

การเปรียบเทียบการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำยางดำที่ใช้วัตถุดิบจากไม้ไผ่และยูคาลิปตัส
โดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

นายวัθνสิริ จินาทองไทย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2550
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COMPARISON ON THERMAL DECOMPOSITION OF BAMBOO AND EUCALYPTUS BASED
BLACK LIQUOR BY THERMOGRAVIMETRIC TECHNIQUE

Mr.Watsiri Jinatongthai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

501152

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การเปรียบเทียบการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำยางคำที่ใช้วัตถุดิบ
จากไม้ไผ่และยูคาลิปตัส โดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก

โดย

นายวัθνัสสิริ จินาทองไทย

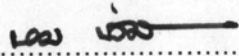
สาขาวิชา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม


อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล

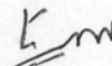
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

 คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงษ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

 ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)

 อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

 กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัศมี)

นายวัθνศิริ จินาทองไทย : การเปรียบเทียบการสลายตัวของตัวอย่างน้ำยางดำที่ใช้วัตถุดิบ
จากไม้ไผ่และยูคาลิปตัสโดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก. (COMPARISON ON THERMAL
DECOMPOSITION OF BAMBOO AND EUCALYPTUS BASED BLACK LIQUOR BY
THERMOGRAVIMETRIC TECHNIQUE) อ. ที่ปรึกษา : อ.ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล, 232 หน้า.

การวิจัยนี้เป็นการศึกษาการสลายตัวของตัวอย่างน้ำยางดำจากโรงงานผลิตเยื่อกระดาษ 2 แห่งในประเทศไทย
ซึ่งใช้วัตถุดิบในการผลิตเยื่อกระดาษที่แตกต่างกัน โดยต้องการศึกษาเฉพาะในขั้นตอนไพโรไลซิส พร้อมทั้งศึกษาผลของ
ตัวแปรที่จะส่งผลกระทบต่อไพโรไลซิส เพื่อหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์และเพื่อสร้างแบบจำลองการสลายตัว โดยจะ
ทำการศึกษาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก ภายใต้สภาวะเฉื่อยโดยใช้ก๊าซไนโตรเจนเป็นก๊าซพา การทดลอง
โดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ คือ แบบไอโซเทอร์มอลและแบบไดนามิก โดยพิจารณา
ตัวแปรต่างๆ ดังนี้ สำหรับการศึกษาทดลองแบบไอโซเทอร์มอลจะมีการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้ายตั้งแต่ 200 ถึง 900
องศาเซลเซียส และกักพักร้อยอย่างไว้เป็นเวลา 15 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิสุดท้ายเพื่อให้การสลายตัวเสร็จสิ้น สำหรับการ
ทดลองแบบไดนามิกจะมีการเปลี่ยนค่าอัตราการให้ความร้อนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2 ถึง 100 องศาเซลเซียส/นาที โดยให้
อุณหภูมิสุดท้ายคงที่ที่ 1,000 องศาเซลเซียสและกักพักร้อยอย่างไว้เป็นเวลา 20 นาที ณ อุณหภูมิสุดท้าย จากผลการ
ทดลองพบว่าค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิสุดท้ายสำหรับการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล และเพิ่มขึ้น
ตามอัตราการให้ความร้อนสำหรับการทดลองแบบไดนามิก การกักพักร้อยอย่างไว้ 15 ชั่วโมง สำหรับการทดลองแบบ
ไอโซเทอร์มอลพบว่าตัวอย่างยังสลายตัวได้ไม่หมด จากการสมมติให้ลำดับของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาลำดับ 1 เพื่อคำนวณ
ค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ พบว่าค่า k ที่คำนวณมาได้ของการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลจะมีค่าสูงในช่วงแรกหลังจากนั้น
จะมีแนวโน้มลดลงอย่างรวดเร็วจนมีค่าใกล้เคียงกับศูนย์ แต่ค่า k จะไม่ขึ้นกับอุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้ายที่เพิ่มขึ้น เมื่อ
นำมาสร้างสมการทำนายค่า k จะพบว่าสมการทำนายค่าจะให้ผลที่เป็นไปได้ที่อุณหภูมิ 200 และ 250 องศาเซลเซียส
สำหรับตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และให้ผลที่เป็นไปได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 500 องศาเซลเซียส สำหรับตัวอย่าง
น้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 สาเหตุสมการทำนายค่าให้ผลที่ดีในบางช่วงอุณหภูมิน่าจะเนื่องมาจากการที่น้ำยางดำมี
องค์ประกอบที่ซับซ้อนเกิดการสลายตัวของสารที่เป็นองค์ประกอบในหลายช่วงอุณหภูมิ ส่วนการทำนายค่าการ
เปลี่ยนรูปของแข็งสำหรับการทดลองแบบไดนามิก พบว่าสมการทำนายค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งก็ให้ค่าที่ไม่ดีนัก
เช่นเดียวกัน เนื่องมาจากการคำนวณสมการทำนายค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของการทดลองแบบไดนามิกต้องใช้
ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณมาจากการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลทำให้ได้สมการทำนายค่าที่ไม่ดีเช่นเดียวกับการทดลอง
แบบไอโซเทอร์มอล การคำนวณหาพลังงานก่อกัมมันต์จาก DTA เทอร์โมแกรมของดีฟเฟอร์เรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส
ไม่สามารถคำนวณได้เพราะ DTA เทอร์โมแกรมในงานวิจัยนี้ไม่สามารถบ่งบอกจุดที่กราฟสูงสุดได้ชัดเจนทำให้ไม่สามารถ
คำนวณค่าพลังงานก่อกัมมันต์ได้

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา 2550

4870619921 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD: BLACK LIQUOR / THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS / PYROLYSIS

WATSIRI JINATONGTHAI : COMPARISON ON THERMAL DECOMPOSITION OF BAMBOO AND EUCALYPTUS BASED BLACK LIQUOR BY THERMOGRAVIMETRIC TECHNIQUE. THESIS ADVISOR : VIBOON SRICHAROENCHAikul, Ph.D. 232 pp.

The objective of this research was to study the decomposition of black liquor from 2 pulp mills in Thailand that has different raw materials. Only pyrolysis step and parameter that effect the decomposition were determined to calculate the instantaneous kinetic constant and model of decomposition. The experiment was carried out by thermogravimetric analysis under nitrogen atmosphere. Two sets of experiment were performed: Isothermal and dynamic. In isothermal experiments, the sample was heated using constant heating rate of 100 °C/min up to the final pyrolysis temperature from 200 to 900 °C, which was maintained for 15 h to assure complete decomposition but from experiments the sample was not completely disintegrated. In dynamic experiments, the sample was heated at different heating rates ranging from 5 to 100 °C/min, up to a temperature of 1000 °C and hold for 20 min. It can be observed that the solid conversion increase with final pyrolysis temperature and heating rate. Assuming a first order for thermal decomposition rate to calculate kinetic constant, it was found that the kinetic value for isothermal experiment is initially high and then drop near zero and that the kinetic constant is not depend on final pyrolysis temperature. For prediction of the kinetic equation for isothermal, it can be determined that the calculated values of kinetic constant and the experimental data is quite good at final pyrolysis temperature 200 °C and 250 °C for first black liquor sample and at under 500 °C for second black liquor sample. For calculated equation to predict the value of solid conversion in dynamic experiment due to the predicted equation must use parameter from isothermal experiment, so the results are not agree well with values for calculated of solid conversion and experimental values in dynamic experiment. Calculation of the activation energy cannot be performed because the DTA thermogram was not indicated distinct peak to divide the graph for calculated activation energy.

DepartmentEnvironmental Engineering.... Student's signature *Watsiri Jinatongthai*

Field of study ...Environmental Engineering.... Advisor's signature

Academic year 2007

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่องการเปรียบเทียบการสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำยางดำที่ใช้วัตถุดิบจากไม้ไผ่และยูคาลิปตัสโดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน ณ โอกาสนี้ผู้วิจัยขอสำนึกในพระคุณของท่านทั้งหลายดังนี้

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาสละเวลาคอยให้ความปรึกษา ข้อชี้แนะ ข้อแนะนำ ปรับปรุง แก้ไขวิทยานิพนธ์ รวมทั้งช่วยเหลือและสนับสนุนทุนในการวิจัยจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธิกุล และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ลักษณะณ์ พึ่งรัศมี ที่กรุณาสละเวลาเพื่อเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำอันเป็นแนวทางที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือที่ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย

ขอขอบคุณ บริษัท เมทเลอร์-โทเลโด (ประเทศไทย) จำกัด ที่คอยช่วยเหลืออย่างดีในการดูแลและซ่อมแซมเครื่อง TGA ให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์จนจบการวิจัย

ขอขอบคุณพี่ๆ และเพื่อนๆ ที่รักทุกคนสำหรับความช่วยเหลือ แนะนำในด้านการใช้เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ต่างๆ ในการทำวิจัย และกำลังใจที่มีให้มาโดยตลอด

ท้ายสุด ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยส่งเสริม สนับสนุน กระตุ้นเตือน และเป็นกำลังใจ ตลอดเป็นแรงใจที่สำคัญยิ่งของผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้การศึกษารั้งนี้ประสบผลสำเร็จได้ตามที่ตั้งใจ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 ชีวมวล.....	5
2.1.1 สมบัติของชีวมวล.....	6
2.1.2 หลักการแปรรูปชีวมวล.....	6
2.2 น้ำยางดำ.....	7
2.3 การผลิตเยื่อกระดาษ.....	8
2.3.1 วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเยื่อกระดาษ.....	8
2.3.2 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย.....	9
2.3.3 กระบวนการผลิตเยื่อกระดาษ.....	10
2.4 แก๊สซิฟิเคชัน.....	11
2.4.1 วิวัฒนาการของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	11
2.4.2 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน.....	12
2.4.3 ปฏิกริยาเผาไหม้พื้นฐาน.....	13
2.4.4 กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	15
2.4.5 ประเภทของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน.....	16
2.4.6 ศักยภาพในด้านพลังงานของน้ำยางดำในปัจจุบัน.....	17

2.5 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	17
2.5.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	18
2.5.2 ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส.....	22
2.6 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	23
บทที่ 3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	26
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
3.2 วัตถุประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	26
3.3 ขั้นตอนและตัวแปรในการดำเนินงานวิจัย.....	27
3.3.1 การเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์.....	27
3.3.2 การศึกษาองค์ประกอบและคุณสมบัติของตัวอย่างน้ำยางดำ.....	28
3.3.3 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	29
3.3.4 ตัวแปรในการศึกษา.....	32
3.4 การวิเคราะห์งานวิจัย.....	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิจารณ์.....	37
4.1 องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่างน้ำยางดำ.....	37
4.2 การวิเคราะห์ด้วยความร้อน.....	38
4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริก.....	38
4.2.2 ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส.....	57
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	69
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	69
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต.....	70
รายการอ้างอิง.....	72
ภาคผนวก.....	75
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์และเตรียมตัวอย่างดำในการวิเคราะห์.....	76
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	83
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	232

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของตัวอย่างซีวมวล.....	5
ตารางที่ 2.2 สูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุลของสารประกอบคาร์โบไฮเดรต และลิกนิน.....	6
ตารางที่ 2.3 องค์ประกอบโดยทั่วไปของน้ำยางดำ.....	8
ตารางที่ 2.4 แสดงปริมาณองค์ประกอบโดยทั่วไปของไม้ยืนต้น และพวกที่ไม่ใช่ไม้.....	10
ตารางที่ 2.5 แสดงปริมาณองค์ประกอบของตัวอย่างยูคาลิปตัส และไม้ไผ่.....	10
ตารางที่ 2.6 ปฏิกริยาการเผาไหม้พื้นฐาน.....	14
ตารางที่ 2.7 ลักษณะที่สำคัญของเตาแก๊สซีฟาย.....	16
ตารางที่ 2.8 ศักยภาพในด้านพลังงานของน้ำยางดำ.....	17
ตารางที่ 3.1 รายละเอียดกระบวนการผลิต วัตถุประสงค์และสารเคมีของ โรงงานผลิตเยื่อกระดาษของ 2 บริษัทที่ใช้ในการวิจัย.....	27
ตารางที่ 3.2 รายการและวิธีวิเคราะห์องค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของ ตัวอย่างน้ำยางดำ.....	29
ตารางที่ 3.3 สรุปตัวแปรในการศึกษาผลของการสลายตัวของน้ำยางดำด้วยเทคนิค เทอร์โมกราวิเมตริก (การทดลองแบบไอโซเทอร์มอล).....	32
ตารางที่ 3.4 สรุปตัวแปรในการศึกษาผลของการสลายตัวของน้ำยางดำด้วยเทคนิค เทอร์โมกราวิเมตริก (การทดลองแบบไดนามิก).....	33
ตารางที่ 3.5 สรุปตัวแปรในการศึกษาผลของการสลายตัวของน้ำยางดำด้วย ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์มอลแอนาไลซิส.....	33
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบและคุณสมบัติทางเคมีของ ตัวอย่างน้ำยางดำ.....	37
ตารางที่ 4.2 พารามิเตอร์ P_1, P_2, P_3 และ P_4 ที่คำนวณได้ของตัวอย่าง น้ำยางดำจากบริษัทที่ 1.....	43
ตารางที่ 4.3 พารามิเตอร์ P_1, P_2, P_3 และ P_4 ที่คำนวณได้ของตัวอย่าง น้ำยางดำจากบริษัทที่ 2.....	43
ตารางที่ 4.4 ค่า $\left(\frac{\partial X_s}{\partial T}\right)_t$ ที่คำนวณได้ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 และบริษัทที่ 2.....	52
ตารางที่ 4.5 ช่วงของค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ จากการทดลองแบบ ไดนามิกของบริษัทที่ 1.....	56

ตารางที่ 4.6 ช่วงของค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	
จากการทดลองแบบ ไดนามิกของบริษัทที่ 2.....	57
ตารางที่ 4.7 การสลายตัวด้วยความร้อนจากงานวิจัยอื่น.....	58
ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบการสลายตัวด้วยความความร้อนของตัวอย่าง	
น้ำอย่างดำที่ใช้วัตถุดิบในการผลิตต่างกัน.....	64
ตารางที่ ก.1 Microwave Program สำหรับย่อยตัวอย่างที่เป็นชิ้นไม้.....	79
ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1.....	84
ตารางที่ ข.1 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	84
ตารางที่ ข.2 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส.....	86
ตารางที่ ข.3 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	89
ตารางที่ ข.4 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส.....	92
ตารางที่ ข.5 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	94
ตารางที่ ข.6 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส.....	97
ตารางที่ ข.7 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	100
ตารางที่ ข.8 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	103
ตารางที่ ข.9 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....	105
ตารางที่ ข.10 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส.....	108
ตารางที่ ข.11 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	111
ตารางที่ ข.12 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส.....	113
ตารางที่ ข.13 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	116
ตารางที่ ข.14 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส.....	119
ตารางที่ ข.15 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	121
ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2.....	125
ตารางที่ ข.16 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส.....	125
ตารางที่ ข.17 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส.....	127
ตารางที่ ข.18 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส.....	130
ตารางที่ ข.19 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส.....	133
ตารางที่ ข.20 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส.....	136

	หน้า
ตารางที่ ข.21 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส.....	138
ตารางที่ ข.22 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส.....	141
ตารางที่ ข.23 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส.....	144
ตารางที่ ข.24 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส.....	146
ตารางที่ ข.25 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส.....	149
ตารางที่ ข.26 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส.....	152
ตารางที่ ข.27 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส.....	155
ตารางที่ ข.28 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส.....	157
ตารางที่ ข.29 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียส.....	160
ตารางที่ ข.30 ตารางในการคำนวณค่า k ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	163
ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1.....	198
ตารางที่ ข.31 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที.....	198
ตารางที่ ข.32 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/นาที.....	200
ตารางที่ ข.33 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 20 °C/นาที.....	203
ตารางที่ ข.34 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 50 °C/นาที.....	206
ตารางที่ ข.35 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 100 °C/นาที.....	209
ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2.....	212
ตารางที่ ข.36 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 5 °C/นาที.....	212
ตารางที่ ข.37 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 10 °C/นาที.....	214
ตารางที่ ข.38 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 20 °C/นาที.....	217
ตารางที่ ข.39 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 50 °C/นาที.....	220
ตารางที่ ข.40 ตารางข้อมูลที่อัตราการให้ความร้อน 100 °C/นาที.....	222

สารบัญญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 หลักการแปรรูปชีวมวลไปเป็นแหล่งพลังงาน.....	7
รูปที่ 2.2 ลำดับการเปลี่ยนแปลงของการแก๊สซิฟิเคชันโดยทั่วไป.....	13
รูปที่ 2.3 ตัวอย่าง TGA เทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลัง (Cassava Starch).....	19
รูปที่ 2.4 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลา.....	20
รูปที่ 2.5 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย กับ อุณหภูมิสุดท้าย ในการไพโรไลซิส.....	21
รูปที่ 2.6 กราฟระหว่างค่าอัตราการสลายตัว กับ อุณหภูมิ.....	22
รูปที่ 2.7 ตัวอย่าง DTA เทอร์โมแกรม.....	23
รูปที่ 3.1 แผนผังการเตรียมตัวอย่างในการวิเคราะห์.....	27
รูปที่ 3.2 แผนผังการวิเคราะห์ด้วยความร้อนแบบไอโซเทอร์มอล.....	30
รูปที่ 3.3 แผนผังการวิเคราะห์ด้วยความร้อนแบบไดนามิค.....	31
รูปที่ 4.1 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลองจาก ผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1.....	39
รูปที่ 4.2 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลองจาก ผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2.....	39
รูปที่ 4.3 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย กับ อุณหภูมิสุดท้าย ในการไพโรไลซิสของบริษัทที่ 1.....	40
รูปที่ 4.4 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งสุดท้าย กับ อุณหภูมิสุดท้าย ในการไพโรไลซิสของบริษัทที่ 2.....	41
รูปที่ 4.5 กราฟระหว่างค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองที่อุณหภูมิสุดท้าย ในการไพโรไลซิส 200 องศาเซลเซียส กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของบริษัทที่ 1.....	41
รูปที่ 4.6 กราฟระหว่างค่า k ที่คำนวณได้จากการทดลองที่อุณหภูมิสุดท้าย ในการไพโรไลซิส 200 องศาเซลเซียส กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของบริษัทที่ 1.....	42
รูปที่ 4.7 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง ของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1.....	44
รูปที่ 4.8 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง ของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1.....	45
รูปที่ 4.9 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง ของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2.....	45

	หน้า
รูปที่ 4.10 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง ของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2.....	46
รูปที่ 4.11 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1.....	46
รูปที่ 4.12 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 1.....	47
4.13 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2.....	47
รูปที่ 4.14 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลองและค่า k ที่ได้จากสมการทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งของผลการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลของบริษัท 2.....	48
รูปที่ 4.15 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลอง จากผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 1.....	50
รูปที่ 4.16 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลาที่ใช้ในการทดลอง จากผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 2.....	51
รูปที่ 4.17 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากสมการ ทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง ของผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 1.....	52
รูปที่ 4.18 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากสมการ ทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง ของผลการทดลองแบบไดนามิกของบริษัท 2.....	53
รูปที่ 4.19 TGA และ DTG เทอร์โมแกรมจากงานวิจัยของ Mansaray และ Ghaly, 1999.....	59
รูปที่ 4.20 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าจากสมการ ทำนายค่าของงานวิจัยโดย Mansaray และ Ghaly, 1999.....	60
รูปที่ 4.21 TGA เทอร์โมแกรม ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1.....	60
รูปที่ 4.22 TGA เทอร์โมแกรม ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2.....	61
รูปที่ 4.23 DTA เทอร์โมแกรม ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1.....	61
รูปที่ 4.24 DTA เทอร์โมแกรม ของตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2.....	62
รูปที่ 4.25 DTA thermogram จากการทดลองโดย Nassar 2003.....	63

	หน้า
รูปที่ 4.26 ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลา สำหรับการทดลองแบบไอโซเทอร์มอล ของงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004.....	61
รูปที่ 4.27 ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็ง กับ เวลา สำหรับการทดลองแบบไดนามิก ของงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004.....	61
รูปที่ 4.28 กราฟผลการทดลองระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง และค่า k จากสมการ ทำนายค่ากับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004.....	62
รูปที่ 4.29 กราฟเปรียบเทียบระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง และค่า k จากสมการ ทำนายค่า กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากงานวิจัยนี้และงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004.....	63
รูปที่ 4.30 กราฟผลการทดลองระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งที่ได้จากการทดลอง และค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งจากสมการทำนายค่าจากงานวิจัยโดย Sánchez และคณะ, 2004.....	64
รูปที่ ก.1 TGA เทอร์โมแกรมของการวิเคราะห์แบบประมาณตัวอย่างน้ำยางดำจาก บริษัทที่ 1.....	78
รูปที่ ก.1 TGA เทอร์โมแกรมของการวิเคราะห์แบบประมาณตัวอย่างน้ำยางดำจาก บริษัทที่ 2.....	78
รูปที่ ก.3 ผลการวิเคราะห์โซเดียมด้วยเครื่อง Atomic Adsorption Spectrophotometer.....	79
ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1.....	166
รูปที่ ข.1 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย 200 องศาเซลเซียส.....	166
รูปที่ ข.2 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย 250 องศาเซลเซียส.....	167
รูปที่ ข.3 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย 300 องศาเซลเซียส.....	167
รูปที่ ข.4 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย 350 องศาเซลเซียส.....	168
รูปที่ ข.5 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสสุดท้าย 400 องศาเซลเซียส.....	168

	หน้า
รูปที่ ข.60 กราฟระหว่างค่า k ที่ได้จากการทดลอง กับ ค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลองแบบไอโซเทอร์มอลตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	197
ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1.....	225
รูปที่ ข.61 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	225
รูปที่ ข.62 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	226
รูปที่ ข.63 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	226
รูปที่ ข.64 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 ที่อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	227
รูปที่ ข.65 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 1 ที่อัตราการให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	227
ตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2.....	228
รูปที่ ข.66 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ที่อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	228
รูปที่ ข.67 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ที่อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	229
รูปที่ ข.68 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ที่อัตราการให้ความร้อน 20 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	229

รูปที่ ข.69 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ที่อัตราการให้ความร้อน 50 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	230
รูปที่ ข.70 กราฟระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของแข็งกับเวลา ของการทดลอง แบบไดนามิกตัวอย่างน้ำยางดำจากบริษัทที่ 2 ที่อัตราการให้ความร้อน 100 องศาเซลเซียสต่อนาที.....	230
รูปที่ ข.71 เครื่องมือในการวิเคราะห์ (a) เครื่องเทอร์โมกราวิเมตริกแอนาไลเซอร์ (TGA) และ (b) ถ้วยอลูมินา-ซิลิกา (Alumina-Silica Crucible) ขนาด 70,150 และ 900 ไมโครลิตร.....	231