

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาแบบกราฟท์ดาวนด้วยคอมพิวเตอร์นั้น ปัจจัยสำคัญที่ควรจะศึกษาคือ ลักษณะการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจีตามรูปแบบที่กำหนด ระบบในการควบคุม ตัวแปรที่มีผลกระทบและตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ เพื่อใช้ในการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรมควบคุมให้ทำงานได้อย่างเหมาะสมเพื่อการทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ผลการทดลองมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 คุณสมบัติและองค์ประกอบของเชื้อเพลิง

ในกระบวนการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาใช้ก๊าซแอลพีจี (LPG gas) เป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ โดยให้เผาไหม้กับอากาศให้ได้ลักษณะการเผาไหม้ตามวัตถุประสงค์ และเพื่อให้การควบคุมการเผาไหม้ในทุกครั้งที่ทำการทดลองสามารถอ้างอิงได้จากองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่เหมือนกันจึงต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซแอลพีจีที่ใช้ด้วยเครื่อง gas chromatograph และเปรียบเทียบข้อมูลกับมาตรฐานของสำนักงานมาตรฐานอุตสาหกรรม โดยก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในการทำการทดลองทุกครั้งใช้ก๊าซแอลพีจีของการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปตท.) ขนาดถัง 48 กิโลกรัม ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

#### ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซแอลพีจี

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยโมล
Ethane	0.66
Propane	64.52
i-Butane	14.87
n-Butane	19.77
Pentane+	0.18
รวม	100.00

#### 4.2 การพัฒนาระบบและโปรแกรมสำหรับควบคุมการเผาไหม้ก๊าซด้วยคอมพิวเตอร์

ระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในงานวิจัยนี้มีส่วนที่พัฒนาขึ้นคือติดตั้งระบบควบคุมเพิ่มเติมให้กับเตาเผาประกอบด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ การดัดแปลงสัญญาณเพื่อใช้ในการควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์ การขยายสัญญาณ และวาล์วควบคุมแบบนิวแมติก (pneumatic control valve) เพื่อใช้ในการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีและอากาศ

##### 4.2.1 ตัวแปรและความสัมพันธ์ของตัวแปรในระบบควบคุม

การพัฒนาระบบควบคุมแบบอัตโนมัติ นั้น สิ่งที่สำคัญมากเป็นอันดับแรกคือต้องทราบถึงตัวแปรที่เข้าและออกจากระบบ รวมถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของอุปกรณ์ควบคุมและกระบวนการในแต่ละหน่วย เพื่อที่จะใช้ในการหาความสัมพันธ์รวมของทั้งระบบควบคุมได้ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

## 4.2.1.1 กระบวนการ (process)

ตัวแปรที่ต้องการควบคุมในระบบการเผาไหม้นี้คือ อุณหภูมิภายในเตาเผา โดยอุณหภูมิภายในเตาเผาจะเปลี่ยนแปลงได้จากพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจีกับอากาศ ดังนั้นตัวแปรเข้าของกระบวนการที่สามารถปรับได้ตัวที่ 1 คือ อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี และตัวแปรเข้าตัวที่ 2 คืออัตราการไหลของอากาศ ซึ่งก๊าซแอลพีจีที่จะเข้าเตาเผานั้นสามารถควบคุมแรงดันให้คงที่ที่ 0.6 กิโลกรัมแรงต่อตารางเซนติเมตร (ksc) และอุณหภูมิให้คงที่ที่ 65 องศาเซลเซียสได้โดยการผ่านก๊าซแอลพีจีเข้าเครื่องอุ่นก๊าซ (preheater) และอากาศที่จะเข้าเตาเผาจะมาจากเครื่องเป่าอากาศแรงดันสูงทำให้อุณหภูมิก๊าซของอากาศมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนักอยู่ในช่วง 60-70 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงสามารถสร้างความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าตัวที่ 1 และตัวแปรเข้าตัวที่ 2 ได้ดังนี้

- ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้กับอากาศอย่างสมบูรณ์ อากาศเกินพอไม่เกินร้อยละ 10 จะได้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศต่ออัตราการไหลโดยปริมาตรของก๊าซแอลพีจี เท่ากับ 39:1

- ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้กับอากาศอย่างไม่สมบูรณ์ เกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ความเข้มข้นในช่วง 200-250 ส่วนในล้านส่วน (ppm) จะได้อัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศต่ออัตราการไหลโดยปริมาตรของก๊าซแอลพีจี เท่ากับ 30:1 อากาศเกินพอไม่เกินร้อยละ 4

จากความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าทั้งสองทำให้สามารถลดตัวแปรเข้าให้เหลือเพียงตัวเดียวได้ โดยเลือกอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีให้เป็นตัวแปรเข้าที่สามารถควบคุมได้ของกระบวนการและให้อัตราการไหลของอากาศเป็นตัวแปรเข้าที่จะถูกควบคุมโดยเป็นสัดส่วนกับอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีดังกล่าวมาแล้วสำหรับการเผาไหม้ทั้งสองรูปแบบ ดังนั้นตัวแปรออกที่สามารถวัดค่าได้ของกระบวนการคืออุณหภูมิภายในเตาเผานั้นเอง เมื่อทดลองหาความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและตัวแปรออกที่กำหนดโดยใช้วิธีทดสอบด้วย step (step test) พบว่าตัวแปรทั้งสองจะมีความสัมพันธ์เป็นสมการอันดับที่ 1 ดังนี้

$$\tau_p \frac{dT}{dt} + T = K_p Q_{LPG} \quad \dots (4.1)$$

แปลงให้อยู่ในรูปของ Laplace domain จะได้ transfer function ของกระบวนการคือ

$$G_p(s) = \frac{T(s)}{Q_{LPG}(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad \text{°C}/(\text{Lit}/\text{min}) \quad \dots (4.2)$$

- เมื่อ  $T$  คือ อุณหภูมิเฉลี่ยภายในเตาเผา, °C  
 $Q_{LPG}$  คือ อัตราการไหลโดยปริมาตรของก๊าซแอลพีจี, Lit/min  
 $K_p$  คือ ค่าคงที่ของกระบวนการ (process gain), °C/(Lit/min)  
 $\tau_p$  คือ เวลาคงที่ของกระบวนการ (time constant), min  
 $G_p(s)$  คือ transfer function ของกระบวนการ

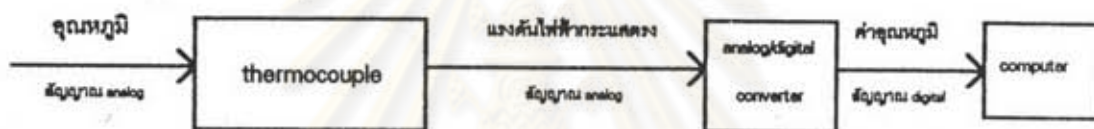
จากการทดสอบด้วย step สามารถหาค่าคงที่และเวลาคงที่เฉลี่ยของกระบวนการได้ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าคงที่และเวลาคงที่ของกระบวนการ

ช่วงอุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ของกระบวนการ $K_p \left( \frac{\text{°C}}{\text{Lit}/\text{min}} \right)$	เวลาคงที่เฉลี่ย ของกระบวนการ $\tau_p$ (min)
350 - 550	19.16	15.61
550 - 800	20.82	
800 - 1050	21.85	
1050 - 1350	24.14	

#### 4.2.1.2 อุปกรณ์วัดสัญญาณ (measuring sensor)

อุปกรณ์วัดสัญญาณในระบบควบคุมนี้คือ thermocouple ซึ่งจะรับสัญญาณเข้าเป็นอุณหภูมิภายในเตาเผา และส่งสัญญาณออกเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง thermocouple ที่ใช้กับระบบควบคุมนี้เป็นแบบ R (R type) สามารถรับสัญญาณเข้าได้ในช่วง 0-1800 องศาเซลเซียส และส่งสัญญาณออกในช่วง 0-22 มิลลิโวลต์ แต่ในการใช้งานจริงสัญญาณออกเป็นแรงดันไฟฟ้านี้จะถูกส่งให้กับเครื่องควบคุมในที่นี้คือเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะมีการแปลงสัญญาณจากสัญญาณ analog เป็น digital คือสามารถแปลงจากสัญญาณไฟฟ้ากระแสตรงนี้กลับเป็นค่า digital เพื่อการใช้งานได้ ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ออกจาก thermocouple กับค่าอุณหภูมิ เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถทราบค่าอุณหภูมิได้ทันที แสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การแปลงค่าสัญญาณของอุปกรณ์วัดสัญญาณ

ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าอุณหภูมิที่คอมพิวเตอร์คำนวณได้เป็นตัวแปรออกแทนค่าแรงดันไฟฟ้า เหมือนกับว่า thermocouple เป็นเพียงอุปกรณ์ผ่านสัญญาณ อุณหภูมิ analog เป็นสัญญาณอุณหภูมิ digital เท่านั้น ความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและตัวแปรออกของอุปกรณ์วัดสัญญาณแสดงด้วย transfer function ดังนี้

$$G_m(s) = \frac{T(s)}{T(s)} = 1 \quad \text{°C/°C} \quad \dots (4.3)$$

เมื่อ  $G_m(s)$  คือ transfer function ของอุปกรณ์วัดสัญญาณ

#### 4.2.1.3 เครื่องควบคุม (controller)

คอมพิวเตอร์ควบคุมจะรับสัญญาณเข้าจาก thermocouple เป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ผ่านการแปลงสัญญาณ analog เป็น digital ได้เป็นค่าอุณหภูมิ ตัวเลข แล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิ set point เป็นค่าอุณหภูมิต่าง เพราะฉะนั้นตัวแปรเข้าของเครื่องควบคุมคือ ค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในเตาเผากับอุณหภูมิ set point ( $E, ^\circ\text{C}$ ) ส่วนคอมพิวเตอร์จะส่งสัญญาณออกเป็นสัญญาณ digital (c, number) เป็นค่าตัวเลขอยู่ในช่วง 0-4095 ความสัมพันธ์ของตัวแปรเข้าและออกของเครื่องควบคุมจะเปลี่ยนไปตามรูปแบบของเครื่องควบคุมว่าจะใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับแบบใดจาก 3 แบบคือเครื่องควบคุมแบบ P, PI และ PID transfer function ทั่วไปของเครื่องควบคุมแสดงดังสมการ

$$G_c(s) = \frac{c(s)}{e(s)} \quad \text{number}/^\circ\text{C} \quad \dots (4.4)$$

เมื่อ  $G_c(s)$  คือ transfer function ของเครื่องควบคุม

#### 4.2.1.4 อุปกรณ์แปลงสัญญาณ digital เป็นสัญญาณ analog (digital / analog converter)

สัญญาณควบคุมที่ออกจากคอมพิวเตอร์จะเป็นสัญญาณ digital ถ้าต้องการส่งสัญญาณนี้ไปควบคุมอุปกรณ์อื่นจำเป็นต้องแปลงสัญญาณนี้ให้เป็นสัญญาณ analog คือแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง โดยอุปกรณ์นี้จะแปลงสัญญาณเข้าตัวเลขในช่วง 0-4095 ให้เป็นสัญญาณออกแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ( $m'$ ) ในช่วง 0-10 โวลต์ สามารถแสดงเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$m' = 2.5112 \times 10^{-3} c \quad \dots (4.5)$$

และ

$$G_u(s) = \frac{m'(s)}{c(s)} = 2.5112 \times 10^{-3} \quad \text{volts}/\text{number} \quad \dots (4.6)$$

เมื่อ  $G_u(s)$  คือ transfer function ของ converter

#### 4.2.1.5 อุปกรณ์แปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นสัญญาณลม

(electronic-pneumatic transducer)

สัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่ออกจากอุปกรณ์แปลงสัญญาณ digital เป็นสัญญาณ analog นั้น ก่อนที่จะส่งไปควบคุมวาล์วควบคุมจะต้องแปลงให้เป็นสัญญาณแรงดันลมก่อน โดยจะแปลงจากสัญญาณเข้าแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 2-10 โวลต์ ให้เป็นสัญญาณออกแรงดันลม (m) ในช่วง 3-15 ปอนด์แรงต่อตารางนิ้ว (psi) แสดงเป็นความสัมพันธ์ดังนี้

$$m = 1.4375m' + 0.125 \quad \dots (4.7)$$

และ

$$G_{12}(s) = \frac{m(s)}{m'(s)} = 1.4375 \quad \text{psi/volts} \quad \dots (4.8)$$

เมื่อ

$G_{12}(s)$  คือ transfer function ของ E/P transducer

#### 4.2.1.6 อุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย (final control element)

อุปกรณ์ควบคุมสุดท้ายในระบบควบคุมนี้คือวาล์วควบคุมแบบนิวแมติก ตัวแปรเข้าคือสัญญาณแรงดันลมจาก E/P transducer ส่วนตัวแปรออกคืออัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี แสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$Q_{LPG} = 6.6984m + 15.3245 \quad \dots (4.9)$$

และ

$$G_f(s) = \frac{Q_{LPG}(s)}{m(s)} = 6.6984 \quad \left(\frac{\text{L}^3/\text{min}}{\text{psi}}\right) \quad \dots (4.10)$$

เมื่อ

$G_f(s)$  คือ transfer function ของอุปกรณ์ควบคุมสุดท้าย

#### 4.2.2 การปรับแต่งค่าคงที่ของเครื่องควบคุม

เมื่อได้ transfer function ของอุปกรณ์และกระบวนการในแต่ละหน่วยแล้ว สามารถหา open loop transfer function ของทั้งระบบควบคุมได้ดังนี้

$$G_{OL}(s) = G_p(s) \cdot G_m(s) \cdot G_c(s) \cdot G_u(s) \cdot G_{I2}(s) \cdot G_f(s)$$

$$= \frac{0.02418 \cdot K_p}{15.61s+1} G_c(s) \quad \dots (4.11)$$

ทำการปรับแต่งค่าคงที่ของเครื่องควบคุมด้วยวิธีของ Ziegler-Nichols โดยการสมมติ dead time เป็น 0.5 นาที จะได้ open loop transfer function ใหม่และผลการปรับแต่งดังนี้

$$G_{OL}(s) = \frac{0.02418 \cdot K_p \cdot K_o \cdot e^{-0.5s}}{15.61s+1} \quad \dots (4.12)$$

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional

ช่วงอุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional proportional gain, $K_c$ (number/°C)
350 - 550	53.615
550 - 800	49.341
800 - 1050	47.015
1050 - 1350	42.555



ตารางที่ 4.4 ค่าคงที่และเวลาคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral

ช่วงอุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ของเครื่องควบคุม proportional gain, $K_C$ (number/°C)	เวลาคงที่ของเครื่องควบคุม integral time constant, $\tau_I$ (นาที)
350 - 550	48.741	1.646
550 - 800	44.855	
800 - 1050	42.741	
1050 - 1350	38.686	

ตารางที่ 4.5 ค่าคงที่และเวลาคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative

ช่วงอุณหภูมิ (°C)	ค่าคงที่ proportional gain, $K_C$ (number/°C)	เวลาคงที่ integral time constant $\tau_I$ (นาที)	เวลาคงที่ derivative time constant $\tau_D$ (นาที)
350 - 550	63.077	0.987	0.247
550 - 800	58.048		
800 - 1050	55.311		
1050 - 1350	50.064		

#### 4.3 การทดสอบการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาด้วยเครื่องควบคุมอัตโนมัติ

เมื่อได้ความสัมพันธของการควบคุมที่จะใช้แล้ว จึงได้เขียนโปรแกรมควบคุมเพื่อทำการทดสอบเครื่องควบคุมและค่าการปรับแต่งเครื่องควบคุมในแต่ละแบบ โดยส่วนของการควบคุมจะใช้สมการความสัมพันธ์ของเครื่องควบคุมแบบช่วง ๆ (discrete controller) ในรูปของสมการความเร็ว (velocity form) เวลาในการชักตัวอย่าง (sampling time) เท่ากับ 1 นาที ทดสอบโดยการเปลี่ยน set point แบบ step ที่อุณหภูมิ 500, 700, 900 และ 600 °C ตามลำดับ

#### 4.3.1 เครื่องควบคุมแบบ proportional

เครื่องควบคุมแบบ P มีสมการความสัมพันธ์คือ

$$\Delta c = c_n - c_{n-1} = K_c \varepsilon_n \quad \dots (4.13)$$

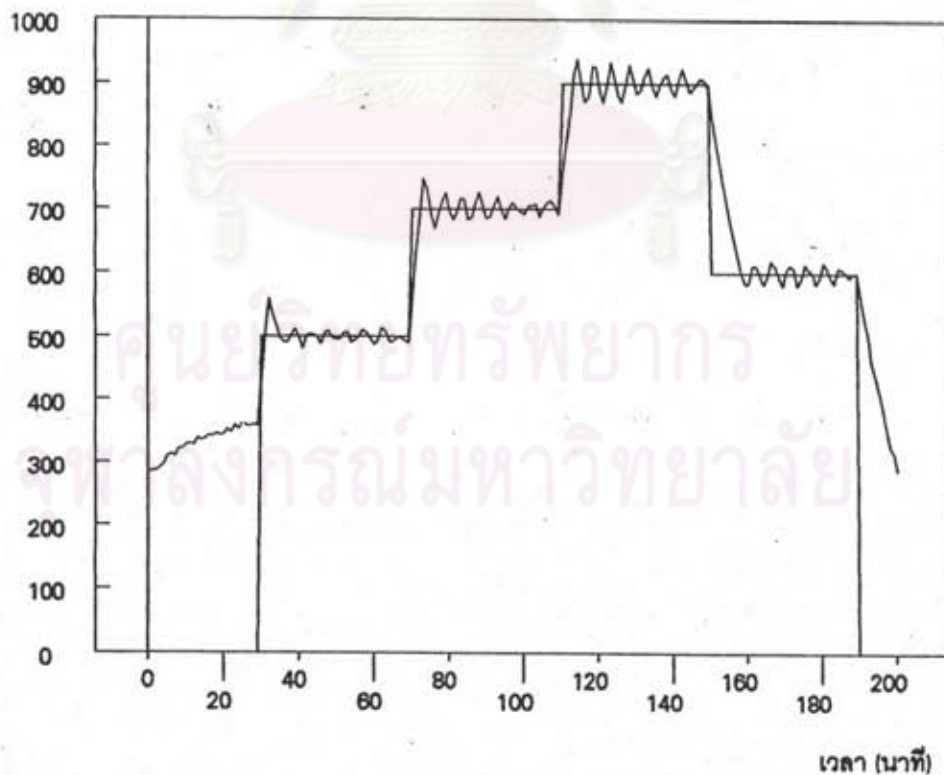
หรือ

$$c_n = K_c \varepsilon_n + c_{n-1} \quad \dots (4.14)$$

เมื่อ  $\Delta c$  คือ ผลต่างของสัญญาณควบคุม  
 $c_n, c_{n-1}$  คือ ค่าสัญญาณควบคุมปัจจุบันและครั้งที่แล้วตามลำดับ  
 $\varepsilon_n$  คือ ค่าความต่างของอุณหภูมิที่กำหนดกับอุณหภูมิที่วัดได้จริง  
 ที่เวลาปัจจุบัน

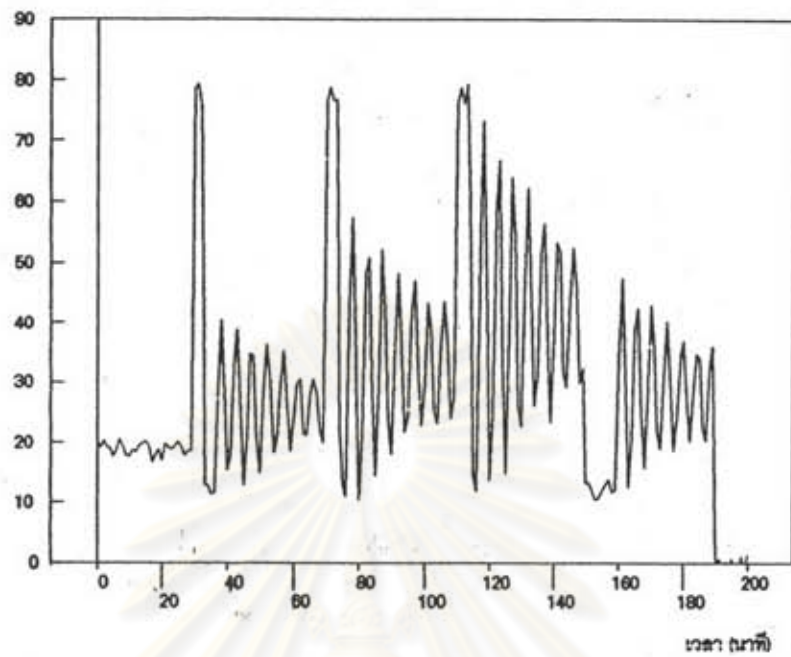
ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4

อุณหภูมิภายในเตาเผา (องศาเซลเซียส)



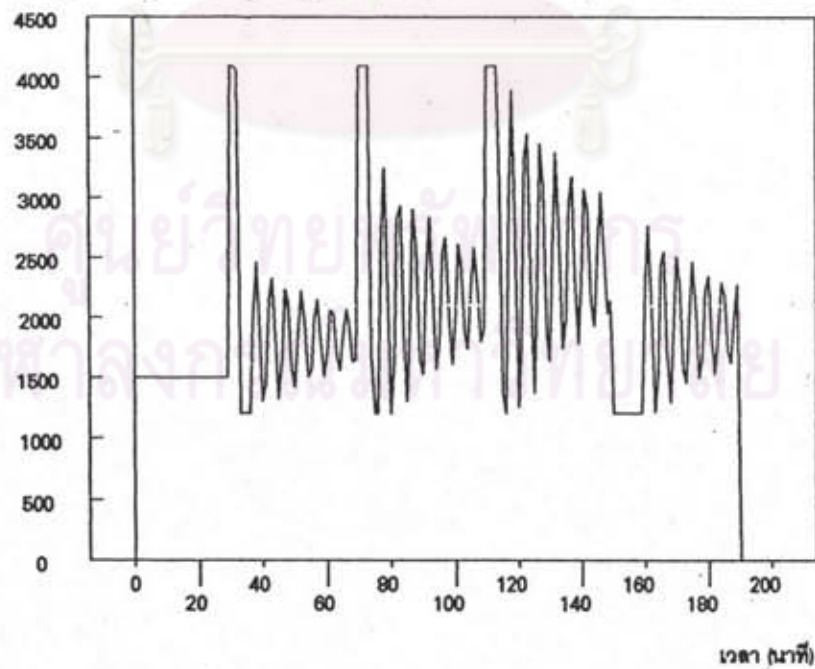
รูปที่ 4.2 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ P

อัตราการไหลของก๊าซแอลทีจี (ลิตร/นาที)



รูปที่ 4.3 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ P

สัญญาณ digital จากเครื่องควบคุม



รูปที่ 4.4 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ P

จากผลการทดสอบเครื่องควบคุมแบบ P จะพบว่าเครื่องควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเตาเผาได้ตาม set point ที่ตั้งไว้แต่จะมีการแกว่งของอุณหภูมิค่อนข้างสูง

#### 4.3.2 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral

เครื่องควบคุมแบบ PI มีสมการความสัมพันธ์คือ

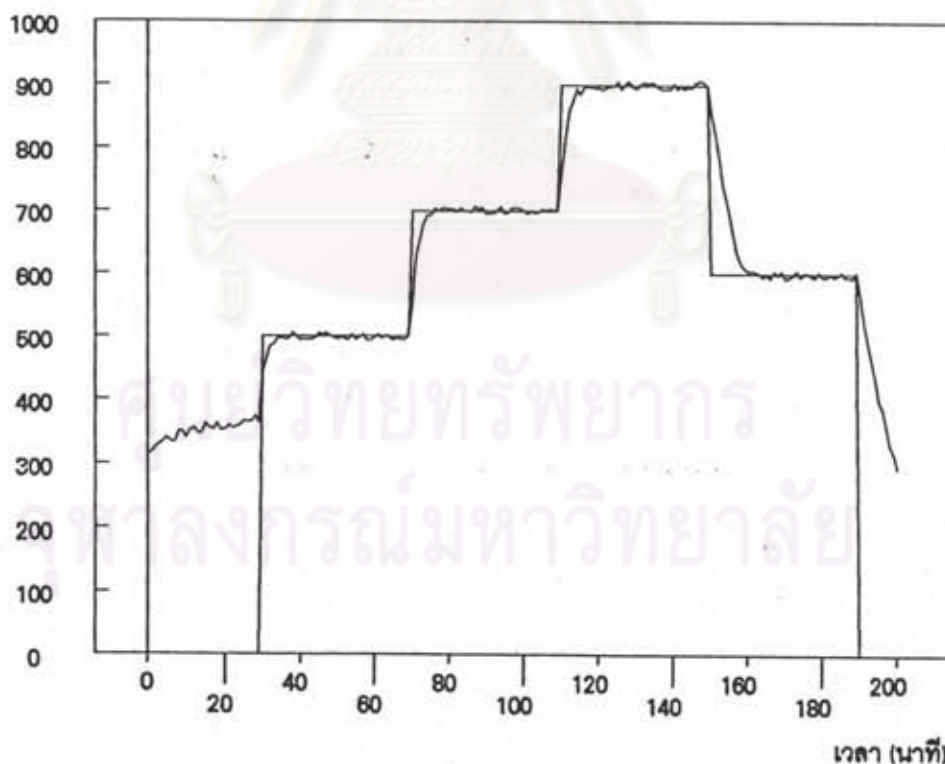
$$\Delta c_n = c_n - c_{n-1} = K_c \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} \right) \varepsilon_n - K_c \varepsilon_{n-1} \quad \dots (4.15)$$

หรือ

$$c_n = K_c \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} \right) \varepsilon_n - K_c \varepsilon_{n-1} + c_{n-1} \quad \dots (4.16)$$

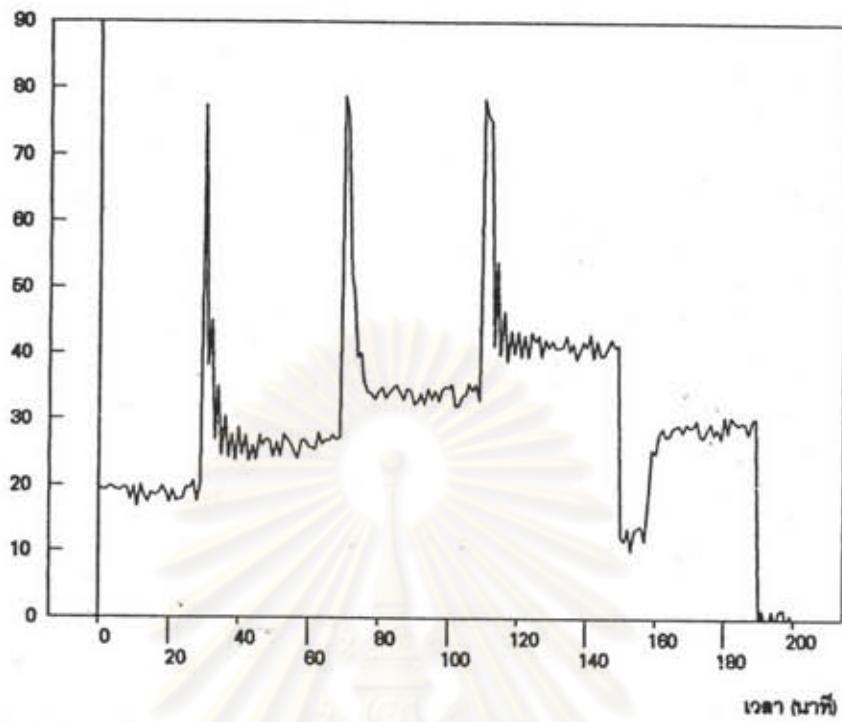
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

อุณหภูมิภายในเตาเผา (องศาเซลเซียส)



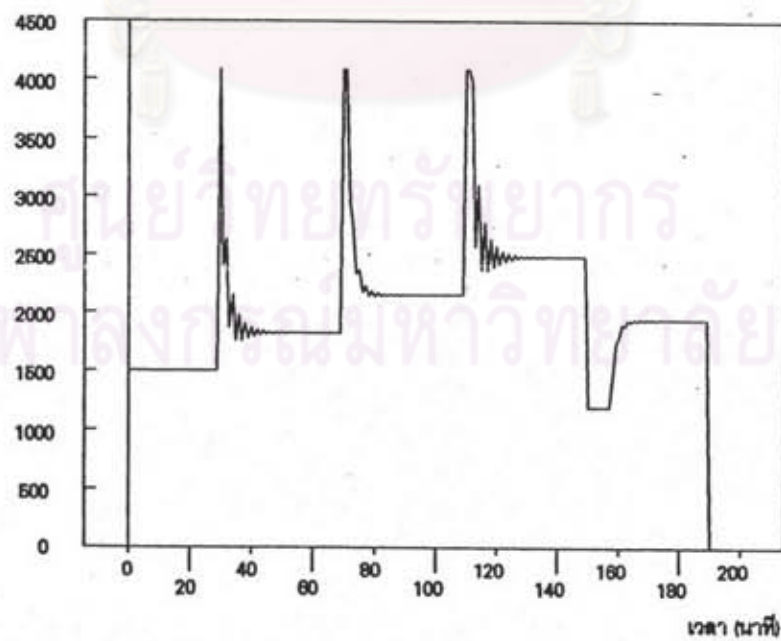
รูปที่ 4.5 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PI

อัตราการใช้ของแก๊สแอลพีจี (ลิตร/นาที)



รูปที่ 4.6 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PI

สัญญาณ digital จากเครื่องควบคุม



รูปที่ 4.7 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PI

### 4.3.3 เครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative

เครื่องควบคุมแบบ PID มีสมการความสัมพันธ์ดังนี้

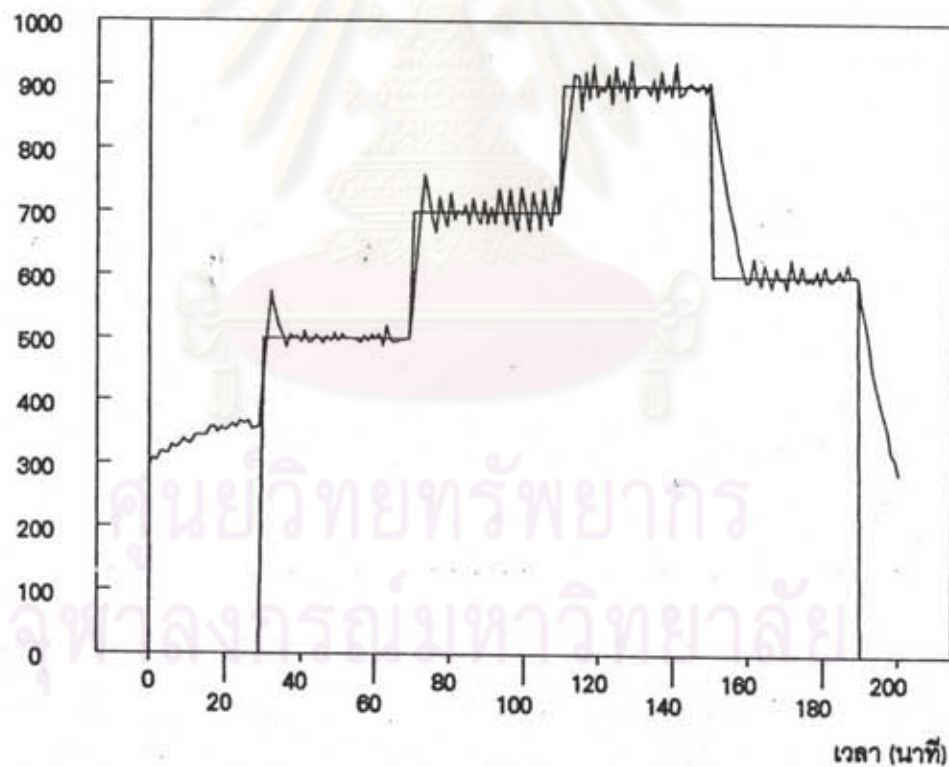
$$\Delta c_n = c_n - c_{n-1} = K_c \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} + \frac{\tau_D}{T} \right) \varepsilon_n - K_c \left( 1 + \frac{2\tau_D}{T} \right) \varepsilon_{n-1} + K_c \frac{\tau_D}{T} \varepsilon_{n-2} \quad \dots (4.17)$$

หรือ

$$c_n = K_c \left( 1 + \frac{T}{\tau_I} + \frac{\tau_D}{T} \right) \varepsilon_n - K_c \left( 1 + \frac{2\tau_D}{T} \right) \varepsilon_{n-1} + K_c \frac{\tau_D}{T} \varepsilon_{n-2} + c_{n-1} \quad \dots (4.18)$$

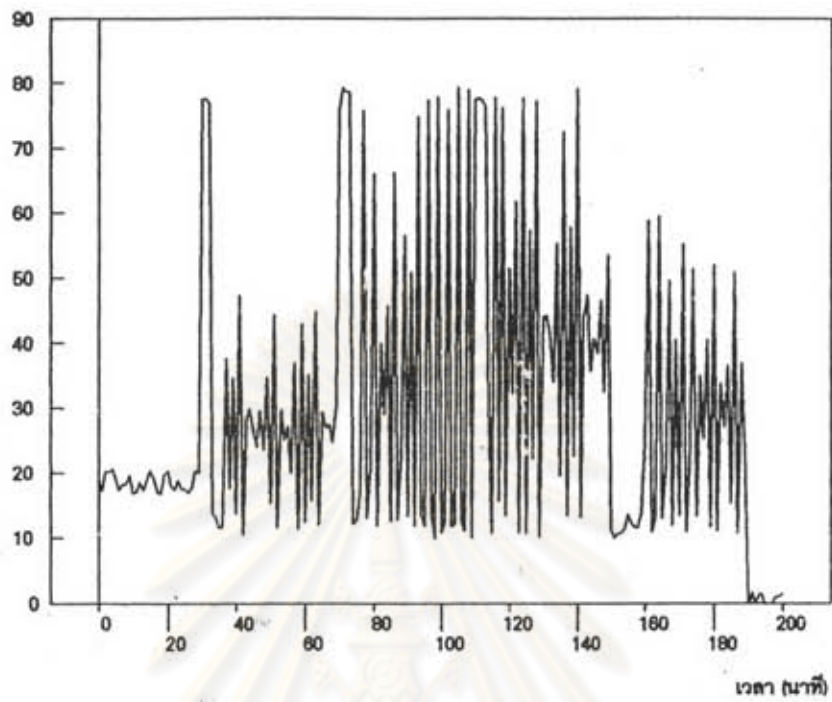
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10

อุณหภูมิภายในเตาเผา (องศาเซลเซียส)



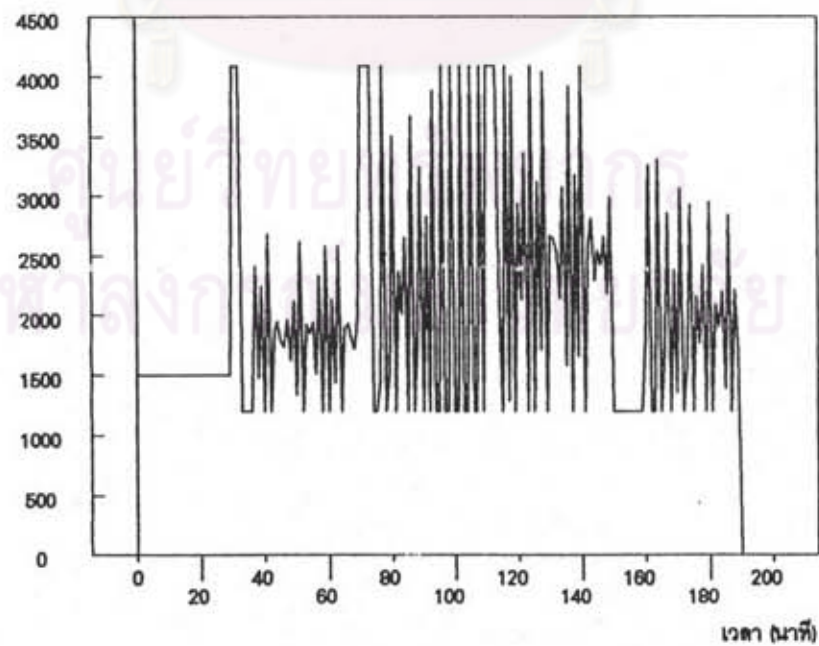
รูปที่ 4.8 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID

อัตราการใช้ของก๊าซแอสฟีซี (ลิตร/นาที)



รูปที่ 4.9 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID

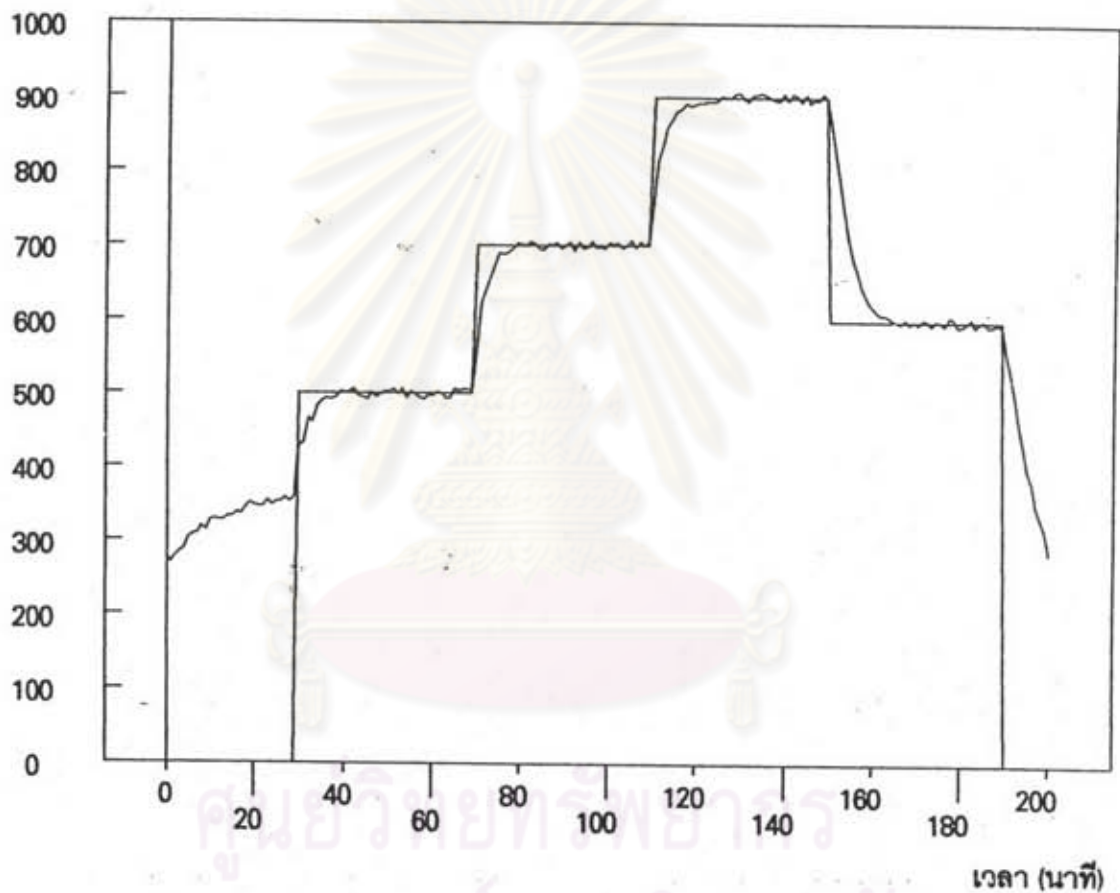
สัญญาณ digital จากเครื่องควบคุม



รูปที่ 4.10 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID

จากผลการทดสอบเครื่องควบคุมแบบ PID พบว่า เครื่องควบคุมสามารถควบคุมอุณหภูมิให้ได้ set point ที่ต้องการแต่อุณหภูมิมีการแกว่งสูงมาก และสูงกว่าเครื่องควบคุมแบบ P ดังนั้นจึงทำการทดสอบอีกครั้งโดยลดค่า proportional gain ลงให้เท่ากับค่า proportional gain ของเครื่องควบคุมแบบ PI แต่ค่าคงที่ของเวลายังใช้ค่าเดิม ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13

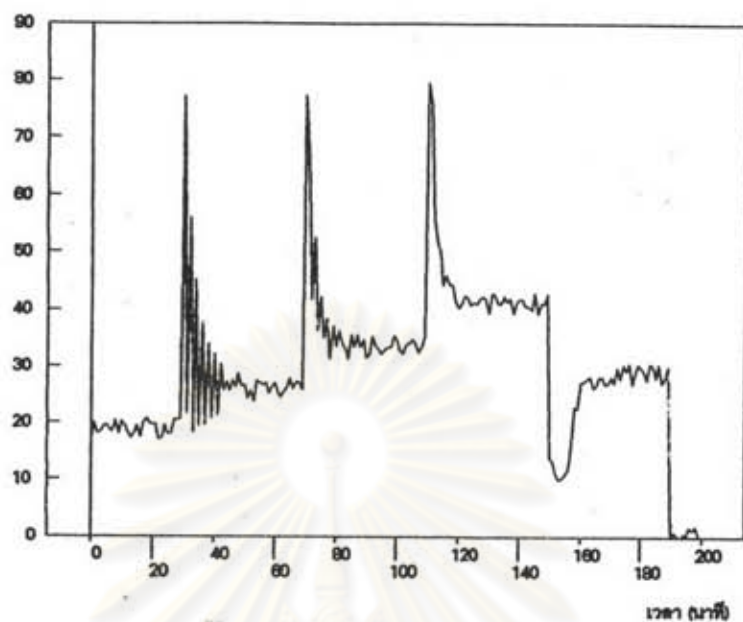
อุณหภูมิภายในเตาเผา (องศาเซลเซียส)



รูปที่ 4.11 ผลของตัวแปรออกของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID  
ปรับค่า proportional gain ให้เท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI

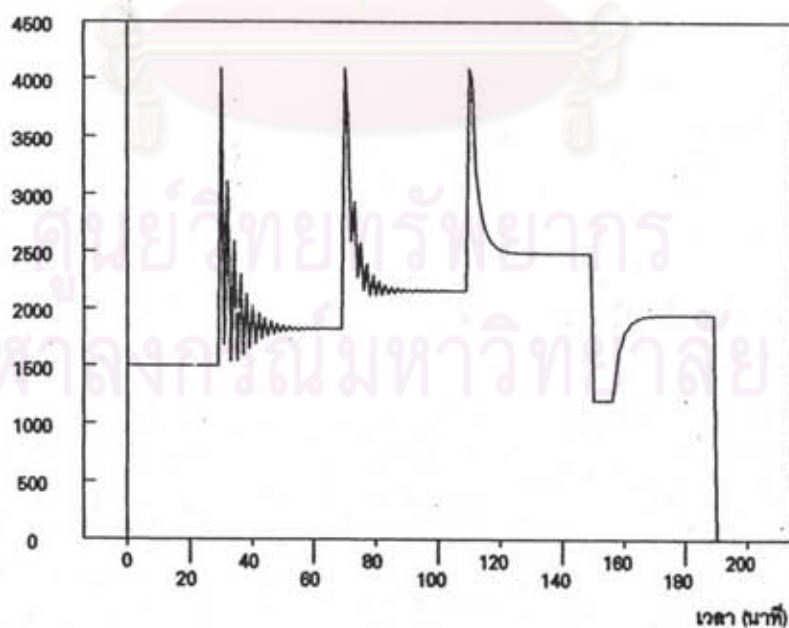


อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน (ลิตร/นาที)



รูปที่ 4.12 ผลของตัวแปรเข้าของกระบวนการกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID  
ปรับค่า proportional gain ให้เท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI

สัญญาณ digital จากเครื่องควบคุม



รูปที่ 4.13 สัญญาณควบคุมกับเวลา เครื่องควบคุมแบบ PID  
ปรับค่า proportional gain ให้เท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI

ผลการทดสอบของเครื่องควบคุมแบบ PID หลังจากปรับค่า proportional gain ให้เท่ากับเครื่องควบคุมแบบ PI จะพบว่า สามารถควบคุมอุณหภูมิให้ได้ตาม set point และลดการแกว่งของอุณหภูมิ แต่การตอบสนองจะช้ากว่าเครื่องควบคุมแบบ PI

#### 4.3.4 การวิเคราะห์เชิงสถิติของผลทดสอบเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ

จากผลการทดสอบเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบได้ชัดเจนยิ่งขึ้นจึงได้คำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของผลต่างของอุณหภูมิ set point กับอุณหภูมิที่ควบคุมได้จริง ผลการคำนวณแสดงดังตารางที่ 4.6 และ 4.7

ตารางที่ 4.6 ผลการคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอุณหภูมิที่ควบคุม (องศาเซลเซียส) ของเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ

อุณหภูมิ set point (°C)	เครื่องควบคุม แบบ P	เครื่องควบคุม แบบ PI	เครื่องควบคุม แบบ PID	เครื่องควบคุม แบบ PID ลดค่า proportional gain
500	7.50	3.99	6.43	4.73
700	11.53	3.77	21.87	3.91
900	16.19	4.73	16.60	4.69
600	11.27	4.32	12.60	5.73

ตารางที่ 4.7 ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของอุณหภูมิต่าง (องศาเซลเซียส) ของเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ

อุณหภูมิ set point (°C)	เครื่องควบคุม แบบ P	เครื่องควบคุม แบบ PI	เครื่องควบคุม แบบ PID	เครื่องควบคุม แบบ PID ลดค่า proportional gain
500	1.30	1.56	0.31	0.26
700	0.85	0.22	3.79	0.59
900	0.46	0.74	0.78	0.23
600	0.27	0.67	2.18	0.20

#### 4.3.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบในด้านการใช้พลังงาน

จากผลการทดลองเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ สามารถนำข้อมูลของอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีที่ถูกสั่งปรับเพื่อรักษาอุณหภูมิเตาเผาให้ได้ตามที่ต้องการ จำนวนเพื่อเปรียบเทียบในด้านการใช้วัตถุดิบ แสดงดังตารางที่ 4.8 และ 4.9

ตารางที่ 4.8 ผลการใช้ก๊าซแอลพีจีเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ set point ที่ต้องการ (ลิตร)

อุณหภูมิ set point (°C)	ช่วงเวลาใน การควบคุม (นาที)	เครื่อง ควบคุม แบบ P	เครื่อง ควบคุมแบบ PI	เครื่อง ควบคุม แบบ PID	เครื่อง ควบคุม แบบ PID ลดค่า proportional gain
500	40	1144.57	1141.91	1164.54	1146.96
700	40	1466.86	1490.67	1496.71	1471.96
900	40	1774.72	1772.04	1781.55	1773.87
600	40	1009.47	1007.07	994.62	995.34
<b>รวม</b>	<b>160</b>	<b>5395.62</b>	<b>5411.69</b>	<b>5437.41</b>	<b>5388.14</b>

ตารางที่ 4.9 ผลการใช้ก๊าซแอลพีจีเพื่อควบคุมอุณหภูมิให้ได้ set point ที่ต้องการ (กิโลกรัม)

อุณหภูมิ set point (°C)	ช่วงเวลาใน การควบคุม (นาที)	เครื่อง ควบคุม แบบ P	เครื่อง ควบคุมแบบ PI	เครื่อง ควบคุม แบบ PID	เครื่อง ควบคุม แบบ PID ลดค่า proportional gain
500	40	3.33	3.32	3.39	3.34
700	40	4.27	4.33	4.35	4.28
900	40	5.16	5.15	5.18	5.16
600	40	2.94	2.93	2.89	2.89
<b>รวม</b>	<b>160</b>	<b>15.70</b>	<b>15.73</b>	<b>15.81</b>	<b>15.67</b>

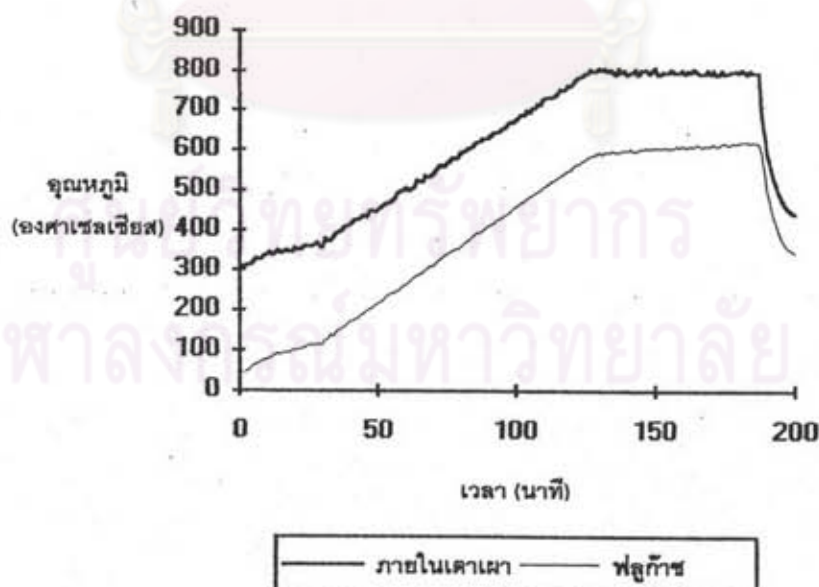
#### 4.4 ผลการทดลองควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในเตาเผาด้วยเครื่องควบคุมแบบ PI

หลังจากทดสอบเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบแล้วพบว่าเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบถึงแม้จะให้ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของผลต่างของอุณหภูมิค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่เครื่องควบคุมแบบ PI จะให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด อีกทั้งในด้านปริมาณการใช้ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้เพื่อให้ได้อุณหภูมิตาม set point ที่ตั้งไว้ เครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบยังใช้ปริมาณก๊าซแอลพีจีที่ใกล้เคียงกัน แต่ในแง่ของผลตอบสนองจะพบว่าเครื่องควบคุมแบบ PI จะให้ผลตอบสนองโดยเข้าสู่ set point ที่ตั้งไว้ในแต่ละช่วงได้เร็วที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้เครื่องควบคุมแบบ PI ใช้ในการทดลองควบคุมการเผาไหม้จริง โดยได้ทดลองควบคุมการเผาไหม้เพื่อใช้ในการเผาผลิตภัณฑ์เซรามิกทั้งหมด 3 แบบ ดังนี้

##### 4.4.1 ทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 800 °C

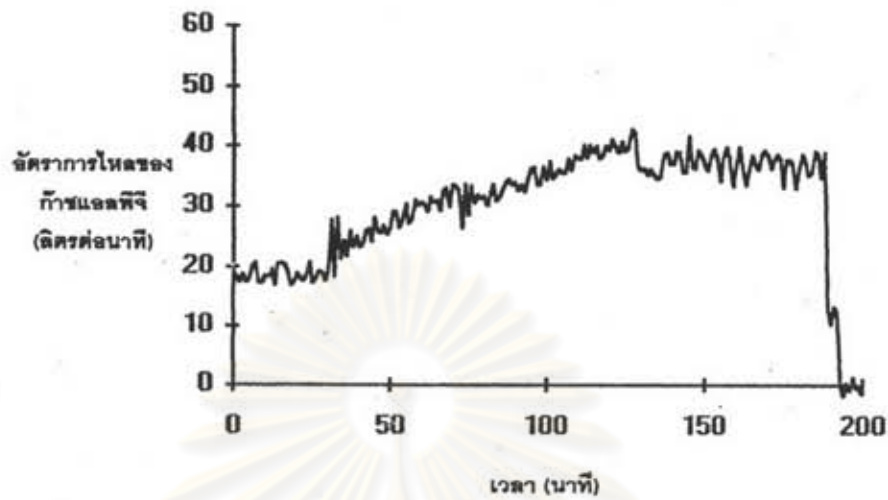
ควบคุมการเผาไหม้แบบสมบูรณ์โดยแบ่งเป็นสองช่วงคือช่วงเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 270 °C ต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 800 °C และช่วงรักษาอุณหภูมิ 800 °C เป็นเวลา 60 นาที

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14



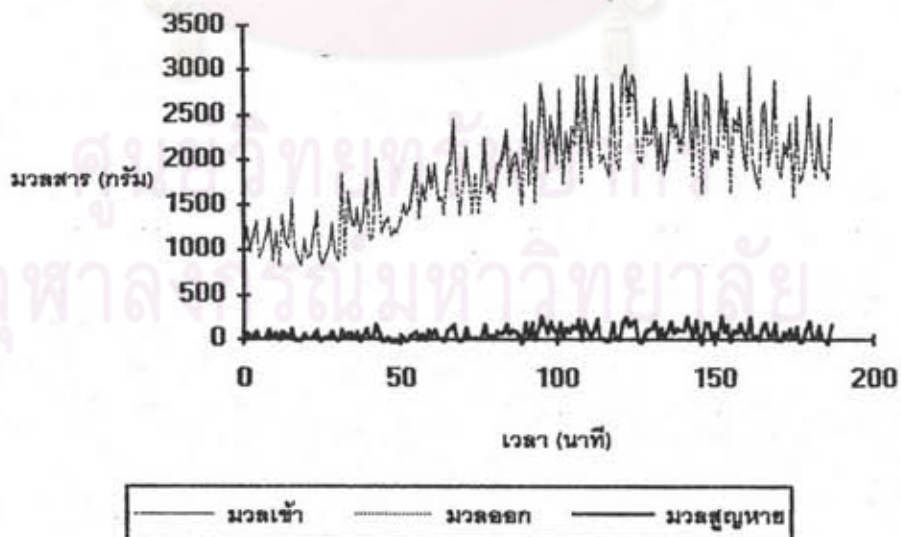
รูปที่ 4.14 อุณหภูมิภายในเตาเผาจากการควบคุมและอุณหภูมิฟลูก๊าซจากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C

ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี แสดงดังรูปที่ 4.15

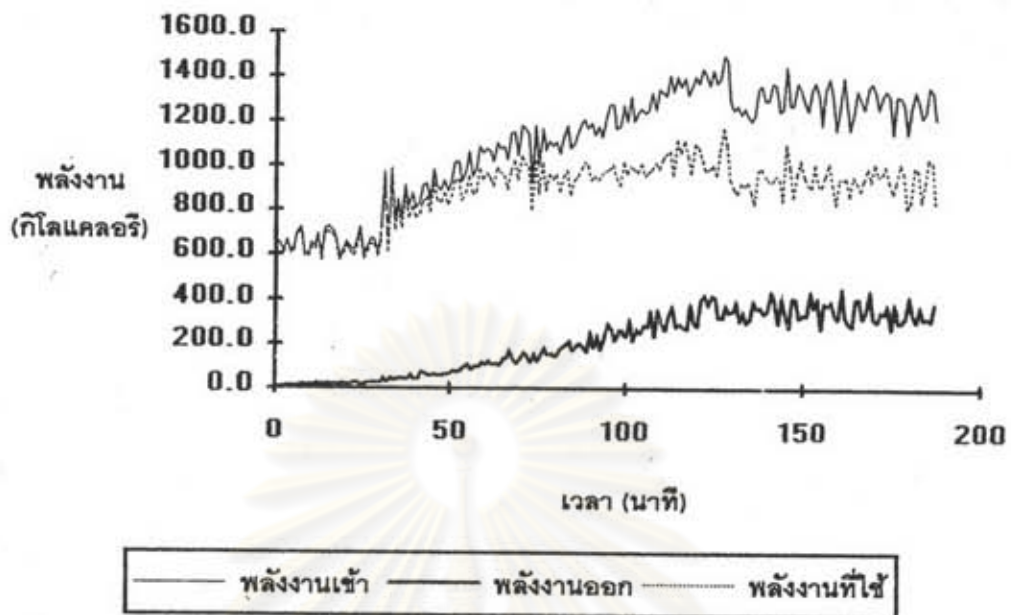


รูปที่ 4.15 ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี  
จากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C

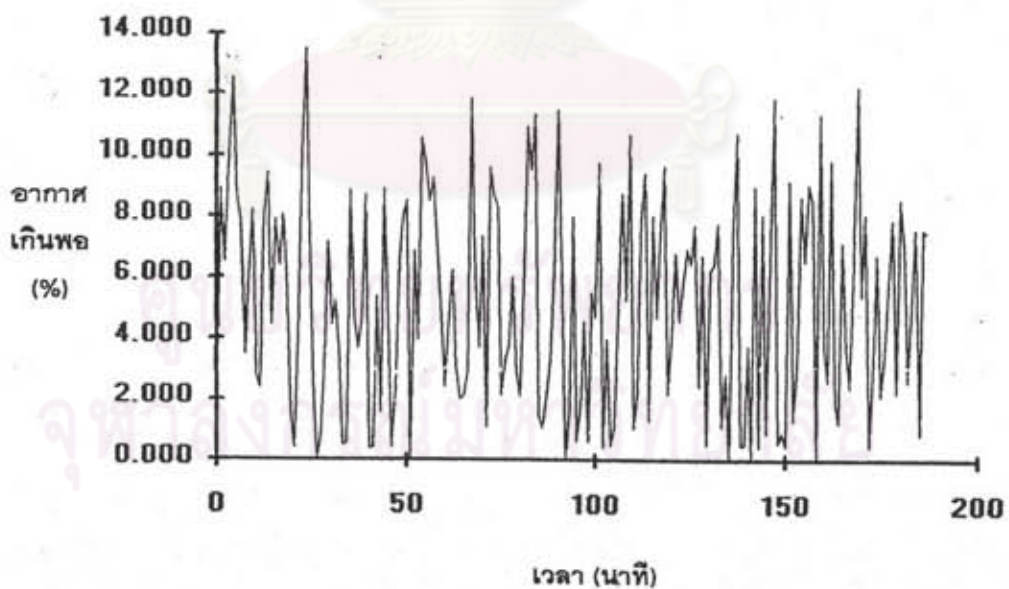
และจากข้อมูลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของฟลูก๊าซสามารถคำนวณ  
สมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.16 สมดุลมวลสารที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C



รูปที่ 4.17 สมดุลพลังงานที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C



รูปที่ 4.18 อากาศเกินพอที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 800 °C

จากผลการทดลองการคำนวณสมมูลมวลสาร สมมูลพลังงาน และอากาศเกินพอ เพื่อให้เห็นผลการทดลองที่ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงวิเคราะห์ผลการทดลองแยกเป็น 2 ช่วงการควบคุม จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 800 °C

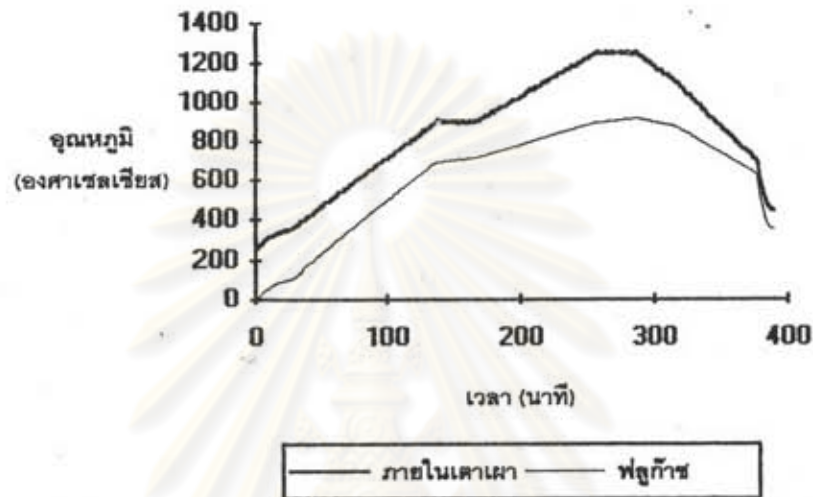
ผลการทดลอง	หน่วย	ช่วงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 800 °C	ช่วงรักษาอุณหภูมิที่ 800 °C	ผลการควบคุมรวมทั้ง 2 ช่วง
ช่วงเวลาทำการควบคุม	นาที	127	60	187
อากาศเกินพอเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์	5.3	4.9	—
ปริมาณก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในแต่ละช่วง	ลิตร	3703.11	2272.34	5975.45
น้ำหนักก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	10.77	6.61	17.38
มวลสูญหายเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	กรัม	59.1	86.5	—
มวลสูญหาย ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	7.57	5.28	12.85
อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้เฉลี่ยต่อเวลา ในแต่ละช่วง	กิโลแคลอรี ต่อนาที	3.770	-0.042	—

#### 4.4.2 ทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C

ทดลองโดยควบคุมการเผาไหม้ก๊าซทั้งแบบสมบูรณ์และแบบไม่สมบูรณ์แบ่งออกเป็น 6 ช่วงการควบคุมดังนี้

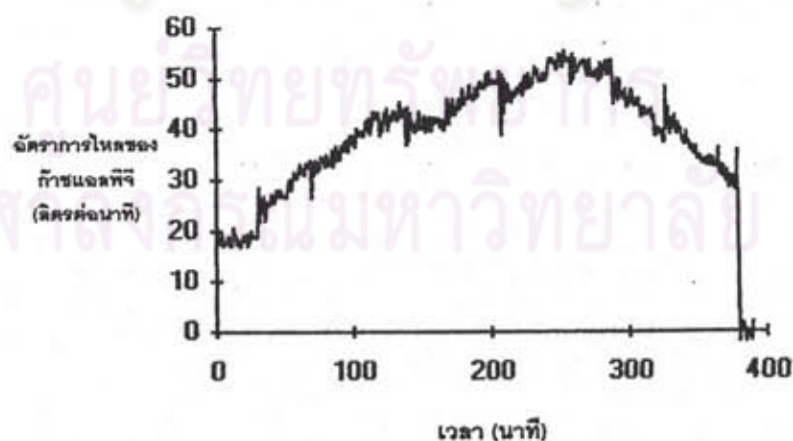
- ช่วงเพิ่มอุณหภูมิช่วงที่ 1 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 300 °C ต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ 900 °C ก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
- ช่วงรักษาอุณหภูมิช่วงที่ 1 รักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 900 °C เป็นเวลา 30 นาที ก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
- ช่วงเพิ่มอุณหภูมิช่วงที่ 2 อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 235 °C ต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิ 1250 °C ก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้ไม่อย่างสมบูรณ์
- ช่วงรักษาอุณหภูมิช่วงที่ 2 รักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 1250 °C เป็นเวลา 30 นาที ก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้ไม่อย่างสมบูรณ์

- ช่วงลดอุณหภูมิช่วงที่ 1 ลดอุณหภูมิจาก 1250 °C เหลือ 1100 °C อัตราการลดอุณหภูมิ 300 °C ต่อชั่วโมง ก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
  - ช่วงลดอุณหภูมิช่วงที่ 2 ลดอุณหภูมิจาก 1100 °C เหลือ 700 °C อัตราการลดอุณหภูมิ 400 °C ต่อชั่วโมง ก๊าซแอลพีจีเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์
- ผลการทดลองแสดงได้ดังรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 อุณหภูมิภายในเตาเผาจากการควบคุมและอุณหภูมิฟลูก๊าซจากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C

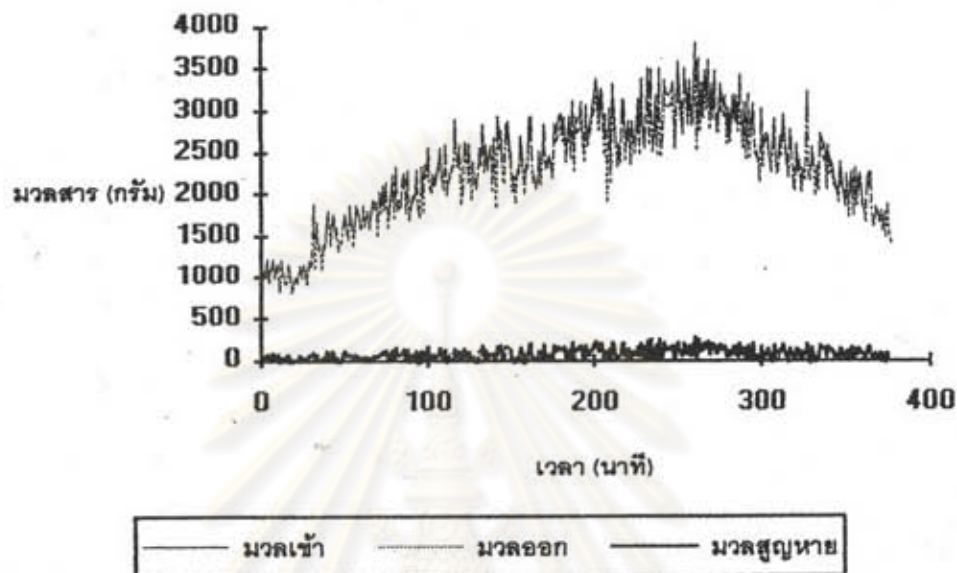
ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี แสดงดังรูปที่ 4.20



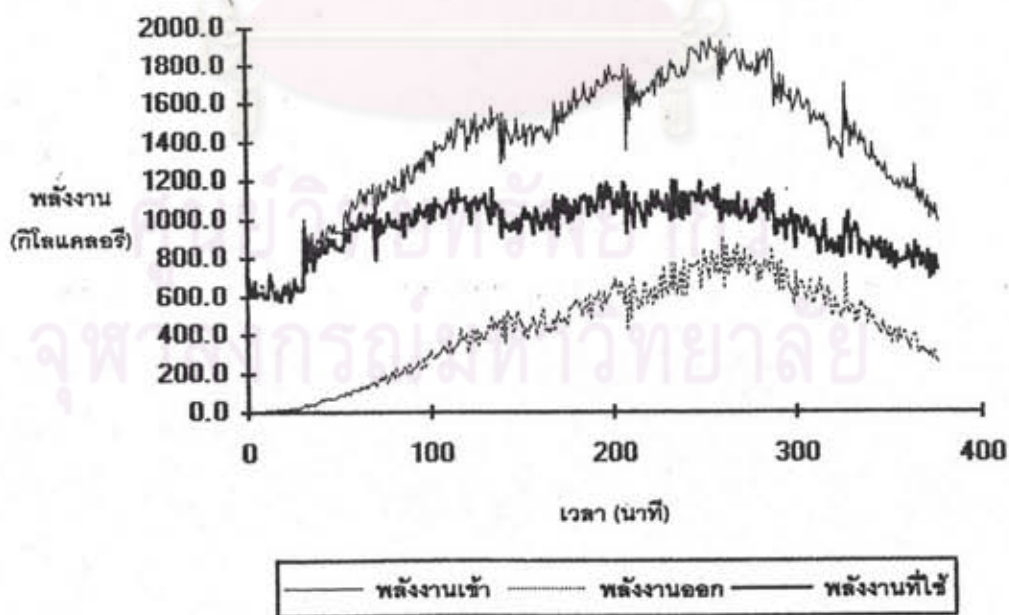
รูปที่ 4.20 ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีจากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C



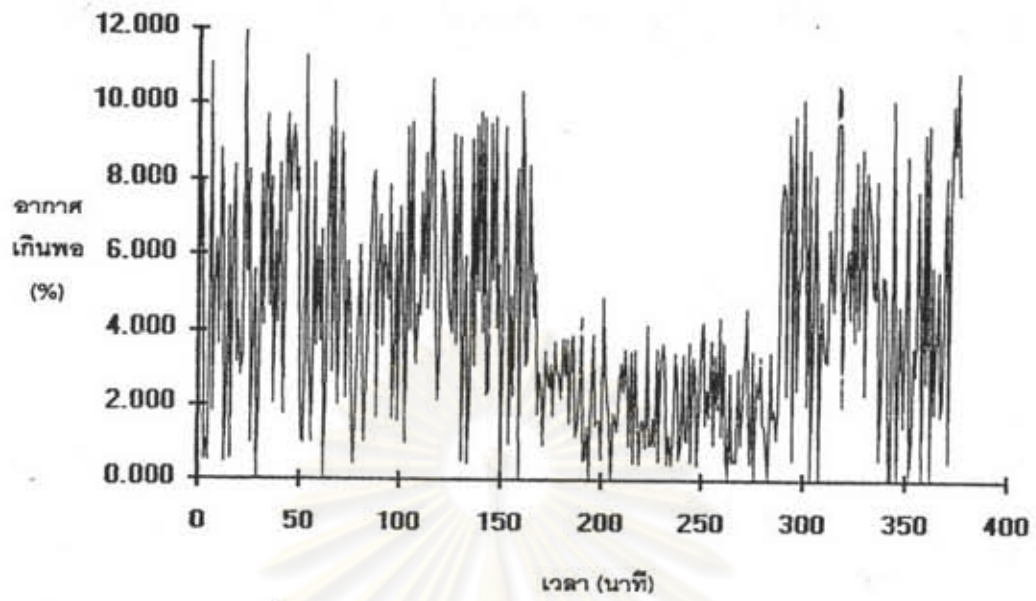
และจากข้อมูลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของฟลู็ก๊าซสามารถคำนวณ  
สมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานได้ผลดังนี้



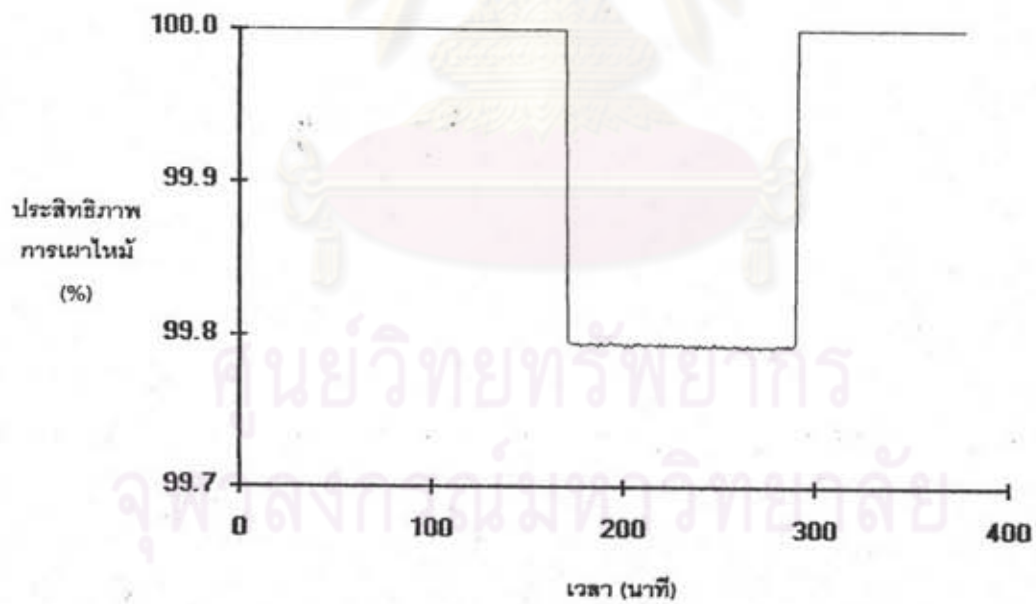
รูปที่ 4.21 สมดุลมวลสารที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C



รูปที่ 4.22 สมดุลพลังงานที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C



รูปที่ 4.23 อากาศเกินพอที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C



รูปที่ 4.24 ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของก๊าซแอลพีจีที่เวลาใด ๆ  
จากการทดลองเผา compound clay ที่ 1250 °C

จากผลการทดลองการคำนวณสมดุลมวลสาร สมดุลพลังงาน อากาศเกินพอ และประสิทธิภาพการเผาไหม้ เพื่อให้เห็นผลการทดลองที่ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงวิเคราะห์ผลการทดลองแยกออกตามช่วงที่ทำการควบคุมได้ 6 ช่วง จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.11, 4.12 และ 4.13

ตารางที่ 4.11 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C  
ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

ผลการทดลอง	หน่วย	ช่วงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 900 °C	ช่วงรักษาอุณหภูมิที่ 900 °C	ช่วงลดอุณหภูมิจาก 1250 °C ถึง 1100 °C	ช่วงลดอุณหภูมิจาก 1100 °C ถึง 700 °C
ช่วงเวลาทำการควบคุม	นาที	137	30	30	60
อากาศเกินพอเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์	5.1	5.6	5.3	5.1
ปริมาตรก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในแต่ละช่วง	ลิตร	4268.53	1280.27	1427.10	2218.46
น้ำหนักก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	12.41	3.72	4.15	6.45
มวลสูญหายเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	กรัม	50.6	78.2	82.7	73.6
มวลสูญหาย ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	6.98	2.42	2.56	4.49
อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้เฉลี่ยต่อเวลา ในแต่ละช่วง	กิโลแคลอรี ต่อนาที	3.896	-0.094	-3.844	-2.248

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C  
ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์

ผลการทดลอง	หน่วย	ช่วงเพิ่มอุณหภูมิจาก 900 °C ถึง 1250 °C	ช่วงรักษาอุณหภูมิที่ 1250 °C
ช่วงเวลาทำการควบคุม	นาที	90	30
อากาศเกินพอเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์	2.2	1.9
ประสิทธิภาพการเผาไหม้เฉลี่ยที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์	99.994	99.993
ปริมาตรก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในแต่ละช่วง	ลิตร	4424.76	1615.45

ตารางที่ 4.12 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C  
ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้อย่างไม่สมบูรณ์ (ต่อ)

ผลการทดลอง	หน่วย	ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ จาก 900 °C ถึง 1250 °C	ช่วงรักษาอุณหภูมิ ที่ 1250 °C
น้ำหนักก๊าซแอลพีจีที่ใช้ ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	12.87	4.70
มวลสูญหายเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	กรัม	111.8	138.6
มวลสูญหาย ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	10.17	4.30
อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงาน ที่ใช้เฉลี่ยต่อเวลา ในแต่ละช่วง	กิโลแคลอรี ต่อนาที	0.536	0.018

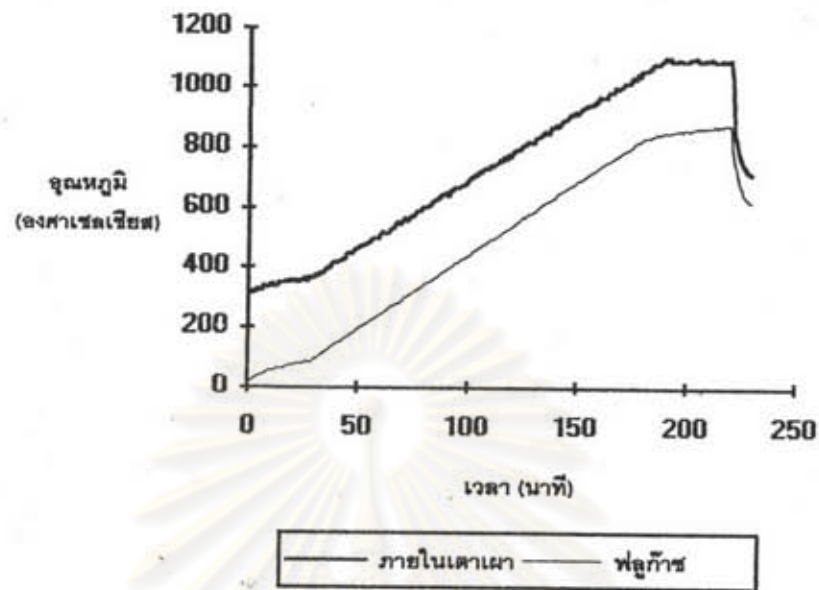
ตารางที่ 4.13 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 1250 °C  
รวมทั้ง 6 ช่วงการควบคุม

ผลการทดลอง	หน่วย	ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้ อย่างสมบูรณ์	ก๊าซแอลพีจีเผาไหม้ อย่างไม่สมบูรณ์	ผลการควบคุม รวมทั้ง 6 ช่วง
ช่วงเวลาทำการควบคุม	นาที	257	120	377
อากาศเกินพอเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์	5.3	2.1	—
ประสิทธิภาพการเผาไหม้เฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์	100	99.99	—
ปริมาตรก๊าซแอลพีจีที่ใช้ ในแต่ละช่วง	ลิตร	9194.36	6040.21	15234.57
น้ำหนักก๊าซแอลพีจีที่ใช้ ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	26.74	17.56	44.30
มวลสูญหาย ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	16.45	14.47	30.92

#### 4.4.3 ทดลองเผาดินผสม dolomite ที่อุณหภูมิ 1100 °C

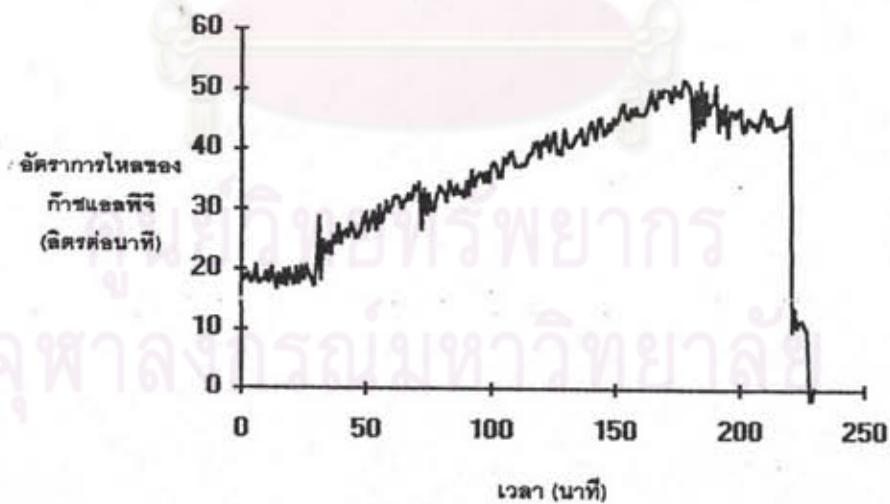
การทดลองจะทำการควบคุมการเผาไหม้แบบสมบูรณ์โดยแบ่งเป็นสองช่วง  
คือ ช่วงเพิ่มอุณหภูมิ อัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 300 °C ต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 1100 °C และช่วง  
รักษาอุณหภูมิ 1100 °C เป็นเวลา 30 นาที

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25



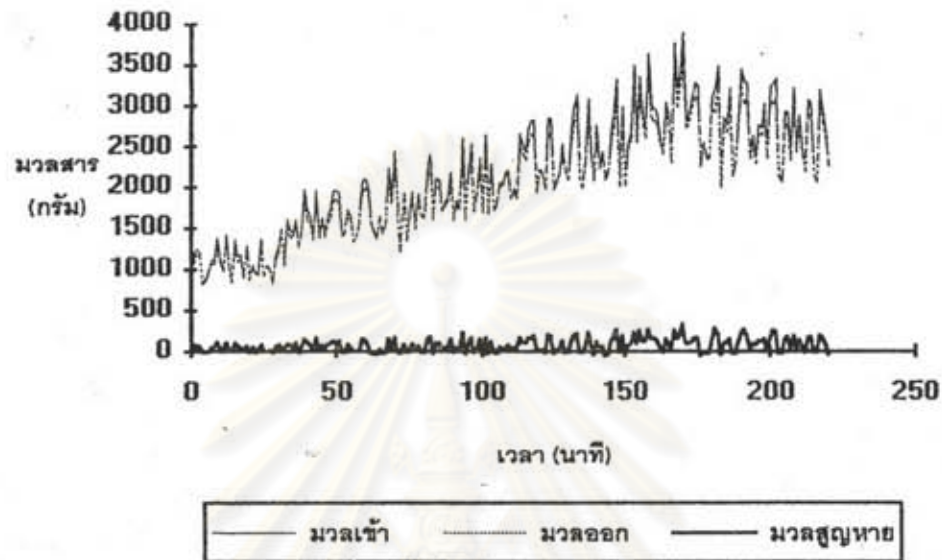
รูปที่ 4.25 อุณหภูมิภายในเตาเผาจากการควบคุมและอุณหภูมิฟลูก๊าซจากการทดลองเผาดินผสม dolomite ที่ 1100 °C

ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี แสดงดังรูปที่ 4.26

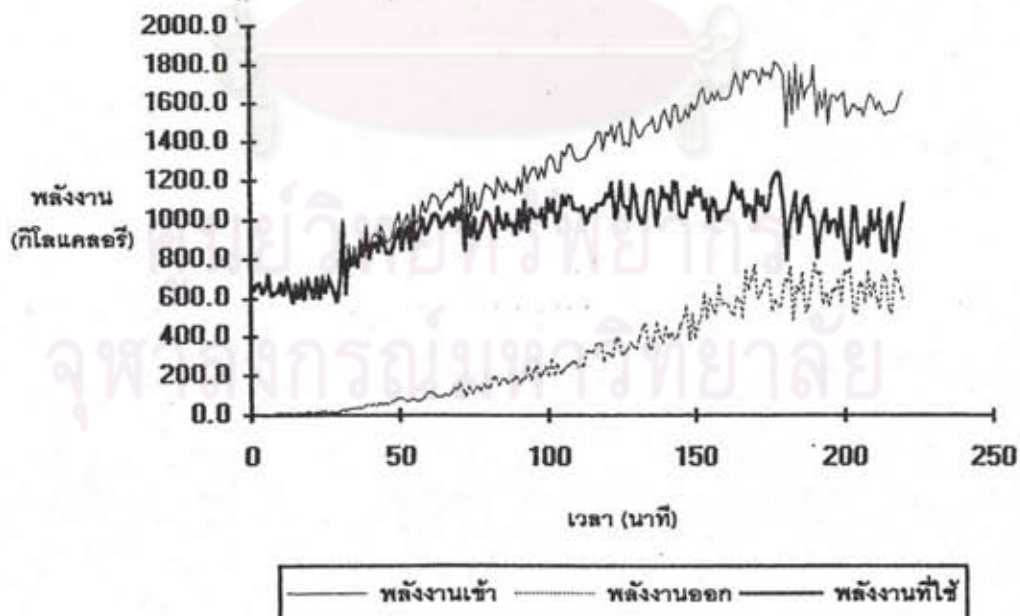


รูปที่ 4.26 ผลการควบคุมอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีจากการทดลองเผาดินผสม dolomite ที่ 1100 °C

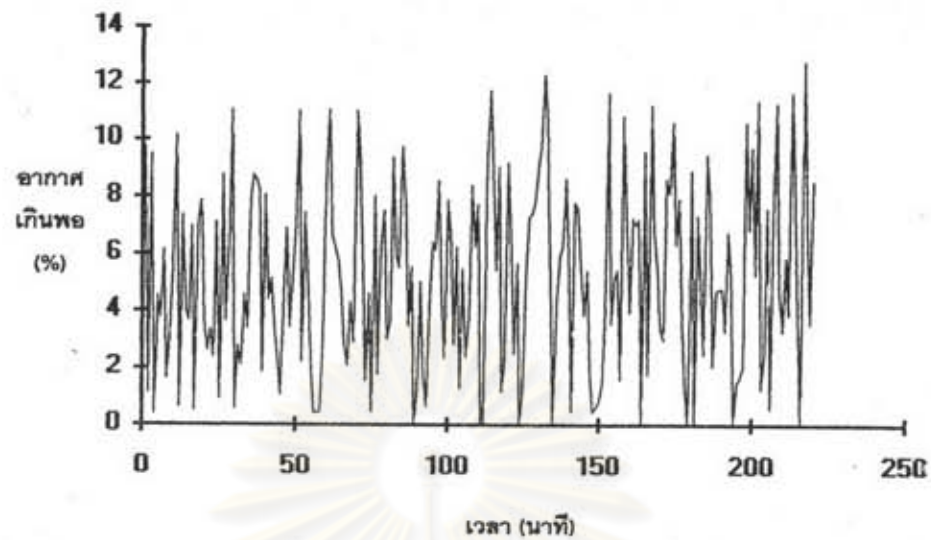
และจากข้อมูลการวิเคราะห์ส่วนประกอบของฟลู็ก๊าซสามารถคำนวณ  
สมดุลมวลสารและสมดุลพลังงานได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.27 สมดุลมวลสารที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผาหินผสม dolomite ที่ 1100 °C



รูปที่ 4.28 สมดุลพลังงานที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผาหินผสม dolomite ที่ 1100 °C



รูปที่ 4.29 อากาศเกินพอที่เวลาใด ๆ จากการทดลองเผาหินผสม dolomite ที่ 1100 °C

จากผลการทดลองการคำนวณสมดุลมวลสาร สมดุลพลังงาน และอากาศเกินพอ เพื่อให้เห็นผลการทดลองที่ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงวิเคราะห์ผลการทดลองแยกเป็น 2 ช่วงการควบคุม จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ผลการทดลองวิเคราะห์ของการทดลองเผาหินผสม dolomite ที่อุณหภูมิ 1100 °C

ผลการทดลอง	หน่วย	ช่วงเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 1100 °C	ช่วงรักษาอุณหภูมิที่ 1100 °C	ผลการควบคุมรวมทั้ง 2 ช่วง
ช่วงเวลาทำการควบคุม	นาที	189	30	219
อากาศเกินพอเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	เปอร์เซ็นต์	5.1	5.6	—
ปริมาตรก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในแต่ละช่วง	ลิตร	6634.01	1458.85	8095.86
น้ำหนักก๊าซแอลพีจีที่ใช้ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	19.29	4.24	23.54
มวลสูญหายเฉลี่ย ที่เวลาใด ๆ	กรัม	67.2	108.0	—
มวลสูญหาย ในแต่ละช่วง	กิโลกรัม	12.78	3.46	16.24
อัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ใช้เฉลี่ยต่อเวลา ในแต่ละช่วง	กิโลแคลอรีต่อนาที	2.506	-0.038	—

#### 4.5 ผลการทดลองเครื่องควบคุมกับระบบควบคุมจำลอง

จากผลการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 4.3 นั้น ได้เลือกใช้เครื่องควบคุมแบบ proportional integral ใช้ในการทดสอบการควบคุมการเผาไหม้ตามวัตถุประสงค์จริงดังผลการทดลองในหัวข้อ 4.4 ซึ่งผลการทดลองปรากฏว่าเครื่องควบคุมแบบ proportional integral ที่ใช้ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมจากการปรับแต่งโดยวิธีของ Ziegler-Nichols สามารถควบคุมกระบวนการเผาไหม้ก๊าซให้ได้ตามเป้าหมายที่ต้องการ การทดลองในส่วนนี้จะเป็นการสร้างการควบคุมจำลอง (simulation) เพื่อวิเคราะห์หถึงตัวแปรที่อาจจะมีผลทำให้เครื่องควบคุมทำงานไม่เหมาะสม โดยจะทดสอบการควบคุมกับเครื่องควบคุม 2 แบบคือ เครื่องควบคุมแบบ proportional integral และ เครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative เพื่อเป็นประโยชน์ในการศึกษาและพัฒนาระบบควบคุมการเผาไหม้ก๊าซในโอกาสต่อไป

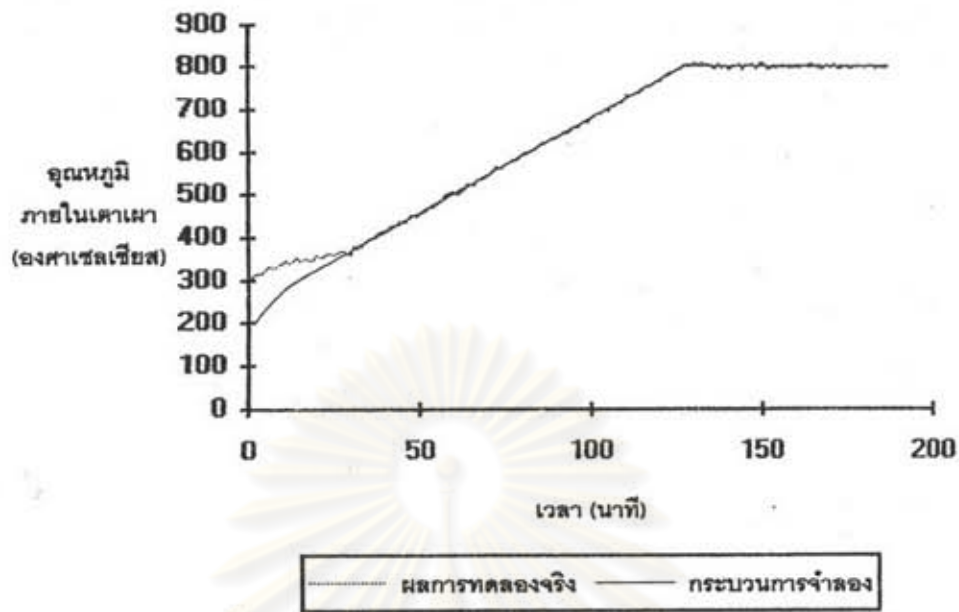
##### 4.5.1 เปรียบเทียบผลการควบคุมกระบวนการจริงกับผลการควบคุม

###### กระบวนการจำลอง

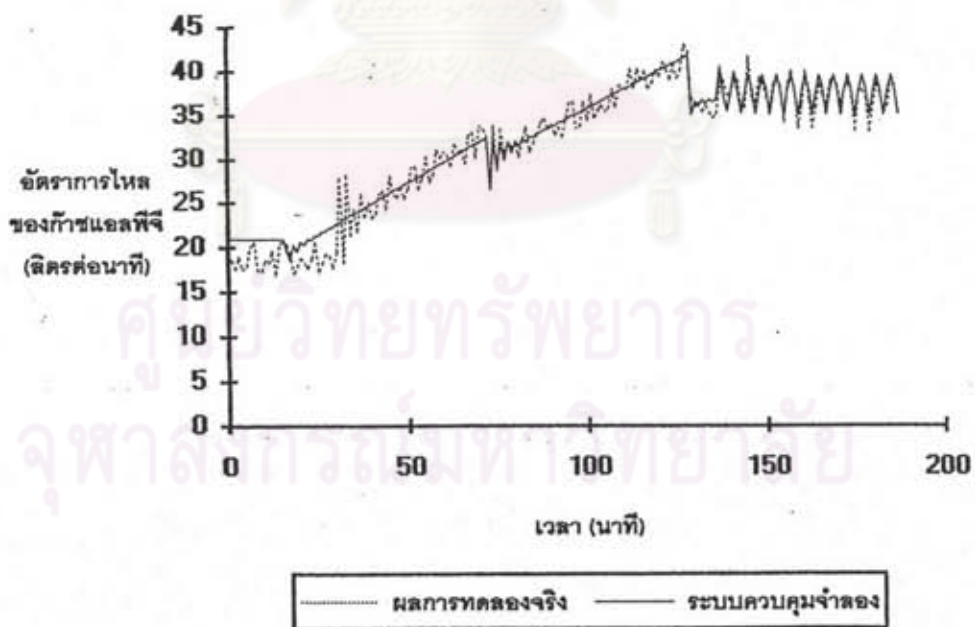
เพื่อเป็นการยืนยันว่าระบบควบคุมจำลองที่ได้สร้างขึ้นให้ผลการทดลองและผลการควบคุมเหมือนกับการทดลองกับเครื่องมือจริง จึงได้ทดสอบระบบควบคุมจำลองกับการควบคุมการเผา compound clay ที่อุณหภูมิ 800 °C ดังผลการทดลองที่ปรากฏในหัวข้อ 4.4.1 โดยใช้ค่าอุณหภูมิ set point, ค่าคงที่กระบวนการ และค่าเวลาคงที่ เหมือนระบบควบคุมจริงทุกประการ ผลการทดลองแสดงเปรียบเทียบอุณหภูมิภายในเตาเผาและการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลทีจี แสดงได้ดังรูปที่ 4.30 และ 4.31

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.30 อุณหภูมิภายในเตาเผา ผลการทดลองจริงจากการเผา compound clay ที่ 800 °C  
กับผลการทดลองจากกระบวนการควบคุมจำลอง



รูปที่ 4.31 อัตราการไหลของก๊าซแอลพีจี ผลการควบคุมจริงจากการเผา compound clay ที่  
800 °C กับผลการควบคุมจากระบบควบคุมจำลอง

จากผลการเปรียบเทียบที่ได้จากรูปที่ 4.30 และ 4.31 นั้น จะพบว่ากระบวนการจำลองและระบบควบคุมจำลองที่สร้างขึ้นให้ผลการทดลองที่เหมือนกับกระบวนการและระบบควบคุมจริงที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นในการปรับปรุงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบอื่น ๆ สามารถใช้กระบวนการและระบบควบคุมจำลองที่ได้มาช่วยพิจารณาการตัดสินใจได้

#### 4.5.2 การปรับปรุงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral

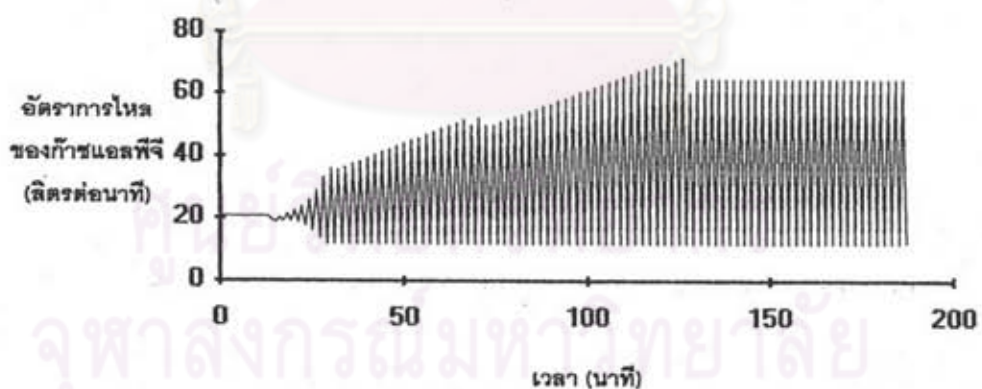
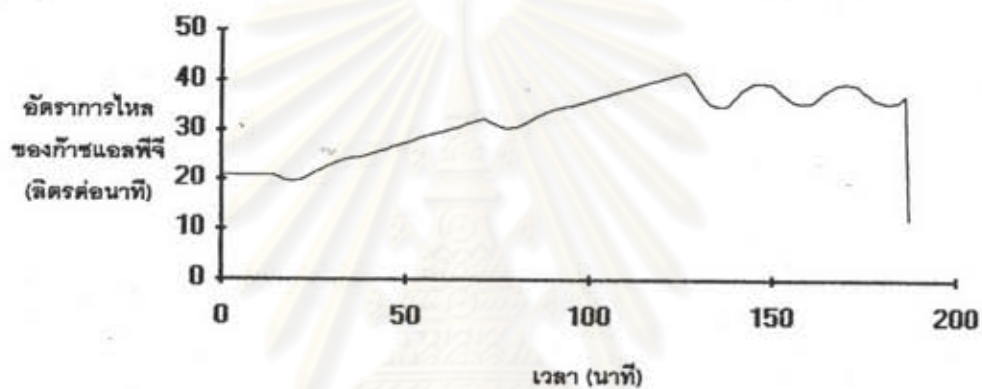
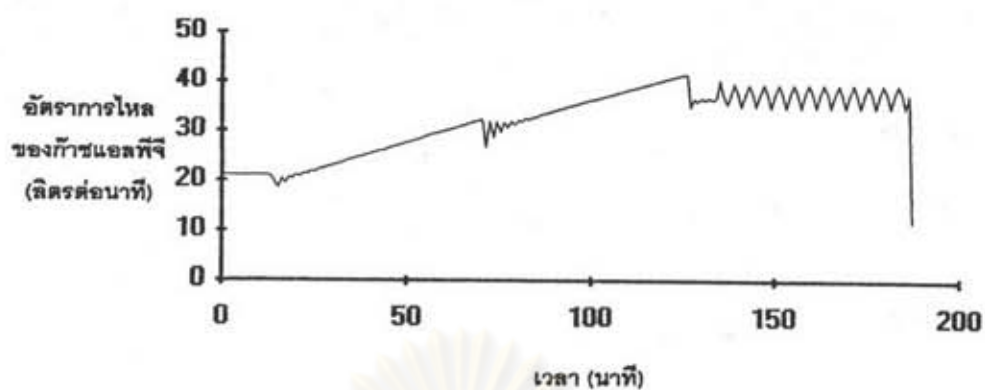
เครื่องควบคุมแบบ PI มีค่าคงที่ในการควบคุมสองค่าคือ proportional gain ( $K_p$ ) และ integral time constant ( $T_i$ ) และถึงแม้ว่าเครื่องควบคุมแบบนี้จะสามารถใช้ควบคุมได้จริงกับกระบวนการดังผลการทดลองที่ผ่านมาในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 แล้วก็ตาม แต่ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมนี้ต้องมีข้อจำกัดในการใช้งาน โดยการทดสอบทำดังนี้

- ทดลองเปลี่ยนค่า proportional gain เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยให้ค่า integral time constant คงที่
- ทดลองเปลี่ยนค่า integral time constant เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยให้ค่า proportional gain คงที่

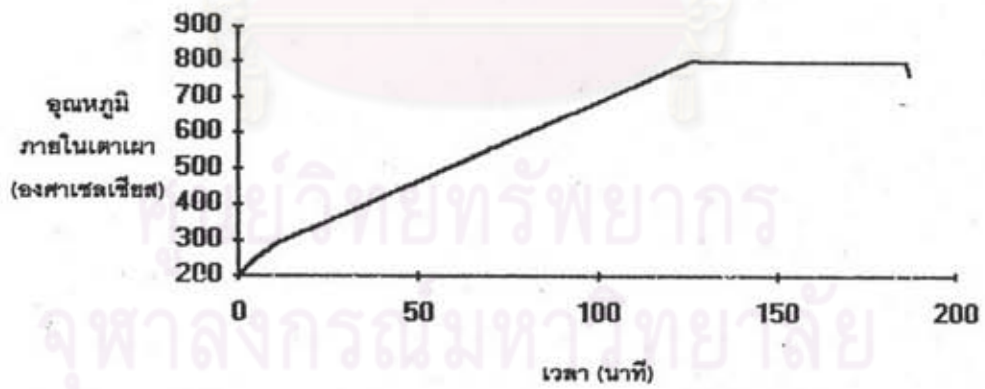
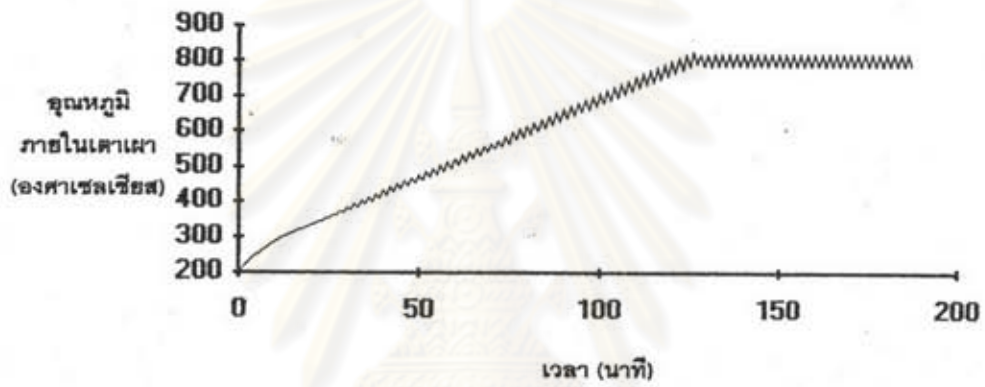
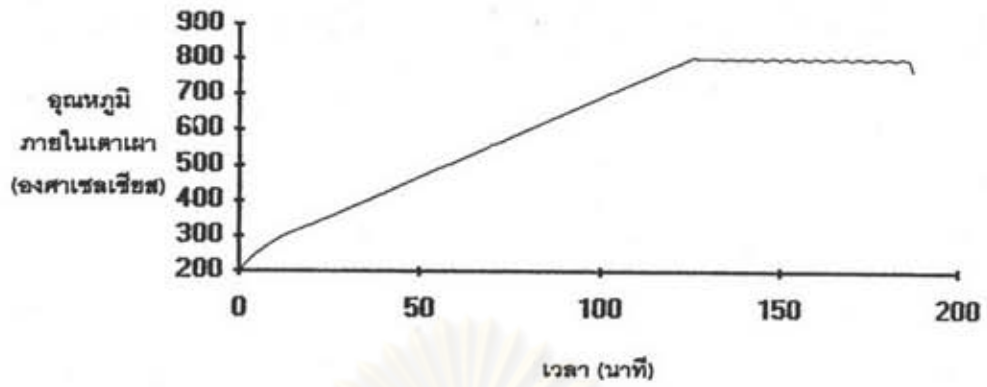
การทดลองเปลี่ยนค่าคงที่ของเครื่องควบคุมโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อใช้ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมจากผลการปรับแต่งในหัวข้อ 4.2 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.32 ถึง 4.35

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

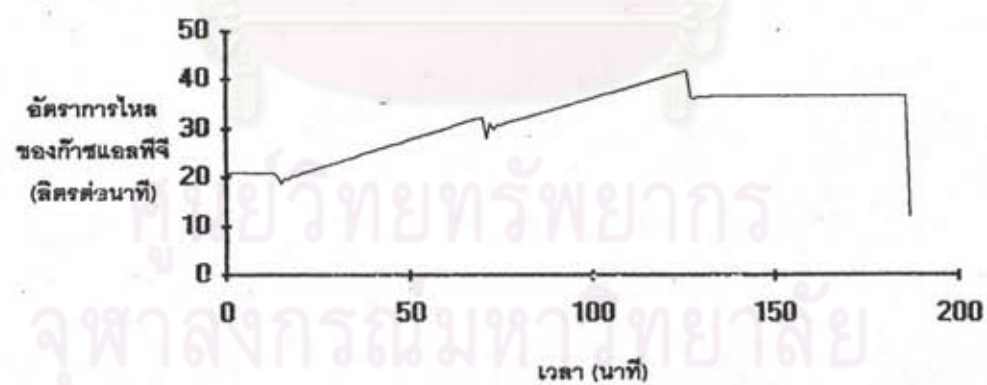
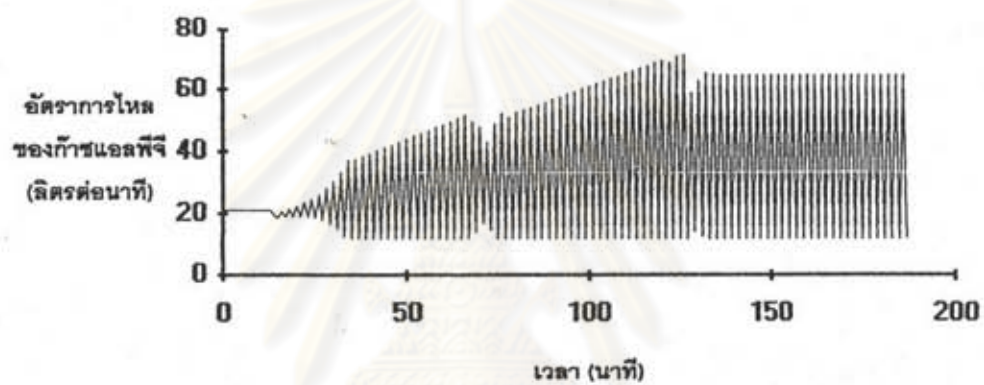
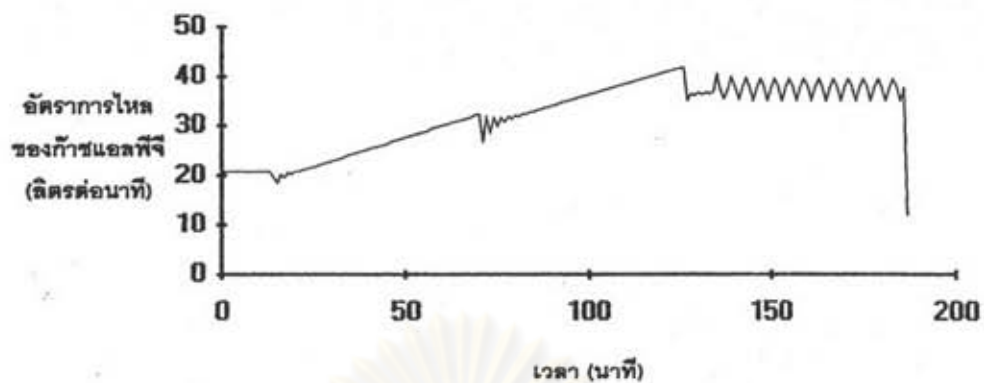




รูปที่ 4.33 ผลการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลอง  
เมื่อเปลี่ยนค่า  $K_c$  โดยให้ค่า  $\tau_I$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PI  
ก ค่า  $K_c$  จากการทดลอง                      ข ลดค่า  $K_c$  ลงเหลือ 1/10  
ค เพิ่มค่า  $K_c$  ขึ้น 12 เท่า



รูปที่ 4.34 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลอง  
เมื่อเปลี่ยนค่า  $\tau_I$  โดยให้ค่า  $K_C$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PI  
ก ค่า  $\tau_I$  จากการทดลอง    ข ลดค่า  $\tau_I$  ลงเหลือ 1/15  
ค เพิ่มค่า  $\tau_I$  ขึ้น 10 เท่า



รูปที่ 4.35 ผลการปรับอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลอง เมื่อเปลี่ยนค่า  $\tau_I$  โดยให้ค่า  $K_C$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PI  
 ก ค่า  $\tau_I$  จากการทดลอง                      ข ลดค่า  $\tau_I$  ลงเหลือ 1/15  
 ค เพิ่มค่า  $\tau_I$  ขึ้น 10 เท่า

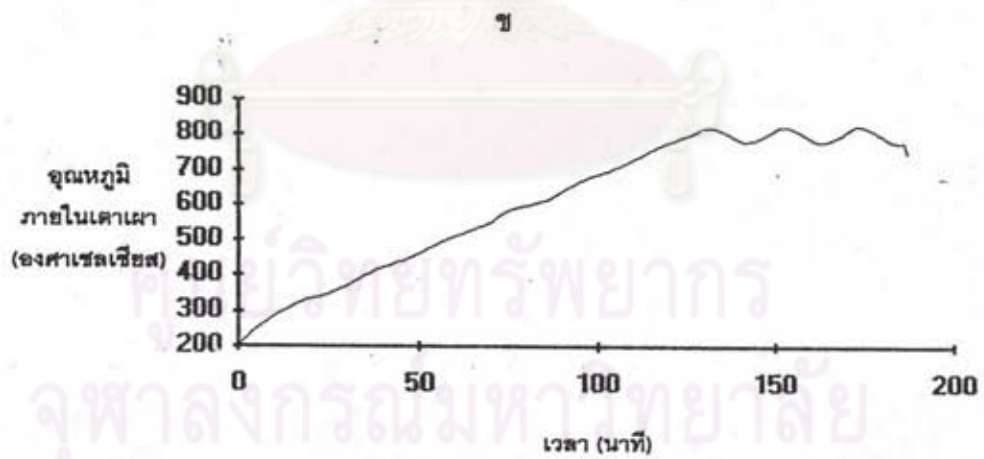
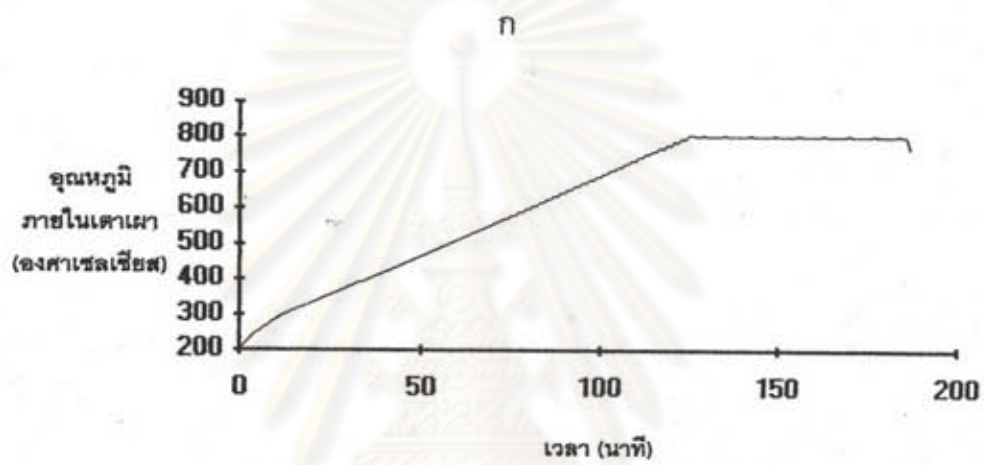
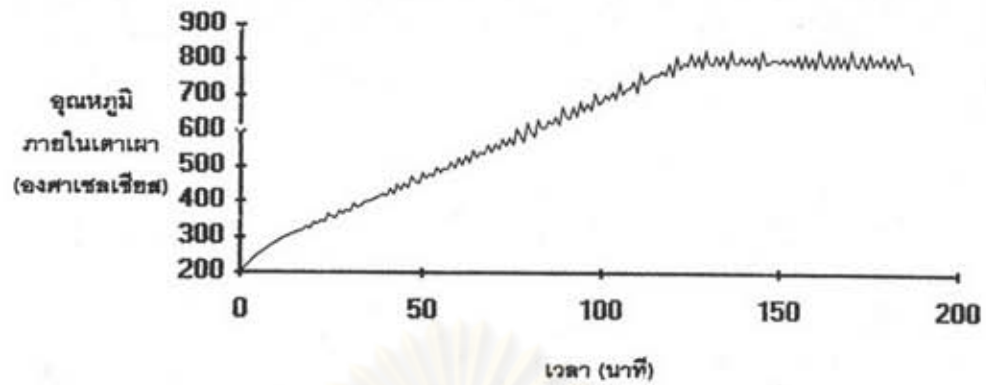
#### 4.5.3 การปรับปรุงค่าคงที่ของเครื่องควบคุมแบบ proportional integral derivative

เครื่องควบคุมแบบ PID มีค่าคงที่ในการควบคุม 3 ค่าคือ proportional gain ( $K_C$ ) integral time constant ( $\tau_I$ ) และ derivative time constant ( $\tau_D$ ) จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.3 เมื่อทดสอบเครื่องควบคุมแบบนี้ในครั้งแรก ผลการควบคุมจะแกว่งมากกว่าเครื่องควบคุมแบบ P จึงเปลี่ยนใช้ค่า  $K_C$  ของเครื่องควบคุมแบบ PI แทนทำให้สามารถควบคุมได้ผลดีขึ้นมาก แสดงว่าค่า  $K_C$  ที่ได้จากการปรับแต่งจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.2 อาจเป็นค่าที่จะทำให้ระบบไม่เสถียรภาพ แต่ค่าคงที่อีกสองค่าอาจจะมีผลกระทบต่ออยู่ด้วย ดังนั้นจึงทำการทดลองดังนี้

- ทดลองเปลี่ยนค่า proportional gain เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยให้ค่า integral time constant และ derivative time constant คงที่
- ทดลองเปลี่ยนค่า integral time constant เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยให้ค่า proportional gain และ derivative time constant คงที่
- ทดลองเปลี่ยนค่า derivative time constant เพิ่มขึ้นหรือลดลงโดยให้ค่า proportional gain และ integral time constant คงที่

การทดลองเปลี่ยนค่าคงที่ของเครื่องควบคุมโดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อใช้ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมจากผลการปรับแต่งในหัวข้อ 4.2 ผลการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.36 ถึง 4.41

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ค

รูปที่ 4.36 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลองเมื่อเปลี่ยนค่า  $K_c$

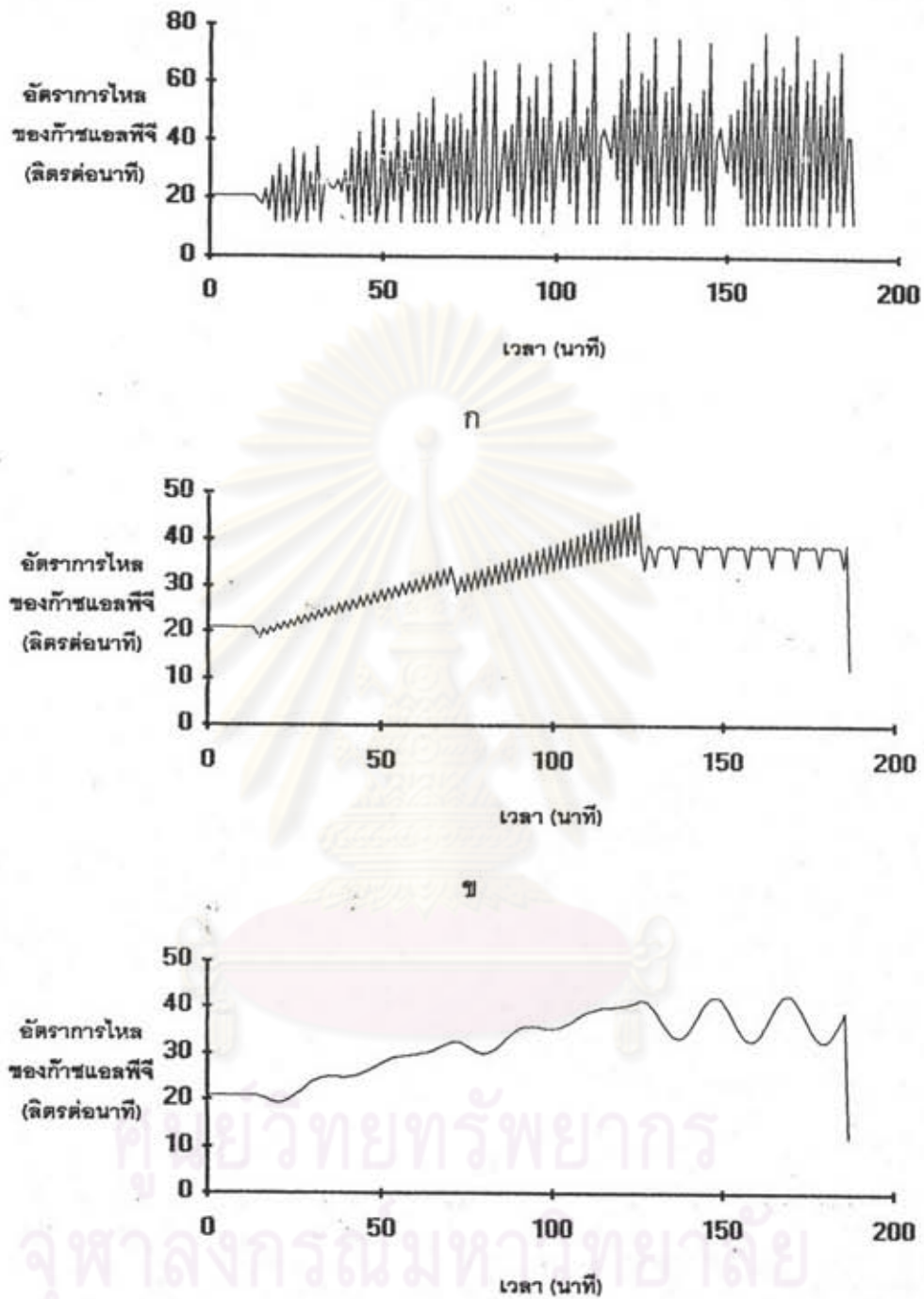
โดยให้ค่า  $\tau_I$  และ  $\tau_D$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID

ก ค่า  $K_c$  จากการทดลอง

ข ลดค่า  $K_c$  ลงเหลือ 1/2

ค ลดค่า  $K_c$  ลงเหลือ 1/8

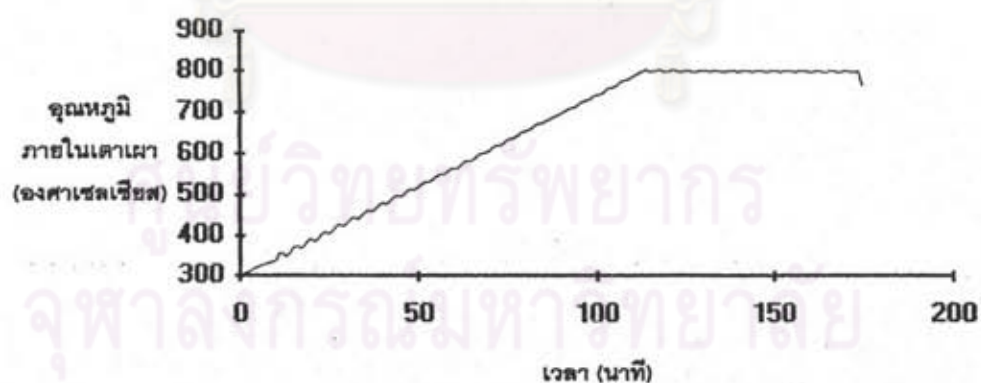
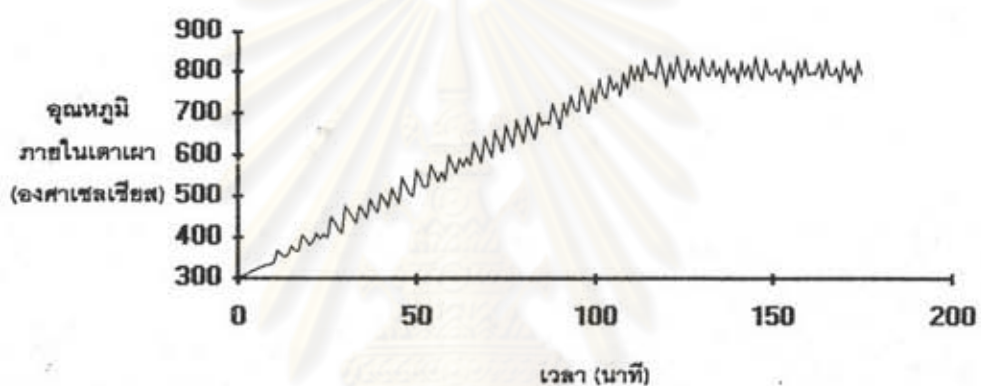
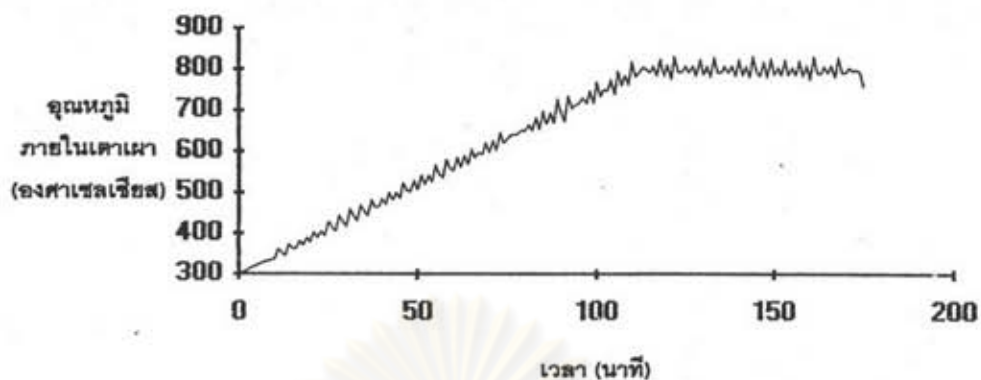




รูปที่ 4.37 ผลการปรับอัตราการไหลของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลองเมื่อเปลี่ยนค่า  $K_C$  โดยให้ค่า  $\tau_I$  และ  $\tau_D$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID

ก ค่า  $K_C$  จากการทดลอง      ข ลดค่า  $K_C$  ลงเหลือ 1/2

ค ลดค่า  $K_C$  ลงเหลือ 1/8



ค

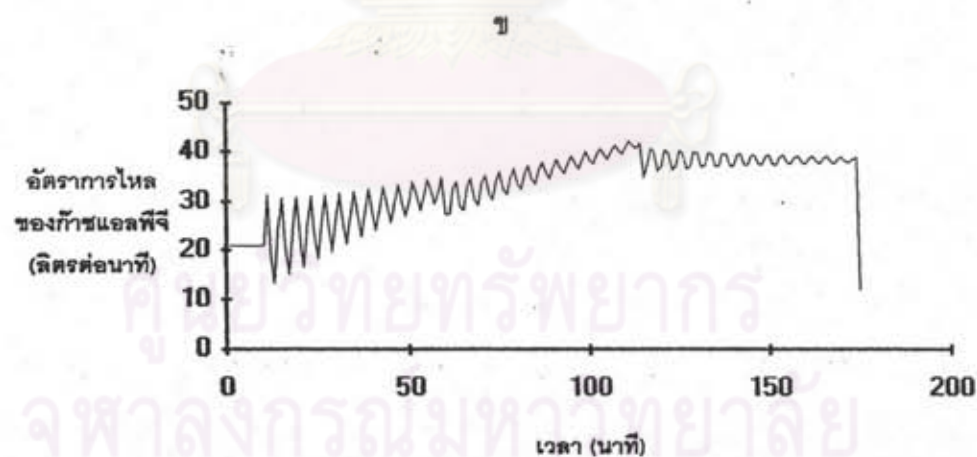
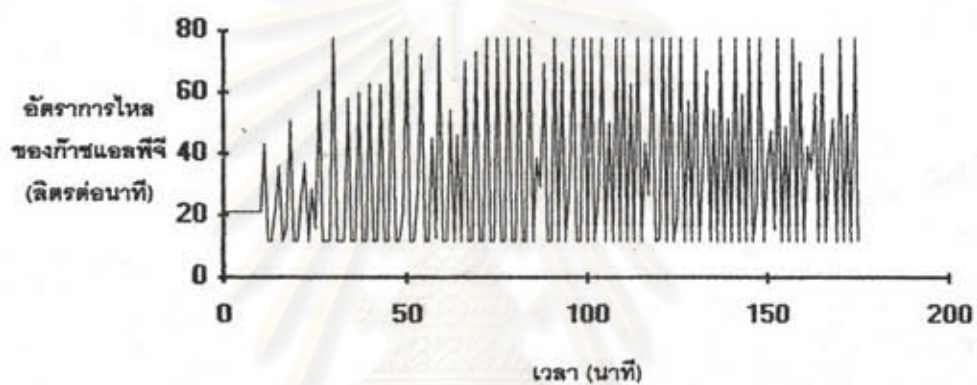
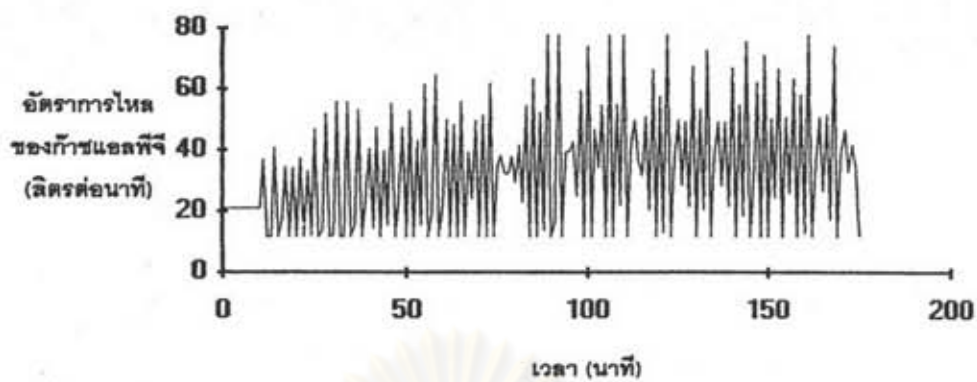
รูปที่ 4.38 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลองเมื่อเปลี่ยนค่า  $\tau_I$

โดยให้ค่า  $K_C$  และ  $\tau_D$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID

ก ค่า  $\tau_I$  จากการทดลอง

ข ลดค่า  $\tau_I$  ลงเหลือ 1/5

ค เพิ่มค่า  $\tau_I$  ขึ้น 10 เท่า

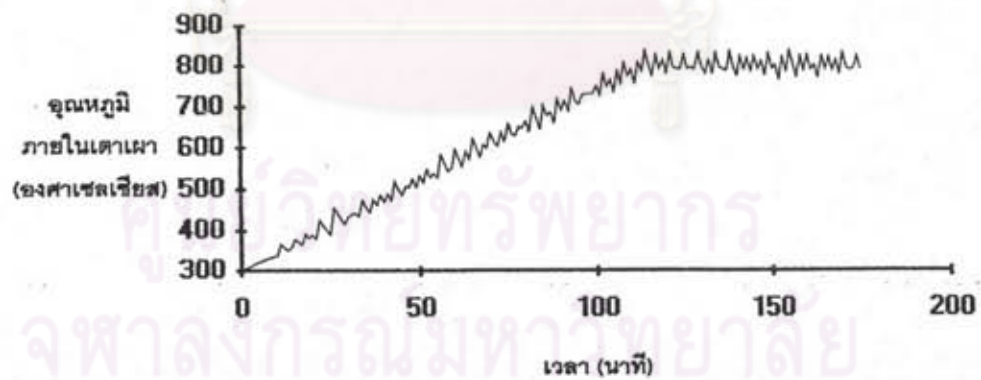
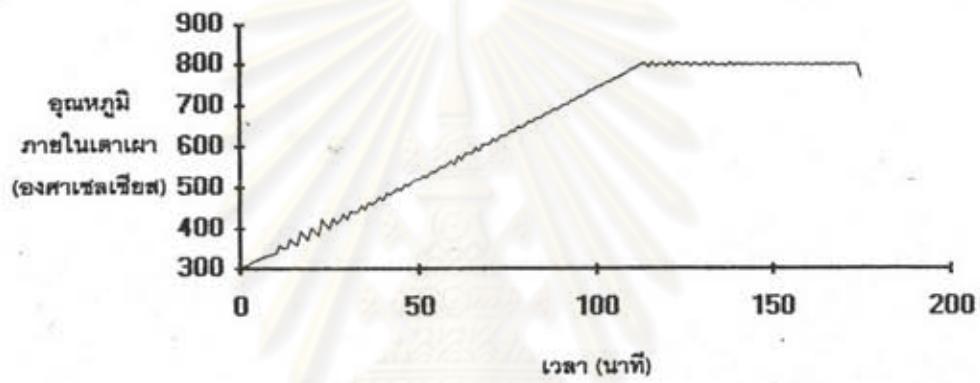
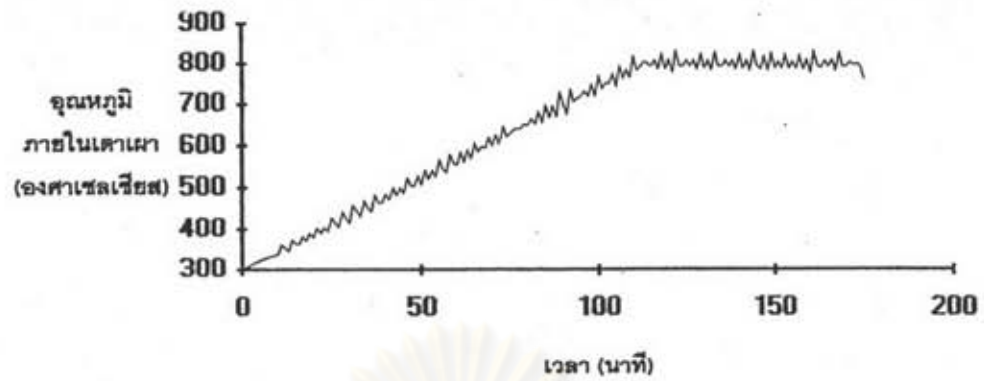


ค

รูปที่ 4.39 ผลการปรับอัตราการใช้ของก๊าซแอลพีจีของระบบควบคุมจำลองเมื่อเปลี่ยนค่า  $\tau_1$  โดยให้ค่า  $K_C$  และ  $\tau_D$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID

ก ค่า  $\tau_1$  จากการทดลอง      ข ลดค่า  $\tau_1$  ลงเหลือ 1/5

ค เพิ่มค่า  $\tau_1$  ขึ้น 10 เท่า

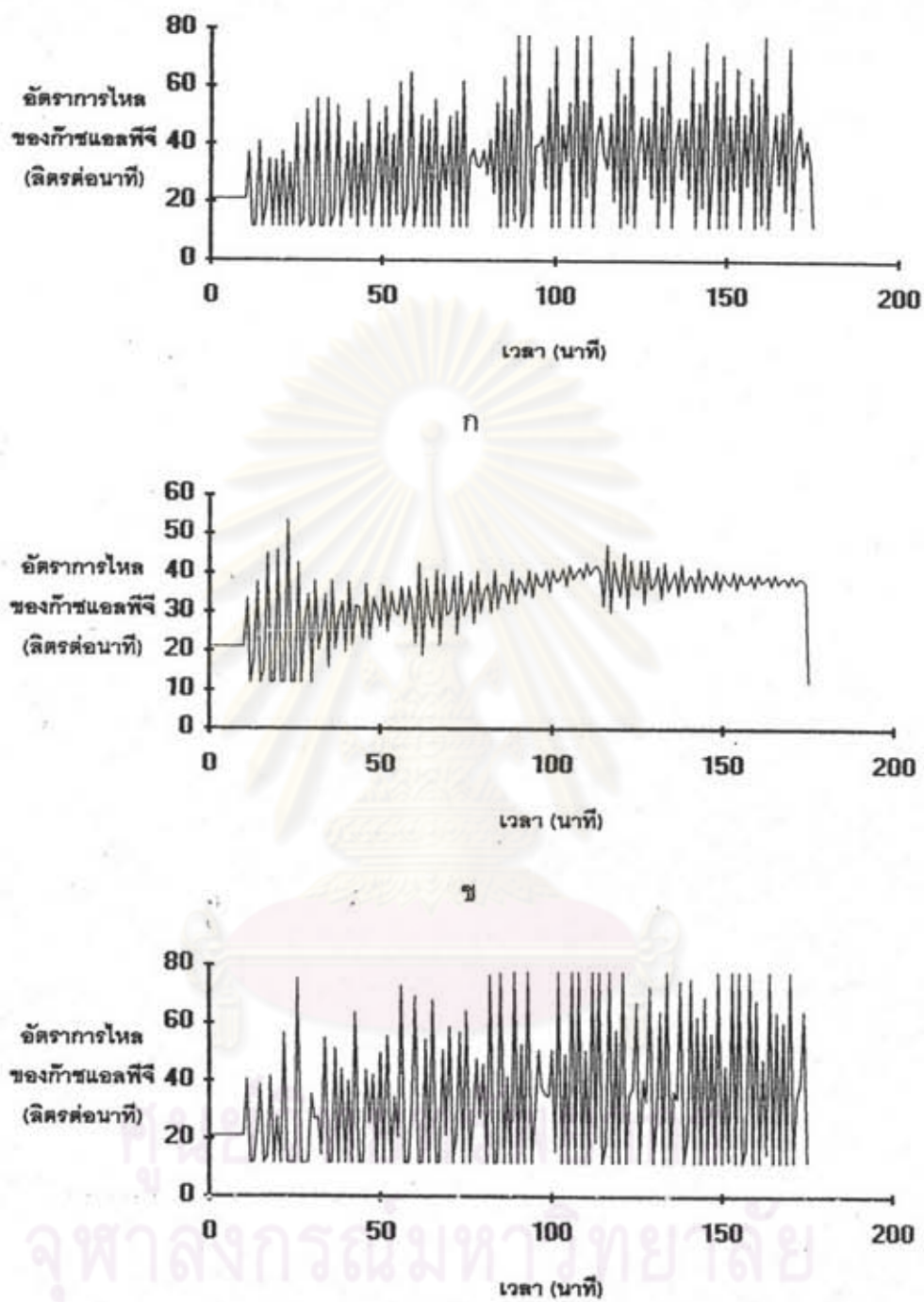


รูปที่ 4.40 ผลของอุณหภูมิภายในเตาเผาจากกระบวนการจำลองเมื่อเปลี่ยนค่า  $\tau_D$

โดยให้ค่า  $K_C$  และ  $\tau_I$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID

ก ค่า  $\tau_D$  จากการทดลอง ข ลดค่า  $\tau_D$  ลงเหลือ  $1/20$

ค เพิ่มค่า  $\tau_D$  ขึ้น 5 เท่า



รูปที่ 4.41 ผลการปรับอัตราการใช้แก๊สแอลทีจีของระบบควบคุมจำลองเมื่อเปลี่ยนค่า  $\tau_D$  โดยให้ค่า  $K_C$  และ  $\tau_I$  คงที่ ของเครื่องควบคุมแบบ PID

ก ค่า  $\tau_D$  จากการทดลอง      ข ลดค่า  $\tau_D$  ลงเหลือ 1/20

ค เพิ่มค่า  $\tau_D$  ขึ้น 5 เท่า