

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิจารณ์

งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการสลายตัวในส่วนของกาโรไลซิสของน้ำยางดำที่มาจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่ใช้วัตถุดิบต่างชนิดกัน คือ จากไม้ไผ่และจากยูคาลิปตัสด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจวัดและเปรียบเทียบการเปลี่ยนรูปของแข็งและค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ของน้ำยางดำที่มาจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษที่ใช้วัตถุดิบต่างชนิดกัน รวมทั้งสร้างแบบจำลองการสลายตัวในส่วนของกาโรไลซิสของน้ำยางดำเพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลอง

4.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำยางดำ

การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำยางดำที่จะใช้ในการดำเนินงานวิจัย โดยทำการวิเคราะห์ตามตารางที่ 3.2 ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.1 ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำยางดำ

รายการวิเคราะห์	วิธีวิเคราะห์	บริษัทที่ 1	บริษัทที่ 2
การวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis), %			
- คาร์บอน	CHNS/O Elemental Analyzer	28.98	27.54
- ไฮโดรเจน		3.76	4.46
- ออกซิเจน		53.53	59.30
- ไนโตรเจน		0.84	0.79
- ซัลเฟอร์		2.17	0.71
- โซเดียม	Atomic Absorption Spectrophotometer	10.73	7.20
การวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate analysis), %			
- ความชื้น	TGA/SDTA	24.36	35.94
- สารระเหย		52.80	45.79
- คาร์บอนคงตัว		3.47	0.28
- ซี้เถ้า		19.37	17.99
ค่าความร้อน, MJ/kg	Bomb calorimeter	10.38	10.04

จากค่าการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำยางดำ ผลการวิเคราะห์แบบประมาณได้ค่าปริมาณความชื้น 24.36 เปอร์เซ็นต์ สารระเหย 52.80 เปอร์เซ็นต์ และคาร์บอนคงตัว 3.47 เปอร์เซ็นต์ มีค่ารวมกัน 80.63 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และสำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ได้ค่าปริมาณความชื้น สารระเหย และคาร์บอนคงตัว 35.94, 45.79, และ 0.28 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีค่ารวมกัน 82.01 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในส่วนี้จะเป็นพวกน้ำและสารประกอบอินทรีย์เช่นลิกนิน เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เป็นต้น ที่ถูกสกัดออกมาจากเนื้อไม้ ค่าเปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบตัวอย่างน้ำยางดำบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ที่มีค่าแตกต่างกัน เป็นผลมาจากการที่ใช้วัตถุดิบในกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษที่ต่างกัน คือ ยูคาลิปตัส และไม้ไผ่ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2.5 ส่วนปริมาณเถ้าที่ได้มีค่า 19.37 เปอร์เซ็นต์ และ 17.99 เปอร์เซ็นต์ สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ตามลำดับ ซึ่งในส่วนนี้จะเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำยางดำได้แก่สารละลาย Na_2CO_3 และ Na_2SO_4 ซึ่งจะเป็นส่วนที่เผาไหม้ไม่ได้

4.2 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน

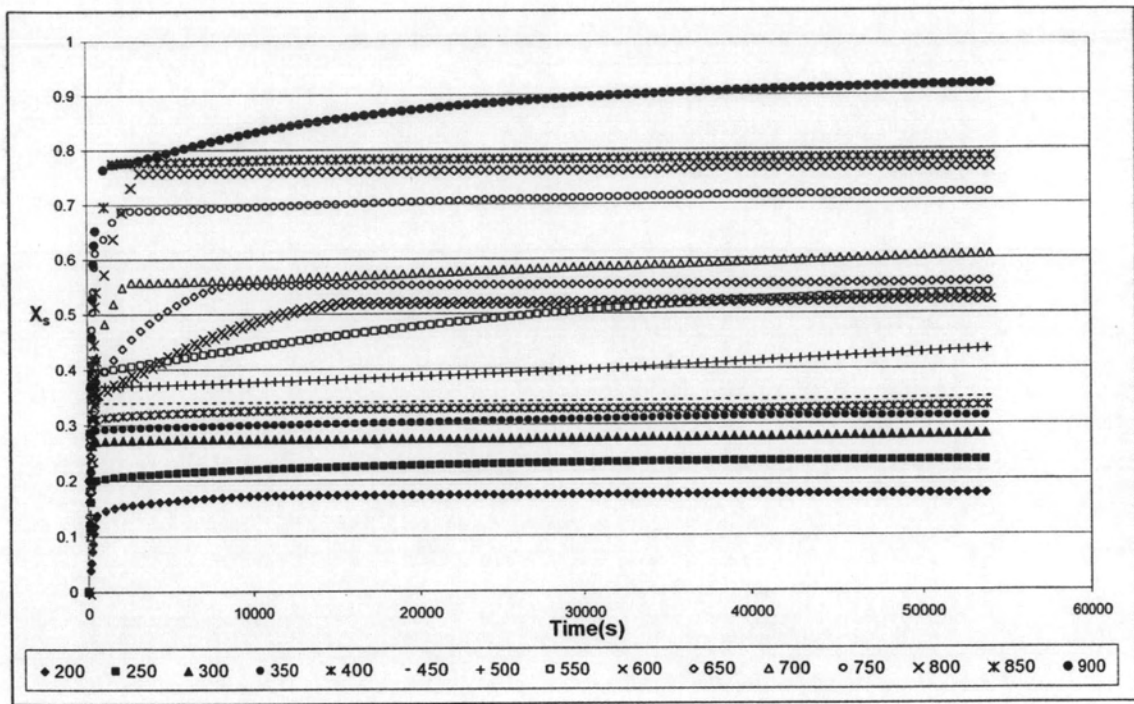
จากการทดลองการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำยางดำที่ใช้วัตถุดิบจากไม้ไผ่และยูคาลิปตัสเพื่อเปรียบเทียบผลของความแตกต่างจากวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยการวิเคราะห์ด้วยความร้อน ซึ่งการวิเคราะห์ด้วยความร้อนแบ่งออกเป็นการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก และดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส

4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

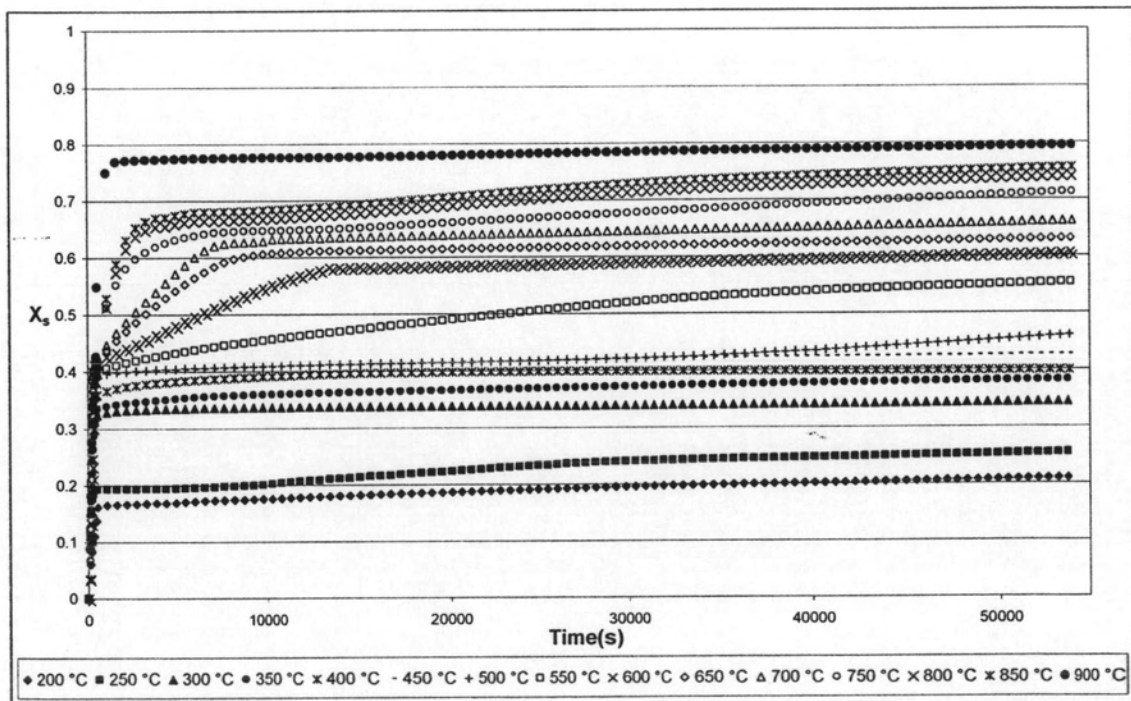
แบ่งการทดลองการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกออกเป็น 2 ช่วง คือ แบบไอโซเทอร์มอลและแบบไดนามิก

1. ไอโซเทอร์มอล เป็นการทดลองเพื่อพิจารณาผลของตัวแปรที่จะส่งผลกระทบต่อการไพโรไลซิส คือ อุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิส

ผลของการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล ซึ่งทำการทดลองที่อุณหภูมิ 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 700, 750, 800, 850 และ 900 องศาเซลเซียส จะได้เป็นค่าของน้ำหนักตัวอย่าง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลอง โดยค่าที่ได้จากการทดลองนี้นำไปคำนวณหาค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง (X_s) ตามสมการ $X_s = \frac{W_0 - W}{W_0}$ เมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลอง จะได้กราฟของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัท 1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.1 และตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัท 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.2

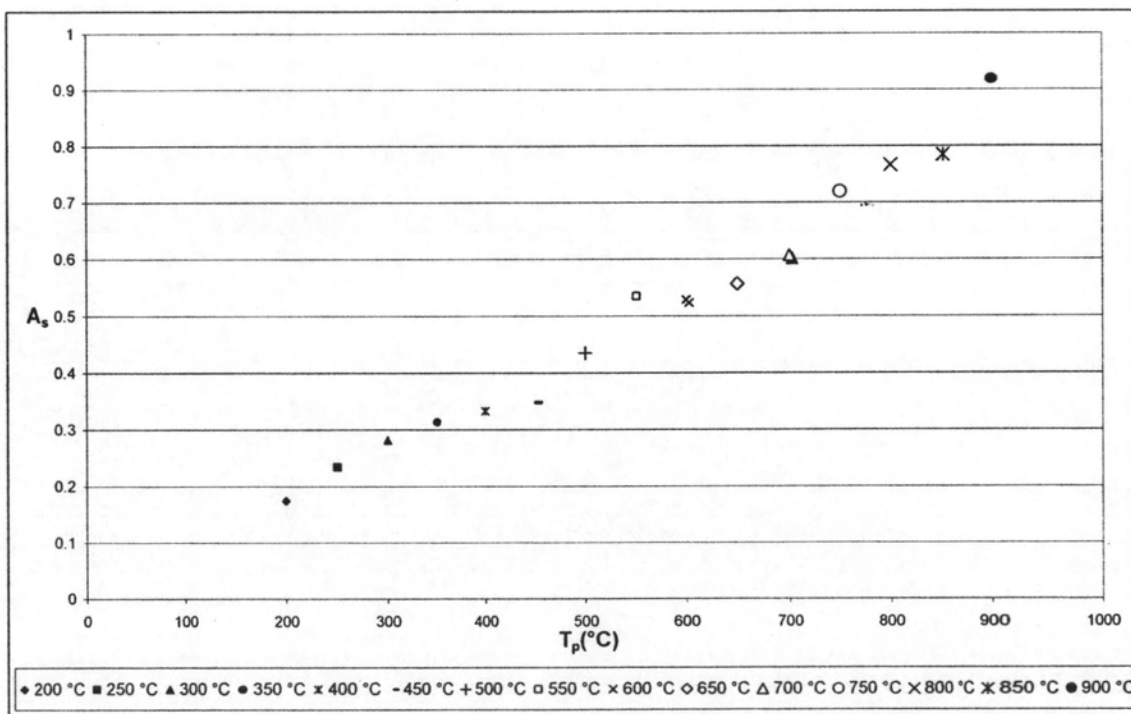


รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลองจากผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1

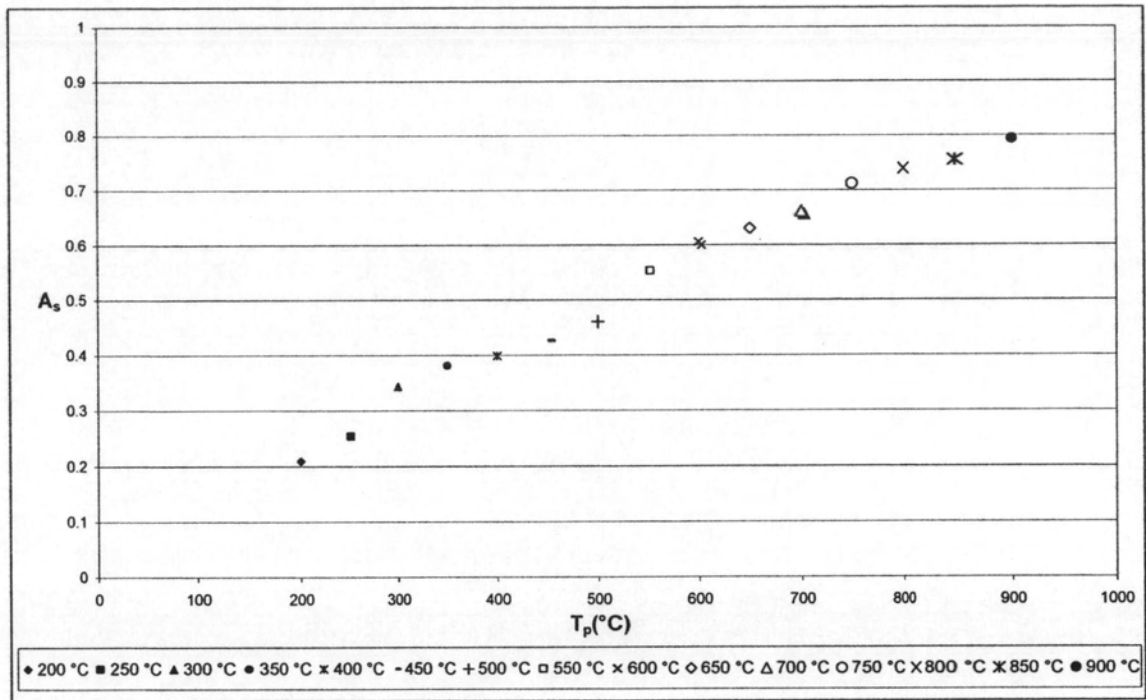


รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลองจากผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2

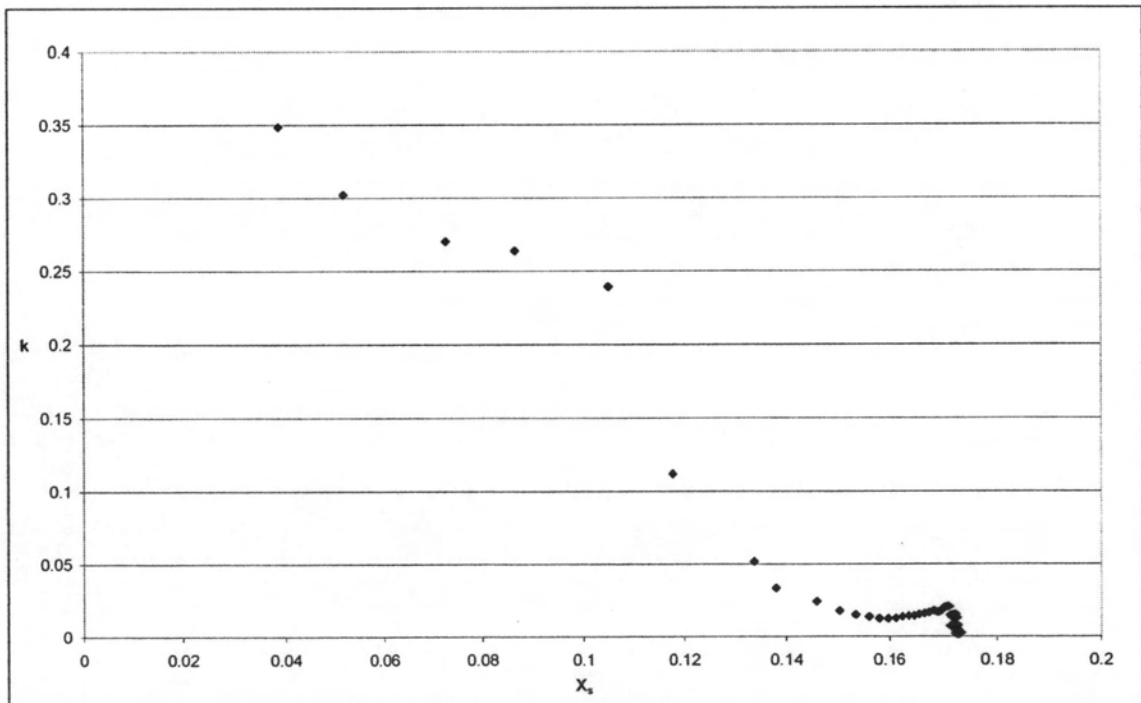
จากกราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลอง ของการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล พบว่าค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่ากราฟแบ่งออกได้เป็นสองส่วน คือ ในส่วนแรกค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเป็นช่วงที่มีการใช้อัตราการให้ความร้อนสูงเพื่อให้ถึงอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย หลังจากนั้นค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งก็จะเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ซึ่งการเปลี่ยนรูปของแข็งที่เกิดขึ้นระหว่างการไพโรไลซิสนี้สามารถแสดงได้โดย Power-law equation, $\frac{dX_s}{dt} = k(A_s - X_s)^n$ (Bilbao, Salvador, Garcia และคณะ, 1993) และจาก Power-law equation สามารถคำนวณหาค่า k ได้ โดยที่ $\frac{dX_s}{dt}$ มาจากความชันของกราฟในรูปที่ 4.1 และ 4.2 ส่วนค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย A_s ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ดูได้จากกราฟในรูปที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ตัวอย่างค่า k ที่คำนวณได้แสดงดังรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟระหว่างค่า k จากผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 กับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง โดยเป็นข้อมูลจากการทดลองของอุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิสที่ 200 องศาเซลเซียส ค่า k ที่อุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิสอื่นๆ แสดงไว้ในรูปที่ 4.7 และรูปที่ 4.9 รวมทั้งในภาคผนวก ข



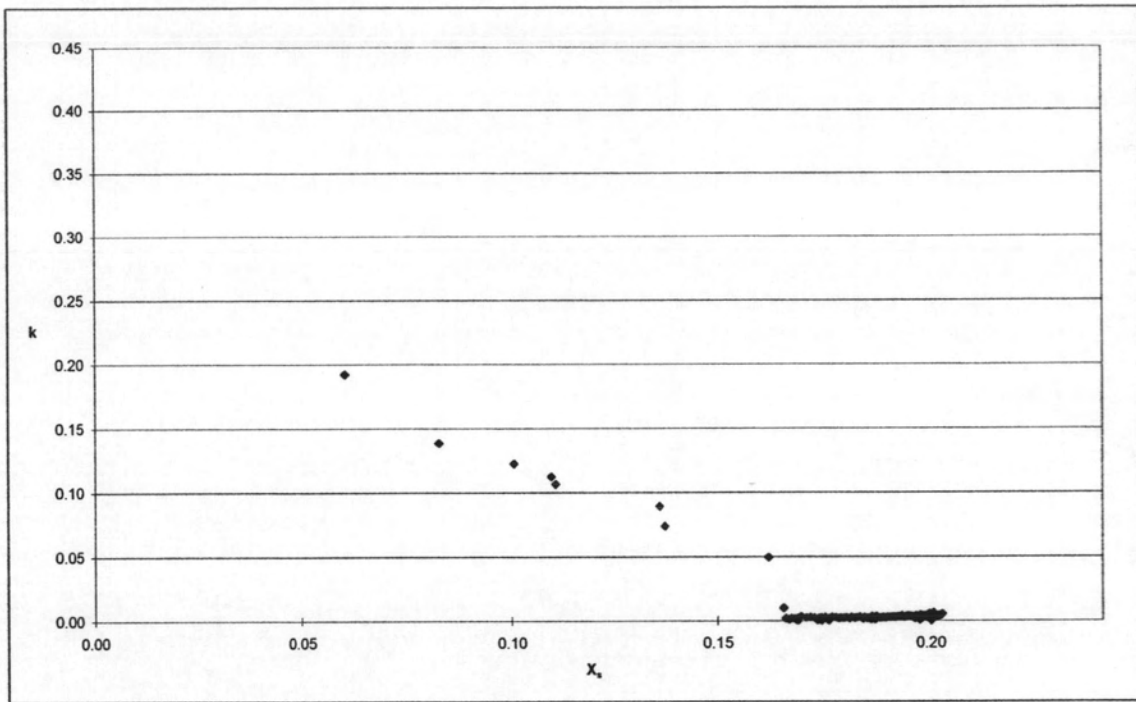
รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย กับ อุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิสของบริษัทที่ 1



รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย กับ อุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิสของ บริษัทที่ 2



รูปที่ 4.5 กราฟระหว่างค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองที่อุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิส 200 องศาเซลเซียส กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของบริษัทที่ 1



รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองที่อุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิส 200 องศาเซลเซียส กับ ค่าการเปลี่ยนแปลงของแข็งของบริษัทที่ 2

ค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองของบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 จะมีลักษณะของกราฟที่คล้ายกัน ในช่วงแรกค่า k ที่คำนวณได้จะมีค่าสูงจากนั้นจะลดลงจนมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ แต่ค่าที่อยู่ในช่วงใกล้เคียงกับศูนย์อาจจะมีค่ากระจายเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ เนื่องจาก Power-law equation ใช้ความชันในการคำนวณค่า k ซึ่งในบางจุดที่ดูจากกราฟระหว่างการเปลี่ยนแปลงของแข็งกับเวลาแล้วมีความชันเท่ากัน แต่เมื่อพิจารณาหาค่าความชันของจุดนั้นในระยะใกล้เคียงแล้วจะพบว่ามีความชันต่างกัน และเมื่อนำค่าซึ่งมีศูนย์เป็นทศนิยมหลายตำแหน่งไปคำนวณใน Power-law equation จึงส่งผลให้ค่า k ที่คำนวณได้มีลักษณะกระจาย

จากสมการ $k = (P_1 + P_2 X_s) e^{-(P_3 + P_4 X_s)/T}$ ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ทำการแก้สมการเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ P_1, P_2, P_3 และ P_4

โดยใส่ลอการิธึมธรรมชาติ (ลอกรฐาน e) ในสมการ $k = (P_1 + P_2 X_s) e^{-(P_3 + P_4 X_s)/T}$ จะได้เป็นสมการที่ 4.1

$$\ln k = \ln P_1 + \ln P_2 + \ln X_s - (P_3 + P_4 X_s)/T \quad (4.1)$$

เมื่อแทนค่า k ที่คำนวณได้และค่าอุณหภูมิสุดท้ายต่างๆ ในสมการที่ 4.1 โดยใช้ค่าที่อุณหภูมิ 250, 450, 750 และ 850 องศาเซลเซียส เป็นตัวแทนของข้อมูลและเป็นการกระจายข้อมูลให้ครอบคลุมช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองทั้งหมดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของสมการ ทำนายค่าค่าพารามิเตอร์ P_1 , P_2 , P_3 และ P_4 ที่คำนวณออกมาได้ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 แสดงในตารางที่ 4.2 และตารางที่ 4.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ P_1 , P_2 , P_3 และ P_4 ที่คำนวณได้ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1

พารามิเตอร์	ค่าที่คำนวณได้
P_1	112.69 min ⁻¹
P_2	-107.65 min ⁻¹
P_3	3957.89 K
P_4	2376.26 K

ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ P_1 , P_2 , P_3 และ P_4 ที่คำนวณได้ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2

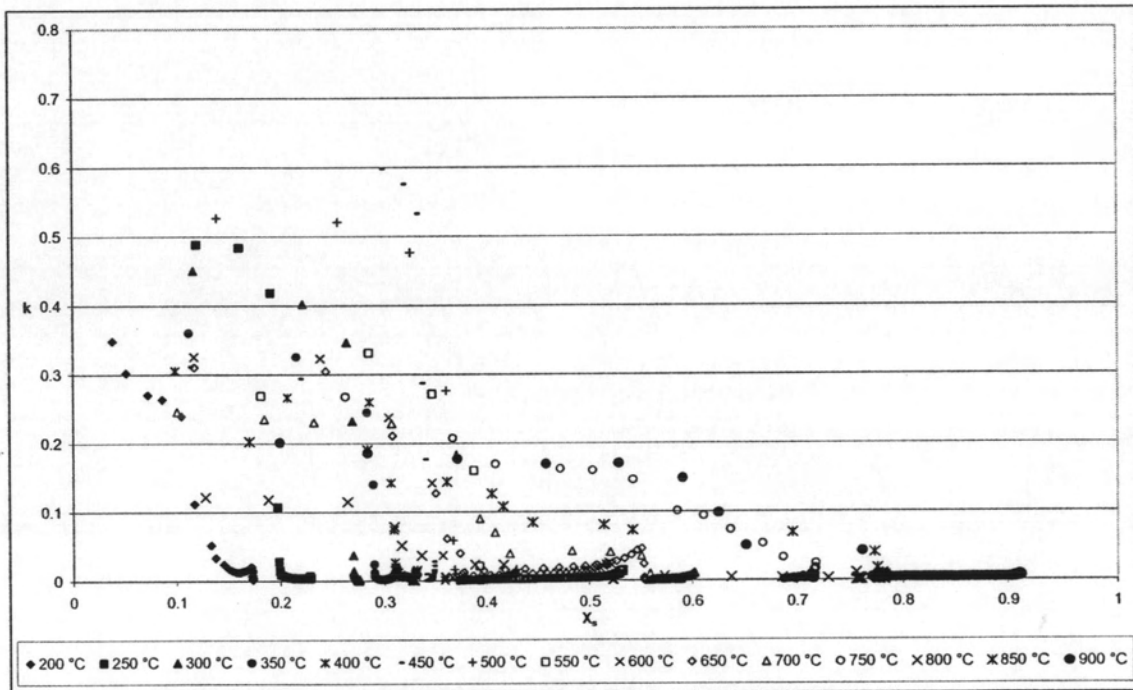
พารามิเตอร์	ค่าที่คำนวณได้
P_1	18.32 min ⁻¹
P_2	-41.23 min ⁻¹
P_3	2877.29 K
P_4	2638.72 K

จากการนำค่าพารามิเตอร์ P_1 , P_2 , P_3 และ P_4 ไปแทนลงในสมการ $k = (P_1 + P_2 X_s) e^{-(P_3 + P_4 X_s)/T}$ จะได้สมการที่สามารถใช้ทำนายหาค่าจลนพลศาสตร์ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ดังสมการที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

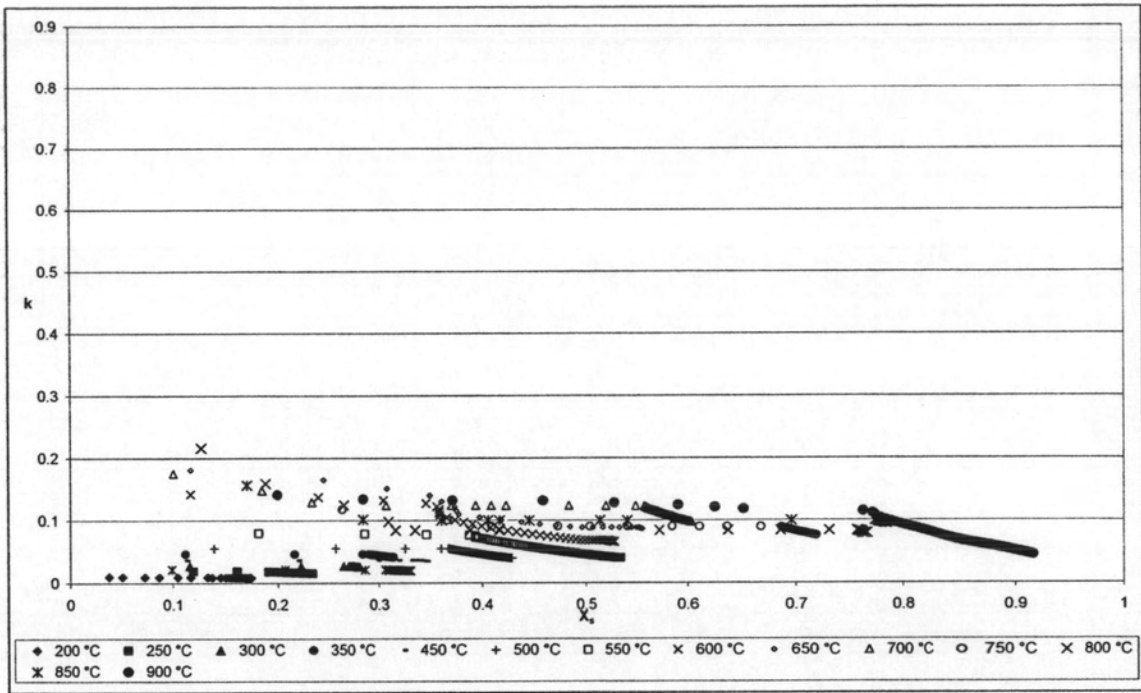
$$k = (112.69 + (-107.65)X_s) e^{-(3957.89 + 2376.26X_s)/T} \quad (4.2)$$

$$k = (18.32 + (-41.23)X_s) e^{-(2877.29 + 2638.72X_s)/T} \quad (4.3)$$

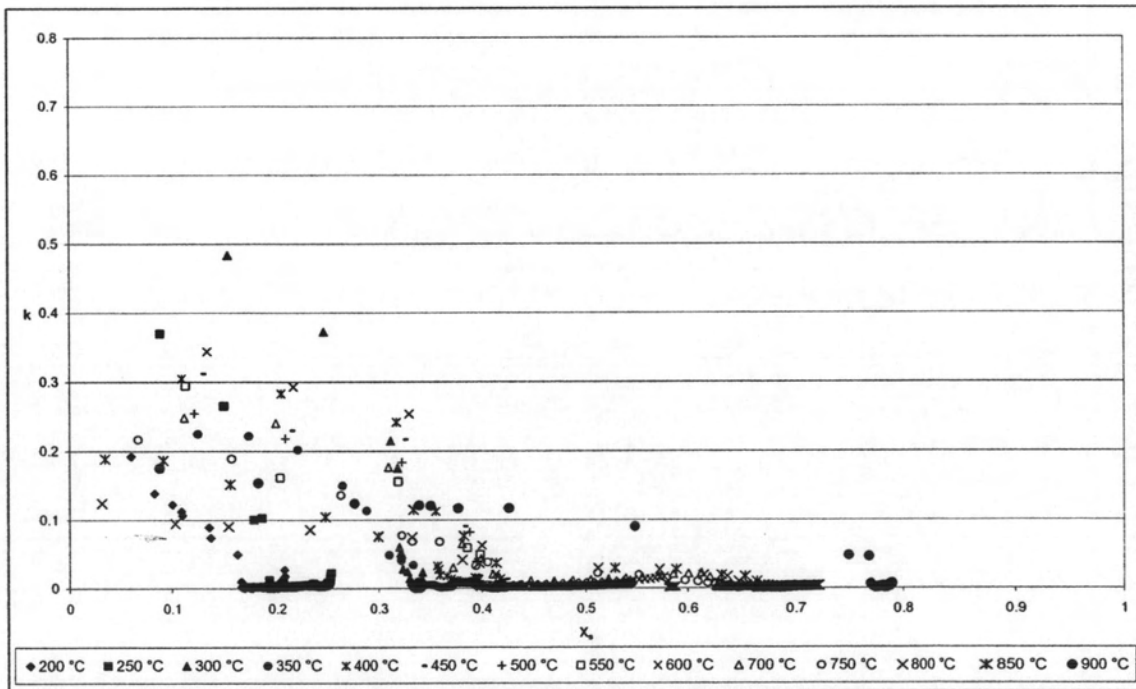
สมการที่ 4.2 และสมการที่ 4.3 เป็นสมการทำนายค่า k ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ตามลำดับ โดยแทนค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งและอุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิสจากค่าที่ได้ในการทดลองลงในสมการดังกล่าว รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 แสดงการพล็อตกราฟระหว่างค่า k ที่คำนวณได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ตามลำดับ



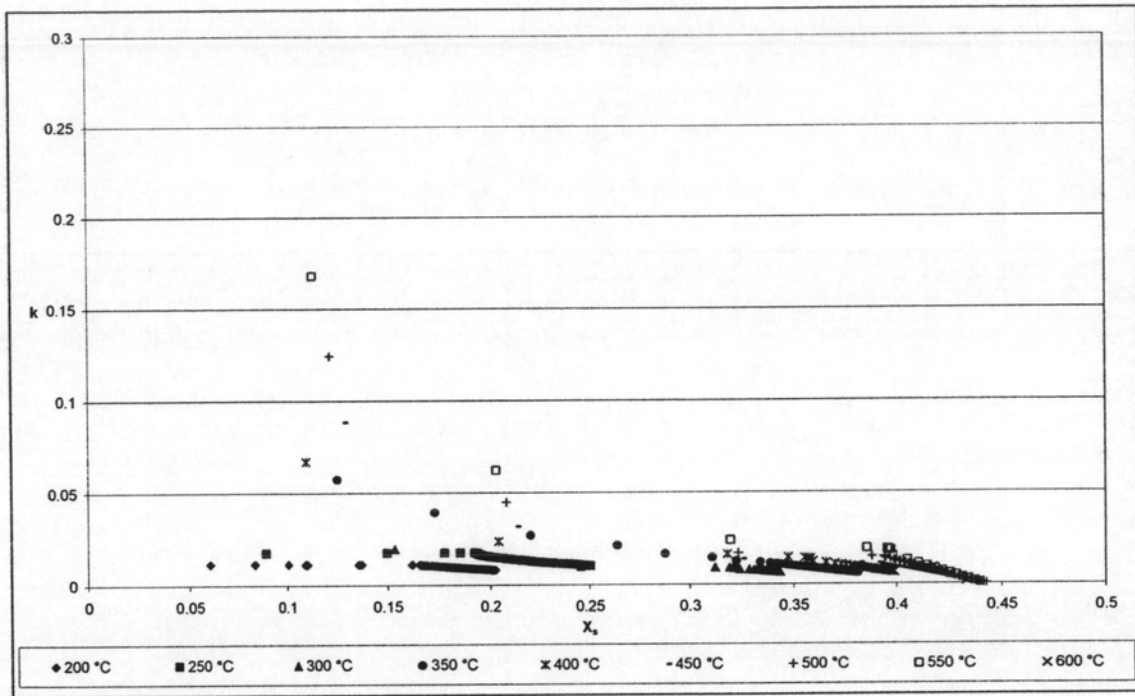
รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1



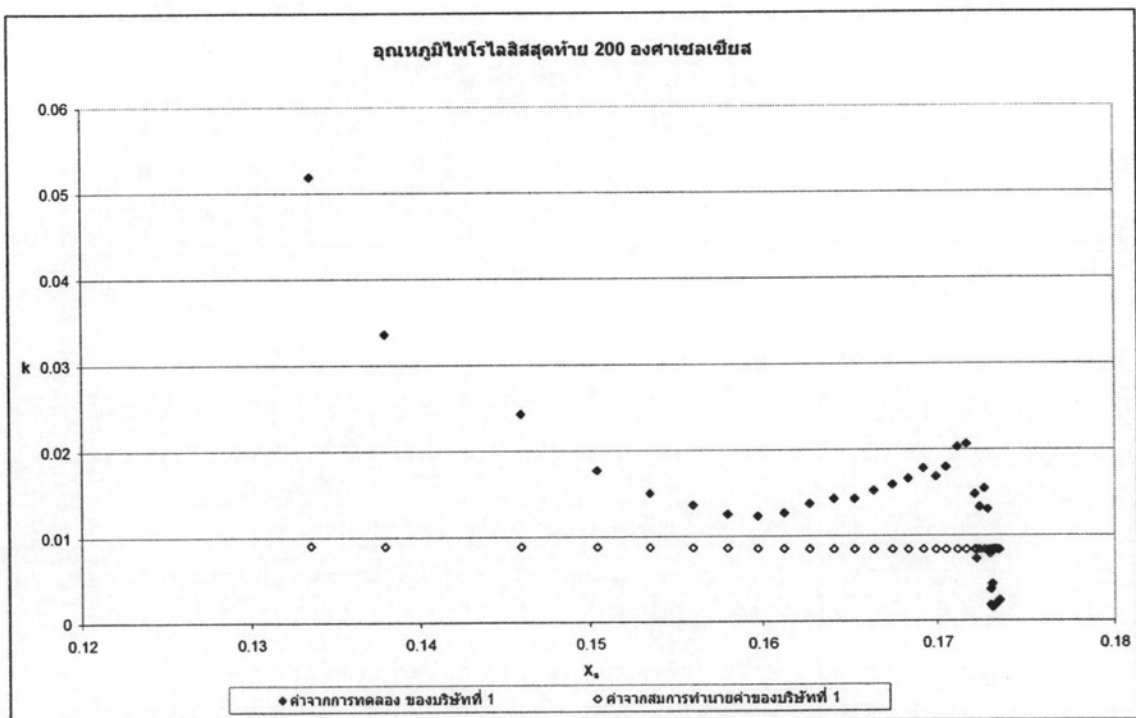
รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนแปลงของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1



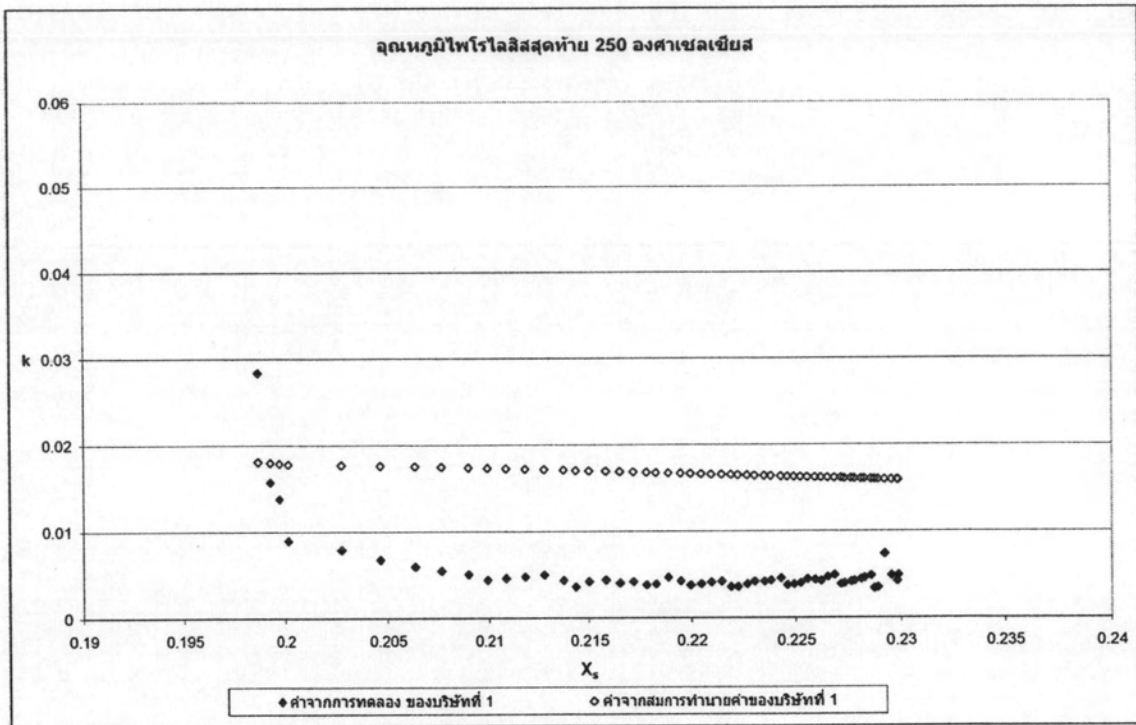
รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าการเปลี่ยนแปลงของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2



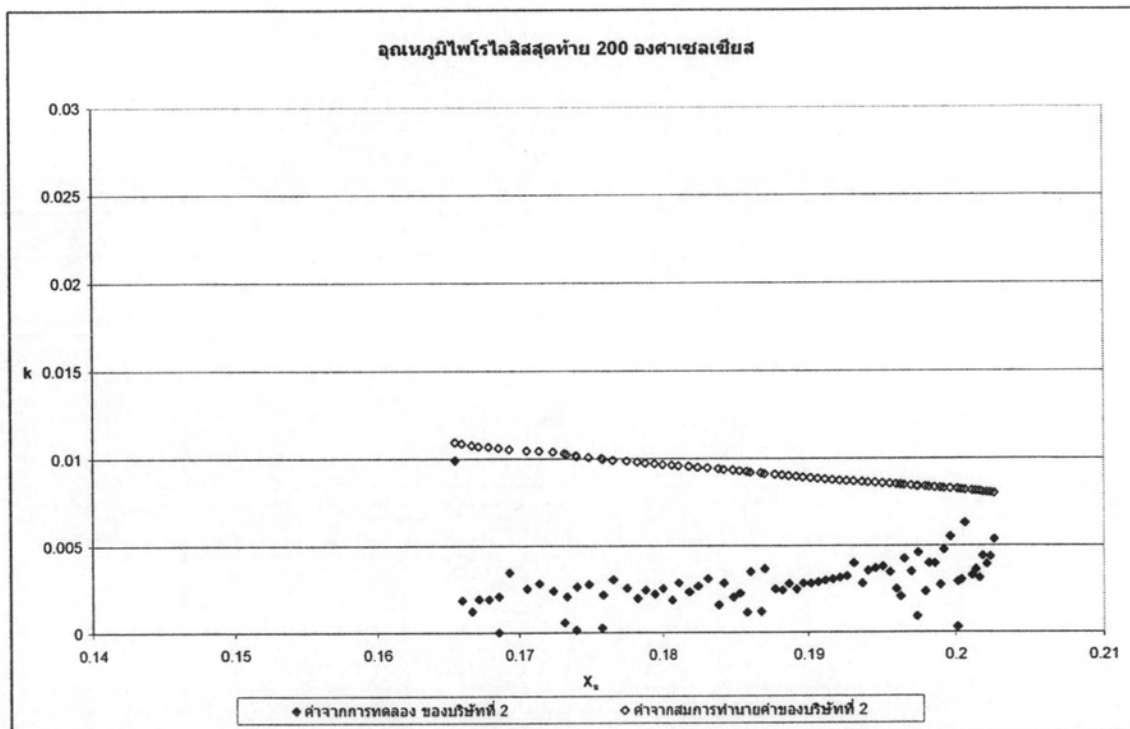
รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2



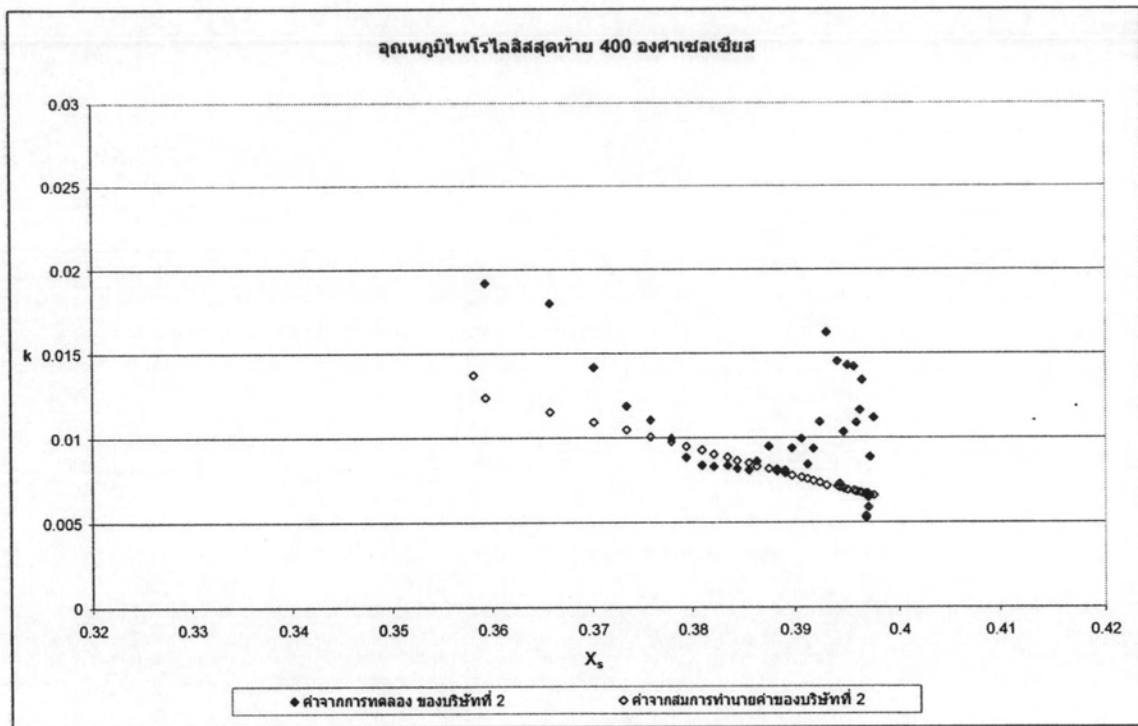
รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1



รูปที่ 4.12 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1



รูปที่ 4.13 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2



รูปที่ 4.14 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนแปลงของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2

จากกราฟหากทำการเปรียบเทียบระหว่างค่า k ที่คำนวณได้จากสมการทำนายค่า และค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลอง พบว่าค่าในช่วงแรกจากสมการทำนายค่ามีแนวโน้มที่ห่างจากค่าจากการทดลอง ช่วงของค่าดังกล่าวนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วเพื่อให้ถึงอุณหภูมิไฟโรไลซิสสุดท้าย ซึ่งจริงๆ แล้วการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลนั้นการทดลองจะทำการใส่ตัวอย่างเมื่อถึงอุณหภูมิไฟโรไลซิสสุดท้าย ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยพิจารณาเฉพาะค่าในช่วงหลังจากการเพิ่มอัตราการให้ความร้อน ซึ่งค่าจากการทำนายค่ามีลักษณะกราฟที่มีแนวโน้มที่ดีกับค่าจากการทดลอง ซึ่งตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 ค่า k จากสมการทำนายค่าต่างกับค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองทุกอุณหภูมิไฟโรไลซิสสุดท้าย แม้ว่าค่าจากการสังเกตที่อุณหภูมิไฟโรไลซิสสุดท้าย 200 และ 250 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 จะมีลักษณะกราฟที่เหมือนจะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.7763 และ 0.5685 ตามลำดับ เป็นค่าที่ต่ำเกินไปที่จะยอมรับได้ ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบของน้ำยางดำที่มีความซับซ้อนทำให้เมื่อเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน จึงมีการสลายตัวของสารหลายชนิดทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ดังจะพิจารณาได้จากรูปที่ 4.15 ซึ่งเป็นกราฟแสดงการสลายตัวของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และรูปที่ 4.17 เป็นกราฟแสดงการสลายตัวของตัวอย่างน้ำยาง

ค่าจากบริษัทที่ 2 โดยที่อุณหภูมิต่ำกว่า 550 องศาเซลเซียสจะเป็นการสลายตัวของสารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำยางดำ และที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียสจะเป็นการสลายตัวของสารอนินทรีย์และนอกจากนี้ลำดับของปฏิกิริยาอาจจะไม่เป็นเป็นลำดับ 1 ตามสมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณค่า k จากสาเหตุนี้ อาจส่งผลให้สมการทำนายค่าให้ผลที่ไม่ดีกับค่าที่ได้จากการทดลอง

ลักษณะของกราฟที่ต่างกันของค่า k ที่ได้จากการทดลองและ k จากสมการทำนายค่าอาจเนื่องมาจากค่า k ที่ได้จากการทดลองคำนวณมาจาก power-law equation ซึ่งเป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณกราฟซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา แต่ค่า k จากสมการทำนายค่าเป็นการคำนวณมาจากการสมมติให้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์กับค่าแฟกเตอร์ความถี่ในสมการการของ Arrhenius มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าการการเปลี่ยนรูปของแข็ง จึงทำให้ลักษณะของกราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งมีลักษณะกราฟคล้ายพาราโบลา แต่กราฟระหว่างค่า k จากสมการทำนายค่ากับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งมีลักษณะเป็นเส้นตรง

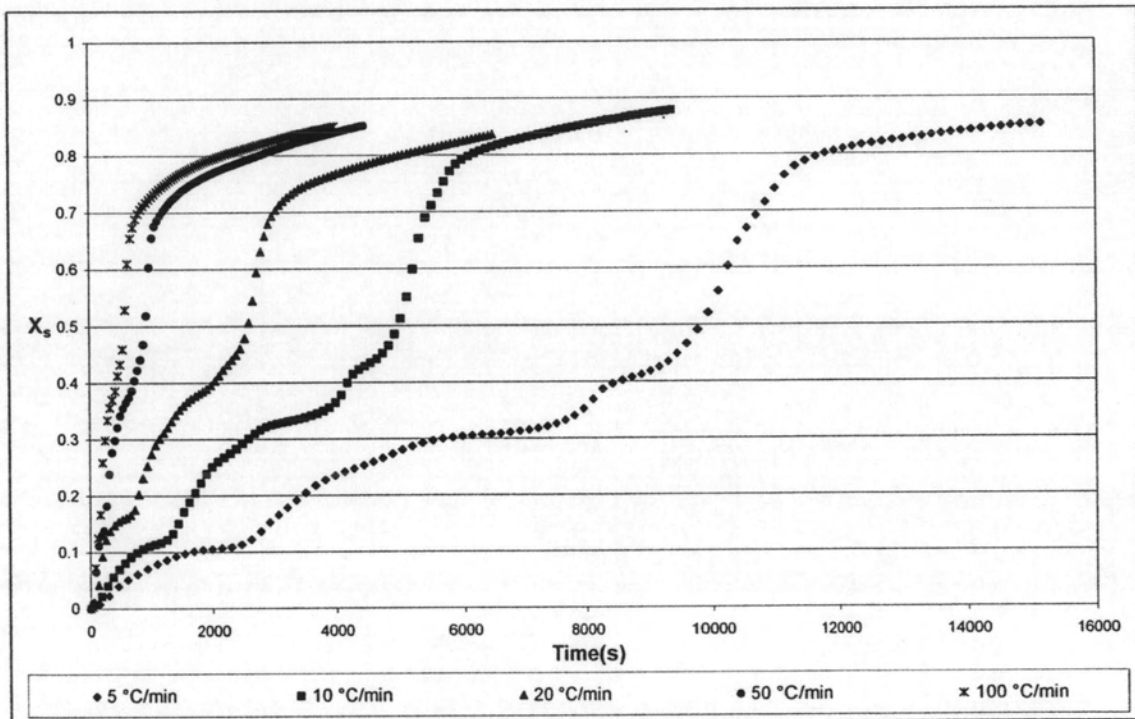
การเปรียบเทียบระหว่างค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า และค่า k ที่ได้จากการทดลองของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 จากการสังเกตพบว่าค่าจากสมการทำนายค่ามีลักษณะของกราฟที่มีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลอง แต่ในช่วงเริ่มแรกของค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งเท่านั้น ซึ่งได้แก่ในช่วงอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้ายตั้งแต่ 200 องศาเซลเซียส จนถึง 450 องศาเซลเซียส โดยแสดงตัวอย่างที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย 200 และ 400 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย 200-450 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.3438, 0.5983, 0.7751, 0.7439, 0.6281 และ 0.4739 ตามลำดับ ซึ่งก็ยังเป็นค่าที่อยู่ในช่วงที่ไม่สามารถยอมรับได้ โดยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่อยู่ระหว่าง 0.9-1 เท่านั้นจึงจะแสดงถึงค่าที่มีความสัมพันธ์ที่ดียอมรับได้

ในการวิจัยก่อนหน้านี้โดย Sánchez และคณะ (2004) ทำการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลที่อุณหภูมิ 200, 225, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส โดยใช้วิธีการหาสมการทำนายค่าวิธีเดียวกันกับการวิจัยนี้ ค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า และค่า k ที่ได้จากการทดลอง เมื่อนำมาพล็อตกราฟกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง พบว่ามีแนวโน้มที่ดีเป็นไปได้ในช่วงอุณหภูมิเหล่านี้คือ 225, 250, 275 และ 300 องศาเซลเซียส แต่ในงานวิจัยนี้ค่า k ที่ได้จากการทดลองกับค่า k จากสมการทำนายค่ากลับให้ผลที่ไม่ดีอย่างในการวิจัยก่อนหน้านี้

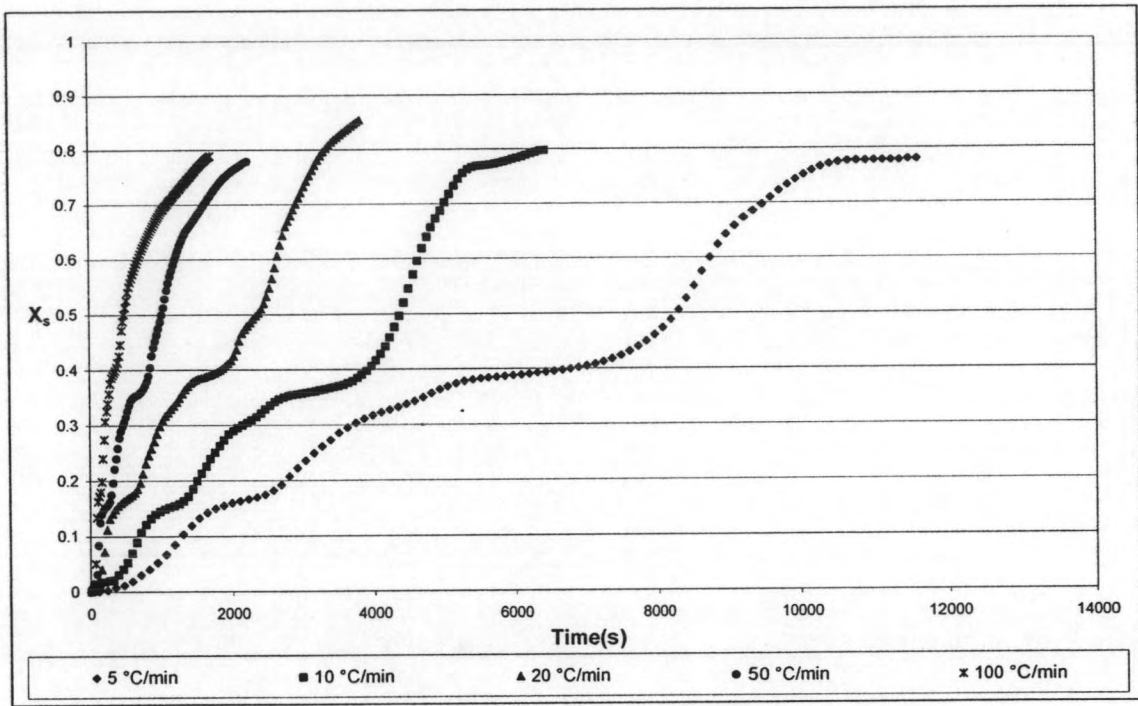
2. ไดนามิค เป็นการทดลองเพื่อพิจารณาผลของตัวแปรที่จะส่งผลต่อการไพโรไลซิส คือ อัตราการให้ความร้อน

ผลการทดลองแบบไดนามิค ซึ่งทำการทดลองที่อัตราการให้ความร้อน 2, 5, 10, 20, 50 และ 100 องศาเซลเซียส/นาที จะได้เป็นกราฟระหว่างค่าของน้ำหนักตัวอย่าง กับ เวลาที่ใช้ใน

การทดลองซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก โดยค่าที่ได้จากการทดลองนี้นำไปคำนวณหาค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง (X_s) เมื่อนำมาพล็อตกราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลอง จะได้กราฟของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัท 1 แสดงได้ดังรูปที่ 4.15 และตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัท 2 แสดงได้ดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.15 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลองจากผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 1



รูปที่ 4.16 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลองจากผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 2

จากข้อมูลและค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลองแบบไดนามิก โดยใช้ข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที กับที่ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที เพื่อที่จะลดความแตกต่างระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลองและค่าจากการคำนวณ (Sánchez และคณะ 2004) พร้อมทั้งใช้ค่าพารามิเตอร์ P_1 , P_2 , P_3 และ P_4 ของการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล นำค่าทั้งหมดไปใช้ในการคำนวณหาค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$ จากสมการ

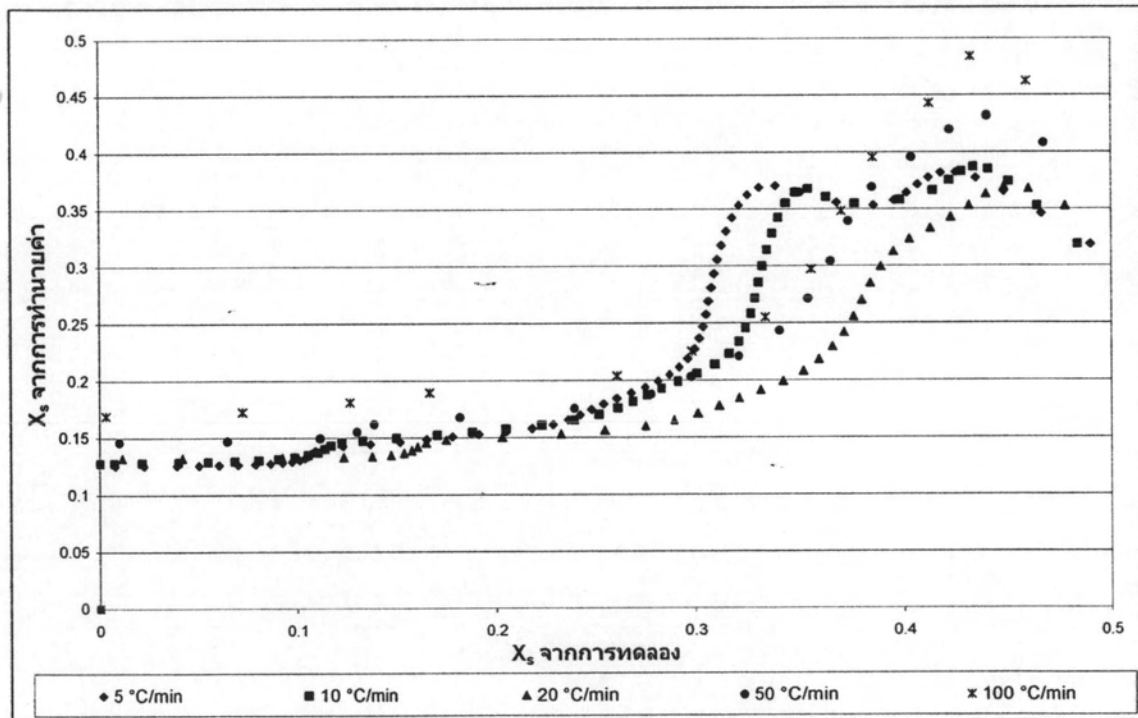
$$\left(\frac{dX_s}{dt}\right)_\beta = (P_1 + P_2 X_s) e^{-(P_3 + P_4 X_s)/T} (A_s - X_s) + \left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t \beta \quad \text{ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 ซึ่ง}$$

จะได้ค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

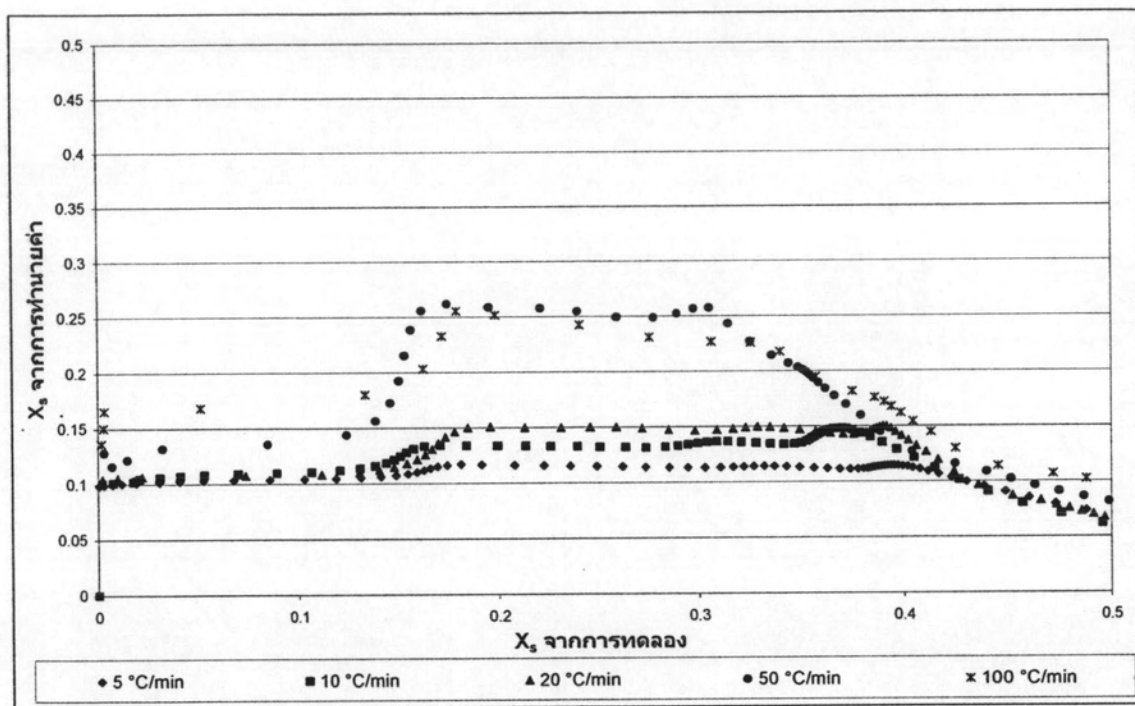
ตารางที่ 4.4 ค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$ ที่คำนวณได้ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2

ตัวอย่าง	ค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$
บริษัทที่ 1	0.00045
บริษัทที่ 2	0.00035

โดยการใช้ค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$ ที่คำนวณมาได้ และทำการอินทิเกรต (Integrate) สมการ $\left(\frac{dX_s}{dt}\right)_\beta = (P_1 + P_2 X_s) e^{-(P_3 + P_4 X_s)/T} (A_s - X_s) + \left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t \beta$ จะได้ค่าของ X_s ไปใช้เปรียบเทียบกับค่าของการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง ซึ่งกราฟที่ 4.17 และกราฟที่ 4.18 แสดงการเปรียบเทียบค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากสมการ กับ ค่าของการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลองของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง ของผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 1



รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง ของผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 2

จากกราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลองของผลการทดลองแบบไดนามิกในรูปที่ 4.17 และในรูปที่ 4.18 พบว่าค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากสมการทำนายค่าที่อัตราการให้ความร้อน 50 และ 100 องศาเซลเซียสต่อนาที จะมีค่าสูงกว่าที่อัตราการให้ความร้อนอื่นๆ ในช่วงแรกเนื่องจากเกิดการสลายตัวเร็วกว่าที่อัตราการให้ความร้อนอื่นๆ แต่หลังจากนั้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนอื่นๆ เกิดการสลายตัวก็จะทำให้ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการสังเกตพบว่าค่าจากสมการทำนายค่าน่าจะให้ค่าที่มีลักษณะความสัมพันธ์ที่ดีกับค่าจากการทดลอง ซึ่งมีค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองแบบไดนามิกอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 พิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอย (Linear regression coefficient) เนื่องจากในสมมติฐานได้กำหนดให้ค่าพลังงานก่อกัมมันต์กับค่าแฟกเตอร์ความถี่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลอง ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณหาค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่าจึงต้องทำการหาความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองและค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่า ซึ่งถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอยมีค่าเข้าใกล้ 0 จะหมายความว่าค่าจากสมการทำนายค่าจะให้ค่าที่มีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงที่น้อยกว่ากับค่าจากการทดลอง ในทางตรงกันข้ามถ้าค่า

สัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอยมีค่าเข้าใกล้ 1 จะหมายความว่าค่าจากสมการทำนายค่าจะให้ค่าที่มีความสัมพันธ์ในเชิงเส้นตรงที่ดีกับค่าจากการทดลอง ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอยมีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.7 จะหมายความว่าค่าจากสมการทำนายค่ากับค่าจากการทดลองจะมีความสัมพันธ์กันปานกลาง โดยที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.7989 ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.8026 ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.8249 ที่อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.7795 และที่อัตราการให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.7397 สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 จากการสังเกตพบว่าค่าจากสมการทำนายค่าน่าจะให้ค่าที่มีความสัมพันธ์ที่ดีค่าการการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองแบบไดนามิกอยู่ระหว่าง 0.1-0.3 โดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอย ซึ่งที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.7161 ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.8236 ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.7344 ที่อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.7220 และที่อัตราการให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสต่อนาที มีค่า 0.7224 ซึ่งจากค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอยสรุปได้ว่าค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการสมการทำนายค่ามีความสัมพันธ์ในลักษณะเส้นตรงกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองในระดับน้อยจนถึงปานกลาง

ถ้าพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่า โดยของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 แสดงดังตารางที่ 4.5 และของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.6 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 สำหรับที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่ากับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองที่อยู่ในช่วงค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งตั้งแต่ 0.1-0.3 จะให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ยอมรับได้คือมีค่ามากกว่า 0.9 ซึ่งหมายถึงค่าจากสมการทำนายค่าจะให้แนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับค่าจากการทดลองคือเมื่อค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองเพิ่มขึ้นค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน แต่สังเกตได้ว่าหลังจากช่วงค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งตั้งแต่ 0.35 ขึ้นไปค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าติดลบ ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการนั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางตรงกันข้ามกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองคือ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้นขณะการสลายตัวของตัวอย่างน้ำยางดำกำลังดำเนินไป แต่ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่ากลับมีค่าลดลงโดยอาจพิจารณาได้จากรูปที่ 4.17 ทั้งนี้สาเหตุอาจจะเกิดจากสมการทำนายค่าที่มีฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วทำให้ค่าที่ติดลบและทำ

P_1, P_2, P_3 และ P_4 ที่มาจากการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล เนื่องจากในการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ก็ทำให้สมการทำนายค่าไม่อยู่ในช่วงที่มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ยอมรับได้กับค่าจากการทดลองดังนั้นจึงอาจจะมีผลต่อการคำนวณสมการทำนายค่าของการทดลองแบบไดนามิคด้วยเช่นกัน ซึ่งหลังจากช่วงค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งตั้งแต่ 0.2 ขึ้นไปค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จะมีค่าติดลบ โดยอาจจะสังเกตได้จากรูปที่ 4.18 ที่ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากการทดลองมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่ากลับมีค่าลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากสมการทำนายค่าที่มีฟังก์ชันเอกซโพเนนเชียล ทำให้เมื่อคำนวณแล้วทำให้ค่าที่ติดลบเช่นเดียวกับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1

ตารางที่ 4.5 ช่วงของค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการทดลองแบบไดนามิคของบริษัทที่ 1

อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์				
	5	10	20	50	100
ช่วงของค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง					
0-0.1	0.862	0.890			
0-0.15			0.788	0.823	0.961
0.1-0.15	0.987	0.926			
0.15-0.2	0.999	0.997	0.867	0.999	
0.15-0.3					0.944
0.2-0.25	0.968	0.983			
0.2-0.3			0.959	0.976	
0.25-0.3	0.964	0.999			
0.3-0.35	0.854	0.964	0.999	0.983	0.973
0.35-0.4	-0.158	-0.834	0.991	0.979	0.985
0.4-0.5	-0.8252	-0.662			-0.786
0.4-0.45			0.998	0.981	
0.45-0.5			-0.980	-0.944	

ตารางที่ 4.6 ช่วงของค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากการทดลองแบบไดนามิกของบริษัทที่ 2

อัตราการให้ความร้อน (องศาเซลเซียสต่อนาที)	สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์				
	5	10	20	50	100
ช่วงของค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง					
0-0.1	0.939	0.941	0.904		
0-0.15				0.880	0.894
0.1-0.15	0.958	0.918	0.935		
0.15-0.2	0.999	0.999	0.951	-0.937	0.995
0.15-0.3					
0.2-0.25	-0.998	-0.966	-0.592	-0.888	
0.2-0.3					-0.991
0.25-0.3	-0.972	-0.729	-0.939		

4.2.2 ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส

จากการทดลองจะได้ TGA เทอร์โมแกรม และ DTA เทอร์โมแกรม ตามรูปที่ 4.21 และ 4.23 สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 รูปที่ 4.22 และ 4.24 สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2

เนื่องจากการทดลองวิเคราะห์ด้วยความร้อนโดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกทั้งการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลและการทดลองแบบไดนามิก ให้สมการทำนายค่าที่ไม่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากผลการทดลอง ซึ่งผู้วิจัยคาดว่าน่าจะมาจากการที่น้ำยางดำมีองค์ประกอบที่ซับซ้อน ซึ่งจากการพิจารณา TGA เทอร์โมแกรมที่ได้จากการทดลองดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส โดยพิจารณาจากกราฟของ DTG ซึ่งแสดงได้ถึงช่วงที่มีอัตราการสูญเสียน้ำหนักที่อุณหภูมิต่างๆ หรือเกิดการสลายตัวด้วยความร้อน โดยกราฟ DTG ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 มีแนวโน้มในทางเดียวกันคือ มีจุดสูงสุดของกราฟ 4 จุด แบ่งออกเป็น 5 ช่วงของขั้นการสลายตัวด้วยความร้อน ดังนี้ ขั้นแรกเริ่มที่อุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองถึงที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และที่ 195 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 10.31 และ 9.74 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของน้ำที่เกิดการระเหยออกไป

ขั้นที่สองตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 170-385 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และที่ 195-387 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 คิดเป็นปริมาณของ

น้ำหนักที่หายไป 15.92 และ 14.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขั้นที่สามตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 385-535 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และที่ 387 - 535 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 6.40 และ 11.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ น้ำหนักที่หายไปในช่วงที่ 2 และช่วงที่ 3 นี้ส่วนใหญ่เกิดจากการสลายตัวของพวกสารประกอบอินทรีย์ โดยที่อุณหภูมิ 200-260 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิสำหรับการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส (Gea, Murillo และ Arauso, 2002) ที่ 200-300 องศาเซลเซียส สำหรับการสลายตัวของพวก carboxylic acids และที่ 280-500 องศาเซลเซียส สำหรับลิกนิน, เรซิน (Nassar, 2003), (Alen, Ryttonen และ McKeough, 1995)

ขั้นที่สี่ตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 535-770 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และที่ 535-823 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 คิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 9.07 และ 19.90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ขั้นที่ 5 ขั้นสุดท้ายน้ำหนักจะหายไปมากที่สุดคือตั้งแต่ช่วงอุณหภูมิ 770-1000 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และที่ 823-1000 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 โดยจะคิดเป็นปริมาณของน้ำหนักที่หายไป 37.83 และ 27.84 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ การสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 550 องศาเซลเซียส จะเป็นการสลายตัวของพวกสารอินทรีย์ (Sánchez และคณะ 2004) เช่น สารประกอบอัลคาไลน์ เกลือของโซเดียม ส่วนน้ำหนักที่เหลือจากนี้ส่วนใหญ่จะเป็นชาร์ซึ่งมาจากการสลายตัวของลิกนิน

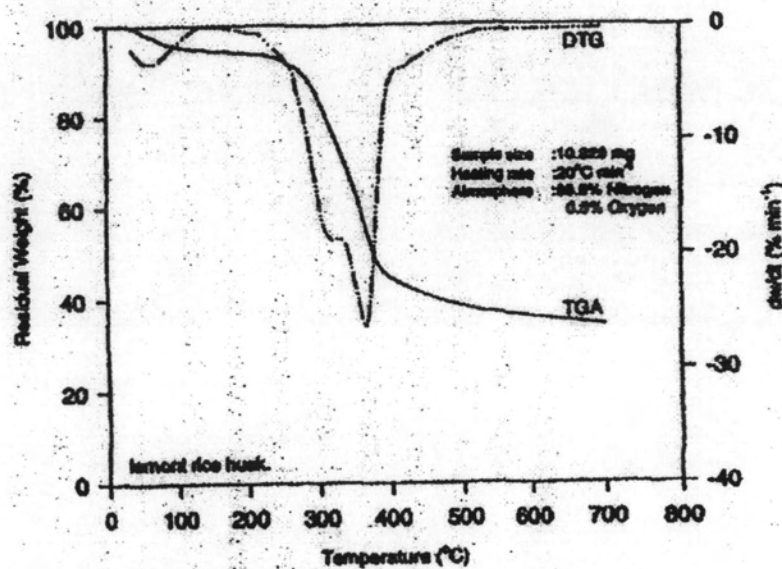
ตารางที่ 4.7 การสลายตัวด้วยความร้อนจากงานวิจัยอื่น

ตัวอย่างในการทดลอง	น้ำยางดำในงานวิจัยนี้	เกลบ (Rice Husk) ^[1]	น้ำยางดำวัตถุดิบจากชานอ้อย ^[2]
การสลายตัว	5 ช่วง	2 ช่วง	4 ช่วง
ช่วงอุณหภูมิในการสลายตัว	ช่วงที่ 1 25-180 °C ช่วงที่ 2 180-387 °C ช่วงที่ 3 385-535 °C ช่วงที่ 4 535-823 °C ช่วงที่ 4 823-1000 °C	ช่วงที่ 1 220-370 °C ช่วงที่ 2 370-550 °C	ช่วงที่ 1 70-269 °C ช่วงที่ 2 269-673 °C ช่วงที่ 3 673-800 °C ช่วงที่ 4 800-1000 °C

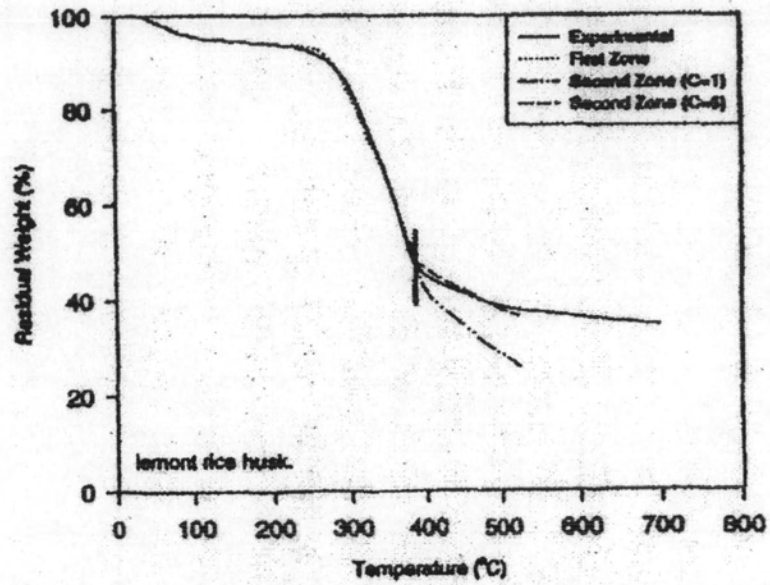
[1] Mansaray และ Ghaly, 1999

[2] Nassar, 2003

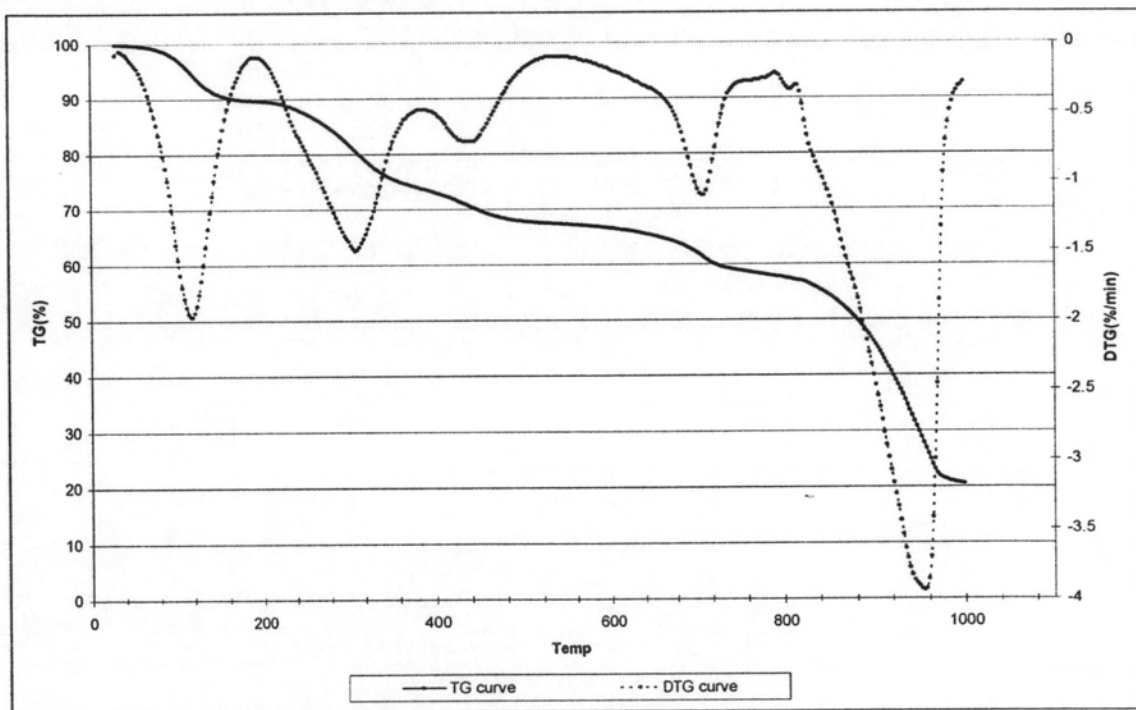
จากตารางที่ 4.7 จะเห็นว่าการสลายตัวด้วยความร้อนจากตัวอย่างที่ทำการทดลองแต่ละชนิดจะมีช่วงของการสลายตัวที่ต่างกัน ซึ่งตัวอย่างที่เป็นชนิดเดียว เช่น แกลบ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 จะมีการสลายตัวที่ไม่ซับซ้อนคือมีการสลายตัวเพียง 2 ช่วง เมื่อทำการทดลองเพื่อหาสมการทำนายค่า พบว่าค่าที่ได้จากสมการทำนายค่าจะให้ผลที่ใกล้เคียงกับค่าจากการทดลองที่ดีดังแสดงในรูปที่ 4.20 มากกว่าตัวอย่างที่มีความซับซ้อนขององค์ประกอบ เช่น น้ำยางดำซึ่งมีที่มาจากกระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ มีองค์ประกอบที่เกิดจากสารเคมีหลายชนิดเมื่อรวมกับองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษแล้ว จึงทำให้มีความซับซ้อนขององค์ประกอบมากขึ้น ยากต่อการสร้างสมการทำนายค่าที่จะสามารถให้ผลที่ดีได้



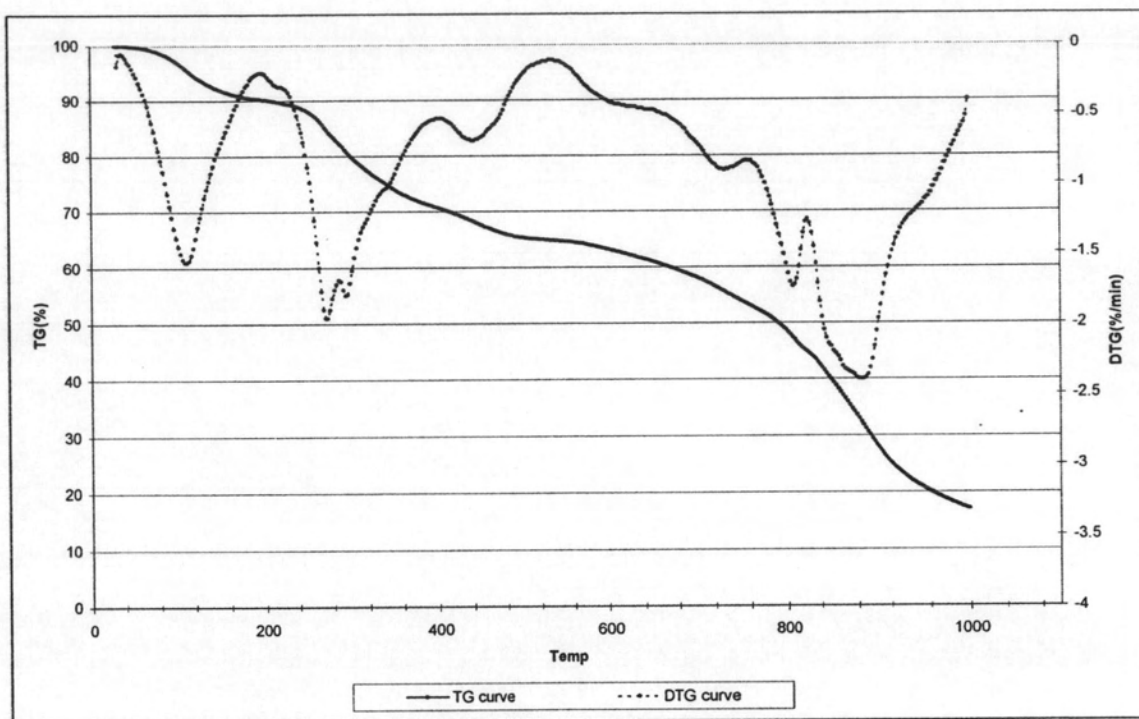
รูปที่ 4.19 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมจากงานวิจัยของ Mansaray และ Ghaly, 1999



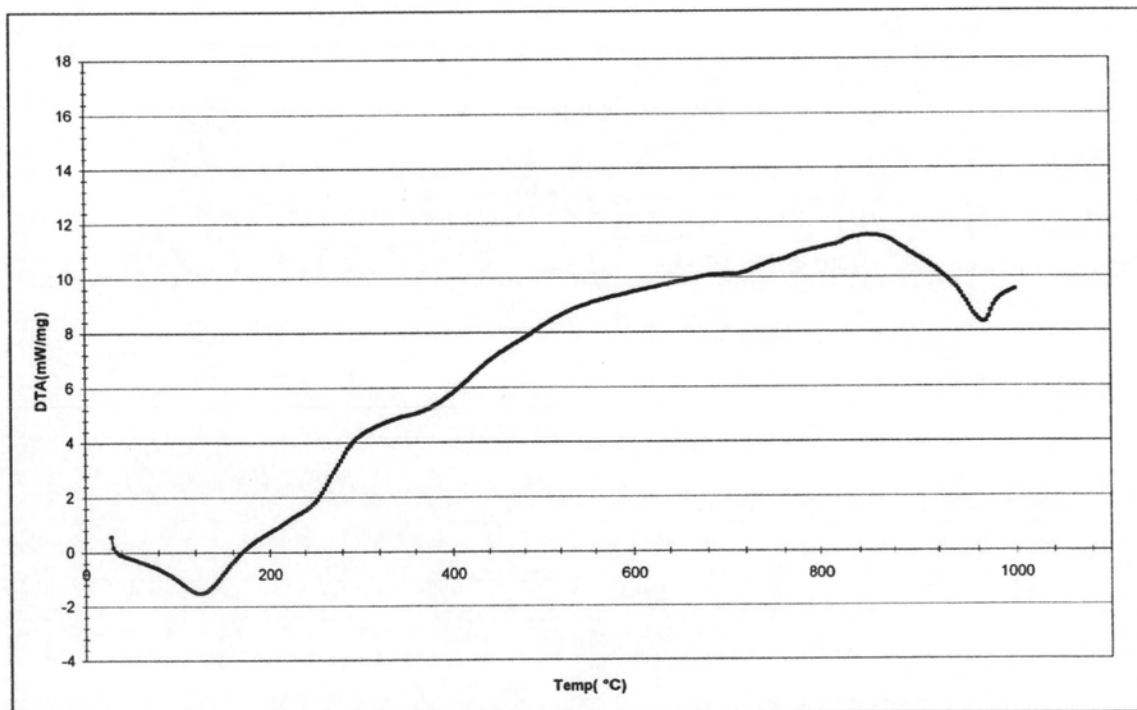
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าจากสมการทำนายค่าของงานวิจัยโดย Mansaray และ Ghaly, 1999



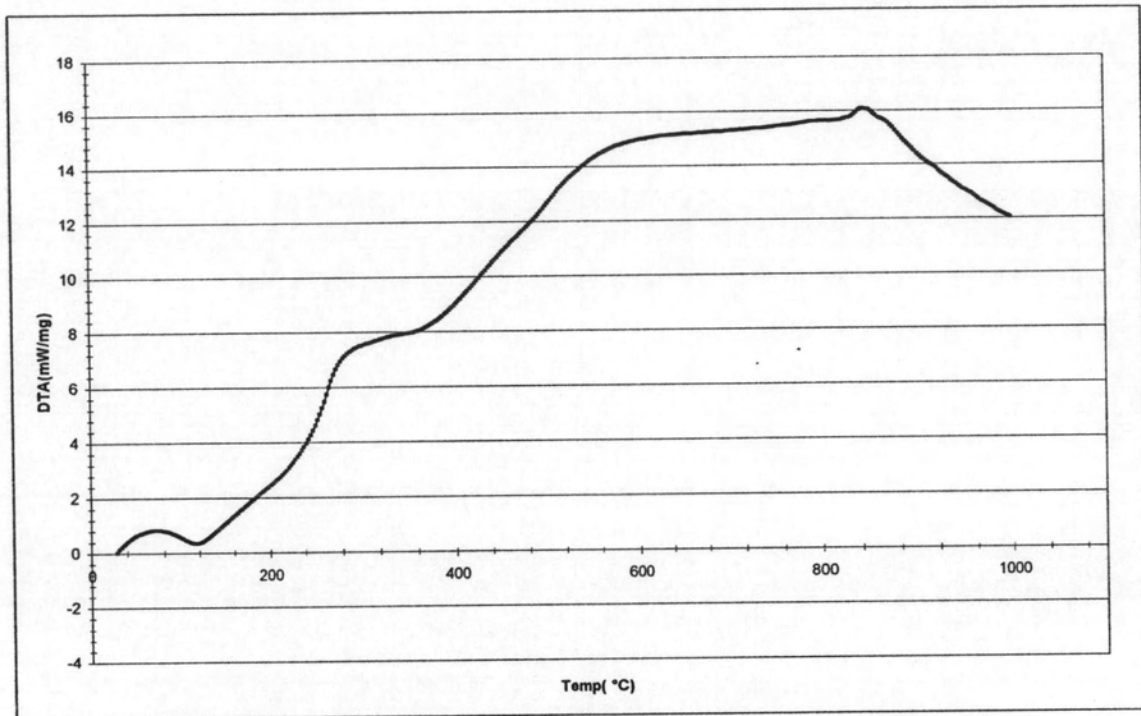
รูปที่ 4.21 TGA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1



รูปที่ 4.22 TGA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2



รูปที่ 4.23 DTA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัท 1



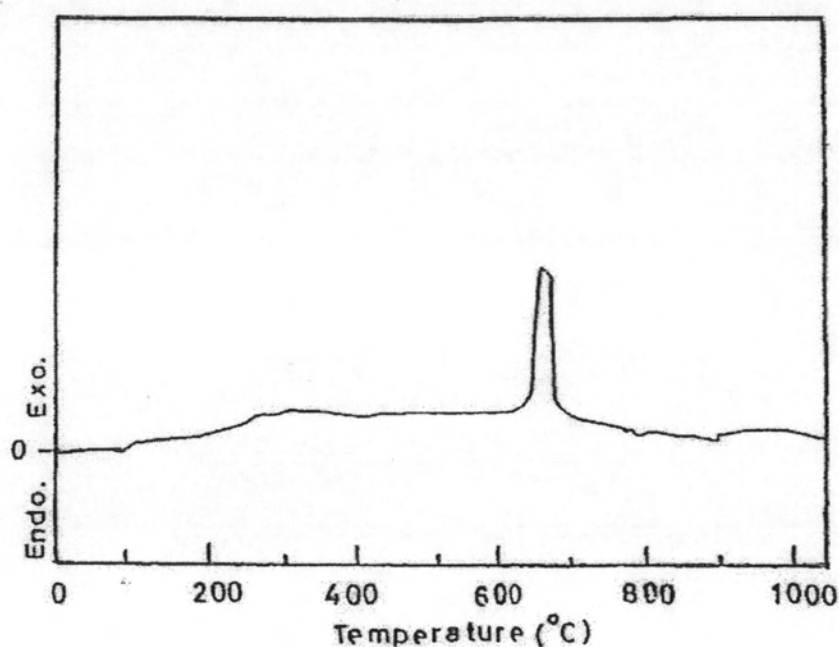
รูปที่ 4.24 DTA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2

จาก DTA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 พบว่าปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนมากจะเป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก ซึ่งเมื่อพิจารณาจากปฏิกิริยาเผาไหม้พื้นฐานในตารางที่ 2.4 ก็พบว่าปฏิกิริยาส่วนใหญ่เป็นปฏิกิริยาคายพลังงานความร้อนออกสู่ภายนอก และจะให้ค่าพลังงานมากกว่าปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนจากภายนอก จึงทำให้ DTA เทอร์โมแกรมที่ได้มีค่าที่สูง โดยปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนจากภายนอกที่อุณหภูมิ 128.5 องศาเซลเซียส ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และที่อุณหภูมิ 116.7 องศาเซลเซียส ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 เป็นการดูดพลังงานความร้อนเนื่องจากความชื้นระเหยออกไป ส่วนปฏิกิริยาดูดพลังงานความร้อนจากภายนอกที่อุณหภูมิ 250.9, 366.3 และที่อุณหภูมิ 241.3, 373.8 องศาเซลเซียส ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2 ตามลำดับ น่าจะมาจากปฏิกิริยานูดอาร์ด (Boudouard Reaction) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาพื้นฐานของการผลิตโปรดิวเซอร์ก๊าซ โดยคาร์บอนไดออกไซด์จะทำปฏิกิริยากับคาร์บอนที่มากเกินไป (Excess Carbon) ในอนุภาคของแข็งที่เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสเป็นคาร์บอนมอนอกไซด์

การคำนวณหาค่าจลนพลศาสตร์จาก DTA เทอร์โมแกรม สามารถคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้จากสมการที่ 4.4 ดังนี้ (Nassar, 2003)

$$\ln\left(-\frac{dw}{dt}\right) = \ln A - \frac{E}{RT} \quad (4.4)$$

แต่เนื่องจาก DTA เทอร์โมแกรมที่ได้จากการวิจัยนี้มีความแตกต่างจากการวิจัยโดย Nassar 2003 :ซึ่งมีลักษณะของ DTA เทอร์โมแกรมดังรูปที่ 4.25 มีจุดสูงสุดของกราฟที่ชัดเจนสามารถแบ่งได้เป็นสองช่วงคือ ช่วง Volatilization stage และ Decarbonization stage และใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้ แต่จากรูปที่ 4.23 และรูปที่ 4.24 ซึ่งเป็น DTA เทอร์โมแกรมของตัวอย่างน้ำยางดำบริษัทที่ 1. และบริษัทที่ 2 ไม่สามารถบ่งบอกจุดสูงสุดของกราฟที่ชัดเจนได้ ทำให้ไม่สามารถนำ DTA เทอร์โมแกรมของงานวิจัยนี้มาใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้



รูปที่ 4.25 DTA เทอร์โมแกรมจากการทดลองโดย Nassar 2003

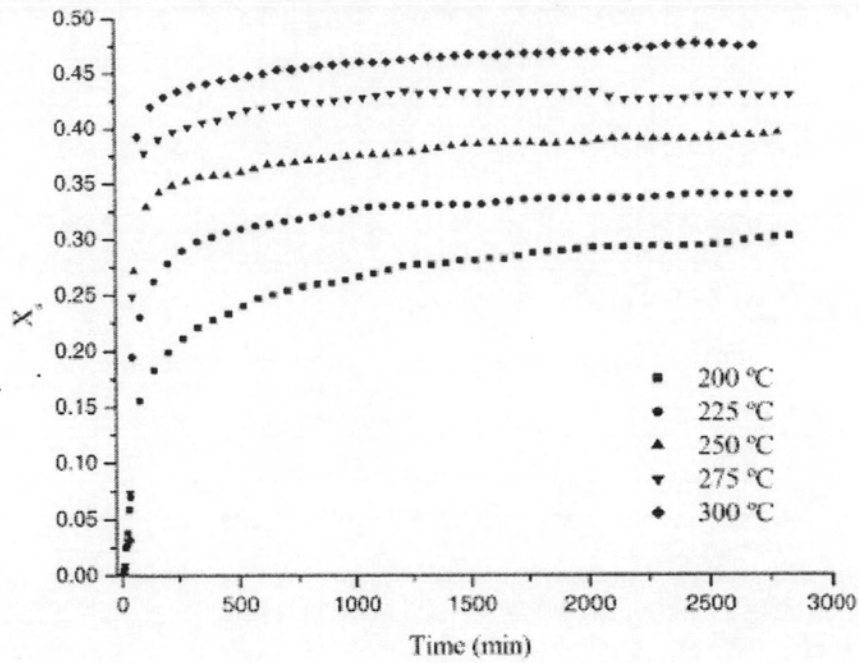
การเปรียบเทียบระหว่างงานวิจัยนี้ที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษที่ต่างกันคือจาก ยูคาลิปตัส และไม้ไผ่ กับงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004 ซึ่งใช้วัตถุดิบจากฟางข้าว แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 จากการเปรียบเทียบลักษณะของกราฟระหว่างการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลา ซึ่งเกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อนด้วยของตัวอย่างน้ำยางดำ พบว่ามีลักษณะของกราฟที่มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน คือ การเปลี่ยนรูปของแข็งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสุดท้ายในการไพโรไลซิส

สำหรับการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล และเพิ่มขึ้นตามอัตราการให้ความร้อนสำหรับการทดลองแบบไดนามิก ดังรูปที่ 4.26 และรูปที่ 4.27

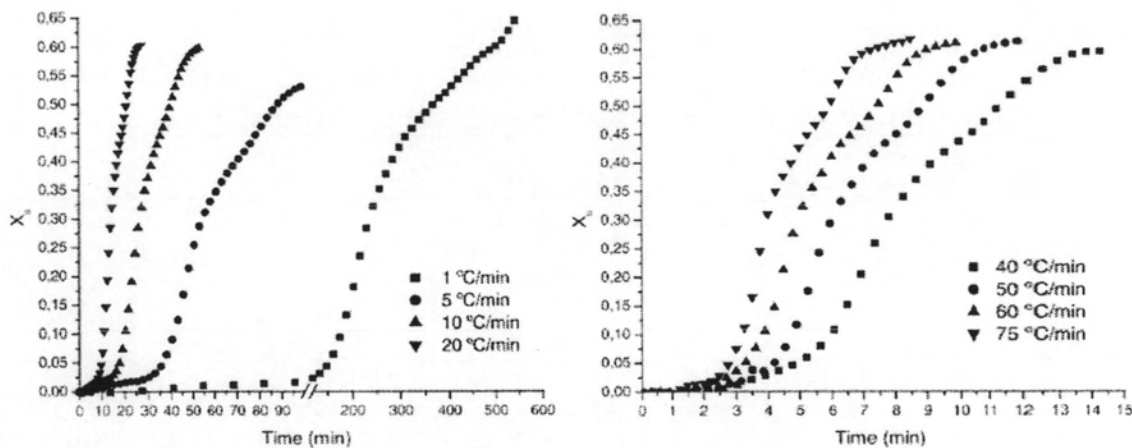
ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบการสลายตัวด้วยความร้อนของตัวอย่างน้ำอย่างดำที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตต่างกัน

ชนิดของวัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษ	ยูคาลิปตัส	ไม้ไผ่	ฟางข้าว ⁽¹⁾
ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง - การทดลองแบบไอโซเทอร์มอล (°C)	200 - 900	200 - 900	200 - 300
อัตราการให้ความร้อน - การทดลองแบบไดนามิก (°C/min)	5, 10, 20, 50 และ 100	5, 10, 20, 50 และ 100	1, 5, 10, 20, 40, 50, 60 และ 75
ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล			
- P ₁	112.69 min ⁻¹	8.32 min ⁻¹	4.8 * 10 ¹¹ min ⁻¹
- P ₂	-107.65 min ⁻¹	-41.23 min ⁻¹	-1.11*10 ¹² min ⁻¹
- P ₃	3957.89 K	2877.29 K	17820 K
- P ₄	2376.26 K	2638.72 K	6510 K
ค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$ ที่คำนวณได้จากการทดลองแบบไดนามิก	0.00045	0.00035	0.0023

[1] Sánchez และคณะ, 2004

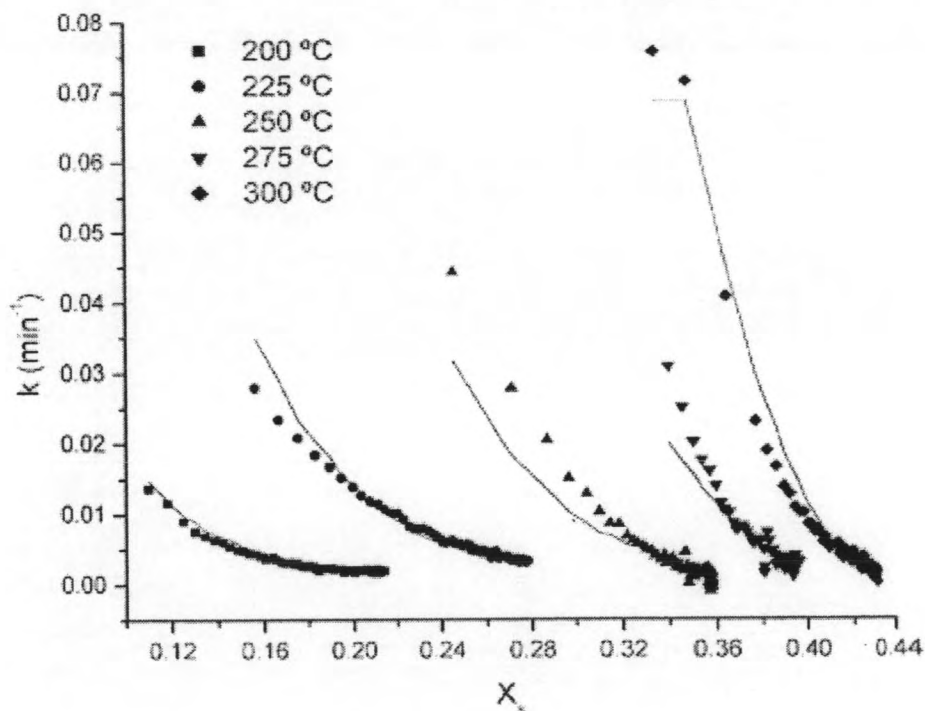


รูปที่ 4.26 ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลา สำหรับการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของงานวิจัย โดย Sánchez และคณะ, 2004

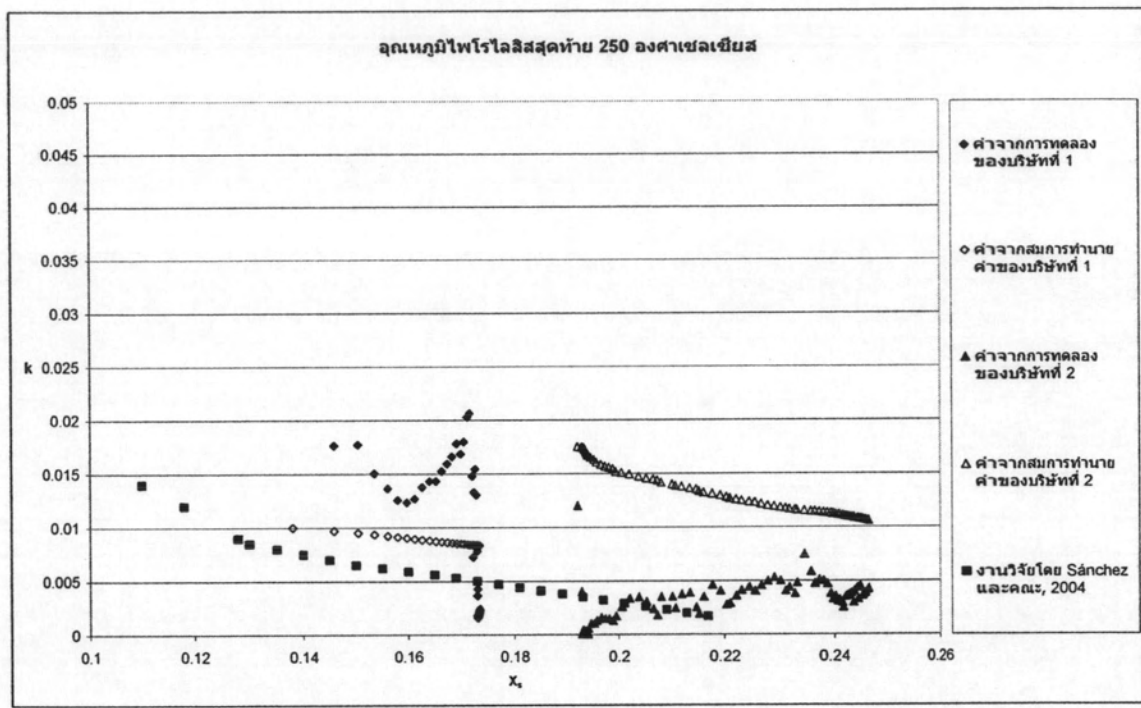


รูปที่ 4.27 ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลา สำหรับการทดลองแบบไดนามิกของงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004

จากการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล แม้ว่าค่าพารามิเตอร์ P_1 , P_2 , P_3 และ P_4 ที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้จะมีค่าต่างกันมาก กับงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004 ดังแสดงในตารางที่ 4.8 แต่เมื่อนำไปใช้ในสมการทำนายค่า k พบว่าค่า k ที่คำนวณได้จากสมการทำนายค่ามีลักษณะแนวโน้มเช่นเดียวกับในงานวิจัยของ Sánchez และคณะ, 2004 ดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 คือค่า k ที่ได้จะมีค่าสูงในช่วงแรกและจากนั้นจะลดลงจนใกล้กับศูนย์เมื่อการทดลองดำเนินไป และมีลักษณะของกราฟเป็นแบบเส้นตรง ซึ่งค่า k จากสมการทำนายค่าโดยงานวิจัยของ Sánchez และคณะ, 2004 จะให้ผลที่ดีกับค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองสำหรับช่วงของอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้ายที่ไม่เกิน 500 องศาเซลเซียส จากนั้นความเบี่ยงเบนจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย ซึ่งต่างจากงานวิจัยนี้ที่ค่า k จากสมการทำนายค่าให้ผลที่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า k จากการทดลอง โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แล้วพบว่ามีความแตกต่างกันมาก โดยงานวิจัยนี้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.85 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ในระดับไม่สามารถยอมรับได้ แต่ในงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของแต่ละอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้ายนั้นมีค่าเกิน 0.9 ทั้งหมด ซึ่งเป็นค่าที่ยอมรับได้

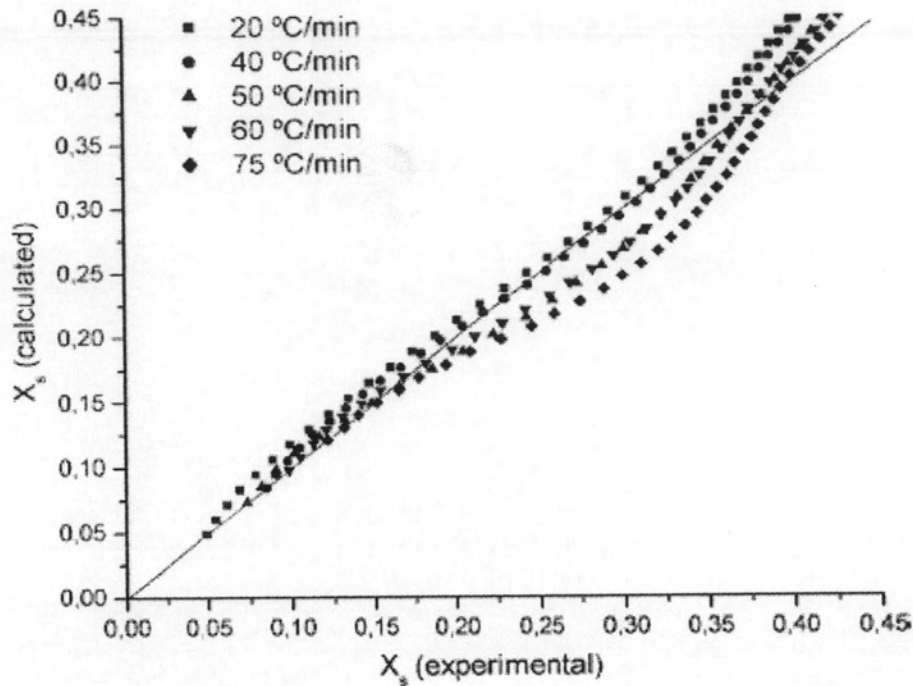


รูปที่ 4.28 กราฟผลการทดลองระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง และค่า k จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004



รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง และค่า k จากสมการทำนายค่า กับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004

การทดลองแบบไดนามิกค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$ ที่คำนวณได้ในงานวิจัยนี้ก็มีค่าต่างจากงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004 ดังแสดงในตารางที่ 4.5 แต่เมื่อนำไปใช้ในการคำนวณค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่าแล้วนำมาพล็อตกราฟกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง พบว่ากราฟจากงานวิจัยนี้ในรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอยระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่ากับค่าจากการทดลอง อยู่ระหว่าง 0.75-0.85 ซึ่งมีความสัมพันธ์อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง เปรียบเทียบกับงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004 ในรูปที่ 4.30 ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเป็นเส้นตรงถดถอยอยู่ระหว่าง 0.8-0.95



รูปที่ 4.30 กราฟผลการทดลองระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง และค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่าจากงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองนี้ พบว่าน้ำยางดำที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตที่ต่างกันจะมีองค์ประกอบของน้ำยางดำที่ต่างกันแต่ในปริมาณที่ไม่มากนัก เมื่อพิจารณาการสลายตัวด้วยความร้อนจากการไพโรไลซิส ลักษณะกราฟของการสลายตัวที่ได้จะมีแนวโน้มคล้ายกันคือ การสลายตัวจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้ายสำหรับการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล และเพิ่มขึ้นตามอัตราการให้ความร้อนสำหรับการทดลองแบบไดนามิก สำหรับค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองในช่วงแรกจะมีค่าสูงและจะลดลงเรื่อยๆ ขณะที่การทดลองดำเนินไป การเปรียบเทียบระหว่างค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่ากับค่า k จากการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล พบว่าสมการทำนายค่า k ให้ค่าที่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า k ที่ได้จากการทดลองทั้งตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ส่วนการเปรียบเทียบระหว่างสมการทำนายค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลองแบบไดนามิก พบว่าสำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 สมการทำนายค่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ยอมรับได้ในช่วงการเปลี่ยนรูปของแข็งตั้งแต่เริ่มการสลายตัวจนถึงการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ 0.45 และอยู่ในช่วงการเปลี่ยนรูปของแข็งตั้งแต่เริ่มการสลายตัวจนถึงการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ 0.2 สำหรับน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2