

จากการดำเนินการวิจัย 2 ครั้ง ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

5.1 การวัดค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน

5.1.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

5.1.1.1 ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุล กฎการระบายความร้อนของนิวตันที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง สามารถเขียนเป็นสมการของค่า γ_m และ γ ได้ดังนี้ (สมการที่ 3.8.4 และ 3.10.7)

$$\gamma_m = \frac{\zeta P_e}{(825 + 1.61(T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61 T_{me})104 T_{me}} \quad 5.1.1.1.1$$

$$\gamma = \frac{P_e}{823.55 + 1.61(T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 1.61(a T_{me})104a T_{me}} \quad 5.1.1.1.2$$

เมื่อ $\zeta = 2.23, 1.99$ และ 1.67
 $a = 0.62$ (ดูในหัวข้อที่ 3.10)

คำนวณหาค่า γ_m และ γ จากสมการที่ 5.1.1.1.1 และ 5.1.1.1.2

5.1.1.2 เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m และ γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ให้ค่า γ_m และ γ อยู่ในแนวแกน y ระดับกำลังของเครื่องอยู่ในแนวแกน x หากค่าสมการเส้นตรงในย่านที่ความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m และ γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ มีความสัมพันธ์ลักษณะที่เป็นเชิงเส้น โดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ดังนี้ (33)

$$y = a + bx$$

เมื่อ y = ค่าตัวแปรในแนวแกน y

x = ค่าตัวแปรในแนวแกน x

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n}$$

n = จำนวนคู่ของข้อมูล

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) (33)

$$= \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\left[(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2) (n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2) \right]^{\frac{1}{2}}}$$

คำนวณหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของเส้นกราฟ (standard deviation, S_{yx})

จากสูตร (33)

$$S_{yx} = \left[\sum (y_i - \hat{y}_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

เมื่อ \hat{y}_i = ค่าตัวแปรในแนวแกน y ตัวที่ i ซึ่งคำนวณได้จากสมการเส้นตรง

5.1.2 ผลการวัดค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน

5.1.2.1 ค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิง ณ

ตำแหน่งที่ทำการวัดอุณหภูมิ (γ_m) และค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาเฉลี่ยในการถ่ายเทความร้อนของแกนเครื่องปฏิกรณ์ (γ) ที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ระหว่าง 10-300 กิโลวัตต์ แสดงไว้ในตารางที่ 5.1.2.1

5.1.2.2 ความสัมพันธ์ของค่า γ_m และ γ กับระดับกำลังของเครื่อง

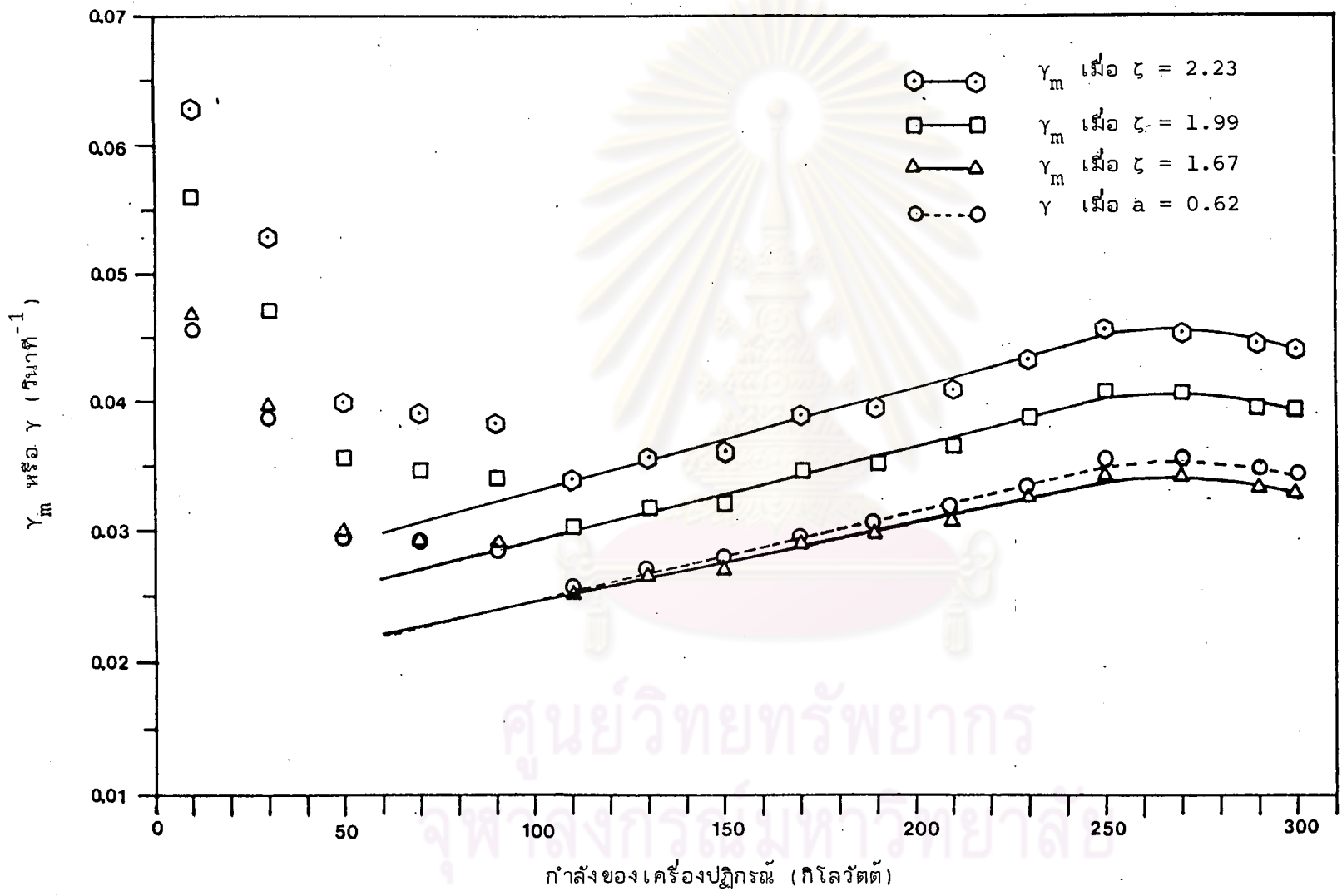
ปฏิกรณ์มีความสัมพันธ์ ดังกราฟรูปที่ 5.1.2.1

ตารางที่ 5.1.2: ค่า γ_m และ γ ที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ระหว่าง 10-300 กิโลวัตต์

P_e (กิโลวัตต์)	γ_m (วินาที ⁻¹)			γ ($a = 0.62$) (วินาที ⁻¹)
	$\zeta = 2.23$	$\zeta = 1.99$	$\zeta = 1.67$	
10	0.0629	0.0561	0.0471	0.0457
30	0.0529	0.0472	0.0396	0.0387
50	0.0400	0.0357	0.0299	0.0296
70	0.0391	0.0349	0.0293	0.0292
90	0.0383	0.0342	0.0287	0.0288
110	0.0341	0.0304	0.0255	0.0259
130	0.0357	0.0319	0.0268	0.0273
150	0.0361	0.0322	0.0270	0.0277
170	0.0389	0.0347	0.0291	0.0299
190	0.0395	0.0353	0.0296	0.0305
210	0.0409	0.0365	0.0306	0.0317
230	0.0434	0.0387	0.0325	0.0336
250	0.0457	0.0408	0.0342	0.0355
270	0.0455	0.0406	0.0341	0.0355
290	0.0445	0.0397	0.0333	0.0349
300	0.0440	0.0393	0.0330	0.0346

ระดับกำลังของ เครื่องปฏิกรณ์เริ่มต้น = 15 วัตต์

$$T_0 = 38^{\circ}\text{ซ}$$



รูปที่ 5.1.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m และ γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์

ในช่วงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ระดับต่ำ จนถึง 110 กิโลวัตต์ ความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m และ γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้จากการวิจัยไม่เป็นไปตามกฎการระบายความร้อนของนิวตัน (ดูในรูปที่ 3.8.1) ต้องอาศัยการต่อเส้นกราฟจากความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ได้เมื่อระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์สูงขึ้น

ที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ 250 กิโลวัตต์ขึ้นไป ค่า γ_m และ γ มีค่าลดลง ได้ความสัมพันธ์กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เป็นกราฟเส้นโค้ง

พิจารณาค่า γ_m ของแท่งเชื้อเพลิงที่ทำกรวดอุณหภูมิ ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m กับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิง ดังสมการ (สมการที่ 3.8.2)

$$\gamma_m = \frac{U}{C_p} = \frac{U_o A_d}{C_p} \quad 5.1.2.2.1$$

เมื่อ U_o = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิง

$$= \frac{U}{A_d}$$

A_d = พื้นที่ผิวของแท่งเชื้อเพลิง

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิง คือส่วนกลับของค่าความต้านทานความร้อน ซึ่งเขียนเป็นสมการได้เป็น (30)

$$U_o = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_f + R_g + R_c + R_s} \quad 5.1.2.2.2$$

เมื่อ R_t = ค่าความต้านทานความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิง

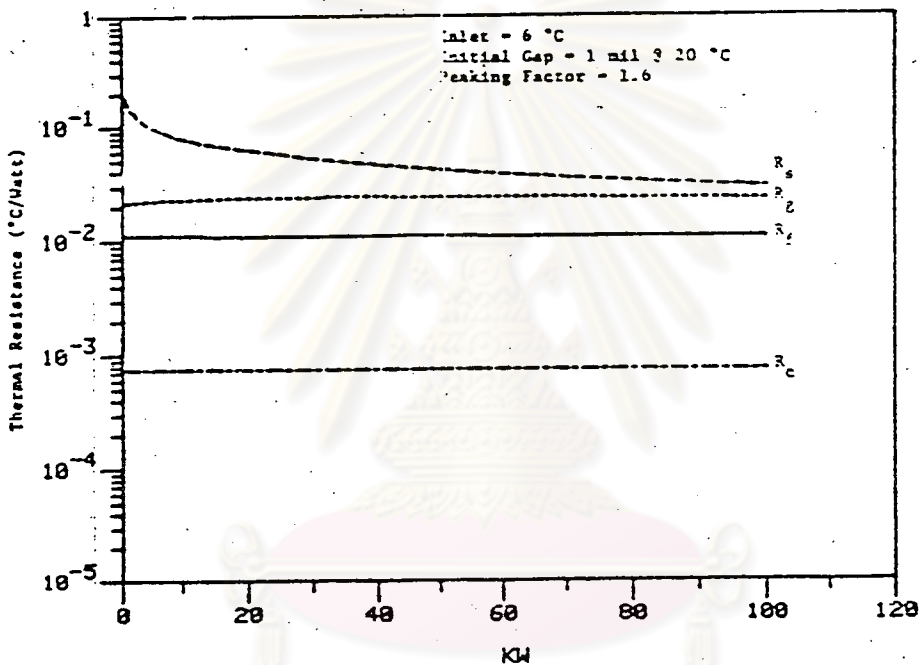
R_f = ค่าความต้านทานความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิง

R_g = ค่าความต้านทานความร้อนของช่องว่างระหว่างเนื้อเชื้อเพลิง กับเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

R_c = ค่าความต้านทานความร้อนของเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง

R_s = ค่าความต้านทานความร้อนบริเวณสัมผัสระหว่างเปลือกหุ้มแท่งเชื้อเพลิง กับตัวระบายความร้อน

ค่า R_f และ R_c โดยประมาณมีค่าคงที่ตลอดย่านอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง ค่า R_g จะมีค่าคงที่ถ้ากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ไม่เกิน 500 กิโลวัตต์ ส่วนค่า R_s นั้นเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง โดยจะมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงสูงขึ้น ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานที่ $\zeta=1.6$ ซึ่งได้จากการคำนวณ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์แสดงไว้ดังรูปที่ 5.1.2.2.1



รูปที่ 5.1.2.2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานความร้อนกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (30)

แทนค่าสมการที่ 5.1.2.2.2 ลงในสมการที่ 5.1.2.2.1 ดังนั้น

$$Y_m = \frac{A_d}{C_p R_t} \tag{5.1.2.2.3}$$

เมื่อกำลังของเครื่องปฏิกรณ์มีระดับต่ำ ความต้านทานความร้อนรวมของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าสูง ทำให้ค่า Y_m มีค่าน้อย สมการการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงตามกฎการระบายความร้อนของนิวตัน (หัวข้อที่ 3.8) จึงเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{K' C_p}{n} - \gamma_m T_m$$

$$\frac{dT_m}{dt} \cong \frac{K' C_p}{n}$$

เรียกว่าสมการสมมูลอะไดแบติก (adiabatic model) กล่าวคือความร้อนที่เกิดขึ้นในแท่งเชื้อเพลิง มีการถ่ายเทออกสู่ตัวระบายความร้อนน้อยมาก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงขึ้นอยู่กับความร้อนที่ผลิตขึ้นมาเพียงอย่างเดียว ดังนั้นขณะที่เครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุล อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงยังคงมีค่าสูงขึ้น ทำให้ไม่สามารถหาค่า γ_m ได้จากการวิจัย อย่างไรก็ตามจากข้อมูลลักษณะความสัมพันธ์ของค่า γ_m กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ที่ได้จากการคำนวณ และข้อมูลที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์สูงพอที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง เป็นไปตามกฎการระบายความร้อนของนิวตัน จึงสามารถต่อเส้นกราฟออกไปยังช่วงที่เครื่องปฏิกรณ์มีระดับกำลังต่ำได้

ที่ระดับกำลังเครื่องปฏิกรณ์ระหว่าง 110-250 กิโลวัตต์ ค่า γ_m มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ จากรูปที่ 5.1.2.2.1 และสมการที่ 5.1.2.2.3 ย่อมแสดงให้เห็นว่าผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิง (C_p') เนื่องจากอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับค่าความต้านทานรวมของแท่งเชื้อเพลิงที่ลดลงในลักษณะที่เกือบเป็นความสัมพันธ์เชิงเส้นกับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์

ในทำนองกลับกัน เมื่อเครื่องปฏิกรณ์มีระดับกำลังเกิน 250 กิโลวัตต์ เริ่มมีผลของการเปลี่ยนแปลงค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยที่ค่าความต้านทานรวมของแท่งเชื้อเพลิงมีค่าลดลงจนเกือบมีค่าคงที่ ในที่สุดค่าความจุความร้อนของเนื้อเชื้อเพลิงมีค่ามากพอที่จะทำให้ γ_m มีค่าลดลง

สำหรับกรณีความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ สามารถอธิบายได้ในทำนองเดียวกันกับค่า γ_m

5.1.2.3 สมการเส้นตรงที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m และ γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ไม่เกิน 250 กิโลวัตต์ มีสมการดังต่อไปนี้

เมื่อ $\zeta = 2.23$

$$\gamma_m = 0.0249 + 8.0179 \times 10^{-5} P \quad \text{วินาที}^{-1} \quad 5.1.2.3.1$$

$$\text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} = 0.9874$$

$$S_{\gamma_m P} = 0.0007 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

เมื่อ $\zeta = 1.99$

$$\gamma_m = 0.0222 + 7.1607 \times 10^{-5} P \quad \text{วินาที}^{-1} \quad 5.1.2.3.2$$

$$\text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} = 0.9875$$

$$S_{\gamma_m P} = 0.0006 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

และ $\zeta = 1.67$

$$\gamma_m = 0.0186 + 5.9940 \times 10^{-5} P \quad 5.1.2.3.3$$

$$\text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} = 0.9871$$

$$S_{\gamma_m P} = 0.0005 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

คำนวณค่า γ เมื่อ $a = 0.62$

$$\gamma = 0.0183 + 6.625 \times 10^{-5} P \quad 5.1.2.3.4$$

$$\text{สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์} = 0.9902$$

$$S_{\gamma P} = 0.0005 \quad \text{วินาที}^{-1}$$

โดย $P =$ ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลวัตต์)

ข้อมูลในการวิจัยและตัวอย่างในการคำนวณไว้ในภาคผนวก ง.

5.2- การวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน

5.2.1 การวิเคราะห์ข้อมูล

พิจารณาวิเคราะห์ข้อมูลออกเป็นสองกรณี กรณีแรกเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากการประมาณค่าของค่าคงตัวเวลาเฉลี่ยในการถ่ายเทความร้อนของแกน เครื่องปฏิกรณ์ให้เท่ากับค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงที่ทำการวัดอุณหภูมิ ($\gamma = \gamma_m$) โดยใช้ข้อมูลค่าฟลักซ์แพคเตอร์ต่าง ๆ กรณีที่สองเป็นการวิเคราะห์ข้อมูลจากการประมาณค่า a ขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังต่อไปนี้

5.2.1.1 คำนวณค่าเปลี่ยนวิกฤตเมื่อเริ่มต้น (ρ_0) ของการกระเพื่อมกำลังแต่ละครั้ง โดยทำการคำนวณเช่นเดียวกับการคำนวณของการปรับเทียบค่าเปลี่ยนวิกฤตของแท่งควบคุมเร็กกูเลติง ดังภาคผนวก ค.

คำนวณค่าคงที่ในการสลายตัวของนิวตรอนล่ากลุ่มเดียว (λ) ที่สัมพันธ์กับค่าเปลี่ยนวิกฤต ดังสมการ (สมการที่ 3.11.2)

$$\lambda = \omega_1 \frac{(100 - \rho_0)}{\rho_0} \quad \text{วินาที}^{-1}$$

$$\text{เมื่อ } \rho_0 = \text{ค่าเปลี่ยนวิกฤต (เซนต์)}$$

$$\omega_1 = \text{ส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาเสถียร (วินาที}^{-1}\text{)}$$

เมื่อเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเปลี่ยนวิกฤตน้อย $\lambda = 0.0767$ วินาที⁻¹ เป็น λ อีกค่าหนึ่งที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของนิวตรอนแทนนิวตรอนล่าทั้ง 6 กลุ่มได้ดี ดังนั้นหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต (arithmetic mean) ของ λ (λ_{av}) ดังสมการ

$$\lambda_{av} = \frac{0.0767 + \omega_1 (1 - \rho_0) / \rho_0}{2} \quad \text{วินาที}^{-1}$$

5.2.1.2 การกระเพื่อมกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ขณะที่กำลังสูงสุด ได้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปลี่ยนวิกฤต กับค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน ดังสมการ (สมการที่ 3.1)

$$\rho_o = \alpha_1 \left[\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma)}{\lambda} \hat{T} \right] + \alpha_2 \hat{T} \left[\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma)}{2\lambda} \hat{T} \right] \quad 5.2.1.2.1$$

จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง และกำหนดให้ $\gamma \equiv \gamma_m$ ให้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$y = \alpha_1 + \alpha_2 x$$

$$\text{เมื่อ } x = \frac{(\hat{T}_m)}{\zeta} \left[\frac{\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma_m)}{2\lambda} \frac{\hat{T}_m}{\zeta}}{\left[\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma_m)}{\lambda} \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \right]} \right]$$



$$y = \frac{\rho_o}{\left[\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma_m)}{\lambda} \frac{\hat{T}_m}{\zeta} \right]}$$

ในทำนองเดียวกันเมื่อคำนวณโดยการประมาณค่า a สมการที่ 5.2.1.2.1 จัดรูปได้ดังนี้

$$y' = \alpha_1 + \alpha_2 x'$$

$$x' = (0.62 \hat{T}_m) \left[\frac{\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma)}{2\lambda} 0.62 \hat{T}_m}{\left[\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma)}{\lambda} 0.62 \hat{T}_m \right]} \right]$$

$$y' = \frac{\rho_o}{\left[\frac{\hat{K}P}{\lambda} + \frac{(1-\gamma)}{\lambda} 0.62 \hat{T}_m \right]}$$

$$= 2.23, 1.99 \text{ และ } 1.67$$

$$= 0.0767, \omega_1 \frac{(1-\rho_o)}{\rho_o}, \lambda_{av} \quad (\text{วินาที}^{-1})$$

$K = \frac{1}{C} P$ คือส่วนกลับของค่าความจุความร้อนรวมของเนื้อเชื้อเพลิงในแกน เครื่องปฏิกรณ์ ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด ($^{\circ}\text{C}/\text{วัตต์-วินาที}$)

$$\begin{aligned}
C_p &= 85649.255 + 167.255 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 167.255 a \hat{T}_m \\
&\quad (\text{ดูในภาคผนวก ข.}) \\
&= 85649.255 + 167.255 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 167.255 \left(\frac{1}{5} \hat{T}_m\right) \\
&\quad \text{วัตต์-วินาที/}^\circ\text{ซ} \quad (\text{สำหรับการประมาณค่า } \gamma) \\
&= 85649.255 + 167.255 (T_o - 25^\circ\text{ซ}) + 167.255 (0.62 \hat{T}_m) \\
&\quad \text{วัตต์-วินาที/}^\circ\text{ซ} \quad (\text{สำหรับการประมาณค่า } a)
\end{aligned}$$

ค่า γ_m และ γ อ่านได้จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ_m และ γ กับระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ ในการวิจัยหาค่าส่วนกลับของค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อน หัวข้อที่ 5.1 ที่ระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์สูงสุด

คำนวณหาค่า x , x' , y , y' หาสมการเส้นตรงโดยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (least-squares fit method) จากข้อมูล x , y หรือ x' , y' ของแต่ละชุด ได้ค่า α_1 และ α_2

5.2.1.3 แทนค่า α_1 และ α_2 ลงในสมการที่แสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน ดังนี้ (สมการที่ 2.10.11)

$$\begin{aligned}
\alpha &= \alpha_1 + \alpha_2 T \\
&= \alpha_1 + \alpha_2 (\bar{T} - T_o)
\end{aligned}$$

เมื่อ α = ค่าลบของค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน (เซนต์/°ซ)

\bar{T} = อุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ (°ซ)

ดังนั้นได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน (α_{prompt}) มีค่าเป็น

$$\alpha_{\text{prompt}} = - [\alpha_1 + \alpha_2 (\bar{T} - T_o)]$$

และมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
\alpha_{\text{Prompt}} &= - [\alpha_1 + \alpha_2 (a T_m)] \\
&= - [\alpha_1 + \alpha_2 (a (T_f - T_o))]
\end{aligned}$$

$$a = \frac{\bar{T} - T_0}{T_m} = \frac{Y}{\zeta \gamma m}$$

5.2.2 ผลการวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน

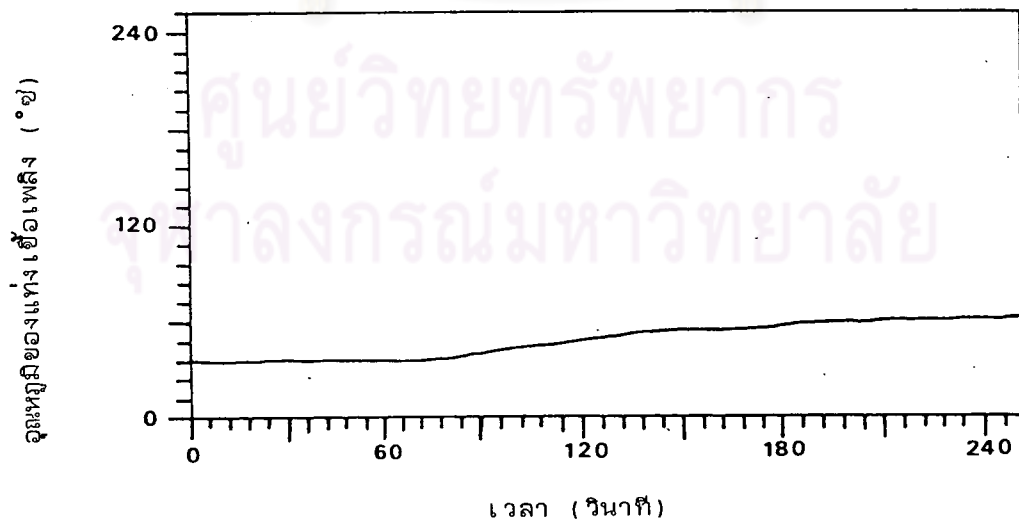
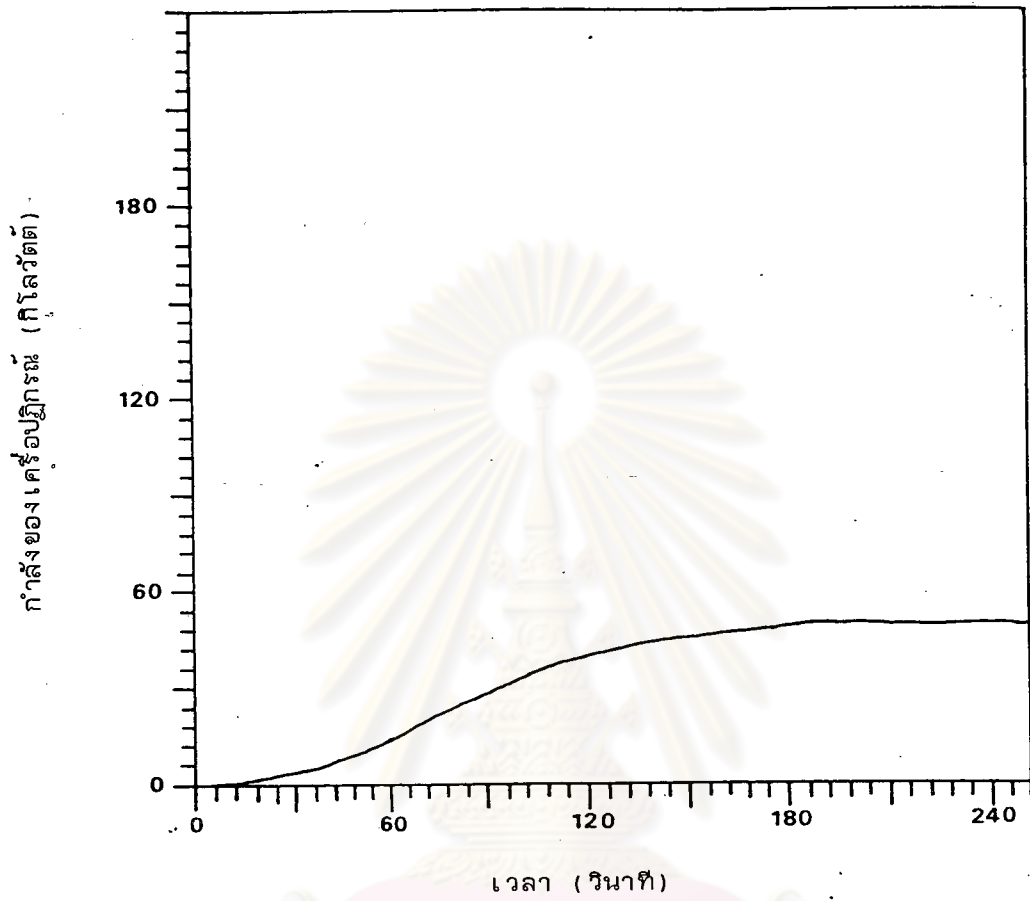
5.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์ และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤตต่าง ๆ กัน แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2.2.1 - 5.2.2.9

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเครื่องปฏิกรณ์กับอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2.2.10

พบว่าเครื่องปฏิกรณ์มีการเปลี่ยนแปลงของกำลังที่เรียกว่าการกระเพื่อมเมื่อค่าเปลี่ยนวิกฤตที่เพิ่มขึ้นประมาณ 30 เซนต์ขึ้นไป และได้ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเครื่องปฏิกรณ์กับอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเป็นกราฟลักษณะชดเป็นวง แต่ภายหลังจากการกระเพื่อมกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และการกระเพื่อมอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงจนเครื่องปฏิกรณ์อยู่ในสภาวะสมดุลแล้ว การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นไม่กลับไปสู่ความสัมพันธ์ดังลักษณะเดิม โดยเห็นได้ชัดเจนที่ค่าเปลี่ยนวิกฤตมีค่ามาก นั่นแสดงให้เห็นว่าเครื่องปฏิกรณ์มีค่าสัมประสิทธิ์ย้อนกลับของค่าเปลี่ยนวิกฤตอื่นที่ไม่ขึ้นกับอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยสันนิษฐานว่าเป็นผลสืบเนื่องมาจากไอโซโทปที่มีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งเกิดมาจากปฏิกิริยาจุกไข้อย่างไรก็ตามขณะที่เกิดการกระเพื่อมกำลังค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลันที่เกิดขึ้นมีค่ามากเมื่อเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์ย้อนกลับดังกล่าว ทำให้ไม่ปรากฏผลในกราฟลักษณะชดเป็นวง

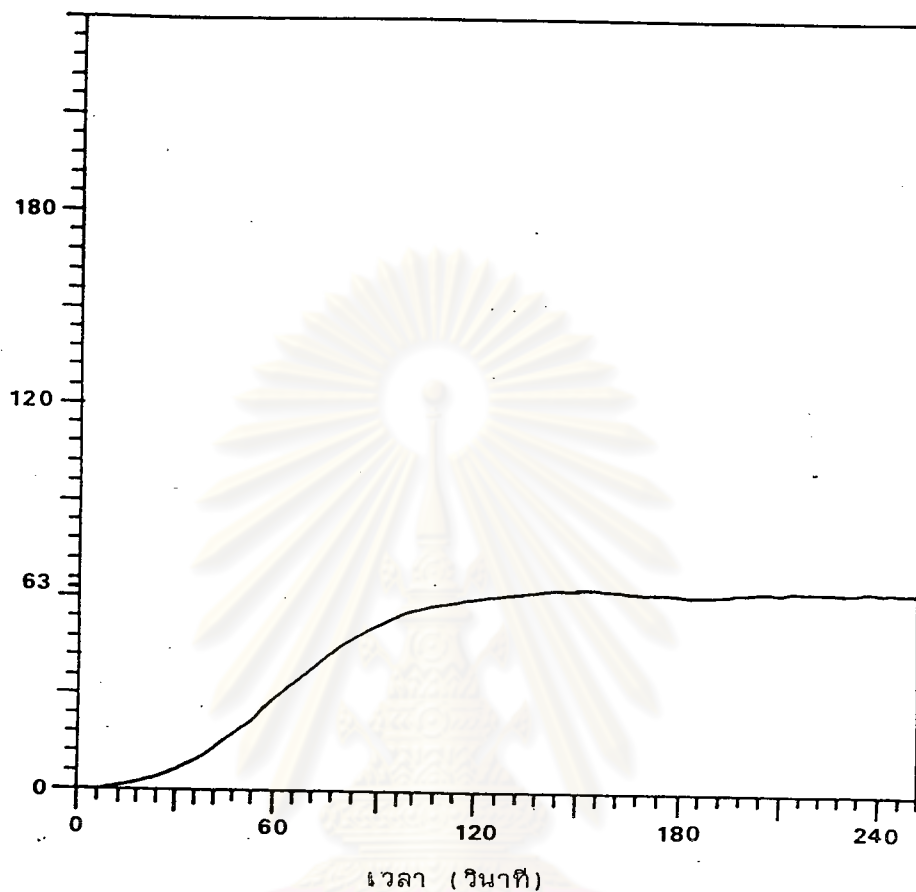
5.2.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x กับ y และค่า x' กับ y' ที่ค่าเปลี่ยนวิกฤตประมาณ 30-50 เซนต์ มีความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรง แสดงไว้ดังกราฟรูปที่ 5.2.2.11-5.2.2.14 ได้ค่า α_1 และ α_2 สรุปไว้ในตารางที่ 5.2.2.1

เมื่อค่าเปลี่ยนวิกฤตเพิ่มขึ้นเกิน 50 เซนต์ เครื่องปฏิกรณ์เกิดกำลังสูงสุดได้อย่างรวดเร็ว การใช้สมการประมาณการกระโดดของความหนาแน่นนิวตรอน อธิบายการเปลี่ยนแปลงของนิวตรอนจึงได้ผลที่ไม่แม่นยำนัก ทำให้ค่า x , y , x' และ y' ไม่สัมพันธ์กับค่าอื่น ๆ ควรพิจารณาการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของนิวตรอนจากสมการการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของ

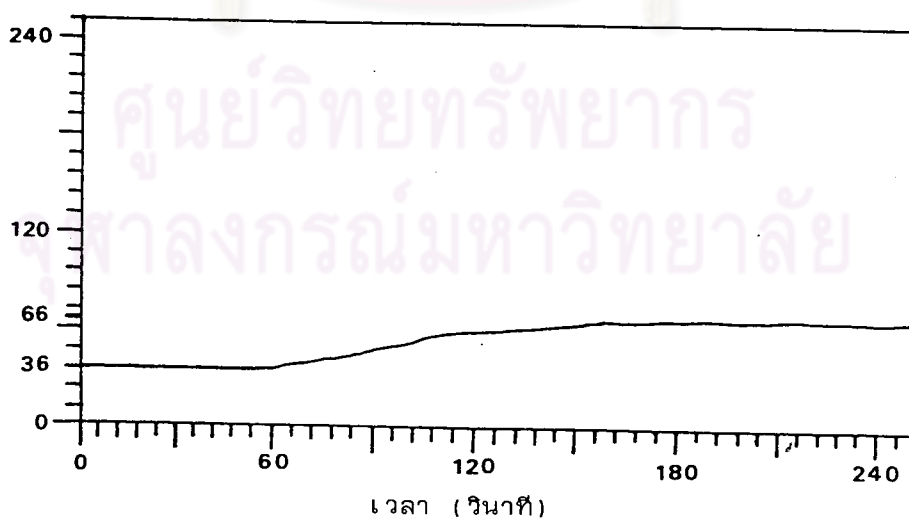


รูปที่ 5.2.2.1 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 24.17 เซนต์

กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลวัตต์)

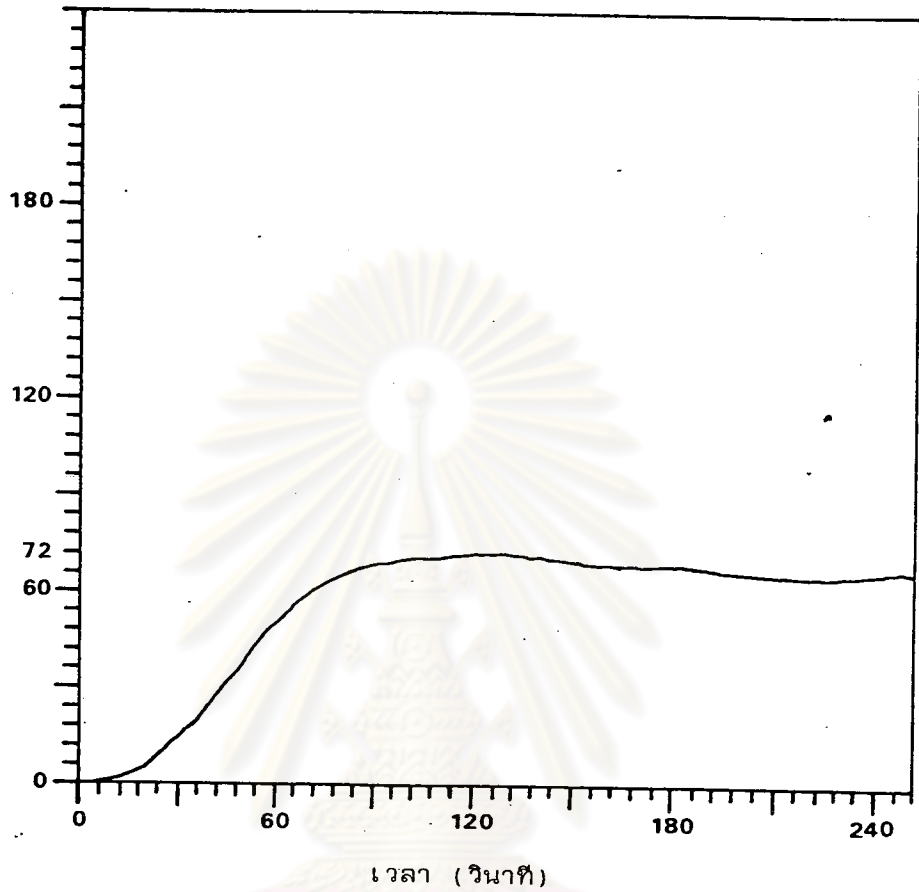


อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง (°ซ)

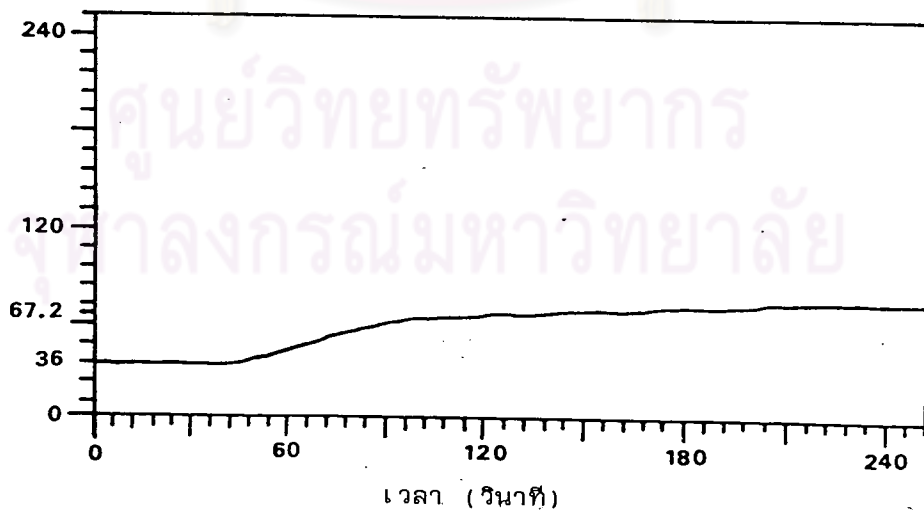


รูปที่ 5.2.2.2 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 28.92 เซนต์

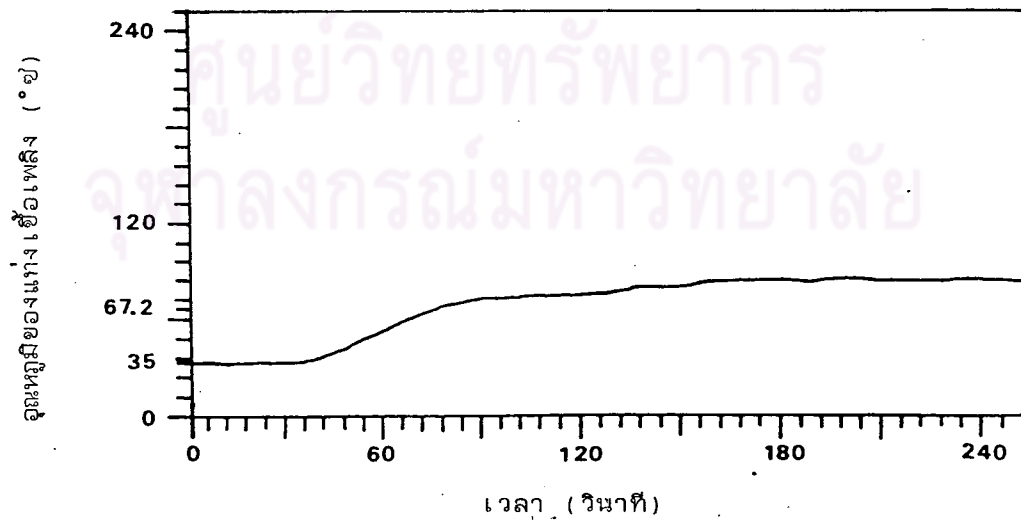
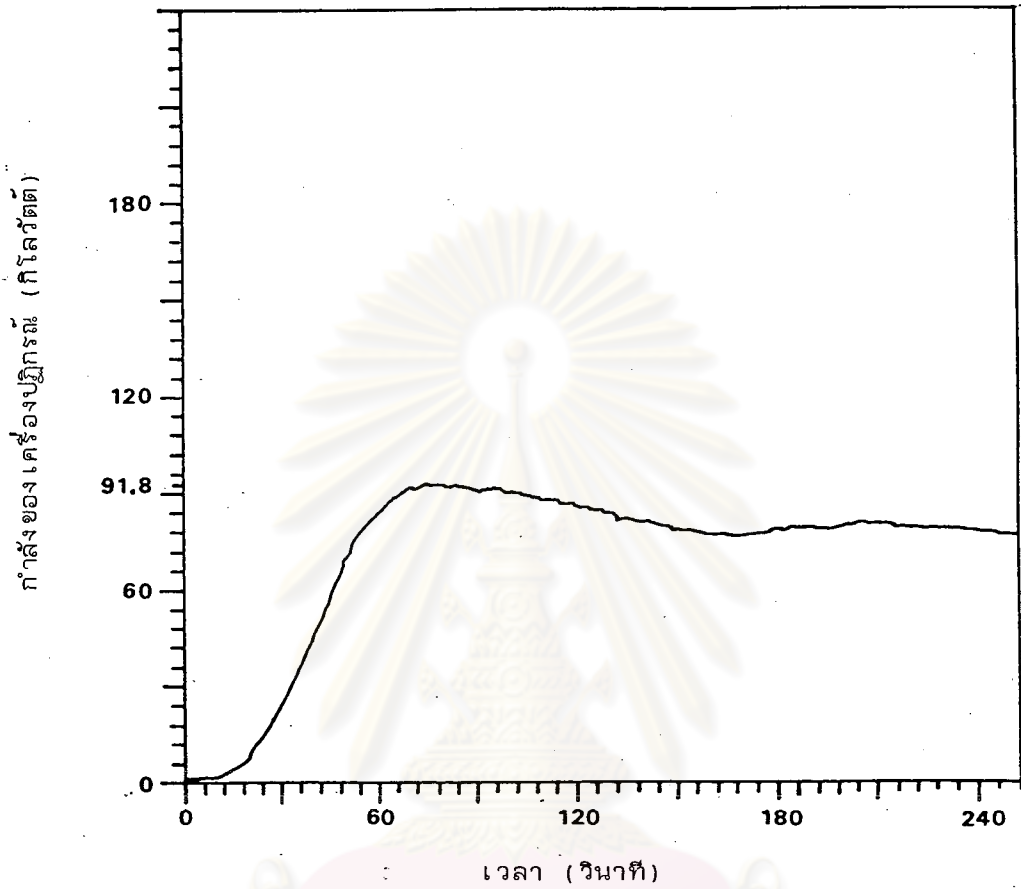
กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลวัตต์)



อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง (°ซ)

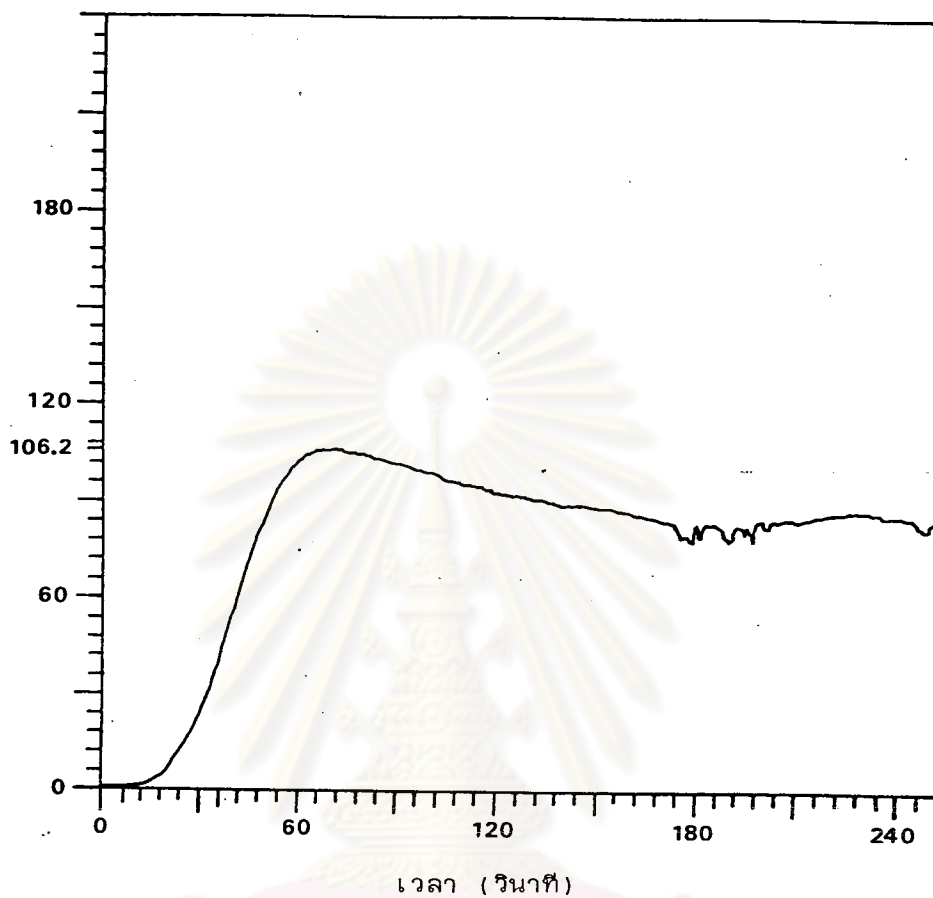


รูปที่ 15.2.2.3 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 32.31 เซนต์

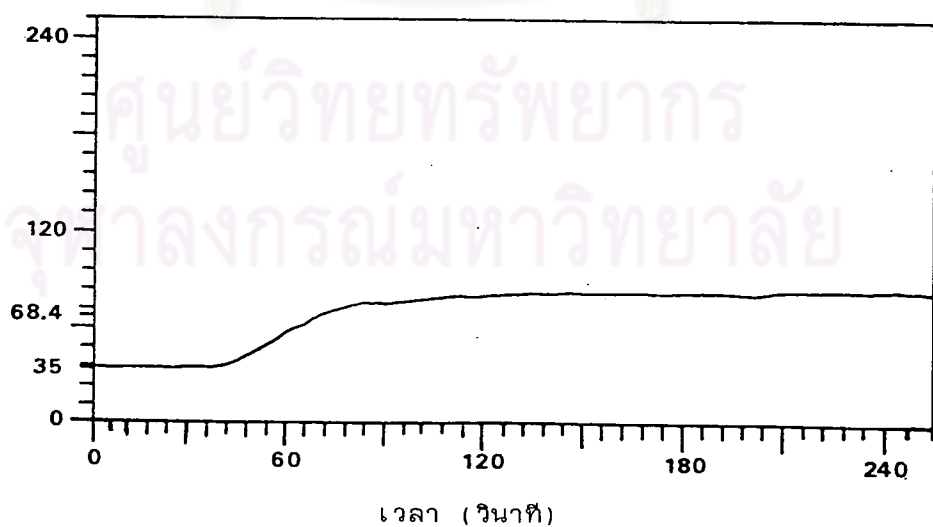


รูปที่ 5.2.2.4 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 35.93 เซนต์

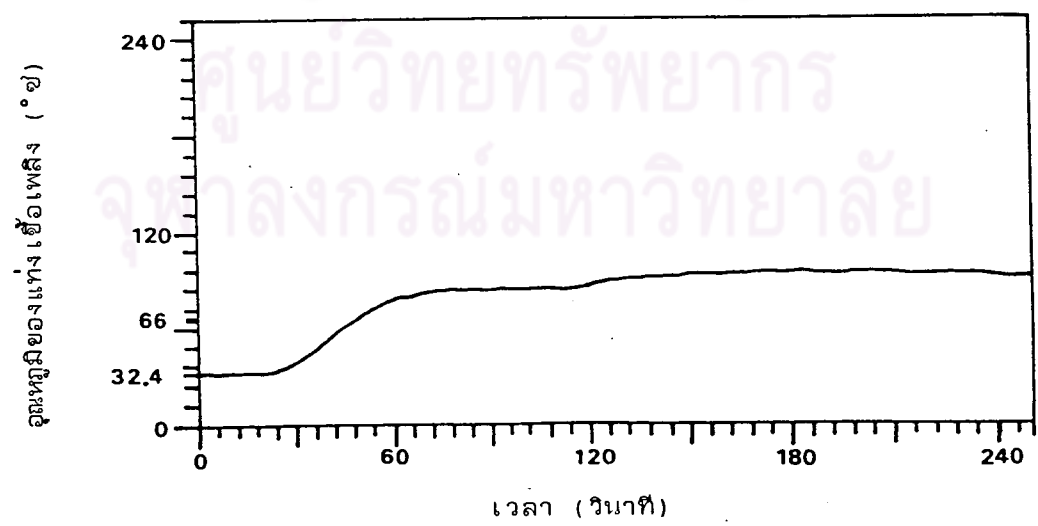
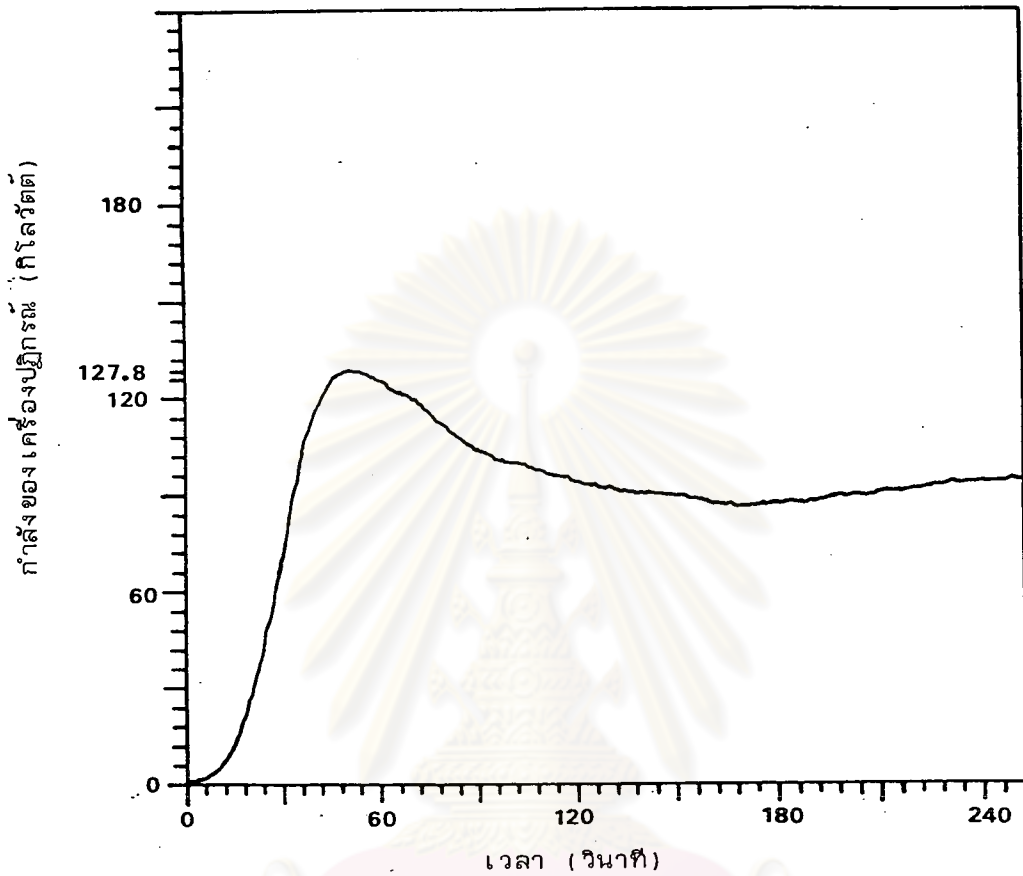
กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลวัตต์)



อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง (°ซ)

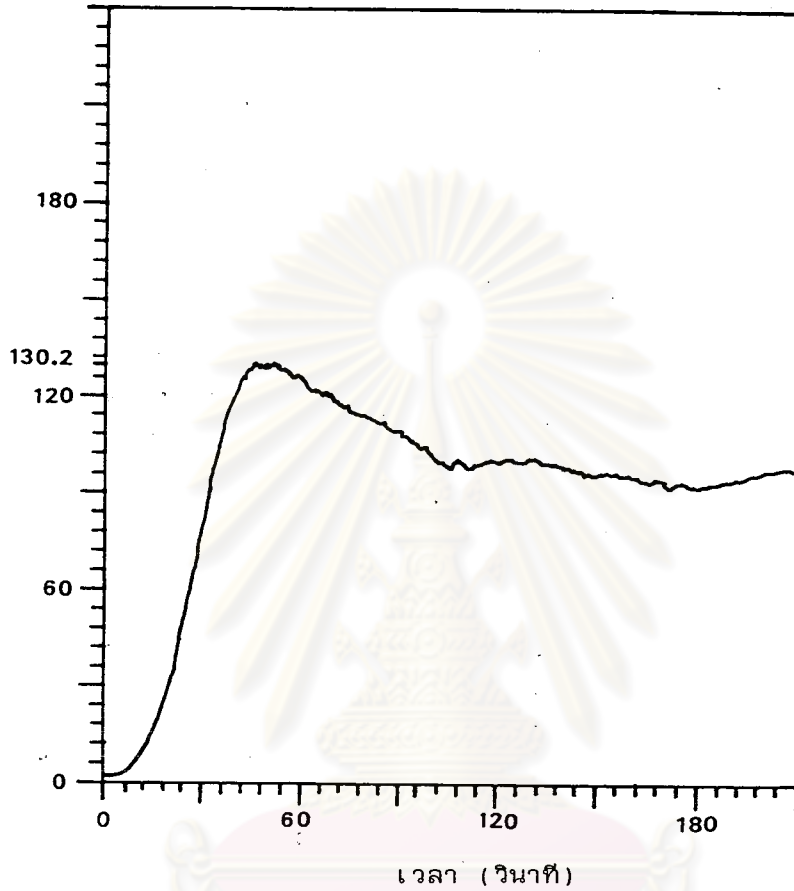


รูปที่ 5.2.2.5 การเปลี่ยนแปลงกำลังของ เครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของ แท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 39.59 เซนต์

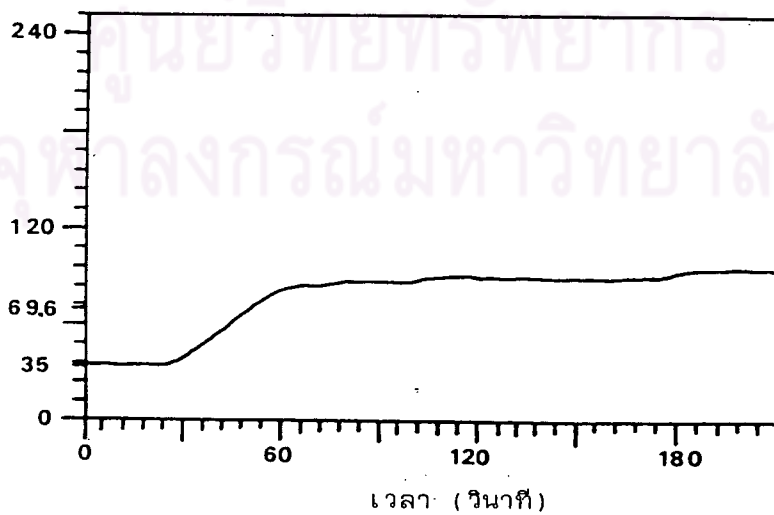


รูปที่ 5.2.2.6 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และองศาของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 43.35 เซนต์

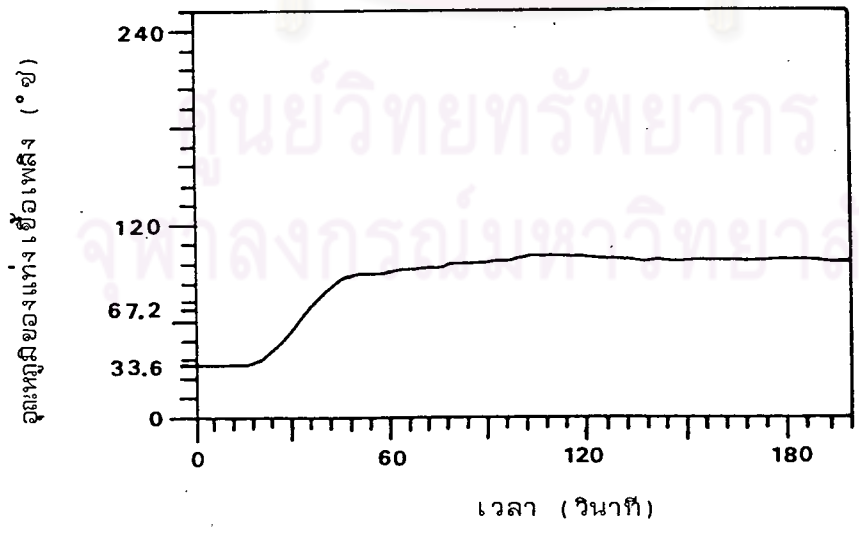
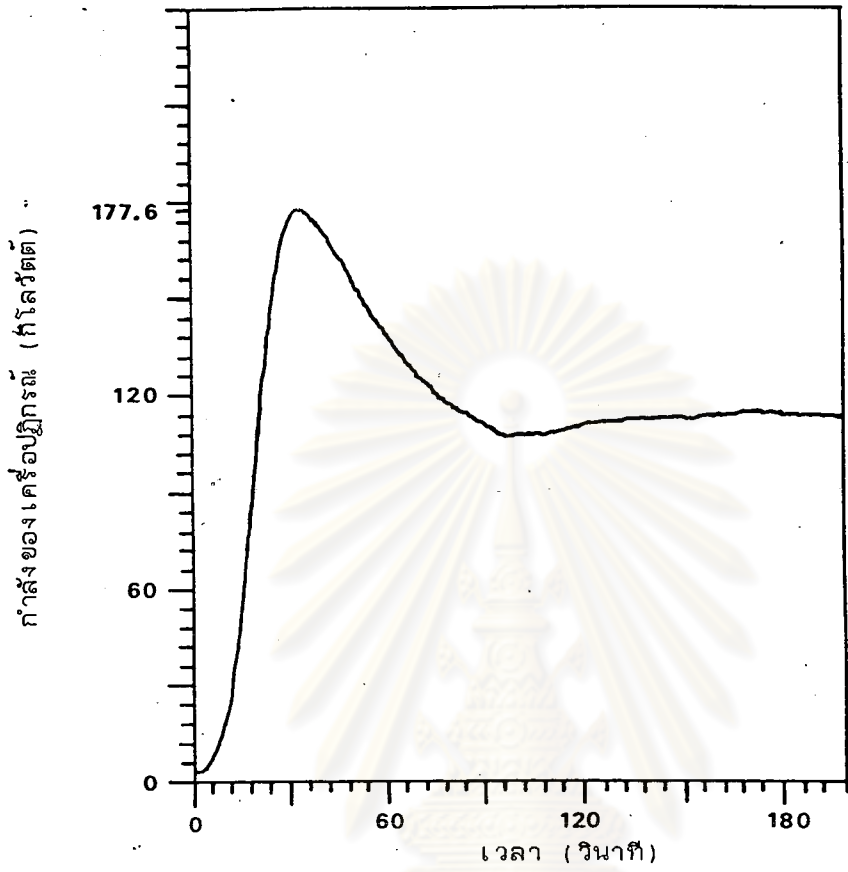
กำลังของเครื่องปฏิกรณ์ (กิโลวัตต์)



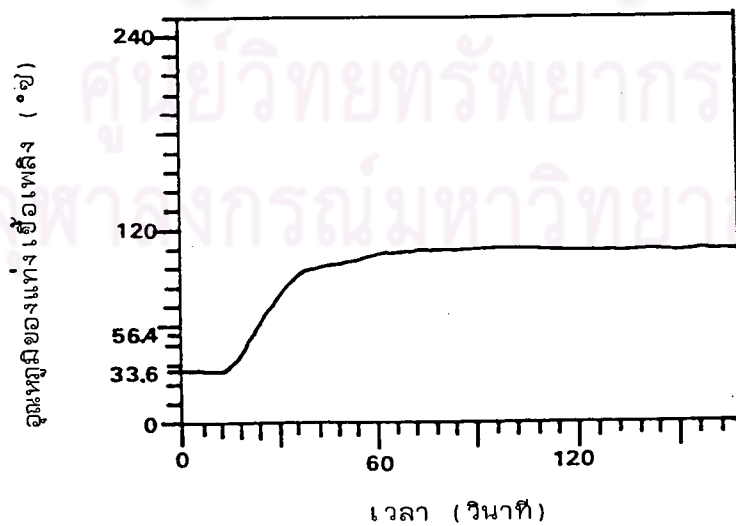
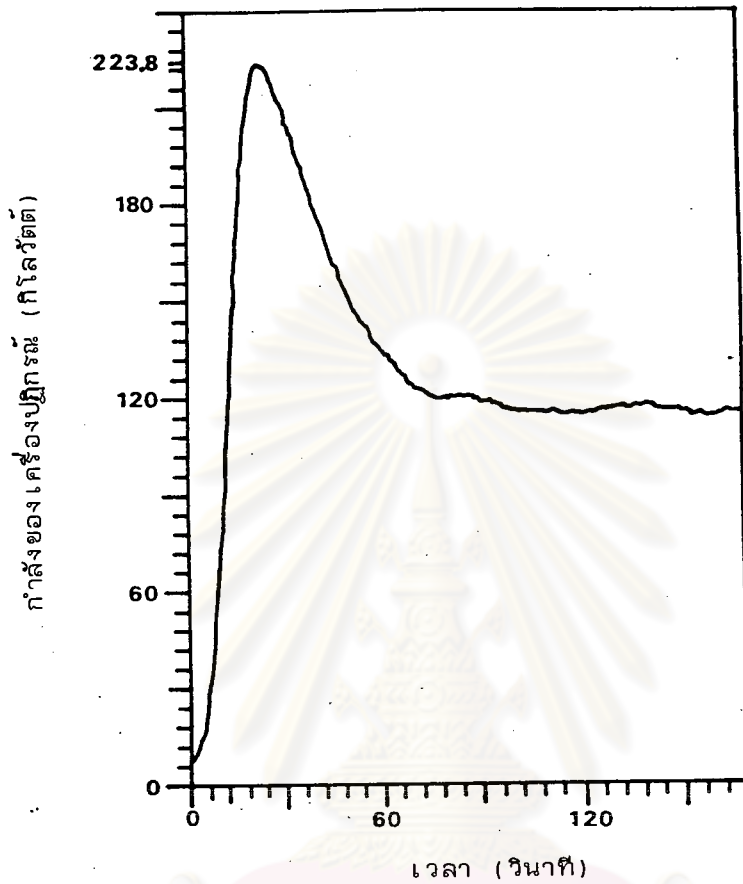
อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง (°ซ)



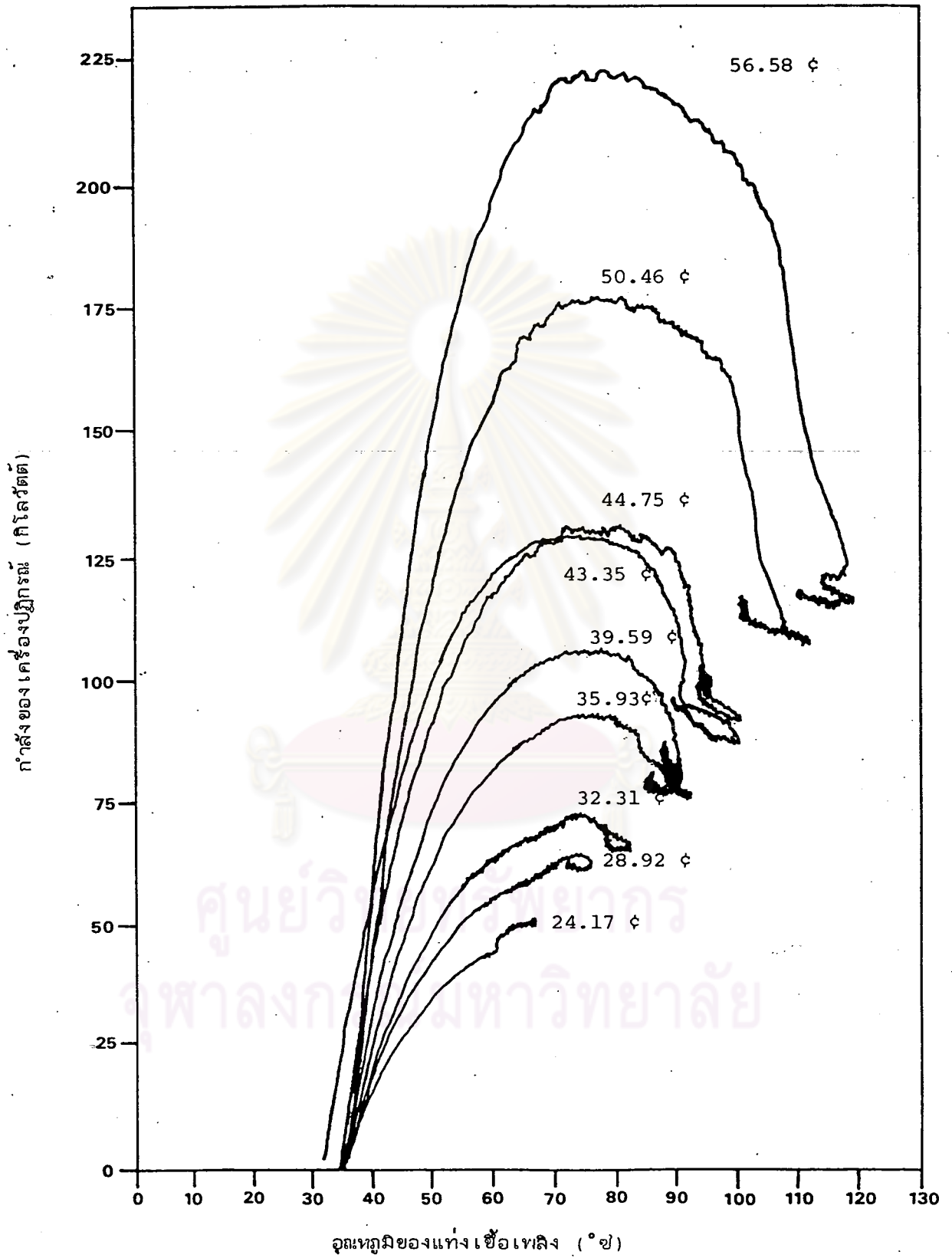
รูปที่ 5.2.2.7 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 44.75 เซนต์



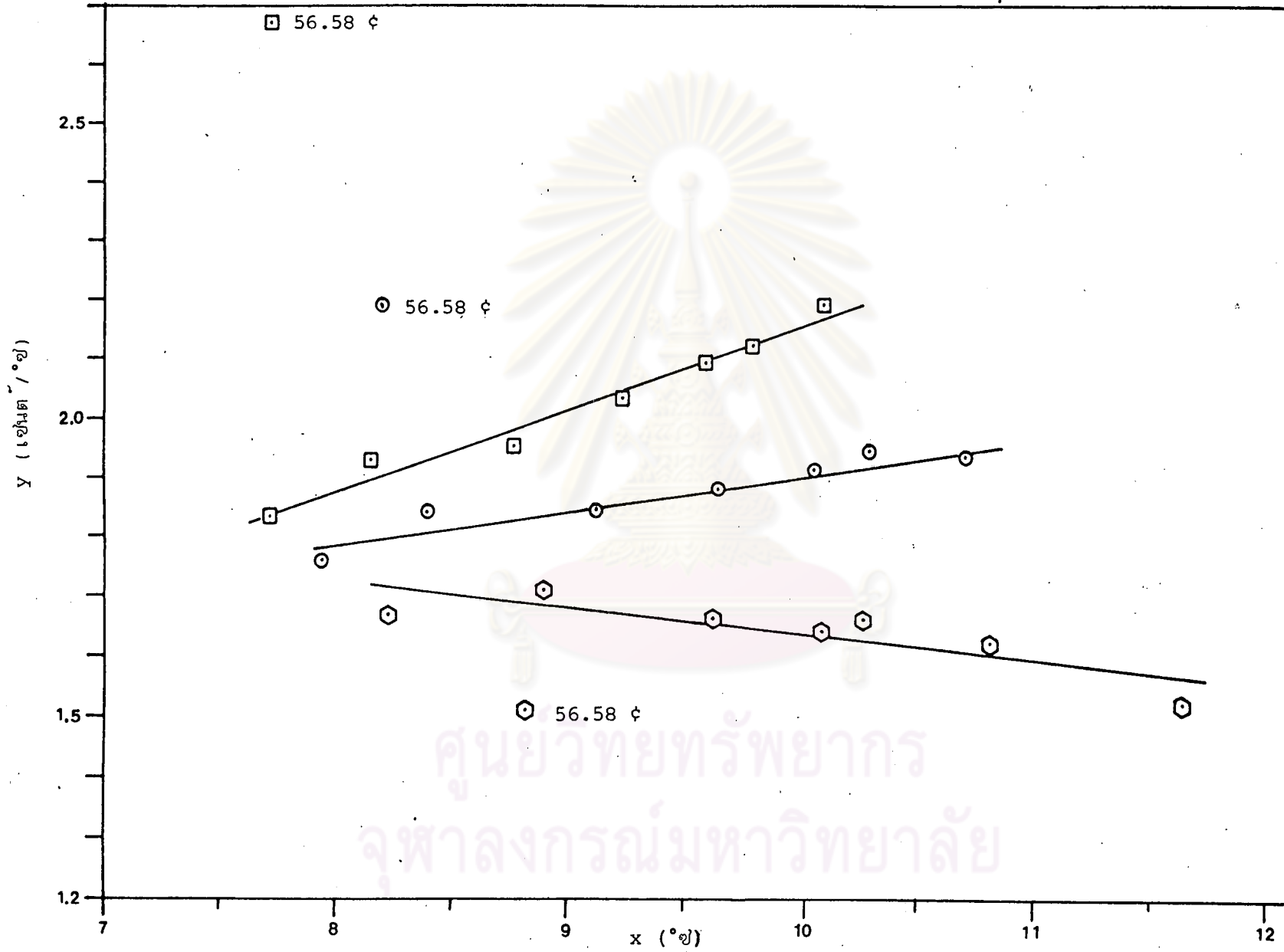
รูปที่ 5.12.2.8 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 50.46 เซนต์



รูปที่ 5.2.2.9 การเปลี่ยนแปลงกำลังของเครื่องปฏิกรณ์และอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงเมื่อเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต 56.58 เซนต์

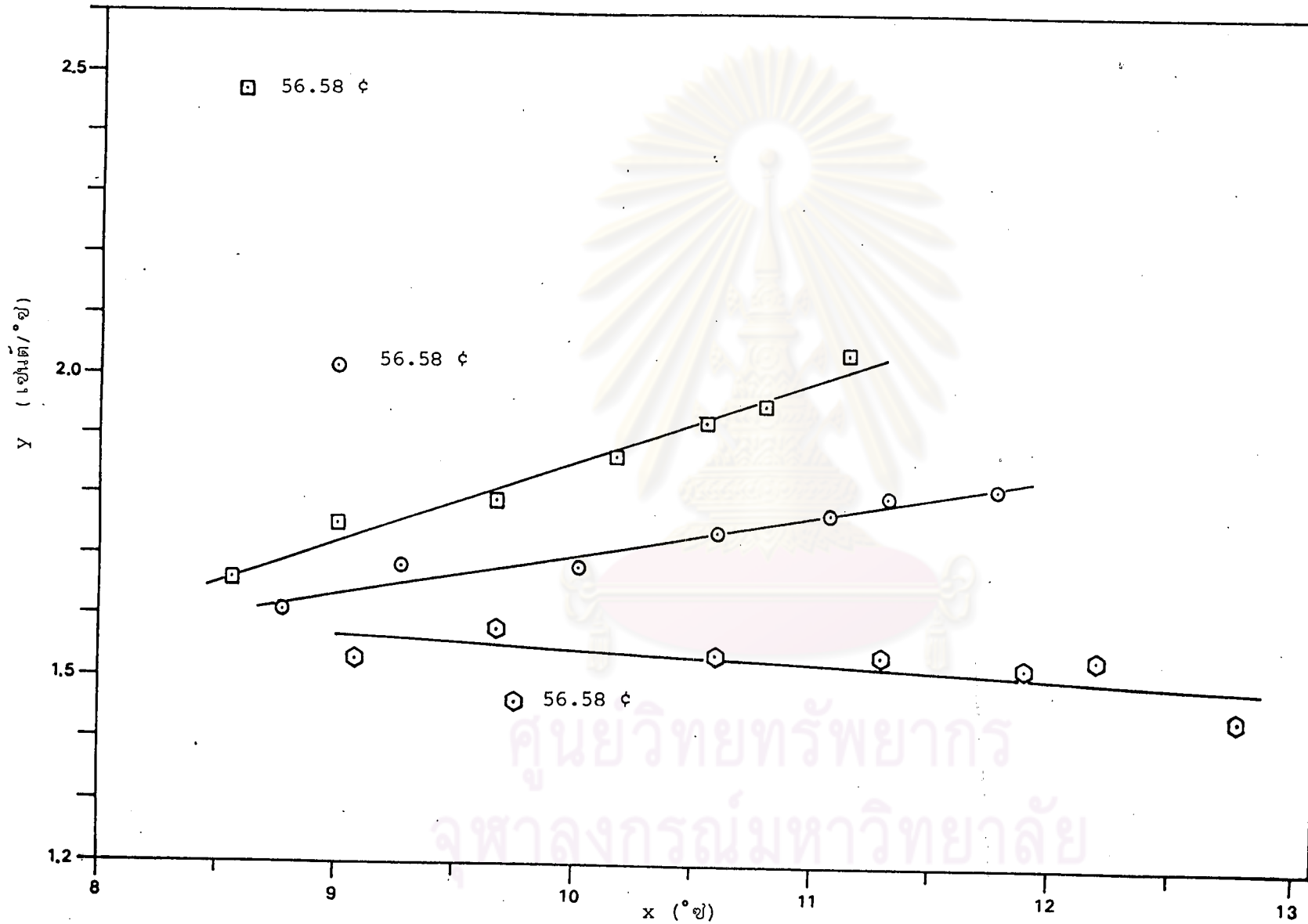


รูปที่ 15.2.2.10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของเครื่องปฏิกรณ์กับมุมของแท่งเชื้อเพลิง

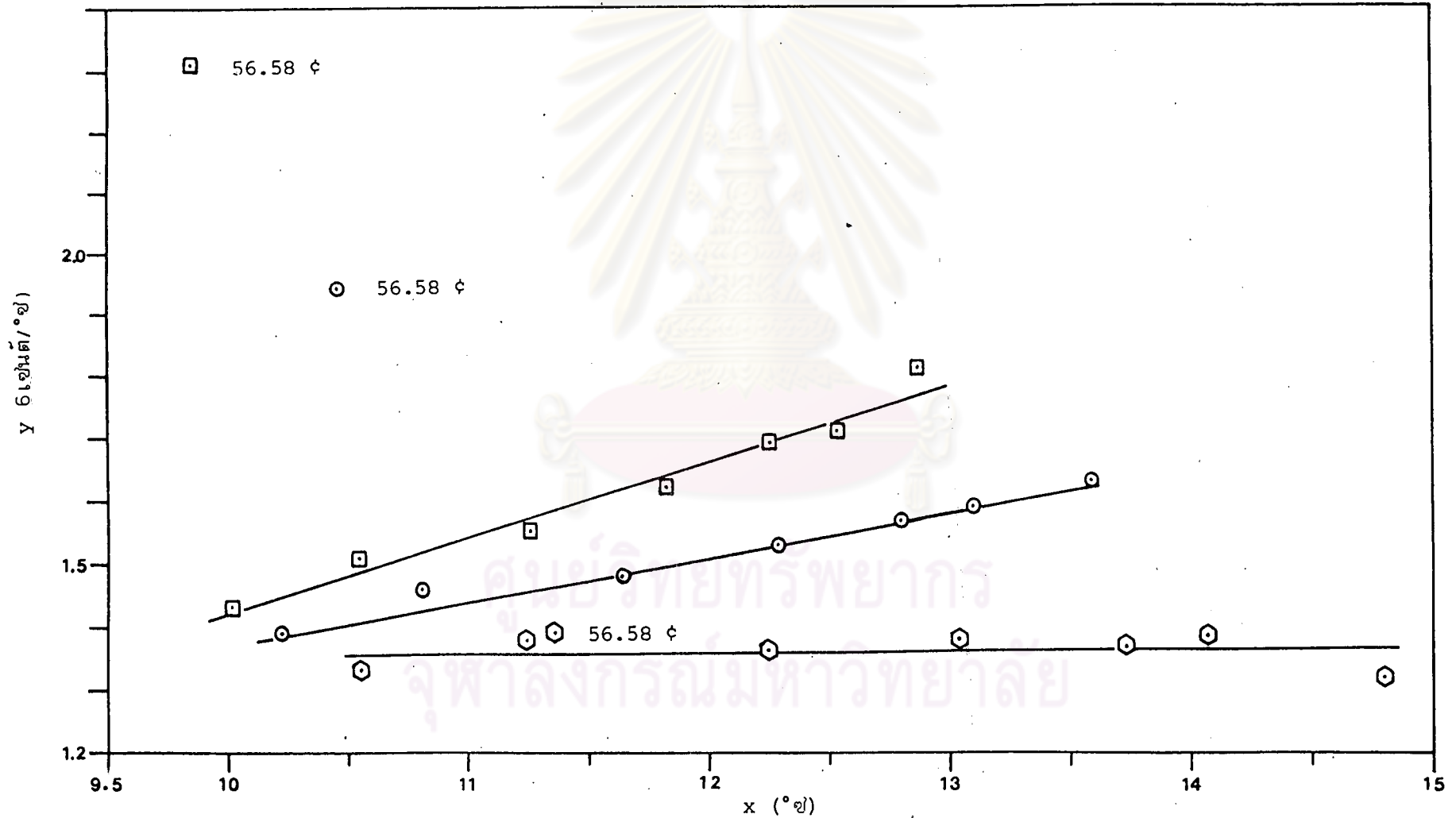


รูปที่ 5.2.2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x กับ y เมื่อ $\zeta = 2.23$

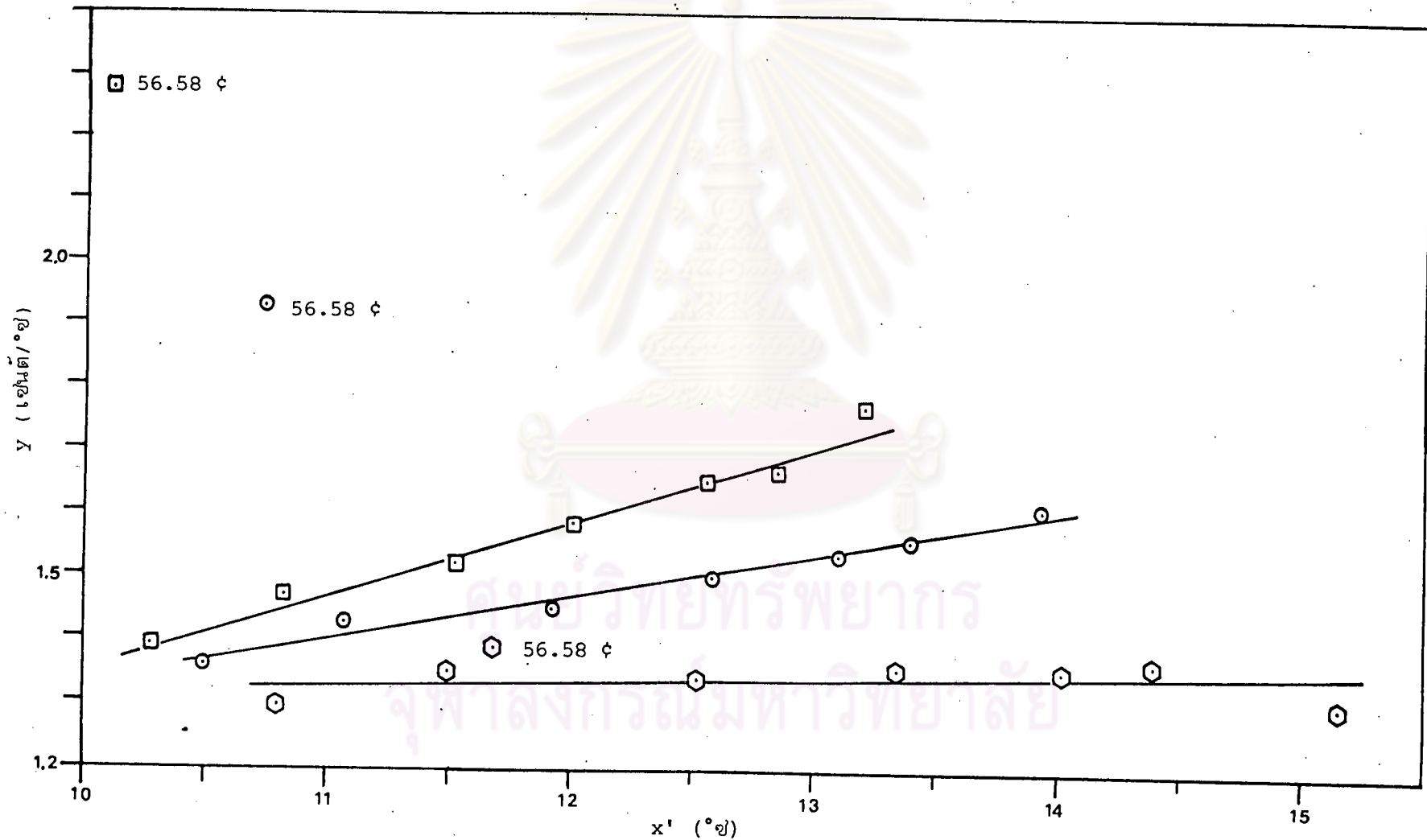
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.2.2.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x กับ y เมื่อ $\zeta = 1.99$



รูปที่ 5.2.2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x กับ y เมื่อ $\zeta = 1.67$



รูปที่ 5.2.2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า x' กับ y' เมื่อ $a = 0.62$

ตารางที่ 5.2.2.1 ค่า α_1 และ α_2 จากการวิจัย

	$\lambda = 0.0767 \text{ วินาที}^{-1}$				$\lambda = \omega_1 (100 - \rho_0) / \rho_0 \text{ วินาที}^{-1}$				$\lambda_{av} \text{ (วินาที}^{-1}\text{)}$			
	α_1 (เซนต์/°ซ)	α_2 (เซนต์/°ซ)	S (เซนต์/°ซ)	r	α_1 (เซนต์/°ซ)	α_2 (เซนต์/°ซ)	S (เซนต์/°ซ)	r	α_1 (เซนต์/°ซ)	α_2 (เซนต์/°ซ)	S (เซนต์/°ซ)	r
<u>จากการประมาณค่า γ</u>												
$\zeta = 2.23$	2.07	-0.0433	0.035	-0.8461	0.76	0.1386	0.024	0.9845	1.31	0.0592	0.021	0.9551
$\zeta = 1.99$	1.75	-0.0203	0.037	-0.6465	0.51	0.1343	0.024	0.9853	1.05	0.0650	0.017	0.9761
$\zeta = 1.67$	1.43	0.0020	0.026	0.1242	0.21	0.1209	0.027	0.9821	0.71	0.0670	0.013	0.9899
<u>จากการประมาณค่า a</u>												
$a = 0.62$	1.26	0.0064	0.025	0.4080	0.17	0.1181	0.026	0.9836	0.66	0.0673	0.014	0.9885

S = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสมการเส้นตรง

r = ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นิวตรอน เมื่อค่าเปลี่ยนวิกฤตเข้าใกล้จุดวิกฤตดับพลัง (reactor dynamics near prompt critical, $\rho \cong \beta$)

5.2.2.3 ความแตกต่างระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบดับพลัง ที่ค่า α_1 และ α_2 ต่าง ๆ ในย่านอุณหภูมิจนโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิง $40-60^\circ\text{C}$ โดยกำหนดให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงก่อนเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต (T_0) เท่ากับ 35°C และคงไว้ดังรูปที่ 5.2.2.15 พบว่า

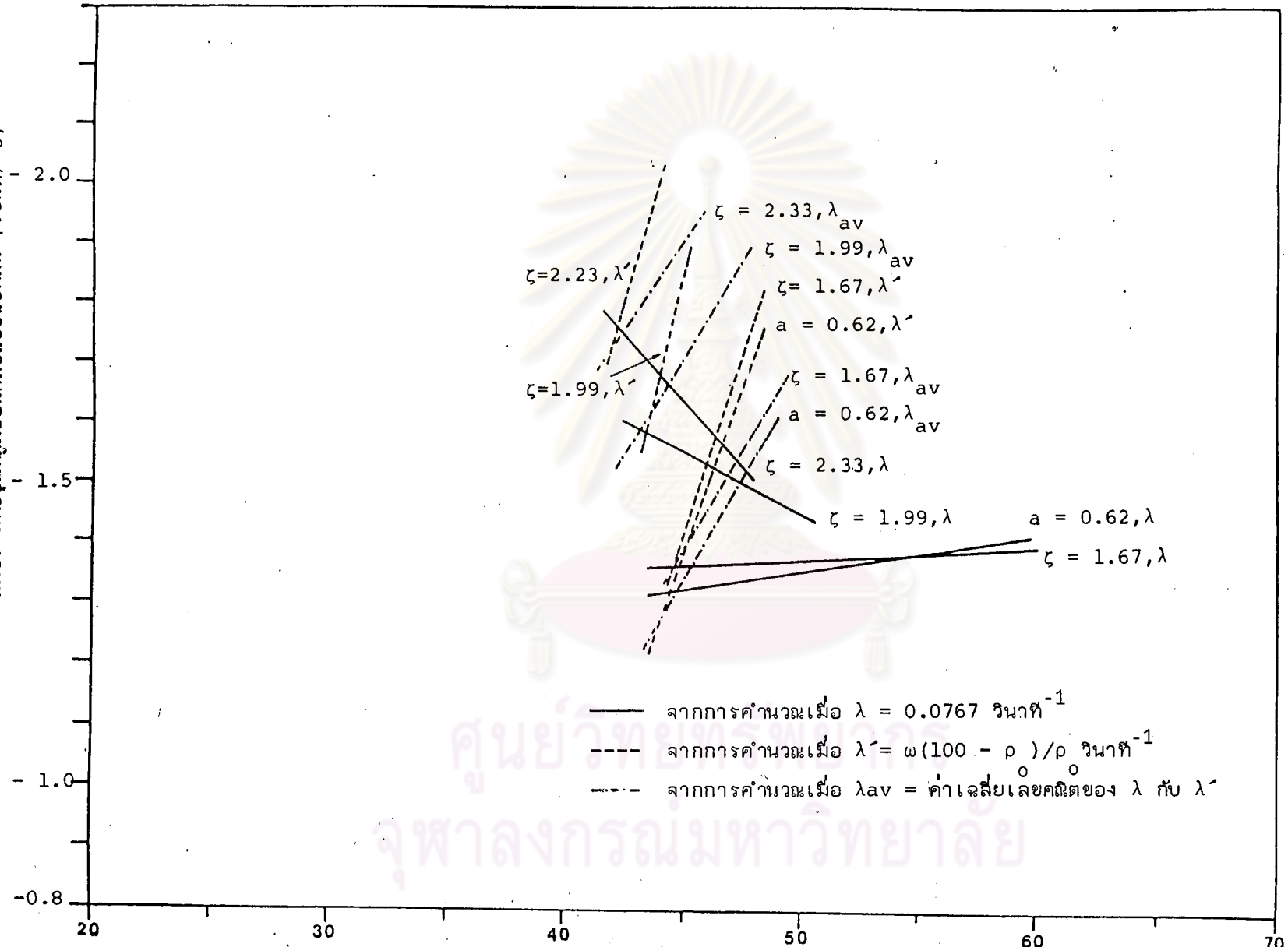
5.2.2.3.1 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบดับพลังที่ได้จากการประมาณค่า γ เมื่อ $\zeta = 1.67$ และจากการประมาณค่า a ซึ่งมีค่าคงที่ในการสลายตัวของนิวตรอนล่ากลุ่มเดียว 0.0767 วินาที⁻¹ มีค่าใกล้เคียงกับค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบดับพลังที่ได้คำนวณขึ้นโดยบริษัท เจเนอรัลอะตอมมิก (1, 7) และค่าจากการวิจัยของมหาวิทยาลัยอริโซนา (4)

5.2.2.3.2 ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด ผลของอุณหภูมิตั้งเชื้อเพลิงทำให้ค่าเปลี่ยนวิกฤตมีค่าลดลงจนมีค่าน้อยมาก จึงสามารถใช้ค่า $\lambda = 0.0767$ วินาที⁻¹ แทนนิวตรอนล่าทั้ง 6 กลุ่ม อธิบายการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของนิวตรอนได้ดีกว่าค่า λ ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเปลี่ยนวิกฤตเมื่อเริ่มต้น หรือค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ λ ซึ่งมีความมากกว่าที่เป็นจริง (ดูในหัวข้อที่ 3.11)

5.2.2.3.3 เมื่อใช้ค่า $\zeta = 1.67$ เป็นค่าพิคกิ้งแฟคเตอร์ของเครื่องปฏิกรณ์ มหาวิทยาลัยอริโซนา เพื่อทดสอบเทคนิคการวัดค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบดับพลัง ซึ่งทำให้ผลการวิจัยสอดคล้องกับการวิจัยของมหาวิทยาลัยอริโซนาโดยวิธีเดียวกัน จึงเป็นการสนับสนุนว่า เทคนิคการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม สามารถใช้หาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบดับพลังของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 ได้

5.2.2.3.4 ค่าพิคกิ้งแฟคเตอร์เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมีย้อนกลับแบบดับพลัง ไม่สามารถใช้ค่าพิคกิ้งแฟคเตอร์ซึ่งได้จากการประมาณค่าโดยตรง ต้องอาศัยเทคนิคการประมาณค่า a ซึ่งอ้างอิงการใช้งานของเครื่องปฏิกรณ์ที่แท้จริง ความสัมพันธ์ระหว่างค่า a กับค่าคงตัวเวลาในการถ่ายเทความร้อนของแท่งเชื้อเพลิงเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบสลับเส้น (เซนต์/°ซ)



รูปที่ 5.2.2.15 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบสลับเส้นเมื่อใช้ค่า α_1 และ α_2 ต่าง ๆ กัน

$$a = \frac{\gamma_m}{\zeta \gamma}$$

$$0.62 = \frac{\gamma_m}{\zeta \gamma}$$

ในกรณีที่กำหนดให้ $\gamma \equiv \gamma_m$ ดังนั้น

$$0.62 = \frac{1}{\zeta}$$

$$\text{นั่นคือ } \zeta = 1.61$$

ค่า ζ ดังกล่าวทำให้ผลการวิจัยได้ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน มีความถูกต้องยิ่งขึ้นซึ่งเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (จากสมการที่ 2.10.11)

$$\alpha_{\text{prompt}} = - (1.26 + 0.0064 T)$$

$$\text{หรือ } \alpha_{\text{prompt}} = - [1.26 + 0.0064 (\bar{T} - T_0)]$$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน กับอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง B1 ที่วัดได้ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ (จากสมการที่ 2.10.13)

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{prompt}} &= - [\alpha_1 + \alpha_2 a (T_f - T_0)] \\ &= - [1.26 + 0.004 (T_f - T_0)] \end{aligned}$$

ในการวิจัยกำหนดให้อุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้ เมื่อระดับกำลังของเครื่องปฏิกรณ์เริ่มต้นก่อนเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต (T_0) มีค่าเท่ากับอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิง ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิงที่วัดได้ และอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรจะมีค่าแตกต่างกันภายหลังจากการเพิ่มค่าเปลี่ยนวิกฤต ดังนั้นอุณหภูมิต่ำกว่า T_0

$$T_f \equiv \bar{T}$$

$$\text{นั่นคือ } \alpha_{\text{prompt}} = - [1.26 + 0.0064 (T_f - T_0)]$$

5.2.2.4: ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัน ขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุดจากการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อมที่ค่าเปลี่ยนวิกฤตประมาณ 30-50 เซนต์ แสดงไว้ในตารางที่

ตารางที่ 5.2.2.2 ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบจับพลัน จากการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม
ที่ค่าเปลี่ยนวิกฤตประมาณ 30-50 เซนต์

\hat{T}_f ($^{\circ}\text{ซ}$)	\hat{T} ($^{\circ}\text{ซ}$)	T_o ($^{\circ}\text{ซ}$)	α_{prompt} (เซนต์/ $^{\circ}\text{ซ}$)
66	54.6	36	- 1.38
67.2	55.3	36	- 1.38
67.2	55.0	35	- 1.39
68.4	55.7	35	- 1.39
66	53.2	32.4	- 1.39
69.6	56.5	35	- 1.40
67.2	54.4	33.6	- 1.39

ศูนย์วิทยุศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

α_{prompt} เฉลี่ย = - 1.39 เซนต์/ $^{\circ}\text{ซ}$

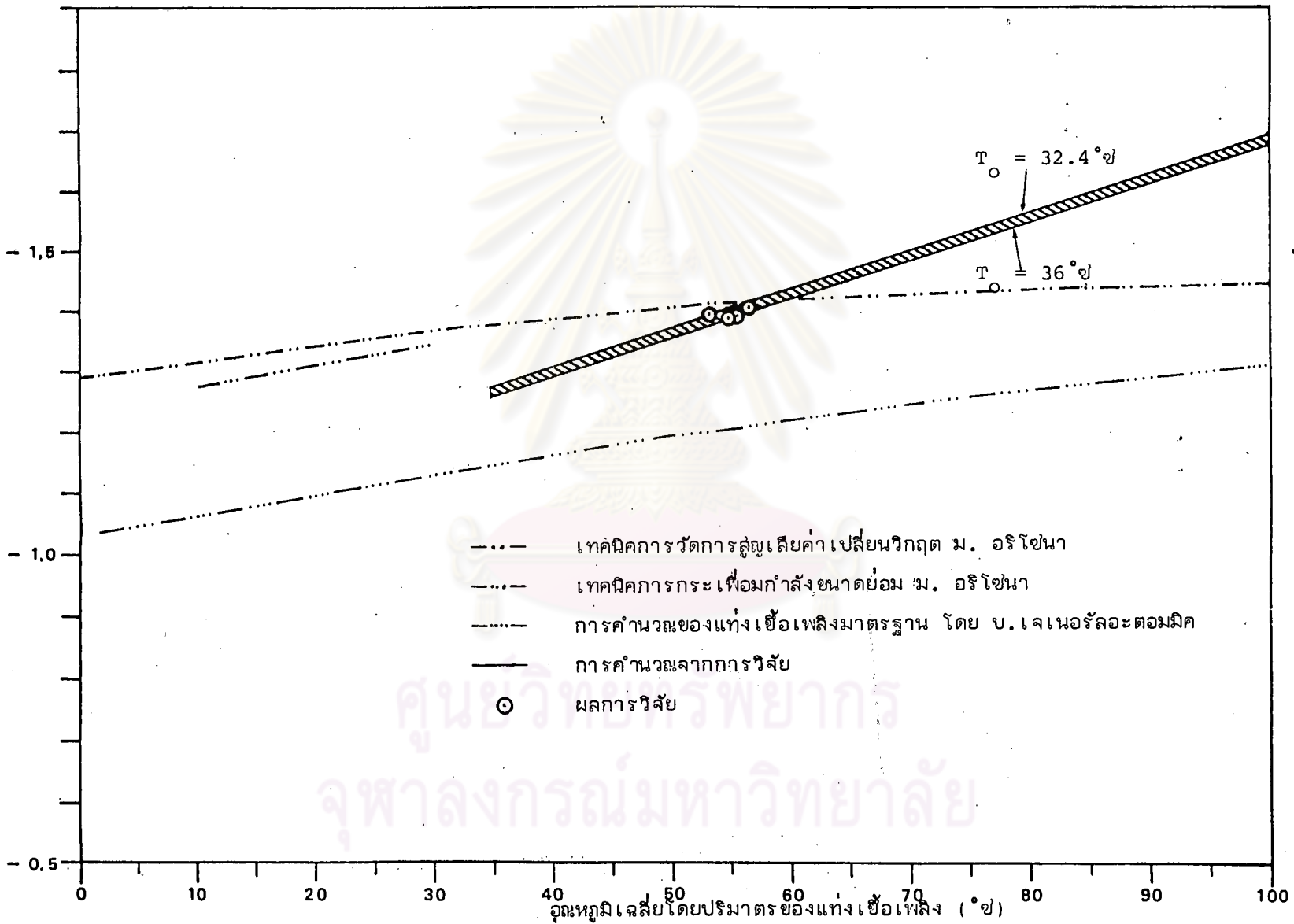
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัม กับอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่งเชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 แสดงไว้ดังรูปที่ 5.2.2.16 พบว่าที่อุณหภูมิค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัม มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐาน แต่มีการเพิ่มขึ้นได้สูงกว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิซึ่งได้จากการวิจัยขณะที่เครื่องปฏิกรณ์มีกำลังสูงสุด ค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัมมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเทคนิคการวัดการสูญเสียค่าเปลี่ยนวิกฤต และเทคนิคการกระเพื่อมกำลังขนาดย่อม ของมหาวิทยาลัยอริโซนา โดยมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณของแท่งเชื้อเพลิงแบบมาตรฐานประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับพลัม กับอุณหภูมิของแท่งเชื้อเพลิง B1 ที่วัดได้จากเทอร์โมคัพเปิดตัวกลาง แสดงไว้ในรูปที่ 5.2.2.17

ข้อมูลจากการวิจัย ผลการคำนวณ และตัวอย่างการคำนวณ แสดงไว้ในภาคผนวก จ.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

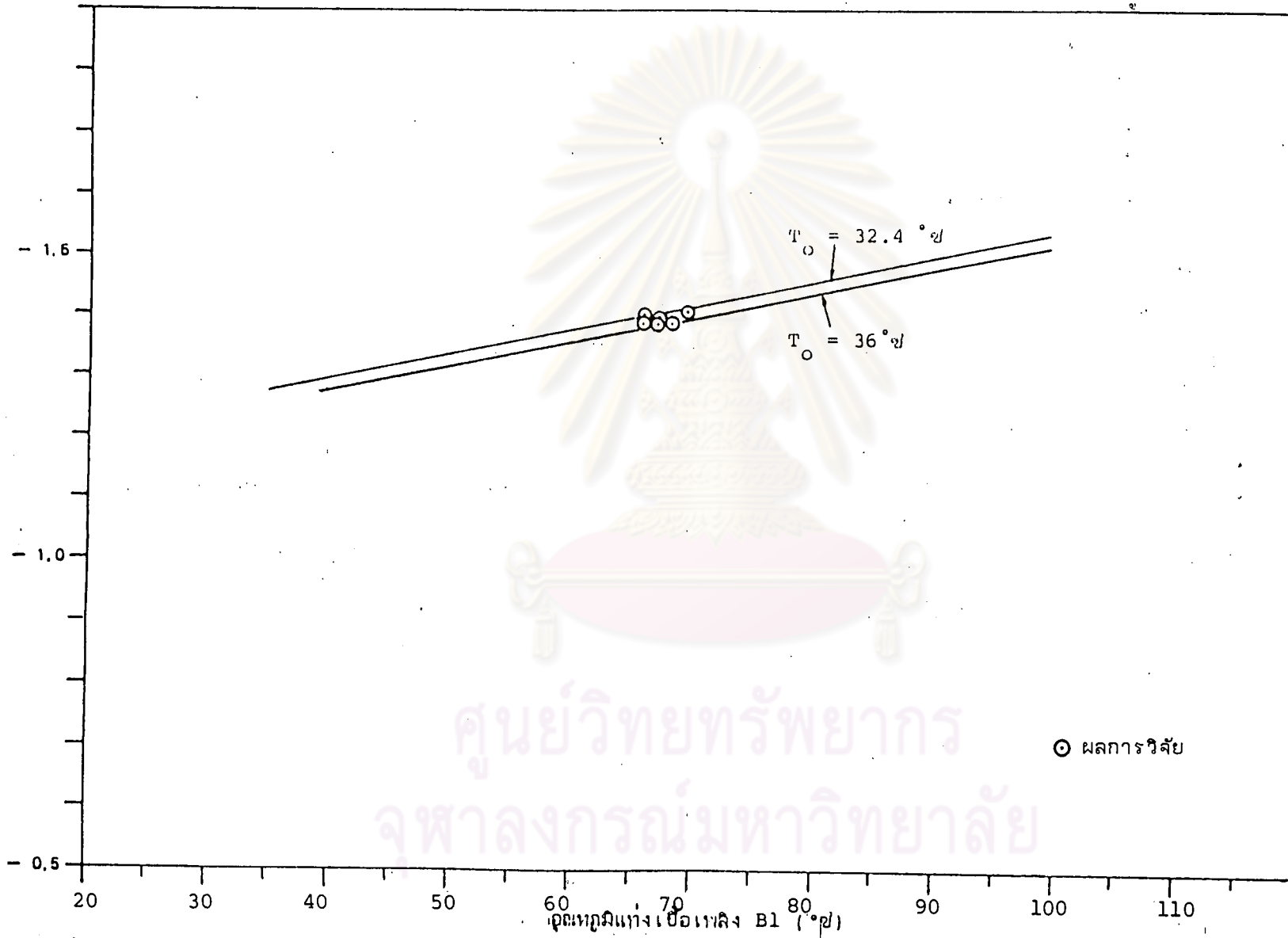
สัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับ (°ซ) / (°ซ)



ศูนย์วิทยุวิทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 5.2.2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิย้อนกลับแบบฉบับกับอุณหภูมิเฉลี่ยโดยปริมาตรของแท่ง เชื้อเพลิงในแกนเครื่องปฏิกรณ์

สัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่อการกลับแบบจับพอสัน (เซนต์/°ซ)



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 15.2.2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิต่อการกลับแบบจับพอสันกับอุณหภูมิของแก่งเข็มนาฬิกา B1 ที่วัดได้จากเทอร์โมคัปเปิลตัวกลาง