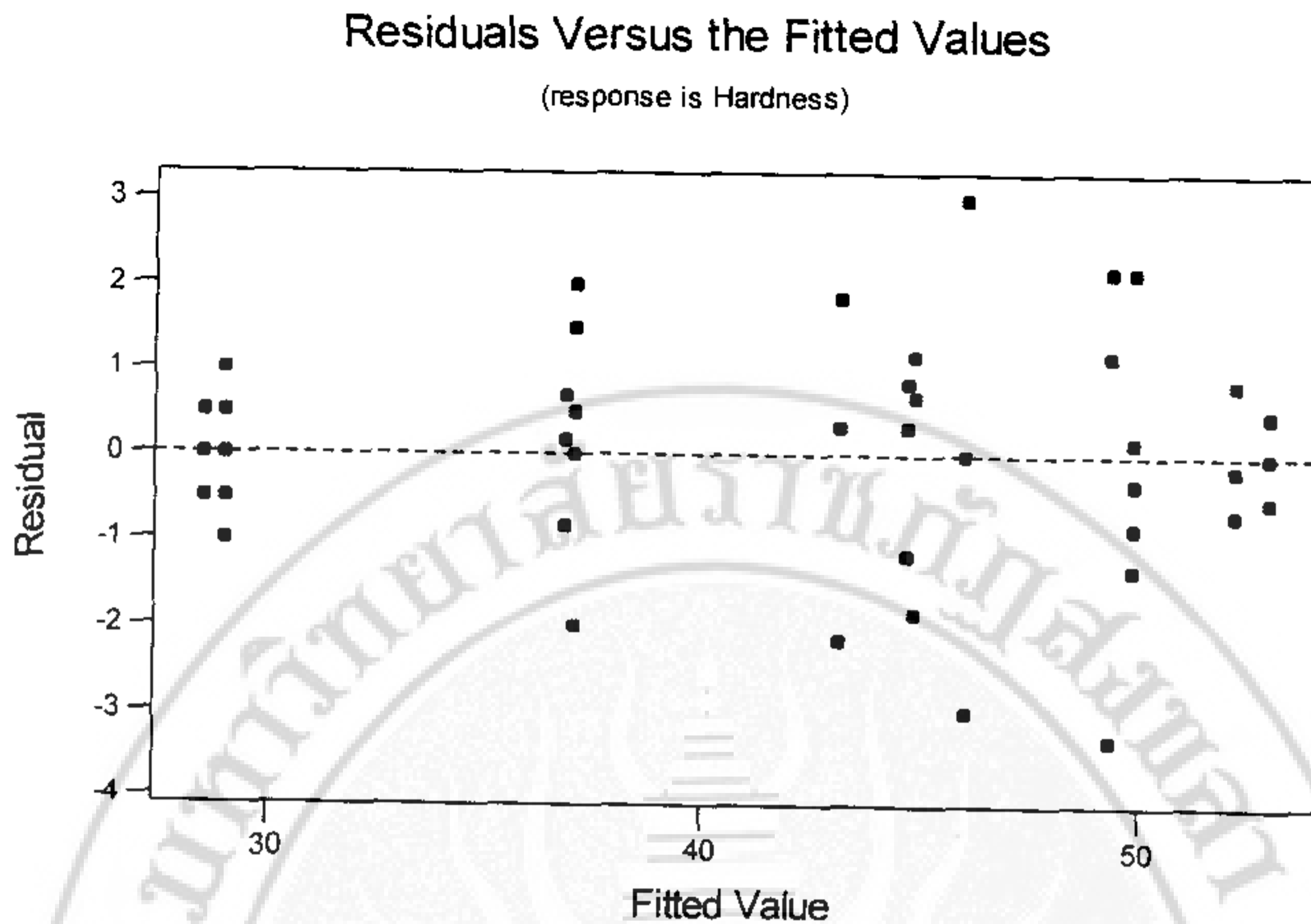
รูปที่ 4.20 แผนภาพทดสอบความอิสระของข้อมูลความแข็ง

## Normal Probability Plot of the Residuals

(response is Hardness)



รูปที่ 4.21 กระดาษทดสอบความเป็นปกติของข้อมูลความแข็ง



รูปที่ 4.22 แผนภาพทดสอบความมีเสถียรภาพของข้อมูลความแข็ง

#### 4.3.2.3 การทดสอบความมีเสถียรภาพของความแปรปรวน (Variance Stability)

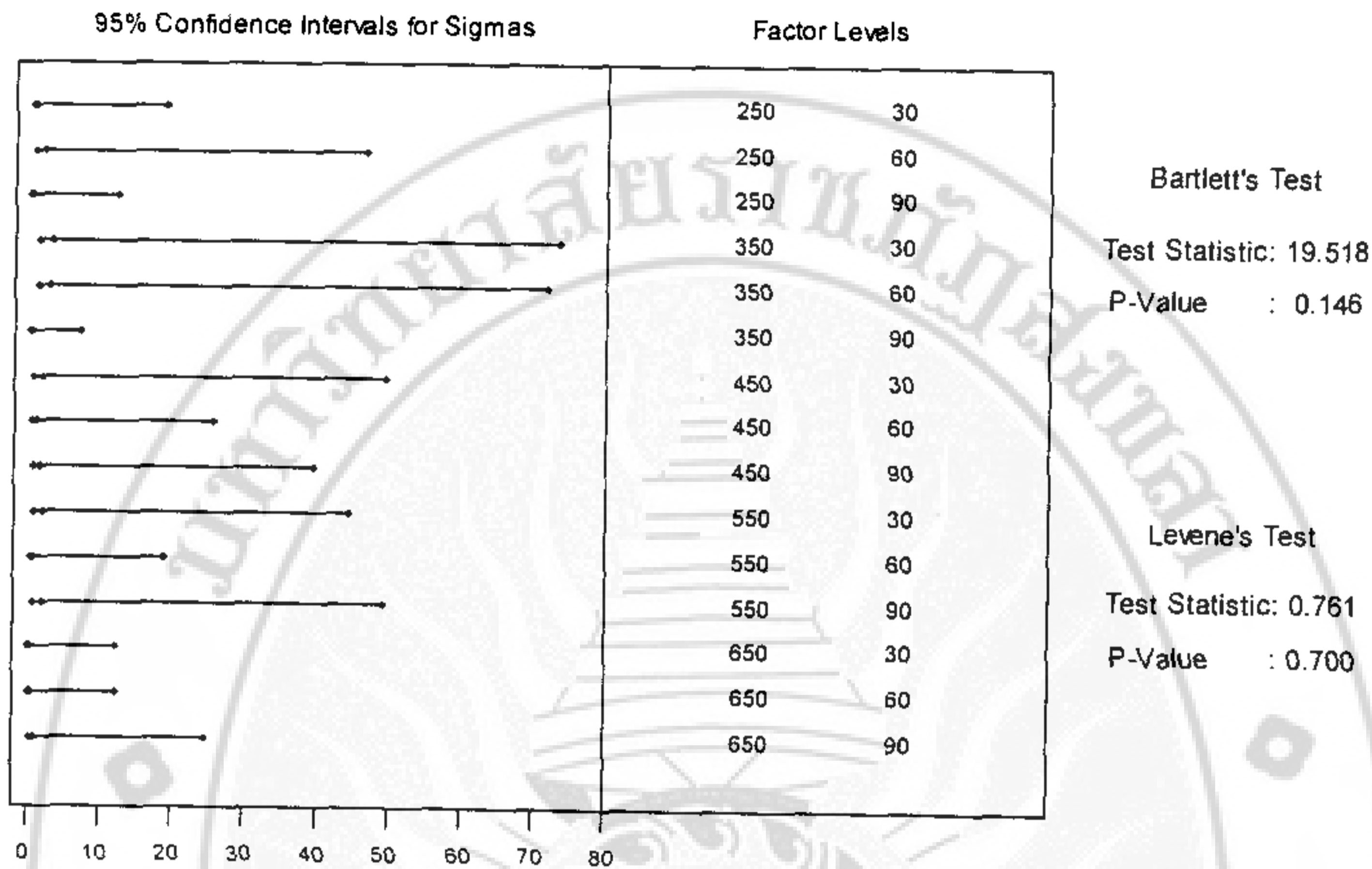
จากรูปที่ 4.22 และรูปที่ 4.23 ค่า P-Value มีค่าเท่ากับ 0.146 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีความเสถียรภาพของความแปรปรวนตามที่ได้ออกแบบไว้

#### 4.5 การวิเคราะห์ผลการทดลอง (Experiment Analysis)

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

วิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน แล้วทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อพลังงานการกระแทก ค่าความแข็ง และค่าแรงดึง เพื่อนำไปสู่การสร้างความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ต่อไป

### Test for Equal Variances for Hardness



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบความแปรปรวนของค่าความแข็ง

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

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

แต่เพื่อป้องกันความผิดพลาดในการตีความหมาย  $R^2$  จึงต้องใช้ตัวสถิติอีกตัวในการประเมินเรียกว่า  $R^2$  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 ดัชนีที่แสดงถึงจำนวนเทอมในตัวแบบถดถอย

#### 4.5.1 การวิเคราะห์ผลการทดลองของการทดสอบแรงกระแทก

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

จากการทดลองพลังงานการกระแทกตามที่ได้ออกแบบไว้ได้ผลว่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 82.1% และค่า Adjust  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 81.2% ซึ่งมีความหมายว่าถ้าหากความผันแปรในข้อมูลมีค่า 100 (มม.<sup>2</sup>) แล้วความผันแปร 82.1 (มม.<sup>2</sup>) สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุด้านรีพิทะบิลิตี้

ดังนั้นจะได้ว่าความผันแปรของข้อมูลพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว ส่วนใหญ่อธิบายได้ด้วยอุณหภูมิ เวลาในการอบคืนตัวดีแล้ว แสดงว่าการออกแบบการทดลองนี้ถูกต้องและมีความเหมาะสม 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

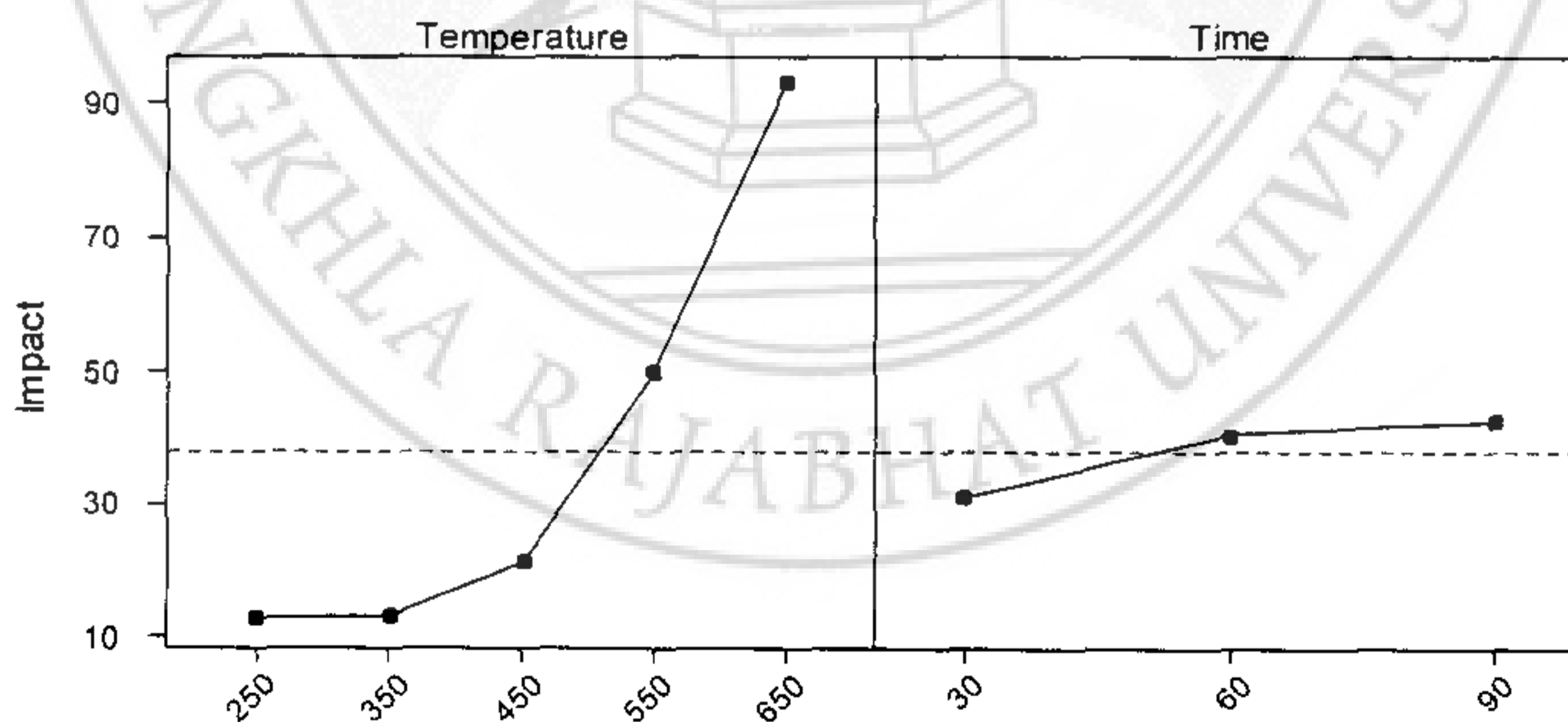
Temperat	Mean	SE Mean
250	12.556	0.3660
350	12.833	0.3660

ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว (ต่อ)

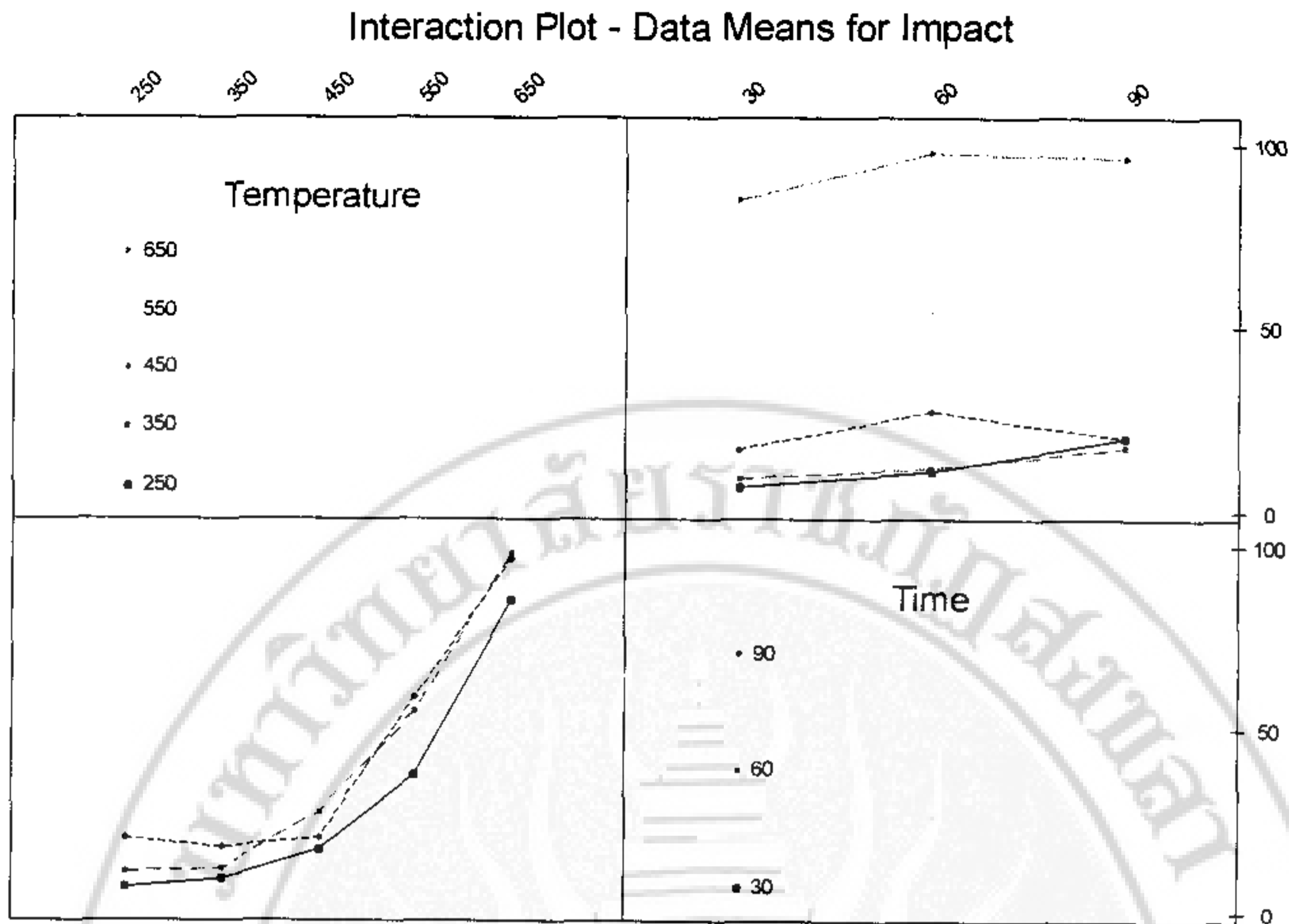
450		21.333	0.3660
550		50.111	0.3660
650		93.222	0.3660
Time			
30		31.033	0.2835
60		40.500	0.2835
90		42.500	0.2835
Temperat*Time			
250	30	6.833	0.6339
250	60	11.000	0.6339
250	90	19.833	0.6339
350	30	9.167	0.6339
350	60	11.833	0.6339
350	90	17.500	0.6339
450	30	17.000	0.6339
450	60	27.000	0.6339
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 พบว่ามีค่าน้อยกว่า 0.05 ซึ่งเป็นค่าของความเสี่ยงในการไม่ยอมรับสมมติฐานทั้งที่สมมติฐานเป็นจริง ( $\alpha$ ) แสดงว่าค่า F-Value มีค่ามาก ดังนั้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิและเวลาในการอบคืนตัว มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (Significant) จึงทำการปฏิเสธสมมติฐาน ดังนั้นอุณหภูมิและเวลาในการอบคืนตัวมีผลต่อค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว

Main Effects Plot - Data Means for Impact



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว

จากรูปที่ 4.24 และรูปที่ 4.25 จะได้ว่าค่าพลังงานการกระแทกจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระดับอุณหภูมิสูงขึ้น เนื่องจากค่าพลังงานการกระแทกที่มาก ๆ เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นควรเลือกค่าพลังงานการกระแทกที่มาก ๆ จึงควรเลือกอบคืนตัวที่เวลา 90 นาที และควรควบคุมระดับอุณหภูมิในช่วง  $550^{\circ}\text{C} - 650^{\circ}\text{C}$  ให้มาก ๆ เนื่องจากเป็นเวลาที่มีผลต่อความไวของอุณหภูมิ น้อย ๆ (Robust) และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการทดลองด้วย

#### 4.5.1.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

นอกจากนี้สามารถนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์การถดถอยได้ดังแสดงใน ตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว

#### 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%

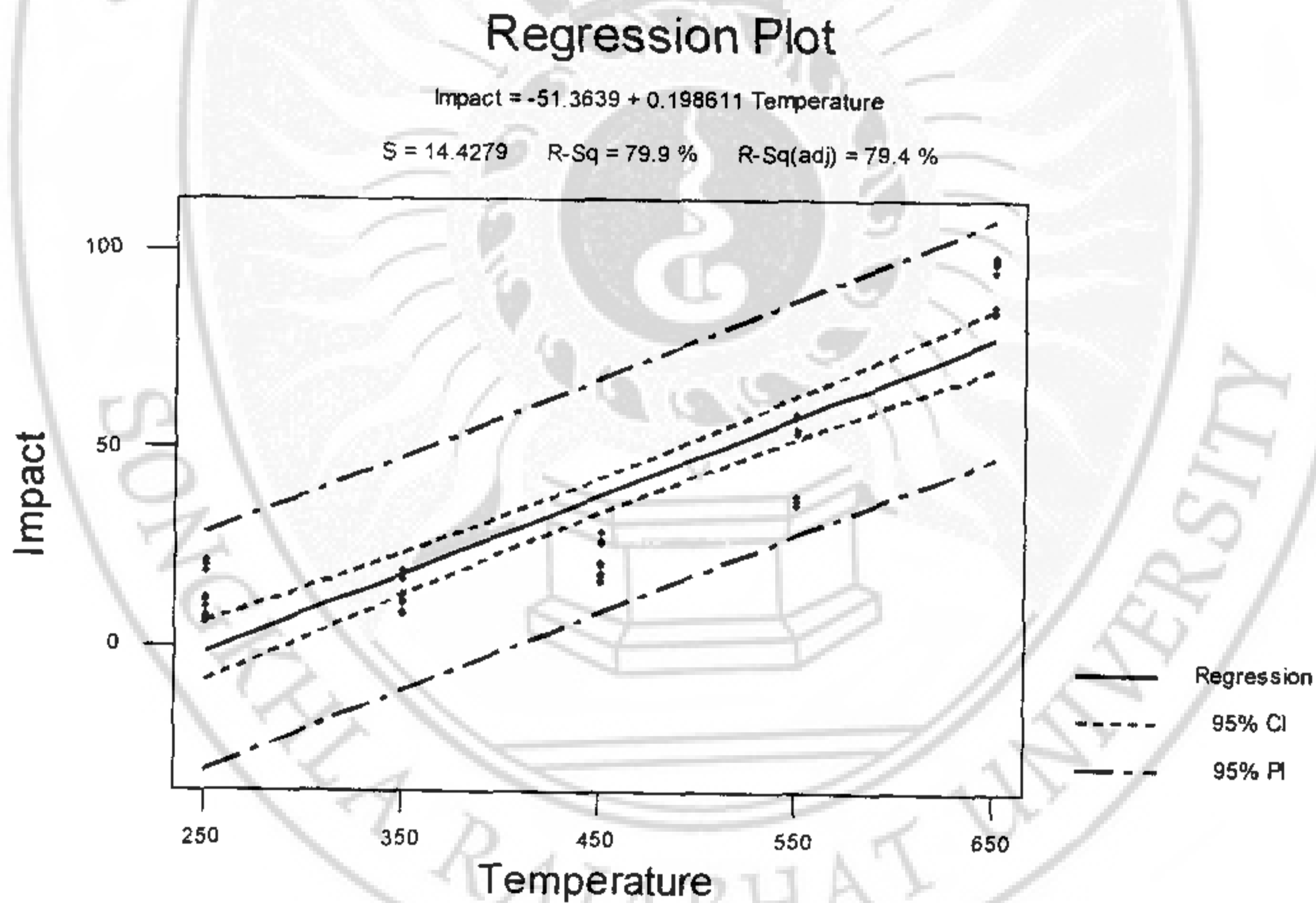
ตารางที่ 4.9 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าพลังงานการกระแทกจากการอบคืนตัว (ต่อ)

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 จูล<sup>2</sup> อธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงของอุณหภูมิกับเวลาเท่ากับ 82.1% โดยปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้มาจากแหล่งความผันแปรใด แสดงว่าข้อมูลมีสารสนเทศในการวิเคราะห์ และ R-Sq. (adj) มีค่าใกล้เคียงกับ R-Sq. แสดงว่าจำนวนข้อมูลมีความเหมาะสม แต่ค่า P-Value ของการทดสอบ Lack of Fit มีค่าต่ำ และค่า F มีค่ามากแสดงว่าความสมรูปของตัวแบบกับข้อมูลไม่มีความเหมาะสม ดังนั้นไม่สามารถทำการตีความจากสมการการถดถอยได้



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 (มม.<sup>2</sup>) แล้วความผันแปร 93.1 (มม.<sup>2</sup>) สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแบบถดถอย ส่วนปริมาณที่เหลือไม่สามารถอธิบายได้เนื่องจากสาเหตุด้านรีพิทะบิลิตี้

ดังนั้นจะได้ว่าความผันแปรของข้อมูลค่าความแข็งจากการอบคืนตัวส่วนใหญ่สามารถอธิบายได้ด้วยอุณหภูมิ เวลาในการอบคืนตัวดีแล้ว 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

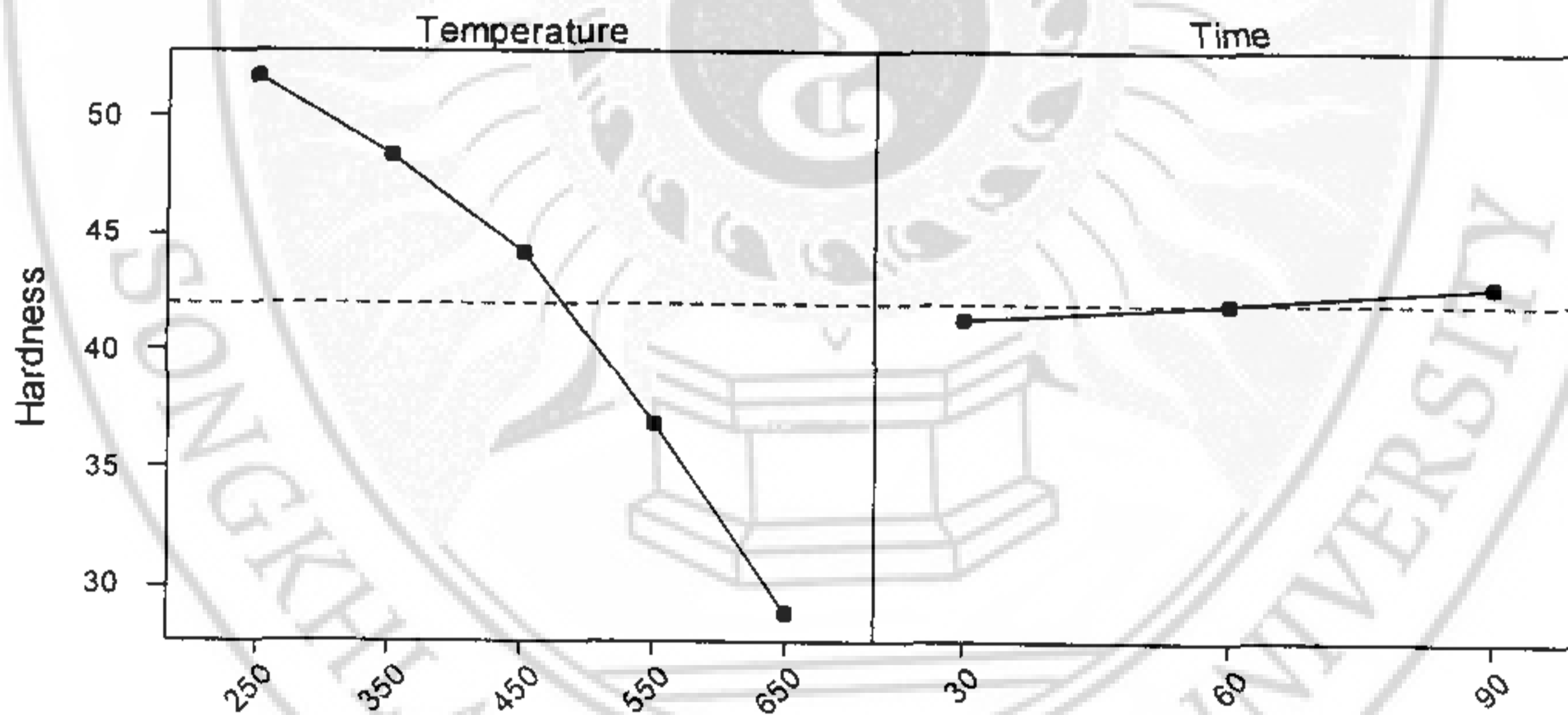
Temperat	Mean	SE Mean
250	51.67	0.5386
350	48.39	0.5386
450	44.22	0.5386
550	36.94	0.5386
650	28.83	0.5386
Time	Mean	SE Mean
30	41.37	0.4172
60	41.93	0.4172
90	42.73	0.4172
Temperat*Time	Mean	SE Mean
250 30	52.17	0.9329
250 60	49.83	0.9329
250 90	53.00	0.9329

ตารางที่ 4.10 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าความแข็งจากการอบคืนตัว (ต่อ)

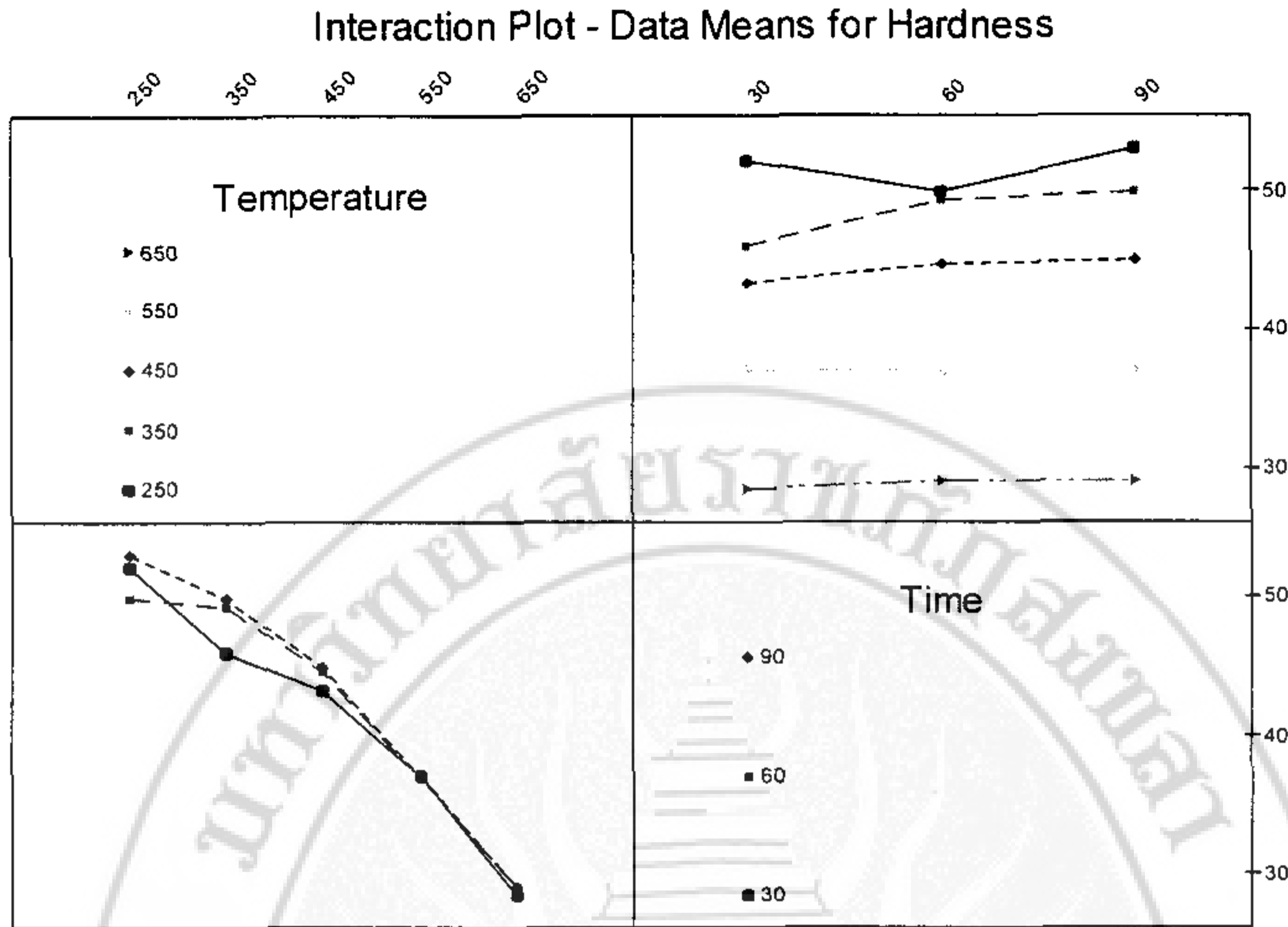
350	30	46.00	0.9329
350	60	49.33	0.9329
350	90	49.83	0.9329
450	30	43.17	0.9329
450	60	44.67	0.9329
450	90	44.83	0.9329
550	30	37.00	0.9329
550	60	36.83	0.9329
550	90	37.00	0.9329
650	30	28.50	0.9329
650	60	29.00	0.9329
650	90	29.00	0.9329

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

Main Effects Plot - Data Means for Hardness



รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักของค่าความแข็งจากการอบคืนตัว



รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลร่วมของค่าความแข็งจากการอบคืนตัว

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

หลังจากวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) แล้วจะเห็นได้ว่าอิทธิพลหลักของอุณหภูมิในการอบคืนตัวมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งส่วนอิทธิพลอื่นไม่มีผลกระทบต่อค่าความแข็ง ดังนั้นจึงเพิ่มองศาความอิสระ (Degree of Freedom; DF) กับรีพีทเทเบิลิตีด้วยการรวมอิทธิพลร่วมให้กับรีพีทเทเบิลิตีโดยการลดรูป (Reduce Model) ดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยการลดรูปของค่าความแข็งจากการอบคืนตัว  
**General Linear Model: Hardness versus Temperature**

Factor	Type	Levels	Values
Temperat	fixed	5	250 350 450 550 650

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	241.20	0.000
Error	40	126.17	126.17	3.15		
Total	44	3169.24				

#### ตารางที่ 4.11 การวิเคราะห์ความแปรปรวนโดยการลดรูปของค่าความแข็งจากการอบคืนตัว (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 เหมาะที่จะนำไปใช้งาน ดังนั้นควรเลือกค่าความแข็งที่มาก ๆ จึงควรเลือกอบคืนตัวที่เวลา 90 นาทีและควบคุมอุณหภูมิในช่วง  $250^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$  ให้มาก ๆ เนื่องจากเป็นเวลาที่มีผลต่อความไวของอุณหภูมิน้อย ๆ (Robust) และเพื่อเป็นการลดต้นทุนในการทดลองด้วย

#### 4.5.1.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

หลังจากทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนแล้ว นอกจากนี้สามารถนำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์การถดถอยได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

#### ตารางที่ 4.12 การวิเคราะห์การถดถอยของค่าความแข็งจากการอบคืนตัว

##### 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
Temperat	-0.057111	0.002411	-23.69	0.000
Time	0.02278	0.01392	1.64	0.109

S = 2.287

R-Sq = 93.1%

R-Sq(adj) = 92.7%

##### Analysis of Variance

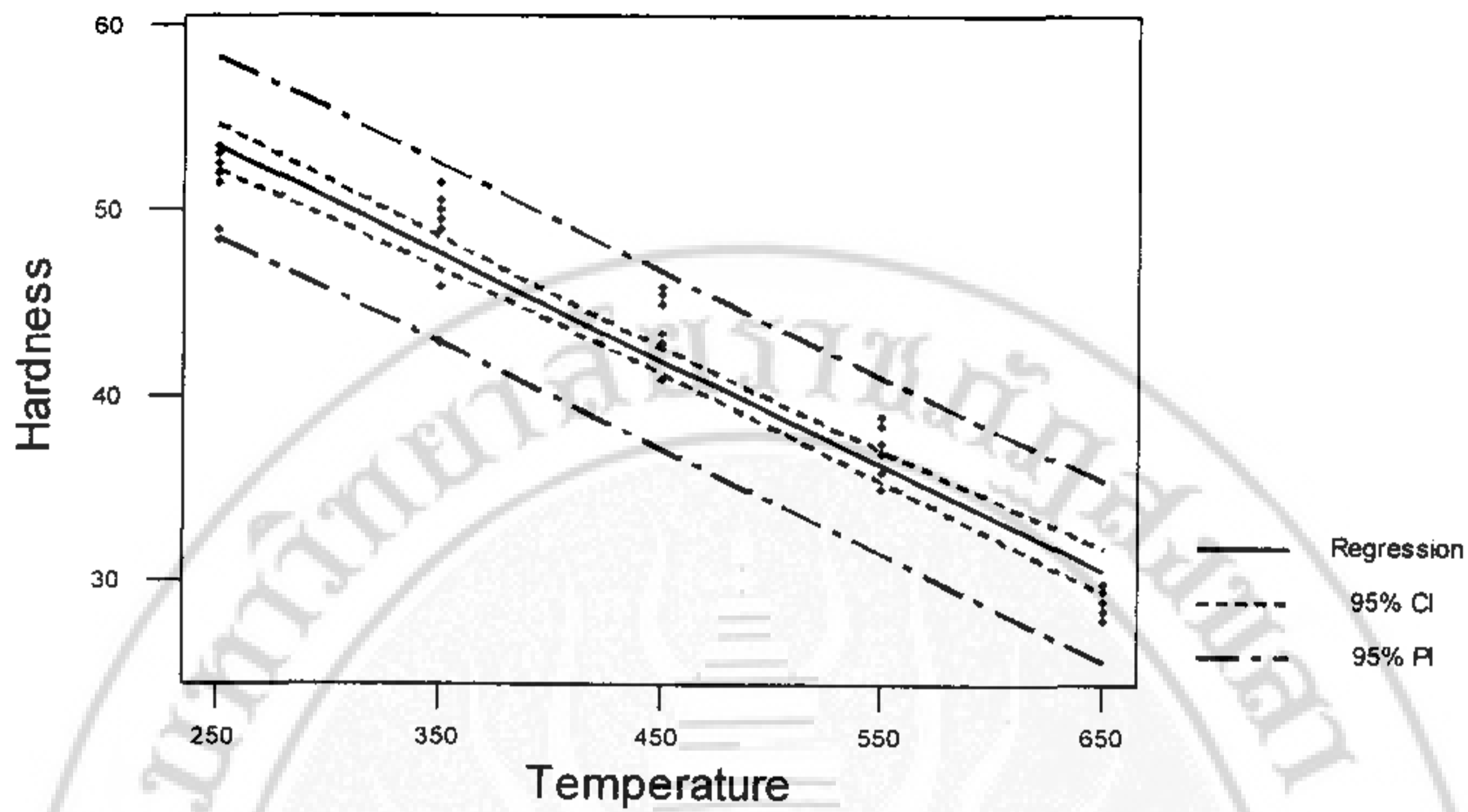
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	2949.5	1474.8	281.90	0.000
Residual Error	42	219.7	5.2		
Lack of Fit	12	141.4	11.8	4.51	0.000
Pure Error	30	78.3	2.6		
Total	44	3169.2			

Source	DF	Seq SS
Temperat	1	2935.5
Time	1	14.0

## Regression Plot

$$\text{Hardness} = 67.7111 - 0.0571111 \text{ Temperature}$$

S = 2.33145 R-Sq = 92.6 % R-Sq(adj) = 92.5 %



รูปที่ 4.29 การประมาณค่าความแข็งจากการอบคืนตัว

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