

การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ด้วยกระบวนการเคมีความร้อน



นาย อธิวรรณ์ เลิศสกุลบรรลือ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-0572-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

BIO-FUEL PRODUCTION FROM THERMOCHEMICAL CONVERSION OF ACTIVATED SLUDGE



Mr. Ativat Lertsikulbanlue

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology  
Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-0572-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ด้วยกระบวนการเคมีความร้อน
โดย	นาย อธิวรรธน์ เลิศสกุลบรรลือ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญเกียรติ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ มีอยู่

---

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธาราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ กัญญา บุญเกียรติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิษณุ มีอยู่)

..... กรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ บารมี)

นาย อธิวรรธน เลิศสกุลบรรลือ : การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจากแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ด้วยกระบวนการเคมีความร้อน. (BIO-FUEL PRODUCTION FROM THERMOCHEMICAL CONVERSION OF ACTIVATED SLUDGE ) อ. ที่ปรึกษา : รศ. กัญจนา บุญเกียรติ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. ดร. วิษณุ มีอยู่ 108 หน้า. ISBN 974-03-0572-5.

แอกทิเวตเต็ดสลัดจ์เป็นกากตะกอนที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นทุกปี ก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมและปัญหาในการจัดการกับการกากตะกอนเหล่านี้ ดังนั้นจึงนำกระบวนการไพโรไลซิสมาใช้กับกากตะกอนเหล่านี้ กระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนแปลงทางเคมีความร้อน จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส น้ำมัน และถ่านชาร์ ซึ่งสามารถนำมาใช้ผลิตเชื้อเพลิงต่อไปได้

การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน ในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่อัตราให้ความร้อน 5, 10, 20 และ 50 องศาเซลเซียสต่อนาที อุณหภูมิการไพโรไลซิสอยู่ในช่วง 523-688 เคลวิน โดยใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย 4 แห่ง คือ โรงฟอกย้อม โรงบำบัดส่วนกลาง เคหะชุมชนห้วยขวาง และโรงโหล่งน้ำดิบ จากการศึกษาพบว่า กากตะกอนเหล่านี้มีค่าความร้อนสูงระหว่าง 1600-5600 แคลอรีต่อกรัม และปริมาณสารระเหยระหว่างร้อยละ 31-60 เหมาะสำหรับใช้เป็นแหล่งพลังงาน และจากกราฟที่แสดงร้อยละน้ำหนักที่หายไปเนื่องจากอัตราให้ความร้อนมีแนวโน้มคล้ายกัน คือ ที่อัตราให้ความร้อนสูงมีอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ำกว่า แต่อุณหภูมิการไพโรไลซิสจะสูงขึ้น จากการศึกษาทางจลนพลศาสตร์โดยใช้กฎของ Arrhenius และแบบจำลอง DEAM สามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น และพรี-เอกโพเนนเชียลแฟกเตอร์ ได้ พบว่า จากแบบจำลอง DEAM เมื่อค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเปลี่ยนไป ค่าพลังงานกระตุ้นเปลี่ยนไปด้วยอยู่ระหว่าง 30-650 กิโลจูลต่อโมล แสดงให้เห็นว่า ปฏิกิริยาไพโรไลซิสประกอบด้วยปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาที่ต่างกันด้วย และจากค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่ได้ ทำให้ทราบสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยา และกลไกของปฏิกิริยา เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีต่อไป

ภาควิชา. เคมีเทคนิค  
สาขาวิชา.เคมีเทคนิค  
ปีการศึกษา 2544

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4172526923 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: bio-fuel / TGA / thermochemical / pyrolysis / activated sludge

MR. ATIVAT LERTSKULBANLUE : THESIS TITLE. (BIO-FUEL PRODUCTION FROM THERMOCHEMICAL CONVERSION OF ACTIVATED SLUDGE ) THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KUNCHANA BUNYAKIAT, THESIS COADVISOR : ASSIST. PROF. DR. VISSANU MEEYOO, 108 pp. ISBN 974-03 -0572-5.

This study uses activated sludge from wastewater treatment that is increasing in quantity significantly every year. It creates environment and disposal problems as well as waste management problem. Pyrolysis is a thermochemical process which convert activated sludge to gas, oil and charcoal, and can be applied to produce fuels from activated sludge.

The pyrolysis kinetic of activated sludge is investigated with a thermogravimetric analyser (TGA). The experiments are carried out in nitrogen atmosphere at pyrolysis temperature (523-688 K) and various heating rates of 5, 10, 20 and 50 K/min. Four samples of activated sludge are taken from wastewater treatment of textile plant, center plant, Huaykwang district and National of Petrochemical plant. The results indicate that activated sludge have volatile matter in the range of 31-60% and heating value in the range of 1600-5600 cal/g. that can be converted to new source of energy. From the TGA studies, the total weight percent loss is mainly affected by the heating rate and temperature. The higher heating rate shows lower conversion and high pyrolysis temperature. From kinetic studies, Arrhenius 's law and DEAM model are developed to simulate this pyrolysis process and to determine the activation energy ( $E_a$ ) and pre-exponential factor ( $k_0$ ). From DEAM model, at different conversions, the different  $E$  (30-650 kJ/mol), indicate that different multiple reactions take place at different stages. The kinetic parameters from this studies can be used to predict rate, mechanism of reactions and design reactor.

Department Chemical Technology

Student's signature.....

Field of study Chemical Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2001

Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์จาก รศ. กัญญา บุญเกียรติ และ ผศ. ดร. วิษณุ มีอยู่ จึงขอขอบพระคุณท่านทั้งสองเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ บริษัท วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี จำกัด และบัณฑิตวิทยาลัยที่ให้การสนับสนุนด้านเงินทุนในการวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ที่นิคมอุตสาหกรรมศรีสุพรรณ โรงโกลเฟิน และโรงบำบัดน้ำเสีย เมาะชุมขุนห้วยขวาง ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอนมาใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ ที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่เอื้อเฟื้อข้อมูลและวิธีการทดลองในงานวิจัย

ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณคุณบิดา มารดา และทุกๆ คนในครอบครัวตลอดจน พี่ และน้อง ที่ให้กำลังใจในการทำงานและช่วยเหลือในทุกๆอย่างตลอดมา ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
2. วรรณกรรมปริทรรศน์.....	4
2.1 กระบวนการแยกทีเวตเตดสตัดจ์.....	4
2.2 กากตะกอนเร่ง.....	8
2.3 กระบวนการไพโรไลซิส.....	10
2.4 กลไกการเกิดไพโรไลซิส.....	12
2.5 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส.....	15
2.6 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส.....	17
2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิส.....	18
2.7.1 ปัจจัยทางกายภาพ.....	18
2.7.2 ปัจจัยทางเคมี.....	23
2.8 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิส.....	25
3 เครื่องมือและวิธีการทดลอง.....	32
3.1 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น.....	34
3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างกากตะกอน.....	34
3.3 ศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอนและค่าความร้อน.....	35
3.4 ลักษณะเครื่อง Thermogravimetric Analyzer TGA.....	36
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	40
4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	41
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ด้วยวิธี Proximate Analysis.....	41
4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุ ด้วยวิธี Ultimate Analysis.....	42

บทที่	หน้า
4.3 ผลการวิเคราะห์หาค่าองค์ประกอบของโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion (AA).....	43
4.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการไพโรไลซิส ที่ภาวะต่างๆ จากเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA).....	44
4.4.1 ศึกษาทางจลนพลศาสตร์โดยวิธี Arrhenius.....	52
4.4.2 ศึกษาจลนพลศาสตร์ด้วยแบบจำลอง DEAM (Distribution Activation Energy Model).....	70
5. สรุปผลการทดลอง.....	80
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	82
รายการอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก แสดงการวิเคราะห์สมบัติองค์ประกอบของกากตะกอน.....	87
ภาคผนวก ข แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TGA และผลการคำนวณ.....	92
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	108



## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
1.1 ประมาณการของเสียอันตรายแยกแยะประเภท.....	1
2.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนดิบและกากตะกอนที่ผ่านการย่อยแล้ว.....	7
2.2 สมการขึ้นพื้นฐานโดยวิธีดิฟเฟอเรนเชียลของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	29
2.3 สมการขึ้นพื้นฐานโดยวิธีอินทิเกรตของงานวิจัยที่ผ่านมา.....	30
4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ.....	41
4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ.....	42
4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion.....	43
4.4 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม.....	57
4.5 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง.....	62
4.6 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงห้วยขวาง.....	62
4.7 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงโอเลฟิน.....	63
4.8 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของกากตะกอนของแหล่งต่างๆ ที่แต่ละ (V/V*) .....	73

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญรูป

รูป	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์.....	5
2.2 แสดงการแปรรูปชีวมวลด้วยวิธีต่างๆ.....	11
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน.....	13
2.4 การแตกตัวของโครงสร้างของถ่านหินระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส.....	13
2.5 อิทธิพลของอัตราให้ความร้อนกับการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์.....	19
2.6 อิทธิพลของอุณหภูมิสุดท้ายกับผลิตภัณฑ์.....	20
2.7 อิทธิพลของขนาดตัวอย่างต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์.....	22
2.8 อิทธิพลของความดันต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ.....	23
2.9 อิทธิพลของอัตราการไหลของไนโตรเจนกับปริมาณของผลิตภัณฑ์.....	24
2.10 อิทธิพลของไฮโดรไพโรไลซิสต่อผลิตภัณฑ์.....	25
2.11 แผนผังกลไกกระบวนการไพโรไลซิสของเสียที่เป็นของแข็ง.....	26
3.1 แผนภาพแสดงภาพรวมของขั้นตอนการศึกษางานวิจัย.....	35
3.2 รูปแสดงองค์ประกอบเครื่อง TGA รุ่น STA 409C.....	39
3.3 แสดงภาพตัดขวางของเครื่องมือ TGA ในส่วนวัด.....	40
3.4 ระบบ sample carrier ของเครื่อง TGA.....	41
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่ลดลงกับ อุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	46
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอน จากโรงงานฟอกย้อมกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	47
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่ลดลงกับ อุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	47
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอน จากโรงบำบัดส่วนกลางกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	48
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่ลดลงกับ อุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	48
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอน จากเคหะชุมชนห้วยขวางกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	49
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนจากโรงโอเลฟินที่ลดลงกับอุณหภูมิ ด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	49

สารบัญรูป (ต่อ)

ฉ  
หน้า

รูป		
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอนจากโรงโม่เลฟินกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน.....	50
4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V/V^*$ กับอุณหภูมิของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม.....	52
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V/V^*$ กับอุณหภูมิของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง.....	53
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V/V^*$ กับอุณหภูมิของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวาง.....	53
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า $V/V^*$ กับอุณหภูมิของกากตะกอนจากโรงโม่เลฟิน.....	54
4.13	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min.....	55
4.14	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่อัตราให้ความร้อน 10 K/min.....	56
4.15	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่อัตราให้ความร้อน 20 K/min.....	56
4.16	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่อัตราให้ความร้อน 50 K/min.....	57
4.17	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min.....	57
4.18	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัตราให้ความร้อน 10 K/min.....	58
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัตราให้ความร้อน 20 K/min.....	58
4.20	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัตราให้ความร้อน 50 K/min.....	59
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min.....	60
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตราให้ความร้อน 10 K/min.....	60
4.23	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตราให้ความร้อน 20 K/min.....	61
4.24	ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตราให้ความร้อน 50 K/min.....	61

สารบัญรูป (ต่อ)

ฎ  
หน้า

รูป	
4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนโรงโหลินที่ อัตราให้ความร้อน 5 K/min.....	62
4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนโรงโหลินที่ อัตราให้ความร้อน 10 K/min.....	62
4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนโรงโหลินที่ อัตราให้ความร้อน 20 K/min.....	63
4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln k$ กับ $1/T$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนโรงโหลินที่ อัตราให้ความร้อน 50 K/min.....	63
4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกาก ตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม กับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองกับกฎของ Arrhenius อัตราให้ความร้อนต่างๆ .....	66
4.30 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกาก ตะกอนจากโรงงานบำบัดส่วนกลางกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ .....	66
4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกาก ตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ .....	68
4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกาก ตะกอนจากโรงโหลินกับอุณหภูมิที่ได้จากการทดลองกับกฎของ Arrhenius อัตราให้ความร้อนต่างๆ .....	69
4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(a/T^2)$ และ $1/T$ ที่แต่ละ $V/V^*$ ของ โรงงานฟอกย้อม.....	71
4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(a/T^2)$ และ $1/T$ ที่แต่ละ $V/V^*$ ของ โรงบำบัดส่วนกลาง.....	72
4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(a/T^2)$ และ $1/T$ ที่แต่ละ $V/V^*$ ของเคหะชุมชนห้วยขวาง.....	72
4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(a/T^2)$ และ $1/T$ ที่แต่ละ $V/V^*$ ของโรงโหลิน.....	73
4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E$ กับ $V/V^*$ ของ โรงงานฟอกย้อม.....	74
4.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E$ กับ $V/V^*$ ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง.....	74
4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E$ กับ $V/V^*$ ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวาง.....	75
4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง $E$ กับ $V/V^*$ ของกากตะกอนจากโรงโหลิน.....	75
4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง $V/V^*$ กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของกากตะกอนจากโรงฟอกย้อมที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ.....	76

สารบัญรูป (ต่อ)

ฐ  
หน้า

รูป

4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V/V^*$ กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของกาคตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ .....	77
4.43 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V/V^*$ กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของกาคตะกอนกาคตะกอนโรงเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ .....	78
4.44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $V/V^*$ กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของกาคตะกอนโรงโหลยที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ.....	78



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

## บทนำ

การเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจและการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากปริมาณของเสียอันตรายจากอุตสาหกรรม ซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดเวลา ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการของเสียอันตรายแยกประเภท [1] (หน่วย: ตันต่อปี)

ประเภทของเสีย	ปี 2529	ปี 2534	ปี 2539	ปี 2544
น้ำมัน	106,372	188,254	332,779	589,508
กากสารอินทรีย์เหลว	187	311	522	876
ตะกอนและของแข็งสารอินทรีย์	3,737	6,674	11,951	21,533
ตะกอนและของแข็งสารอนินทรีย์	11,655	19,163	31,858	53,696
ตะกอนและของแข็งโลหะหนัก	302,316	536,322	946,565	1,658,192
ตัวทำละลาย	19,783	36,163	66,532	124,306
ของเสียที่เป็นกรด	18,505	31,432	53,973	46,105
ของเสียที่เป็นด่าง	5,769	9,839	16,846	29,019
ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ได้มาตรฐาน	12	25	52	107
พีซีบี	2,468	0	0	0
กากสารอินทรีย์น้ำ	116	242	499	1,037
น้ำเสียล้างอัดรูป	8,820	16,384	30,398	57,809
ขยะชุมชน	7,231	11,787	19,090	31,093
ขยะติดเชื้อ	46,674	76,078	123,219	200,699
รวม	533,645	932,638	1,634,108	2,813,980

จากตารางที่ 1.1 พบว่าปริมาณของเสียเพิ่มมากขึ้น ทุกๆปี ดังนั้นจึงต้องหาวิธีในการลดปริมาณของเสียโดยการกำจัดด้วยวิธีต่างๆ หรือมีการหมุนเวียนนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ เช่น การลดการใช้กระถางโฟม เพราะโฟมทำลายยาก จึงส่งเสริมให้ใช้กระถางที่ทำจากวัสดุธรรมชาติ วัชพืช หรือเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรแทน และการคัดแยกวัสดุเหลือใช้ก่อนทิ้งลงขยะ เช่น ขวด กระดาษ พลาสติก โลหะ อลูมิเนียม เป็นต้น ทำให้สามารถนำวัสดุเหลือใช้นั้นมาแปรรูปเป็นสินค้าต่อไปได้ เพื่อประโยชน์ในการเก็บไปกำจัดทำลาย รวมทั้งเป็นการนำวัสดุไร้ค่ามาใช้ให้เกิดประโยชน์ด้วย โดยมูลสัตว์เลี้ยงและเศษพืชผลทางการเกษตรมาหมักทำเป็นปุ๋ย ผลิตภัณฑ์ชีวภาพ รวมทั้งใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมเยื่อและกระดาษ แอลกอฮอล์ อาหารสัตว์

สำหรับการกำจัดกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียแหล่งต่างๆ วิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ การฝังกลบ และการเผา กล่าวคือ การฝังกลบ [1] มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกต้องทำลายฤทธิ์ของกากอุตสาหกรรมเสียก่อน จากนั้นจึงทำให้กากแข็งตัว และนำไปฝังในหลุมฝังกลบที่ปูพื้นด้วยวัสดุพิเศษกันการรั่วซึม เช่น แผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากนั้นจึงทำการปิดปากหลุม ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้เนื้อที่มากในการจัดการ และอาจมีปัญหาเกี่ยวกับสารพิษซึมลงดิน หรือแหล่งน้ำชุมชนได้ ส่วนการเผา เป็นวิธีที่เสียค่าใช้จ่ายมาก และอาจเกิดปัญหาเกี่ยวกับมลภาวะทางอากาศด้วย

วิธีการข้างต้นนี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสิ่งมีชีวิตต่างๆ ด้วย เนื่องจากกากตะกอนมีสารอินทรีย์ที่อันตรายและมีองค์ประกอบของพวก โลหะหนัก เช่น นิกเกิล โครเมียม แคดเมียม สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง เป็นต้น จึงมีการค้นคว้าและพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพ เพื่อที่จะกำจัดหรือเปลี่ยนกากตะกอนไปในรูปแบบต่างๆ

เนื่องจากกากตะกอน เป็นชีวมวล ที่สามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้ โดยผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งเป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่กากตะกอนในบรรยากาศที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน ทำให้เกิดการสลายตัวทางเคมีได้ผลิตภัณฑ์เป็นถ่านชาร์(Char) น้ำมันทาร์(Liquid tar) และแก๊สไฮโดรคาร์บอน [2] ซึ่งสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอนาคต โดยไม่ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม เนื่องจากกากตะกอนมีซัลเฟอร์และไนโตรเจนต่ำเมื่อเกิดการเผาไหม้จะเกิดสารประกอบออกไซด์ของซัลเฟอร์และไนโตรเจนต่ำ และไม่เพียงแต่ช่วยในด้านเศรษฐกิจ แต่ยังสามารถช่วยลดปริมาณกากตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียได้อีกด้วย

จากข้อมูลเบื้องต้นจะเห็นได้ว่า เราสามารถใช้กระบวนการนี้สำหรับการกำจัดกากตะกอน และผลิตน้ำมัน และจากการทดลองจะได้ข้อมูลสำหรับศึกษาจลนพลศาสตร์ ทำให้ทราบสมการ อัตราเร็วของปฏิกิริยา และกลไกของปฏิกิริยา เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีต่อไป และจากแบบจำลองของกระบวนการไพโรไลซิสที่ได้นำมาใช้ในการทำนายการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ รวมทั้งทำนายน้ำหนักที่หายไปมากที่สุด สามารถควบคุมกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ดีที่สุด



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### วรรณกรรมปริทรรศน์

ในบทนี้จะกล่าวถึง ลักษณะทั่วไปของกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ ที่ก่อให้เกิดกากตะกอนซึ่งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งมีผลต่อปัญหาสิ่งแวดล้อม จึงต้องกำจัดกากตะกอนนี้ด้วยวิธีต่างๆ และวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือ กระบวนการไพโรไลซิส หลังจากนั้นจึงกล่าวถึงการศึกษาด้านจลนพลศาสตร์ในการเกิดปฏิกิริยาจากงานวิจัยที่ผ่านมาเพื่อใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ต่อไป และควบคุมกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ

#### 2.1 กระบวนการแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์ [3]

เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวเคมี ได้เริ่มใช้โดย Arden & Lockett ในปี 1914 และใช้เรื่อยมาจนถึงปัจจุบันอย่างแพร่หลาย แม้ว่ากระบวนการแอกทิเวตเต็ดสลัดจ์จะมีหลายแบบ แต่มีองค์ประกอบที่เหมือนกันดังนี้

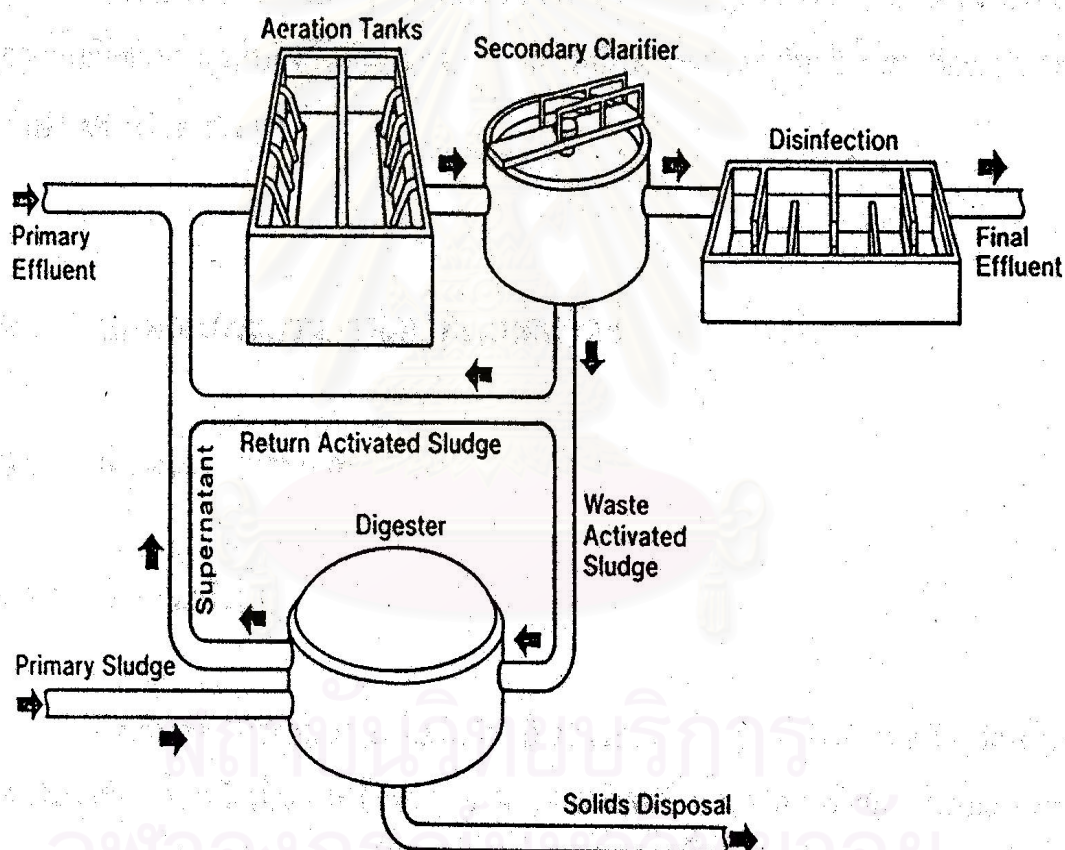
1. ใช้จุลินทรีย์ที่จับตัวเป็นกลุ่ม (floculant) ได้ กำจัดสารอาหารละลายจากน้ำเสีย
2. ใช้การตกตะกอนแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยน้ำเสียทิ้ง
3. หมุนเวียนตะกอนจุลินทรีย์ที่เข้มข้นจากกันถึงตกตะกอนกลับไปยังถังเติมอากาศ
4. การทำงานของกระบวนการขึ้นอยู่กับอายุเฉลี่ยของจุลินทรีย์ (mean cell residence time, MCRT) ที่อยู่ในระบบ

ส่วนประกอบที่จำเป็นของระบบนี้คือ ถังเติมอากาศ ถังตกตะกอน และระบบเวียนตะกอนกลับจากกันถึงตกตะกอนไปยังถังเติมอากาศ ส่วนหนึ่งของตะกอนจุลินทรีย์จะถูกทิ้งออกจากระบบเพื่อรักษาอายุเฉลี่ยของจุลินทรีย์ ที่ต้องการ

ถังเติมอากาศโดยมากจะเป็นถังเปิด ลึกประมาณ 4-5 เมตร ทำด้วยคอนกรีต มีผนังด้านข้างตั้งตามแนวตั้ง บางทีก็เป็นถังเหล็กหรือบ่อดิน ออกซิเจนที่ใช้ในเมแทบอลิซึม (metabolism) ของ จุลินทรีย์อาจป้อนเข้าไปได้หลายวิธี วิธีที่เก่าแก่ที่สุดคือ การใช้ตัวกระจาย (diffusers) ที่ให้ฟองอากาศ

แบบหยาบหรือแบบละเอียด วิธีที่สอง คือการใช้ตัวเติมอากาศที่ผิวแบบกล (mechanical surface aerators) ซึ่งอาจเป็นแบบยึดติดอยู่กับที่หรือแบบที่ลอยบนผิวน้ำ วิธีที่สามใช้เทอร์บินใต้น้ำ

(submerged turbines) ในถังปิด ทำให้อัตราสูงสุดของการถ่ายเทออกซิเจนเข้าไปในชีวมวล (biomass) เพิ่มขึ้นอย่างมาก นอกจากการเติมออกซิเจนแล้ว ในถังเติมอากาศยังต้องการการผสมที่เพียงพอ เพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์ลอยตัวอยู่ในน้ำอย่างสม่ำเสมอ ไม่ตกตะกอน การผสมนี้ใช้เครื่องมือที่ใช้เติมอากาศนั่นเอง ในการออกแบบต้องคำนึงถึงทั้งปริมาณออกซิเจนที่ต้องการสำหรับเมแทบอลิซึม และการผสมที่เพียงพอ



Typical Air Activated Sludge process

รูปที่ 2.1 รูปแสดงกระบวนการบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีแอกทีเวตเต็ดสลัดจ์ [3]

กระแสที่เข้าถึงปฏิกรณ์มีสองกระแส กระแสแรกเป็นน้ำเสียที่ยังไม่ได้บำบัด ส่วนอีก กระแสหนึ่งเป็นตะกอนจุลินทรีย์เข้มข้นที่เวียนกลับมาจากถังตกตะกอนสุดท้าย ความเข้มข้นของ สารอินทรีย์ละลายและอนุภาคที่เข้าสู่ถังเดิมอากาศนั้น ขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียที่จะบำบัด และ แบบของการบำบัดนำก่อนเข้าถึงเดิมอากาศ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในกระแสเวียนกลับ ขึ้นอยู่ กับความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่เข้าถึงตกตะกอนและอัตราส่วนของอัตราการเวียนกลับต่ออัตราการ ไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของจุลินทรีย์ที่เข้าถึงตกตะกอนขึ้นอยู่กับอายุเฉลี่ยของจุลินทรีย์ ของ ระบบ เวลาพัก และรูปร่างของถังเดิมอากาศ

ในถังปฏิกรณ์จุลชีพจะใช้สารอาหารละลายโดยวิธีแอสซิมิเลชัน (assimilation) หรือการดูด ซึมเข้าไปใช้ในกระบวนการสร้างเซลล์ ด้วยวิธีนั้นได้คาร์บอนและพลังงานสำหรับการเจริญเติบโต สารอินทรีย์ที่เป็นอนุภาคจะถูกดักไว้ในมวลจุลชีพ แล้วถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ภายนอกเซลล์ (extracellular enzymes) กลายเป็นรูปที่ละลาย และถูกจุลชีพดูดซึมไปใช้ในการสร้างเซลล์ จุลชีพที่ เกี่ยวข้องโดยตรงกับการย่อยสลายสารอินทรีย์นี้ เป็นแบคทีเรียที่สร้างอาหารเองไม่ได้แบบแอโรบิก และแฟคัลเททีฟ (aerobic & facultative heterotrophic) เนื่องจากความกดดันแบบเลือก (selective pressure) ที่เกิดจากการตกตะกอน กลุ่มแบคทีเรียที่คงอยู่ได้จะเป็นพวกที่สามารถจับกลุ่มได้ (flocculant) และตกตะกอนได้ดี นอกจากนี้อาจจะมีจุลชีพในรูปชีวิตที่สูงขึ้นเช่น พวกโปรโตซัว จะ รวมอยู่ในตะกอนและใช้แบคทีเรียเป็นอาหาร บางทีก็มีเชื้อรา รูปร่างแบบเส้นใย จะทำให้การจับตัว กันไม่แน่น ทำให้ความเร็วในการตกตะกอนลดลง และจะมีแบคทีเรียที่ใช้ในโตรเจนสร้างอาหาร เองได้ (autotrophic nitrifying bacteria) อยู่ด้วย แม้มันไม่ได้ใช้สารอินทรีย์เป็นแหล่งคาร์บอนและ พลังงาน จึงไม่มีผลต่อขั้นตอนของระบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ แต่จุลชีพนี้ทำให้เกิดออกซิเดชันของ แอมโมเนีย หรือไนตริฟิเคชันจึงมีความสำคัญต่อคุณภาพกระแสออก จึงต้องมีการเตรียมออกซิเจน ให้พอกับความต้องการของจุลชีพทุกชนิด

ส่วนผสมของจุลชีพและสารอินทรีย์ที่เป็นอนุภาค ที่ยังไม่ได้ย่อยสลายในถังปฏิกรณ์เรียกว่า mixed liquor suspended solids (MLSS) หรือแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ เมื่อผ่านถังตกตะกอนจะตกสู่ก้น ถังแล้วเวียนกลับไปยังถังเดิมอากาศ น้ำใสไหลออกทางด้านบนของถัง ส่วนหนึ่งของแอกทิเวเต็ด สลัดจ์จะต้องทิ้งออกจากระบบ ในปริมาณที่สมดุลกับการเจริญเติบโตของจุลชีพ เพื่อรักษาอายุเฉลี่ย ของจุลินทรีย์ ให้คงที่ อาจทิ้งจากก้นถังตกตะกอนหรือจากถังปฏิกรณ์โดยตรง ตะกอนจุลชีพต้องที่ ึ่งต้องนำไปกำจัดต่อไป อาจย่อยโดยแอโรบิก หรือ แอนแอโรบิก หรือวิธีอื่นๆ

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนดิบและกากตะกอนที่ผ่านการย่อยแล้ว [4]

Constituents	Primary sludge	Waste Activated Sludge	Digested Sludge
PH	5.6-6.5	6.5-7.5	6.5-7.5
Total dry solid, %	3-8	0.5-1.0	5.0-10.0
Total volatile solids, %dry wt.	60-90	60-80	30-60
Specific gravity of individual solids particles	1.3-1.5	1.2-1.4	1.3-1.6
Bulk specific gravity	1.02-1.03	1.0-1.005	1.03-1.04
BOD <sub>5</sub> /TVS	0.5-1.1	-	-
COD/TVS	1.2-1.6	2.0-3.0	-
Alkalinity, mg/l as CaCO <sub>3</sub>	500-1500	200-500	2,500-3,500
Cellulose, %dry wt.	8-15	5-10	8-15
Hemicellulose, %dry wt.	2-4	-	-
Lignin, %dry wt.	3-7	-	-
Grease and fat, %dry wt.	6-35	5-12	5-20
Protein, %dry wt.	20-30	32-41	15-20
N, %dry wt.	1.5-4.0	2.5-7.0	1.6-60
P, %dry wt.	0.8-2.8	2.0-7.0	1.4-40
Potash, %dry wt.	0.1-1.0	0.2-0.5	0.1-3.0
Heating value, kJ/kg	15,000-24,000	12,000-16,000	6000-14,000
Cd, mg/kg	16	-	76
Cr, mg/kg	110	-	160
Cu, mg/kg	200	-	340
Pb, mg/kg	500	-	-
Ni, mg/kg	46	-	63
Zn, mg/kg	320	-	930
Hexachlorobenzene, mg/kg	0.4	0.8	-
Lindane, mg/kg	0.6	1.0	-
Chlodane, mg/kg	2.6	4.4	-

## 2.2 กากตะกอนเร่ง (Activated sludge)

กากตะกอนเร่ง หมายถึง มวลจุลชีพ ที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสีย แล้วตกตะกอนแยกตัวออกมา ซึ่งกากตะกอนเหล่านี้ต้องนำไปกำจัดต่อไป ส่วนสารอินทรีย์ที่ไม่ละลายสามารถกำจัดโดยวิธีทางฟิสิกส์เคมีเช่น การดูดซับ(adsorption) และการกักในฟล็อก (entrapment) โดยจลนพลศาสตร์ของการปฏิบัติการถูกควบคุมโดยความเข้มข้นของสารอินทรีย์ละลาย

กากตะกอน [5] ซึ่งได้มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยการตะกอนที่ได้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท

- กากตะกอนที่เป็นสารอินทรีย์ เป็นตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยา มีส่วนประกอบของสารอินทรีย์ของเซลล์แบคทีเรีย มีความเข้มข้นของของแข็งต่ำ
- กากตะกอนที่เป็นสารอนินทรีย์ จากการบำบัดทางเคมี โดยองค์ประกอบของตะกอนนี้ขึ้นกับสารเคมีที่เติมลงในขั้นตอนการบำบัด เช่น เดิมปูนขาว เพื่อกำจัดโลหะหนัก ตะกอนนี้ก็จะมีส่วนประกอบของปูนขาวและโลหะออกไซด์

การตะกอนจะอยู่ในรูปกึ่งแข็งกึ่งเหลว มีลักษณะคล้ายดินเหนียว สีน้ำตาลเข้มจนถึงดำ มีกลิ่นเหม็น มีแก๊สและความร้อนจากการย่อยสลายกากตะกอนของจุลินทรีย์ ซึ่งเมื่ออยู่ในรูปไม่คงตัวนี้ สามารถย่อยสลายได้ และอัตราการเกิดตะกอนขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณน้ำเสียที่นำมาบำบัดรวมทั้งขนาดและกิจกรรมหลักในแต่ละชุมชน โดยอัตราการเกิดตะกอนมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นในเกือบทุกประเทศ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนการบำบัดตะกอนจนได้กากตะกอนที่มีสภาพไม่ย่อยสลาย ก่อนนำไปกำจัดด้วยวิธีการต่างๆ ต่อไป

### 2.2.1 องค์ประกอบของตะกอน

องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจะแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับประเภทของน้ำเสีย ขั้นตอน วิธีการและชนิดของระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วนประกอบของการตะกอนแยกออกได้เป็น 2 กลุ่ม ดังนี้

1. สารโลหะหนัก สารอินทรีย์เคมี จุลินทรีย์ และหนอนพยาธิต่างๆ
2. ธาตุอาหารพืช ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และจุลธาตุอาหารพืช เช่น เหล็ก แมกนีเซียม ทองแดง สังกะสี และธาตุอื่นๆ

เนื่องจากในกากตะกอนมีธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับพืช จึงทำการศึกษาคุณสมบัติของกากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียชุมชนแหล่งต่างๆ เพื่อสามารถนำมาปรับปรุงคุณภาพดินได้

## 2.2.2 เทคนิคในการกำจัดกากตะกอน [4,6]

โดยทั่วไปกากตะกอนสามารถกำจัดได้หลายวิธี ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียต่างกัน ดังต่อไปนี้ คือ

**2.2.2.1 การปล่อยทิ้งทะเล (Sea disposal)** เป็นวิธีที่นำไปทิ้งในทะเลลึกโดยตรง เป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยาก และมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่มีผลกระทบต่อระบบนิเวศน์วิทยาอย่างมาก โดยเฉพาะถ้าในทะเลเปิด และไม่ลึกมากนักทำให้ของเสียไม่มีการถ่ายเท ดังนั้น จึงไม่นิยมปฏิบัติในปัจจุบัน

**2.2.2.2 การฝังกลบ (Sanitary Landfill)** การฝังกลบ มีอยู่ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกต้องทำลายฤทธิ์ของกากอุตสาหกรรมเสียก่อน จากนั้นจึงทำให้กากแข็งตัว และนำไปฝังในหลุมฝังกลบที่ปูพื้นด้วยวัสดุพิเศษกันการรั่วซึม เช่น แผ่นพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง จากนั้นจึงทำการปิดปากหลุม ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีที่ต้องใช้เนื้อที่มากในการจัดการ และถ้าการจัดการไม่มีประสิทธิภาพพอ อาจเกิดการรั่วซึมของสารพิษออกจากบริเวณที่ฝังกลบโดยซึมลงดินหรือลงแหล่งน้ำ จึงมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

**2.2.2.3 การทำปุ๋ยหมัก (Composting)** สามารถทำได้ 2 วิธีคือ วิธีใช้ความร้อน เป็นการกำจัดความชื้นในกากตะกอนที่เปียกและเกิดการเผาไหม้บางส่วน of สารอินทรีย์โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 370°C โดยที่อุณหภูมินี้สารระเหยจะออกไปและกากตะกอนจะอยู่ในสภาพคงตัว ใช้ในการทำปุ๋ยหมักได้ และที่ 750-800°C แก๊สจะออกมาเพื่อกำจัดกลิ่น หลังจากการทำให้แห้งแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพ, บด, ลดน้ำหนัก และป้องกันกระบวนการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ ส่วนวิธีใช้จุลินทรีย์ เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง เพื่อที่ใช้จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่คงตัว โดยใช้เวลาประมาณ 5-10 วัน มีการกวนทุกๆ 2-3 วัน และระบบต้องมีความชื้น 55-70 % เพื่อให้ได้ปุ๋ยที่เป็นอาหารของพืช มีข้อเสียคือ ต้องมี มาตรการป้องกันน้ำเสียที่ไหลออกจากพื้นที่ทำปุ๋ยหมัก ปุ๋ยที่ได้มีคุณภาพต่ำ เสียค่าใช้จ่ายสูง

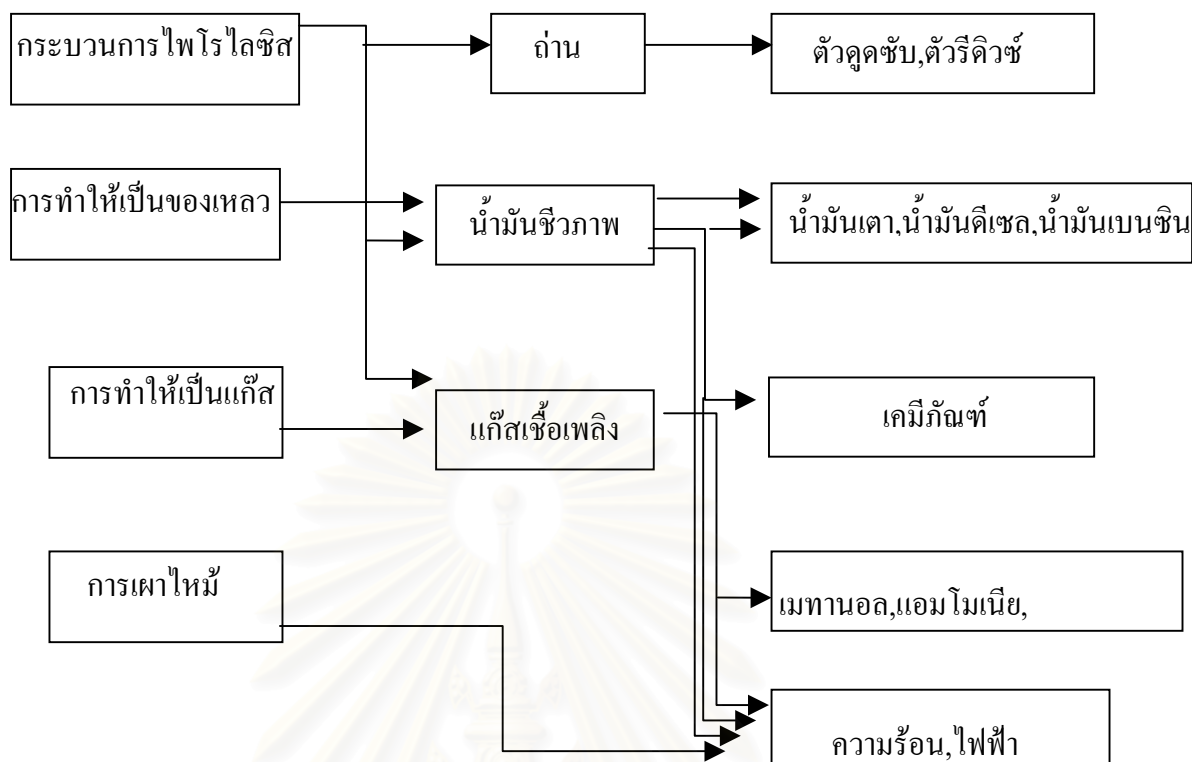
**2.2.2.4 การเผา (Incineration)** เหมาะสมกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง เช่น การเผากากส้วของโรงงานสุรา เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดปริมาตรตะกอนและขจัดกลิ่น (ใช้อุณหภูมิอย่างต่ำ 700°C) โดยทั่วไปนิยมนำกากตะกอนที่มีค่าความชื้นต่ำกว่า 70 % มาเผา มิฉะนั้นจะเสียค่าใช้จ่ายสูง การเผาต้องใช้อุณหภูมิสูง 1200-1400°F ใช้อัตราส่วนอากาศผสมสูง มากเกินพอประมาณ 50-100 % มากกว่าอากาศที่ต้องการจริง และใช้แก๊สธรรมชาติหรือน้ำมันเชื้อเพลิงช่วยในการเผาไหม้ เพื่อให้เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์ (complete combustion) และสามารถนำพลังงานความร้อนส่วนเกินไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ แต่ข้อเสียคือ เครื่องมือราคาสูง ต้องป้องกันมลภาวะอากาศจาก เถ้าที่ฟุ้งกระจาย

**2.2.2.5 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis)** เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายโดยการนำกากตะกอนซึ่งเป็นสารอินทรีย์มาเพิ่มความร้อนที่อุณหภูมิสูง (300-700°C) และความดัน ในบรรยากาศที่ปราศจากแก๊สออกซิเจน จะเกิดการสลายตัวของสารอินทรีย์จะได้เชื้อเพลิงมาใช้ประโยชน์ได้ในรูปแบบต่างๆ ทั้งแก๊ส น้ำมันทาร์ และถ่าน ซึ่งสามารถเผาไหม้และใช้เป็นแหล่งพลังงานในอนาคตต่อไป

## 2.3 กระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) [7, 8]

เป็นกระบวนการสลายสารประกอบอินทรีย์ของชีวมวล ถ่านหิน หรือสารอินทรีย์ ของเชื้อเพลิงจากได้พิภพ โดยให้ความร้อนในที่อับอากาศหรือบรรยากาศแก๊สเฉื่อย นอกจากนี้ยังมีคำที่มีความหมายเหมือนกับไพโรไลซิส คือ การสลายตัวทางความร้อน, การระเหย, การทำลายโครงสร้างเนื่องจากความร้อน เป็นต้น และยังมีกระบวนการอื่นๆ ที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวล เช่น การทำให้เป็นของเหลว, การทำให้เป็นแก๊ส และการเผาไหม้ เป็นต้น จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.2

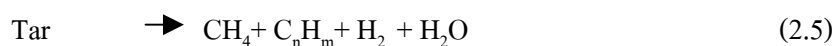
เมื่อถ่านหิน หินน้ำมัน ทาร์แซนค์ หรือชีวมวล ที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ได้สารระเหยที่มีไฮโดรเจนสูงจะกลั่นออกมา และเพิ่มสัดส่วนคาร์บอนโดยเหลือส่วนที่เป็นของแข็งซึ่งมีคาร์บอนสูง ขณะเดียวกันก็ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือแก๊สออกมาด้วย โดยจะเกิดการหักออกตรงบริเวณที่มีพันธะที่อ่อนหรือหมู่ที่หลุดออกได้ง่าย ทำให้โมเลกุลวงแหวนแตกออกจากกันเป็นกลุ่มๆ จำนวนมาก



รูปที่ 2.2 แผนผังกระบวนการแปรรูปชีวมวลด้วยวิธีต่างๆ [9]

โครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกหลักที่เหลือกลายเป็นโครงสร้างของถ่านชาร์ ส่วนกลุ่มโครงสร้างโมเลกุลหรือหมู่ที่มีขนาดเล็กกว่า จะกลั่นสลายตัวออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่อุณหภูมิห้อง ได้แก่ น้ำ แอมโมเนีย น้ำมันทาร์ และแก๊สต่างๆ ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_n\text{H}_m$ ,  $\text{H}_2$ )

ก่อนที่ไอจากไพโรไลซิสจะถูกควบแน่น และเกิดปฏิกิริยาต่างๆ เช่น การแตกตัวของน้ำมันทาร์ และการลดลงของถ่านชาร์ ซึ่งกระบวนการเหล่านี้จะทำให้เกิด แก๊สที่ไม่กลั่นตัว เช่น  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  ในขณะที่เดียวกันก็เกิดการแตกตัว ของ  $\text{C}_n\text{H}_m$  ดังนี้ [10]





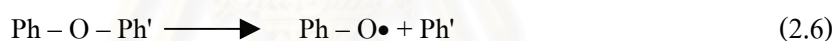
## 2.4 กลไกการเกิดไฟโรไลซิส [11]

การศึกษากลไกการเกิดไฟโรไลซิสเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากจะทำให้สามารถบ่งบอกถึงการดำเนินของปฏิกิริยา ซึ่งจะนำไปสู่การเกิดผลิตภัณฑ์ที่มีค่าความต้องการสูง และนำไปสู่สมมติฐานที่ใช้เป็นแนวทางในการออกแบบต่อไป

กลไกการเกิดไฟโรไลซิส เกิดจากแตกออกของพันธะทางเคมีที่ซับซ้อนของโครงสร้างโพลีเมอร์ของชีวมวลโดยการให้ความร้อน ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ ขึ้น ซึ่งสามารถสรุปปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ 2 แบบ

**2.4.1 ปฏิกิริยาการเติมอนุมูลอิสระ** (addition of free radical) เช่น  $\bullet\text{H}$ ,  $\bullet\text{CH}_3$ ,  $\bullet\text{C}_2\text{H}_5$  ในสารประกอบอะลิฟาติก และอาจจะเพิ่มเข้าไปในสารประกอบอะลิฟาติกที่มีสองพันธะ (Aliphatic double bond)

**2.4.2 ปฏิกิริยาการแตกสลายของพันธะอีเทอร์** (Dissociation of ether bond) ดังนี้



ปฏิกิริยาเหล่านี้จะให้อนุมูลฟีนอลที่มีโครงสร้างทนต่อความร้อนพอสมควรปฏิกิริยานี้สามารถใช้อธิบาย การเกิดสารประกอบฟีนอล ดังนั้นเมื่อไรที่เกิดอนุมูลอิสระขึ้น ก็จะเกิดปฏิกิริยากันทันทีก่อนที่อนุมูลอิสระเหล่านี้จะแยกตัวออกจากกัน

โดยจากการศึกษาโครงสร้างของถ่านหิน [8] ซึ่งมีลักษณะคล้ายโมเลกุลโพลีเมอร์ ประกอบด้วยวงแหวนอะโรมาติกและไฮโดรอะโรมาติก ซึ่งเชื่อมกันด้วยวงแหวนอะลิฟาติก ที่อ่อนแอกว่า ดังรูปที่ 2.3 พบว่า

ปริมาณ C ในอะโรมาติก ประมาณ 60-75%

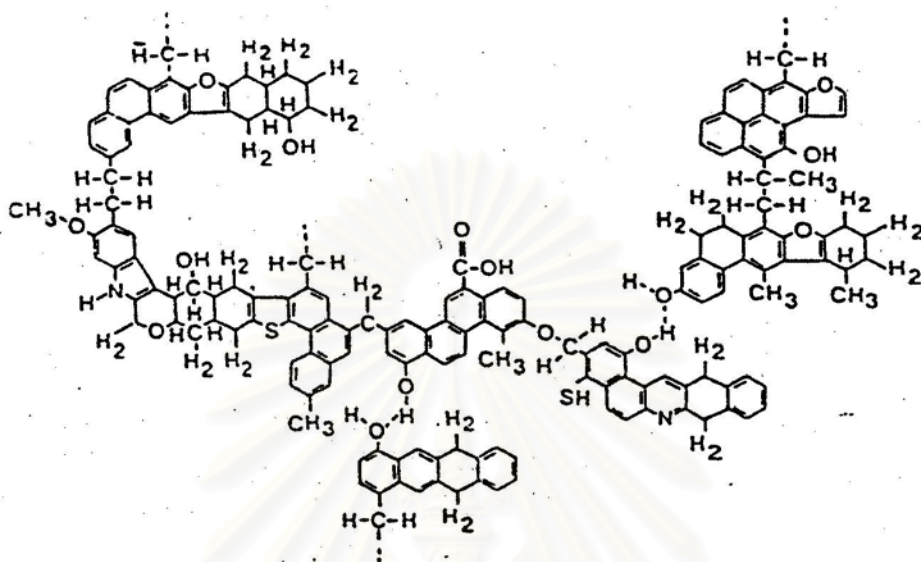
ปริมาณ C ในไฮโดรอะโรมาติก ประมาณ 15-25% (ไฮโดรคาร์บอน)

ปริมาณ C ใน อะลิฟาติก ประมาณ 5-10%

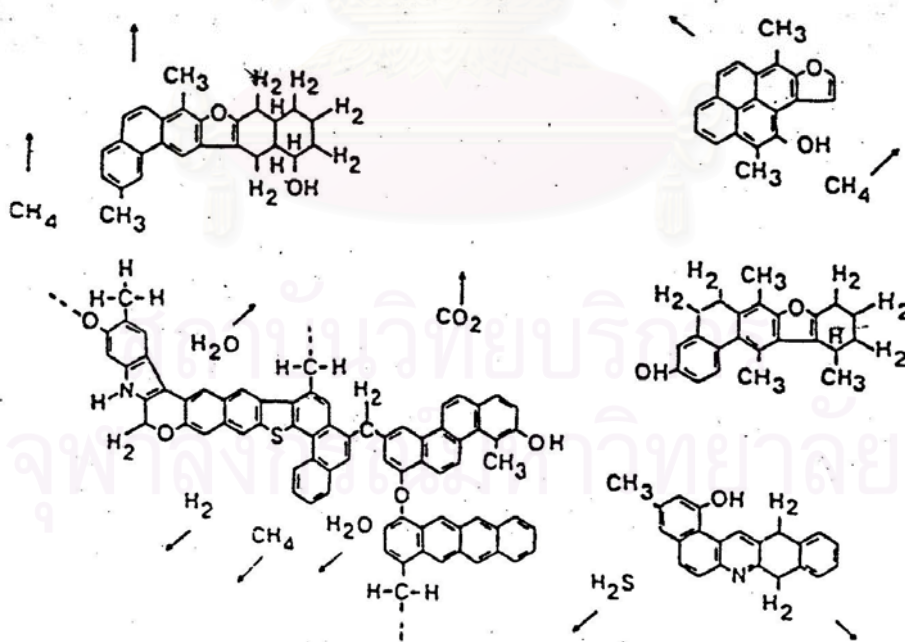
ในวงแหวน นี้ยังมีอะตอมหลายอะตอม เช่น พวก O,S และ N

ในขณะที่เกิดแตกสลายโครงสร้างที่อุณหภูมิประมาณ  $500^\circ\text{C}$  โดยพันธะอะลิฟาติกจะหักออกก่อนทำให้ได้อนุภาคอิสระที่มีโมเลกุลใหญ่ ได้ ทาร์และน้ำมันเบา ซึ่งที่ได้จากการที่ อนุภาค

อิสระ เหล่านี้คายแก๊สไฮโดรเจนออกมา โดย Solomon เชื่อว่าแก๊สไฮโดรเจน นี้มาจากอะลิฟาติก เป็นส่วนใหญ่ ส่วนที่เป็นโมเลกุลแก๊ส ได้จากการแตกตัวของพวก พันธะเชื่อมระหว่างโมเลกุล วงแหวน และ กลุ่มที่ติดกัน กลายเป็นกลุ่มโมเลกุลที่เรียกว่า โค้ก แสดงดังในรูปที่ 2.4 ข้างล่างนี้



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของถ่านหิน [7]



รูปที่ 2.4 การแตกตัวของโครงสร้างของถ่านหินระหว่างกระบวนการไพโรไลซิส [7]

จากรูปที่ 2.4 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกมีการจัดเรียงตัวใหม่ น้อยมาก ส่วนโครงสร้างอะลิฟาติก หรือไฮโดรอะโรมาติก ของถ่านหินจะสลายตัว แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดจากหมู่คาร์บอกซิล น้ำเกิดจากหมู่ไฮดรอกซิล แก๊สไฮโดรคาร์บอนเกิดจากหมู่อะลิฟาติก แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดจาก mercaptans และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เกิดจากหมู่อีเทอร์ แต่ที่อุณหภูมิสูงโครงสร้างวงแหวนอะโรมาติกเกิดการแตกตัวและจัดเรียงตัวใหม่ ในขั้นตอนนี้จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากไฮโดรเจนในอะโรมาติก แก๊ส คาร์บอนซัลไฟด์จากไทโอฟิน และแก๊สไฮโดรเจนไซยาไนด์จากวงแหวนไนโตรเจน และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์จากหมู่อีเทอร์

การเปลี่ยนแปลง น้ำหนักที่หายไปของถ่านหินเมื่อได้รับความร้อน พบว่า น้ำหนักที่หายไปจะสูงมากที่อุณหภูมิประมาณ  $450^{\circ}\text{C}$  และช่วงการเปลี่ยนน้ำหนักเริ่มตั้งแต่  $350-400^{\circ}\text{C}$  จนถึง  $500^{\circ}\text{C}$

การเปลี่ยนแปลงมี 3 ช่วง

- 1.) อุณหภูมิ  $100-300^{\circ}\text{C}$  เป็นการปล่อยน้ำและ  $\text{CO}_2$  ออกมา
- 2.) สารระเหยประมาณ 2 ใน 3 ส่วนถูกปล่อยออกมา
- 3.) เกิดดีแก๊สซิฟิเคชันขั้นที่สอง(ทุติยภูมิ) ซึ่งเกิดจากเปลี่ยนแปลงของถ่านชาร์ไปเป็นโค้ก และมีการปลดปล่อย แก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัว (ส่วนใหญ่ คือ  $\text{H}_2$ )

ในแง่ของอัตราเร็วของการให้ความร้อนพบว่า มีความแตกต่างระหว่าง อัตราการให้ความร้อนอย่างช้า ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นจะอยู่ในสภาวะสมดุลกัน ตลอดเวลาที่ตำแหน่งนั้น ๆ แต่ถ้าอัตราการให้ความร้อนอย่างรวดเร็ว ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นให้ความร้อนมีน้อยมาก โดยปฏิกริยาจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสุดท้ายไม่ขึ้นกับปฏิกริยาก่อนหน้านั้น คล้ายกับเป็น การไพโรไลซิสที่อุณหภูมิกงที่ และจะไม่มีโอกาสเกิด แตกสลายโครงสร้างขั้นทุติยภูมิของผลิตภัณฑ์ นั่นคือ ทาร์ที่ออกมาไม่มีโอกาสเกิด รีโพลิเมอร์ไรซ์ไปเป็นโค้ก ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้ จึงเป็นแก๊สจำนวนมาก และทาร์ที่มีมวลโมเลกุลสูงมากกว่ากระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า

การทดลองในห้องทดลองมีวิธีที่ใช้เป็นมาตรฐาน คือ ในประเทศอเมริกาใช้ Fischer assey ที่อุณหภูมิ  $500^{\circ}\text{C}$  ส่วนในประเทศอังกฤษและที่อื่นๆ ใช้ Gray-King assey ที่  $500$  หรือ  $600^{\circ}\text{C}$  โดยการให้ความร้อน โดยไม่มีอากาศอยู่ด้วย ที่อัตราเร็วคงที่ จนถึงอุณหภูมิสุดท้ายและรอน แก๊ส และของเหลวออกมาหมด วัดปริมาณหรือ ปริมาตรของผลิตภัณฑ์

พบว่าในแง่โครงสร้างและองค์ประกอบของทาร์แล้วใกล้เคียงกับของถ่านหิน ดังนั้นน่าจะคาดคะเนได้ว่า อัตราส่วนมวลของ ทาร์ ที่อุณหภูมิต่ำขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของ H/C ในถ่านหินเดิม จากการวิเคราะห์และทำ least square กับถ่านหินมากกว่า 130 ชนิด พบความสัมพันธ์ดังนี้

$$\text{ทาร์ + น้ำมันเบา (mass\%)} = 29.1(\text{H/C}) - 12.1 \quad (2.7)$$

พบว่าค่าที่ได้จากสมการ 2.7 ใช้ได้จนถึงอุณหภูมิ 1000°C แต่ที่ 900°C อัตราส่วนแก๊ส เพิ่มขึ้นจากที่ 500°C มาก ซึ่งเกิดจาก แตกสลายโครงสร้างของซาร์

องค์ประกอบ ทาร์และน้ำมันเบา (ที่ < 700°C) ทาร์ประกอบด้วย ฟีนอล ไพรีดีน พาราฟิน และโอเลฟิน สำหรับลิกไนต์ทาร์ จะมีส่วนประกอบของ พาราฟินแวกต์ อยู่ด้วย สำหรับ น้ำมันเบา ประกอบด้วยองค์ประกอบจำนวนมากมาย แต่ละตัวอาจมีอยู่เพียง 1%

องค์ประกอบทาร์ (ที่ > 700°C) มีลักษณะเป็นส่วนผสมคล้ายบิทูเมน ซึ่งประกอบด้วย สารประกอบอะโรมาติกที่กลั่นตัวได้ และน้ำมันเบา ซึ่งประกอบด้วย เบนซีน, โทลูอิน และไซลีน เป็นส่วนใหญ่

ทาร์ และน้ำมันเบาไม่ค่อยคงสภาพเมื่อให้ความร้อนสูงจะเข้มข้นและข้นขึ้น ส่วนใหญ่จะมาทำ ไฮโดรจีเนตต่อและเพื่อกำจัดซัลเฟอร์และไนโตรเจน ออกมาในรูปแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแอมโมเนีย โดยใช้กระบวนการเดียวกับ แก๊สปิโตรเลียม ประกอบด้วย CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> ซึ่งประกอบด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งไม่มากนัก องค์ประกอบหลักคือ CH<sub>4</sub> ปริมาณของแก๊สขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ มากกว่าชนิดของถ่านหิน เนื่องจากซาร์จะสลายโครงสร้าง ที่อุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์สูงขึ้น และมีปริมาณ H<sub>2</sub> สูงขึ้นด้วย

## 2.5 ผลผลิตที่ได้อาจจากกระบวนการไพโรไลซิส [12]

เมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส จะมีการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการระเหยไปของน้ำและสารระเหย รวมทั้งแก๊สต่างๆที่เกิดขึ้นด้วย องค์ประกอบของสารอินทรีย์และอนินทรีย์เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งด้านกายภาพ และเคมี ผลผลิตหลักที่ได้มี 3 ประเภท คือ

**2.5.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง** มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือผลิตสารเคมีอื่นได้อีก เช่น ถ่านกัมมันต์ แนฟทาลิน แอนทราซีน และสารประกอบไซยาโนเจน แต่โดยนำมาใช้เป็นวัสดุเชื้อเพลิงไร้ควัน เพื่อใช้ในบ้านเรือนและอุตสาหกรรมขนาดเล็กหรือกลางได้ดี เช่น เป็นเชื้อเพลิงให้หม้อไอน้ำ การเผาอิฐ การอบแห้ง ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร โรงงานผลิตหินปูน และซีเมนต์ หรือ ใช้ในโรงงานถลุงเหล็กและทองแดง เพราะไม่ก่อให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมจากกลิ่นหรือควันจากพวกสารระเหยและสารประกอบพวกไนโตรเจนและกำมะถัน

**2.5.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว** ที่อุณหภูมิห้องเป็นของเหลว เรียกว่า liquid tar ประกอบด้วยน้ำและสารประกอบที่ละลายน้ำ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นน้ำมันทาร์ องค์ประกอบของน้ำมันทาร์เป็นสารประกอบที่ซับซ้อนของไฮโดรคาร์บอน ที่มีโครงสร้างส่วนมากเป็นพวกวงแหวน แนฟทาลินเชื่อมด้วยหมู่เอทีลิน โมเลกุลของน้ำมันทาร์มีองค์ประกอบของธาตุคาร์บอนตั้งแต่  $C_5$ - $C_6$  ประกอบเป็นโครงสร้างของสารเคมีต่างๆ อาจมีมากกว่า 200 ชนิด แบ่งออกได้ตามอุณหภูมิที่ใช้ในการกลั่นเป็น 5 ส่วน คือ

- น้ำมันเบา (light oil) ช่วงอุณหภูมิ  $< 200^{\circ}C$  ได้แก่ เบนซีน เบนโซลดิบ โทลูอิน เอทิลเบนซีน ไซลีน
- น้ำมันช่วงกลาง (middle oil) ช่วงอุณหภูมิ  $200-250^{\circ}C$  ได้แก่ ฟีนอล ไซรีน
- น้ำมันช่วงหนัก (heavy oil) ช่วงอุณหภูมิ  $250-300^{\circ}C$  ได้แก่ ไคเมททิล แนฟทาลิน
- น้ำมันแอนทาซีน (anthracene) ช่วงอุณหภูมิ  $300-350^{\circ}C$  ได้แก่ ฟลูออรีน ฟีนแนพทีน
- พิตช์ (pitch) ช่วงอุณหภูมิ  $> 350^{\circ}C$  ได้แก่ น้ำมันหนักบางประเภทพวกไข (red wax) ซึ่งเป็นส่วนที่เหลือจากการกลั่น

โดยผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว พวกน้ำมันทาร์ปัจจุบันมีคุณค่าทางเศรษฐกิจมาก คุณค่าของน้ำมันทาร์นี้ขึ้นกับกระบวนการผลิต เช่น ถ้าผลิตที่อุณหภูมิสูงจะกลั่นได้แนฟทาลิน และแอนทราซีน ซึ่งสามารถแยกเป็นส่วนต่างๆ ได้ ส่วนการผลิตที่อุณหภูมิต่ำน้ำมันเบาและหนักจะเป็นของผสมอิมัลชัน ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปกลั่นแยกให้บริสุทธิ์สามารถนำไปใช้ผลิตน้ำมันแทนการผลิตจากการกลั่นจากปิโตรเลียมเหลวได้หรือใช้ในการผลิตสารเคมีอื่นได้ ส่วนที่เป็นน้ำมันหนักจะผ่านการกลั่นลำดับส่วนแยกเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ น้ำมันเตา และสารเคมีชนิดต่างๆ เช่น

น้ำมัน ครีโอโซท แนพทาลิน แอนทราซีน ฟีนอล ซายลอน พิริดีน เป็นต้น หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตเรซิน

**2.5.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส** เป็นของผสมระหว่างแก๊สอินทรีย์และอนินทรีย์ โดย แก๊สอินทรีย์ ได้แก่ ไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน เป็นต้น

โดยแก๊สส่วนใหญ่จะเป็นแก๊สไฮโดรเจน มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนแก๊สที่เผาไหม้ได้ คือ คาร์บอนไดออกไซด์ ไนโตรเจน ออกซิเจน และสารประกอบไฮโดรคาร์บอน นอกจากนี้ยังมีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแอมโมเนีย ซึ่งต้องกำจัดออกก่อนนำไปใช้เป็นแก๊สเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ให้ความร้อน หรือการผลิตไฟฟ้า และจำหน่ายต่อไป

## 2.6 ประเภทของกระบวนการไพโรไลซิส [13]

กระบวนการไพโรไลซิส สามารถแบ่งประเภทตามอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลได้ 2 ประเภท คือ

**2.6.1 กระบวนการไพโรไลซิสอย่างช้า (Slow pyrolysis)** เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนให้แกชีวมวลอย่างช้าๆ ในระยะเวลามากกว่า 5 นาทีขึ้นไป ในช่วงอุณหภูมิ 400-600°C และให้อัตราการให้ความร้อนไม่เกิน 10°C/วินาที

**2.6.2 กระบวนการไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว (Rapid pyrolysis)** เป็นกระบวนการถ่ายเทความร้อนให้แกชีวมวลอย่างรวดเร็ว ในช่วงระยะเวลาสั้นน้อยกว่า 5 วินาทีในช่วงอุณหภูมิ 600-1000°C และอัตราให้ความร้อนในช่วง 10-100°C/วินาที และแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีจะถูกทำให้เย็นลงอย่างรวดเร็ว การไพโรไลซิสอย่างรวดเร็วมักได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าทางความร้อนสูง เช่น โอลีฟิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเอทิลีน และ โพรพิลีน

การไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว ของชีวมวล ไม้ และสิ่งที่เหลือจากการเกษตร จะได้ถ่านชาร์ปริมาณน้อยกว่า ไพโรไลซิสอย่างช้า แต่ถ่านชาร์ที่ได้จะมีรูพรุนสูงและเกิดปฏิกิริยาได้เร็ว นอกจากนี้ยังเกิดปฏิกิริยา แก๊สซิฟิเคชันมากกว่าด้วย [14] โดยที่อุณหภูมิปานกลาง เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิสูง จะใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยามาก จะ

ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์, ไฮโดรเจน และมีเทนมากขึ้น แต่แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง [10]

## 2.7 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการไพโรไลซิส [13]

สิ่งสำคัญที่จะต้องพิจารณาในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์ คือ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ ชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากวัตถุดิบชนิดต่างๆ และสถานะของไพโรไลซิส

องค์ประกอบทางเคมีที่มีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส โดยถ้าตัวอย่างมีคาร์บอนปริมาณมาก ออกซิเจนต่ำ และอัตราส่วน H/C ต่ำ จะได้ปริมาณการเกิดโค้ก สูง [15]

ดังนั้นในการผลิตเชื้อเพลิงสังเคราะห์จะต้องทำการควบคุมตัวแปรเหล่านี้ เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณสมบัติตามต้องการ อิทธิพลเหล่านี้จะส่งผลทำให้ปริมาณและสมบัติของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และแก๊สเปลี่ยนแปลงได้ นอกจากนี้แล้วการศึกษาถึงอิทธิพลเหล่านี้มีผลให้เกิดแนวความคิดในการออกแบบสร้างเครื่องมือที่ใช้สำหรับกระบวนการไพโรไลซิสที่มีประสิทธิภาพด้วย

ปัจจัยที่มีผลต่อการไพโรไลซิส จำแนกได้เป็น 2 ประเภทคือ ปัจจัยทางกายภาพ ปัจจัยทางเคมี

### 2.7.1 ปัจจัยทางกายภาพ

ได้แก่ อุณหภูมิสุดท้าย เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา อัตราการให้ความร้อน ขนาดของอนุภาค ความดัน และชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เป็นต้น

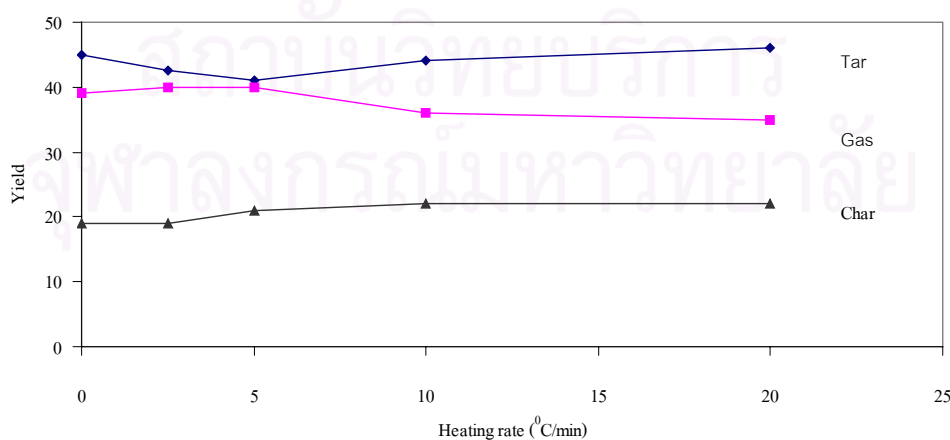
#### 2.7.1.1 อิทธิพลของอัตราการให้ความร้อน

ในการทำปฏิกิริยาไพโรไลซิส ถ้าอัตราการให้ความร้อนเร็วทำให้ได้ปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ระเหยได้มีมาก ได้ถ่านชาร์น้อย และการให้ความร้อนอย่างรวดเร็วจนถึงอุณหภูมิการสลายตัวของชีวมวลได้ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส และของเหลวมากกว่าการให้ความร้อนด้วยอัตราช้า ดังรูปที่ 2.5 เพราะชีวมวลถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนเหลวได้ง่ายขึ้น [14]

และโมเลกุลของน้ำมันทาร์ที่อยู่ในสถานะแก๊ส มีช่วงเวลาที่ได้รับความร้อนสั้นมาก ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาจึงเกิดปฏิกิริยาน้อยเนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดส่วนใหญ่จะเกิดที่อุณหภูมิสุดท้าย ซึ่งไม่ขึ้นกับปฏิกิริยาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ไม่เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ และเวลาในการเกิดการแตกตัวของทาร์น้อย ทำให้ไม่ต้องสูญเสียปริมาณและคุณสมบัติของน้ำมันทาร์ จึงได้ทาร์, มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์มาก แต่ไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนลดลง โดยอัตราเร็วในการเกิดแก๊สแต่ละชนิดไม่แตกต่างกัน เมื่อเปลี่ยนอัตราให้ความร้อนอาจเนื่องมาจากข้อจำกัดในการถ่ายโอนความร้อนในระบบการทดลอง [15, 16]

Said et.al. [17] พบว่า ที่อัตราให้ความร้อนต่ำหรือปานกลาง ( $<100^{\circ}\text{C/s}$ ) เกิดปฏิกิริยามากกว่าที่อัตราให้ความร้อนสูง ส่งผลให้มวลเกิดการเปลี่ยนแปลงมากกว่า และเวลาที่ต้องการสำหรับปฏิกิริยาการเกิดสารระเหยที่สมบูรณ์น้อยกว่าเวลาที่อนุภาคต้องการเพื่อให้อุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสุดท้าย ดังนั้นที่อัตราให้ความร้อนสูงก็ต้องใช้อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวที่สมบูรณ์มากที่สุด

นอกจากนี้อัตราให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสในการเกิดถ่านชาร์ของชีวมวล มากกว่าถ่านหิน [18] เนื่องจากชีวมวลมีปริมาณเซลลูโลสสูง อัตราให้ความร้อนมีผลอย่างมากต่อการไพโรไลซิสเซลลูโลส โดยจะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของเซลลูโลส และเกิดการดีโพลีเมอไรเซชันของเซลลูโลส เปลี่ยนไปเป็นแอนไฮโดรเซลลูโลส ที่มีความอยู่ตัวมากขึ้น และก็จะให้ถ่านชาร์มากขึ้น แต่ถ้าใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อย อัตราให้ความร้อนก็จะมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาน้อยเพราะเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะน้อยมาก



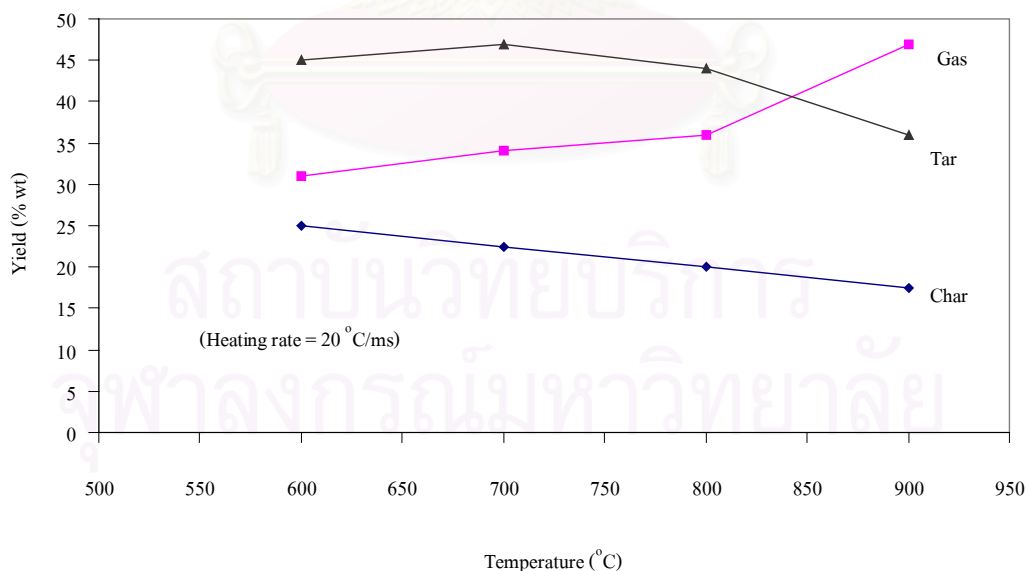
รูปที่ 2.5 อิทธิพลของอัตราให้ความร้อนกับการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ [18]



### 2.7.1.1 อิทธิพลของอุณหภูมิ

K.Maniatis et al. [18] ไพโรไลซิสไม้ ที่อุณหภูมิประมาณ 600-900°C พบว่าที่ 400°C เริ่มเกิดกระบวนการไพโรไลซิส ที่ 600°C ไม้เปลี่ยนเป็นสารระเหยได้ 75 %และเพิ่มขึ้นเป็น 82% ที่ 900°C โดยอุณหภูมิมีผลต่อปฏิกิริยาการไพโรไลซิสทั้งในด้านปริมาณและองค์ประกอบของสารระเหยได้ คือ เมื่ออุณหภูมิมากขึ้น น้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดถ่านชาร์จะลดลง

Dai et al. [10] พบว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นถึง 900°Cจะได้แก๊สเพิ่มมากขึ้นและคุณสมบัติของน้ำมันทาร์จะมีโครงสร้างเปลี่ยนไปด้วย เพราะการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานเพื่อทำลายพันธะภายใน โครงสร้างของวัตถุดิบนั้น เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของทาร์จากปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิ มากขึ้น เกิดเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอนมอนอกไซด์, มีเทน และไฮโดรเจน ปริมาณมากขึ้น ส่วนไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นจะลดลง ทำให้ปริมาณทาร์และชาร์ที่ได้ลดลง และมีการสะสมของคาร์บอน โดยการแตกตัวของสารระเหยบนพื้นผิวชาร์ที่ร้อน โดยปริมาณชาร์ไม่เกิดขึ้นมากในปฏิกิริยาขั้นต้น และแก๊สที่ไม่สามารถกลั่นตัวได้มาจากการหลอมเหลวในขั้นแรกโดยไม่ผ่านทาร์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 อิทธิพลของอุณหภูมิสุดท้ายกับผลิตภัณฑ์ แก๊ส ทาร์ และชาร์ [18]

นอกจากนี้ชั้นแรกสารระเหยได้ที่ออกมาปริมาณไม่มาก และแก๊สที่ได้ส่วนใหญ่เป็นน้ำและสารประกอบออกไซด์ของคาร์บอน หลังจากนั้นชั้นที่สองจึงเกิดดีแก๊สซิฟิเคชัน จึงปล่อยแก๊สที่ไม่ควมแน่น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งมีผลต่อเนื่องกับการเปลี่ยนรูปไปเป็นถ่านชาร์ต่อไป

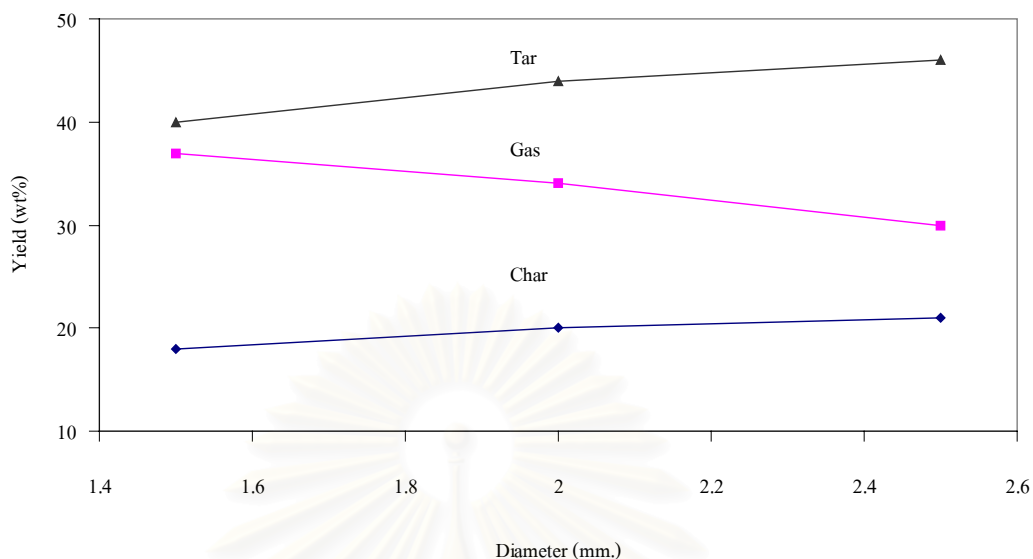
### 2.7.1.3 อิทธิพลของขนาดอนุภาค

ขนาดวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสมีผลต่อปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ ขนาดใหญ่มีผลทำให้อัตราการเพิ่มความร้อนเป็นไปได้ช้ามาก ดังนั้นอุณหภูมิเฉลี่ยของอนุภาคขนาดใหญ่จะต่ำกว่าอุณหภูมิเฉลี่ยของขนาดเล็ก เป็นผลให้สารระเหยที่ได้จากวัตถุดิบขนาดใหญ่มีปริมาณน้อย เพราะขนาดใหญ่มีรูพรุนมาก การนำความร้อนไม่ดี แต่ถ้าขนาดเล็กจะส่งผลให้อัตราการเพิ่มความร้อนเร็วมากเป็นผลให้สารระเหยออกมาได้ปริมาณน้ำมันทาร์มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากตัวอนุภาคมีรูพรุนน้อยเกิดการนำความร้อนได้ดี กระจายความร้อนได้ทั่วถึง สม่่าเสมอมากกว่านั่นเอง

Veronika et al. [15] ไพโรไลสส์ถ่านหินบิทูมินัสขนาด 100-2000  $\mu\text{m}$ . พบว่าอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ จะมีช่องว่างระหว่างอนุภาค (void space or bed porosity) ลดลง มีความหนาแน่นสูง จะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน, คาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนมอนอกไซด์ลดลง แต่มีเทน, อีเทน และโพรเพนเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาในการแตกตัวขึ้นทุติยภูมิของทาร์ในช่องว่างระหว่างอนุภาคได้มากกว่าขนาดเล็ก

Said et al. [21] พบว่าอนุภาคขนาดใหญ่ มีการตอบสนองต่ออุณหภูมิลดลง ต้องใช้เวลานานในการเกิดปฏิกิริยา จึงเกิดปฏิกิริยาในชั้นทุติยภูมิมากขึ้น ได้แก๊สอีเทน มีเทนมากขึ้น แต่คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงเล็กน้อย

Maniatis et al. [18] พบว่า เมื่ออนุภาคมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่ขึ้น ในกระบวนการไพโรไลซิสต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อให้ภายในอนุภาคมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสุท้าย ทำให้ได้ปริมาณทาร์และชาร์ เพิ่มขึ้น แต่ปริมาณแก๊สลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 เนื่องจากการแตกตัวทางความร้อนของทาร์ และสารระเหยที่เคลื่อนที่ผ่านผิวของอนุภาคเกิดปฏิกิริยากับชาร์ เป็นปฏิกิริยาในชั้นทุติยภูมิอีกด้วย ส่วนที่ผ่านการไพโรไลสแล้วบนรูพื้นผิวที่ร้อนเกิดการสะสมของคาร์บอนอีกด้วย



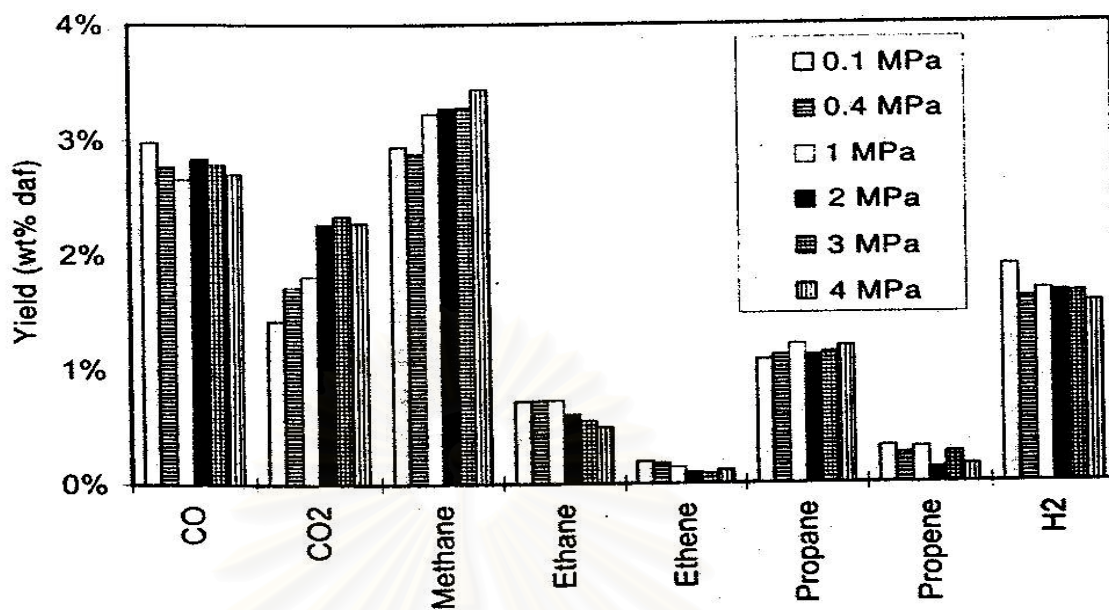
รูปที่ 2.7 อิทธิพลของขนาดตัวอย่างต่อการกระจายตัวของผลิตภัณฑ์ [18]

#### 2.7.1.4 อิทธิพลของความดัน

ความดันมีผลต่อปริมาณและสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้ คือ การลดความดันส่งผลทำให้ปฏิกิริยาแตกตัวลดลง ได้ปริมาณน้ำมันทาร์มากกว่าที่ความดันสูง แต่ปริมาณถ่านชาร์เพิ่มขึ้น และการเพิ่มความดัน [15] ส่งผลให้ปฏิกิริยาแตกตัวได้ดีขึ้นทำให้สารระเหย, น้ำและทาร์ในถ่านหินลดลง ส่วนปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน มากขึ้น แต่ปริมาณ อีเทน อีthin โพรเพน และไฮโดรเจนลดลง ขณะที่คาร์บอนมอนอกไซด์มากขึ้นแล้วคงที่ โดยที่อุณหภูมิต่ำ (200-400°C) เกิดคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ส่วนที่อุณหภูมิปานกลาง (450-600°C) เกิดมีเทน ดังรูป 2.8

#### 2.7.1.5 อิทธิพลของเวลาในการเกิดปฏิกิริยา

เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา มีผลต่อปริมาณและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส โดยยิ่งใช้เวลามาก จะทำให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสต่อเนื่องขั้นทุติยภูมิ ส่งผลให้ได้ถ่านชาร์มากขึ้น ส่วนทาร์จะแตกตัวทำให้มีปริมาณลดลงนำไปสู่การเกิดแก๊สมีเทน หรือ ไฮโดรเจน และมีอิทธิพลต่อองค์ประกอบของแก๊สที่ได้อื่นๆ ด้วย [14, 18, 21]



รูปที่ 2.8 อิทธิพลของความดันต่อปริมาณของผลิตภัณฑ์แก๊สต่างๆ [15]

### 2.7.1.6 อิทธิพลของอัตราการไหล

จากงานวิจัยของ A.E. Putun et al. ศึกษาการไพโรไลซิสของดอกทานตะวันพบว่า ถ้าเปลี่ยนขนาดตัวอย่าง จากน้อยกว่า 0.4 mm. และมากกว่า 1.8 mm. ที่อุณหภูมิ 500°C อัตราให้ความร้อนต่ำ 7°C/min และอัตราไหลของแก๊สไนโตรเจน 0.022 cm<sup>3</sup>/s พบว่า ไม่มีผลต่อผลได้ของผลิตภัณฑ์ถ่านชาร์ คือจะคงที่ประมาณ 27 % [16]

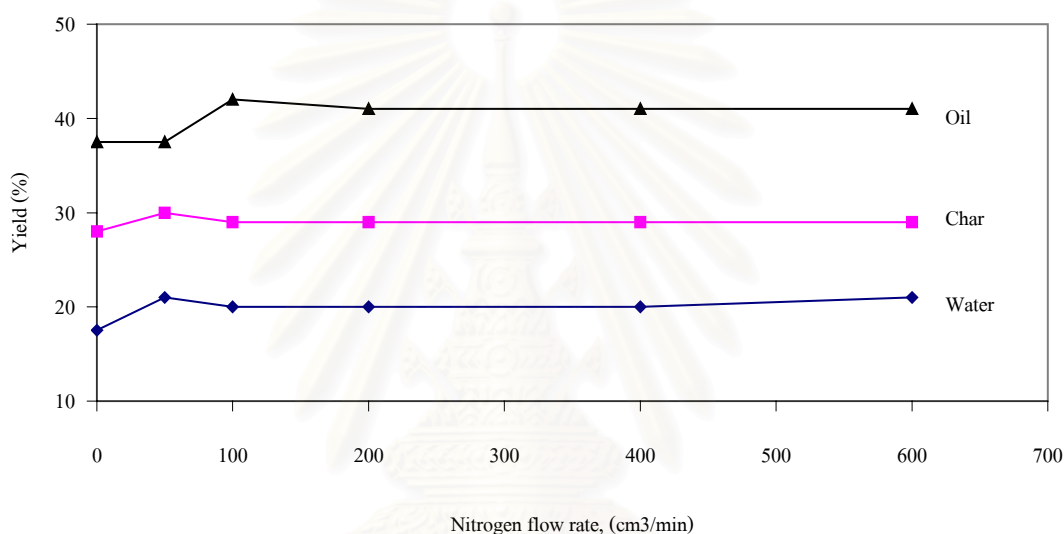
แต่เมื่อเพิ่มความเร็วของอัตราการไหลของแก๊สในช่วง 0.022-0.044 cm<sup>3</sup>/s ปริมาณน้ำมันจะเพิ่มขึ้นระหว่าง 2-4 % โดยน้ำมันจะเกิดมากที่สุดถึง 40 % จากนั้นมีแนวโน้มที่ ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้เป็นดังรูปที่ 2.9

### 2.7.2 ปัจจัยทางเคมี

ได้แก่ ธาตุที่เป็นองค์ประกอบของกากตะกอน องค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันของสารอินทรีย์และอนินทรีย์ รวมทั้งองค์ประกอบของบรรยากาศที่ใช้ในการไพโรไลซิส

### 2.7.2.1 อิทธิพลของปฏิกิริยาไฮโดรไพโรไลซิส

ปฏิกิริยาไฮโดรไพโรไลซิสก็คือ การไพโรไลซิสในบรรยากาศของไฮโดรเจน โดยแก๊สไฮโดรเจนสามารถเกิดปฏิกิริยากับสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ได้ เช่น อีเทน เอททีลีน โพรเพน เป็นต้น โดยเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน เป็นผลทำให้ได้ปริมาณแก๊สสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนน้ำหนักโมเลกุลต่ำมากขึ้น

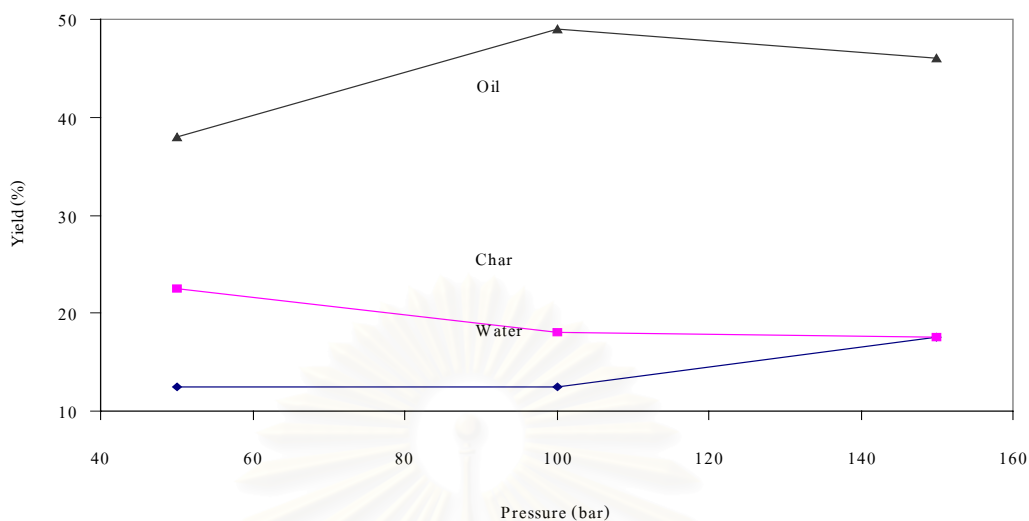


รูปที่ 2.9 อิทธิพลของอัตราการไหลของไนโตรเจนกับปริมาณผลิตภัณฑ์ [16]

ปฏิกิริยาไฮโดรไพโรไลซิส [16] เมื่อ ความดันของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณออกซิเจนของน้ำมันลดลง เมื่อใช้คาร์บอนเป็นเกณฑ์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนเป็นน้ำมันมากขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.11

### 2.7.2.2 อิทธิพลของ Additives หรือ Catalyst

MiNik-Agar et al. [19] ใช้ ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ Ni-Al โดยศึกษาว่า ถ้าเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของตัวเร่งปฏิกิริยากับอัตราการไหลของชีวมวลจะทำให้ได้แก๊สไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์มากขึ้น แต่มีเทนและอีเทนลดลง

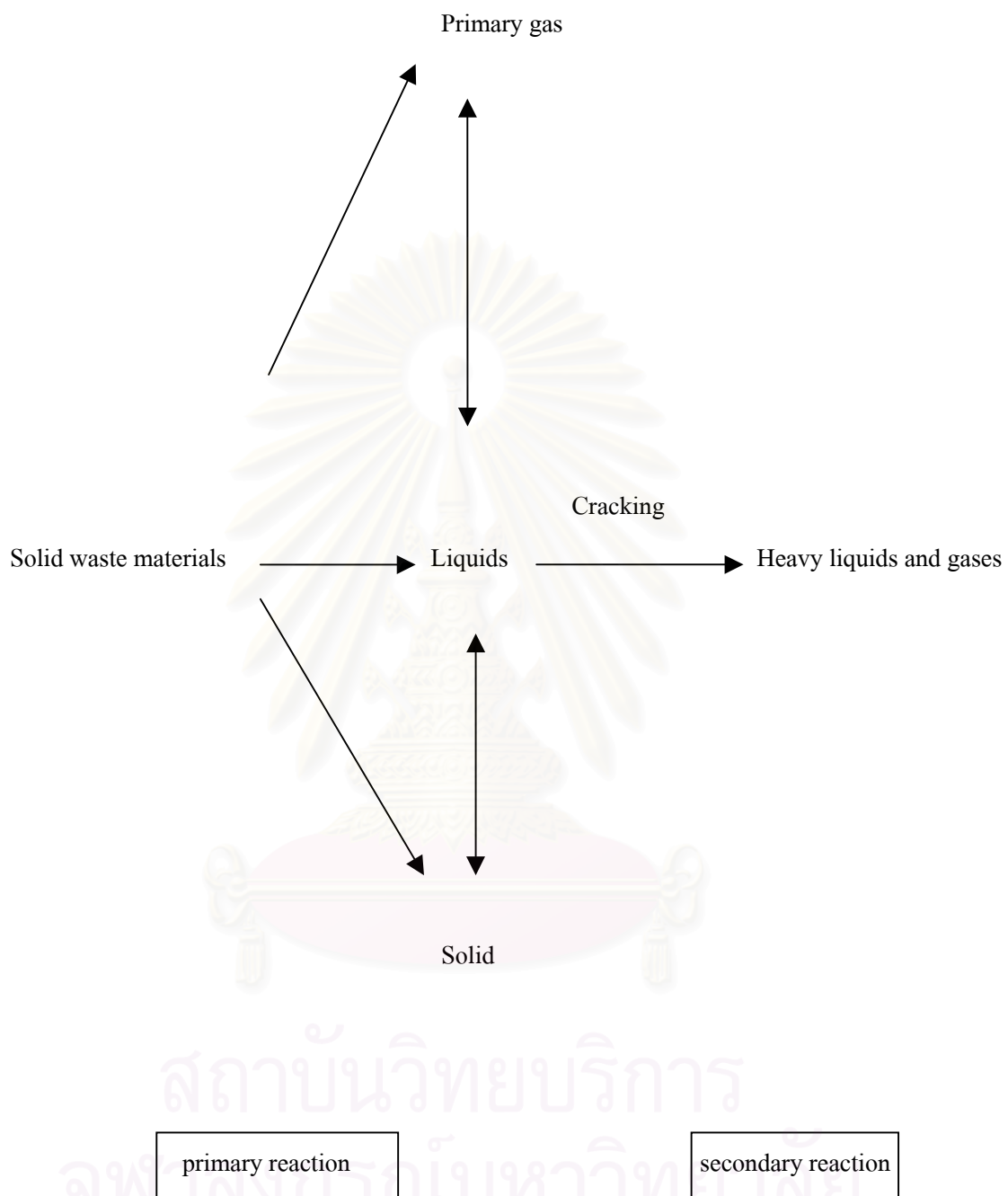


รูปที่ 2.10 อิทธิพลของไฮโดรไฟโรไลซิสต่อผลิตภัณฑ์ [16]

นอกจากนี้ผลของไอออนบวกสามารถใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้อีกด้วย [19,20] โดยไอออนบวกมีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสและกระบวนการแตกตัวของทาร์ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น โพลีไซคลิก, แคลเซียม และโซเดียม ทำให้ทาร์และชาร์ลดลง แต่ได้แก๊สเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่อุณหภูมิต่ำกว่า 450°C ออกไซด์ของโพแทสเซียมจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแก๊สซิฟิเคชัน และที่อุณหภูมิ 650°C ออกไซด์จะลดลงเกิดเป็นโพแทสเซียม โดยออกซิเจนไปสะสมในระบบอะโรมาติกในชาร์ซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาให้เร็วขึ้นเช่นกัน

## 2.8 การศึกษาทางจลนพลศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิส

จากการศึกษาของ Kawser [22] พบว่า ปฏิกิริยาไพโรไลซิสของเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนประกอบด้วยปฏิกิริยาพร้อมๆกัน ตามกันมา ซึ่งส่งผลให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่หลากหลาย โดยที่ผ่านมาได้มีผู้ทำการศึกษาแบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ในหลาย ๆ วิธี และได้ค้นพบว่าเมื่อของเสียที่เป็นของแข็ง ผ่านการให้ความร้อนจะเกิดสารที่ระเหยได้ขั้นต้นก่อน (primary vapor) และถ้าได้รับอุณหภูมิสูงเป็นเวลานานพอก็จะเกิดปฏิกิริยาขั้นทุติยภูมิ ได้เป็นน้ำมันทาร์และแก๊สต่อไป โดยการเย็นตัวอย่างรวดเร็วทำให้เกิด liquid intermediate ก่อนที่จะเกิดปฏิกิริยาแตกหักไปเป็นแก๊สที่มีมวลโมเลกุลใหญ่ ซึ่งแผนภูมิกลไกกระบวนการไพโรไลซิสของเสียที่เป็นของแข็งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนภูมิกลไกกระบวนการไพโรไลซิสของเสียที่เป็นของแข็ง [22]

### 2.8.1 แบบจำลองปฏิกิริยาเดี่ยว (Single-Reaction Models) [23]

กระบวนการไพโรไลซิสประกอบด้วยปฏิกิริยาการย่อยสลายและมีปรากฏการณ์การถ่ายโอนที่ซับซ้อนซึ่งยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องแม่นยำนัก ดังนั้นผู้ทำการวิจัยส่วนใหญ่จึงตั้งสมมติฐานว่า กระบวนการทั้งหมดเป็นการย่อยสลายแบบอันดับหนึ่งที่เกิดขึ้นในรูปแบบเดียวกันตลอดทั้งอนุภาค แสดงอัตราเร็วการไพโรไลซิสได้ดังนี้

$$dV/dt = k(V^*-V) \quad (2.8)$$

หรือ

$$dw/dt = -k(w_0-w_t) \quad (2.9)$$

$$V = (w_0-w)/w_0 \quad (2.10)$$

$$V^* = (w_0-w_f)/w_0 \quad (2.11)$$

$V$  คือ ปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้นที่เวลาใดๆ ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนน้ำหนักเริ่มต้นที่เปลี่ยนไปกับเวลา ส่วน  $k$  คือ ค่าคงที่อัตราเร็ว,  $V^*$  คือ ปริมาณสารระเหยที่เกิดขึ้นทั้งหมด,  $w_0$  คือ น้ำหนักเริ่มต้น  $w$  คือ น้ำหนักที่เวลาใดๆ และ  $w_f$  คือ น้ำหนักสุดท้าย โดยค่าคงที่อัตราเร็วสัมพันธ์กับอุณหภูมิสามารถอธิบายได้โดยใช้สมการ Arrhenius

$$k = k_0 e^{-E/RT} \quad (2.12)$$

$k_0$  คือ ปัจจัยความถี่,  $E$  คือ พลังงานกระตุ้น,  $R$  คือ ค่าคงที่ของแก๊ส และ  $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าอัตราเร็วของกระบวนการไพโรไลซิส และอันดับของปฏิกิริยามีค่าที่ต่างกันแต่ช่วงอุณหภูมิ ซึ่งเนื่องมาจากชนิดของถ่านหิน รวมทั้งชนิดของเครื่องมือที่ใช้ และวิธีที่ใช้ในการทดลองด้วย

มีผู้ทำการวิจัยจำนวนมากโต้แย้งว่าแบบจำลองแบบปฏิกิริยาเดี่ยวอันดับหนึ่งอย่างง่ายไม่เพียงพอที่จะอธิบายกระบวนการไพโรไลซิสที่ซับซ้อนได้ โดยข้อมูลเกี่ยวกับสารระเหย และค่าคงที่



ทางจลนพลศาสตร์มีความสอดคล้องต่ำกับค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง ซึ่งอาจเป็นเพราะการถ่ายโอนมวลและความร้อน เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในอนุภาคนั้น

### 2.8.2 แบบจำลองหลายปฏิกิริยา (Multiple-Reaction Models) [23]

เนื่องจากแบบจำลองแบบปฏิกิริยาเดี่ยว ไม่สามารถอธิบายจลนพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นได้ จึงมีผู้เสนอว่าปฏิกิริยาไพโรไลซิสเกิดขึ้นทีละปฏิกิริยาในแต่ละช่วงอุณหภูมิ

$$dV_i/dt = k_i (V_{i*} - V_i) \quad (2.13)$$

ตัวห้อย  $i$  แสดงปฏิกิริยาเฉพาะหนึ่งปฏิกิริยาและทำการอินทิเกรตสมการข้างต้น สำหรับสถานะที่อุณหภูมิคงที่เพื่อหาปริมาณสารระเหยที่ช่วงอุณหภูมิหนึ่งๆ

$$V_{i*} - V_i = V_{i*} \exp(-kt \exp -E/RT)_i \quad (2.14)$$

ค่า  $k_0$ ,  $E$ ,  $V_{i*}$  ไม่สามารถหาได้จากการทำนาย และต้องตั้งสมมติฐานว่า  $k_{0i} = k_0$  สำหรับทุกๆ ปฏิกิริยา ดังนั้นเนื่องจากมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นจำนวนมาก จึงสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นจากฟังก์ชันการกระจายตัวอย่างต่อเนื่อง  $f(E)$  โดย  $f(E) dE$  แทนอัตราส่วนของสารระเหยทั้งหมด ( $V^*$ ) ที่พลังงานกระตุ้น ระหว่าง  $E$  และ  $E + dE$

$$dV^* = V^* f(E) dE \quad (2.15)$$

$$\int f(E) dE = 1 \quad (2.16)$$

ปริมาณสารระเหยทั้งหมดได้รับจากการคิดรวมในทุกๆ ปฏิกิริยา หรือ โดยการอินทิเกรตสมการตลอดค่า  $E$  ทั้งหมดจะได้

$$1 - V/V^* = \int \exp[-k_0 t \exp(-E/RT)] f(E) dE \quad (2.17)$$

Zoran and Zoltan[24] ได้รวบรวมสมการขึ้นพื้นฐานของงานวิจัยที่ผ่านมาในการศึกษาทางจลนพลศาสตร์แบ่งออกเป็น 2 วิธีหลักๆ คือ วิธีดิฟเฟอเรนเชียล และอินทิเกรตดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการขั้นพื้นฐาน โดยวิธีดิฟเฟอเรนเชียลของงานวิจัยที่ผ่านมา (24)

สมการขั้นพื้นฐาน	หมายเหตุ
$n(1-\alpha)_m^{n-1} \approx (n-1) \cdot \frac{2RT_m}{E} \quad , n \neq 1$	(2.18) $T_m$ = อุณหภูมิที่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดจากกราฟ DTG
$\ln(1-\alpha)_m = (1 - \frac{2RT_m}{E}) \quad , n = 1$	(2.19) $\alpha$ = degree of conversion
$S = \frac{(d^2a/dt^2)_1}{(d^2a/dt^2)_2} \quad n = 1.26S^{0.5}$	(2.20) S = shape factor ของยอด asymmetry $m$ = maximum rate ตัวห้อย 1,2 คือ จุดที่ตำแหน่งยอดของกราฟ
$\ln B \left( \frac{d\alpha}{dt} \right) = \ln A + \ln f(\alpha) - \frac{E}{RT}$	(2.21)
$f(\alpha) = (1-\alpha)^n$	(2.22)
$\frac{\Delta \log \frac{d\alpha}{dt}}{\Delta \log(1-\alpha)} = n - \frac{E}{2.3R} \cdot \frac{\Delta \left( \frac{1}{T} \right)}{\Delta \log(1-\alpha)}$	(2.23) ค่าที่ได้มาจากกราฟทั่วไปของช่วง 1/T

ตารางที่ 2.3 สมการขั้นพื้นฐาน โดยวิธีอินทิเกรตของงานวิจัยที่ผ่านมา (24)

สมการขั้นพื้นฐาน	หมายเหตุ
$\ln \left[ \frac{(1-\alpha)^{1-n}}{1-n} \right] = \ln \left[ \frac{A}{B} \left( \frac{0.368}{T_m} \right)^{E/RT_m} \cdot \frac{1}{\frac{E}{RT_m} + 1} \right] + \left( \frac{E}{RT_m} + 1 \right) \cdot \ln T, n \neq 1$	(2.24) $T_m$ = อุณหภูมิที่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงมากที่สุดจากกราฟ DTG
$\ln \ln(1-\alpha) = \left( \frac{E}{RT_m} + 1 \right) \ln T, n = 1$	(2.25)
$\log \frac{\alpha}{T^2} = \log \frac{A \cdot R}{B \cdot E} \left( 1 - \frac{2RT}{E} \right) - \frac{E}{2.3R} \cdot \frac{1}{T}$	(2.26) ค่าของ $\alpha$ น้อยกว่า 0.1 เมื่อสมมติค่า $n = 0$
$\ln \ln(1-\alpha) \approx \ln \frac{A \cdot E}{B \cdot R} - 5.33 - \frac{1.052}{T_s} + \frac{1.052 \cdot \theta}{R \cdot T_s^2}, n \neq 1$	(2.27) $T_s$ = อุณหภูมิที่ $1-\alpha = 1/e = 0.368$
$\ln \ln(1-\alpha) \approx \frac{E \cdot \theta}{R \cdot T^2}, n = 1$	(2.28)
$\ln \ln(1-\alpha) = -\frac{E}{RT} + \ln \left( \frac{A \cdot \Delta T}{B} \right), n = 1$	(2.29) $\alpha$ ได้มาจากรูปทั่วไปของ ช่วง $\Delta T$
$\ln \alpha \approx \frac{E}{RT} + \ln \left( \frac{A \cdot \Delta T}{B} \right), n = 0$	(2.30)

ตารางที่ 2.3 (ต่อ) สมการขั้นพื้นฐานโดยวิธีอินทิเกรตของงานวิจัยที่ผ่านมา (24)

สมการพื้นฐาน	หมายเหตุ
$E = \frac{4.6 \log(B_2/B_1)(T_1/T_2)^2}{(1/T_1 - 1/T_2)}$	(2.31) ต้องใช้กราฟอย่างน้อย 2 กราฟ ที่อัตราให้ความร้อนต่างกัน
$-\log B_1 - 0.457 \frac{E}{RT_1} = \log B_2 - 0.457 \frac{E}{RT_2}$	(2.32)
$E = \frac{R \log(B_2/B_1)}{0.457[(1/T_1) - (1/T_2)]}$	(2.33)

โดยสรุปแล้ว ทุกวิธีที่ใช้เพื่อหากราฟอุณหภูมิที่ถูกต้อง แต่ก็มีข้อจำกัดเนื่องจากความผิดพลาดในการคำนวณ อย่างไรก็ตามสมมติฐานบางอย่างเกี่ยวกับ  $f(\alpha)$  ก็ยังไม่ถูกต้อง หรือถ้าเป็นปฏิกิริยาที่ซับซ้อนก็มีความขัดแย้งในแต่ละวิธีอีกด้วย โดยวิธีที่ใช้หลายกราฟ (ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ) จะเกิดความผิดพลาดน้อยกว่าวิธีที่ใช้กราฟเพียงกราฟเดียวหรือจุดเพียงจุดเดียวจากกราฟ และทั้งวิธีดิฟเฟอเรนเชียลและอินทิเกรตได้นำมาใช้กับปฏิกิริยาอย่างง่าย จะทำให้ได้ค่าทางจลนพลศาสตร์ที่ถูกต้อง วิธีที่ต้องสมมติค่าอันดับของปฏิกิริยาความถูกต้องของผลที่ได้ขึ้นอยู่กับสมมติค่าว่ามีความแม่นยำเพียงใด และสูตรที่ใช้ว่าเป็นอย่างง่ายหรือซับซ้อนเพียงใด

## บทที่ 3

### เครื่องมือและวิธีการทดลอง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณและองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาไพโรไลซิสของ กากตะกอน เช่น อุณหภูมิ เวลาในการทำปฏิกิริยา อัตราให้ความร้อน เป็นต้น และศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไพโรไลซิส activated sludge จากเครื่อง Thermogravimetric Analyser (TGA) และหาสมการที่เหมาะสมสำหรับอธิบายกระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นต่อไป

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย แบ่งออกเป็นขั้นตอนเป็นหัวข้อ ดังแสดงในรูปที่ 3.1

3.1 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

3.2 การเก็บและการเตรียมตัวอย่างกากตะกอน

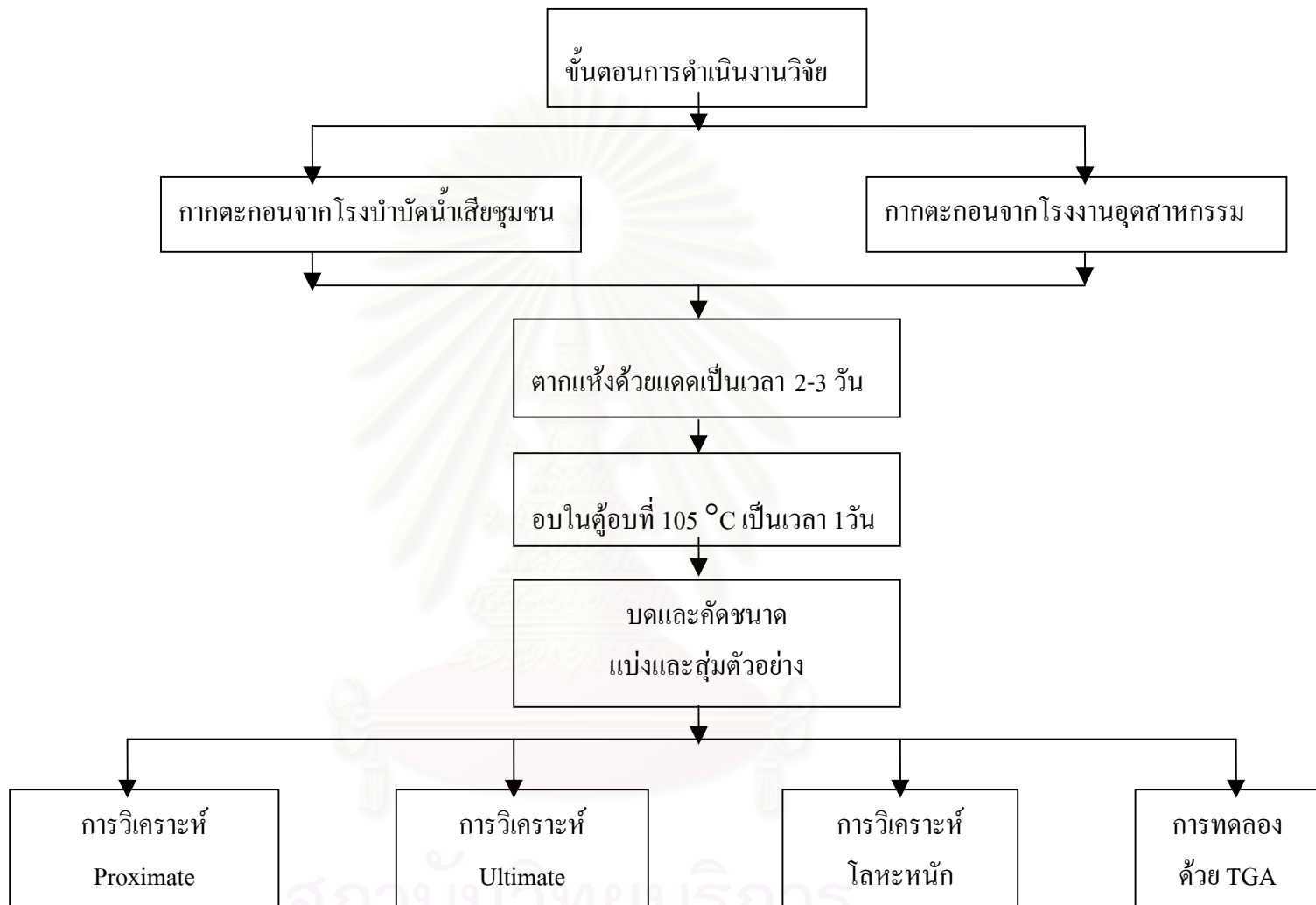
3.3 การศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอนและคุณค่าเชิงความร้อน

3.3.1 วิเคราะห์ องค์ประกอบของกากตะกอน ด้วยวิธี Proximate Analysis

3.3.2 วิเคราะห์ปริมาณธาตุ (CHNS/O) ด้วยวิธี Ultimate Analysis จากเครื่อง Elemental Analysis

3.3.3 วิเคราะห์หาองค์ประกอบของโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion (AA)

3.4 ศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยากระบวนการไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆจากเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงภาพรวมของขั้นตอนการศึกษาของงานวิจัย

### 3.1 การรวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้น

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการรวบรวมข้อมูลของกากตะกอนในด้านต่างๆ ได้แก่ การประเมินปริมาณกากตะกอนที่มีอยู่ในอดีตจนถึงปัจจุบันเพื่อที่จะคาดการณ์แนวโน้มของปริมาณกากตะกอนในอนาคต ตลอดจนศึกษาถึงแนวทางในการจัดการกับกากตะกอนเหล่านี้ด้วยวิธีต่างๆ โดยศึกษาถึงทั้งข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีในการนำมาแปรรูปเป็นแหล่งพลังงานใหม่โดยใช้กากตะกอนเหล่านี้เป็นวัตถุดิบ

### 3.2 การเก็บและเตรียมตัวอย่างกากตะกอน

เนื่องจากกากตะกอนเป็นสิ่งที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำเสีย เช่น น้ำเสียจากแหล่งชุมชนกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น ก็จะมีองค์ประกอบหรือคุณสมบัติของกากตะกอนที่ต่างกัน โดยกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนจะมีองค์ประกอบจำพวกสารอินทรีย์ค่อนข้างมาก ในขณะที่กากตะกอนจากโรงงานอุตสาหกรรมก็จะมีองค์ประกอบพวกสารอนินทรีย์โดยเฉพาะโลหะหนักในปริมาณมาก ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้อาจจะส่งผลกระทบต่อกระบวนการไพโรไลซิสได้ ดังนั้นจึงต้องพิจารณาองค์ประกอบของกากตะกอนอย่างละเอียดเพื่อให้สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ถูกต้องที่สุด

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ทำการเก็บตัวอย่างกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ ที่มีองค์ประกอบต่างกัน ไป ทั้งโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน และ โรงงานอุตสาหกรรม ดังต่อไปนี้

1. กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนห้วยขวาง จ.กรุงเทพฯ
2. กากตะกอนจากโรงโอเลฟินส์ บริษัท ปิโตรเคมีแห่งชาติ จำกัด (มหาชน) นิคมอุตสาหกรรมมาบตาพุด อ. เมือง จ. ระยอง
3. กากตะกอนจากนิคมอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ คือ โรงฟอกย้อม และโรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง อ. ศรีราชา จ. ชลบุรี

กากตะกอนที่เก็บตัวอย่างมาได้จะมีความชื้นอยู่มาก จึงต้องมีการเตรียมกากตะกอนให้เหมาะสมเพื่อนำมาใช้ในการทดลองต่อไป ด้วยวิธีดังนี้

- 3.2.1 สุ่มเก็บตัวอย่างกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ ประมาณ 10 กิโลกรัม ต่อการเก็บตัวอย่างหนึ่งครั้ง
- 3.2.2 นำกากตะกอนมาตากแห้งเป็นเวลา 2-3 วัน (ในกรณีที่ตัวอย่างที่มีความชื้นมาก) แล้วนำมาอบที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 1-2 วัน
- 3.2.3 บดกากตะกอนด้วยเครื่องบด
- 3.2.4 คัดขนาดโดยใช้เครื่องร่อนขนาด น้อยกว่า 250 ไมโครเมตร

### 3.3 ศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอน และค่าความร้อน

การศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอนมีความสำคัญมาก เนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอนมีผลต่อปฏิกิริยาไพโรไลซิส และผลิตภัณฑ์ที่ได้ และเนื่องจากกากตะกอนได้มาจากแหล่งน้ำเสียซึ่งมีองค์ประกอบหลากหลาย จึงต้องมีการศึกษาอย่างต่อเนื่องเพื่อสามารถหาค่าเฉลี่ยที่ใช้เป็นตัวแทนของแต่ละองค์ประกอบของกากตะกอนนั้นได้ถูกต้องมากที่สุด

ส่วนการศึกษาค่าความร้อนของกากตะกอนนั้น จะเป็นตัวบอกว่ากากตะกอนจากแหล่งนั้นมีความเหมาะสมและคุ้มค่าต่อการนำมาแปรรูปด้วยวิธีไพโรไลซิสหรือไม่

#### 3.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนด้วยวิธี Proximate Analysis

การวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยวิธี Proximate Analysis เป็นการหาองค์ประกอบของกากตะกอน ได้แก่ ความชื้น สารระเหย เถ้า และคาร์บอนคงตัว โดยข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์นี้สามารถคาดคะเนการเกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากกระบวนการไพโรไลซิสได้ คือ ถ้ามีปริมาณสารระเหยได้สูง ก็มีแนวโน้มที่จะเกิดผลิตภัณฑ์พวกก๊าซ แต่ถ้าคาร์บอนคงตัวสูงก็มีแนวโน้มที่จะให้ผลได้ของถ่านชาร์สูง เป็นต้น

และการวิเคราะห์นี้ยังสามารถบอกได้ว่ากากตะกอนนั้นมีความสามารถให้พลังงานได้มากน้อยเพียงใด พบว่า ถ้าปริมาณของเถ้ามากจะทำให้ค่าความร้อนต่ำ แต่ถ้ามีปริมาณสารระเหยสูง และคาร์บอนคงตัวต่ำ ค่าความร้อนก็จะสูง เป็นต้น ขั้นตอนสำหรับการวิเคราะห์แบบประมาณนี้ ได้อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 3173-3175



### 3.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบโลหะหนัก

การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน จะใช้เครื่อง Atomic Absorption (AA) รุ่น SpectrAA 300 เนื่องจากเป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ธาตุได้ทั้งเชิงคุณภาพและปริมาณ มีความเที่ยงแม่นยำ และนิยมใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป

เนื่องจากปริมาณของโลหะหนักในกากตะกอนอาจมีผลต่อปฏิกิริยาไฟโรไลซิส นอกจากนี้ การศึกษาปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนและในกากตะกอนที่ผ่านการทำปฏิกิริยาไฟโรไลส์หรือถ่านชาร์จะเป็นตัวบอกถึงแนวทางในการจัดการกับกากตะกอนเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมต่อไป

### 3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ CHNS/O ด้วยเครื่อง Elemental Analyser

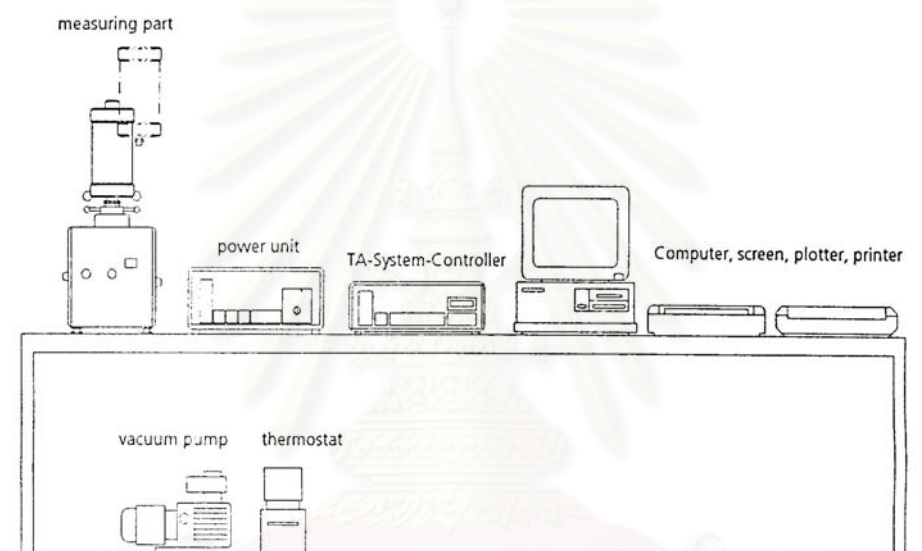
การวิเคราะห์ธาตุของกากตะกอนด้วยเครื่อง Elemental Analyser รุ่น Perkin Elmer PE 2400 ซึ่งเป็นเครื่องวิเคราะห์แบบอัตโนมัติสำหรับหาปริมาณของธาตุที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ มีหน่วยการวัดเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก เป็นวิธีที่สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว สามารถวิเคราะห์ได้หลายธาตุพร้อมกัน เช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน เป็นต้น

โดยองค์ประกอบของธาตุจะส่งผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์ คือ ถ้ามีไนโตรเจน หรือซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ ถ้านำไปเผาไหม้ก็อาจจะได้สารประกอบที่เป็นมลภาวะได้ เช่น สารประกอบออกไซด์ของไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ

### 3.4 ลักษณะของเครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA)

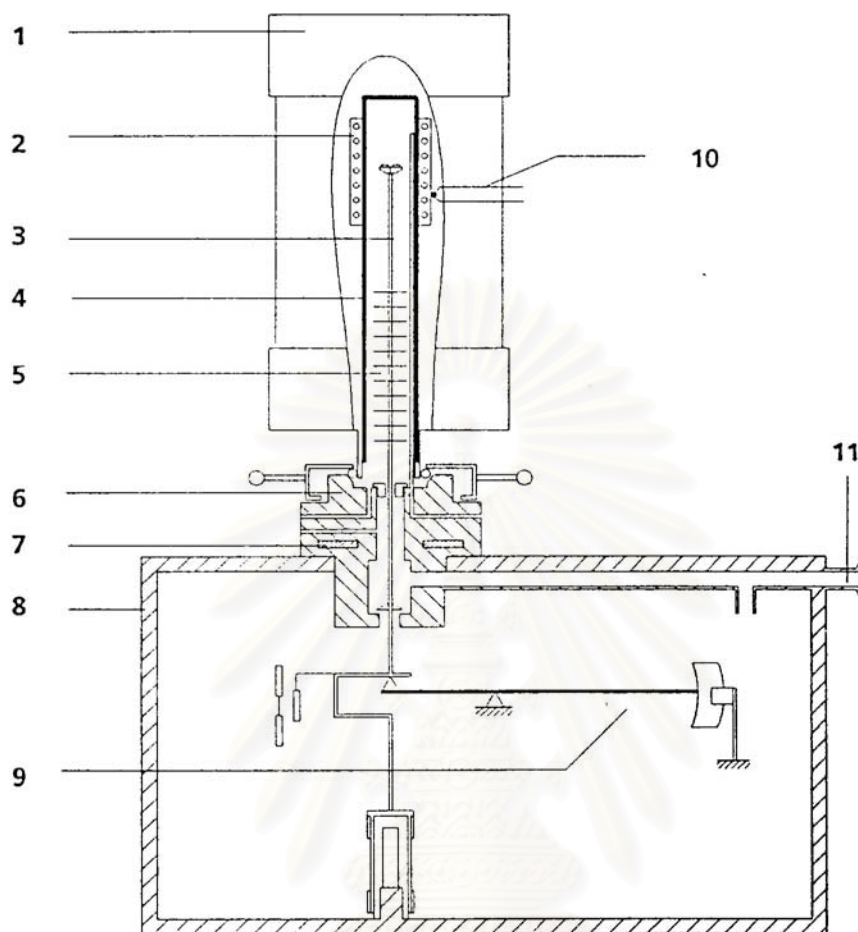
ในส่วนนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่มีต่อกระบวนการไฟโรไลซิส โดยใช้เครื่อง Thermogravimetric Analyzer (TGA) เพื่อหาข้อมูลพื้นฐานทางจลนพลศาสตร์ เช่น น้ำหนักของกากตะกอนที่หายไปกับเวลาต่างๆ โดยที่จะควบคุมอุณหภูมิ หรือการเพิ่มอัตราให้ความร้อน และเป็นการใช้ระบบอัตโนมัติหรือกึ่งอัตโนมัติในการควบคุม ต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 3.2

TGA ใช้กันอย่างกว้างขวาง มาหลายปีแล้วในการศึกษาพฤติกรรมของการไพโรไลซิส หรือ อัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (decomposition or devolatilization reaction) ภายใต้ความร้อน จะทำให้ได้น้ำหนักที่หายไป ที่อัตราให้ความร้อนคงที่ จากข้อมูลที่ได้สามารถนำมาหา พารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์ เพื่อใช้หาแบบจำลองของการไพโรไลซิสได้ เช่น การไพโรไลซิสของ กระจายชนิดต่างๆ จากของเสียในชุมชน [25] โดยใช้ tga ทดลองในบรรยากาศของไนโตรเจน ช่วง อุณหภูมิ 450-900 K และ heating rate 1,2 และ 5 K/min พบว่า ไพโรไลซิสของกระจายผสม สามารถอธิบายโดย ใช้โมเดลสองปฏิกิริยา ส่วนการไพโรไลซิสอย่างช้า ของกระจายผสมสามารถ อธิบายได้ด้วยผลรวมน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบได้ เป็นต้น



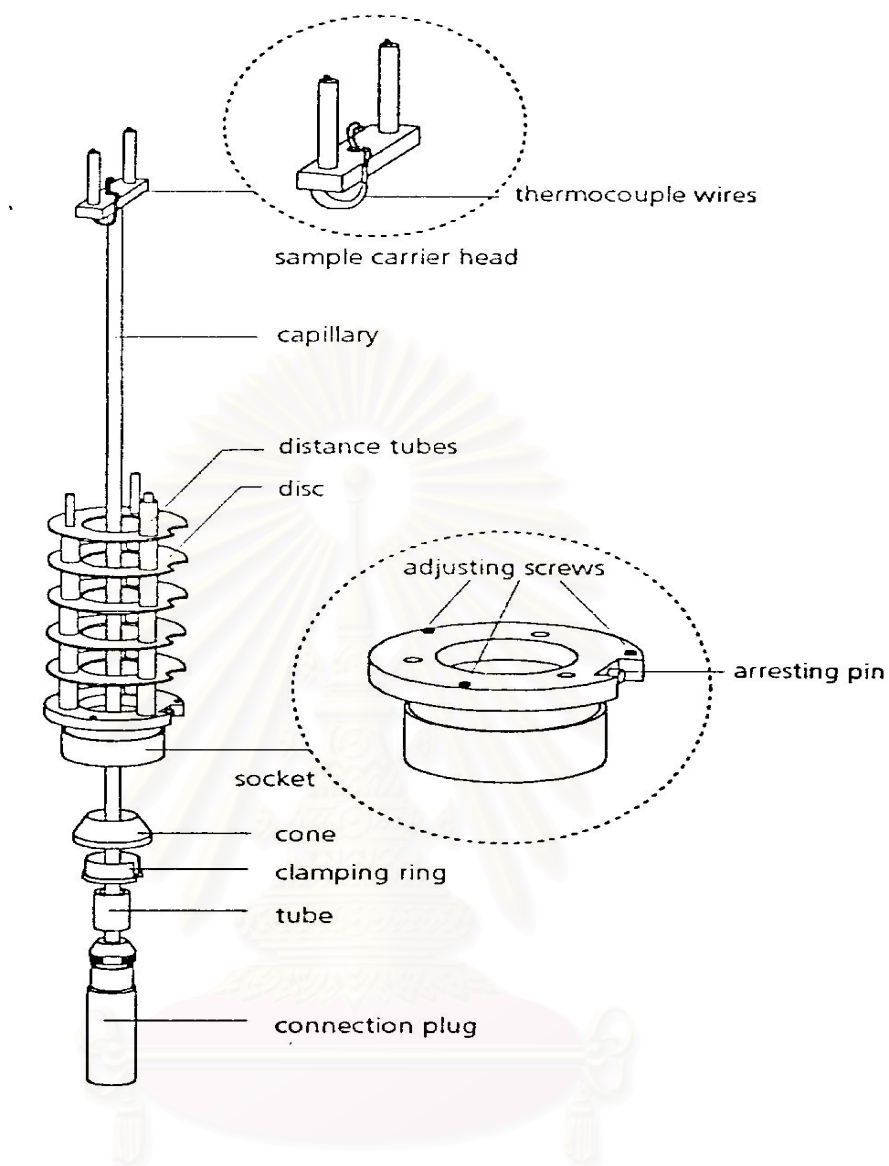
รูปที่ 3.2 รูปแสดงองค์ประกอบเครื่อง TGA รุ่น STA 409C

จากรูปที่ 3.2 จะเห็นว่าจะมี ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ไว้สำหรับทำให้อากาศ (ออกซิเจน) ไม่สามารถเข้ามาในระบบได้ เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสได้อย่างสมบูรณ์ ได้ใช้ก๊าซเฉื่อย (ในการทดลองนั้นใช้ก๊าซไนโตรเจน เนื่องจากมีราคาถูก และไม่รบกวนต่อปฏิกิริยา) เพื่อช่วยรักษาความดันของระบบ และช่วยไล่ก๊าซ (รวมทั้งส่วนที่ระเหยได้) ออกจากระบบ การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัวอย่างวัดโดยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดมาก (analytic balance) โดยตัวเครื่องวัด (measuring part) สามารถแสดงในภาพตัดขวางได้ดังรูปที่ 3.3



- |                          |                         |                                  |
|--------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| 1. furnace               | 5. radiation shield     | 9. analytical balance            |
| 2. heating element       | 6. cross head           | 10. control thermocouple         |
| 3. sample carrier system | 7. thermostatic control | 11. connection:evacuating system |
| 4. protective tube       | 8. Casing               |                                  |

รูปที่ 3.3 แสดงภาพตัดขวางของเครื่องมือ TGA ในส่วนวัด (measuring part)



รูปที่ 3.4 รูประบบ Sample Carrier ของเครื่อง TGA

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. จัดเตรียมชุดอุปกรณ์การทดลองดังรูปที่ 3.1
2. เปิดสวิตซ์เทอร์โมสแตท ทิ้งไว้ประมาณ 2 ชั่วโมงก่อนทำการทดลอง
3. เปิดสวิตซ์เครื่องควบคุม คอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ ทิ้งไว้ประมาณ 1 ชั่วโมงก่อนการทดลอง
4. เตรียมตัวอย่างกากตะกอนประมาณ 50 mg และตัวอ้างอิงใส่ในครุชชีเบิลลูมินา(Alumina crucible,  $Al_2O_3$ ) แล้วนำไปวางลงบน sample carrier system แล้วปิดล็อกส่วนการวัด (measuring part) ให้เรียบร้อยดังรูปที่ 3.3
5. ตรวจสอบชนิดของเทอร์โมคอปเปิล และปรับสมดุลในส่วนเครื่องชั่ง
6. ทำระบบให้เป็นสุญญากาศโดยใช้ปั๊มดูดอากาศออก แล้วทำให้อยู่ในบรรยากาศของก๊าซเฉื่อย โดยให้ไนโตรเจนไหลเข้าระบบด้วยอัตรา 40 ml/min
7. ตั้งค่าต่างๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์
  - 7.1 เลือก Container Carrier เพื่อใส่ค่าน้ำหนักที่ได้จากการเตรียมในข้อ 4
  - 7.2 เลือก System Temperature Control เป็น ON และเลือก Mass, Temperature เป็น ON
  - 7.3 เลือก Temperature Program เพื่อใส่ค่าอุณหภูมิสุดท้าย, อัตราให้ความร้อน และกำหนดจำนวนตำแหน่งการเก็บค่าต่ออุณหภูมิ
8. เริ่มโปรแกรม โดยผลการทดลองที่ได้จะถูกเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์
9. เลือก Reduction และเลือก mass แล้วทำการ offset โดยการลบกับ base line ก็จะได้ mass correction เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์ต่อไป
  - 9.1 จาก mass correction ก็จะได้กราฟระหว่าง w กับอุณหภูมิ เรียกว่า TG curve
  - 9.2 เลือก Analysis, (TG)/dt และกำหนดช่วงของการหาดิฟเฟอเรนเชียล ก็จะได้กราฟ dw/dt กับอุณหภูมิ เรียกว่า DTG Curve
10. ทำการทดลองโดยเปลี่ยนอัตราการให้ความร้อน เป็น 10, 20 และ 50 °C/min ตามลำดับ
11. นำผลการทดลองที่ได้ไปศึกษาทางจลนพลศาสตร์ต่อไป

## บทที่ 4

### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

วัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้ตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ คือ โรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง, โรงงานฟอกย้อม, โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนห้วยขวาง และโรงโอเลฟินเป็นต้น ซึ่งแต่ละแหล่งก็จะมีลักษณะทางกายภาพและเคมีที่ต่างกัน ดังนั้นการศึกษาถึงการเตรียมวัตถุดิบและลักษณะองค์ประกอบของกากตะกอน จึงเป็นสิ่งสำคัญในการประเมินว่าตัวอย่างมีความเหมาะสมในกระบวนการไพโรไลซิสมากน้อยเพียงใด และองค์ประกอบของกากตะกอนตัวอย่างนั้นจะทำให้สามารถอธิบายลักษณะหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณ ด้วยวิธี Proximate Analysis

การศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอน โดยวิธีวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) เพื่อหาปริมาณสารระเหย เถ้า และความชื้นในกากตะกอน ดังแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์แบบประมาณของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ

ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์	แหล่งที่มาของกากตะกอน			
	โรงงานฟอกย้อม	โรงบำบัดส่วนกลาง	เคหะชุมชนห้วยขวาง	โรงโอเลฟิน
% , air dried basis				
ความชื้น	2.1	4.2	15.4	9.5
สารระเหย	59.5	31.8	44.5	60.2
คาร์บอนคงตัว	3.1	1.9	2.1	17.9
เถ้า	35.3	62.2	38.0	12.3
ค่าความร้อน(cal/g)	3867	1638	2565	5613

จากตารางที่ 4.1 พบว่า กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียของโรงโกลีฟีน มีปริมาณสารระเหย, คาร์บอนคงตัว และค่าความร้อน มากที่สุด เมื่อเทียบกับกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม, เเคะชุมชนห้วยขวาง และโรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง ตามลำดับ โดยกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลางมีปริมาณเถ้าสูงมากเมื่อเทียบกับแหล่งอื่นๆ

ดังนั้นกากตะกอนจากโรงโกลีฟีน เมื่อเกิดกระบวนการไพโรไลซ์จะให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากกว่ากากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม เเคะชุมชนห้วยขวาง และโรงบำบัดน้ำเสียส่วนกลาง ตามลำดับ และกากตะกอนโรงโกลีฟีนน่าจะให้ผลได้ของถ่านชาร์มากที่สุด เนื่องจากปริมาณคาร์บอนคงตัวมากที่สุด

#### 4.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุด้วยวิธี Ultimate Analysis จากเครื่อง Elemental Analysis

ผลการวิเคราะห์แยกองค์ประกอบของแต่ละธาตุด้วยวิธี ultimate analysis ดังแสดงในตารางที่ 4.2 เพื่อหาปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ แต่ออกซิเจนหาโดยผลต่างของธาตุ โดยผลที่ได้สอดคล้องกับผลจากการวิเคราะห์แบบประมาณคือ ปริมาณคาร์บอนกับปริมาณคาร์บอนคงตัว ส่วนปริมาณไฮโดรเจนกับปริมาณสารระเหย จะเห็นว่าโรงโกลีฟีนมีปริมาณไฮโดรเจนและคาร์บอนมากที่สุด จึงมีสารระเหยและคาร์บอนคงตัวปริมาณมากที่สุด

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ

ธาตุ %, in organic (dried basis)	แหล่งที่มาของกากตะกอน			
	โรงงานฟอกย้อม	โรงบำบัดส่วนกลาง	เคหะชุมชนห้วยขวาง	โรงโกลีฟีน
%C	36.3	15.2	27.1	57.3
%H	5.2	2.7	4.7	6.5
%N	3	1.3	3.8	4.6
%S	1	1.9	2	1.8
%O	54.5	78.9	62.4	29.8

#### 4.3 ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบของโลหะหนัก ด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion (AA)

เนื่องจากกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียจะมีลักษณะเฉพาะขึ้นอยู่กับแหล่งน้ำเสีย เช่น น้ำเสียจากชุมชนกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนั้น องค์ประกอบหรือคุณสมบัติของกากตะกอนที่ได้ก็จะต่างกัน รวมทั้งยังขึ้นกับชนิดของโรงงานอุตสาหกรรมอีกด้วย กล่าวคือ ถ้ากากตะกอนนั้นได้จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนจะมีองค์ประกอบจำพวกสารอินทรีย์มาก ในขณะที่กากตะกอนที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมจะมีองค์ประกอบพวกสารอนินทรีย์เคมี โดยเฉพาะโลหะหนักหลายชนิดในปริมาณที่ต่างกัน ดังผลการทดลองในตารางที่ 4.3 ซึ่งอาจจะมีผลต่อปฏิกิริยาไพโรไลซิส เช่น การเกิดผลข้างเคียงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการได้ถ้าสถานะของกระบวนการไพโรไลซิสไม่เหมาะสม หรือโลหะบางชนิดสามารถทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาได้ เช่น สังกะสี และเหล็ก เป็นต้น

ตารางที่ 4.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนด้วยเครื่อง Atomic Absorbtion (ppm)

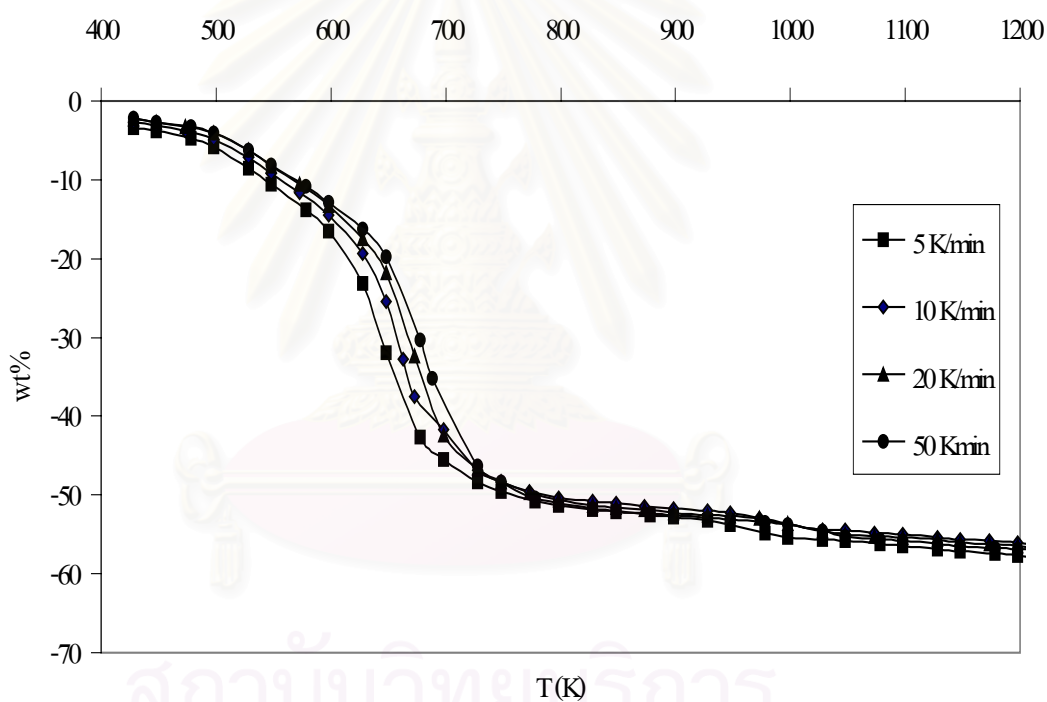
โลหะหนัก (PPM) (dried basis)	แหล่งที่มาของกากตะกอน			
	โรงงานฟอกย้อม	โรงบำบัดส่วนกลาง	เคหะชุมชนห้วยขวาง	โรงโหล่ฟีน
Cu	26.42	795.88	15.88	2.64
Fe	251.74	606.94	684.3	486.66
Zn	37.52	37.74	74.78	112.55
Cd	0.01	0.06	0.04	0.01
Pb	0.31	4.39	3.06	0.29



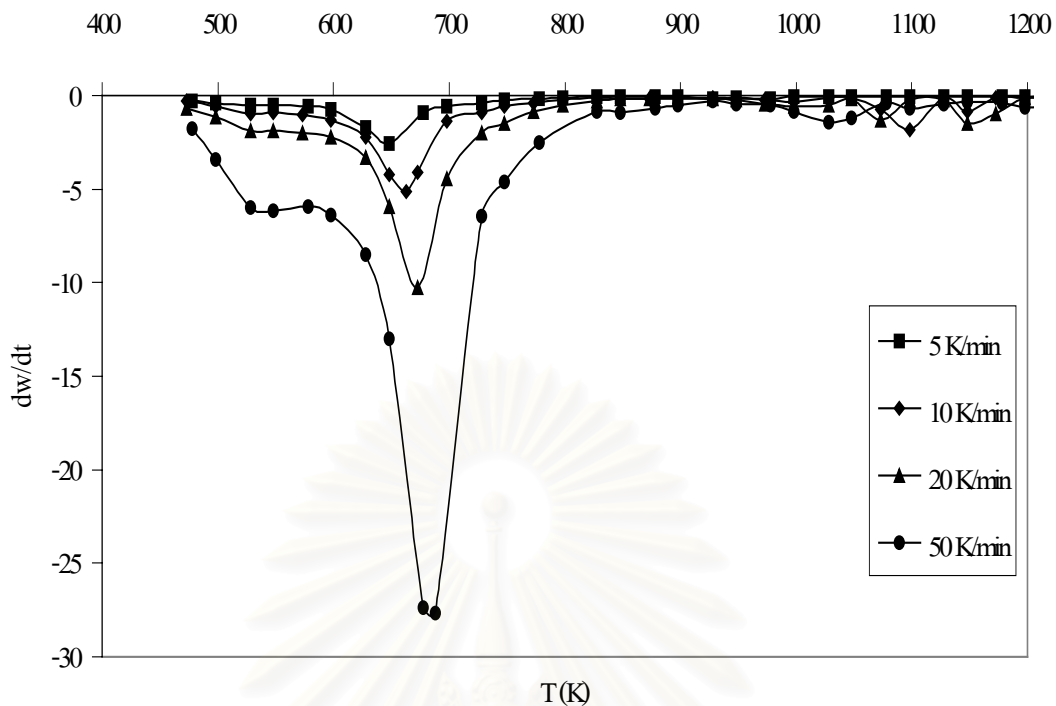
#### 4.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาการไพโรไลซิสที่ภาวะต่างๆจากเครื่อง

##### Thermogravimetric Analyzer (TGA)

เนื่องจากองค์ประกอบของกากตะกอนมีความซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงใช้เครื่อง TGA ศึกษากระบวนการไพโรไลซิสขององค์ประกอบโดยรวมของตัวอย่าง โดยทำการไพโรไลส์กากตะกอนจากแหล่งต่างๆ ที่อัตราให้ความร้อน 4 ระดับ คือ 5, 10, 20 และ 50 °C/min จากผลการทดลองด้วยเครื่อง TGA จะแสดงผลทางเทอร์โมแกรมในรูปของกราฟระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนตัวอย่างที่ลดลงกับอุณหภูมิ (กราฟ TG) และทำการดิฟเฟอเรนเชียลน้ำหนักเทียบกับเวลา จะได้กราฟระหว่างอัตราการลดลงของน้ำหนักกากตะกอนตัวอย่างกับอุณหภูมิ (กราฟ DTG) ได้ดังกราฟที่ 4.1-4.8

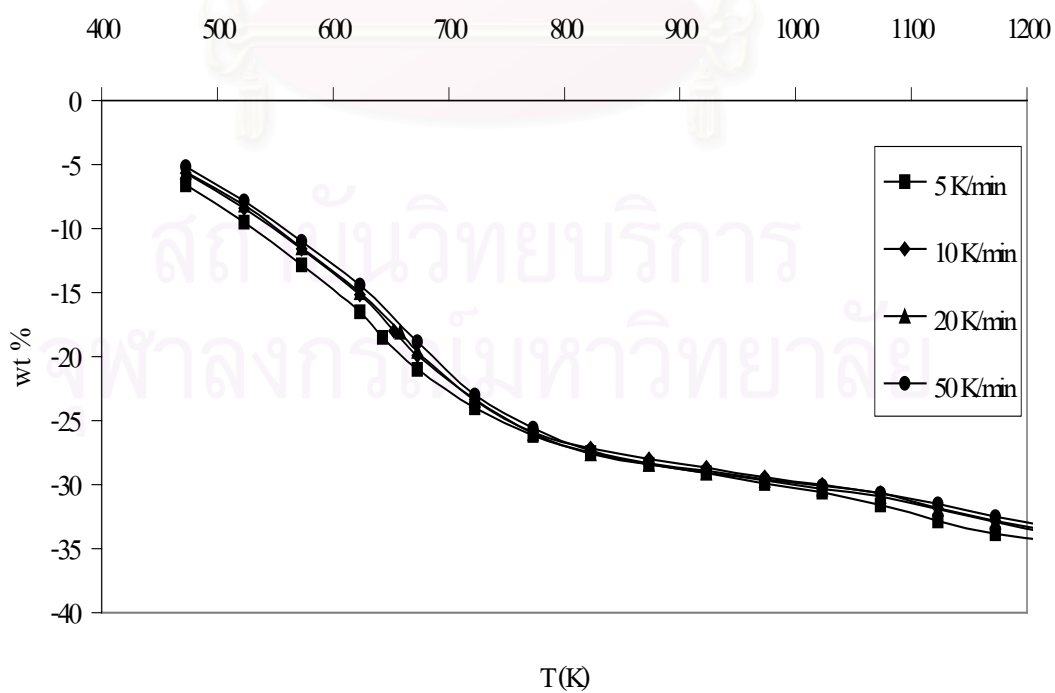


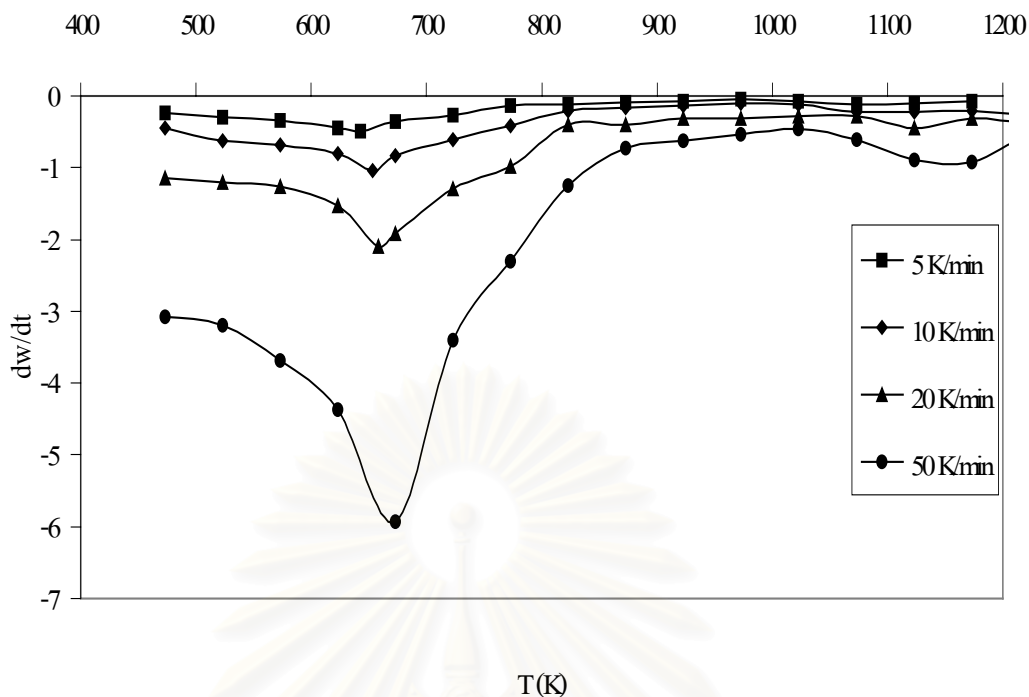
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่ลดลงกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน



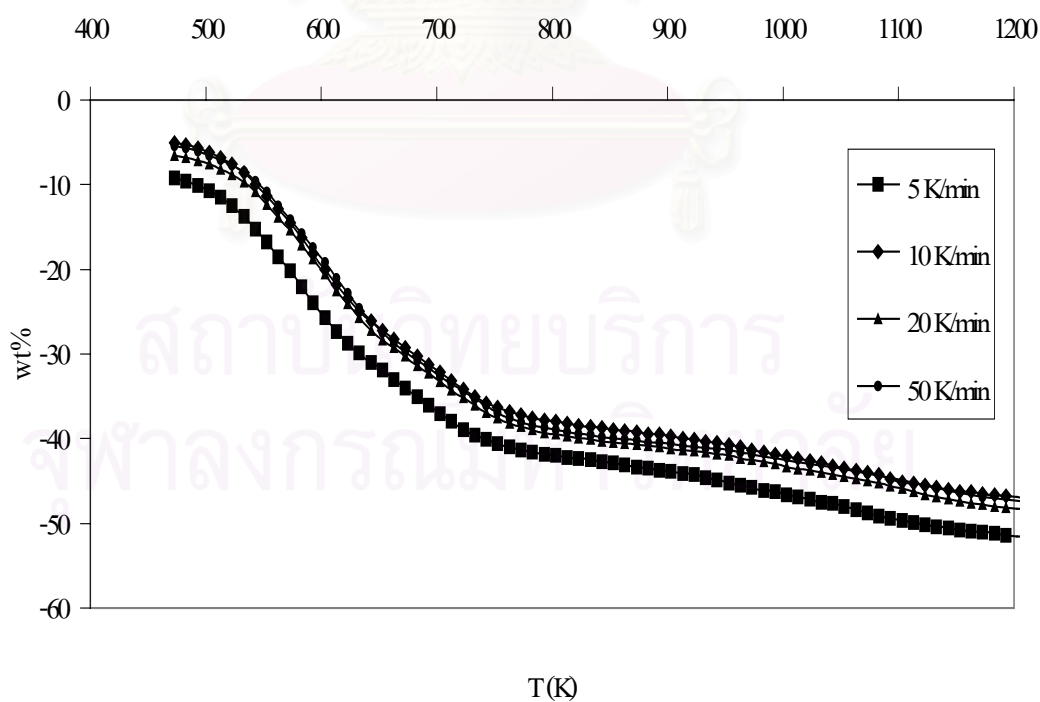
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอนจากโรงงานฟอกเชื่อมกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน

รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอน จากโรงบำบัดส่วนกลางที่ลดลงกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน

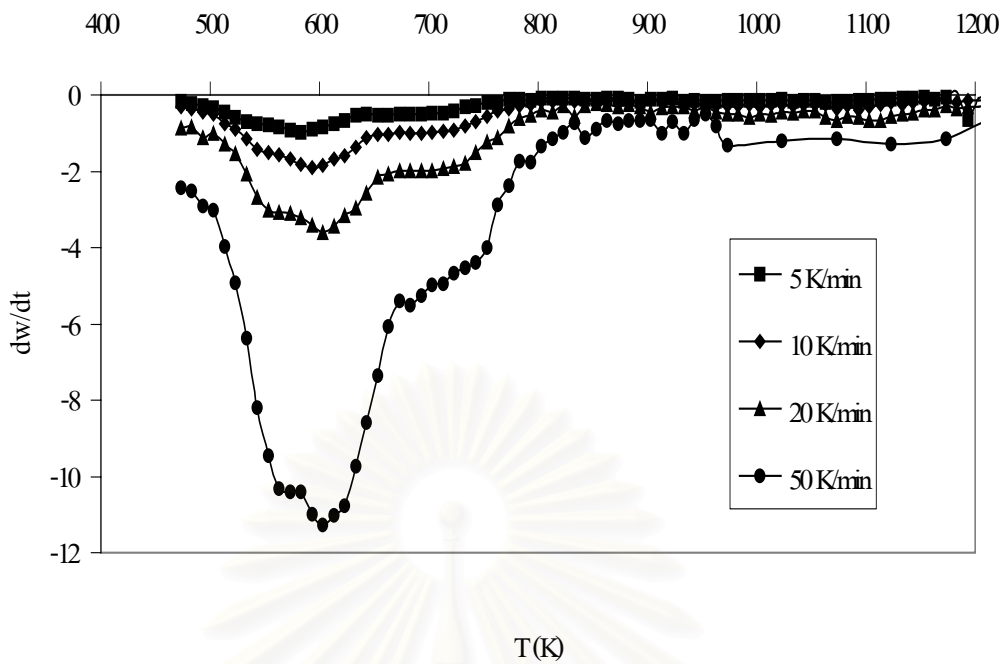




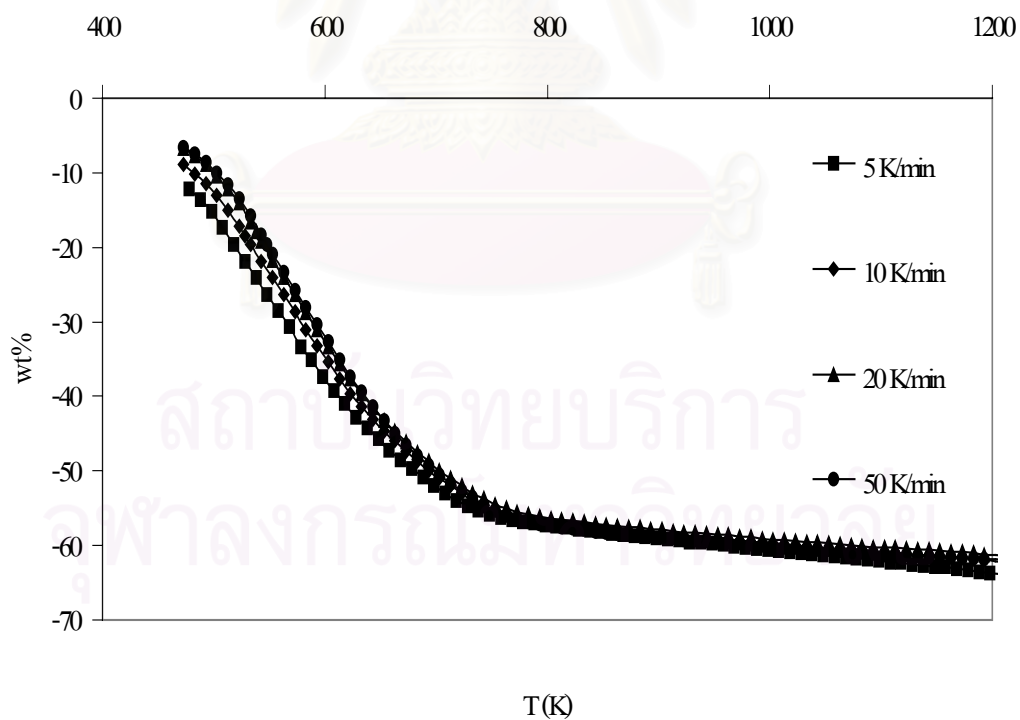
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน



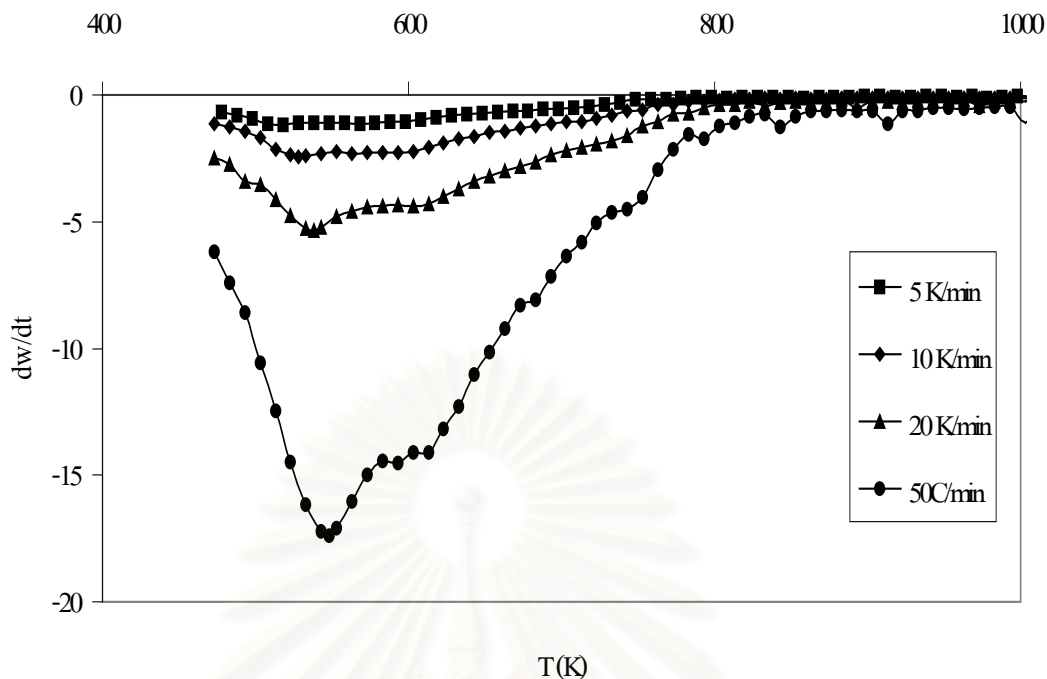
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่ลดลงกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอนจากเศษหมันห้วยขวางกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักของกากตะกอนจากโรงโม่หินที่ลดลงกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน



**รูปที่ 4.8** ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเทียบกับเวลาของกากตะกอนจากโรงโม่หินกับอุณหภูมิด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน

จากการพิจารณารูปภาพ TG จะมีลักษณะคล้ายกัน คือ น้ำหนักจะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงลดลงเมื่ออุณหภูมิประมาณ 473 K โดยเริ่มแรกจะลดลงอย่างช้าๆ และจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แล้วจะเริ่มคงที่ ที่อุณหภูมิประมาณ 873 K ดังรูปที่ 4.1,4.3,4.5 และ 4.7 โดยน้ำหนักที่หายไปทั้งหมดเนื่องมาจากส่วนที่เป็นสารระเหยและคาร์บอนคงตัวที่หายไป โดยมีส่วนที่เหลือสุดท้ายเป็นพวกเถ้า ซึ่งกราฟที่ได้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์แบบ proximate เช่น เมื่อพิจารณากากตะกอนจากโรงงานฟอกซั้วที่มีปริมาณเถ้าร้อยละ 35.3 ดังนั้นน้ำหนักที่หายไปทั้งหมดไม่ควรเกิน ร้อยละ 65.7 เป็นต้น

จากการพิจารณารูปภาพ DTG ของโรงงานฟอกซั้ว รูปที่ 4.2 พบว่า จะเกิดขอดกราฟเด่นชัดเพียงหนึ่งขอด โดยเริ่มมีการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 473 K ที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min มีขอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 648 K , ที่อัตราให้ความร้อน 10 K/min มีขอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 663 K, ที่อัตราให้ความร้อน 20 K/min มีขอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 673 K และที่อัตราให้ความร้อน 50 K/min เกิดโหล่งกราฟที่ 573 K และมีขอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 688 K โดยทุกอัตราให้ความร้อนปฏิกิริยาจะสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 873 K

จากการพิจารณากราฟ DTG ของโรงบำบัดส่วนกลาง รูปที่ 4.4 พบว่า โดยเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 423 K ที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min, 10 K/min และ 20 K/min เกิดยอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน คือ 643-658 K แต่ที่ 50 K/min ยอดกราฟสูงสุดเกิดที่อุณหภูมิ 673 K และปฏิกิริยาสิ้นสุดที่ 873 K เช่นเดียวกับโรงงานฟอกย้อม

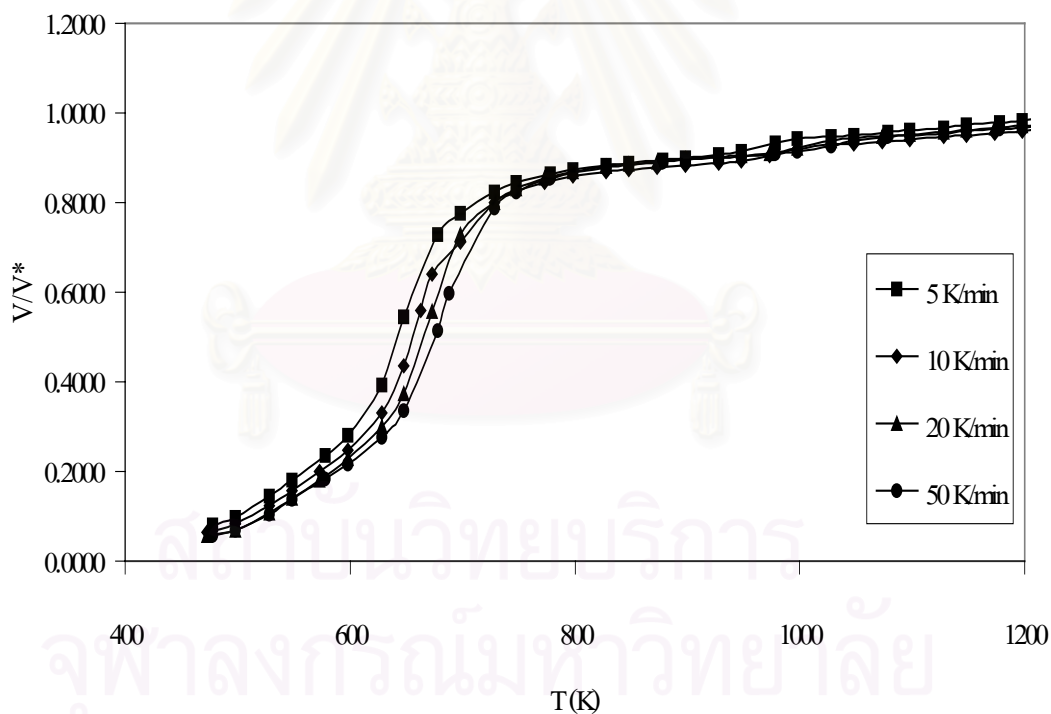
จากการพิจารณากราฟ DTG ของโรงบำบัดห้วยขวาง รูปที่ 4.6 พบว่า โดยเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 423 K ที่ทุกอัตราให้ความร้อนจะเกิดยอดกราฟไม่เด่นชัด เกิดยอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิที่ใกล้เคียงกัน คือ 583-603K โดยที่ใกล้ยอดกราฟใหญ่เกิดไปหลังกราฟ 2 ส่วน ที่อุณหภูมิประมาณ 575 และ 700 K โดยปฏิกิริยาจะสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 873 K

จากการพิจารณากราฟ DTG ของโรงโหล่งรูปที่ 4.8 พบว่า อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุดที่แต่ละอัตราให้ความร้อนจะต่างกันไป กล่าวคือ ที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min เกิดยอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 513 K , 10 K/min เกิดยอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 528 K และ 20 K/min เกิดยอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 538 K แต่ที่อัตราให้ความร้อน 50 K/min เกิดยอดกราฟสูงสุดที่อุณหภูมิ 548 K โดยที่ทุกอัตราให้ความร้อน หลังจากเกิดยอดกราฟใหญ่มียอดกราฟเล็กๆ ที่ประมาณ 623 K แล้วปฏิกิริยาสิ้นสุดที่อุณหภูมิ 823 K

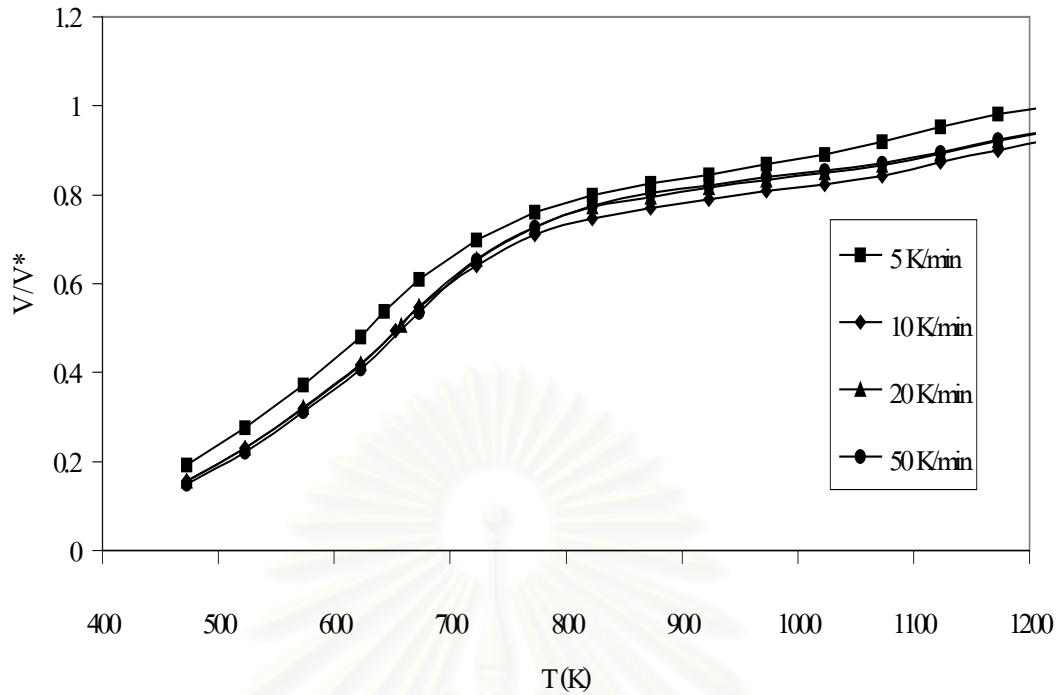
จากผลการทดลองที่ได้จากกราฟ DTG ในบางการทดลองพบว่า ยอดกราฟเกิดขึ้นไม่เห็นเด่นชัด ซึ่งอาจเป็นเพราะองค์ประกอบมีความซับซ้อนหรือมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นมากกว่า 1 ปฏิกิริยา และการทดลองในส่วนนี้จะช่วยให้เราสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของกากตะกอนได้อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาในการทำการทดลอง และสามารถนำกราฟ TG และ DTG นี้ไปช่วยในการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการลดน้ำหนักสูงสุด (อุณหภูมิที่เกิดยอด DTG สูงสุด) และอัตราการลดน้ำหนักสูงสุด (ความสูงของยอด DTG) และผลที่ได้นำไปใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์ต่อไป เพื่ออธิบายกลไกในการเกิดปฏิกิริยาต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

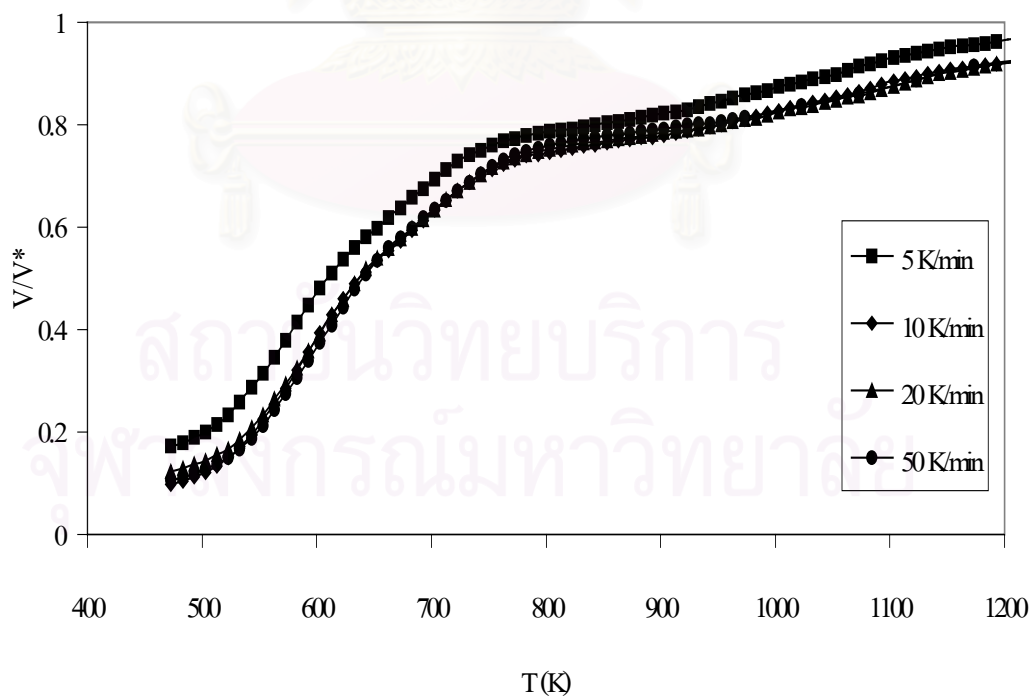
สำหรับการไพโรไลซิสของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ ด้วยเครื่องTG ที่อัตราให้ความร้อน 4 ระดับ คือ 5, 10, 20 และ 50 K/min จากรูปที่ 4.1-4.8 จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากตะกอนตัวอย่างจากแหล่งต่างๆ มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกัน กล่าวคือ การเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 473 K และจะสิ้นสุดที่อุณหภูมิประมาณ 823 K ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอาจจะสังเกตจากยอดกราฟ ซึ่งมีความสูงต่างกัน ที่อุณหภูมิต่างกัน จึงน่าที่จะมีปฏิกิริยาที่ต่างกันและด้วยอัตราเร็วที่ต่างกันไปที่อุณหภูมินั้นๆ ซึ่งน่าจะบ่งชี้ว่ากระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อยขององค์ประกอบในกากตะกอนแต่ละชนิด และความสูงกราฟน่าจะบ่งชี้ถึงอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่เท่ากัน คือ อัตราให้ความร้อนสูงมีอัตราการสูญเสียน้ำหนักสูงกว่าที่อัตราให้ความร้อนต่ำ ณ อุณหภูมิเดียวกัน เพราะที่อัตราให้ความร้อนสูง ส่งผลให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาน้อยลง และอุณหภูมิที่ต้องการสำหรับการย่อยสลายโครงสร้างจะสูงขึ้น ส่งผลให้กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารระเหยได้ต่อสารระเหยได้ทั้งหมด ( $V/V^*$  or Conversion) เลื่อนไปทางขวา เมื่ออัตราให้ความร้อนสูงขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.9-4.12



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าของ  $V/V^*$  กับอุณหภูมิของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม

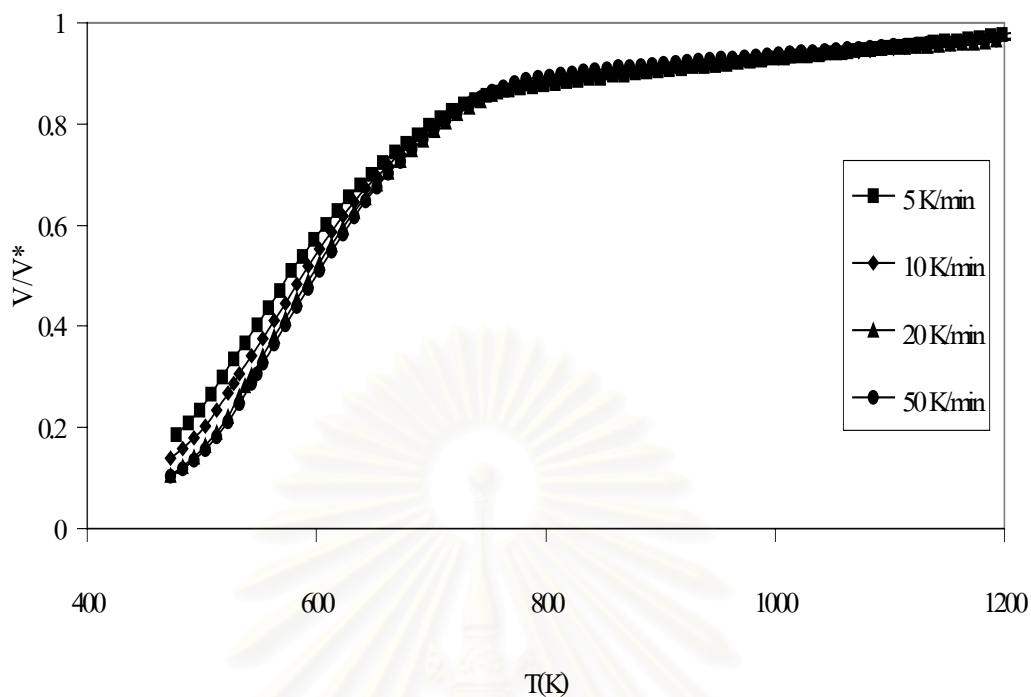


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าของ  $V/V^*$  กับอุณหภูมิของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าของ  $V/V^*$  กับอุณหภูมิของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวาง





รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนค่าของ  $V/V^*$  กับอุณหภูมิของของภาคตะกอนจากโรงโหลาเฟิน

#### 4.4.1 ศึกษาทางจลนพลศาสตร์โดยวิธี Arrhenius

ส่วนในการศึกษาทางจลนพลศาสตร์อย่างง่าย เพื่อหาค่าคงที่ทางจลนพลศาสตร์โดยใช้สมการของ Arrhenius สำหรับปฏิกิริยาเคมีอันดับที่หนึ่ง เพื่ออธิบายกลไกของปฏิกิริยา [26] ดังสมการ

$$(dw/dt) = -k(w-w_p) \quad (4.1)$$

$$k = [-(dw/dt)/(w-w_p)] = k_0 \exp(-E/RT) \quad (4.2)$$

$$(dw/dt) = -k_0 \exp(-E/RT)(w-w_p) \quad (4.3)$$

$$\ln k = \ln k_0 - E/RT \quad (4.4)$$

$w$  = น้ำหนักเริ่มต้น

$w_f$  = น้ำหนักสุดท้าย

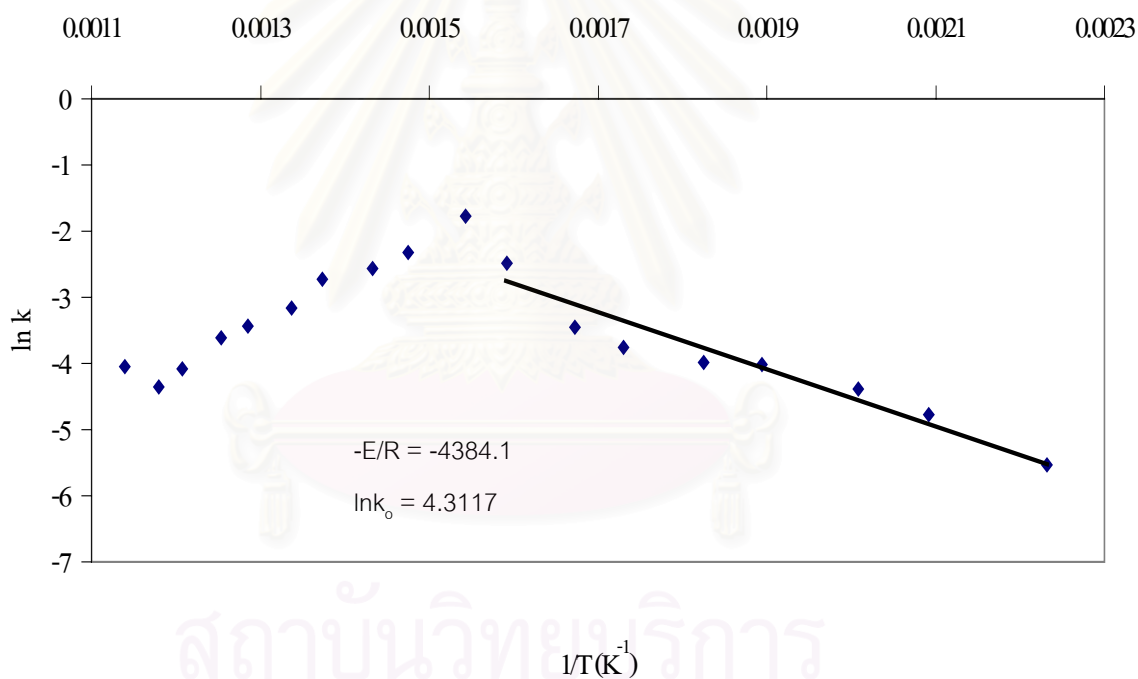
$R$  = ค่าคงที่ของแก๊ส =  $8.314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

$E$  = พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

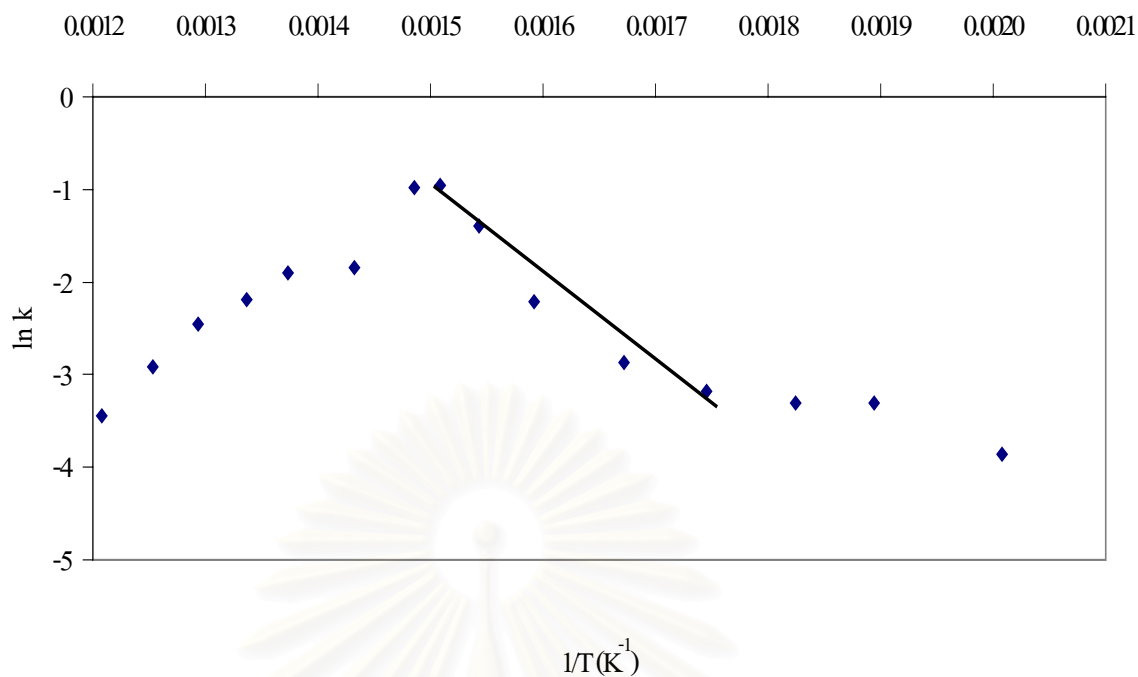
$k$  = ค่าคงที่อัตราเร็ว

$k_0$  = frequency factor or pre-exponential factor

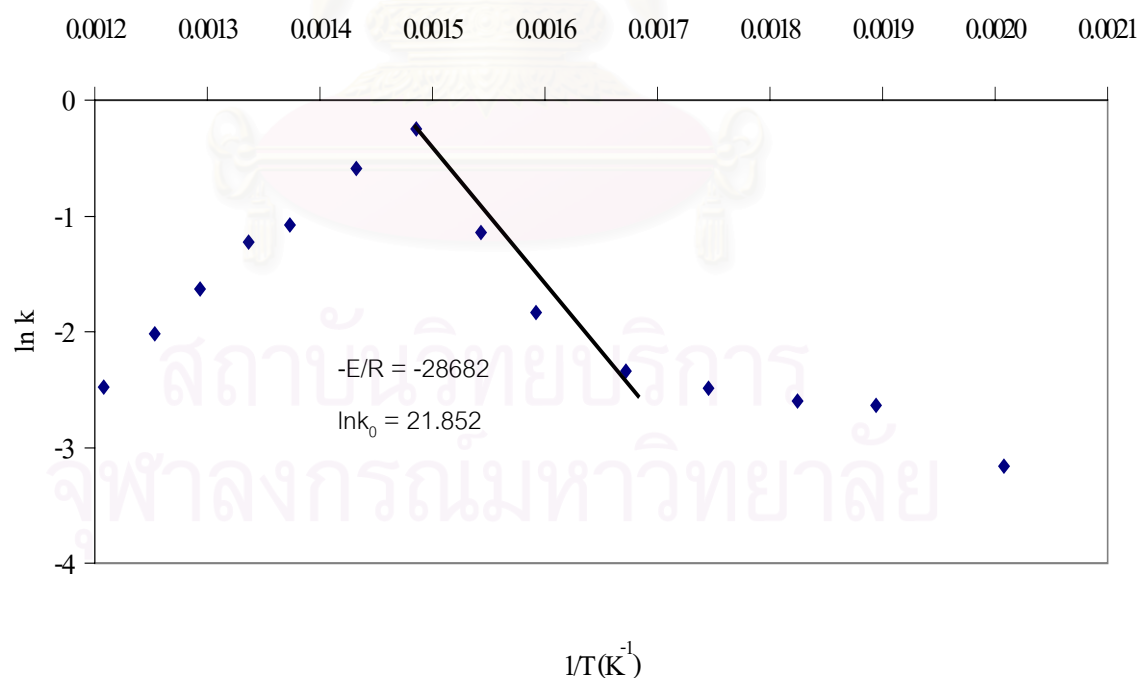
จากผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง TG เมื่อไปแทนค่าในสมการที่ 4.2 และ 4.4 แล้วเขียนกราฟระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ดังรูปที่ 4.9-4.24 ที่แต่ละอัตราให้ความร้อนจะได้ ความชัน คือ  $-E/R$  และจุดตัดแกน y คือ  $\ln k_0$  จะได้ค่าพารามิเตอร์ทางจลนพลศาสตร์คือ  $E$  และ  $k_0$  ตามลำดับ



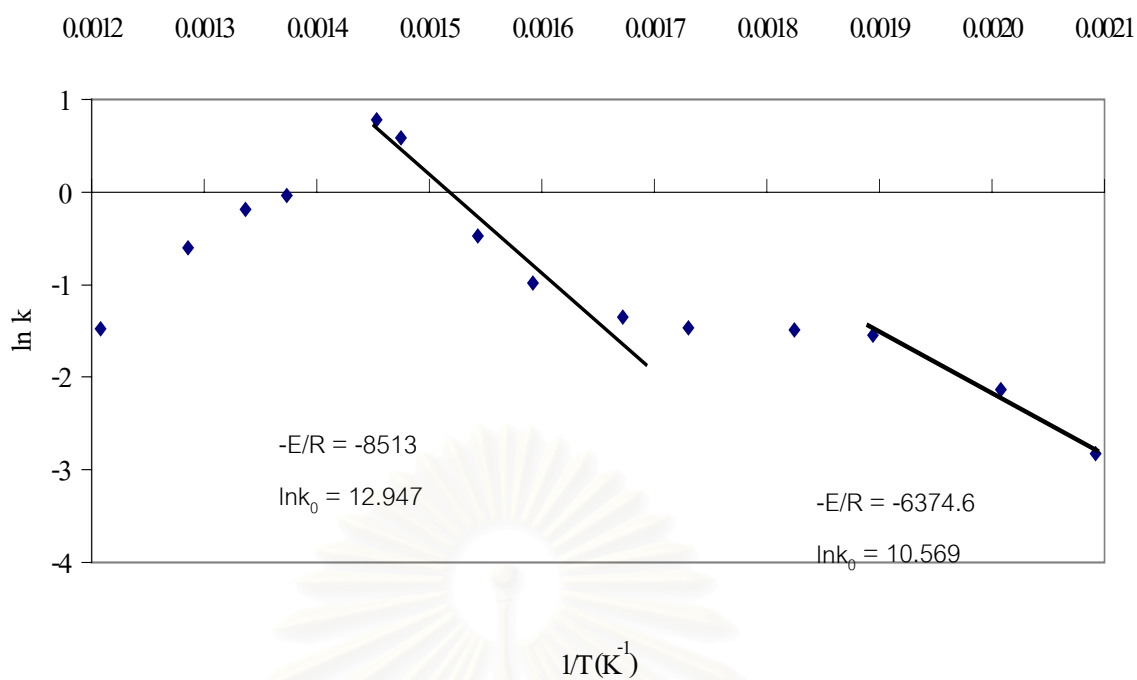
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อมที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min



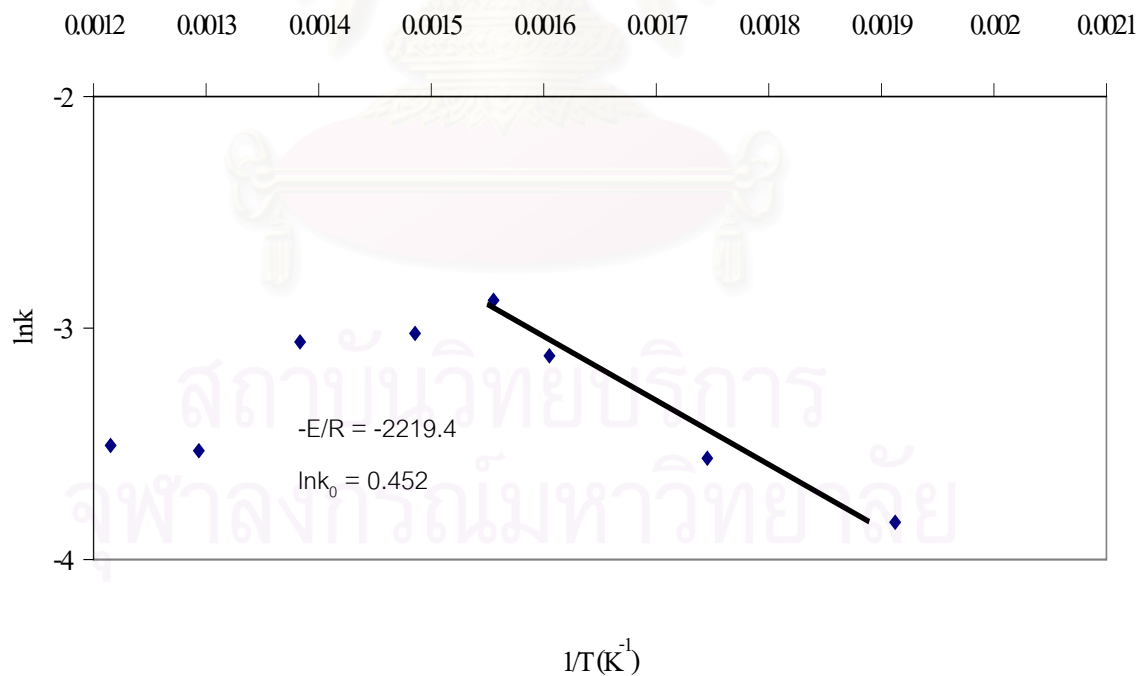
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกาคตะก่อนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อน 10 K/min



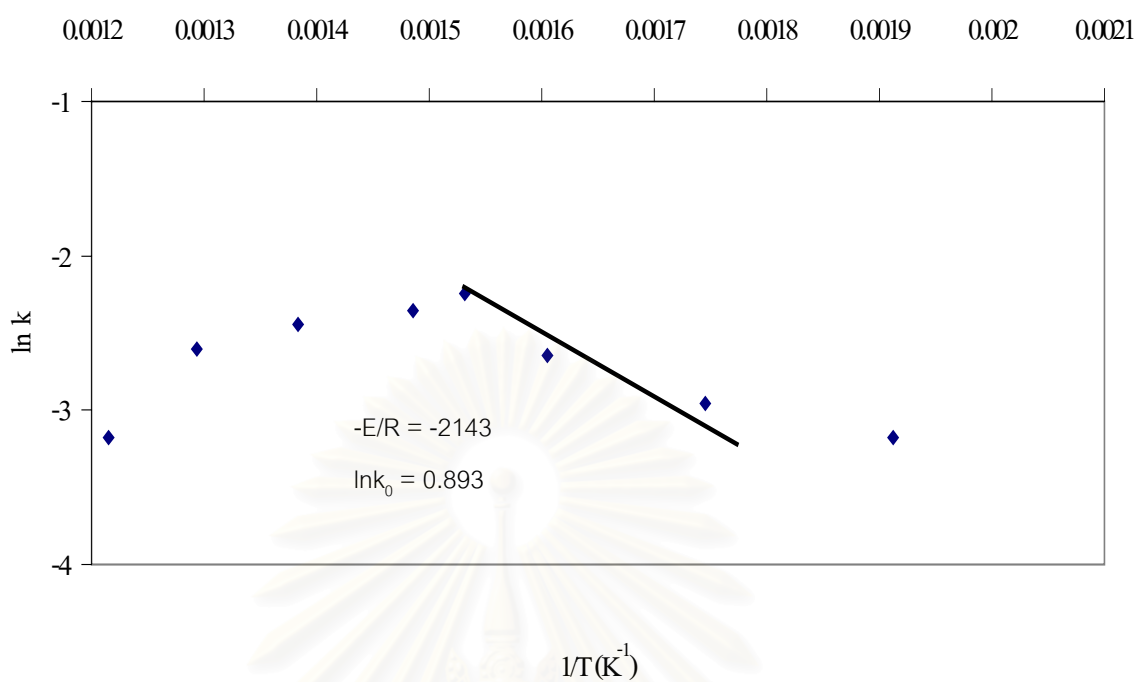
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกาคตะก่อนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อน 20 K/min



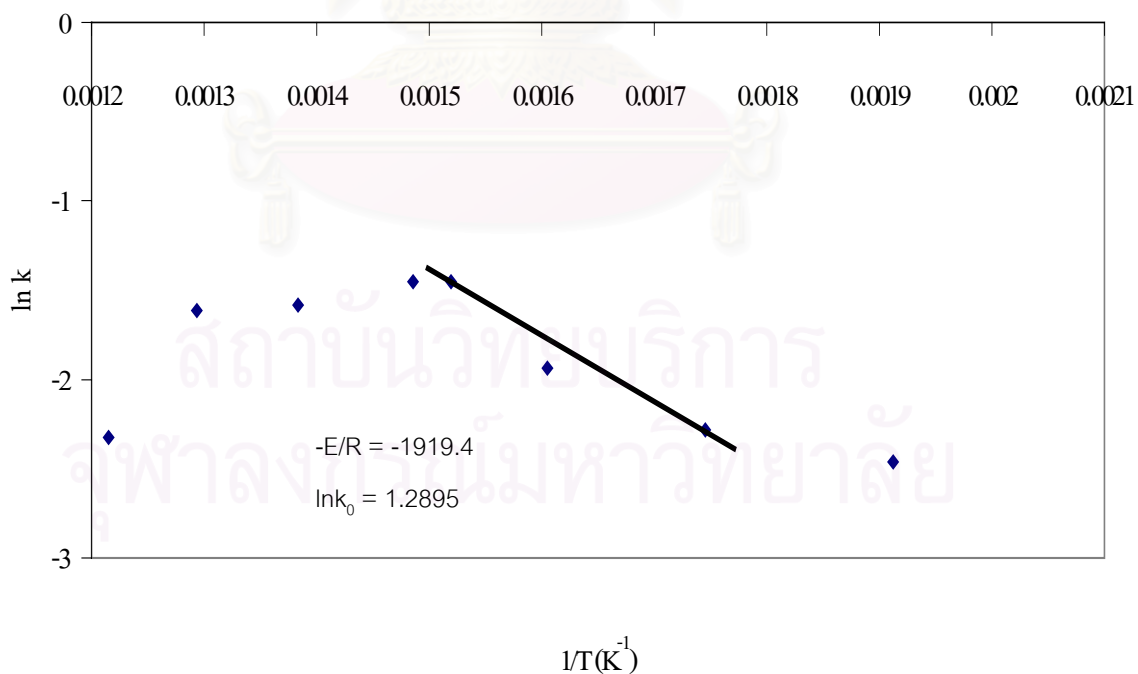
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อน 50 K/min



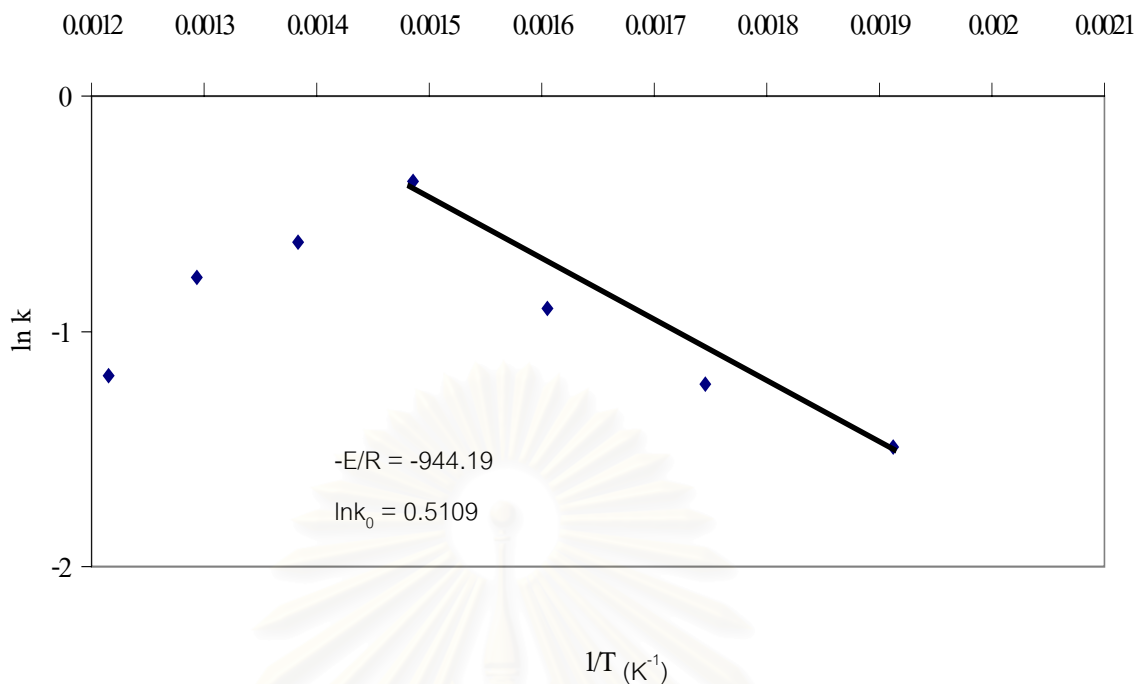
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง ที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min



รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกาต้มน้ำจากโรงบำบัดส่วนกลาง ที่ อัตราให้ความร้อน 10 K/min



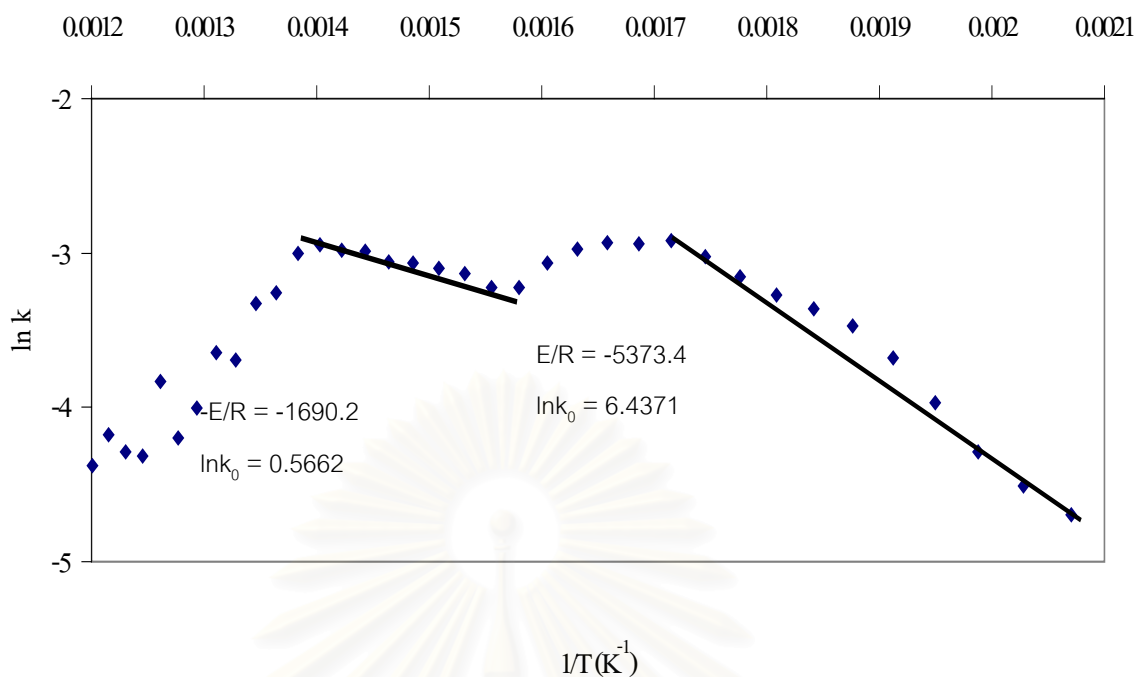
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกาต้มน้ำจากโรงบำบัดส่วนกลาง ที่ อัตราให้ความร้อน 20 K/min



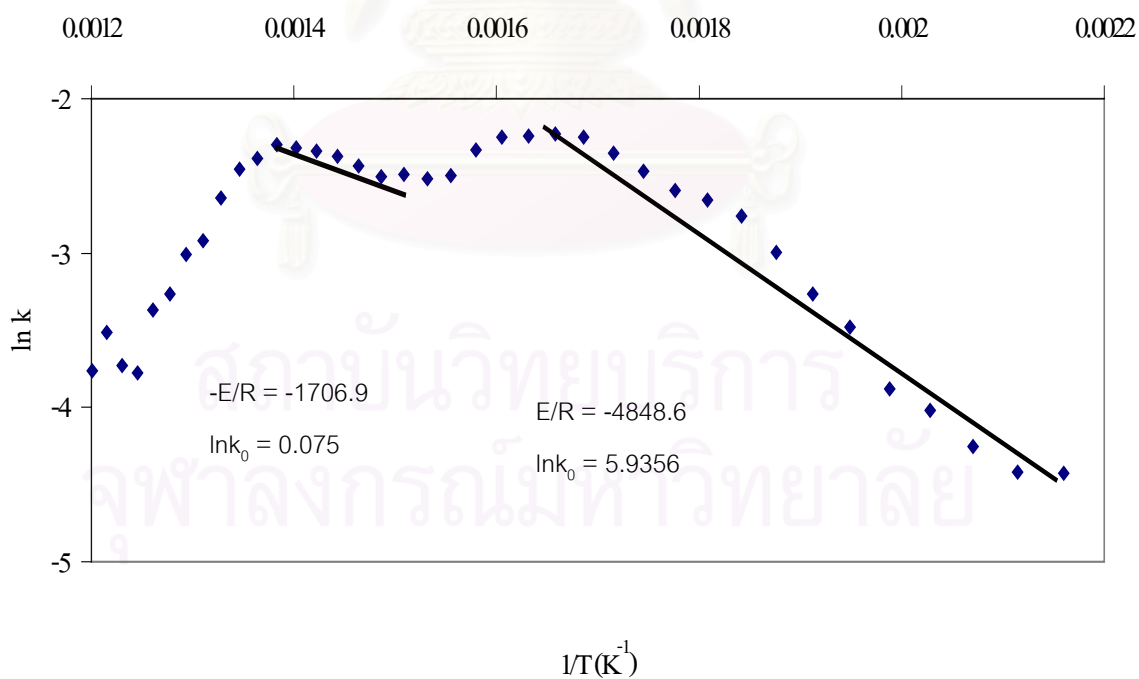
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง ที่อัตราให้ความร้อน 50 K/min

ตารางที่ 4.4 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงงานฟอกข้อม

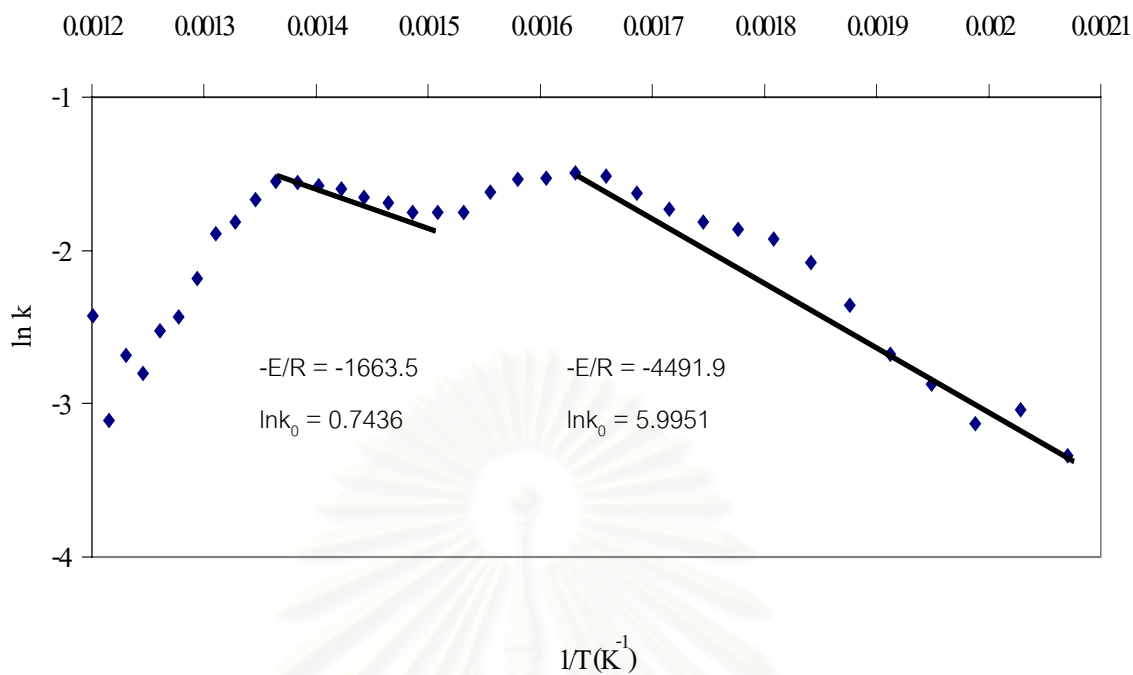
อัตราให้ความร้อน (K/min)	ช่วงอุณหภูมิ (K)	E (kJ/mol)	$k_0$ (min <sup>-1</sup> )
5	428-648	36.45	7.46E+01
10	548-673	64.17	3.33E+04
20	588-667	70.76	1.75E+05
50	478-528	53.00	3.89E+04
	578-688	70.78	4.20E+05



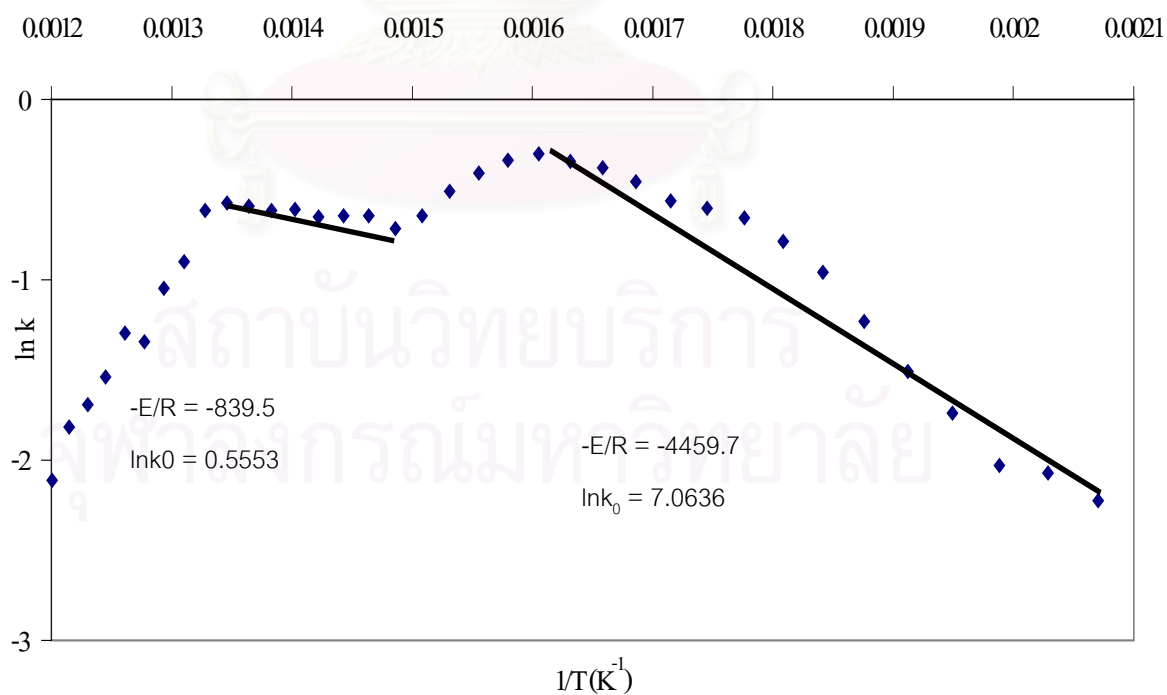
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวาง ที่อัตราให้ความร้อน 5 K/min



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวาง ที่อัตราให้ความร้อน 10 K/min

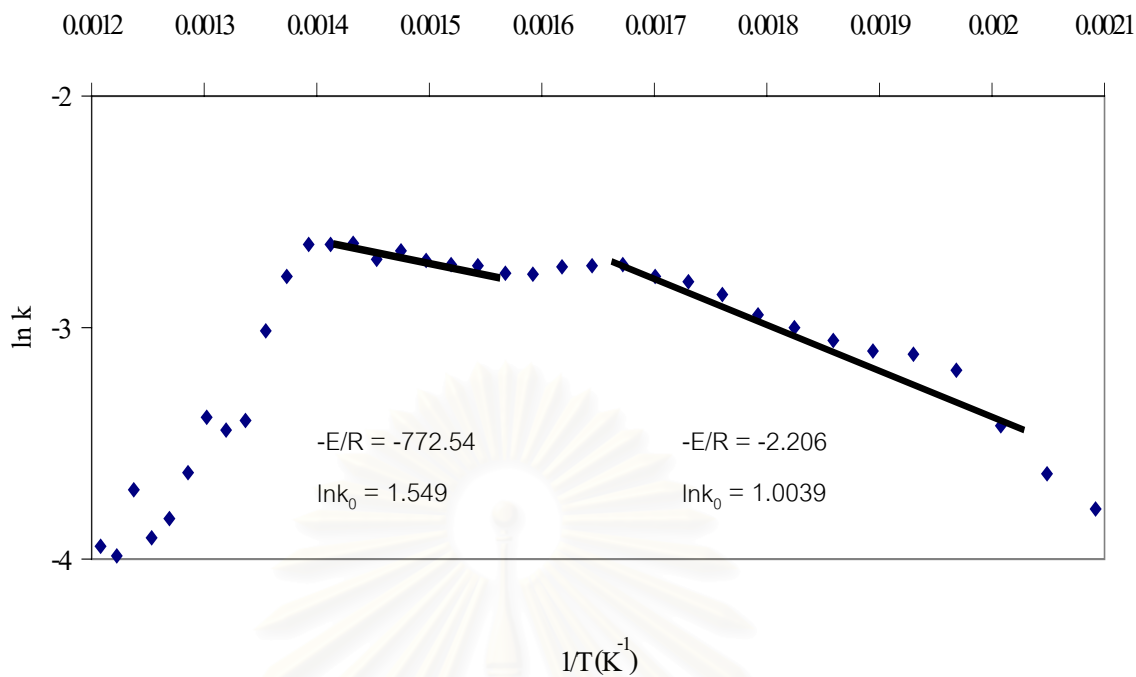


รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของเคหะชุมชนห้วยขวาง ที่อัตราให้ความร้อน  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

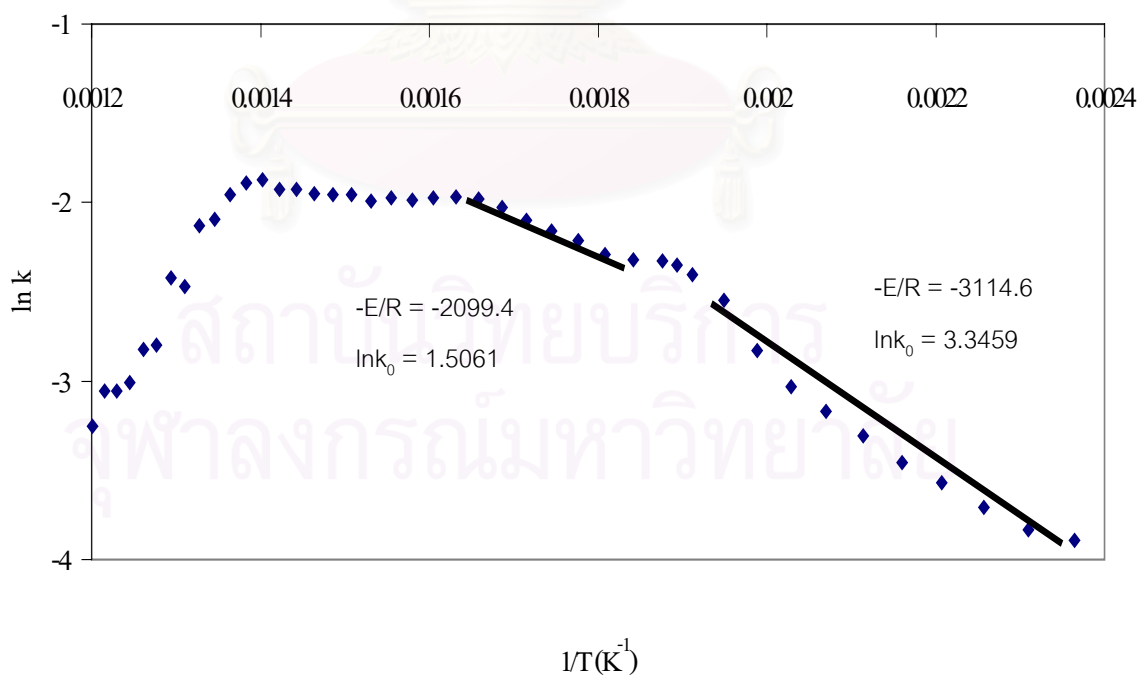


รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของเคหะชุมชนห้วยขวาง ที่อัตราให้ความร้อน  $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

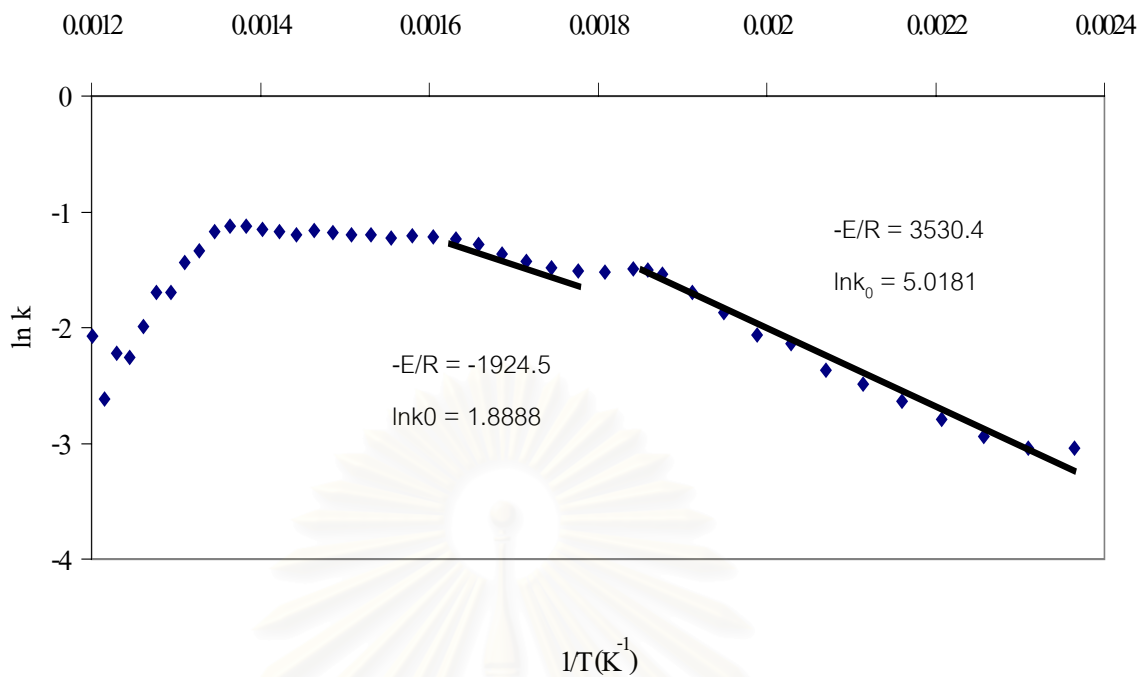




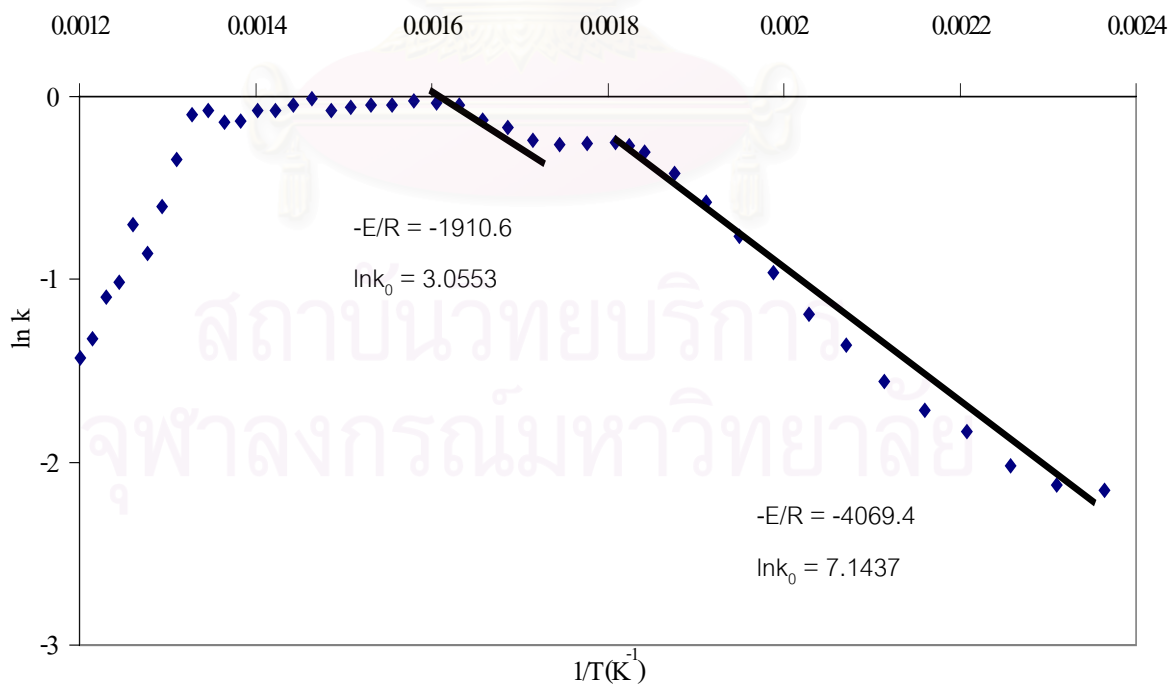
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงโอเลฟิน ที่อัตราให้ความร้อน  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงโอเลฟิน ที่อัตราให้ความร้อน  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงโอเลฟิน ที่อัตราให้ความร้อน  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln k$  กับ  $1/T$  ของกากตะกอนจากโรงโอเลฟิน ที่อัตราให้ความร้อน  $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$

ตารางที่ 4.5 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง

อัตราให้ความร้อน (K/min)	ช่วงอุณหภูมิ (K)	E (kJ/mol)	$k_0(\text{min}^{-1})$
5	473-643	18.45	1.57E+00
10	473-653	17.82	2.44E+00
20	473-673	15.96	3.63E+00
50	423-623	7.85	1.67E+00

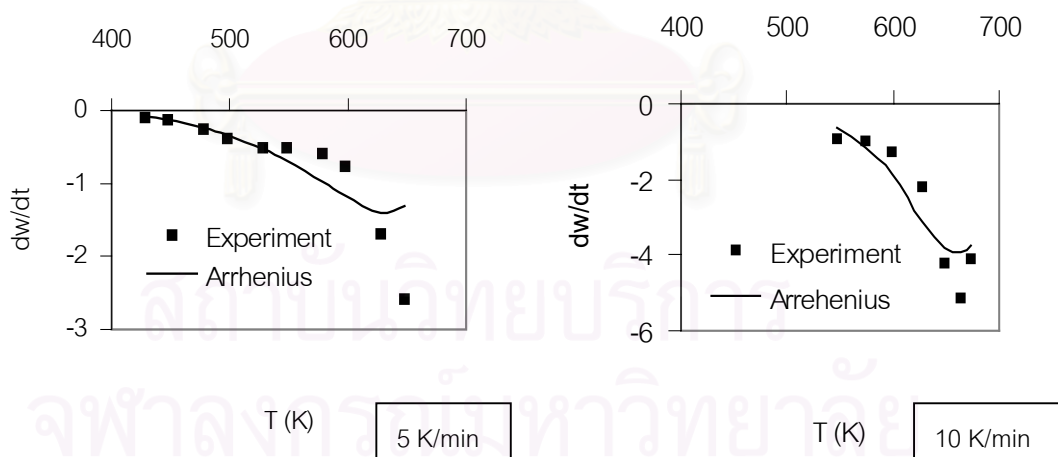
ตารางที่ 4.6 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงห้วยขวาง

อัตราให้ความร้อน (K/min)	ช่วงอุณหภูมิ (K)	E (kJ/mol)	$k_0(\text{min}^{-1})$
5	473-583	44.68	6.25E+02
	643-713	14.05	1.76E+00
10	463-613	40.31	3.78E+02
	653-713	14.19	1.08E+00
20	483-613	37.35	4.01E+02
	673-733	13.83	2.10E+00
50	473-623	37.08	1.17E+03
	673-743	6.98	1.74E+00

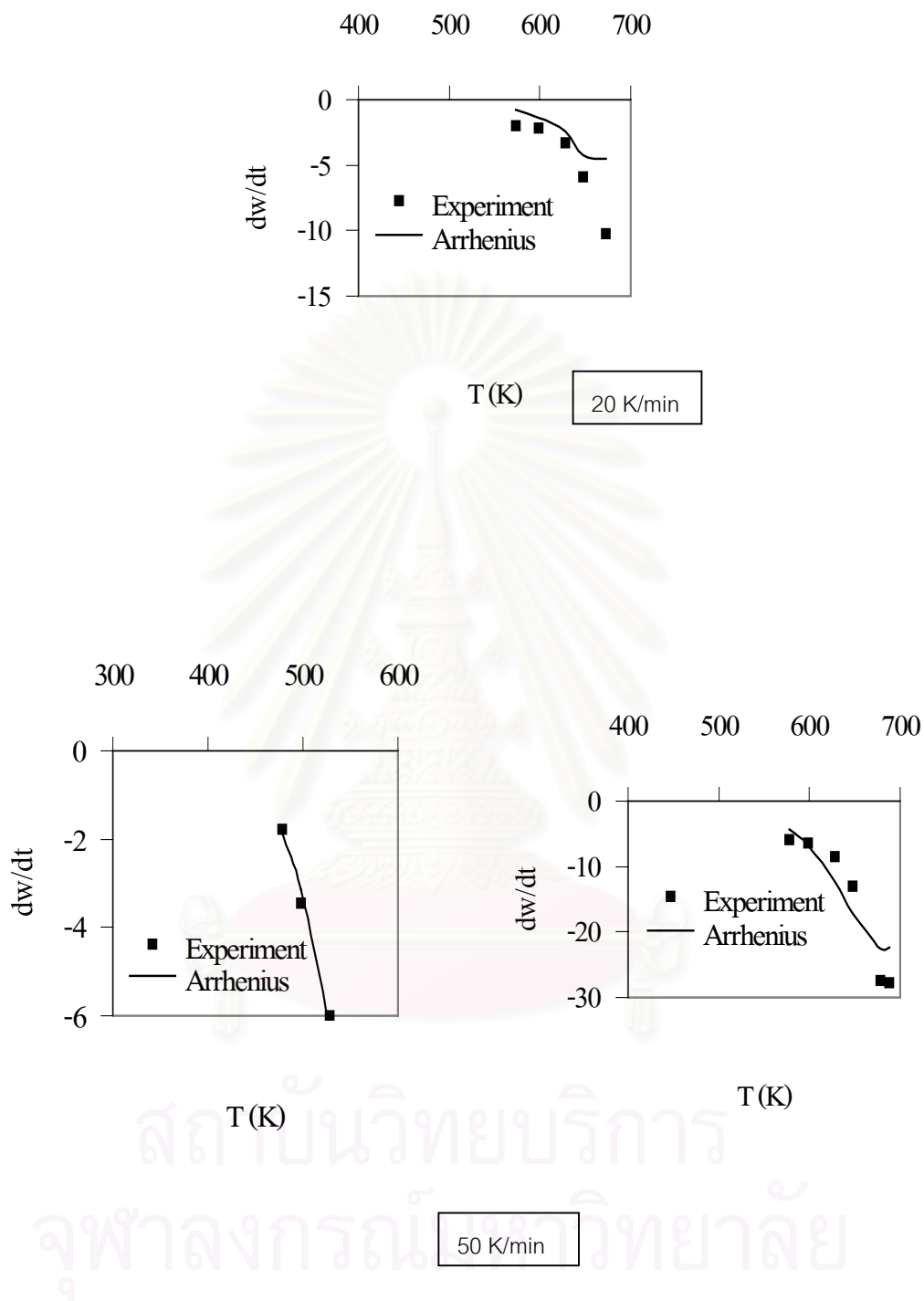
ตารางที่ 4.7 ค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์เบื้องต้นของกากตะกอนจากโรงโหล่ฟีน

อัตราให้ความร้อน (K/min)	ช่วงอุณหภูมิ (K)	E (kJ/mol)	$k_0(\text{min}^{-1})$
5	478-608	18.34	2.73E+00
	628-678	6.87	2.32E-01
10	423-513	25.90	2.84E+01
	553-603	17.46	4.51E+00
20	433-543	29.35	1.51E+02
	563-623	16.00	6.61E+00
50	433-553	33.83	1.27E+03
	573-613	15.89	2.12E+01

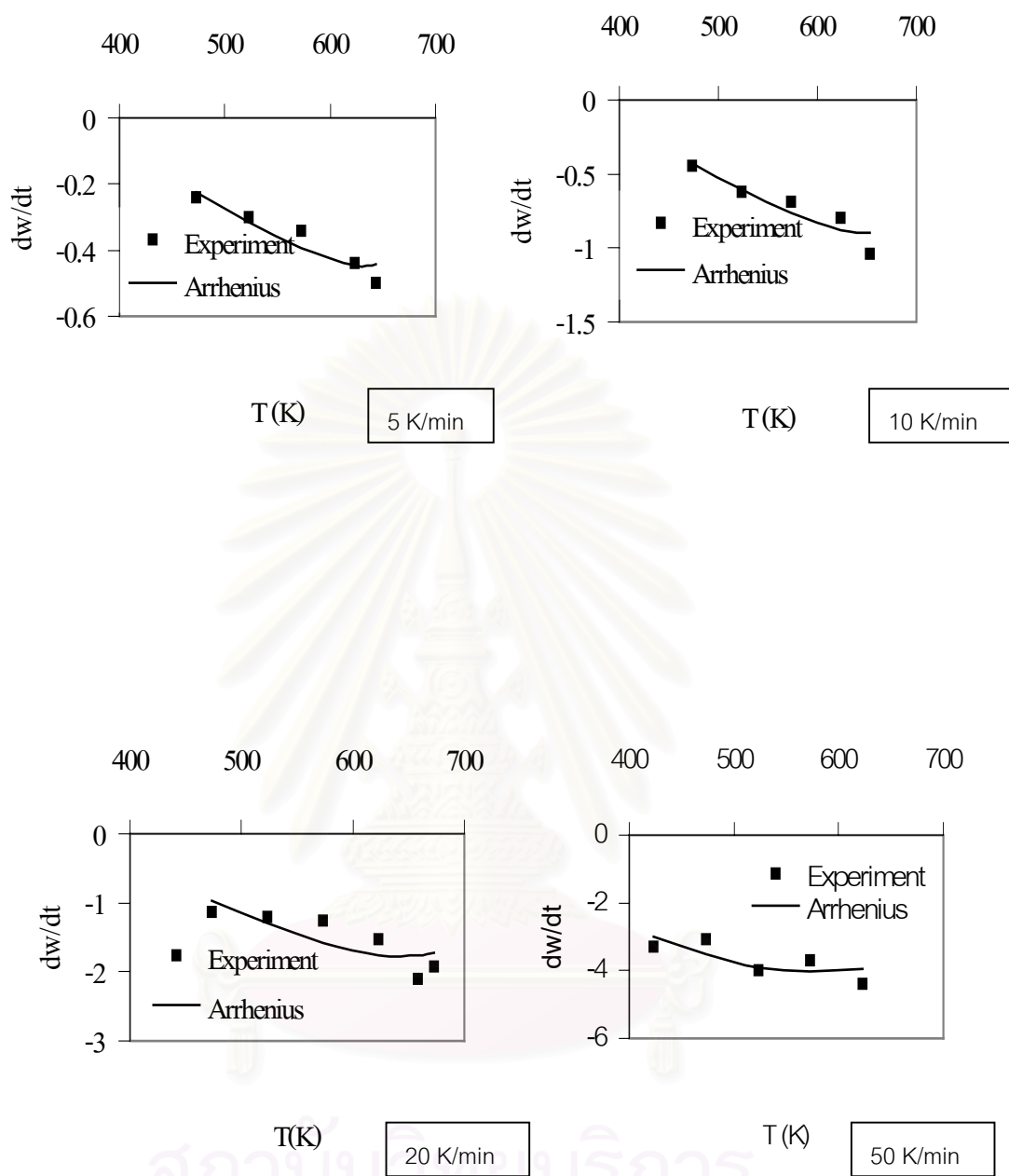
จากค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่ได้ ( $E$ ,  $k_0$ ) เมื่อนำมาแทนค่าในสมการของ Arrhenius จะได้  $(dw/dt) = -k_0 \exp(-E/RT)(w-w_p)$  ซึ่งเป็นสมการที่สามารถใช้ทำนายอัตราการสลายน้ำหนักรวมที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ ซึ่งจะแสดงการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและจากสมการนี้ ของกากตะกอนแหล่งต่างๆ ดังรูปที่ 4.25-4.40



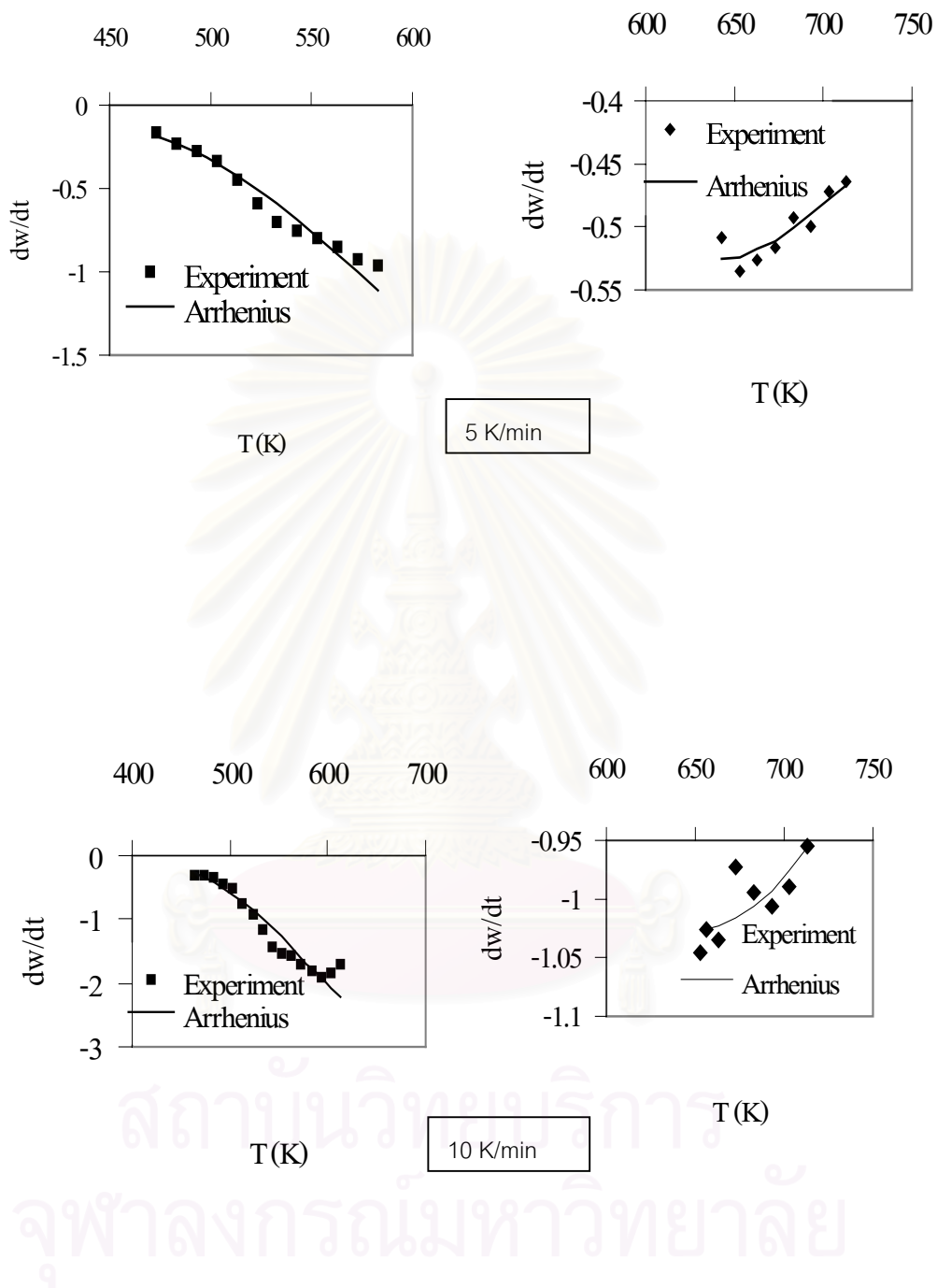
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับอุณหภูมิ ระหว่างจากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ



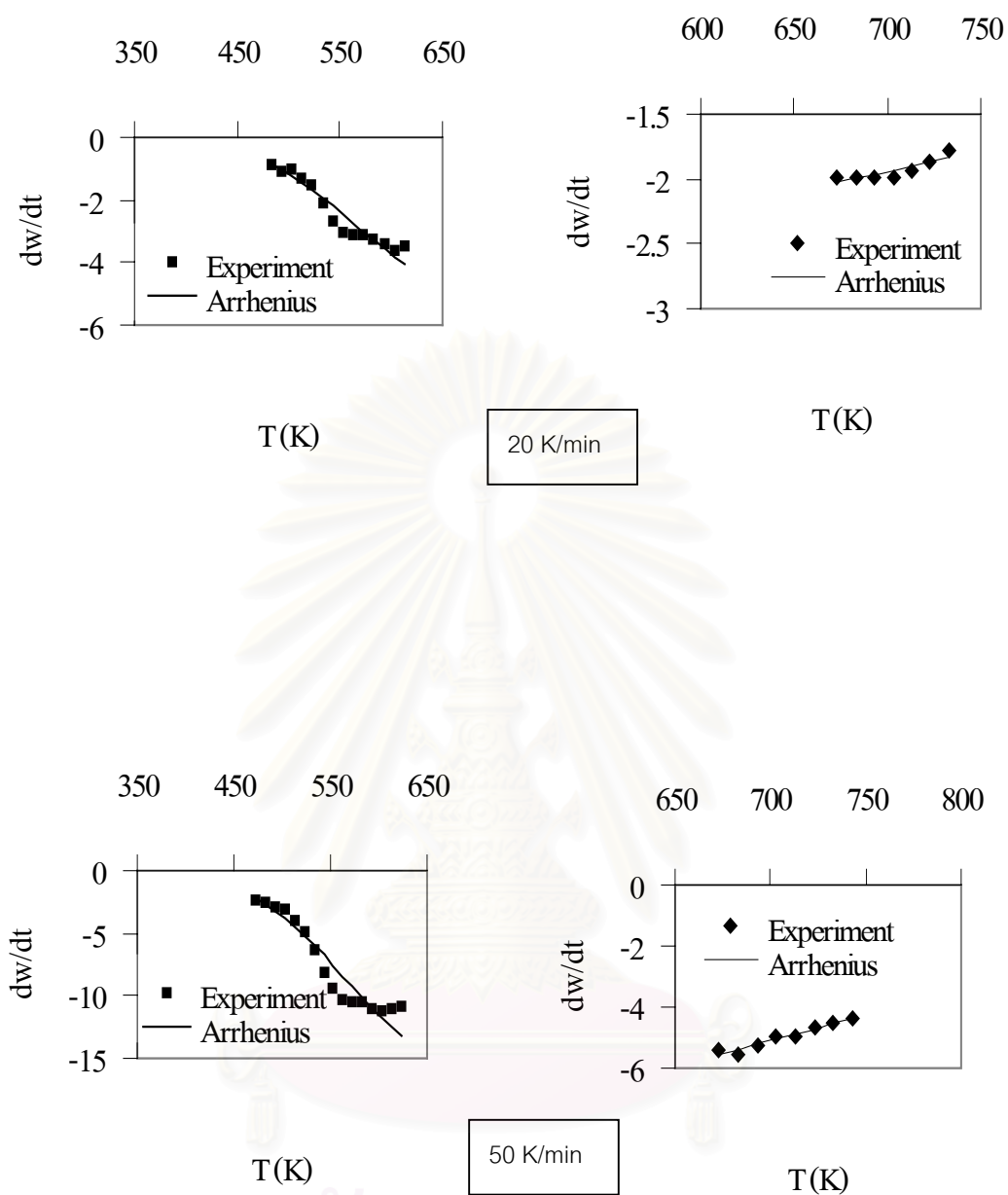
รูปที่ 4.29 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับอุณหภูมิ ระหว่างจากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ



**รูปที่ 4.30** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับอุณหภูมิ ระหว่างจากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ของภาคตะกอนจากโรงงานบำบัดส่วนกลาง ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ

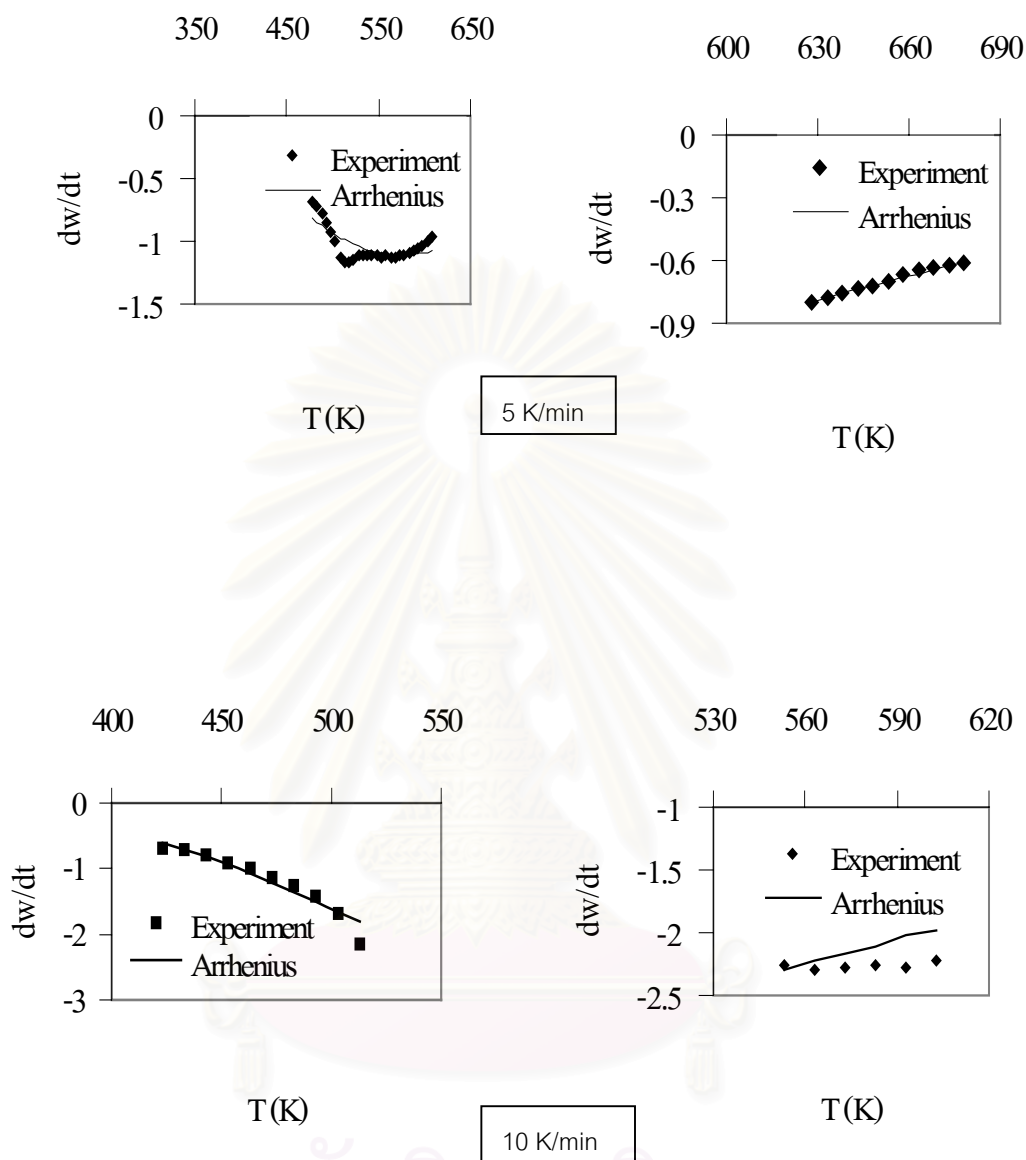


รูปที่ 4.31 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับอุณหภูมิ ระหว่างจากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ของกากตะกอนจากโรงเคหะชุมชนห้วยขวาง ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ

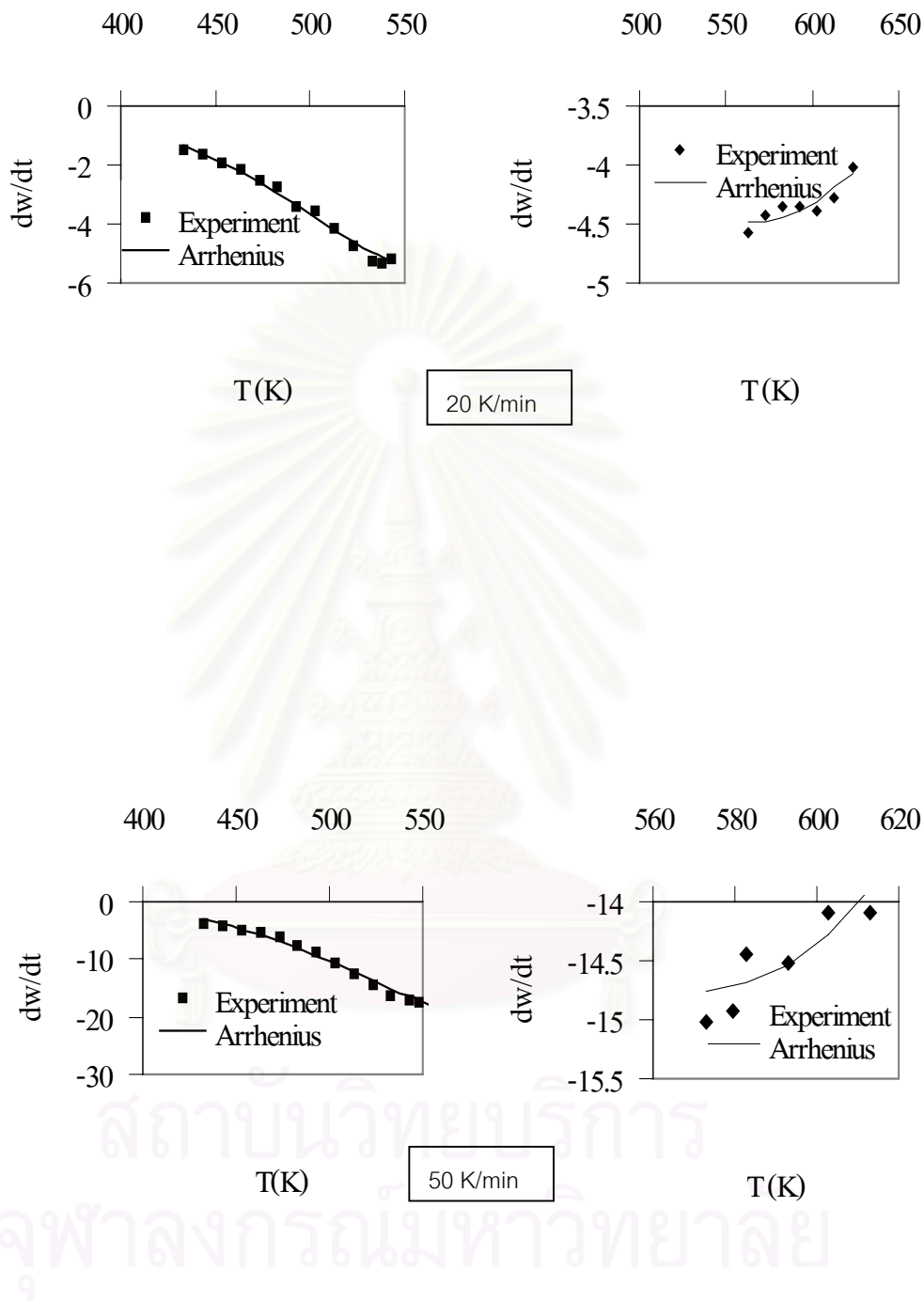


รูปที่ 4.31 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับอุณหภูมิ ระหว่างจากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ของกากตะกอนจาก โรงเคหะชุมชน ห้วยขวาง ที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ





รูปที่ 4.32 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับอุณหภูมิ ระหว่างจากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ของกากตะกอนจากโรงโหลาไฟฟ้า อัตราให้ความร้อนต่างๆ



รูปที่ 4.32 (ต่อ) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกับอุณหภูมิ ระหว่างจากการทดลองกับกฎของ Arrhenius ของกากตะกอนจากโรงโม่หิน อัตราให้ความร้อนต่างๆ

#### 4.4.2 ศึกษาจลนพลศาสตร์ด้วยแบบจำลอง DEAM (Distribution Activation Energy Model)

เนื่องจากในกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สหลายชนิด ( $\text{CO}, \text{CO}_2, \text{Hydrocarbon}, \text{H}_2\text{O}$ ) ดังนั้นปฏิกิริยาน่าจะประกอบด้วย ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งที่ผันกลับไม่ได้แบบขนานจำนวนมาก จึงได้ทำการเสนอแบบจำลอง DEAM เป็นโมเดลอย่างง่าย [27-29] โมเดลนี้ตั้งสมมติฐานว่า มีปฏิกิริยาผันกลับไม่ได้จำนวนมากของ ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแบบขนาน ที่มีค่าคงที่อัตราเร็วต่างกัน เพื่อที่จะหา  $f(E)$  (distribution curve of activation energy,  $E_a$ ) โดยเสนอความแตกต่างของ  $E_a$  ของแต่ละปฏิกิริยาและ  $k_0(E)$  ที่สัมพันธ์กับ  $E$  ดังนี้

$$1 - V/V^* = \int \exp(-k \int e^{-E/RT} dt) f(E) dE \quad (4.5)$$

$$\int f(E) dE = 1 \quad (4.6)$$

$$\Phi(E, T) = \exp(-k_0 \int e^{-E/RT} dt) = \exp[-(k_0/a) \int e^{-E/RT} dT] \quad (4.7)$$

$$= \exp[-(k_0 RT^2/aE) e^{-E/RT}] \quad (4.8)$$

$$dV/dT = d(\Delta V)/dt = k_0 e^{-E/RT} (\Delta V^* - \Delta V) \quad (4.9)$$

$$1 - (\Delta V/\Delta V^*) = \exp(-k_0 \int e^{-E/RT} dt) = \exp[-(k_0 RT^2/aE) e^{-E/RT}] \quad (4.10)$$

จากสมการข้างต้น มาจัดรูปใหม่จะได้

$$\ln [(dV/V^*)/dt] = \ln [k_0 (\Delta V^*/V^*) (1 - (\Delta V/\Delta V^*)) - E/R(1/T)] \quad (4.11)$$

$$\ln (a/T^2) = \ln(k_0 R/E) - \ln[-\ln(1 - (\Delta V/\Delta V^*))] - E/R(1/T) \quad (4.12)$$

ให้  $[1 - (\Delta V/\Delta V^*)] = \Phi(E, T) = 0.58$  จะได้

$$\ln (a/T^2) = \ln(k_0 R/E) + 0.6075 - E/R(1/T) \quad (4.13)$$

ให้ทอม 0.6075 ในสมการที่ 3.13 กำหนดให้เท่ากับ 0 จะได้

$$\ln(a/T^2) = \ln(k_0 R/E) - E/R(1/T) \quad (4.14)$$

T = อุณหภูมิ (K)

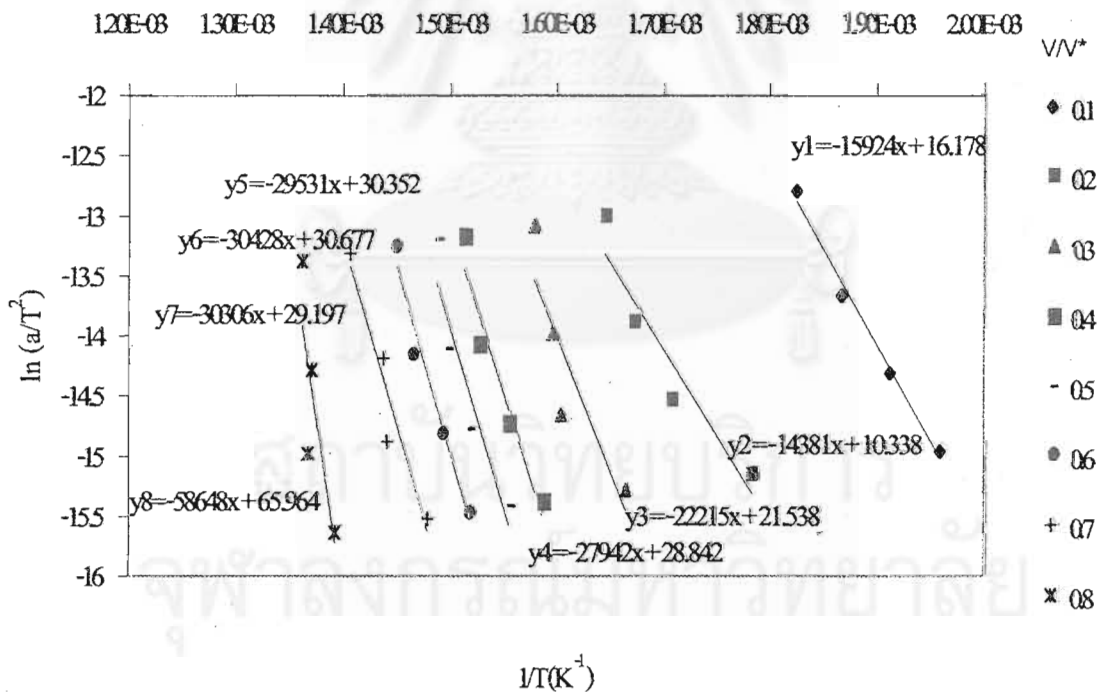
a = อัตราให้ความร้อน ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )

R = ค่าคงที่ของแก๊ส =  $8.314 \cdot 10^{-3} \text{ kJ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$

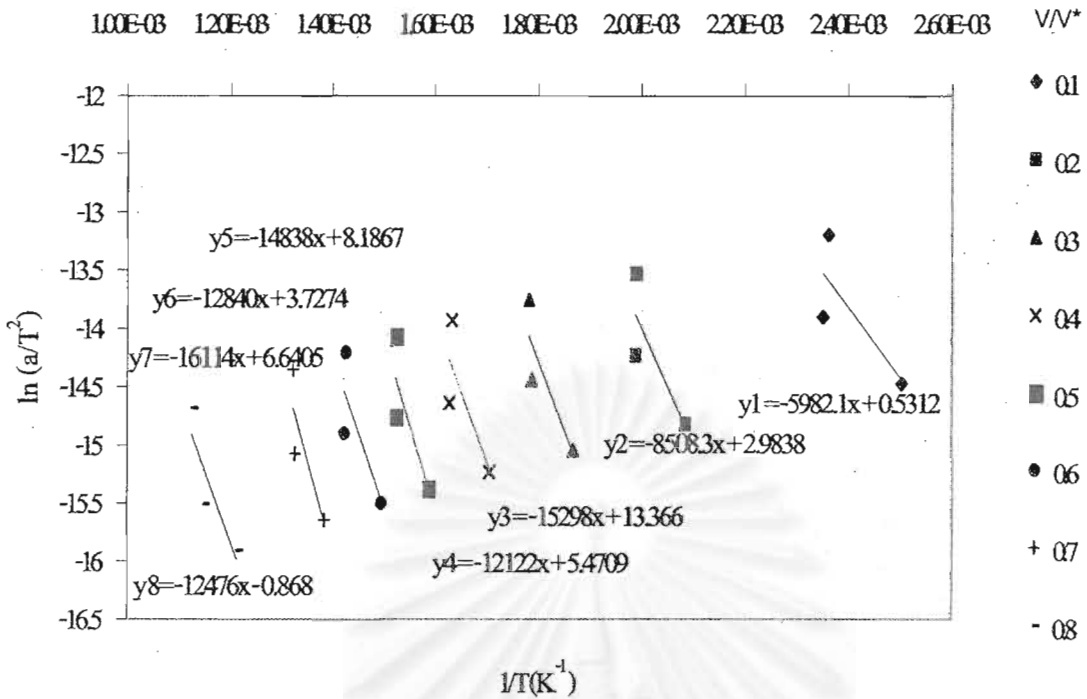
E = พลังงานกระตุ้น (kJ/mol)

$k_0$  = frequency factor or pre-exponential factor

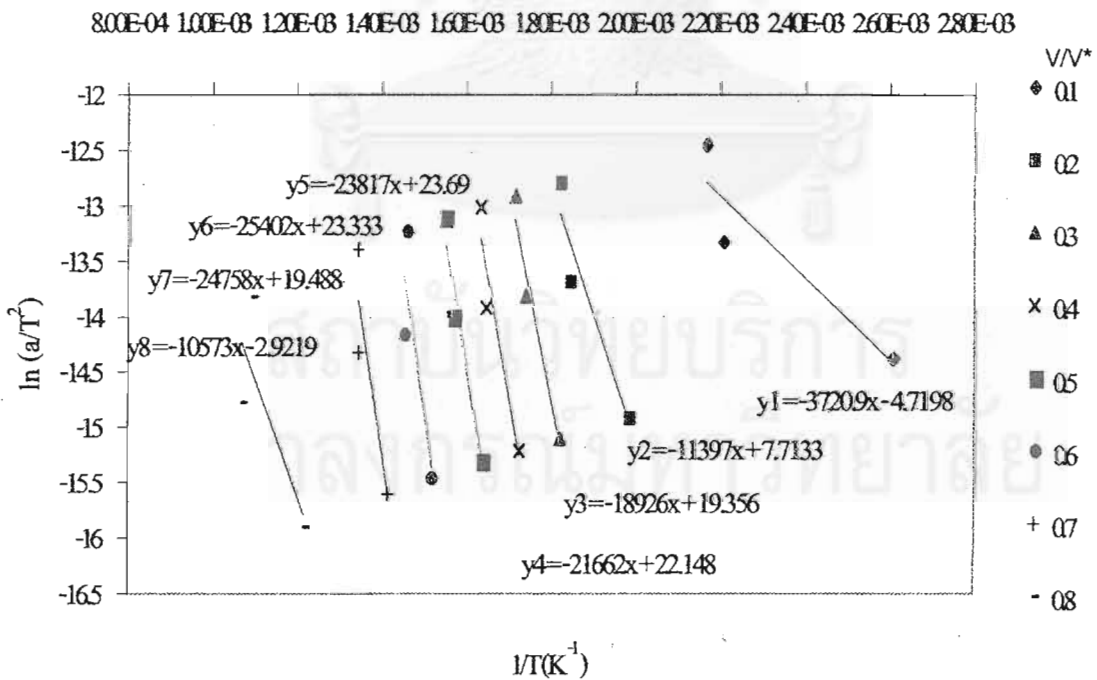
จากรูปที่ 4.9-4.12 กราฟระหว่าง  $V/V^*$  กับ T ทำการเลือกค่า  $V/V^*$  จะได้ค่า T แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(a/T^2)$  และ  $1/T$  ที่แต่ละ  $V/V^*$  จะให้ความชัน คือ  $-E/R$  และจุดตัดแกน y คือ  $\ln(k_0 R/E)$  ดังกราฟรูปที่ 4.33-4.36 กล่าวคือ จะได้พารามิเตอร์ E และ  $k_0$  ที่แต่ละ  $V/V^*$



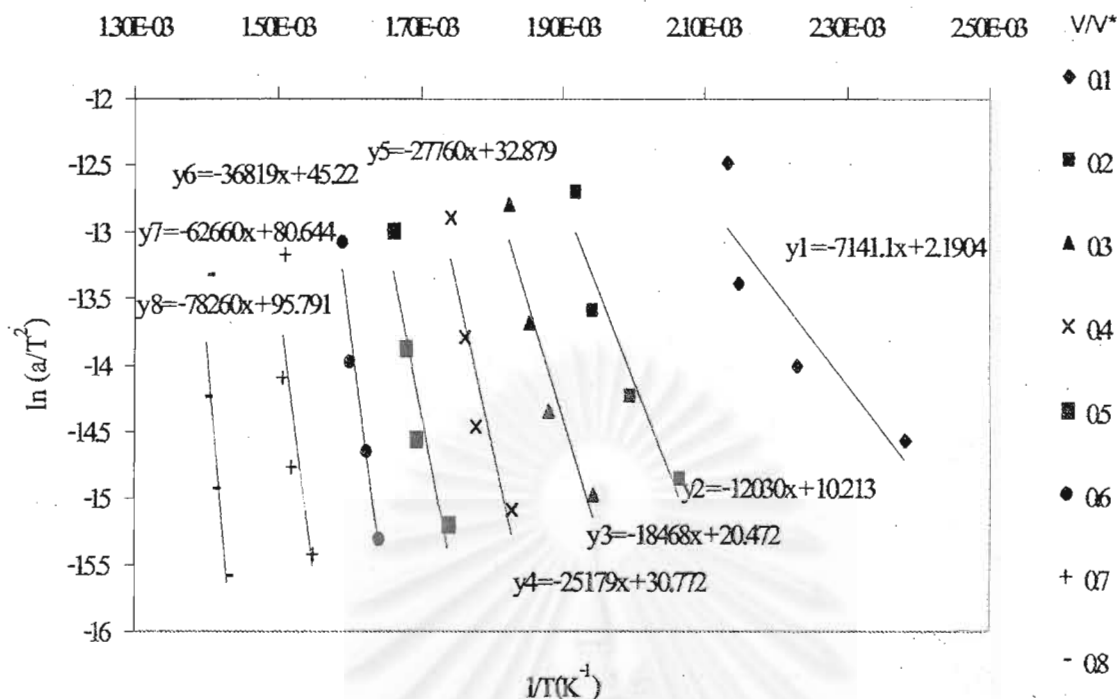
รูปที่ 4.33 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(a/T^2)$  และ  $1/T$  ที่แต่ละ  $V/V^*$  ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม



รูปที่ 4.34 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(a/T^2)$  และ  $1/T$  ที่แต่ละ  $V/V^*$  ของกากตะกอนจากโรงบำบัด  
ส่วนกลาง



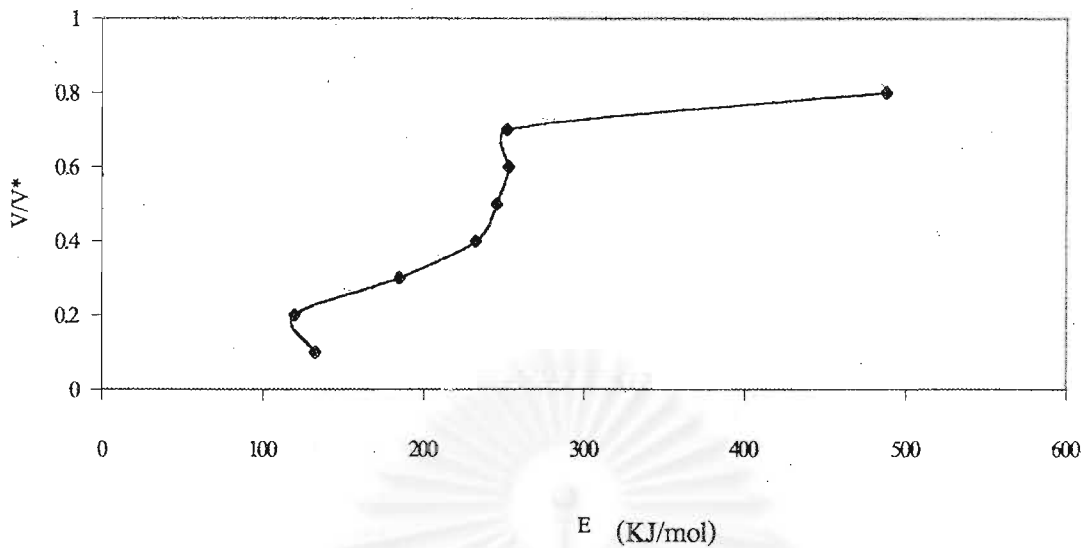
รูปที่ 4.35 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(a/T^2)$  และ  $1/T$  ที่แต่ละ  $V/V^*$  ของกากตะกอนจากเคหะชุมชน  
ห้วยขวาง



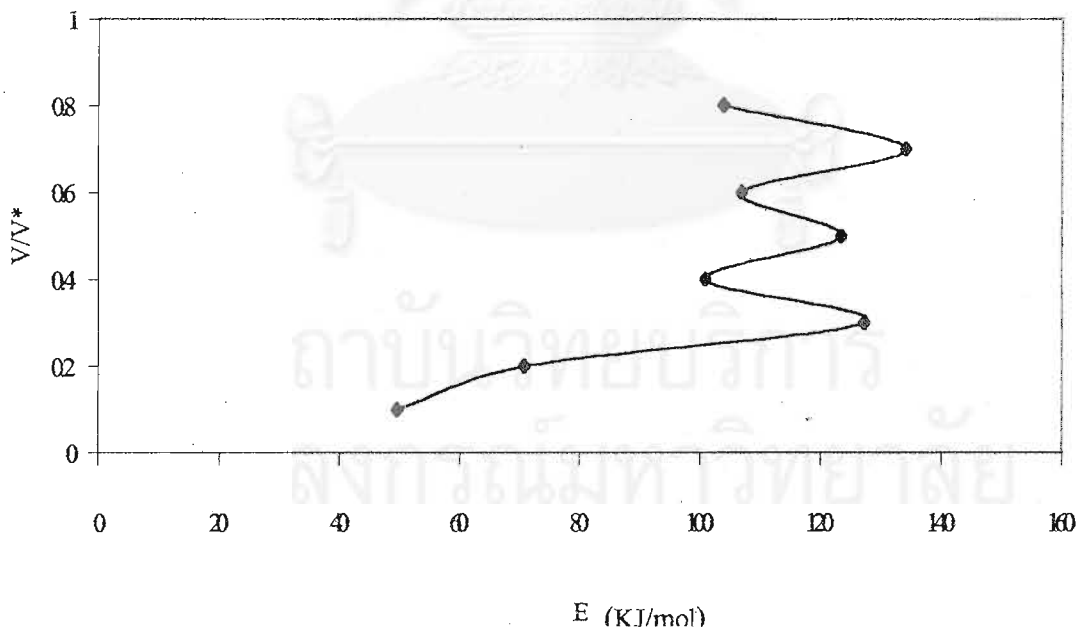
รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $\ln(a/T^2)$  และ  $1/T$  ที่แต่ละ  $V/V^*$  ของกากตะกอนจากโรงโหล่ฟีน

ตารางที่ 4.8 ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ของกากตะกอนของแหล่งต่างๆ ที่อัตราการเปลี่ยนแปลง ( $V/V^*$ ) ต่างกัน

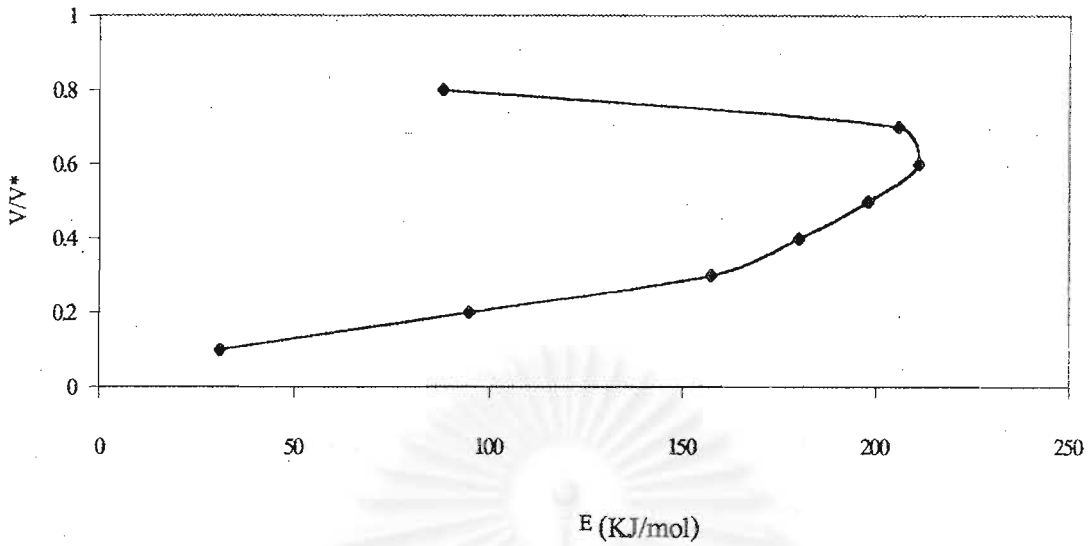
V/V*	กากตะกอน							
	โรงงานฟอกย้อม		โรงบำบัดส่วนกลาง		ทะเลชุมชนห้วยขวาง		โรงโหล่ฟีน	
	E(KJ/mol)	$k_0$ (sec <sup>-1</sup> )	E(KJ/mol)	$k_0$ (sec <sup>-1</sup> )	E(KJ/mol)	$k_0$ (sec <sup>-1</sup> )	E(KJ/mol)	$k_0$ (sec <sup>-1</sup> )
0.1	132.39	1.69E+11	49.74	1.02E+04	30.94	4.17E+05	59.37	63831.88
0.2	119.56	4.44E+08	70.74	1.68E+05	94.75	2.55E+07	100.02	3.28E+08
0.3	184.70	5.02E+13	127.19	9.76E+09	157.35	4.82E+12	153.54	1.44E+13
0.4	232.31	9.38E+16	100.78	2.88E+06	180.10	9.00E+13	209.34	5.82E+17
0.5	245.52	4.49E+17	123.36	5.33E+07	198.01	4.63E+14	230.80	5.28E+18
0.6	252.98	6.4E+17	106.75	5.34E+05	211.19	3.45E+14	306.11	1.6E+24
0.7	251.96	1.45E+17	133.97	1.23E+07	205.84	7.20E+12	520.96	6.74E+39
0.8	487.60	2.61E+33	103.73	5.24E+03	87.90	5.69E+02	650.65	3.13E+46



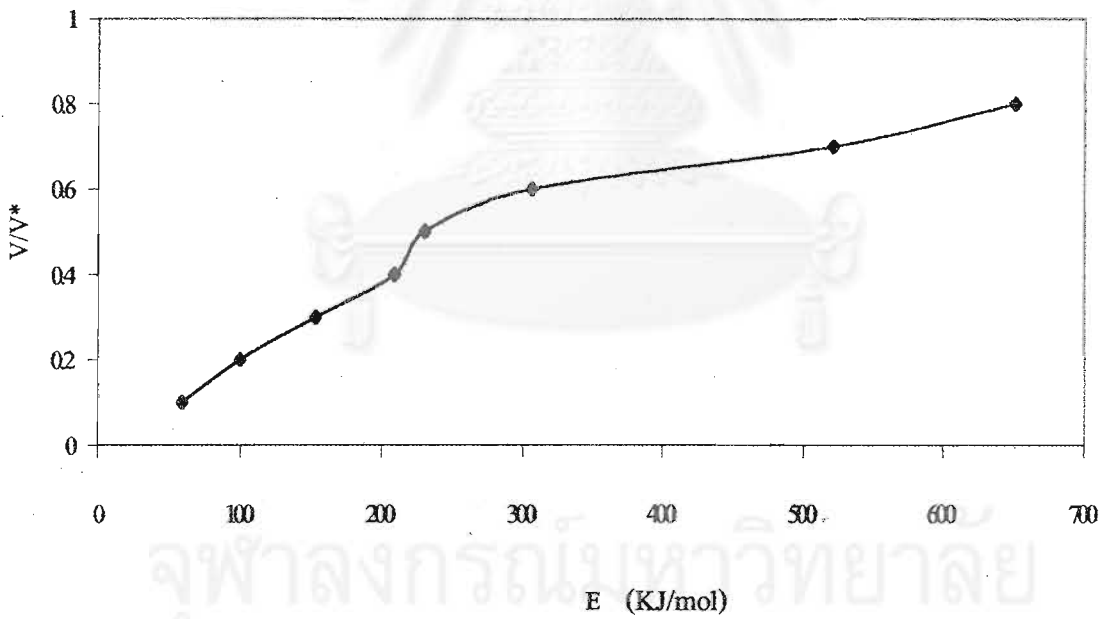
รูปที่ 4.37 ความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ V/V\* ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม



รูปที่ 4.38 ความสัมพันธ์ระหว่าง E กับ V/V\* ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง



รูปที่ 4.39 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E$  กับ  $V/V^*$  ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวาง

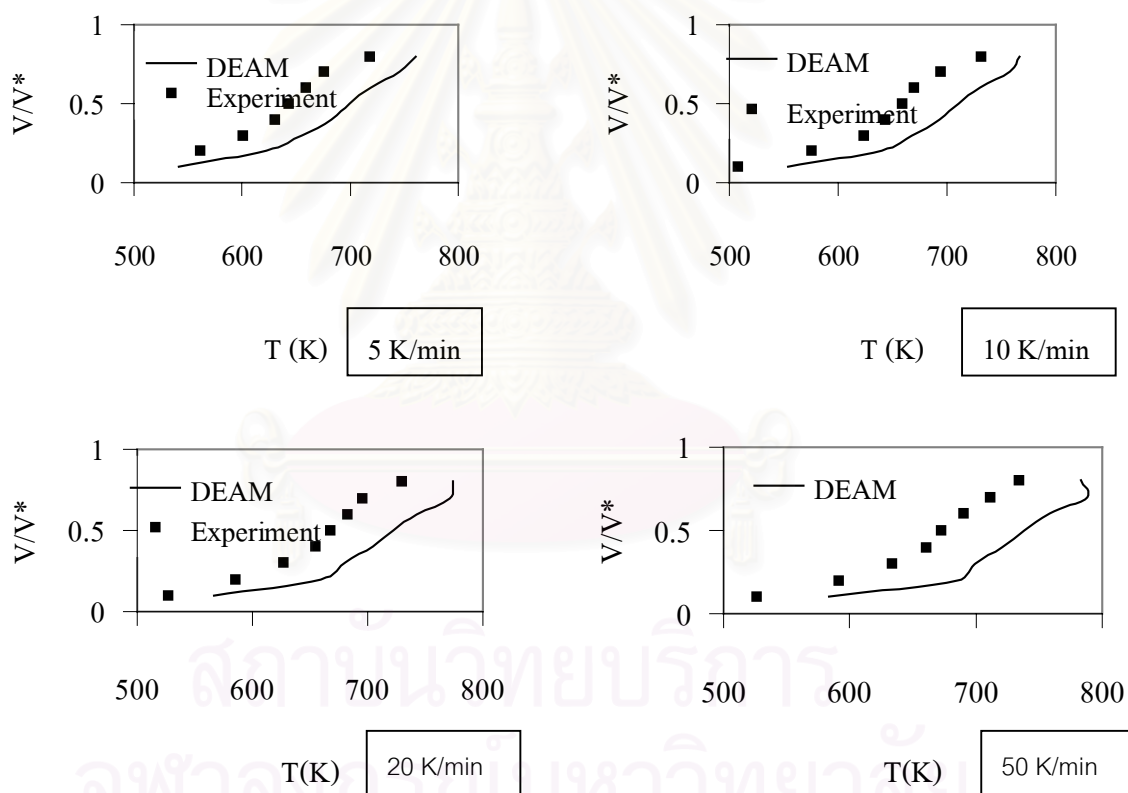


รูปที่ 4.40 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $E$  กับ  $V/V^*$  ของกากตะกอนจากโรงโม่หิน

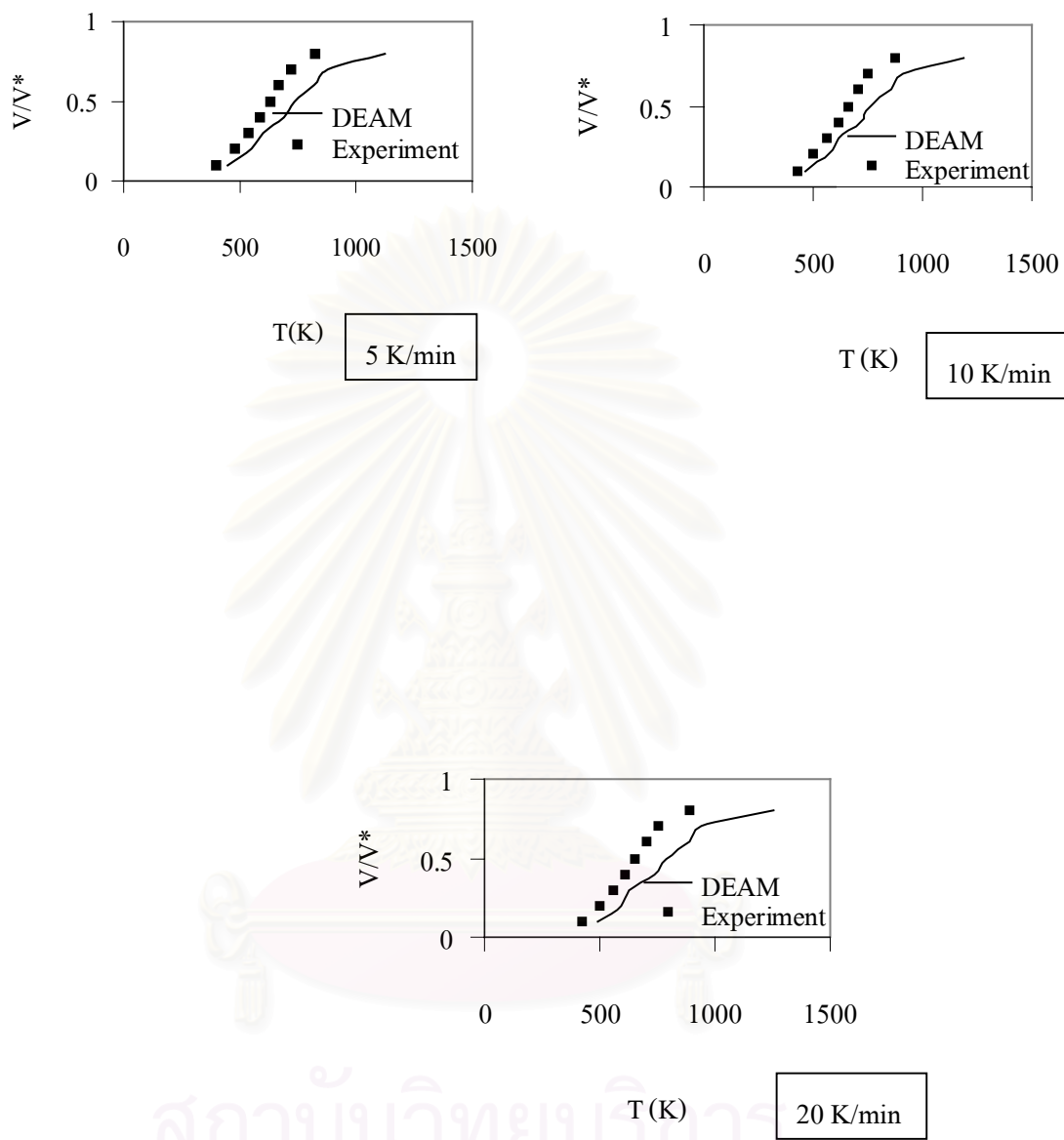


จากการพิจารณาค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่ได้ดังตาราง 4.8 และเมื่อนำมาเขียนกราฟ ดังรูปที่ 4.37-4.40 พบว่า ค่าพลังงานกระตุ้น(E) มีค่าเปลี่ยนไปเมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลง ( $V/V^*$  หรือ X) มากขึ้น แสดงให้เห็นว่า กลไกของปฏิกิริยาการแตกสลายเนื่องจากความร้อนนี้มีความแตกต่างกันในแต่ละอัตราการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นกลไกของปฏิกิริยาต้องประกอบด้วยปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยาที่ซับซ้อน

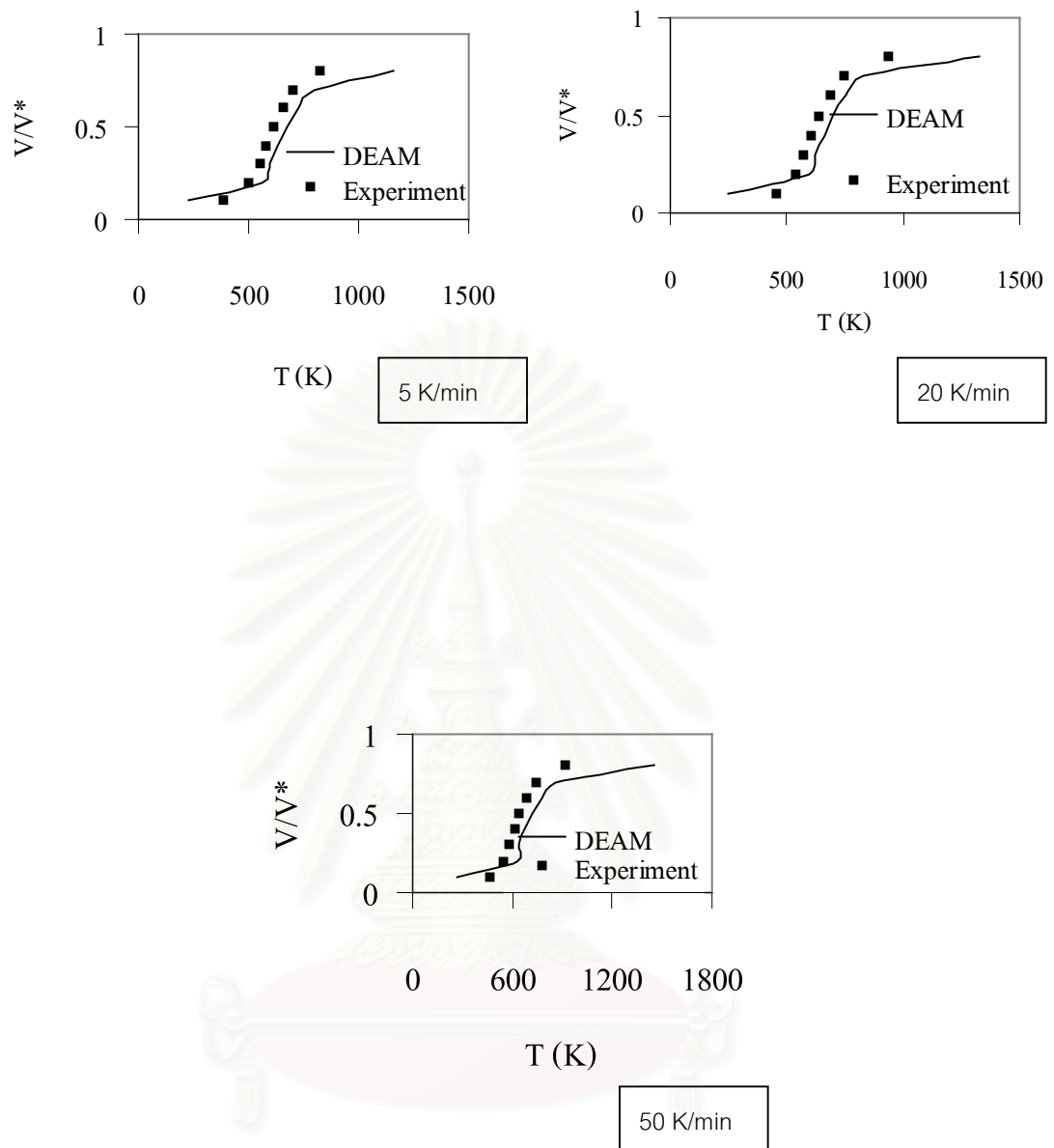
จากตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่ได้จากตารางที่ 4.3 ใช้สมการของแบบจำลอง DEAM สมการที่ 4.10 คือ  $1-(\Delta V/\Delta V^*) = \exp[-(k_0RT^2/aE)e^{-E/RT}]$  ในการทำนายอัตราส่วนของสารระเหยต่อสารระเหยทั้งหมด ( $V/V^*$ ) ที่อุณหภูมิต่างๆ ได้ โดยจะแสดงความสัมพันธ์ของกากตะกอนแต่ละแหล่งจากการทดลองกับจากแบบจำลอง DEAM ดังแสดงดังรูป 4.41-4.44



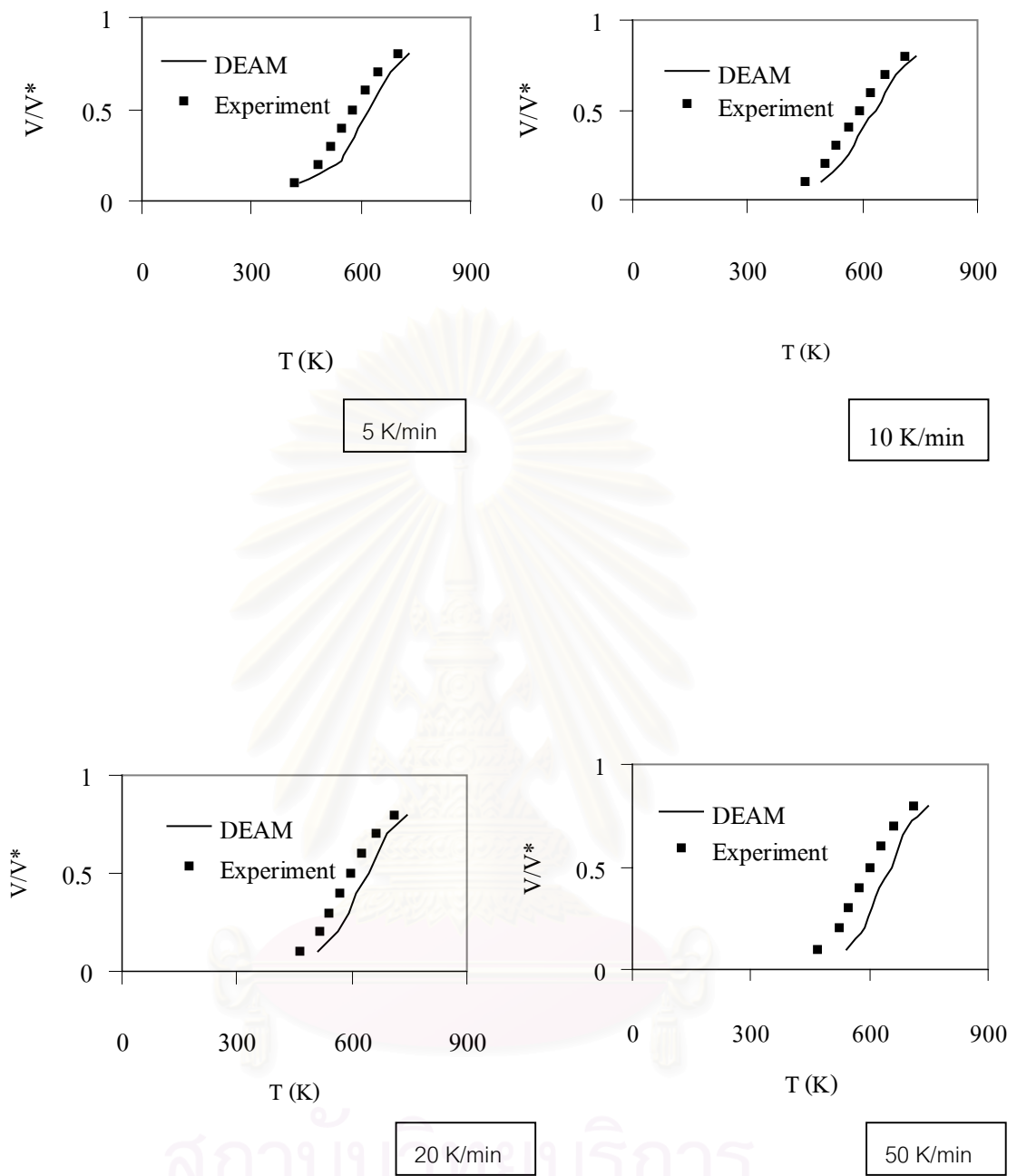
รูปที่ 4.41 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V/V^*$  กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของกากตะกอนจากโรงฟอกย้อมที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ



รูปที่ 4.42 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V/V^*$  กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของกาคตะก่อนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ



รูปที่ 4.43 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V/V^*$  กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของโรงเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตราให้ความร้อน



รูปที่ 4.44 ความสัมพันธ์ระหว่าง  $V/V^*$  กับอุณหภูมิจากการทดลองและจากแบบจำลอง DEAM ของกากตะกอนจากโรงโหลาไฟฟ้าที่อัตราให้ความร้อนต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาวิจัยกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องวิเคราะห์ทางความร้อน TGA (Thermogravimetric analysis) ของกากตะกอนที่ได้จากแหล่งกากตะกอนจำนวน 4 แหล่ง ได้แก่ โรงบำบัดส่วนกลาง โรงงานฟอกย้อม โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนห้วยขวาง และโรงโอเลฟิน ตามลำดับ

ในเบื้องต้นพบว่า สมบัติของกากตะกอนในแต่ละแหล่งแตกต่างกันไปขึ้นกับลักษณะของแต่ละอุตสาหกรรม หรือแหล่งวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสีย โดยการวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนและศึกษากระบวนการไพโรไลซิสด้วย TGA สามารถสรุปได้ดังนี้

1. กากตะกอนที่มีสารระเหยปริมาณมาก (31-60%) มีแนวโน้มที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นก๊าซหรือน้ำมันชีวภาพมากและถ้ามีคาร์บอนคงตัวปริมาณมากมีแนวโน้มที่จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์มาก นอกจากนี้ยังมีความชื้นและปริมาณซัลเฟอร์ต่ำ แต่มีค่าความร้อนสูง (1,600-5,600 cal/g) ดังนั้นกากตะกอนจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจในการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นเชื้อเพลิงในอนาคตต่อไป
2. กากตะกอนมีองค์ประกอบของโลหะหนักในปริมาณที่ต่างกัน ดังนั้นอาจมีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมได้ จึงต้องหาวิธีในการจัดการกับกากตะกอน โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้กระบวนการไพโรไลซิส
3. ในการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสพบว่าปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อกระบวนการไพโรไลซิสคือ อุณหภูมิ และอัตราให้ความร้อน โดยจากการพิจารณากราฟ DTG กล่าวคือ

- 3.1 ยอดกราฟ DTG ที่สูงสุด คือ อุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ซึ่งอยู่ในช่วง 200-600 °C โดยช่วงอุณหภูมิก่อน 100-150 °C เป็นช่วงที่น้ำเกิดการระเหย และที่อุณหภูมิมากกว่า 600 °C จะไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของกากตะกอน
- 3.2 เมื่ออัตราให้ความร้อนสูงขึ้น จะทำให้อุณหภูมิที่ระเหยได้ออกไปอย่างรวดเร็ว อัตราการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสมากขึ้น ใช้อุณหภูมิการไพโรไลซิสสูง โดยเมื่อพิจารณากราฟ DTG เมื่ออัตราให้ความร้อนเพิ่มขึ้น กราฟเลื่อนไปทางขวาและพิจารณาจากกราฟการเปลี่ยนกับอุณหภูมิ เมื่ออัตราให้ความร้อนเพิ่ม อัตราการเปลี่ยนแปลงของ (V/V\*) ต่ำ ที่อุณหภูมิเดียวกัน
- 3.3 อัตราให้ความร้อนต่ำ ใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยานานกว่า เพื่อให้ถึงอุณหภูมิไพโรไลซิส ดังนั้นจึงมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลง (V/V\*) มากกว่า
- 3.4 เมื่อพิจารณากราฟ DTG สามารถบอกได้ว่า ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นมีกี่ขั้นตอน โดยในการทดลองนี้จะได้ยอดกราฟ DTG ที่เด่นชัดเพียง 1 ยอดจึงเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสเพียงขั้นตอนเดียว แต่มีบางการทดลองเกิดยอดกราฟเล็กๆ เกิดขึ้น แสดงว่า อาจมีปฏิกิริยาย่อยๆ ที่ซับซ้อนเกิดขึ้นอีกด้วย
4. เมื่ออัตราการเปลี่ยนแปลง (V/V\*) ต่างกัน ได้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ต่างกันอย่างเด่นชัด แสดงว่าในกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนนี้ประกอบด้วยปฏิกิริยาหลายปฏิกิริยา
5. การศึกษาด้วยเครื่อง TGA เป็นวิธีการศึกษากระบวนการสูญเสียน้ำหนักทั้งหมดของตัวอย่างเนื่องจากความร้อน และสามารถใช้เป็นข้อมูลในการศึกษาจลนพลศาสตร์เบื้องต้นได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้สมการของ Arrhenius คือ  $\ln k = \ln k_0 - E/RT$  โดยความชัน คือ  $-E/R$  และจุดตัดแกน y คือ  $\ln k_0$  ได้ค่า  $E = 6.98-70.78 \text{ kJ/mol}$  และ  $k_0 = 2.32 \cdot 10^{-1} - 4.20 \cdot 10^5 \text{ min}^{-1}$  แล้วใช้สมการ  $dw/dt = -k_0 \exp(-E/RT)(w-w_p)$  สามารถทำนายอัตราการส่วนเสียน้ำหนักได้

ส่วนแบบจำลอง DEAM คือ  $\ln(a/T^2) = \ln(k_0 R/E) - E/R(1/T)$  โดยความชัน คือ  $-E/R$  และจุดตัดแกน y คือ  $\ln(k_0 R/E)$   $E = 30-650 \text{ kJ/mol}$  และ  $k_0 = 5.69 \cdot 10^2 - 3.13 \cdot 10^{46} \text{ sec}^{-1}$  เป็นวิธีอย่างง่ายที่สามารถหาค่าทางตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ที่อัตราการเปลี่ยนแปลง (conversion) ได้ และใช้สมการ  $1-(\Delta V/\Delta V^*) = \exp[(-k_0 RT^2/aE)e^{-E/RT}]$  ทำนายอัตราการเปลี่ยนแปลงได้

จากวิธีข้างต้นจะได้ค่าตัวแปรทางจลนพลศาสตร์ ทำให้ทราบสมการอัตราเร็วของปฏิกิริยา และกลไกของปฏิกิริยา รวมทั้งทำนายน้ำหนักที่หายไปมากที่สุด สามารถควบคุมกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ดีที่สุด เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมีต่อไป

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากกาคตะกอนที่ใช้ได้มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากแหล่งจึงมีความชื้นมาก และมีกลิ่นเหม็น จึงต้องทำให้ใช้กระบวนการทำแห้งและทำการอบในระบบมีระบายอากาศที่ดี นอกจากนี้กาคตะกอนยังมีองค์ประกอบที่ต่างๆ กัน จึงต้องมีการสุ่มเก็บกาคตะกอนอย่างสม่ำเสมอ แล้วทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเพื่อสามารถใช้เป็นตัวแทนของกาคตะกอนในแต่ละแหล่งได้

ส่วนในการทดลองด้วยเครื่อง TGA ต้องมีการให้ความร้อนเบื้องต้นก่อนเพื่อไล่ความชื้นในกาคตะกอน(ที่อุณหภูมิ 100 –150 °C) แล้วจึงศึกษากระบวนการไพโรไลซิสต่อไป เพื่อหาแบบจำลองที่สามารถอธิบายกลไกกระบวนการไพโรไลซิสได้ดีที่สุดต่อไป

## รายการอ้างอิง

1. สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม, รายงานสถานการณ์คุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ.2540, สิงหาคม 2542.
2. Conesa. J.A., A.Marcilla, R. Moral, J. Moreno-Caselles and Perez-Espinosa. Evolution of gases in the Primary Pyrolysis of Different Sewage Sludge. Thermochimica Acta 313 (1998): 63-73.
3. วีระ เกรอต. วิศวกรรมน้ำเสีย:การบำบัดทางชีวภาพ. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
4. Syed R. Qasim. waste water treatment plants planning, design and operation. Japan: CBS Publishing Japan,(n.d.).
5. S. Jones. Fertilizers & Soil Fertility. Virginia: Reston,(1979)
6. สุขเมธ ชวเดช. การบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม. เอกสารประกอบการสอน ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.
7. Ronald F. Probst and R. Edwin Hicks. Synthetic Fuels. New York: International Student Edition. McGraw-Hill Book, (1985): 95-103.
8. Richard H. Schlosberg.Chemistry of Coal Conversion. New York: Plenum Press, (1985): 124-125
9. K. Raveendran and Anuradda Ganesh. Heating value of biomass and biomass pyrolysis products. Fuel 75 (1996): 1715-1720.
10. Dai Xianwen, Wu Chuangzhi, Li Haibin and Chen Yong. The fast pyrolysis of biomass in CFB reactor. Energy & Fuels 14 (2000): 552-557.
11. George R. Gavalas, Paul How-Kel and Ravl Jain. Model of coal pyrolysis. Ind. Eng. Chem. Fundam. 20 (1981),113-122
12. Beenackers, A.A.M.C., and Bridgewater, A.V. Pyrolysis and gasification Technology. Elsevier Applied Science Publishers, (1987)
13. Gibson, S. and D.H. Gregory. Carbonization of Coal. London: CE/4, M&B Monograph, Mill&Boon Limited, (1964)



14. Rolando Zanzi, Krister Sjoström and Emilia Bjornbom. Rapid high temperature pyrolysis of biomass in free fall reactor. Fuel 75 (1996): 525-550.
15. Veronika Seebaver, Josef Petek and Gernot Staudinger. Effect of particle size, heating rate and pressure on measurement of pyrolysis kinetic by Thermalgravimetric analysis. Fuel Processing Technology. 76 (1997): 1277-1282.
16. AE. Putun et.al. Fixed-bed Pyrolysis and hydrolysis of sunflower bagasse :product yields and compositions. Fuel Processing Technology. 46 (1996): 49-62.
17. Said MA. Ibrahim. Pyrolysis of Egyptian Maghara pulverized coal particles. Fuel Processing Technology 50 (1997): 1-17.
18. K.Maniatis and A. Buekens. Fast Pyrolysis of biomass. A.V. Bridgwater and J.L. Kuester. Research in thermochemical biomass conversion. Great Britain: Elsevier Science Publishers, LTD. 1988, pp. 179-189.
19. Minik-Agar, M.R. Hajaligol, M. Sohrabi and B.Dabir. Mineral matter effects in rapid pyrolysis of beech wood. Fuel Processing Technology 51 (1997): 7-17.
20. Tganga T Ganga Devi and M.p. Kannan. Gasification of biomass chars in air-Effect of heat treatment temperature. Energy & Fuels 15 (2000): 127-130.
21. Jame R. Langanbach and Fred Bauer. Fuel and Chemical by pyrolysis. Lyle F. Albright and Billy L. Crynes, Editor. Industrial and laboratory Pyrolysis. Washington, D.C.: American Chemical Society, 1976, p. 476-491.
22. Kawser Md. Kawser Jamil. Preparation and characterization of solid waste for pyrolysis. Engineering Transactions (Group A). 3 (2000): 156-162.
23. Martin A. Elliott. Chemistry of Coal Utilization. Second supplement volume: John Wiley & Sons Inc, 1981, p. 727-753.
24. Zoran S. Petrovic and Zoltan Z. Zavargo. Reliability of methods for determination of kinetic parameters from thermogravimetry and dsc measurements. J. of Applied Polymer Science. 32(1986): 4353-4367.
25. Chao-Hsiung Wu, Ching-Yuan Chang and Jyh-Ping Lin. Pyrolysis kinetic of paper mixtures in municipal solid waste. J. Chem. Tech. Biotechnol. 68 (1997): 65-74.

26. O.Senneca, P. Salatino and R Chirone. A fast heating-rate thermogravimetric study of the pyrolysis of scrap tyres. Fuel 78 (1999): 1575-1581.
27. Kouichi Miura. A new and simple method to estimate  $f(E)$  and  $ko(E)$  in the distributed activation energy model from three sets of experimental data. Energy & fuel 9 (1995): 302-307.
28. Kouichi Miura and Taisuke Maki. A simple method for estimate  $f(E)$  and  $ko(E)$  in the distributed activation energy model. Energy & fuel 12 (1998): 864-869.
29. Kouichi Miura and Taisuke Maki. Simple method for estimate  $f(E)$  in distributed activation energy model for analyzing coal pyrolysis reaction. Journal of Chemical Engineering of Japan 31(1998):228-235.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

### วิธีวิเคราะห์สมบัติองค์ประกอบของกากตะกอน

#### 1. วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณ (Proximate Analysis)

วิธีวิเคราะห์สมบัติโดยประมาณของกากตะกอน ตามวิธี ASTM D 3173-3175 โดยวิเคราะห์สารที่แห้งในอากาศ และคำนวณเพื่อรายงานค่าที่ได้เทียบกับน้ำหนักของสารที่ไม่มี ความชื้น(Dry basis) ยกเว้นค่าความชื้นที่รายงานเทียบน้ำหนักของสารที่แห้งในอากาศ(Air dry basis) วิธีวิเคราะห์ครอบคลุมการ วิเคราะห์หาค่าความชื้น สารระเหย และเถ้า รายละเอียดการ วิเคราะห์มีดังต่อไปนี้

#### การเตรียมสารตัวอย่าง

บดตัวอย่างอย่างรวดเร็วและคัดขนาดของตัวอย่างให้ผ่านตะแกรงร่อนขนาด No.60 mesh (250  $\mu\text{m}$ ) และนำตัวอย่างที่บดได้มาผสมรวมกันและเก็บไว้ในภาชนะที่ป้องกันความชื้นได้

#### 1.1 วิธีหาค่าความชื้น (Moisture, M), ASTM 3173

- อบจานอลูมิเนียมพร้อมฝาในเตาอบที่ 105-110 °C เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทิ้งให้เย็น ในหม้อดูดความชื้นบนตักน้ำหนักที่แน่นอน
- ใสตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์ประมาณ 1 กรัม บนตักน้ำหนัก
- นำไปอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 105-110 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแง้มฝาจานและ พาดไว้บนจาน
- นำจานอลูมิเนียมออกจากเตา จากนั้นทิ้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น และบนตักน้ำหนัก
- คำนวณค่าความชื้น จาก  $M \% = [(W_1 - W_2) / W] * 100$

M = ปริมาณความชื้น, %

$W_1$  = น้ำหนักจาน + ฝา + ตัวอย่างก่อนอบ, g

$W_2$  = น้ำหนักจาน + ฝา + ตัวอย่างหลังอบ, g

W = น้ำหนักตัวอย่าง, g

### 1.2. วิธีหาปริมาณสารระเหย (Volatile matter, VM), ASTM D 3174

- ตั้งอุณหภูมิเตาเผา (tubular furnace) ไว้ที่ 950 °C ชั่งน้ำหนักของครุชชีเบลพร้อมฝา และใส่ตัวอย่างประมาณ 1 กรัม แล้วบันทึกน้ำหนัก
- ปิดฝาครุชชีเบลให้สนิท แล้ววางบนห่วงของที่แขวน นำไปให้ความร้อนเป็นช่วงๆ โดยเริ่มแรกวางไว้เหนือเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 300 °C) จากนั้นวางไว้ที่ขอบเตาเผาเป็นเวลา 3 นาที (อุณหภูมิประมาณ 600 °C) และจากนั้นไว้ที่กลางเตาเผาเป็นเวลา 6 นาที (อุณหภูมิประมาณ 950 °C)
- นำออกจากเตาเผาทั้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วนำไปชั่งและบันทึกน้ำหนัก
- คำนวณหาค่าสารระเหย จาก VM % =  $[(W_3 - W_4) / W] * 100$

VM = ปริมาณสารระเหย, %

$W_3$  = น้ำหนักครุชชีเบล + ฝา + ตัวอย่างก่อนเผา, g

$W_4$  = น้ำหนักครุชชีเบล + ฝา + ตัวอย่างหลังเผา, g

W = น้ำหนักตัวอย่าง, g

### 1.3. วิธีหาค่าเถ้า (Ash), ASTM 3175

- เผาครุชชีเบลพร้อมฝาในเตาเผา ที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วบันทึกน้ำหนัก
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักของตัวอย่างประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนัก
- เผาครุชชีเบลที่บรรจุตัวอย่างเพื่อไล่ควัน ด้วยตะเกียงเบนเซนโดยใช้ไฟอ่อนๆ และเปิดฝาไว้ จนหมดควันเพื่อไล่กำมะถัน แล้วเผาต่อจนร้อนแดงจึงยกออกและปิดฝา
- นำเข้าเตาเผา โดยเปิดฝาดอก เผาที่อุณหภูมิ 750 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนน้ำหนักคงที่
- นำครุชชีเบลออกจากเตาเผา นำเข้าหม้อดูดความชื้น เมื่อเย็นลงชั่งน้ำหนักครุชชีเบลพร้อมฝา บันทึกผล
- คำนวณหาค่าเถ้า จาก A % =  $[(W_5 - W_6) / W] * 100$

A = ปริมาณเถ้า, %

$W_5$  = น้ำหนักครุชชีเบล + ฝา + ตัวอย่างก่อนเผา, g

$W_6$  = น้ำหนักครุชชีเบล + ฝา, g

W = น้ำหนักตัวอย่าง, g

#### 1.4 ค่าคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC)

$$FC \text{ (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)} = 100 - A - VM - M$$

#### 1.5 วิธีการหาค่าความร้อน (Heating Value)

- ชั่งตัวอย่างลงในครุชเชิลประมาณ 1 กรัม บันทึกน้ำหนัก
- นำครุชเชิลไปวางในตำแหน่งบนหัวบอมบ์
- ตัดลวดยาวประมาณ 10 เซนติเมตรนำมาผูกที่ปลายทั้งสองของหัวบอมบ์ให้ลวดแต่ละที่ผิวหน้าของตัวอย่าง
- เติมน้ำกลั่นลงในหัวบอมบ์ประมาณ 1 มิลลิลิตร
- ประกอบหัวบอมบ์กับหัวบอมบ์เข้าด้วยกัน ชันเกลียวให้แน่นแล้วนำไปอัดแก๊สออกซิเจน จนมีความดัน 20-25 บรรยากาศ
- เติมน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ 24-25 °C ลงในถังบอมบ์ 1 ลิตรก่อนแล้วนำบอมบ์ลงในถังบอมบ์ จึงเติมน้ำกลั่นนี้อีก 1 ลิตร เสียบสายอิเล็กโทรดเข้ากับบอมบ์ ปิดฝาเครื่อง
- เปิดสวิตซ์ให้เครื่องทำงาน บันทึกอุณหภูมิของน้ำ เมื่ออุณหภูมิของน้ำในถังบอมบ์กับน้ำล้อมรอบถังบอมบ์ใกล้เคียงกัน กดปุ่มจุดระเบิด บันทึกอุณหภูมิที่จุดระเบิดและอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที จนกระทั่งอุณหภูมิกคงที่
- ปิดสวิตซ์เครื่อง นำบอมบ์ออกจากเครื่อง แล้วปล่อยแก๊สจากบอมบ์อย่างช้าๆ
- ล้างหัวบอมบ์และหัวบอมบ์ด้วยน้ำกลั่นที่เติมเมทิลออเรนจันหมดกรด (น้ำที่ล้างไม่เป็นสีชมพู)
- นำน้ำที่ล้างได้ ไปไตเตรตด้วย 0.0709 N. NaOH บันทึกปริมาณ NaOH ที่ใช้
- ถอดลวดที่เหลืออยู่ในบอมบ์มาทำการวัดและบันทึกความยาว

$$\text{คำนวณค่าความร้อนจาก } H = (t \cdot w - e_1 - e_2 - e_3 - e_4) / g$$

$H$  = ค่าความร้อนของการเผาไหม้, Cal/g

$t$  = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น, °C

$w$  = ค่า Energy equivalent of calorimeter, Cal/°C = 2404 Cal/°C

$e_1$  = การแก้ค่าความร้อนของกรดไนตริก

= 1.2 \* ปริมาตรของ 0.0709 N. NaOH, ml.

$e_2$  = การแก้ค่าความร้อนของกรดซัลฟูริก

= 13.18 \* % S

$e_3$  = การแก้ค่าความร้อนของการเผาไหม้ลวด

= 2.3 \* ความยาวลวดที่ใช้, cm.

$e_4$  = การแก้ค่าความร้อนของ Pressure-sensitive tape

= 0

$g$  = น้ำหนักตัวอย่าง, g.

## 1.6 วิธีการหาปริมาณกำมะถันรวม (Total Sulfur), ASTM 3177

- นำน้ำล้างบอมบ์ที่ผ่านการไตเตรตด้วย 0.0709 N. NaOH จากวิธีการหาค่าความร้อนข้อ 1.5 มากรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 ล้างด้วยแอมโมเนีย(1:10) 2-3 ครั้ง แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นที่ผสมเมทิลออเรนจ์ให้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร
- นำสารละลายที่ได้ไปต้มให้เดือดและขณะคนช้าๆ ค่อยๆ เติมสารละลายแบเรียมคลอไรด์ 10 มิลลิลิตร ต้มต่อไปอีก 15 นาที แล้วจึงนำออกจากเตมาตั้งทิ้งไว้ค้างคืน
- นำสารละลายนั้นมากรองตะกอนแบเรียมซัลเฟต ( $BaSO_4$ ) ด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และล้างด้วยน้ำกลั่นที่ร้อนหลายๆ ครั้ง จนน้ำล้างตะกอนปราศจากคลอไรด์ไอออน ซึ่งทดสอบด้วยสารละลายซิลเวอร์ไนเตรต ( $AgNO_3$ ) กล่าวคือ ถ้ามีคลอไรด์ไอออนอยู่เมื่อหยด  $AgNO_3$  สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีขาวขุ่น
- นำกระดาษกรองที่ได้พร้อมตะกอนใส่ในครุชชีเบลที่ทราบน้ำหนักแน่นอนเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ  $800 \pm 50$  °C จนน้ำหนักคงที่ ทิ้งไว้ให้เย็นในหม้อดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก
- คำนวณร้อยละกำมะถันรวม จาก  $\%S = (A-B) \cdot 13.738/C$

$A$  = น้ำหนักกระดาษกรองและครุชชีเบลหลังเผา, g

$B$  = น้ำหนักครุชชีเบลก่อนเผา, g

$A-B$  = น้ำหนักของ  $BaSO_4$ , g

$C$  = น้ำหนักของตัวอย่าง, g

## 2. การวิเคราะห์องค์ประกอบของโลหะหนัก

ก่อนจะวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักนั้น ต้องทำการย่อยสลายกากตะกอนของแข็งด้วยการใช้กรดไนตริกตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5198-92 ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- เตรียมตัวอย่างกากตะกอนจำนวน 5 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่
- ใส่กรดไนตริกเข้มข้น 1:1 โดยปริมาตร ปริมาณ 25 มิลลิลิตร อย่างช้า ๆ เขย่าขวดเบา ๆ จนกระทั่งตัวอย่างเปียกทั่วทั้งหมด
- นำไปตั้งบนแผ่นความร้อน ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 90-95 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พร้อมทั้งเขย่าเบาๆ เป็นระยะ เพื่อชะล้างตัวอย่างที่ติดข้างขวด
- เมื่อครบ 2 ชั่วโมงแล้ว ทำให้ขวดรูปชมพู่เย็นลงจนอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง เติมน้ำอีก 50 มิลลิลิตร เขย่าเบาๆ ให้เข้ากัน
- กรองสารละลายบรรจุใส่ขวดรูปชมพู่ แล้วเติมน้ำจืดจนปริมาตรรวมทั้งหมดเป็น 200 มิลลิลิตร ก็จะได้สารละลายที่ต้องการสำหรับการวิเคราะห์ด้วย AA ต่อไป



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ภาคผนวก ข

## แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG และผลการคำนวณ

ตารางที่ ข1 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อน 5 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass % (010000)	d(TG)/dt /min (000000)	w (g)	V/V*	ln k	1/T
155	-3.4	-0.1035	54.8688	0.0579	-5.7153	0.0023
205	-4.7	-0.2580	54.1304	0.0801	-4.7781	0.0021
255	-8.5	-0.5177	51.9720	0.1448	-4.0087	0.0019
305	-13.8	-0.5950	48.9616	0.2351	-3.7580	0.0017
355	-23.1	-1.6910	43.6792	0.3935	-2.4814	0.0016
405	-42.7	-0.8979	32.5464	0.7274	-2.3147	0.0015
455	-48.4	-0.3813	29.3088	0.8245	-2.7307	0.0014
505	-50.8	-0.1442	27.9456	0.8654	-3.4378	0.0013
555	-51.8	-0.0659	27.3776	0.8825	-4.0850	0.0012
605	-52.5	-0.0615	26.9800	0.8944	-4.0473	0.0011
655	-53.2	-0.1523	26.5824	0.9063	-3.0210	0.0011
705	-54.8	-0.1710	25.6736	0.9336	-2.5614	0.0010
755	-55.6	-0.0528	25.2192	0.9472	-3.5068	0.0010
805	-56.2	-0.0727	24.8784	0.9574	-2.9722	0.0009
855	-56.8	-0.0590	24.5376	0.9676	-2.9066	0.0009
905	-57.4	-0.0468	24.1968	0.9779	-2.7595	0.0008
955	-58.1	-0.0865	23.7992	0.9898	-1.3709	0.0008
990	-58.7	-0.0829	23.4584	1	-	0.0008

ตารางที่ ข2 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้  
ความร้อน 10 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass % (010000)	d(TG)/dt /min (000000)	w	V/V*	lnk	1/T
155	-2.7	-0.2400	50.1095	0.0462	-4.7853	0.0023
200	-3.8	-0.3051	49.5430	0.0650	-4.5254	0.0021
255	-7.2	-0.9681	47.7920	0.1231	-3.3065	0.0019
300	-11.7	-1.0020	45.4745	0.2000	-3.1803	0.0017
355	-19.3	-2.2190	41.5605	0.3299	-2.2080	0.0016
400	-37.5	-4.0820	32.1875	0.6410	-0.9743	0.0015
455	-46.8	-0.9031	27.3980	0.8000	-1.8979	0.0014
500	-49.5	-0.3968	26.0075	0.8462	-2.4580	0.0013
555	-50.8	-0.1262	25.3380	0.8684	-3.4475	0.0012
600	-51.4	-0.1440	25.0290	0.8786	-3.2344	0.0011
655	-52.0	-0.1292	24.7200	0.8889	-3.2546	0.0011
700	-52.9	-0.2558	24.2565	0.9043	-2.4225	0.0010
755	-54.4	-0.1054	23.4840	0.9299	-2.9974	0.0010
800	-54.8	-0.7686	23.2780	0.9368	-0.9079	0.0009
855	-55.4	-0.0915	22.9690	0.9470	-2.8593	0.0009
900	-55.8	-0.1069	22.7630	0.9538	-2.5655	0.0009
955	-56.5	-0.1283	22.4025	0.9658	-2.0829	0.0008
975	-56.8	-0.3740	22.2480	0.9709	-0.8505	0.0008
1000	-57.1	-0.2067	22.0935	0.9761	-1.2494	0.0008
1055	-57.8	-0.7670	21.7330	0.9880	0.7550	0.0008
1100	-58.0	-0.0114	21.6300	0.9915	-3.1183	0.0007
1155	-58.3	-0.0466	21.4755	0.9966	-0.7938	0.0007
1190	-58.5	-0.1012	21.3725	1.0000	-	0.0007

ตารางที่ ข3 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อน 20 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass % (010000)	d(TG)/dt /min (000000)	w	V/V*	lnk	1/T
155	-2.3	-0.5556	49.8270	0.0395	-3.9379	0.0023
200	-3.3	-0.6748	49.3170	0.0567	-3.7255	0.0021
255	-6.2	-1.9070	47.8380	0.1065	-2.6324	0.0019
300	-10.6	-2.0240	45.5940	0.1821	-2.4844	0.0017
355	-17.4	-3.3140	42.1260	0.2990	-1.8372	0.0016
400	-32.4	-10.2600	34.4760	0.5567	-0.2488	0.0015
455	-46.6	-2.0160	27.2340	0.8007	-1.0765	0.0014
500	-49.7	-0.8462	25.6530	0.8540	-1.6337	0.0013
555	-51.3	-0.2951	24.8370	0.8814	-2.4786	0.0012
600	-51.8	-0.1950	24.5820	0.8900	-2.8177	0.0011
655	-52.5	-0.1845	24.2250	0.9021	-2.7572	0.0011
700	-53	-0.4601	23.9700	0.9107	-1.7516	0.0010
755	-54.6	-0.5213	23.1540	0.9381	-1.2590	0.0010
800	-55.2	-1.3130	22.8480	0.9485	-0.1530	0.0009
825	-55.4	-0.2207	22.7460	0.9519	-1.8672	0.0009
855	-55.7	-0.2356	22.5930	0.9570	-1.6886	0.0009
900	-56.2	-0.9733	22.3380	0.9656	-0.0469	0.0009
955	-56.7	-0.1557	22.0830	0.9742	-1.5919	0.0008
1000	-57.3	-0.3400	21.7770	0.9845	-0.3001	0.0008
1055	-57.9	-0.1590	21.4710	0.9948	0.0385	0.0008
1090	-58.2	-0.0872	21.3180	1.0000	-	0.0007

ตารางที่ ข4 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงงานฟอกย้อม ที่อัตราให้ความร้อน 50 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass % (010000)	d(TG)/dt /min (000000)	W	V/V*	lnk	1/T
155	-2.2	-1.7170	52.3230	0.0374	-2.8699	0.0023
205	-3.3	-1.7680	51.7345	0.0561	-2.8210	0.0021
255	-6.2	-6.0090	50.1830	0.1054	-1.5440	0.0019
305	-10.8	-5.9150	47.7220	0.1837	-1.4682	0.0017
355	-16.3	-8.5090	44.7795	0.2772	-0.9829	0.0016
405	-30.3	-27.3600	37.2895	0.5153	0.5847	0.0015
455	-46.3	-6.4610	28.7295	0.7874	-0.0345	0.0014
505	-50.3	-2.4830	26.5895	0.8554	-0.6051	0.0013
555	-51.7	-0.8637	25.8405	0.8793	-1.4811	0.0012
605	-52.4	-0.6918	25.4660	0.8912	-1.5993	0.0011
655	-52.9	-0.2850	25.1985	0.8997	-2.4047	0.0011
705	-53.5	-0.5339	24.8775	0.9099	-1.6698	0.0010
755	-54.5	-1.4150	24.3425	0.9269	-0.4860	0.0010
805	-55.7	-0.4007	23.7005	0.9473	-1.4205	0.0009
855	-56.2	-0.4304	23.4330	0.9558	-1.1731	0.0009
905	-56.7	-0.3912	23.1655	0.9643	-1.0550	0.0008
955	-57.2	-0.4587	22.8980	0.9728	-0.6239	0.0008
1005	-57.7	-0.6672	22.6305	0.9813	0.1255	0.0008
1055	-58.4	-0.5705	22.2560	0.9932	0.9805	0.0008
1085	-58.8	-0.5831	22.0420	1.0000	-	0.0007

ตารางที่ ข5 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลาง ที่อัตราให้

ความร้อน $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Temperature	Mass	d(TG)/dt	w	V/V*	lnk	1/T
$^{\circ}\text{C}$ (RAW)	% (010000)	/min (00000)				
150	-4.6	-0.219	53.2332	0.133721	-4.3298	0.002364
200	-6.6	-0.2414	52.1172	0.19186	-4.16294	0.002114
250	-9.5	-0.2996	50.499	0.276163	-3.83678	0.001912
300	-12.8	-0.3424	48.6576	0.372093	-3.56107	0.001745
350	-16.5	-0.4404	46.593	0.479651	-3.12148	0.001605
370	-18.5	-0.4975	45.477	0.537791	-2.88108	0.001555
400	-21	-0.3639	44.082	0.610465	-3.02273	0.001486
450	-24	-0.272	42.408	0.697674	-3.06036	0.001383
500	-26.2	-0.134	41.1804	0.761628	-3.53065	0.001294
550	-27.5	-0.1152	40.455	0.799419	-3.50921	0.001215
600	-28.4	-0.08201	39.9528	0.825581	-3.70928	0.001145
650	-29.1	-0.07973	39.5622	0.84593	-3.61342	0.001083
700	-29.9	-0.04975	39.1158	0.869186	-3.92143	0.001028
750	-30.6	-0.07876	38.7252	0.889535	-3.29295	0.000978
800	-31.6	-0.1159	38.1672	0.918605	-2.60125	0.000932
850	-32.8	-0.09778	37.4976	0.953488	-2.21164	0.00089
900	-33.8	-0.06778	36.9396	0.982558	-1.59727	0.000853
950	-34.4	0.93222	36.6048	1	-	0.000818

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข6 แสดงผลการทดลองจากเครื่องTG ของกากตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัคราให้  
ความร้อน 10 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass %(01000)	d(TG)/dt /min (000000)	W	V/V*	lnk	1/T
150	-3.5	-0.5365	51.145	0.096154	-3.48128	0.002364
200	-5.7	-0.4439	49.979	0.156593	-3.60154	0.002114
250	-8.4	-0.6177	48.548	0.230769	-3.17908	0.001912
300	-11.6	-0.6838	46.852	0.318681	-2.95606	0.001745
350	-15.2	-0.7964	44.944	0.417582	-2.64678	0.001605
380	-18	-1.037	43.46	0.494505	-2.24114	0.001531
400	-19.9	-0.83	42.453	0.546703	-2.35481	0.001486
450	-23.3	-0.6039	40.651	0.64011	-2.44208	0.001383
500	-25.9	-0.4125	39.273	0.711538	-2.60202	0.001294
550	-27.2	-0.2027	38.584	0.747253	-3.18035	0.001215
600	-28	-0.1687	38.16	0.769231	-3.27299	0.001145
650	-28.7	-0.1389	37.789	0.788462	-3.38034	0.001083
700	-29.4	-0.1046	37.418	0.807692	-3.56864	0.001028
750	-30	-0.1229	37.1	0.824176	-3.3178	0.000978
800	-30.7	-0.2299	36.729	0.843407	-2.5757	0.000932
850	-31.8	-0.2188	36.146	0.873626	-2.41078	0.00089
900	-32.8	-0.2052	35.616	0.901099	-2.22983	0.000853
950	-33.7	-0.2473	35.139	0.925824	-1.75553	0.000818
1000	-34.3	-0.1015	34.821	0.942308	-2.39476	0.000786
1050	-34.8	-0.1116	34.556	0.956044	-2.02796	0.000756
1100	-35.2	-0.06392	34.344	0.967033	-2.29757	0.000728
1150	-35.8	-0.1261	34.026	0.983516	-0.92498	0.000703
1190	-36.4	-0.2102	33.708	1	-	0.000684

ตารางที่ ข7 แสดงผลการทดลองจากเครื่องTG ของภาคตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัคราให้  
ความร้อน 20 °C/min

Temperature	Mass	d(TG)/dt	W	V/V*	lnk	1/T
°C (RAW)	% (010000)	/min (000000)				
150	-3.5	-1.531	49.3115	0.098039	-2.37466	0.002364
200	-5.6	-1.138	48.2384	0.156863	-2.60387	0.002114
250	-8.2	-1.197	46.9098	0.229692	-2.46298	0.001912
300	-11.5	-1.264	45.2235	0.322129	-2.28069	0.001745
350	-15	-1.529	43.435	0.420168	-1.93413	0.001605
385	-18.1	-2.101	41.8509	0.507003	-1.4541	0.00152
400	-19.6	-1.92	41.0844	0.54902	-1.45511	0.001486
450	-23.4	-1.292	39.1426	0.655462	-1.58202	0.001383
500	-26	-0.9875	37.814	0.728291	-1.61332	0.001294
550	-27.6	-0.4057	36.9964	0.773109	-2.32262	0.001215
600	-28.4	-0.3983	36.5876	0.795518	-2.23704	0.001145
650	-29.1	-0.3075	36.2299	0.815126	-2.39496	0.001083
700	-29.7	-0.3095	35.9233	0.831933	-2.29317	0.001028
750	-30.3	-0.2796	35.6167	0.848739	-2.28941	0.000978
800	-30.9	-0.2852	35.3101	0.865546	-2.15179	0.000932
850	-31.9	-0.4448	34.7991	0.893557	-1.47375	0.00089
900	-32.9	-0.3131	34.2881	0.921569	-1.51947	0.000853
950	-33.8	-0.3647	33.8282	0.946779	-0.97915	0.000818
1000	-34.6	-0.3411	33.4194	0.969188	-0.4995	0.000786
1050	-35.3	-0.1819	33.0617	0.988796	-0.11662	0.000756
1090	-35.7	-0.1553	32.8573	1	-	0.000734

ตารางที่ ข8 แสดงผลการทดลองจากเครื่องTG ของภาคตะกอนจากโรงบำบัดส่วนกลางที่อัคราให้

ความร้อน 50 °C/min

Temperature	Mass	d(TG)/dt	W	V/V*	lnk	1/T
°C (RAW)	% (010000)	/min (00000)				
150	-1.7	-1.425	50.5262	0.03972	-2.6963	0.002364
200	-3.1	-2.955	49.8066	0.07243	-1.93232	0.002114
250	-5.9	-5.72	48.3674	0.13785	-1.19871	0.001912
300	-12.4	-10.97	45.0264	0.28972	-0.35375	0.001745
330	-18.2	-12.74	42.0452	0.425234	0.007532	0.001658
350	-22.3	-11.98	39.9378	0.521028	0.128346	0.001605
400	-29.6	-6.269	36.1856	0.691589	-0.07907	0.001486
450	-34.4	-3.624	33.7184	0.803738	-0.17512	0.001383
500	-36.7	-1.455	32.5362	0.857477	-0.76775	0.001294
550	-37.5	-0.6016	32.125	0.876168	-1.51034	0.001215
600	-38	-0.5099	31.868	0.88785	-1.57662	0.001145
650	-38.5	-0.4845	31.611	0.899533	-1.51772	0.001083
700	-38.9	-0.5458	31.4054	0.908879	-1.30095	0.001028
750	-39.3	-0.4497	31.1998	0.918224	-1.38641	0.000978
800	-39.8	-0.3275	30.9428	0.929907	-1.54935	0.000932
850	-40.3	-0.517	30.6858	0.941589	-0.91047	0.00089
900	-40.7	-0.3059	30.4802	0.950935	-1.2609	0.000853
950	-41.1	-0.3126	30.2746	0.96028	-1.02793	0.000818
1000	-41.7	-0.5345	29.9662	0.974299	-0.0562	0.000786
1050	-42.2	-0.7074	29.7092	0.985981	0.830199	0.000756
1090	-42.8	-0.243	29.4008	1	-	0.000734



ตารางที่ ๗๑ แสดงผลการทดลองจากเครื่องTG ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตราให้ความร้อน 5 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass % (010000)	d(TG)/dt /min (00000)	W	V/V*	lnk	1/T
150	-7.6	-0.2283	52.8528	0.142322	-4.74276	0.002364
200	-9.2	-0.1606	51.9376	0.172285	-5.05895	0.002114
250	-12.5	-0.5919	50.05	0.234082	-3.67693	0.001912
300	-20.2	-0.9217	45.6456	0.378277	-3.02547	0.001745
350	-28.7	-0.6576	40.7836	0.537453	-3.06735	0.001605
400	-34	-0.5162	37.752	0.636704	-3.06792	0.001486
450	-38.9	-0.4113	34.9492	0.728464	-3.00396	0.001383
500	-41.3	-0.1258	33.5764	0.773408	-4.00765	0.001294
550	-42.3	-0.09746	33.0044	0.792135	-4.17664	0.001215
600	-43.3	-0.09025	32.4324	0.810861	-4.15909	0.001145
650	-44.3	-0.0956	31.8604	0.829588	-3.99724	0.001083
700	-45.8	-0.142	31.0024	0.857678	-3.42146	0.001028
750	-47.2	-0.1211	30.2016	0.883895	-3.37707	0.000978
800	-48.8	-0.1643	29.2864	0.913858	-2.7735	0.000932
850	-50.2	-0.1093	28.4856	0.940075	-2.81819	0.00089
900	-51.1	-0.05067	27.9708	0.956929	-3.25671	0.000853
950	-52	-0.1522	27.456	0.973783	-1.66042	0.000818
990	-53.4	-0.2085	26.6552	1	-	0.000792

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข10 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตรา  
ให้ความร้อน $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$

Temperature $^{\circ}\text{C}$ (RAW)	Mass % (010000)	d(TG)/dt /min (000000)	w	V/V*	lnk	1/T
150	-3.1	-0.7235	53.1981	0.060904	-3.59102	0.002364
210	-5.3	-0.3548	51.9903	0.104126	-4.25645	0.00207
250	-7.6	-0.909	50.7276	0.149312	-3.26391	0.001912
300	-14.5	-1.691	46.9395	0.284872	-2.46959	0.001745
350	-23.4	-1.591	42.0534	0.459725	-2.25017	0.001605
400	-29.2	-0.9729	38.8692	0.573674	-2.50513	0.001486
450	-34.1	-0.9264	36.1791	0.669941	-2.29817	0.001383
500	-37.2	-0.3722	34.4772	0.730845	-3.00606	0.001294
550	-38.4	-0.2038	33.8184	0.75442	-3.51669	0.001215
600	-39.2	-0.1709	33.3792	0.770138	-3.62661	0.001145
650	-40.1	-0.1423	32.8851	0.787819	-3.72971	0.001605
700	-41.3	-0.2857	32.2263	0.811395	-2.91492	0.001028
750	-42.6	-0.2403	31.5126	0.836935	-2.94247	0.000978
800	-44	-0.3718	30.744	0.86444	-2.32126	0.000932
850	-45.5	-0.2025	29.9205	0.89391	-2.68376	0.00089
900	-46.5	-0.1315	29.3715	0.913556	-2.9107	0.000853
950	-47.2	-0.1759	28.9872	0.927308	-2.44652	0.000818
1000	-48.6	-0.4273	28.2186	0.954813	-1.08352	0.000786
1050	-50.5	-0.2241	27.1755	0.992141	0.020285	0.000756
1090	-50.9	-0.08687	26.9559	1	-	0.000734

ตารางที่ ข11 แสดงผลการทดลองจากเครื่องTG ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวางที่อัตรา  
ให้ความร้อน 20 °C/min

Temperature	Mass	d(TG)/dt	w	V/V*	lnk	1/T
°C (RAW)	% (010000)	/min (000000)				
150	-3.9	-2.067	49.2993	0.074286	-2.49005	0.002364
200	-6.5	-0.8677	47.9655	0.12381	-3.30307	0.002114
250	-8.8	-1.542	46.7856	0.167619	-2.67679	0.001912
300	-15.4	-3.108	43.3998	0.293333	-1.81216	0.001745
350	-24.1	-3.161	38.9367	0.459048	-1.52802	0.001605
400	-30.3	-1.982	35.7561	0.577143	-1.74851	0.001486
450	-35.2	-1.867	33.2424	0.670476	-1.55889	0.001383
500	-38.6	-0.8017	31.4982	0.735238	-2.18543	0.001294
550	-39.9	-0.2884	30.8313	0.76	-3.10962	0.001215
600	-40.7	-0.3063	30.4209	0.775238	-2.98381	0.001145
650	-41.5	-0.3189	30.0105	0.790476	-2.87329	0.001083
700	-42.5	-0.5089	29.4975	0.809524	-2.31061	0.001028
750	-43.8	-0.4405	28.8306	0.834286	-2.31569	0.000978
800	-45	-0.6787	28.215	0.857143	-1.735	0.000932
850	-46.6	-0.5707	27.3942	0.887619	-1.66836	0.00089
900	-47.8	-0.272	26.7786	0.910476	-2.18204	0.000853
950	-48.5	-0.3175	26.4195	0.92381	-1.86609	0.000818
1000	-49.5	-0.5929	25.9065	0.942857	-0.95386	0.000786
1050	-51.6	-0.7343	24.8292	0.982857	0.464002	0.000756
1090	-52.5	-0.3383	24.3675	1	-	0.000734

ตารางที่ ข12 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากเคหะชุมชนห้วยขวาง ที่อัตรา  
ให้ความร้อน 50 °C/min

Temperature	Mass	d(TG)/dt	w	V/V*	lnk	1/T
°C (RAW)	% (01000)	/min(0000)				
150	-2.9	-4.052	49.7152	0.05653	-1.81086	0.002364
200	-5.4	-2.423	48.4352	0.105263	-2.27203	0.002114
250	-7.7	-4.929	47.2576	0.150097	-1.51049	0.001912
300	-14.1	-10.41	43.9808	0.274854	-0.60411	0.001745
350	-22.8	-10.78	39.5264	0.444444	-0.30278	0.001605
400	-29.7	-5.401	35.9936	0.578947	-0.71668	0.001486
450	-34.4	-4.667	33.5872	0.670565	-0.61737	0.001383
500	-38.1	-2.366	31.6928	0.74269	-1.04959	0.001294
550	-39.4	-0.9878	31.0272	0.768031	-1.81938	0.001215
600	-40.2	-0.7577	30.6176	0.783626	-2.01498	0.001145
650	-41	-0.7063	30.208	0.79922	-2.01043	0.001083
700	-41.8	-1.321	29.7984	0.814815	-1.30347	0.001028
750	-43	-1.212	29.184	0.838207	-1.25455	0.000978
800	-44.1	-1.157	28.6208	0.859649	-1.15882	0.000932
850	-45.5	-1.279	27.904	0.88694	-0.84235	0.00089
900	-46.9	-1.148	27.1872	0.91423	-0.67415	0.000853
950	-47.7	-0.5775	26.7776	0.929825	-1.16055	0.000818
1000	-48.3	-0.8147	26.4704	0.94152	-0.63412	0.000786
1050	-49.9	-2.148	25.6512	0.97271	1.097496	0.000756
1090	-51.3	-1.855	24.9344	1	-	0.000734

ตารางที่ ข13 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงโม่หินที่อัตราให้ความร้อน 5 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass %(010000)	d(TG)/dt /min(00000)	w	V/V*	lnk	1/T
155	-6.8	-0.3767	53.3104	0.104294	-4.485005767	0.002336
205	-12.1	-0.692	50.2788	0.185583	-3.781729964	0.002092
255	-21.9	-1.115	44.6732	0.33589	-3.100681942	0.001894
305	-33.3	-1.107	38.1524	0.510736	-2.802336068	0.00173
355	-42.8	-0.8028	32.7184	0.656442	-2.770094333	0.001592
405	-49.7	-0.6157	28.7716	0.76227	-2.667219183	0.001475
455	-54.7	-0.5852	25.9116	0.838957	-2.328560579	0.001374
505	-56.8	-0.128	24.7104	0.871166	-3.625340433	0.001285
555	-57.8	-0.08212	24.1384	0.886503	-3.942437399	0.001208
605	-58.7	-0.08978	23.6236	0.900307	-3.723578935	0.001139
655	-59.5	-0.08503	23.166	0.912577	-3.646601031	0.001078
705	-60.2	-0.1282	22.7656	0.923313	-3.104985359	0.001022
755	-61	-0.06248	22.308	0.935583	-3.649377011	0.000973
805	-61.7	-0.08352	21.9076	0.946319	-3.176815836	0.000928
855	-62.5	-0.0813	21.45	0.958589	-2.944244748	0.000887
905	-63.3	-0.08587	20.9924	0.970859	-2.538158353	0.000849
955	-64.3	-0.1309	20.4204	0.986196	-1.369344803	0.000814
985	-65.2	-0.09582	19.9056	1	-	0.000795

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข14 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงโม่หินที่อัตราให้ความร้อน 10 °C/min

Temperature °C (RAW)	Mass % (010000)	d(TG)/dt /min(00000)	w	V/V*	lnk	1/T
150	-4.4	-0.6796	53.3448	0.068643	-3.892186593	0.002364
200	-8.9	-1.131	50.8338	0.138846	-3.30446444	0.002114
250	-17.2	-0.2361	46.2024	0.268331	-4.708121194	0.001912
255	-18.4	-2.437	45.5328	0.287051	-2.347934207	0.001894
300	-28.6	-2.284	39.8412	0.446178	-2.160208088	0.001745
350	-39.6	-1.895	33.7032	0.617785	-1.976057962	0.001605
400	-47.4	-1.315	29.3508	0.73947	-1.958175737	0.001486
450	-53	-0.9353	26.226	0.826833	-1.890436737	0.001383
500	-56.1	-0.3957	24.4962	0.875195	-2.423144156	0.001294
550	-57.3	-0.1784	23.8266	0.893916	-3.057253354	0.001215
600	-58.1	-0.1891	23.3802	0.906396	-2.873842456	0.001145
650	-58.7	-0.1054	23.0454	0.915757	-3.35299528	0.001083
700	-59.4	-0.1209	22.6548	0.926677	-3.076957713	0.001028
750	-60	-0.1106	22.32	0.936037	-3.029425847	0.000978
800	-60.5	-0.07827	22.041	0.943838	-3.24512842	0.000932
850	-61.1	-0.06955	21.7062	0.953198	-3.180925333	0.00089
900	-61.6	-0.1568	21.4272	0.960998	-2.185678586	0.000853
950	-62.4	-0.1742	20.9808	0.973479	-1.694783149	0.000818
1000	-63.3	-0.1341	20.4786	0.98752	-1.202629621	0.000786
1050	-63.8	-0.09169	20.1996	0.99532	-0.601972836	0.000756
1060	-63.9	-0.07435	20.1438	0.99688	-0.406137377	0.00075
1070	-64	-0.06972	20.088	0.99844	0.222713351	0.000745
1080	-64.1	-0.04315	20.0322	1	-	0.000739

ตารางที่ ข15 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงโม่หินที่อัตราให้ความร้อน 20 °C/min

Temperature	Mass	d(TG)/dt	W	V/V*	lnk	1/T
°C (RAW)	% (010000)	/min (000000)				
150	-3.4	-1.517	50.9082	0.053628	-3.03706	0.002364
200	-6.7	-2.483	49.1691	0.105678	-2.48775	0.002114
250	-14.1	-4.755	45.2693	0.222397	-1.69817	0.001912
300	-26.4	-4.429	38.7872	0.416404	-1.48219	0.001745
350	-37.7	-4.018	32.8321	0.594637	-1.21515	0.001605
400	-46.1	-2.805	28.4053	0.727129	-1.17875	0.001486
450	-52	-1.955	25.296	0.820189	-1.12267	0.001383
500	-55.5	-0.7652	23.4515	0.875394	-1.69393	0.001294
550	-56.7	-0.2588	22.8191	0.894322	-2.61325	0.001215
600	-57.5	-0.2807	22.3975	0.90694	-2.40487	0.001145
650	-58.2	-0.2748	22.0286	0.917981	-2.29982	0.001083
700	-58.8	-0.4122	21.7124	0.927445	-1.77175	0.001028
750	-59.4	-0.2634	21.3962	0.936909	-2.07982	0.000978
800	-60	-0.1762	21.08	0.946372	-2.31936	0.000932
850	-60.4	-0.1886	20.8692	0.952681	-2.12618	0.00089
900	-60.9	-0.1099	20.6057	0.960568	-2.48392	0.000853
950	-61.5	-0.2652	20.2895	0.970032	-1.32857	0.000818
1000	-62.3	-0.3553	19.8679	0.98265	-0.48955	0.000786
1050	-63	-0.1478	19.499	0.993691	-0.35505	0.000756
1090	-63.4	-0.1432	19.2882	1	-	0.000734

ตารางที่ ข16 แสดงผลการทดลองจากเครื่อง TG ของกากตะกอนจากโรงโม่หินที่อัตราให้ความร้อน 50 °C/min

Temperature	Mass	d(TG)/dt	W	V/V*	lnk	1/T
°C (RAW)	%(010000)	/min (000000)				
150	-3.4	-3.59	49.3626	0.053125	-2.15476	0.002364
200	-6.6	-6.189	47.7274	0.103125	-1.55589	0.002114
250	-13.5	-14.47	44.2015	0.210938	-0.57851	0.001912
300	-25.8	-15.01	37.9162	0.403125	-0.26273	0.001745
350	-37.3	-13.16	32.0397	0.582813	-0.0361	0.001605
400	-46.5	-8.308	27.3385	0.726563	-0.0736	0.001486
450	-52.7	-5.054	24.1703	0.823438	-0.13324	0.001383
500	-56.4	-2.135	22.2796	0.88125	-0.5983	0.001294
600	-58.5	-0.6506	21.2065	0.914063	-1.46322	0.001145
650	-59.2	-0.6107	20.8488	0.925	-1.39038	0.001083
700	-59.7	-0.511	20.5933	0.932813	-1.45862	0.001028
750	-60.3	-0.6293	20.2867	0.942188	-1.10009	0.000978
800	-60.8	-0.3715	20.0312	0.95	-1.48197	0.000932
850	-61.3	-0.6128	19.7757	0.957813	-0.81158	0.00089
900	-61.7	-0.346	19.5713	0.964063	-1.22284	0.000853
950	-62.2	-0.7829	19.3158	0.971875	-0.16115	0.000818
1000	-62.8	-0.5563	19.0092	0.98125	-0.09738	0.000786
1050	-63.7	-0.7206	18.5493	0.995313	1.547687	0.000756
1090	-64	-0.5013	18.396	1	-	0.000734

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย อธิวรรธน์ เลิศสกุลบรรลือ เกิดวันที่ 5 มกราคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2540 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมีวิศวกรรม ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย