



ผลการทดลอง

การควบคุมกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไต์เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์นั้น สิ่งสำคัญที่ควรจะศึกษา คือ ลักษณะกลไกการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิดไต์เบด ระบบในการควบคุมตัวแปรที่มีผลกระทบและตัวแปรที่สามารถควบคุมได้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเขียนและพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่จะนำมาใช้กับให้ได้้อย่างเหมาะสม และศึกษาผลของตัวแปรโดยใช้โปรแกรมที่ได้ควบคุมการเผาไหม้ต่อไป ตามรายละเอียดของผลการทดลองดังนี้

4.1 คุณสมบัติของถ่านหินและโดโลไมท์

ในกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินที่ศึกษาใช้วัตถุติด 2 ชนิด คือ ถ่านหิน และโดโลไมท์ เมื่อเผาไหม้แล้วถ่านหินจะให้ความร้อนและผลิตภัณฑ์อื่นๆ เกิดขึ้นหลายชนิด ขึ้นกับองค์ประกอบของถ่านหินที่ใช้ ส่วนโดโลไมท์ใช้ผสมกับถ่านหินในการเผาไหม้เพื่อกำจัดก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่เกิดจากการเผาไหม้ให้อยู่ในรูปของสารประกอบซัลเฟต ซึ่งความสามารถในการกำจัดจะมากหรือน้อยขึ้นกับปริมาณของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีอยู่ในโดโลไมท์ ดังนั้นจึงต้องวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านหินและโดโลไมท์ เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาใช้ค่าของตัวแปรต่างๆ ที่จะศึกษาต่อไป

4.1.1 คุณสมบัติของถ่านหิน

ถ่านหินที่ใช้ในการทดลองนี้เป็นถ่านหินจากอำเภอ ลี้ จังหวัด ลำพูน ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท แพร่ลิกไนท์ จำกัด ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของถ่านหินแสดงได้ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านหิน

การวิเคราะห์แบบประมาณ		การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ	
องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
ความชื้น	10.92	คาร์บอน	35.76
เถ้า	28.81	ไนโตรเจน	1.76
สารระเหย	35.22	ไฮโดรเจน	4.36
คาร์บอนคงตัว	25.05	ซัลเฟอร์	1.67
		เถ้า	28.81
		ความชื้น	10.92
		ออกซิเจน	16.72
รวม	100.00	รวม	100.00

ค่าความร้อนของถ่านหิน = 3425 แคลอรี/กรัม

4.1.2 คุณสมบัติของโถโลไมท์

โถโลไมท์ที่ใช้ในการทดลองเป็นโถโลไมท์จากจังหวัด นครปฐม ได้รับความอนุเคราะห์จาก บริษัท เทนประทานการแร่ จำกัด ผลการวิเคราะห์โถโลไมท์แสดงได้ดังตารางที่ 4.2

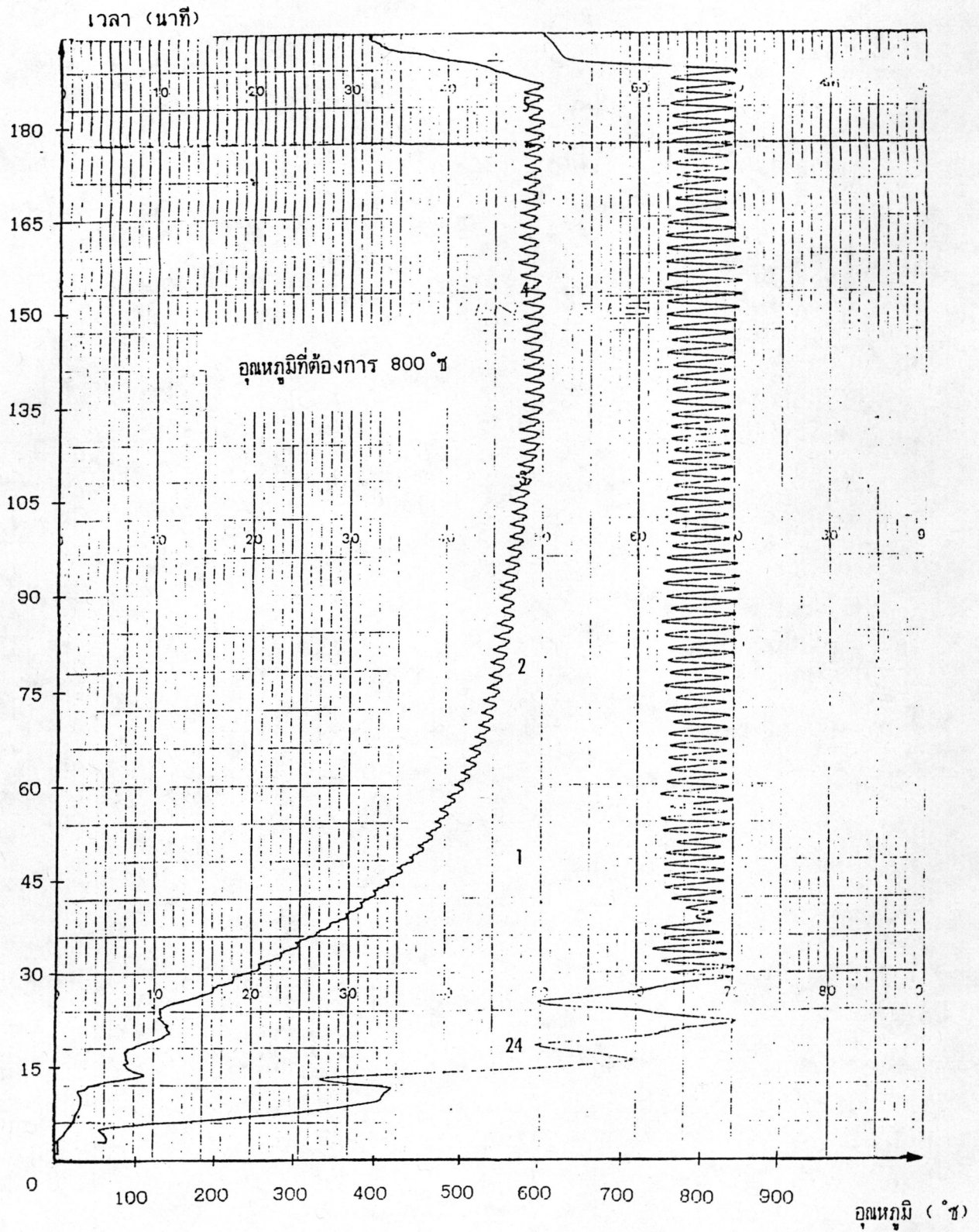
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของโพลีไมท์

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก
แคลเซียม	32.03
แมกนีเซียม	11.16
ความชื้น	0.09
องค์ประกอบอื่นๆ เช่น SiO_2 Al_2O_3 FeO เป็นต้น	56.72
รวม	100.00

4.2 การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด

จากการศึกษาลักษณะกลไกของการเผาไหม้ถ่านหิน ตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ อาทิเช่น อุณหภูมิการเผาไหม้ในเบดและความเร็วอากาศ เป็นต้น ซึ่งความเร็วอากาศนั้นสามารถกำหนดค่าได้โดยปรับวาล์วควบคุมอัตราการไหล ส่วนอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัว เช่น อัตราการป้อนถ่านหินถ้ามีอัตราการป้อนถ่านหินมากที่ความเร็วลมคงที่อุณหภูมิที่ได้จากการเผาไหม้จะมีค่าสูง แต่ถ้าปริมาณถ่านหินในเบดมีค่าคงที่แต่ความเร็วลมสูงขึ้นจะทำให้อุณหภูมิการเผาไหม้ลดลง จากข้อมูลดังกล่าวนี้เมื่อนำมาพิจารณาควบคุมระบบการเผาไหม้ จึงเลือกที่จะควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้โดยปรับอัตราการป้อนถ่านหินเป็นสำคัญ ซึ่งเครื่องควบคุมขั้นต้นที่นิยมใช้ควบคุมกัน คือ เครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด ระบบการทำงานนั้นเครื่องควบคุมจะป้อนถ่านหินเข้าสู่เบดเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้ในเบดมีค่าน้อยกว่าอุณหภูมิที่ต้องการ (set point temperature) และจะหยุดป้อนเมื่ออุณหภูมิในเบดมีค่าสูงกว่า ทั้งนี้เพื่อรักษาให้อุณหภูมิในเบดมีค่าคงที่ จากการศึกษาการควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิดของสมบัติ (3) โดยใช้โพลีไมท์ผสมกับถ่านหินในการเผาไหม้ ผลการทดลองได้ประสิทธิภาพ

การเผาไหม้สูงกว่า 90 % ไม่ก่อให้เกิดมลพิษ ไม่มีปัญหาเรื่องการหลอมตัวของแก้ว ดังนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ในระบบ ดังผลการควบคุมอุณหภูมิโดยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิดแสดงได้ในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ผลการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด

4.3 การพัฒนาโปรแกรมซอฟต์แวร์สำหรับควบคุมการเผาไหม้

จากการทดลองการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด ได้พบว่า อุดหนุนการเผาไหม้ที่ควบคุมได้มีค่าการเบี่ยงเบนสูง ดังนั้นเพื่อค่าการเบี่ยงเบนของ อุดหนุนมีค่าแคบลง ผู้วิจัยจึงนำเอาไมโครคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการควบคุม โดยติดตั้ง ระบบควบคุมใหม่ คือ เครื่องขยายสัญญาณ การ์ดควบคุมในไมโครคอมพิวเตอร์ และเครื่อง ควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อกำหนดอัตราการป้อนถ่านหิน

การเขียนโปรแกรมให้มีรูปแบบการทำงานให้เหมาะสมกับการเผาไหม้นั้น พิจารณาจาก การเผาไหม้ที่ควบคุมด้วยเครื่องควบคุมแบบเปิด-ปิด ซึ่งมีรูปแบบการทำงานหลักแบ่งเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ควบคุมโดยผู้ควบคุม และช่วงควบคุมโดยเครื่องควบคุม จากหลักการนี้เองทำให้เราสามารถวางรูปแบบการทำงานของโปรแกรมให้สอดคล้องกับรูปแบบเดิม ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ส่วน สำคัญ คือ

ก. ส่วนควบคุมโดยผู้ควบคุม (manual control) คือ ผู้ควบคุมสามารถปรับ เปลี่ยนค่าของอัตราการป้อนถ่านหินได้ตามต้องการ โดยใช้สัญญาณการควบคุมตามที่กำหนดใน โปรแกรม โปรแกรมส่วนนี้จะใช้เมื่อเริ่มการเผาไหม้จนกระทั่งสถานะการเผาไหม้อยู่ในสถานะคงที่

ข. ส่วนของการอ่านค่าอุดหนุน คือ ส่วนนี้จะทำหน้าที่รับสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล ที่ผ่านเครื่องขยายสัญญาณแล้ว เพื่อมาคำนวณเป็นค่าของอุดหนุนเก็บไว้ในหน่วยความจำของเครื่อง ไมโครคอมพิวเตอร์สำหรับนำไปใช้ต่อไป

ค. ส่วนของการควบคุมแบบอัตโนมัติ (automatic control) คือ ส่วนของ โปรแกรมที่นำค่าอุดหนุนที่อ่านได้มาเปรียบเทียบกับค่าของอุดหนุนที่กำหนดและไปปรับเปลี่ยนค่าของ อัตราการป้อนถ่านหินตามความสัมพันธ์ที่เขียนไว้ในโปรแกรม เพื่อควบคุมสถานะการเผาไหม้ให้อยู่ ในสถานะคงที่

ซึ่งเราจะเขียนโปรแกรมให้การทำงานทั้ง 3 ส่วนนี้สัมพันธ์กันโดยใช้ภาษาเบสิก จากนั้นนำโปรแกรมที่ได้มาศึกษาผลของการควบคุมต่อไป คือ

4.3.1 ทดสอบว่าไมโครคอมพิวเตอร์สามารถควบคุมการเผาไหม้ได้หรือไม่

เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงระบบควบคุมใหม่จึงต้องมีการทดสอบอุปกรณ์และ โปรแกรมให้มีการทำงานที่สอดคล้องกัน โดยใช้โปรแกรมส่วนที่ควบคุมโดยผู้ควบคุม ทั้งนี้เพราะ สามารถปรับอัตราการป้อนถ่านหินได้อย่างรวดเร็ว และ เพื่อเป็นการศึกษาระบบการเผาไหม้เมื่อ

เปลี่ยนเครื่องควบคุมด้วย ซึ่งจากการทดลองไมโครคอมพิวเตอร์สามารถควบคุมการเผาไหม้ได้ดี ซึ่งผลการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

4.3.2 ทดสอบโปรแกรมส่วนควบคุมแบบอัตโนมัติ

เมื่อโปรแกรมส่วนควบคุมโดยผู้ควบคุมสามารถควบคุมการเผาไหม้ได้ และทราบลักษณะการควบคุมเมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่ คือ จะมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่านหินเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ดังนั้นในส่วนของโปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติจึงให้การทำงานมีการลดอัตราการป้อนถ่านหินเมื่ออุณหภูมิการเผาไหม้ในเบตสูงกว่าค่าที่ต้องการ และเพิ่มอัตราการป้อนถ่านหินเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่าที่ต้องการ การเพิ่มหรือลดอัตราการป้อนถ่านหินจะมีมากน้อยเท่าไรขึ้นกับผลต่างของอุณหภูมิ เมื่อนำโปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติมาใช้ทดลองควบคุมในช่วงที่การเผาไหม้อยู่ในสภาวะคงที่ คือ ใช้โปรแกรมควบคุมโดยผู้ควบคุมทำการควบคุมการเผาไหม้เริ่มต้นจนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ จึงเปลี่ยนมาใช้โปรแกรมควบคุมแบบอัตโนมัติต่อไป

เมื่อทดลองโปรแกรมควบคุมโดยใช้ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่านหินกับผลต่างของอุณหภูมิ ดังนี้

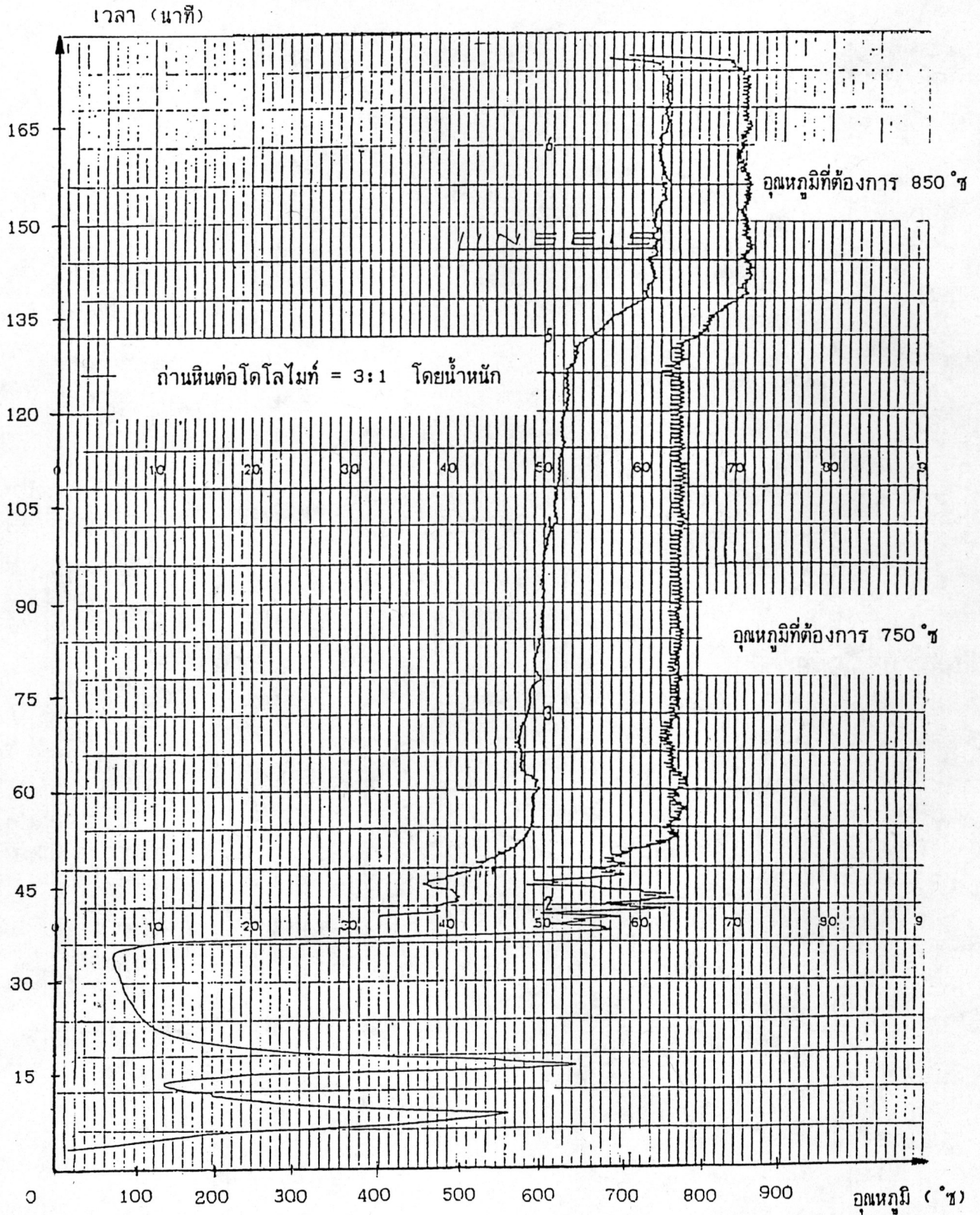
อุณหภูมิที่กำหนด - อุณหภูมิการเผาไหม้ขณะนั้น	> 30	อัตราการป้อนเปลี่ยนไป	+20
"	21 - 30	"	+10
"	11 - 20	"	+5
"	-20 - (-11)	"	-10
"	< -21	"	-2

ได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 4.3

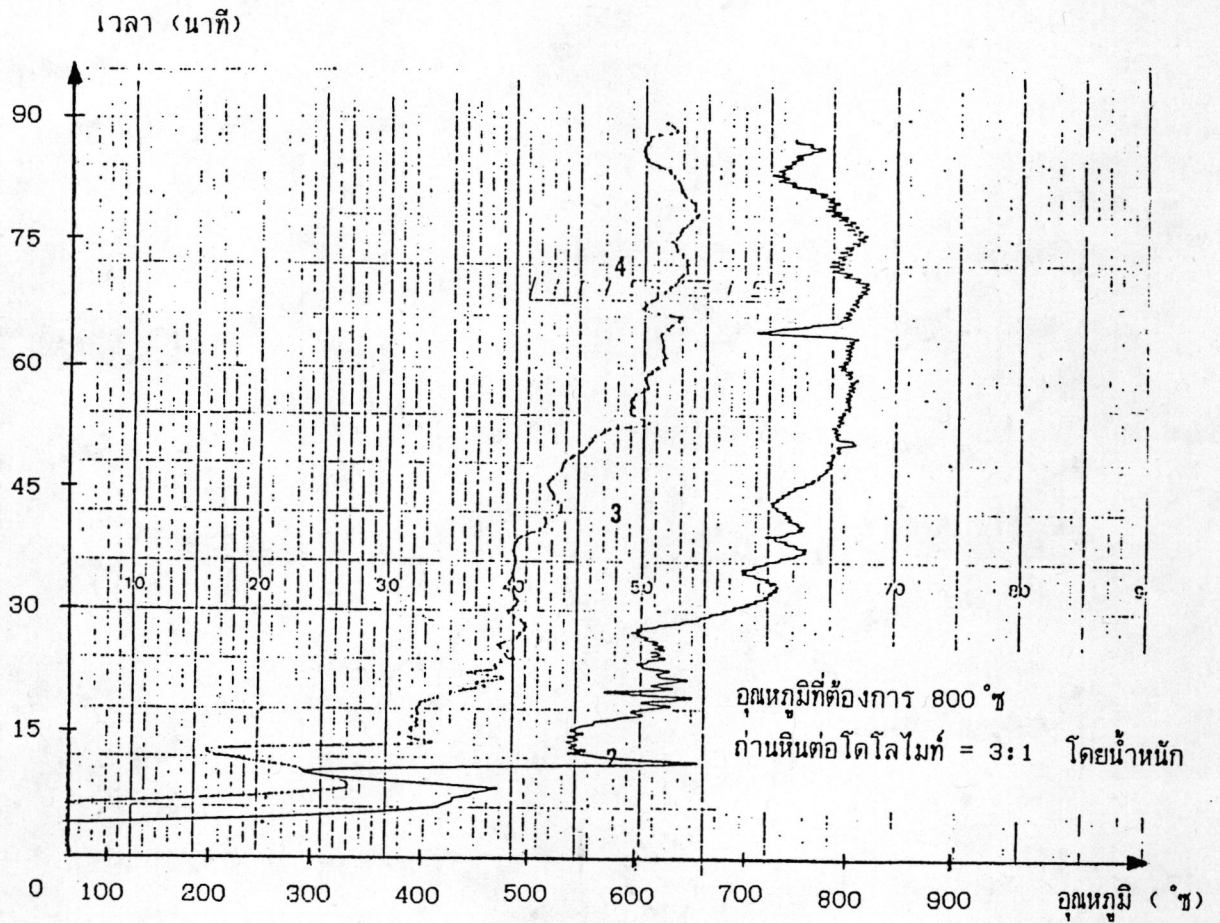
เมื่อความสัมพันธ์ที่ใช้แบบแรกค่าอัตราการป้อนที่เปลี่ยนแปลงตามค่าผลต่างของอุณหภูมิมิมีค่าสูงเกินไป ทำให้ไม่เหมาะสมกับความสามารถในการทำงานของเครื่องคอมพิวเตอร์ ดังนั้นจึงเปลี่ยนค่าความสัมพันธ์ใหม่ให้มีค่าการเปลี่ยนแปลงน้อยลงดังนี้

อุณหภูมิที่กำหนด - อุณหภูมิการเผาไหม้ขณะนั้น	> 30	อัตราการป้อนเปลี่ยนไป	+1.5
"	21 - 30	"	+1
"	11 - 20	"	+0.5
"	-20 - (-11)	"	-2
"	< -21	"	-5

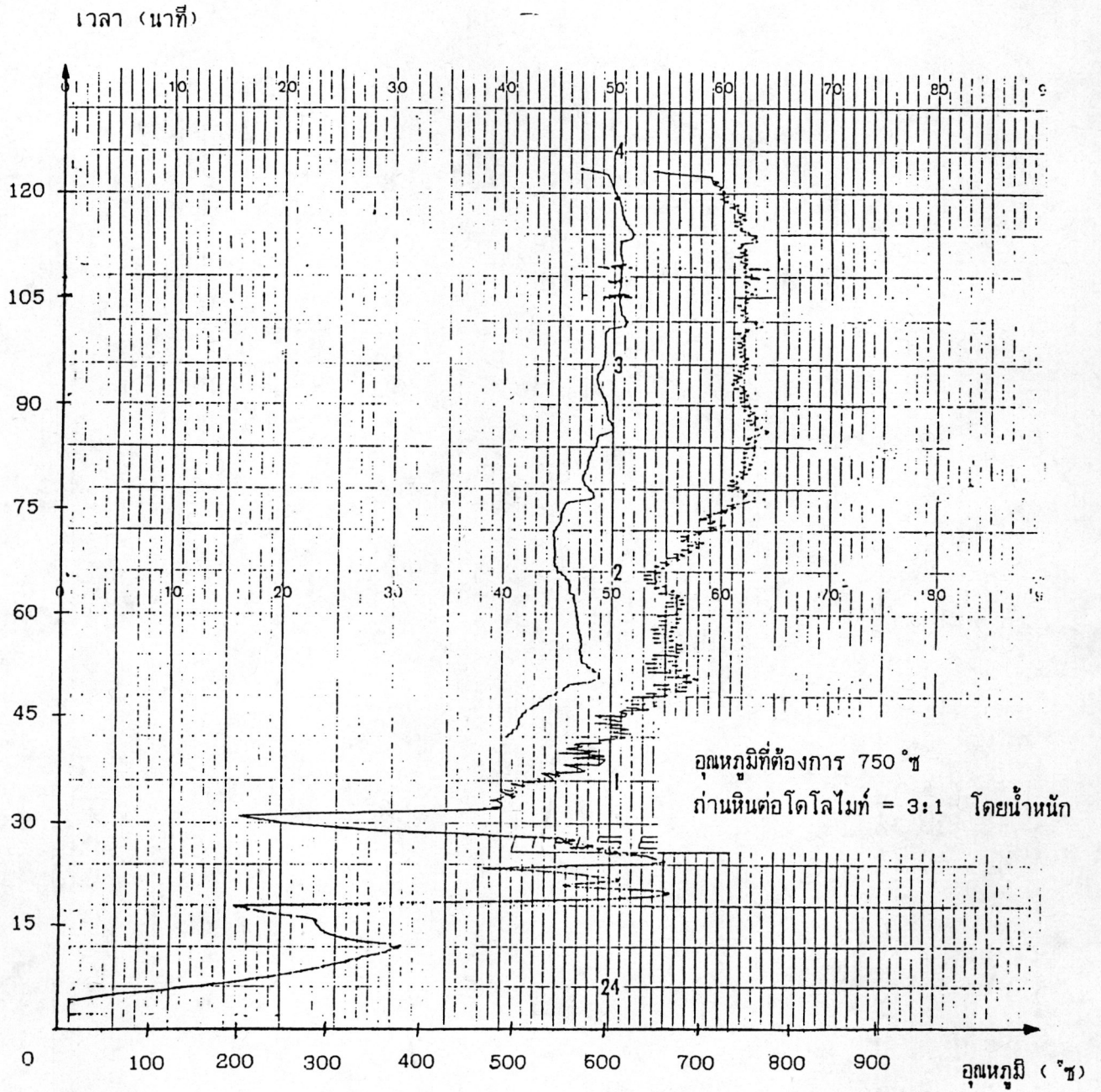
ได้ผลการควบคุมดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.2 ผลการควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ถ่านหินเมื่อใช้โปรแกรมควบคุมโดยผู้ควบคุม



รูปที่ 4.3 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติที่ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงคือ
 อุณหภูมิกที่กำหนด - อุณหภูมิกการเผาไหม้ขณะนั้น > 30 อัตราการป้อนเปลี่ยนไป +20
 " " 21 - 30 " +10
 " " 11 - 20 " +5
 " " -20 - (-11) " -10
 " " < -21 " -2



รูปที่ 4.4 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติที่ความสัมพันธ์ในการเปลี่ยนแปลงคือ

อุณหภูมิที่กำหนด	-	อุณหภูมิการเผาไหม้ขณะนั้น	> 30	อัตราการเปลี่ยนแปลงไป	+1.5
"	"	"	21 - 30	"	+1
"	"	"	11 - 20	"	+0.5
"	"	"	-20 - (-11)	"	-2
"	"	"	< -21	"	-5

ผลการควบคุมของโปรแกรมที่ใช้ความสัมพันธ์ที่ผ่านมายังไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของการเผาไหม้ได้อย่างแน่นอน ผู้วิจัยจึงพยายามหาความสัมพันธ์ของโปรแกรมที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งความสัมพันธ์ที่เลือกใช้ คือ ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของเครื่องควบคุมแบบต่างๆ ตามหลักการของการควบคุมกระบวนการทางเคมี ซึ่งความสัมพันธ์แบบนี้จะมีค่าคงที่เฉพาะในแต่ละแบบ ในการทดลองหาค่าคงที่ของกระบวนการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์ เบดโดยใช้โปรแกรมควบคุมโดยผู้ควบคุมคือ เมื่อระบบอยู่ในสภาวะคงที่แล้ว จากนั้นเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่านหินไปเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง เช่น จากอัตราการป้อนเดิมเท่ากับ 150 กรัม/นาทึ เปลี่ยนเป็น 200 กรัม/นาทึ เป็นต้น และรอจนกว่าระบบเข้าสู่สภาวะคงที่เองอีกครั้งที่ความเร็วลมคงที่ จะได้ค่าผลต่างของอุณหภูมิที่สภาวะคงที่ และผลต่างของถ่านหินที่ป้อน ซึ่งจากการทดลองนี้จะได้อัตราคงที่ของกระบวนการดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่าคงที่ของกระบวนการ (process gain, } K_p) &= 0.083 \quad ^\circ\text{C/step} \\ \text{เวลาคงที่ของกระบวนการ (time constant, } T_p) &= 3.03 \quad \text{นาทึ} \end{aligned}$$

การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้มีรูปแบบการควบคุมเป็นแบบป้อนกลับ (feedback control) ซึ่งการควบคุมแบบนี้มีเครื่องควบคุมที่นิยมใช้กัน 3 แบบ คือ เครื่องควบคุมแบบ P เครื่องควบคุมแบบ PI และเครื่องควบคุมแบบ PID แต่ละเครื่องควบคุมจะมีค่าคงที่ต่างกันตามสมมุติฐานของ Cohen & Coon (31) คือ จากค่าคงที่ของกระบวนการจะได้ค่าคงที่ของเครื่องควบคุมดังนี้

- เครื่องควบคุมแบบ P

$$\text{ค่าคงที่ของเครื่องควบคุม (proportional gain, } K_c) = 40 \quad \text{step}/^\circ\text{C}$$

- เครื่องควบคุมแบบ PI

$$\text{ค่าคงที่ของเครื่องควบคุม (proportional gain, } K_c) = 33.5 \quad \text{step}/^\circ\text{C}$$

$$\text{ค่า integral time constant (} T_i) = 1.2 \quad \text{นาทึ}$$

- เครื่องควบคุมแบบ PID

$$\text{ค่าคงที่ของเครื่องควบคุม (proportional gain, } K_c) = 51.2 \quad \text{step}/^\circ\text{C}$$

$$\text{ค่า integral time constant (} T_i) = 1.3 \quad \text{นาทึ}$$

$$\text{ค่า derivative time constant (} T_d) = 0.2 \quad \text{นาทึ}$$

จากความสัมพันธ์ใหม่ที่เราเลือกใช้ ผู้วิจัยจะได้ทดลองเขียนโปรแกรมตามชนิดของเครื่องควบคุมทั้ง 3 แบบ ต่อไป เพื่อดูว่าโปรแกรมใดเหมาะสมกับระบบการเผาไหม้

4.4 การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดเบดด้วยโปรแกรมอัตโนมัติแบบ P, PI, PID

เมื่อได้ความสัมพันธ์ของการควบคุมที่จะใช้แล้ว จึงได้เขียนโปรแกรมควบคุมตามแบบเครื่องควบคุม และกำหนดเวลาในการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิเพราะการเปรียบเทียบกับอุณหภูมิของคอมพิวเตอร์จากเดิมนั้นเร็วเกินไป อีกทั้งที่อุณหภูมิของการเผาไหม้ต่ำกว่าค่าที่ต้องการ เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนถ่านหินแล้ว ต้องรอเวลาช่วงหนึ่งเพื่อให้ถ่านหินถูกเผาไหม้และทำให้อุณหภูมิสูงขึ้น จึงเขียนโปรแกรมเพื่อรอเวลาก่อนที่จะมีการเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่านหินอีกครั้ง ส่วนการลดอุณหภูมิการเผาไหม้นั้นจะลดช้า ดังนั้นช่วงเวลาในการลดอัตราการป้อนถ่านหินจึงเร็วกว่าเพื่อให้อุณหภูมิลดลงเร็วขึ้น ซึ่งจากโปรแกรมใหม่นี้จะได้ทำการทดลองหาโปรแกรมที่เหมาะสมต่อไป

4.4.1 การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ P

เครื่องควบคุมแบบ P มีสมการความสัมพันธ์ คือ

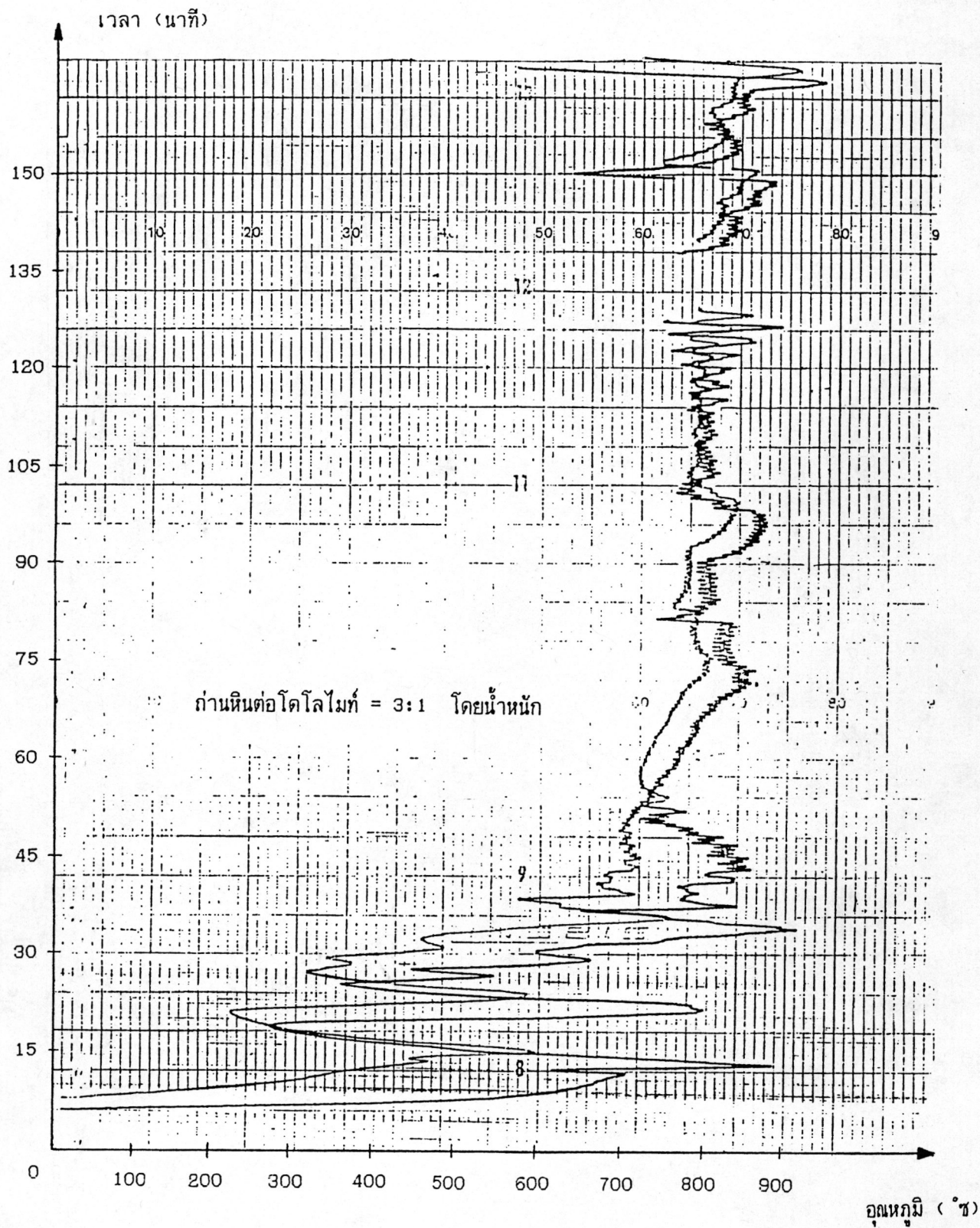
$$\text{อัตราการป้อนถ่านหิน} = K_c(\text{อุณหภูมิที่กำหนด} - \text{อุณหภูมิที่วัดได้}) + \text{อัตราการป้อนถ่านหินที่สถานะเดิม} \quad \dots (4.1)$$

เมื่อทดลองใช้โปรแกรมควบคุมใหม่นี้โดยใช้ค่าคงที่ $K_c = 40 \text{ step/}^\circ\text{C}$ ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.5

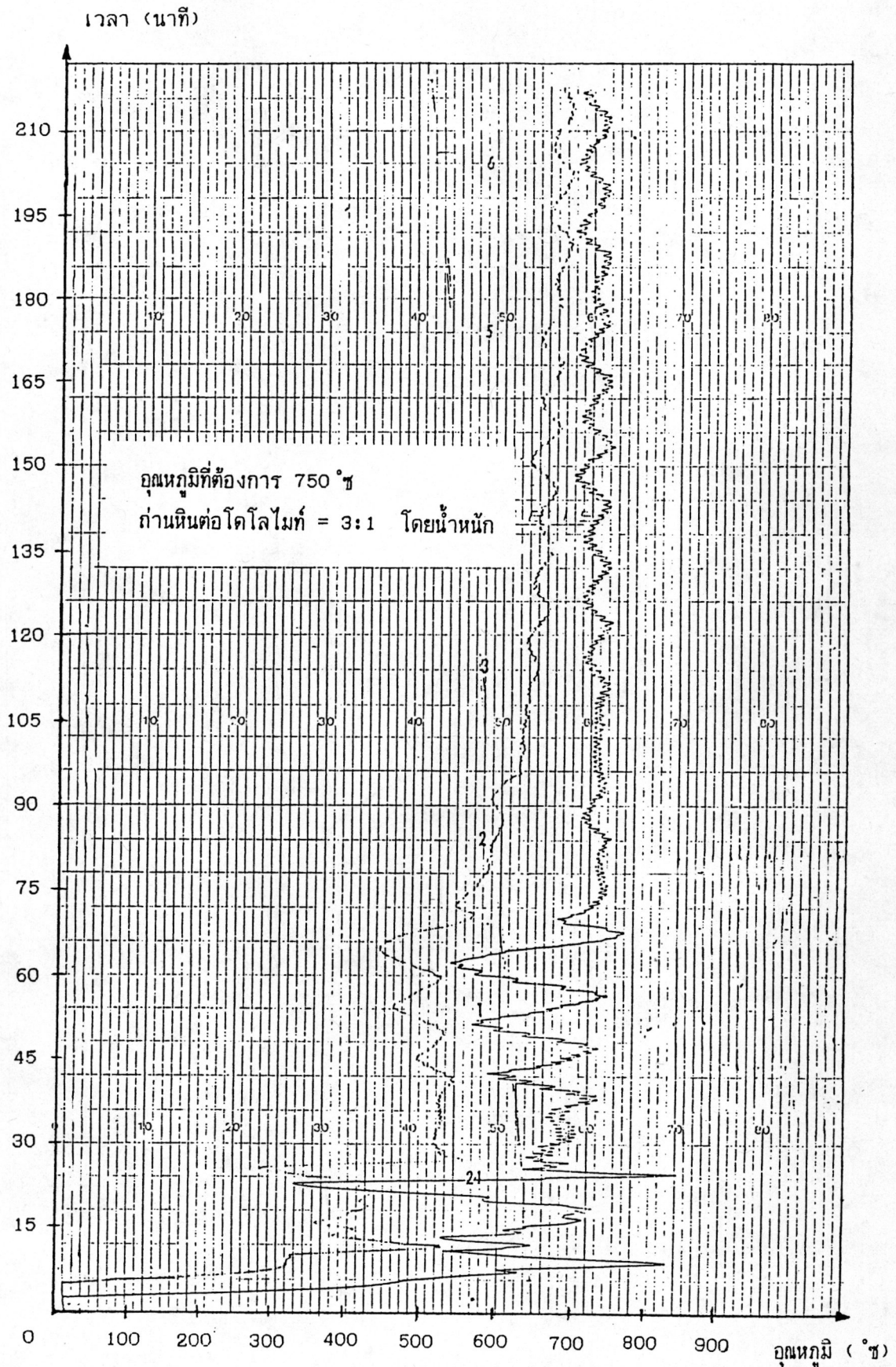
จากการใช้ค่าคงที่ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon ไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิการเผาไหม้ให้คงที่ได้ ผู้วิจัยจึงเลือกค่าคงที่ของการควบคุม (K_c) ใหม่ให้สอดคล้องกับการทำงานของระบบการเผาไหม้ คือ อัตราการป้อนถ่านหินควรมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย เพื่อให้อุณหภูมิการเผาไหม้คงที่ ดังนั้นเราจึงใช้ค่าคงที่ของการควบคุมให้มีค่าน้อยลงโดยพิจารณาจากสมการการหาค่าคงที่ของกระบวนการกับสมการความสัมพันธ์ของเครื่องควบคุมแบบ P จะได้

$$K_c = 1/K_p = 12 \text{ step/}^\circ\text{C} \quad \dots (4.2)$$

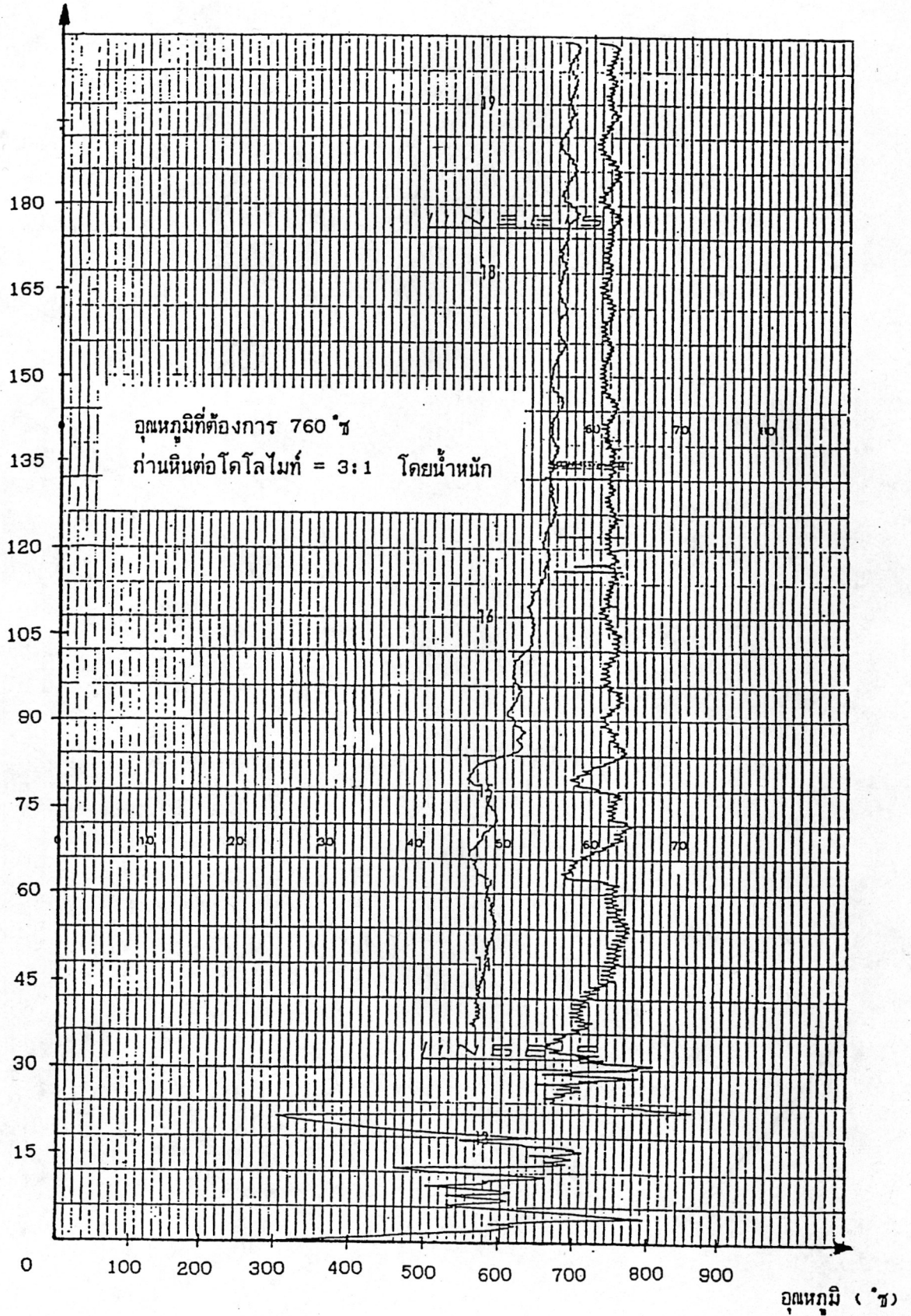
สำหรับช่วงเวลาในการนำค่าอุณหภูมิมาเปรียบเทียบกับจะต้องเป็นค่าที่เหมาะสม สอดคล้องกับการเผาไหม้และการควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลองหาค่าเวลาในการเปรียบเทียบที่เหมาะสมของโปรแกรมแบบ P ที่ใช้ค่าคงที่ $K_c = 12 \text{ step/}^\circ\text{C}$ เป็นดังนี้



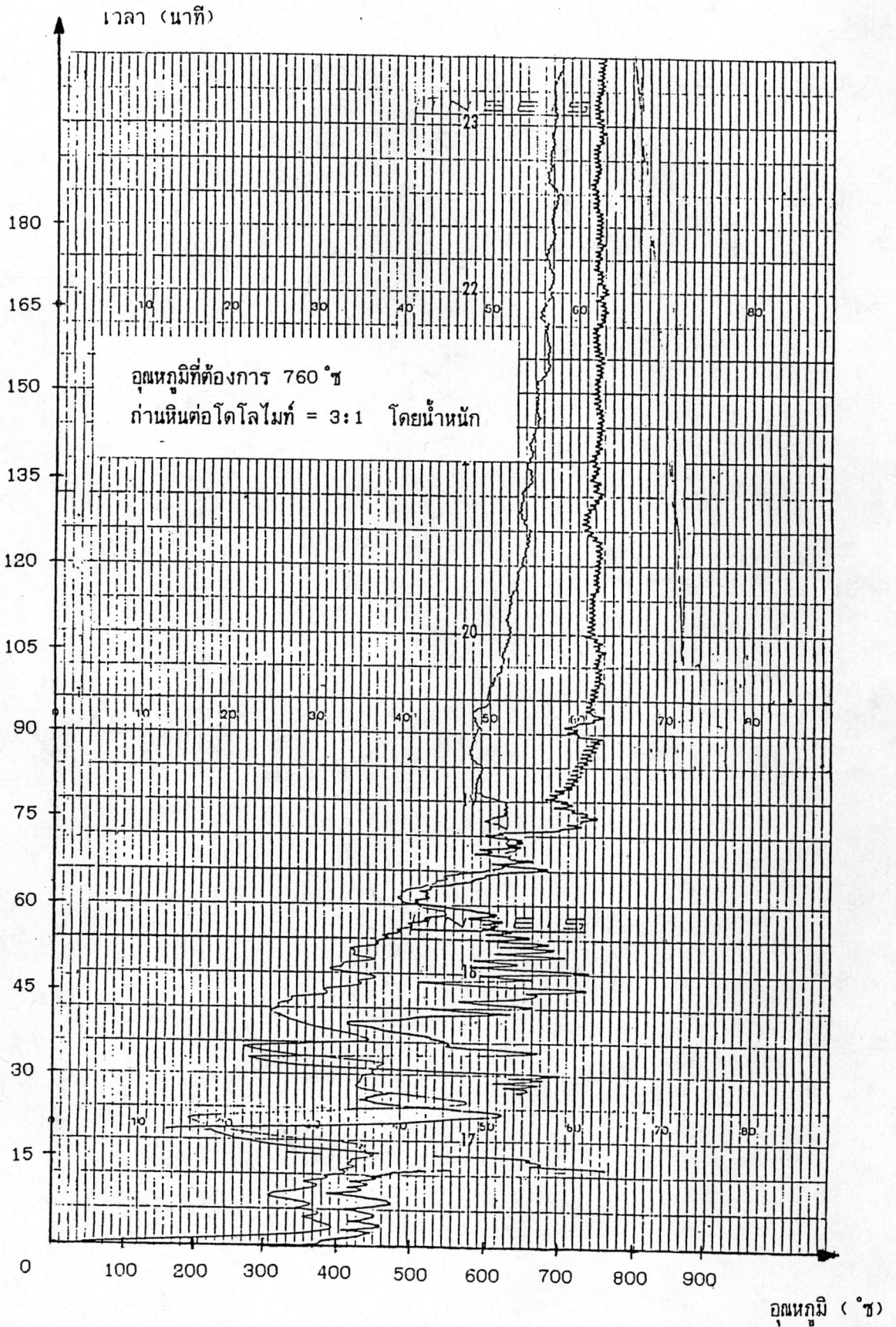
รูปที่ 4.5 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่า $K_c = 40$ เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที



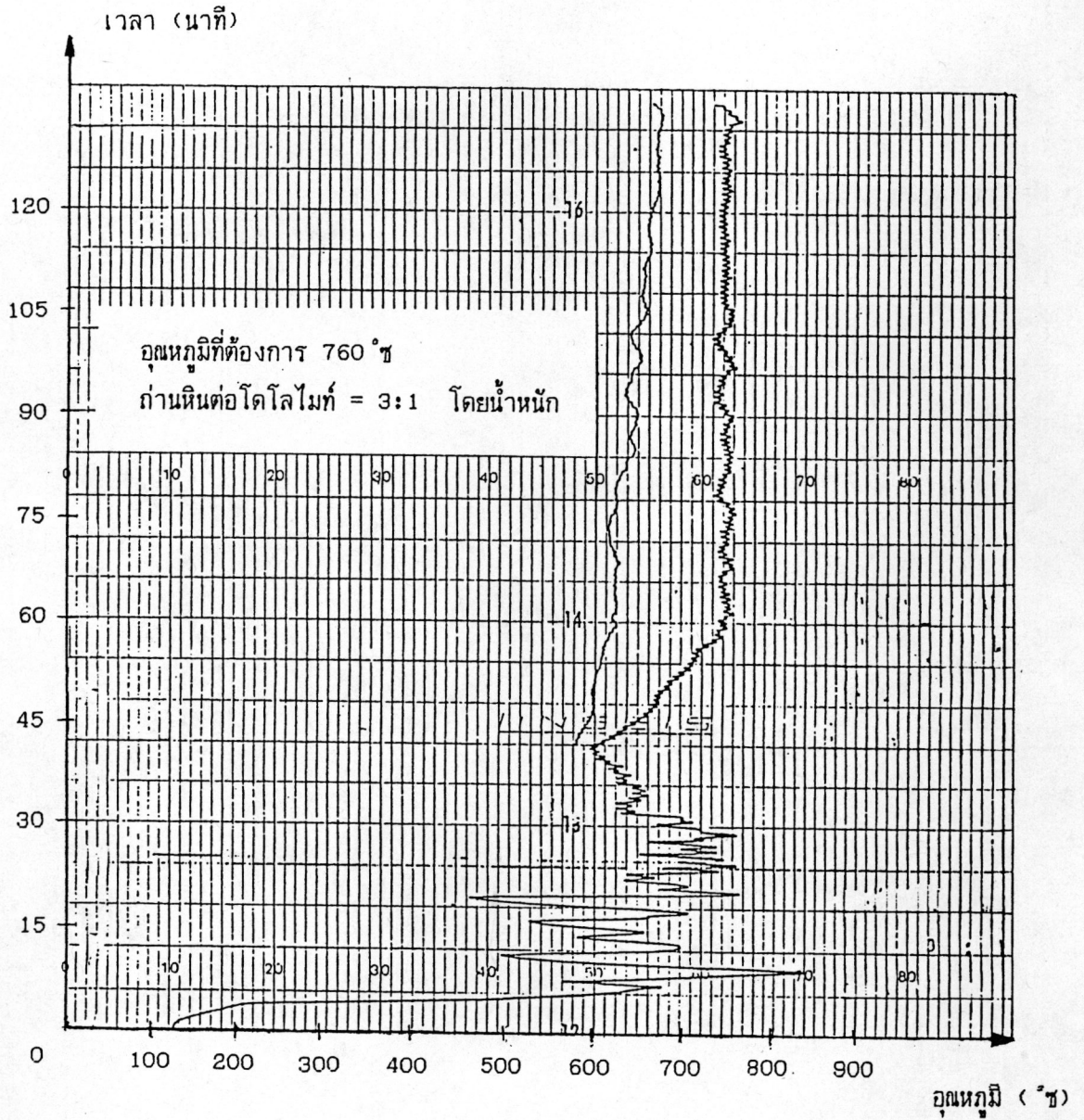
รูปที่ 4.6 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 25 วินาที จำนวนการวนรอบหรือจำนวนเท่าของเวลาที่ใช้ในการเปรียบเทียบเมื่ออุณหภูมิมีค่าต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด = 7



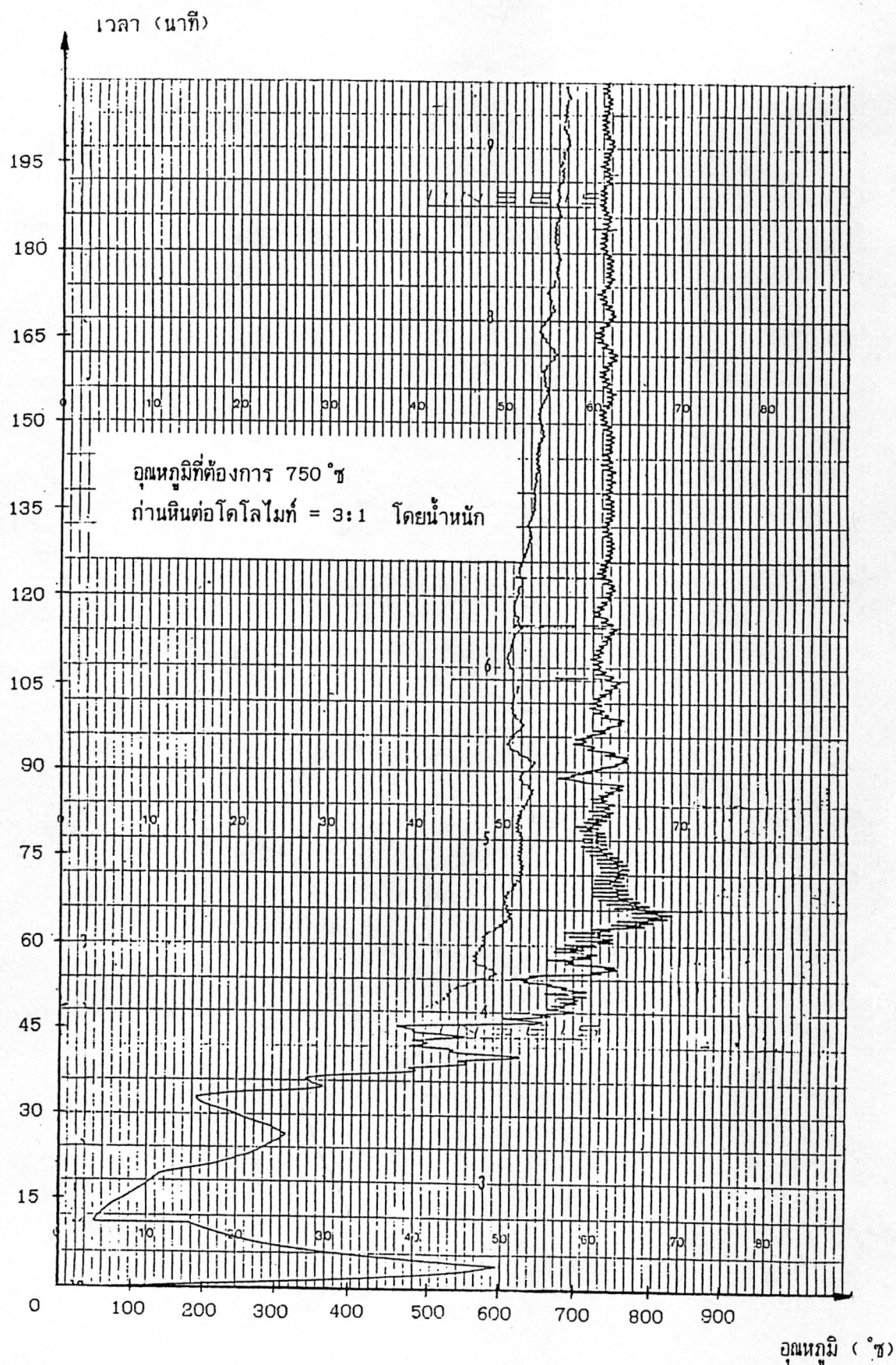
รูปที่ 4.7 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 15 นาที จำนวนการวนรอบ = 7



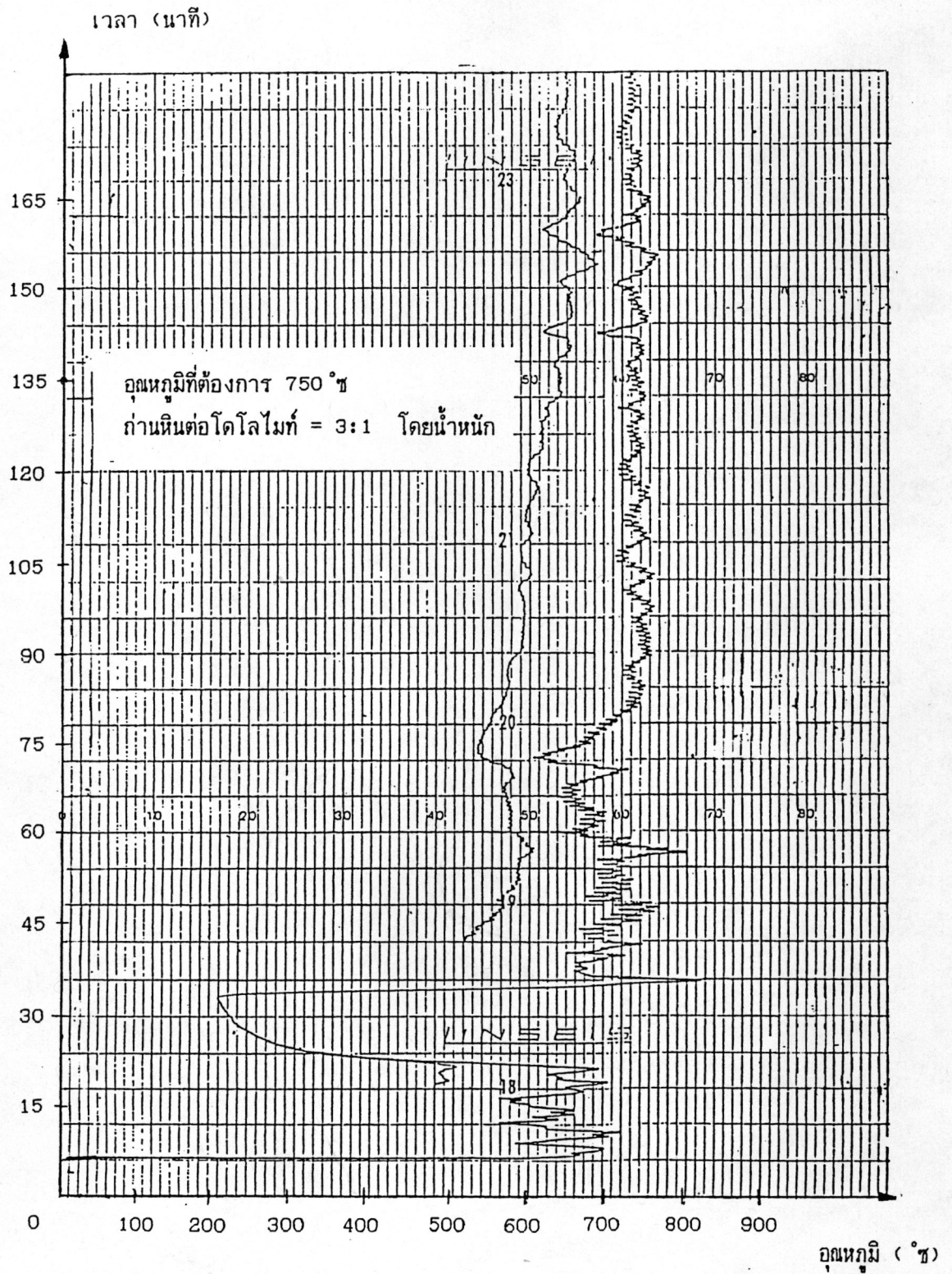
รูปที่ 4.8 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 15 นาที จำนวนการวนรอบ = 7



รูปที่ 4.9 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 10 นาที จำนวนการวนรอบ = 8



รูปที่ 4.10 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 10 นาที จำนวนการวนรอบ = 7



รูปที่ 4.11 ผลการควบคุมเมื่อโปรแกรมใช้ค่าคงที่ $K_c = 12$ และ ช่วงเวลาในการเปรียบเทียบ 10 นาที จำนวนการวนรอบ = 6

จากผลการทดลองหาค่าคงที่ที่เหมาะสมขึ้นกับสภาวะการเผาไหม้ขณะนั้นๆ ผู้วิจัยจึงพัฒนาโปรแกรมให้สามารถเลือกใช้ค่าคงที่ของความสัมพันธ์ให้เหมาะสมกับสภาวะการเผาไหม้และแก้ไขข้อบกพร่องของโปรแกรมที่ผ่านมา คือ อัตราการป้อนจะเปลี่ยนมากถ้าสภาวะในระบบมีการเผาไหม้ช้า เนื่องจากความสัมพันธ์เป็นการเปลี่ยนอัตราการป้อนถ่วงน้ำหนักจากค่าที่เปลี่ยนไปแล้วเช่นนี้ จึงทำให้โอกาสที่อัตราการป้อนจะเปลี่ยนแปลงไปมากเกินต้องการได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้ความสัมพันธ์แบบ P ที่สภาวะคงที่ คือ

$$\text{อัตราการป้อนถ่วงน้ำหนัก} = K_c(\text{อุณหภูมิที่กำหนด} - \text{อุณหภูมิที่วัดได้}) + \text{อัตราการป้อนถ่วงน้ำหนักที่สภาวะคงที่} \quad \dots (4.3)$$

โปรแกรมที่พัฒนาใหม่นี้มีลักษณะการทำงานดังรูปที่ 4.12 ผลการควบคุมด้วยโปรแกรมนี้สามารถรักษาอุณหภูมิในการเผาไหม้ให้อยู่ในแนวที่ต้องการได้ดังรูปที่ 4.13

4.4.2 การควบคุมด้วยโปรแกรมแบบ PI

เมื่อโปรแกรมควบคุมแบบ P เกิดปัญหาเรื่องค่า offset ดังนั้นผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยทดลองใช้ความสัมพันธ์ของเครื่องควบคุมแบบ PI ที่สามารถกำจัดค่า offset ได้ทั้งหมด สมการความสัมพันธ์ คือ

$$\text{อัตราการป้อนถ่วงน้ำหนัก} = K_c(\text{อุณหภูมิที่กำหนด} - \text{อุณหภูมิที่วัดได้}) + (K_c/\tau_i)(\text{พื้นที่ใต้กราฟระหว่างค่าผลต่างของอุณหภูมิกับเวลา}) + \text{อัตราการป้อนถ่วงน้ำหนักที่สภาวะคงที่} \quad \dots (4.4)$$

รูปแบบการทำงานของโปรแกรมแสดงได้ดังรูป 4.14 ผลการควบคุมเมื่อใช้ $K_c = 12 \text{ step}/^\circ\text{C}$ กับ $\tau_i = 1.2$ นาที (ตามสมมติฐานของ Cohen & Coon) ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.15

4.4.3 โปรแกรมควบคุมแบบ PID

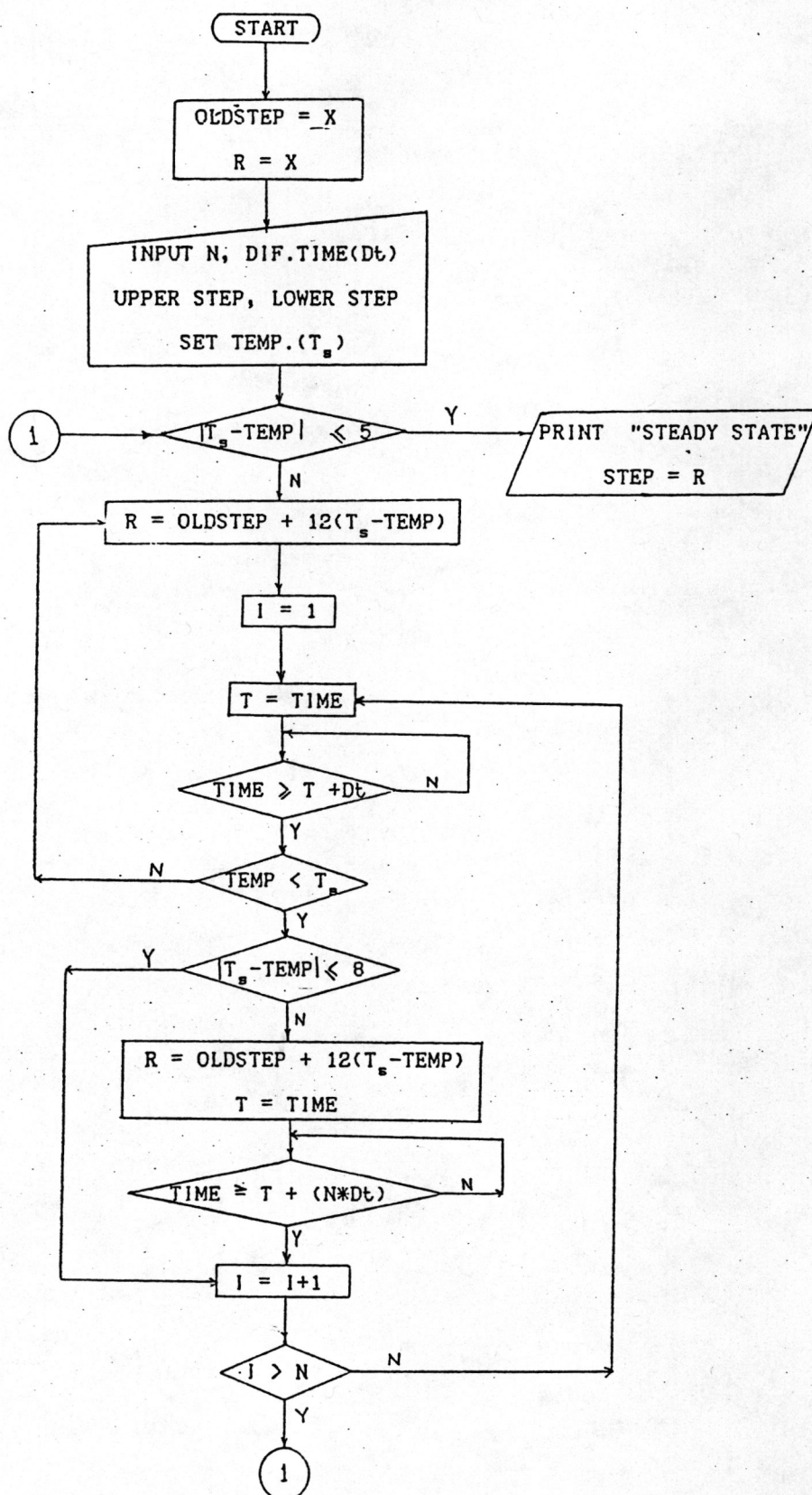
โปรแกรมควบคุมแบบนี้จะช่วยลดค่าการแกว่งที่เกิดขึ้นจากการควบคุมแบบ PI และยังสามารถกำจัดค่า offset ได้ด้วย ซึ่งสมการความสัมพันธ์ คือ

$$\begin{aligned} \text{อัตราการป้อนถ่านหิน} &= Kc(\text{อุณหภูมิที่กำหนด} - \text{อุณหภูมิที่วัดได้}) + (Kc/\tau_i) \left(\text{พื้นที่} \right. \\ &\quad \left. \text{ใต้กราฟระหว่างค่าผลต่างของอุณหภูมิกับเวลา} \right) + Kc\tau_D \\ &\quad \left(\text{ความชันของกราฟ} \right) + \text{อัตราการป้อนถ่านหินที่สภาวะคงที่} \\ &\quad \dots (4.5) \end{aligned}$$

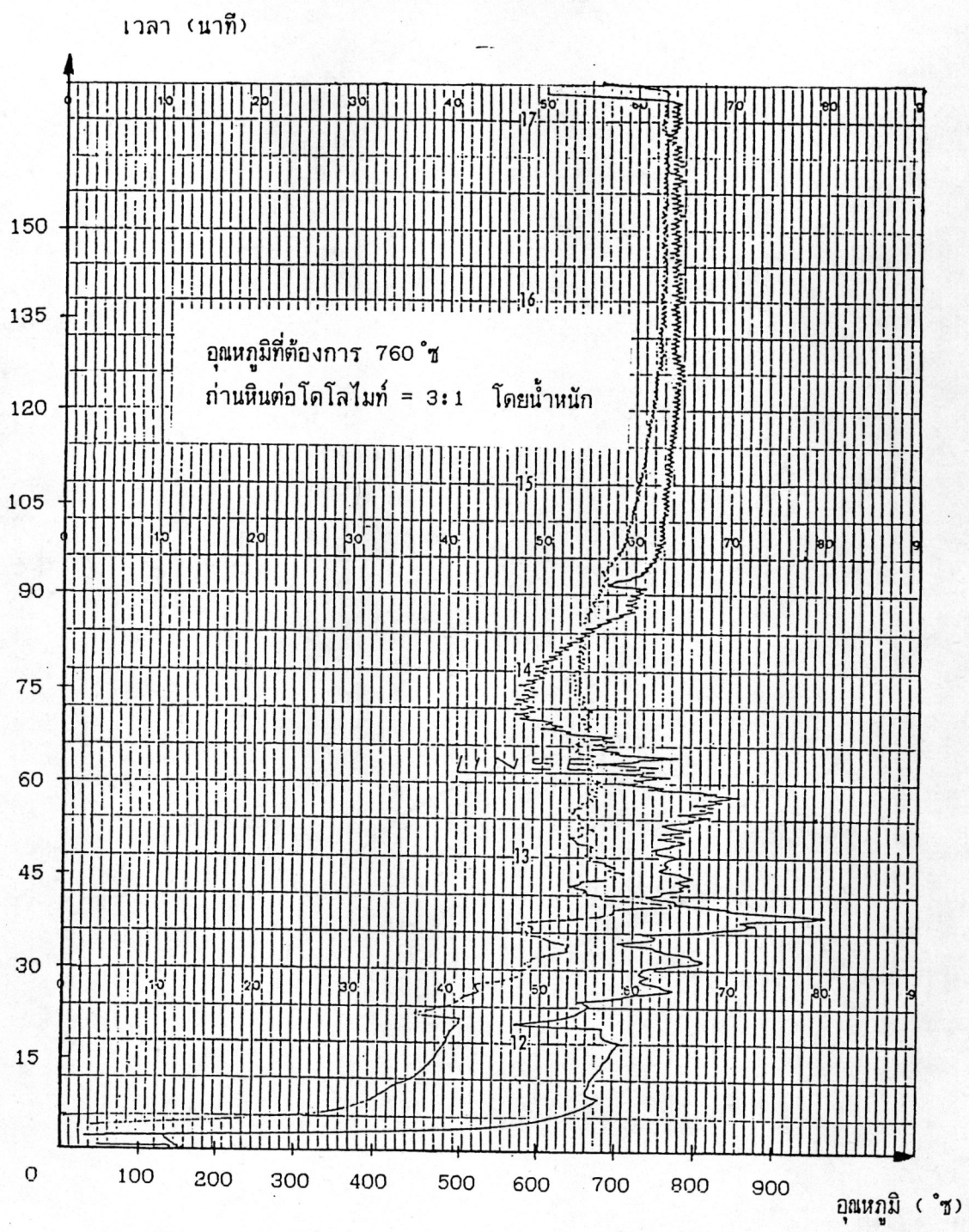
รูปแบบของโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 4.16 ผลการควบคุมเมื่อใช้ค่า $Kc = 12 \text{ step/}^\circ\text{C}$
 $\tau_i = 1.2 \text{ นาที}$ และ $\tau_D = 0.5 \text{ นาที}$ แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และเมื่อใช้ค่าคงที่
 $Kc = 12 \text{ step/}^\circ\text{C}$, $\tau_i = 1.3 \text{ นาที}$ และ $\tau_D = 0.2 \text{ นาที}$ ได้ผลการควบคุมดังรูป
 ที่ 4.18

4.4.4 โปรแกรมควบคุมแบบ P ที่พัฒนาใหม่

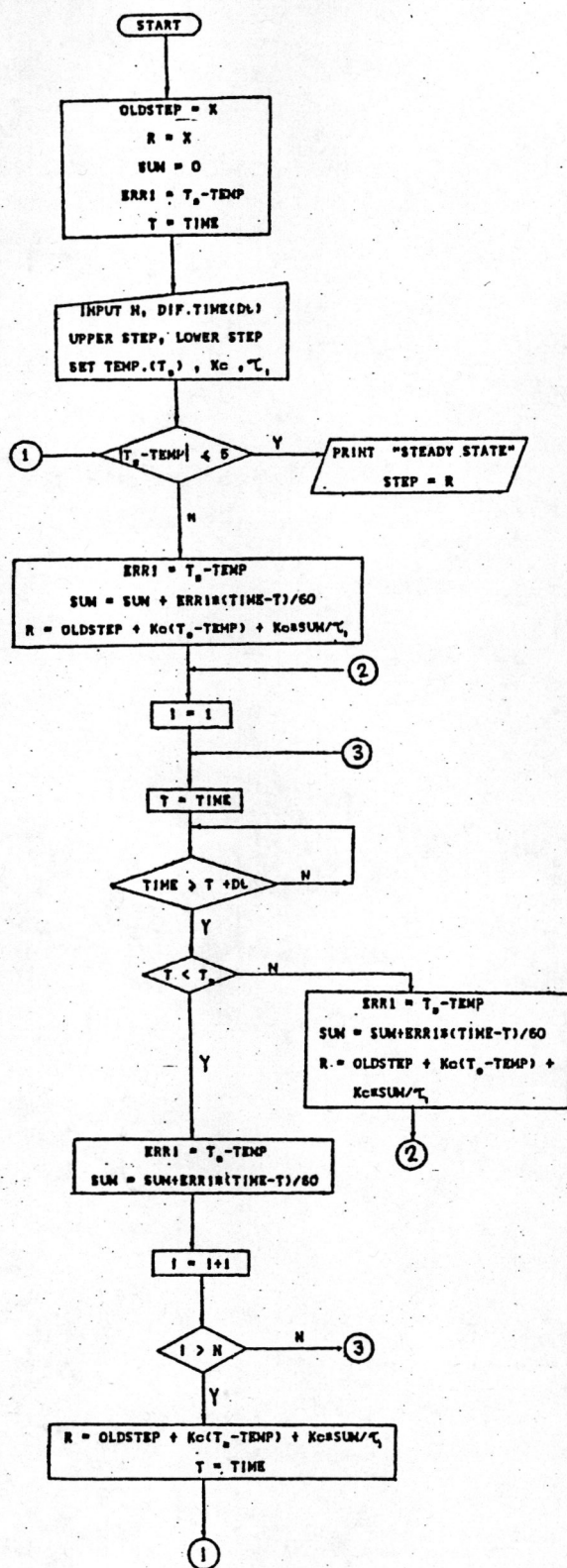
โปรแกรมที่ผ่านมามีทั้ง 3 แบบมีข้อดีและข้อเสียต่างกัน แต่โปรแกรมที่ผู้วิจัย
 คิดว่าน่าจะนำมาพัฒนาแก้ไขต่อไป คือ โปรแกรมควบคุมแบบ P เพราะมีการเบี่ยงเบนของอุณหภูมิ
 น้อยที่สุด อีกทั้งมีรูปแบบสมการความสัมพันธ์ในการควบคุมง่ายที่สุด ในการควบคุมที่ผ่านมานั้น
 โปรแกรมควบคุมแบบ P จะเกิดค่า offset คือ อุณหภูมิที่ควบคุมได้สูงกว่าอุณหภูมิที่กำหนด ซึ่ง
 ในการเขียนโปรแกรมเราสามารถเขียนให้แก้ไขข้อบกพร่องนี้ได้ เพราะลักษณะการทำงานของ
 เครื่องคอมพิวเตอร์ขึ้นกับโปรแกรมควบคุมที่ใช้ไม่มีลักษณะการทำงานเฉพาะเหมือนเครื่องควบคุมทั่วๆ
 ไป โปรแกรมที่แก้ไขใหม่มีรูปแบบการทำงานดังรูปที่ 4.19 ได้ผลการควบคุมเมื่อใช้ค่า
 $Kc = 12 \text{ step/}^\circ\text{C}$ ดังรูปที่ 4.20



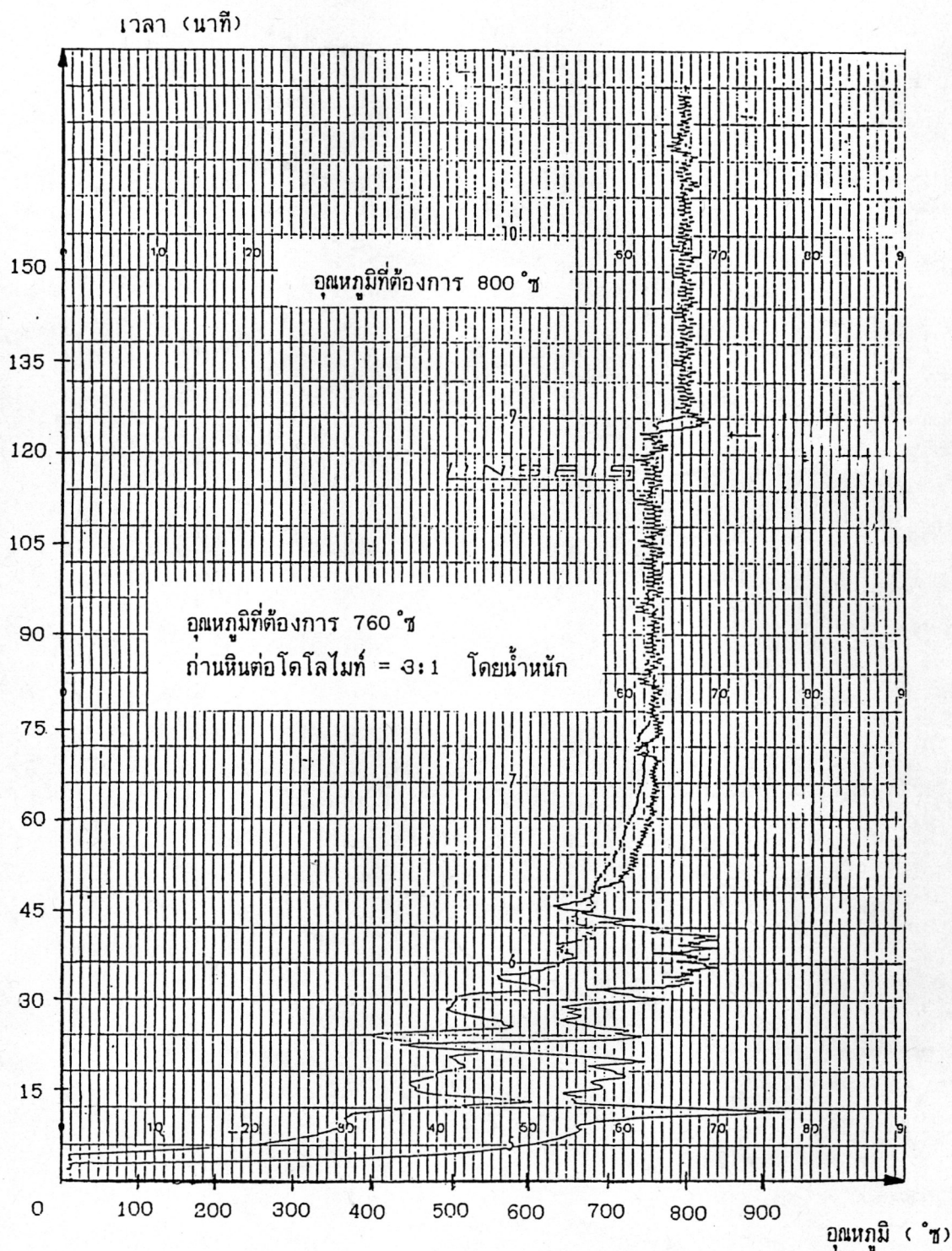
รูปที่ 4.12 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ P(proportional)



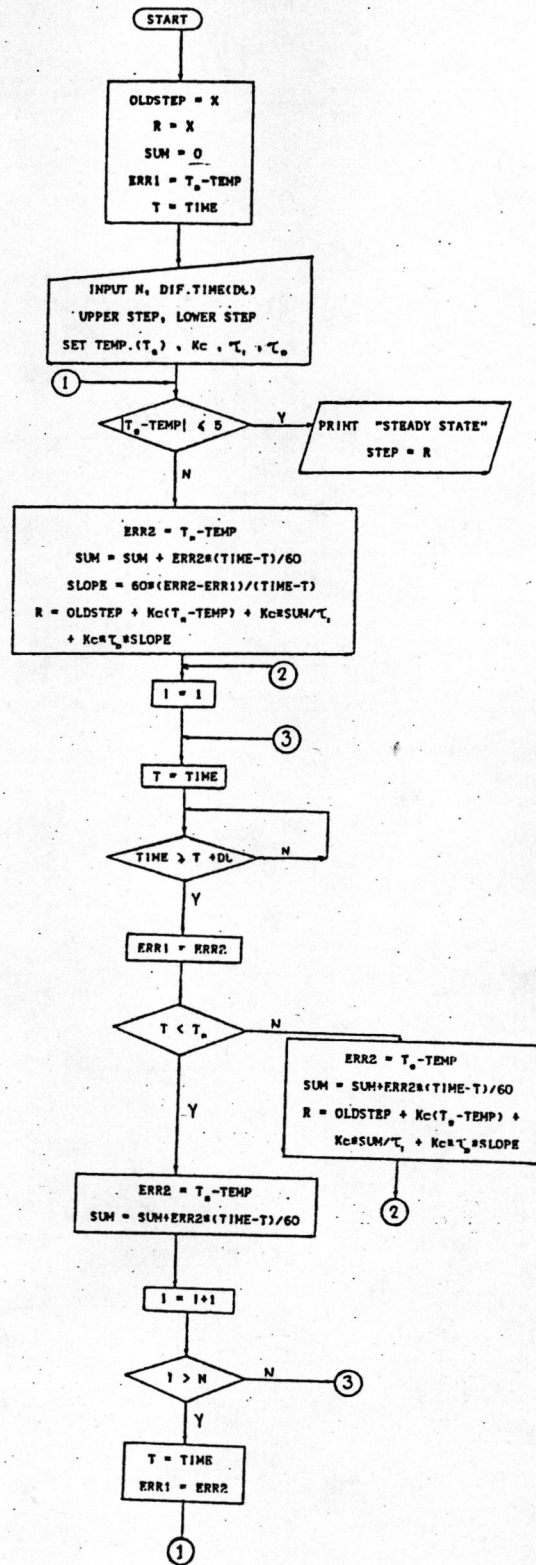
รูปที่ 4.13 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ P ที่ค่า $K_c = 12$
เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2



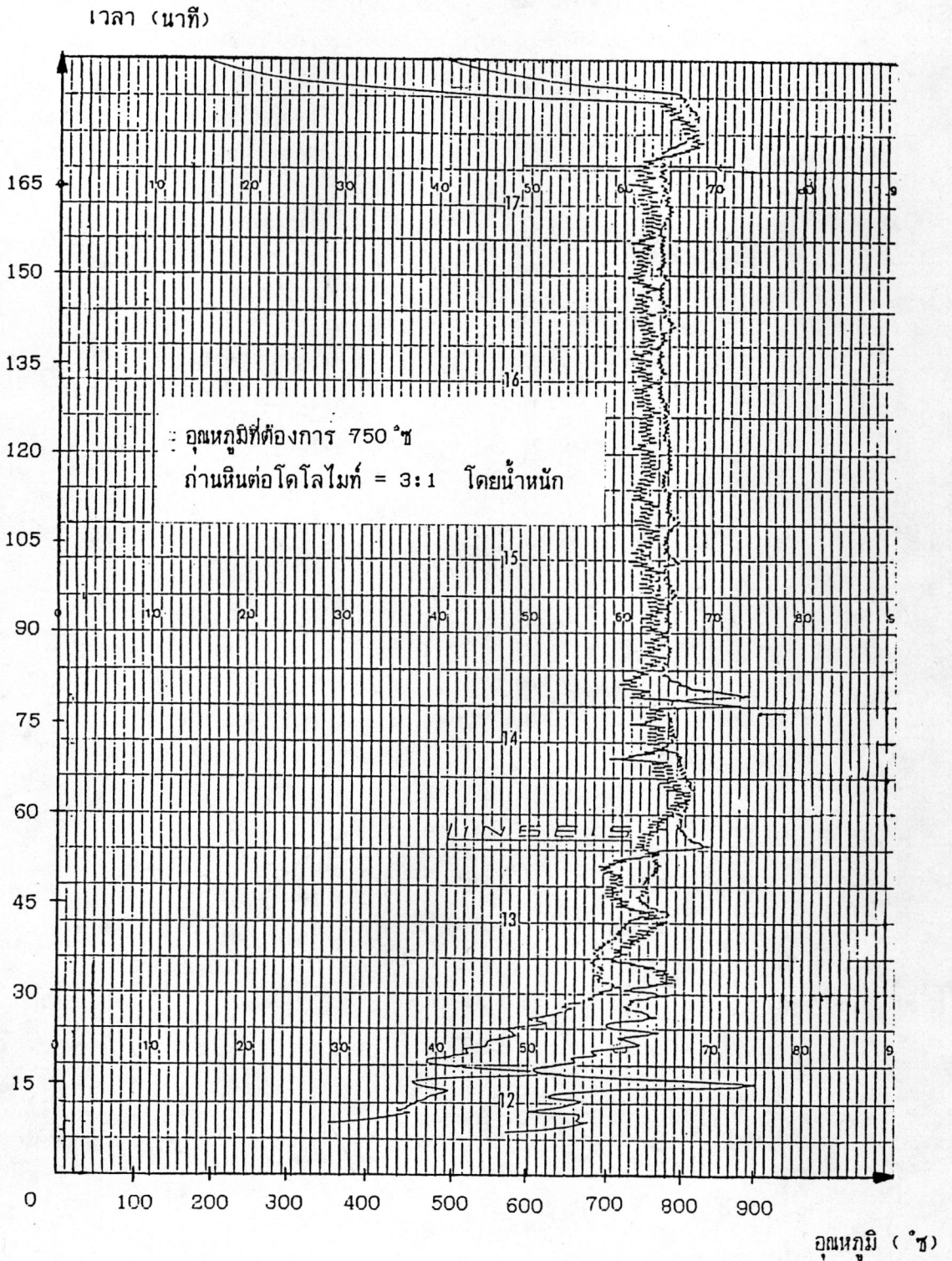
รูปที่ 4.14 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ PI (proportional Integral)



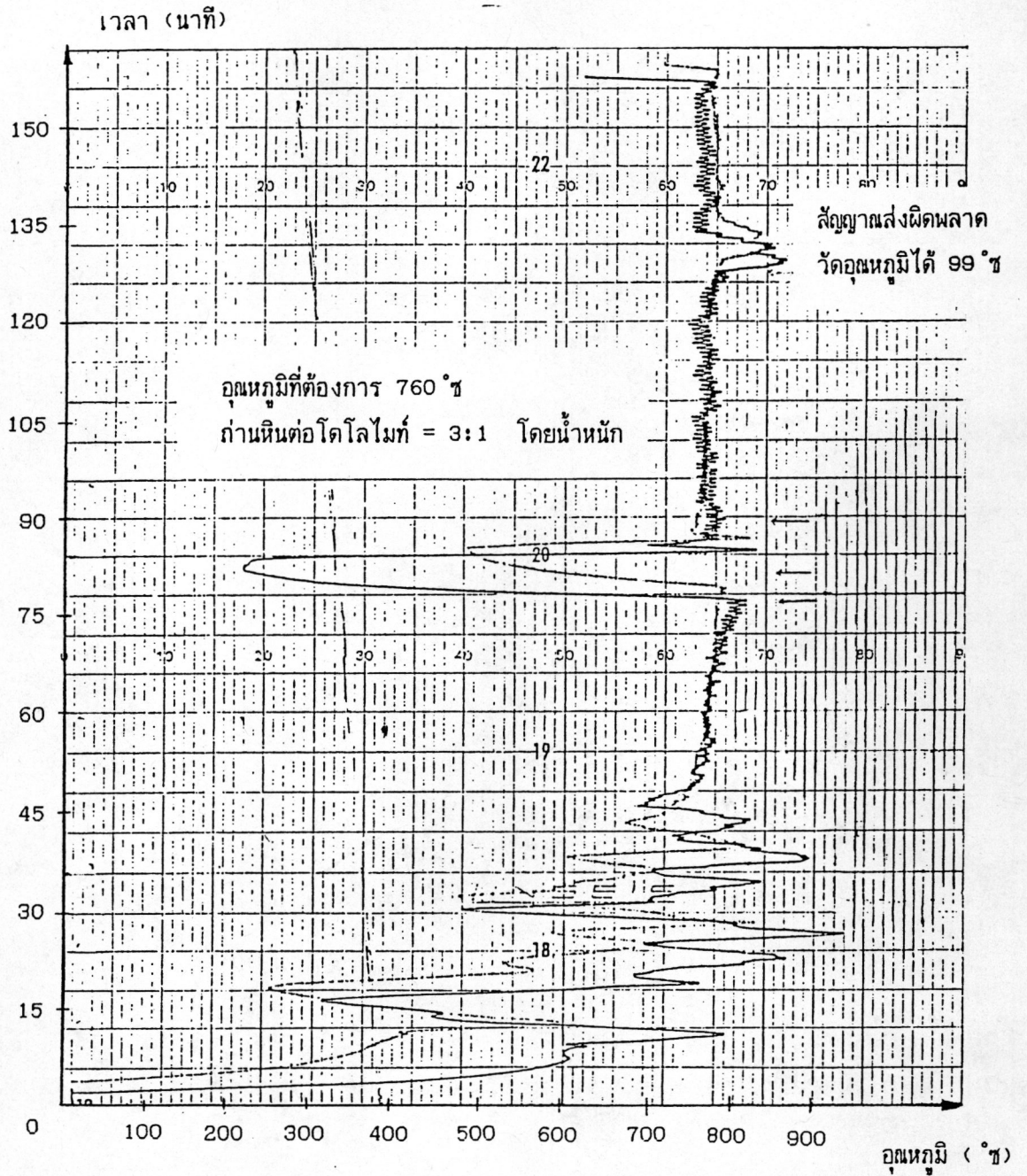
รูปที่ 4.15 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ PI ที่ค่า $K_c = 12$, $\tau_i = 1.2$
เวลาในการเปรียบเทียบ 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2



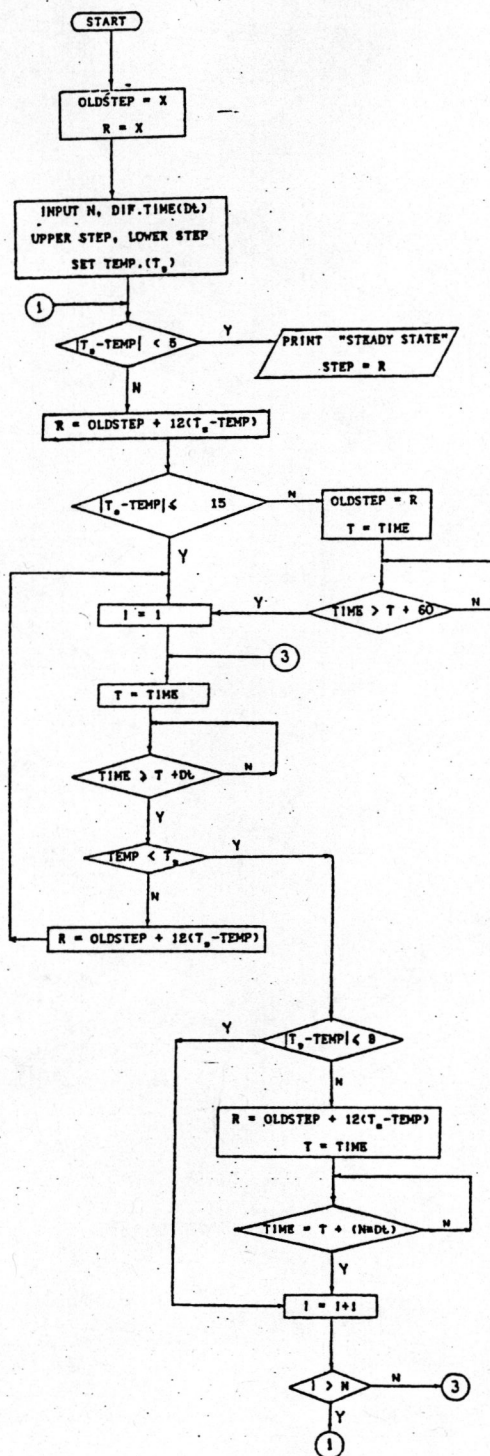
รูปที่ 4.16 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ PID (proportional Integral Derivative)



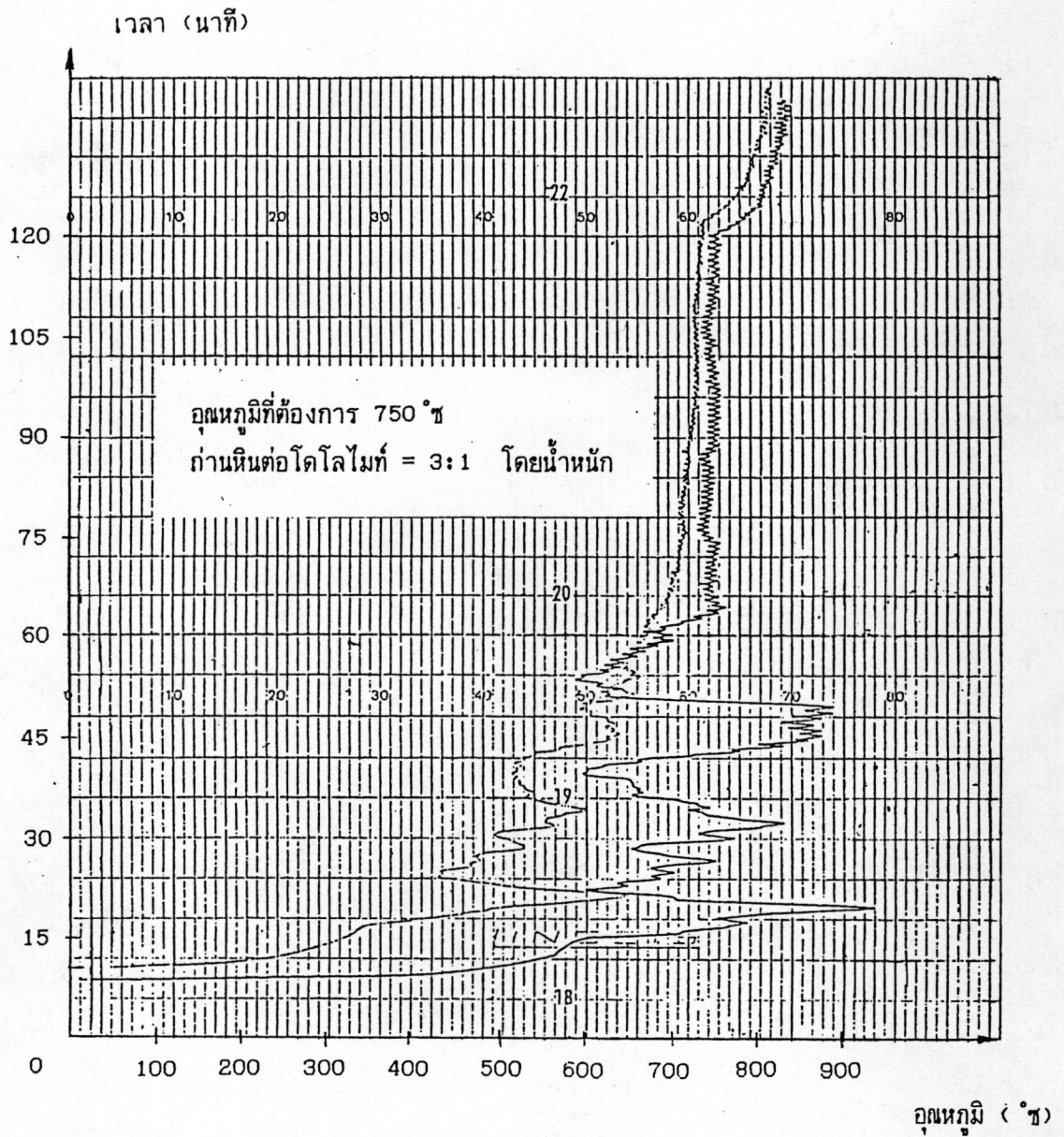
รูปที่ 4.17 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ PID ที่ค่า $K_c = 12$,
 $\tau_i = 1.2$, $\tau_d = 0.5$ เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที
 จำนวนการวนรอบ = 2



รูปที่ 4.18 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ PID ที่ค่า $K_c = 12$, $\tau_i = 1.3$, $\tau_d = 0.2$ เวลาในการเปรียบเทียบ 15 วินาที จำนวนการวนรอบ = 1



รูปที่ 4.19 แผนผังการทำงานของโปรแกรมอัตโนมัติแบบ P (proportional) ที่แก้ไขค่า offset ของการควบคุม



รูปที่ 4.20 ผลการควบคุมเมื่อใช้โปรแกรมอัตโนมัติแบบ P ที่แก้ไขค่า offset ใช้ค่า $K_c = 12$ เวลาในการเปรียบเทียบ 10 วินาที จำนวนการวนรอบ = 2

4.5 ผลของตัวแปรที่มีต่อการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดที่ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

การควบคุมการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดด้วยไมโครคอมพิวเตอร์นั้น เมื่อตอนเริ่มการทดลองจะใช้โปรแกรมควบคุมโดยผู้ควบคุม ทำการอุ่นเตาให้ได้อุณหภูมิประมาณ 400°C จากนั้นป้อนถ่านหินเข้าสู่เบดประมาณ 500 กรัม เมื่อถ่านหินติดไฟดีแล้วจึงหยุดการอุ่นเตา จึงได้เริ่มป้อนอากาศกับถ่านหินเข้าสู่เบดให้สัมพันธ์กันโดยพิจารณาจากอุณหภูมิการเผาไหม้ในเบด จนกระทั่งได้ค่าอุณหภูมิที่ต้องการพร้อมทั้งปรับความเร็วอากาศให้ได้ค่าที่ต้องการศึกษา จนกว่าระบบจะอยู่ในสภาวะคงที่ จึงเปลี่ยนโปรแกรมควบคุมเป็นโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติแบบ P ที่สามารถลดค่า offset ได้ เพื่อควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ตลอดเวลาที่ทำการเก็บตัวอย่างและบันทึกผลการทดลอง ตัวแปรที่จะศึกษาในงานวิจัยนี้ คือ ความเร็วอากาศ (อยู่ในช่วง 36.55 ถึง 43.88 เมตร/นาที) อัตราส่วนถ่านหินต่อไดโลไมท์ (อยู่ในช่วง 5:1 ถึง 2.33:1 โดยน้ำหนัก) และอุณหภูมิเบด (อยู่ในช่วง 750 ถึง 900°C)

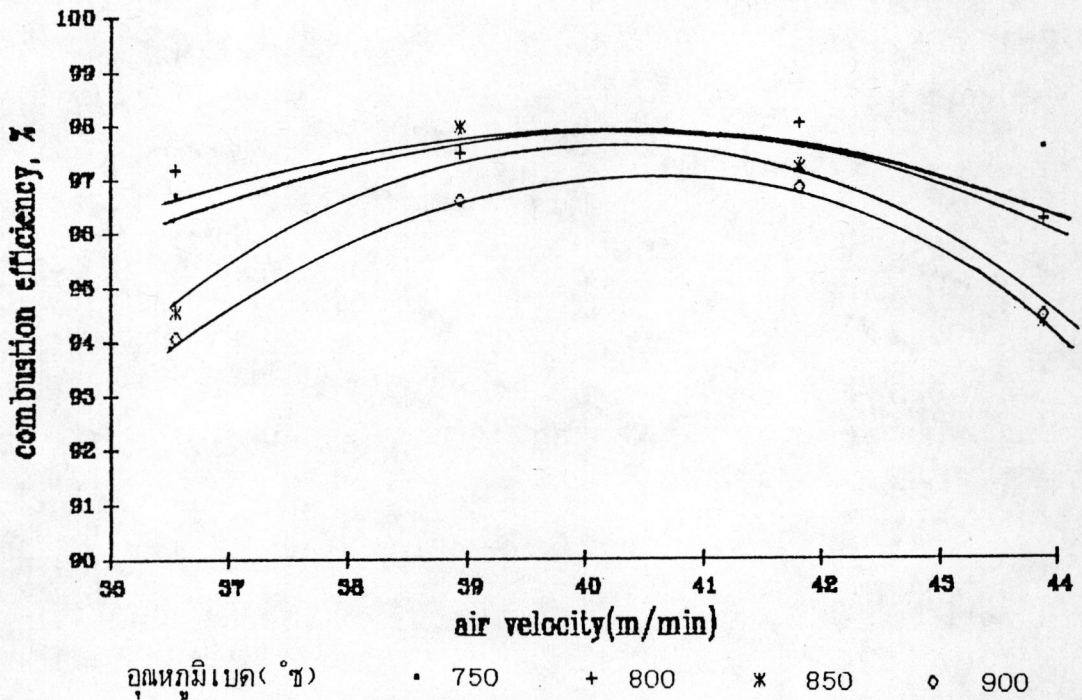
ผลการทดลองทั้งหมดแสดงได้ดังตารางที่ 4.1 และแบ่งผลการทดลองตามชนิดของตัวแปรได้ดังนี้

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินในฟลูอิโดซ์เบดที่ควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์

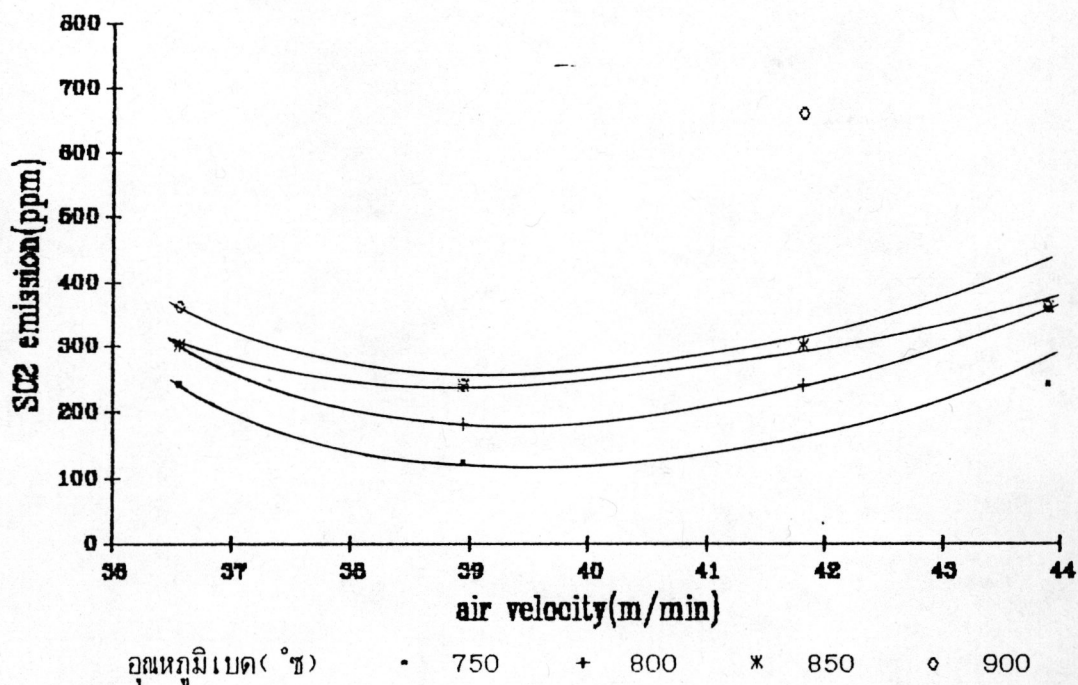
RUN NO.	COAL:DOL. by Wt	T _b °C	T _{fg} (C) over bed	T _{fg} (C) to boiler	VEL.AIR. m/min	FEED C&D g/min	COMPOSITION OF FLUE GAS					% excess air	% comb. eff.
							% O ₂	% CO ₂	% CO	SO ₂ ppm	NO ppm		
1	3:1	750	750	290	36.55	145.01	15.55	9.25	0.10	240	180	209.42	96.69
2	3:1	800	800	340	36.55	158.99	12.77	11.93	0.40	300	300	119.12	97.15
3	3:1	850	850	390	36.55	171.42	12.28	12.81	0.60	300	360	106.53	94.53
4	3:1	900	900	430	36.55	185.02	11.49	13.35	0.80	360	420	88.51	94.04
5	3:1	750	750	320	38.94	148.93	13.23	10.88	0.1	120	300	130.37	97.79
6	3:1	800	800	380	38.94	159.35	13.28	9.82	0.2	180	120	120.42	97.46
7	3:1	850	850	420	38.94	165.53	12.45	11.03	0.2	240	180	101.60	97.95
8	3:1	900	900	450	38.94	171.36	13.04	11.44	0.4	240	600	116.10	96.59
9	3:1	750	750	340	41.81	180.34	13.19	10.69	0.10	240	180	123.76	97.28
10	3:1	800	800	400	41.81	190.63	12.87	9.01	0.20	240	240	109.85	97.99
11	3:1	850	850	440	41.81	197.32	10.79	12.37	0.25	300	240	74.94	97.18
12	3:1	900	900	490	41.81	211.66	11.56	13.00	0.25	660	600	82.06	96.79
13	3:1	750	750	340	43.88	200.98	13.71	11.47	0.10	240	240	130.48	97.52
14	3:1	800	800	390	43.88	221.92	13.13	11.42	0.70	360	360	117.16	96.20
15	3:1	850	850	450	43.88	230.61	10.61	14.00	1.00	360	420	70.60	94.30
16	3:1	900	900	510	43.88	251.70	9.87	14.82	1.10	360	420	61.82	94.42
17	4:1	750	750	300	38.94	151.50	15.36	9.35	0.05	240	360	202.42	98.00
18	4:1	800	800	340	38.94	160.78	13.66	10.97	0.3	240	420	141.38	97.30
19	4:1	850	850	400	38.94	172.02	11.82	12.69	0.5	300	420	95.99	96.18
20	4:1	900	900	430	38.94	197.78	9.10	14.92	0.5	300	480	53.81	95.80
21	5:1	750	750	300	38.94	134.90	16.03	8.89	0	240	420	231.02	96.87
22	5:1	800	800	350	38.94	153.08	14.50	10.29	0.2	300	480	162.34	96.23
23	5:1	850	850	440	38.94	183.65	10.77	13.36	1.0	360	480	79.96	94.47
24	5:1	900	900	500	38.94	196.55	10.28	13.29	1.1	420	480	65.64	95.15
25	7:3	750	750	310	38.94	163.09	14.02	10.67	0.1	180	180	148.21	97.83
26	7:3	800	800	360	38.94	171.28	13.41	11.94	0.4	180	240	132.71	96.80
27	7:3	850	850	400	38.94	182.57	11.77	13.35	0.8	240	360	95.65	95.59
28	7:3	900	900	460	38.94	204.52	10.35	14.10	1.0	240	360	70.59	95.51
29	4:1	750	750	390	41.81	173.57	12.83	12.15	0.1	240	240	121.31	96.87
30	4:1	800	800	430	41.81	181.14	11.46	12.73	0.3	300	300	90.45	97.11
31	4:1	850	850	470	41.81	184.89	10.19	13.35	0.4	360	360	70.15	96.03
32	4:1	900	900	510	41.81	188.60	10.39	15.00	0.4	360	360	77.34	96.24
33	5:1	750	750	410	41.81	149.77	12.64	10.08	0	240	240	116.61	98.42
34	5:1	800	800	440	41.81	162.30	12.65	10.86	0.1	300	240	116.88	97.92
35	5:1	850	850	470	41.81	171.86	10.49	12.28	0.3	360	300	75.78	97.20
36	5:1	900	900	520	41.81	174.62	11.07	11.48	0.4	420	360	83.20	97.58
37	7:3	750	750	310	41.81	189.84	14.23	10.64	0.1	180	240	147.81	96.82
38	7:3	800	800	390	41.81	196.96	14.39	10.80	0.3	180	300	159.32	96.64
39	7:3	850	850	440	41.81	207.08	13.22	11.49	0.4	240	300	122.01	95.83
40	7:3	900	900	460	41.81	214.48	12.06	12.17	0.4	300	360	98.27	95.22

4.5.1 ความเร็วอากาศ

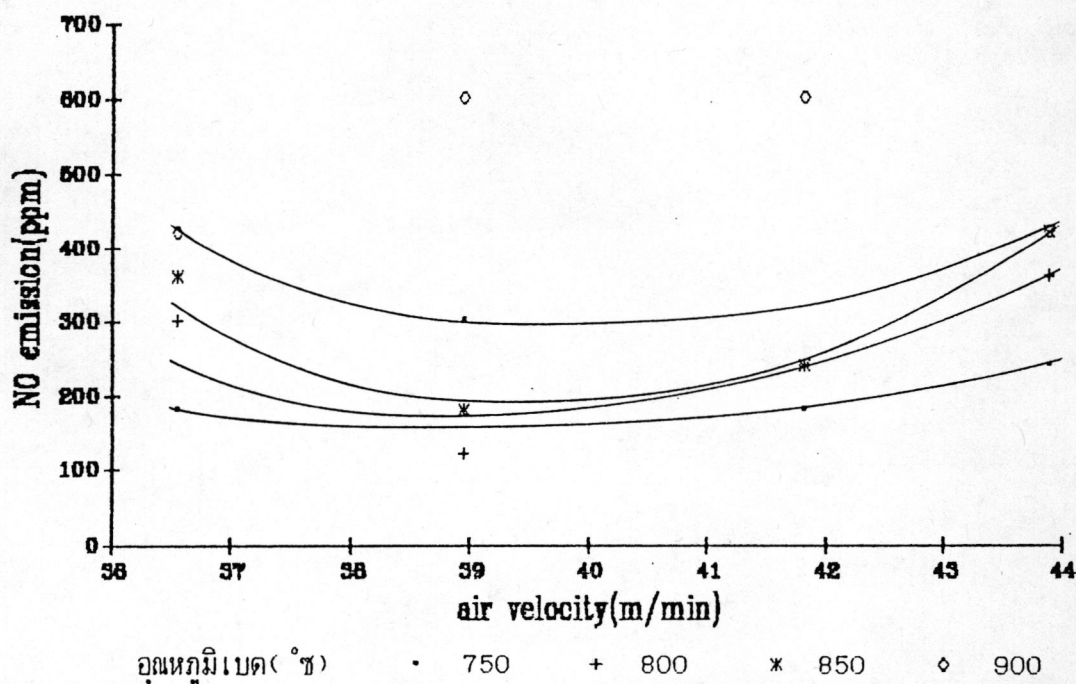
ได้แปรเปลี่ยนความเร็วอากาศเป็น 36.55, 38.94, 41.81 และ 43.88 เมตร/นาทึ เพื่อหาความสัมพันธ์ที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณก๊าซ SO_2 และ NO ที่ปลดปล่อย ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 ถึง 4.24



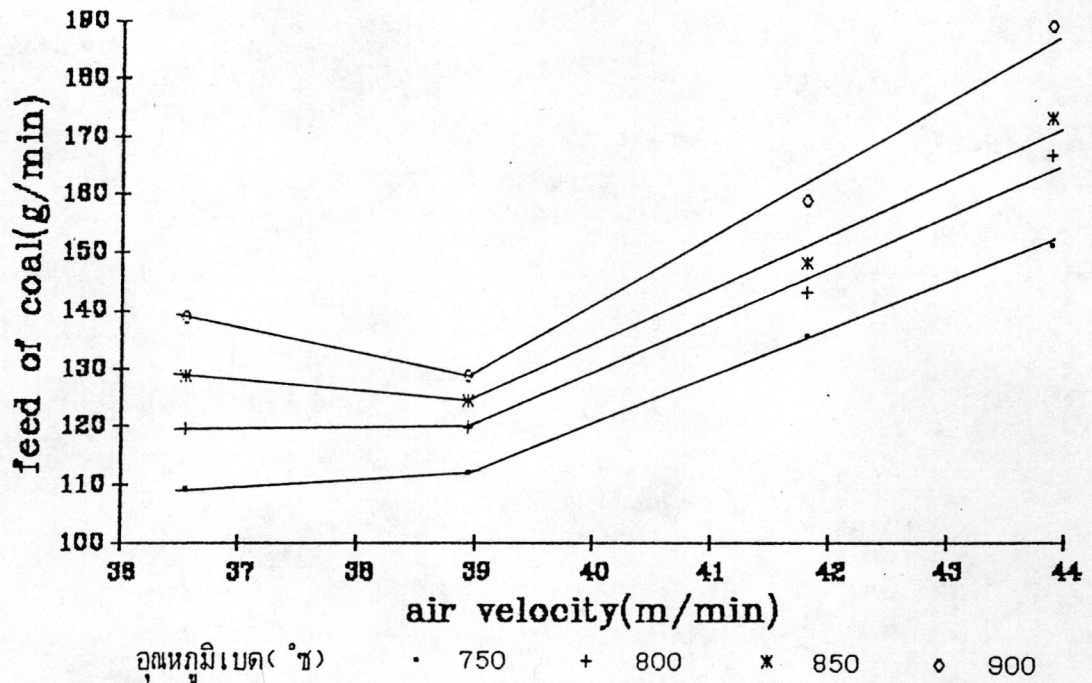
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วอากาศกับประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่อัตราส่วนถ่านหินต่อโคโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก)



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับความเร็วอากาศที่อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก)



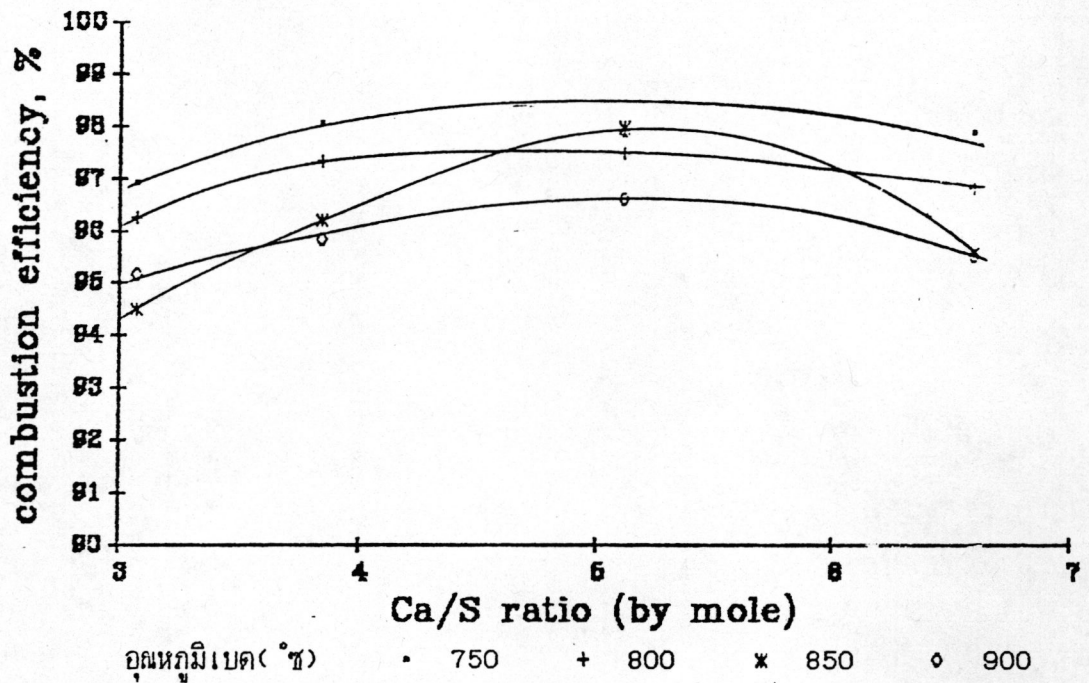
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับความเร็วอากาศที่อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก)



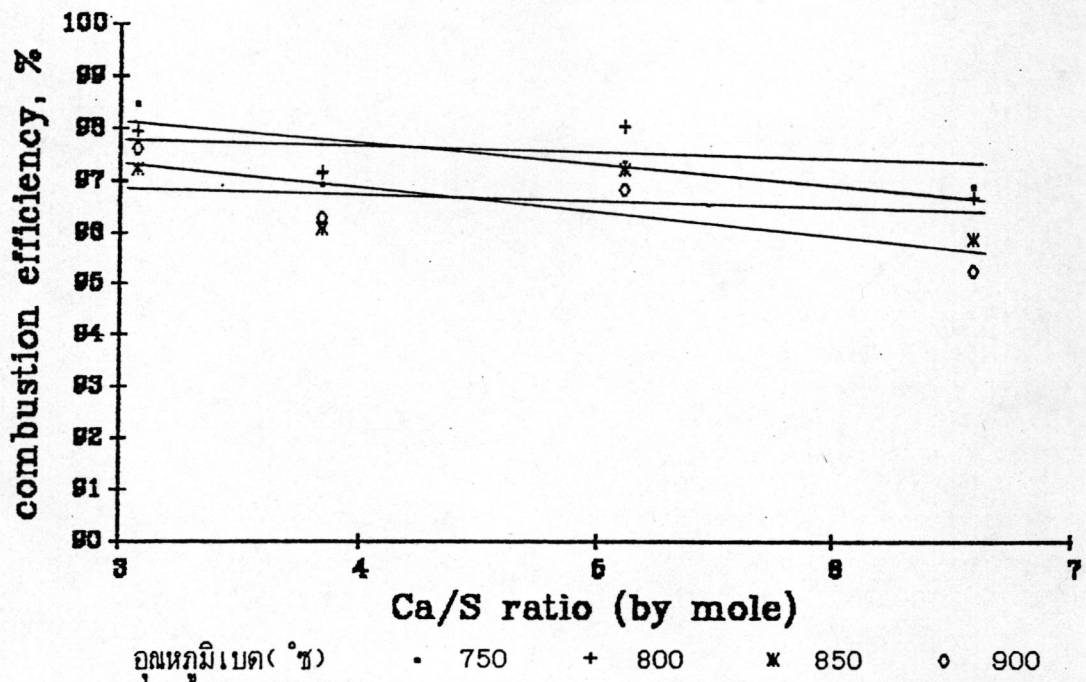
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับความเร็วอากาศ
ที่อัตราการป้อนถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก)

4.5.2 อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์

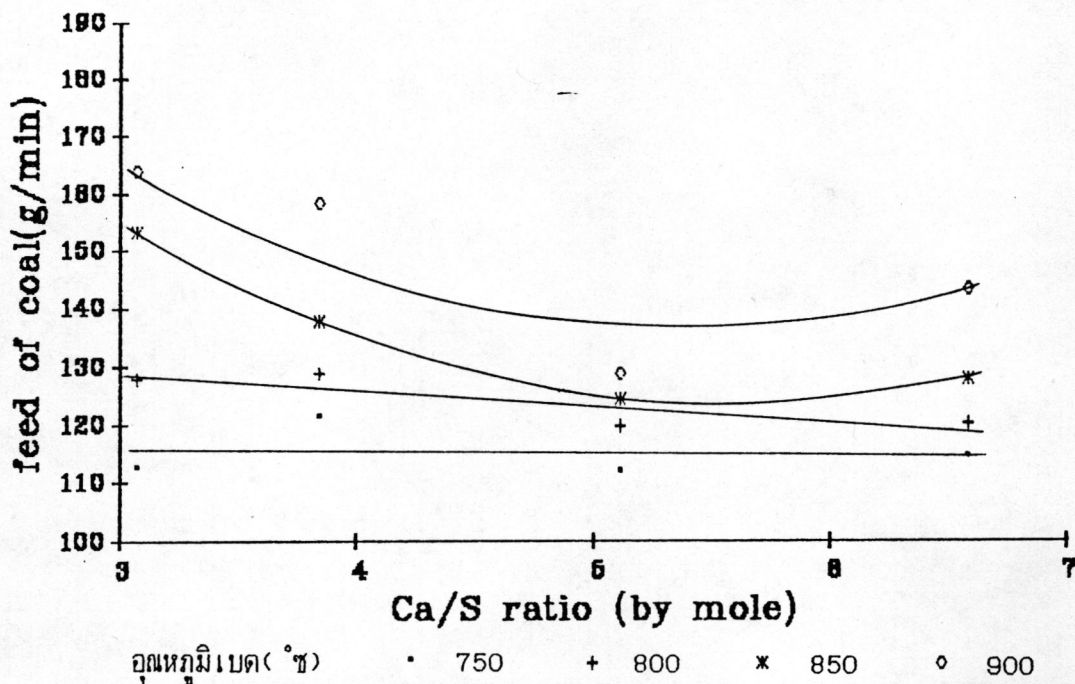
อัตราส่วนถ่านหินต่อโดโลไมท์ที่ใช้มีค่า 5:1, 4:1, 3:1 และ 2.33:1 โดย
น้ำหนัก เพื่อหาความสัมพันธ์ที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และปริมาณก๊าซ SO_2 ที่ปลดปล่อย ได้
ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.25 ถึง 4.30



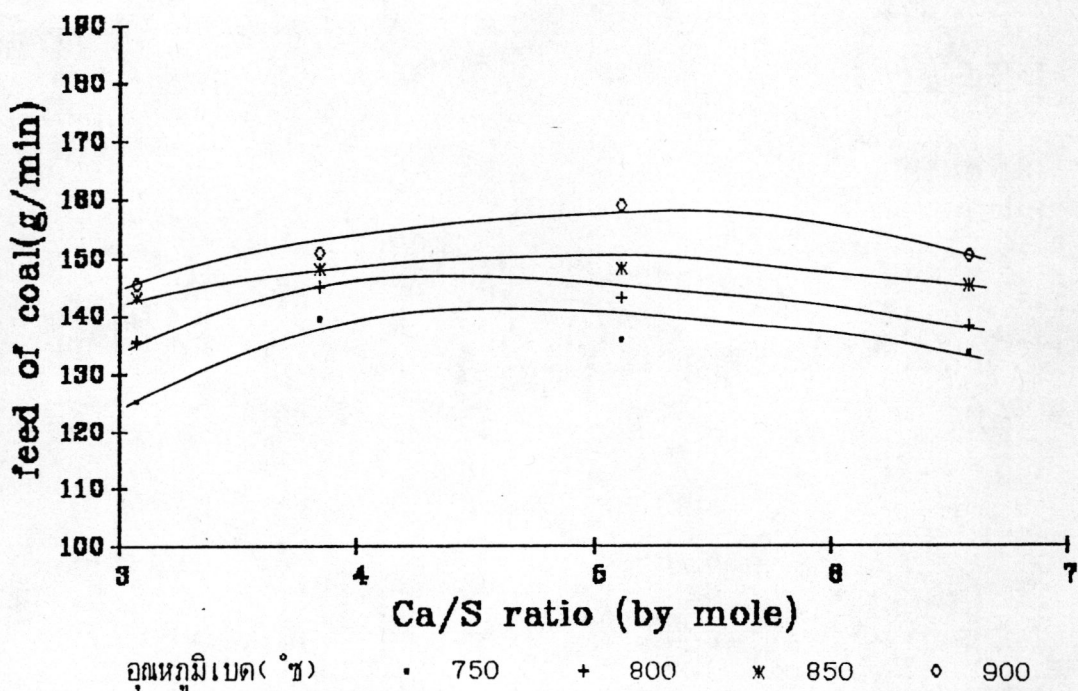
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซัลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาทึ



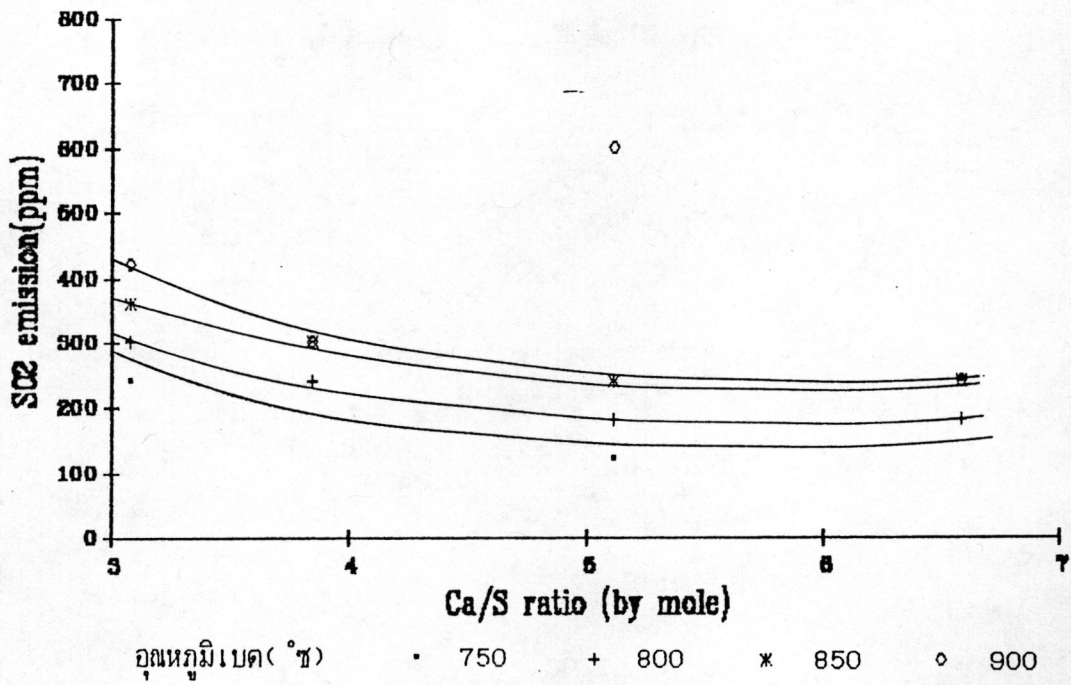
รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซัลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาทึ



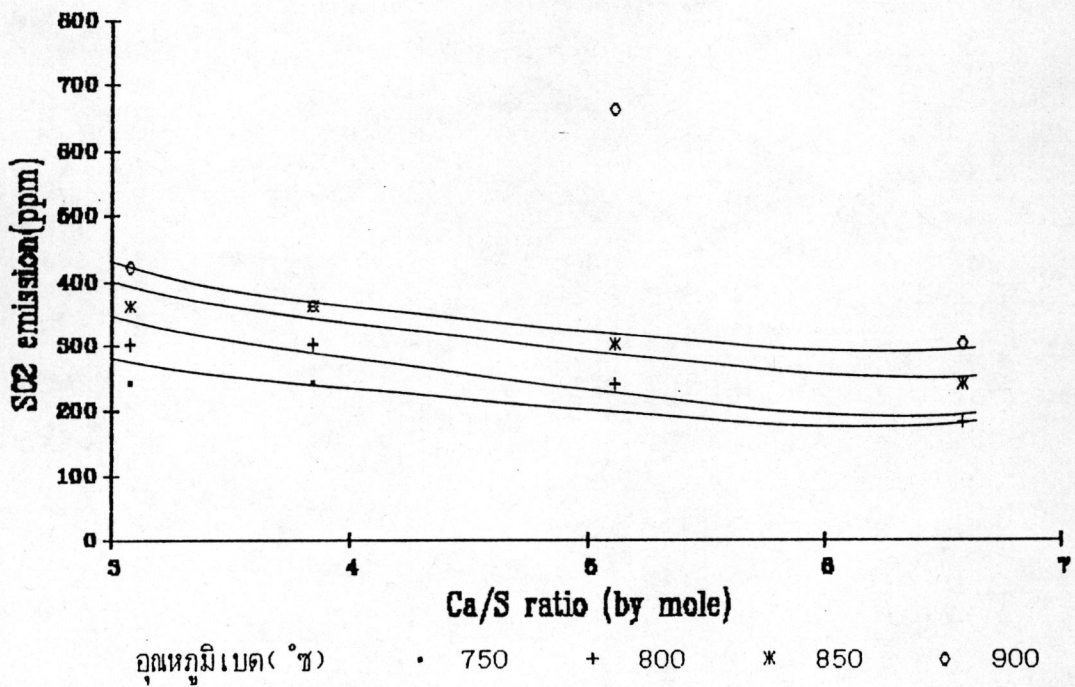
รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซิลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที



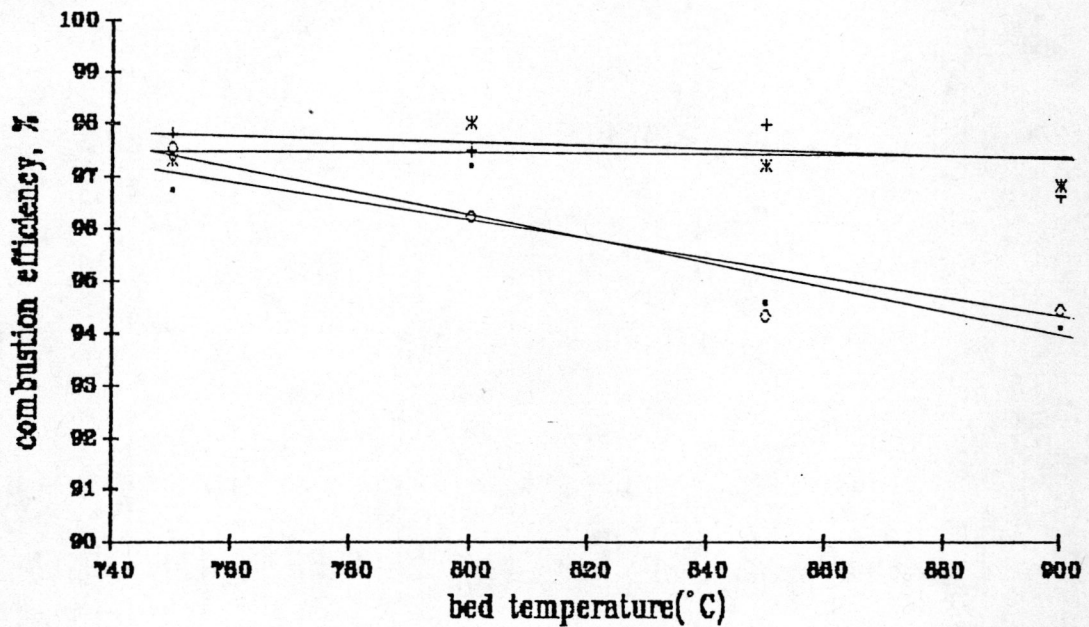
รูปที่ 4.29 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซัลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับอัตราส่วนของแคลเซียมต่อซัลเฟอร์ที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที

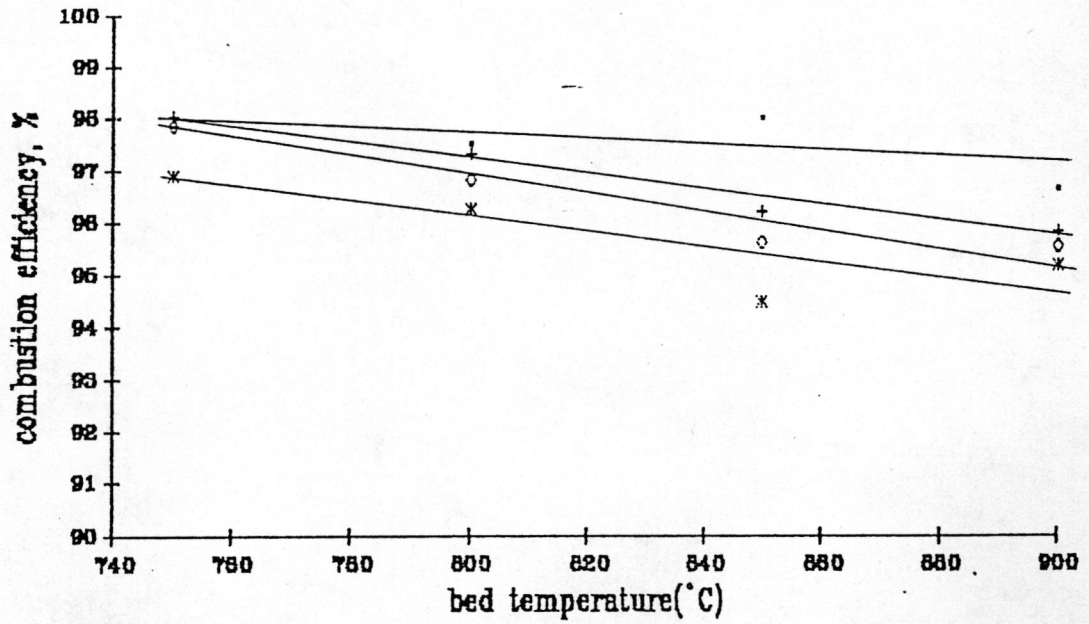
4.5.3 อุณหภูมิเบด

อุณหภูมิการเผาไหม้ในเบดได้ปรับให้มีค่า 750, 800, 850 และ 900 °C เพื่อหาค่าความสัมพันธ์ที่มีต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้ และปริมาณก๊าซ SO_2 และ NO ที่ปลดปล่อย ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.31 ถึง 4.42



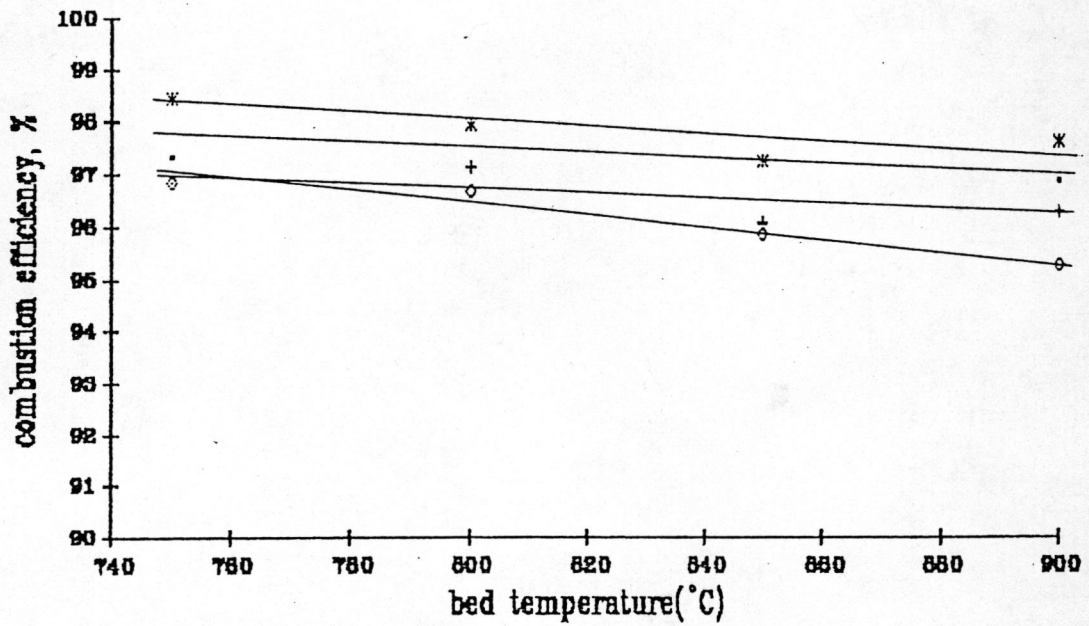
ความเร็วอากาศ(เมตร/นาที) . 36.55 + 38.94 * 41.81 o 43.88

รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอุณหภูมิเบดที่อัตราส่วน
ถ่านหินต่อโดโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก)



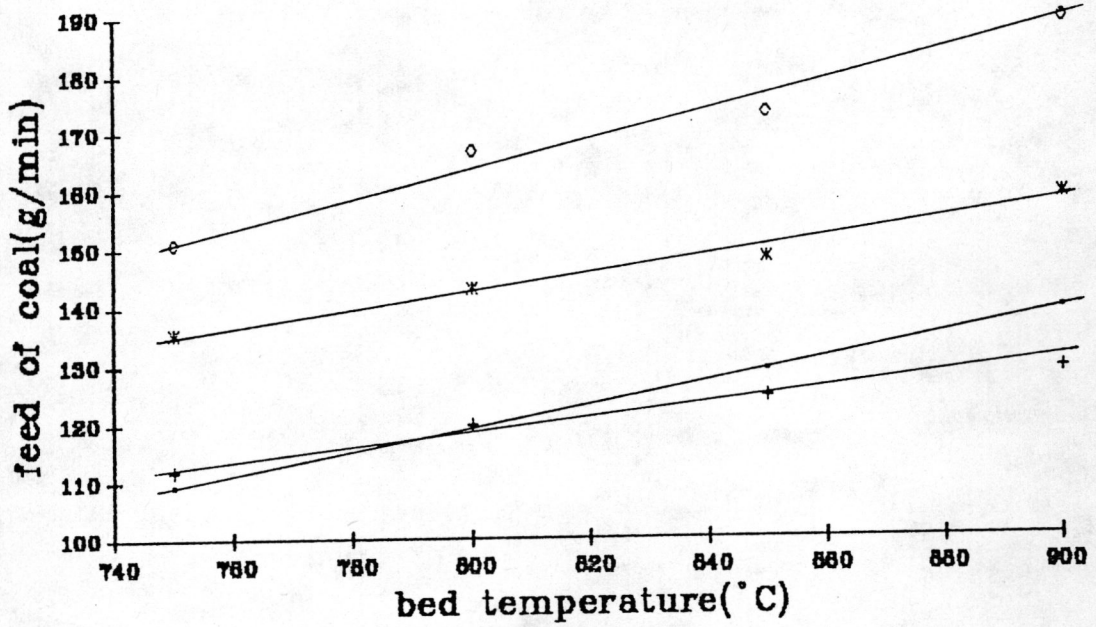
ถ่านหินต่อโดโลไมท์ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 · 3:1 o 2.33:1

รูปที่ 4.32 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาที



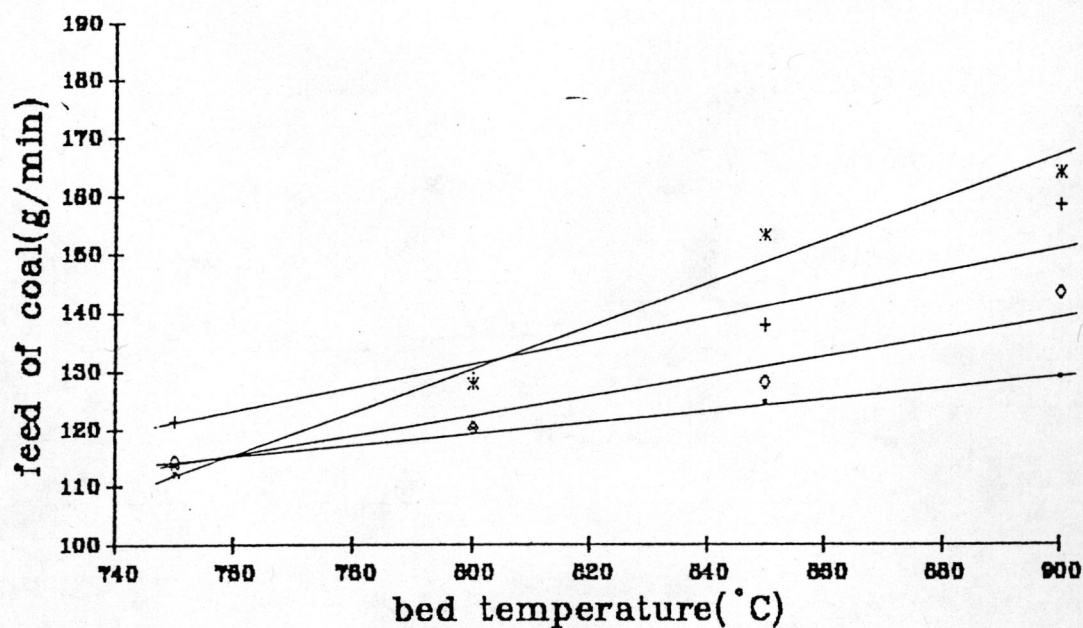
ถ่านหินต่อโดโลไมท์ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 · 3:1 o 2.33:1

รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเผาไหม้กับอุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาที



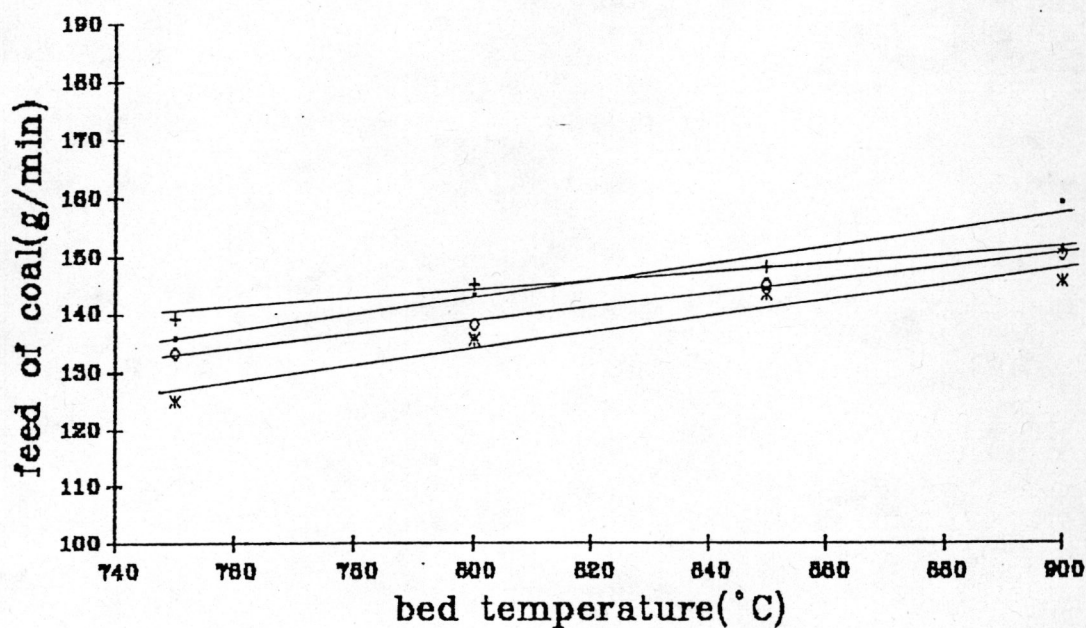
ความเร็วอากาศ (เมตร/นาที) · 36.55 + 38.94 * 41.81 ◊ 43.88

รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอุณหภูมิเบดที่อัตราส่วนของแคลเซียมต่อโคโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก)



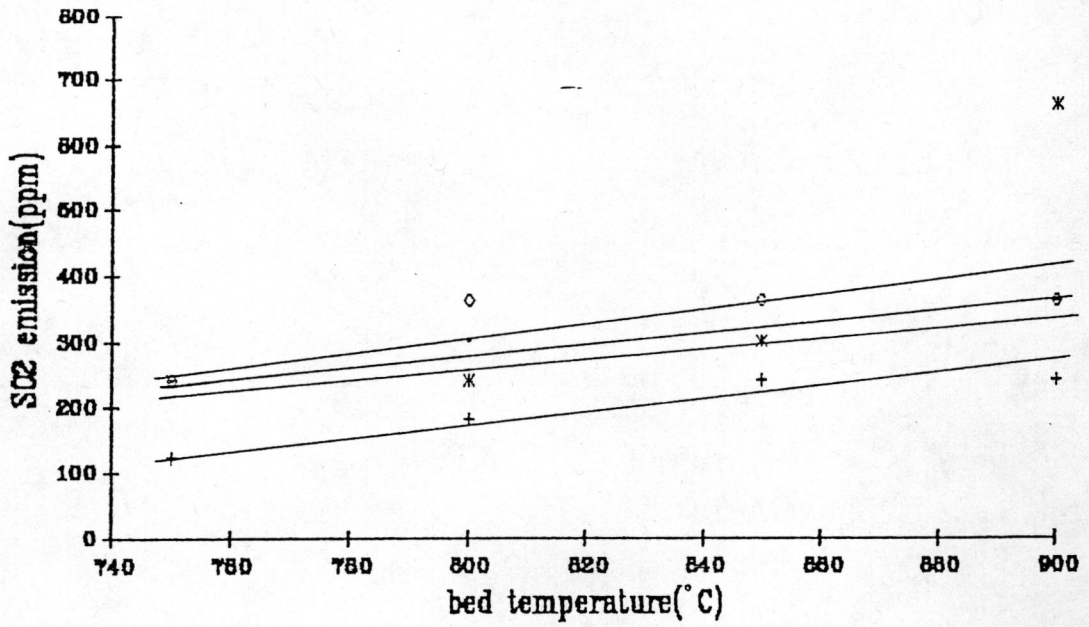
ถ่านหินต่อโดโลไมท์ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 · 3:1 o 2.33:1

รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอุณหภูมิเบดที่ความเร็ว
อากาศ 38.94 เมตร/นาทึ



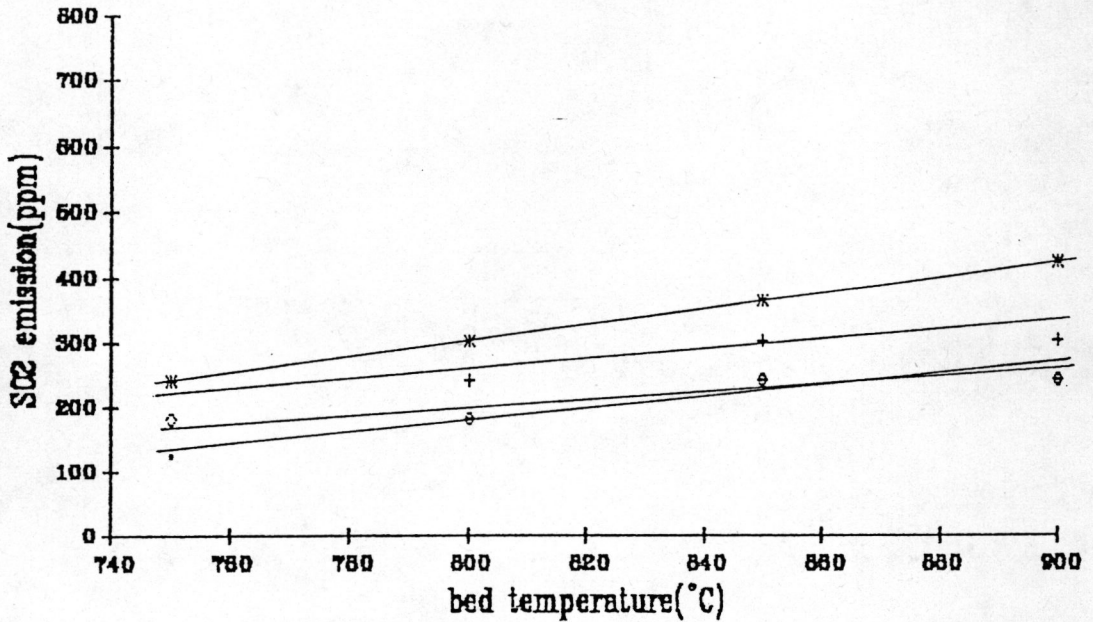
ถ่านหินต่อโดโลไมท์ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 · 3:1 o 2.33:1

รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการป้อนถ่านหินกับอุณหภูมิเบดที่ความเร็ว
อากาศ 41.81 เมตร/นาทึ



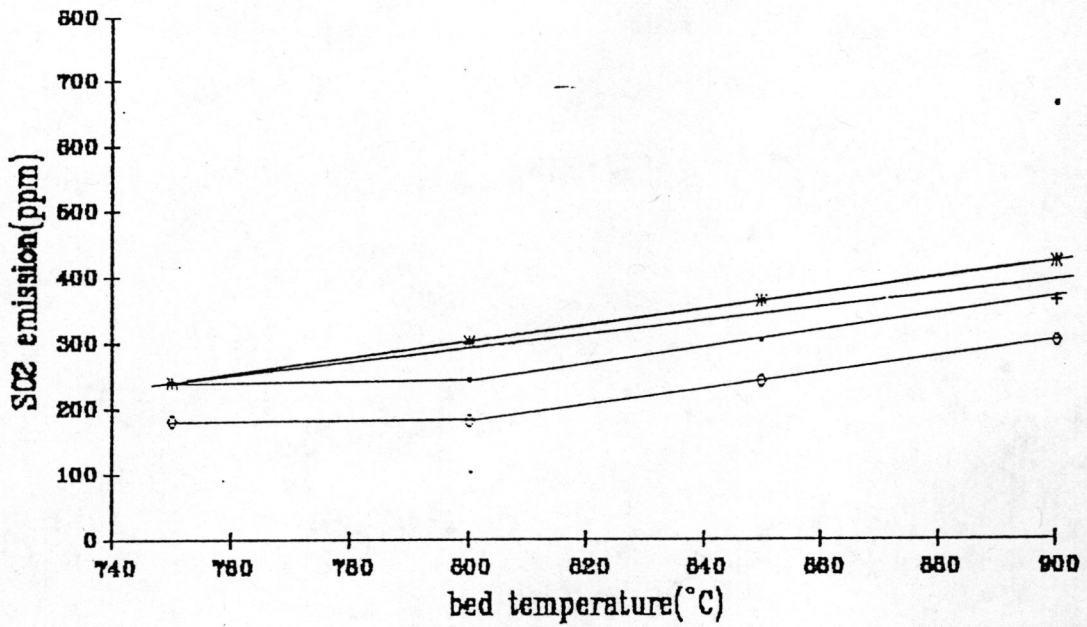
ความเร็วอากาศ (เมตร/นาทื) • 36.55 + 38.94 * 41.81 ◊ 43.88

รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่อัตราส่วนถ่านหินต่อโคลโลไมท์ 3:1 (โดยน้ำหนัก)



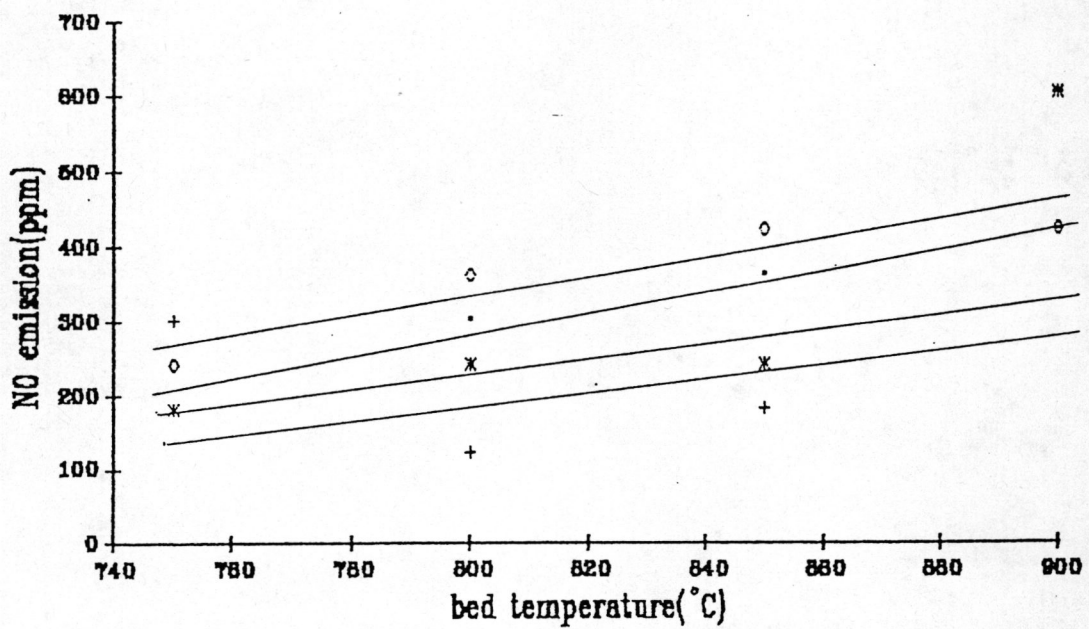
ถ่านหินต่อโคลโลไมท์ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 • 3:1 ◊ 2.33:1

รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาทื



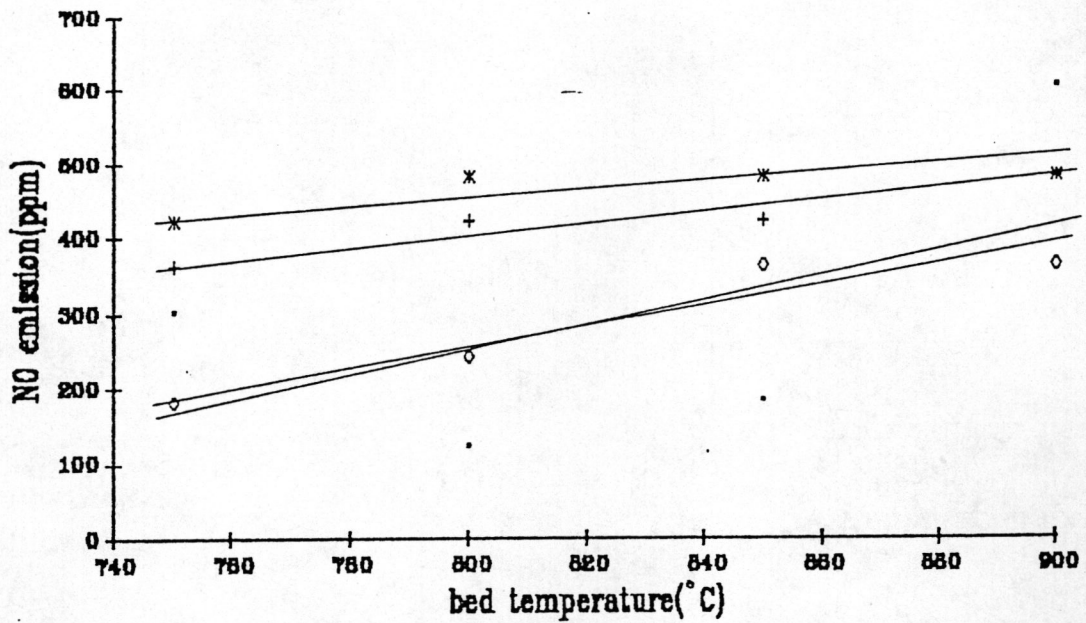
กำหนดต่อโคโลไม้ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 . 3:1 o 2.33:1

รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาทึ



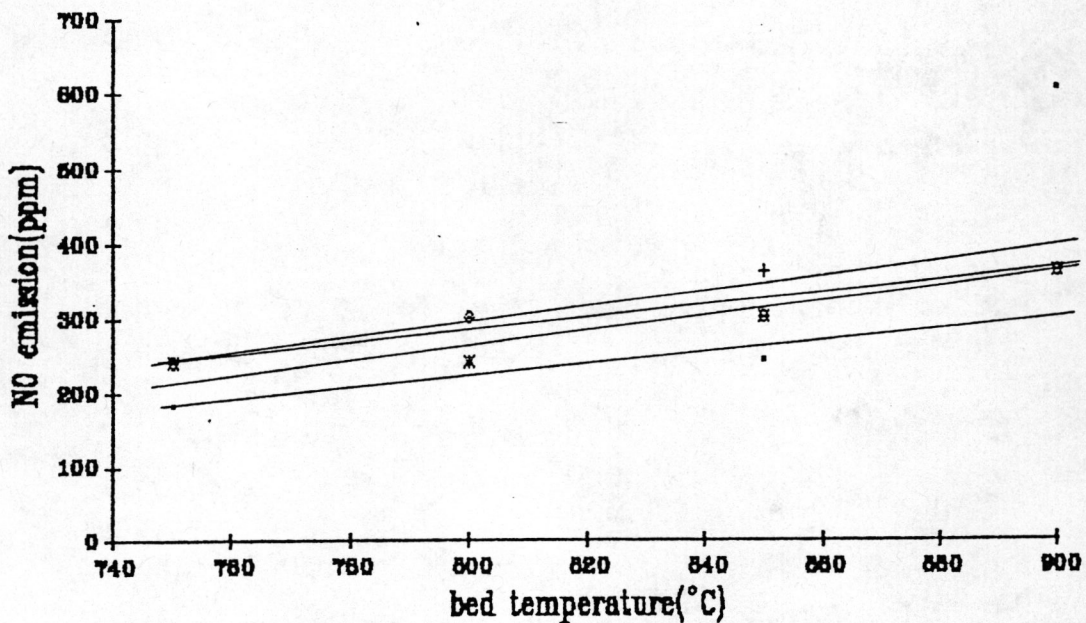
ความเร็วอากาศ (เมตร/นาทึ) . 36.55 + 38.94 * 41.81 o 43.88

รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่อัตราส่วนกำหนดต่อโคโลไม้ 3:1 (โดยน้ำหนัก)



ถ่านหินต่อโคโลไมท์ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 · 3:1 ◊ 2.33:1

รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 38.94 เมตร/นาทึ



ถ่านหินต่อโคโลไมท์ (โดยน้ำหนัก) * 5:1 + 4:1 · 3:1 ◊ 2.33:1

รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซไนโตรเจนออกไซด์ที่ปลดปล่อยกับ อุณหภูมิเบดที่ความเร็วอากาศ 41.81 เมตร/นาทึ