



บทที่ 5

## การทดลองและผลการทดลอง

### 5.1 เครื่องมือทดลอง

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองศึกษาอุณหภูมิค่าสัตรีของปฏิกิริยาทางเคมีเคชั่นถ่านหินลิกไนท์ด้วยไอน้ำ ในสภาวะพลูอิโดซ์ ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเตาปฏิกรณ์เคมี (Chemical Reactor) กับส่วนที่เป็นเตาผลิตไอน้ำ (Steam Generator)

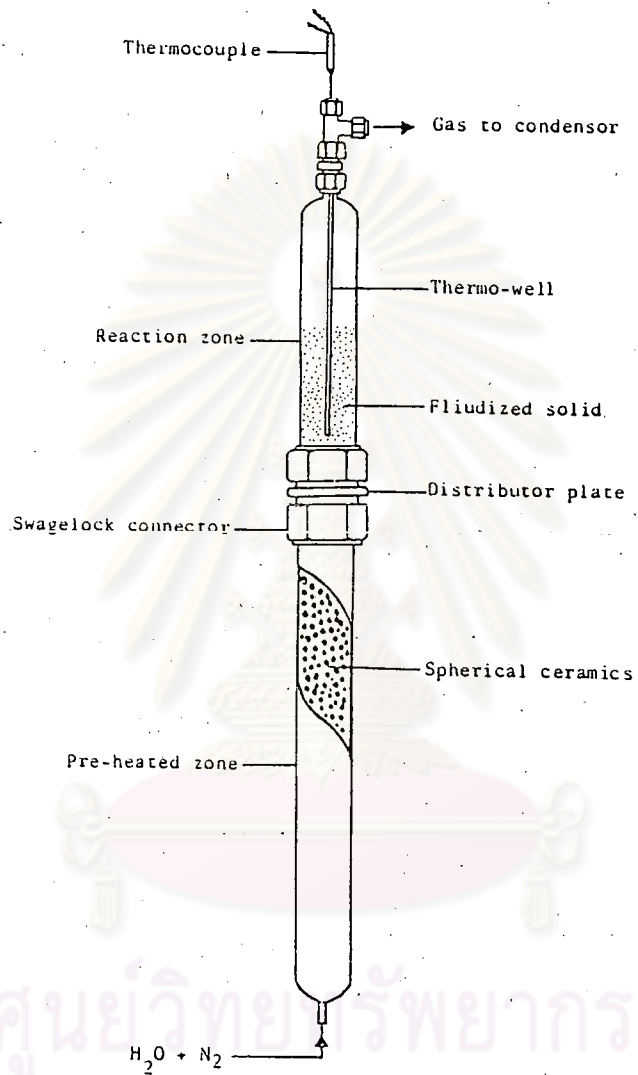
#### 1. เตาปฏิกรณ์เคมี

เตาปฏิกรณ์เคมีทำจากท่อสแตนเลส (Stainless Steel No. 304) ทรงกระบอกกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว แบ่งเป็น 2 ส่วน ดังรูปที่ 5.1

ส่วนบน ยาว 30.48 ซม. เป็นที่บรรจุถ่านหิน และเป็นตำแหน่งที่ถ่านหินเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำ โดยมีแผ่นกระจายก๊าซให้ก๊าซกระจายตัวออกอย่างสม่ำเสมอ และเกิดปรากฏการณ์พลูอิโดซ์ ตอนกลางของส่วนบน จะติดท่อสแตนเลสขนาดเล็ก (Thermo-Well) สำหรับสวมอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) ชนิด เค (K-type) ขนาด  $\frac{1}{8}$  นิ้ว ยาว  $1\frac{1}{2}$  ฟุต วัดอุณหภูมิได้สูงสุด  $1800^{\circ}\text{C}$

ส่วนล่าง ยาวประมาณ 50 ซม. บรรจุเป็นเซรามิก ขนาด 5 มม. ทำจากดินขาวสำปาง : ดินเขี้ยวหมูมาน : ดินพินมา : ดินดำ อัตราส่วน 45:20:20:15 เผาที่อุณหภูมิ  $1350^{\circ}\text{C}$  ทำหน้าที่เป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้แก่ไอน้ำที่เข้ามา มีอุณหภูมิตัวให้ มีอุณหภูมิสูงขึ้นใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่จะเกิดปฏิกิริยา และทำหน้าที่กระจายความเร็วของก๊าซให้มีความเร็วใกล้เคียงกันระหว่างที่จุดศูนย์กลางท่อและที่บริเวณใกล้ ๆ กับผนังท่อ (Flat Velocity Profile) ส่วนบนและส่วนล่างของเตาปฏิกรณ์มีแผ่นกระจายก๊าซเป็นตัวกั้นกลาง เชื่อมต่อกันด้วยระบบสล๊วล็อก (Swage Lock)

แผ่นกระจายก๊าซทำจากแผ่นโลหะสแตนเลสทรงกลม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง  $1\frac{1}{2}$  นิ้ว หนา  $1\frac{1}{2}$  มม. เจาะรูขนาด 0.75 มม. ความหนาแน่น 15 ช่อง/ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 5.1 แสดงเตาปฏิกรณ์เคมีระบบฟลูอิดซ์



เตาปฏิกรณ์ดังรูป 5.1 จะถูกประกบด้วยแท่งเหล็กหล่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4½ นิ้ว เพื่อทำหน้าที่ถ่ายเทความร้อนและดูดซึมความร้อนเอาไว้ มิให้เตาปฏิกรณ์เคมีมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วเกินไป

เตาปฏิกรณ์ที่ประกบเหล็กหล่อแล้วจะถูกล้อมรอบด้วยขดลวดไฟฟ้า (Heater Coil) กันด้วยฉนวน เพื่อให้ความร้อนแก่เตาปฏิกรณ์ ขนาดเส้นละ 3000 วัตต์ ซึ่งควบคุมด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิแบบสัมผัสแม่เหล็ก (Magnetic Contactor) และตัวอ่านอุณหภูมิระบบแสดงผลเป็นตัวเลข (Digital Temperature Reading) หลังจากนั้นจะหุ้มเตาปฏิกรณ์ทั้งหมดด้วยอิฐทนไฟก่อเป็นเตารูปทรงสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 5.2 ประกอบ

## 2. เตาผลิตไอน้ำ

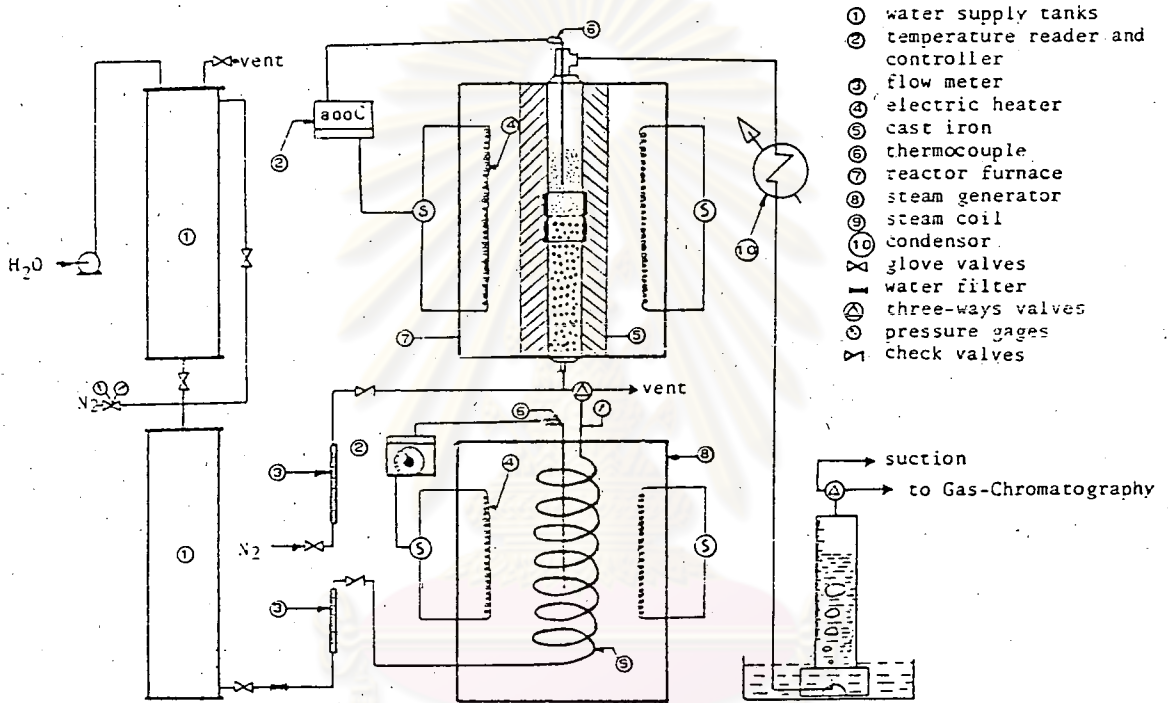
เป็นเตาด้านล่าง ในรูปที่ 5.2 สร้างจากท่อทองแดงขนาด 3/8 นิ้ว ขดเป็นรูปสปริง ขดท่อทองแดงนี้จะผิวน้ำที่วัดอัตราการไหลแล้ว ไหลอยู่ภายใน รับความร้อนจากขดลวดความร้อนไฟฟ้าที่ห่อหุ้มอยู่ และหุ้มอีกชั้นหนึ่งด้วยปูนซีเมนต์ทนไฟ ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมแบบสัมผัสแม่เหล็ก แสดงระดับอุณหภูมิแบบเข็มชี้ อ่านระดับความดันของไอน้ำด้วยเกจความดัน

อุปกรณ์การป้อนน้ำ ประกอบด้วย ถังบรรจุน้ำ 2 ถัง มีระดับอ่านปริมาณน้ำ ถังตอนบนจะเป็นถังพักน้ำ ถังใบล่างจะทำการอัดก๊าซไนโตรเจนด้วยความดันสูงคงที่ค่าหนึ่ง น้ำที่ถูกก๊าซไนโตรเจนที่อัดอยู่ส่วนบนของถังจะไหลไปตามท่อผ่านมิเตอร์วัดอัตราการไหลแบบลูกลอย ควบคุมการไหลด้วยชุดวาล์วอย่างละเอียด และส่วนกรองน้ำต่อด้วยวาล์วกันการไหลกลับของน้ำแบบเหวี่ยง

อุปกรณ์ป้อนก๊าซไนโตรเจน ก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ปราศจากก๊าซออกซิเจนจะถูกป้อนจากถังก๊าซ ผ่านมิเตอร์วัดอัตราการไหลแบบลูกลอย (Floating Flow Meter) โดยใช้อวาล์วควบคุม และกันก๊าซไหลย้อนกลับด้วยวาล์วแบบเหวี่ยง

## 5.2 วิธีการทดลอง

ดังรูปที่ 5.2 ประกอบ ถ่านหินลิกไนท์ที่บดละเอียดแล้วจะใช้ตะแกรงร่อนมาตรฐานของเทลเลอร์ เพื่อคัดขนาดให้อยู่ระหว่าง -20+30 เมลล์ ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 75 กรัม ซึ่งจะให้ค่าความสูงของชั้นอนุภาคในเตาปฏิกรณ์ประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นจะบรรจุเข้าในเครื่องปฏิกรณ์ตอนบน เครื่องปฏิกรณ์จะถูกให้ความร้อนโดยขดลวดความร้อน ซึ่งควบคุมด้วยชุด



รูปที่ 5.2 แสดงแผนภาพเครื่องมือทดลองการก๊าซไฮโดรเจนระบบฟลูอิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ควบคุมอุณหภูมิ ให้มีอัตราการขึ้นอุณหภูมิประมาณ 100-200 °ซ ต่อชั่วโมง ขณะเดียวกันจะเปิด ก๊าซไนโตรเจนให้ไหลส่วนทางขึ้นมาเพื่อไล่สารระเหย และความชื้นออกจากถ่านหิน และเพื่อ ป้องกันก๊าซออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยากับถ่านหินด้วย จนเมื่ออุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์เป็น 700 °ซ แล้ว จะรักษาระดับอุณหภูมิให้คงที่ต่อไปเป็นเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง ในช่วงเวลานี้ น้ำที่ผ่าน กรรมวิธีกำจัดไอออน (Deionized water) จะถูกวัดอัตราการไหลที่แน่นอน และป้อนเข้าสู่เตา ผลิตไอน้ำ เพื่อทำการผลิตไอน้ำ หลังจากนั้นจะทำการเพิ่มอุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์ให้ถึงอุณหภูมิ ที่จะใช้ในการทดลอง เมื่อสภาวะการทดลองทุกอย่างคงที่แล้ว จะทำการสับเปลี่ยนวาล์ว ให้ไอน้ำ เข้ารวมตัวกับก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ ในอัตราส่วนที่กำหนดและเข้าทำปฏิกิริยากับถ่านหินที่ถูก ฟลูอิดซ์อยู่ภายในตอนบนของ เครื่องปฏิกรณ์ ก๊าซผลิตภัณฑ์จะประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน ก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำที่เหลือ จากการทำปฏิกิริยา ก๊าซผลิตภัณฑ์จะถูกกรองเอาอนุภาคที่ลอยติดมาออก และอนุภาคเหล่านี้จะตก ลงในเตาปฏิกรณ์ต่อไป จากนั้นไอน้ำจะถูกควบแน่น และก๊าซจะถูกทำให้เย็นตัวลง และเก็บโดย การแทนที่น้ำที่มีค่าความเป็นกรด (pH) ประมาณ 4 บันทึกปริมาตรของก๊าซที่ผลิตได้เป็นเวลาต่าง ๆ และใช้กระบอกเก็บก๊าซดึงก๊าซตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาความเข้มข้น โดยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟ รายละเอียดสภาวะการวิเคราะห์ด้วยวิธีโครมาโตกราฟ ดูได้จาก ภาคผนวก ก4 การทดลองจะสิ้นสุดลง เมื่อก๊าซผลิตภัณฑ์มีปริมาณของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนได ออกไซด์ และก๊าซมีเทนน้อยมาก ซึ่งประมาณ 100 นาที

#### 5.2.1 การแปลงข้อมูลดิบจากการทดลอง

ในการแปลงข้อมูลดิบจากการทดลอง จะนิยามเทอมที่เรียกว่า "ปริมาณการแปลงผันสะสม" (Cumulative Conversion) ของธาตุคาร์บอน

$$X = \frac{M_{CO} + M_{CO_2} + M_{CH_4}}{M_C} \quad (5.2.1)$$

โดย X = ค่าการแปลงผันสะสม

$M_{CO}$ ,  $M_{CO_2}$ ,  $M_{CH_4}$  = จำนวนโมลของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซมีเทน สะสมที่ผลิตได้ทั้งหมด จากเวลาเริ่มต้น ( $t=0$ ) จนถึงเวลาใด ๆ ( $t$ )

$M_C$  = จำนวนโมลเริ่มต้นของธาตุคาร์บอนในถ่านหิน

โดยจะกำหนดว่า จำนวนธาตุคาร์บอนทั้งหมดที่พบอยู่ในก๊าซผลิตภัณฑ์  
มาจากธาตุคาร์บอนในถ่านเท่านั้น ส่วนจำนวนโมลเริ่มต้นของธาตุคาร์บอนในถ่านหิน คำนวณจาก

$$M_c = \frac{W_i \times C}{M.W.} \quad (5.2.2)$$

$W_i$  = น้ำหนักของถ่าน ก่อนเกิดปฏิกิริยาก๊าซซีไอไฟ

$C$  = เปอร์เซ็นต์คาร์บอนของถ่านก่อนเกิดปฏิกิริยาก๊าซซีไอไฟ  
ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธี Ultimate Analysis ฤดูกาลผนวก  
ก- 3.2

$M.W.$  = น้ำหนักโมเลกุลของธาตุคาร์บอน = 12 กรัม/กรัมโมล

#### 5.2.2 การทดลองตัดตัวแปรเนื่องจากความเร็วของก๊าซ (The Experiment to Eliminate Gas Flow-Rate Effect)

ขั้นตอนในการทดลองขั้นแรกสุด จำเป็นจะต้องหาค่าความเร็วของ  
ก๊าซที่ต่ำที่สุดค่าหนึ่ง ซึ่งจะให้อัตราการแปลงผันสูงสุด หรือหาค่าแปลงผันสูงสุดค่าหนึ่ง ถึงแม้จะเพิ่ม  
ความเร็วก๊าซไปมากกว่านี้ก็ไม่ทำให้ค่าการแปลงผันสูงขึ้นอีกแล้ว สาเหตุก็เพราะว่าปฏิกิริยาการ  
ก๊าซซีไอไฟถ่านหินซึ่งเป็นอนุภาคของแข็งโดยใช้ไอน้ำนั้น แพกเตอร์หนึ่งซึ่งมีผลต่ออัตราเร็วการเกิด  
ปฏิกิริยา คือ อัตราการแพร่ของก๊าซผ่านความต้านทานที่เกิดจากฟิล์มของก๊าซและความต้านทานที่  
เกิดจากการแพร่ผ่านชั้นเถ้า จากความรู้เรื่องฟลูอิดแมคคานิค พบว่าเมื่อความเร็วของก๊าซมาก  
ขึ้น ความหนาของฟิล์มจะลดลง ซึ่งจะมีผลให้ความต้านทานการแพร่ผ่านแผ่นฟิล์มก๊าซมีค่าน้อย  
เป็นการตัดความสำคัญของฟิล์มก๊าซออกไป เพื่อจะได้พิจารณาที่อัตราเร็วปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจริง ๆ  
บนอนุภาคของแข็งได้

ในการทดลองตัวแปรอื่นซึ่งมีผลต่ออัตราการแปลงผัน ได้แก่ ชนิดของ  
ถ่านหิน ขนาด อนุภาค อัตราส่วนก๊าซในโตรเจนต่อไอน้ำ อุณหภูมิ ความดัน ฯลฯ จะถูกจำกัดค่า  
ให้คงที่ ดังตารางการทดลองที่ 5.1 ส่วนปริมาณของก๊าซในโตรเจนกับไอน้ำซึ่งมีอัตราส่วนคงที่  
จะถูกป้อนด้วยปริมาณการไหลที่แตกต่างกันออกไป ผลการทดลองพิจารณาได้จาก รูปที่ 5.3

ตารางที่ 5.1 แสดงสภาวะการทดลองอิทธิพลอัตราเร็วของก๊าซ

ชนิดถ่านหิน อำเภอสี่ จังหวัดลำพูน ขนาดอนุภาค -20+30 Mesh น้ำหนัก 75 กรัม  
 การทดลอง อุณหภูมิ 850 °ซ อัตราส่วน  $N_2:H_2O = 1:2.4$  โดยน้ำหนัก

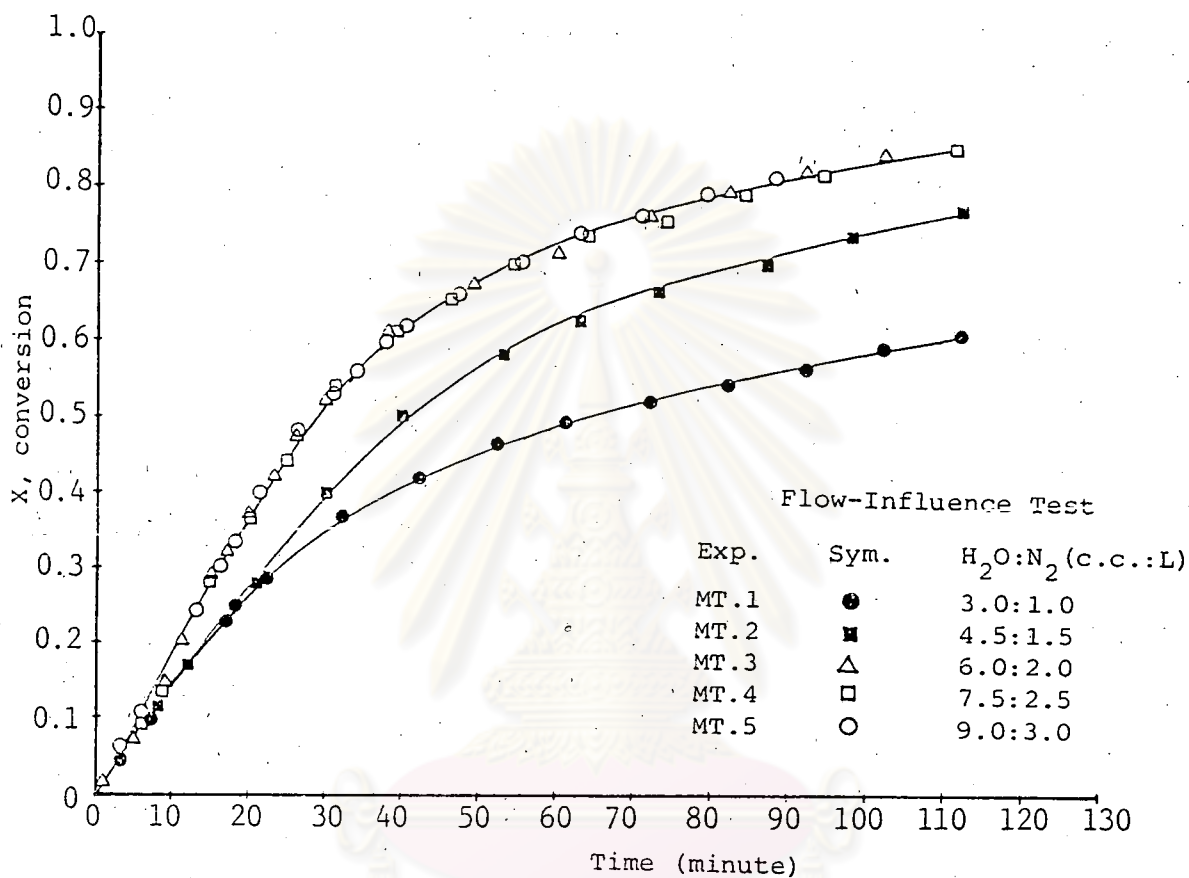
อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน ลิตร/นาที อัตราการไหลน้ำ ลบ.ซม./นาที

MT.1	1.0	3.0
MT.2	1.5	4.5
MT.3	2.0	6.0
MT.4	2.5	7.5
MT.5	3.0	9.0

5.2.3 การทดลองจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาก๊าซไพล์ถ่านหินลิกไนต์ด้วยไอน้ำ  
 (Kinetics Experimentation of Lignite-Steam Gasification Reaction)

จากผลการทดลองตัดตัวแปรเนื่องจากความเร็วของก๊าซ ซึ่งมีผลต่ออัตราการแปลงผันของธาตุคาร์บอนในถ่านหินลิกไนต์ ดังรูปผลการทดลองที่ 5.3 จะเห็นได้ว่าอัตราการแปลงผันของธาตุคาร์บอนจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณการไหลของก๊าซเพิ่มมากขึ้น จนเมื่อปริมาณการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 2 ลิตร/นาที และอัตราการไหลของน้ำเป็น 6 ลบ.ซม./นาที อัตราการแปลงผันจะเป็นค่าสูงสุด นั่นคือ ถึงแม้จะเพิ่มอัตราการไหลให้มากขึ้น (MT4, MT5) ก็ไม่ทำให้อัตราการแปลงผันเปลี่ยนแปลงไปอีกแล้ว อัตราการไหลนี้สามารถคำนวณเป็นความเร็วของก๊าซที่สภาวะปกติได้ประมาณ 16 ซม./วินาที จากผลการทดลองนี้ จึงนำค่าปริมาณการไหลก๊าซไนโตรเจน 2 ลิตร/นาที และอัตราการป้อนน้ำ 6 ลบ.ซม./นาที มาใช้ในการศึกษาจลนของปฏิกิริยาก๊าซไพล์ต่อไป

การทดลองกระทำโดยการจำกัดค่าตัวแปรอื่น ๆ ซึ่งได้แก่ ชนิดของถ่านหิน ขนาดอนุภาคและปริมาณการไหลของไนโตรเจนและน้ำ ให้มีค่าคงที่ตลอดทุก ๆ ชุด



รูปที่ 5.3 แสดงผลการทดลองอิทธิพลของอัตราเร็วก๊าซ

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ของการทดลอง โดยให้อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่เปลี่ยนไป ตารางที่ 5.2 และ 5.3 แสดงสภาวะการทดลองของถ่านหินทั้ง 2 ชนิด รูปที่ 5.4 และ รูปที่ 5.5 เป็นผลการทดลองตามสภาวะการทดลองดังกล่าวตามลำดับ

ตารางที่ 5.2 แสดงสภาวะการทดลองการกาซไฟถ่านหินลิกไนท์ อำเภอสี่

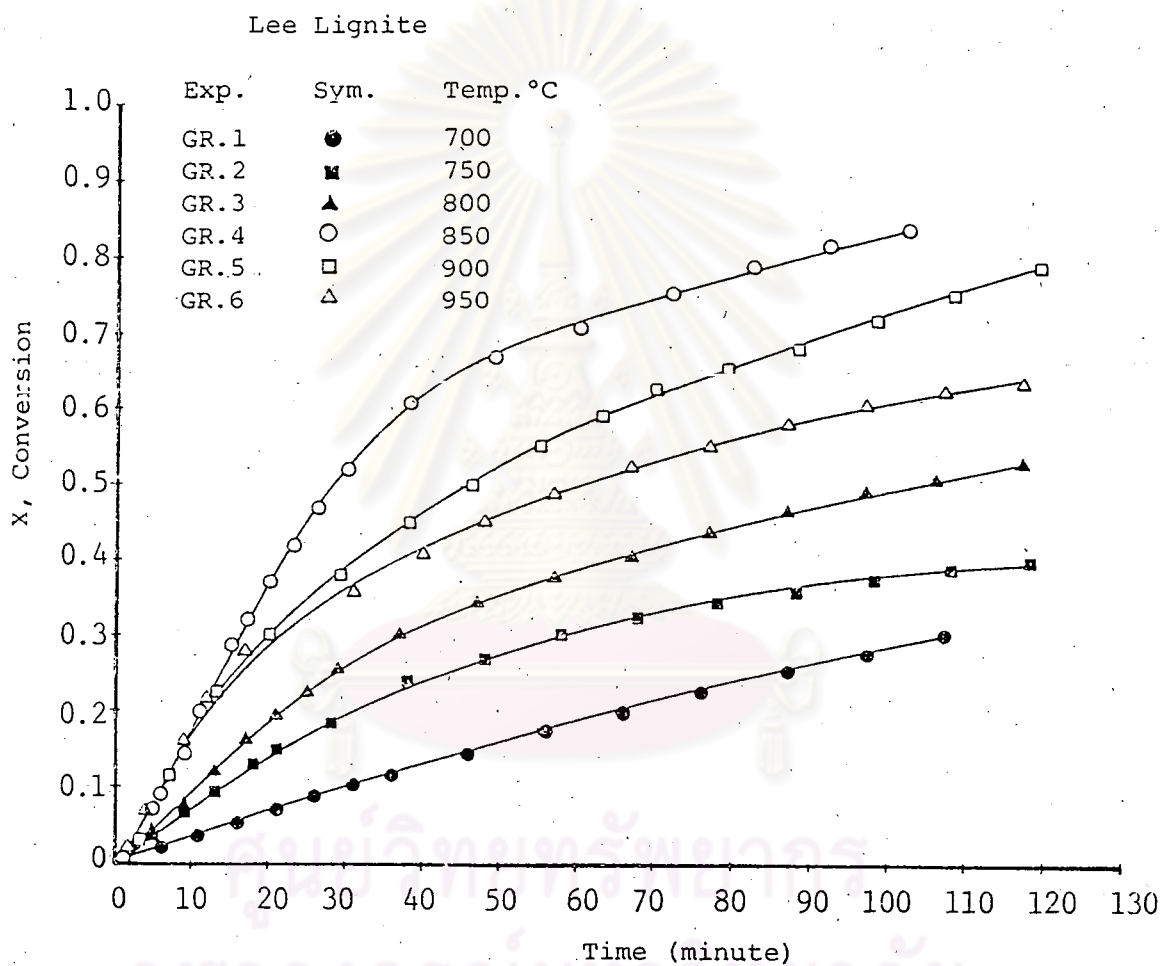
ชนิดถ่านหินลิกไนท์ อำเภอสี่ จังหวัดลำพูน ขนาดอนุภาค -20+30 Mesh น้ำหนัก 75 กรัม อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน 2 ลิตร/นาที อัตราการไหลน้ำ 6 ลบ.ซม./นาที

การทดลอง	อุณหภูมิ °ซ
GR.1	700
GR.2	750
GR.3	800
GR.4	850
GR.5	900
GR.6	950

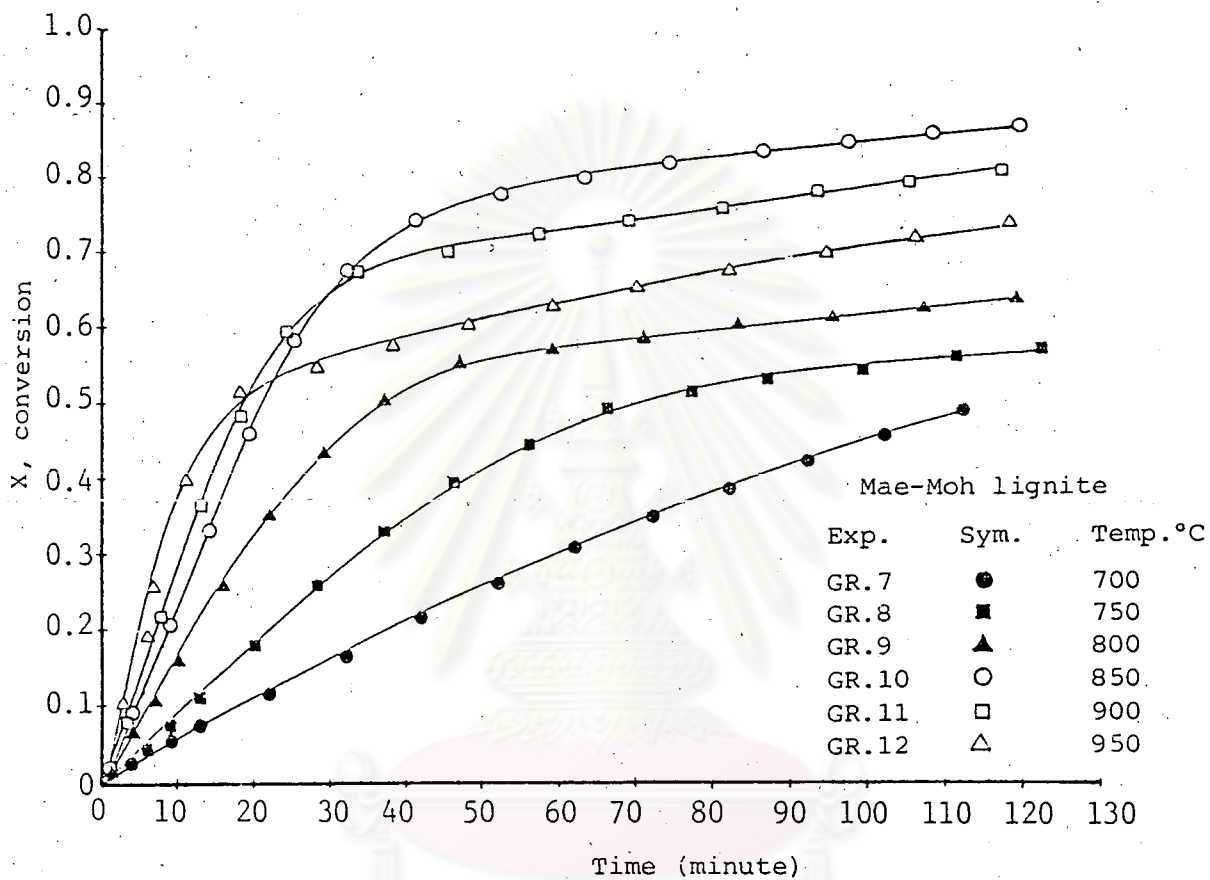
ตารางที่ 5.3 แสดงสภาวะการทดลองการกาซไฟถ่านหินลิกไนท์ อำเภอมแม่เมาะ

ชนิดถ่านหินลิกไนท์ อำเภอมแม่เมาะ ขนาดอนุภาค -20+30 Mesh น้ำหนัก 75 กรัม อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน 2 ลิตร/นาที อัตราการไหลน้ำ 6 ลบ.ซม./นาที

การทดลอง	อุณหภูมิ °ซ
GR.7	700
GR.8	750
GR.9	800
GR.10	850
GR.11	900
GR.12	950



รูปที่ 5.4 แสดงผลการทดลองการกาซซีไฟถ่านหินลิกไนต์ อำเภอสี จังหวัดลำพูน



รูปที่ 5.5 แสดงผลการทดลองการกาซซิไฟผ่านหินลิกไนท์ อานกอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

ศูนย์วิทยาศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 5.3 สรุปผลและการอภิปรายผลการทดลอง

#### 5.3.1 อิทธิพลเนื่องจากความเร็วก๊าซ (Gas-Velocity Influenced)

อิทธิพลเนื่องจากความเร็วของก๊าซ ซึ่งมีความหมายก็คือ อิทธิพลเนื่องจากฟิล์มของก๊าซที่ห่อหุ้มอนุภาคเอาไว้ นั่นคือ เมื่อความเร็วของก๊าซสูงขึ้นความหนาของฟิล์มก๊าซก็จะลดลง ฟิล์มก๊าซที่ห่อหุ้มไว้จะเป็นตัวต้านทานการแพร่ของก๊าซที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับอนุภาคของแข็ง ความเร็วของก๊าซจะต้องสูงจนค่าหนึ่ง ซึ่งความหนาของฟิล์มก๊าซนี้หมดลง ทำให้ผลการทดลองต่อมาไม่มีอิทธิพล เนื่องจากความต้านทานการแพร่ของก๊าซผ่านชั้นของฟิล์มก๊าซเพื่อยืนยันผลการทดลองนี้ สามารถอธิบายโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 4 คือ

1. แบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ดังสมการที่ 4.3.11 คือ

$$t/\tau = X \quad (5.3.1)$$

$$\tau = \frac{\rho_B R_o}{3bk_g C_{Ag}} \quad (5.3.2)$$

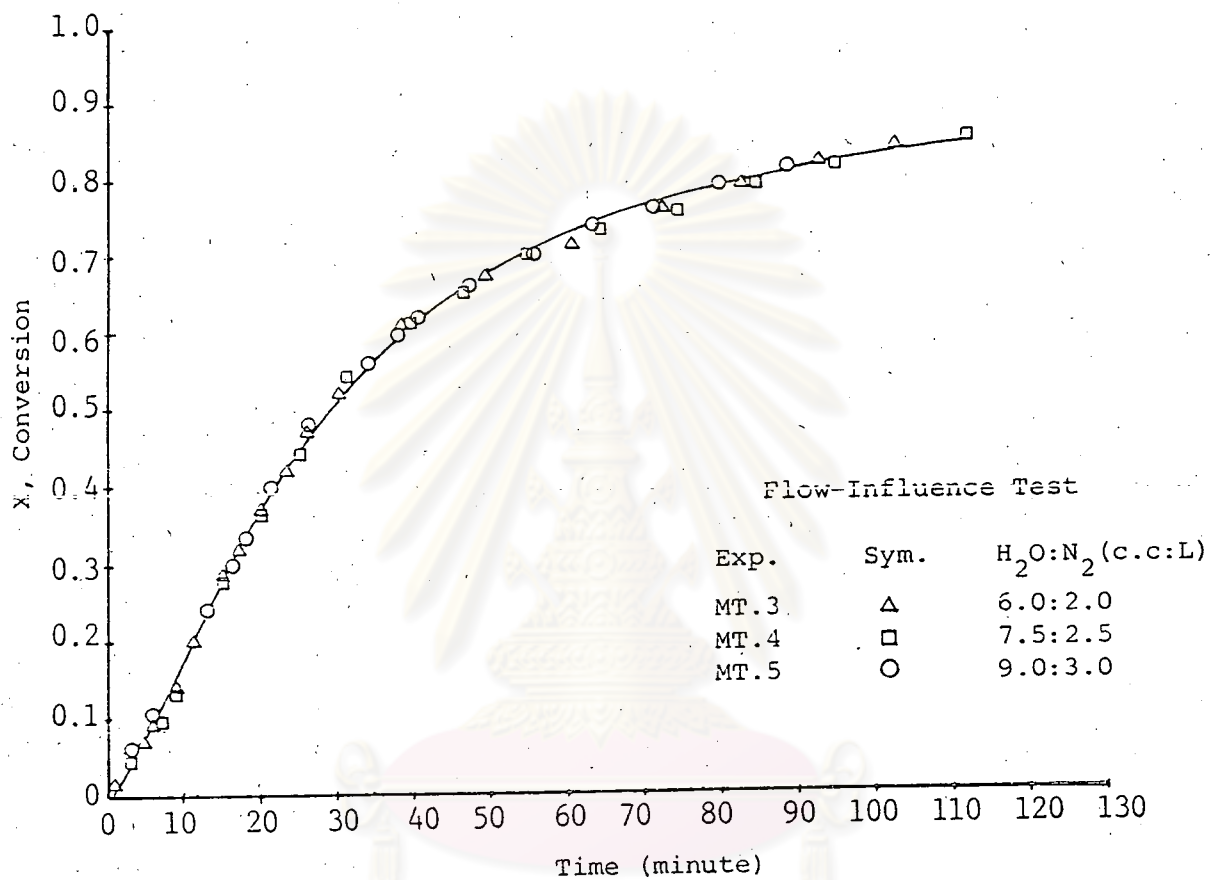
นำค่าการแปลงผันของของแข็ง ( $X$ ) มาเขียนกราฟกับค่าเวลาที่ดำเนินไป ( $t$ ) ในกราฟแบบธรรมดา (Normal Graph) ดังแสดงในรูปที่ 5.6

2. แบบจำลองแกนกลางหดตัวและขนาดอนุภาคลดลง เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ดังสมการที่ 4.4.10

$$t/\tau = 1 - (1-X)^{2/3} \quad (5.3.3)$$

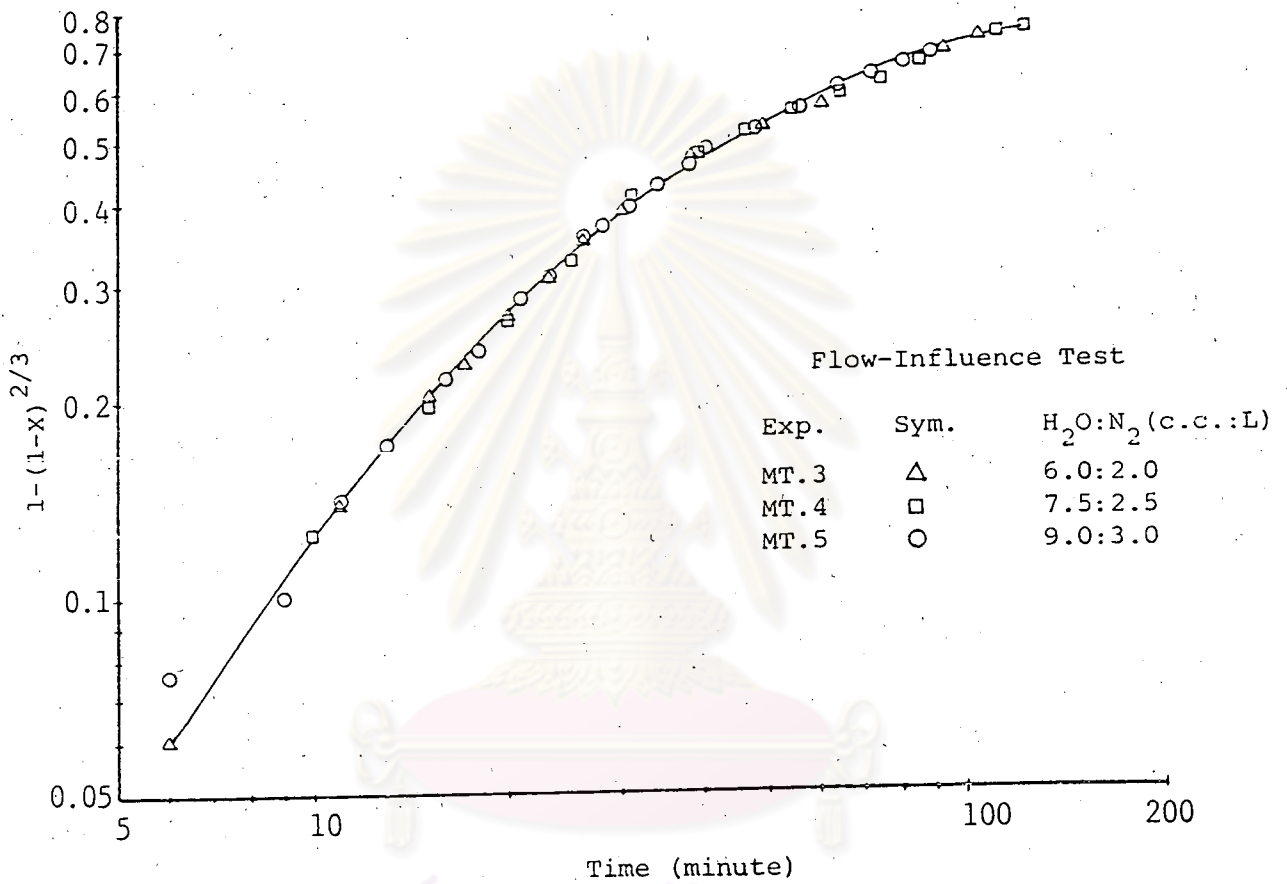
$$\tau = \frac{\rho_B R_o^2}{2b C_{Ag}} \quad (5.3.4)$$

นำค่าฟังก์ชัน  $1 - (1-X)^{2/3}$  มาเขียนกราฟกับเวลา ( $t$ ) ในกราฟล็อก-ล็อก (Log-Log Graph) ดังแสดงในรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.6 แสดงการเทียบแบบจำลองแกนกลางหัดตัวและขนาดอนุภาคลดลง เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.7 แสดงการเทียบแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากรูปที่ 5.6 และ 5.7 ถ้ามีอิทธิพลเนื่องจากการแพร่ผ่านฟิล์มก๊าซ กราฟที่ได้ ทั้งสอง เมื่อพิจารณาจากสมการ 5.3.1 และ 5.3.3 ควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยรูปที่ 5.6 ควรเป็นกราฟเส้นตรงออกจากจุดเริ่มต้น มีความชันเป็น 1. และรูปที่ 5.7 ควรเป็นกราฟเส้นตรง โดยมีความชันมีค่าเป็น 1. แต่จากการพิจารณากราฟทั้งสอง จะเห็นได้ว่า มีลักษณะแนวโน้มเป็นเส้นโค้ง หาได้เป็นเส้นตรงดังกล่าวไม่ จึงกล่าวได้ว่า ที่ค่าปริมาณการไหลของก๊าซในโตรเจนเป็น 2 ลิตร/นาที และอัตราการไหลของน้ำเป็น 6 ลบ.ซม./นาที หรือมากกว่า จะไม่มีอิทธิพลเนื่องจากความต้านทานการแพร่ผ่านชั้นของฟิล์มก๊าซ

เมื่อแน่ใจได้แล้วว่าปราศจากอิทธิพลเนื่องจากความต้านทานการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มก๊าซ ในการอธิบายผลการทดลองในรูปที่ 5.4 และ รูปที่ 5.5 จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ที่ได้อธิบายมาแล้วในบทที่ 4 โดยจะพิจารณาว่า ผลการทดลองนี้สามารถเทียบได้กับแบบจำลองแบบใด

### 5.3.2 แบบจำลองโปรเกสซีฟ-คอนเวอร์ชัน

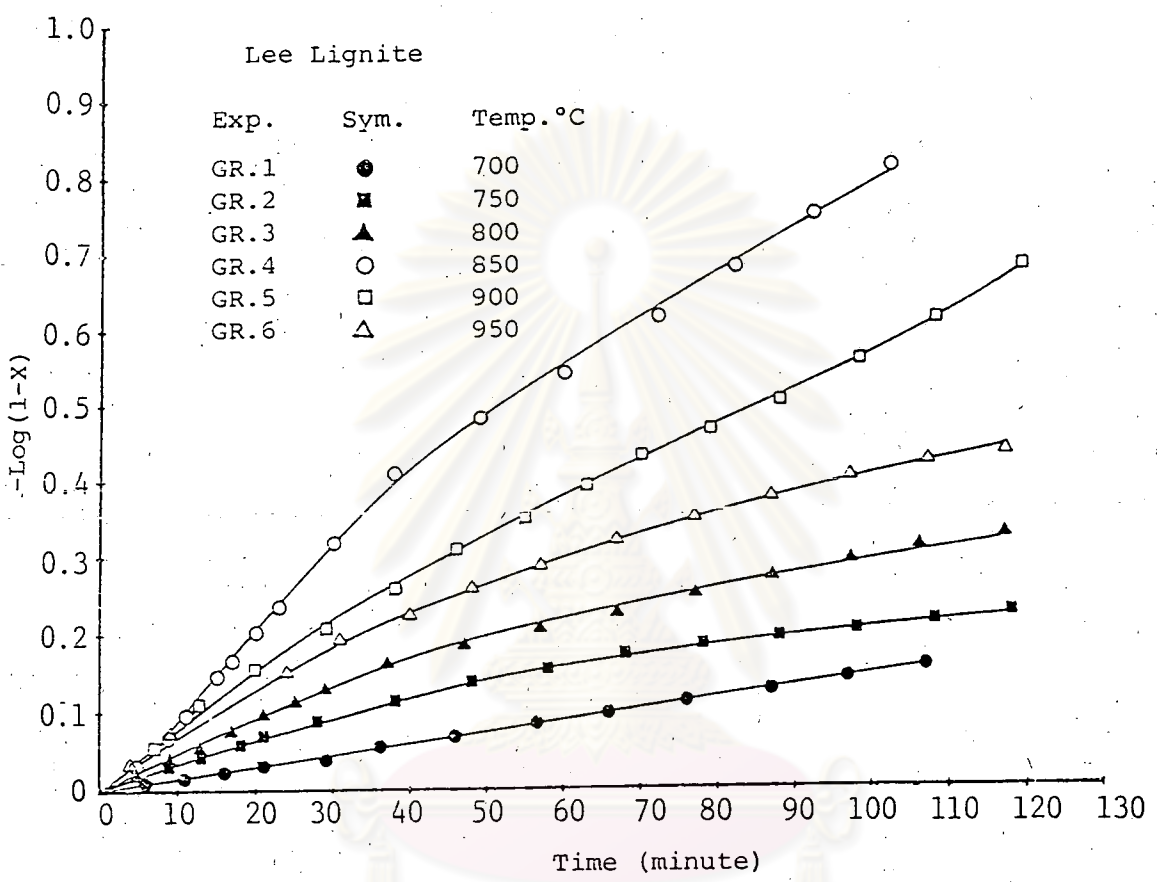
ซึ่งอธิบายว่าอนุภาคของแข็งเกิดปฏิกิริยาพร้อม ๆ กัน ทุก ๆ จุด โดยมีความเข้มข้นของก๊าซที่ทำปฏิกิริยาเท่ากันตลอด สมการทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายแบบจำลองนี้ คือ

$$(1-X) = \exp(-K_r C_A t) \quad (5.3.5)$$

$$-\log(1-X) = K_r C_A t \quad (5.3.6)$$

เมื่อนำค่าฟังก์ชัน  $-\log(1-X)$  และ  $t$  เขียนลงในกราฟธรรมดา ดังแสดงในรูป 5.8 และรูปที่ 5.9

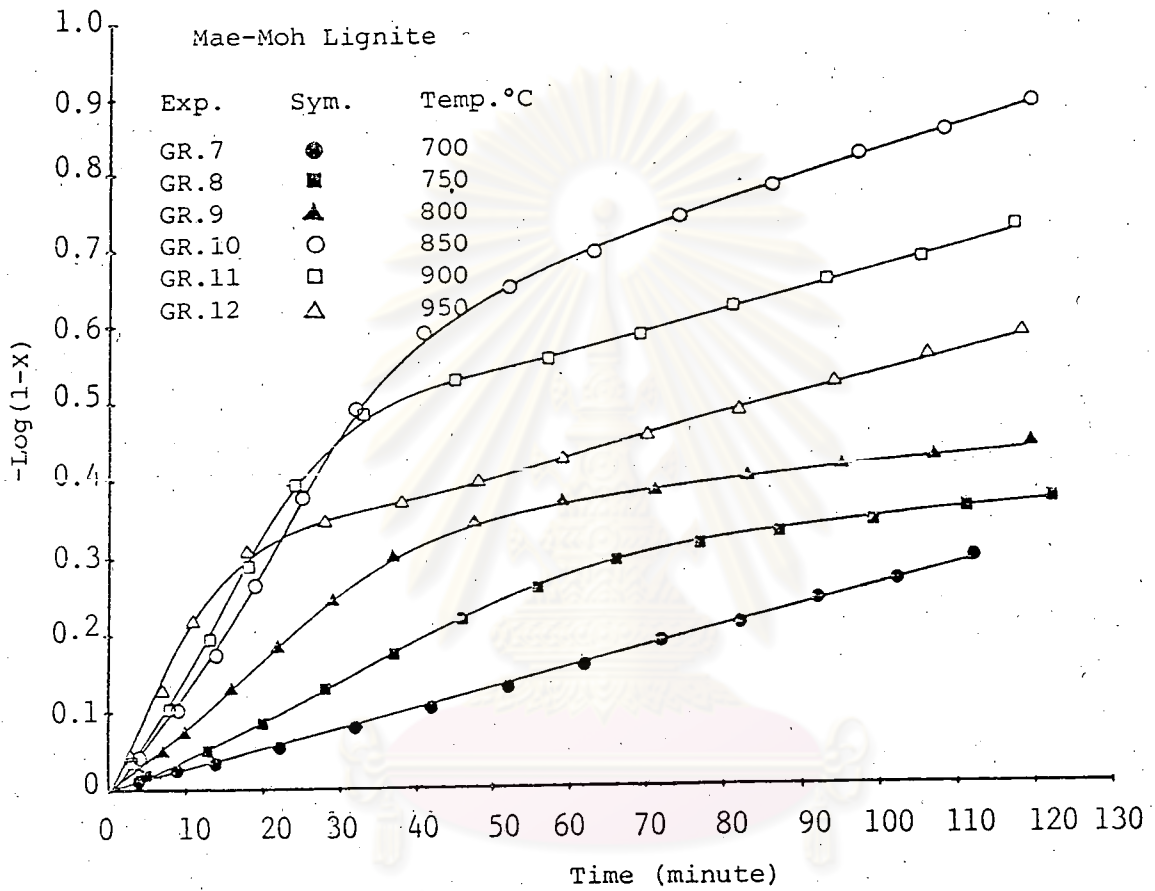
พิจารณาสมการที่ 5.3.5 และ 5.3.6 เมื่อเขียนกราฟฟังก์ชัน  $-\log(1-X)$  และ  $t$  ดังรูปที่ 5.8 และรูปที่ 5.9 ถ้าผลการทดลองเทียบได้พอดีกับแบบจำลองนี้ เส้นกราฟที่ได้ควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ผลปรากฏว่ามีเพียงที่อุณหภูมิ 700 °ซ (GR 1, GR 7) เท่านั้นที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง นั้นแสดงว่าที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °ซ แบบจำลองนี้ไม่สามารถอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาได้ เพื่อทดสอบถึงการเทียบกันของแบบจำลองโปรเกสซีฟ-คอนเวอร์ชัน ที่อุณหภูมิ 700 °ซ นี้ จะทำโดยการเขียนกราฟ  $\log(1-X)$  และ  $t$  ลงในกราฟล็อก-ล็อก (log-log Graph) ซึ่งควรจะได้เส้นตรง โดยมีความชันมีค่าเป็น 1



รูปที่ 5.8 แสดงแบบจำลองโปรเกรสซีฟ-คอนเวอร์ชัน ถ่านหินลิกไนท์ อ่าเกอส์ จังหวัดลำพูน

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 5.9 แสดงแบบจำลองโพรเกสซีฟ-คอนเวอร์ชัน ถ่านหินลิกไนท์ อำเภอมะเมาะ

จังหวัดลำปาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ดังแสดงในรูป 5.10

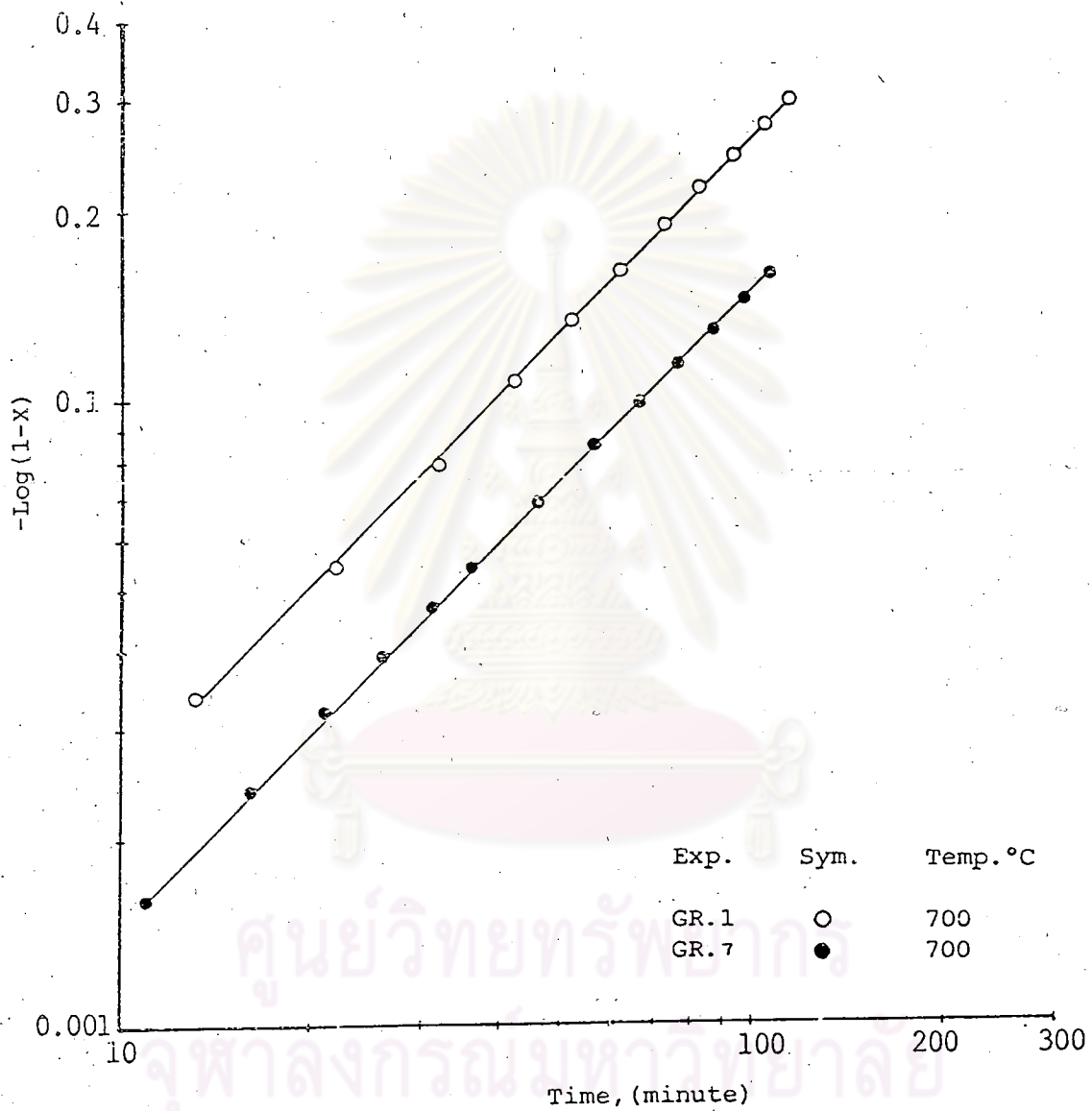
จากรูปที่ 5.10 ความชันของกราฟการทดลอง GR1 และ GR7 ทั้งสองเป็น 0.973 และ 1.037 สำหรับถ่านหินลิกไนท์ อ่าเกอส์ และ อ่าเกอแม่มะ ตามลำดับ แสดงว่าที่อุณหภูมิ 700 °ซ การเกิดปฏิกิริยาก๊าซไฟถ่านหินลิกไนท์ทั้งสองชนิดด้วยไอน้ำ สามารถอธิบายปรากฏการณ์ การเกิดปฏิกิริยาได้โดยอาศัยแบบจำลองคณิตศาสตร์โปร เกลสชีพ-คอนเวอร์ชัน ส่วนที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °ซ แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้ไม่สามารถอธิบายได้

สาเหตุที่อุณหภูมิ 700 °ซ สามารถเทียบกันได้อย่างดีกับแบบจำลองโปร เกลสชีพ-คอนเวอร์ชัน สามารถอธิบายได้เนื่องจาก อัตราเร็วของปฏิกิริยาที่ถูกควบคุมโดยปรากฏการณ์ 3 ชนิด คือ การแพร่ของสารเข้าทำปฏิกิริยาผ่านฟิล์มก๊าซ การแพร่ผ่านเข้าสู่อนุภาคของแข็ง และปฏิกิริยาเคมี เมื่อได้ทำการทดลองตัดอิทธิพลการแพร่ผ่านฟิล์มก๊าซออกแล้ว ตัวแปรที่เหลือจึงมีเพียงการแพร่ของก๊าซเข้าสู่อนุภาคและปฏิกิริยาเคมีเท่านั้น โดยที่อุณหภูมิ 700 °ซ เป็นอุณหภูมิที่ต่ำมาก สำหรับปฏิกิริยาก๊าซไฟถ่านหิน และค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าเปลี่ยนแปลงว่องไวมาก ตามอุณหภูมิ ที่อุณหภูมิ 700 °ซ นี้จึงมีปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยา ปฏิกิริยาเคมีจะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ โดยที่การแพร่ของก๊าซเข้าสู่อนุภาคของแข็งเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ทั้งก่อนของอนุภาคเกิดปฏิกิริยาโดยพร้อม ๆ กัน แต่เมื่ออุณหภูมิสูงมากขึ้นค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาจะมีค่าสูงมากขึ้น ทำให้สารเข้าทำปฏิกิริยาไม่สามารถแพร่เข้าไปได้อย่างทั่วถึงทั้งก่อนอนุภาค เพียงแพร่เข้าไปถึงผิวของอนุภาคก็เกิดปฏิกิริยาหมดแล้ว ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงขึ้นแบบจำลองโปร เกลสชีพ-คอนเวอร์ชัน จึงไม่อาจอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้

### 5.3.3 แบบจำลองแกนกลางหดตัว

แบบจำลองนี้อธิบายว่าการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เมื่อก๊าซที่จะเข้าทำปฏิกิริยาแพร่เข้ามาถึงผิวภายนอกของแกนปราศจากปฏิกิริยา จะเกิดปฏิกิริยาทันทีทันใด นั่นคือความเข้มข้นของก๊าซที่จะเข้าทำปฏิกิริยาที่ผิวภายนอกนี้จะมีค่าเป็นศูนย์ ขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยามี 3 ขั้นตอน

1. ฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา สมการคณิตศาสตร์ที่อธิบายปรากฏการณ์นี้ คือ



รูปที่ 5.10 แสดงแบบจำลองโปรแกสซีพ-คอนเวอร์ชัน ที่อุณหภูมิ 700 °ซ

$$t/\tau = x \quad (5.3.7)$$

$$\tau = \frac{\rho_B R_0}{3bk_g C_{Ag}} \quad (5.3.8)$$

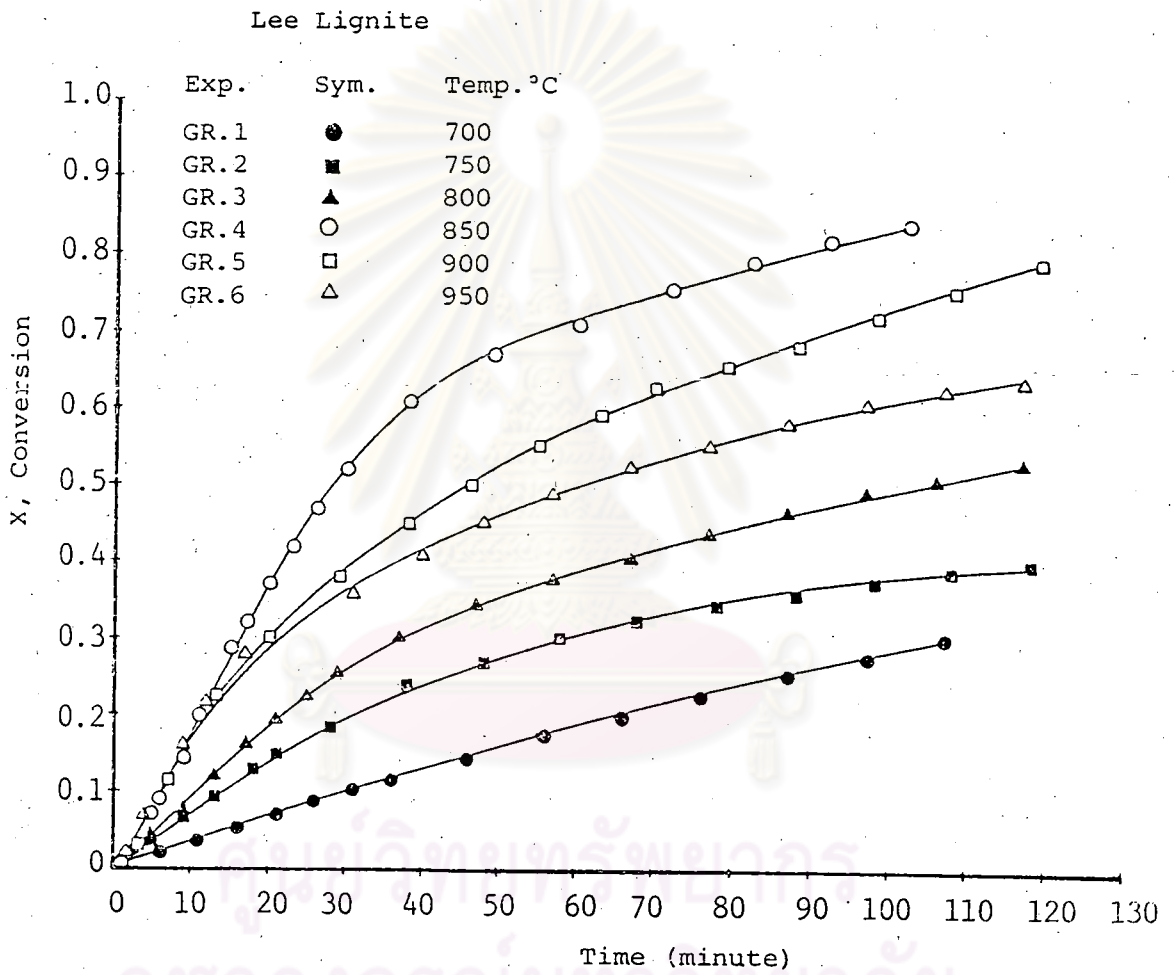
ทำการเขียนกราฟฟังก์ชัน  $x$  และ  $t$  ลงในกราฟธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 โดยเมื่อพิจารณาสมการ 5.3.7 แล้ว ถ้าผลการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองนี้ กราฟที่ได้ควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง ซึ่งจะมีความชันเป็น  $\tau$  พิจารณารูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าไม่มีกราฟเส้นใดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงเลย แสดงว่าแบบจำลองแกนกลางหดตัวโดยมีฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ไม่สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้ และเหตุผลที่สนับสนุนการสรุปผลการทดลองดังนี้อีกเหตุผลหนึ่งก็คือ การตัดอิทธิพลเนื่องจากความเร็วก๊าซ ดังที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 5.3.1 ซึ่งแสดงว่าในการทดลองนี้จะไม่มีความต้านทานเนื่องจากการแพร่ผ่านฟิล์มก๊าซ

2. การแพร่ผ่านชั้นเยื่อถ่านควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา สมการคณิตศาสตร์ที่อธิบายปรากฏการณ์นี้คือ

$$t/\tau = 1 - 3(1-x)^{2/3} + 2(1-x) \quad (5.3.9)$$

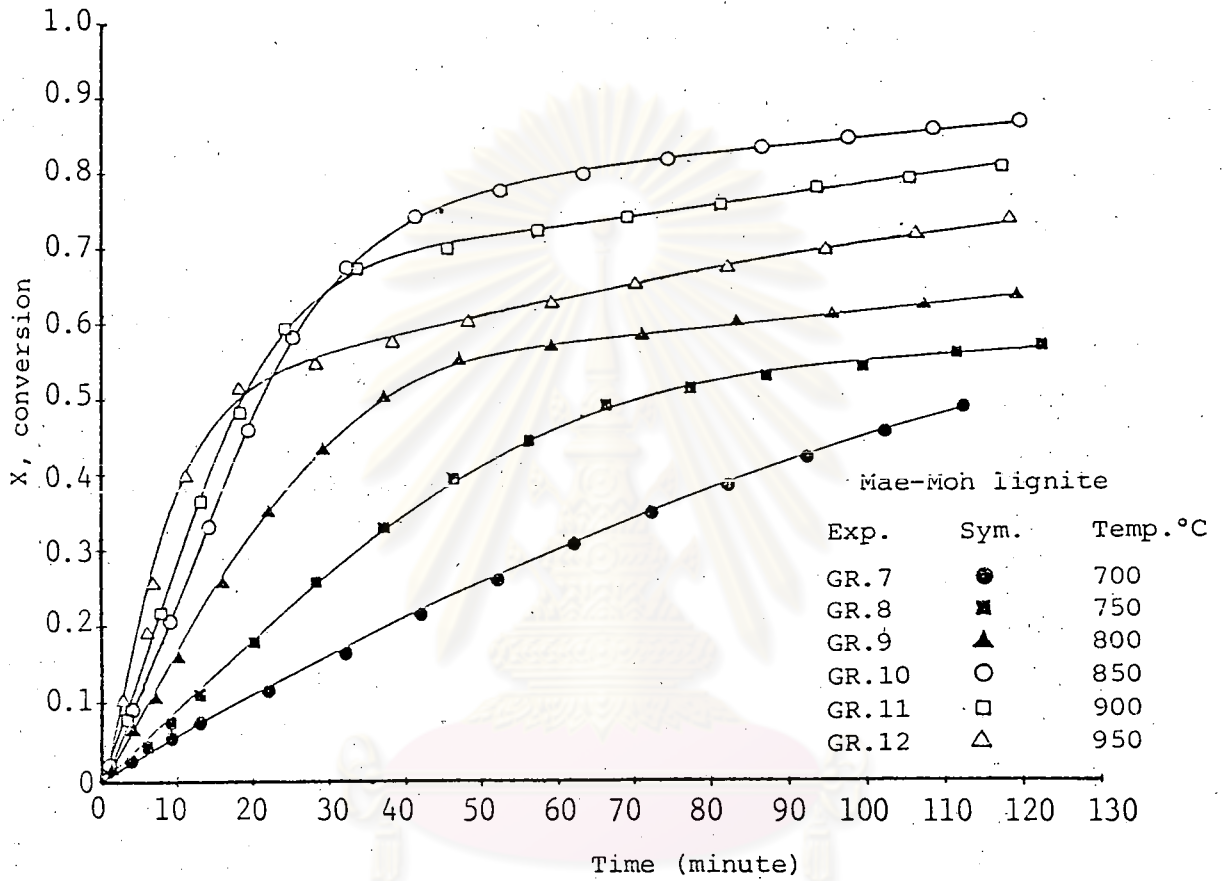
$$\tau = \frac{\rho_B R_0^2}{6b \mathcal{D}_e C_{Ag}} \quad (5.3.10)$$

เมื่อเขียนกราฟฟังก์ชัน  $1 - 3(1-x)^{2/3} + 2(1-x)$  และ  $t$  ลงในกราฟล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 5.13 และรูปที่ 5.14 ซึ่งเมื่อพิจารณาจากสมการ 5.3.9 เส้นกราฟที่ได้ควรจะเป็นเส้นตรง มีค่าความชันเป็น 1. พิจารณารูปที่ 5.13 และ 5.14 จะเห็นได้ว่าไม่กราฟเส้นใดเลยที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงโดยตลอดทั้งเส้น มีเพียงช่วงเวลาดอนท้ายของการทดลองเท่านั้นที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง นับแต่เวลาประมาณ 25 นาที เป็นต้นไปของเวลาที่เกิดปฏิกิริยา ค่าความชันของช่วงเส้นตรงเหล่านี้แสดงในตารางที่ 5.4



รูปที่ 5.11 แสดงแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา

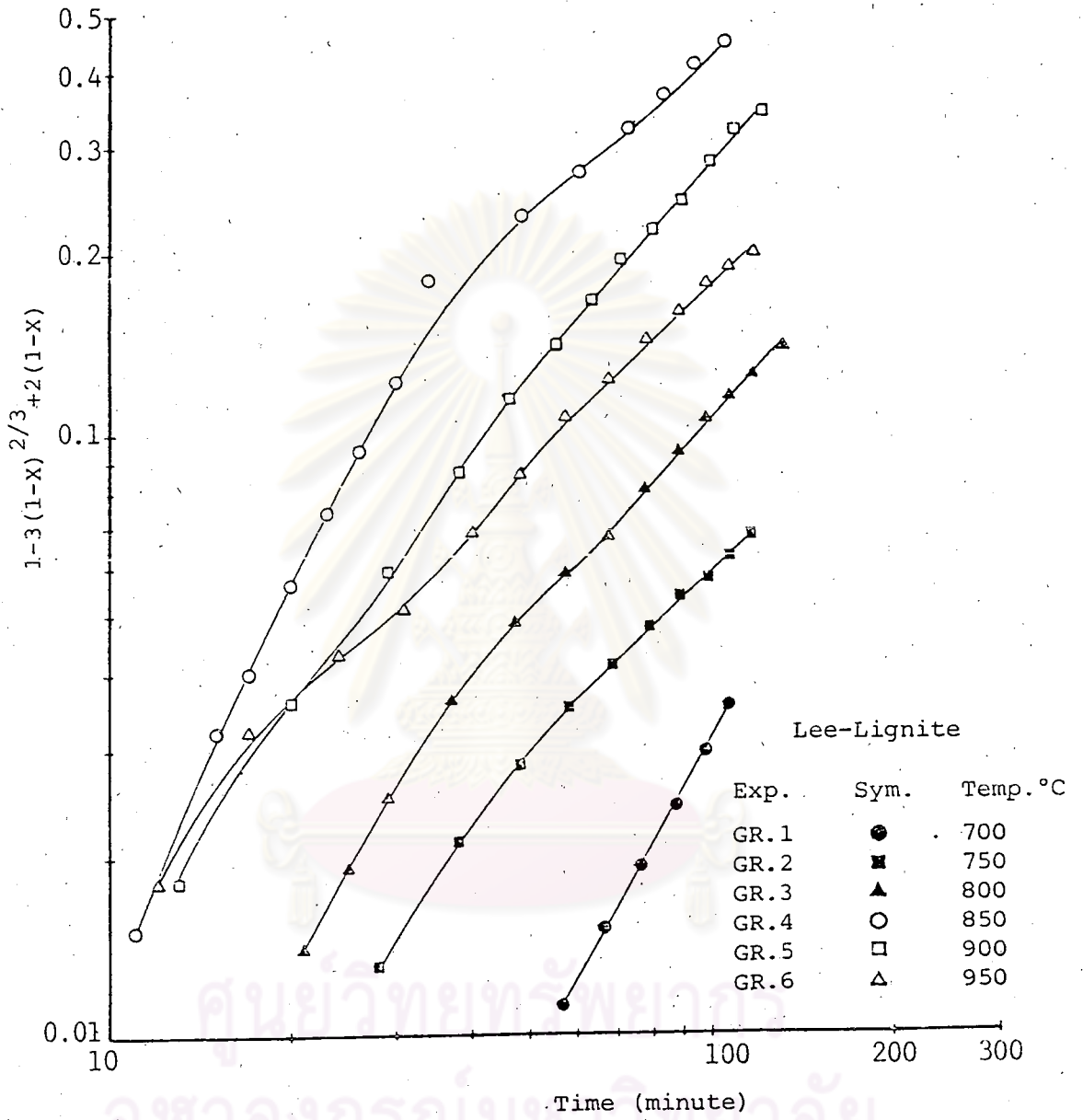
ถ่านหินลิกไนต์ อำเภอสี จังหวัดลำพูน



รูปที่ 5.12 แสดงแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา

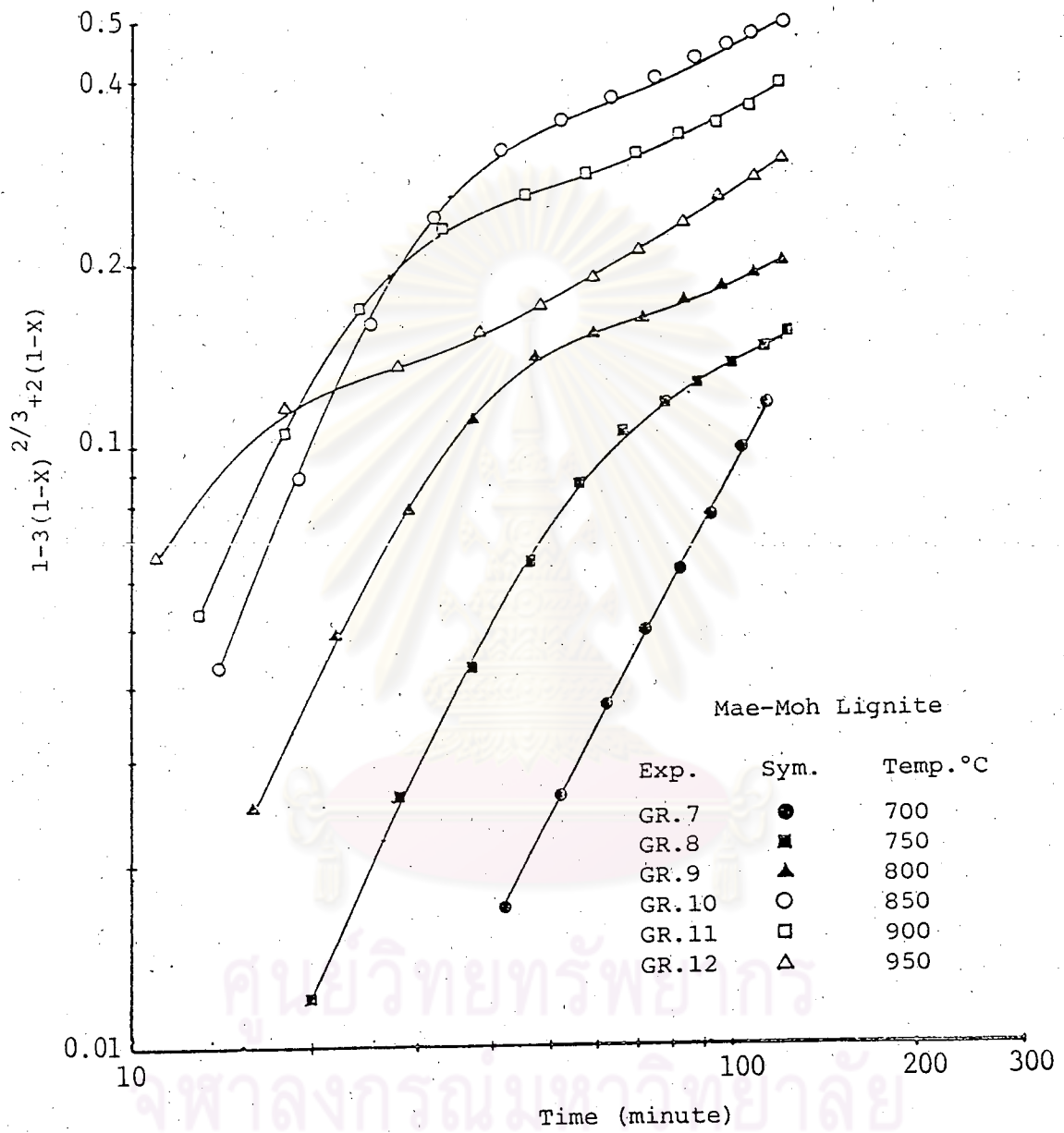
ถ่านหินลิกไนต์ อ่าเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.13 แสดงแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อการแพร่ผ่านชั้นเก้าถ่าน

ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ถ่านหินลิกไนท์ อำเภอสี จังหวัดลำพูน



รูปที่ 5.14 แสดงแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อการแพร่ผ่านชั้นเถ้าถ่าน

ควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา ถ่านหินลิกไนท์ อำเภอมะเมาะ จังหวัดลำปาง



ตารางที่ 5.4 แสดงค่าความชื้นที่อุณหภูมิต่าง ๆ ภายหลังจากเวลา 25 นาที จากผลการทดลอง  
รูปที่ 5.13 และ 5.14

อุณหภูมิ °ซ	ถ่านหินลิกไนท์ อำเภอสี จังหวัดลำพูน	ถ่านหินลิกไนท์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
700	4.232	1.935
750	1.0115	0.805
850	0.918	0.683
900	1.112	0.638
950	0.899	0.806

จากตารางที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าให้ค่าความชื้นเข้าใกล้ 1. แสดงว่าในช่วงเวลาเริ่มต้นจนถึงเวลาประมาณ 25 นาที อัตราเร็วปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคถ่านหินและไอน้ำมิได้ถูกควบคุมด้วยอัตราการแพร่ของไอน้ำผ่านชั้นเถ้า แต่ภายหลังจากเวลาประมาณ 25 นาทีไปแล้ว อัตราเร็วปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านชั้นเถ้า เหตุผลที่อธิบายก็คือ ขณะที่เริ่มต้นการทดลอง ( $t < 25$ ) ชั้นเถ้าจะยังไม่มีหรือกำลังเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย ทำให้อัตราการแพร่ผ่านชั้นเถ้าไม่มีความสำคัญ ต่อเมื่อเวลาในการทดลองนานเข้า ( $t > 25$ ) ความหนาของชั้นเถ้าจะเพิ่มมากขึ้น ความต้านทานการแพร่ผ่านชั้นเถ้าก็จะมากขึ้นด้วย จนในที่สุดอัตราการแพร่ผ่านชั้นเถ้าก็จะมีค่าสำคัญมากจนเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาในที่สุด ส่วนค่าความชื้นที่ได้จากตารางที่ 5.4 ของถ่านหินลิกไนท์ อำเภอแม่เมาะ ให้ปรากฏการณ์ที่แตกต่างออกไป กล่าวคือ ค่าความชื้นของกราฟไม่เข้าใกล้ 1. เหมือนกราฟของถ่านหินจากอำเภอสี มีค่าความชื้นระหว่าง 0.63-0.80 ซึ่งแสดงว่าการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างซับซ้อน อัตราการเกิดปฏิกิริยาไม่ได้ถูกควบคุมโดยขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่งอย่างเด็ดขาด แต่แนวโน้มจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านชั้นเถ้ามากขึ้น

ดังได้กล่าวแล้วว่าภายหลังจากเวลาในการเกิดปฏิกิริยามากเกินกว่า 25 นาทีไปแล้ว อัตราเร็วปฏิกิริยาจะถูกควบคุมโดยอัตราการแพร่ผ่านชั้นเถ้าถ่านที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 850 °ซ ไปแล้ว ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่ออุณหภูมิ

สูงขึ้นอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมีจะมีอัตราเร็วมากขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการแพร่ของก๊าซผ่านชั้น  
 ถ้าถ่านจะมีความสำคัญเพิ่มมากขึ้น เมื่ออัตราการแพร่ผ่านชั้น ถ่านควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา  
 จะให้ค่าการแปลงผันลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น

### 3. ปฏิกิริยาเคมีควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา สมการคณิตศาสตร์ที่

อธิบายปรากฏการณ์การเกิดปฏิกิริยาแทนด้วยสมการ 4.3.27

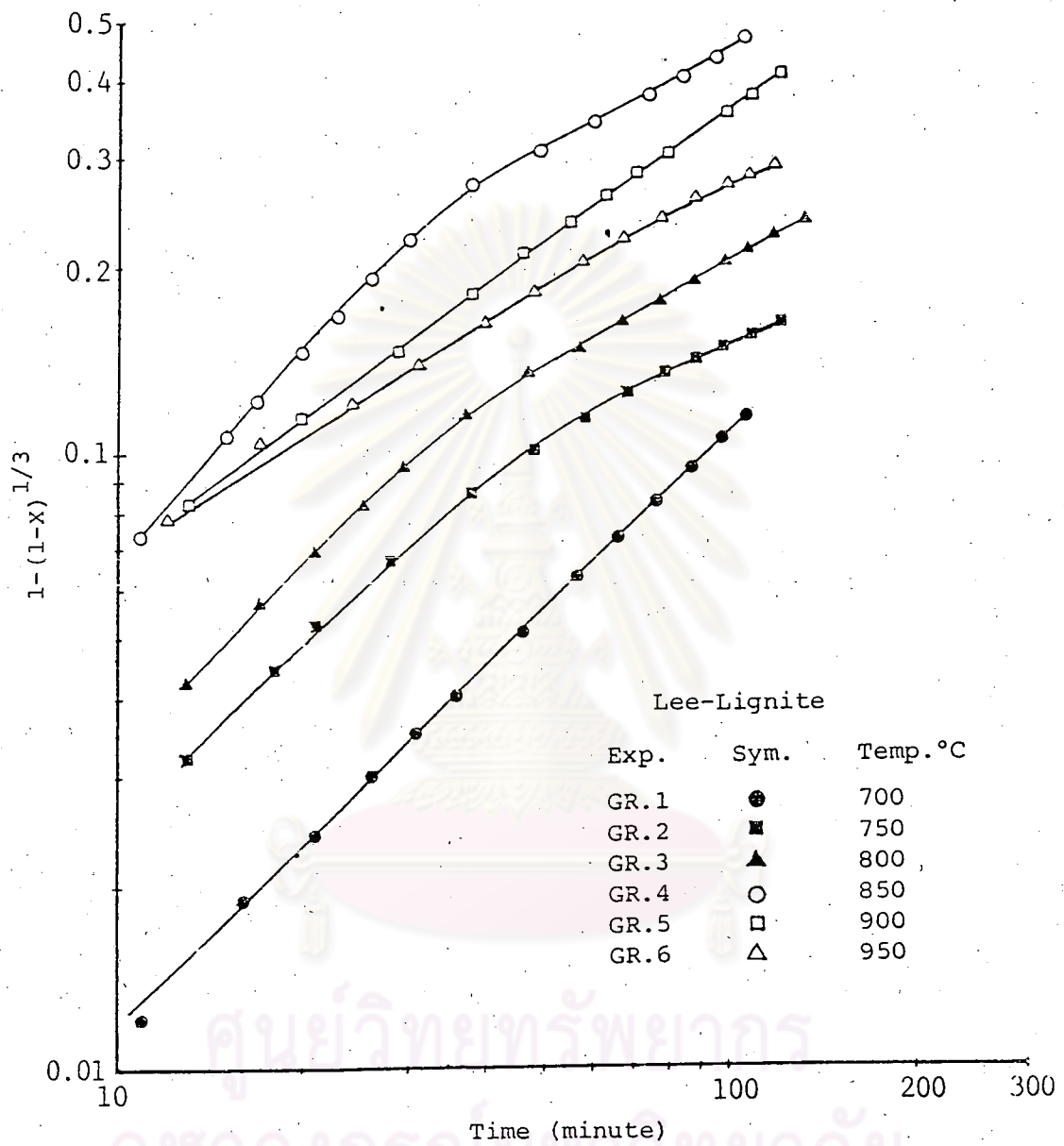
$$t/\tau = 1 - (1-X)^{1/3} \quad (5.3.11)$$

$$\tau = \frac{\rho_B R_0}{b k_s C_{Ag}} \quad (5.3.12)$$

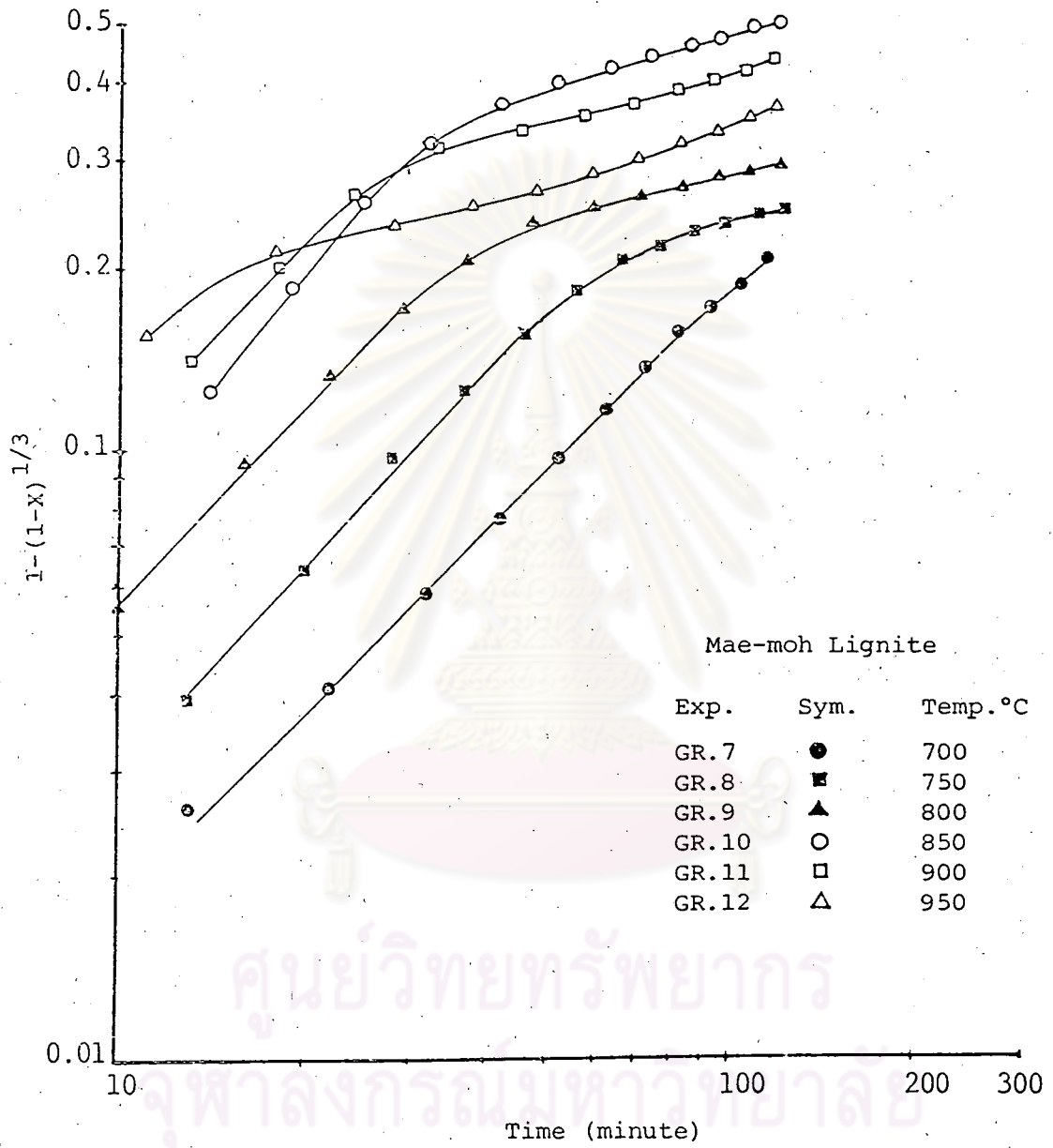
เขียนกราฟฟังก์ชัน  $1 - (1-X)^{1/3}$  และ  $t$  ลงในกราฟสี่เหลี่ยม ดังแสดงในรูปที่ 5.15 และ  
 รูปที่ 5.16 ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นไปตามแบบจำลองนี้ เส้นกราฟที่ได้ควรจะมีลักษณะเป็นเส้นตรง  
 มีความชัน = 1 พิจารณารูปที่ 5.16 เป็นกราฟแสดงแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อปฏิกิริยา  
 เคมีควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยาของถ่านหินลิกไนท์ อ่าเกอส์ และ อ่าเกอแม่เมาะ ตามลำดับ  
 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยา คือเมื่อเวลาการเกิด  
 ปฏิกิริยาน้อยกว่า 25 นาที แต่หลังจากนั้นเส้นกราฟจะมีลักษณะการเปลี่ยนความชันต่ำลง ยกเว้น  
 เส้นกราฟที่อุณหภูมิ 700 °ซ เท่านั้นที่เส้นกราฟมีลักษณะเป็นเส้นตรงตลอดทั้งเส้น ตารางที่ 5.5  
 แสดงค่าความชัน ที่วัดได้ระหว่างเวลาที่น้อยกว่า 25 นาทีและที่มากกว่า 25 นาทีขึ้นไปจากรูป  
 ที่ 5.15 และ รูปที่ 5.16

ตารางที่ 5.5 แสดงค่าความชันที่ได้จากเส้นกราฟรูปที่ 5.15 และรูปที่ 5.16

อุณหภูมิ °ซ	ช่วงอุณหภูมิ, นาที			
	ถ่านหินลิกไนท์ อ่าเกอส์ ส่วงหวัดสาฬุน		ถ่านหินลิกไนท์ อ่าเกอแม่เมาะ ส่วงหวัดสาฬาง	
	0.-25	25-120	0-25	25-120
700	0.940	0.940	1.004	0.90
750	0.953	0.497	1.070	0.299
800	0.985	0.560	1.037	0.214
850	1.022	0.520	1.1045	0.271
900	0.710	0.711	1.099	0.278
950	0.978	0.520	1.092	0.314



รูปที่ 5.15 แสดงแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อปฏิกิริยาเคมีควบคุมอัตราเร็ว  
ปฏิกิริยา ถ่านหินลิกไนท์ อ่าแกอส์ จังหวัดลำพูน



รูปที่ 5.16 แสดงแบบจำลองแกนกลางหดตัว เมื่อปฏิกิริยาเคมีควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา  
ถ่านหินลิกไนต์ อ่าเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

จากค่าความชันดังแสดงในตารางที่ 5.5 จะเห็นได้ว่า ถ้าเวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า 25 นาทีความชันของเส้นกราฟจะมีค่าใกล้เคียง 1. แสดงว่าช่วงนี้แบบจำลองแกนกลางหดตัวเมื่อปฏิกิริยาเคมีเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา สามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาได้ แต่เมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มมากขึ้นกว่า 25 นาที ค่าความชันจะลดลงเป็น 0.214-0.560 เท่านั้นแสดงว่าช่วงนี้ ปฏิกิริยาไม่ได้ถูกควบคุมด้วยปฏิกิริยาเคมี แต่ถูกควบคุมด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นถ้าแทน ดังได้อธิบายและแสดงไว้ในตารางที่ 5.4

#### 5.3.4 แบบจำลองขนาดอนุภาคหดตัว

แบบจำลองนี้อธิบายปรากฏการณ์เมื่ออนุภาคของแข็งเกิดปฏิกิริยากับก๊าซเฉพาะที่ผิวของอนุภาคเท่านั้น ซึ่งคล้ายกับแบบจำลองแกนกลางหดตัว เพียงแต่อนุภาคเป็นชนิดที่ไม่มีชั้นถ้า หรือผลิตภัณฑ์ของแข็งเกิดขึ้นภายหลังการเกิดปฏิกิริยา ดังนั้นจึงไม่มีความต้านทานเนื่องจากการแพร่ของก๊าซผ่านชั้นของแข็งนี้ คงมีแต่ความต้านทานเนื่องจากการแพร่ผ่านฟิล์มก๊าซเท่านั้น โดยมีสมการทางคณิตศาสตร์อธิบายปรากฏการณ์การเกิดปฏิกิริยา ดังสมการที่ 5.4.10

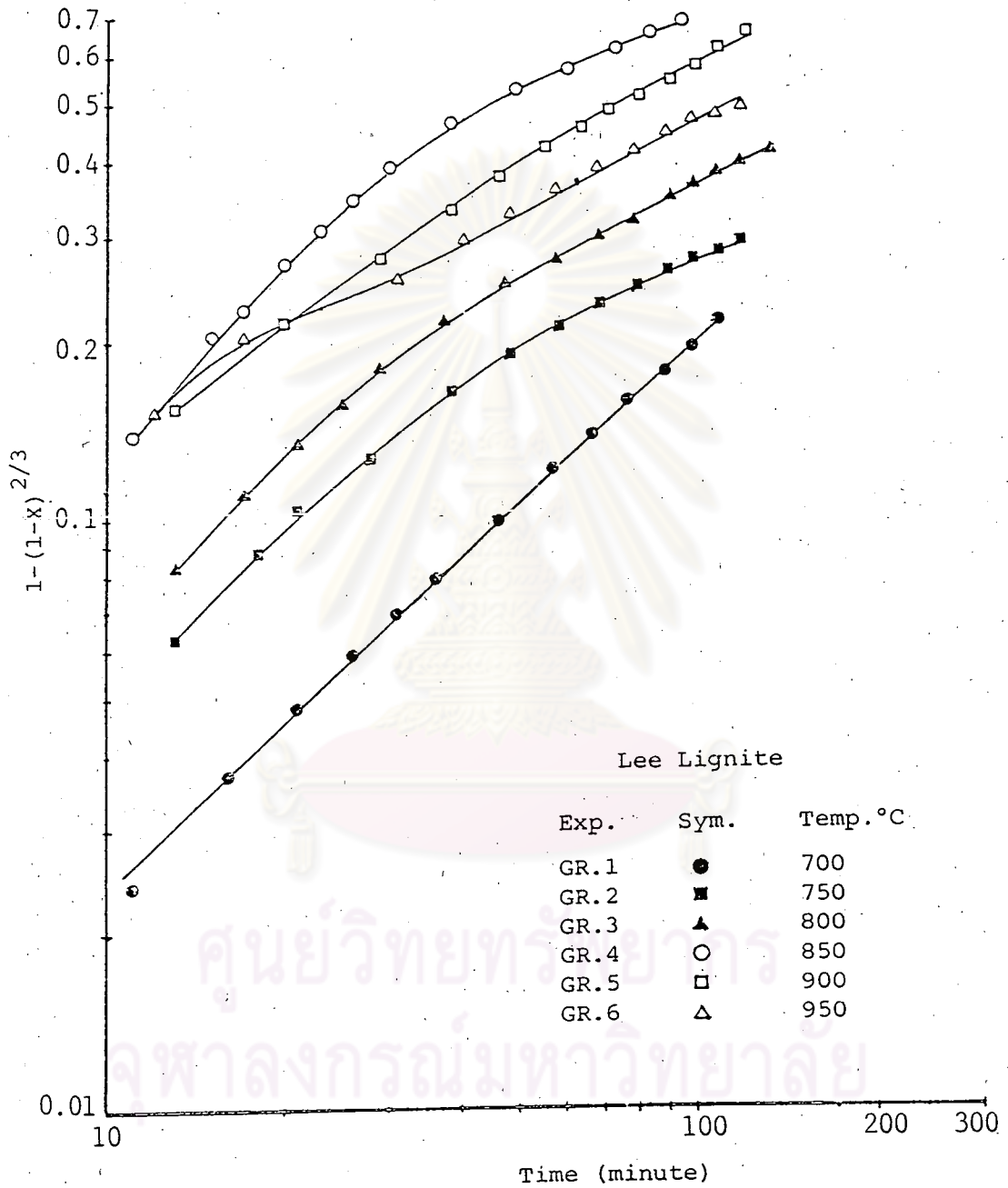
$$t/\tau = 1 - (1-x)^{2/3} \quad (5.3.13)$$

$$\tau = \frac{\rho_B R_o^2}{2bc_{Ag}} \quad (5.3.14)$$

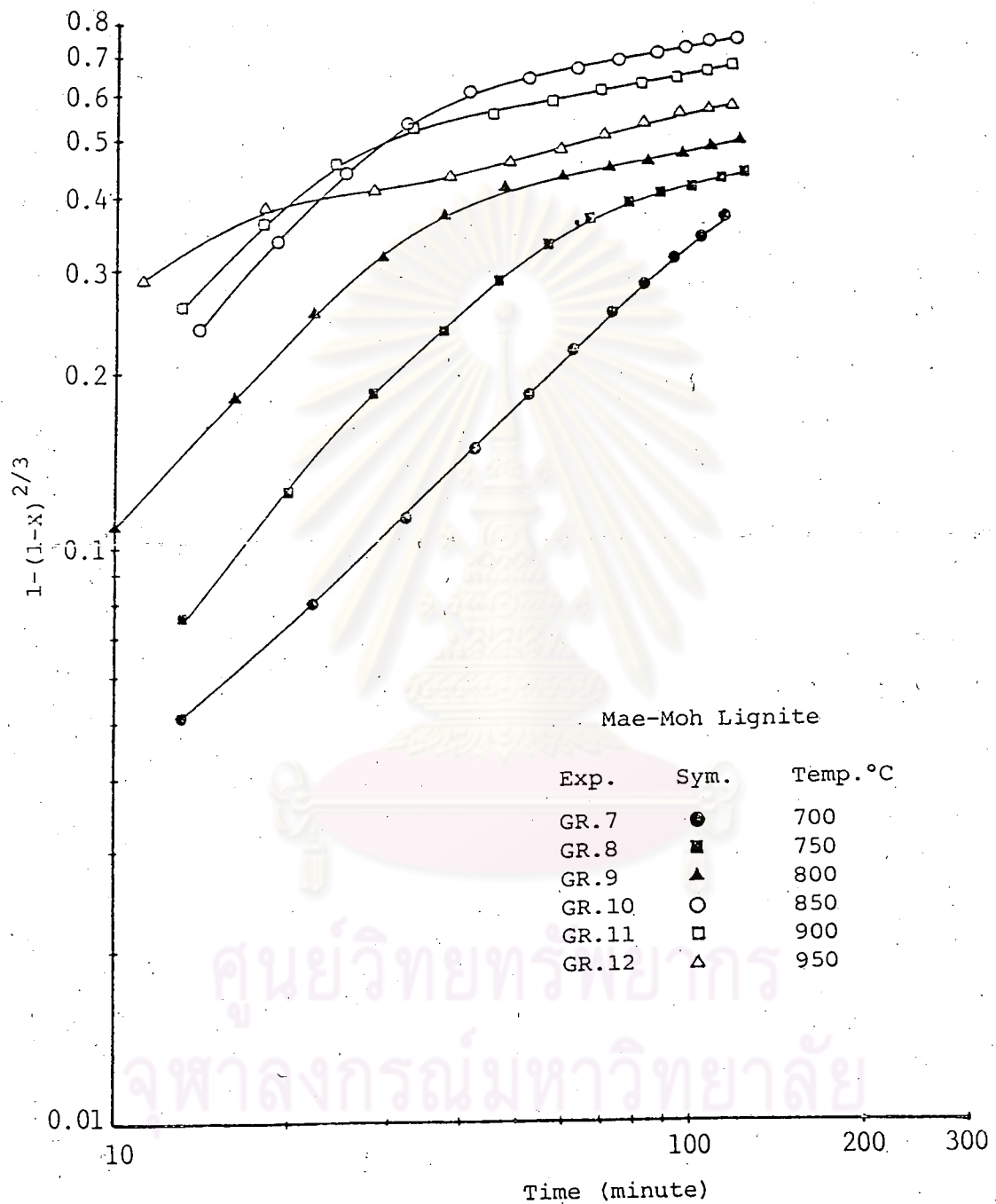
เมื่อเขียนกราฟฟังก์ชัน  $1 - (1-x)^{2/3}$  และ  $t$  ลงในกราฟล็อก-ล็อก ดังแสดงในรูปที่ 5.17 และ 5.18 ถ้าผลการทดลองเป็นไปตามแบบจำลองนี้ ลักษณะเส้นกราฟที่ได้อควรจะเป็นเส้นตรงมีค่าความชันเป็น 1. จากสมการที่ 5.3.13 และจากผลการทดลองในรูปที่ 5.17 และ 5.18 ไม่ปรากฏว่ามีเส้นกราฟเส้นใดที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง และมีค่าความชันเป็น 1. เลยแม้แต่เพียงเส้นเดียว ซึ่งสามารถกล่าวได้ว่า ผลการทดลองนี้ไม่สามารถอธิบายโดยการใช่แบบจำลองอนุภาคหดตัวเมื่อการแพร่ผ่านฟิล์มก๊าซเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา

#### 5.3.5 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบและปริมาณของก๊าซผลิตภัณฑ์

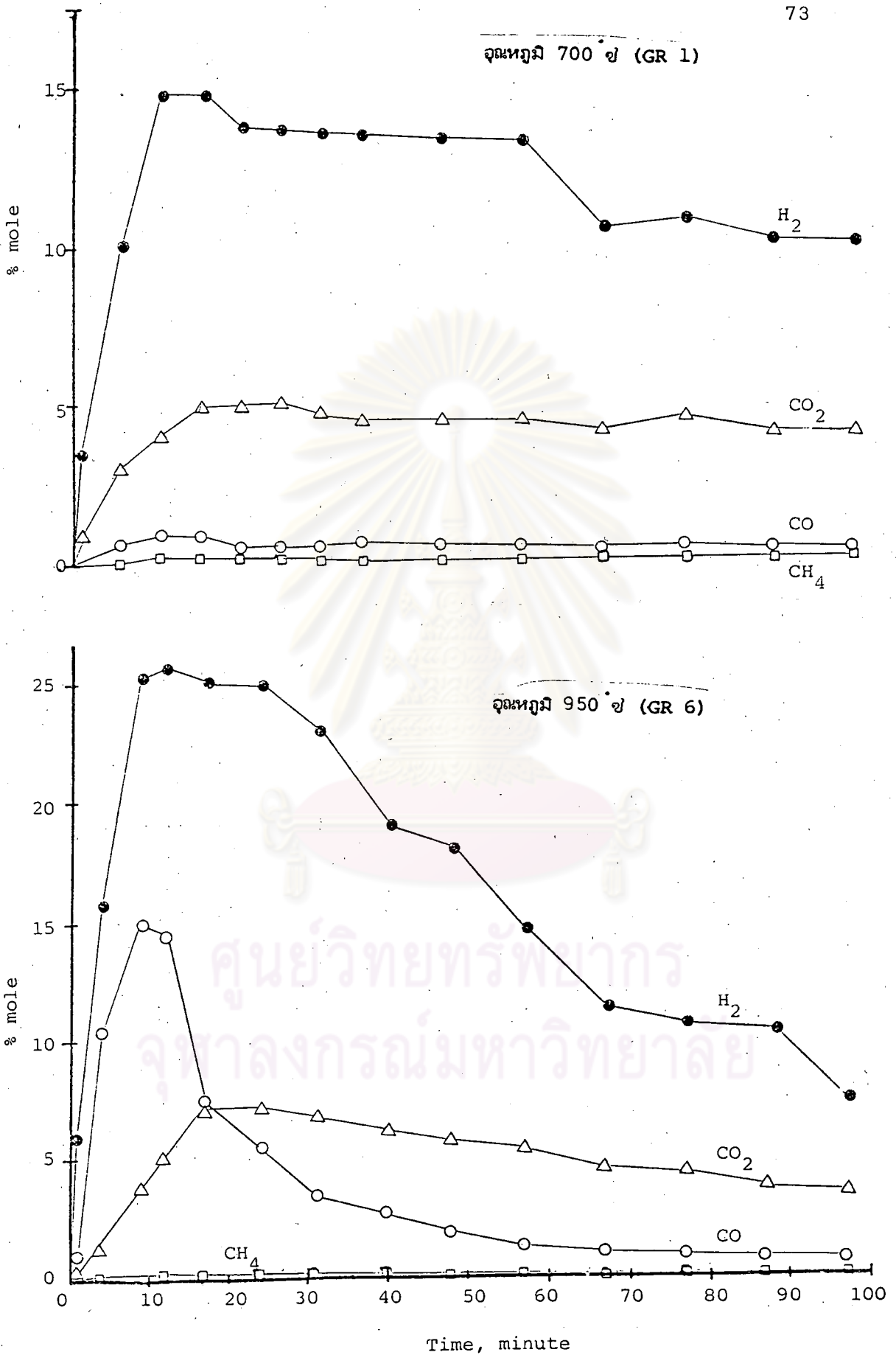
พิจารณารูปที่ 5.19 และ 5.20 ซึ่งแสดงองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จากการเกิดปฏิกิริยาของคาร์บอนในถ่านหินกับไอน้ำ ที่อุณหภูมิ 700 °ซ และ 950 °ซ โดยที่ อุณหภูมิ 700 °ซ ในช่วง 25 นาทีแรกของการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของ



รูปที่ 5.17 แสดงแบบจำลองขนาดอนุภาคหดตัว เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา  
ถ่านหินลิกไนท์ อ่าเกอส์ จังหวัดลำพูน

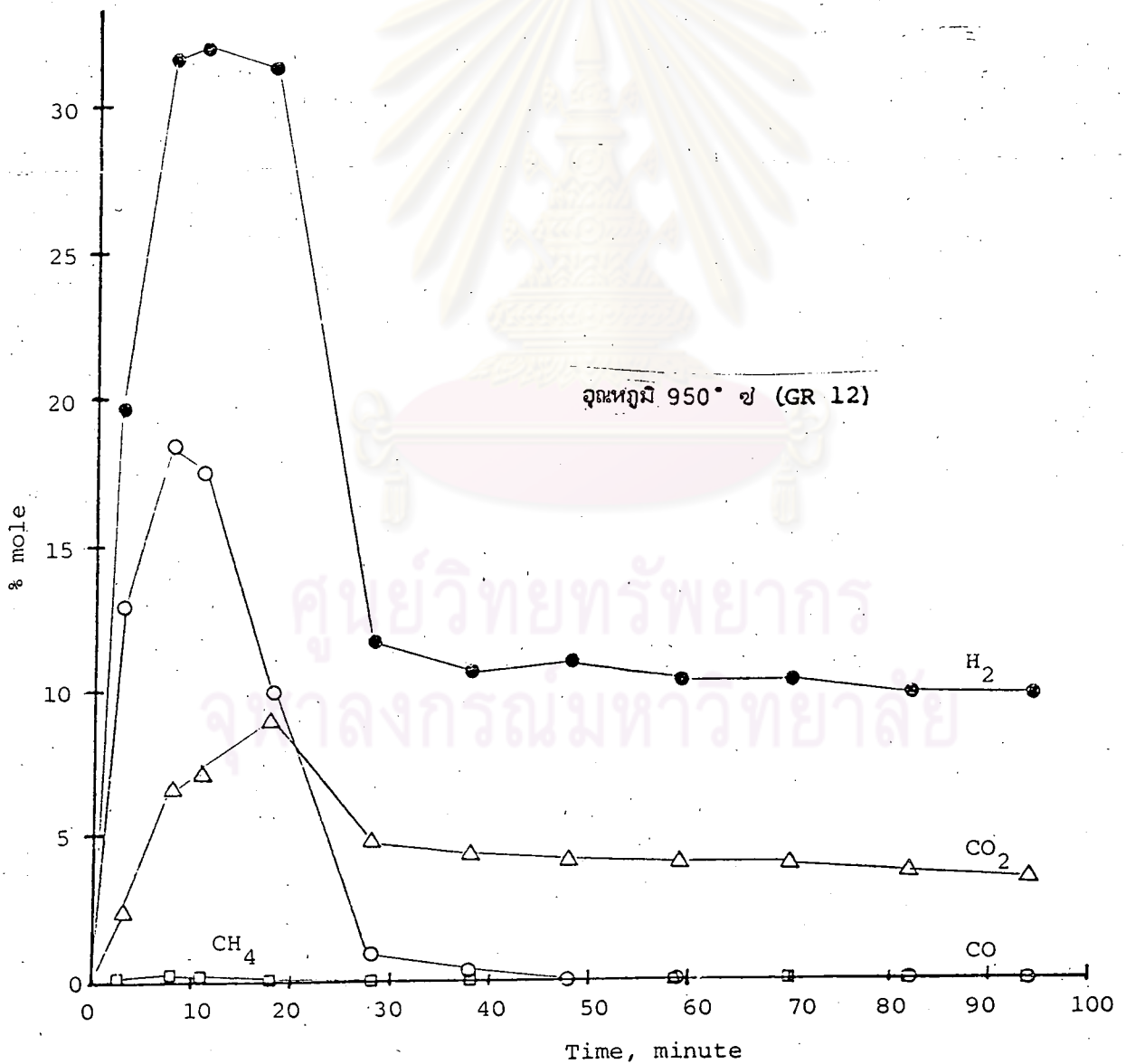
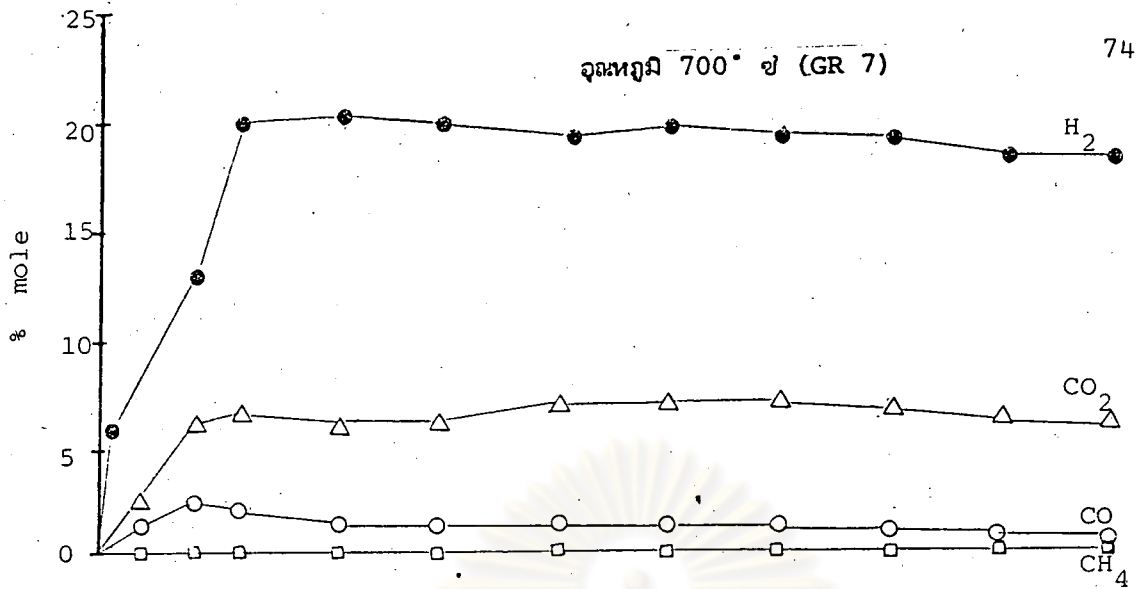


รูปที่ 5.18 แสดงแบบจำลองขนาดอนุภาคหดตัว เมื่อฟิล์มก๊าซควบคุมอัตราเร็วปฏิกิริยา  
ถ่านหินลิกไนต์ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง



รูปที่ 5.19 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ถ่านหินลิกไนท์  
 อ่าเกอส์ ที่อุณหภูมิ 700 °ซ (GR 1) และ 950 °ซ (GR.6)





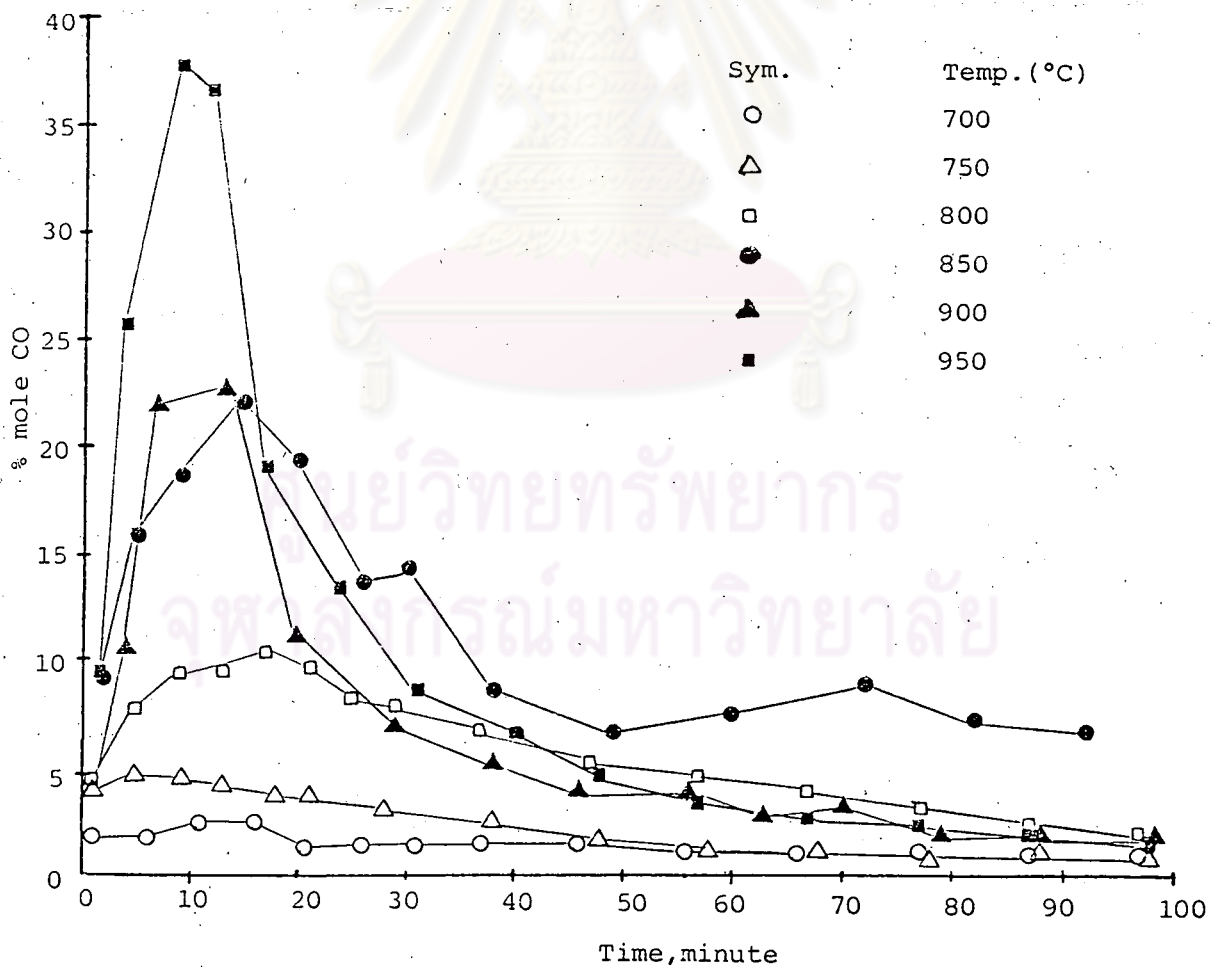
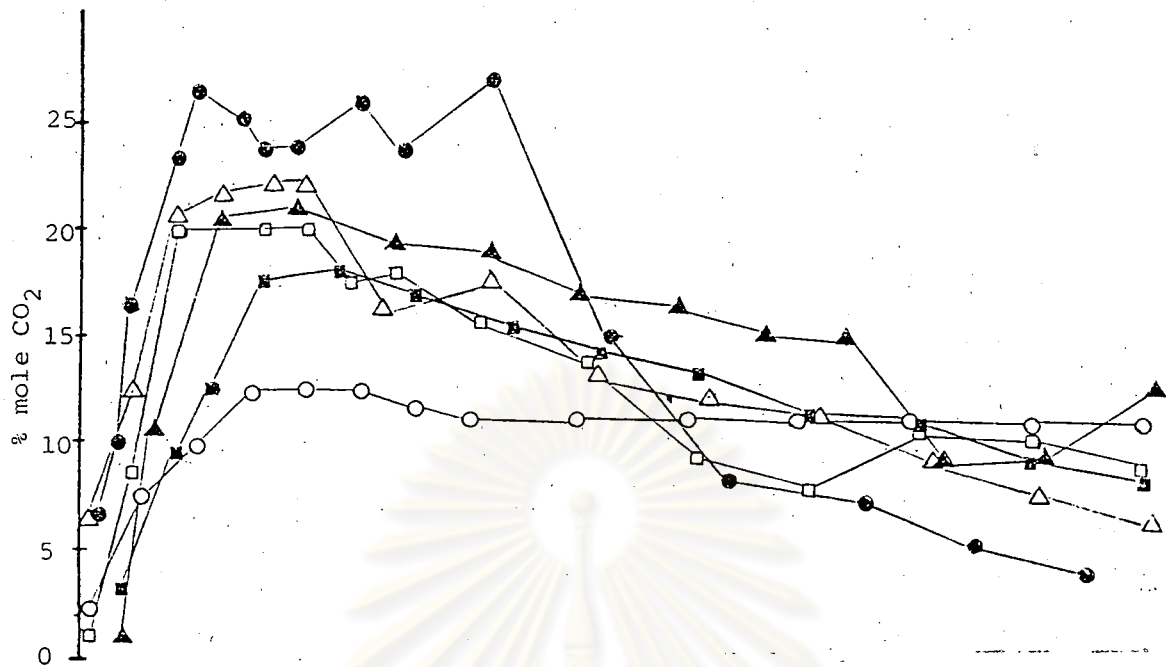
รูปที่ 5.20 แสดงอิทธิพลของจุดอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ถ่านหินลิกไนท์  
อำเภอแม่เมาะ ที่จุดอุณหภูมิ 700° ซ (GR 7) และ 950° ซ (GR 12)

ก๊าซทุกชนิดจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่หลังจากนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะค่อนข้างคงที่ และมีแนวโน้มต่ำลง จนถึงช่วงสุดท้ายของการเกิดปฏิกิริยา โดยความเข้มข้นของก๊าซจะเรียงอันดับจากมากไปน้อยดังนี้ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน นั่นคือก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นเป็นปริมาณมากที่สุด และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะเกิดมากกว่าก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ โดยก๊าซมีเทนเกิดน้อยมาก

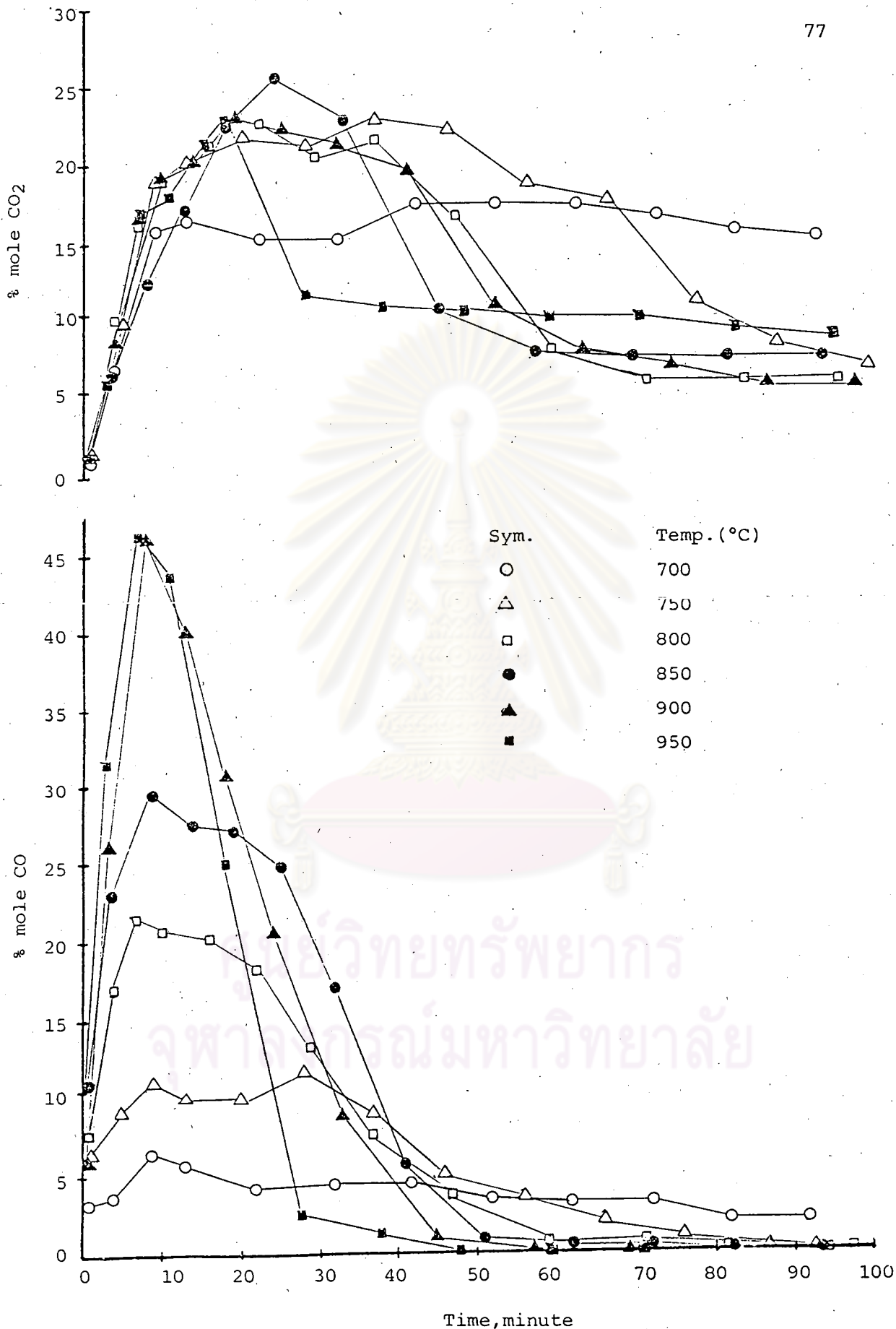
ส่วนที่อุณหภูมิสูง เช่นที่ 950 °C ในช่วง 25 นาทีแรกของการเกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของก๊าซทุกชนิดจะสูงอย่างรวดเร็ว เช่นเดียวกับที่อุณหภูมิต่ำ (700 °C) เพียงแต่ให้ก๊าซผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า โดยมีความเข้มข้นของก๊าซชนิดต่าง ๆ เรียงจากมากไปน้อย ดังนี้ คือ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน เมื่อเวลาในการทำปฏิกิริยานานขึ้น อัตราเร็วการเกิดปฏิกิริยาจะลดอย่างรวดเร็ว โดยความเข้มข้นของก๊าซผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จะเรียงจากมากไปน้อยดังนี้ ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน จะเห็นได้ว่า ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จะมีปริมาณมากกว่า ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงเริ่มต้นของการทดลอง และจะน้อยกว่าเมื่อเวลาผ่านไป

การที่ความเข้มข้นของก๊าซผลิตภัณฑ์มีค่าสูงเมื่อเริ่มต้นปฏิกิริยา อธิบายได้ว่าเนื่องจากช่วงนี้ยังไม่เกิด แก๊สที่ผิวของถ่าน ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงถูกควบคุมโดยอัตราเร็วปฏิกิริยาเคมี แต่ภายหลังจากนั้นขึ้น ถ้าจะเกิดขึ้นและมากขึ้นตามลำดับ ทำให้อัตราเร็วปฏิกิริยาถูกควบคุมโดยการแพร่ผ่านชั้นถ่าน ซึ่งในอัตราการเกิดปฏิกิริยาน้อยกว่า

พิจารณารูปที่ 5.21 และ 5.22 แสดงปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ที่อุณหภูมิต่ำ ๆ จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในช่วงแรกที่ทุก ๆ อุณหภูมิ จะมีความเข้มข้นมากอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจะมีแนวโน้มคงที่ และลดลงเล็กน้อย โดยอุณหภูมิต่ำ จะเกิดปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มากกว่าที่อุณหภูมิสูง ส่วนก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ในช่วงแรกของการเกิดปฏิกิริยาจะมีความเข้มข้นสูงอย่างรวดเร็วเช่นกัน แต่เมื่อเวลาในการเกิดปฏิกิริยานานขึ้น ความเข้มข้นจะลดลงอย่างรวดเร็ว โดยที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาสูง จะให้ปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์สูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 5.21 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านหินลิกไนท์ อ่าเภอสี



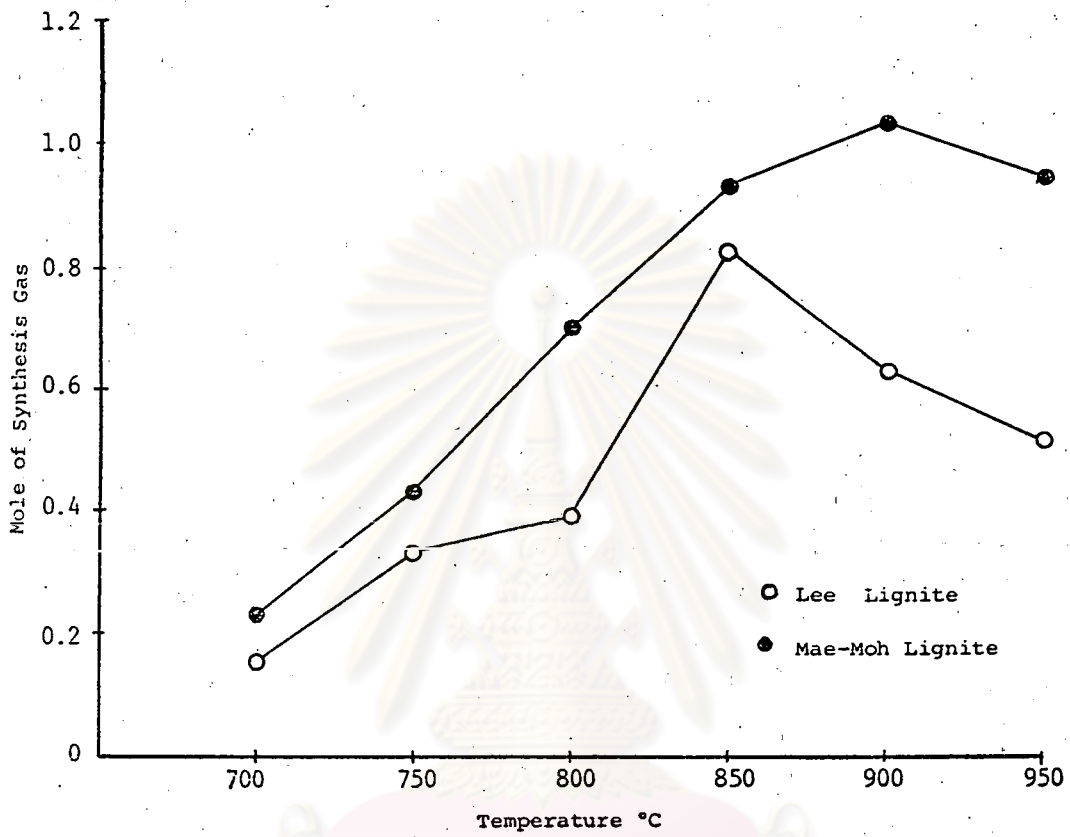
รูปที่ 5.22 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิต่อปริมาณการเกิดก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ถ่านหินลิกไนท์ อำเภอแม่เมาะ

ส่วนการเกิดก๊าซมีเทนนั้น เกิดขึ้นน้อยมาก (น้อยกว่า 0.35%) พบว่า ก๊าซมีเทนมีแนวโน้มจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง และสาเหตุอันหนึ่งที่เกิดก๊าซมีเทนน้อยคือ ความดันในการเกิดปฏิกิริยา จะต้องสูงกว่านี้ และเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะต้องนาน จึงจะเกิดก๊าซมีเทนได้ดี

พิจารณารูปที่ 5.23 แสดงจำนวนโมลของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ที่อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ โดยมีระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเพียง 25 นาที จะเห็นได้ว่า ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น มีแนวโน้มจะมากขึ้นตามอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่สูงขึ้น จนถึงอุณหภูมิประมาณ 850-900 °C จะเกิดค่าสูงสุด และปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์จะมีค่าต่ำลง พบว่า ถ่านหินจากอำเภอแม่เมาะ จะให้ปริมาณก๊าซผลิตภัณฑ์สูงกว่า ถ่านหินจาก อำเภอสี ซึ่งชี้ให้เห็นว่า ถ่านหินจาก อำเภอแม่เมาะ มีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำมากกว่า หรือต้องการพลังงานในการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาน้อยกว่านั่นเอง



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.23 แสดงจำนวนโมลของก๊าซผลิตภัณฑ์ที่ อุณหภูมิต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย