

## วิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาดังตัวแปรต่างๆในการคาร์บอนไนซ์แกลบ ได้แก่ ปริมาณแกลบ, อัตราการไหลก๊าซ, อุณหภูมิ และเวลาที่มีผลต่อแนวโน้มคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการวิเคราะห์โดยประมาณ คือ ปริมาณความชื้น, สารระเหย, เถ้า และคาร์บอนคงตัว และมีการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่อคาร์บอนในผลิตภัณฑ์ การทดลองในช่วงแรกต้องมีการควบคุมอัตราการให้ความร้อน และปริมาณออกซิเจนจนถึงอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ก่อนที่จะทำการคาร์บอนไนซ์ต่อไปตามช่วงอุณหภูมิที่ต้องการ โดยแปรอัตราการไหลก๊าซให้มากกว่าความเร็วต่ำสุดในการเกิดฟลูอิดเซชัน (0.9 เมตรต่อวินาที)

### 5.1 การควบคุมสภาวะของระบบในช่วงแรก

การทดลองในส่วนนี้เป็นการทดลองมองหาสภาวะการทดลองในช่วงเพิ่มอุณหภูมิเพื่อให้เกิดสภาวะฟลูอิดเซชันในเบด และไม่เกิดการเผาไหม้อย่างรุนแรงของแกลบ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะไม่สม่ำเสมอ ซึ่งจะมีลักษณะสีขาวปนดำ มีปริมาณของเถ้าสูง และปริมาณของคาร์บอนต่ำ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.2

#### 5.1.1 อัตราการป้อนก๊าซ

การเกิดสภาวะฟลูอิดเซชันของเม็ดแกลบเกิดขึ้นได้ยาก จากการทดลองพบว่าเกิดสภาวะที่เป็นช่อง (chaneling) สลับกับการเกิดสภาวะฟลูอิดเซชัน (Xu และคณะ, 1983) เนื่องจากแกลบมีความหนาแน่นต่ำ และลักษณะทางกายภาพของเม็ดแกลบที่ บริเวณผิวนอกจะประกอบด้วยชนเล็กๆ เป็นส่วนทำให้เกิดการเกาะเกี่ยวระหว่างเม็ดแกลบเป็นสาเหตุให้มีการเคลื่อนที่ของกลุ่มก้อนแกลบที่เกาะกันจากด้านล่างของเบตขึ้นมาด้านบน (slugging) เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่จะเกิดขึ้นจำเป็นต้องหาอัตราการป้อนก๊าซด้วยความเร็วที่เหมาะสม และให้ความร้อนเพื่อเผาชนให้หลุดออกจากผิวแกลบ ทำให้เกิดสภาวะฟลูอิดเซชัน นอกจากนี้อุณหภูมิในเบตยังยากต่อการควบคุมเนื่องจากการเผาไหม้ของสารระเหยที่ปลดปล่อยออกมา โดยเลือกใช้อัตราการป้อนก๊าซด้วยความเร็ว 3 เมตรต่อวินาที พร้อมกับมีการกวนเบตช่วยในช่วงเริ่มต้น จากอุณหภูมิห้องไปจนถึงช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง คือ 300 องศาเซลเซียส

### 5.1.2 อัตราการให้ความร้อน และปริมาณออกซิเจน

ตัวแปรที่สำคัญของการควบคุมสภาวะในฟลูอิไดซ์เบด ได้แก่ อัตราการให้ความร้อน และปริมาณออกซิเจน โดยอัตราการให้ความร้อนสามารถควบคุมได้จากการปรับปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดความร้อนหลัก ส่วนปริมาณออกซิเจนสามารถควบคุมโดยป้อนก๊าซไนโตรเจนเพื่อไล่อากาศที่มีอยู่ในระบบออกก่อนให้ความร้อน จากผลการทดลองพบว่า ในกรณีที่มีปริมาณออกซิเจนสูงกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ อัตราการให้ความร้อนมีผลกระทบต่อคาร์บอนไอซ์แกลบบ้างมาในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 300 องศาเซลเซียส ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.3 เนื่องจากอุณหภูมิในช่วงนี้เริ่มมีการปลดปล่อยสารระเหย จากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นโครงสร้างของแกลบบ เช่น เซลลูโลส เอมีเซลลูโลส (Antal, 1982) อย่างรวดเร็วเกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์กับออกซิเจนที่เหลืออยู่ในระบบ ส่งเสริมการเผาไหม้ของแกลบบ และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน อุณหภูมิภายในเบตสูงขึ้นอย่างรวดเร็วจนไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเบตได้ ทำการลดผลกระทบดังกล่าวด้วยการลดปริมาณออกซิเจนในระบบให้ต่ำกว่า 8 เปอร์เซ็นต์ เพื่อลดความรุนแรงของปฏิกิริยาออกซิเดชัน แต่ยังไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิในเบตได้ทันจึงทำการหยุดให้ความร้อนแก่เตาเป็นช่วงๆ ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที, ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส 10 นาที และที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส 10 นาที เพื่อให้สารระเหยภายในแกลบบค่อยๆ สลายตัวออกมา และชนแกลบบหลุดออกมาอย่างทั่วถึง ผลการทดลองแสดงได้ในรูปที่ 4.4

### 5.2 ผลกระทบของตัวแปรที่มีต่อคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์

ในการศึกษาการคาร์บอนไอซ์แกลบบ พบว่าคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่น่าสนใจ และสามารถตรวจวิเคราะห์ได้ คือ ความชื้น, สารระเหย, เถ้า, คาร์บอนคงตัว และซิลิกา เมื่อทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ อาทิ ปริมาณแกลบบ, อัตราการไหลของก๊าซ, อุณหภูมิ และเวลาการทดลองจะทำ โดยมีการกำหนดค่าตัวแปร 2 ตัวให้คงที่ แล้วทำการแปรค่าตัวแปรที่เหลือ จากนั้นเปลี่ยนค่าตัวแปรอื่นๆ ให้เป็นตัวคงที่ แล้วแปรค่าตัวแปรที่เหลือตามลำดับ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในแต่ละการทดลองถูกนำไปวิเคราะห์โดยประมาณดังแสดงในภาคผนวก ค. ผลการวิเคราะห์ได้นำมาแสดงเปรียบเทียบกับตัวแปรต่างๆ ดังนี้



### 5.2.1 ความชื้น

รูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับปริมาณแกลบต่างๆ จาก 30 กรัม ถึง 60 กรัม โดยแปรค่าอุณหภูมิตั้งแต่ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงขึ้นลงเพียงเล็กน้อยที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากความชื้นบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอกของแกลบเริ่มระเหยออกที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส (James, 1986) ดังนั้นในช่วงการเพิ่มอุณหภูมิจนถึง 300 องศาเซลเซียส ความชื้นบริเวณเนื้อเยื่อชั้นนอก และชั้นกลางระเหยไปเกือบหมด ส่วนที่เหลือจะอยู่ในบริเวณเนื้อเยื่อชั้นในยังคงมีค้างอยู่ และการเกิดความปั่นป่วนที่มีการผสมแบบไหลย้อนกลับ (back mixing) ทำให้มีการถ่ายเทความร้อนจากผนังเบตสู่เม็ดแกลบได้ดี ทำให้คุณสมบัติด้านความชื้นโดยเฉลี่ยเปลี่ยนแปลงไปไม่มากนัก นอกจากนี้การแพร่ของน้ำผ่านชั้นเนื้อเยื่อของแกลบที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างแล้วก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณความชื้นที่มีอยู่ในแกลบ

ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นและอัตราการไหลของก๊าซ ตั้งแต่ 1.2 เมตรต่อวินาที ถึง 2.4 เมตรต่อวินาที ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส แสดงไว้ในรูปที่ 4.17 และ 5.1 พบว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นมีแนวโน้มลดลงอย่างช้าๆ เมื่ออัตราการป้อนก๊าซเพิ่มขึ้นโดยในช่วงแรกลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงอัตราการไหลก๊าซ 1.2 ถึง 1.6 เมตรต่อวินาที เนื่องจากเมื่อความเร็วก๊าซผ่านเบตสูงขึ้น ภายในเบตจะมีดีกรีความปั่นป่วนของกระแสรอบเม็ดแกลบเพิ่มขึ้น เป็นผลทำให้เกิดชั้นฟิล์มใหม่ที่ผิวแกลบอย่างต่อเนื่อง น้ำที่แพร่ผ่านแกลบออกมาจะถูกพัดพาออกไปตลอดเวลาทำให้แรงผลักดัน (driving force) ที่ผิวนอกของเม็ดแกลบ และบริเวณเนื้อเยื่อชั้นกลางสูง มีส่วนช่วยลดความต้านทานในการแพร่ของน้ำออกสู่กระแสก๊าซภายนอก

เมื่อทดลองเพิ่มเวลาให้เม็ดแกลบอยู่ในเตานานขึ้นจาก 15 นาที จนถึง 60 นาที เห็นได้ว่าร้อยละความชื้นลดลง ดังแสดงในรูปที่ 4.21 และ 5.2 เนื่องจากโดยธรรมชาติเม็ดแกลบมีลักษณะโครงสร้างเป็นฉนวนที่นำความร้อนได้ไม่ดีนัก เวลาที่ความร้อนจะเข้าสู่ภายในเม็ดแกลบค่อนข้างช้าอุณหภูมิภายในแกลบช่วงแรกจึงไม่สูงพอที่ความชื้นจะระเหยออกไปมาก ดังนั้นเมื่อให้เวลาเม็ดแกลบอยู่ในเตานานขึ้น ความร้อนจึงไหลเข้าสู่ภายในเม็ดแกลบมากขึ้นจนอุณหภูมิภายในเม็ดแกลบสูงพอที่จะทำให้ความชื้นระเหยออกไปได้เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.28 และ 5.3 จะเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นลดลงอย่างเห็นได้ชัด ที่เวลาในการคาร์บอนไนซ์เท่ากัน โดยแปรค่าอุณหภูมิ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส

เพราะเมื่ออุณหภูมิในเบตสูงขึ้นจะทำให้เกิดผลต่างระหว่างอุณหภูมิในเบต กับอุณหภูมิภายในเม็ด แกลบสูงจะส่งผลให้ เกิดการผลัดกันที่ความร้อนจะไหลเข้าสู่เม็ดแกลบได้เร็วขึ้น ถึงแม้ว่าแกลบจะมีลักษณะเป็นฉนวนก็ตาม โดยความชื้นส่วนใหญ่จะอยู่ในเนื้อเยื่อชั้นนอก และชั้นกลาง จึงมีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความชื้นที่เหลือในแกลบมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็ว

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูป 4.7, 5.1, 5.2 และ 5.3 จะเห็นได้ว่าปริมาณแกลบมีผลกระทบต่อเปอร์เซ็นต์ความชื้นไม่มากนัก และความชื้นที่คงเหลือแปรผันกับอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการคาร์บอน ซึ่งจัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสามตัวแปร คือ  $M/M_0 = f[U/U_{mf}, (T-T_0)/T_0, t/t_0]$  โดยตั้งสมมติฐานให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล  $y = a e^{bx}$  เพราะการทำงานเป็นระบบ batch

ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามสามารถหาได้จากการทดลองที่กำหนดตัวแปรตัวหนึ่งคงที่ และทำการแปรค่าตัวแปรที่เหลือสองตัวเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ในกราฟสองมิติได้ ดังรูปที่ 5.1 ถึง 5.3 และสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 ดังนี้

$$M/M_0 = A1 e^{A2U/U_{mf}} \quad (5.1)$$

$$M/M_0 = A3 e^{A4(T-T_0)/T_0} \quad (5.2)$$

$$M/M_0 = A5 e^{A6t/t_0} \quad (5.3)$$

เมื่อ

$M$  = ความชื้นที่เหลือในแกลบ (เปอร์เซ็นต์)

$M_0$  = ความชื้นเริ่มต้นในแกลบ (เปอร์เซ็นต์)

$U$  = ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)

$U_{mf}$  = ความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไลเซชัน (เมตรต่อวินาที)

$T$  = อุณหภูมิที่ใช้ (องศาเซลเซียส)

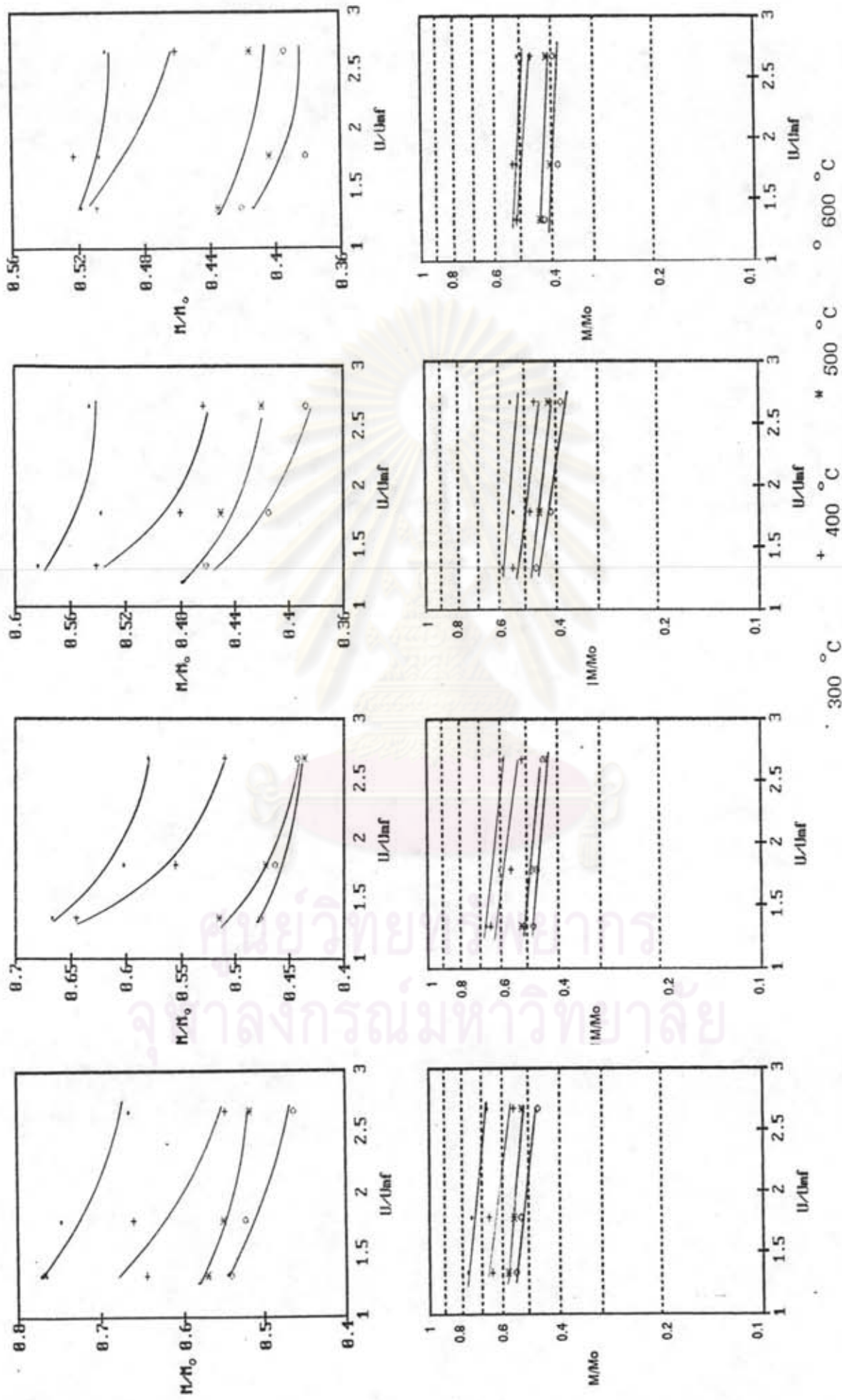
$T_0$  = อุณหภูมิอ้างอิง 30 องศาเซลเซียส

$t$  = เวลาที่ใช้

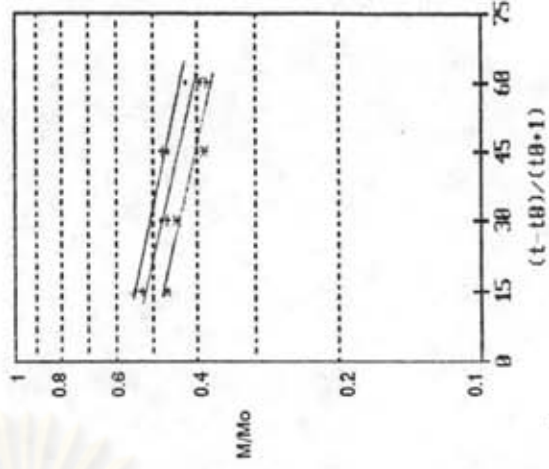
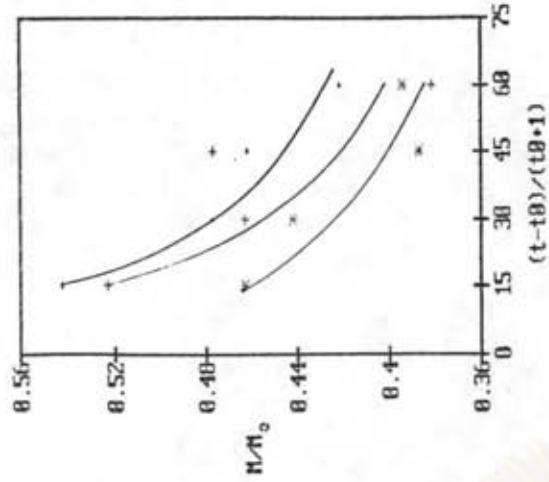
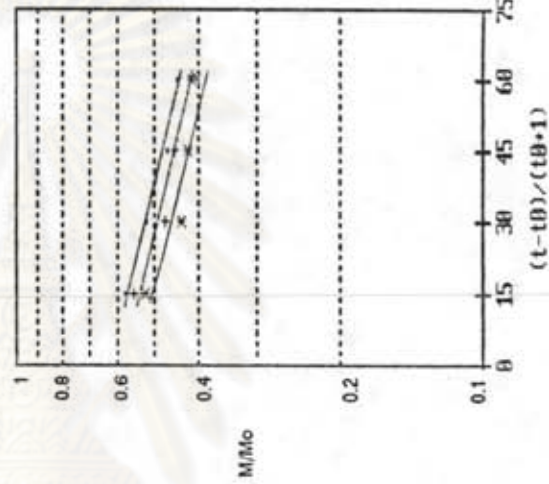
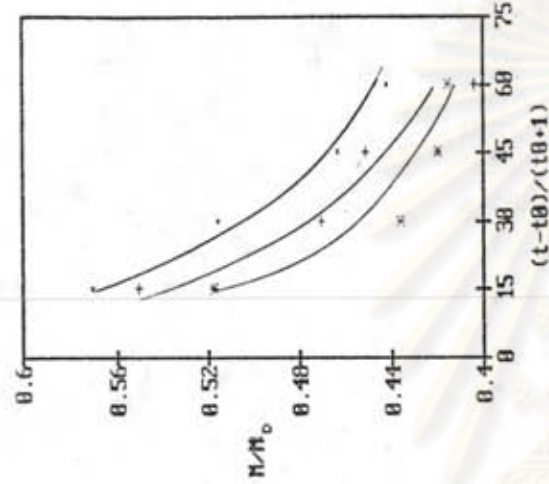
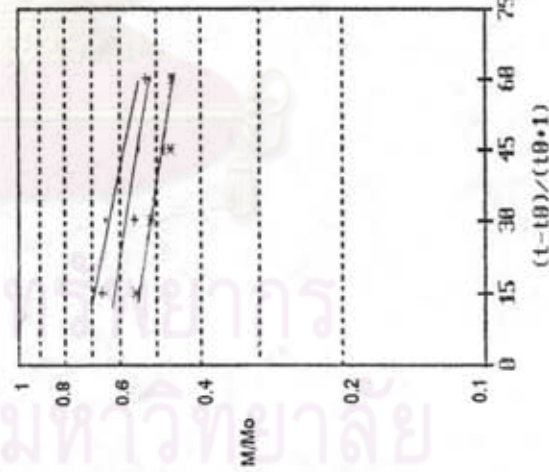
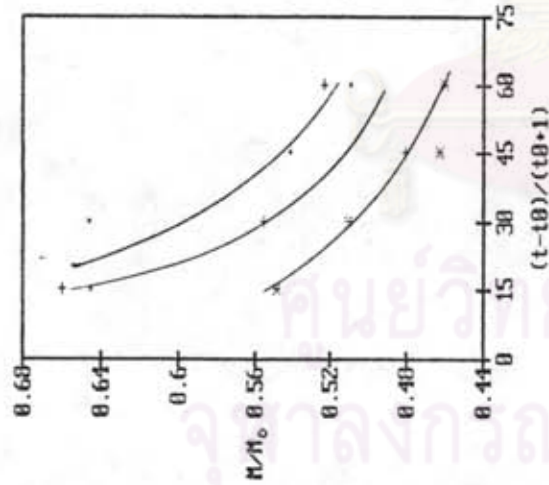
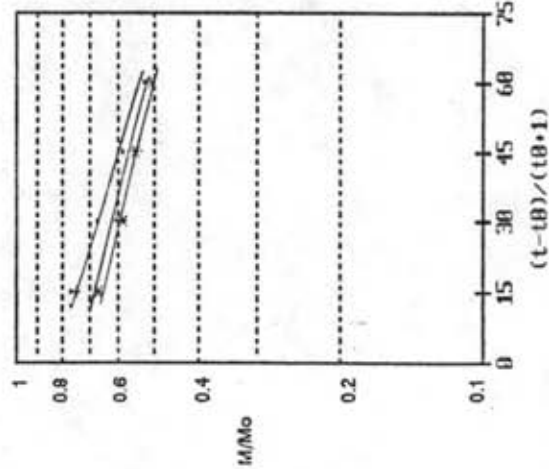
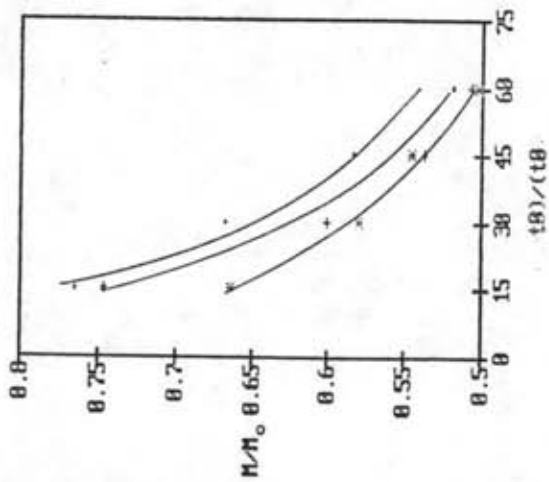
$t_0$  = เวลาอ้างอิง 1 นาที

$A1, \dots, A6$  = ค่าคงที่ของสมการของความสัมพันธ์แต่ละตัวแปร



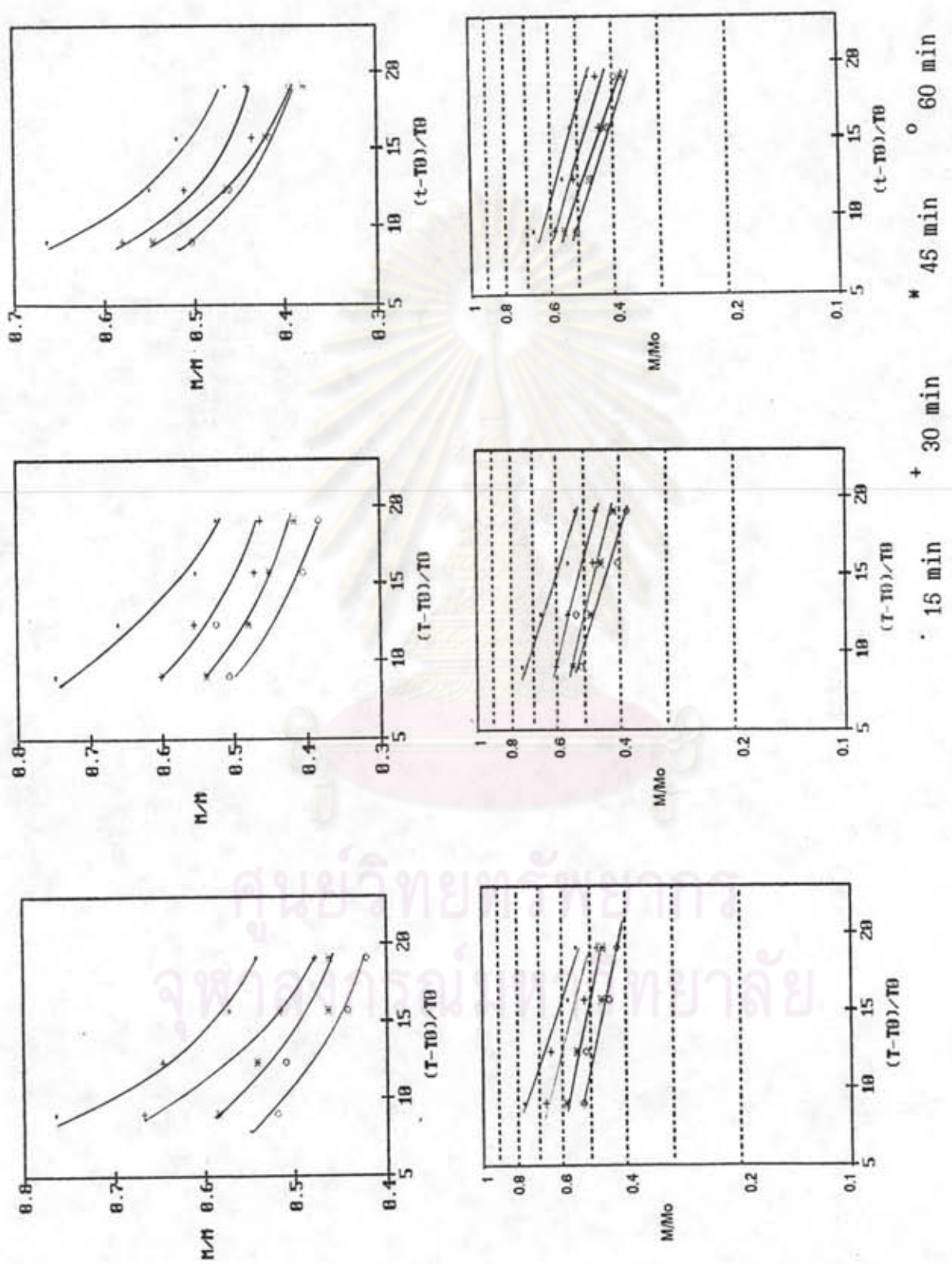


รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับอัตราการป้อนก๊าซที่เวลาต่างๆ และความสัมพัทธ์ที่ปรับเป็นเส้นตรง  
 ก. 15 นาที      ข. 30 นาที      ค. 45 นาที      ง. 60 นาที



\* 1.2 m/s      \* 1.6 m/s      \* 2.4 m/s  
 ก. 300 °C      ข. 400 °C      ค. 500 °C      ง. 600 °C

รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความสัมพัทธ์กับเป็นเส้นการเส้นตรง



ก. 1.2 m/s

ข. 1.6 m/s

ค. 2.4 m/s

รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ความชื้นกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และความสัมพัทธ์ที่ไว้เป็นสมการเส้นตรง



ค่า  $A_1$  และ  $A_6$  ในสมการที่ 5.1 ถึง 5.3 มีค่าไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของตัวแปรว่าเป็นค่าอัตราการป้อนก๊าซ เวลา หรืออุณหภูมิ โดยค่า  $A_1$  ถึง  $A_6$  สามารถหาได้จากค่าจุดตัดแกนเฉลี่ย และความชันเฉลี่ย ของกราฟที่ปรับสมการให้อยู่ในรูปเส้นตรง (Linearlization) ดังนี้

$$\ln M/M_0 = \ln A_1 + A_2 U/U_{mf} \quad (5.4)$$

$$\ln M/M_0 = \ln A_3 + A_4 (T-T_0)/T_0 \quad (5.5)$$

$$\ln M/M_0 = \ln A_5 + A_6 t/t_0 \quad (5.6)$$

เมื่อ  $A_1, A_3, A_5 =$  จุดตัดแกน  $\ln M/M_0$

$A_2, A_4, A_6 =$  ความชันของกราฟ

รูปที่ 5.1 ถึง 5.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่ปรับเป็นเส้นตรงตามสมการที่ 5.4 ถึง 5.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าข้อมูลกระจายอยู่ในแนวเส้นตรงเป็นไปตามสมมติฐานที่กล่าวข้างต้น ซึ่งจะได้อัตราความชัน และจุดตัดแกนของความสัมพันธ์ของตัวแปรแต่ละตัวดังแสดงในตารางที่ จ.1

จากตารางจะได้อัตราความชันเฉลี่ย  $A_2, A_4$  และ  $A_6$  ที่เป็นค่าคงที่แต่ละตัวแปร ส่วนค่า  $A_1, A_3$  และ  $A_5$  ไม่เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์ในรูป  $f(T, U, t)$  แต่เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์เพียงสองตัวแปร จึงคิดเป็นค่าคงที่ไว้ตามเดิม ดังนั้นจากสมการ 5.1 ถึง 5.3 จึงเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$M/M_0 = A_1 e^{-0.087U/U_{mf}} \quad (5.7)$$

$$M/M_0 = A_3 e^{-0.031(T-T_0)/T_0} \quad (5.8)$$

$$M/M_0 = A_5 e^{-0.006t/t_0} \quad (5.9)$$

เมื่อทำการรวมสมการให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ จะได้รูปสมการ 5.10

$$M/M_0 = C_1 e^{-0.086U/U_{mf}} e^{-0.031(T-T_0)/T_0} e^{-0.006t/t_0} \quad (5.10)$$

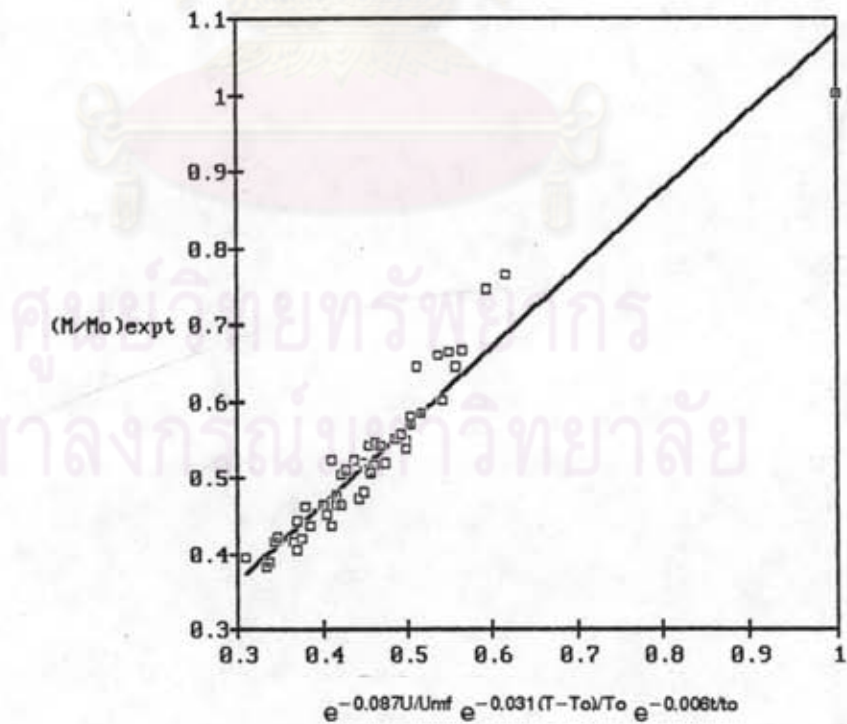
เมื่อ



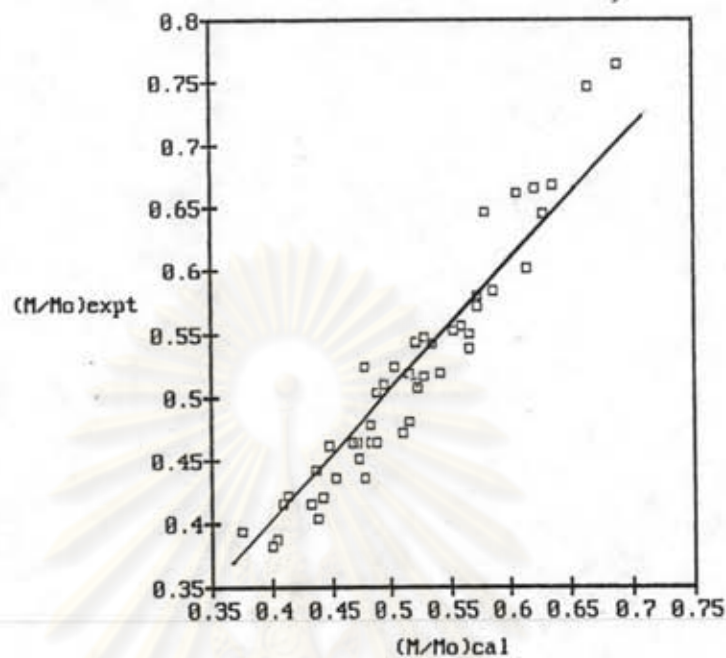
$C1 =$  ค่าคงที่ของฟังก์ชัน

ค่าคงที่  $C1$  หาได้จากกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าความชื้นที่ได้จากการทดลอง กับ  $e^{-0.087U/Umf} e^{-0.006t/t_0} e^{-0.031(T-T_0)/T_0}$  แสดงไว้ในรูปที่ 5.4 จากกราฟความสัมพันธ์จะได้ค่าคงที่  $C1$  ในรูปของความชื้นเท่ากับ 1.0237 และจุดตัดแกน  $M/M_0$  ที่ 0.057 ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนความชื้นที่เป็นฟังก์ชันกับอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และ อุณหภูมิ ได้ปรับใหม่เพื่อให้ตรงกับสภาวะเริ่มต้นแสดงดังสมการที่ 5.11 เมื่อแทนค่าตัวแปรในสมการที่ 5.11 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความเชื่อมั่นเป็นเส้นตรง (R-square) เท่ากับ 0.923 ดังรูปที่ 5.5 จากกราฟพบว่าสมมติฐาน และความสัมพันธ์ที่กำหนดขึ้นให้แนวโน้มไปในทางที่ถูกต้อง

$$M/M_0 = 0.057 + 1.024 e^{-0.087U/Umf} e^{-0.031(T-T_0)/T_0} e^{-0.00593t/t_0} \quad (5.11)$$



รูปที่ 5.4 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่ และจากผลการทดลอง



รูปที่ 5.5 อัตราส่วนความชื้นที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

### 5.2.2 สารระเหย

อิทธิพลของปริมาณแกลบ อัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์สารระเหยที่เหลืออยู่ในแกลบแสดงไว้ในรูปที่ 4.8, 4.15, 4.22 และ 4.29 ตามลำดับ รูปที่ 4.8 แสดงผลของปริมาณแกลบที่มีต่อเปอร์เซ็นต์ของสารระเหยที่ยังเหลืออยู่ในแกลบ เมื่อใช้ปริมาณแกลบ 30 ถึง 60 กรัม เมื่อพิจารณาจะพบว่าเปอร์เซ็นต์ของสารระเหยมีแนวโน้มสูงขึ้นเล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากการที่แกลบมีการผสมกันในแนวแกนค่อนข้างสมบูรณ์ อุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากันทั้งเบด การสลายตัวของสารอินทรีย์ในแกลบอยู่ในอัตราเฉลี่ยเท่ากัน เมื่อใช้แกลบมากขึ้นปริมาณสารระเหยจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของเบดทำให้เกิดการแพร่ของสารระเหยออกจากเม็ดแกลบได้ไม่ทันก เมื่อเทียบกับการใช้แกลบปริมาณน้อยจึงทำให้แนวโน้มปริมาณสารระเหยที่เหลืออยู่มีค่าสูงขึ้นเล็กน้อย

ผลของอัตราการไหลของก๊าซที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์สารระเหยที่อุณหภูมิระหว่าง 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส แสดงไว้ในรูปที่ 4.18 และ 5.6 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่ออัตราการป้อนก๊าซสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในแกลบลดลงอย่างเห็นได้ชัด เพราะในช่วงอุณหภูมิ



เดียวกันมีการปลดปล่อยสารอินทรีย์จากการสลายตัวทางความร้อนขององค์ประกอบโครงสร้างภายใน เช่น เซลลูโลส ลิกนิน ฯลฯ ซึ่งจากการที่เบตมีการผสมกันดีทำให้อุณหภูมิในเบตสม่ำเสมอและความดันป่วนสูงทำให้ชั้นฟิล์มรอบผิวแกลบจะบางลง มีการสลายฟิล์มเก่าออกอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการถ่ายเทมวลสารจากเม็ดแกลบไปสู่กระแสก๊าซได้ดีขึ้น

กรณีที่ใช้เวลาในการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นจาก 15 ถึง 60 นาที ความร้อนจะค่อยๆ ถ่ายเทผ่านชั้นของเนื้อเยื่อต่างๆ ของเม็ดแกลบเข้าไป และเนื่องจากแกลบมีลักษณะค่อนข้างเป็นฉนวนจึงต้องใช้เวลาเพื่อให้สารอินทรีย์ที่เป็นโครงสร้างของพวกเซลลูโลส และลิกนินที่อยู่บริเวณเนื้อเยื่อชั้นกลาง และชั้นนอกได้รับความร้อน แล้วค่อยๆ สลายตัวออกมาโดยมีแนวโน้มของร้อยละสารระเหยลดลง ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.22 และ 5.7

การใช้อุณหภูมิสูงๆ ในการคาร์บอนไนซ์แกลบ ทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่เม็ดแกลบเร็ว นอกจากจะมีการระเหยของน้ำแล้ว ยังเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นโครงสร้างแกลบ ได้แก่ เซลลูโลส และลิกนินในช่วงอุณหภูมิ 330 ถึง 380 องศาเซลเซียส และ 277 ถึง 500 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Jame และ Rao, 1986) โครงสร้างแกลบจะเปลี่ยนไป ซึ่งจะเห็นว่าปริมาณสารระเหยที่เหลืออยู่ในเม็ดแกลบลดลงจากเดิมมากเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 300 ไปเป็น 600 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังในรูปที่ 4.29 และ 5.8

เมื่อพิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูป 4.8, 5.9, 5.10 และ 5.11 จะเห็นได้ว่าผลกระทบของปริมาณแกลบต่อเปอร์เซ็นต์สารระเหยไม่มากนัก และเปอร์เซ็นต์สารระเหยที่เหลืออยู่ในแกลบจะแปรผกผันกับอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ โดยมีแนวโน้มลดลงอย่างเห็นได้ชัด จัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชัน  $[U/Umf, (T-T_0)/T_0, t/(t_0)]$  เช่นเดียวกับค่าความชื้น และตั้งสมมติฐานการลดลงของสารระเหยอยู่ในรูปฟังก์ชันแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล ดังนี้

$$VM/VM_0 = A7 e^{A8U/Umf} \quad (5.12)$$

$$VM/VM_0 = A9 e^{A10(T-T_0)/T_0} \quad (5.13)$$

$$VM/VM_0 = A11 e^{A12t/t_0} \quad (5.14)$$

เมื่อ

$VM$  = สารระเหยที่เหลือในแกลบ (เปอร์เซ็นต์)

$VM_0$  = สารระเหยเริ่มต้นในแกลบ (เปอร์เซ็นต์)

$U$  = ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)

$U_{mf}$  = ความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไลเซชัน (เมตรต่อวินาที)

$T$  = อุณหภูมิที่ใช้ (องศาเซลเซียส)

$T_0$  = อุณหภูมิอ้างอิง 30 องศาเซลเซียส

$t$  = เวลาที่ใช้

$t_0$  = เวลาอ้างอิง 1 นาที

$A7, \dots, A12$  = ค่าคงที่ของสมการของความสัมพันธ์แต่ละตัวแปร

ค่า  $A7$  ถึง  $A12$  ในสมการที่ 5.12 ถึง 5.14 มีค่าต่างๆกันขึ้นอยู่กับตัวแปรที่ใช้ว่าเป็นค่าอัตราการป้อนก๊าซ เวลา หรืออุณหภูมิ โดยค่า  $A7$  ถึง  $A12$  สามารถหาได้จากค่าจุดตัดแกนเฉลี่ย และความชันเฉลี่ยของกราฟที่ปรับสมการให้อยู่ในรูปเส้นตรง (Linearlization) ตั้งสมการ 5.15 ถึง 5.17 และรูปที่ 5.6 ถึง 5.8 โดยค่าความชัน และจุดตัดแกน ของความสัมพันธ์แต่ละตัวแปรแสดงไว้ในตารางที่ จ.1

$$\ln VM/VM_0 = \ln A7 + A8 U/U_{mf} \quad (5.15)$$

$$\ln VM/VM_0 = \ln A9 + A10 (T-T_0)/T_0 \quad (5.16)$$

$$\ln VM/VM_0 = \ln A11 + A12 t/t_0 \quad (5.17)$$

เมื่อ

$$A7, A9, A11 = \text{จุดตัดแกน } \ln VM/VM_0$$

$$A8, A10, A12 = \text{ความชันของกราฟ}$$

ความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ติดค่าคงที่ได้จากค่าความชันเฉลี่ยในตารางที่ จ.1 ส่วนค่าคงที่  $A7, A9, A11$  ไม่ใช่เป็นค่าคงที่ของสมการความสัมพันธ์สามตัวแปรจึงติดเป็นค่าคงที่เมื่อแทนค่าคงที่  $A7, A9, A11$  ลงในสมการที่ 5.12 ถึง 5.14 เขียนความสัมพันธ์ได้ตั้งสมการ

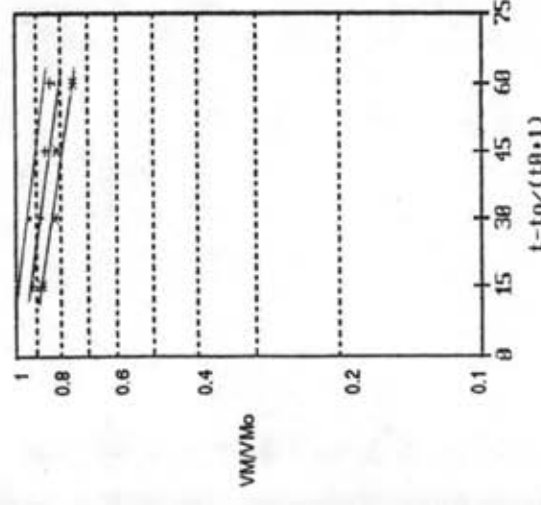
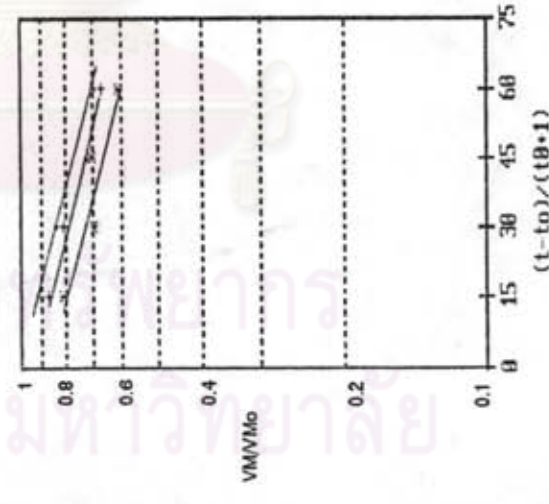
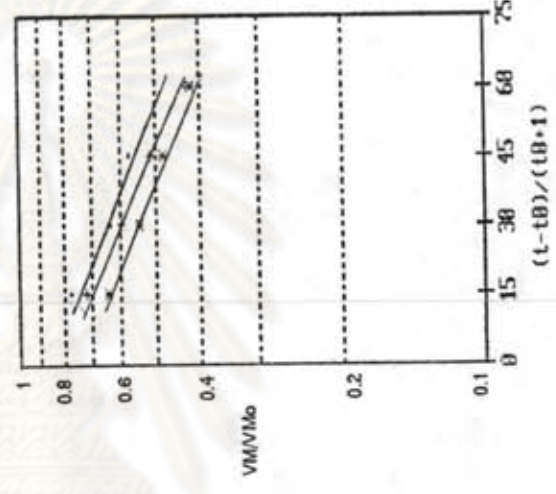
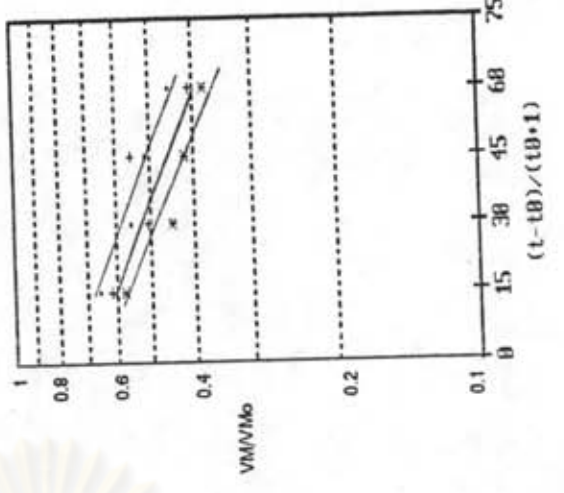
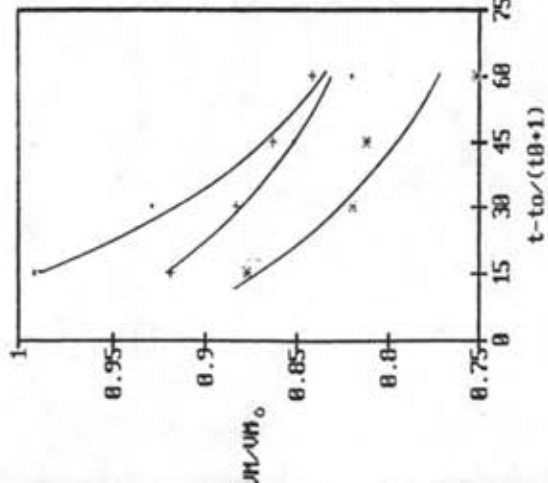
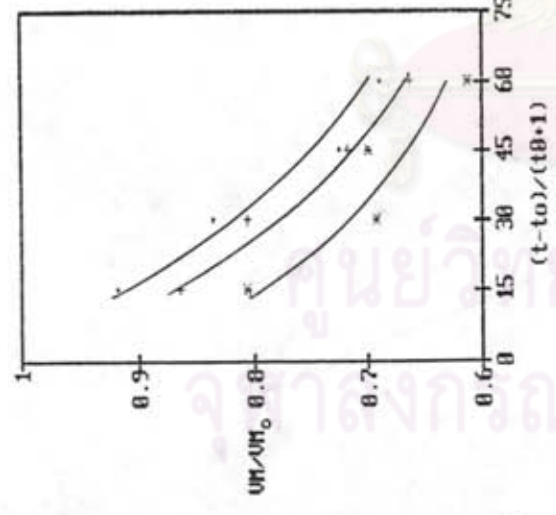
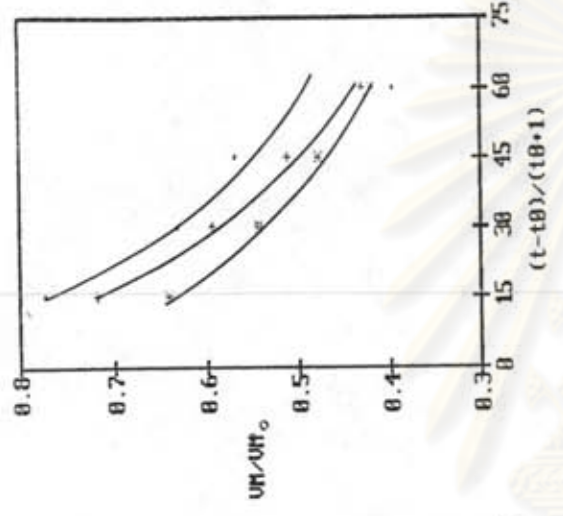
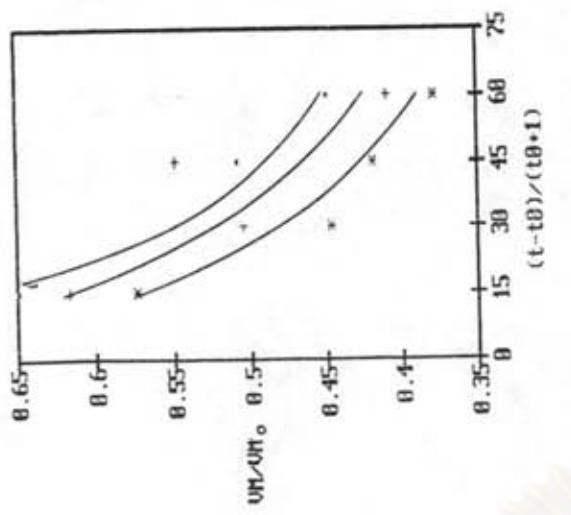
$$VM/VM_0 = A7 e^{-0.098U/U_{mf}} \quad (5.18)$$

$$VM/vM_0 = A9 e^{-0.116(T-T_0)/T_0} \quad (5.19)$$

$$VM/VM_0 = A11 e^{-0.007t/t_0} \quad (5.20)$$





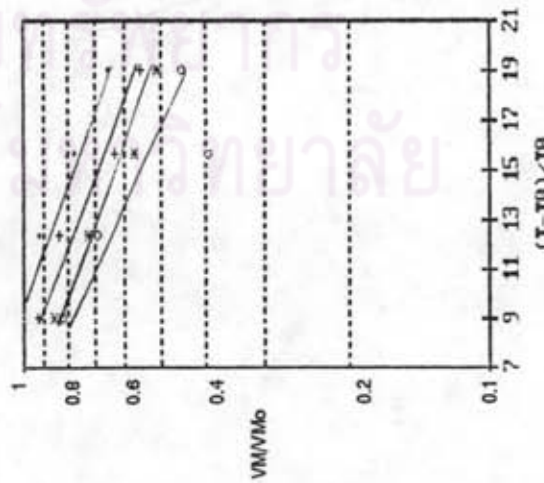
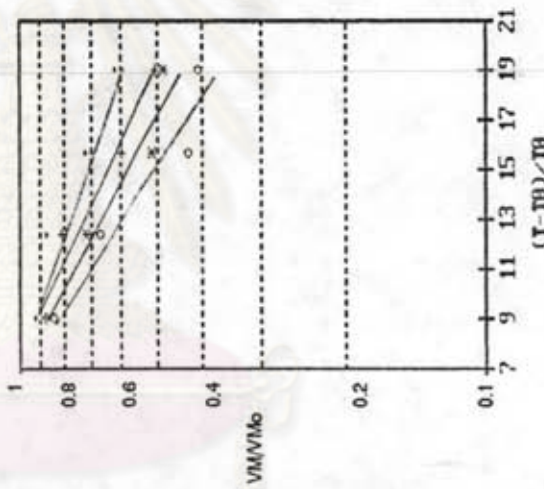
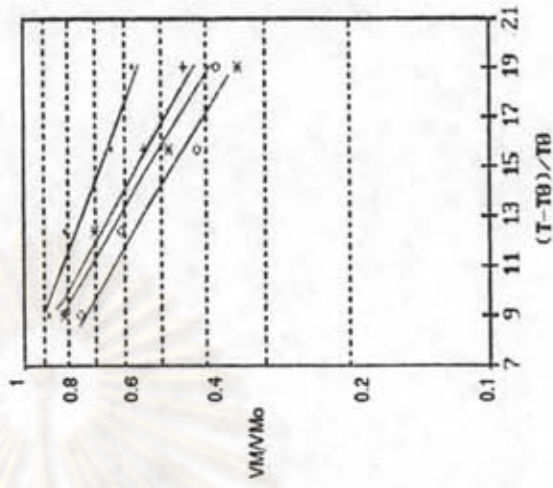
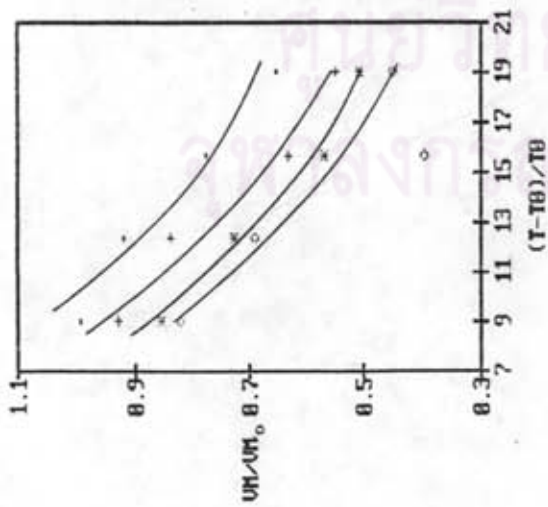
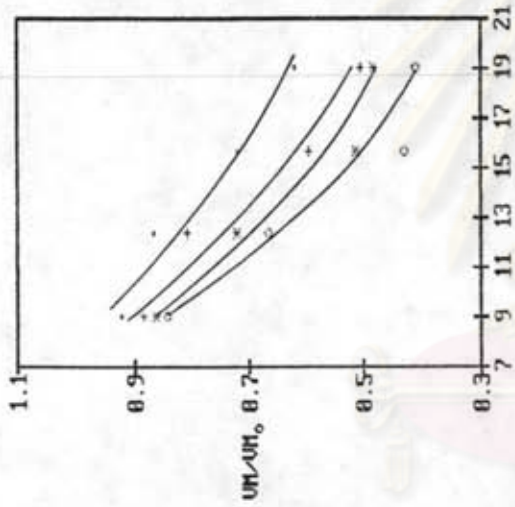
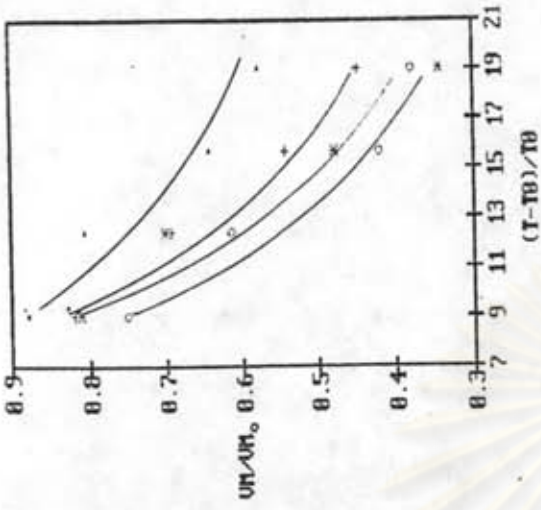


• 1.2 m/s      + 1.6 m.s      \* 2.4 m/s

ก. 300 ° C      ข. 400 ° C      ค. 500 ° C      ง. 600 ° C

รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สารระเหยกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความสัมพัทธ์ที่ปรับเป็นเส้นการเส้นตรง





\* 45 min ° 60 min

+ 30 min

· 15 min

ก. 2.4 m/s

ข. 1.6 m/s

ค. 1.2 m/s

รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์สารระเหยกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และความสัมพัทธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง

จากนั้นรวมสมการให้อยู่ในรูปฟังก์ชันของสามตัวแปร คือ อัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ จะได้สมการ 5.10 ในรูปของฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียล

$$VM/VM_0 = C2 e^{-0.098U/Umf} e^{-0.116(T-T_0)/T_0} e^{-0.007t/t_0} \quad (5.21)$$

เมื่อ

$C2 =$  ค่าคงที่ของฟังก์ชัน

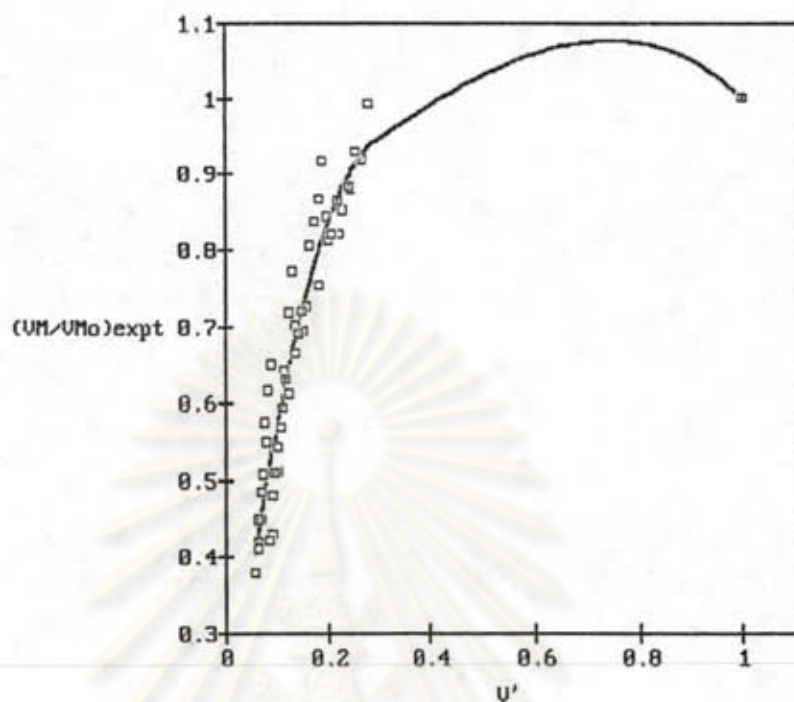
จากกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างสารระเหยที่เหลืออยู่ในแกลบจากการคาร์บอนซ์ กับ ค่า  $e^{-0.098U/Umf} e^{-0.116(T-T_0)/T_0} e^{-0.007t/t_0}$  แสดงไว้ในรูปที่ 5.9 พบว่าความสัมพันธ์ไม่ได้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง แต่อยู่ในรูปสมการโพลีโนเมียลดีกรีสาม ค่าคงที่  $C2$  จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรยกกำลังต่างๆ ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสารระเหยที่เป็นฟังก์ชันกับอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ แสดงได้ดังสมการที่ 5.22 เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการที่ 5.22 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองพบว่า ความสัมพันธ์ที่ตั้งสมมติฐานไว้ให้แนวโน้มในลดลงแบบเอ็กซ์โปเนนเชียลโดยมีค่าความเชื่อมั่นเป็นเส้นตรง(R-square) เท่ากับ 0.905 ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5.10

$$VM/VM_0 = 0.124 + 5.594V' - 11.493V'^2 + 6.775V'^3 \quad (5.22)$$

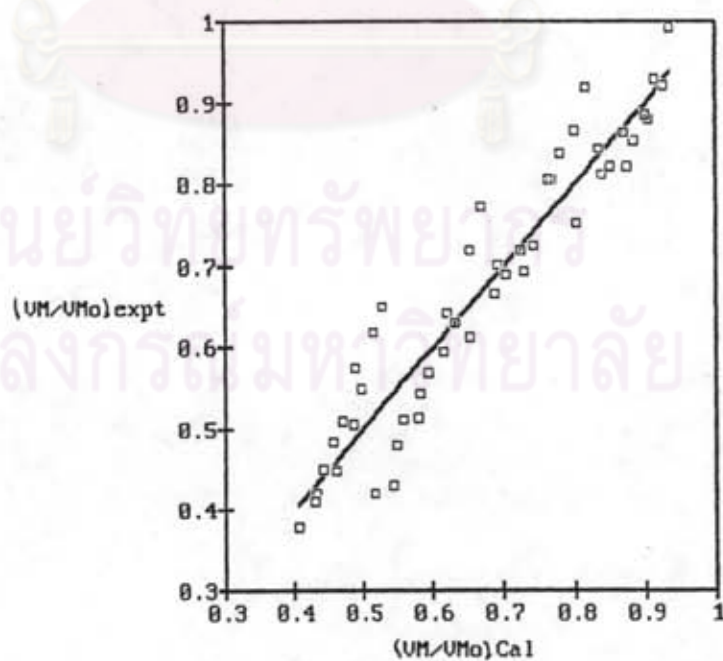
เมื่อ

$$V' = e^{-0.098U/Umf} e^{-0.116(T-T_0)/T_0} e^{-0.007t/t_0}$$

ศูนย์วิทยุทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.9 เปอร์เซนต์สสารระเหยที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่ และจากผลการทดลอง



รูปที่ 5.10 อัตราส่วนสสารระเหยที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง



### 5.2.3 เถา

ผลกระทบของปริมาณแกลบ อัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ ที่มีต่อค่าเปอร์เซ็นต์เถาที่มีอยู่ในแกลบที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ แสดงไว้ในรูปที่ 4.9, 4.16, 4.23 และ 4.30 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.9 แสดงถึงปริมาณแกลบที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์เถา โดยใช้แกลบปริมาณ 30 กรัม ถึง 60 กรัม ในช่วงอุณหภูมิ 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส พบว่าเปอร์เซ็นต์เถามีการเปลี่ยนแปลงลดลงเล็กน้อย อาจถือได้ว่ามีค่าโดยเฉลี่ยคงที่เนื่องจากสัดส่วนของปริมาณสารระเหย และความชื้นที่เหลืออยู่ภายในแกลบ มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไม่มาก เนื่องจากปริมาณสารระเหยที่มากขึ้นตามความสูงของเบต ทำให้เกิดการแพร่ของสารระเหยออกจากเม็ดแกลบไม่ทันก เป็นผลทำให้สัดส่วนปริมาณเถาในแกลบมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย ซึ่งปกติปริมาณเถาในแกลบจะมีค่าคงที่ แต่เนื่องจากสัดส่วนของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแกลบเปลี่ยนแปลงไปจึงทำให้สัดส่วนของเถาในแกลบมีค่าแปรผันกับเปอร์เซ็นต์สารระเหย

สัดส่วนปริมาณเถาแกลบที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซจาก 1.2 ถึง 2.4 เมตรต่อวินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.16 และ 5.11 สาเหตุมาจากเมื่ออัตราการไหลของก๊าซสูงขึ้นเม็ดแกลบจะเกิดการเคลื่อนที่ปั่นป่วน และเกิดพื้นผิวใหม่บนผิวแกลบตลอดเวลาทำให้มีการแพร่ของสารระเหย และความชื้นออกจากเม็ดแกลบได้ดีขึ้น ทำให้สัดส่วนของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแกลบลดลงเป็นที่สังเกตได้ และเถาในแกลบไม่ได้มาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ในแกลบจึงมีค่าคงที่ เมื่อนำไปเปรียบเทียบสัดส่วนเป็นเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบผลิตภัณฑ์ สัดส่วนของเถาในแกลบจะสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.23 และ 5.12 จะเห็นได้ว่า กรณีที่เวลาเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที เป็น 60 นาที เปอร์เซ็นต์ของสารระเหยและความชื้นลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากการถ่ายเทความร้อนและการแพร่ของสารอินทรีย์ที่สลายตัว และน้ำออกจากแกลบเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ในช่วงเวลานานขึ้นจะทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ในแกลบลดลงมาก เป็นเหตุให้สัดส่วนของเถาที่มีอยู่ในแกลบแปรผันกับเปอร์เซ็นต์สารระเหย มีค่าสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนในตอนเริ่มต้น

กรณีที่แปรค่าอุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์จาก 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส จะมีการถ่ายเทความร้อนแบบการนำเข้าสู่แกนกลางของแกลบ ทำให้เกิดการระเหยของน้ำ และมีการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นโครงสร้างแกลบ เมื่อการคาร์บอนไนซ์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง สารระเหยที่เป็นผลิตภัณฑ์ ถูกปลดปล่อยออกมามากขึ้นทำให้สัดส่วนของสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในแกลบลดลง แต่ปริมาณเถาที่มีอยู่ในแกลบไม่ได้เปลี่ยนแปลง จึงทำให้สัดส่วนเถาที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทางตรงกันข้ามกับปริมาณสารระเหย ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.30 และ 5.13

เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูป 4.9, 5.11, 5.12 และ 5.13 พบว่าเปอร์เซ็นต์ไถ่มีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก เมื่อใช้แกลบเพิ่มขึ้น อาจถือได้ว่ามีความโดยประมาณคงที่ ส่วนตัวแปรอื่นๆ อาทิ อัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ไถ่มีแนวโน้มแปรผันตามค่าตัวแปรที่เพิ่มขึ้น จัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสามตัวแปร คือ  $f(U/U_{mf}, (T-T_0)/T_0, t/t_0)$  โดยตั้งสมมติฐานให้เป็นฟังก์ชันอัตราการเติบโตอิมิตัว  $y = a[x/(ab+x)]$  เนื่องจากการทำงานเป็นแบบ batch และเมื่อเพิ่มค่าตัวแปรต่างๆ สัดส่วนไถ่จะแปรผกผันกับปริมาณสารอินทรีย์ในแกลบ โดยในช่วงแรกจะเกิดการสลายตัวทางความร้อนไล่สารระเหยออกอย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้ไถ่ในแกลบมีอัตราเพิ่มขึ้นมาก แล้วค่อยๆ ลดลงในช่วงหลังเพราะโครงสร้างสารอินทรีย์เหลือน้อยลง เป็นผลทำให้สัดส่วนไถ่จะเพิ่มในอัตราลดลงด้วย

ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามหาได้จาก กำหนดตัวแปรคงที่ตัวหนึ่ง และทำการแปรค่าตัวแปรที่เหลือสองตัวเพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ในกราฟสองมิติ ดังแสดงในรูปที่ 5.11 ถึง 5.13 และสมการ 5.23 ถึง 5.25 ดังนี้

$$A/A_0 = \frac{A13 (U/U_{mf})}{(A14 + U/U_{mf})} \quad (5.23)$$

$$A/A_0 = \frac{A15 (T-T_0)/T_0}{(A16 + (T-T_0)/T_0)} \quad (5.24)$$

$$A/A_0 = \frac{A17 (t/t_0)}{(A18 + t/t_0)} \quad (5.25)$$

เมื่อ

$A$  = ไถ่ที่มีในแกลบ (เปอร์เซ็นต์)

$A_0$  = ไถ่ที่มีในแกลบตอนเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)

$U$  = ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)

$U_{mf}$  = ความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิดไลเซชัน (เมตรต่อวินาที)

$T$  = อุณหภูมิที่ใช้ (องศาเซลเซียส)

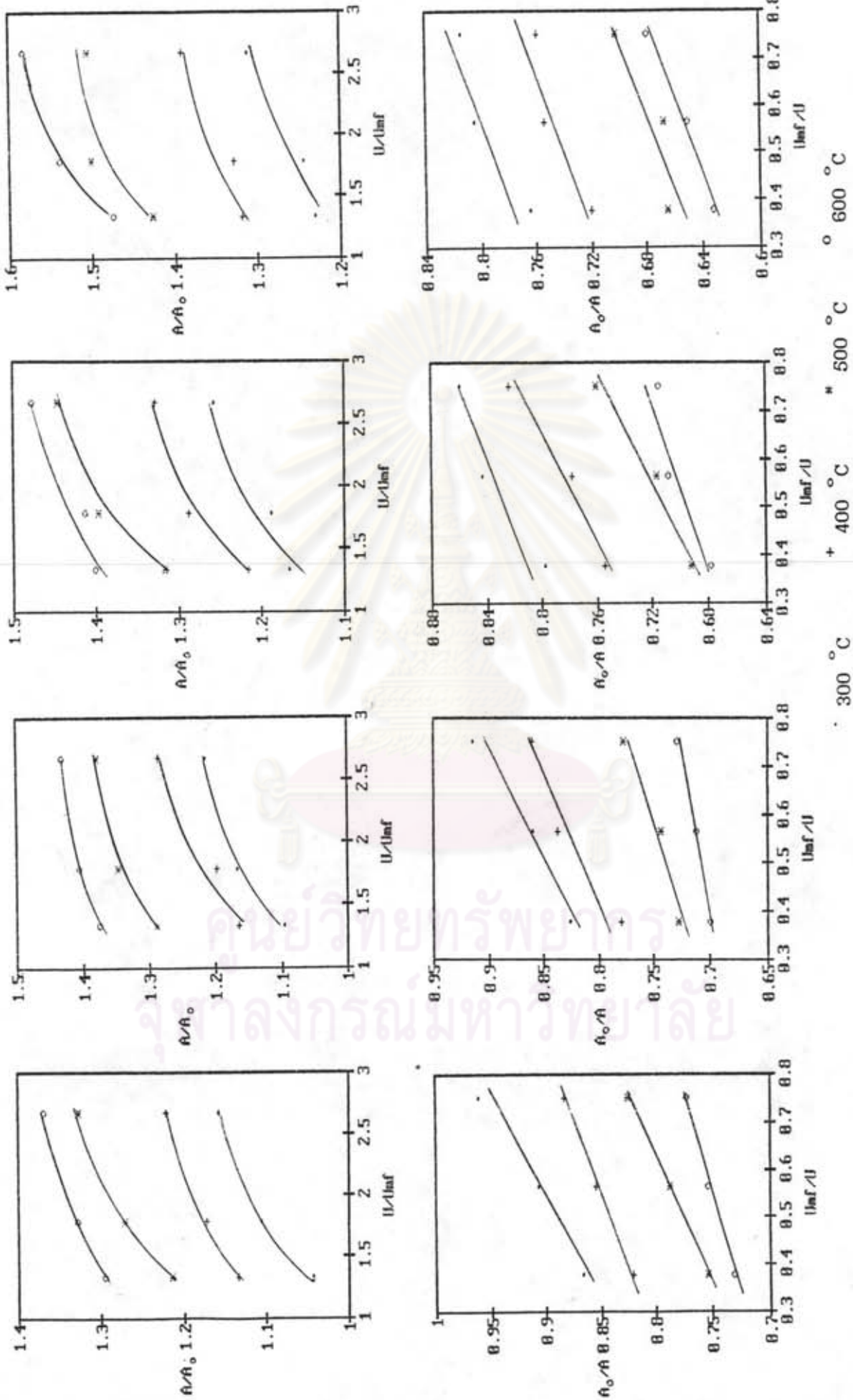
$T_0$  = อุณหภูมิอ้างอิง 30 องศาเซลเซียส

$t$  = เวลาที่ใช้

$t_0$  = เวลาอ้างอิง 1 นาที

$A13, \dots, A18$  = ค่าคงที่ของสมการของความสัมพันธ์แต่ละตัวแปร





ก. 15 นาที

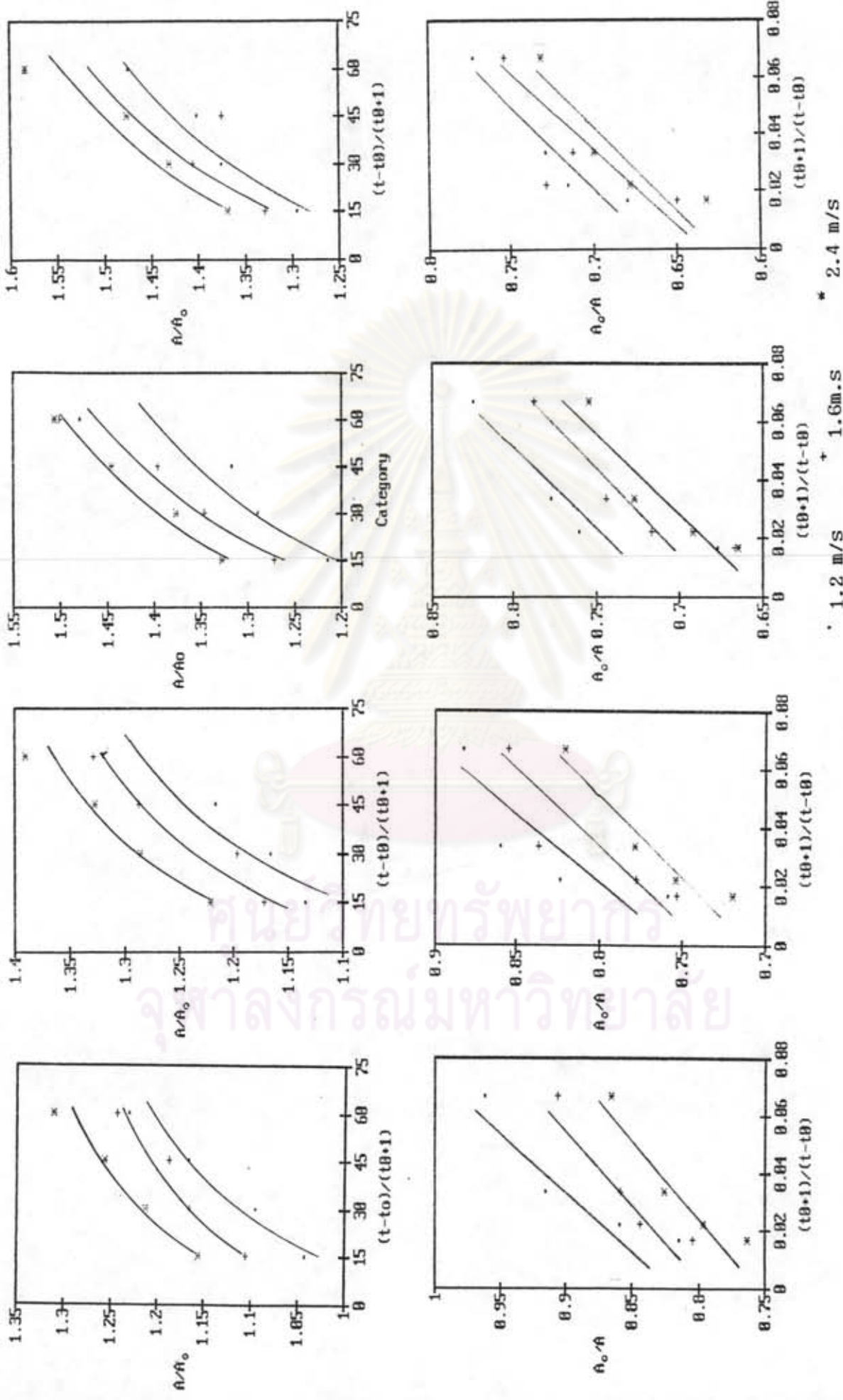
ข. 30 นาที

ค. 45 นาที

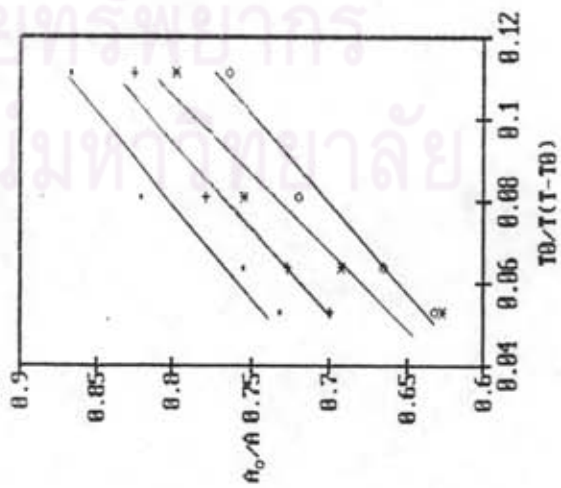
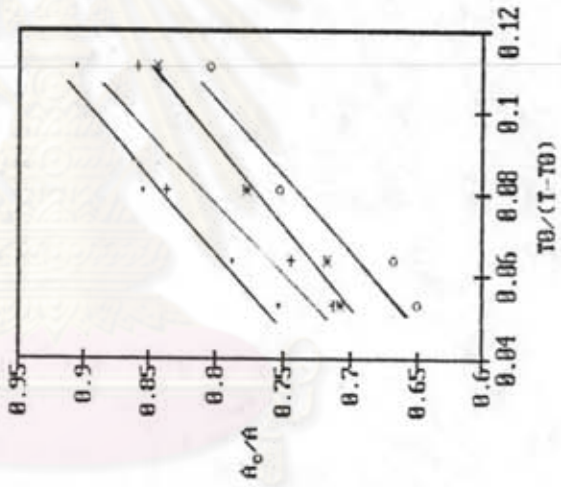
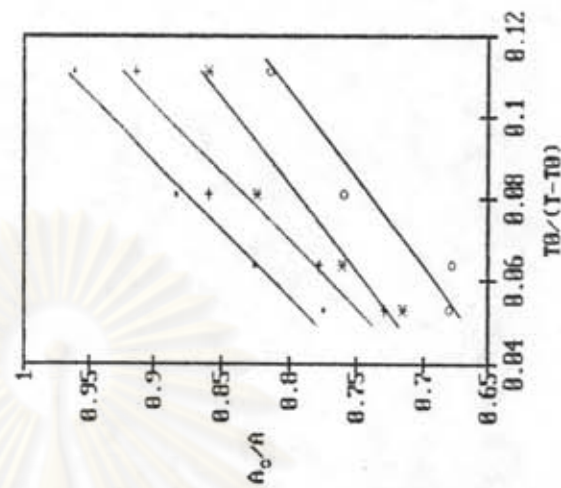
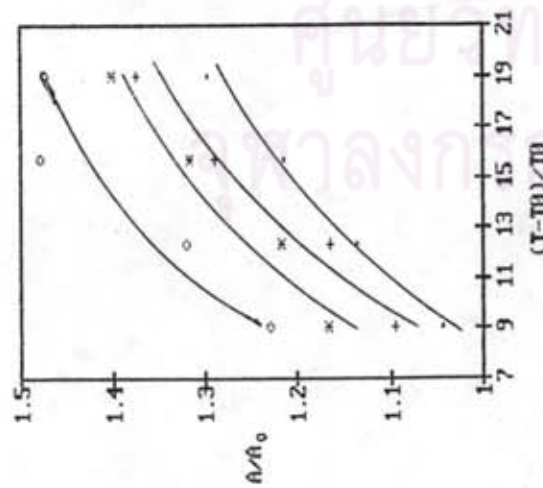
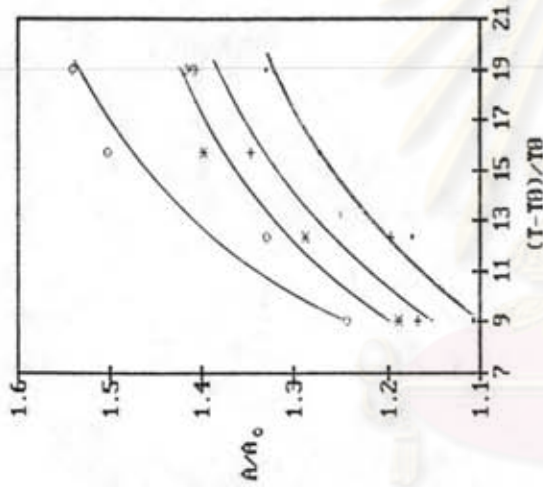
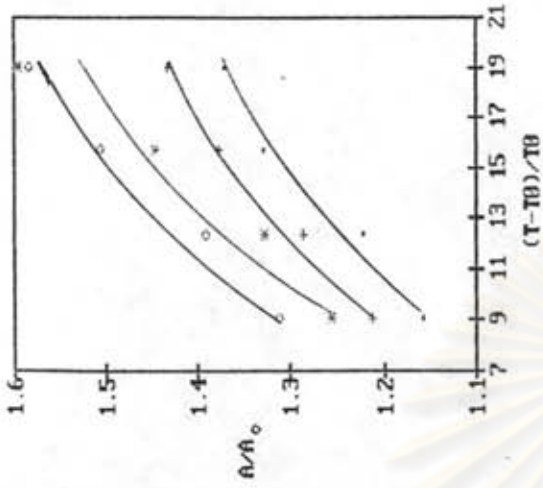
ง. 60 นาที

รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เข้ากัมมันตรังสีการย่อยกัมมันต์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง





รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์ไอน้ำที่ชื้นได้กับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความสัมพัทธ์กับเป็นเส้นการเส้นตรง  
 ก. 300 °C    ข. 400 °C    ค. 500 °C    ง. 600 °C  
 \* 1.2 m/s    \* 1.6m.s    \* 2.4 m/s



+ 30 min \* 45 min ° 60 min

ก. 1.2 m/s

ข. 1.6 m/s

ค. 2.4 m/s

รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์เชื้อเพลิงกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และความสัมพัทธ์ที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง

ค่า A13 ถึง A18 ในสมการที่ 5.23 ถึง 5.25 จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยค่า A13 ถึง A18 สามารถหาได้จากค่าจุดตัดแกนเฉลี่ย และความชันเฉลี่ยของกราฟที่ปรับสมการให้อยู่ในรูปเส้นตรง (Linearlization) ดังนี้

$$(A/A_0)^{-1} = A14/[A13 U/U_{mf}] + 1/A13 \quad (5.26)$$

$$(A/A_0)^{-1} = A16/[A15 (T-T_0)/T_0] + 1/A15 \quad (5.27)$$

$$(A/A_0)^{-1} = A18/[A17 t/t_0] + 1/A17 \quad (5.28)$$

เมื่อ

$$A13, A15, A17 = \text{ส่วนกลับของจุดตัดแกน } (A/A_0)^{-1}$$

$$A14/A13, A16/A15, A18/A17 = \text{ความชันของกราฟ}$$

รูปที่ 5.11 ถึง 5.13 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่ปรับเป็นเส้นตรงตามสมการที่ 5.26 ถึง 5.28 พบว่าการกระจายของข้อมูลอยู่ในแนวเส้นตรงเป็นไปตามสมมติฐานที่กล่าวข้างต้นซึ่งจะได้ค่าความชัน และจุดตัดแกน ของความสัมพันธ์ตัวแปรแต่ละตัว ดังตารางที่ จ.1

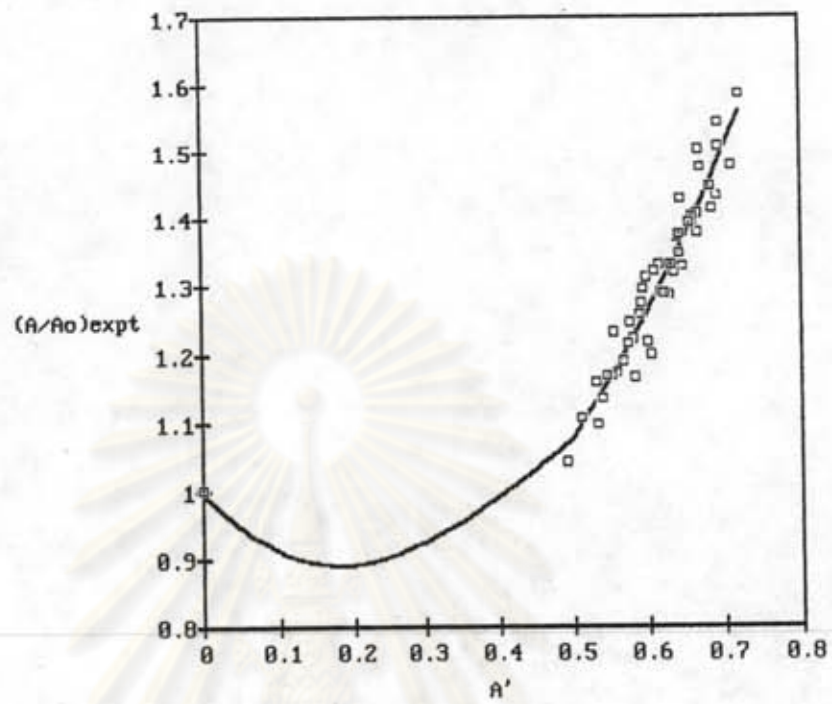
จากตารางค่าความชันเฉลี่ย เมื่อทราบค่า A13, A15 และ A17 จะทำให้ได้ค่า A14, A16 และ A18 ซึ่งเป็นค่าคงที่ของแต่ละตัวแปร ส่วนค่า A13, A15 และ A17 ไม่เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์ในรูป  $f(T, U, t)$  แต่เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์ของตัวแปรจึงติดเป็นค่าคงที่ไว้ตามเดิม ดังนั้นสมการ ที่ 5.26 ถึง 5.28 เขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$A/A_0 = A13 \left[ \frac{(U/U_{mf})}{0.224 + U/U_{mf}} \right] \quad (5.29)$$

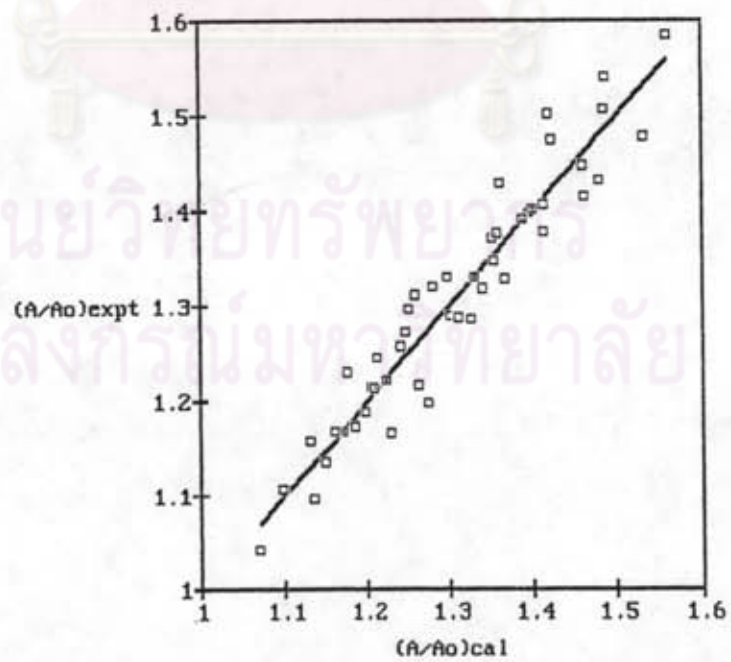
$$A/A_0 = A15 \left[ \frac{(T-T_0)/T_0}{4.332 + (T-T_0)/T_0} \right] \quad (5.30)$$

$$A/A_0 = A17 \left[ \frac{(t/t_0)}{2.650 + t/t_0} \right] \quad (5.31)$$





รูปที่ 5.14 อัตราส่วนเถ้าที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่ และจากผลการทดลอง



รูปที่ 5.15 อัตราส่วนเถ้าที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

เมื่อทำการรวมสมการให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสามตัวแปรของอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และ อุณหภูมิ จะได้รูปสมการ 5.32

$$A/A_o = C3 \left[ \frac{(U/U_{mf})}{0.224+U/U_{mf}} \right] \left[ \frac{(T-T_o)/T_o}{4.332+(T-T_o)/T_o} \right] \left[ \frac{(t/t_o)}{2.650+t/t_o} \right] \quad (5.32)$$

เมื่อ

$C3 =$  ค่าคงที่ของฟังก์ชัน

จากกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าเข้าที่ได้จากการทดลอง กับค่า  $[(U/U_{mf})/(0.224+U/U_{mf})][(T-T_o)/T_o(4.332+(T-T_o)/T_o)][(t/t_o)/(2.650+t/t_o)]$  ดังรูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ไม่อยู่ในรูปสมการเส้นตรง เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลพบ ข้อมูลสอดคล้องกับการกระจายแบบฟังก์ชันโพลีโนเมียลดีกรีสอง ดังนั้นค่าคงที่  $C3$  จะอยู่ในรูปของ สมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนเข้าที่เป็นฟังก์ชันกับอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ แสดงได้ดังสมการที่ 5.33 เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการที่ 5.33 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลจากการทดลอง จากกราฟพบว่าค่าความเชื่อมั่นเป็นเส้นตรง (R-square) มีค่าเท่ากับ 0.917 ดังรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่าสมมติฐาน และความสัมพันธ์ที่กำหนดขึ้นให้แนวโน้มไปในทางที่ถูกต้อง และมีความเป็นไปได้จริง

$$A/A_o = 0.9987 - 1.228A' + 2.790A'^2 \quad (5.33)$$

เมื่อ

$$A' = \left[ \frac{(U/U_{mf})}{0.224+U/U_{mf}} \right] \left[ \frac{(T-T_o)/T_o}{4.332+(T-T_o)/T_o} \right] \left[ \frac{(t/t_o)}{2.650+t/t_o} \right]$$

#### 5.2.4 การบอณคงตัว

ค่าเปอร์เซ็นต์เข้าที่มีความสัมพันธ์กับปริมาณแกลบ อัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ แสดงได้ในรูปที่ 4.10, 4.17, 4.24 และ 4.31 ตามลำดับ ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ในเขตของแกลบทำให้เกิดการผสมที่ดี สารระเหยที่เกิดจากการสลายตัวทางความร้อนจะถูกปลดปล่อยออกมาอย่างสม่ำเสมอ และการแพร่ที่เกิดขึ้นได้ไม่มากนักเมื่อใช้แกลบปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นผล

ทำให้เกิดโครงสร้างที่ประกอบด้วยคาร์บอน โดยสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.10 จะเห็นได้ว่าปริมาณแกลบที่เพิ่มขึ้นจาก 30 กรัม ถึง 60 กรัม ไม่ค่อยมีผลกระทบต่อสัดส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวในแกลบ

ตัวแปรอัตราการป้อนก๊าซที่มีผลต่อค่าคาร์บอนคงตัว แสดงได้ดังรูปที่ 4.17 และ 5.16 โดยแปรค่าอัตราการไหลก๊าซจาก 1.2 ถึง 2.4 เมตรต่อวินาที พบว่าค่าคาร์บอนคงตัวมีแนวโน้มสูงขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซ เนื่องจากองค์ประกอบหลักของแกลบได้แก่ พวกลูเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเมื่อได้รับความร้อนจะสลายตัวเป็นสารระเหย และคาร์บอน สารระเหยจะแพร่ผ่านเนื้อเยื่อแกลบ ส่วนคาร์บอนยังเหลืออยู่ในโครงสร้างของแกลบ ดังนั้นเมื่ออัตราการป้อนก๊าซเพิ่มขึ้นจะเกิดการหมุนวนปั่นป่วนของเม็ดแกลบอย่างรวดเร็ว การแพร่ของสารระเหยจากเม็ดแกลบเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้สัดส่วนของคาร์บอนสูงขึ้น แปรผันตามปริมาณสารระเหยที่ปลดปล่อยออกมา

จากการสลายตัวทางความร้อนของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบภายในแกลบ จะทำให้ได้โครงสร้างที่ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอนอะตอมอยู่ตามสัดส่วนของสารอินทรีย์ที่ลดลง ดังนั้นการใช้เวลาในการคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 15 นาที จนถึง 60 นาที จะมีการปลดปล่อยสารอินทรีย์ออกมามากตลอดเวลา แต่เนื่องจากโครงสร้างแกลบไม่ได้เป็นคาร์บอนทั้งหมด ดังนั้นสัดส่วนคาร์บอนจึงไม่เพิ่มขึ้นในสัดส่วนที่เท่ากับเปอร์เซ็นต์ของสารระเหยและความชื้นที่ลดลง ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.24 และ 5.17

อุณหภูมิในการคาร์บอนเพิ่มขึ้นในช่วง 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส ที่มีผลต่อสัดส่วนของคาร์บอน แสดงไว้ในรูปที่ 4.31 และ 5.18 พบว่าสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากคาร์บอนในแกลบมักจะอยู่ในโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบหลักของแกลบ ดังนั้นเมื่อใช้อุณหภูมิสูงสารอินทรีย์เกิดการสลายตัวไปมากทำให้เหลือโครงสร้างที่เป็นคาร์บอนที่ระเหยไม่ได้เป็นส่วนใหญ่

เมื่อพิจารณาข้อมูลที่ได้จากการทดลองในรูป 4.10, 5.25, 5.26 และ 5.27 พบว่าปริมาณแกลบมีผลกระทบทำให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนมีการเปลี่ยนแปลงน้อย ส่วนตัวแปรอื่นๆ ได้แก่ อัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์คาร์บอนมีแนวโน้มแปรผันตามค่าตัวแปรที่เพิ่มขึ้น โดยตั้งสมมติฐานให้เป็นฟังก์ชันอัตราการเติบโตในตัว  $y = a[x/(ab+x)]$  และจัดให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสามตัวแปร  $FC/FC_0 = f[U/U_{mf}, (T-T_0)/T_0, t/t_0]$  เช่นเดียวกับค่าเก่า



ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสามหาได้จาก กำหนดตัวแปรคงที่ตัวหนึ่ง และทำการแปรค่าตัวแปรที่เหลือสองตัว ดังแสดงในรูปที่ 5.16 ถึง 5.18 และสมการ 5.34 ถึง 5.36

$$FC/FC_o = \frac{A19 (U/U_{mf})}{(A20+U/U_{mf})} \quad (5.34)$$

$$FC/FC_o = \frac{A21 (T-T_o)/T_o}{(A22+(T-T_o)/T_o)} \quad (5.35)$$

$$FC/FC_o = \frac{A23 (t/t_o)}{(A24+t/t_o)} \quad (5.36)$$

เมื่อ

FC = คาร์บอนคงตัวที่มีในแกลบ (เปอร์เซ็นต์)

FC<sub>o</sub> = คาร์บอนคงตัวที่มีในแกลบตอนเริ่มต้น (เปอร์เซ็นต์)

U = ความเร็วก๊าซ (เมตรต่อวินาที)

U<sub>mf</sub> = ความเร็วต่ำสุดที่เกิดฟลูอิไดเซชัน (เมตรต่อวินาที)

T = อุณหภูมิที่ใช้ (องศาเซลเซียส)

T<sub>o</sub> = อุณหภูมิอ้างอิง 30 องศาเซลเซียส

t = เวลาที่ใช้

t<sub>o</sub> = เวลาอ้างอิง 0 นาที

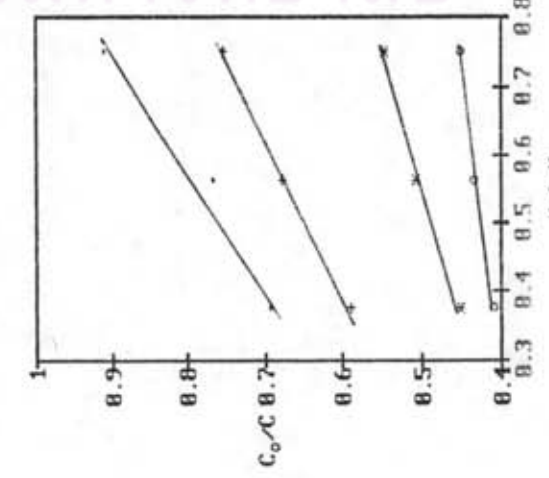
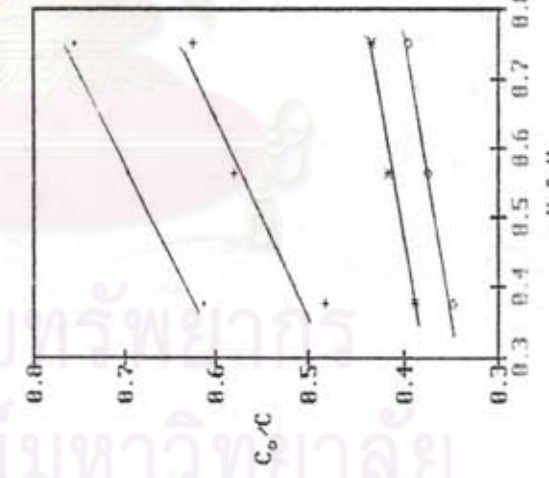
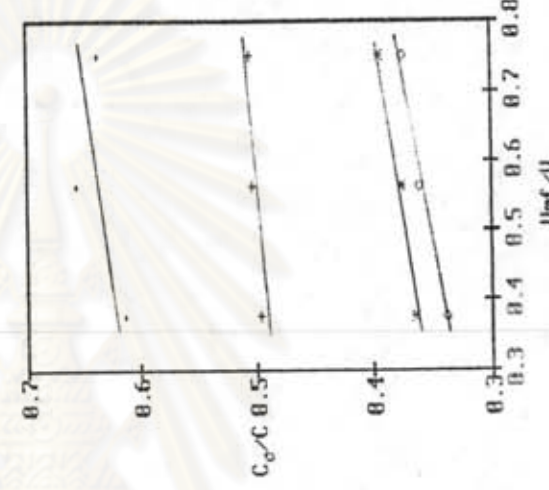
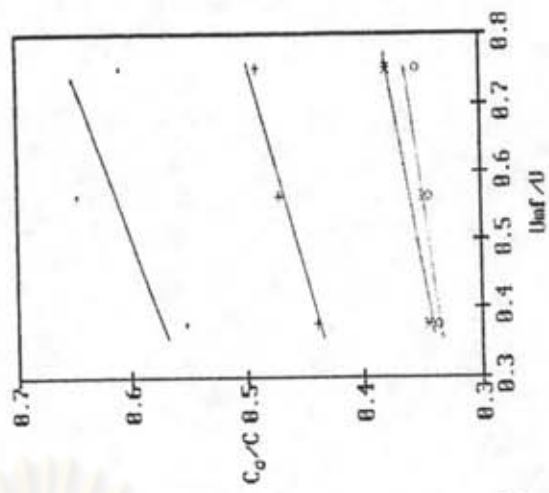
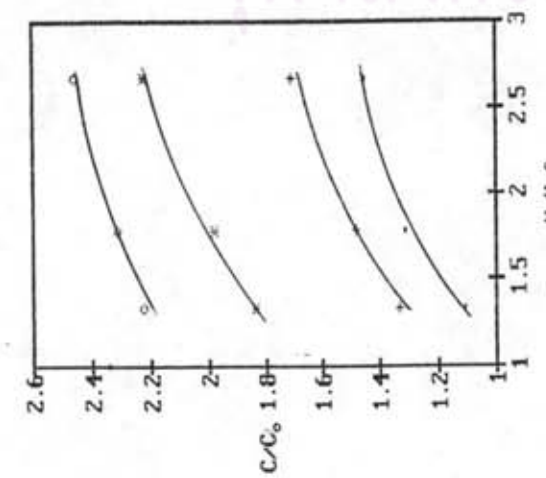
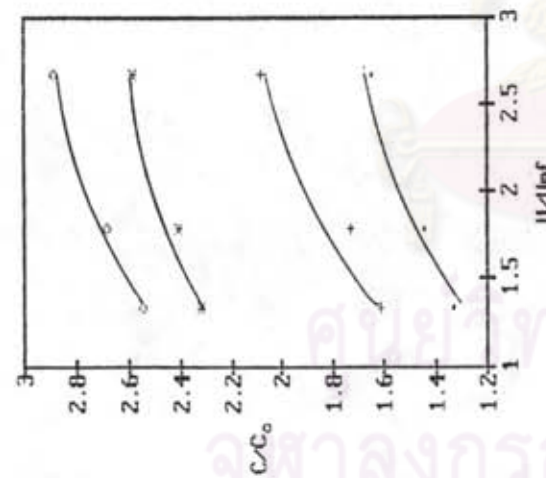
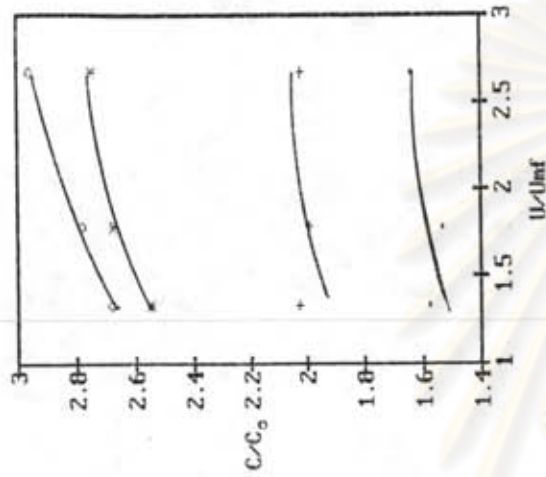
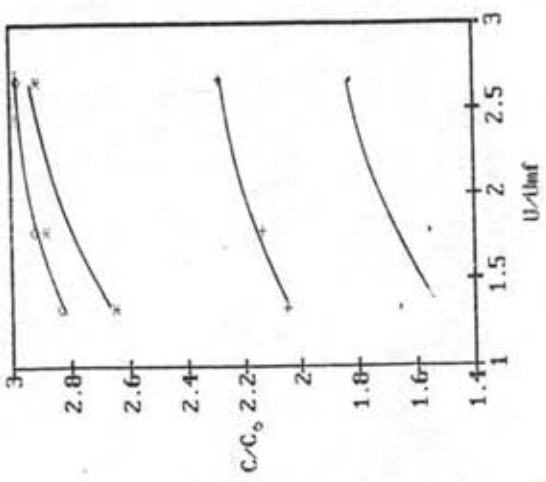
A19, ..., A23 = ค่าคงที่ของสมการของความสัมพันธ์แต่ละตัวแปร

ค่าคงที่ในสมการที่ 5.34 ถึง 5.36 จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ โดยค่าคงที่ A19 ถึง A23 สามารถหาได้จากค่าจุดตัดแกนเฉลี่ย และความชันเฉลี่ยของกราฟที่ปรับสมการให้อยู่ในรูปเส้นตรง (Linearlization) ดังนี้

$$(FC/FC_o)^{-1} = A20/[A19 U/U_{mf}] + 1/A19 \quad (5.37)$$

$$(FC/FC_o)^{-1} = A22/[A21 (T-T_o)/T_o] + 1/A21 \quad (5.38)$$

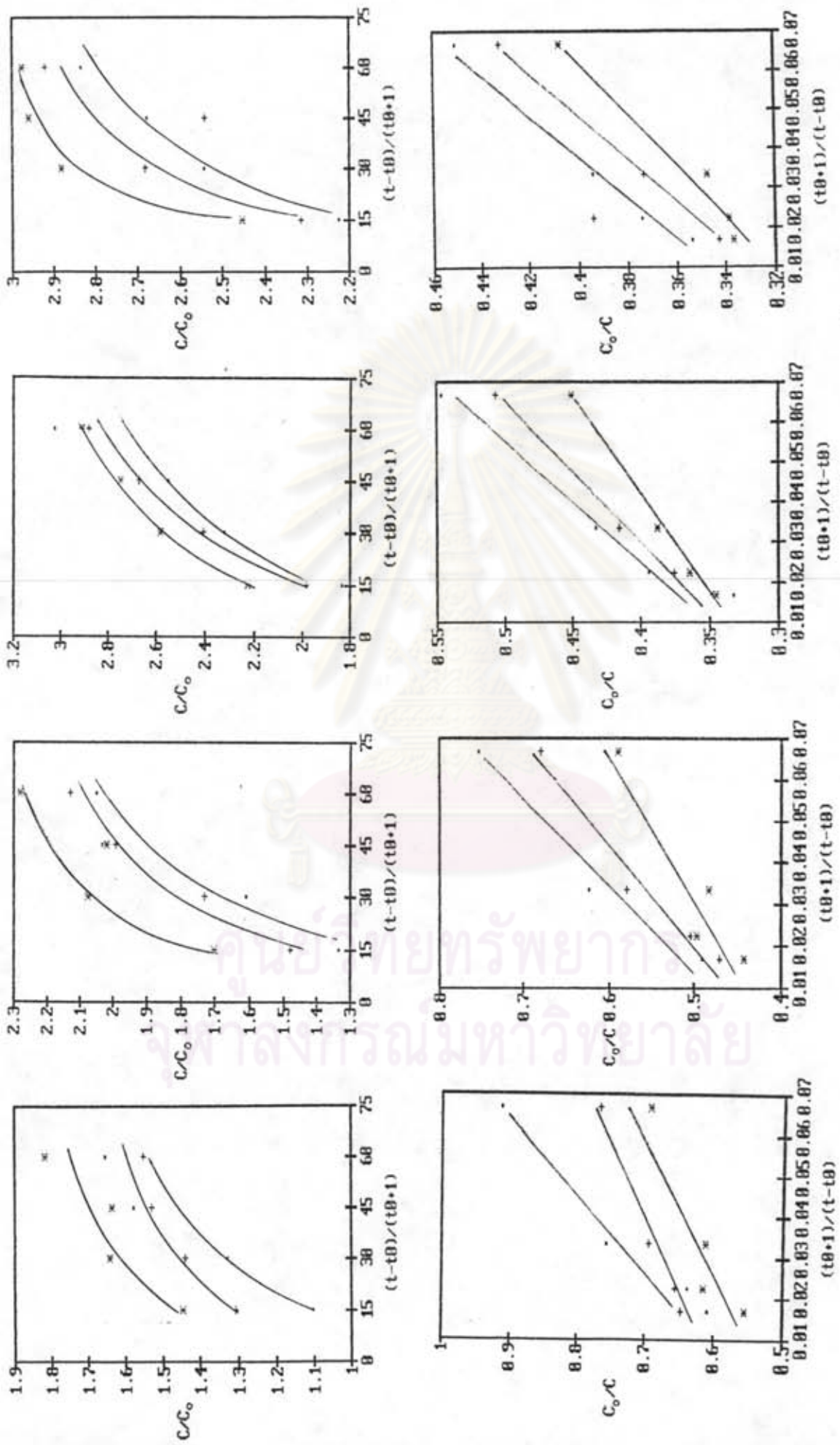
$$(FC/FC_o)^{-1} = A24/[A23 t/t_o] + 1/A23 \quad (5.39)$$



300 °C      + 400 °C      \* 500 °C      ° 600 °C

ก. 15 นาที      ข. 30 นาที      ค. 45 นาที      ง. 60 นาที

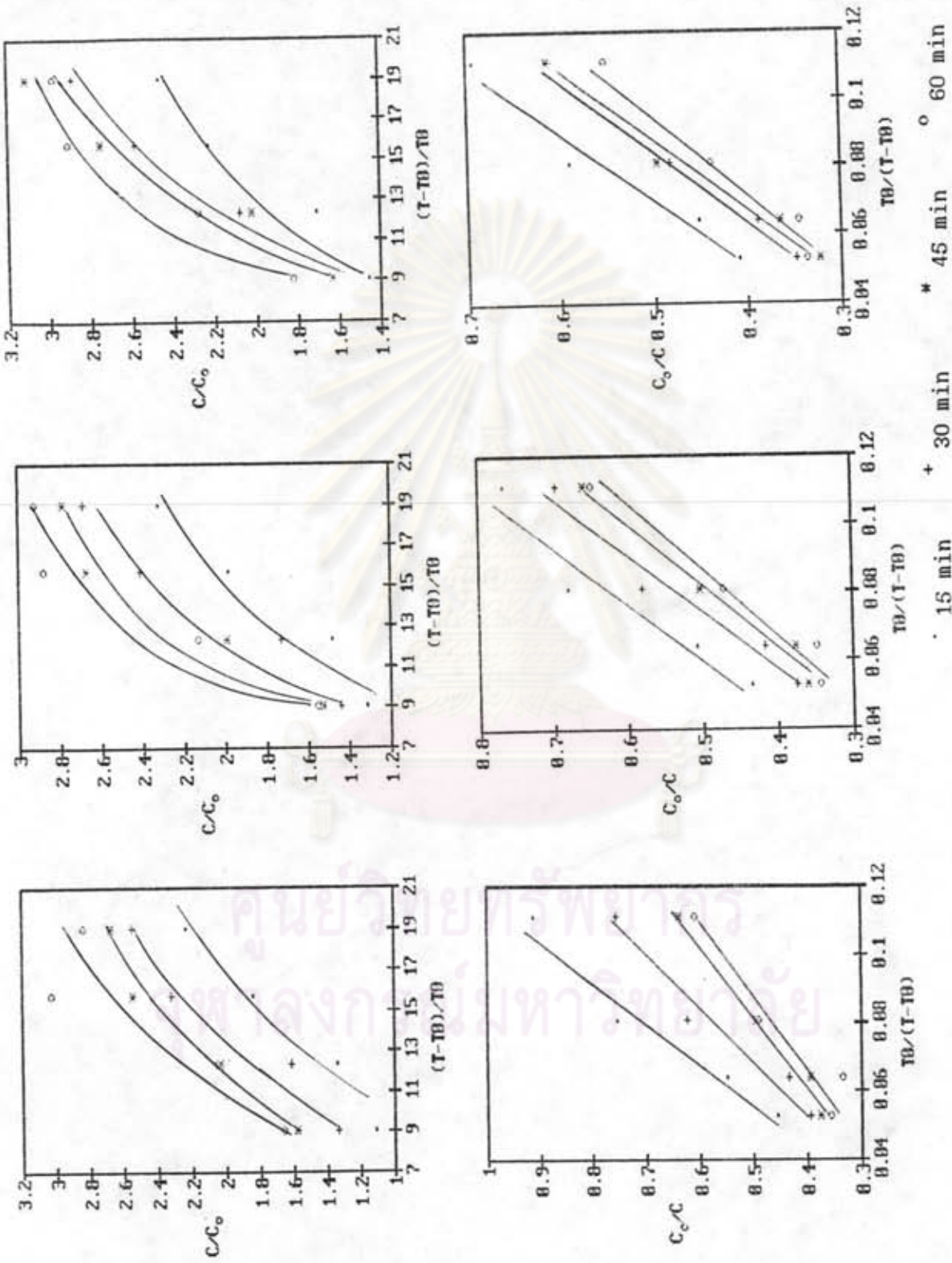
รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การร่อนกับอัตราการมือเกือกที่เวลาต่างๆ และความสัมพันธ์กับเป็นเส้นตรง



· 1.2 m/s + 1.6 m/s \* 2.4 m/s  
 ค. 500 °C      ง. 600 °C

รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ และความเข้มข้นที่ปรับเป็นสมการเส้นตรง





ก. 1.2 m/s

ข. 1.6 m/s

ค. 2.4 m/s

รูปที่ 5.18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์คาร์บอนกับอุณหภูมิที่อัตราการป้อนก๊าซต่างๆ และความสัมพัทธ์ที่รับเป็นสมการเส้นตรง

เมื่อ

$$A19, A21, A23 = \text{ส่วนกลับของจุดตัดแกน } (FC/FC_0)^{-1}$$

$$A20/A19, A22/A21, A24/A23 = \text{ความชันของกราฟ}$$

รูปที่ 5.16 ถึง 5.18 แสดงกราฟความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่ปรับเป็นเส้นตรงตามสมการที่ 5.37 ถึง 5.39 พบว่าการกระจายของข้อมูลอยู่ในแนวเส้นตรง ซึ่งจะได้ค่าความชัน และจุดตัดแกนของความสัมพันธ์ของตัวแปรดัง ตารางที่ จ.1

จากตารางที่ จ.1 ค่า A20, A22 และ A24 ที่เป็นค่าคงที่ของแต่ละตัวแปร หาได้จากความชันเฉลี่ย A20/A19, A22/A21 และ A24/A23 ที่ทราบค่า A19, A21 และ A23 ส่วนค่า A19, A21 และ A23 เป็นค่าคงที่ของความสัมพันธ์ฟังก์ชันเพียงสองตัวแปรจึงคิดเป็นค่าคงที่ของสมการ ดังนั้นจากสมการ 5.34 ถึง 5.36 จึงเขียนความสัมพันธ์ได้ ดังนี้

$$FC/FC_0 = A19 \left[ \frac{U/U_{mf}}{0.483 + U/U_{mf}} \right] \quad (5.40)$$

$$FC/FC_0 = A21 \left[ \frac{(T-T_0)/T_0}{78.355 + (T-T_0)/T_0} \right] \quad (5.41)$$

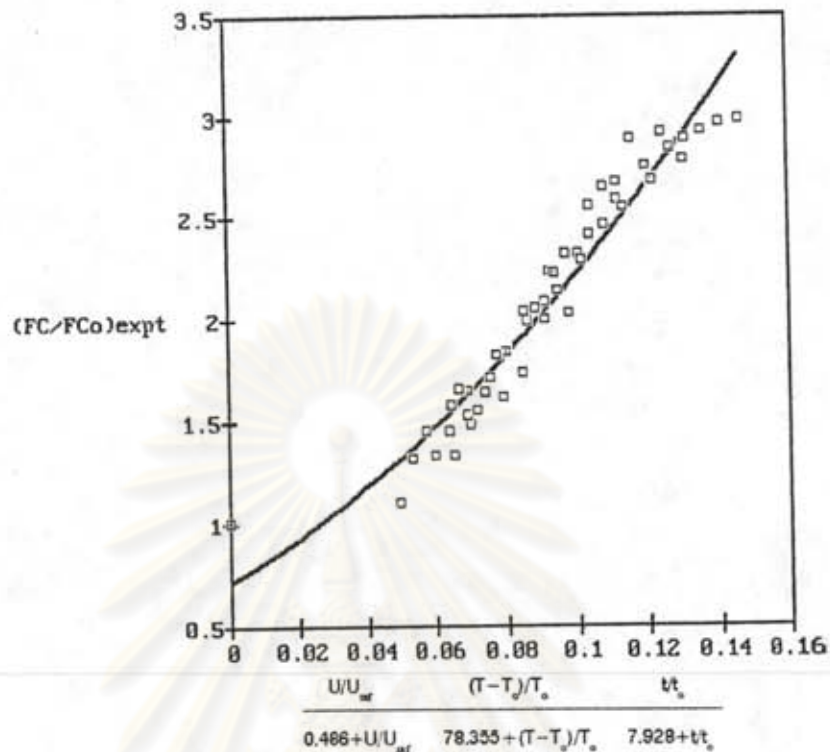
$$FC/FC_0 = A23 \left[ \frac{t/t_0}{7.928 + t/t_0} \right] \quad (5.42)$$

เมื่อทำการรวมสมการให้อยู่ในรูปฟังก์ชันสามตัวแปรของอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และ อุณหภูมิ จะได้รูปสมการ 5.43

$$FC/FC_0 = C4 \left[ \frac{U/U_{mf}}{0.483+U/U_{mf}} \right] \left[ \frac{(T-T_0)/T_0}{78.355+(T-T_0)/T_0} \right] \left[ \frac{t/t_0}{7.928+t/t_0} \right] \quad (5.43)$$

เมื่อ

$$C4 = \text{ค่าคงที่ของฟังก์ชัน}$$

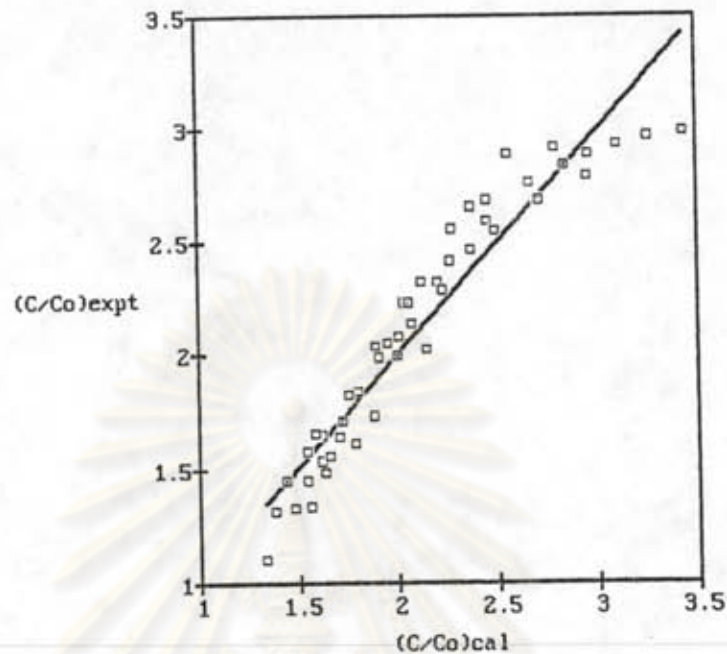


รูปที่ 5.19 อัตราส่วนคาร์บอนที่ได้จากการคำนวณสมการติดค่าคงที่ และจากผลการทดลอง

จากกราฟความสัมพันธ์เปรียบเทียบระหว่างค่าเข้าที่ได้จากการทดลอง กับค่า  $[(U/U_{mf}) / (0.483 + U/U_{mf})] [(T-T_0)/T_0 (78.355 + (T-T_0)/T_0)] [t/t_0 / (7.928 + t/t_0)]$  แสดงในรูปที่ 5.19 จากกราฟความสัมพันธ์จะเห็นได้ว่าไม่สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงได้ แต่พบว่าความสัมพันธ์อยู่ในรูปฟังก์ชันเอ็กซ์โปเนนเชียลที่มีค่าคงที่  $a = 0.822$ ,  $b = 9.804$  ดังนั้นค่าคงที่ C4 จะแปลงไปอยู่ในรูปค่าคงที่คู่กับค่าเอ็กซ์โปเนนเชียลยกกำลัง ซึ่งสมการความสัมพันธ์ของอัตราส่วนคาร์บอนคงตัวที่เป็นฟังก์ชันกับอัตราการป้อนก๊าซ เวลา และอุณหภูมิ แสดงได้ดังสมการที่ 5.44 เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆในสมการที่ 5.44 แล้วนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.20 จากกราฟพบว่าค่าความสัมพันธ์ที่กำหนดขึ้นให้แนวโน้มเป็นเส้นตรง โดยความเชื่อมั่น (R-square) มีค่าเท่ากับ 0.912 แสดงให้เห็นว่าเป็นไปสมมติฐานที่กำหนดไว้

$$FC/FC_0 = 0.822 \exp \left[ \frac{9.804}{0.483 + U/U_{mf}} \frac{(T-T_0)/T_0}{78.355 + (T-T_0)/T_0} \frac{t/t_0}{7.929 + t/(t_0)} \right] \quad (5.44)$$





รูปที่ 5.20 อัตราส่วนคาร์บอนที่ได้จากการคำนวณเปรียบเทียบกับผลจากการทดลอง

### 5.2.5 อัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่อคาร์บอน

ปริมาณซิลิกาที่มีอยู่ในเกลบส่วนใหญ่จะหมายถึงเถ้า ซึ่งในการศึกษานี้จะคิดความบริสุทธิ์ของซิลิกามีค่าโดยประมาณ 98.7 เปอร์เซ็นต์ (พงษ์ศักดิ์, 2535) เมื่อพิจารณาถึงอัตราส่วนของซิลิกาต่อคาร์บอนที่มีอยู่ในเกลบ เมื่อใช้ปริมาณเกลบเพิ่มขึ้นจาก 30 กรัม ถึง 60 กรัม พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนของเถ้าสูงกว่าการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของคาร์บอนคงตัวที่ได้จากการสลายตัวของสารอินทรีย์ ดังแสดงในรูปที่ 4.11

จากรูปที่ 4.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนซิลิกาต่อคาร์บอนคงตัวกับอัตราการป้อนก๊าซ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนดังกล่าวมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากคาร์บอนส่วนใหญ่จะอยู่เป็นโครงสร้างของสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของเกลบ ซึ่งเมื่อมีการสลายตัวของสารอินทรีย์ในเกลบแล้วจะได้โครงสร้างที่มีสัดส่วนคาร์บอนสูง การเพิ่มอัตราการป้อนก๊าซจาก 1.2 ถึง 2.4 เมตรต่อวินาที ทำให้เม็ดเกลบมีการเคลื่อนที่ได้เร็วทำให้สารระเหยแพร่ออกสู่กระแสก๊าซรอบเม็ดเกลบได้ดีขึ้น เมื่อเทียบกับสัดส่วนของเถ้าแล้วพบว่าสัดส่วนของคาร์บอนเพิ่มขึ้นมากกว่าเถ้า เพราะคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นเป็นผลมาจากการสลายตัวของสารอินทรีย์



จากการเปรียบเทียบสัดส่วนเท่ากับคาร์บอนที่เพิ่มขึ้นจะเห็นได้ว่าที่เวลาในการคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 15 ถึง 60 นาที พบว่าสัดส่วนคาร์บอนจะเพิ่มขึ้นมากกว่าเก้า เพราะคาร์บอนเป็นธาตุที่มีอยู่โครงสร้างหลักในเกลบที่มีอยู่มากกว่าเก้า ดังนั้นอัตราส่วนซิลิกาต่อคาร์บอนจะมีแนวโน้มลดลง แสดง ได้ดังรูปที่ 4.25

จากรูปที่ 4.32 จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนระหว่างซิลิกาต่อคาร์บอนในผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนสูงขึ้นจาก 300 ถึง 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากสัดส่วนของคาร์บอนจากการสลายตัวของโครงสร้างสารอินทรีย์จะเพิ่มขึ้นมากกว่าเก้าที่เป็นองค์ประกอบเพียงส่วนน้อย การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้มีการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วซึ่งจะปลดปล่อยสารระเหยออกได้มากขึ้น ส่งผลให้ได้สัดส่วนคาร์บอน และเก้าในโครงสร้างเกลบเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนของคาร์บอนเพิ่มขึ้นสูงกว่า

### 5.3 ผลของตัวแปรต่างๆ กับผลิตภัณฑ์เกลบที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์

จากภาคผนวก ค. และรูปของเกลบจากการคาร์บอนไนซ์ที่สภาวะต่างๆในบทที่ 4 จะเห็นได้ว่า ปริมาณเกลบ และ อัตราการป้อนก๊าซ มีผลกระทบต่อรูปร่าง และลักษณะทางกายภาพของเกลบเล็กน้อย ดังรูปที่ 4.12, 4.13, 4.19 และ 4.20 โดยเกลบที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกันทั้งด้านสี ขนาด และรูปร่าง ส่วนอุณหภูมิ และเวลาจะเป็นตัวแปรสำคัญที่มีผลทำให้เกลบเกิดการสลายตัว ทำให้สีของเกลบเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีน้ำตาลเข้ม และกลายเป็นสีดำในที่สุด ดังแสดงไว้ในรูปที่ 4.26, 4.27, 4.33 และ 4.34 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิสูง และให้เวลาอยู่ในเตานานจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีดำเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่เป็นโครงสร้างเกลบมีผลทำให้สัดส่วนของคาร์บอนค่อยๆเพิ่มขึ้น โดยรูปร่างของเกลบยังคงเดิม แต่ขนาดเล็กลง และมีความเปราะเพิ่มขึ้น ลักษณะผลิตภัณฑ์ที่ดีจะมีสีดำลักษณะ เป็นมันวาว

### 5.4 ผลของตัวแปรต่างๆ กับผลิตภัณฑ์ก๊าซที่เกิดขึ้น

จากการทดลองพบว่าในการสลายตัวของโครงสร้างเกลบจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ และไฮโดรเจน โดยเปอร์เซ็นต์ก๊าซที่เกิดขึ้นจะถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี โดยแบ่งเป็นหัวข้อ ดังนี้



#### 5.4.1 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากการทดลองพบว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม อัตราการป้อนก๊าซ อุณหภูมิ และเวลาที่เพิ่มขึ้น แสดงในรูปที่ 4.35, 4.37, 4.39 และ 4.41 เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูง และเวลานาน จะทำให้มีการสลายตัวของหมุ่ฟังกซ์คาร์บอกซิลในกรดยูโรนิก หรือจากพวกกลุ่มกลูโคซิติกของเฮมิเซลลูโลสที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ เกิดการปลดปล่อยสารระเหยและก๊าซมากขึ้น (Shafizadeh, 1979) ส่วนเมื่อใช้อัตราการป้อนก๊าซสูงจะช่วยทำให้ก๊าซถ่ายเทออกสู่กระแสก๊าซภายในเบดได้รวดเร็วขึ้น เนื่องจากการหมุนวนของเม็ดแกลบมีอิสระมากขึ้น

#### 5.4.2 ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์

การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์มักเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในขั้นที่สอง (secondary reaction) ของสารระเหยที่ปลดปล่อยออกมาจากก๊าซเป็นส่วนใหญ่ (Antal, 1982) จึงเห็นได้ว่าก๊าซนี้จะเกิดเพิ่มขึ้นที่อุณหภูมิสูง และการใช้เวลา และอัตราการไหลของก๊าซในการคาร์บอนไนซ์เพิ่มขึ้นจะทำให้มีการปลดปล่อยสารอินทรีย์มากขึ้น โอกาสเกิดการแตกตัวของสารระเหยไปเป็นก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์จึงสูงขึ้น ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 4.34, 4.36, 4.38 และ 4.40

#### 5.4.3 ก๊าซไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนสามารถตรวจพบได้เมื่อมีการใช้อุณหภูมิในการคาร์บอนไนซ์สูงถึง 600 องศาเซลเซียส และให้เวลาเม็ดแกลบอยู่ในเตาฟลูอิดไชน์นานๆ ดังแสดงในภาคผนวก ค. เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนได้มาจากการแตกตัวของสารระเหยที่ปลดปล่อยมาจากแกลบ ซึ่งปฏิกิริยาการแตกตัวจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง

ศูนย์วิจัยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย