



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ศึกษาและพัฒนากการแปรรูปกากตะกอน
จากระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิง

โดย รศ. ดร. วิษณุ มียู่ และคณะ

พฤษภาคม 2548

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการ ศึกษาและพัฒนาระบบการแปรรูปกากตะกอน จากระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิง

คณะผู้วิจัย

สังกัด

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------------|
| 1. รศ.ดร. วิษณุ มีอยู่ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 2. ศ.ดร. สมชาย โอสุวรรณ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 3. รศ.ดร. ชีรศักดิ์ ฤกษ์สมบูรณ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. ผศ.ดร. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 5. รศ.ดร. ปราโมช รังสรรค์วิจิตร | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. ผศ.ดร. สติศา ไกรลาส | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |
| 7. ผศ.ดร. บุญยรัชต์ กิตียนันท์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |

ชุดโครงการ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

รายงานสรุปสำหรับผู้บริหาร

โครงการแปรรูปกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียเป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เป็นโครงการที่มีเป้าหมายหลักสำหรับศึกษา และพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับกำจัดของเสีย และได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าในเชิงพลังงาน โดยมีจุดเน้นที่การศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหย ซึ่งวิเคราะห์ได้จากการวิเคราะห์แบบประมาณ (Proximate Analysis) ตามวิธีการมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing Materials) กับปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งทำให้เกิดผลดีคือ สามารถใช้ตัวอย่างกากตะกอนเพียงเล็กน้อย (ไม่เกิน 5 กรัม) ในการ ‘ประเมิน’ ว่ากากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียเหล่านั้นๆ จะมีศักยภาพในการผลิตน้ำมันชีวภาพมากหรือน้อยเพียงใด โดยไม่ต้องทดสอบโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ซึ่งจะเป็นการสิ้นเปลืองมากกว่า

ในเบื้องต้นทีมผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมเก็บกากตะกอนสำหรับใช้ในงานวิจัยจากโรงบำบัดน้ำเสียจำนวน 20 แห่งซึ่งอาจแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มดังนี้

ก. กลุ่มโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนจำนวน 12 แห่ง ซึ่งได้แก่ โรงบำบัดน้ำเสียกองกำจัดสิ่งปฏิกูล โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนคลองเตย โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนทุ่งสองห้องที่สอง โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนบางนา โรงบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเมืองภูเก็ต โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนรามอินทรา โรงบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำยานนาวา โรงบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนท่าทราย โรงบำบัดน้ำเสียเทศบาล อำเภอแสนสุข จ.ชลบุรี และโรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนอ่อนนุช

ข. กลุ่มโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจำนวน 5 แห่ง ได้แก่ โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลประจำอำเภอเสนา จ. อยุธยา โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลเชนต์หลุยส์ เขตสาทร กรุงเทพฯ โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลประจำจังหวัดปทุมธานี โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลสมเด็จพระนั่งเกล้า จ. นนทบุรี โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลประจำจังหวัดอยุธยา

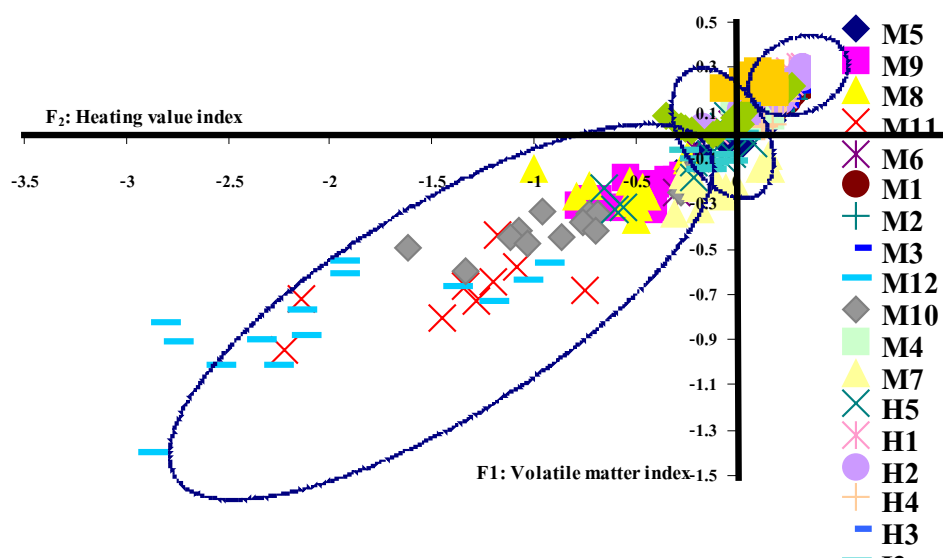
ค. กลุ่มโรงบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 3 แห่ง ได้แก่ โรงบำบัดน้ำเสียบริษัท ยูนิลีเวอร์ไทยโฮลดิ้ง จำกัด โรงบำบัดน้ำเสียรวมนิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง และโรงบำบัดน้ำเสีย โรงควบคุมคุณภาพน้ำสวนอุตสาหกรรม เครือสหพัฒน์ จำกัด

อย่างไรก็ตามในการนำเสนอผลการศึกษากากตะกอนเหล่านี้ จำเป็นต้องใช้ “สัญลักษณ์” แทนการใช้ชื่อแหล่งของกากตะกอนเหล่านั้นโดยตรง เนื่องจากอาจจะส่งผลกระทบต่อภาพพจน์ของหน่วยงานนั้นๆ นอกจากนี้แล้วสำหรับข้อมูลกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียซึ่งจำเป็นต้องนำเสนอกระบวนการจริง และต้องเอ่ยชื่อโรงบำบัดน้ำเสีย ทางทีมงานผู้วิจัยได้นำเสนอข้อมูลเฉพาะโรงบำบัดน้ำเสียที่ได้รับอนุญาตแล้วเท่านั้น

กากตะกอนที่ถูกจัดเก็บจากโรงบำบัดน้ำเสียแหล่งต่างๆ นั้นถูกนำมาเตรียมเป็นตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปการศึกษาเป็นหัวข้อต่างๆ ดังต่อไปนี้

ก. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

โดยทั่วไปแล้วถ้ามองในภาพกว้าง จากการศึกษาพบว่า องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนแต่ละแห่งจะไม่ค่อยต่างกันนัก ยกตัวอย่างเช่น สำหรับปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงประมาณ 30-50 % โดยน้ำหนัก ปริมาณเถ้าประมาณ 40-60 % โดยน้ำหนัก ซึ่งลักษณะที่มีปริมาณเถ้ามากนี้เป็นจุดเด่นของกากตะกอนที่พบในประเทศไทย



รูปที่ 1 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีคุณค่าความร้อน และดัชนีปริมาณสารระเหยของกากตะกอนตัวอย่างทั้ง 20 แหล่ง (เมื่อ M แทน โรงบำบัดน้ำเสียชุมชน, H แทน โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล และ I แทนโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม)

และเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าขององค์ประกอบแบบประมาณ (ได้แก่ปริมาณสารระเหย) กับคุณค่าความร้อน (ดังแสดงในรูปที่ 1) จะสามารถแบ่งกากตะกอนที่พบนี้ได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ

กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนสูง

กากตะกอนที่อยู่ในกลุ่มนี้อยู่ในบริเวณจุดภาคที่ 1 (Quadrant 1) ของรูปที่ 1 ซึ่งกากตะกอนในกลุ่มนี้มีปริมาณสารระเหยอยู่ประมาณร้อยละ 44-52 โดยน้ำหนัก และมีคุณค่าความร้อนประมาณ 2,614-3,295 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมกากตะกอน ซึ่งแหล่งกากตะกอนที่อยู่ในกลุ่มที่ 1 นี้มีจำนวน 9 แห่ง หรือประมาณร้อยละ 45

กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนปานกลาง

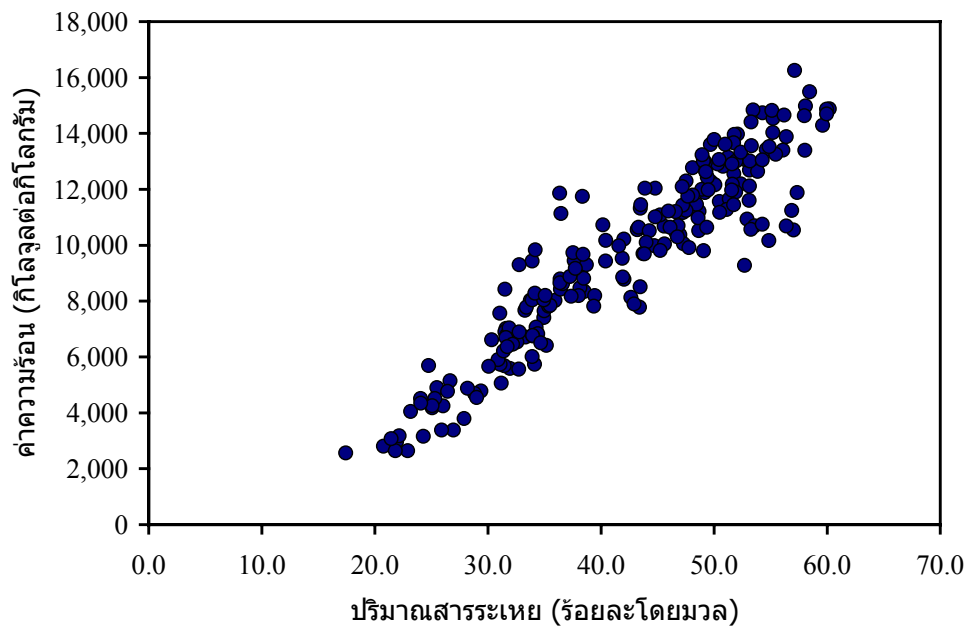
กากตะกอนในกลุ่มนี้มีคุณค่าความร้อนปานกลาง กล่าวคือ มีคุณค่าความร้อนใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของกากตะกอนทั้งหมดทุกตัวอย่าง โดยมีปริมาณสารระเหยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 32-43 โดยน้ำหนัก และมีคุณค่าความร้อนประมาณ 2,023-2,373 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมกากตะกอน จำนวนแหล่งกากตะกอนที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้มีจำนวน 6 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 30

กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ

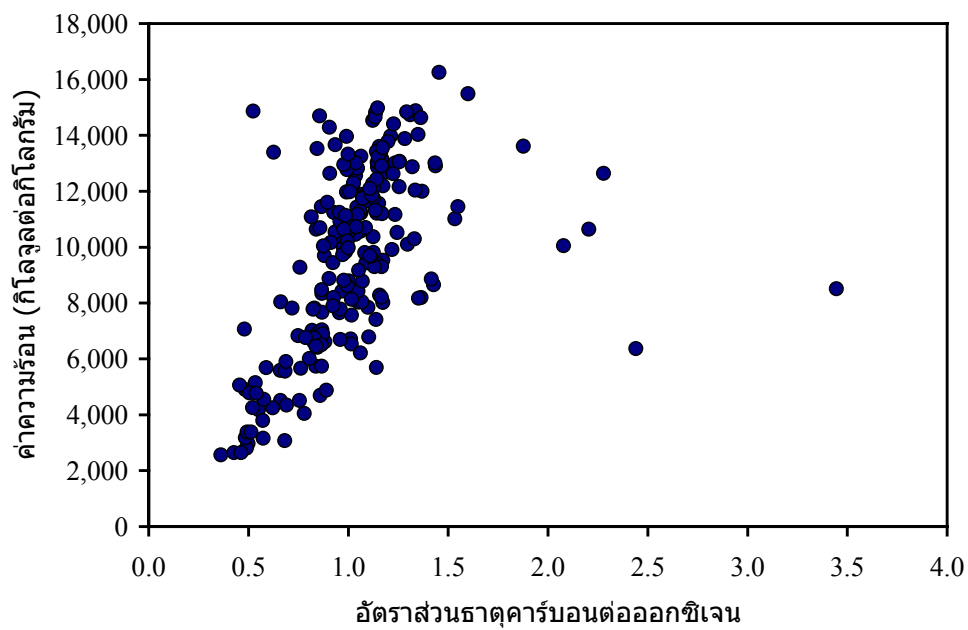
กากตะกอนที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ มีปริมาณสารระเหยค่อนข้างต่ำคืออยู่ที่ประมาณร้อยละ 21-33 โดยน้ำหนัก และมีคุณค่าความร้อนประมาณ 829-1,597 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมกากตะกอน และจำนวนแหล่งกากตะกอนที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 5 แห่ง หรือคิดเป็นร้อยละ 25

ข. ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (หรือองค์ประกอบเคมี)

ซึ่งผลจากการศึกษาพบว่า ปริมาณธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดของกากตะกอนเมื่อพิจารณาแบบแยกชนิดจะเป็นดังต่อไปนี้คือ คาร์บอนอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9-30 โดยประมาณ ไฮโดรเจนอยู่ที่ช่วงประมาณร้อยละ 2-5 ออกซิเจนอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 16-28 และปริมาณไนโตรเจนอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 1-5 นอกนั้นเป็นปริมาณของซัลเฟอร์อีกเล็กน้อย ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า กากตะกอนมีลักษณะที่เป็นสารเชิงอินทรีย์ค่อนข้างมาก



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณค่าความร้อน และปริมาณสารระเหยของกากตะกอนแห้งใด ๆ



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างคุณค่าความร้อน และสัดส่วนคาร์บอนกับออกซิเจนของกากตะกอนแห้งใด ๆ

ซึ่งข้อมูลจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ และแบบแยกธาตุนี้ เมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์กับคุณค่าความร้อนดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3 จะสามารถสร้างสหสัมพันธ์ระหว่างคุณค่าความร้อนของกากตะกอนกับ องค์ประกอบของกากตะกอน ซึ่งสามารถใช้วิธีการที่ถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) สรุปในรูปของสมการที่ค่อนข้างแม่นยำได้แก่

$$HV^\Delta = 276.04V + 289.70F - 51.45M - 2847.53 \quad (1)$$

$$HV^\Delta = 278.07(V + F) - 50.44M - 2875.52 \quad (2)$$

โดยที่ V คือ ปริมาณสารระเหย

F คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว

M คือ ปริมาณความชื้น

HV คือ คุณค่าความร้อน มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg)

หรือ

$$HV^\Delta = 430.2C - 186.7H - 127.4N + 178.6S + 184.2O - 2379.9 \quad (3)$$

$$HV^\Delta = 406.4C - 210.6H + 154.7S + 160.3O - 151.3N - 23.8A + 0.0034 \quad (4)$$

โดยที่ A คือ ปริมาณเถ้า

C คือ คาร์บอน

H คือ ไฮโดรเจน

N คือ ไนโตรเจน

O คือ ออกซิเจน

S คือ ซัลเฟอร์

ซึ่งการใช้สมการที่ 1-4 นั้น มีความแม่นยำใกล้เคียงกัน สามารถเลือกได้ตามข้อมูลองค์ประกอบของกากตะกอนที่มี ตามความเหมาะสม

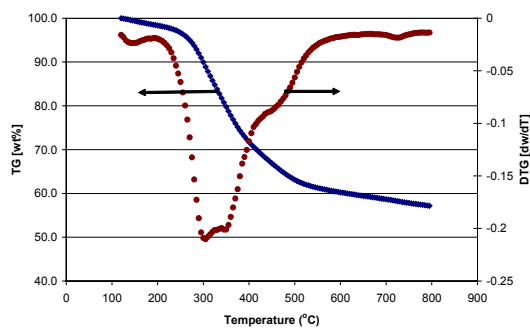
ค. ผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักของกากตะกอนตัวอย่าง

ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของกากตะกอน กล่าวคือ กากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียทุกแห่งมีโลหะหนักประเภท แคดเมียม ทองแดง โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว หรือสังกะสี เป็นองค์ประกอบอยู่ในระดับปริมาณต่างกันไป (ซึ่งในภาพรวมแล้วไม่เกินค่ามาตรฐานของ US EPA) แต่อย่างไรก็ตามยกเว้นโลหะหนักบางชนิดที่เกินจากค่ามาตรฐาน US EPA บ้าง เช่น ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี และมักพบในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนซึ่งเป็นไปได้ว่ามาจากการทิ้งขยะที่มีโลหะหนักจำพวก ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เจือปนอยู่ ค่าคล่อง

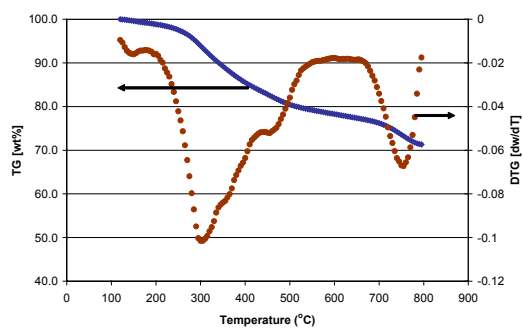
และเมื่อพิจารณาในแง่ของฤดูกาลพบว่า ปริมาณโลหะหนักที่ตรวจวัดได้นั้น โดยทั่วไปแล้วจะจัดกระจาย ไม่สามารถกำหนดเป็นแนวโน้มที่ชัดเจน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงโลหะหนักบางชนิด เช่น ตะกั่ว หรือโมลิบดีนัม ก็พบว่า จะมีปริมาณความเข้มข้นค่อนข้างสูงมากในช่วงปลายฤดูร้อนกับต้นฤดูฝน

ง. กลไก และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไพโรไลซิส

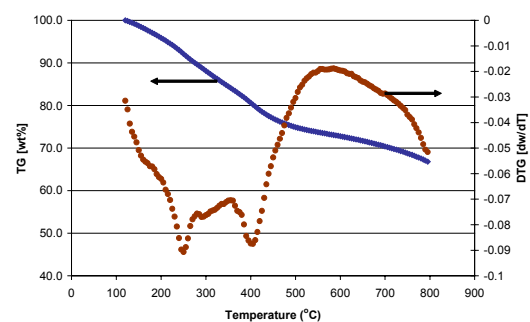
ลักษณะกลไก และจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของกากตะกอนสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทเมื่อพิจารณาจากวิธีการ Thermogravimetric Analysis (TGA) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะมีกลไกแบบใดก็ตาม ขั้นตอนหลักของปฏิกิริยาจะอยู่ที่ประมาณ 300-400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด และกลไกของกระบวนการไพโรไลซิส โดยทั่วไปแล้วอาจจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยซึ่งได้แก่ ขั้นตอนการกำจัดน้ำอิสระในกากตะกอน และขั้นตอนปฏิกิริยาไพโรไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 5



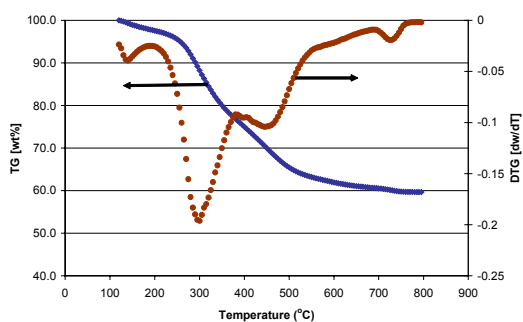
กลุ่มที่ 1



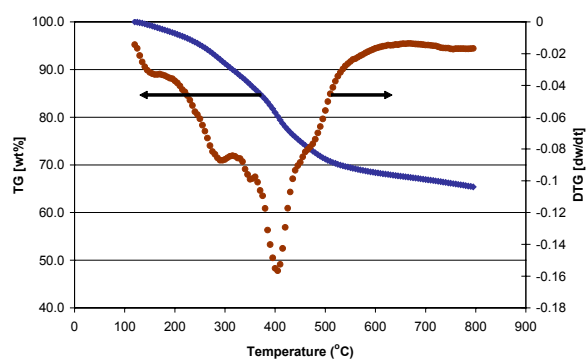
กลุ่มที่ 2



ประเภทที่ 3

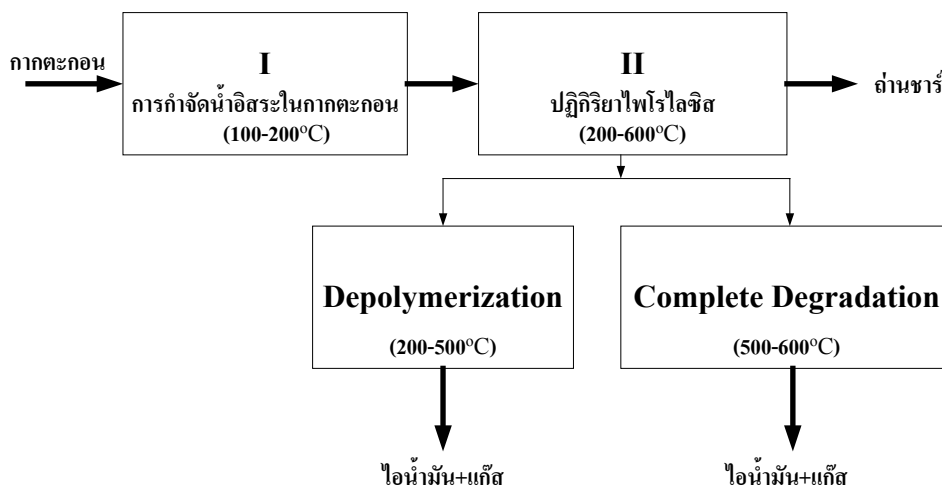


ประเภทที่ 4



ประเภทที่ 5

รูปที่ 4 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงของกากตะกอนตัวอย่างตามวิธีการ TGA แบ่งได้ 5 ประเภทหลัก



รูปที่ 5 ภาพรวมของกลไกปฏิกิริยาไพโรไลซิสกากตะกอน

ในแง่ของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาซึ่งเริ่มต้นจากการพัฒนาแบบจำลองของ Arrhenius มาสู่แบบจำลอง Pseudo Bi-component Separate State Model (PBSM) ดังแสดงในสมการที่ 5-6

$$\frac{dx}{dT} = \begin{cases} \frac{w_{10} - w_{1\infty}}{w_{10} - w_{2\infty}} \frac{dx_1}{dT} & w_{10} < w < w_{1\infty} \\ \frac{w_{20} - w_{2\infty}}{w_{20} - w_{2\infty}} \frac{dx_2}{dT} & w_{20} < w < w_{2\infty} \end{cases} \quad (5)$$

และ

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dT} = \frac{A_1}{\beta} \exp(-E_1/RT) f_1(x_1) & w_{10} < w < w_{1\infty} \\ \frac{dx_2}{dT} = \frac{A_2}{\beta} \exp(-E_2/RT) f_2(x_2) & w_{20} < w < w_{2\infty} \end{cases} \quad (6)$$

โดยที่

w_{i0} และ $w_{i\infty}$ คือ มวลเริ่มต้นและมวลสุดท้ายขององค์ประกอบเสมือน
ตัวห้อย i มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบเสมือนที่ i ($i=1,2,3, \dots$)

A คือ ค่า pre-exponential factor

E คือ พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

x คือ สัดส่วนของมวลสารที่สูญหายไป

$f(x)$ คือ ฟังก์ชันของสัดส่วนมวลสารที่สูญหายไป

จากการศึกษาพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส ของกากตะกอนทุกแหล่งจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 65-84 กิโลจูลต่อกิโลกรัมในทุกอัตราการให้ความร้อน ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิอื่นๆ นั้นค่าพลังงานกระตุ้นจะแปรผันต่างกันค่อนข้างมากสำหรับแต่ละอัตราการให้ความร้อน และแต่ละแหล่งของกากตะกอน ด้วยเหตุนี้จึงอาจจะสรุปได้ว่า ปฏิกริยาหลักของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อมูลจลนพลศาสตร์ที่ศึกษาในช่วงนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และระบบกระบวนการไพโรไลซิสในระดับต่างๆได้

จ. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหย และน้ำมันชีวภาพ

ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า มีความแปรผันตามกับปริมาณสารระเหยอินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอน ซึ่งข้อมูลนี้จึงสามารถถูกใช้เสมือนเป็นเครื่องชี้วัดในเบื้องต้นได้ถึง แนวโน้มของปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ของกากตะกอนแหล่งต่างๆ โดยมีประโยชน์อย่างมากในการเปรียบเทียบ โดยไม่จำเป็นต้องใช้การวัดปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้จริง ซึ่งจะช่วยลดภาระการสิ้นเปลืองพลังงาน และช่วยย่นเวลาในการดำเนินการอีกด้วย

โดยที่สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหยที่ได้จากการวัดองค์ประกอบแบบประมาณ และน้ำมันชีวภาพนั้น (ที่อุณหภูมิของระบบประมาณ 550-600 องศาเซลเซียส) จะได้ว่า

$$\text{น้ำมันชีวภาพในรูปของไอน้ำมัน} = 0.72 \times (\text{ปริมาณสารระเหย}) \pm 8.5$$

อย่างไรก็ตามผลการคำนวณที่ได้จากสหสัมพันธ์ชุดนี้เป็นการประเมินว่า ไอน้ำมันชีวภาพถูกดึงออกจากสารระเหยที่อยู่ในกากตะกอนจริงๆเท่านั้น ไม่ใช่ปริมาณน้ำมันชีวภาพหลังจากผ่านเครื่องควบแน่นแล้ว เนื่องจากเครื่องควบแน่นแต่ละเครื่อง และแต่ละชนิดมีขนาด และกำลัง ตลอดจนประสิทธิภาพไม่เท่ากัน

จ. การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด

จากการศึกษาซึ่งในที่นี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตคิง และแบบเตาหมุน ซึ่งให้เป็นตัวแทนของระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch System) และแบบต่อเนื่อง (Continuous System) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน (เมื่อพิจารณาจากค่าของประสิทธิภาพการดัดสารระเหย) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา เป็นที่น่าสังเกตว่าถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสต่ำเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้มีปริมาณน้อยลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าในทางตรงกันข้ามในกรณีที่ใช้ในอุณหภูมิที่สูงเกินไป ปริมาณน้ำมันชีวภาพจะต่ำลงเนื่องจากการเกิดการแตกตัวของโมเลกุลบางตัวในน้ำมันชีวภาพไปเป็นแก๊ส

ข. ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

ข-1 ผลลัพธ์จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วย Pyro-GC/MS

เมื่อพิจารณาผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนด้วยการใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัด Pyro-GC/MS พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก สามชนิดคือ

1. สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygenated Compounds) และ สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Nitrogenated Compound)
2. สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกสายโซ่ตรงและวง (Aliphatic and Alicyclic Hydrocarbon Compounds)
3. สารประกอบจำพวกเบนซีนและอนุพันธ์ (Benzene and its derivatives)

ซึ่งแต่ละองค์ประกอบดังกล่าวข้างต้นนี้ ประกอบด้วยสารประกอบเคมีต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1-4 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Hydrogencyanide	HCN	27
Nitrous oxide	N ₂ O	44
2-Hydroxyl-propanenitrile	C ₃ H ₅ NO	71
1H-Pyrrole-1-methyl	C ₄ H ₄ N	66
4-Pyridinamine	C ₅ H ₆ N ₂	94
2-Methyl pyridine	C ₆ H ₇ N	93
3-Methyl pyridine	C ₆ H ₇ N	93
2-Ethenyl pyridine	C ₇ H ₉ N	107
3-Ethenyl pyridine	C ₇ H ₉ N	107
3-Phenyl-5(4H)-isoxazoline	C ₇ H ₉ NO ₂	139
Indole	C ₈ H ₇ N	117
Benzyl nitrile	C ₈ H ₇ N	117
1-Isocyano-4-methyl-benzene	C ₈ H ₈ N	118
α-Ethyl benzene acetonitrile	C ₁₀ H ₁₁ N	145

ตารางที่ 2 สารประกอบจำพวกเบนซีน และอนุพันธ์

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Benzene	C ₆ H ₆	78
Cyclopropabenzene	C ₇ H ₆	90
Toluene	C ₇ H ₈	92
Styrene	C ₈ H ₈	104
Ethyl benzene	C ₈ H ₁₀	106
o,m,p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106
2,3-Benzo furan	C ₈ H ₆ O	118
1,4-Benzodioxin	C ₈ H ₆ O ₂	134
Indene	C ₉ H ₈	116
2-Phenyl-2,5-Cyclohexadiene-1,4-dione	C ₁₂ H ₈ O ₂	184
Benzylisopentylether	C ₁₂ H ₁₈ O	178
Benzeneacetic acid cyclopentylester	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	206

ตารางที่ 3 สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

Product Classes	Compound Name	Formular	Molecular Weight
Acids	Acetic acid	$C_2H_4O_2$	60
	Propanoic acid	$C_3H_6O_2$	74
	Butanoic acid	$C_4H_8O_2$	88
	Pentanoic acid	$C_5H_{10}O_2$	102
	Hexanoic acid	$C_6H_{12}O_2$	116
Aldehydes and Ketones	Acetaldehyde		
	Butanedial	$C_4H_6O_2$	86
	3-Hydroxyl butanal	$C_4H_8O_2$	89
	3-Methyl butanal	$C_5H_{10}O$	86
	Pentanedial	$C_5H_8O_2$	100
	4-Octan-3-one	$C_8H_{14}O$	126
Acohols and Ethers	Oxirane	C_2H_4O	44
	Ethyl alcohol	C_2H_6O	46
	Cyclobutanol	C_4H_8O	70
	Cyclopropyl carbinol	C_4H_8O	72
	2-Pentene-1-ol	$C_5H_{10}O$	86
	5-Hexen-2-ol	$C_6H_{12}O$	99
	2,4-Hexadiene-1-ol	$C_6H_{10}O$	103
	Benzyl alcohol	C_7H_8O	108
	3-Heptyne-1-ol	$C_7H_{12}O$	112
Furan			
	Furan (Furfural)	C_4H_4O	68
	2,3-Dihydro-furan	C_4H_6O	70
	Furfural (2-Furaldehyde)	$C_5H_4O_2$	96
Phenols and Cresols			
	Furfural alcohol	$C_5H_6O_2$	98
	Phenol	C_6H_6O	90
	o,m,p-Cresol	C_7H_8O	108
	2,3-Dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	122

ตารางที่ 4 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ตรงและวง

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Methane	CH ₄	16
Ethene	C ₂ H ₄	28
Ethane	C ₂ H ₆	30
1-Propyne	C ₃ H ₄	40
Propylene	C ₃ H ₆	42
Propane	C ₃ H ₈	44
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54
Butene	C ₄ H ₈	56
Butane	C ₄ H ₁₀	58
Hexane	C ₆ H ₁₄	86
3,3-Dimethyl-1,6-heptadiene	C ₉ H ₁₆	124
6-Methyl 1-octane	C ₉ H ₁₈	126
1,2,3-Trimethyl cyclohexane	C ₉ H ₁₈	126
1-Decyne	C ₁₀ H ₁₈	138
7-Methyl-1-nonyl	C ₁₀ H ₁₈	138
3,7-Dimethyl-1-octane	C ₁₀ H ₂₀	140
2,5,5-Trimethyl heptane	C ₁₀ H ₂₂	142
Decane	C ₁₀ H ₂₂	142
Undecane	C ₁₁ H ₂₄	156
2,4,6-Trimethyl octaene	C ₁₁ H ₂₄	156
1-Dodeccane-3-yne	C ₁₂ H ₂₀	164
4-Dodecane	C ₁₂ H ₂₄	168
5-Dodecane	C ₁₂ H ₂₄	168
3-Methyl-3-undecane	C ₁₂ H ₂₄	168
2-Propyl-1,3,3-trimethyl cyclohexane	C ₁₂ H ₂₄	168
1-Tridecyne	C ₁₃ H ₂₄	180
6-Tridecane	C ₁₃ H ₂₆	182
6-Ethyl-2-methyl decane	C ₁₃ H ₂₈	184
3,7-Dimethyl undecane	C ₁₃ H ₂₈	184
1-Tetradecyne	C ₁₄ H ₂₆	194
3-Tetradecane	C ₁₄ H ₂₈	196
4-Tetradecane	C ₁₄ H ₂₈	196
Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	212
Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	226

ช.-2 ถ่านชาร์

เนื่องจากถ่านชาร์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิส มีค่าตัวเลขไอโอดีนค่อนข้างต่ำ(ประมาณ 40-300 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่าน) เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (มีค่าตัวเลขไอโอดีนประมาณ 900-1,100 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่าน) ซึ่งค่าตัวเลขไอโอดีนนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับพื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้ในกรณีที่ต้องการนำถ่านชาร์เหล่านี้ไปใช้จึงจำเป็นต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพเช่น กระบวนการกระตุ้นด้วยไอน้ำ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวเสียก่อน

ช.-3 แก๊ส

ข้อมูลผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนด้วยการใช้เครื่อง Coupled Temperature Program Pyrolysis/Mass Spectroscopy (TPP/MS) ซึ่งได้ไว้ในตารางที่ 5 โดยในการศึกษาได้ดำเนินการติดตามแก๊สที่เกิดขึ้นจำนวน 10 ชนิด อาทิเช่น ไฮโดรเจน มีเทน น้ำ เอธิลีน โพรพิลีน โพรเพน คาร์บอนไดออกไซด์ เมทานอล คลอโรมีเทน และบิวเทน เป็นต้น ตั้งแต่อุณหภูมิ 100 จนถึง 800 องศาเซลเซียส และแบ่งแยกตามประเภทของกากตะกอนดังในหัวข้อ ค. พบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แก๊สจำพวกโพรเพน คาร์บอนไดออกไซด์ และเมทานอลจะเกิดขึ้นสำหรับกากตะกอนทุกประเภท ในขณะที่อุณหภูมิในช่วง 400-500 องศาเซลเซียสนั้น แก๊สที่เกิดขึ้นสำหรับกากตะกอนทุกประเภทได้แก่ มีเทน และเอธิลีน ซึ่งเป็นโมเลกุลอินทรีย์ขนาดเล็ก แสดงให้เห็นว่าเริ่มมีการแตกตัวของไอน้ำมันในชั้นทุติยภูมิแล้ว นอกจากนี้เมื่อระบบมีอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียส จะพบว่า มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วยสำหรับกากตะกอนทุกแหล่งซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่า มีการแตกตัวของไฮโดรเจนที่อยู่ในมีเทน และเอธิลีนออกมา รวมทั้งเกิดสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 5 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนตัวอย่าง จำแนกตามกลุ่มของกากตะกอน และช่วงอุณหภูมิที่เกิด

ผลิตภัณฑ์	ช่วงอุณหภูมิที่เกิดและกลุ่มของกากตะกอนที่เกิดแก๊สชนิดนั้น (องศาเซลเซียส)				
ชื่อ	250	300	400-500	650	800
H ₂ (Hydrogen)	1		5	1,2,3,4,5	
CH ₄ (Methane)			1,2,3,4,5		
H ₂ O (Water)			5		
C ₂ H ₄ (Ethylene)			1,2,3,4,5		
C ₃ H ₆ (Propylene)			1,2,4,5		
C ₃ H ₈ (Propane)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
CO ₂ (Carbon dioxide)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
CH ₃ OH (Methanol)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
CH ₃ Cl (Chloromethane)			1,2,4,5		
C ₄ H ₁₀ (Butane)			1,2,4,5		

ข. การประเมินความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์

สำหรับการประเมินความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนนั้น เมื่อพิจารณาถึงส่วนต่างระหว่าง อัตราผลตอบแทนโครงการลงทุน กับดอกเบี้ยเงินกู้พบว่า ไม่ว่าจะใช้กากตะกอนตัวอย่างที่สำรวจจาก 20 แหล่งในประเทศไทย ที่มีศักยภาพเชิงความร้อน (ซึ่งได้แก่ ปริมาณสารระเหย หรือคุณค่าความร้อน) ระดับใดก็ตามจะพบว่า ส่วนต่างจะมีค่าเป็นบวกดังแสดงในตารางที่ 6 (อยู่ในช่วงประมาณ 3-23% แปรผันตามศักยภาพกากตะกอน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โครงการแปรรูปกากตะกอนให้เป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิสมิมีความ “คุ้มทุน” ในการดำเนินโครงการในระดับนําร่อง (รวมถึงในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่)

อย่างไรก็ตามการใช้กากตะกอนที่มีศักยภาพในเชิงพลังงานสูงกว่าจะช่วยในการบริหารจัดการโครงการเพื่อป้องกัน “ความเสี่ยง” ของโครงการได้ง่ายกว่าการใช้กากตะกอนที่มีศักยภาพเชิงพลังงานต่ำ อันเนื่องมาจากความ “ผันผวน” ทางเศรษฐกิจของประเทศที่อาจจะมีขึ้นได้ในอนาคตได้

ตารางที่ 6 ผลตอบแทนโครงการเมื่อเปลี่ยนคุณภาพกากตะกอนที่ป้อน

กากตะกอน*	ผลต่างอัตราผลตอบแทนโครงการ กับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (IRR □ interest rate)
กากตะกอนคุณภาพต่ำ (สารระเหย $\cong$ 25 %)	3.6 %
กากตะกอนคุณภาพปานกลาง(สารระเหย $\cong$ 40 %)	14.9 %
กากตะกอนคุณภาพสูง (สารระเหย $\cong$ 55%)	23.8 %

ฉ. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

การศึกษา และพัฒนาการแปรรูปกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส นั้น เนื่องจากใช้เครื่องปฏิกรณ์ในระดับห้องทดลองซึ่งมีขนาดเล็ก ดังนั้นแหล่งพลังงานที่นำมาใช้สำหรับระบบจึงใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้ง และการดำเนินการ รวมทั้งไม่สิ้นเปลืองมากนัก อย่างไรก็ตามสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง อาทิเช่น ในระดับกึ่งนำร่อง ระดับนำร่อง หรือระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีขนาดใหญ่ และซับซ้อนมากขึ้น การใช้พลังงานไฟฟ้ากลับจะมีความยุ่งยาก และสิ้นเปลืองมาก

แนวคิดที่น่าสนใจคือ การนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสเองมาใช้ประโยชน์ในแง่ที่เป็นเชื้อเพลิงของระบบกล่าวคือ ในการดำเนินการต้องแบ่งเป็นออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นซึ่งจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นเช่น น้ำมันเตา หรือแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) สำหรับสร้างพลังงานให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน เมื่อระบบดำเนินไปจนถึงช่วงหนึ่งแล้ว แก๊สเชื้อเพลิง (ซึ่งองค์ประกอบหลักได้แก่ CO, H₂ และ CH₄) ที่ได้จากระบบจะมีปริมาณมากขึ้น จากนั้นการดำเนินการจึงเข้าสู่ช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเหล่านี้กลับเข้าไปยังห้องเผาไหม้แทนแก๊ส LPG ซึ่งระบบจะสามารถดำเนินไปด้วยตัวเองเรื่อยๆ จนกว่ากระบวนการจะสิ้นสุด ดังนั้นต้นทุนของพลังงานภายนอกที่ต้องใช้จึงน่าจะต่ำมาก ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนของกระบวนการเองต่ำลงด้วย

นอกจากนี้แล้วผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าร้อยละของการดิงสารระเหยของเครื่องปฏิกรณ์ที่ทดสอบ นั้นอยู่ในระดับสูง แต่ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้โดยทั่วไปจะน้อย ซึ่งเกิดจากประสิทธิภาพของ เครื่องควบแน่นค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงระบบเครื่องควบแน่นสำหรับการนำไปใช้ในระดับที่ใหญ่ และมีความซับซ้อนรวมทั้งต้องการได้น้ำมันชีวภาพในปริมาณมาก

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ: RDG4530004

ชื่อโครงการ: โครงการศึกษา และพัฒนาการแปรรูปกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิง

ชื่อนักวิจัย: วิษณุ มีอยู่¹, สมชาย โอสุวรรณ², ชีรศักดิ์ ฤกษ์สมบูรณ์², ปราโมช รังสรรค์วิจิตร²,
จตุพร วุฒิกนกกาญจน์³, สติศา ไกรลาส¹, บุญยรัชต์ กิตยานันท์¹
¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร, ²วิทยาลัยปิโตรเลียม และปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, ³มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

Email address: vissanu@mut.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : ธันวาคม 2544-ธันวาคม 2547

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ พัฒนา และรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสำหรับการแปรรูปกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งมีประโยชน์ทั้งในแง่ของการลดมลภาวะ และได้แหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิง โดยในการศึกษานี้ใช้กากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียที่เป็นตัวแทนจากชุมชน อุตสาหกรรม และโรงพยาบาล จำนวน 20 แห่ง อย่างต่อเนื่องทุกเดือนเป็นระยะเวลา 1 ปี กากตะกอนถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ และแบบแยกธาตุ วิเคราะห์โลหะหนัก จากนั้นถูกนำไปหาตัวแปรจลนพลศาสตร์ และกลไกของปฏิกิริยาด้วย TGA, การศึกษาโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ 2 ชนิดคือแบบเบดนิ่ง และแบบเตาหมุน ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการถูกนำมาทดสอบด้วยเครื่อง TPP/MS และ GC/MS และศึกษาสมบัติทางอย่างของน้ำมันชีวภาพ และของถ่านชาร์ ตลอดจนประเมินแนวโน้มการพัฒนากระบวนการนี้ในเชิงเศรษฐศาสตร์

จากการศึกษาพบว่า ข้อมูลองค์ประกอบแบบประมาณสามารถใช้เป็นข้อมูลสำหรับการประเมินเบื้องต้นในการพิจารณาศักยภาพของกระบวนการอย่างมีนัยสำคัญ โดยเป็นสหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหยในกากตะกอน กับ ปริมาณน้ำมันชีวภาพ นอกจากนี้ยังสามารถเข้าใจกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนว่าประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยที่ผลิตภัณฑ์หลักในน้ำมันชีวภาพเป็นสารประกอบจำพวก เบนซีน เป็นต้น และตัวแปรจากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์ เช่น ผลตอบแทนโครงการ และความไวต่อการเปลี่ยนแปลง ชี้ให้เห็นว่าโครงการมีความเป็นไปได้

คำหลัก: ไพโรไลซิส, กากตะกอน, จลนพลศาสตร์, ผลิตภัณฑ์, ความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์

Abstract

Project Code: RDG4530004

Project Title: Thermochemical Conversion of Activated Sludge: Sludge to Oil

Investigators: V.Meeyoo¹, S. Osuwan², T. Rirksomboon², P. Rangsunvigit², J. Woothikanokkhan³, S. Krailas¹, and B. Kittiyanan²

¹Faculty of Engineering, Mahanakorn University of Technology, ²The Petroleum and Petrochemical Collage, Chulalongkorn University, ³Faculty of Energy and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi

Email address: vissanu@mut.ac.th

Project Duration: December 2001-December 2004

The objective of this project is to develop and compile basic information about sewage sludge pyrolysis process. The pyrolysis is an alternative technology for pollutant reduction and energy production. Sewage sludges collected from 20 wastewater treatment plants were selected as represent samples of sludge in Thailand. The characteristics of the sewage sludge were investigated by means of proximate analysis, ultimate analysis, and heavy metals analysis. Kinetics studies were carried out using the thermogravimetric analysis. Pyrolyzed GC/MS was used to identify the pyrolysis products. Heating value of bio-oil and iodine number of char were also evaluated.

The results showed that the sludge proximate analysis can be used as an intrinsic information for preliminary evaluation of the pyrolysis process. The feasibility study of the pyrolysis process with the site of 300 kg●day⁻¹ showed that the project is very attractive for the investment since the rate of the return is rather high (ca. 24%) and the break-even point is reached within 5 years.

Keyword: Pyrolysis, sewage sludge, kinetics, products, feasibility study

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1

หลักการ และเหตุผล	1
-------------------	---

บทที่ 2

แหล่งที่มาของกากตะกอน และองค์ประกอบ	5
2.1 ความนำ	5
2.2 โรงบำบัดน้ำเสีย	5
2.3 องค์ประกอบกากตะกอน	27
2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณ	27
2.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน	32
2.3.3 สหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแบบประมาณ และคุณค่าความร้อน ของกากตะกอน	35
2.3.4 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน	40

บทที่ 3

กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน	44
3.1 ความนำ	44
3.2 ทฤษฎีกระบวนการไพโรไลซิส	46
3.2.1 นิยามของกระบวนการไพโรไลซิส	46
3.2.2 กลไกของกระบวนการไพโรไลซิส	48
3.2.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส	49
3.3 กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนในประเทศไทย	53
3.3.1 การศึกษาลักษณะของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนด้วย วิธี TGA	53

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.2 จลนพลศาสตร์กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน	60
3.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในระบบที่มีต่อกระบวนการไพโรไลซิส	65
3.3.4 การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ	66
3.3.5 ผลกระทบจากกระบวนการไพโรไลซิส	72
3.3.6 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพในแง่คุณค่าความร้อน	84
3.4 พื้นที่ผิวของถ่านชาร์	86
3.5 การสร้างโปรแกรมสำหรับคำนวณสมดุลมวลสาร และพลังงานเบื้องต้นของกระบวนการไพโรไลซิส (PyrSim)	88
3.5.1 ลักษณะของโปรแกรม	88
3.5.2 หลักการคำนวณที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม	89
3.5.3 หลักการคำนวณสมดุลมวลในถังปฏิกรณ์	90
3.5.4 หลักการคำนวณสมดุลพลังงาน	92
3.5.5 ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรม	93
3.6 สรุป	95
บทที่ 4	
การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์	98
4.1 นิยาม และรูปแบบการดำเนินงานของโครงการ	98
4.2 ข้อมูลด้านเทคนิค	98
4.3 การประเมินมูลค่าการลงทุน และสมมติฐาน	99
4.3.1 มูลค่าการลงทุน	99
4.3.2 สมมติฐานด้านราคา และต้นทุนการผลิต	100
4.3.3 ระยะเวลาคืนทุน	101
4.3.4 การวิเคราะห์ผลตอบแทนโครงการ	103
4.3.5 การวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลง	103

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 5

สรุป

109

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ระบบบำบัดน้ำเสียชนิดแอคติเวตเต็ดสลัดจ์

ผ-1

ภาคผนวก ข.

ปริมาณถ่านชาร์ และน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสด้วย
เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุนของกากตะกอนแหล่งต่างๆ

ผ-13

ภาคผนวก ค.

ปริมาณโลหะหนักของกากตะกอน

ผ-24

ภาคผนวก ง.

คู่มือกระบวนการไพโรไลซิส

ผ-31

ภาคผนวก จ.

คู่มือการใช้งานโปรแกรมสมดุลมวลสารพลังงานปฏิกรณ์
ไพโรไลซิสของกากตะกอน PyrSim

ผ-31

สารบัญรูป

หน้า

บทที่ 1

รูปที่ 1.1 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในช่วง พ.ศ. 2537-2553 และประมาณการจนถึงปี พ.ศ. 2553	1
--	---

บทที่ 2

รูปที่ 2.1 แผนภาพสรุปกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป	7
รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำสีพระยา	9
รูปที่ 2.3 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์	11
รูปที่ 2.4 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำชองนนท์	13
รูปที่ 2.5 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาล ตำบลแสนสุข	15
รูปที่ 2.6 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำคลองเตย	16
รูปที่ 2.7 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำบางนา	18
รูปที่ 2.8 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุช	19
รูปที่ 2.9 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำท่าทราย	21
รูปที่ 2.10 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำทุ่งสองห้อง แห่งที่ 2	22
รูปที่ 2.11 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรามอินทรา	23
รูปที่ 2.12 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา	24
รูปที่ 2.13 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล อ. เสนา จ. พระนครศรีอยุธยา	25
รูปที่ 2.14 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล จังหวัดปทุมธานี	26
รูปที่ 2.15 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีคุณค่าความร้อน และดัชนีปริมาณ สารระเหยของกากตะกอนตัวอย่างทั้ง 20 แหล่ง	31
รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแบบประมาณ	35

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเชิงเคมีของกากตะกอนปริมาณของเสีย ที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในช่วง พ.ศ. 2537-2544 และประมาณการจนถึง ปี พ.ศ. 2553	38
บทที่ 3	
รูปที่ 3.1 ปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นในสหภาพยุโรปช่วงปี ค.ศ. 1984-2005	44
รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่างๆ	50
รูปที่ 3.3 ลักษณะการสลายตัวของกากตะกอนตัวอย่างในแบบต่างๆ	54
รูปที่ 3.4 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนตัวอย่างด้วยข้อมูล TGA	58
รูปที่ 3.5 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสตามแบบจำลอง PSOM	62
รูปที่ 3.6 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสตามแบบจำลอง PMOM	62
รูปที่ 3.7 อิทธิพลของอุณหภูมิของระบบที่มีต่อปริมาณน้ำมันฟิงได้ จากตัวแทน ของกากตะกอนแหล่งต่างๆ	65
รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดั่งสารระเหยจากกากตะกอน แหล่งต่างๆด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	66
รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดั่งสารระเหยจากกากตะกอน แหล่งต่างๆด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส	68
รูปที่ 3.10 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสในการศึกษา	68
รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบร้อยละการดั่งสารระเหยจากกากตะกอนของเครื่องปฏิกรณ์ แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 450, 500, และ 550 องศาเซลเซียสตามลำดับ	70
รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดั่งสารระเหยจากกากตะกอนของเครื่องปฏิกรณ์ แบบเดาหมุนที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส	71
รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับกากตะกอน	72
รูปที่ 3.14 สัญญาณ MS แสดงการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆ จากกระบวนการ ไพโรไลซิสของกากตะกอน	73
รูปที่ 3.15 ระบบที่ใช้ในการคำนวณสมดุลมวลสาร และพลังงานรอบกระบวนการ ไพโรไลซิส	89

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.16 ปริมาณ และคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของ กากตะกอน ณ ช่วงอุณหภูมิต่าง	91
รูปที่ 3.17 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงมวลสารกากตะกอน	92
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรมสมดุลมวลสาร และพลังงาน	93

บทที่ 4

รูปที่ 4.1 กราฟการไหลเวียนของกระแสเงินสดของโครงการ	101
รูปที่ 4.2 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุต่อผลตอบแทนโครงการ	104

บทที่ 5

รูปที่ 5.1 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงของกากตะกอนตัวอย่างตามวิธีการ TGA	108
รูปที่ 5.2 ภาพรวมของกลไกปฏิกิริยาไพโรไลซิสกากตะกอน	109
รูปที่ 5.3 ตัวอย่างแผนภาพการประยุกต์ใช้กระบวนการไพโรไลซิสในโรงงานอุตสาหกรรม	122

ภาคผนวก ก.

รูปที่ 1 ถังเติมอากาศ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์	ผ-3
รูปที่ 2 ระบบตกตะกอน โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์	ผ-3
รูปที่ 3 เครื่องรีดน้ำออกจากตะกอนแบบสายพาน โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ รัตนโกสินทร์	ผ-4
รูปที่ 4 ถังพักตะกอนแห้ง โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์	ผ-4
รูปที่ 5 รูปถ่ายโดยรวมระบบบำบัดน้ำเสีย โรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา	ผ-5
รูปที่ 6 บ่อเติมอากาศ ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา	ผ-6
รูปที่ 7 บ่อตกตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา	ผ-6
รูปที่ 8 บ่อรวบรวมตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา	ผ-7

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 9 ป่อเพิ่มความเข้มข้น ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา	ผ-7
รูปที่ 10 ป่อสัมผัสคลอรีน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา	ผ-8
รูปที่ 11 ป่อเติมอากาศแบบคลองวงเวียน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ. เสนา	ผ-9
รูปที่ 12 ป่อตกตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ. เสนา	ผ-10
รูปที่ 13 ป่อสัมผัสคลอรีน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ. เสนา	ผ-10
รูปที่ 14 ป่อเติมสารคลอรีน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ. เสนา	ผ-11
รูปที่ 15 ป่อเติมอากาศ ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลเขื่อนลพบุรี	ผ-12
รูปที่ 16 ระบบตกตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลเขื่อนลพบุรี	ผ-12
ภาคผนวก ข.	
รูปที่ 17 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งรวมอินทรา	ผ-14
รูปที่ 18 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์	ผ-14
รูปที่ 19 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลสมเด็จพระนั่งเกล้า	ผ-15
รูปที่ 20 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสียรัตนโกสินทร์	ผ-15
รูปที่ 21 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งเทศบาลตำบลแสนสุข	ผ-16
รูปที่ 22 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งอุตสาหกรรม บ.ยูนิลีเวอร์ จำกัด	ผ-16
รูปที่ 23 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสียทุ่งสองห้อง 2	ผ-17
รูปที่ 24 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสียคลองเตย	ผ-17

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 25 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาล อ.เสนา จ.อยุธยา	ผ-18
รูปที่ 26 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลประจำจังหวัดอยุธยา	ผ-18
รูปที่ 27 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งกองกำลังปฏิภูม	ผ-19
รูปที่ 28 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลประจำจังหวัดปทุมธานี	ผ-19
รูปที่ 29 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลน้ำเสีย ยานนาวา	ผ-20
รูปที่ 30 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลน้ำเสียสี่พระยา	ผ-20
รูปที่ 31 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลน้ำเสีย ท่าทราย	ผ-21
รูปที่ 32 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลน้ำเสีย บางนา	ผ-21
รูปที่ 33 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งอุตสาหกรรมลาดกระบัง	ผ-22
รูปที่ 34 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลน้ำเสีย อ่อนนุช	ผ-22
รูปที่ 35 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมจากเครื่องปฏิกรณ์ แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลเซ็นหลุยส์	ผ-23

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ก.

รูปที่ 36 ปริมาณแกลดเมียมของตัวอย่างกากตะกอนในรอบ 12 เดือน	ผ-25
รูปที่ 37 ปริมาณทองแดงของตัวอย่างกากตะกอนในรอบ 12 เดือน	ผ-26
รูปที่ 38 ปริมาณโมลิบดีนัมของตัวอย่างกากตะกอนในรอบ 12 เดือน	ผ-27
รูปที่ 39 ปริมาณนิกเกิลของตัวอย่างกากตะกอนในรอบ 12 เดือน	ผ-28
รูปที่ 40 ปริมาณตะกั่วของตัวอย่างกากตะกอนในรอบ 12 เดือน	ผ-29
รูปที่ 41 ปริมาณสังกะสีของตัวอย่างกากตะกอนในรอบ 12 เดือน	ผ-30

ภาคผนวก ง.

รูปที่ 42 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิส	ผ-34
รูปที่ 43 แสดงตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่างๆ	ผ-36
รูปที่ 44 แผนภาพคู่มือประกอบสำหรับการตัดสินใจกระบวนการไพโรไลซิสขั้นตอนต่างๆ	ผ-43

ภาคผนวก จ.

รูปที่ 45 ระบบไพโรไลซิส	ผ-45
รูปที่ 46 หน้าจอ interface เริ่มต้นขอ PyrSim	ผ-47
รูปที่ 47 Dialog เพื่อป้อนข้อมูลสารป้อน	ผ-48
รูปที่ 48 Dialog เพื่อป้อนข้อมูลพลังงานป้อน	ผ-48
รูปที่ 49 Dialog เพื่อป้อนข้อมูลก๊าซผลิตภัณฑ์	ผ-49
รูปที่ 50 หน้าจอ interface แสดงผลการคำนวณสมดุลมวลสาร	ผ-49
รูปที่ 50 หน้าจอ interface แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงาน	ผ-50

สารบัญตาราง

หน้า

บทที่ 1

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของของเสียโดยทั่วไป เปรียบเทียบกับวัสดุอื่นๆ	2
---	---

บทที่ 2

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบ และคุณค่าเชิงความร้อนเฉลี่ยของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ จำนวน 20 แห่งเทียบกับถ่านลิกไนต์	29
ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ จำนวน 20 แห่ง	33
ตารางที่ 2.3 สมการทำนายค่าความร้อนของกากตะกอนที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอย	39

บทที่ 3

ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะกระบวนการไพโรไลซิสที่สำคัญโดยใช้วัตถุดิบจำพวกไม้	47
ตารางที่ 3.2 สรุปกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพทั่วโลกในปี 1998	51
ตารางที่ 3.3 ค่าพลังงานกระตุ้น และลำดับของปฏิกิริยาที่สอดคล้องกับกระบวนการสลายตัวเชิงความร้อนของกากตะกอนแยกตามแบบพฤติกรรม	64
ตารางที่ 3.4 ผลัดกันที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน	73
ตารางที่ 3.5 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนตัวอย่างจำแนกตามกลุ่มของกากตะกอน และช่วงอุณหภูมิที่เกิดขึ้น	79
ตารางที่ 3.6 สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ	81
ตารางที่ 3.7 สารประกอบจำพวกเบนซีน และอนุพันธ์	81
ตารางที่ 3.8 สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ	82
ตารางที่ 3.9 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ตรง และวง	83
ตารางที่ 3.10 คุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์สองชนิดเปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่มีชีวมวลเป็นวัตถุดิบ และน้ำมันเตา	85
ตารางที่ 3.11 การประมาณพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิด เมื่อพิจารณาจากตัวเลขไอโอซิน	87

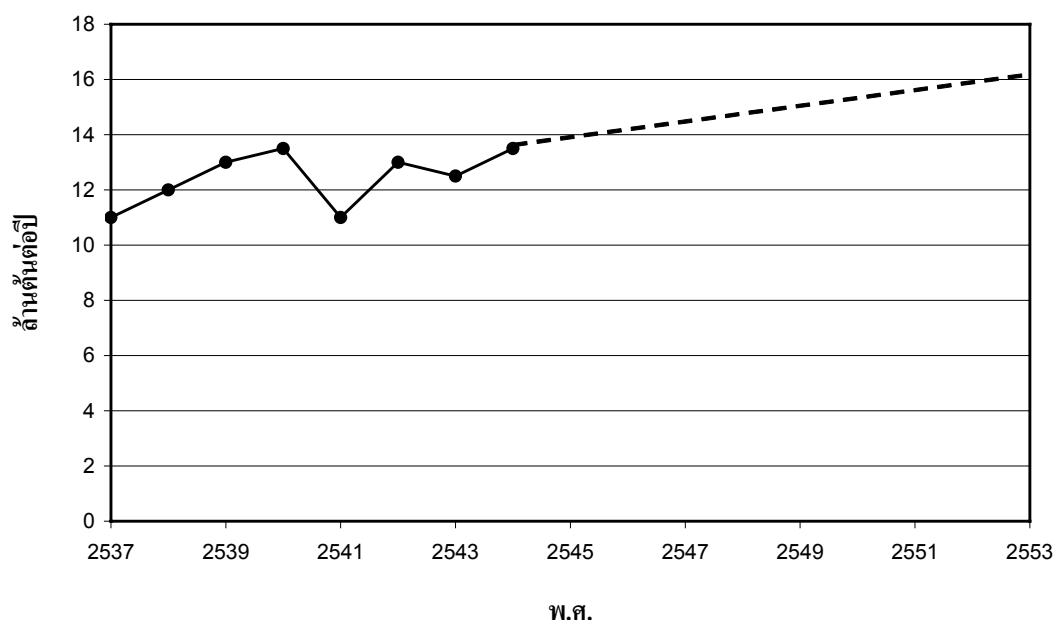
สารบัญตาราง (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4	
ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส	98
ตารางที่ 4.2 ข้อมูลคุณสมบัติของกากตะกอนที่ใช้ในการศึกษา และปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น	99
ตารางที่ 4.3 ต้นทุนการผลิต	100
ตารางที่ 4.4 สมมติฐานราคาวัสดุอื่นๆ	100
ตารางที่ 4.5 การไหลเวียนของกระแสเงินสดของโครงการ	102
ตารางที่ 4.6 ผลตอบแทนโครงการเมื่อเปลี่ยนคุณภาพกากตะกอนที่ป้อน	105
บทที่ 5	
ตารางที่ 5.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส กับองค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน	114
ตารางที่ 5.2 สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ	115
ตารางที่ 5.3 สารประกอบจำพวกเบนซีน และอนุพันธ์	116
ตารางที่ 5.4 สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ	117
ตารางที่ 5.5 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ตรง และวง	118
ตารางที่ 5.6 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนตัวอย่าง จำแนกตามกลุ่มของกากตะกอน และช่วงอุณหภูมิที่เกิด	120
ตารางที่ 5.7 ผลตอบแทนโครงการเมื่อเปลี่ยนคุณภาพกากตะกอนที่ป้อน	121
ภาคผนวก จ	
ตารางที่ 1 สรุปลักษณะกระบวนการไพโรไลซิสที่สำคัญโดยใช้วัตถุดิบจำพวกไม้	ผ-33
ตารางที่ 2 องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน และการจัดแบ่งคุณภาพ	ผ-41

บทที่ 1

หลักการ และเหตุผล

ปัจจุบัน แนวโน้มปริมาณของขยะของเสียในประเทศต่าง ๆ นั้นจะทวีมากขึ้น อันเนื่องมาจากความเจริญทางด้านเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และเทคโนโลยีการผลิต สำหรับประเทศไทย, จากข้อมูลของธนาคารโลก [1] แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นจากการบริโภคในประเทศนั้น มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี พ.ศ. 2537 ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งแม้ว่าแนวโน้มจะลดต่ำลงไปบ้างในช่วงปี พ.ศ. 2539-2541 อันเนื่องมาจากวิกฤติเศรษฐกิจ แต่หลังจากที่เศรษฐกิจได้กลับฟื้นตัวในช่วงปลายปี พ.ศ. 2541 แนวโน้มก็กลับมาเพิ่มขึ้นอีกครั้ง ซึ่งประมาณว่าในปีพ.ศ. 2553 ปริมาณของเสียในประเทศไทยอาจมากถึง 16 ล้านตันต่อปี (เฉลี่ยวันละประมาณ 45,000 ตันต่อวัน) โดยของเสียส่วนใหญ่นั้นมาจากระบบบำบัดน้ำเสีย ในรูปของกากตะกอนซึ่งคิดเป็นร้อยละ 70 [2] ของของเสียทั้งระบบ ปริมาณของเสียทั้งระบบ ปริมาณของเสียทั้งระบบที่ถูกคาดการณ์ไว้ในปี 2544 มีประมาณ 6 ล้านตันต่อปี และคาดว่าจะสูงยิ่งขึ้นในปัจจุบัน ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีสำหรับกำจัดของเสียเหล่านี้



รูปที่ 1.1 ปริมาณของเสียที่เกิดขึ้นในประเทศไทยในช่วง พ.ศ. 2537-2544 และประมาณการจนถึงปี พ.ศ. 2553 [1]

โดยทั่วไปแล้ว เทคโนโลยีที่นิยมใช้กันได้แก่ การฝังกลบ ซึ่งทางคณะผู้วิจัยมีความเห็นว่าไม่ใช่เทคโนโลยีที่ใช้ในการกำจัดของเสียแบบเบ็ดเสร็จ แม้ว่าเทคโนโลยีนี้มีราคาค่อนข้างถูกเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกำจัดแบบอื่นๆ แต่ถ้าหลุมฝังกลบไม่ได้รับการดูแลอย่างถูกวิธีอาจก่อให้เกิดผลเสียตามมาได้ และแม้ว่าจะดำเนินการอย่างถูกต้องตามหลักวิธี ก็ใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

นอกจากปัญหาด้านมลภาวะจากขยะของเสียแล้ว วิกฤตการณ์ราคาน้ำมันดิบที่มีแนวโน้มที่จะมีราคาสูงขึ้นทุกวัน ส่งผลให้การพัฒนางานทดแทนมีความสำคัญสำหรับประเทศมากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงคุณสมบัติของของเสียในตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าของเสีย (ซึ่งโดยทั่วไปแล้วหมายถึง กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย) มีคุณค่าพลังงานใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์ คือประมาณ 10-20 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม แต่กระบวนการกำจัดของเสียในปัจจุบันยังมิได้เล็งเห็นถึงโอกาสที่จะนำพลังงานที่อยู่ในของเสียมาใช้ให้เป็นประโยชน์ ดังนั้นในข้อเสนองานวิจัยนี้ จึงมุ่งประเด็นไปที่การพัฒนากระบวนการกำจัดของเสียที่สามารถนำพลังงานที่มีอยู่ในของเสียมาใช้ให้เป็นประโยชน์

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของของเสียโดยทั่วไป เปรียบเทียบกับวัสดุชนิดอื่นๆ (ไม่คิดความชื้น)

องค์ประกอบ	กากตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสีย	ถ่านหินลิกไนต์ [3]	วัสดุการเกษตร [4]
สารระเหย	50-70 %	36.57 %	60-80 %
คาร์บอนคงตัว	2-7 %	23.06 %	15-25 %
เถ้า	42-61 %	40.37 %	0.5-1.0%
คาร์บอน	50-70 %	36.74 %	39-64 %
ไฮโดรเจน	6.5-7.5 %	6.16 %	4.0-6.0 %
ออกซิเจน	21-24 %	11.29 %	34-40 %
ไนโตรเจน	15-18 %	1.68 %	0.2-1.7 %
ซัลเฟอร์	0.0-2.4 %	3.77 %	0.0-0.4 %
คุณค่าความร้อน (เม ก กะ จูล ต่ อ กิโลกรัม)	8.4-10.5	16.3	14-20

จากรายงานการศึกษาทางด้านเทคโนโลยีไฟโรไลซิส [4-8] สำหรับการแปรรูปชีวมวลให้เป็นน้ำมันชีวภาพแสดงให้เห็นว่าชีวมวล เช่น เซลลูโลส ลิกนิน มีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำมันชีวภาพ โดยสามารถผลิตน้ำมันชีวภาพได้สูงถึงร้อยละ 70 ของน้ำหนักเริ่มต้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่เราจะนำเทคโนโลยีไฟโรไลซิส มาใช้ในการแปรรูปกากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียให้เป็นน้ำมันชีวภาพได้ อย่างไรก็ตามองค์ประกอบของกากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียมีข้อแตกต่างไปจากชีวมวลโดยทั่วไป อีกทั้งองค์ประกอบในกากตะกอนเองมีความหลากหลาย ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำมันชีวภาพ

จากการศึกษาเบื้องต้นของการแปรรูปกากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิง [5-8] แสดงให้เห็นว่ากากตะกอนสามารถนำมาผ่านกระบวนการไฟโรไลซิส เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพได้ อย่างไรก็ตามก็ยังมีคำถามที่ว่า กากตะกอนทุกชนิดสามารถนำมาผ่านกระบวนการนี้เพื่อผลิตน้ำมันชีวภาพได้หรือไม่ และปัจจัยได้เป็นตัวบ่งบอกชี้ถึงศักยภาพของกากตะกอนแต่ละชนิดซึ่งมาจากน้ำเสียคนละชนิด

ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ พัฒนาระบบไฟโรไลซิสสำหรับการกำจัดกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน และโรงพยาบาล ในประเทศไทย โดยเปลี่ยนให้เป็นเชื้อเพลิง เพื่อลดการใช้เชื้อเพลิงที่นำเข้าจากภายนอกประเทศ รวมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการออกแบบ และพิจารณาในการนำกระบวนการไฟโรไลซิสไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม

เอกสารอ้างอิง

- [1] <http://web.worldbank.org>
- [2] P. Eamsakulrat, D. Patmasiriwat, and P. Huidobro. (1994). “Hazardous Waste Mannagement in Thailand” TDRI Quartery Review, Vol 9, No. 3: 7-14
- [3] ฉัตรชัย ฉัตรเจริญมิตร, “การกำจัดกัมมะถันจากถ่านหินโดยไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่ำ”, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541
- [4] <http://www.woodgas.com/biomass%20energy.htm>
- [5] กรมควบคุมมลพิษ. (2544). การวิจัยพัฒนาการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ (การนำกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียอุตสาหกรรมมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง), กรุงเทพฯ: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ
- [6] กรมควบคุมมลพิษ. (2545). การศึกษาวิจัยการสร้างแบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส สำหรับผลิตเชื้อเพลิงจากกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย, กรุงเทพฯ: สถาบันพัฒนาเทคโนโลยีการควบคุมมลพิษ
- [7] X. Chen and S.Jeyaseelan. (2001). “Study of Sewage Sludge Pyrolysis Mechanism and Mathematical Modeling,” J. of Env. Eng., **127**, 585-593
- [7] J. Wootthikakanokkhan, A. Jaturapiree, and V. Meeyoo. (2003). Effect of Metal Compounds and Experimental Conditions on Distribution of Products from PVC Pyrolysis., **11**, No. 1, 1-6
- [8] P.Punnaruttanakun, V.Meeyoo, C.Kalambaheti, P. Rangsunvigit, T. Rirksomboon, B. Kitiyanan, (2003). “Pyrolysis of API Separator Sludge”, J. Anal. Appl. Pyrol.68-69, 547-560

บทที่ 2

แหล่งที่มาของกากตะกอน และองค์ประกอบ

2.1 ความนำ

เนื่องจากกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียมีองค์ประกอบที่เป็นอินทรีย์สาร (Organics compounds) ดังนั้นจึงสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงโครงสร้างภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูง และปราศจากออกซิเจนได้สารประกอบอินทรีย์ อาทิเช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคุณค่าความร้อนปานกลาง หรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียนั้นมีลักษณะในเชิงคุณภาพต่างกัน ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียแต่ละแห่งนั้นต่างกันด้วย

เพื่อให้ผลสรุปจากการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้กากตะกอนระบบบำบัดเป็นวัตถุดิบนั้นสามารถใช้ได้ในวงกว้าง และครอบคลุมมากที่สุด ดังนั้นกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำมาจากโรงบำบัดน้ำเสียจำนวนถึง 20 แห่ง รวมทั้งมีการเก็บตัวอย่างมาอย่างต่อเนื่องเดือนละครั้งจำนวน 12 เดือน ซึ่งช่วยให้ติดตามแนวโน้มต่างๆ ได้ชัดเจนขึ้น

โรงบำบัดน้ำเสียจำนวน 20 แห่ง ที่ได้ดำเนินการจัดเก็บตัวอย่างกากตะกอนนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มใหญ่คือ โรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล และโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอาจจะมีข้อมูลบางประเภทที่อาจจะส่งผลในเชิงลบต่อภาพพจน์ของหน่วยงานบางแห่งโดยมิได้ตั้งใจ ซึ่งมีใจมุ่งหมายของทีมงานผู้วิจัยแต่อย่างใด ด้วยเหตุนี้ ในส่วนของผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอนจึงไม่ได้เอ่ยชื่อของโรงบำบัดน้ำเสียทั้งหมด แต่จะใช้การกำหนดเป็นนามสมมติแทน

2.2 โรงบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment Plant) [1]

ในภาพรวมแล้ว โรงบำบัดน้ำเสียเป็นหน่วย (Unit) ที่ทำหน้าที่ในการแปลงสภาพน้ำเสีย ให้เป็นน้ำที่มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำในแหล่งธรรมชาติมากที่สุดก่อนที่จะปล่อยสู่สาธารณะ โดยไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ด้วยการนำน้ำเสียนั้นผ่านกระบวนการบำบัดต่างๆ ตามความเหมาะสม

โดยทั่วไปแล้วการบำบัดน้ำเสียอาจแบ่งตามลักษณะขั้นตอนตามลำดับดังต่อไปนี้

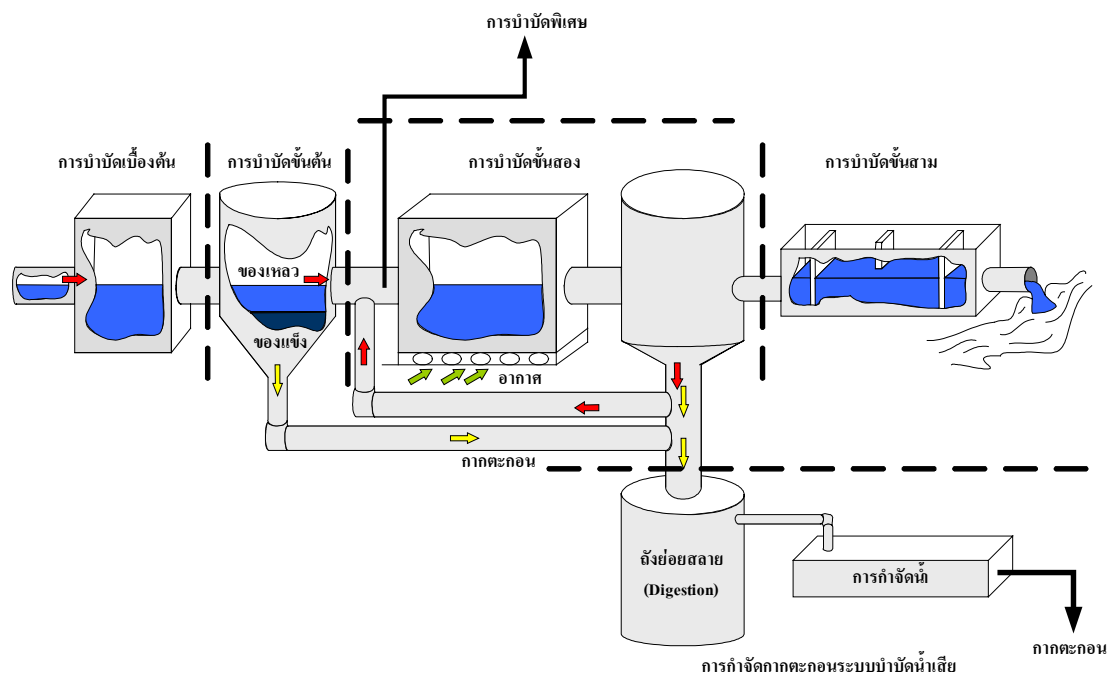
- การบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment)
- การบำบัดขั้นต้น (Primary Treatment)
- การบำบัดขั้นสอง (Secondary Treatment)
- การบำบัดขั้นสาม (Tertiary Treatment)

ซึ่งการบำบัดเบื้องต้นเป็นการปรับสภาพน้ำเสียให้เหมาะสมก่อนที่จะถูกป้อนเข้าสู่การบำบัดขั้นถัดไป เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในระบบบำบัดน้ำเสีย และไม่ก่อปัญหาต่อระบบซึ่งได้แก่ การแยกกากของแข็ง (Screening) การแยกเม็ดทราย การแยกน้ำมัน การเติมอากาศเบื้องต้น การปรับสภาพน้ำเสียให้คงที่ เช่น การปรับค่า pH ให้น้ำเสียมีสภาพเป็นกลาง เป็นต้น

การบำบัดขั้นต้นเป็นการลดมลสาร (Pollutants) ในน้ำเสียให้ต่ำลงเป็นเบื้องต้นด้วยวิธีการง่ายๆ เช่น การตกตะกอน (Sedimentation) การตกตะกอนด้วยสารเคมี (Chemical Precipitation) การกรอง (Filtration) การแยกสารลอย (Flotation) และการย่อยสลายโดยปราศจากออกซิเจน (Anaerobic Fermentation) เป็นต้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะผ่านการบำบัดขั้นต้นแล้ว ในน้ำเสียก็ยังคงมีปริมาณสารอินทรีย์อยู่ค่อนข้างมาก ดังนั้นน้ำเสียจึงถูกป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียขั้นสอง ซึ่งมักจะใช้กระบวนการทางชีววิทยา (การย่อยสลายโดยใช้ออกซิเจน: Aerobic Digestion) ในการกำจัดมลสารอินทรีย์เหล่านี้ หลังจากการบำบัดน้ำเสียในขั้นสองแล้ว เป็นไปได้ว่าน้ำเสียอาจมีความขุ่น หรือมีโลหะหนักอยู่สูงมากเกินกว่าจะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมได้ จึงต้องนำมาเข้าสู่กระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นสาม ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการดูดซับสี และโลหะหนัก อาทิเช่น การดูดซับด้วยการใช้ถ่านกัมมันต์ กระบวนการ Ion-Exchange การกรองโดยใช้เยื่อเลือกผ่าน (Membrane Filtration) นอกจากนี้แล้ว ในบางครั้งถ้ามีน้ำเสียนั้นมาจากแหล่งที่มีเชื้อโรค ก็ต้องถูกนำไปผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคด้วย

ในระบบการบำบัดน้ำเสียขั้นสองซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยใช้ออกซิเจนนั้น โดยปกติแล้วใช้หลักการที่ให้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์พวกนี้ ซึ่งหลังจากการย่อยสลายแล้วแบคทีเรียก็จะมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น เมื่อสารอินทรีย์ในน้ำเสียถูกย่อยสลายเป็นเวลานานจนมีปริมาณลดลงอย่างมาก ทำให้อาหารของแบคทีเรียเหล่านี้ลดลงตามไปด้วย ทำให้แบคทีเรียเกิดภาวะขาดแคลนอาหาร และตายลงเป็นซากของแบคทีเรียซึ่งแยกออกจากน้ำได้ง่ายกว่า

ที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ และตะกอนของซากแบคทีเรียเหล่านี้เรียกว่า กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสีย (Sludge) นั่นเอง



รูปที่ 2.1 แผนภาพสรุปกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป

จากที่กล่าวมาในข้างต้นดังนั้น กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปจึงมีขั้นตอนของการบำบัดระดับต่างๆ กันดังที่สรุปไว้ในรูปที่ 2.1 ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้ว กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียที่ถูกนำมาใช้นั้นได้มาจาก กากตะกอนที่ผ่านกระบวนการคั่งน้ำ (Dewatering) แล้วเป็นด้านหลัก

อย่างไรก็ตาม โรงบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในที่ต่างๆ โดยเฉพาะในประเทศไทยนั้นแต่ละแห่งก็มีลักษณะที่จำเพาะของแต่ละแห่ง ดังนั้นเพื่อให้เห็นภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียต่างๆ ที่ได้เก็บกากตะกอนมานั้นชัดเจนขึ้น จึงได้แบ่งกลุ่มของโรงบำบัดน้ำเสียออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

ก. กลุ่มโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนจำนวน 12 แห่ง ซึ่งได้แก่ โรงบำบัดน้ำเสียกองกำลังตั้งปฏิภณ โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนคลองเตย โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนทุ่งสองห้องที่สอง โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนบางนา โรงบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนเมืองภูเก็ต โรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนรามอินทรา โรงบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำ

ยานนาวา โรงพยาบาลน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ โรงพยาบาลน้ำเสียเคหะชุมชนท่าทราย โรงพยาบาลน้ำเสียเทศบาล อำเภอแสนสุข จ.ชลบุรี และโรงพยาบาลน้ำเสียเคหะชุมชนอ่อนนุช

ข. กลุ่มโรงพยาบาลน้ำเสียโรงพยาบาลจำนวน 5 แห่ง ได้แก่ โรงพยาบาลน้ำเสียโรงพยาบาลประจำอำเภอเสนา จ. พระนครศรีอยุธยา โรงพยาบาลน้ำเสียโรงพยาบาลเชน็ดหลุยส์ เขตสาทร กรุงเทพฯ โรงพยาบาลน้ำเสียโรงพยาบาลประจำจังหวัดปทุมธานี โรงพยาบาลน้ำเสียโรงพยาบาลสมเด็จพระนั่งเกล้า จ. นนทบุรี โรงพยาบาลน้ำเสียโรงพยาบาลประจำจังหวัดอยุธยา

ค. กลุ่มโรงพยาบาลน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมจำนวน 3 แห่ง ได้แก่ โรงพยาบาลน้ำเสียบริษัทยูนิลีเวอร์ไทยโฮลดิ้ง จำกัด โรงพยาบาลน้ำเสียรวมนิคมอุตสาหกรรมลาดกระบัง และโรงพยาบาลน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำสวนอุตสาหกรรม เครือสหพัฒน์ จำกัด

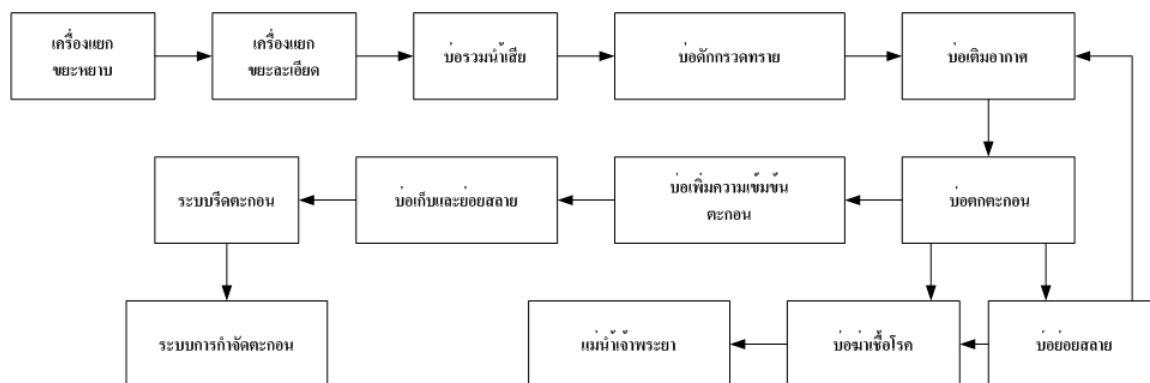
ลักษณะของโรงพยาบาลน้ำเสียแต่ละแห่งมีดังต่อไปนี้ (ในที่นี้ยกตัวอย่างเฉพาะโรงพยาบาลน้ำเสียชุมชนและโรงพยาบาลบางแห่งเท่านั้น เนื่องจากในบางแห่งไม่อนุญาตให้มีการเปิดเผยข้อมูล)

2.2.1 โรงพยาบาลน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำสีพระยา

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำสีพระยาเป็นระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่โดยจะรวบรวมน้ำเสียจากชุมชนเข้าสู่โรงพยาบาลน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่คูคลอง และแม่น้ำเจ้าพระยา สถานที่ตั้งอยู่ในบริเวณปากคลองผดุงกรุงเกษม ขนาด 1 ไร่ 3 งาน ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในพื้นที่ประมาณ 2.7 ตารางกิโลเมตร อันได้แก่ เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย เขตสัมพันธวงศ์ และเขตบางรักบางส่วนซึ่งมีประชากรอาศัยประมาณ 120,000 คน

โรงพยาบาลน้ำเสียแห่งนี้มีความสามารถบำบัดน้ำเสียจำนวน 30,000 ลูกบาศก์เมตร ต่อวัน และมีการจัดการน้ำเสียด้วย กระบวนการบำบัดน้ำเสีย ที่ประกอบขึ้นจาก ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Treatment) ตามด้วยกระบวนการแบบสัมผัสและย่อยสลาย (Contact Stabilization Process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ดัดแปลงมาจากระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) และมีการควบคุมในระบบบำบัดน้ำเสียโดยใช้พารามิเตอร์ F/M (kg BOD/kg MLSS.d), pH, BOD INF และ Solid Suspension INF ประกอบกับการควบคุมคุณภาพน้ำในระบบโดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD, COD และ Solid Suspension ซึ่งประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าจาก 46 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่า BOD ขาออกเป็น 2.7 มิลลิกรัมต่อลิตร

กระบวนการบำบัดน้ำเสียระบบตะกอนเร่ง (Activate Sludge) แบบ Contact Stabilization Activated Sludge เป็นกระบวนการที่มีลักษณะเด่นคือ นำน้ำสลัดจ์ที่รวบรวมได้จากถังตกตะกอน ส่วนหนึ่งจะถูกถ่ายออกจากระบบและอีกส่วนหนึ่งจะถูกนำมาทำการเติมอากาศในถังปรับเสถียร (Stabilization Tank) ประมาณ 4-6 ชม. แล้วจึงนำมาผสมกับน้ำเสียในถังเติมอากาศอีกถังเรียกว่า ถังสัมผัส (Contact Tank)



รูปที่ 2.2 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงบำบัดน้ำเสียโรงควบคุมคุณภาพน้ำสี่พระยา

จากรูปที่ 2.2 จะเห็นได้ว่ากระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียแห่งนี้เริ่มจาก รับน้ำเสียจากท่อรวบรวมน้ำเสียสี่พระยา และท่อรวบรวมน้ำเสียถนนกรุงเกษม ผ่านเครื่องดักขยะขนาดใหญ่ (Automatic Bar Screen) ทำหน้าที่ดักขยะขนาดใหญ่ออกจากน้ำเสีย จากนั้นน้ำเสียจะไหลผ่านเครื่องดักขยะชนิดละเอียด (Fine Screen) ทำหน้าที่ดักขยะขนาดเล็ก และผ่านน้ำเสียไปยัง บ่อปรับสภาพน้ำเสีย (Equalization Tank) ทำหน้าที่เก็บกักน้ำเสียและปรับสภาพน้ำเสียให้มีลักษณะเดียวกันทั่วถึง ภายในมีเครื่องกวนผสมน้ำเสีย (Mixer) เพื่อกวนผสมน้ำเสีย และส่งต่อไปยัง บ่อดักกรวดทราย (Aerated Grit Chamber) ทำหน้าที่แยกกรวดทรายออกจากน้ำเสียเป็นการป้องกันไม่ให้เครื่องจักรเกิดการชำรุดเสียหาย โดยการใช้ Air Lift Pump แยกกรวดทรายออกไปทิ้ง

หลังจากที่ผ่านการบำบัดทางกายภาพ ตามที่กล่าวมาข้างต้น น้ำเสียก็จะถูกส่งต่อมาบำบัดทางชีวภาพ โดย บ่อสัมผัส (Contact Tank) ทำหน้าที่เป็นถังเติมอากาศ ให้ตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดสัมผัส จับ หรือดูดซับสารอินทรีย์ หรือสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่ผ่านเข้ามาในบ่อ หลังจากนั้นจะส่งต่อไปยัง บ่อดกตะกอน (Clarifier Tank) ทำหน้าที่เป็นถังตกตะกอนเพื่อให้ตะกอนตกลงสู่ก้นถัง ภายใน

มีเครื่องกวาดตะกอน (Scraper) ซึ่งทำหน้าที่กวาดตะกอนให้มารวม อยู่ในกรวย (Hopper) กันถึง น้ำใสส่วนบนจะไหลผ่านสันเขื่อน และถูกปล่อยสู่บ่อฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) หรือ

บ่อเติมคลอรีน (Chlorine Contact Tank) ทำหน้าที่เป็นบ่อเติมคลอรีนเพื่อทำลายเชื้อโรคในน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัด ก่อนปล่อยสู่แม่น้ำสาธารณะ คลอรีนที่ใช้อยู่ในรูปของ NaOCl เข้มข้น 10% จากนั้นจึงปล่อยเข้าสู่บ่อย่อยสลาย (Stabilization Tank) ทำหน้าที่เป็นถังเติมอากาศให้แก่ตะกอนหมุนเวียน กลับมาใช้ในระบบเพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์มีเวลาในการย่อยสารอินทรีย์ที่ดูดซับไว้ขณะอยู่ในบ่อสัมผัส

ส่วนสุดท้ายเป็นระบบกำจัดกากตะกอน ซึ่งจะประกอบด้วย ถังทำให้ตะกอนเข้มข้น (Sludge Thickener Tank) ทำหน้าที่คล้ายถังตกตะกอน โดยสูบตะกอนส่วนเกินมาในถังทำให้ตะกอนเข้มข้น แล้วสูบสารพอลิเมอร์เข้ามาผสมเพื่อช่วยในการตกตะกอนให้เข้มข้นขึ้น และสูบเข้าสู่ถัง Flocculation Tank ซึ่งช่วยในการกวนผสม จากนั้นจึงถูกสูบไปยังถังเก็บ และย่อยตะกอน (Sludge Storage Tank) ทำหน้าที่กักเก็บรวบรวมตะกอนส่วนเกิน และเกิดการย่อยสลายของตะกอนบางส่วน สุดท้ายจึงปล่อยของผสมเข้าสู่เครื่องรีดตะกอนซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนสถานะของเหลวให้มีลักษณะเป็นของแข็งกึ่งเหลว โดยมีค่าความเข้มข้นของแข็งประมาณ 20% เพื่อประโยชน์ในการนำกากตะกอนไปกำจัดต่อไป

2.2.2 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่โดยระบบจะรวบรวมน้ำเสียจากท่อรวบรวมน้ำเสีย 2 เส้น เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยตั้งอยู่บนพื้นที่ บริเวณตลาดบ้านพานถม บางลำพู มีพื้นที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำ 6,683 ตารางเมตร ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในเขตพระนคร มีพื้นที่ประมาณ 4.1 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมีประชากรอยู่พักอาศัยประมาณ 70,000 คน นอกจากอาคารสถานที่อยู่อาศัยแล้วยังรวมถึงตลาดสด (ปากคลองตลาด ตลาดบ้านพานถม เป็นต้น) อาคารร้านค้า (คลองถม พาหุรัด เป็นต้น) ฯลฯ ซึ่งเป็นเขตที่เรียกว่า เกาะรัตนโกสินทร์หรือกรุงรัตนโกสินทร์ คือ พื้นที่ล้อมรอบด้วยแม่น้ำเจ้าพระยาและคลองรอบกรุง (คลองบางลำพู และ คลองโอ่งอ่าง) ประกอบกับพื้นที่ใกล้เคียงยังมี คลองคูเมืองเดิม (คลองหลอด) คลองวัดราชนัคนาคา และคลองวัดราชปิต

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำแห่งนี้เป็นระบบบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ สามารถรับน้ำเสียได้วันละ 40,000 ลูกบาศก์เมตรที่ได้ผ่านเข้าสู่โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ จะได้จากกิจกรรมในเรื่องน้ำเสียของประชาชนที่อาศัยอยู่ในบริเวณ เช่น การอาบน้ำ ชักผ้า การปรุงอาหาร การขับถ่ายของเสีย และกิจกรรมน้ำเสียตลาดสด เช่น การล้างสิ่งของหรือพื้นที่ ฯลฯ จะถูกนำไปผ่านกระบวนการบำบัดตะกอนเร่งแบบ

กระบวนการในการบำบัดน้ำแบ่งออกเป็น 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ กระบวนการขั้นแรก เป็นกระบวนการทางกายภาพ ต่อด้วยกระบวนการทางชีวภาพ และขั้นตอนสุดท้ายคือ ระบบบำบัดตะกอน

รูปที่ 2.3 กระบวนการบำบัดตะกอนแร่ที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์

การบำบัดขั้นที่สอง เป็นการบำบัดทางชีววิทยา เพื่อลดมลพิษซึ่งส่วนใหญ่มีเหลืออยู่ในรูปของสารอินทรีย์ออกจากน้ำเสีย ในขั้นตอนนี้ โรงบำบัดแห่งนี้มีจุดเด่นคือ ใช้กระบวนการตะกอนเร่งแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Activated Sludge Process) เพราะเป็นเทคโนโลยีที่พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบตะกอนเร่งแบบธรรมดา (Convention Activated Sludge) มีความคล่องตัวในการปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงสภาพการทำงานได้ดีที่สุด และมีความสามารถในการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสด้วย

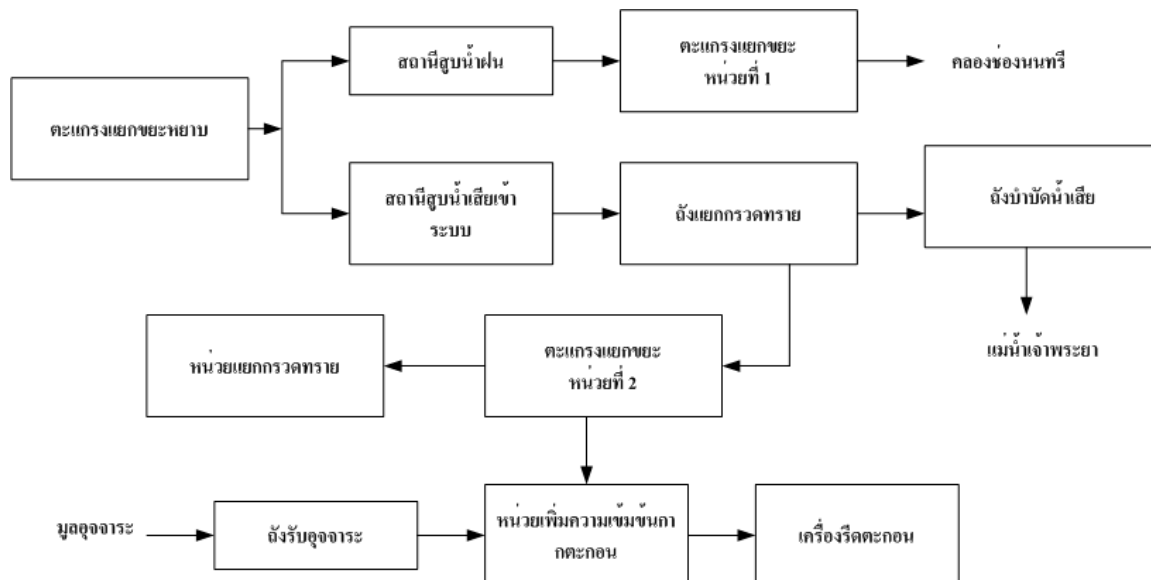
การบำบัดขั้นตอนสุดท้าย ระบบบำบัดตะกอนจะประกอบด้วย ถังเพิ่มความเข้มข้นตะกอน ทำหน้าที่เพิ่มความเข้มข้นตะกอนส่วนเกินที่จะนำไปทิ้ง จากความเข้มข้น 1% ให้มีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นประมาณ 5% โดยใช้แรงโน้มถ่วงของโลก และเครื่องรีดน้ำออกจากตะกอน ซึ่งจะทำหน้าที่รีดน้ำที่มีอยู่ในตะกอนที่จะทิ้งออก โดยให้น้ำเหลืออยู่ไม่เกิน 80% โดยเครื่องจักรที่เรียกว่า Belt Press ซึ่งตะกอนที่ได้จะถูกนำไปที่ถังพักตะกอนแห้งเพื่อรอการขนไปทิ้งต่อไป

2.2.3 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำชองนนทรี (ยานนาวา)

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำชองนนทรี เป็นโรงบำบัดน้ำเสียรวมขนาดใหญ่ จะรวบรวมน้ำเสียได้จากระบบบ่อรวบรวมน้ำเสียซึ่งจะรับทั้งน้ำฝน และน้ำเสียไปบำบัด นอกจากนี้ระบบรวบรวมน้ำเสียยังได้จาก สถานีสูบน้ำย่อย 3 แห่ง สถานีสูบน้ำเสียพระราม3 สถานีสูบน้ำเสียสาทร และสถานีสูบน้ำเสียเจริญกรุง เข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสีย โดยโรงบำบัดตั้งอยู่บนพื้นที่ บริเวณปากคลองชองนนทรี ถนนพระราม3 มีพื้นที่โรงควบคุมคุณภาพน้ำ 20 ไร่ ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในเขตยานาวา เขตสาทร เขตบางรัก และเขตบางคอแหลม รวมมีพื้นที่ครอบคลุม 28.5 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมีประชากรอยู่อาศัยประมาณ 580,000 คน

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำชองนนทรี เป็นโรงบำบัดน้ำเสียรวม เป็นอาคารคอนกรีต 4 ชั้น ที่มีความสามารถบำบัดน้ำเสียได้วันละ 20,000 ลูกบาศก์เมตร และมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยระบบตะกอนเร่งแบบ Cyclic Activated Sludge System (CASS™) ในแต่ละชั้นประกอบด้วยบ่อบำบัดน้ำเสียขนาด 17.5 X 60.0 เมตร ลึก 4.8 เมตร จำนวน 6 บ่อ แต่ละบ่อสามารถบำบัดได้เบ็ดเสร็จในวัฏจักรบำบัดน้ำเสียใน 1 รอบ ใช้เวลา 4 ชั่วโมง นับจากสูบน้ำเข้าบ่อบำบัด เติมน้ำอากาศ ตกตะกอน จนกระทั่งปล่อยน้ำที่ได้รับการบำบัดแล้วออกสู่แม่น้ำเจ้าพระยา โดยมีการตรวจวัดควบคุมคุณภาพน้ำคุณภาพน้ำเสีย โดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD, COD และ Solid Suspension

ซึ่งโรงบำบัดแห่งนี้สามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียเข้า 148 มิลลิกรัมต่อลิตรให้มีค่า BOD ขาออกจากระบบเป็น 3.6 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.4 กระบวนการบำบัดตะกอนแรงที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำช่องนนทรี

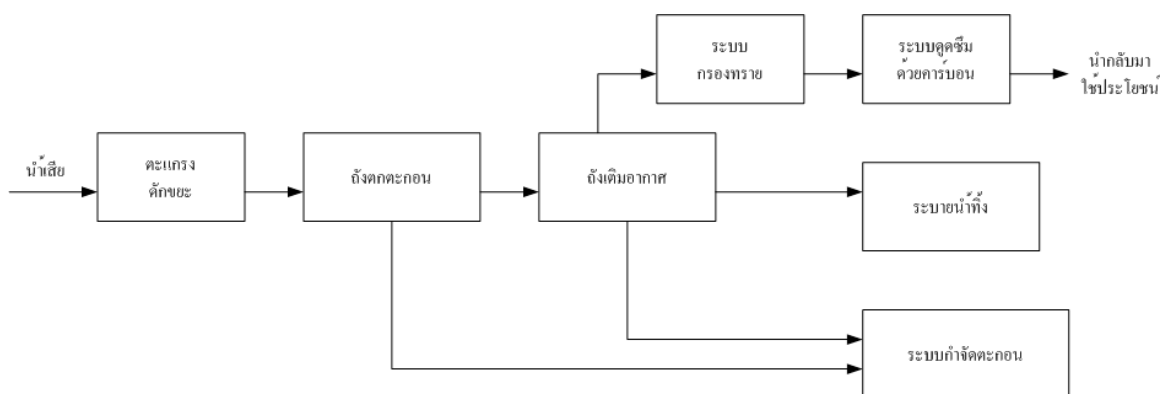
จากรูป 2.4 กระบวนการบำบัดน้ำเสียประกอบด้วย ห้องรับน้ำเข้า (Inlet Chamber) น้ำเสียจากท่อรวบรวมน้ำเสียจะเข้ามายังห้องรับน้ำเข้าเป็นหน่วยแรก และผ่านตะแกรงดักขยะแบบหยาบ เพื่อแยกขยะชิ้นใหญ่ออกจากน้ำเสียที่จะผ่านต่อไปยัง สถานีสูบน้ำเสียสูบน้ำเข้าระบบ (Inlet Pumping Station) จะทำหน้าที่สูบน้ำเสียเข้าสู่กระบวนการบำบัด นอกจากนั้นในกรณีน้ำเสียมีมากเกินไปเนื่องจากปริมาณน้ำฝนจะไหลล้นไปรวมกันที่สถานีสูบน้ำฝน (Storm Pumping Station) จากนั้นน้ำเสียจะถูกสูบไปผ่านตะแกรงดักขยะแบบคราดหมุน เพื่อคัดขยะออกก่อนปล่อยลงสู่คลองช่องนนทรี ส่วนน้ำเสียที่ยังอยู่ในระบบจะถูกส่งต่อไปยัง ถังแยกกรวดทราย (Dynamic Separator) ทำหน้าที่แยกกรวดทรายและเศษขยะขนาดเล็กออกจากน้ำเสียโดยใช้วิธีการหมุนวนจะทำให้กรวดทรายและเศษขยะที่มีน้ำหนักมากตกลงสู่ก้นถัง ต่อจากนั้นจะสูบไปยัง Underflow Screen เพื่อแยกขยะ และ Grit Classifier เพื่อแยกกรวดทราย แล้วน้ำเสียจะผ่านเข้าถังบำบัดน้ำเสีย (CASS Basin) ที่ใช้ระบบ CASS (Cyclic Activated Sludge System) น้ำที่หลักของถังบำบัดน้ำเสีย คือลดปริมาณสารอินทรีย์ (BOD) สารแขวนลอย ไนโตรเจนและฟอสฟอรัส เมื่อน้ำที่ผ่านการจากถังบำบัดจะถูกส่งผ่านไปยัง Outfall Cascade เป็นจุดปล่อยน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วลงสู่แม่น้ำเจ้าพระยา มีลักษณะเป็นขั้นบันไดเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ

นอกจากระบบบำบัดน้ำเสียแล้ว โรงบำบัดน้ำเสียแห่งนี้ยังมีหน่วยบำบัดมูลอุจจาระอีกด้วย กล่าวคือ มูลอุจจาระจะถูกป้อนมายังถังรับอุจจาระ ซึ่งประกอบด้วย หน่วยแยก (Screening) หลายชนิดรวม ทั้งมีการกวนเพื่อไม่ให้เกิดการทับถมและอัดกันแน่น เมื่อตะกอนมูลอุจจาระเข้าถังแล้วจะถูกสูบไป ยังหน่วยเพิ่มความเข้มข้นของกากตะกอน โดยให้มีการตกตะกอน และกวนเป็นระยะเพื่อป้องกันการ รวมตัวจนเป็นก้อนแข็ง จากนั้นจะถูกนำไปยังเครื่องรีดตะกอนเพื่อรีดเอาน้ำออกให้มากที่สุด จากนั้นกากตะกอนที่ได้จะถูกนำมาผสมกับปูนขาวเพื่อปรับค่า pH และฆ่าเชื้อแบคทีเรียที่ทำให้ตะกอน เน่าเสีย เกิดกลิ่นเหม็น

2.2.4 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลแสนสุข จ.ชลบุรี

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลแสนสุข เป็นโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียรวม ตั้งอยู่บริเวณ หาดวอนนภา เทศบาลแสนสุข มีพื้นที่ประมาณ 20,268 ตารางกิโลเมตร จำนวนบ้านที่อยู่อาศัย 18,019 ครัวเรือน มี ประชากรทั้งสิ้น 39,094 คน (เมษายน 2544) รับน้ำเสียจากกิจกรรมต่างๆ ของประชาชนที่อยู่ในชุม ชน เช่น จากอาคารบ้านเรือน โรงแรม โรงพยาบาล โรงเรียน ร้านค้า ตลาดสด สำนักงาน และจาก กิจกรรมท่องเที่ยว โดยเทศบาลได้มีท่อรวบรวมน้ำเสียรวมสายหลักความยาวท่อรวบรวมกว่า 30 กิโลเมตร และท่อรวบรวมน้ำเสียจากอาคารตามถนน ตรอกและซอยยาวรวมกว่า 100 กิโลเมตร

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียเทศบาลแสนสุขได้ มีความสามารถในการบำบัดน้ำเสียได้วันละ 9,000 ลูกบาศก์เมตร ใช้กระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่ง ชนิดคลองวนเวียน ซึ่งเป็นระบบการบำบัดน้ำ-เสียที่นิยมใช้กันค่อนข้างมากในประเทศไทย เพราะเป็นระบบที่มีการควบคุมดูแลไม่ยุ่งยากและโดย ปกติจะได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ได้มาตรฐานน้ำทิ้งอย่างสม่ำเสมอ หลักการ รูปแบบของถังเป็นลักษณะ คลองวนเวียน โดยยังคงเป็นถังแบบผสมสมบูรณ์ดี การไหลของน้ำในถังประมาณ 0.25 ถึง 0.35 เมตรต่อวินาที แต่ต้องการเวลาในการเก็บกักนานประมาณ 24 ชั่วโมง หรือมากกว่า และมีอายุสลัดจ์ (Sludge Age) นานเท่ากับกระบวนการเติมอากาศยี่สิบเวลา ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเทศบาลตำบลแสนสุข

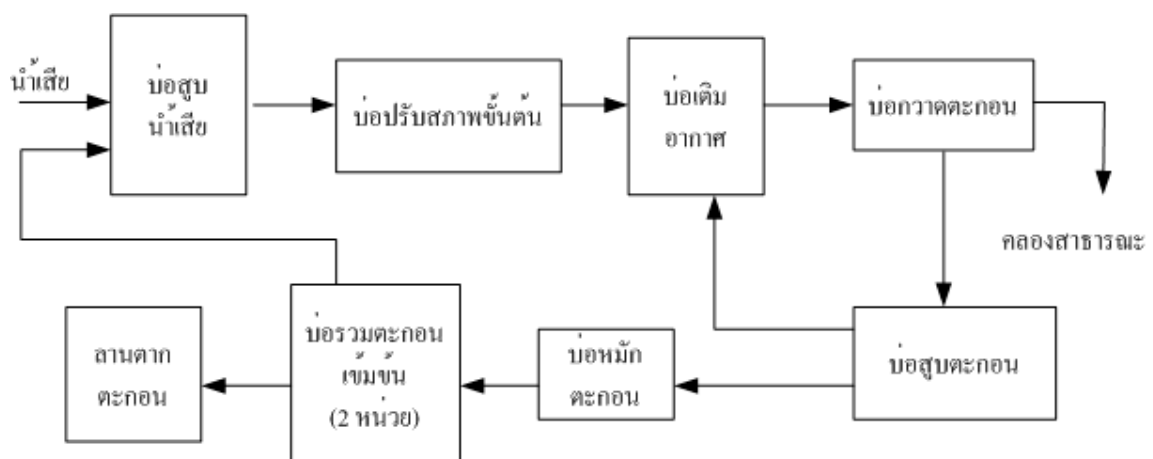
โรงบำบัดน้ำเสียแห่งนี้มีขั้นตอนการบำบัดหลักๆ 4 ขั้นตอน ดังนี้

- . การบำบัดขั้นต้น : ได้แก่การตกตะกอน ปลูกขนาดใหญ๋ ด้วยตะแกรง และมีถังกำจัดตะกอนหนัก
- . การบำบัดขั้นที่สอง : น้ำเสียที่เข้าสู่ขั้นตอนนี้จะเป็นการบำบัดน้ำเสียชีวภาพ ระบบเติมอากาศในคลองวนเวียนและใช้ตะกอนย้อนกลับ จากนั้นจะส่งต่อไปยังถังตกตะกอน
- . การบำบัดขั้นสูง : ในขั้นตอนนี้ น้ำใสจะมีการเติมคลอรีน เพื่อฆ่าเชื้อโรค ก่อนระบายลงสู่คลองสาธารณะ นอกจากนั้นยังมีการบำบัดขั้นสูงคือ มีระบบกรองทราย และระบบดูดซึมด้วยคาร์บอน เพื่อนำน้ำที่ได้มาใช้ประโยชน์ เช่น รดน้ำต้นไม้ หล่อเย็นเครื่องจักร ล้างรถ เป็นต้น
- . การบำบัดตะกอน : การกำจัดตะกอนหลังผ่านกระบวนการชีวภาพ จากคลองวนเวียนแล้วจะเกิดตะกอนที่มีลักษณะเป็นของเหลวข้น ซึ่งไปตกตะกอนที่บ่อตกตะกอน กวาดตะกอนที่ก้นบ่อออกอย่างช้าๆ ปล่อน้ำใสออกไปกบ่อ นำตะกอนที่กวาดได้จากบ่อตกตะกอนมารีดน้ำออกที่โรงรีดตะกอน จะได้ตะกอนที่สามารถนำไปปรับสภาพเพื่อใช้ทำปุ๋ยต่อไป

2.2.5 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำคลองเตย

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำคลองเตย เดิมมีชื่อว่า “โรงงานบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนคลองเตย” ซึ่งตั้งอยู่ในเขตคลองเตย มีขนาดพื้นที่โรงบำบัดน้ำเสีย 880 ตารางเมตร ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในพื้นที่ประมาณ 33.6 ไร่ โดยเฉพาะเคหะชุมชนห้วยขวาง ซึ่งมีประชากรอยู่พักอาศัยประมาณ 7,200 คน

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำคลองเตย จัดเป็นโรงบำบัดน้ำเสียเคหะชุมชนที่มีความสามารถบำบัดน้ำเสียจำนวน 1,000-1,200 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน และมีการจัดการน้ำเสียด้วยระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งแบบธรรมดา (Conventional Activated Sludge) น้ำเสียจะถูกรวบรวมด้วยระบบ Separated Systems ซึ่งจะแยกน้ำฝนออกไปต่างหาก ไม่ปล่อยเข้าสู่ระบบบำบัด สำหรับน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบประกอบไปด้วย น้ำอุจจาระ น้ำปัสสาวะ จากห้องส้วม น้ำทิ้งจากห้องครัวที่ใช้ในการทำ ความสะอาดต่างๆ อนึ่งระบบบำบัดในชุมชนแห่งนี้ ไม่มีบ่อเกรอะสำหรับบำบัดในขั้นต้น และน้ำเสียทั้งหมดจะถูกนำไปผ่านกระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Completely Mixed) โดยมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD, DO, COD, สารแขวนลอยของแข็ง, สีและความขุ่น และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าจาก 276 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่า BOD ขาออกเป็น 18 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.6 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำคลองเตย

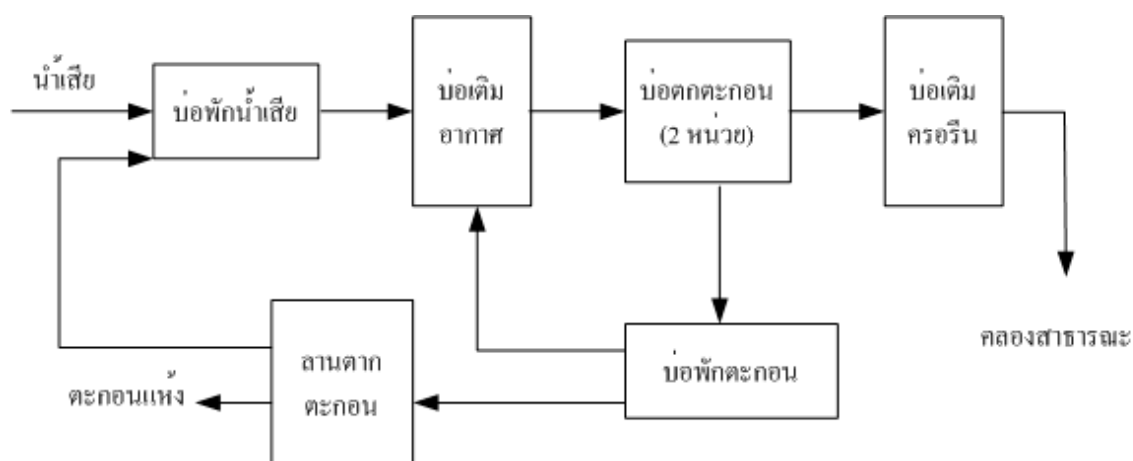
จากรูปที่ 2.6 ระบบท่อน้ำเสีย ที่ส่งมายังโรงบำบัดฯ เป็นแบบ Separated System ซึ่งได้แยกน้ำฝนออกไปต่างหาก ไม่ปล่อยให้เข้าสู่ระบบบำบัด อนึ่งระบบบำบัดแห่งนี้ ไม่มีบ่อเกรอะสำหรับบำบัดในขั้นต้น จากรูปที่ 2.6 จะเห็นว่า น้ำเสียไหลเข้าสู่บ่อน้ำเสีย ซึ่งมีตะกอนหนา จะดักระยะขนาดใหญ่ และจะสูบน้ำเสียไปต่อยังบ่อปรับสภาพขั้นต้น ซึ่งจะเป็นบ่อผึ่งน้ำเสียกลางแจ้ง เพื่อให้กรวดทรายตกตะกอนลง ต่อจากนั้นจึงสูบน้ำเสียต่อไปยังบ่อเติมอากาศ โดยมีเครื่องเติมอากาศบนผิวน้ำ หลังจากเก็บกักในบ่อเติมอากาศ 4-6 ชั่วโมง น้ำที่ได้รับการบำบัดจะไหลล้น เข้าบ่อกวาดตะกอน เพื่อแยกน้ำใสออกจากตะกอน

ระบบกำจัดตะกอนจะประกอบด้วย บ่อกวาดตะกอน (Final Clarifier) มีจำนวน 2 บ่อเพื่อส่งต่อไปยังบ่อสูบตะกอนซึ่งมีเครื่องสูบตะกอนแบบแช่ จำนวน 2 เครื่อง จะสูบตะกอนส่วนหนึ่งไปยังบ่อเติมอากาศ เพื่อเติมตะกอนในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ สำหรับส่วนตะกอน ที่เกินจะสูบไปเก็บไว้ในบ่อหมักตะกอนเป็นบ่อเก็บตะกอนส่วนที่เกินจากบำบัดไว้ โดยมีเครื่องเติมอากาศ ชนิดเป่าลม (air blower) จำนวน 1 เครื่อง ขนาด 10 แรงม้า ช่วยเติมอากาศให้ออกซิเจนก่อนที่จะส่งไปยัง บ่อรวมตะกอนเข้มข้นโดยใช้แบบน้ำล้น เป็นถังเก็บตะกอน มีจำนวน 2 บ่อ ซึ่งเป็นถังขั้นสุดท้าย ในการรวมตะกอนก่อนที่จะส่งตะกอนไปยังลานตากตะกอน ใช้วิธีส่งผ่านในระบบใช้ลมดึงจากเครื่องเป่าอากาศ พร้อมตะกอนไปยังบ่อตากตะกอน สำหรับน้ำเสียส่วนที่เหลือจะล้นไปยังท่อระบายส่งไปยังบ่อรวบรวมน้ำเสียต่อไปลานตากตะกอน (Sludge Drying Bed) มีจำนวน 4 บ่อ พื้นที่ประมาณ 167 ตารางเมตร จะตากตะกอนทิ้งไว้ประมาณ 7-10 วัน ก็จะแห้งจากนั้นจะทำการขนไปทิ้ง หรือใส่ต้นไม้เพื่อเป็นปุ๋ยต่อไป

2.2.6 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำบางนา

โรงงานปรับปรุงคุณภาพน้ำแห่งนี้ ตั้งอยู่ที่ กม.4 ถนนบางนา-ตราด มีขนาดพื้นที่โรงบำบัดน้ำเสีย 3,524 ตารางเมตร ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในพื้นที่ประมาณ 50 ไร่ 3 งาน 57 ตารางวา โดยรับน้ำเสียจากเคหะชุมชนบางนา ซึ่งมีจำนวนแฟลต 10 หลัง มีจำนวนห้องพักรวม 1,656 ห้อง มีประชาชนอาศัยประมาณ 8,280 คน

น้ำเสียจำนวน 1,300 ลูกบาศก์เมตร/วัน จะถูกรวบรวมโดยท่อน้ำเสียจากแฟลตโดยทั่วไปแล้วจะได้จากการใช้ภายในชุมชน อาทิเช่น การชำระร่างกาย การซักเสื้อผ้า การประกอบปรุงอาหาร การขับถ่ายของเสีย ฯลฯ จะถูกนำไปผ่านกระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่ง ชนิดคลองวนเวียน (Oxidation Ditch) โดยมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD, COD และ Solid Suspension และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าจาก 189 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่า BOD ขาออกเป็น 6.7 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.7 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำบางนา

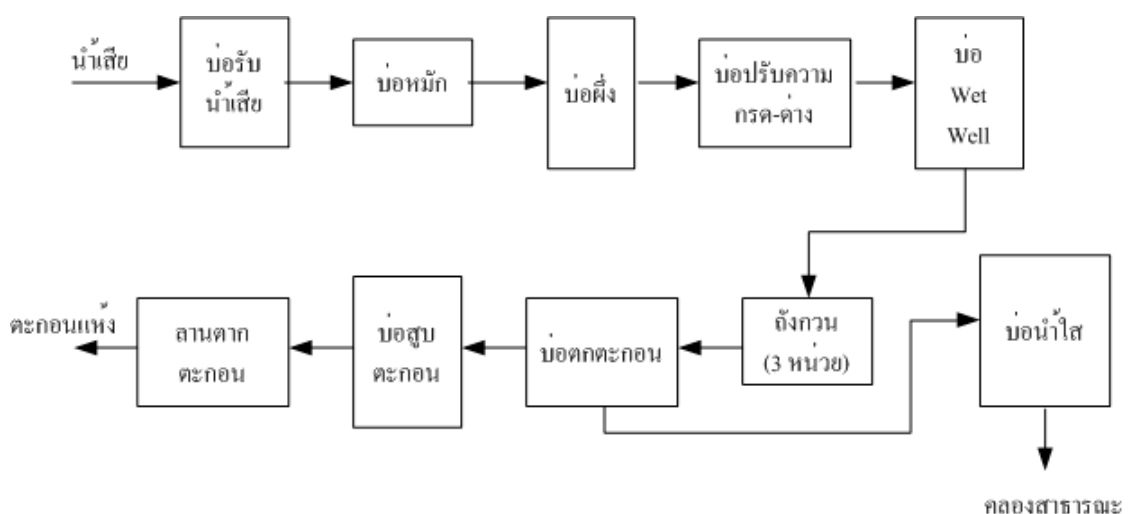
จากรูปที่ 2.7 น้ำเสียจะไหลผ่านตามท่อน้ำเสียผ่านตะแกรงดักขยะ ก่อนที่จะเข้าไปรวมในบ่อพักน้ำเสีย โดยน้ำเสียจะถูกสูบส่งต่อไปยังบ่อเติมอากาศ ที่มีความจุประมาณ 2,650 ลูกบาศก์เมตร ที่มีการบำบัด โดยใช้จุลินทรีย์พวกใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ น้ำจากบ่อเติมอากาศจะถูกส่งไปที่บ่อตกตะกอนซึ่งมีจำนวน 2 บ่อ ในบ่อตกตะกอนนี้ส่วนของน้ำจะถูกแยกออกจากตะกอนจุลินทรีย์ โดยน้ำใสจะไหลล้นไปยังบ่อเติมคลอรีน เพื่อฆ่าเชื้อโรคก่อนที่จะปล่อยสู่คลองสาธารณะ

ตะกอนจุลินทรีย์จะตกลงสู่ก้นถังหลังจากนั้นจะถูก ระบายไปยังบ่อพักตะกอน โดยตะกอนบางส่วนจะถูกสูบหมุนเวียนไปยังบ่อเติมอากาศ เพื่อรักษาสมดุลระหว่างจุลินทรีย์และสารอินทรีย์ในบ่อเติมอากาศให้พอเหมาะ ตะกอนส่วนเกินจะถูกสูบไปยังลานตากตะกอนที่มีพื้นที่ 300 ตารางเมตร เป็นเวลาประมาณ 7-10 วัน เมื่อตะกอนแห้งสามารถนำไปเป็นปุ๋ยในการปลูกต้นไม้หรือถมที่ต่อไป

2.2.7 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุช

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุช มีขนาดพื้นที่โรงบำบัดน้ำเสีย 20,000 ตารางเมตร ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในเขตประเวศ พื้นที่บริการ 928,000 ตารางเมตร และมีกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างจาก โรงบำบัดน้ำเสียแหล่งอื่นที่กล่าวมา กล่าวคือไม่ได้ใช้กระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) แต่ใช้กระบวนการ Solid Contact Process ซึ่งเป็นระบบบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Treatment System) เป็นวิธีที่ไม่ต้องเติมออกซิเจนหรือนิยมเรียกว่า ระบบไร้ออกซิเจนหรือถังหมัก ระบบนี้เริ่มนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากขึ้นเรื่อยๆ เพราะสามารถประหยัดพลังงานในการเติมอากาศ และยังได้พลังงานพลักรงานที่เกิดจากระบบไร้ออกซิเจน ได้แก่ ก๊าซมีเทนเป็นต้น ในอดีตเข้าใจกันว่าการบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาสนั้น จำเป็นต้องใช้น้ำเสียที่มีปริมาณออกซิเจนน้อยมาก (BOD มากๆ) แต่ปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาขึ้นเรื่อยๆ จนสามารถบำบัด BOD ต่ำๆ ได้ เช่น น้ำเสียจากชุมชนเป็นต้น

ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เป็นการเปลี่ยนสภาพจากสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียไปเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และอื่นๆ ระบบนี้มี ปฏิกริยาชีวเคมีที่ซับซ้อนกว่าระบบใช้อากาศมาก โดยต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ คือ ค่า BOD, pH หรือความเป็นกรดเป็นด่างในระบบ ที่อยู่ประมาณ 7-8 และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือต้องอยู่ในช่วง 37-40 องศาเซลเซียส และสำหรับโรงบำบัดแห่งนี้มีการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD, COD, สีและความขุ่น และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าจาก 279 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่า BOD ขาออกเป็น 96 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.8 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุช

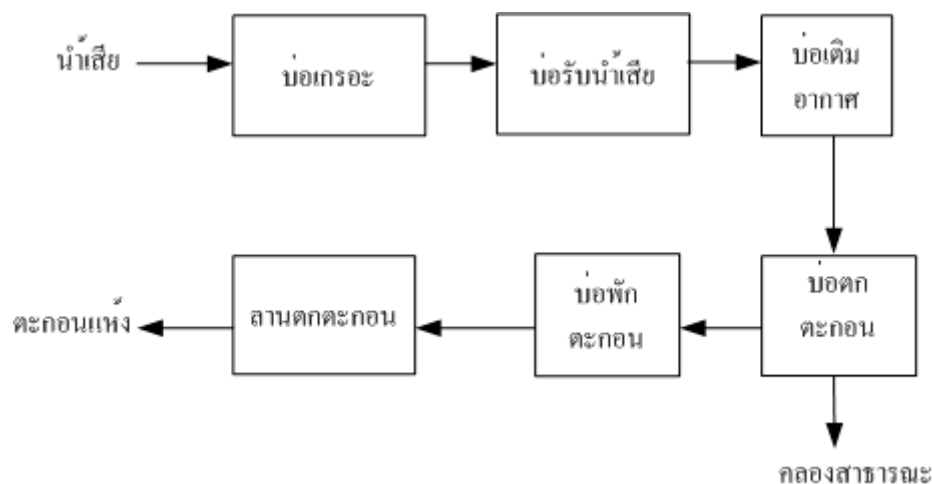
จากรูปที่ 2.8 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุชสามารถบำบัดน้ำเสียได้วันละ 2,400 ลูกบาศก์เมตร น้ำเสียจะถูกส่งเข้าสู่บ่อรับน้ำเสีย เป็นบ่อดินสำหรับเก็บกักน้ำเสียและดักขยะ จากนั้นจะสูบน้ำเสียต่อไปยังบ่อหมัก (Anaerobic Pond) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์ ชนิดไม่ใช้ออกซิเจน และส่งต่อน้ำเสียต่อไปยัง บ่อผึ่ง (Facultative Pond) ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์อีกครั้งโดยจุลินทรีย์ ชนิดใช้และไม่ใช้ออกซิเจน ต่อด้วยบ่อปรับความเป็นกรด-ด่าง (pH-Controller) จะมีการเติมสารส้ม และกรดกำมะถันเพื่อ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง ประมาณ 5.7-6 บ่อ Wet Well ทำหน้าที่ลดแรงดันน้ำก่อนส่งต่อไปยังถังกวน (Mixing Tank) จำนวน 3 ใบ ทำหน้าที่กวนผสมของเสียรวมตัวเข้ากับสารเคมี เพื่อให้ตะกอนจับตัวเร็วขึ้น และในขั้นตอนต่อไปก็เป็นบ่อดกตะกอน

บ่อดกตะกอน (Sedimentation Tank) ตะกอนหนักจะตกลงสู่ก้นถังและถูกกวาดและถูกสูบไปรวมกันที่บ่อสูบตะกอน ส่วนน้ำใสส่วนบนจะไหลล้นไปยังบ่อน้ำใสต่อไปก่อนปล่อยลงสู่คลองสาธารณะ ตะกอนที่ได้จากบ่อดกตะกอนจะถูกสูบไปยังลานทรายตากตะกอน ที่ตากแดดให้แห้ง แล้วนำตะกอนที่แห้งไปถมปรับแต่งพื้นที่ หรือนำไปทำปุ๋ยต่อไป

2.2.8 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำท่าทราย

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำท่าทราย เป็นโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียชุมชน ตั้งอยู่บริเวณชุมชนท่าทราย เขตหลักสี่ มีขนาดพื้นที่โรงบำบัดน้ำเสีย 2,600 ตารางเมตร ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในเขตหลักสี่ พื้นที่ 233 ไร่ มีประชาชนอาศัยประมาณ 7,095 คน

น้ำเสียจำนวน 1,200 ลูกบาศก์เมตร/วัน จากการใช้ภายในชุมชน อาทิเช่น การชำระร่างกาย การซักเสื้อผ้า การประกอบปรุงอาหาร การขับถ่ายของเสีย ฯลฯ โดยได้รับน้ำเสียจากระบบท่อรวบรวมน้ำเสียในบริเวณพื้นที่เคหะชุมชนท่าทราย เป็นระบบท่อระบายน้ำเสียรวม (Combine System) โดยจะรวมระบบระบายน้ำเสียและระบบระบายน้ำฝนเข้าด้วยกันเข้าสู่ระบบบำบัด น้ำเสียในส่วนองปริมาณที่มากเกินไปจะล้น (Over Flow) ลงสู่คลองสาธารณะด้านหลังของระบบบำบัดน้ำเสีย ส่วน น้ำเสียที่เหลือจะถูกนำไปผ่านกระบวนการบำบัดแบบตะกอนเร่งแบบธรรมชาติ คือประกอบด้วยบ่อเติมอากาศ และบ่อดกตะกอนเป็นหลัก และไม่มีการใช้สารเคมีในกระบวนการบำบัด โดยมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD, COD และ Solid Suspension และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าจาก 73 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่า BOD ขาออกเป็น 16 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 2.9 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำท่าทราย

จากรูปที่ 2.9 โรงบำบัดแห่งนี้มีขั้นตอนการบำบัดหลักๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้

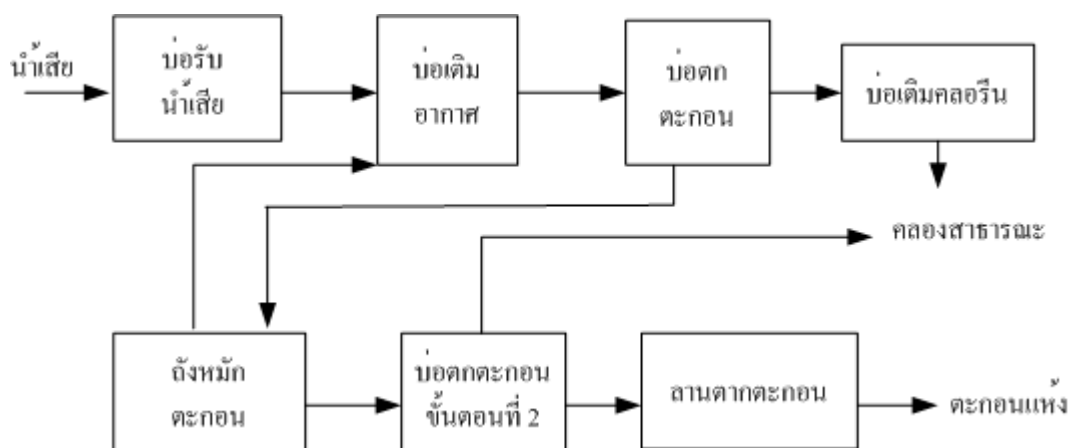
- . การบำบัดขั้นแรก : เป็นการกำจัดสารมลพิษออกจากน้ำเสียด้วยระบบทางกายภาพ ได้แก่ การตกตะกอน ด้วยตะแกรงหยาบ (Coarse Screen) บริเวณบ่อรับน้ำเสีย
- . การบำบัดขั้นตอนที่สอง : เป็นการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการทางชีววิทยา โดยน้ำเสียจากบ่อเติมอากาศจะไหลไปยัง ถังตกตะกอน เพื่อแยกน้ำใสออกจากตะกอน จุลินทรีย์ ส่วนน้ำใสที่ผ่านการบำบัดแล้วจะปล่อยลงสู่แม่น้ำลำคลองต่อไป
- . ระบบการกำจัดตะกอน : มีความคล้ายคลึงกับ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำอ่อนนุช คือเป็นระบบลานทรายตกตะกอน รวมทั้งการนำกากตะกอนไปถมปรับแต่งพื้นที่ หรือนำไปทำปุ๋ยต่อไป

2.2.9 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำทุ่งสองห้อง 2

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำทุ่งสองห้อง 2 เป็นโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียเคหะชุมชนรองรับน้ำเสียจากเคหะชุมชนทุ่งสองห้อง เขตดอนเมือง มีขนาดพื้นที่โรงบำบัดน้ำเสีย 1,240 ตารางเมตร ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในเขตดอนเมือง พื้นที่ 29.82 ไร่ มีประชาชนอาศัยประมาณ 5,555 คน โดยใช้ระบบตะกอนเร่งแบบหมุนเวียน (Septic Tank & Activated Sludge) โดยก่อนที่น้ำเสียจะไหลเข้าสู่ระบบการกำจัดน้ำเสียรวมจะมีการผ่านบ่อเกรอะก่อน (Septic Tank) น้ำเสียจำนวน 474 ลูกบาศก์

เมตรต่อวัน จะได้รับจากการใช้ภายในเคหะ อาทิเช่น การชำระร่างกาย การซักเสื้อผ้า การประกอบปรุงอาหาร การขับถ่ายของเสีย ฯลฯ โดยจะรับน้ำเสียจากระบบท่อรวบรวมน้ำเสียในบริเวณพื้นที่เคหะชุมชน เป็นระบบท่อระบายน้ำเสียรวม (Combine System) ซึ่งทำหน้าที่รวมเอา

ระบบระบายน้ำเสีย และระบบระบายน้ำฝนเข้าด้วยกันเข้าสู่ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง โดยมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD, COD และ Solid Suspension และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าจาก 273 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่า BOD ขาออกเป็น 21 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนั้นยังมีการเติมคลอรีน เพื่อฆ่าเชื้อโรค หลังจากน้ำเสียผ่านการบำบัดแล้ว ซึ่งต่างจาก โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำท่าทราย ซึ่งมีลักษณะแสดงไว้ในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำทั้งสองห้องแห่งที่ 2

เมื่อน้ำเสียและน้ำฝน จากชุมชนถูกรวบรวมผ่านระบบท่อร่วมมายังบ่อรับน้ำเสียที่มีตะแกรงดักขยะขนาดใหญ่ และถูกสูบต่อไปยังบ่อเติมอากาศ เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ ในน้ำเสีย ต่อจากนั้นน้ำเสียจะไหลลงเข้าสู่บ่อดกตะกอนชั้นที่ 1 (Primary Settling Tank) เพื่อให้ตะกอน จุลินทรีย์ตกลงก้นบ่อ ส่วนน้ำใสจะไหลลงสู่บ่อเติมคลอรีน เพื่อฆ่าจุลินทรีย์ที่ยังหลงเหลือในน้ำ แล้วปล่อยลงสู่คลองสาธารณะ

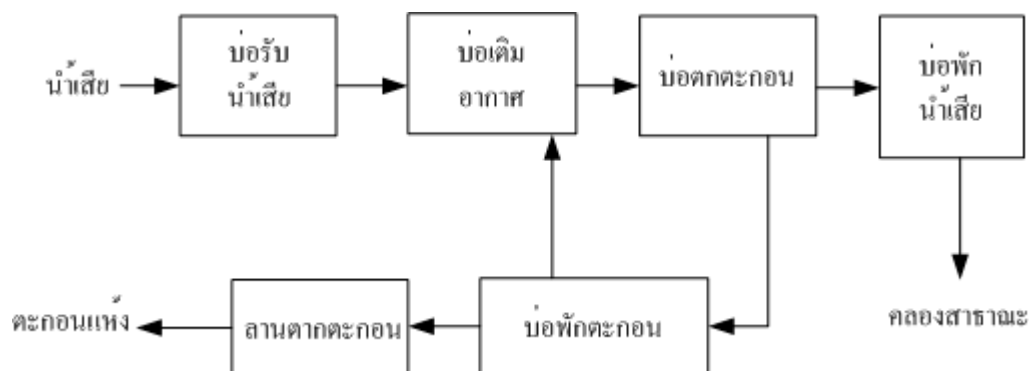
ตะกอนจากบ่อดกตะกอนชั้นที่ 1 จะถูกสูบมายังถังหมักตะกอน (Sludge Digestion Tank) เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของกากตะกอน โดยตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกเวียนกลับไปยังบ่อเติมอากาศเพื่อเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ ตะกอนเมื่อผ่านจากถังหมักตะกอนซึ่งมีความเข้มข้นมากขึ้น จะถูกสูบมายังบ่อดกตะกอนชั้นที่ 2 (Secondary Settling Tank) แล้วสูบน้ำใส ปล่อยลงสู่คลองสาธารณะ ส่วนตะกอนที่

กันถึงตกตะกอนขั้นที่ 2 นี้ จะถูกสูบมายังลานทรายตกตะกอน เพื่อให้ตะกอนแห้งแล้วนำไปถมต่อไป

2.2.10 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรามอินทรา

โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรามอินทรา เป็นโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียเคหะชุมชนรองรับน้ำเสียจากเคหะชุมชนรามอินทรา มีขนาดพื้นที่โรงบำบัดน้ำเสีย 2,106 ตารางเมตร ดำเนินการปรับปรุงคุณภาพน้ำในเขตบางเขน พื้นที่ 52 ไร่ มีประชาชนอาศัยประมาณ 4,056 คน

น้ำเสียจำนวน 600-700 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จะได้รับจากแพลตฟอร์มที่อยู่อาศัยในชุมชนโดยน้ำเสีย ก่อนที่จะไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียรวม จะผ่านบ่อเกรอะก่อนซึ่งจะมีอยู่ตามแพลตฟอร์มต่างๆก่อนจะเข้าสู่ระบบรวม และผ่านเข้าสู่ระบบตะกอนเร่งแบบการเติมอากาศยืดเวลา (Extended Aeration Process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีระยะเวลาเก็บกักของน้ำเสียและอายุสัปดาห์นานกว่าระบบตะกอนเร่งอื่นๆ ดังนั้นขนาดถังเติมอากาศจะมีขนาดใหญ่กว่าระบบอื่นๆ และให้ตะกอนน้อย นอกจากนั้นก่อนน้ำเสียหรือน้ำโสโครก จะไหลเข้าสู่บ่อรวบรวมน้ำเสียจะต้องผ่านบ่อเกรอะเพื่อบำบัดมูลอุจจาระก่อน ซึ่งคล้ายคลึงกับ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำทุ่งสองห้อง 2 โดยมีการตรวจวัดคุณภาพน้ำเสียโดยใช้พารามิเตอร์ pH, BOD และ Solid Suspension และประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสามารถลดค่า BOD ของน้ำเสียขาเข้าจาก 138 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีค่า BOD ขาออกเป็น 15 มิลลิกรัมต่อลิตร



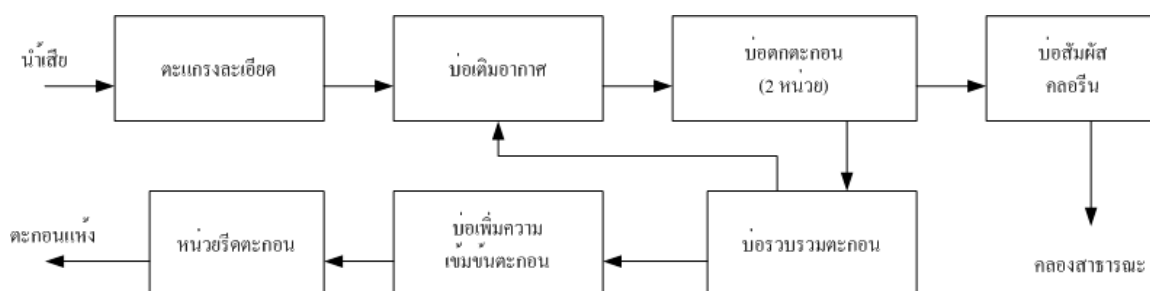
รูปที่ 2.11 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรามอินทรา

จากรูปที่ 2.11 เมื่อน้ำเสียได้ผ่านบ่อเกรอะแล้วจะเข้าสู่บ่อรับน้ำเสียรวมที่มีตะแกรงดักขยะ ก่อนที่จะเข้าสู่บ่อเติมอากาศที่มีการเติมอากาศบนพื้นผิวน้ำ เพื่อให้ออกซิเจนแก่จุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ น้ำเสียจะไหลลงมายังบ่อตกตะกอน เพื่อให้ตะกอนจุลินทรีย์ตกลงสู่ก้นถังและปล่อยน้ำลงสู่คลองสาธารณะต่อไป

ตะกอนจากบ่อดกตะกอนบางส่วนจะถูกสูบกลับ (Return Sludge) มายังบ่อเติมอากาศเพื่อรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศเพื่อรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ ส่วนตะกอนปริมาณส่วนเกินจะถูกสูบไปยังลานตากตะกอน แล้วนำตะกอนแห้งไปทำปุ๋ย

2.2.11 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

โรงบำบัดแห่งนี้มีระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง แบบธรรมดา และมีการเติมคลอรีนให้แก่ น้ำใสที่ผ่านจากถังตกตะกอน ก่อนปล่อยลงสู่คลองสาธารณะ ทางโรงพยาบาลได้ให้บริษัทเอกชนเข้าดำเนินการ ในการควบคุมพารามิเตอร์ในการตรวจวัดคุณภาพของน้ำ เช่น ค่า BOD, COD, pH, SS และความทึบแสง ประกอบกับตรวจประสิทธิภาพของระบบบำบัด และสำหรับประเภทของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจะได้จาก กิจกรรมการทำความสะอาด การขับถ่าย จากห้องต่างๆในโรงพยาบาล และหอพักของพนักงานที่อาศัยอยู่ในบริเวณของโรงพยาบาล



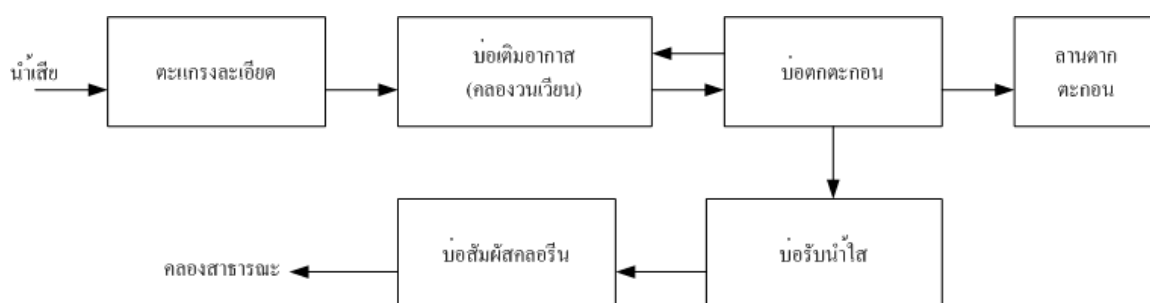
รูปที่ 2.12 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

จากรูปที่ 2.12 น้ำเสียที่รวบรวมจะถูกส่งผ่านมายังท่อรวบรวมน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด โดยผ่านตะแกรงละเล็ยดเพื่อคัด ขยะ สิ่งปฏิกูล และหินกรวด ทราบละเอียด เพื่อป้องกันไม่ให้เข้าสู่ระบบ จากนั้นจะถูกส่งต่อมาบ่อเติมอากาศ เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มากับน้ำเสีย และมีการเติมอากาศในถังตลอดเวลา โดยจะมีผู้ดูแลระบบเป็นผู้ตรวจปริมาณจุลินทรีย์ให้พอเหมาะ เมื่อผ่านบ่อเติมอากาศ ก็จะส่งน้ำเสียต่อไปยังบ่อดกตะกอนซึ่งโรงบำบัดแห่งนี้มีบ่อดกตะกอน 2 หน่วยเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพและรวดเร็ว เมื่อผ่านมาขั้นตอนของบ่อดกตะกอนจะได้น้ำใสออกมา และจะถูกส่งต่อไปยัง บ่อสัมผัสคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคและปล่อยน้ำลงสู่คลองสาธารณะ

ตะกอนจากระบบตกตะกอนจะถูกรวบรวมไว้ใน บ่อรวบรวมตะกอน ที่ทำหน้าที่ให้ตะกอนส่วนหนึ่งกลับไปยังบ่อเติมอากาศเพื่อรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในบ่อเติมอากาศ และส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปยังบ่อเพิ่มความเข้มข้นตะกอน ตะกอนที่ได้จะมีลักษณะเหลวข้นและมีกลิ่น จากนั้นตะกอนจะถูกส่งไปยังหน่วยรีดตะกอนเพื่อรีดน้ำออกจากตะกอนเพื่อให้ได้ตะกอนที่มีลักษณะแห้งออกมา

2.2.12 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล อำเภอสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

โรงพยาบาลแห่งนี้ มีความคล้ายคลึงกับโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ จังหวัดพระนครศรีอยุธยา คือมีบริษัทเอกชนเป็นผู้ตรวจคุณภาพน้ำ และดูแลประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย และประเภทของน้ำเสียก็จะได้จากการทำความสะอาดของการใช้ห้องพัก ห้องปฏิบัติการ ในโรงพยาบาล และห้องพักในบริเวณโรงพยาบาล ทางโรงพยาบาลจะไม่มีการเทของเหลวจากสารเคมีลงในท่อระบายน้ำ และได้แยกระบบของเสียจากสารเคมีออกจากระบบรวบรวมน้ำเสีย โรงพยาบาลแห่งนี้มีระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง ชนิดคลองวนเวียน และมีการเติมคลอรีนให้แก่ น้ำใสที่ผ่านจากถังตกตะกอน ก่อนปล่อยลงสู่คลองสาธารณะ ดังแสดงในรูปที่ 2.13

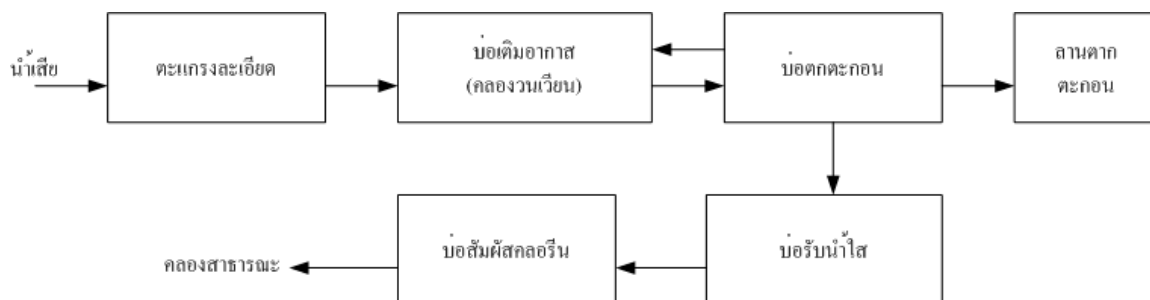


รูปที่ 2.13 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล อ.สนา จ. พระ-นครศรีอยุธยา

น้ำเสียจะถูกรวบรวมมายังบ่อรวบรวมน้ำเสีย ที่มีตะแกรงละเอียดดักขยะ ไม่ให้เข้าสู่ระบบบำบัด ในบ่อสูบน้ำเสียเข้าระบบจะมีลูกลอยที่ทำหน้าที่บอกระบบ ที่จะสูบน้ำเสียเข้าระบบ ให้เข้าสู่คลองวนเวียน ที่มีการเติมอากาศบนผิวน้ำ และส่งน้ำเสียต่อไปยังบ่อตกตะกอน ที่ทำหน้าที่ตกตะกอน และให้ตะกอนส่วนหนึ่งย้อนกลับสู่บ่อเติมอากาศ หลังจากนั้นน้ำเสียผ่านบ่อตกตะกอนจะได้ น้ำใสที่ล้นส่งต่อไปยังบ่อรับน้ำใส และต่อไปยังบ่อสัมผัสคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค ก่อนปล่อยลงสู่คลองสาธารณะ สำหรับตะกอนที่ตกลงสู่ก้นถังตกตะกอน จะถูกสูบต่อไปยังลานตากตะกอนต่อไป

2.2.13 โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล จังหวัดปทุมธานี

โรงบำบัดแห่งนี้ มีกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่เหมือนกับโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาลอำเภอเสนา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา เพราะบริษัทเอกชนที่ออกแบบการก่อสร้าง เป็น บริษัทเดียวกัน นอกจากนั้น การตรวจสอบคุณภาพน้ำ และประสิทธิภาพของระบบบำบัด ทางโรงพยาบาลได้จ้างบริษัทเอกชนเข้ามารับผิดชอบ เช่นกัน ประกอบกับประเภทของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจะมีความคล้ายคลึงกับ โรงพยาบาล เสนา คือ ไม่มีการบำบัดน้ำเสียที่เป็นสารเคมี เพราะทางโรงพยาบาลไม่เทสารเคมีในท่อบำบัดน้ำเสียรวมของโรงพยาบาล ดังนั้นระบบบำบัดน้ำเสียจึงเป็นการบำบัดทางชีวภาพเท่านั้น



รูปที่ 2.13 กระบวนการบำบัดตะกอนเร่งที่ใช้ในโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำโรงพยาบาล จังหวัดปทุมธานี

จากที่ได้นำเสนอตัวอย่างโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำข้างต้นจะสังเกตเห็นได้ว่า โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำทุกที่ใช้วิธีการบำบัดน้ำเสียด้วยกระบวนการตะกอนเร่งแทบทั้งสิ้น เนื่องจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพสูง และแต่ละที่มีเทคนิคในการบำบัดน้ำเสียที่แตกต่างกันตามลักษณะของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ

ถึงแม้ว่าโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำทุกที่จะมีกระบวนการที่คล้ายกัน แต่กากตะกอนที่ได้ของแต่ละก็มีลักษณะความแตกต่างกัน จากการศึกษาค้นคว้าวิธีหาค่าความร้อนที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่ละแหล่งให้ผลค่าความร้อนที่กระจัดกระจาย แต่ก็สามารถแบ่งออกได้ 3 กลุ่ม คือ กากตะกอนกลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนสูง, กากตะกอนที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนค่อนข้างต่ำ, กากตะกอนที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนต่ำ

2.3 องค์ประกอบของกากตะกอน

เนื่องจากลักษณะ และองค์ประกอบของกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียมีความแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบ และกระบวนการบำบัด ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่ากากตะกอนที่นำมาศึกษานี้อาจมีความแตกต่างกัน ด้วยเหตุนี้จึงได้ทำการศึกษาองค์ประกอบที่สำคัญของกากตะกอนจากแต่ละแหล่งว่าเป็นอย่างไร และสามารถนำข้อมูลองค์ประกอบของกากตะกอนนี้ไปใช้ในลักษณะใด

องค์ประกอบของกากตะกอนที่ทำการศึกษานั้นประกอบไปด้วย การศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate Analysis) การศึกษาองค์ประกอบแบบวิเคราะห์ธาตุ (Ultimate Analysis) และการวิเคราะห์โลหะหนักบางชนิดที่สำคัญในกากตะกอน ซึ่งการวิเคราะห์ทั้งสามชนิดนี้ ได้ทำการวิเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอนที่เก็บมาทั้ง 20 แห่ง เดือนละหนึ่งครั้ง จนครบ 12 เดือน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการตรวจสอบคุณภาพของกากตะกอนที่ผันแปรไปในแต่ละเดือนต่างๆ

2.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณ

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณ (Proximate Analysis of Sludge) นั้น เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในเชิงคุณสมบัติของกลุ่มสารประกอบซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter Content) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ซึ่งข้อมูลของแต่ละชนิดมีประโยชน์ดังต่อไปนี้

- **สารระเหย:** ปริมาณสารระเหยเป็นดัชนีชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมของกากตะกอนตัวอย่างในฐานะที่เป็นวัตถุดิบของกระบวนการไพโรไลซิสว่าจะสามารถได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (หรือ น้ำมันชีวภาพ) ได้มากหรือน้อยเพียงใด ด้วยเหตุนี้การหาปริมาณสารระเหยในกากตะกอนจึงมีความจำเป็นอย่างมาก
- **คาร์บอนคงตัว:** คาร์บอนคงตัวคือ คาร์บอนองค์ประกอบซึ่งไม่ได้อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งไม่มีการออกซิไดส์ คาร์บอนกลุ่มนี้จะรวมอยู่ในถ่านชาร์ (Char Coal) ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้เป็นดัชนีอย่างหนึ่งในการชี้ถึงปริมาณถ่านชาร์ที่ได้

- **เถ้า:** เนื่องจากในกากตะกอนมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ โดยมีหลักการคิดว่า ถ้านำสารประกอบเหล่านี้ไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้ส่วนที่เป็นเถ้าซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะเหล่านี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิส นั้นใช้อุณหภูมิไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ โลหะหนักเหล่านี้จึงค่อนข้างเสถียร และรวมอยู่ในถ่านชาร์ได้ ด้วยเหตุนี้ปริมาณเถ้าจึงอาจจะใช้เป็นอีกดัชนีในการชี้ถึงระดับปริมาณของถ่านชาร์ที่ได้ด้วย นอกจากนี้แล้วเนื่องจากปริมาณเถ้าเป็นส่วนที่ไม่มีคุณค่าในเชิงความร้อน ดังนั้นถ้ากากตะกอนมีปริมาณเถ้ามากก็ย่อมจะมีคุณค่าในเชิงความร้อนต่ำด้วย
- **ความชื้น:** ในที่นี้หมายถึง น้ำอิสระ (Free Water) ที่มีอยู่ในเนื้อกากตะกอน ดังนั้นถ้ามีปริมาณความชื้นมากก็จะทำให้น้ำที่ระเหยออกไปนี้ไปผสมกับน้ำมันชีวภาพมาก ข้อดีคือ ช่วยลดความหนืดของน้ำมันชีวภาพ แต่ข้อด้อยคือ จะทำให้คุณค่าความร้อน และคุณลักษณะความเป็นน้ำมันจะลดลงด้วย นอกจากนี้แล้วถ้ากากตะกอนมีความชื้นมากก็ย่อมจะต้องใช้พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งก็ทำให้ต้นทุนในการดำเนินกระบวนการสูงขึ้นด้วย
- **คุณค่าความร้อน (Heating Value):** แม้ว่าการวิเคราะห์หาคุณค่าความร้อนจะไม่ได้อยู่ในหมวดการวิเคราะห์แบบประมาณตามวิธีการมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing Materials) 5865 03a แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์คุณค่าความร้อนของกากตะกอนควบคู่กับการวิเคราะห์แบบประมาณ (หรือแบบวิเคราะห์ธาตุ) น่าจะมีประโยชน์มากการสร้างสหสัมพันธ์ (Correlation) สำหรับใช้ประเมินคุณค่าความร้อนของกากตะกอนได้

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน และคุณค่าความร้อนสำหรับการศึกษาวิจัยนี้ ดำเนินการตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 3172-3175 และ ASTM D 5865 ร่วมกับ D 3177 ตามลำดับ [3-4] ซึ่งผลการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบ และคุณค่าความร้อนของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆจำนวน 20 แห่ง เทียบกับถ่านหินลิกไนต์

แหล่งกากตะกอน	องค์ประกอบ(% น้ำหนัก)				คุณค่าความร้อน (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
	สารระเหย	เถ้า	ความชื้น	คาร์บอนคงตัว	
กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนสูง					
I1	51.89±1.86	39.91±1.63	5.23±1.29	2.97±1.36	2,615±192
H1	50.26±4.66	38.05±3.87	6.93±1.48	4.77±1.25	3,070±367
H2	49.90±4.94	37.11±6.55	6.09±2.15	6.90±1.89	3,095±472
M1	49.53±2.84	35.88±3.64	6.46±2.11	8.13±1.96	3,295±295
M2	48.55±1.56	39.82±1.95	5.37±1.91	6.26±1.04	3,149±215
M3	47.52±3.48	40.47±3.83	5.45±1.24	6.56±1.20	3,026±273
H3	46.92±1.67	42.57±3.19	6.92±1.86	3.59±1.55	2,666±155
H4	45.49±2.47	43.78±3.61	4.56±1.43	6.18±1.14	2,964±159
M4	44.14±1.67	45.23±1.83	6.71±1.22	3.92±1.33	2,638±155
กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนปานกลาง					
I2	42.90±3.49	49.23±3.91	5.31±1.23	2.56±0.98	2,309±447
M5	40.17±3.13	50.63±4.82	3.68±1.68	5.53±2.15	2,376±305
H5	36.50±4.25	55.95±4.60	4.74±2.12	2.81±1.31	2,023±345
I3	36.54±1.97	55.81±2.29	4.82±1.06	2.83±0.99	2,178±189
M6	37.61±4.92	54.11±5.09	3.42±1.09	4.85±1.35	2,085±252
M7	32.88±1.81	59.34±1.67	4.42±1.50	3.36±1.45	2,224±350

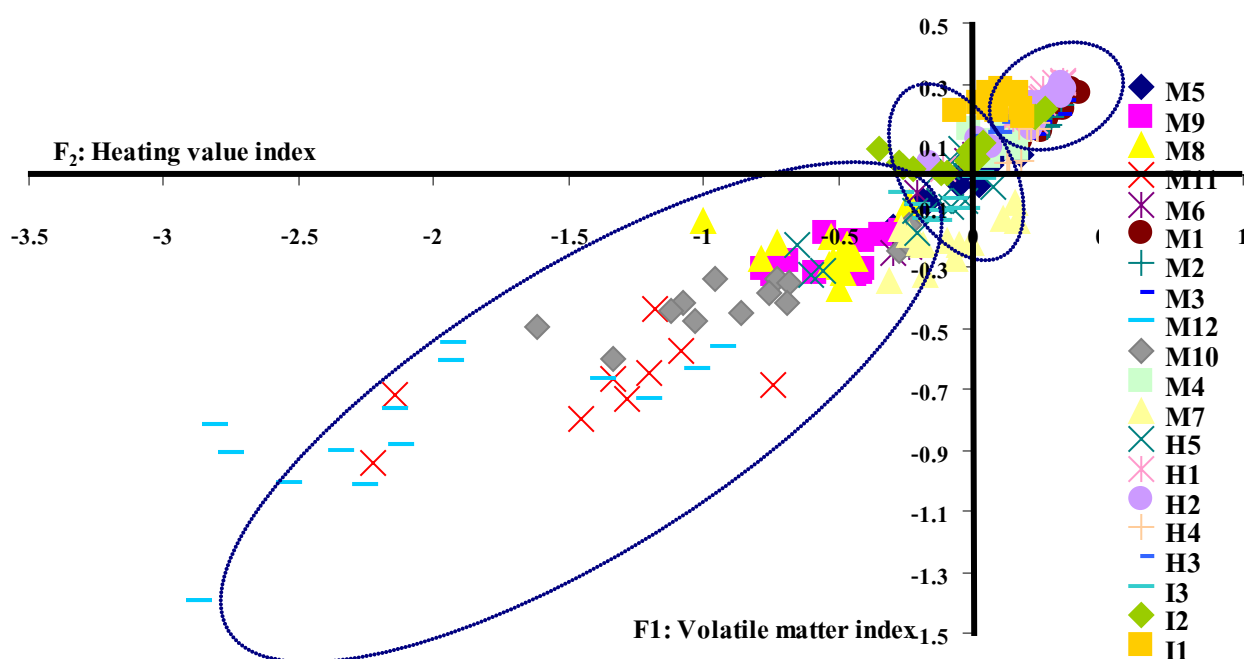
ตารางที่ 2.1 ปริมาณองค์ประกอบ และคุณค่าความร้อนเฉลี่ยของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ จำนวน 20 แห่ง เทียบกับถ่านหินลิกไนต์ (ต่อ)

แหล่งกากตะกอน	องค์ประกอบ (%น้ำหนัก)				คุณค่าเชิงความร้อน (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม)
	สารระเหย	เถ้า	ความชื้น	การบดผงตัว	
กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนต่ำ					
M8	32.47±2.14	60.85±1.83	3.76±1.92	2.92±1.48	1,575±186
M9	31.69±1.70	61.51±2.02	4.13±1.87	2.68±1.65	1,579±171
M10	29.34±2.55	65.64±3.19	3.31±1.38	1.71±0.97	1,364±325
M11	23.74±2.03	69.73±1.98	4.39±0.89	2.14±1.32	1,021±191
M12	21.18±2.81	67.65±1.83	9.04±2.28	2.13±0.58	830±206
ถ่านหินลิกไนต์	40.29	19.46	10.50	28.25	2,700

หมายเหตุ เนื่องจากอาจจะมีข้อมูลบางประเภทที่อาจจะส่งผลในเชิงลบต่อภาพพจน์ของหน่วยงานบางแห่งโดยมิได้ตั้งใจ ซึ่งมีใช้จุดมุ่งหมายของทีมงานผู้วิจัยแต่อย่างใด ด้วยเหตุนี้ ในส่วนของผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอนจึงไม่ได้เอื้อชื่อของโรงบำบัดน้ำเสียทั้งหมด แต่จะใช้การกำหนดเป็นนามสมมติแทน โดยกำหนดให้

- สัญลักษณ์
- I = โรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม
 - H = โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล
 - M = โรงบำบัดน้ำเสียชุมชน

ข้อมูลในตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่า เมื่อพิจารณาถึงคุณค่าความร้อนของกากตะกอน ซึ่งเปรียบเทียบกับคุณค่าความร้อนของถ่านหินลิกไนต์ (ประมาณ 2,700 kcal/kg) เป็นหลักแล้ว จะสามารถแบ่งกลุ่มของกากตะกอนได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ กลุ่มที่มีคุณค่าความร้อนสูง (ประมาณ 2,600-3,300 kcal/kg) กลุ่มที่มีคุณค่าความร้อนปานกลาง (ประมาณ 2,000-2,400 kcal/kg) และกลุ่มที่มีคุณค่าความร้อนต่ำ (ประมาณ 800-1,600 kcal/kg) เมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าดัชนีคุณค่าความร้อน (= คุณค่าความร้อนของกากตะกอน/คุณค่าความร้อนเฉลี่ยของกากตะกอนทั้งหมด: F_2) กับค่าดัชนีปริมาณสารระเหย (= ปริมาณสารระเหยของกากตะกอน/ปริมาณสารระเหยเฉลี่ยของกากตะกอนทั้งหมด: F_1) เพื่อดูแนวโน้มความสัมพันธ์กันระหว่างปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนของกากตะกอนแต่ละแหล่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.15 แผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีคุณค่าความร้อน และดัชนีปริมาณสารระเหยของกากตะกอนตัวอย่างทั้ง 20 แหล่ง

ข้อมูลที่แสดงในรูปที่ 2.2 ช่วยยืนยันได้ว่า คุณค่าความร้อนของกากตะกอนนั้น มีความสัมพันธ์กับปริมาณสารระเหยที่มีอยู่ในกากตะกอนด้วยในลักษณะที่แปรผันตามกัน นอกจากนี้แล้วข้อมูลที่ได้จากรูปที่ 2.2 นั้น ยังสามารถช่วยกำหนดกลุ่มของกากตะกอนตามลักษณะปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ ได้ชัดเจนขึ้น คือ

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆจำนวน 20 แห่ง

แหล่งกากตะกอน		องค์ประกอบ (ร้อยละน้ำหนัก)						
		C	H	N	S	O		
กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนสูง								
I1		25.14±0.004	3.99±0.005	3.82±0.003	0.88±0.003	26.10±0.004		
H1		26.72±0.005	4.05±0.06	4.30±0.006	0.68±0.03	27.66±0.001		
H2		29.62±0.001	4.55±0.001	5.01±0.002	0.99±0.003	21.14±0.004		
M1		31.11±0.005	4.19±0.002	3.27±0.001	1.14±0.004	24.25±0.004		
M2		27.47±0.004	4.09±0.001	4.01±0.003	1.15±0.002	23.72±0.001		
M3		26.35±0.002	4.08±0.001	4.26±0.001	0.91±0.003	23.68±0.002		
H3		24.97±0.003	3.77±0.003	3.65±0.002	0.78±0.001	24.26±0.004		
H4		25.44±0.004	3.85±0.004	4.20±0.001	1.02±0.001	22.33±0.003		
M4		23.85±0.001	3.93±0.002	3.82±0.005	1.34±0.002	21.79±0.002		
กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนปานกลาง								
I2		22.53±0.004	3.24±0.004	2.89±0.003	2.02±0.001	20.03±0.004		
M5		20.72±0.004	3.36±0.005	3.27±0.003	0.93±0.001	21.09±0.002		
H5		19.29±0.002	2.99±0.001	2.75±0.003	1.17±0.003	17.01±0.002		
I3		18.32±0.004	3.42±0.001	1.77±0.003	1.80±0.002	18.67±0.003		
M6		19.53±0.001	3.19±0.004	3.05±0.003	0.75±0.003	19.37±0.002		
M7		17.96±0.002	2.89±0.002	2.25±0.002	0.83±0.004	16.34±0.002		

ตารางที่ 2.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ จำนวน 20 แห่ง (ต่อ)

แหล่งกากตะกอน	องค์ประกอบ (ร้อยละน้ำหนัก)				
	C	H	N	S	O
กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าเชิงความร้อนต่ำ					
M8	15.28±0.004	2.53±0.001	2.34±0.001	0.45±0.001	17.74±0.003
M9	14.51±0.002	2.64±0.004	2.58±0.002	1.15±0.001	18.70±0.004
M10	12.66±0.004	1.99±0.005	1.84±0.003	0.59±0.004	17.49±0.002
M11	10.56±0.003	1.96±0.001	1.64±0.001	0.40±0.003	15.67±0.003
M12	9.00±0.004	2.23±0.001	1.46±0.004	1.57±0.001	18.17±0.001

หมายเหตุ เนื่องจากอาจจะมีข้อมูลบางประเภทที่อาจจะส่งผลในเชิงลบต่อภาพพจน์ของหน่วยงานบางแห่งโดยมิได้ตั้งใจ ซึ่งมีใช้จุดมุ่งหมายของทีมงานผู้วิจัยแต่อย่างใด ด้วยเหตุนี้ ในส่วนของผลการวิเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอนจึงไม่ได้เอ่ยชื่อของโรงพยาบาลต้นน้ำเสียทั้งหมด แต่จะใช้การกำหนดเป็นนามสมมติแทน โดยกำหนดให้

- สัญลักษณ์
- I = โรงพยาบาลน้ำเสียอุตสาหกรรม
 - H = โรงพยาบาลน้ำเสียโรงพยาบาล
 - M = โรงพยาบาลน้ำเสียชุมชน

กลุ่มที่ 1 กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนสูง

กากตะกอนที่อยู่ในกลุ่มนี้อยู่ในบริเวณจุดภาคที่ 1 (Quadrant 1) ของรูปที่ 2.2 ซึ่งกากตะกอนในกลุ่มนี้มีปริมาณสารระเหยอยู่ประมาณร้อยละ 44-52 โดยน้ำหนัก และมีคุณค่าความร้อนประมาณ 2,614-3,295 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมกากตะกอน ซึ่งแหล่งกากตะกอนที่อยู่ในกลุ่มที่ 1 นี้มีจำนวน 9 แห่ง หรือประมาณร้อยละ 45

กลุ่มที่ 2 กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนปานกลาง

กากตะกอนในกลุ่มนี้มีคุณค่าความร้อนปานกลาง กล่าวคือ มีคุณค่าความร้อนใกล้เคียงกับค่าเฉลี่ยของกากตะกอนทั้งหมดทุกตัวอย่าง โดยมีปริมาณสารระเหยอยู่ที่ประมาณร้อยละ 32-43 โดยน้ำหนัก และมีคุณค่าความร้อนประมาณ 2,023-2,373 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมกากตะกอน จำนวนแหล่งกากตะกอนที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้มีจำนวน 6 แห่ง คิดเป็นร้อยละ 30

กลุ่มที่ 3 กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนค่อนข้างต่ำ

กากตะกอนที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้ มีปริมาณสารระเหยค่อนข้างต่ำคืออยู่ที่ประมาณร้อยละ 21-33 โดยน้ำหนัก และมีคุณค่าความร้อนประมาณ 829-1,597 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมกากตะกอน และจำนวนแหล่งกากตะกอนที่จัดอยู่ในกลุ่มนี้มีจำนวนทั้งสิ้น 5 แห่ง หรือคิดเป็นร้อยละ 25

ซึ่งเมื่อสังเกตผลการศึกษาในหัวข้อนี้พบว่า กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไปแล้วมีคุณค่าความร้อนค่อนข้างสูงในระดับหนึ่ง ประมาณใกล้เคียงกับถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญอย่างหนึ่งที่สำคัญได้

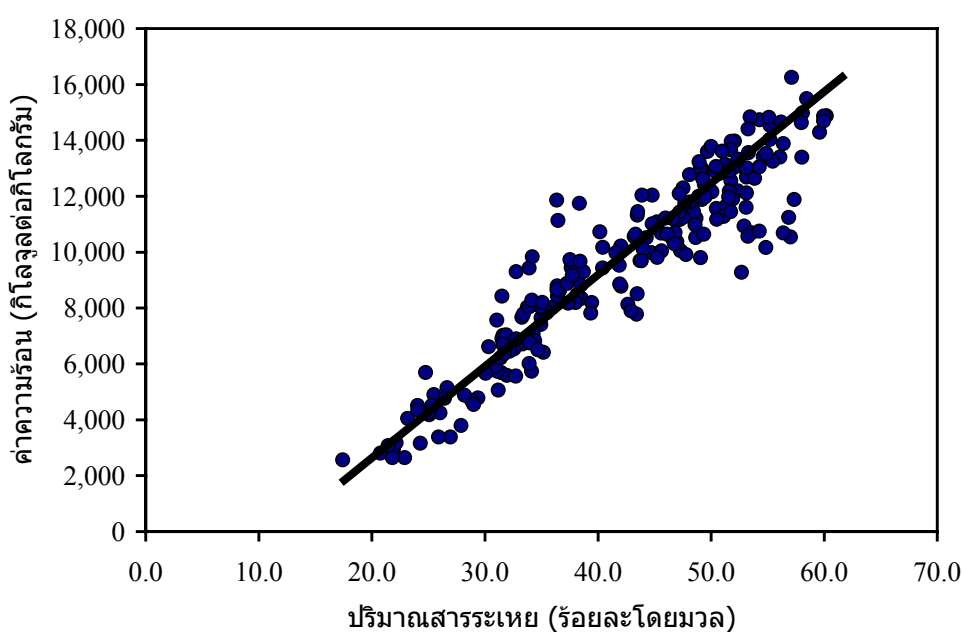
2.3.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอน [5]

การศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอนโดยวิเคราะห์แบบนี้ ต่างจากการวิเคราะห์แบบประมาณตรงที่ การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีนั้น จะเป็นการวิเคราะห์ธาตุหลักของกากตะกอน อาทิเช่น คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ และออกซิเจน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ซึ่งผลจากการศึกษาจากตารางที่ 2.2 พบว่า ปริมาณธาตุองค์ประกอบแต่ละชนิดของกากตะกอนเมื่อพิจารณาแบบแยกชนิดจะเป็นดังต่อไปนี้คือ คาร์บอนอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 9-30 โดยประมาณ ไฮโดรเจนอยู่ที่ช่วงประมาณร้อยละ 2-5 ออกซิเจนอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 16-28 และปริมาณไนโตรเจนอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 1-5 นอกนั้นเป็นปริมาณของซิลเฟอร์อีกเล็กน้อย ซึ่งข้อมูลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่า กากตะกอนมีลักษณะที่เป็นสารเชิงอินทรีย์ค่อนข้างมาก ดังนั้นข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของกากตะกอนจึงช่วยสนับสนุนแนวความคิดในการแปรรูปกากตะกอนเป็นน้ำมันชีวภาพอีกทางหนึ่ง

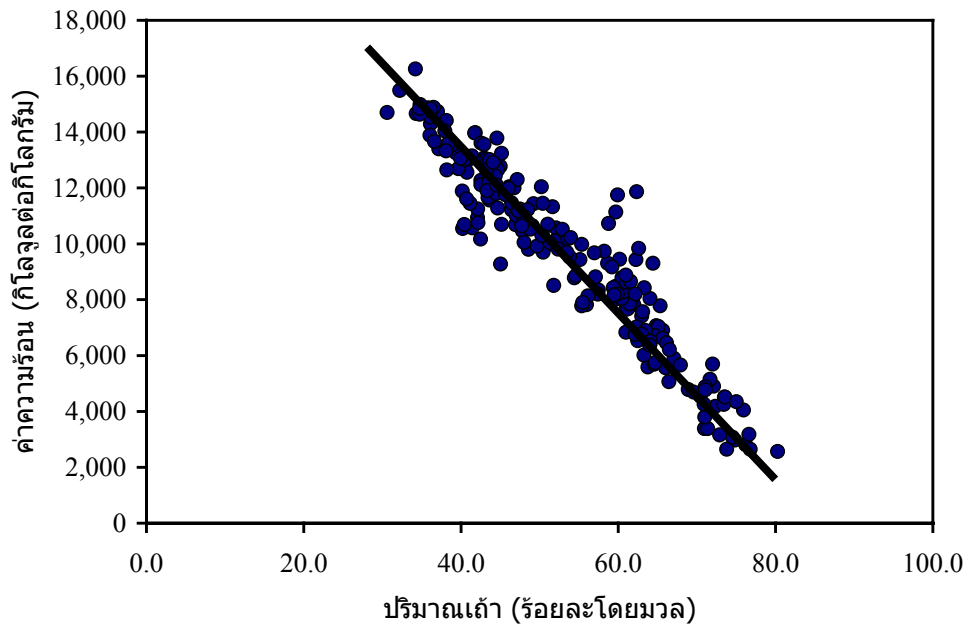
2.3.3 สหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแบบประมาณ และคุณค่าความร้อนของกากตะกอน

เมื่อนำผลศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ และองค์ประกอบเชิงเคมีมาพล็อตกับ ข้อมูลคุณค่าความร้อนพบว่า ตัวแปรต่างๆ เหล่านี้ น่าจะมีความสัมพันธ์ในเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งกันและกัน ดังแสดงแสดงในรูปที่ 2.16 และ 2.17 ตามลำดับ

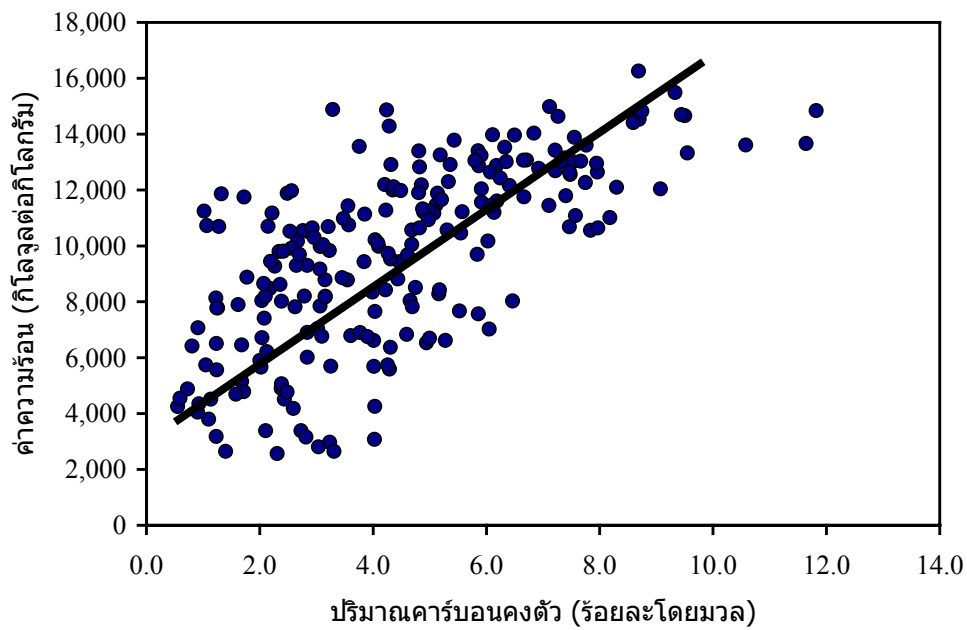


(ก)

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแบบประมาณ (ก) สารระเหย (ข) เถ้า (ค) คาร์บอนคงตัว กับคุณค่าความร้อน

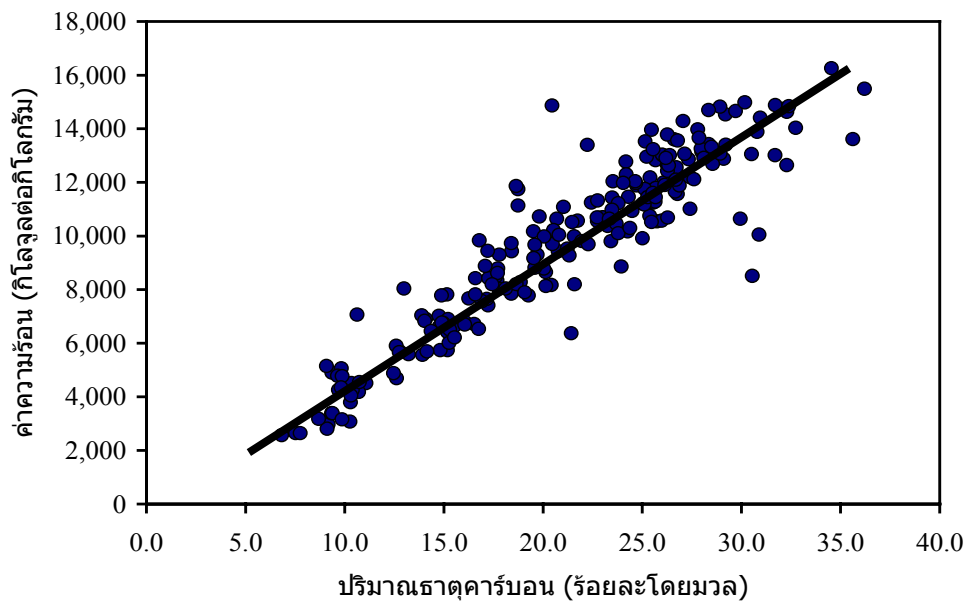


(ข)

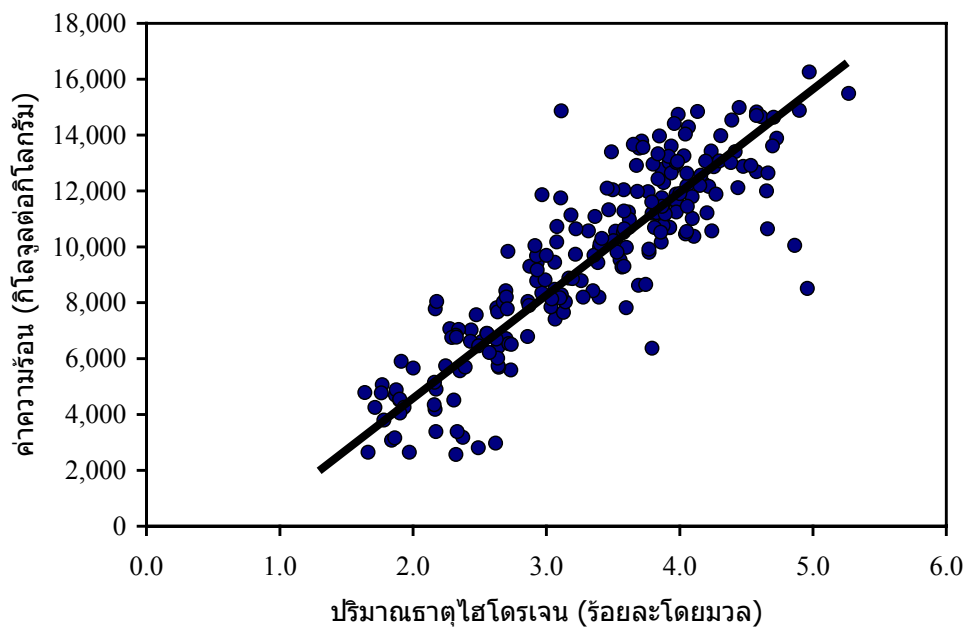


(ค)

รูปที่ 2.16 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบแบบประมาณ (ก) สารระเหย (ข) เถ้า (ค) คาร์บอนคงตัว กับคุณค่าความร้อน (ต่อ)

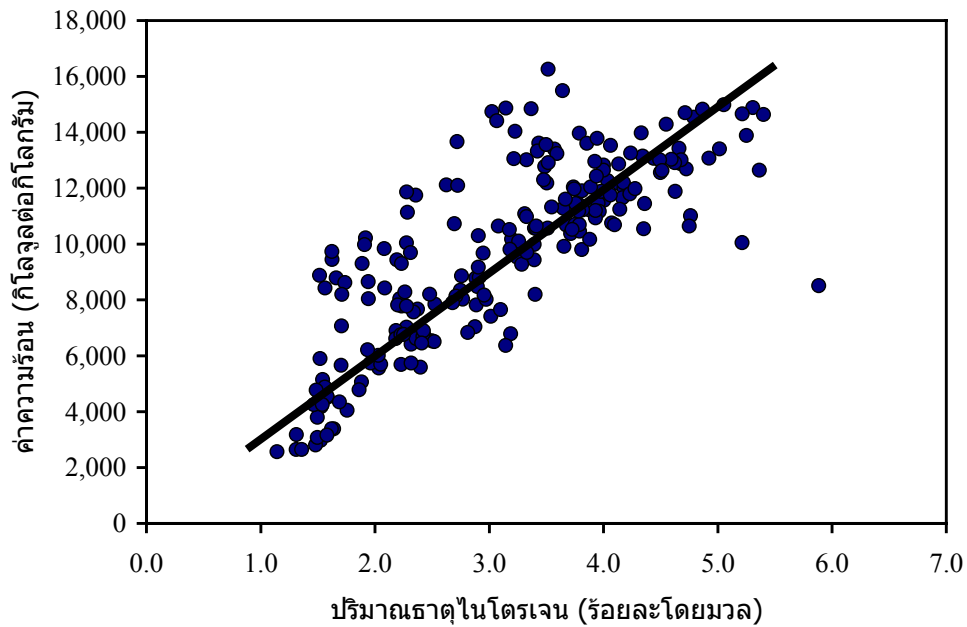


(ก)

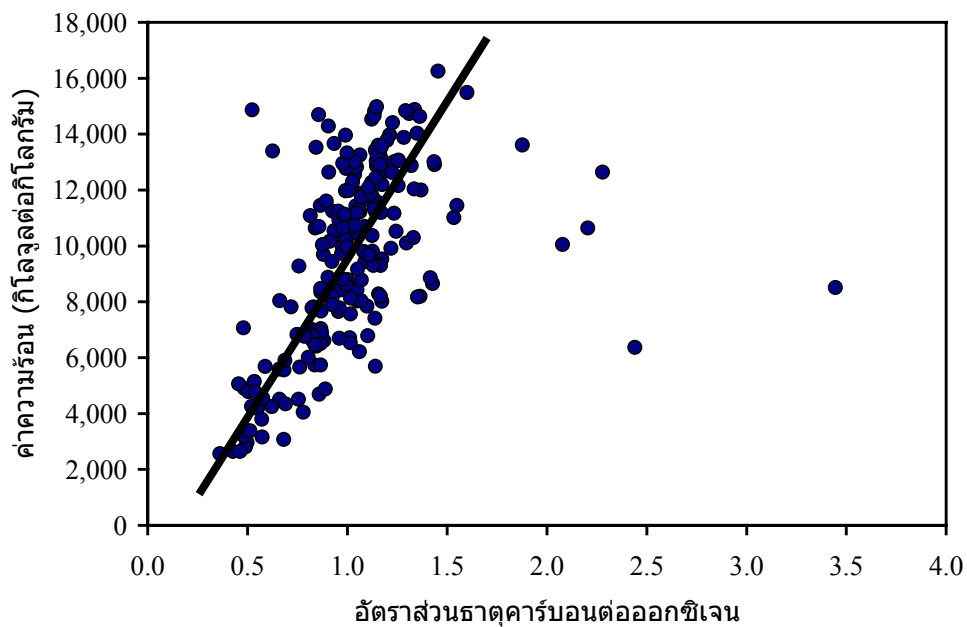


(ข)

รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเชิงเคมีของกากตะกอน (ก) คาร์บอน (ข) ไฮโดรเจน (ค) ไนโตรเจน (ง) อัตราส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจน กับคุณค่าความร้อน



(ก)



(ง)

รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเชิงเคมีของกากตะกอน (ก) คาร์บอน (ข) ไฮโดรเจน (ค) ไนโตรเจน (ง) อัตราส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจน กับคุณค่าความร้อน (ต่อ)

ในรูปที่ 2.17 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบเชิงเคมีของกากตะกอนบางชนิดกับคุณค่าความร้อนก็พบในลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 2.16 กล่าวคือ องค์ประกอบของกากตะกอน และคุณค่าความร้อนมีความสัมพันธ์ในลักษณะเชิงเส้นซึ่งกันและกัน นอกจากนี้แล้วมีข้อสังเกตด้วยว่า ความสัมพันธ์เชิงเส้นนี้เป็นในลักษณะที่แปรผันตามกันทั้งสิ้น

จากข้อมูลในที่ได้เหล่านี้ ทำให้เกิดแนวความคิดว่า ถ้าสร้างสหสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบของกากตะกอน และคุณค่าความร้อนได้ จะช่วยลดความสับสนในการทดสอบหาคุณค่าความร้อนสำหรับกากตะกอนตัวอย่างได้ ซึ่งในที่นี้จะใช้ตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย 20 แห่ง จำนวน 254 ตัวอย่าง โดยใช้วิธีการสร้างสหสัมพันธ์ด้วยการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear-Regression) ซึ่งมีเงื่อนไขให้ค่าความผิดพลาดกำลังสองที่น้อยที่สุด (Least Square Error Method) [6] เป็นเกณฑ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นจากข้อมูลกากตะกอนแสดงได้ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 สมการทำนายค่าความร้อนของกากตะกอนที่ได้จากการวิเคราะห์ความถดถอย

	สมการ*	R ²	หน่วย
สมการบนพื้นฐานของผลวิเคราะห์แบบประมาณ			
1	$HV = 259.83(V+F) - 2454.76$	0.8991	kJ/kg
2	$HV = 255.75V + 283.88F - 2386.38$	0.8993	kJ/kg
3	$HV^A = 278.07(V + F) - 50.44M - 2875.52$	0.9011	kJ/kg
4	$HV^A = 219.98V + 327.44F - 68.39M$	0.8810	kJ/kg
5	$HV^A = 276.04V + 289.70F - 51.45M - 2847.53$	0.9012	kJ/kg
สมการบนพื้นฐานของผลวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ			
6	$HV = 491.2C - 911.9H + 117.7O$	0.8906	kJ/kg
7	$HV = 492.5C - 926.0H + 117.6O + 19.3S$	0.8906	kJ/kg
8	$HV = 414.8C - 184.1H + 178.9O - 2159.5$	0.9035	kJ/kg
9	$HV = 425.9C - 69.8H + 181.7O - 180.5N - 2277.0$	0.9044	kJ/kg
10	$HV = 430.2C - 186.7H - 127.4N + 178.6S + 184.2O - 2379.9$	0.9050	kJ/kg
11	$HV = 406.4C - 210.6H + 154.7S + 160.3O - 151.3N - 23.8A + .0034$	0.9050	kJ/kg
12	$HV = 406.4C - 210.5H + 154.8S + 160.4O - 151.2N - 23.8A$	0.9050	kJ/kg

บทที่ 2 แหล่งที่มาของกากตะกอนและองค์ประกอบ

13	$HV = 395.9C - 447.1H + 255.5S + 154.3 (O + N) - 18.1A - 21.7$	0.9028	kJ/kg
14	$HV = 395.6C - 446.0H + 254.5S + 154.0 (O + N) - 21.9A$	0.9028	kJ/kg
15	$HV = 134.3C - 1,502.1H - 2.7 (O^2/(1-A/100)) + 29,132.8 (1 - A/100)$	0.8926	kJ/kg
16	$HV = 279.8C - 849.1H + 724.9O - 9.2(O^2/(1 - A/100)) - 118.5S$	0.9024	kJ/kg
17	$HV = 328C + 1,419H + 92.8S + 276.7 (O + N) + 110.4A - 14,278.3$	0.8830	kJ/kg
18	$HV = 661.0 (0.328C + 1.419H + 0.0928S) + 146.5 (O + N) - 31.4A$	0.8898	kJ/kg
19	$HV = 683.8 (0.328C + 1.419H) + 0.0928S - 0.0238N + 154.6O - 33.1A$	0.8921	kJ/kg

โดยที่

*สถานะไม่รวมความชื้น

^Δสถานะสมดุลในบรรยากาศ

เมื่อ V คือ ปริมาณสารระเหย

F คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว

M คือ ปริมาณความชื้น

A คือ ปริมาณเถ้า

C คือ คาร์บอน

H คือ ไฮโดรเจน

N คือ ไนโตรเจน

O คือ ออกซิเจน

S คือ ซัลเฟอร์

HV คือ คุณค่าความร้อน มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg)

ซึ่งเกณฑ์ในการตัดสินใจเลือกใช้สมการใดนั้นใช้ค่าของ R^2 เป็นหลัก ซึ่งถ้าค่าของ R^2 มีค่าเข้าใกล้ 1.0 มากเพียงไหนความแม่นยำของสหสัมพันธ์นั้นก็ถือว่ามากขึ้นเพียงนั้น จะเห็นว่ามีสมการหลายๆ สมการที่ให้ค่า R^2 สูง นั่นคือมีขนาดที่ยอมรับได้ ซึ่งจากตารางที่ 2.3 พบว่า ค่า R^2 ของแต่ละสมการมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.881-0.901 สำหรับสมการบนพื้นฐานของผลวิเคราะห์แบบประมาณ และอยู่ในช่วง 0.883-0.905 สำหรับสมการบนพื้นฐานของผลวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบ

2.3.4 ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอน [7]

โลหะหนักในกากตะกอนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งที่ได้ดำเนินการตรวจสอบ เนื่องจากว่าโดยทั่วไปแล้วกากตะกอนที่ได้จากระบบบำบัดนั้น ได้จากระบวนการบำบัดขั้นที่สองซึ่งยังไม่ผ่านกระบวนการบำบัดโลหะหนัก ดังนั้นโลหะหนักที่มีในน้ำเสียก็จะเข้ามารวมอยู่ในเนื้อของกากตะกอนด้วย

โลหะหนักที่มีอยู่ในกากตะกอนที่ได้ทำการวิเคราะห์ได้แก่ แคดเมียม (Cd) ทองแดง (Cu) โมลิบดีนัม (Mo) นิกเกิล (Ni) ตะกั่ว (Pb) และสังกะสี (Zn) โดยเปรียบเทียบค่าที่ได้กับค่ามาตรฐาน US EPA โดยใช้เครื่องอะตอมมิกแอคซอร์ปชัน (Atomic Adsorption: AAS) ซึ่งมีความแม่นยำในการตรวจวัดสูง

ซึ่งภาพรวมของโลหะหนักในกากตะกอนดังแสดงในรูปที่ 36-41 ในภาคผนวก ก และมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (นอกจากโลหะหนักที่เสนอไว้ข้างต้นจำนวน 6 ชนิดแล้ว โลหะหนักจำพวกปรอท (Hg) หรือสารหนู (As) ที่มีอยู่ในกากตะกอนก็ได้ดำเนินการตรวจวัดด้วย อย่างไรก็ตามจากการตรวจวัดแล้วไม่พบโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้ ซึ่งอาจจะเป็นเพราะว่าปริมาณของโลหะหนักทั้งสองชนิดนี้มีน้อยมากจนต่ำกว่าความสามารถของเครื่องอะตอมมิกแอคซอร์ปชันจะตรวจวัดได้)

2.3.4.1 แคดเมียม

จากการศึกษาพบว่า ปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนนั้นมีปริมาณน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน (ประมาณ 85 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ดังแสดงในรูปที่ 36 ซึ่งปริมาณแคดเมียมที่พบในกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียทุกแห่งจะอยู่ในช่วง 0.00-8.13 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.3.4.2 ทองแดง

รูปที่ 37 แสดงให้เห็นว่าปริมาณทองแดงในกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มีสูงกว่าแหล่งอื่นๆ และมีค่าเกินกว่าค่ามาตรฐาน (ประมาณ 4,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) ซึ่งพบว่าปริมาณทองแดงในกากตะกอนโรงงานอุตสาหกรรมจะอยู่ในช่วง 3,000-26,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมทีเดียว ในขณะที่ปริมาณทองแดงในกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน และโรงพยาบาลจะอยู่ในช่วงประมาณ 100-1,100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 0-23 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

2.3.4.3 โมลิบดีนัม

จากการศึกษาพบว่าปริมาณโมลิบดีนัมในกากตะกอนมีค่าน้อยกว่าค่ามาตรฐานมาก ซึ่งค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้อยู่ที่ 75 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม กล่าวคือ โดยทั่วไปแล้วปริมาณโมลิบดีนัมในกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียแห่งต่างๆจะอยู่ในช่วงประมาณ 0-50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมเท่านั้น

2.3.4.4 นิกเกิล

ปริมาณนิกเกิลในกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียจากแหล่งต่างๆ แสดงไว้ในรูปที่ 39 พบว่าปริมาณนิกเกิลนั้นมีลักษณะที่ค่อนข้างผันผวนคือ มีแนวโน้มที่ไม่แน่นอน โดยกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียชุมชนพบว่ามีปริมาณนิกเกิลในช่วงประมาณ 13-320 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่กากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม และโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจะอยู่ที่ประมาณ 9-210 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ 14-82 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมตามลำดับ

2.3.4.5 ตะกั่ว

แนวโน้มปริมาณตะกั่วที่มีอยู่ในกากตะกอนจากแหล่งโรงบำบัดน้ำเสียต่างๆ นั้นจากการวิเคราะห์พบว่า มีปริมาณของตะกั่วอยู่ต่ำกว่าค่ามาตรฐาน (ค่ามาตรฐาน 840 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยพบว่าในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนมีประมาณ 1.3-100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม กากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล 10-69 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมอยู่ที่ประมาณ 2.7-590 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.3.4.6 สังกะสี

แนวโน้มโดยทั่วไปของปริมาณสังกะสีที่ตรวจพบในกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียทุกแห่งพบว่า มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนดที่ 7,500 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ยกเว้นบางแห่งซึ่งพบว่ามีค่าเกินมาตรฐาน โดยค่าสูงสุดที่ตรวจพบคืออยู่ที่ประมาณ 12,000 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

2.4 สรุป

จากที่กล่าวมาข้างต้นสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียในการวิจัยซึ่งแบ่งเป็นระบบบำบัดน้ำเสียชุมชน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล และระบบบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรมนั้น โดยภาพรวมแล้วมีความแตกต่างกันไม่มากนักเมื่อพิจารณาจากองค์ประกอบแบบประมาณ และการวิเคราะห์ธาตุ แม้ว่ากากตะกอนเหล่านี้จะผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ต่างกัน ขึ้นกับลักษณะของโรงบำบัดน้ำเสียแต่ละที่ กล่าวคือ องค์ประกอบส่วนที่เกี่ยวข้องกับพลังงานอาทิ เช่น ปริมาณสารระเหยอยู่ในช่วงประมาณร้อยละ 20-50 ทำให้กากตะกอนเหล่านี้มีคุณค่าความร้อนสูงในระดับหนึ่ง และมีค่าสัดส่วนระหว่าง C/O เฉลี่ยที่ประมาณ 1.03 ซึ่งถือว่ามีความเสถียรในเชิงความร้อนค่อนข้างสูง

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ และแบบวิเคราะห์ธาตุ มีความสัมพันธ์กับข้อมูลคุณค่าความร้อนของกากตะกอนในลักษณะเชิงเส้น ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่สร้างสหสัมพันธ์ (Correlation) ในรูปของสมการสำหรับคำนวณหาคุณค่าความร้อนเมื่อทราบข้อมูลตัวแปรองค์ประกอบ ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลนี้พบว่า สมการมีความแม่นยำในระดับหนึ่งซึ่งสามารถใช้เป็นสมการเบื้องต้นในการทำนายคุณค่าความร้อนของกากตะกอนได้

เมื่อพิจารณาถึงปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแต่ละแห่งนั้น ที่ทำการวิเคราะห์ได้แก่ แคดเมียม ทองแดง โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสี ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีปริมาณอยู่ในระดับต่ำกว่าค่ามาตรฐาน US EPA โดยส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามในบางครั้งพบว่า ในตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียบางแห่ง (2-3 แห่ง) มีโลหะหนักบางชนิดที่เกินกว่าค่ามาตรฐานเช่น ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Tchobanoglous and Franklin .L. Burton (1991) “Wastewater Engineering (Treatment, Disposal and Reuse)” International Edition, McGraw-Hill Inc., Singapore
- [2] กองจัดการคุณภาพน้ำ (เอกสารพับ), “โรงบำบัดน้ำเสียในเขตกรุงเทพมหานคร”, กรุงเทพฯ: สำนักการระบายน้ำ, กรุงเทพมหานคร
- [3] ASTM Standard; D3172-75. Standard method for Proximate Analysis of Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials 1999.
- [4] ASTM Standard; D5865. Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials 1999.
- [5] ASTM Standard; D3176-89. Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke. USA: American Society for Testing and Materials 2002.
- [6] S.C. Chapra and R.P. Canale (1998) “Numerical Method for Engineering” 3rd Edition, McGraw-Hill Inc., Singapore

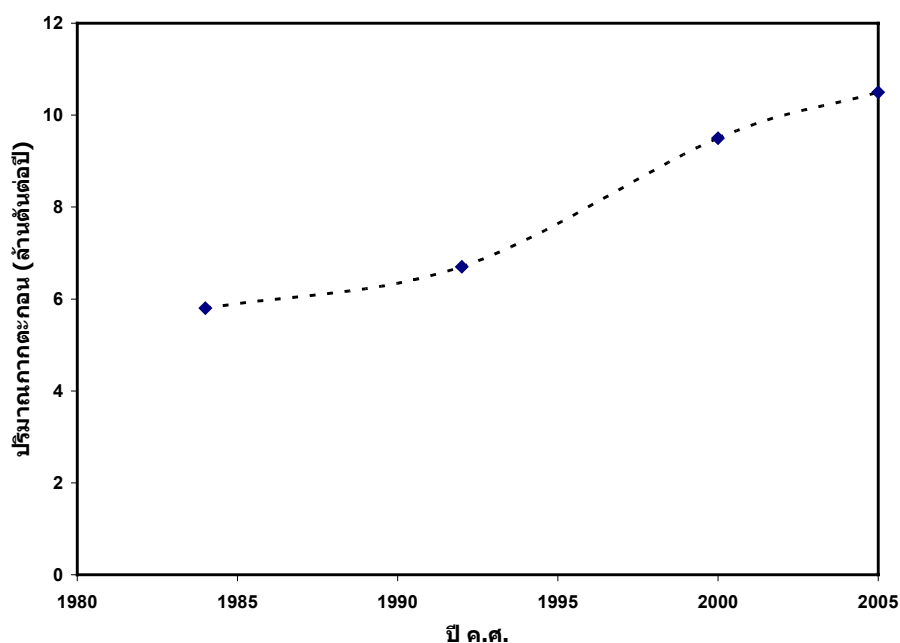
ขาด ref 7

บทที่ 3

กระบวนกรไฟโรไลซิสกากตะกอน

3.1 ความนำ

ดังที่กล่าวในบทที่แล้วว่ากากตะกอนเป็นส่วนที่เป็นของเสียที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วมักจะถูกนำไปกำจัดด้วยการฝังกลบ อย่างไรก็ตามปริมาณกากตะกอนมีแนวโน้มมากขึ้นในทุกขณะ ซึ่งแนวโน้มนี้เป็นไปในทำนองเดียวกันทั่วโลก Werther และ Ogada [1] ได้สังเกตแนวโน้มปริมาณของกากตะกอนที่เกิดขึ้นในประเทศกลุ่มสหภาพยุโรป และได้ทำนายปริมาณกากตะกอนในปีค.ศ. 2005 (พ.ศ. 2548) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นในสหภาพยุโรปช่วงปีค.ศ. 1984-2005

ทั้งสองได้ให้ข้อสังเกต [1] ด้วยว่า ในปี ค.ศ. 1991 นั้น สหภาพยุโรปมีจำนวนประชากรราว 345 ล้านคน โดยมีจำนวนหน่วยบำบัดน้ำเสียประมาณ 40,300 หน่วย ทำให้เกิดกากตะกอนมากถึง 6.5 ล้านตันต่อปีซึ่งเพิ่มมากขึ้นถึงร้อยละ 18 จากปีค.ศ. 1987 และพบว่า ร้อยละ 84 ของปริมาณกากตะกอนทั้งหมดเป็นกากตะกอนที่ได้จากประเทศที่มีความเจริญทางอุตสาหกรรมได้แก่ อังกฤษ ฝรั่งเศส เยอรมนี และอิตาลี นอกจากนี้แล้วสำหรับในประเทศอุตสาหกรรมนอกสหภาพยุโรป อาทิ-เช่น

สหรัฐอเมริกา และญี่ปุ่นก็กำลังประสบปัญหาเกี่ยวกับปริมาณของกากตะกอนที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน [1]

สำหรับประเทศไทยนั้นแม้ว่าจะไม่มีหน่วยงานใดที่เป็นแหล่งข้อมูลสำหรับปริมาณกากตะกอนที่เกิดขึ้นในแต่ละปีที่ชัดเจน และเป็นทางการ แต่เมื่อพิจารณาถึงอัตราการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ [2] และการขยายตัวของเมืองใหญ่ และอุตสาหกรรม [3] แล้ว ก็อาจจะคาดการณ์ได้ว่าปริมาณกากตะกอนในประเทศไทยย่อมจะมีมากด้วย อย่างไรก็ตามในปีพ.ศ. 2532 คณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติได้ตั้งคณะกรรมการการศึกษาเพื่อสร้างแผนการจัดการของเสียอันตราย (Waste Management) โดยอนุกรรมการชุดนี้พบว่า ปริมาณของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมมีประมาณ 1.16 ล้านตันต่อปี และประมาณร้อยละ 71 ของจำนวนนี้เป็นกากตะกอน [4] และได้ทำการประเมินว่าปริมาณกากตะกอนในปีพ.ศ. 2544 อาจจะมีถึง 4.5 ล้านตันต่อปี ในขณะที่เดียวกันกรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อม (ในขณะนั้น) ก็ได้ให้กระทรวงอุตสาหกรรมทำการทบทวนข้อมูลนี้อีกครั้งหนึ่ง (เนื่องจากว่า ฐานการประเมินของคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาตินั้นใช้ข้อมูลการเพิ่มขึ้นของของเสียในประเทศสหรัฐอเมริกาเป็นพื้นฐาน อาจจะทำให้ตัวเลขสูงเกินกว่าความเป็นจริง) ซึ่งพบว่า ปริมาณของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ที่ประมาณ 0.53 ล้านตันต่อปี และประมาณร้อยละ 57 ของจำนวนนี้เป็นกากตะกอน รวมทั้งประเมินว่าในปี พ.ศ. 2544 จะมีปริมาณกากตะกอนเกิดขึ้นประมาณ 1.7 ล้านตันต่อปี [4] ดังนั้นจึงอาจจะประเมินได้คร่าวๆ ว่าปริมาณกากตะกอนในช่วงทศวรรษนี้จะมีปริมาณกากตะกอนเกิดขึ้นระหว่าง 1.7-4.5 ล้านตันต่อปี ซึ่งจำเป็นจะต้องหาวิธีการในการกำจัดต่อไป

การกำจัดกากตะกอน (หรือของเสีย)โดยทั่วไปมีอยู่หลายวิธีแต่ที่นิยมใช้กันมากได้แก่ การฝังกลบ การเผาในเตาเผาความร้อนสูง ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ในภายหลังพบว่ามักก่อให้เกิดปัญหากับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือ การฝังกลบนั้นมักพบปัญหาการชะละลายโลหะหนักในกากตะกอน (รวมทั้งเชื้อโรค) เข้าสู่ทางน้ำใต้ดิน และเกิดแก๊สมีเทนแพร่ออกสู่บรรยากาศ ในขณะที่การเผาในเตาเผาความร้อนสูงนั้นก็จะเกิดการแพร่ของแก๊สมลพิษ อาทิเช่น ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ต่างๆ (SO_x) หรือแก๊สไนโตรเจนออกไซด์ต่างๆ (NO_x) เป็นต้น เข้าสู่บรรยากาศ หรือถ้ามีการเพิ่มหน่วยปรับปรุงคุณภาพเพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้บริสุทธิ์ก่อนที่จะปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมก็จะเป็นการเพิ่มต้นทุนในการสร้าง และเดินระบบของการกำจัดด้วย ดังนั้นจึงมีความพยายามหาวิธีการ “ทางเลือก” ในการกำจัดกากตะกอน (หรือของเสีย) เหล่านี้โดยที่มีหลักอยู่ว่า ใช้ต้นทุนต่ำที่สุด และก่อให้เกิดผลกระทบกับสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด

หนึ่งในวิธีการกำจัดกากตะกอนทางเลือกหลายๆ วิธีนั้น วิธีการหนึ่งที่น่าสนใจศึกษากันมากขึ้นโดยเฉพาะในสหภาพยุโรป และออสเตรเลีย คือกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis Process) ซึ่งกระบวนการนี้เป็นการเปลี่ยนรูปกากตะกอน หรือของเสียอินทรีย์ให้กลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าในแง่ของเชื้อเพลิง ซึ่งทำให้มี “มูลค่า” ในเชิงเศรษฐกิจได้ อาทิเช่น น้ำมันชีวภาพ และก่อกผลกระทบท่อสิ่งแวดล้อมน้อยมากเมื่อเทียบกับวิธีการกำจัดกากตะกอนทั้งสองวิธีข้างต้น

เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการเปลี่ยนสภาพกากตะกอน หรือของเสียอินทรีย์ ดังนั้นการวิจัยนี้จึงพยายามศึกษาถึง “ความสัมพันธ์” ระหว่างองค์ประกอบของกากตะกอนกับกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจะช่วยให้ได้ข้อมูลพื้นฐานเพิ่มเติมสำหรับการประเมินสำหรับการประยุกต์ใช้กระบวนการไพโรไลซิสสำหรับกำจัดของเสียในประเทศไทยอีกอันหนึ่ง

3.2 ทฤษฎีกระบวนการไพโรไลซิส

3.2.1 นิยามของกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัววัสดุโดยใช้ความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในระบบที่ปราศจากอากาศ (หรือออกซิเจน) กระบวนการนี้อาจจะแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการย่อยขึ้นกับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ [5] เป็นปัจจัยสำคัญ กล่าวคือ ถ้าเป็นกระบวนการซึ่งใช้อุณหภูมิปานกลาง (ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) เวลาที่ไอซึ่งระเหยจากวัตถุดิบอยู่ในระบบสั้น (ถึงสั้นมากๆ) เรียกว่า “กระบวนการไพโรไลซิสเร็ว (Fast pyrolysis)” ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันชีวภาพในปริมาณมาก ถ้าเป็นกระบวนการซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำลง และให้เวลาที่ไออยู่ในระบบนานขึ้นมากกว่ากระบวนการไพโรไลซิสเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะเปลี่ยนเป็น ถ่านชาร์ (Charcoal) ในปริมาณมากจึง เรียกกระบวนการนี้ว่า “กระบวนการไพโรไลซิสช้า (Slow Pyrolysis)” หรือบางครั้งเรียกว่า ‘กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)’ ในขณะที่กระบวนการสุดท้ายเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิภายในระบบสูงมาก โดยที่เวลาที่ไออยู่ในระบบนานซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สมากกว่า ทั้งสองกระบวนการข้างต้น และเรียกว่า “กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification)” [5] ซึ่งสภาวะและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละกระบวนการถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 3.1

กระบวนการไพโรไลซิสเร็วขึ้นโดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาไม่กี่วินาที ซึ่งลักษณะที่สำคัญของกระบวนการไพโรไลซิสเร็วเน้นการผลิตน้ำมันชีวภาพประกอบด้วย

- มีอัตราการให้ความร้อน และอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงมากที่บริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยา
- มีการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาไพโรไลซิสอย่างระมัดระวังให้อยู่ที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของวัฏภาคไออยู่ในช่วง 400-450 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาที่ไอซึ่งระเหยออกมาจากวัตถุดิบอยู่ในระบบสั้นมาก และโดยทั่วไปแล้วไม่ควรจะเกิน 2 วินาที
- มีการทำให้ไอนั้นเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเพื่อให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ซึ่งถ้ามีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้ดีแล้วจะได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพถึงประมาณร้อยละ 75 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 3.1 สรุปลักษณะกระบวนการไพโรไลซิสที่สำคัญโดยใช้วัตถุดิบจำพวกไม้ [5]

กระบวนการ	สภาวะของระบบ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%น้ำหนักสารป้อน)		
		น้ำมันชีวภาพ	ถ่านชาร์	แก๊ส
ไพโรไลซิสเร็ว	อุณหภูมิปานกลาง (ประมาณ 400-500°C), เวลาที่ไอซึ่งระเหยจากวัตถุดิบอยู่ในระบบสั้น (น้อยกว่า 2 วินาที)	75	12	13
คาร์บอไนเซชัน	อุณหภูมิต่ำกว่าไพโรไลซิสเร็ว, แต่เวลาที่ไอยู่ในระบบนานขึ้นกว่า	30	35	35
แกสซิฟิเคชัน	อุณหภูมิสูงกว่าไพโรไลซิสเร็ว, และเวลาที่ไอยู่ในระบบนานกว่าคาร์บอไนเซชัน	5	10	85

3.2.2 กลไกของกระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไป

แม้ว่ากลไกของปฏิกิริยาไพโรไลซิสค่อนข้างจะซับซ้อนขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง แต่ในภาพรวมแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่สำคัญ [6] คือ

- ช่วงก่อนไพโรไลซิส (Pre-Pyrolysis): ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 120-200 องศาเซลเซียส ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจะเกิดการจัดเรียงตัวขึ้นมาใหม่ กล่าวคือ ส่วนที่เป็นน้ำอิสระ (Free water) จะระเหยออกมา และเกิดการทำลายพันธะเคมีในโมเลกุลของวัตถุดิบบางส่วน รวมทั้งเริ่มมีอนุมูลอิสระ (Free radical) ขึ้น นอกจากนี้แล้วหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group) หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxyl group) และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide group) จะเริ่มหลุดออกจากโมเลกุล แล้วทำปฏิกิริยาได้น้ำ (H_2O) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกมาจากเนื้อวัตถุดิบบางส่วน และการระเหยของน้ำอิสระ CO_2 และ CO นี้ทำให้น้ำหนักของวัตถุดิบลดลงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 5-10 ของน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด)
- ช่วงการสลายตัว (Decomposition): เป็นขั้นตอนหลักของกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยามากที่สุด และเกิดผลิตภัณฑ์มากที่สุด โดยทั่วไปแล้วพบว่า น้ำหนักของวัตถุดิบกว่าร้อยละ 85 ของน้ำหนักทั้งหมดจะสูญหายไปในช่วงนี้ ซึ่งในช่วงการสลายตัวนี้จะเกิดการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดยาว ณ ตำแหน่งพันธะของ C-O, C-S และ C-C ออกเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่ที่สั้นลง หรือมีขนาดเล็กลง ได้สารผลิผลระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) เป็นจำนวนมาก ซึ่งสารผลิผลระหว่างปฏิกิริยาเหล่านี้ก็จะตั้งโมเลกุลของไฮโดรเจนจากสารประกอบอื่นมา และเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ บางครั้งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า “พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization)”

ปกติแล้วไอน้ำมันที่ได้จากช่วงการสลายตัวเมื่อถูกนำไปควบแน่นก็จะได้น้ำมันชีวภาพซึ่งมีคุณค่าความร้อนประมาณ 16-19 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (ประมาณร้อยละ 40 ของคุณค่าความร้อนน้ำมัน

เตา) ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในน้ำมันชีวภาพเอง (ซึ่งไม่เกินร้อยละ 25 โดยน้ำหนักของน้ำมัน) [5]

3.2.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

เครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในการแปรรูปกากตะกอน (หรือของเสียอินทรีย์) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากว่าเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดนั้น ดำเนินการโดยใช้สภาวะที่จำเพาะเจาะจง ลักษณะสภาวะที่แตกต่างกันก็จะให้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในเชิงคุณภาพ และปริมาณที่แตกต่างกันด้วย

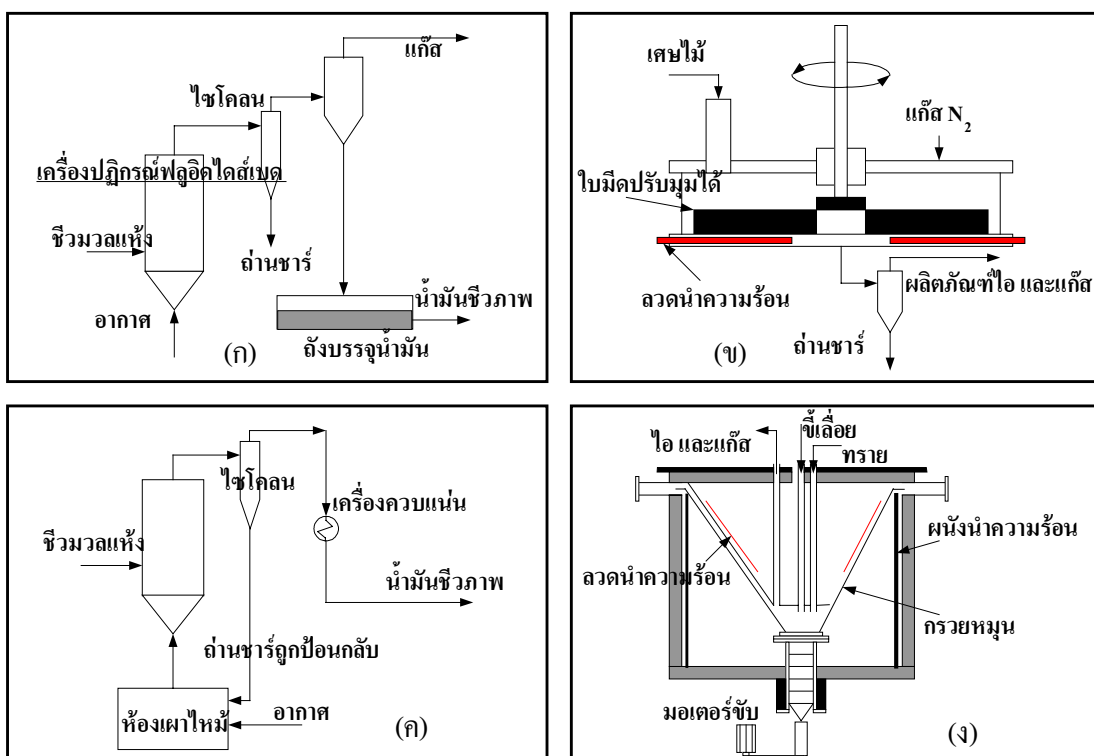
โดยทั่วไปแล้วเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสมีอยู่หลากหลายชนิด ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่พัฒนาในระดับนำร่อง หรือใช้ในระดับอุตสาหกรรมปัจจุบัน [7] ซึ่งโดยภาพรวมแล้วมีอยู่ประมาณ 6 ชนิดซึ่งได้แก่ (1) ชนิดฟลูอิดไคส์เบด (2) ชนิด Ablative (3) ชนิดฟลูอิดไคส์เบดแบบป้อนเวียน (CFB) และ (4) ชนิดกรวยหมุน ซึ่งแต่ละแบบก็มีลักษณะดังแสดงในรูปที่

3.2

ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคส์เบดนั้น โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้แก๊สเฉื่อยป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อสร้างสภาวะฟลูอิดไคส์ให้กับเบด (ซึ่งเบดโดยมากแล้วเป็นทราย) เมื่อให้ความร้อนกับเบด และป้อนตัวอย่างวัตถุดิบมาในระบบ ความร้อนก็จะถูกส่งผ่านไปยังวัตถุดิบ พร้อมกับเกิดกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนที่เป็นไอน้ำ แก๊ส และถ่านชาร์เบสจะลอยออกมาทางด้านบนของเครื่อง จากนั้นจึงเข้าสู่เครื่องไซโคลนสำหรับแยกผลิตภัณฑ์วัฏภาคไอ (และแก๊ส) กับวัฏภาคของแข็ง (คือ ถ่านชาร์) ออกจากกัน โดยถ่านชาร์จะตกมาด้านล่างของเครื่อง ในขณะที่ วัฏภาคไอน้ำจะลอยออกทางด้านบน และเข้าสู่เครื่องควบแน่นได้น้ำมันชีวภาพออกมาตามลำดับ

ชนิดที่สองเป็นชนิดที่เรียกว่า Ablative ซึ่งเป็นเครื่องที่อาศัยหลักการรีดวัตถุดิบพร้อมกับให้ความร้อน กล่าวคือ เมื่อป้อนวัตถุดิบลงมา วัตถุดิบจะถูกใบมีดครีดยกขึ้นผิวร้อน ทำให้ส่วนที่ได้รับความร้อนเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นไอน้ำ และแก๊สจะลอยออกมาเข้าสู่เครื่องไซโคลน เพื่อแยกไอน้ำกับถ่านชาร์ออกจากกัน จากนั้นไอน้ำจะเข้าสู่หน่วยควบแน่นต่อไป

ชนิดที่สามเป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดส์เบดชนิดป้อนเวียน ซึ่งมีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดส์เบดในชนิดที่หนึ่งซึ่งได้กล่าวไว้แล้ว จุดที่ต่างคือ มีการป้อนถ่านชาร์และทรายเบาซึ่งได้จากเครื่องไซโคลนกลับไปยังห้องเผาไหม้ซึ่งอยู่ด้านล่างสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้นั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ (Flue gas) ซึ่งมีความร้อนสูงจะทำหน้าที่ให้เบดเกิดสภาวะฟลูอิดไดส์



รูปที่ 3.2 แสดงตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบต่างๆ (ก) แบบฟลูอิดไดส์เบด (ข) แบบ Ablative (ค) แบบฟลูอิดไดส์เบดแบบป้อนเวียน และ (ง) แบบกรวยหมุน ตามลำดับ

ชนิดที่สี่ เป็นเตาชนิดใหม่ โดยเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีลักษณะเป็นรูปกรวย และหมุนได้ด้วยการใช้มอเตอร์ควบคุมรอบการหมุน พื้นผิวด้านในของกรวยติดลวดนำความร้อนไว้ เมื่อกรวยหมุนพร้อมกับป้อนวัตถุดิบๆจะกลิ้งไปรอบกรวยโดยอาศัยหลักของแรงหนีศูนย์กลาง และเมื่อได้รับความร้อนผลิตภัณฑ์ไอ (และแก๊ส) จะลอยออกมาทางด้านบนของเครื่อง ในขณะที่ส่วนที่เป็นถ่านชาร์ซึ่งมีน้ำหนักมากจะตกมาทางด้านล่างของกรวย อย่างไรก็ตามในปัจจุบันนี้มีการประยุกต์ใช้กระบวนการไพโรไลซิสอย่างกว้างขวาง และมีลักษณะต่างๆกันจำนวนมากดังสรุปในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพทั่วโลกในปี 1998 [7]

สถานที่ติดตั้งระบบ	ประเทศ	เทคโนโลยี	อัตราป้อน (kg/hr)	สถานะการ ดำเนินระบบใน ปัจจุบัน (ค.ศ.1998)
Castle Capital	แคนาดา	Ablative tube	2,000	ปิดระบบ
	แคนาดา	ฟลูอิดไคส์เบด	1,500	ขึ้นออกแบบ
Dynamotive	อเมริกา		1,360	เลิกในปี 1994
	อเมริกา	Ablative Vortex	1,250	กำลังดำเนิน
Interchem	อเมริกา		1,000	การ
	อิตาลี	Circulating bed	625	กำลังดำเนิน
Red Arrow/Ensyn	อิตาลี	3	500	การ
	เนเธอร์แลนด์	Circulating bed	200	กำลังดำเนิน
Red Arrow/Ensyn	สเปน		200	การ
	เบลเยียม	Circulating bed	200	เลิกในปี 1992
ENEL/Ensyn	แคนาดา		125	ขึ้นออกแบบ
	แคนาดา	Stir/fluid bed	100	กำลังดำเนิน
Alten	อิตาลี	กรวยหมุน	50	การ
	อเมริกา	ฟลูอิดไคส์เบด	50	เลิกในปี 1992
BTG/Kara	แคนาดา		50	กำลังดำเนิน
	สวิตเซอร์	Entrained Flow	50	การ
Union Fenosa /Waterloo	แลนด์		50	กำลังดำเนิน

บทที่ 3 กระบวนการไพโรไลซิส กากตะกอน

	เนเธอร์แลนด์	Circulating bed	50	การ
Egemin	เยอรมนี		50	ปิดระบบ
	แคนาดา	Circulating bed	50	เลิกในปี 1990
Red Arrow/Ensyn	จีน		42	ปิดระบบ
	แคนาดา	CFB	40	เลิกในปี 1993
Ensyn	แคนาดา		20	กำลังดำเนิน
	แคนาดา	Entrained Flow	30	การ
Pasquali/ENEL	อเมริกา		20	กำลังดำเนิน
	อเมริกา	Ablative tube	20	การ
GTRI	แคนาดา		20	กำลังดำเนิน
	ฟินแลนด์	เบดนิ่ง	10	การ
BBC	กรีซ	กรวยหมุน		ปิดระบบ
		ฟลูอิดไดส์เบด		กำลังดำเนิน
Bio-Alternative		เบดเคลื่อนที่		การ
		สุญญากาศ		กำลังดำเนิน
BTG		กรวยหมุน		การ
		เตาเผา Augur		กำลังดำเนิน
University of Hamburg		Circulating bed		การ
		ฟลูอิดไดส์เบด		รื้อถอนในปี
University of Laval				1997
		Ablative Vortex		กำลังดำเนิน
University of Shenyang				การ
		Ablative Vortex		กำลังดำเนิน
WWTC		ฟลูอิดไดส์เบด		การ
		Circulating bed		กำลังดำเนิน
Ensyn				การ
		CFB		กำลังดำเนิน
Dynamotive				การ
NREL				

บทที่ 3 กระบวนการไพโรไลซิส กากตะกอน

NREL				
RTI				
VTT/Ensyl				
CRES				

ตารางที่ 3.2 สรุปกระบวนการผลิตน้ำมันชีวภาพทั่วโลกในปี 1998 (ต่อ)

สถานที่ติดตั้งระบบ	ประเทศ	เทคโนโลยี	อัตราป้อน (kg/hr)	สถานะการ ดำเนินระบบใน ปัจจุบัน (ค.ศ.1998)
Ensyn	แคนาดา	Circulating bed	10	กำลังดำเนินการ
	เยอรมนี		10	กำลังดำเนินการ
University of Tübingen	เนเธอร์แลนด์	เตา Augur	10	กำลังดำเนินการ
	เยอรมนี	กรวยหมุน	5	กำลังดำเนินการ
University of Twente	โปรตุเกส	ฟลูอิดไดส์เบด	5	กำลังดำเนินการ
	สหราชอาณาจักร	ฟลูอิดไดส์เบด	3	กำลังดำเนินการ
BFH/IWC	จักร	Ablative Plate	3	กำลังดำเนินการ
3	แคนาดา		3	กำลังดำเนินการ
INETI	สหราชอาณาจักร	ฟลูอิดไดส์เบด		กำลังดำเนิน
	จักร		2	การ*
University of Aston	แคนาดา	Ablative Plate	1	กำลังดำเนินการ
	สหราชอาณาจักร	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังสร้างใหม่
RTI	จักร	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังดำเนินการ
	กรีซ		<1	รื้อถอนในปี
University of Aston	เยอรมนี	CFB	<1	1990

บทที่ 3 กระบวนการไฟโรไลซิส กากตะกอน

	อเมริกา	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	รู้ถนอนแล้ว
University of Waterloo	กรีซ		<1	กำลังดำเนินการ
	อเมริกา	Ablative mill	<1	กำลังดำเนินการ
University of Aston	แคนาดา	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังดำเนินการ
	สหราชอาณาจักร	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังดำเนินการ
CPERI	จักร	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังดำเนินการ
	สหราชอาณาจักร	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังดำเนินการ
BFH(IWC)	จักร	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	ขึ้นออกแบบ
	เยอรมนี	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังดำเนินการ
Colorado School of Mines	มาเลเซีย	ฟลูอิดไดส์เบด	<1	กำลังดำเนินการ
	สเปน	ฟลูอิด ไดส์เบด		กำลังดำเนินการ
CPERI	อิตาลี	ฟลูอิด ไดส์เบด		กำลังดำเนินการ
	เยอรมนี	ฟลูอิด ไดส์เบด		
NERI	สเปน	ฟลูอิด ไดส์เบด		
	ฟินแลนด์	ฟลูอิด ไดส์เบด		
RTI				
University of Aston				
University of Leeds				
University of Oldenburg				
University of Technology				
University of sandiago				
University of Sassari				
University of Stuttgart				

University of Zaragoza				
VTI				

หมายเหตุ

* ย้ายรวมกับ RTI ปี 1995

3.3 กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนในประเทศไทย

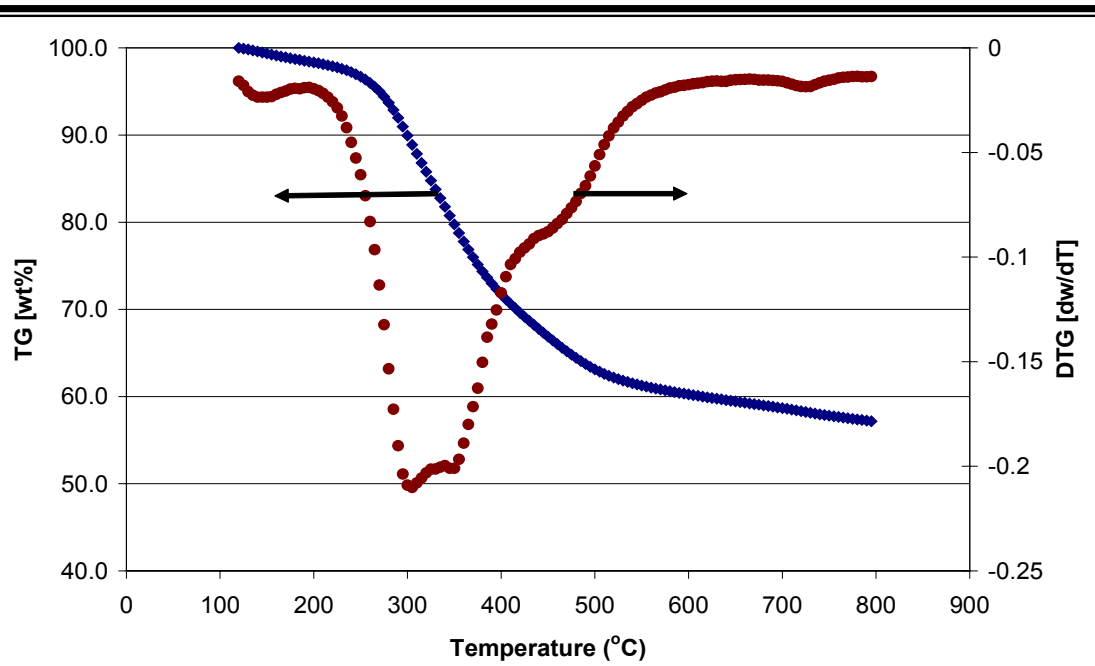
เพื่อให้กระบวนการไพโรไลซิสนี้เกิดประโยชน์แก่การนำมาประยุกต์ใช้ภายในประเทศไทยได้ รวมทั้งจะได้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการศึกษาในอนาคต ดังนั้นทีมผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนในประเทศไทย ซึ่งในที่นี้ดำเนินการเก็บตัวอย่างกากตะกอนจำนวน 19 แห่งจากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล และโรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2

3.3.1 การศึกษาลักษณะของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนด้วยวิธี TGA

วิธี Thermogravimetric Analysis (TGA) เป็นวิธีการหนึ่งในการศึกษาปฏิกิริยาไพโรไลซิสด้วยการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักในระหว่างการดำเนินของปฏิกิริยา ณ เวลาใดๆ ดังนั้นถ้าดำเนินการศึกษาในช่วงเวลาที่ยาวนานก็จะทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการสลายตัวของวัตถุดิบ อันเนื่องมาจากความร้อนที่ให้กับระบบ รวมถึงผลกระทบเนื่องจากอัตราการให้ความร้อนที่ต่างกันด้วย

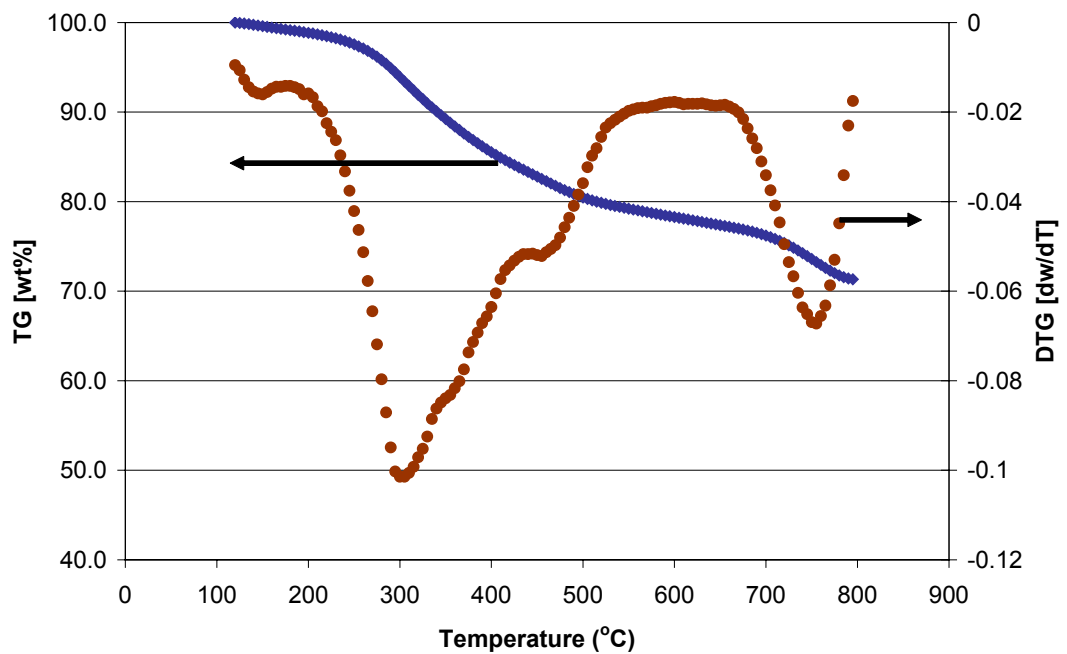
ซึ่ง พบว่า กากตะกอนตัวอย่างซึ่งได้จากแหล่งต่างๆกันจะมีลักษณะต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.3

¹ ตามแผนการเดิมได้วางแผนไว้ว่าจะได้ดำเนินการทดสอบกากตะกอนจำนวน 20. แห่ง แต่ในช่วงที่กำลังดำเนินการศึกษานั้น โรงบำบัดน้ำเสียชุมชนแห่งหนึ่งไม่สามารถจัดส่งกากตะกอนได้ตามกำหนด และขาดหายไป ซึ่งในภายหลังได้รับแจ้งว่า ระบบอุปกรณ์บำบัดน้ำเสียของโรงบำบัดน้ำเสียแห่งนั้นเสียหาย ต้องหยุดทำงานเป็นระยะเวลา 7 เดือน ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้กากตะกอนในศึกษาได้เพียง 19 แห่งเท่านั้น

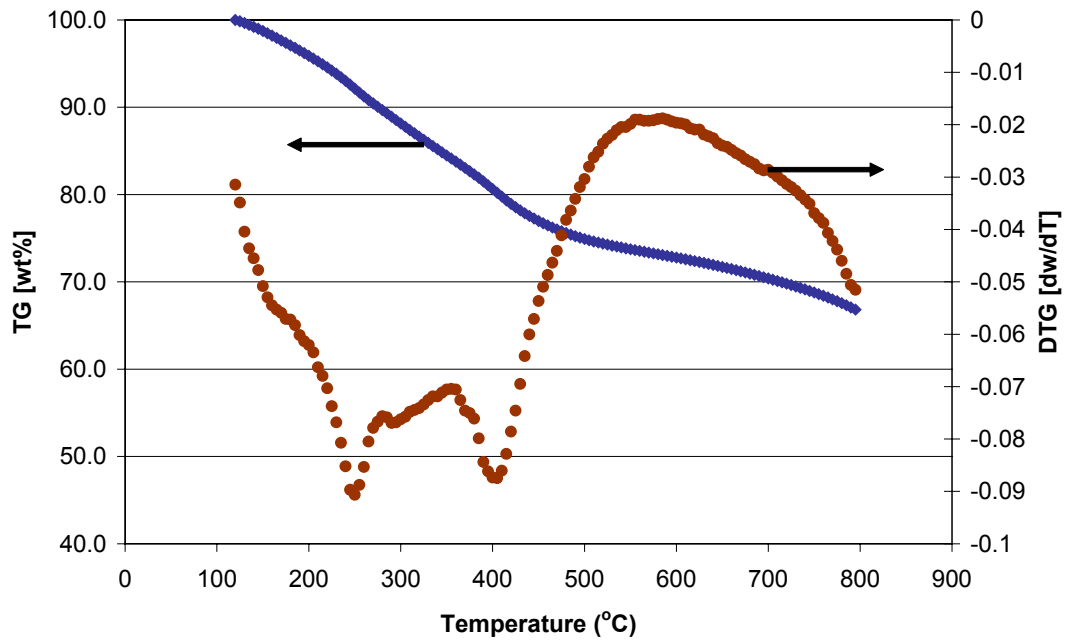


(ก)

รูปที่ 3.3 ลักษณะการสลายตัวของกากตะกอนตัวอย่างในแบบต่างๆ

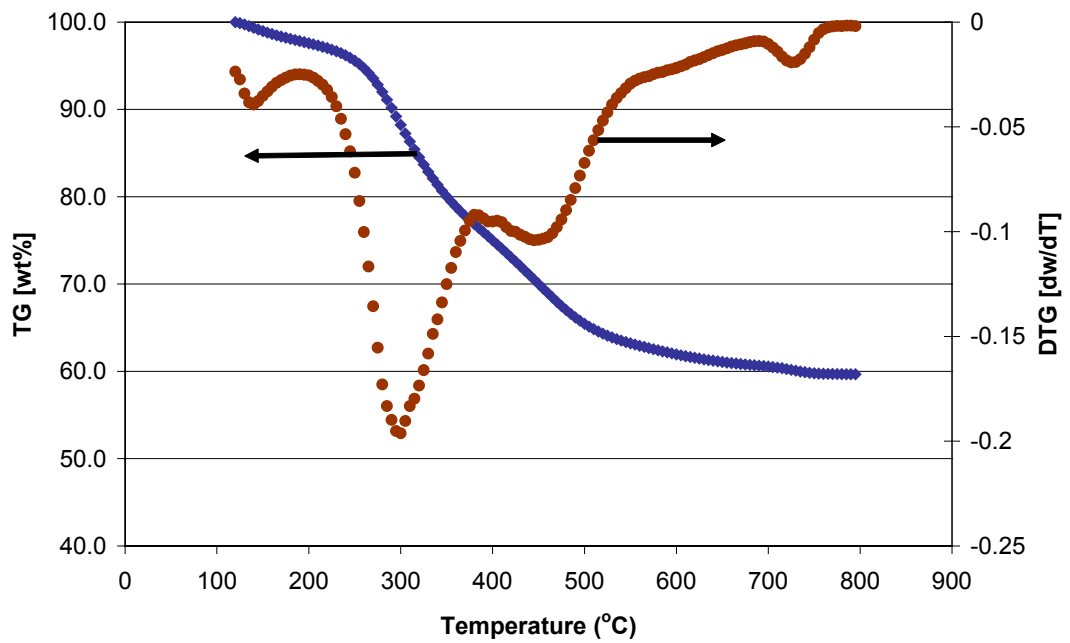


(ข)

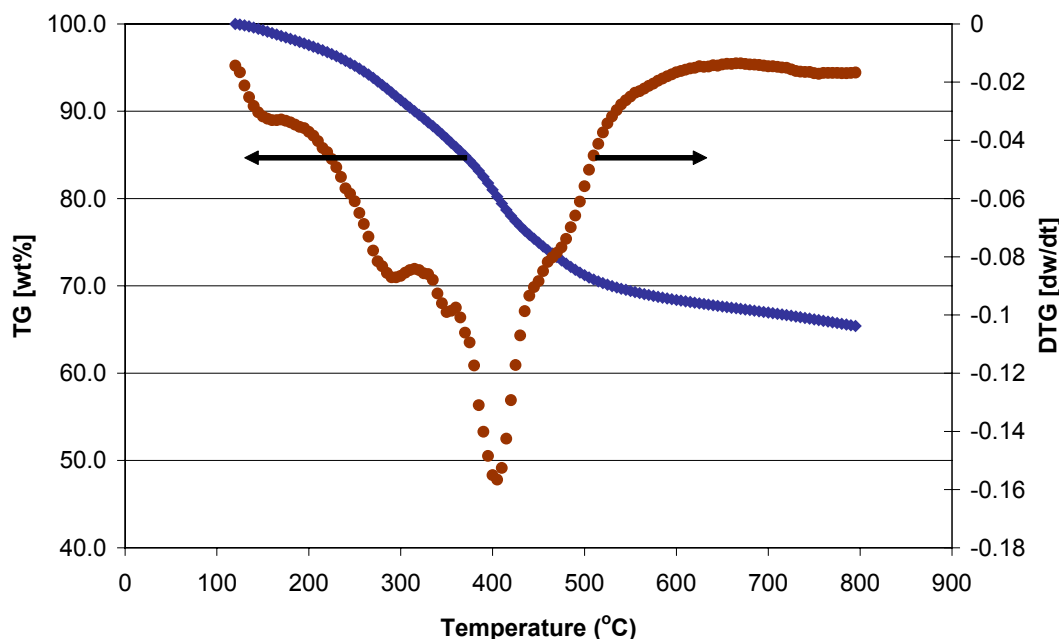


(ค)

รูปที่ 3.3 ลักษณะการสลายตัวของกากตะกอนตัวอย่างในแบบต่างๆ (ต่อ)



(ง)



(จ)

รูปที่ 3.3 ลักษณะการสลายตัวของกากตะกอนตัวอย่างในแบบต่างๆ (ต่อ)

รูปที่ 3.3 เป็นกราฟซึ่งประกอบด้วยแกนตั้งสองเส้นในด้านซ้าย และด้านขวาโดยที่แกนตั้ง ด้านซ้าย หมายถึง “น้ำหนัก” ที่เปลี่ยนแปลงไป ณ เวลาใดๆ (TG) ในขณะที่ด้านขวาหมายถึง “อัตราการเปลี่ยนแปลง” ของน้ำหนัก ณ เวลาใดๆ (DTG) ซึ่งข้อมูลจากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อกากตะกอน ตัวอย่างได้รับความร้อนในสภาวะที่ปราศจากอากาศจะมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเกิดขึ้นใน รูปของโครงร่าง (Profile) ที่ต่างกัน 5 จำพวก ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กลุ่มที่ 1 (รูปที่ 3.3 ก) ลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้แก่ เมื่อกากตะกอนได้รับความ ร้อนจนกระทั่งอุณหภูมิเป็น 100-200 องศาเซลเซียส น้ำหนักของกากตะกอนจะลดลงจากเดิมเล็กน้อยประมาณร้อยละ 2.5 ของน้ำหนักกากตะกอนโดยน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักของกากตะกอนที่ลดลงไป นี้เนื่องจากการระเหยของน้ำอิสระที่ปนอยู่กับกากตะกอน หลังจากกระบวนการระเหยของความชื้น แล้วกระบวนการไพโรไลซิสเริ่มเกิดขึ้นที่ช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-600 องศาเซลเซียส โดยที่ อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดอยู่ที่ประมาณ 300 องศาเซลเซียสซึ่งสามารถสังเกตได้จากยอด กราฟ (Peak) ซึ่งเกิดขึ้นที่อุณหภูมินั้น น้ำหนักของกากตะกอนที่ลดลงในช่วงนี้มีมากถึงประมาณ 40% ของน้ำหนักกากตะกอน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 600 องศาเซลเซียส เป็นต้นไป การ เปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากตะกอนจะเกิดขึ้นน้อยมากคือประมาณไม่เกินร้อยละ 7 ของน้ำหนัก กากตะกอน

กลุ่มที่ 2 (รูปที่ 3.3 ข) ลักษณะของการสลายตัวของกากตะกอนตัวอย่างนี้ คล้ายคลึงกับกลุ่มที่ 1 โดยสังเกตเห็นได้ว่าที่อุณหภูมิ 100-200 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากตะกอนเล็กน้อย และในช่วงอุณหภูมิประมาณ 200-600 องศาเซลเซียสเป็นช่วงที่เกิดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักมากที่สุด (ประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนักกากตะกอน) และที่อุณหภูมิประมาณ 300 องศาเซลเซียสเป็นจุดซึ่งมีอัตราการเกิดปฏิกิริยามากที่สุด อย่างไรก็ตามเป็นที่น่าสังเกตว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่า 600 องศาเซลเซียส กากตะกอนในกลุ่มนี้มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเกิดขึ้นเป็นครั้งที่ 2 ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 650-800 องศาเซลเซียส แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงในช่วงแคบ ซึ่งน้ำหนักของกากตะกอนที่ลดลงไปอยู่ที่ประมาณร้อยละ 5 โดยน้ำหนักกากตะกอนเท่านั้น

อย่างไรก็ตามเป็นที่ทราบอยู่แล้วว่า กระบวนการไฟโรไลซิสนั้นมักจะไม่เกินที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์โดยทั่วไปจะสิ้นสุดที่อุณหภูมินี้ ดังนั้นจึงอาจจะสันนิษฐานได้ว่า การเปลี่ยนแปลงในครั้งที่สองนั้น เป็นการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของสารอินทรีย์ เช่น โลหะหนักบางชนิด หรือสารประกอบจำพวกคาร์บอนेटก็อาจเป็นไปได้ ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูล TG ที่ว่า การระเหยของสารอินทรีย์นั้นมีเพียงร้อยละ 20 เท่านั้น ซึ่งน้อยกว่าในกลุ่มที่ 1 ถึง 2 เท่าโดยประมาณ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของสารระเหยในกากตะกอนกลุ่มนี้มีน้อย เมื่อเทียบกับปริมาณเถ้าที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ

กลุ่มที่ 3 (รูปที่ 3.3 ค) ลักษณะการสลายตัวของกากตะกอนในกลุ่มนี้จะมีลักษณะที่ต่างออกไปจากสองกลุ่มแรกอย่างชัดเจน โดยสังเกตได้ว่าในช่วงของการระเหยของความชื้น (100-200 องศาเซลเซียส) จะมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในปริมาณที่มากกว่า 2 กลุ่มแรก ซึ่งเป็นไปได้ว่า ปริมาณความชื้นจากการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณนั้นมีสูงมาก ที่อุณหภูมิในช่วง 200-600 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงปฏิกิริยาไฟโรไลซิสหลักเกิดขึ้น พบว่า มีขดกราฟ DTG เกิดขึ้นถึงสองขดกราฟที่อุณหภูมิประมาณ 250 และ 400 องศาเซลเซียส ตามลำดับ การที่มีขดขดถึงสองอันนี้อาจจะเป็นไปได้ว่าในกระบวนการมีการเกิดปฏิกิริยาไฟโรไลซิสขององค์ประกอบหลักจำนวนสองชนิดที่แตกต่างกัน นอกจากนี้แล้วพบว่า น้ำหนักของกากตะกอนที่เปลี่ยนแปลงในช่วงนี้อยู่ที่ประมาณร้อยละ 20 ของน้ำหนักกากตะกอน ซึ่งแสดงให้เห็นคล้ายคลึงกับกลุ่มที่ 2 ว่า มีปริมาณสารระเหยค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณเถ้า

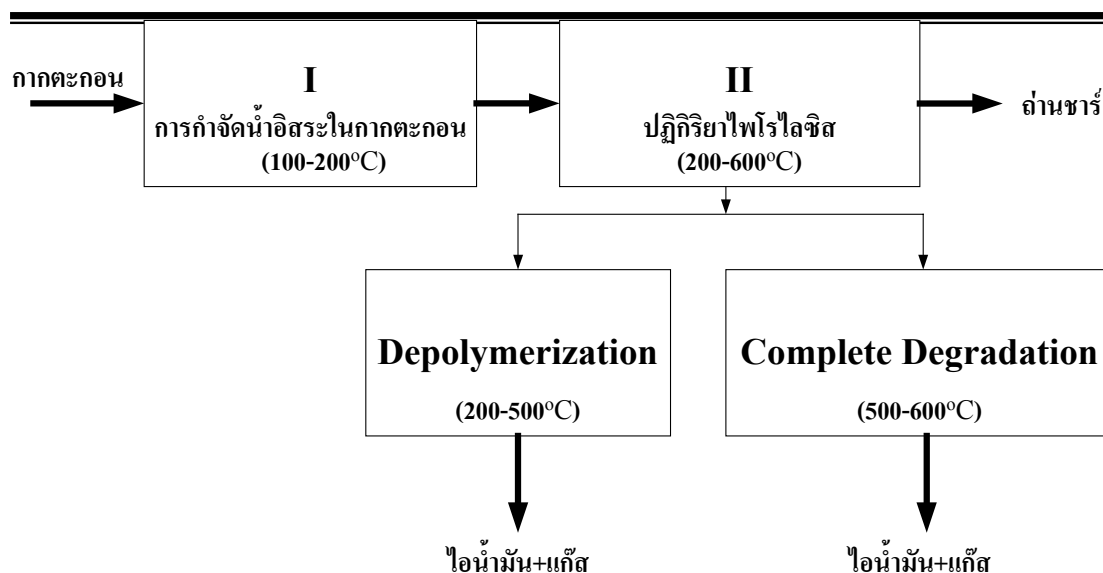
ซึ่งการที่ปริมาณเถ้ามีค่อนข้างมากนี้ส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกากตะกอนยังคงเกิดขึ้นแม้ว่าอุณหภูมิของระบบจะสูงกว่า 600 องศาเซลเซียสไปแล้วก็ตาม โดยสังเกตเห็นแนวโน้มว่า มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเกิดขึ้นอีกครั้งหนึ่งซึ่งเห็นได้ชัดเจนในกราฟ TG และ DTG

กลุ่มที่ 4 (รูปที่ 3.3 ง) กากตะกอนในกลุ่มนี้จะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักคล้ายคลึงกับกลุ่มที่ 1 กล่าวคือ การสลายตัวหลักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 200-600 องศาเซลเซียส โดยที่การเปลี่ยนแปลงมากที่สุดอยู่ที่ประมาณ 300 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามสังเกตด้วยว่า ที่อุณหภูมิประมาณ 450 องศาเซลเซียส จะมียอดกราฟ DTG เล็กๆ เกิดขึ้นค่อนข้างชัดเจน ซึ่งในช่วงของการเกิดการสลายตัวหลักนี้น้ำหนักของกากตะกอนเปลี่ยนแปลงไปประมาณ 40% โดยน้ำหนักกากตะกอน

ที่น่าสังเกตอีกจุดหนึ่งของลักษณะกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกากตะกอนในกลุ่มที่ 4 นี้คือ มียอดกราฟขนาดเล็กมากเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 750 องศาเซลเซียส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วอาจจะคาดว่าเป็นการเปลี่ยนแปลงของสารอนินทรีย์นั่นเอง แต่ในปริมาณที่น้อยมาก

กลุ่มที่ 5 (รูปที่ 3.3 จ) เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากตะกอนในกลุ่มนี้ พบว่ามีรูปแบบโครงสร้างต่างจากแบบอื่นทั้งหมด ในช่วงที่มีการระเหยน้ำอิสระภายในเนื้อกากตะกอนนั้น (ประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส) อัตราการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงนี้จะค่อนข้างมาก ทำให้ทราบว่า ปริมาณความชื้นของน้ำในกากตะกอนตัวอย่างกลุ่มนี้มีค่อนข้างสูง ในช่วงการเกิดกระบวนการไฟโรไลซิส (ประมาณ 200-600 องศาเซลเซียส) ยอดกราฟ DTG พบที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส และช่วงนี้น้ำหนักกากตะกอนเปลี่ยนแปลงประมาณร้อยละ 30 เมื่อเทียบกับน้ำหนักกากตะกอนเริ่มต้น

อย่างไรก็ตามแม้ว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักกากตะกอนตัวอย่างจะแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่มข้างต้น แต่ในการศึกษาวิจัยพบว่า ในจำนวนตัวอย่างทั้งหมด 132 ตัวอย่างนั้น เข้ากันได้กับกลุ่มที่ 1 2 และ 4 มากที่สุด (ประมาณร้อยละ 90 ของจำนวนตัวอย่างทั้งหมด) และถ้าตัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักในช่วงตั้งแต่อุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียสออกไป (ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงของจำพวกโลหะหนักบางชนิด) จะพบว่า ลักษณะของกระบวนการไฟโรไลซิสกากตะกอนอาจจะแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอนหลัก [8] ได้แก่



รูปที่ 3.4 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนตัวอย่างด้วยข้อมูล TGA [8]

- **ขั้นตอนการกำจัดน้ำอิสระในกากตะกอน** ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 100-200 องศาเซลเซียส เป็นขั้นตอนการดึงโมเลกุลของน้ำที่แทรกอยู่ในเนื้อกากตะกอนออก ซึ่งในช่วงนี้น้ำหนักของกากตะกอนจะลดลงประมาณ 5% โดยน้ำหนักกากตะกอนรวม
- **ขั้นตอนปฏิกิริยาไพโรไลซิส** ซึ่งอยู่ในช่วง 200-600 องศาเซลเซียส ขั้นตอนนี้สามารถแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยกล่าวคือ ในขั้นตอนนี้เป็นการดึงเอาสารระเหยออกมาจากกากตะกอนด้วยการทำให้พันธะระหว่างโมเลกุลอินทรีย์เกิดการขาดออกจากกัน กลายเป็นโมเลกุลสายสั้นๆ (ไอน้ำมันชีวภาพ) หรือจากโมเลกุลสายสั้นอยู่แล้วให้มีขนาดเล็กลงอีก (แก๊สบางชนิดเช่น CO, CO₂, H₂ และ CH₄ เป็นต้น) เรียกขั้นตอนนี้ว่า Depolymerization ในขณะที่เมื่อกระบวนการใกล้สิ้นสุด (อุณหภูมิประมาณ 500-600 องศาเซลเซียส) ซึ่งวัตถุดิบ (คือกากตะกอน) ถูกใช้ในกระบวนการ Depolymerization หมดแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง (Complete Degradation) กล่าวคือ ไอน้ำมันบางส่วนทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวถ่านชาร์ แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของกากตะกอนมากนัก ดังนั้นข้อมูลในกราฟ TG จึงค่อนข้างคงที่

ซึ่งลักษณะกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนนี้ สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4

ข้อมูลข้างต้นสนับสนุนว่า องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนนั้นมีความเกี่ยวข้องกับกลไกการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสอย่างหนักแน่น ดังนั้นถ้าทราบข้อมูลขององค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนตัวอย่าง ก็จะช่วยในการ “ประเมิน” ถึงลักษณะของกระบวนการไพโรไลซิสได้ในเบื้องต้นอีกทางหนึ่ง

3.3.2 จลนพลศาสตร์กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน

ข้อมูลจาก TGA นอกจากจะใช้ในการประเมินลักษณะของกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว ยังมีประโยชน์ในการศึกษาจลนพลศาสตร์ได้อีกทางหนึ่งด้วย โดยศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักกากตะกอนในช่วงเวลา ซึ่งการศึกษาจลนพลศาสตร์กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนนี้เป็นประโยชน์อย่างมากในการใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการคาดการณ์ถึงสถานะที่เหมาะสมเช่น ช่วงอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยา (Resident time) เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพในปริมาณมากที่สุด นอกจากนี้แล้วข้อมูลจลนพลศาสตร์ยังสามารถใช้เป็นตัวแปรเบื้องต้นสำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสในระดับนำร่อง หรือระดับอุตสาหกรรมได้

โดยทั่วไปแล้วสมการอัตราการสลายตัวของมวลสาร (หรืออัตราการเกิดปฏิกิริยา) มักจะถูกเขียนให้อยู่ในรูป

$$\frac{dx}{dt} = kf(x) \quad (3.1)$$

เมื่อ

- x คือ สัดส่วนของมวลสารที่สูญหายไป
- $f(x)$ คือ ฟังก์ชันของสัดส่วนมวลสารที่สูญหายไป
- t คือ เวลาซึ่งอาจจะมีหน่วยเป็นวินาที หรือนาที
- k คือ ค่าคงที่ของ Arrhenius

โดยที่

$$k = A \exp(-E / RT) \quad (3.2)$$

เมื่อ

- A คือ ค่า pre-exponential factor
- E คือ พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

และ เมื่อกำหนดให้ β คืออัตราการให้ความร้อน สมการที่ 3.1 สามารถประยุกต์ได้ว่า

$$\frac{dx}{dT} = \frac{A}{\beta} \exp(-E/RT) f(x) \quad (3.3)$$

โดยทั่วไปแล้วเทอม $f(x)$ จะแสดงถึงสมมุติฐานของกลไกของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งอาจสมมุติให้อยู่ในรูปของปฏิกิริยาลำดับ n

$$f(x) = (1-x)^n \quad (3.4)$$

จากแบบจำลองจลนศาสตร์ดังกล่าว ดังนั้นสำหรับการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน โดยใช้ข้อมูลจากอุปกรณ์ TGA นั้น จึงจำเป็นจะต้องแปลงสมการให้อยู่ในรูปของสมการอินทิกรัลดังนี้

$$g(x) = \int_0^x \frac{dx}{f(x)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^T \exp(-E/RT) dT \quad (3.5)$$

ด้วยวิธีการประมาณทางคณิตศาสตร์สมการที่ 3.5 จึงสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น

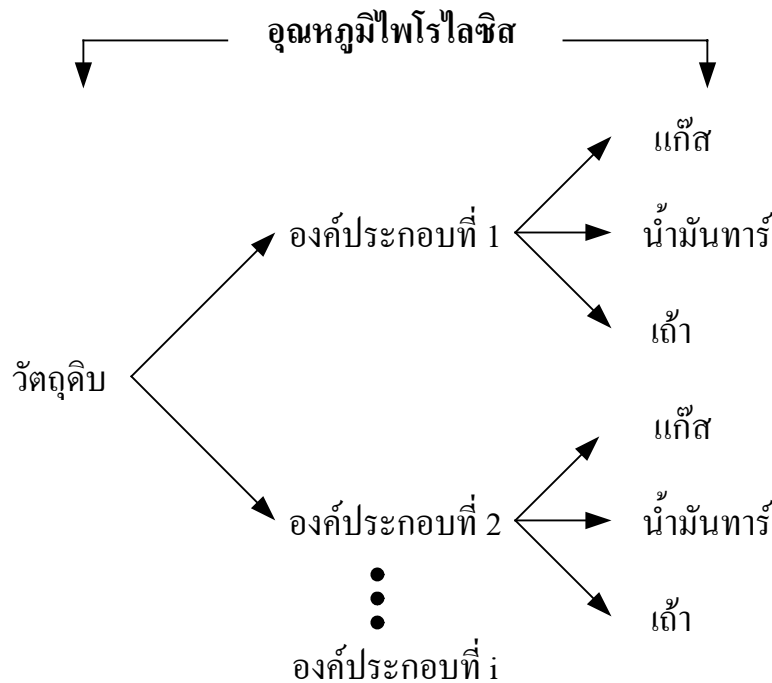
$$\ln \left[\frac{g(x)}{T^2} \right] = \ln \frac{AR}{\beta E} \left[1 - \frac{2RT}{E} \right] - \frac{E}{RT} \quad (3.6)$$

และ

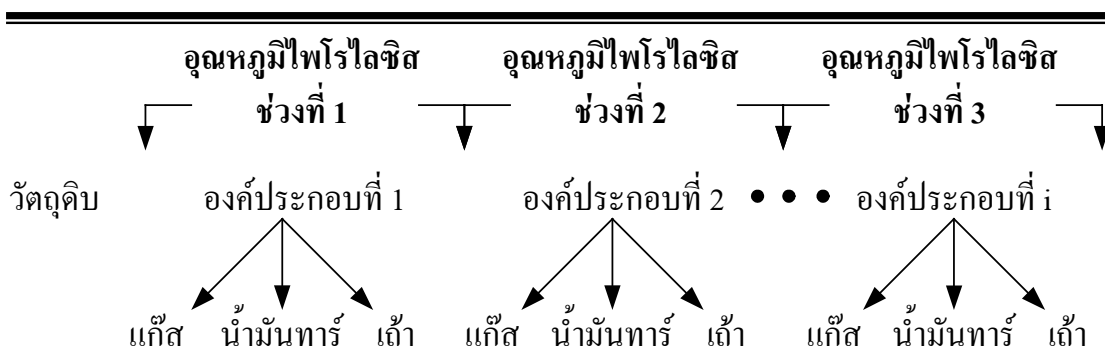
$$g(x) = \begin{cases} -\ln(1-x) & n=1 \\ \frac{1-(1-x)^{1-n}}{1-n} & n \neq 1 \end{cases} \quad (3.7)$$

สมการที่ 3.6 และ 3.7 ซึ่งเป็นสมการทั่วไปนี้สามารถใช้สำหรับการอธิบายจลนพลศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิสได้ดีสำหรับปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในขั้นตอนเดียว อย่างไรก็ตามสำหรับกากตะกอนแล้ว เมื่อพิจารณาจากกราฟ DTG จะเห็นได้ว่า น่าจะมีขั้นตอนของปฏิกิริยามากกว่าหนึ่งขั้นตอน วิธีการสำหรับแก้ปัญหานี้ทำได้โดยใช้แบบจำลองของกระบวนการ ซึ่งอาจจะแบ่งได้เป็นองค์

ประกอบเสมือนเดียว (Pseudo Single Component Overall Model; PSOM) ซึ่งเป็นแบบจำลองโดยใช้สมมติฐานว่า “แต่ละองค์ประกอบของวัตถุดิบเกิดปฏิกิริยาไปพร้อมๆกันในช่วงอุณหภูมิเดียวกันทั้งหมด” ดังรูปที่ 3.5 และแบบจำลองหลายองค์ประกอบเสมือน (Pseudo Multi-component Overall Model, PMOM) ซึ่งมีสมมติฐานว่า “แต่ละองค์ประกอบของวัตถุดิบเกิดปฏิกิริยาเป็นแต่ละช่วงอุณหภูมิที่แยกจากกันชัดเจน” ดังรูปที่ 3.6 ในที่นี้ยกตัวอย่างว่าองค์ประกอบภายในกากตะกอนมี 2 องค์ประกอบ และเรียกว่าเป็น แบบจำลองชนิด 2 องค์ประกอบเสมือน (Pseudo Bi-component Separate State Model, PBSM) [9] สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.5 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสตามแบบจำลอง PSOM



รูปที่ 3.6 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสตามแบบจำลอง PMOM

$$\frac{dx}{dT} = \begin{cases} \frac{w_{10} - w_{1\infty}}{w_{10} - w_{2\infty}} \frac{dx_1}{dT} & w_{10} < w < w_{1\infty} \\ \frac{w_{20} - w_{2\infty}}{w_{20} - w_{2\infty}} \frac{dx_2}{dT} & w_{20} < w < w_{2\infty} \end{cases} \quad (3.8)$$

และ

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dT} = \frac{A_1}{\beta} \exp(-E_1/RT) f_1(x_1) & w_{10} < w < w_{1\infty} \\ \frac{dx_2}{dT} = \frac{A_2}{\beta} \exp(-E_2/RT) f_2(x_2) & w_{20} < w < w_{2\infty} \end{cases} \quad (3.9)$$

เมื่อ

w_{i0} และ $w_{i\infty}$ คือ มวลเริ่มต้นและมวลสุดท้ายขององค์ประกอบเสมือน

ตัวห้อย i มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบเสมือนที่ i ($i=1,2,3, \dots$)

ซึ่งในการศึกษานี้กำหนดให้ กระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนประกอบด้วยปฏิกิริยาย่อย 2 ขั้นตอน ดังนั้นจึงตั้งสมมติฐานโดยใช้แบบจำลององค์ประกอบเสมือน 2 องค์ประกอบ ซึ่งเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน (ดูที่กราฟ DTG ประกอบ) โดยแบบจำลองจลนพลศาสตร์ดังกล่าวนี้ จะสมมุติให้การสลายตัวของมวลสารเกิดจากองค์ประกอบเสมือน 2 ชนิด ซึ่งสลายตัวได้ในช่วงอุณหภูมิที่ต่างกัน (เว้นแต่ในบางกรณีซึ่งมีฮิสเทอรีซิสมากกว่า 2 ตำแหน่งดังนั้นต้องประยุกต์ใช้แบบจำลององค์ประกอบเสมือนหลายองค์ประกอบ) ควบคู่กับวิธีวิเคราะห์ความถดถอย (Regression

Method) ในการคำนวณหาค่าตัวแปรจลนพลศาสตร์ในแบบจำลอง ซึ่งค่าตัวแปรทางจลนศาสตร์ที่คำนวณได้นั้น แสดงไว้ในตารางที่ 3.3

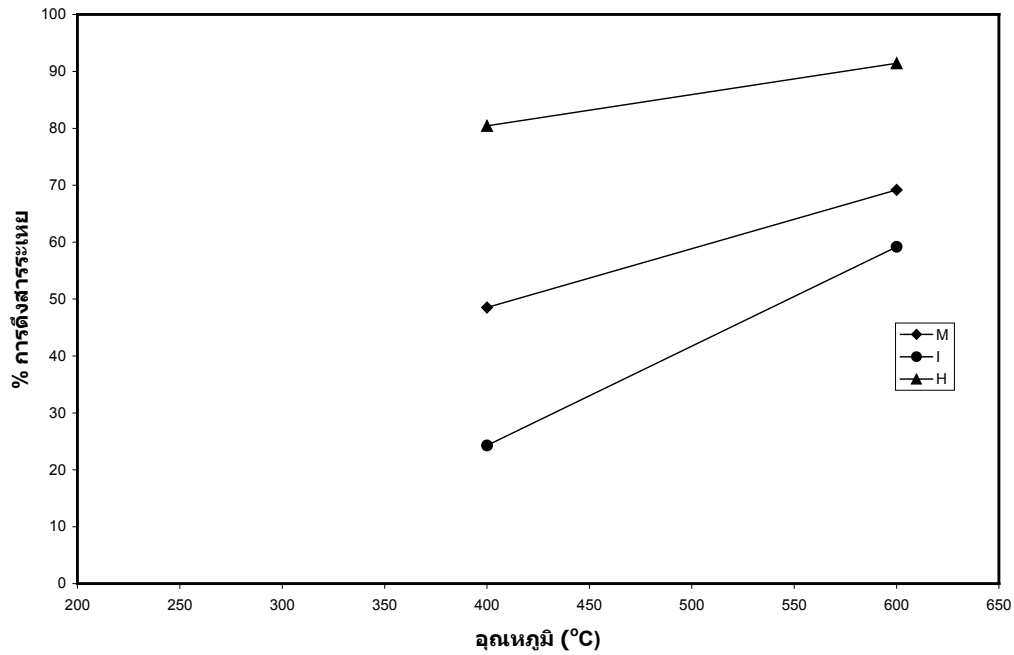
ตารางที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่า ในกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนนั้น ไม่ว่าจะแหล่งใดสำหรับในช่วงอุณหภูมิที่หนึ่ง (100-400 องศาเซลเซียส) ซึ่งเป็นช่วงหลักของกากตะกอนทุกแหล่ง จะมีค่าพลังงานกระตุ้นที่ใกล้เคียงกันคือประมาณ 65-84 กิโลจูลต่อโมล ในทุกอัตราการให้ความร้อน ในขณะที่ในช่วงที่สอง (400-600 องศาเซลเซียส) นั้นพลังงานกระตุ้นมีความแปรผันค่อนข้างมากในอัตราการให้ความร้อนที่ต่างกัน คืออยู่ในช่วง 79-219 กิโลจูลต่อโมล ซึ่งแสดงว่าให้เห็นว่า แม้ว่าปฏิกิริยาจะเกิดในช่วงอุณหภูมิที่สองเดียวกัน แต่ชนิดของส่วนที่เกิดปฏิกิริยาน่าจะต่างชนิดกัน ซึ่งตรงกันข้ามกับกรณีในช่วงที่หนึ่ง สำหรับช่วงที่สามซึ่งอุณหภูมิมากกว่า 600 องศาเซลเซียสนั้น โดยทั่วไปแล้วไม่น่าสนใจมากนักเนื่องจากเป็นช่วงที่พ้นไปจากกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว

กลุ่มของภาคตะกอน	อัตราการให้ความร้อน (°C min ⁻¹)	แบบจำลอง	ช่วงที่ 1		ช่วงที่ 2		ช่วงที่ 3	
			E (kJ/mol)	n	E (kJ/mol)	n	E (kJ/mol)	n
1	5	PSOM	69.2	1.79				
	10		76.9	2.34				
	20		74.5	2.28				
2	5	PBSM	73.6	1.48	162.8	1.73		
	10		69.4	1.46	179.0	1.81		
	20		65.3	1.47	108.7	1.67		
3	5	PBSM	73.2	1.61	91.2	1.96		
	10		73.2	1.57	79.9	1.78		
	20		73.2	1.55	85.0	1.79		
4	5	PBSM	65.1	1.50	219.0	1.92		
	10		66.3	1.45	185.4	1.87		
	20		71.4	1.30	149.3	1.78		
5	5	PMOM	84.5	1.16	149.0	1.41	119.9	1.33
	10		78.1	1.13	135.6	1.47	122.5	1.32
	20		67.6	1.11	141.5	1.51	152.9	1.33

3.3.3 อิทธิพลของอุณหภูมิในระบบที่มีต่อกระบวนการไพโรไลซิส

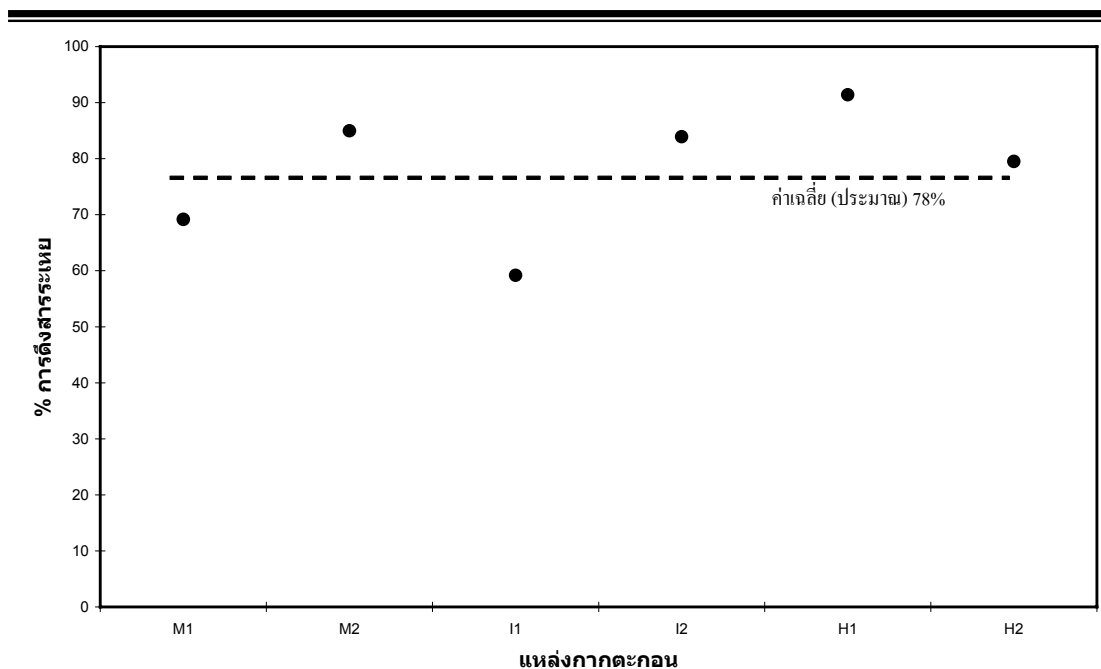
จากการทดสอบอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อกระบวนการไพโรไลซิสพบว่า ในภาพรวมแล้วไม่ว่าจะใช้กากตะกอนจากแหล่งใดก็ตาม แนวโน้มที่เห็นได้ชัดคือ “ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ฟุ้งได้”² มีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นแปรผันตามอุณหภูมิ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

² ปริมาณน้ำมันฟุ้งได้ คือ ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ฟุ้งได้จริงเมื่ออุปกรณ์เครื่องควบแน่นมีประสิทธิภาพในการควบแน่นไอน้ำมันระเหยที่ถูกลดจากวัฏุดิบ (ในที่นี้คือ กากตะกอน) ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เป็นอุดมคติ (100%) ดังนั้นตัวเลขในแกนตั้งจึงใช้ว่า “ร้อยละการดั่งสารระเหย” ซึ่งจะอธิบายละเอียดในหัวข้อ 3.3.4 การศึกษากระบวนการไพโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ



รูปที่ 3.7 อิทธิพลของอุณหภูมิของระบบที่มีต่อปริมาณน้ำมันฟิงได้ จากตัวแทนของกากตะกอนแหล่งต่างๆ (M แหล่งชุมชน, I แหล่งอุตสาหกรรม, H แหล่งโรงพยาบาล)

รูปที่ 3.7 แสดงอย่างชัดเจนว่า ไม่ว่าจะใช้กากตะกอนจากแหล่งชุมชน แหล่งอุตสาหกรรม หรือแหล่งโรงพยาบาล เมื่อนำไปผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้วมีแนวโน้มเป็นเช่นเดียวกันคือ ปริมาณน้ำมันชีวภาพฟิงได้ จะมากขึ้นตามอุณหภูมิของระบบ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจริงแล้ว จะไม่ใช่อุณหภูมิที่สูงเกินกว่า 600 องศาเซลเซียส เนื่องจากเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และจะทำให้ได้ปริมาณถ่านชาร์มากขึ้น (Carbonization) รวมทั้งเป็นช่วงพ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว



รูปที่ 3.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดั่งสารระเหยจากกากตะกอนแหล่งต่างๆ ด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (M แหล่งชุมชน, I แหล่งอุตสาหกรรม, H แหล่งโรงพยาบาล)

นอกจากนี้แล้วยังพบอีกว่า ที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันสำหรับกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ซึ่งพบว่า ความสามารถของกระบวนการไฟโรไลซิสในการดั่งสารระเหยจากกากตะกอน (เพื่อนำมาควบแน่นเป็นน้ำมันชีวภาพ) จากทุกแหล่งจะมีค่าใกล้เคียงกัน และอยู่ที่ประมาณร้อยละ 78 เมื่อเทียบกับสารระเหยที่มีอยู่ในเนื้อกากตะกอน

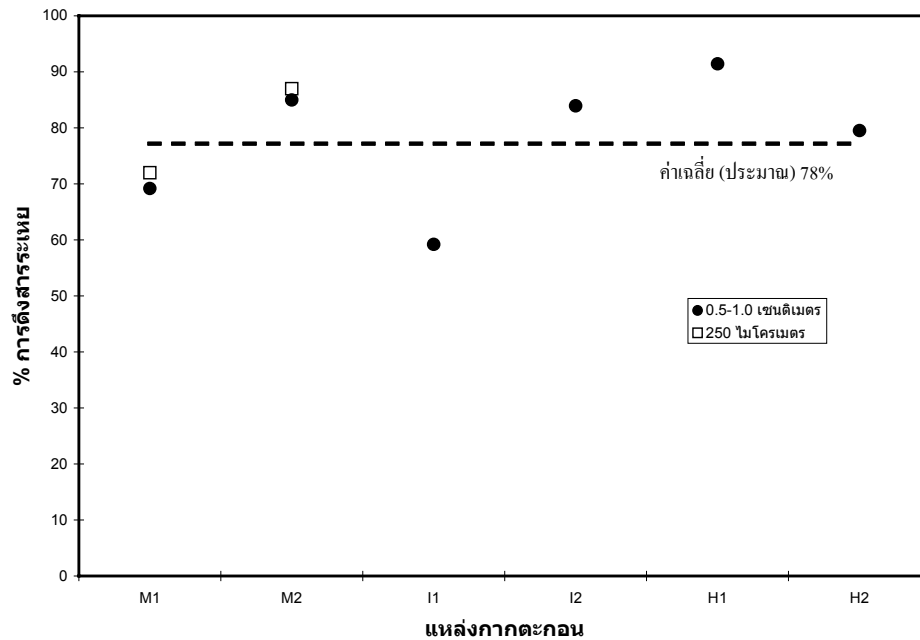
3.3.4 การศึกษากระบวนการไฟโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการ

การศึกษากระบวนการไฟโรไลซิสในระดับห้องปฏิบัติการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะทราบถึงสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการไฟโรไลซิสกากตะกอน โดยตัวแปรตามที่ใช้เป็นดัชนีชี้วัดคือ “ปริมาณน้ำมันชีวภาพ” ที่ได้มีมากน้อยเพียงไรในสถานะหนึ่ง ซึ่งในที่นี้จะเน้นหนักไปในการศึกษาอุณหภูมิของระบบเป็นตัวแปรหลัก โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเบดนิ่ง และแบบเตาหมุนเป็นเครื่องปฏิกรณ์หลักในการศึกษา

แม้ว่าได้มีการวิจัยพบว่า ขนาดของวัตถุดิบเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส [10] ซึ่งสรุปไว้ว่า เวลาที่ทำปฏิกิริยา (ไพโรไลซิส) จะเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ข้อสรุปนี้หมายความว่า ถ้าขนาดของวัตถุดิบใหญ่อัตราการถ่ายโอนความร้อน และถ่ายโอนมวลจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการเกิดถ่านชาร์เพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่อัตราการเกิดน้ำมันชีวภาพลดต่ำลง และยังเสนอด้วยว่าขนาดของวัตถุดิบที่เหมาะสมไม่ควรจะมีขนาดมากกว่า 1 เซนติเมตร

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาอิทธิพลของขนาดกากตะกอนที่มีต่อกระบวนการไพโรไลซิสด้วยการใช้เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งซึ่งมีขนาดบรรจุกากตะกอนได้ 15 กิโลกรัมต่อกะ พบว่า ไม่เหมาะที่จะใช้กากตะกอนเป็นวัตถุดิบซึ่งมีขนาดเล็กกว่า 1 เซนติเมตรเนื่องจากถ้ากากตะกอนมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ จะทำให้เกิดเป็นเบดที่มีความหนาแน่นมาก กลับจะทำให้การถ่ายโอนความร้อนจากผนังเตาเข้าสู่ภายในกึ่งกลางเครื่องปฏิกรณ์น้อยลงมากตามไปด้วย ทำให้เกิดปฏิกิริยาเฉพาะกากตะกอนที่อยู่บริเวณที่อยู่ใกล้กับผนังเตาเท่านั้น ในขณะที่บริเวณใกล้กับกึ่งกลางเตาไม่เกิดปฏิกิริยาขึ้นเลย [11] ดังนั้นสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งจะใช้กากตะกอนขนาดประมาณ 2.5-3.0 เซนติเมตร เป็นหลัก

สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุนนั้น ไม่สามารถใช้กากตะกอนตัวอย่างขนาด 2.5-3.0 เซนติเมตร เท่ากับที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งได้ เนื่องจากมีขนาดใหญ่เกินไป (เมื่อเทียบกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อหมุนประมาณ 3.0 เซนติเมตร) ทำให้เกิดการอุดตันได้ ในขณะเดียวกันได้มีการทดสอบโดยใช้กากตะกอนจากแหล่งชุมชนสองแห่ง ที่มีขนาดเล็กมากๆ (ประมาณ 250 ไมครอน หรือประมาณ 0.25 มิลลิเมตร) จะทำให้ท่อน้ำมันก่อนเข้าสู่หน่วยควบแน่นเกิดการอุดตัน เนื่องจากว่า กากตะกอน และถ่านชาร์ซึ่งมีขนาดเล็กมากๆเช่นนี้จะลอยออกมาพร้อมกับไอน้ำมันด้วย ดังนั้นเมื่อไอน้ำมันไปตกกระทบ และเกาะบนผิวด้านในของท่อ ผงกากตะกอน และถ่านชาร์ก็จะไปตก จับตัว และสะสมในบริเวณนั้นด้วย ดังนั้นเมื่อเวลาผ่านไปการจับเกาะบนผิวด้านในของท่อนี้ก็จะมากขึ้นไปเรื่อยๆ ทำให้ท่อน้ำมันเข้าสู่หน่วยควบแน่นเกิดการอุดตันได้ ดังนั้นเพื่อป้องกันปัญหาอุดตันในท่อเช่นนี้ จึงได้ปรับใช้กากตะกอนซึ่งมีขนาดใหญ่ขึ้น แต่ไม่เกิน 2.5 เซนติเมตร โดยพบว่าขนาดกากตะกอนที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 0.5-1.0 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าร้อยละการดั่งสารระเหยแล้วพบว่า ขนาดของกากตะกอน 250 ไมครอน และ 0.5-1.0 เซนติเมตร มีค่าไม่แตกต่างกันนักดังแสดงในรูปที่ 3.9 ด้วยเหตุนี้จึงอาจสรุปได้ว่า ขนาดของกากตะกอนแทบไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของกระบวนการไพโรไลซิส



รูปที่ 3.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการดึงสารระเหยจากกากตะกอนแหล่งต่างๆ ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส (M แหล่งชุมชน, I แหล่งอุตสาหกรรม, H แหล่งโรงพยาบาล)

เครื่องปฏิกรณ์สำหรับในการศึกษานี้แบ่งออกเป็นสองชนิด คือ เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และเครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมูน ซึ่งมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.810



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสในการศึกษา (ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมูน

(ก) เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง สำหรับใช้ในการศึกษานั้นมีขนาด 15 กิโลกรัมต่อกะ (1 กะหมายความว่า เสร็จสิ้นการทำงานในแต่ละรอบ ซึ่งใช้เวลาประมาณ 8 ชั่วโมง) ได้รับความร้อนจากลวดนำความร้อนที่พันอยู่รอบๆเครื่องปฏิกรณ์ สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในได้ เมื่อระบบทำงาน และกากตะกอนได้รับความร้อนจนถึงจุดที่เกิดปฏิกิริยา ไอของน้ำมันจะลอยสู่ด้านบนของเครื่องพร้อมกับส่วนที่เป็นแก๊ส และไหลไปตามท่อที่ยื่นออกมา และต่อเข้ากับหน่วยควบแน่น น้ำมันที่ควบแน่นได้จะถูกเก็บในภาชนะ และแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้ก็จะถูกจุดไฟทิ้งไป และหลังจากครบแปดชั่วโมงแล้วจึงปิดเครื่อง เมื่อเครื่องเย็นแล้วจึงนำถ่านชาร์ที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ออกมา ในที่นี้กำหนดให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นตัวแทนเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch Reactor)

(ข) เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุน มีลักษณะเป็นรูปท่อทรงกระบอกวางในแนวทำมุม 15 องศา กับแนวราบ สามารถหมุนได้โดยใช้มอเตอร์ในการควบคุมความเร็วรอบ ในที่นี้ใช้อัตราการป้อน 380 กรัมต่อชั่วโมง เมื่อป้อนกากตะกอนวัตถุดิบลงมา กากตะกอนจะไหลลงตามทางลาดด้วยแรงโน้มถ่วงโลก พร้อมกับที่เตาก็ให้ความร้อนกับกากตะกอนๆก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส ส่วนที่เป็นไอน้ำมัน และแก๊สจะออกมาปลายทางอีกด้าน และไหลเข้าสู่หน่วยควบแน่นเพื่อกลั่นได้น้ำมันชีวภาพ ในขณะที่เดียวกันถ่านชาร์ก็จะไหลลงสู่ภาชนะเก็บ ในที่นี้กำหนดให้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นตัวแทนเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous Reactor)

อย่างไรก็ตาม สำหรับการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งเป็นตัวแทน) และเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (ซึ่งใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุนเป็นตัวแทน) เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดมีขนาดไม่เท่ากัน เพื่อให้เห็นตัวเลขประสิทธิภาพในของแต่ละระบบเพื่อการเปรียบเทียบที่ชัดเจนขึ้น และหลีกเลี่ยงอิทธิพลของเครื่องควบแน่นซึ่งมีขนาด และประสิทธิภาพที่ต่างกันดังนั้น จึงได้กำหนดเทอมซึ่งเรียกว่า “เปอร์เซ็นต์-การดีังสารระเหย” (Percent of Devolatilization) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบความสามารถในการดีังสารระเหยได้มากน้อยเพียงไรเมื่อเทียบต่อหน่วยน้ำหนักกากตะกอนเดียวกัน ซึ่งมีสูตรในการคำนวณดังนี้

$$\% \text{ devolatilization} = \frac{(\text{volatile in sludge equivalent} - \text{volatile in char}) \times 100}{\text{volatile in sludge equivalent}}$$

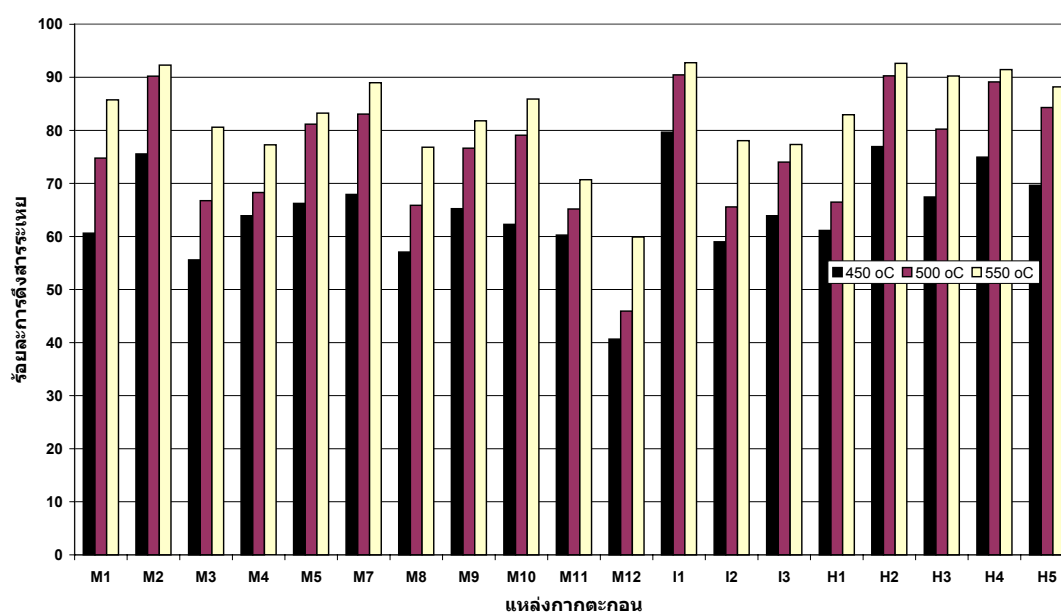
เมื่อ

volatile in sludge equivalent = ปริมาณสารระเหยในกากตะกอนต่อหน่วยน้ำหนักเทียบเท่ากับ
ถ่านชาร์

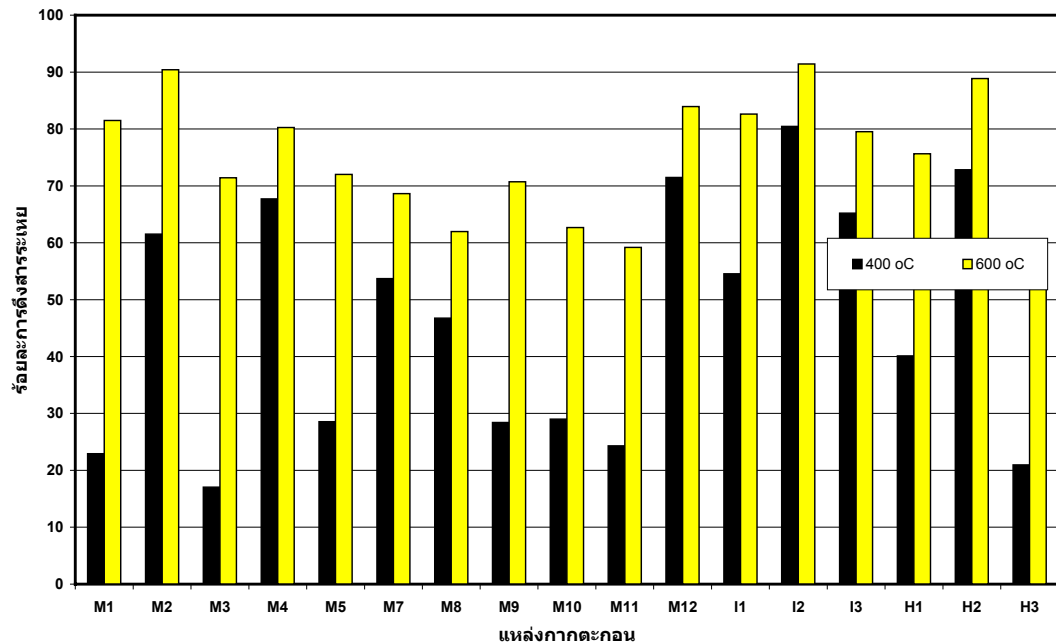
volatile in char = ปริมาณสารระเหยในถ่านชาร์

ซึ่งผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดั่งสารระเหยออกจากเนื้อกากตะกอนของเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12

ข้อมูลดังที่แสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.12 สามารถสรุปในเบื้องต้นได้ว่า ที่อุณหภูมิของระบบเดียวกัน ไม่ว่าจะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ หรือแบบต่อเนื่องก็ตาม ก็มีประสิทธิภาพไม่ต่างกันเท่าไร โดยที่อุณหภูมิ 550-600 องศาเซลเซียสประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง และแบบเตาหมุนอยู่ที่ประมาณร้อยละ 70-75 อย่างไรก็ตามสำหรับการนำไปใช้จริง จำเป็นจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยอื่นประกอบด้วยอาทิเช่น ต้นทุนในด้านต่างๆ เช่น การจัดสร้าง การดำเนินการ การดูแลรักษา เป็นต้น

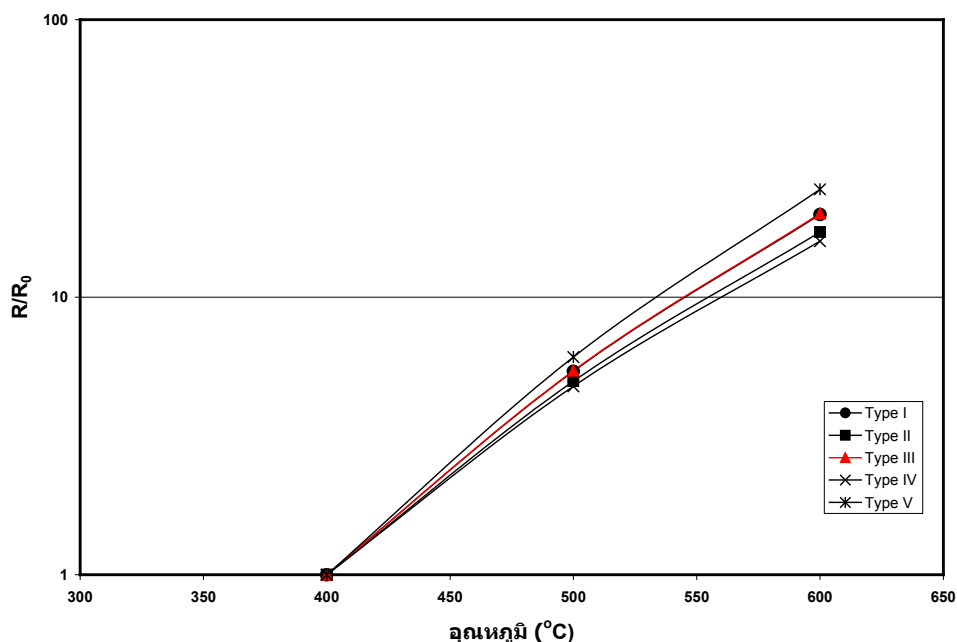


รูปที่ 3.11 เปรียบเทียบร้อยละการดั่งสารระเหยจากกากตะกอนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส ตามลำดับ



รูปที่ 3.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดั่งสารระเหยจากกากตะกอนของเครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุนที่อุณหภูมิ 400 และ 600 องศาเซลเซียส

นอกจากนี้แล้วข้อมูลจากรูปที่ 3.1-3.12 ซึ่งเห็นได้ว่า ที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีร้อยละการดั่งสารระเหยสูงกว่าด้วยนั้นสามารถอธิบายจากข้อมูลจลนพลศาสตร์ (หัวข้อ 3.3.2) ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่ำ และที่อุณหภูมิสูงจะได้ผลการเปรียบเทียบดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์อัตราการเกิดปฏิกิริยาสัมพันธ์ที่อุณหภูมิต่างๆเปรียบเทียบกับอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่ 400 องศาเซลเซียส กับอุณหภูมิโดยพบว่า ที่อุณหภูมิของระบบสูงกว่าจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูง ทำให้ไอสารระเหยออกมาจากวัตถุดิบเร็วขึ้น ดังนั้นในช่วงเวลาที่เท่ากันจึงได้ร้อยละของสารระเหยสูงกว่าที่อุณหภูมิของระบบต่ำกว่า และลักษณะเช่นนี้เหมือนกันทั้งหมดไม่ว่ากากตะกอนนั้นจะมาจากแหล่งใดก็ตาม



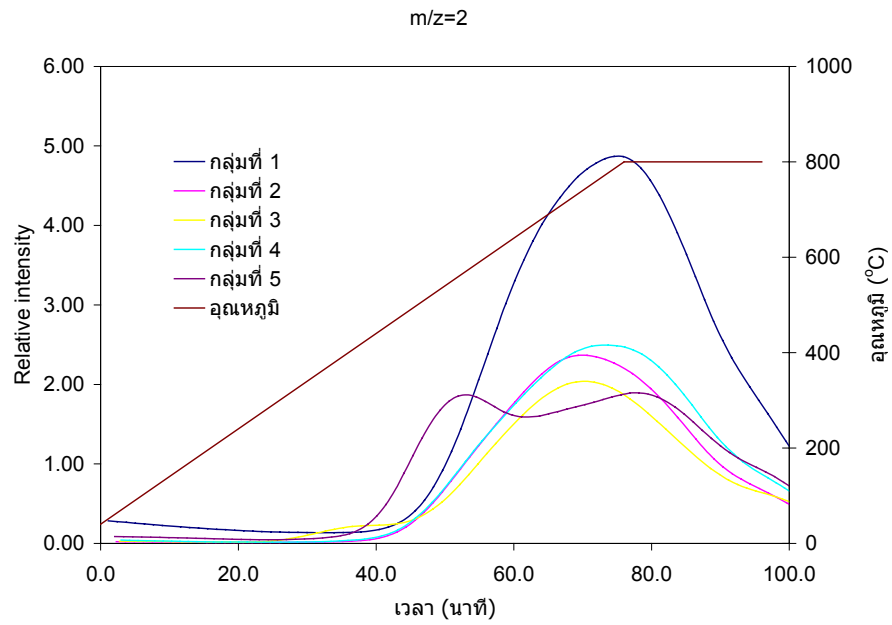
รูปที่ 3.13 เปรียบเทียบอัตราการเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับกากตะกอนทั้ง 5 กลุ่ม

3.3.5 ผลลัพธ์จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน

แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน ถูกวิเคราะห์โดยใช้อุปกรณ์ Coupled Temperature Program Pyrolysis/Mass Spectroscopy (TPP/MS) และ Pyro GC/MS โดยในการวิเคราะห์ซึ่งใช้ TPP/MS นั้นจะเน้นการตรวจวัดองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งข้อมูลได้มาจากการสุ่มตัวอย่างกากตะกอนจากแต่ละกลุ่มเพื่อทำการทดลอง ตัวอย่างจะถูกบรรจุในอุปกรณ์ลักษณะคล้ายปฏิกรณ์เบคกิงที่อยู่ภายใต้สภาวะบรรยากาศของไนโตรเจน และถูกให้ความร้อนด้วยอัตราคงที่ 20 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิห้องจนถึง 800 องศาเซลเซียส และกำหนดให้อุณหภูมิตั้งที่อีก 10 นาที แก๊สที่เกิดขึ้นในระบบจะถูกตรวจสอบด้วยอุปกรณ์ Mass Spectroscopy โดยตรงและรายงานผลสัญญาณเป็นค่ามวลต่อประจุ (m/z) เทียบกับอุณหภูมิ ซึ่งค่ามวลต่อประจุนี้จะสัมพันธ์กับแก๊สแต่ละชนิดที่เป็นไปได้ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และผลการทดลองแสดงไว้ในรูปที่ 3.14

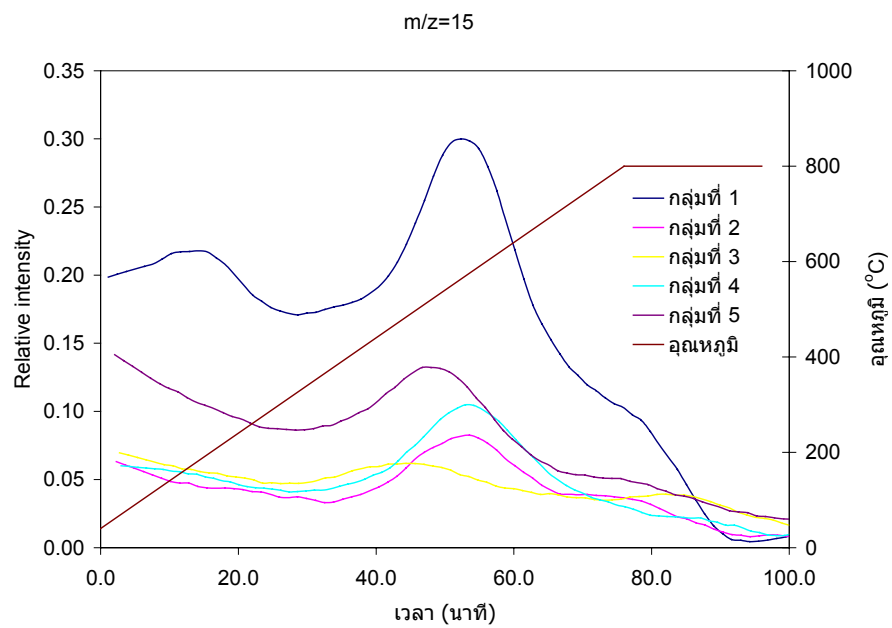
ตารางที่ 3.4 ผลิตภัณฑ์แก๊สที่คาดว่าจะเกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน

m/z	ผลิตภัณฑ์
2	H ₂ (Hydrogen)
15	CH ₄ (Methane)
18	H ₂ O (Water)
26	C ₂ H ₄ (Ethylene)
39	C ₃ H ₆ (Propylene)
43	C ₃ H ₈ (Propane)
44	CO ₂ (Carbon dioxide)
45	CH ₃ OH (Methanol)
50	CH ₃ Cl (Chloromethane)
55	C ₄ H ₁₀ (Butane)
60	CH ₃ COOH (Acetic Acid)

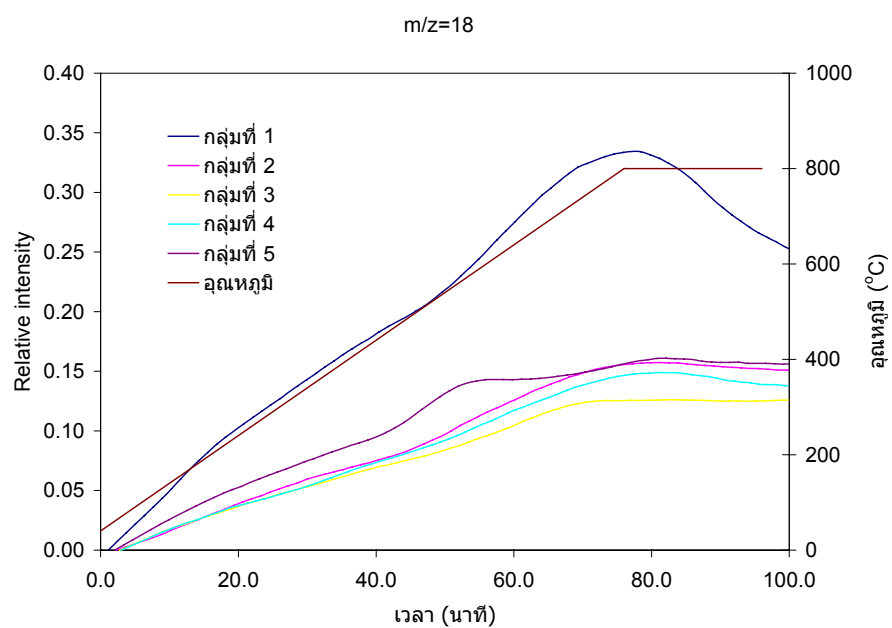


(ก)

รูปที่ 3.14 สัญญาณ MS แสดงการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน (กลุ่มที่ หมายถึง กลุ่มของกากตะกอนตามลักษณะการวิเคราะห์จาก TGA ดังแสดงในรูปที่ 3.3)

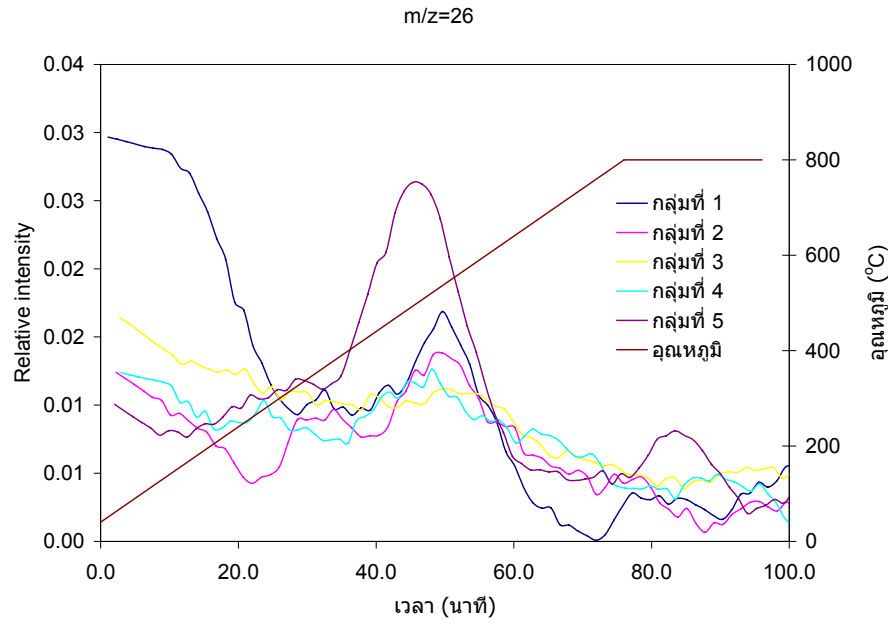


(ข)

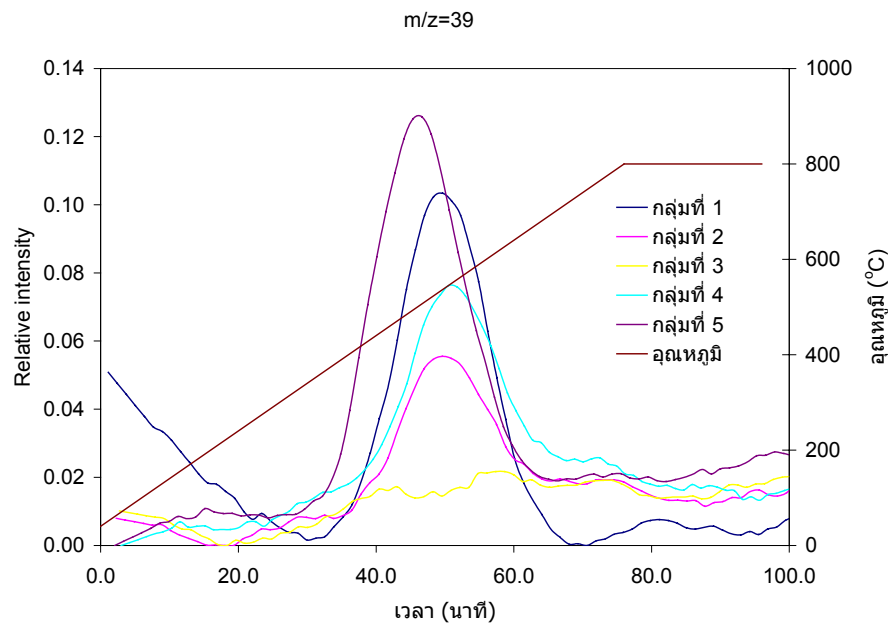


(ค)

รูปที่ 3.14 สัญญาณ MS แสดงการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน (ต่อ)

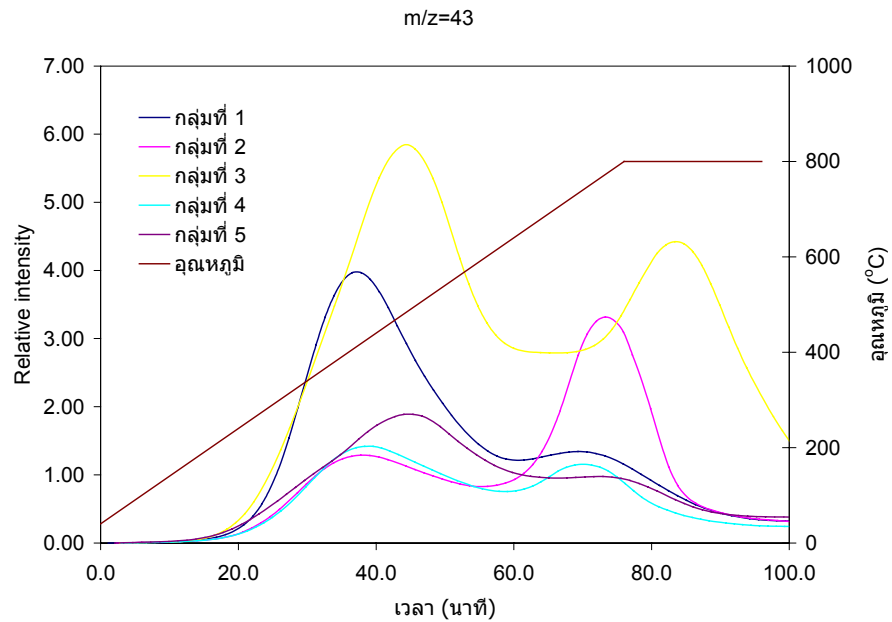


(ง)

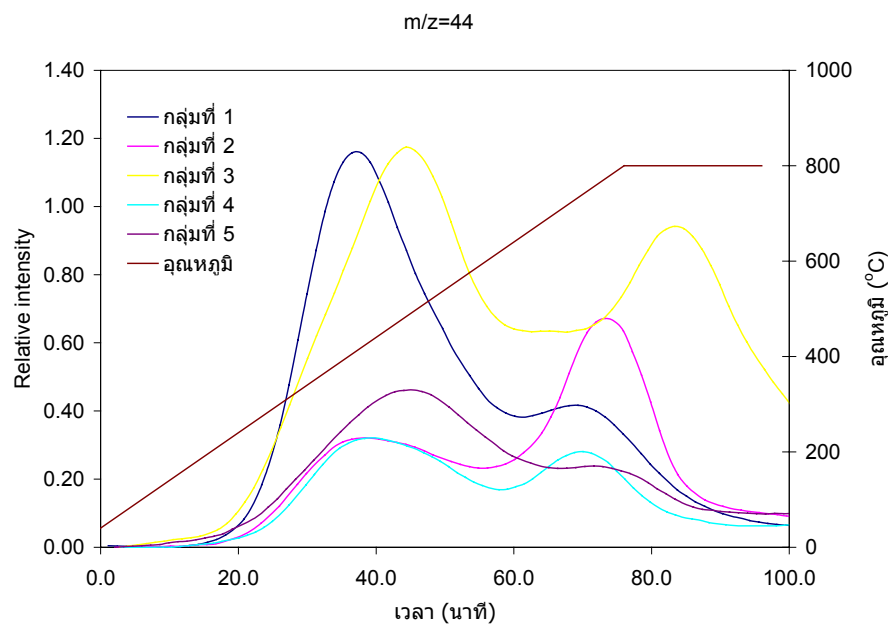


(จ)

รูปที่ 3.14 สัญญาณ MS แสดงการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน (ต่อ)

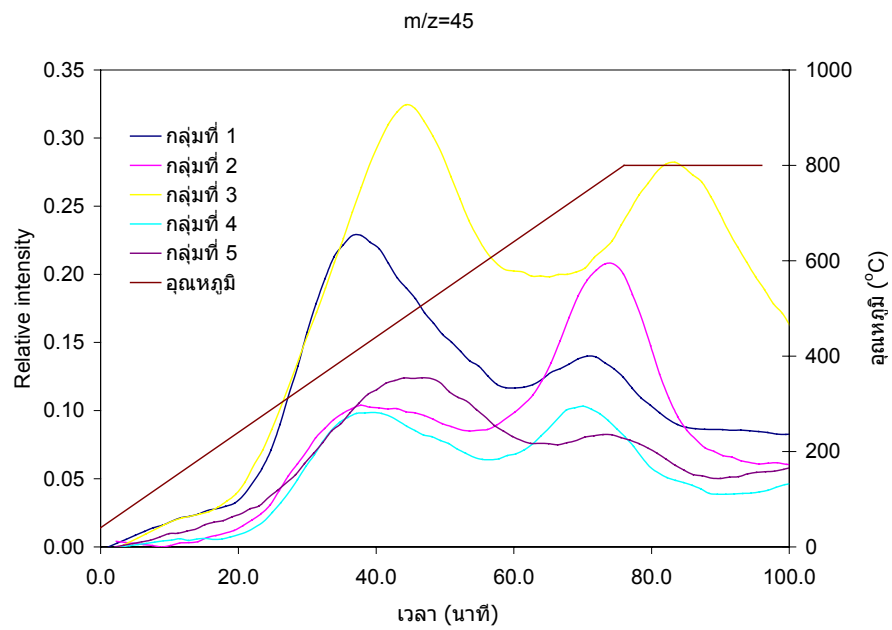


(จ)

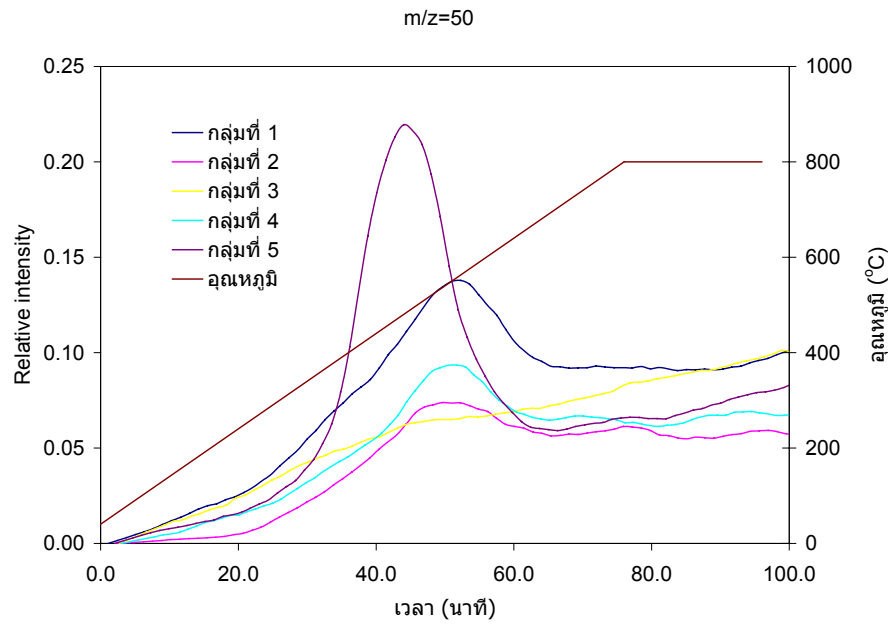


(ข)

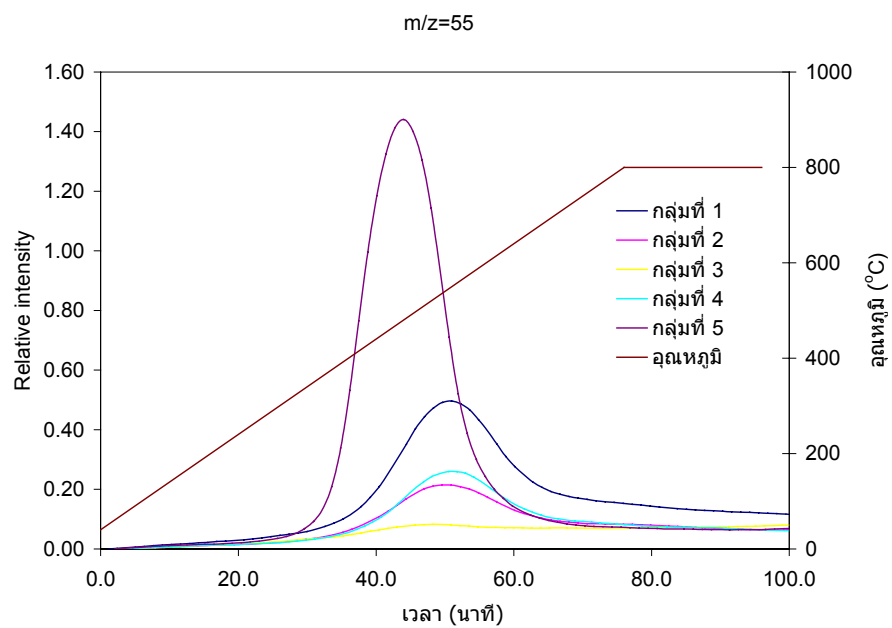
รูปที่ 3.14 สัญญาณ MS แสดงการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน (ต่อ)



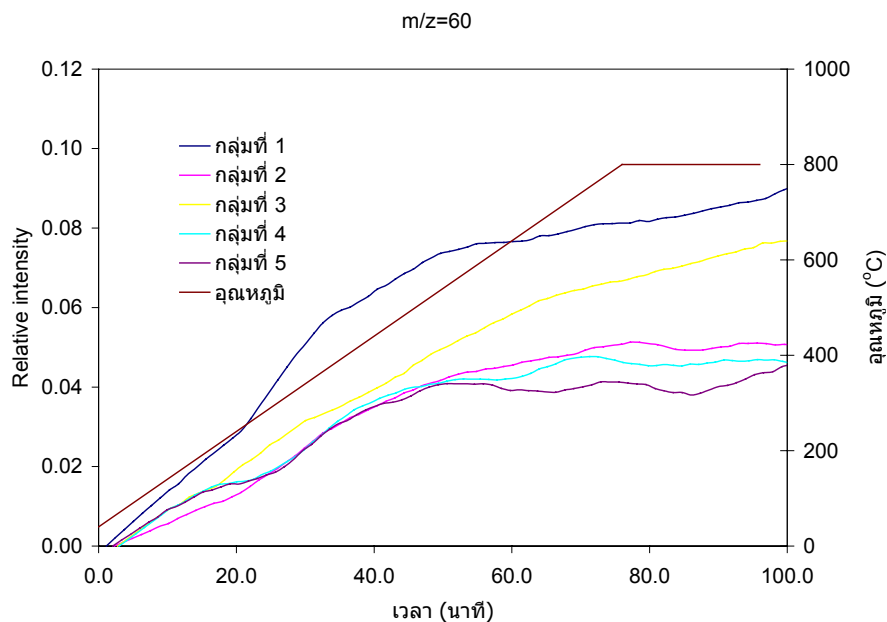
(ข)



รูปที่ 3.14 สัญญาณ MS แสดงการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน (ต่อ)



(ญ)



(ณ)

รูปที่ 3.14 สัญญาณ MS แสดงการเกิดแก๊สผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิต่างๆจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน (ต่อ)

จากผลการวิเคราะห์แก๊สดังรูปที่ 3.14 พบว่าแก๊สที่เกิดขึ้นภายในระบบไพโรไลซิสของกากตะกอน ตัวอย่างนั้น เกิดขึ้นได้แบ่งเป็น 5 ระยะ (ดูประกอบกับตารางที่ 3.5) แก๊สที่เกิดขึ้นนี้อาจเป็นได้ทั้งแก๊สปฐมภูมิที่เกิดขึ้นโดยการสลายตัวของกากตะกอนโดยตรง โดยเฉพาะในช่วงอุณหภูมิต่ำๆ (ระยะที่ 1-3) และแก๊สที่เกิดจากปฏิกิริยาทุติยภูมิของสารผลิตภัณฑ์ และอาจรวมไปถึงการแตกตัวในส่วนของน้ำมันที่เกิดขึ้นด้วย ช่วงอุณหภูมิระยะแรกที่ประมาณ 250 องศา ช่วงนี้จะทำให้เกิดแก๊สมีเทน ซึ่งพบได้เพียงเล็กน้อยในกากตะกอนกลุ่มที่ 1 ต่อมาในระยะที่ 2 และ 3 เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 300 และช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียสตามลำดับ ในระยะนี้เรียกได้ว่าเป็นส่วนของปฏิกิริยาหลักทำให้เกิดแก๊สผลิตภัณฑ์หลายชนิดได้แก่ไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ แอลกอฮอล์ และรวมไปถึงแก๊สคลอโรมีเทนด้วย ซึ่งสำหรับแก๊สยังเกิดขึ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 650 องศาเซลเซียส เรียกเป็นระยะที่ 4 นอกจากนี้แล้วที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส จะเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสำหรับกากตะกอนกลุ่มที่ 3 จัดให้เป็นระยะที่ 5

ตารางที่ 3.5 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนตัวอย่าง จำแนกตามกลุ่มของกากตะกอน และช่วงอุณหภูมิที่เกิด

ผลิตภัณฑ์		ช่วงอุณหภูมิที่เกิดและกลุ่มของกากตะกอนที่เกิดแก๊สชนิดนั้น (องศาเซลเซียส)				
m/z	ชื่อ	250	300	400-500	650	800
2	H ₂ (Hydrogen)	1		5	1,2,3,4,5	
15	CH ₄ (Methane)			1,2,3,4,5		
18	H ₂ O (Water)			5		
26	C ₂ H ₄ (Ethylene)			1,2,3,4,5		
39	C ₃ H ₆ (Propylene)			1,2,4,5		
43	C ₃ H ₈ (Propane)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
44	CO ₂ (Carbon dioxide)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
45	CH ₃ OH (Methanol)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
50	CH ₃ Cl (Chloromethane)			1,2,4,5		
55	C ₄ H ₁₀ (Butane)			1,2,4,5		

เมื่อวิเคราะห์จำแนกตามกลุ่มของกากตะกอน (ตามพฤติกรรมการสลายตัวเชิงความร้อน) แล้ว พบว่ากากตะกอนกลุ่มที่ 1,2 และ 4 จะให้กลุ่มของแก๊สผลิตภัณฑ์ที่คล้ายกัน ซึ่งสัมพันธ์กับพฤติกรรมการสลายตัว (TG-DTG) ของแต่ละกลุ่ม กล่าวคือ ปฏิกริยาหลักเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส และประมาณ 450 องศาเซลเซียสตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับแก๊สผลิตภัณฑ์หลักที่เกิดขึ้นในช่วงนี้และนอกจากนี้สำหรับกรณีกากตะกอนกลุ่มที่ 2 ซึ่งมีการสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส จะทำได้แก๊สที่ m/z = 43, 44 และ 45 เป็นหลัก สันนิษฐานได้ว่า การสลายตัวในช่วงนี้เป็นผลมาจากสารจำพวกคาร์บอนेटให้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีอิทธิพลต่อสัญญาณ MS ดังกล่าว นอกจากนี้กากตะกอนกลุ่มที่ 1 ยังให้แก๊สมีเทนที่อุณหภูมิประมาณ 250 องศาเซลเซียสอีก

ด้วย สำหรับกากตะกอนกลุ่มที่ 3 และ 5 จะมีลักษณะที่ต่างออกไปคือ กลุ่มที่ 3 ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและสังเกตได้อย่างชัดเจน คือ โพรเพน คาร์บอนไดออกไซด์ และ แอลกอฮอล์ ($m/z = 43, 44, 45$) ซึ่งมีลักษณะพิเศษคือ จะเกิดขึ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิประมาณ 800 องศาเซลเซียส ส่วนสารผลิตภัณฑ์อื่นๆ นั้น ให้สัญญาณ MS ต่ำมาก สำหรับกากตะกอนช่วงของการเกิดแก๊สจะมีลักษณะคล้ายกลุ่มแรก แต่มีผลิตภัณฑ์บางตัวที่ต่างออกไป เช่น จะเกิดน้ำ (H_2O) ที่ประมาณ 600 องศาเซลเซียส และเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส

ในขณะที่การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้ Pyro GC/MS (ชุดอุปกรณ์ PyroJector, TRACE GC and Polaris Q-MS) นั้น ทำการวิเคราะห์โดยใช้กากตะกอนตัวอย่างบดจนเป็นผงละเอียด (ประมาณ 250 ไมโครเมตร) ซึ่งนำไปใส่ในถ้วยขนาดเล็กมาก แล้วจึงฉีดเข้าสู่ระบบห้องไพโรไลซิสที่กำหนดอุณหภูมิไพโรไลซิสตามที่ได้ตั้งไว้ เมื่อกากตะกอนตัวอย่างถูกฉีดเข้าสู่ห้องไพโรไลซิสก็จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอน้ำมัน และแก๊สที่ควบแน่นไม่ได้ผสมกันเรียกว่า “ของผสมในวัฏภาคแก๊ส” จากนั้นของผสมในวัฏภาคแก๊สก็จะถูกพาไปยังเครื่อง GC/MS เพื่อทำการวิเคราะห์ชนิดของสารต่างๆ ที่อยู่ภายในวัฏภาคนี้อย่างหมดซึ่งผลที่ได้แสดงในตารางที่ 3.6-3.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.6 สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Hydrogencyanide	HCN	27
Nitrous oxide	N ₂ O	44
2-Hydroxyl-propanenitrile	C ₃ H ₅ NO	71
1H-Pyrrole-1-methyl	C ₄ H ₄ N	66
4-Pyridinamine	C ₅ H ₆ N ₂	94
2-Methyl pyridine	C ₆ H ₇ N	93
3-Methyl pyridine	C ₆ H ₇ N	93
2-Ethenyl pyridine	C ₇ H ₉ N	107
3-Ethenyl pyridine	C ₇ H ₉ N	107
3-Phenyl-5(4H)-isoxazoline	C ₇ H ₉ NO ₂	139
Indole	C ₈ H ₇ N	117
Benzyl nitrile	C ₈ H ₇ N	117
1-Isocyano-4-methyl-benzene	C ₈ H ₈ N	118
α-Ethyl benzene acetonitrile	C ₁₀ H ₁₁ N	145

ตารางที่ 3.7 สารประกอบจำพวกเบนซีน และอนุพันธ์

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Benzene	C ₆ H ₆	78
Cyclopropabenzene	C ₇ H ₆	90
Toluene	C ₇ H ₈	92
Styrene	C ₈ H ₈	104
Ethyl benzene	C ₈ H ₁₀	106
o,m,p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106
2,3-Benzo furan	C ₈ H ₆ O	118
1,4-Benzodioxin	C ₈ H ₆ O ₂	134
Indene	C ₉ H ₈	116
2-Phenyl-2,5-Cyclohexadiene-1,4-dione	C ₁₂ H ₈ O ₂	184
Benzylisopentylether	C ₁₂ H ₁₈ O	178
Benzeneacetic acid cyclopentylester	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	206

ตารางที่ 3.8 สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

Product Classes	Compound Name	Formular	Molecular Weight
Acids	Acetic acid	$C_2H_4O_2$	60
	Propanoic acid	$C_3H_6O_2$	74
	Butanoic acid	$C_4H_8O_2$	88
	Pentanoic acid	$C_5H_{10}O_2$	102
	Hexanoic acid	$C_6H_{12}O_2$	116
Aldehydes and Ketones	Acetaldehyde		
	Butanedial	$C_4H_6O_2$	86
	3-Hydroxyl butanal	$C_4H_8O_2$	89
	3-Methyl butanal	$C_5H_{10}O$	86
	Pentanedial	$C_5H_8O_2$	100
	4-Octan-3-one	$C_8H_{14}O$	126
Acohols and Ethers	Oxirane	C_2H_4O	44
	Ethyl alcohol	C_2H_6O	46
	Cyclobutanol	C_4H_8O	70
	Cyclopropyl carbinol	C_4H_8O	72
	2-Pentene-1-ol	$C_5H_{10}O$	86
	5-Hexen-2-ol	$C_6H_{12}O$	99
	2,4-Hexadiene-1-ol	$C_6H_{10}O$	103
	Benzyl alcohol	C_7H_8O	108
	3-Heptyne-1-ol	$C_7H_{12}O$	112
Furan			
	Furan (Furfural)	C_4H_4O	68
	2,3-Dihydro-furan	C_4H_6O	70
	Furfural (2-Furaldehyde)	$C_5H_4O_2$	96
Phenols and Cresols			
	Furfural alcohol	$C_5H_6O_2$	98
	Phenol	C_6H_6O	90
	o,m,p-Cresol	C_7H_8O	108
	2,3-Dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	122

ตารางที่ 3.9 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ตรงและวง

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Methane	CH ₄	16
Ethene	C ₂ H ₄	28
Ethane	C ₂ H ₆	30
1-Propyne	C ₃ H ₄	40
Propylene	C ₃ H ₆	42
Propane	C ₃ H ₈	44
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54
Butene	C ₄ H ₈	56
Butane	C ₄ H ₁₀	58
Hexane	C ₆ H ₁₄	86
3,3-Dimethyl-1,6-heptadiene	C ₉ H ₁₆	124
6-Methyl 1-octane	C ₉ H ₁₈	126
1,2,3-Trimethyl cyclohexane	C ₉ H ₁₈	126
1-Decyne	C ₁₀ H ₁₈	138
7-Methyl-1-nonyl	C ₁₀ H ₁₈	138
3,7-Dimethyl-1-octane	C ₁₀ H ₂₀	140
2,5,5-Trimethyl heptane	C ₁₀ H ₂₂	142
Decane	C ₁₀ H ₂₂	142
Undecane	C ₁₁ H ₂₄	156
2,4,6-Trimethyl octaene	C ₁₁ H ₂₄	156
1-Dodecane-3-yne	C ₁₂ H ₂₀	164
4-Dodecane	C ₁₂ H ₂₄	168
5-Dodecane	C ₁₂ H ₂₄	168
3-Methyl-3-undecane	C ₁₂ H ₂₄	168
2-Propyl-1,3,3-trimethyl cyclohexane	C ₁₂ H ₂₄	168
1-Tridecyne	C ₁₃ H ₂₄	180
6-Tridecane	C ₁₃ H ₂₆	182
6-Ethyl-2-methyl decane	C ₁₃ H ₂₈	184
3,7-Dimethyl undecane	C ₁₃ H ₂₈	184
1-Tetradecyne	C ₁₄ H ₂₆	194
3-Tetradecane	C ₁₄ H ₂₈	196
4-Tetradecane	C ₁₄ H ₂₈	196
Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	212
Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	226

3.3.6 การศึกษาคุณสมบัติของน้ำมันชีวภาพในแง่คุณค่าความร้อน

น้ำมันชีวภาพที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณค่าความร้อน เพื่อศึกษาถึงศักยภาพในการนำน้ำมันชีวภาพไปใช้ในเชิงพลังงานซึ่งจะมีคุณค่าต่อไปในเชิงพาณิชย์ ผลการศึกษาคุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพแสดงในตารางที่ 3.10 อย่างไรก็ตามน้ำมันชีวภาพที่นำมาใช้ศึกษาคุณค่าความร้อนนี้เป็นน้ำมันที่ได้จากระบบที่อุณหภูมิ 400 และ 600°C ผสมกัน เนื่องจากปริมาณที่ได้ในแต่ละครั้งไม่เพียงพอสำหรับวิเคราะห์ ด้วยเหตุนี้ค่าความร้อนที่ได้จึงเป็นค่าเฉลี่ยจากสองอุณหภูมิ

จากตารางที่ 3.10 จะสามารถเห็นได้ว่า คุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบเบดนิ่งจะอยู่ในช่วงประมาณ 18-22 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุนจะอยู่ในช่วงประมาณ 20-27 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม การที่คุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองมีความแตกต่างกันบ้างเล็กน้อยนั้น อาจจะเป็นไปได้ว่า เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งมีขนาดที่ใหญ่กว่า ดังนั้นประสิทธิภาพจึงอาจจะต่ำกว่าบ้าง

อย่างไรก็ตามเมื่อนำน้ำมันชีวภาพเปรียบเทียบกับน้ำมันชนิดอื่นๆ พบว่ามีคุณค่าความร้อนปานกลางค่อนข้างน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำมันเชื้อเพลิงฟอสซิลเช่น น้ำมันเบนซิน หรือน้ำมันดีเซล (ประมาณ 40 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านหิน (ประมาณ 27-30 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) หรือกระทั่งเทียบกับไบโอ-เอทานอล (ประมาณ 25-27 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม) [12] แล้ว น้ำมันชีวภาพก็มีศักยภาพในแง่ของพลังงานไม่ด้อยกว่าเชื้อเพลิงเหล่านี้เลย

มีเครื่องมือที่อาจจะจำเป็นต้องใช้ในอนาคต เช่น เครื่องตรวจวัดปริมาณโลหะหนัก, เครื่อง gas chromatograph-Mass spectrometer ฯลฯ

นอกจากการตรวจวิเคราะห์ และประเมินศักยภาพของกากตะกอนแล้ว ศูนย์ยังทำหน้าที่เป็นสื่อกลางระหว่างองค์กรภาครัฐ ภาคเอกชน โดยอาศัยใช้พื้นที่เว็บไซต์ของศูนย์วิจัยวัสดุประยุกต์ และสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร (<http://www.eng.mut.ac.th/Camer/>)

ตารางที่3.10 คุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์สองชนิด (น้ำมันชีวภาพผสมจากอนุภาคน้ำมันต่างๆ) เปรียบเทียบกับน้ำมันชีวภาพที่มีชีวมวลเป็นวัตถุดิบ และน้ำมันเตา

แหล่งกากตะกอน	คุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพ (เมกกะจูลต่อกิโลกรัม)	
	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง	เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุน
1.กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหยสูง		
I1	18.42	27.43
	20.84	24.15
H1	20.96	24.68
	21.63	25.23
H2	19.06	25.07
	22.84	26.23
M1	23.58	27.47
	19.81	24.36
M2	20.88	24.49
M3		
H3		
H4		
M4		
2. กลุ่มปริมาณสารระเหยปานกลาง		
I2	20.05	23.65
	20.42	23.42
M5	20.39	23.73
	21.27	22.12
H5	20.26	23.01

³ เหตุที่ใช้น้ำมันผสมเนื่องจากว่า ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนเมื่อแยกตามอนุภาคน้ำมันแล้วจะมีปริมาณน้อยมาก จนไม่เพียงพอสำหรับการนำมาใช้เป็นตัวอย่างสำหรับทดสอบหาคุณค่าความร้อน ด้วยเหตุนี้ น้ำมันชีวภาพที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งจึงต้องเตรียมให้เป็นน้ำมันผสมด้วยเพื่อให้สะดวกสำหรับการเปรียบเทียบ

บทที่ 3 กระบวนการไพโรไลซิส กากตะกอน

I3		
M7		
3. กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ		
M8	21.91	21.15
	19.34	19.54
M9	19.49	20.03
M10	20.50	21.56
M11	19.52	20.29
M12		
น้ำมันชีวภาพจากชีวมวล [13]	15.6	
น้ำมันเตา [14]	42.0	

3.4 พื้นที่ผิวของถ่านชาร์

ถ่านชาร์เป็นผลิตภัณฑ์อีกชนิดที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอน ซึ่งถ่านชาร์ที่ได้นี้เป็นกาก (Residue) ที่เหลือจากการคั่งส่วนที่เป็นสารระเหยออกจากวัตถุดิบ ลักษณะเด่นของถ่านชาร์ คือ มีพื้นที่ผิวมากพอสมควร ซึ่งเกิดจากการที่สารระเหยที่ถูกคั่งออกมานั้นอยู่ในรูปของไอน้ำมันแล้วพุ่งทะลุผ่านพื้นที่ผิวของกากตะกอนออกมา

วิธีทดสอบหาพื้นที่ผิวของถ่านชาร์โดยทั่วไปแล้วมีหลายวิธี แต่วิธีการที่ง่าย และสะดวกในการเปรียบเทียบกับวัสดุอื่นคือ วิธีการตัวเลขไอโอดีน (Iodine Number) ซึ่งหลักการคร่าวๆของวิธีการนี้คือ นำตัวอย่างมาแช่อยู่ในสารละลายไอโอดีนในช่วงเวลาหนึ่ง เพื่อดูว่าตัวอย่างนั้นๆมีความสามารถในการดูดซับไอโอดีนมากหรือน้อยเพียงไร โดยมีหลักเกณฑ์ง่ายๆว่า ถ้าดูดซับไอโอดีนได้มากก็แสดงว่ามีพื้นที่ผิวมาก ค่าตัวเลขไอโอดีนสูง ซึ่งผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 แสดงให้เห็นว่า ค่าตัวเลขไอโอดีนของถ่านชาร์ซึ่งได้จากชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุนนั้นมีค่าอยู่ระหว่างประมาณ 40-300 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่านชาร์ขึ้นกับแหล่งกากตะกอน และอุณหภูมิของระบบ พบว่า โดยทั่วไปแล้วกากตะกอนที่มีคุณค่าความร้อนสูงมักจะมีค่าไอโอดีนนับเบอร์สูงเมื่อเปลี่ยนสภาพเป็นถ่านชาร์แล้ว และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ค่าไอโอดีน

น้ำมันสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้เป็นเพราะว่า เมื่ออุณหภูมิในระบบสูงขึ้นจะทำให้อัตราการดีังสารระเหยออกมาในรูปของไอน้ำมันสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งก็จะส่งผลทำให้ความพรุนของของกากตะกอนเพิ่มขึ้น และส่งผลทำให้พื้นที่ผิวของถ่านชาร์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าไอโอดีนน้ำมัน-เบอร์กับถ่านชาร์ซึ่งได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส) พบว่า ค่าตัวเลขไอโอดีนของถ่านที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนมีค่าสูงกว่าเล็กน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เป็นเพราะขนาดกากตะกอนในระบบเครื่องแบบเบดนิ่งมีขนาดใหญ่กว่า รวมทั้งความจุของเครื่องก็มากกว่า ทำให้อัตราการส่งผ่านความร้อนจากผิวเตาไปยังกึ่งกลางเตา และจากผิววัตถุดิบไปยังกึ่งกลางวัตถุดิบจึงน้อยกว่า ทำให้อัตราการดีังสารระเหยน้อย และทำให้พื้นที่ผิวน้อยกว่าด้วย

บทที่ 3 กระบวนการไพโรไลซิส กากตะกอน

ตารางที่ 3.11 การประมาณพื้นที่ผิวของถ่านชาร์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ทั้งสองชนิดเมื่อพิจารณาจากตัวเลขไอโอดีน

แหล่งกากตะกอน	ตัวเลขไอโอดีน (มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่านชาร์)			
	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง		เครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุน	
	450 °C	550 °C	400 °C	600 °C
1.กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหยสูง				
I1	87	143	80	153
	84	143	98	153
H1	81	141	154	238
	74	132	62	163
H2	73	129	113	210
	78	143	50	257
M1	81	140	82	251
	81	135	188	272
M2	83	140	168	339
H3	72.61	123.82	40	130
	72.88	127.38	70	210
H4	67.37	120.76	78	210
M4	67.72	118.47	43	127
	81.68	140.09	132	177
2. กลุ่มปริมาณสารระเหยปานกลาง				
I2				
M5				
H5				
I3				
M7				
3. กลุ่มที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ				

บทที่ 3 กระบวนการไพโรไลซิส กากตะกอน

M8	72.19	132.22	29	154
M9	73.06	129.55	88	169
	67.77	119.88	90	170
M10	64.60	118.65	41	99
M11	64.75	119.00	99	182
M12				
ถ่านกัมมันต์ [14]	900-1,100			

3.5 การสร้างโปรแกรมสำหรับคำนวณสมมูลมวลสาร และพลังงานเบื้องต้นของกระบวนการไพโรไลซิส (PyrSim)

จากข้อมูลที่ได้ในข้างต้น สามารถใช้เป็นเครื่องมือใช้สำหรับวิเคราะห์ และตัดสินใจในการนำกากตะกอนจากแหล่งใดๆ มาเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสเมื่อพิจารณาในแง่ของปริมาณกากตะกอนที่ป้อนเข้า ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้ และใช้พลังงานในกระบวนการนั้นๆ มากหรือน้อยเพียงใด โดยอาศัยรูปแบบที่ทำให้เห็นภาพชัดเจน รวมทั้งง่าย และรวดเร็วในการคำนวณในเชิงตัวเลข ซึ่งทั่วไปแล้วมักจะอยู่ในรูปของโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับช่วยคำนวณ

3.5.1 ลักษณะของโปรแกรม

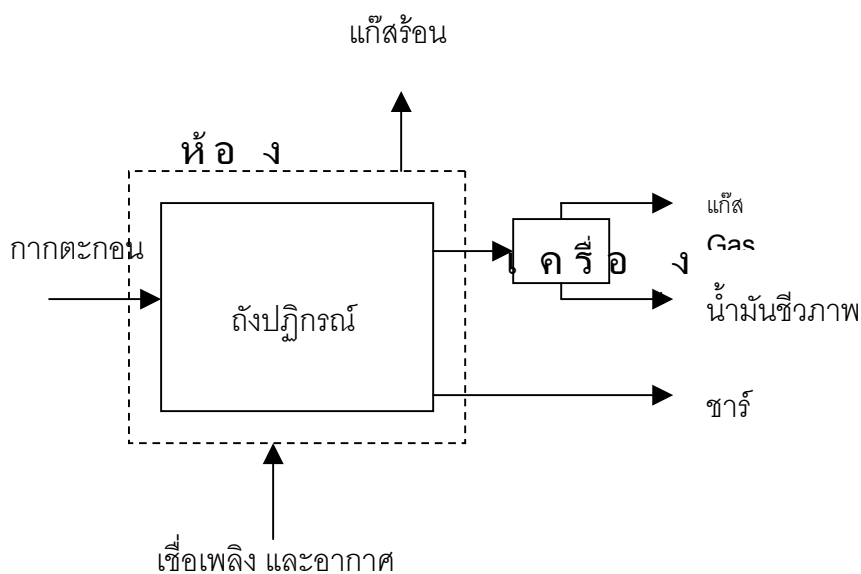
โปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ถูกออกแบบโดยถือหลักว่า “ง่ายสำหรับผู้ใช้งาน” เป็นหลักสำคัญ โดยผู้ใช้งานต้องป้อนข้อมูลเบื้องต้นของกากตะกอนได้แก่ ข้อมูลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ และ/หรือ ค่าความร้อนของกากตะกอน และป้อนค่าสถานะที่ต่างๆ ที่ใช้สำหรับกระบวนการไพโรไลซิส อาทิเช่น อุณหภูมิที่ใช้ อัตราการป้อนกากตะกอน ฯลฯ เป็นต้น จากนั้นโปรแกรมจะทำการคำนวณและรายงานผล โดยที่จะสามารถคำนวณถึง

- ปริมาณผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นก๊าซ น้ำมันชีวภาพ หรือถ่านชาร์
- องค์ประกอบต่างๆ ในก๊าซผลิตภัณฑ์
- คุณค่าความร้อนของผลิตภัณฑ์
- ปริมาณความร้อนที่จำเป็นต้องให้กับกระบวนการ

นอกจากนี้โปรแกรมยังสามารถคำนวณถึงประสิทธิภาพของกระบวนการ และสามารถนำผลที่ได้นี้ไปคำนวณวิเคราะห์กระบวนการในเชิงเศรษฐศาสตร์ต่อไปได้

3.5.2 หลักการคำนวณที่ใช้ในการพัฒนาโปรแกรม

โดยทั่วไปแล้ว เนื่องจากองค์ประกอบของระบบเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสสามารถแบ่งระบบออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของถังปฏิกริยา (Pyrolysis Reactor) และ ส่วนของห้องเผาไหม้ (Burner) เพื่อถ่ายเทความร้อนให้ถังปฏิกริยาโดย ในสองส่วนนี้จะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนกันโดยไม่มีการถ่ายเทมวลซึ่งกันและกัน โดยในถังปฏิกริยา กากตะกอนที่ป้อนเข้าไปจะถูกควบคุมสภาวะให้เกิดปฏิกิริยาและสลายตัวให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นไอระเหยออกไปทางด้านบน จากนั้นไอระเหยที่ได้จะถูกควบแน่นแยกเป็นของเหลว (Bio-Oil) บางส่วน และคงเหลือส่วนของก๊าซที่ไม่ควบแน่น (Uncondensed Gas) สำหรับส่วนของห้องเผาไหม้ จะทำการป้อนเชื้อเพลิงซึ่งอาจจะเป็นก๊าซหรือน้ำมันร่วมกับอากาศซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงและถ่ายเทความร้อนให้กับถังปฏิกริยาหลัก ระบบที่ใช้ในการคำนวณสมดุลมวลและพลังงานสำหรับระบบไพโรไลซิสของกากตะกอนสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.15



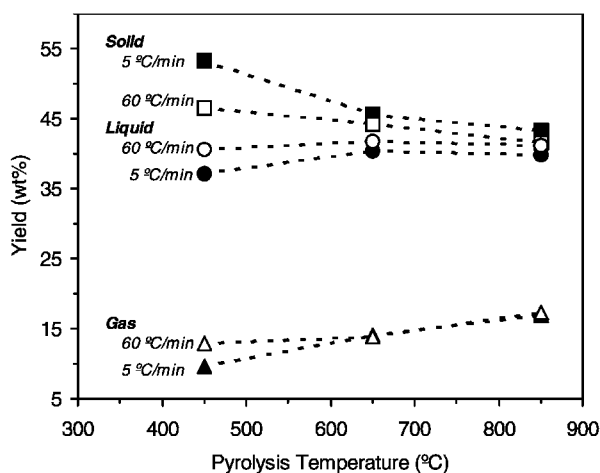
รูปที่ 3.15 ระบบที่ใช้ในการคำนวณสมดุลมวลและพลังงานรอบกระบวนการไพโรไลซิส

3.5.3 หลักการคำนวณสมดุลมวลในถังปฏิกรณ์

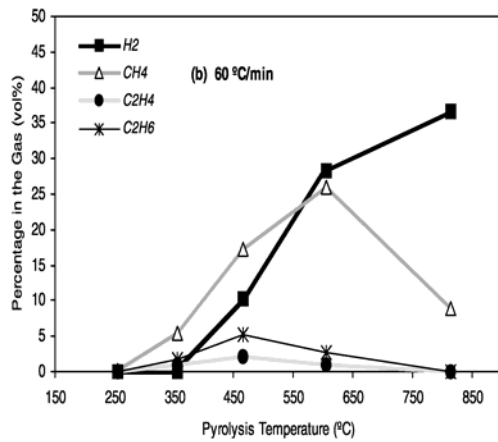
โปรแกรมนี้ถูกสร้างขึ้นโดยอ้างอิงจากผลการทดลองหาปริมาณและคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนซึ่งศึกษาโดย Inguanzo และคณะ [16] ตัวอย่างปริมาณและคุณภาพของสารผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสแสดงได้ดังรูปที่ 3.16

โปรแกรมนี้จะถูกสร้างโดยอ้างอิงกับผลการทดลองดังกล่าวบนสมมุติฐานที่ว่า ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้จะสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณดังรายละเอียดต่อไปนี้

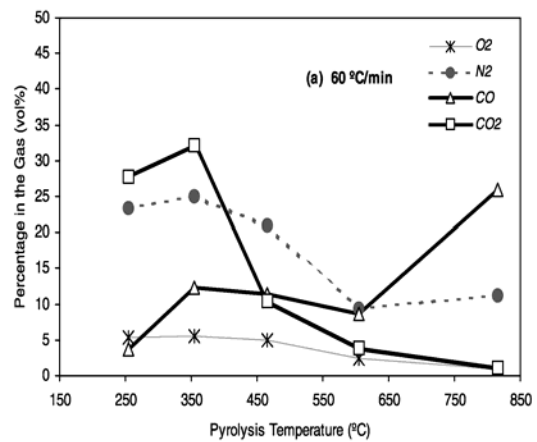
- ถ้ำ และคาร์บอนคงตัว (อยู่ในรูปของถ่านชาร์) จะหลงเหลืออยู่ในของแข็งเสมอ
- ปริมาณความชื้นในกากตะกอนเมื่อผ่านกระบวนการแล้วจะไม่ทำปฏิกิริยา และสุดท้ายจะควบแน่นกลายเป็นน้ำติดไปกับผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นของเหลว
- องค์ประกอบส่วนที่เป็นสารระเหยเท่านั้นที่จะเกิดปฏิกิริยาสลายตัวให้สารผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นก๊าซเบา ส่วนที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่โมเลกุลใหญ่ขึ้นจะควบแน่นกลายเป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (หรือน้ำมันชีวภาพ) และยังคงมีสารระเหยได้ส่วนหนึ่งที่ไม่สลายตัวหลงเหลืออยู่ในส่วนที่เป็นของแข็ง



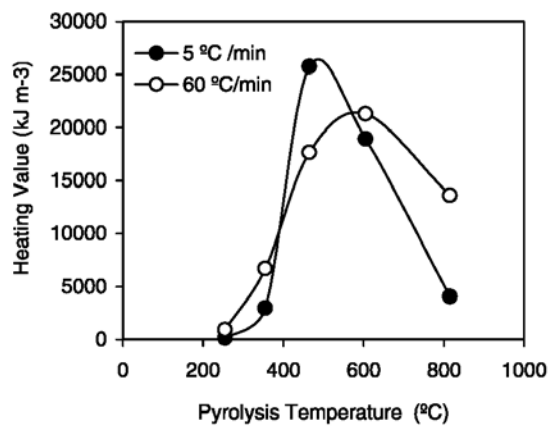
(ก)



(ข)



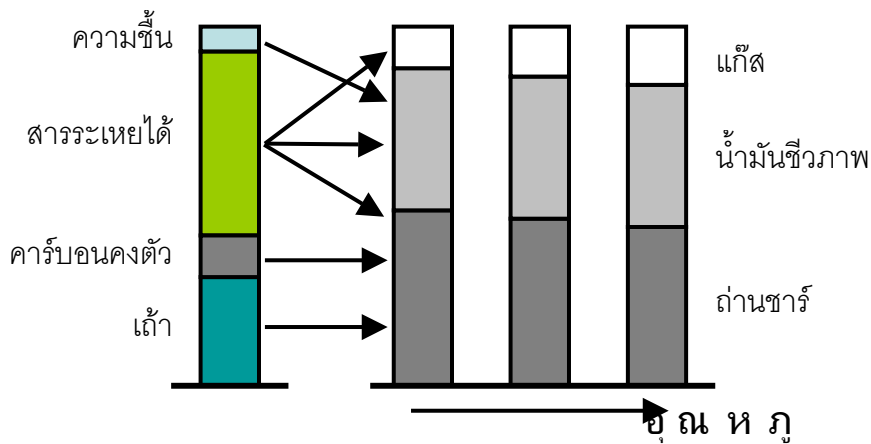
(ค)



(ง)

รูปที่ 3.16 ปริมาณและคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน ณ ช่วงอุณหภูมิต่างๆ [16]

สมมุติฐานของการเปลี่ยนแปลงเชิงมวลของกากตะกอนเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงมวลสารกากตะกอนเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิส

3.5.4 หลักการคำนวณสมดุลพลังงาน

ในการคำนวณสมดุลพลังงานนั้น โปรแกรมจำเป็นจะต้องคำนวณหาปริมาณพลังงานที่ต้องให้แก่ระบบเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน) โดยพลังงานที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส (H_p) จะเป็นไปตามสมการ

$$H_p = \text{Sensible Heat} + \text{Enthalpy of Reaction } (H_{rxn})$$

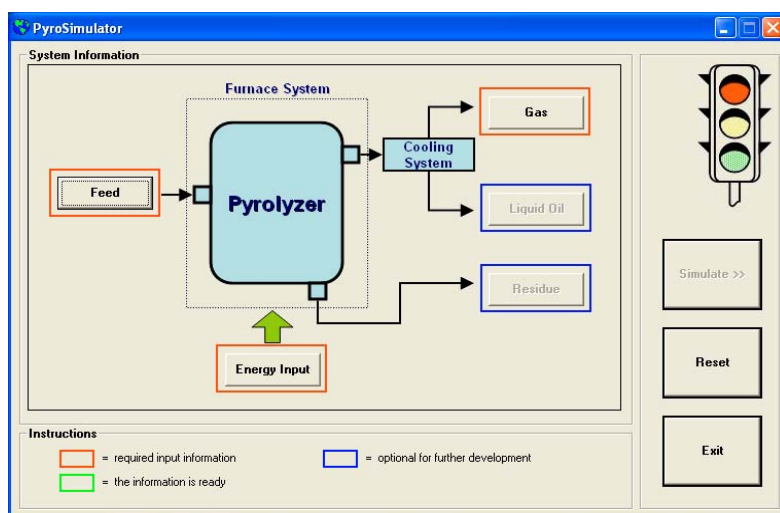
โดย

H_p	=	พลังงานรวมที่ต้องใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส
Sensible heat	=	พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิกากตะกอนจากอุณหภูมิห้องไปจนถึงอุณหภูมิไพโรไลซิส
H_{rxn}	=	พลังงานในการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส

จากสมการจะเห็นว่า พลังงานที่จำเป็นต้องให้แก่วัสดุขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ (จาก Sensible Heat) และลักษณะ (หรือธรรมชาติ) ของปฏิกิริยาการไพโรไลซิสของกากตะกอน (จาก H_{rxn}) จากการศึกษาพบว่า พลังงานที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสนี้จะอยู่ในช่วงประมาณ 0.7-1.7 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม สำหรับวัสดุป้อนประเภทชีวมวลโดยคิดอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาที่ 500 องศาเซลเซียส [17] สำหรับกากตะกอนนั้นยังไม่มีผู้ศึกษาอย่างจริงจัง ค่าที่ใช้ในโปรแกรมจึงเป็นค่าที่สมมติขึ้นในช่วงนี้ (อย่างไรก็ตามค่าพลังงานในการไพโรไลซิสของกากตะกอนนั้นขณะนี้กำลังศึกษาอยู่) จากค่าพลังงานที่คำนวณได้นี้ สามารถนำไปใช้หาปริมาณเชื้อเพลิงที่จำเป็นต้องใช้ป้อนเข้าสู่กระบวนการได้

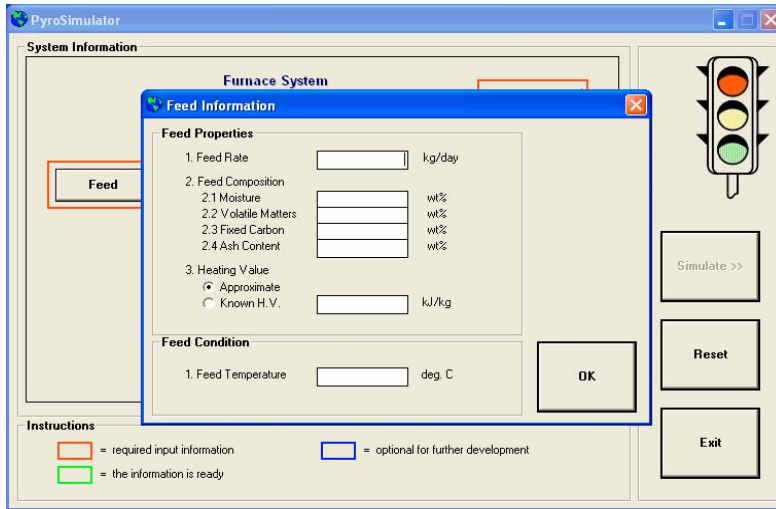
3.5.5 ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรม

โปรแกรม ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้โปรแกรมภาษาวิชวลเบสิก (Visual Basic) มีการแสดงผลที่สวยงามและสะดวกต่อการใช้งานบนระบบปฏิบัติการวินโดวส์ซึ่งสามารถใช้ได้กับคอมพิวเตอร์ทั่วไป ตัวอย่างหน้าจอแสดงผลของโปรแกรมแสดงได้ดังรูปที่ 3.18

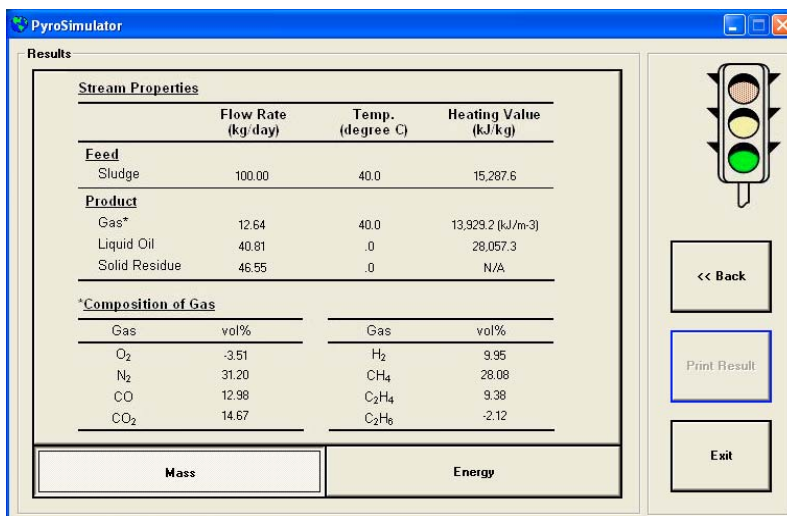


(ก)

รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรมสมดุลมวลและพลังงานในกระบวนการไพโรไลซิส กากตะกอน



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการแสดงผลของโปรแกรมสมดุลมวลและพลังงานในกระบวนการไพโรไลซิส กากตะกอน (ต่อ)

3.6 สรุป

จากข้อมูลที่ได้นำเสนอมาทั้งหมดนั้นเพื่อแสดงให้เห็นว่า กระบวนการไฟโรไลซิสกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียในประเทศไทย เพื่อแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าในเชิงพลังงาน และในเชิงเศรษฐกิจนั้นมีความเป็นไปได้ โดยไม่จำกัดว่าเป็นกากตะกอนจากแหล่งใดเช่น จากโรงบำบัดน้ำเสียชุมชน โรงบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม หรือโรงบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลก็ตาม

อย่างไรก็ตาม สำหรับการประเมินปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไฟโรไลซิสกากตะกอน หรือต้นทุนพลังงานของกระบวนการนั้น ในทางปฏิบัติแล้วสามารถทำได้ด้วยวิธีง่ายๆ โดยไม่จำเป็นต้องทดสอบด้วยการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ไม่ว่าระดับใดๆเลย เพียงแต่ทราบข้อมูลองค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอนเท่านั้น ก็สามารถประเมินทั้งปริมาณของผลิตภัณฑ์ และต้นทุนพลังงานเบื้องต้นได้ด้วยการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ทราบความเป็นไปได้เบื้องต้นสำหรับการ “ลงทุน” พัฒนากระบวนการนี้ต่อไปได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Werther J, and Ogada T. (1999). "Sewage Sludge Combustion", Progress in Energy and Combustion, (25): p.55-116
- [2] <http://www.bot.or.th/bothomepage/databank/EconData/>
- [3] http://www.oie.go.th/industrystatus1_th.asp
- [4] P. Eamsakulrat, D.Patmasiriwat and P.Huidobro (1994). "Hazardous Waste Management in Thailand" TDRI Quarterly Review Vol.9 (3): p.7-14
- [5] <http://www.pyne.co.uk/>
- [6] Probststein, Ronald F. and Hicks, R.E. (1985), "Synthetic Fuels" Internatinal Student edition, McKeaw-Hill Book., p. 98-99
- [7] Bridgwater, A.V. and Peacocke, GV.C. (2000). "Fast Pyrolysis Process for Biomass" Renewable and Sustainable Energy Reviews (4) p. 1-73
- [8] Leung, D.Y.C.and Wang, C.L.J. (1989). "Kinetic Study of Scrap Tyre Pyrolysis and Combustion" Anal.&App.Pyro (45), p.153-169
- [9] Nain, L., Weicheng, F., Ritsu, D.and Qizhao, L. (2000). "New Mass Loss Kinetic Model for Thermal Decomposition of Biomass" Chinese Sci. Bulletin. (45), p.385-391
- [10] Antal, M.J. Jr. and Varhegyi, G. (1995). "Cellulose Pyrolysis Kinetics: The Current State of Knowledge" Ind.Eng.Chem.Res (34), p.703-717
- [11] กรมควบคุมมลพิษ, กรม (2001) "รายงานหลัก โครงการวิจัย พัฒนาการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่" คพ. 08-007
- [12] <http://millennium-debate.org/biomass.htm>
- [13] Huffman, D.R., Vogiatzis, A.J. and Bridgwater, A.V. (1994) "The Characteristic of Fast Pyrolysis Bio-Oils" Advances in Thermochemical Biomass Conversation, edited by Bridgwater, (Vol.2), p. 1095-1102
- [14] ปราโมช ไชยเวช (2533) "ปิโตรเลียมเทคโนโลยี" เอกสารประกอบคำสอน
- [15] <http://www.carbtrol.com/carbon.html>
- [16] Inguanzo, M, A. Domínguez, J.A. Menéndez , C.G. Blanco and J.J. Pis (2002) "On the pyrolysis of sewage sludge: the influence of pyrolysis conditions on solid, liquid and gas fractions" Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, (63), p. 209-222

- [17] Daugaard, D.E. and R.C. Brown (2003) “Enthalpy for Pyrolysis of Several Types of Biomass”, Energy and Fuel, 17(4) p. 934-939

บทที่ 4

การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

4.1 นิยามและรูปแบบการดำเนินงานของโครงการ

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้กำหนดให้โครงการมีรูปแบบการดำเนินงานดังต่อไปนี้ คือ ลงทุนสร้างเตาปฏิกรณ์ไฟฟโรไลซิสสำหรับกากตะกอน และรับบำบัดกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียต่างๆ เพื่อผลิตเป็นน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ โดยมีรายได้จาก 3 ทาง คือ การรับบำบัดกากตะกอน, การขายน้ำมันชีวภาพ และถ่านชาร์ ส่วนผลิตภัณฑ์แก๊สอาจป้อนกลับเพื่อให้ความร้อนกับกระบวนการ

4.2 ข้อมูลด้านเทคนิค

ข้อมูลทางด้านเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์นำมาจาก ข้อมูลจริงที่ได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ปฏิกรณ์ไฟฟโรไลซิสของกากตะกอนขนาดนําร่อง โดยมีรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 4.1 ในการวิเคราะห์จะใช้ข้อมูลกากตะกอนที่มีคุณภาพปานกลางเป็นกรณีศึกษาเริ่มต้น (Base Case) และจะทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับการใช้กากตะกอนคุณภาพต่ำและสูงตามลำดับ คุณสมบัติของกากตะกอนที่ใช้ศึกษาแสดงดังตารางที่ 4.2 ซึ่งกากตะกอนที่ยกมาศึกษานี้ครอบคลุมช่วงของกากตะกอนที่สำรวจพบสำหรับประเทศไทย

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลเตาปฏิกรณ์ไฟฟโรไลซิส

	คุณสมบัติ
เครื่องปฏิกรณ์ไฟฟโรไลซิส	เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง ดำเนินการแบบกะ
อุณหภูมิปฏิบัติงาน	600 องศาเซลเซียส
ขนาดความจุเครื่องปฏิกรณ์	300 กิโลกรัม (เดินระบบ 2 กะต่อหนึ่งวัน)
ชั่วโมงปฏิบัติงาน	8 ชั่วโมง/วัน, 300 วัน/ปี
พลังงานป้อน	- เชื้อเพลิงแก๊ส LPG 50 กิโลกรัม/วัน (ค่าความร้อน 50 เมกกะจูล/กิโลกรัม) - พลังงานไฟฟ้า 80 หน่วย/วัน

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลคุณสมบัติของกากตะกอนที่ใช้ในการศึกษาและปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

	กากตะกอน		
	คุณภาพต่ำ	คุณภาพปานกลาง	คุณภาพสูง
คุณสมบัติ			
- ความชื้น*	7.84 %	5.32 %	5.82 %
- สารระเหย*	24.82 %	40.10 %	54.70 %
- เถ้า*	65.40 %	50.47 %	32.78 %
- คาร์บอนคงตัว*	1.94%	4.11%	6.70 %
- คุณค่าความร้อน*	3.39MJ/kg	9.69 MJ/kg	15.0 MJ/kg
ผลิตภัณฑ์			
- แก๊สรวมความชื้น*	13.70 %	14.79 %	18.74 %
- น้ำมันชีวภาพ*	15.86 %	25.62 %	34.95 %
- ถ่านชาร์*	70.44 %	59.59 %	46.31 %

หมายเหตุ * ค่าเฉลี่ยสำหรับกากตะกอนตัวอย่างที่นำมาใช้จำนวน 20 แห่งในประเทศไทย
คุณภาพของกากตะกอนใช้ปริมาณสารระเหย และคุณค่าความร้อนเป็นตัวกำหนด

4.3 การประเมินมูลค่าการลงทุนและสมมติฐาน

4.3.1 มูลค่าการลงทุน

มูลค่าการลงทุน (Capital Investment) คำนวณจากการทดลองติดตั้งเตาปฏิกรณ์นำร่องขนาด 600 กิโลกรัม ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการลงทุนเบื้องต้นที่ประมาณ 2,000,000 บาท โดยแยกเป็น

- ค่าก่อสร้างและดำเนินการติดตั้งเตาปฏิกรณ์	1,787,000 บาท
- อุปกรณ์สำหรับหน่วยควบคุม	35,000 บาท
- วัสดุอื่นๆ เช่นท่อ, วาล์ว และฟิตติง	35,000 บาท
- ค่าออกแบบและจัดจ้างที่ปรึกษา	71,500 บาท
- อื่นๆ	<u>71,500 บาท</u>
- รวม	<u>2,000,000 บาท</u>

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

4.3.2 สมมติฐานด้านราคาและต้นทุนการผลิต

สำหรับสมมติฐานด้านราคาและต้นทุนการผลิตมีดังต่อไปนี้ คือ ต้นทุนการผลิตหลักของระบบไฟ-โรไลซิสจะอยู่ที่น้ำมันเชื้อเพลิงและพลังงานไฟฟ้าที่ใช้สำหรับเตาปฏิกรณ์ ส่วนค่าใช้จ่ายอื่นๆ จะเป็นค่าใช้จ่ายทั่วไปจากการปฏิบัติงานและการบริหารจัดการซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3 จากการคำนวณต้นทุนการผลิตทั้งหมดจะมีราคาอยู่ที่ประมาณ 3.33 บาทต่อกากตะกอน 1 กิโลกรัม (ไม่รวมมูลค่าการลงทุน) สำหรับสมมติฐานด้านราคาส่งอุปกรณ์อื่นๆ แสดงดังตารางที่ 4.4 โดยเปรียบเทียบกับราคาท้องตลาดในปัจจุบัน

ตารางที่ 4.3 ต้นทุนการผลิต

	ปริมาณ	ราคาต่อหน่วย	หมายเหตุ
ต้นทุนการผลิตหลัก			
- แก๊ส LPG	50 กิโลกรัม/วัน	17บาท/กิโลกรัม	ระบบอาจถูกออกแบบให้ใช้ได้กับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ได้
- ไฟฟ้า	80 หน่วย/วัน	3 บาท/หน่วย	
อื่นๆ			
- ค่าสาธารณูปโภค	20,000 บาทต่อปี		
- ค่าซ่อมบำรุง	20,000 บาทต่อปี		
- ค่าบริหารจัดการ	20,000 บาทต่อปี		

ตารางที่ 4.4 สมมติฐานราคาวัสดุอื่น

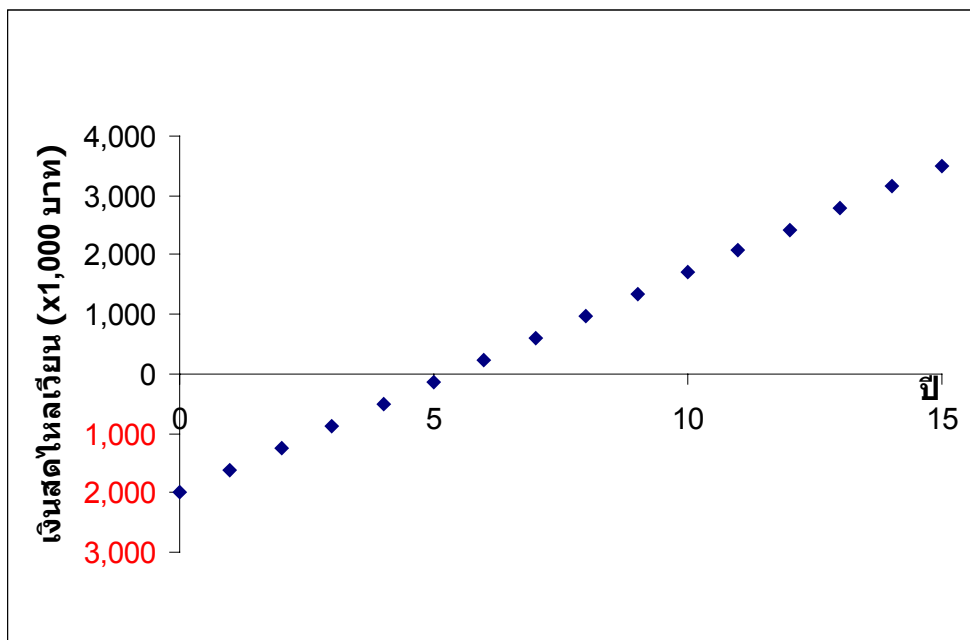
วัสดุ	ราคา	ราคาวัสดุเปรียบเทียบ*
น้ำมันชีวภาพ	9 บาท/ลิตร	- น้ำมันเตา 7.99 บาท/ลิตร - น้ำมันดีเซล 11.89 บาท/ลิตร
ถ่านชาร์	500 บาท/ตัน	- ลิกไนต์ 569.7 บาท/ตัน
กากตะกอน	3 บาท/กิโลกรัม (ราคารับกำจัด)	

หมายเหตุ * ราคาคำนวณ (EPPO, 5 ส.ค.47)

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

4.3.3 ระยะเวลาคืนทุน

ในการประเมินระยะเวลาคืนทุนสำหรับโครงการนี้ โดยตั้งสมมติฐานในแง่ที่ประสิทธิภาพของกระบวนการต่ำคือ ได้ผลิตกัณฑ์น้ำมันชีวภาพประมาณ 50% โดยน้ำหนักเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำมันชีวภาพปิ้งได้ที่มีอยู่เนื้อของกากตะกอนวัตถุดิบเท่านั้น และตั้งสมมติฐานตามหัวข้อที่ 4.3 ซึ่งจากการทำแบบจำลองพบว่า ระยะเวลาคืนทุนของโครงการจะอยู่ที่ประมาณ 5 ปี ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.1 กราฟการไหลเวียนของกระแสเงินของโครงการ

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

ตารางที่ 4.5 การไหลเวียนของกระแสเงินสดของโครงการ

ปีที่ (หน่วยเงิน x 1000 บาท)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
ราคาขาย																
น้ำมันชีวภาพ		330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
ถ่านชาร์		27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2	27.2
รายได้อื่น																
ค่ารับกำจัดกากตะกอน		270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
รวมรายได้	0	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2	627.2
เงินลงทุนในการก่อสร้าง	2,000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ค่าใช้จ่าย																
ค่าเชื้อเพลิง		153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153	153
ค่าไฟฟ้า		36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
ค่าสาธารณูปโภค		20	20.4	20.8	21.2	21.6	22.1	22.5	23.0	23.4	24	24.4	24.9	25.4	25.9	26.4
ค่าบำรุงรักษา		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
ค่าการจัดการ		20	21	22.1	23.1	24.3	25.5	26.8	28.1	29.5	31	32.6	34.2	35.9	37.7	39.6
รวมต้นทุน และค่าใช้จ่าย	2,000	249	250.4	251.9	253.4	255	256.6	258.3	260.1	262	263.9	266	268.1	270.3	272.6	275
กำไร		378.2	376.8	375.4	373.8	372.3	370.6	368.9	367.1	365.2	363.3	361.3	359.2	356.9	354.6	352.2
กำไรสะสม	-2,000	-1,622	-1,245	-869.6	-495.7	-123.5	247.1	616	983.2	1,348	1,712	2,073	2,432	2,789	3,144	3,496

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

4.3.4 การคำนวณผลตอบแทนโครงการ

การคำนวณผลตอบแทนจะทำการวิเคราะห์ถึงมูลค่าปัจจุบัน (Net Present Value: NPV) ของโครงการโดยเทียบกับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารที่ 7 % และทำการเปรียบเทียบผลตอบแทนภายใน (Internal Rate of Return: IRR) ของโครงการโดยให้ระยะเวลาดำเนินงาน 15 ปี จากการคำนวณทางเศรษฐศาสตร์ มูลค่าทางบัญชี (Project Cash Flow) ของโครงการแสดงได้ดังตารางที่ 4.5 หากกลไกราคาเป็นไปตามสมมติฐานดังที่ได้กล่าวข้างต้นจะทำให้โครงการมีผลตอบแทนภายในประมาณ 14.9 % และมีมูลค่าปัจจุบันของโครงการเท่ากับ 1,029,000 บาท เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารปัจจุบันที่ร้อยละ 7 แล้วจะเห็นว่าอยู่ในระดับที่น่าพอใจ

4.3.5 การวิเคราะห์ความไวต่อการเปลี่ยนแปลง

การวิเคราะห์ความไว (Sensitivity Analysis) ต่อการเปลี่ยนแปลงจะวิเคราะห์โดยสมมติให้ตัวแปรต่างๆ เกิดการเปลี่ยนแปลงสูงสุดเป็น 30 % ของกรณีเริ่มต้น (base case) และสังเกตผลที่ทำให้อัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุน (IRR) ของโครงการเปลี่ยนแปลงไป โดยตัวแปรที่ศึกษาแยกเป็น 2 ประเภทคือ

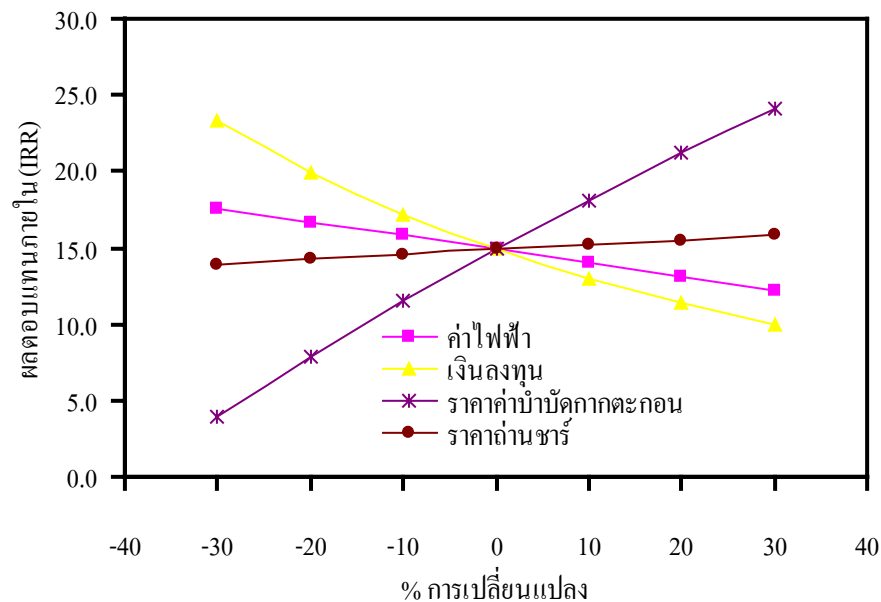
- ตัวแปรทั่วไป ได้แก่ ค่าไฟฟ้า เงินลงทุน และค่าบำบัดกากตะกอน และ
- ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน ได้แก่ ราคาแก๊ส LPG และราคาน้ำมันชีวภาพ

ความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของโครงการแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 สำหรับตัวแปรทั่วไป สิ่งที่มีอิทธิพลต่อผลตอบแทนของโครงการสูงคือมูลค่าการลงทุนและ ราคาบำบัดกากตะกอน แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าตัวแปรเหล่านี้จะเปลี่ยนแปลงไปถึง 30 % แต่ยังไม่ให้ผลตอบแทนที่ดี คือ ในกรณีที่แย่ที่สุดยังให้ผลตอบแทนที่มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับดอกเบี้ยธนาคารที่ 7 % สำหรับตัวแปรอื่นๆนั้นจะมีอิทธิพลต่อโครงการค่อนข้างน้อย

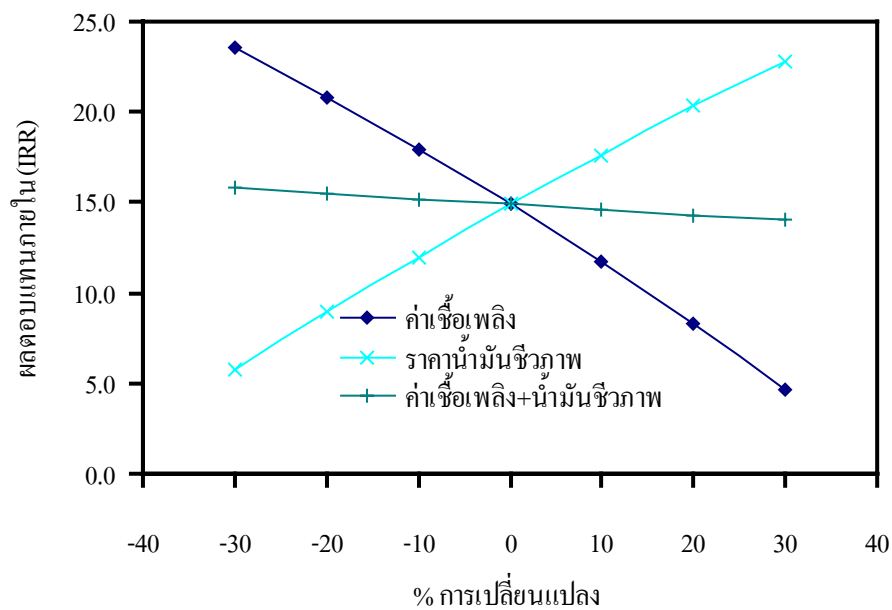
สำหรับตัวแปรด้านพลังงาน ซึ่งได้แก่ ราคาแก๊ส LPG และราคาน้ำมันชีวภาพนั้น เมื่อพิจารณาแยกกันจะเห็นว่าแต่ละตัวแปรจะมีอิทธิพลต่อผลตอบแทนโครงการสูง อย่างไรก็ตามในสถานะหนึ่งๆ ตัวแปรเหล่านี้จะมีการเคลื่อนไหวไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ ถ้าหากราคาแก๊ส LPG สูงขึ้น ราคาน้ำมันชีวภาพน่าจะสูงขึ้นตามไปด้วย ในการวิเคราะห์ความไวจึงกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงตัวแปรเหล่านี้เกิดขึ้นควบคู่กันไป เมื่อพิจารณาร่วมกันแล้ว จากรูปจะเห็นว่าตัวแปร

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

ด้านพลังงานจะมีผลต่อผลตอบแทนโครงการน้อย นอกจากนี้อาจลดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานออกไปได้อีกด้วยการออกแบบให้ระบบใช้กับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ซึ่งมีราคาถูกกว่าในท้องตลาดได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.2 ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงราคาวัสดุต่อผลตอบแทนโครงการ

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

- ตัวแปรทั่วไป
- ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับพลังงาน

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาถึงผลกระทบต่อโครงการเมื่อเปลี่ยนแปลงคุณภาพกากตะกอนที่ป้อนเข้าสู่กระบวนการ ผลการวิเคราะห์แสดงได้ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นว่าแม้ว่าจะใช้กากตะกอนคุณภาพต่ำ แต่โครงการยังให้อัตราผลตอบแทนจากโครงการลงทุน เท่ากับ 3.6 % ซึ่งมากกว่าดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคาร แต่อย่างไรก็ตามผลตอบแทนนี้อาจทำให้โครงการไม่น่าสนใจเนื่องจากว่าความแตกต่างระหว่างผลตอบแทนโครงการ และดอกเบี้ยเงินกู้ (7 %) ห่างกันไม่มากนัก ในอนาคตอาจสามารถเกิดความผันผวนในด้านปัจจัยต้นทุนหลายอย่าง อาทิเช่น ราคาแก๊ส LPG ราคาไฟฟ้า เงินเฟ้อ ฯลฯ ซึ่งอาจจะทำให้ผลตอบแทนโครงการต่ำลง หรือติดลบได้ ซึ่งจะทำให้การบริหารโครงการให้ได้รับกำไร (หรืออย่างน้อยที่สุดให้ถึงจุดคุ้มทุน) เป็นไปได้ยากมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ในการตัดสินใจสำหรับตัดสินใจโครงการนั้น จะต้องกำหนดให้ค่าดอกเบี้ย และผลตอบแทนโครงการมีความห่างกันให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะช่วยรับรองว่าโครงการที่ตัดสินใจนั้น มีความคุ้มทุน และก่อให้เกิดกำไรค่อนข้างแน่นอน สำหรับกรณีตรงข้าม ถ้าหากกากตะกอนมีคุณภาพสูงขึ้น จะให้ผลตอบแทนโครงการที่สูงขึ้นในลักษณะที่แปรผันตามกัน

ตารางที่ 4.6 ผลตอบแทนโครงการเมื่อเปลี่ยนคุณภาพกากตะกอนที่ป้อน

กากตะกอน*	ผลต่างอัตราผลตอบแทนโครงการ กับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (IRR □ interest rate)
กากตะกอนคุณภาพต่ำ (สารระเหย $\cong$ 25 %)	3.6 %
กากตะกอนคุณภาพปานกลาง (สารระเหย $\cong$ 40 %)	14.9 %
กากตะกอนคุณภาพสูง (สารระเหย $\cong$ 55%)	23.8 %

* คุณภาพของกากตะกอนแสดงในตารางที่ 4.2

4.4 กรณีเงื่อนไขอื่น

ดังแสดงในการวิเคราะห์ต้นทุนแล้วว่า ในที่นี้สมมติฐานพื้นฐานสำหรับการประเมินทางเศรษฐศาสตร์นั้นพิจารณาว่า กากตะกอนวัตถุดิบซึ่งจัดแบ่งออกเป็นสามกลุ่มนั้น มีความชื้นอยู่ในช่วงร้อยละ 5-9 ขึ้นกับชนิดของกากตะกอนที่นำมาใช้ ซึ่งอาจจะมีการตั้งคำถามถึงต้นทุนจะเป็นอย่างไรถ้ากากตะกอนนั้นมีร้อยละความชื้นอยู่สูงมาก

คำตอบคือ ต้นทุนของกระบวนการอาจจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญนัก ในกรณีที่กากตะกอนมีความชื้นสูงกว่าที่กำหนดไว้เมื่อเทียบกับตัวแปรตัวอื่น เนื่องจากห้องเผาไหม้สำหรับเป็นแหล่งความร้อนให้กับเครื่องปฏิกรณ์นั้น อุณหภูมิในห้องเผาไหม้อาจจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 600-800 องศาเซลเซียส แก๊สที่ได้จากห้องเผาไหม้นี้ จะถูกนำออกจากห้องเผาไหม้ทางปล่อง ในขณะที่แก๊สจากห้องเผาไหม้ผ่านปล่องอุณหภูมิของแก๊สนี้จะอยู่ในช่วงระหว่าง 400-600 องศาเซลเซียส พลังงานความร้อนของแก๊สนี้สามารถนำมาใช้ในการระเหยไล่ความชื้นออกจากกากตะกอนได้หรือ ถ้าพลังงานไม่เพียงพอ ก็สามารถนำมาจากน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้จากกระบวนการ

ในการประเมินความคุ้มค่าในด้านการลงทุนนั้น ในรายงานได้ตั้งสมมติฐานว่า กากตะกอนที่ได้จากโรงบำบัดน้ำเสีย นั้นถูกทำให้แห้งแล้วโดยส่วนใหญ่ด้วยการตากแดดจนกระทั่งความชื้นของกากตะกอนเหลืออยู่ประมาณไม่เกินร้อยละ 10 จากนั้นจึงนำกากตะกอนที่แห้งแล้วนี้ไปใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งรายละเอียดไว้แล้วในหัวข้อ 4.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ของโครงการเชิงเศรษฐศาสตร์

อย่างไรก็ตาม การใช้แหล่งความร้อนแหล่งอื่นเพื่อช่วยในการระเหยน้ำที่มีอยู่ในกากตะกอน อาจจะเป็นการ ‘เพิ่ม’ ต้นทุนของกระบวนการหรือไม่? เพียงไร? เป็นสิ่งที่ต้องนำมาพิจารณาในที่นี้

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

กรณีศึกษา การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำพลังงานความร้อนที่ได้จากกระบวนการสำหรับระเหยความชื้นจากตะกอน

กำหนดให้ ตะกอน 300 กิโลกรัม มีความชื้น 10% โดยน้ำหนักถูกป้อนเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิส ถ้าอุณหภูมิเริ่มต้นเป็น 25 องศาเซลเซียส

ปริมาณความชื้นจากตะกอนเริ่มต้น	50 % (โดยน้ำหนัก)	40 % (โดยน้ำหนัก)	30 % (โดยน้ำหนัก)
ปริมาณน้ำที่ต้องระเหย (กิโลกรัม)	120	90	60
พลังงานความร้อนที่ต้องใช้ทั้งหมด (MJ)	309	232	155

หมายเหตุ

ความจุความร้อนของน้ำ 4.2 kJ/kg K

ความร้อนแฝงของน้ำ 2,260 kJ/kg

จะเห็นว่า ปริมาณความร้อนที่ต้องการ ในการทำแห้งจากตะกอนอยู่ในช่วงระหว่าง 155-309 เมกกะจูล ซึ่งสามารถได้มาจากพลังงานที่มีอยู่ในแก๊สปล่อง

องค์ประกอบของแก๊สปล่อง	N ₂	63.3 % โดยน้ำหนัก
	O ₂	4.9 % โดยน้ำหนัก
	CO ₂	21.9 % โดยน้ำหนัก
	H ₂ O	9.8 % โดยน้ำหนัก
ความจุความร้อนของแก๊สปล่อง (kJ/kg)	0.94	
น้ำหนักโมเลกุลของแก๊สปล่องเฉลี่ย (kg/kgmole)	30.3	
โมลรวมของแก๊สปล่อง	23.4	
น้ำหนักรวมของแก๊สปล่องโดยประมาณ (kg)	759	
อุณหภูมิของแก๊สปล่อง (°C)	500	
คุณค่าความร้อนที่ได้จากแก๊สปล่อง (MJ)	339	

บทที่ 4 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ ของโครงการในเชิงเศรษฐศาสตร์

อย่างไรก็ตาม กระบวนการนำความร้อนกลับมาใช้นี้มีประสิทธิภาพโดยประมาณ 30% ซึ่งทำให้พลังงานจากแก๊สปล่องที่จะนำไปใช้ในการทำแห้งกากตะกอนนี้มีไม่เพียงพอ (คือ ได้เพียงประมาณ 102 เมกกะจูล) ซึ่งพลังงานที่ขาดไปนั้น (ประมาณสูงสุด 207 เมกกะจูล) สามารถนำมาจากน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้จากกระบวนการ

จากการศึกษาพบว่า คุณค่าความร้อนของน้ำมันชีวภาพอยู่ที่ประมาณ 12 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม ด้วยเหตุนี้จึงต้องใช้น้ำมันชีวภาพประมาณ 17.25 กิโลกรัม เพื่อชดเชยพลังงานที่ขาดหายไปจากการทำแห้ง ซึ่งน้ำมันชีวภาพจำนวนนี้ คิดเป็นเพียงร้อยละ 16 ของปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ผลิตได้ทั้งหมดเท่านั้น

จากรูปที่ 4.2 การที่น้ำมันชีวภาพหายไปเป็นปริมาณร้อยละ 16 นี้ จะมีผลกระทบต่อผลตอบแทนภายใน (IRR) จากเดิมร้อยละ 15 เป็นร้อยละ 10 อย่างไรก็ตาม ถ้ากากตะกอนวัตถุดิบที่ได้จากโรงบำบัดน้ำเสียยังมีความชื้นต่ำลงไปเพียงใด ผลกระทบที่มีต่อผลตอบแทนภายในจะยิ่งน้อยลงไปตามลำดับ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติแล้วการใช้พลังงานความร้อนจากแสงอาทิตย์ในการทำแห้งกากตะกอนเป็นสิ่งที่สะดวก และประหยัดมากกว่า ทั้งในแง่ของต้นทุน และการควบคุมสถานะ

บทที่ 5

สรุป

งานวิจัยชิ้นนี้ให้ความสำคัญถึงการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสีย มาแปรรูปให้เป็นเชื้อเพลิงโดยเน้นไปที่ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของกากตะกอนที่มีผลต่อกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

ก. โลหะหนัก

ปริมาณโลหะหนักในกากตะกอนจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของกากตะกอน กล่าวคือ กากตะกอนจากโรงงานบำบัดน้ำเสียทุกแห่งมีโลหะหนักประเภท แคดเมียม ทองแดง โมลิบดีนัม นิกเกิล ตะกั่ว หรือสังกะสี เป็นองค์ประกอบอยู่ในระดับปริมาณต่างกันไป (ซึ่งในภาพรวมแล้วไม่เกินค่ามาตรฐานของ US EPA) แต่อย่างไรก็ตามยกเว้นโลหะหนักบางชนิดที่เกินจากค่ามาตรฐาน US EPA บ้าง เช่น ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี และมักพบในกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนซึ่งเป็นไปได้ว่ามาจากการทิ้งขยะที่มีโลหะหนักจำพวก ทองแดง นิกเกิล และสังกะสี เจือปนสู่ลำคลอง

ข. คุณค่าความร้อนของกากตะกอน

คุณค่าความร้อนของกากตะกอนขึ้นอยู่กับปริมาณสารระเหยเป็นหลักโดยที่พบว่า คุณค่าความร้อนของกากตะกอนจะแปรผันตรงกับปริมาณสารระเหย ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า เนื่องจากสารระเหยนั้นเป็นของผสมสารอินทรีย์ต่างๆ (ซึ่งเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสแล้วจะถูกเปลี่ยนสภาพเป็นน้ำมันชีวภาพ) ที่มีคุณค่าความร้อนสูง ด้วยเหตุนี้เกณฑ์ในการประเมินคุณค่าความร้อนของกากตะกอนจึงขึ้นกับปริมาณสารระเหยเป็นหลัก

นอกจากสารระเหยแล้ว การประเมินคุณค่าความร้อนของกากตะกอนยังขึ้นอยู่กับองค์ประกอบส่วนอื่นด้วยได้แก่ ปริมาณคาร์บอนคงตัว และปริมาณความชื้นในกากตะกอน เป็นต้นซึ่งความสำคัญขององค์ประกอบทั้งสองนี้คือ คาร์บอนคงตัว เป็นส่วนที่มีคุณค่าความร้อนในตัวเอง ในขณะที่ความชื้นเป็นส่วนที่ดึงให้คุณค่าความร้อนของกากตะกอนลดต่ำลง ดังนั้นเมื่อนำองค์ประกอบทั้งสามส่วนนี้มาพิจารณา จะสามารถสร้างสหสัมพันธ์ (Correlation) สำหรับประเมินคุณค่าความร้อนได้ดังแสดงในสมการ

$$HV^\Delta = 276.04V + 289.70F - 51.45M - 2847.53 \text{ และ}$$

$$HV^\Delta = 278.07(V + F) - 50.44M - 2875.52$$

โดยที่ V คือ ปริมาณสารระเหย

F คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว

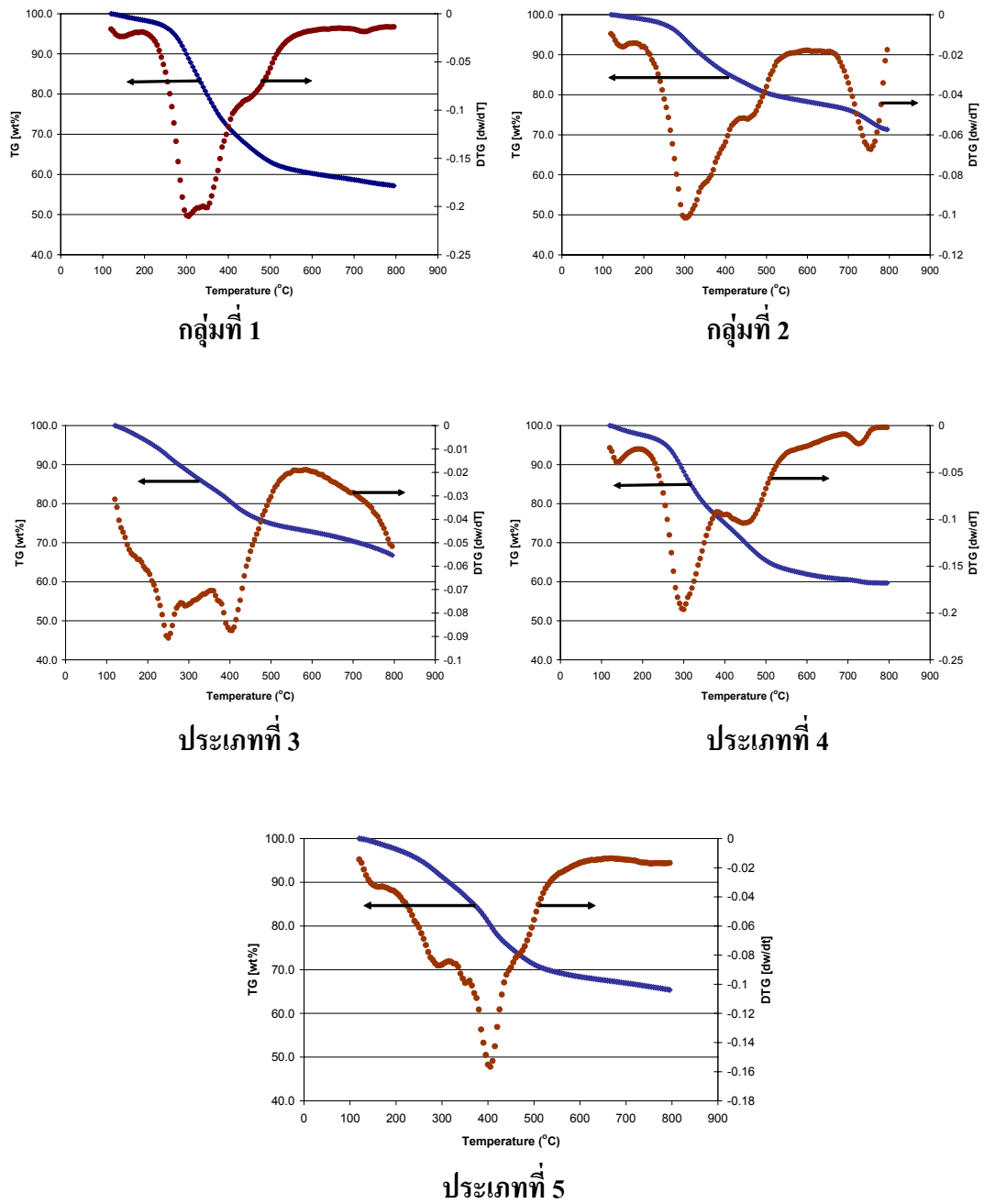
M คือ ปริมาณความชื้น

HV คือ คุณค่าความร้อน มีหน่วยเป็น กิโลจูลต่อกิโลกรัม (kJ/kg)

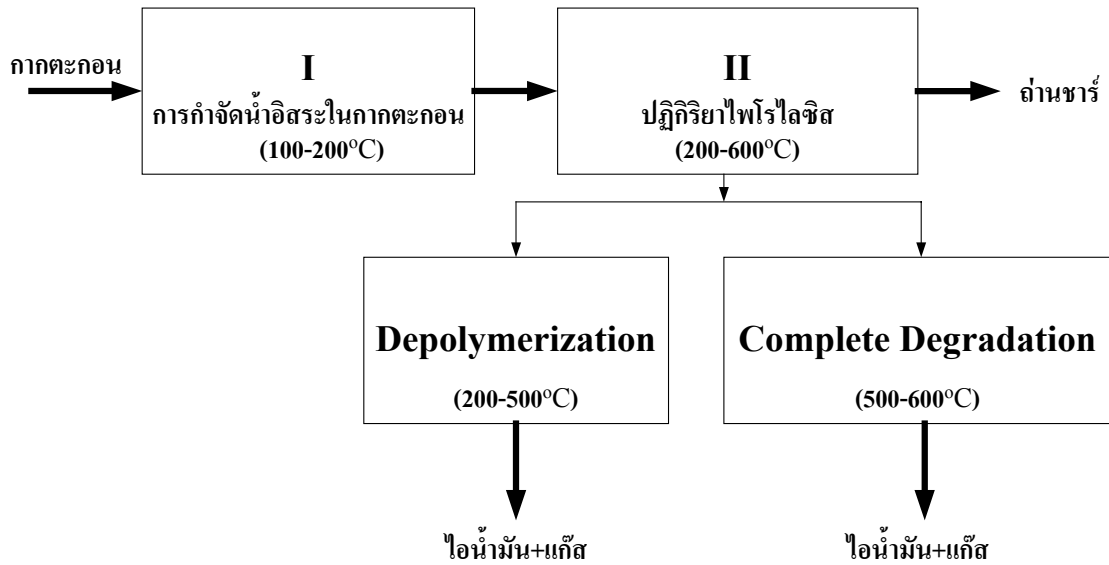
ซึ่งสมการทั้งสองนี้มีค่าความแม่นยำใกล้เคียงกัน จึงสามารถเลือกใช้สมการใดก็ได้ในการพิจารณาตามความเหมาะสม

ค. กลไก และจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาไพโรไลซิส

ลักษณะกลไก และจลนพลศาสตร์ของการเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสของกากตะกอนสามารถแบ่งออกเป็น 5 ประเภทเมื่อพิจารณาจากวิธีการ Thermogravimetric Analysis ซึ่งแสดงในรูปที่ 5.1 อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะมีกลไกแบบใดก็ตาม ขั้นตอนหลักของปฏิกิริยาจะอยู่ที่ประมาณ 300-400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสุด และกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไปแล้วอาจจะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยซึ่งได้แก่ ขั้นตอนการกำจัดน้ำอิสระในกากตะกอน และขั้นตอนปฏิกิริยาไพโรไลซิส ดังแสดงในรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.1 แผนภาพการเปลี่ยนแปลงของกากตะกอนตัวอย่างตามวิธีการ TGA แบ่งได้ 5 ประเภทหลัก



รูปที่ 5.2 ภาพรวมของกลไกปฏิกิริยาไพโรไลซิสกากตะกอน

ในแง่ของจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาซึ่งเริ่มต้นจากการพัฒนาแบบจำลองของ Arrhenius มาสู่แบบจำลอง Pseudo Bi-component Separate State Model (PBSM) ดังแสดงในสมการที่ 5.1

$$\frac{dx}{dT} = \begin{cases} \frac{w_{10} - w_{1\infty}}{w_{10} - w_{2\infty}} \frac{dx_1}{dT} & w_{10} < w < w_{1\infty} \\ \frac{w_{20} - w_{2\infty}}{w_{20} - w_{2\infty}} \frac{dx_2}{dT} & w_{20} < w < w_{2\infty} \end{cases} \quad (5.1)$$

และ

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dT} = \frac{A_1}{\beta} \exp(-E_1/RT) f_1(x_1) & w_{10} < w < w_{1\infty} \\ \frac{dx_2}{dT} = \frac{A_2}{\beta} \exp(-E_2/RT) f_2(x_2) & w_{20} < w < w_{2\infty} \end{cases} \quad (5.2)$$

เมื่อ

w_{i0} และ $w_{i\infty}$ คือ มวลเริ่มต้นและมวลสุดท้ายขององค์ประกอบเสมือน
ตัวห้อย i มีความสัมพันธ์กับองค์ประกอบเสมือนที่ i ($i=1,2,3, \dots$)

A คือ ค่า pre-exponential factor

E คือ พลังงานกระตุ้นของปฏิกิริยา (kJ/mol)

R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

x คือ สัดส่วนของมวลสารที่สูญหายไป

$f(x)$ คือ ฟังก์ชันของสัดส่วนมวลสารที่สูญหายไป

จากการศึกษาพบว่า ค่าพลังงานกระตุ้นในช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส ของกากตะกอนทุกแหล่งจะมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 65-84 กิโลจูลต่อกิโลกรัมในทุกอัตราการให้ความร้อน ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิอื่นๆ นั้นค่าพลังงานกระตุ้นจะแปรผันต่างกันอย่างมีนัยสำคัญมากสำหรับแต่ละอัตราการให้ความร้อน และแต่ละแหล่งของกากตะกอน ด้วยเหตุนี้จึงอาจจะสรุปได้ว่า ปฏิริยาหลักของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนอยู่ที่ช่วงอุณหภูมิ 100-400 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อมูลจลนพลศาสตร์ที่ศึกษาในช่วงนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์และระบบกระบวนการไพโรไลซิสในระดับต่างๆ ได้

ง. ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหย และน้ำมันชีวภาพ

ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่หลังจากผ่านกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนจากแหล่งต่างๆ สามารถสรุปได้ว่า มีความแปรผันตามกับปริมาณสารระเหยอินทรีย์ที่มีอยู่ในกากตะกอน ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และข้อมูลการดั่งสารระเหยดังแสดงในรูปที่ 3.5 ตามลำดับ ซึ่งข้อมูลนี้จึงสามารถถูกใช้เสมือนเครื่องชี้วัดในเบื้องต้นได้ถึง แนวโน้มของปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้ของกากตะกอนแหล่งต่างๆ โดยมีประโยชน์อย่างมากในการเปรียบเทียบ โดยไม่จำเป็นต้องใช้การวัดปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้จริง ซึ่งจะช่วยลดภาระการสิ้นเปลืองพลังงาน และช่วยย่นเวลาในการดำเนินการอีกด้วย

โดยที่สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหยที่ได้จากการวัดองค์ประกอบแบบประมาณ และน้ำมันชีวภาพนั้น (ที่อุณหภูมิของระบบประมาณ 550-600 องศาเซลเซียส) เมื่อใช้ข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 2.1 และรูปที่ 3.5 ดังกล่าวข้างต้นจะได้ว่า

$$\text{น้ำมันชีวภาพในรูปของไอน้ำมัน} = 0.72 \times (\text{ร้อยละปริมาณสารระเหย}) \pm 8.5$$

อย่างไรก็ตามผลการคำนวณที่ได้จากสหสัมพันธ์ชุดนี้เป็นการประเมินว่า ไอน้ำมันชีวภาพถูกดึงออกจากสารระเหยที่อยู่ในกากตะกอนจริงๆ เท่านั้น ไม่ใช่ปริมาณน้ำมันชีวภาพหลังจากผ่านเครื่องควบแน่นแล้ว เนื่องจากเครื่องควบแน่นแต่ละเครื่อง และแต่ละชนิดมีขนาด และกำลัง ตลอดจนประสิทธิภาพไม่เท่ากัน

อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารระเหย กับปริมาณน้ำมันที่ถูกดึงออกมาจากกากตะกอนได้สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิส กับองค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน

กลุ่มกากตะกอน	คุณสมบัติ (ร้อยละของค่าเฉลี่ย)		คุณค่าความร้อนของกากตะกอน (MJ/kg)	ร้อยละการดึงน้ำมันจากกากตะกอน	
	สารระเหย	เถ้า		400°C	600°C
1. ปริมาณสารระเหยสูง	48.24	40.31	12.45	53.76	80.07
2. ปริมาณสารระเหยปานกลาง	37.77	54.18	9.24	46.34	75.11
3. ปริมาณสารระเหยต่ำ	29.68	65.08	5.35	37.28	67.20

ข้อมูลจากตารางที่ 5.1 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า คุณค่าความร้อนของกากตะกอน และปริมาณผลิตภัณฑ์ (น้ำมันชีวภาพ) มีลักษณะแปรผันโดยตรงกับปริมาณสารระเหย และแปรผันผกผันกับปริมาณเถ้า ที่มีอยู่ในกากตะกอนตัวอย่าง

นอกจากนี้ข้อมูลจากตารางที่ 5.1 ยังแสดงให้เห็นอีกด้วยว่า แม้ว่าปริมาณสารระเหยในกากตะกอนค่อนข้างต่ำ (ดูกลุ่มกากตะกอนที่มีปริมาณสารระเหยต่ำ) แต่ก็สามารถมีความสามารถในการดึงน้ำมันได้ถึงร้อยละ 67.20 ในขณะที่ที่อุณหภูมิต่ำกว่าก็จะทำให้ได้ปริมาณลดต่ำลง ด้วยเหตุนี้จึงอาจจะสรุปในเบื้องต้นได้ว่า แม้ว่ากากตะกอนตัวอย่างภายหลังจากการทำการวิเคราะห์แบบประมาณแล้ว จะถูกจัดอยู่ในกลุ่มที่มีปริมาณสารระเหยต่ำก็ตาม ก็อาจจะทำให้ได้ปริมาณผลิตภัณฑ์มากขึ้นได้จากการปรับอุณหภูมิของระบบให้สูงขึ้น

จ. การเปรียบเทียบผลการศึกษาจากเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิด

จากการศึกษาซึ่งในที่นี้ได้ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบเบตคิง และแบบเตาหมุน ซึ่งให้เป็นตัวแทนของระบบเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch System) และแบบต่อเนื่อง (Continuous System) ตามลำดับ ซึ่งพบว่าเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ใกล้เคียงกัน (เมื่อพิจารณา

จากค่าของประสิทธิภาพการดีสสารระเหย) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา เป็นที่น่าสังเกตว่าถ้าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสต่ำเกินไปจะส่งผลให้ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้มีปริมาณน้อยลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ แต่ถ้าในทางตรงกันข้ามในกรณีที่ใช้อุณหภูมิที่สูงเกินไป ปริมาณน้ำมันชีวภาพจะต่ำลงเนื่องจากการเกิดการแตกตัวของโมเลกุลบางตัวในน้ำมันชีวภาพไปเป็นแก๊ส

จ. ผลลัพธ์จากกระบวนการไพโรไลซิสด้วย Pyro-GC/MS

เมื่อพิจารณาผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนด้วยการใช้ชุดอุปกรณ์ตรวจวัด Pyro-GC/MS พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นประกอบด้วยองค์ประกอบหลักๆ สามชนิดคือ

1. สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ (Oxygenated Compounds) และ สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (Nitrogenated Compound)
2. สารประกอบไฮโดรคาร์บอนจำพวกโซ่ตรงและวง (Aliphatic and Alicyclic Hydrocarbon Compounds)
3. เบนซีนและอนุพันธ์ (Benzene and its derivatives)

ซึ่งแต่ละองค์ประกอบดังกล่าวข้างต้นนี้ ประกอบด้วยสารประกอบเคมีต่างดังแสดงในตารางที่ 5.2-5.5 ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 5.2 สารประกอบที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Hydrogencyanide	HCN	27
Nitrous oxide	N ₂ O	44
2-Hydroxyl-propanenitrile	C ₃ H ₅ NO	71
1H-Pyrrole-1-methyl	C ₄ H ₄ N	66
4-Pyridinamine	C ₅ H ₆ N ₂	94
2-Methyl pyridine	C ₆ H ₇ N	93
3-Methyl pyridine	C ₆ H ₇ N	93
2-Ethenyl pyridine	C ₇ H ₉ N	107
3-Ethenyl pyridine	C ₇ H ₉ N	107
3-Phenyl-5(4H)-isoxazalone	C ₇ H ₉ NO ₂	139
Indole	C ₈ H ₇ N	117
Benzyl nitrile	C ₈ H ₇ N	117
1-Isocyano-4-methyl-benzene	C ₈ H ₈ N	118
α-Ethyl benzene acetonitrile	C ₁₀ H ₁₁ N	145

ตารางที่ 5.3 สารประกอบจำพวกเบนซีน และอนุพันธ์

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Benzene	C ₆ H ₆	78
Cyclopropabenzene	C ₇ H ₆	90
Toluene	C ₇ H ₈	92
Styrene	C ₈ H ₈	104
Ethyl benzene	C ₈ H ₁₀	106
o,m,p-Xylene	C ₈ H ₁₀	106
2,3-Benzo furan	C ₈ H ₆ O	118
1,4-Benzodioxin	C ₈ H ₆ O ₂	134
Indene	C ₉ H ₈	116
2-Phenyl-2,5-Cyclohexadiene-1,4-dione	C ₁₂ H ₈ O ₂	184
Benzylisopentylether	C ₁₂ H ₁₈ O	178
Benzeneacetic acid cyclopentylester	C ₁₃ H ₁₈ O ₂	206

ตารางที่ 5.4 สารประกอบที่มีออกซิเจนเป็นองค์ประกอบ

Product Classes	Compound Name	Formular	Molecular Weight
Acids	Acetic acid	$C_2H_4O_2$	60
	Propanoic acid	$C_3H_6O_2$	74
	Butanoic acid	$C_4H_8O_2$	88
	Pentanoic acid	$C_5H_{10}O_2$	102
	Hexanoic acid	$C_6H_{12}O_2$	116
Aldehydes and Ketones	Acetaldehyde		
	Butanedial	$C_4H_6O_2$	86
	3-Hydroxyl butanal	$C_4H_8O_2$	89
	3-Methyl butanal	$C_5H_{10}O$	86
	Pentanedial	$C_5H_8O_2$	100
	4-Octan-3-one	$C_8H_{14}O$	126
Acohols and Ethers	Oxirane	C_2H_4O	44
	Ethyl alcohol	C_2H_6O	46
	Cyclobutanol	C_4H_8O	70
	Cyclopropyl carbinol	C_4H_8O	72
	2-Pentene-1-ol	$C_5H_{10}O$	86
	5-Hexen-2-ol	$C_6H_{12}O$	99
	2,4-Hexadiene-1-ol	$C_6H_{10}O$	103
	Benzyl alcohol	C_7H_8O	108
	3-Heptyne-1-ol	$C_7H_{12}O$	112
Furan	Furan (Furfural)	C_4H_4O	68
	2,3-Dihydro-furan	C_4H_6O	70
	Furfural (2-Furaldehyde)	$C_5H_4O_2$	96
	Furfural alcohol	$C_5H_6O_2$	98
Phenols and Cresols	Phenol	C_6H_6O	90
	o,m,p-Cresol	C_7H_8O	108
	2,3-Dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	122

ตารางที่ 5.5 สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เป็นโซ่ตรงและวง

Compound Name	Formular	Molecular Weight
Methane	CH ₄	16
Ethene	C ₂ H ₄	28
Ethane	C ₂ H ₆	30
1-Propyne	C ₃ H ₄	40
Propylene	C ₃ H ₆	42
Propane	C ₃ H ₈	44
1,3-Butadiene	C ₄ H ₆	54
Butene	C ₄ H ₈	56
Butane	C ₄ H ₁₀	58
Hexane	C ₆ H ₁₄	86
3,3-Dimethyl-1,6-heptadiene	C ₉ H ₁₆	124
6-Methyl 1-octane	C ₉ H ₁₈	126
1,2,3-Trimethyl cyclohexane	C ₉ H ₁₈	126
1-Decyne	C ₁₀ H ₁₈	138
7-Methyl-1-nonyl	C ₁₀ H ₁₈	138
3,7-Dimethyl-1-octane	C ₁₀ H ₂₀	140
2,5,5-Trimethyl heptane	C ₁₀ H ₂₂	142
Decane	C ₁₀ H ₂₂	142
Undecane	C ₁₁ H ₂₄	156
2,4,6-Trimethyl octaene	C ₁₁ H ₂₄	156
1-Dodecane-3-yne	C ₁₂ H ₂₀	164
4-Dodecane	C ₁₂ H ₂₄	168
5-Dodecane	C ₁₂ H ₂₄	168
3-Methyl-3-undecane	C ₁₂ H ₂₄	168
2-Propyl-1,3,3-trimethyl cyclohexane	C ₁₂ H ₂₄	168
1-Tridecyne	C ₁₃ H ₂₄	180
6-Tridecane	C ₁₃ H ₂₆	182
6-Ethyl-2-methyl decane	C ₁₃ H ₂₈	184
3,7-Dimethyl undecane	C ₁₃ H ₂₈	184
1-Tetradecyne	C ₁₄ H ₂₆	194
3-Tetradecane	C ₁₄ H ₂₈	196
4-Tetradecane	C ₁₄ H ₂₈	196
Pentadecane	C ₁₅ H ₃₂	212
Hexadecane	C ₁₆ H ₃₄	226

จ.-1 ถ่านชาร์

ถ่านชาร์ที่ได้จากการกระบวนการไพโรไลซิส มีค่าตัวเลขไอโอดีนค่อนข้างสูง (ประมาณ 800-900 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่าน) โดยค่าตัวเลขไอโอดีนนั้นมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตามกับพื้นที่ผิว ด้วยเหตุนี้จึงสามารถนำถ่านชาร์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับแทนถ่านกัมมันต์ (มีค่าตัวเลขไอโอดีนประมาณ 900-1,100 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่าน) ได้ อาทิเช่น การนำถ่านชาร์ที่ได้ไปดูดซับสีออกจากน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อม เป็นต้น

จ.-2 แก๊ส

ผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนด้วยการใช้เครื่อง Coupled Temperature Program Pyrolysis/Mass Spectroscopy (TPP/MS) ซึ่งได้ติดตามแก๊สที่เกิดขึ้นจำนวน 10 ชนิด อาทิเช่น ไฮโดรเจน มีเทน น้ำ เอทิลีน โพรพิลีน โพรเพน คาร์บอนไดออกไซด์ เม-ทานอล คลอโรมีเทน และบิวเทน เป็นต้น ตั้งแต่อุณหภูมิ 100 จนถึง 800 องศาเซลเซียส และแบ่งแยกตามประเภทของกากตะกอนดังในหัวข้อ ค. พบว่า ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส แก๊สจำพวก โพรเพน คาร์บอนไดออกไซด์ และเมทานอลจะเกิดขึ้นสำหรับกากตะกอนทุกประเภท ในขณะที่อุณหภูมิในช่วง 400-500 องศาเซลเซียสนั้น แก๊สที่เกิดขึ้นสำหรับกากตะกอนทุกประเภทได้แก่ มีเทน และเอทิลีน ซึ่งเป็นโมเลกุลอินทรีย์ขนาดเล็ก แสดงให้เห็นว่าเริ่มมีการแตกตัวของไอน้ำมันในขั้นทุติยภูมิแล้ว นอกจากนี้เมื่อระบบมีอุณหภูมิ 650 องศาเซลเซียสจะพบว่า มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วยสำหรับกากตะกอนทุกแหล่งซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่า มีการแตกตัวของไฮโดรเจนที่อยู่ในมีเทน และเอทิลีนออกมา รวมทั้งเกิดสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอีกครั้งหนึ่ง

ตารางที่ 5.6 แก๊สผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอนตัวอย่าง จำแนกตามกลุ่มของกากตะกอน และช่วงอุณหภูมิที่เกิด

ผลิตภัณฑ์	ช่วงอุณหภูมิที่เกิดและกลุ่มของกากตะกอนที่เกิดแก๊สชนิดนั้น (องศาเซลเซียส)				
ชื่อ	250	300	400-500	650	800
H ₂ (Hydrogen)	1		5	1,2,3,4,5	
CH ₄ (Methane)			1,2,3,4,5		
H ₂ O (Water)			5		
C ₂ H ₄ (Ethylene)			1,2,3,4,5		
C ₃ H ₆ (Propylene)			1,2,4,5		
C ₃ H ₈ (Propane)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
CO ₂ (Carbon dioxide)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
CH ₃ OH (Methanol)		1,2,3,4,5	3,5	1,2,3,4,5	3
CH ₃ Cl (Chloromethane)			1,2,4,5		
C ₄ H ₁₀ (Butane)			1,2,4,5		

ข. การประเมินความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์

สำหรับการประเมินความเป็นไปได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการไพโรไลซิสกากตะกอนนั้น เมื่อพิจารณาถึงส่วนต่างระหว่าง อัตราผลตอบแทนโครงการลงทุน กับดอกเบี้ยเงินกู้พบว่า ไม่ว่าจะใช้กากตะกอนตัวอย่างที่สำรวจจาก 20 แหล่งในประเทศไทย ที่มีศักยภาพเชิงความร้อน (ซึ่งได้แก่ ปริมาณสารระเหย หรือคุณค่าความร้อน) ระดับใดก็ตามจะพบว่า ส่วนต่างจะมีค่าเป็นบวกดังแสดงในตารางที่ 5.6 (อยู่ในช่วงประมาณ 3-23 % แปรผันตามศักยภาพกากตะกอน) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า โครงการแปรรูปกากตะกอนให้เป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิสมีความ ‘คุ้มค่า’ ในการดำเนินโครงการในระดับนำร่อง (รวมถึงในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่)

อย่างไรก็ตามการใช้กากตะกอนที่มีศักยภาพในเชิงพลังงานสูงกว่าจะช่วยในการบริหารจัดการโครงการเพื่อป้องกัน ‘ความเสี่ยง’ ของโครงการได้ง่ายกว่าการใช้กากตะกอนที่มีศักยภาพเชิงพลังงานต่ำ อันเนื่องมาจากความ ‘ผันผวน’ ทางเศรษฐกิจของประเทศที่อาจจะมีขึ้นได้ในอนาคตได้

ตารางที่ 5.7 ผลตอบแทนโครงการเมื่อเปลี่ยนคุณภาพกากตะกอนที่ป้อน

กากตะกอน*	ผลต่างอัตราผลตอบแทนโครงการ กับอัตราดอกเบี้ยเงินกู้ (IRR □ interest rate)
กากตะกอนคุณภาพต่ำ (สารระเหย $\cong$ 25 %)	3.6 %
กากตะกอนคุณภาพปานกลาง(สารระเหย $\cong$ 40 %)	14.9 %
กากตะกอนคุณภาพสูง (สารระเหย $\cong$ 55%)	23.8 %

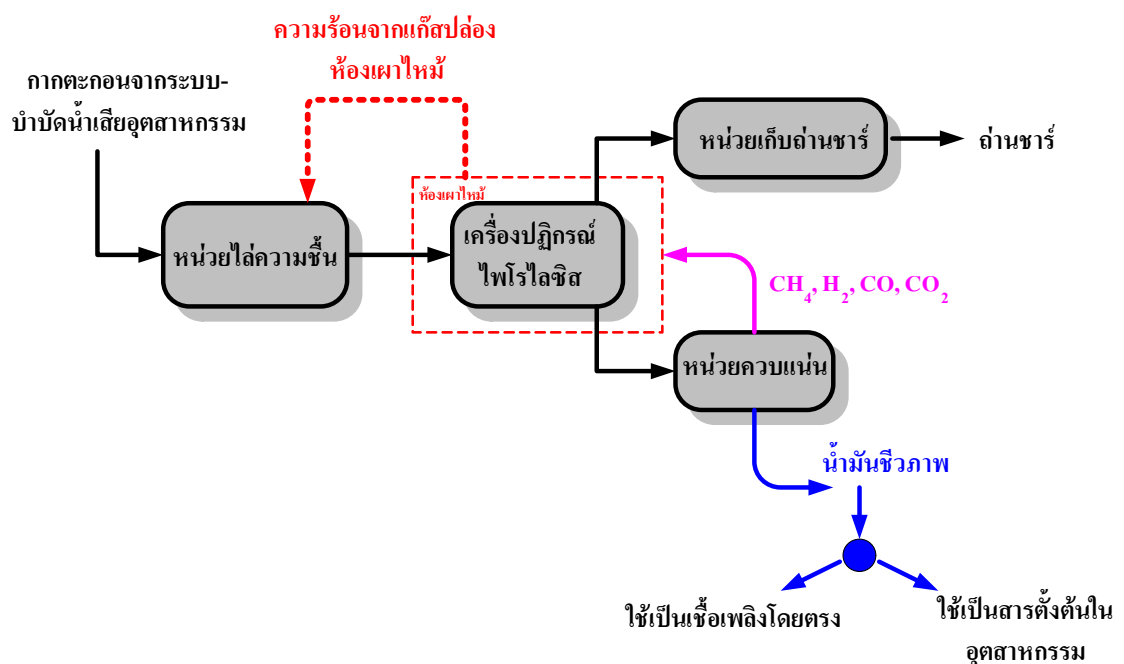
ข. ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม

การศึกษา และพัฒนาการแปรรูปกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียให้เป็นเชื้อเพลิงด้วยกระบวนการไพโรไลซิส นั้น เนื่องจากใช้เครื่องปฏิกรณ์ในระดับห้องทดลองซึ่งมีขนาดเล็ก ดังนั้นแหล่งพลังงานที่นำมาใช้สำหรับระบบจึงใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นหลัก เนื่องจากมีความสะดวกในการติดตั้ง และการดำเนินการ รวมทั้งไม่สิ้นเปลืองมากนัก อย่างไรก็ตามสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริง อาทิเช่น ในระดับกังหันรอง ระดับนำร่อง หรือระดับอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีขนาดใหญ่ และซับซ้อนมากขึ้น การใช้พลังงานไฟฟ้ากลับจะมีความยุ่งยาก และสิ้นเปลืองมาก

แนวคิดที่น่าสนใจคือ การนำแก๊สเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบการไพโรไลซิสเองมาใช้ประโยชน์ในแง่ที่เป็นเชื้อเพลิงของระบบกล่าวคือ ในการดำเนินการต้องแบ่งเป็นออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรกเป็นช่วงเริ่มต้นซึ่งจำเป็นต้องใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งอื่นเช่น น้ำมันเตา หรือแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG) สำหรับสร้างพลังงานให้เกิดกระบวนการไพโรไลซิสของกากตะกอน เมื่อระบบดำเนินไปจนถึงช่วงหนึ่งแล้ว แก๊สเชื้อเพลิง (ซึ่งองค์ประกอบหลักได้แก่ CO, H₂ และ CH₄) ที่ได้จากระบบจะมีปริมาณมากขึ้น จากนั้นการดำเนินการจึงเข้าสู่ช่วงที่ 2 ซึ่งเป็นการป้อนแก๊สเชื้อเพลิงเหล่านี้กลับเข้าไปยังห้องเผาไหม้แทนแก๊ส LPG ซึ่งระบบจะสามารถดำเนินไปได้ด้วยตัวเองเรื่อยๆจนกว่ากระบวนการจะสิ้นสุด ดังนั้นต้นทุนของพลังงานภายนอกที่ต้องใช้จึงน่าจะต่ำมาก ซึ่งจะส่งผลทำให้ต้นทุนของกระบวนการเองต่ำลงด้วย

นอกจากนี้แล้วผลการทดลอง จะเห็นได้ว่าร้อยละของการดองสารระเหยของเครื่องปฏิกรณ์ที่ทดสอบ นั้นอยู่ในระดับสูง แต่ปริมาณน้ำมันชีวภาพที่ได้โดยทั่วไปจะน้อย ซึ่งเกิดจากประสิทธิภาพของ เครื่องควบแน่นค่อนข้างต่ำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาปรับปรุงระบบเครื่องควบแน่นสำหรับการ นำไปใช้ในในระดับที่ใหญ่ และมีความซับซ้อนรวมทั้งต้องการได้น้ำมันชีวภาพในปริมาณมาก

สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมนั้น อาศัยข้อดีด้านหนึ่งคือ กระบวนการไพโรไลซิสเป็นการ แปรรูปกากตะกอนของเสียจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรมมาแปรรูปเป็น ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าเพิ่มสูงขึ้นดังนั้นจึงเป็นการลดค่ากำจัดกากของเสีย และนำผลิตภัณฑ์ที่ได้ไปใช้ ประโยชน์ทั้งการนำกลับมาใช้ใหม่ หรือนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอื่นได้ (คือ สามารถ นำไปขายเป็นวัตถุดิบได้นั่นเอง) ตัวอย่างหนึ่งของการประยุกต์ใช้กระบวนการไพโรไลซิสในอุตสาหกรรมแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 ตัวอย่างแผนภาพการประยุกต์ใช้กระบวนการไพโรไลซิสในโรงงานอุตสาหกรรม

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่า น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังจากผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสีย แล้ว จะได้กากตะกอนออกมาเป็นผลิตภัณฑ์ซึ่งปกติแล้วมักจะกำจัดด้วยการนำไปฝัง ซึ่งต้องเสียค่า บริการในการกำจัด

เมื่อได้มีการประกอบชุดอุปกรณ์กระบวนการไพโรไลซิสเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่า กากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียนั้นจะถูกไล่ความชื้นออกภายในหน่วยไล่ความชื้น ด้วยความร้อนที่ได้จากแก๊สปล่อง (Stack gas) เมื่อออกจากหน่วยนี้แล้วกากตะกอนจะมีความชื้นน้อยมาก และถูกป้อนเข้าสู่ชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส ซึ่งได้รับความร้อนจากห้องเผาไหม้ หลังจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นโดยสมบูรณ์แล้ว จะได้ผลิตภัณฑ์ออกมา 2 ส่วน คือ ไอน้ำมันที่ผสมอยู่กับแก๊ส CH_4 , H_2 , CO และ CO_2 ที่เรียกรวมๆว่า ‘วัตถุดิบ’ และถ่านชาร์

วัตถุดิบถูกป้อนเข้าสู่หน่วยควบแน่นได้ส่วนที่เป็นแก๊ส และน้ำมันชีวภาพ ซึ่งแก๊สนี้สามารถติดไฟได้ และมีคุณค่าความร้อนปานกลางจึงถูกใช้เป็นเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้ ในขณะที่น้ำมันชีวภาพอาจจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรง หรืออาจจะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางเคมีอื่นๆเช่น กระบวนการไฮโดรแครกกิง เป็นต้น ได้เป็นสารประกอบจำพวกโอลิฟินส์ ซึ่งสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอื่นๆได้อีก

นอกจากนี้แล้ว การประชาสัมพันธ์ การเผยแพร่ข้อมูล ตลอดจนการให้คำปรึกษาก็เป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างหนึ่งเช่นกัน เนื่องจากทำให้เป็นสื่อกลางระหว่างทีมผู้วิจัย กับผู้สนใจต่อกระบวนการไพโรไลซิสทั้งภาครัฐ และเอกชน ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความคิด และทักษะกันได้อย่างกว้างขวาง และรอบด้านมากที่สุด ซึ่งทำให้เกิดการพัฒนากระบวนการนี้ในระดับอุตสาหกรรม ให้เป็นจริงขึ้นได้ในประเทศไทย

นอกจากให้คำปรึกษา แลกเปลี่ยนความรู้แล้ว แนวทางการจัดตั้งศูนย์บริการให้คำปรึกษาควรมีห้องปฏิบัติการพื้นฐานสำหรับการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบประมาณขึ้น ด้วยเหตุที่ว่า ข้อมูลที่ได้จากผลการวิเคราะห์นี้ ร่วมกับการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PyrSim (ดูการใช้งานในภาคผนวก ง ประกอบ) สามารถได้ข้อมูลเบื้องต้นการประเมินศักยภาพของกากตะกอนในการนำเข้ามาจัดการด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (ขั้นตอนการประเมินศักยภาพกากตะกอนดูภาคผนวก ง ประกอบ)

ซึ่งศูนย์สำหรับรับวิเคราะห์ตัวอย่างกากตะกอนนี้ประกอบด้วยเครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบแบบประมาณครบถ้วนตามมาตรฐาน ASTM อาทิเช่น ตู้อบ, เตาเผาแบบท่อ และแบบห้องสี่เหลี่ยมที่สามารถควบคุมอุณหภูมิภายในเตาได้, ครุชเปิดแบบทองเหลือง และแบบกระเบื้อง เป็นต้น

นอกจากอุปกรณ์การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณแล้ว ศูนย์ยังมีอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาวิจัยกระบวนการไพโรไลซิสเพื่อรองรับถึงงานวิจัย หรือการตรวจวัดพารามิเตอร์

ภาคผนวก ก.
ระบบบำบัดน้ำเสียชนิดแอคติเวตเต็ดจ์

ลักษณะสำคัญของระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge process)

จากการศึกษา วิจัยระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้ในประเทศไทย ส่วนใหญ่จะใช้ระบบบำบัดแบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge process) ซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสูงระดับหนึ่ง คือประมาณ 85-90% จึงเป็นที่นิยมใช้กันมากในปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ในการบำบัดน้ำเสียจากอาคารและอุตสาหกรรมผลิตอาหาร โดยปกติแล้วน้ำเสียจะต้องผ่านตะแกรง บ่อดักไขมัน บ่อดักกรวดทรายเพื่อแยกเอาเศษวัสดุและตะกอนที่มีขนาดใหญ่ออกขั้นหนึ่งก่อนจากนั้นน้ำเสียจะเข้าสู่ระบบแอกติเวตเต็ดสลัดจ์ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องเติมอากาศที่ติดตั้งอยู่ในถังเติมอากาศจะเพิ่มออกซิเจนให้แก่ น้ำเสีย เพื่อทำให้จุลินทรีย์น้ำออกซิเจนไปใช้ในการย่อยสลายสิ่งสกปรกในน้ำเสีย และการเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนต่อไป น้ำตะกอนจากถังเติมอากาศจะนำเข้าสู่ถังตกตะกอน เพื่อแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำที่บำบัดแล้วน้ำใสส่วนที่ไหลล้นออกจากถังตกตะกอนจะนำไปฆ่าเชื้อโรคก่อนระบายลงสู่คลอง สำหรับตะกอนจุลินทรีย์ที่อยู่ก้นถังตกตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับไปยังถังเติมอากาศเพื่อรักษาปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ให้เหมาะสม อีกส่วนหนึ่งซึ่งเป็นตะกอนส่วนเกินจะต้องนำไปกำจัดทิ้งด้วยระบบกำจัดตะกอนต่อไป

หัวใจสำคัญของระบบบำบัดน้ำเสียแบบนี้คือ อาศัยจุลินทรีย์ทั้งหลายที่มีอยู่ในถังเติมอากาศของระบบเป็นตัวย่อยสลายสิ่งสกปรกที่มีอยู่ในน้ำเสียให้หมดไป หรือจนมีความสะอาดพอที่จะระบายทิ้งได้ โดยไม่ก่อให้เกิดน้ำโคลงเน่าเสียอีก สิ่งสกปรกในน้ำเสียที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ ส่วนใหญ่เป็นพวกสารอินทรีย์ ทั้งในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ และในรูปของคอลลอยด์ผลผลิตสุดท้ายที่ได้จากการย่อยได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ เชลจุลินทรีย์ตัวใหม่ และพลัง

จากรูปที่ 1 แสดงถังเติมอากาศแบบเครื่องเติมอากาศได้น้ำ ของโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ ซึ่งเป็นโรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่และใช้ระบบตะกอนเร่งแบบสองขั้นตอน (Two-stage activated sludge) ในการบำบัดน้ำเสีย โดยถังเติมอากาศขั้นแรกจะเป็นแบบ High rate aeration และถังที่สองเป็น Extended เพื่อควบคุมกระบวนการให้เป็นแบบ Anoxic ให้มีการกำจัดไนโตรเจนและในถังเติมอากาศขั้นที่สองจะมีการเติมเกลือคลอรีนเพื่อกำจัดฟอสฟอรัสสำหรับระบบตกตะกอน โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ น้ำเสียที่ไหลเข้าผ่านระบบตกตะกอนจะมีการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรค ดังแสดงในรูปที่ 2 และรูปที่ 3 แสดงเครื่องรีดน้ำออกจากตะกอน (Sludge Dewatering Machine) ทำหน้าที่รีดน้ำที่มีอยู่ในตะกอนที่จะทิ้งออก โดยทำให้มีน้ำเหลืออยู่ไม่เกิน 80% เครื่องจักรที่ใช้เป็นชนิด Belt Press และตะกอนจะถูกส่งต่อไปยังถังพัก

ตะกอนแห้ง (Sludge Hopper) ที่ทำหน้าที่เก็บรวบรวมตะกอนที่ทิ้งจากเครื่องรีดน้ำออกจากตะกอนดัง
แสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 1 ถังเติมอากาศ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์



รูปที่ 2 ระบบตกตะกอน โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์



รูปที่ 3 เครื่องรีดน้ำออกจากตะกอนแบบสายพาน(Belt Press) โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์



รูปที่ 4 ถังพักตะกอนแห้ง (Sludge Hopper) โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์

โรงพยาบาลจังหวัดอุรุษย ก็เป็นอีกแห่งที่มีการบำบัดน้ำเสียแบบแอคทีเวตสลัดจ์ (Activated Sludge process) แต่เนื่องจากการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นการใช้จากอาคารของโรงพยาบาลและที่พักอาศัยในบริเวณโรงพยาบาล โรงบำบัดน้ำเสียจึงมีขนาดเล็กและขั้นตอนในการบำบัดที่ไม่ซับซ้อนเท่ากับโรงบำบัดน้ำเสียรัตนโกสินทร์ สำหรับโรงบำบัดแห่งนี้จะประกอบไปด้วย ตะแกรงดักขยะแบบหยาบ ก่อนน้ำเสียเข้าสู่ระบบบ่อเติมอากาศได้น้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นน้ำเสียจะถูกส่งต่อไปยังบ่อตกตะกอน (รูปที่ 2) ที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งน้ำใสที่ได้จากบ่อตกตะกอนจะส่งต่อไปยังบ่อเติมคลอรีน(รูปที่ 10) เพื่อฆ่าเชื้อโรคก่อนปล่อยสู่คลอง สำหรับตะกอนที่ได้จากบ่อตกตะกอนที่ 1 และ 2 ส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับไปยังบ่อเติมอากาศ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปยังบ่อรวบรวมตะกอน(รูปที่ 8) จากบ่อตกตะกอนที่ 1 และ 2 ก่อนส่งต่อไปบ่อเพิ่มความเข้มข้น(รูปที่ 9) ก่อนจะนำตะกอนที่มีตะกอนเข้มข้นสู่โรงรีดตะกอนแบบ Filter Press



รูปที่ 5 รูปภาพโดยรวมระบบบำบัดน้ำเสีย โรงพยาบาลจังหวัดอุรุษย



รูปที่ 6 บ่อเติมอากาศ ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอุรยา



รูปที่ 7 บ่อตกตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอุรยา



รูปที่ 8 บ่อรวบรวมตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา



รูปที่ 9 บ่อเพิ่มความเข้มข้น ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอยุธยา



รูปที่ 10 บ่อสัมผัสคลอรีน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลจังหวัดอุบลราชธานี

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเป็นการบำบัดแบบบ่อเติมอากาศโดยระบบเติมอากาศได้น้ำหรือแบบฟุ้ง (Diffused-air Aeration Systems) โดยที่จะนำเสนอต่อไปนี้เป็นระบบแอคทีเวตเต็ดสลัดจ์ (Activated Sludge process) แบบคลองวนเวียน (Oxidation Ditch Process) โดยมีเครื่องเติมอากาศบนผิวน้ำ (Surface Aeration Systems) เป็นกระบวนการที่มีระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียและอายุสลัดจ์ยาวนานกว่าระบบอื่นๆ แต่มีข้อดี ที่ง่ายต่อการควบคุมระบบให้มีประสิทธิภาพสูง ซึ่งอาจไม่จำเป็นต้องถ่ายน้ำสลัดจ์ทิ้งออกไปจากระบบเหมือนระบบอื่นๆ เนื่องจากในทางทฤษฎีแล้วจะไม่มีมวลจุลชีพส่วนเกินเกิดขึ้นมา รูปแบบของถังเป็นลักษณะคลองวนเวียนดังแสดงในรูป 11 การไหลของน้ำในถังแบบคลองวนเวียนมีความเร็วประมาณ 0.25 ถึง 0.35 เมตรต่อวินาที ต้องการเก็บกักน้ำเสียประมาณ 24 ชั่วโมง และกระบวนการดังกล่าวเป็นที่นิยมใช้กันค่อนข้างมากในประเทศไทย เพราะเป็นระบบที่มี การควบคุมดูแลไม่ยุ่งยากและโดยปกติมาตรฐานน้ำทิ้งจะมีคุณภาพสม่ำเสมอ ถังเติมอากาศจะมีความลึกประมาณ 60 เมตร ถึง 150 เมตร มีพื้นที่หน้าตัดน้อยเหมือนเป็นลักษณะท่อโค้งในแนวตั้ง ระบบคลองวนเวียนนี้ต้องใช้พลังงานมากในการเติมอากาศซึ่งมีน้ำลึกมากๆ แต่จะมีประสิทธิภาพสูงในการให้ออกซิเจนแก่น้ำเสียในถัง หลังจากนั้นน้ำเสียที่มีการเติมอากาศแล้ว จะถูกส่งไปยังถังตกตะกอน (รูปที่ 12) โดยปกติถังตกตะกอนนี้จะมีน้ำไหลเข้าและออก และจะมีสลัดจ์ที่ก้นถัง ถูกสูบ

กลับไปยังดั้งเดิมอากาศอีกครั้ง และบางส่วนถูกถ่ายทิ้งออกไปยังลานตากตะกอน น้ำใสที่ล้นออกจากถังตกตะกอนจะถูกส่งต่อไปยัง บ่อสัมผัสคลอรีน ดังรูปที่ 13 เพื่อฆ่าเชื้อโรคในน้ำ ซึ่งจะหมายถึงการกำจัดเชื้อจุลินทรีย์ต่างๆ ที่เป็นสื่อให้เกิดโรคติดต่อ แต่จะมีจุลินทรีย์บางส่วนอาจหลงเหลืออยู่ในน้ำ สำหรับพวกจุลินทรีย์ที่จำเป็นต้องกำจัดได้แก่ พวกแบคทีเรีย พวกโปรโตซัว และพวกไวรัส เป็นต้น สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียของโรงพยาบาล อ. เสนาแห่งนี้ ได้ใช้สารคลอรีน ที่มีสูตรทางเคมี แคลเซียมไฮโปคลอไรต์ ($\text{Ca}(\text{OCl})_2$) ที่อยู่ในรูปของสารละลาย บรรจุในถัง ดังรูปที่ 14 สำหรับสารคลอรีนจะเป็นที่นิยมใช้ในการฆ่าเชื้อทั้งในน้ำประปา และน้ำทิ้งหลังจากการผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียก่อนปล่อยลงสู่สิ่งแวดล้อม เป็นการช่วยในการกำจัดค่า BOD และกำจัดกลิ่นได้ด้วย



รูปที่ 11 บ่อเติมอากาศแบบคลองวนเวียน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ.เสนา



รูปที่ 12 บ่อดกตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ.เสนา



รูปที่ 13 บ่อดักไขมัน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ.เสนา



รูปที่ 14 บ่อเดิมสารคลอรีน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาล อ.เสนา

สำหรับการตัดสินใจเลือกวิธีบำบัดน้ำเสีย ก็เป็นปัจจัยหนึ่งที่ผู้ออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียต้องให้ความสนใจเช่นกัน จากที่กล่าวมาด้านต้นจะเห็นว่า ขนาดพื้นที่ที่ต้องการใช้สำหรับโรงบำบัดน้ำเสียก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ที่โรงบำบัดน้ำเสียในพื้นที่ต่างจังหวัดสามารถใช้ระบบแบบคลองวนเวียนได้ เนื่องจากระบบดังกล่าวต้องใช้พื้นที่ในการติดตั้งระบบมาก ดังนั้น โรงบำบัดน้ำเสียในพื้นที่กรุงเทพ จึงต้องเลือกใช้ระบบบำบัดแบบถังเดิมอากาศ ที่ใช้พื้นที่น้อย ดังแสดงในรูปที่ 15 บ่อเดิมอากาศได้น้ำ ของระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลเซนต์หลุยส์ ซึ่งจะติดตั้งระบบบำบัดไว้ห้องได้อาคารโรงพยาบาล และมีระบบการทำงานคล้ายกับ โรงปรับปรุงคุณภาพน้ำรัตนโกสินทร์ แต่ขนาดเล็กกว่าและจำนวนถังเดิมอากาศน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณน้ำเสียในการบำบัดแตกต่างกัน ซึ่งน้ำเสียที่โรงบำบัดแห่งนี้จะรับน้ำเสียที่เกิดขึ้นในพื้นที่ของโรงพยาบาลเท่านั้น หลังจากนั้นน้ำเสียที่ผ่านการเดิมอากาศแล้วจะถูกส่งต่อไปยังถังตกตะกอน โดยการออกแบบจะออกตามแนวยาว (รูปที่ 16) เพื่อเกิดการตกตะกอนและได้น้ำใสที่ล้นออกทางด้านข้าง ซึ่งจะเป็นรางน้ำใส ต่อเข้าสู่ระบบค่าเชื้อต่อไป



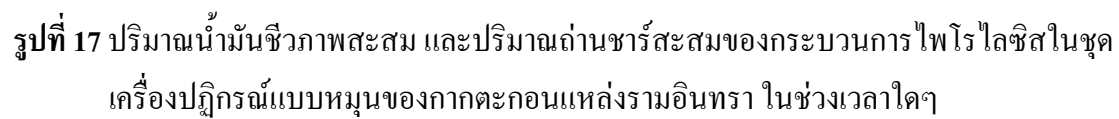
รูปที่ 15 บ่อเติมอากาศ ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลเชนต์หลุยส์



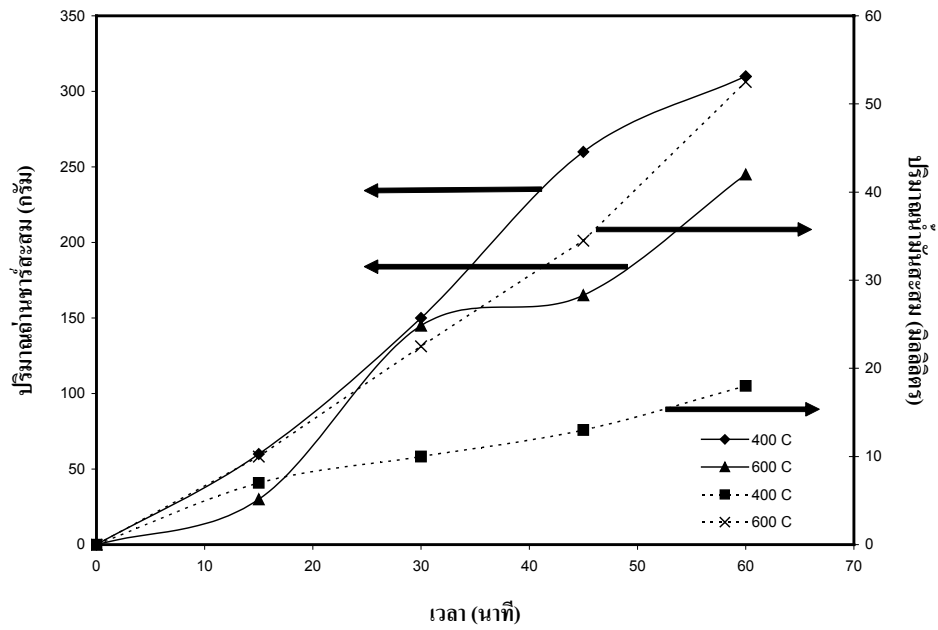
รูปที่ 16 ระบบตกตะกอน ระบบบำบัดน้ำเสียโรงพยาบาลเชนต์หลุยส์

ภาคผนวก ข.

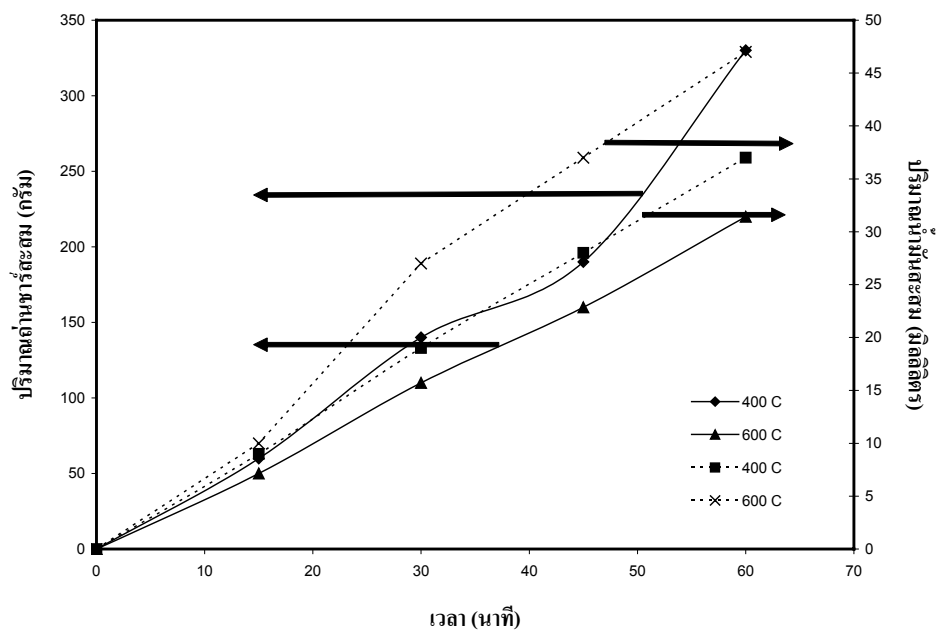
ปริมาณถ่านชาร์ และน้ำมันจากกระบวนการไพโรไลซิสด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบเตาหมุนของกาก
ตะกอนจากแหล่งต่างๆ



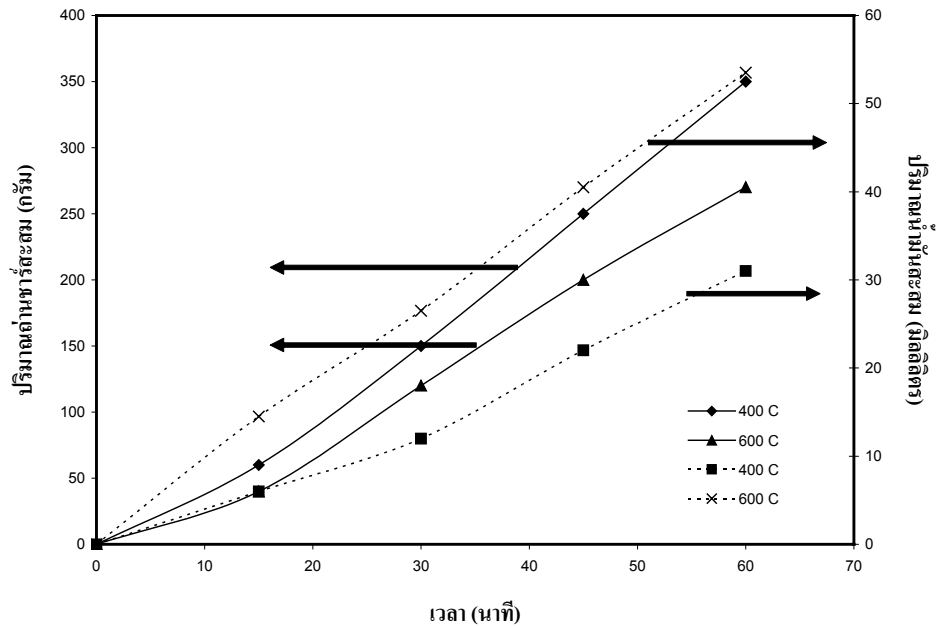
รูปที่ 17 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งรามอินทรา ในช่วงเวลาใดๆ



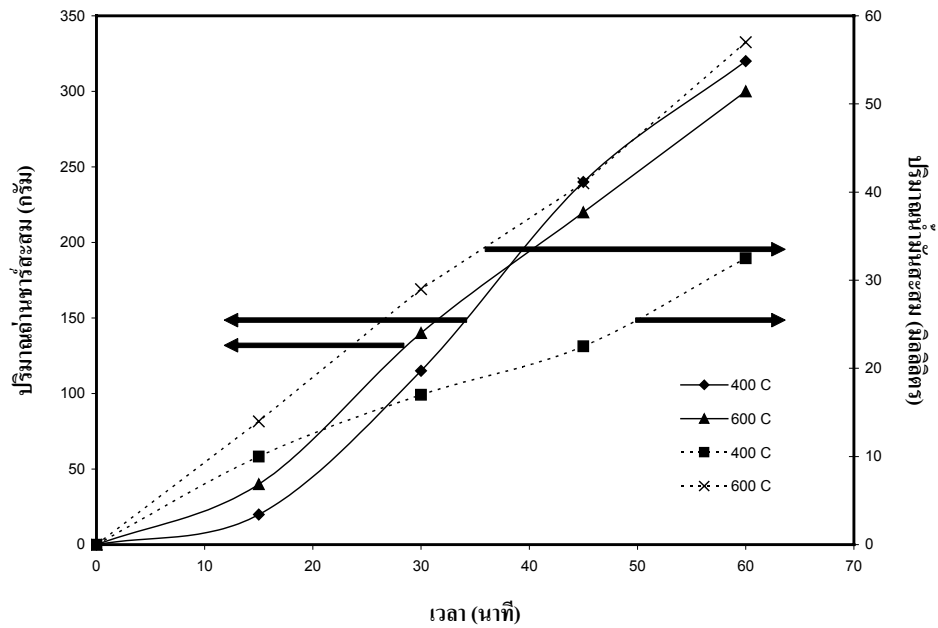
รูปที่ 18 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณอาหารสะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งสวนอุตสาหกรรมเครือสหพัฒน์ ในช่วงเวลาใดๆ



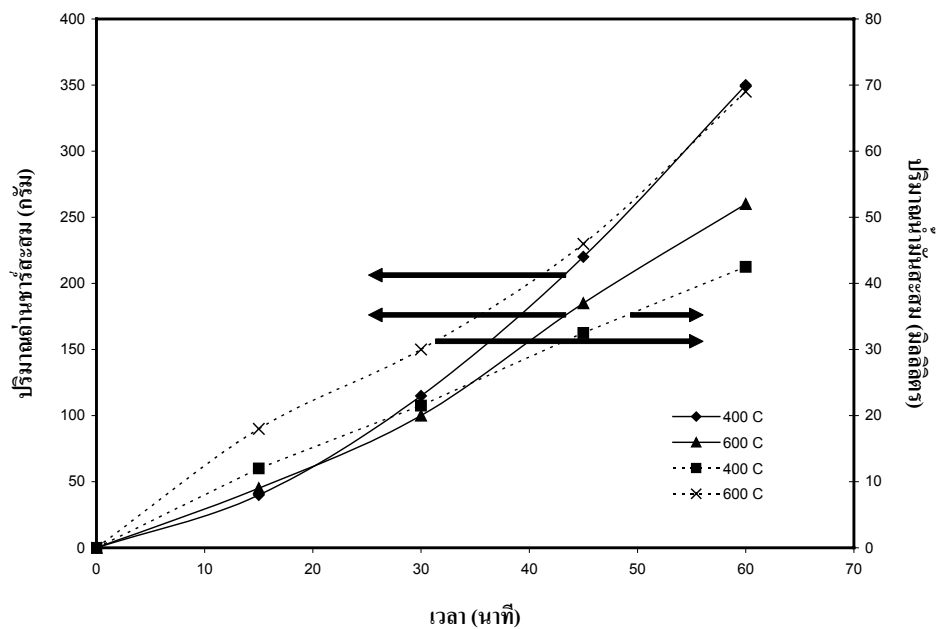
รูปที่ 19 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลสมเด็จพระนั่งเกล้า ในช่วงเวลาใดๆ



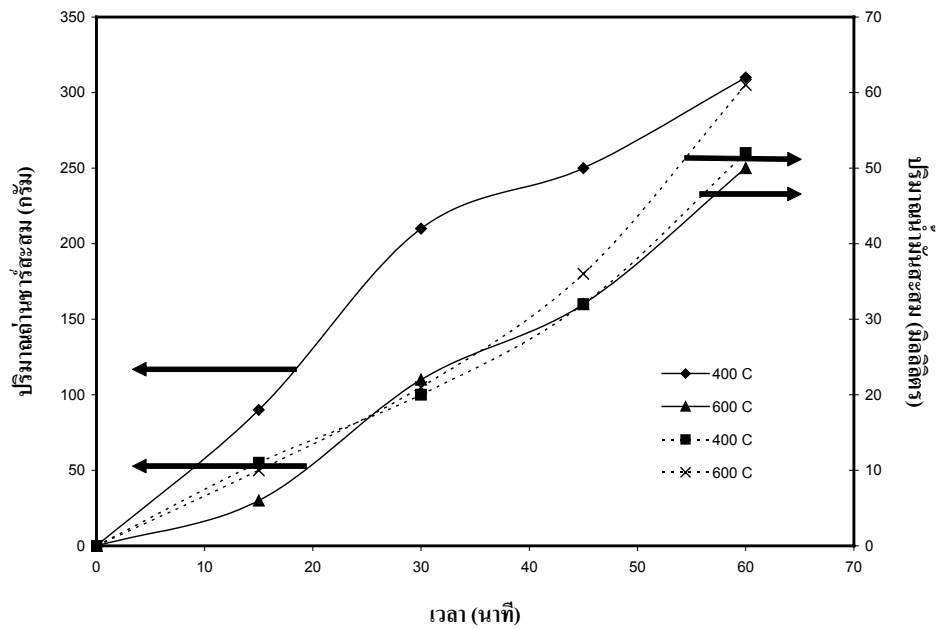
รูปที่ 20 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลศิริราช ในช่วงเวลาใดๆ



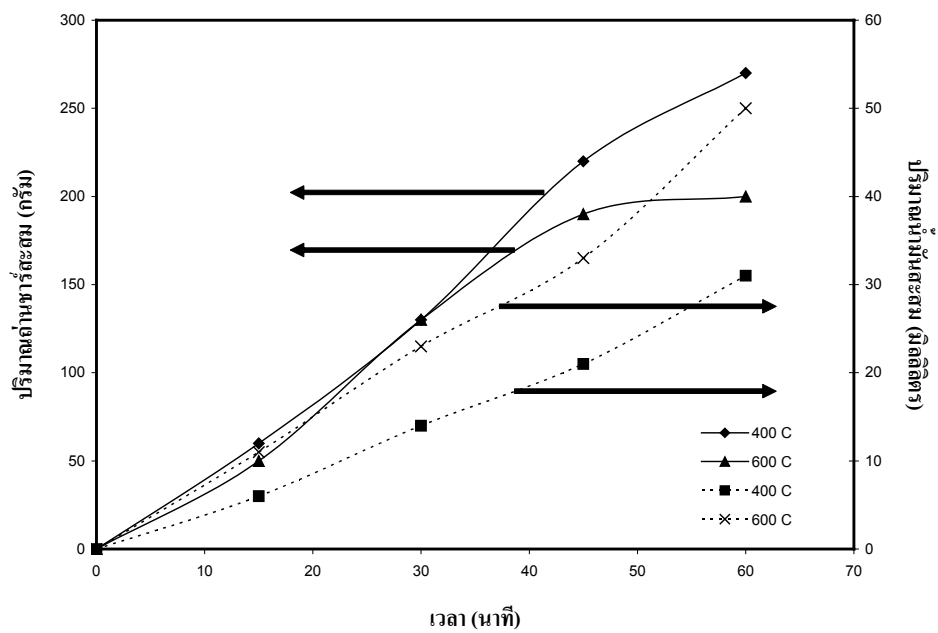
รูปที่ 21 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งเทศบาลอำเภอแสนสุข จ. ชลบุรี ในช่วงเวลาใดๆ



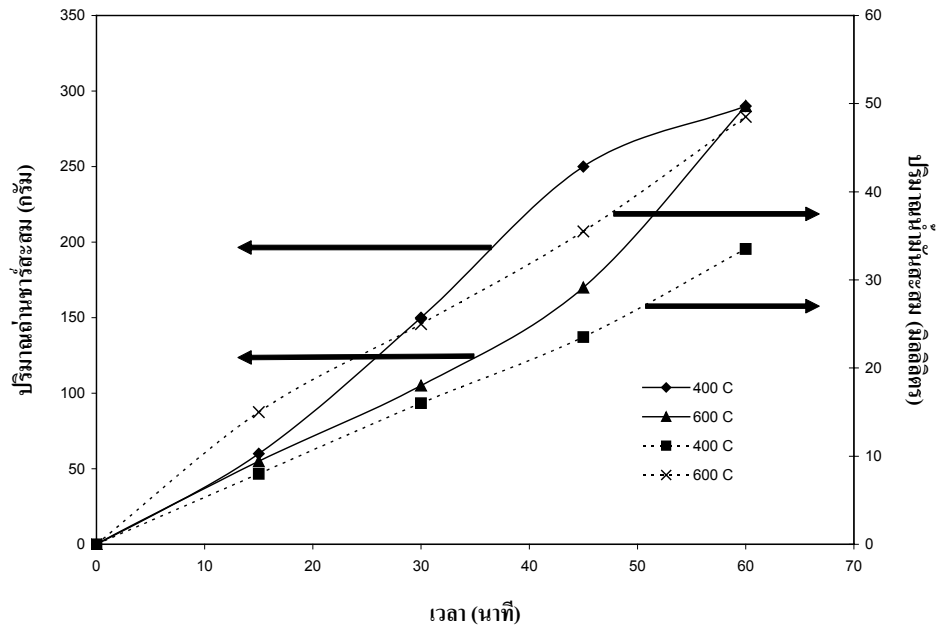
รูปที่ 22 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งอุตสาหกรรม บ. ยูนิลีเวอร์ จำกัด ในช่วงเวลาใดๆ



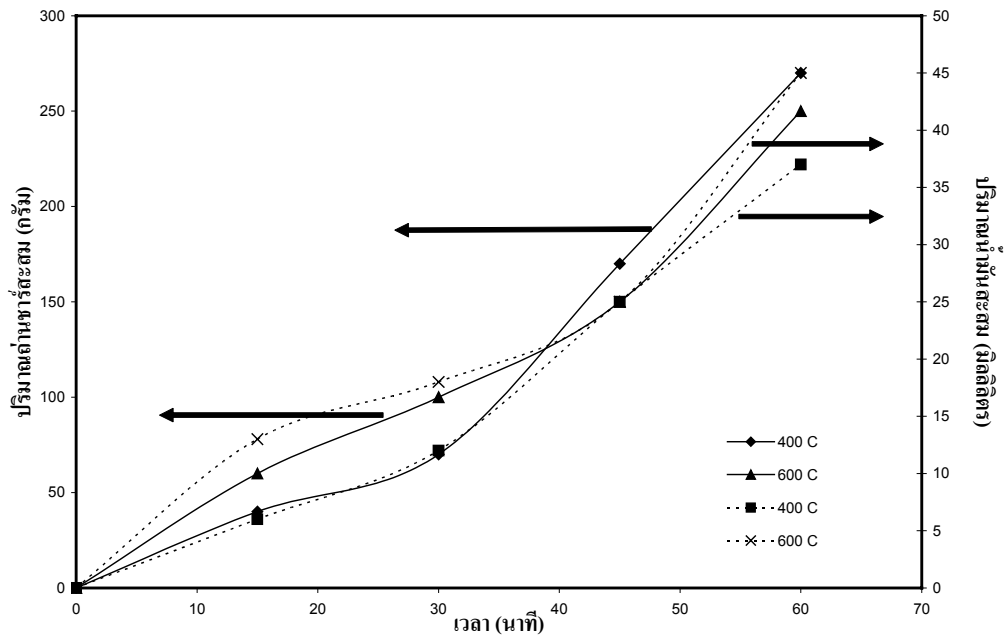
รูปที่ 23 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณน้ำตาลสะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสีย ทั้งสองห้อง 2 ในช่วงเวลาใดๆ



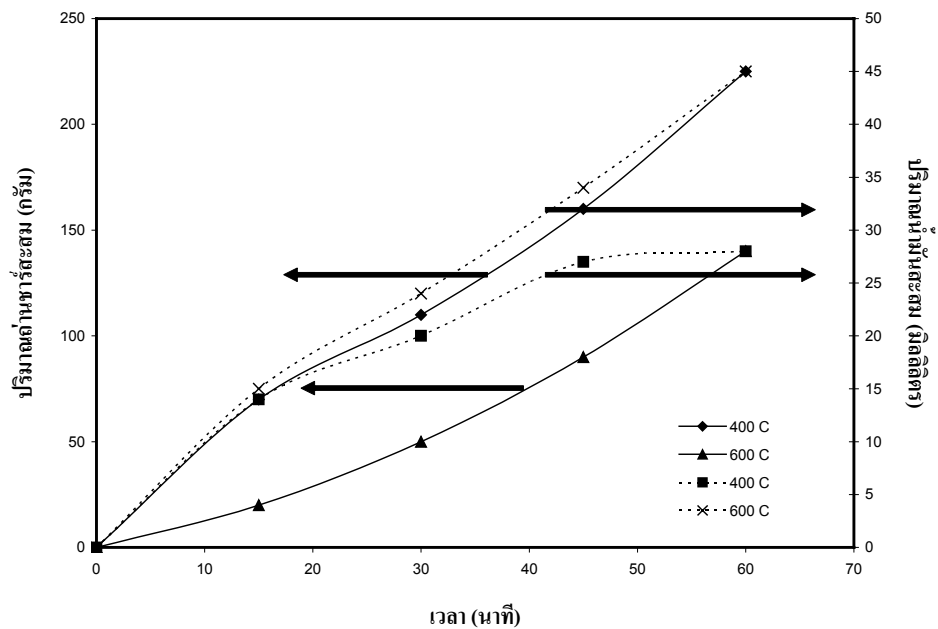
รูปที่ 24 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุด
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลน้ำเสียดองเตยในช่วงเวลาใดๆ



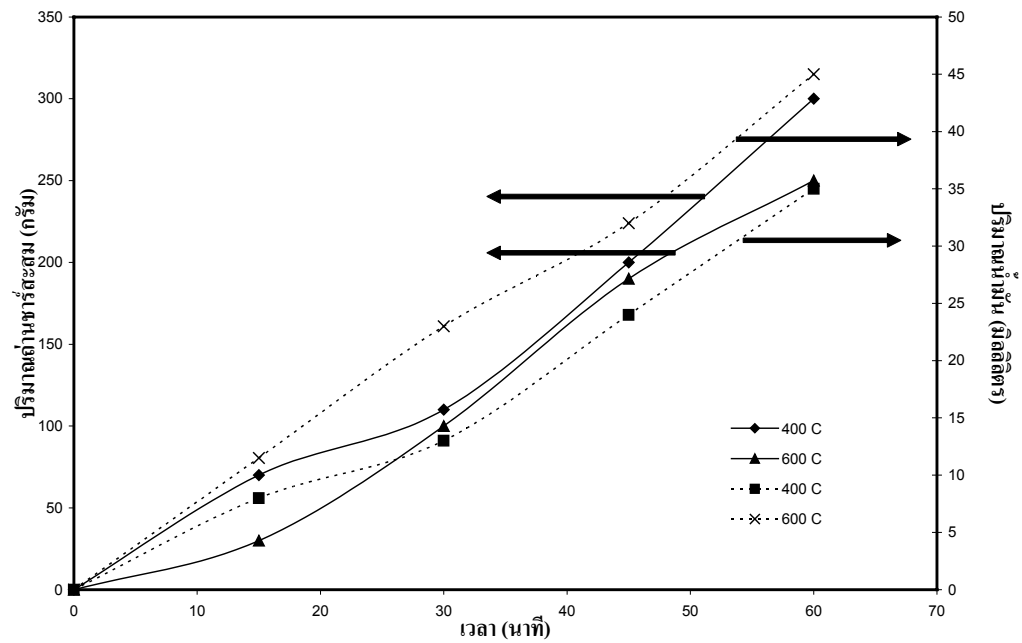
รูปที่ 25 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุด
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาล อ. เสนา จ. พระนครศรีอยุธยา
ในช่วงเวลาใดๆ



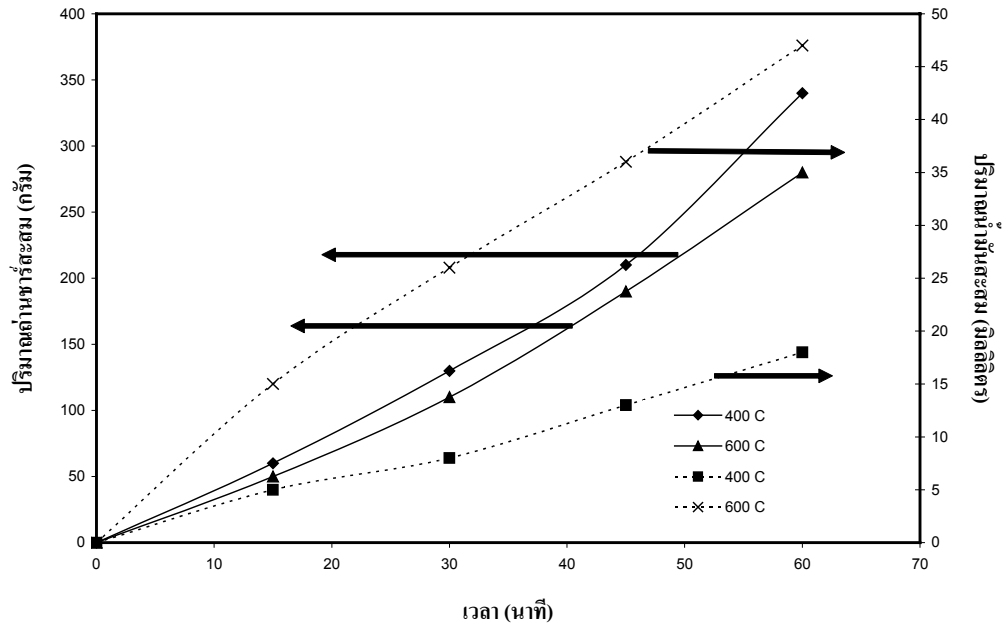
รูปที่ 26 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาล อ. เมือง จ. พระนครศรีอยุธยา ในช่วงเวลาใดๆ



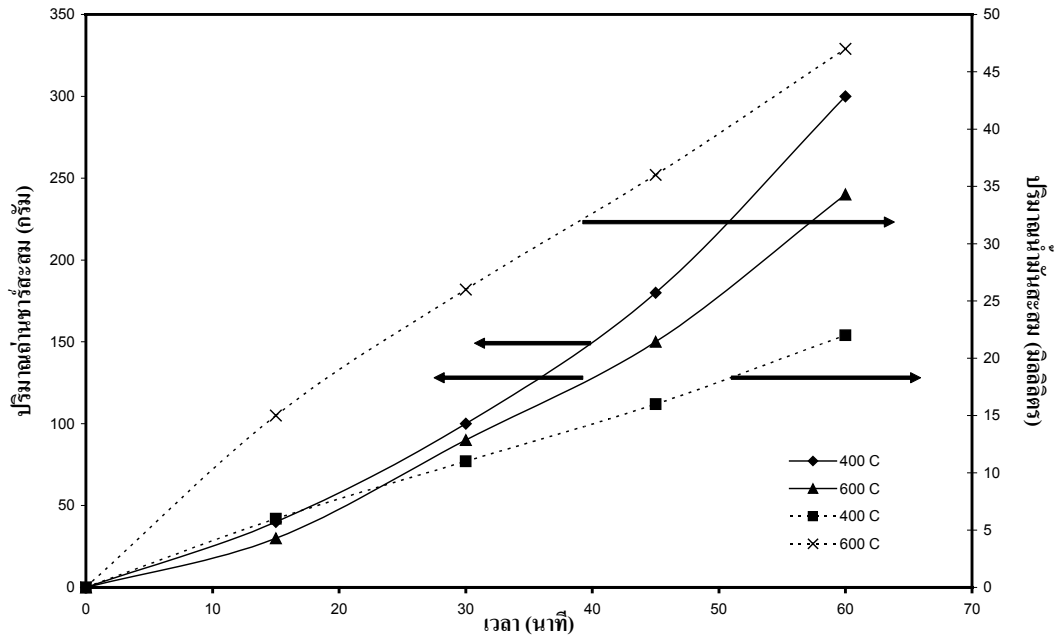
รูปที่ 27 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งกองกำจัดสิ่งปฏิกูล ในช่วงเวลาใดๆ



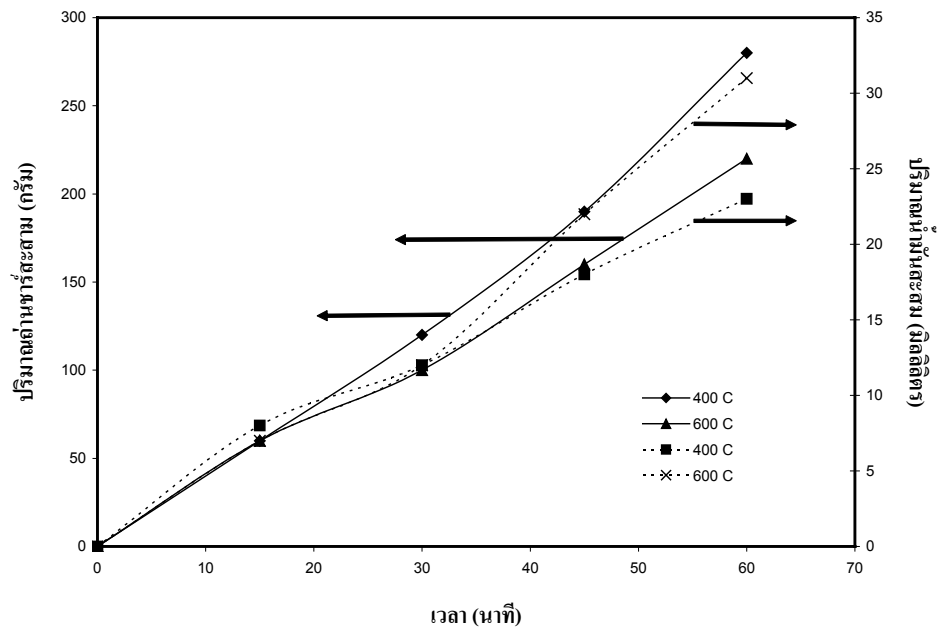
รูปที่ 28 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาล จ.ปทุมธานี ในช่วงเวลาใดๆ



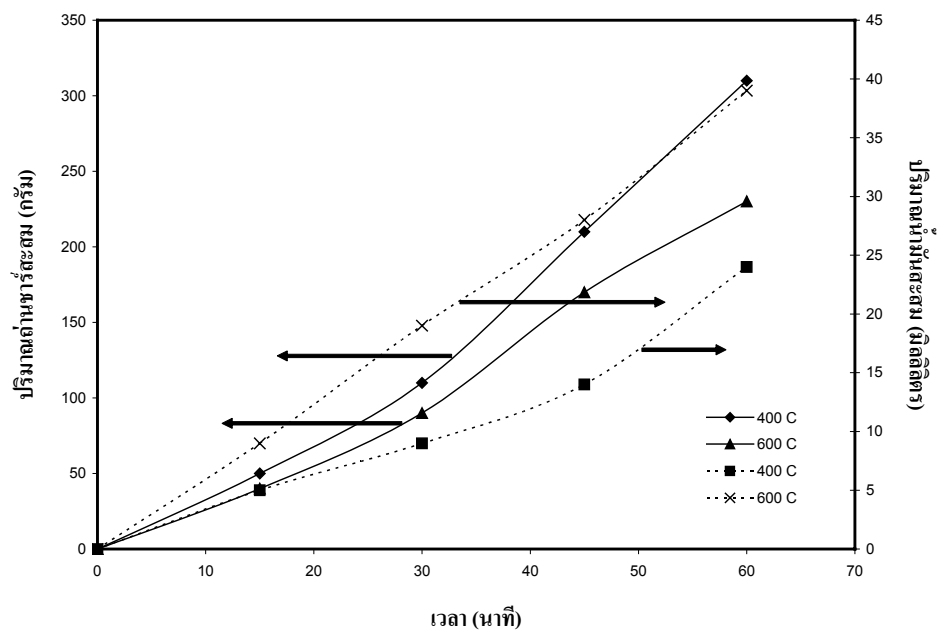
รูปที่ 29 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณอาหารสะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสีย ยานนาวา ในช่วงเวลาใดๆ



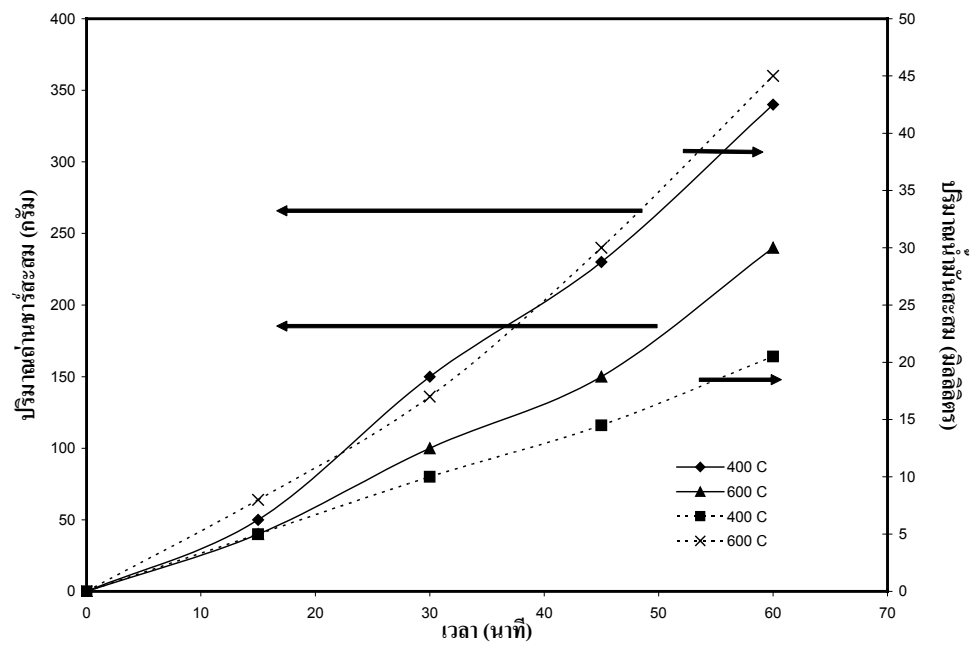
รูปที่ 30 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณอาหารสะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสีย สีพระยาในช่วงเวลาใดๆ



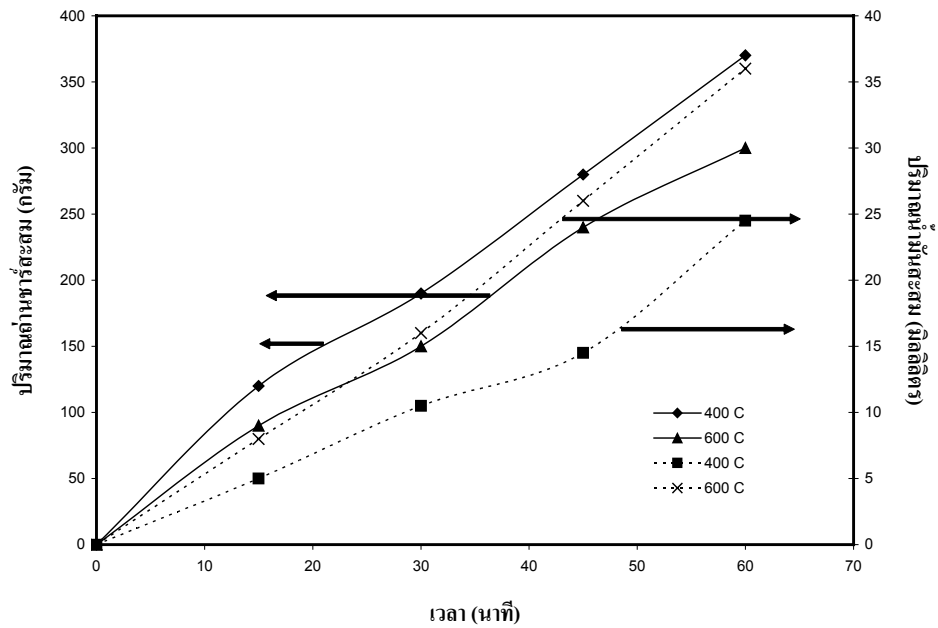
รูปที่ 31 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณอาหารสะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสีย ทำทรายในช่วงเวลาใดๆ



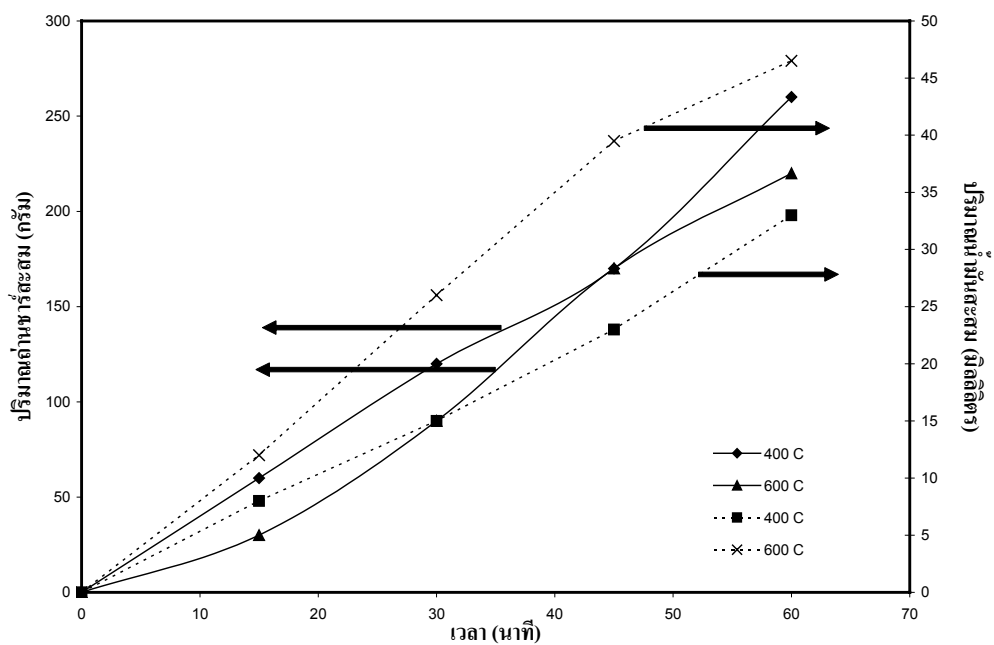
รูปที่ 32 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุด
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงบำบัดน้ำเสีย บางนาในช่วงเวลาใดๆ



รูปที่ 33 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณถ่านชาร์สะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุด
เครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งนิคมอุตสาหกรรมลาดกระบังในช่วงเวลา
ใดๆ



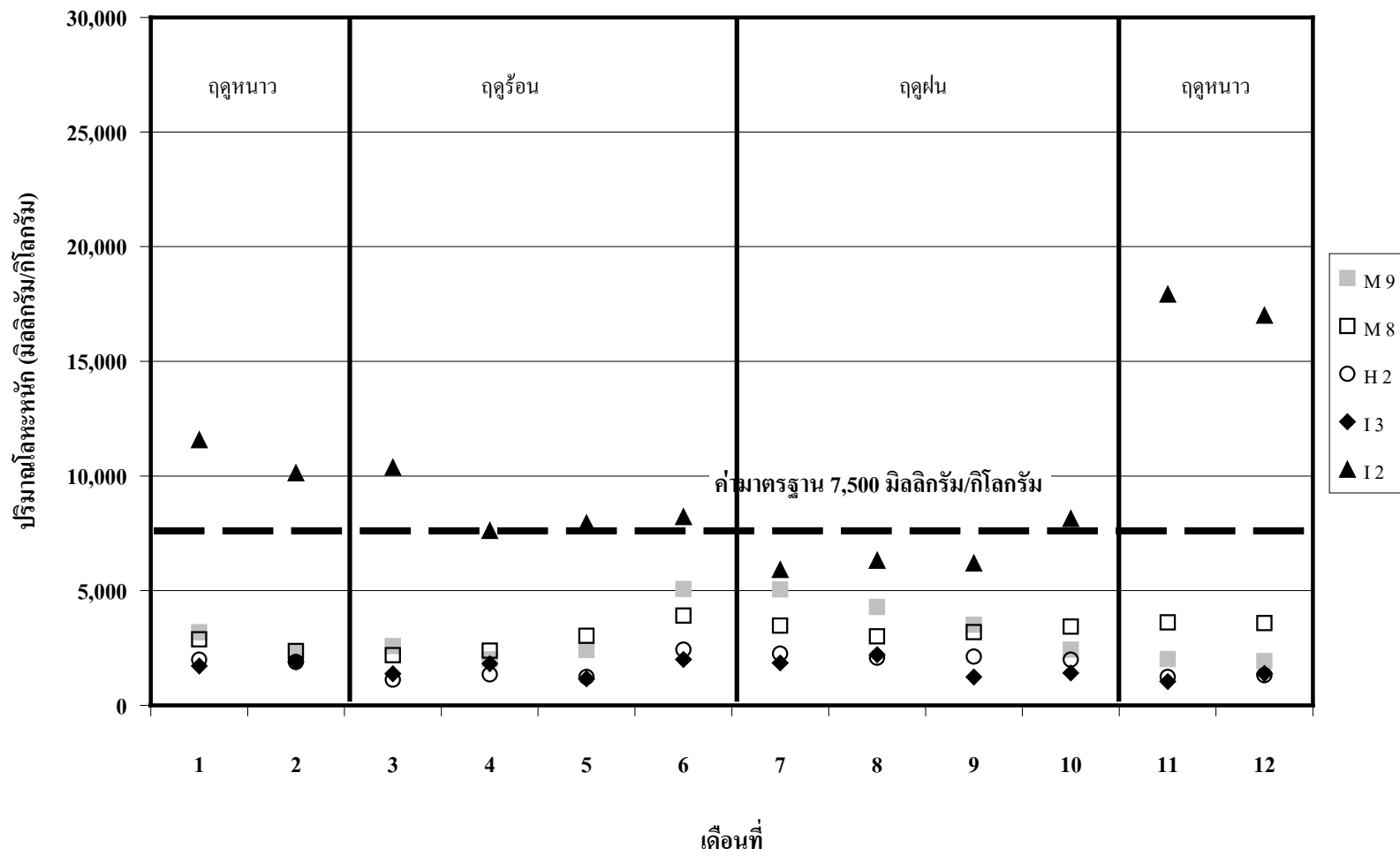
รูปที่ 34 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณอาหารสะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่ง โรงบำบัดน้ำเสียอ่อนนุชในช่วงเวลาใดๆ



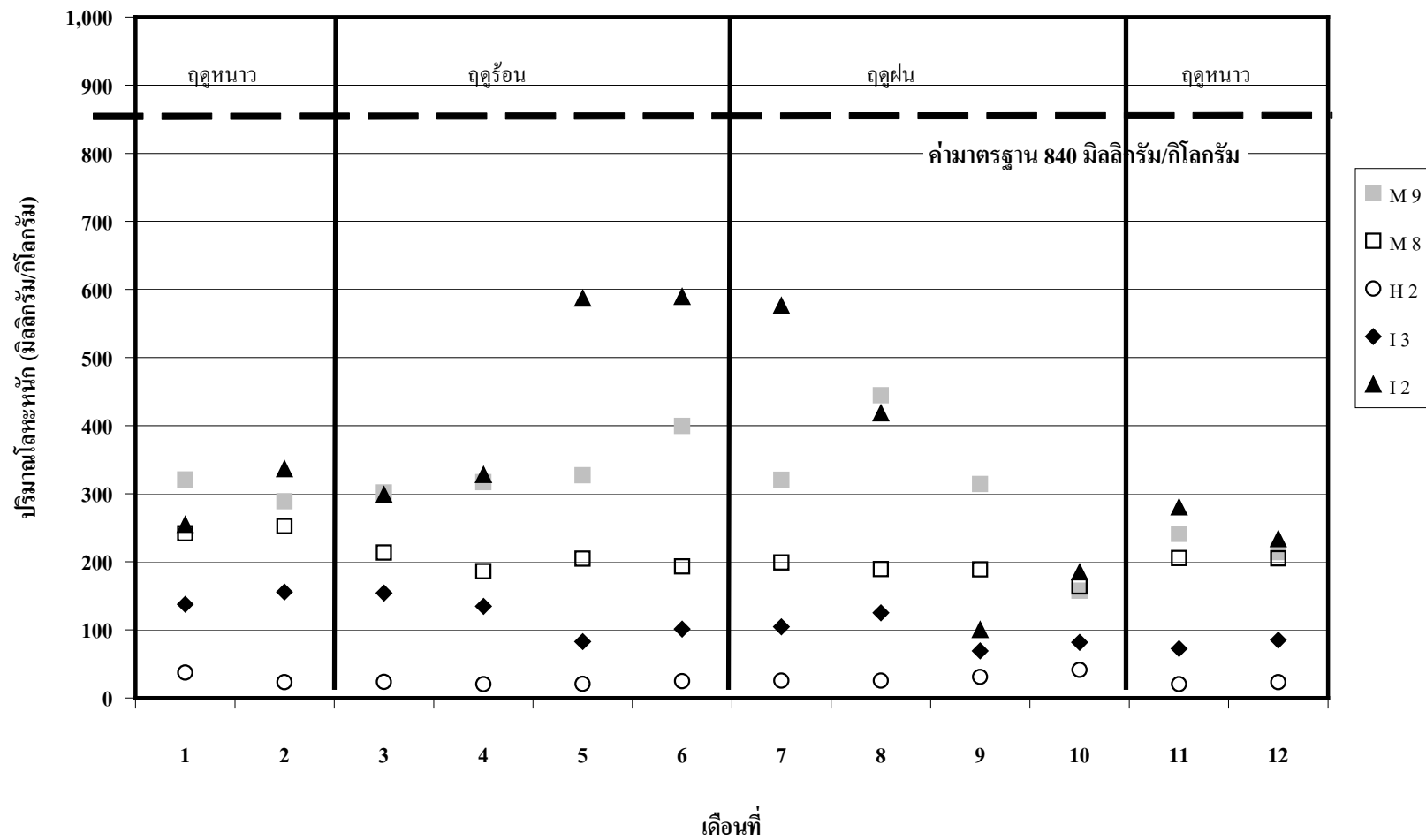
รูปที่ 35 ปริมาณน้ำมันชีวภาพสะสม และปริมาณอาหารสะสมของกระบวนการไพโรไลซิสในชุดเครื่องปฏิกรณ์แบบหมุนของกากตะกอนแหล่งโรงพยาบาลเซ็นต์หลุยส์ ในช่วงเวลาใดๆ

ภาคผนวก ค.

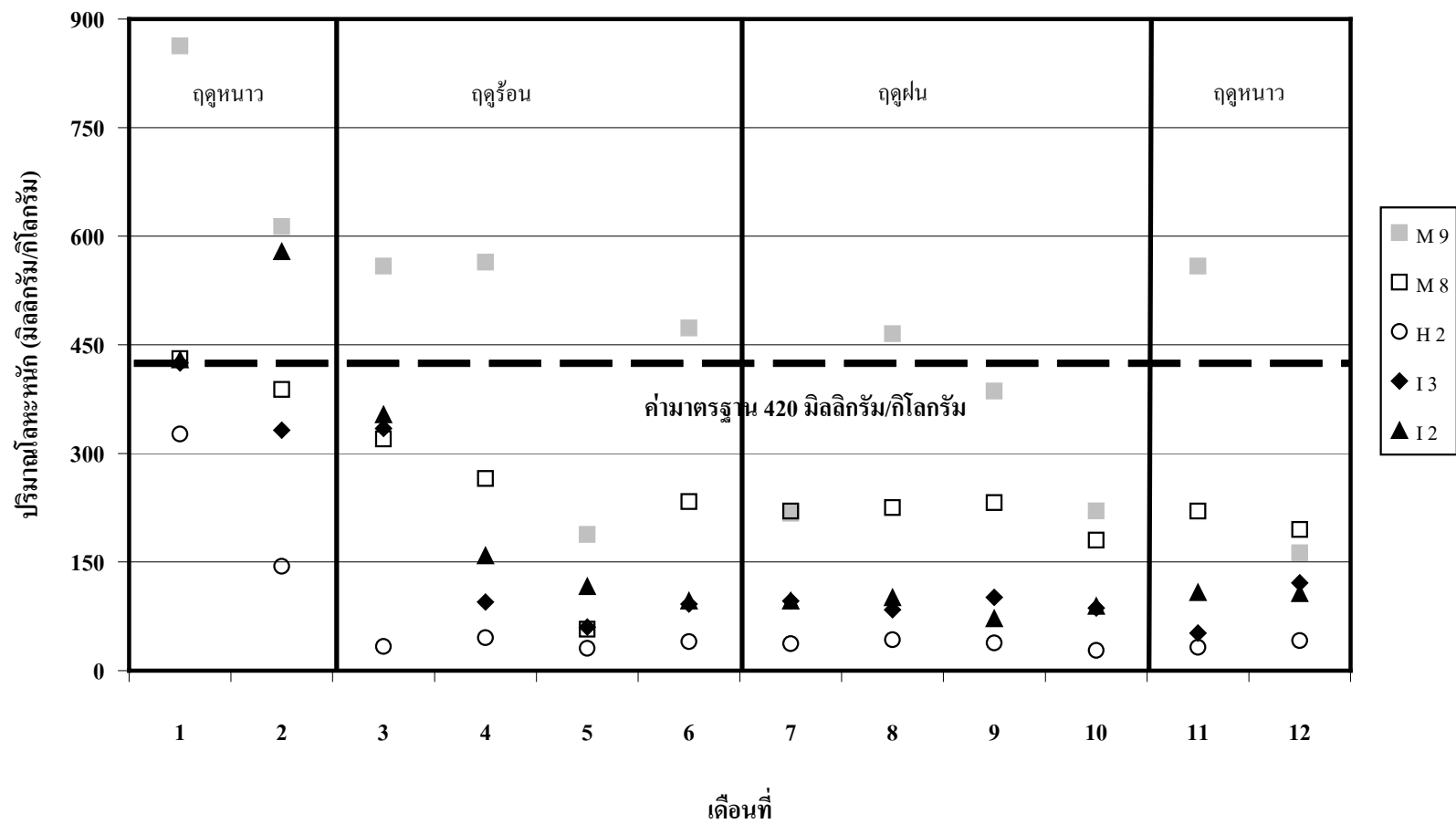
ปริมาณโลหะหนักของกากตะกอน



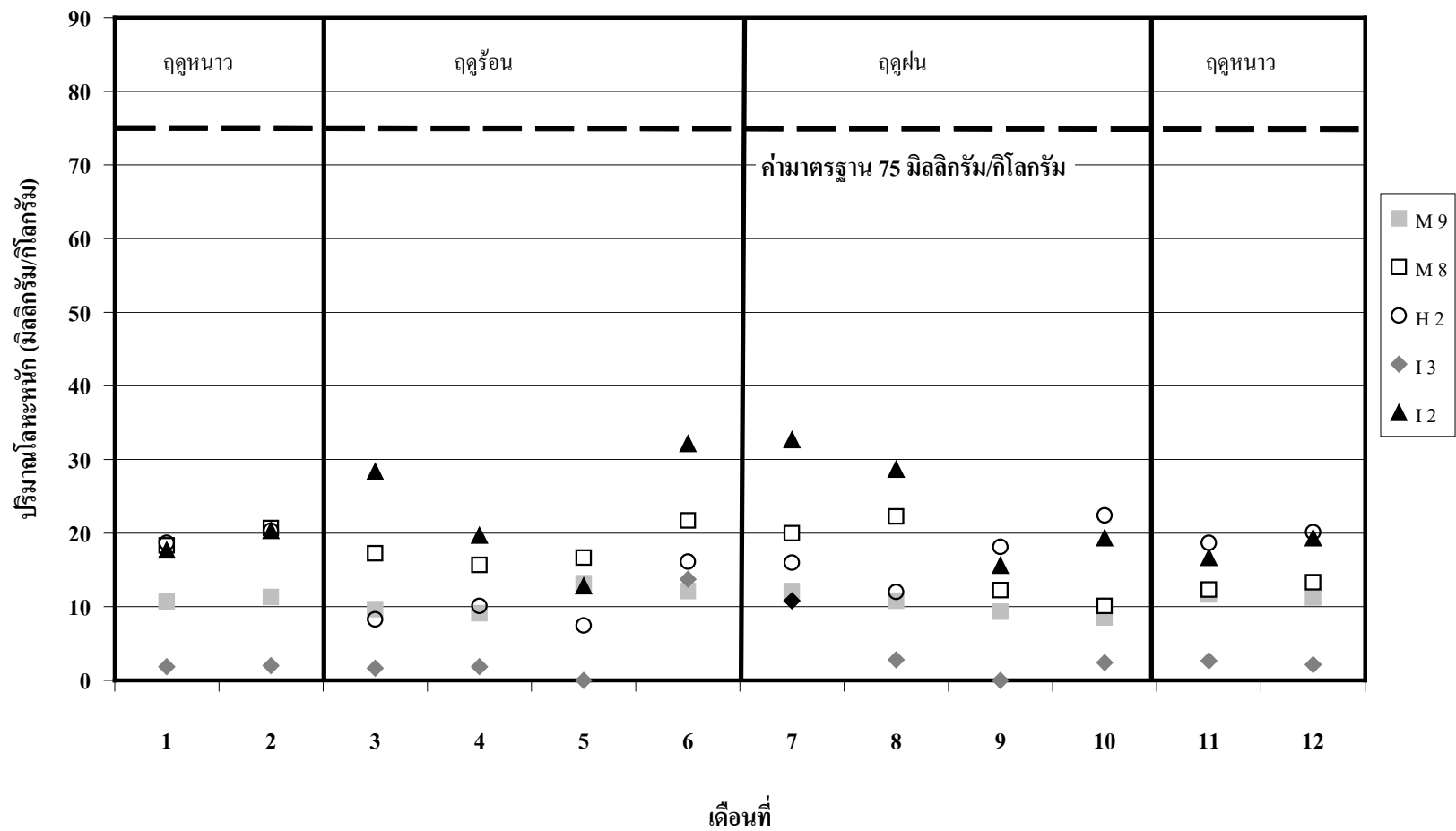
รูปที่ 41 ปริมาณสิ่งกะสีของตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียบางแห่งที่จัดเก็บในรอบ 12 เดือน



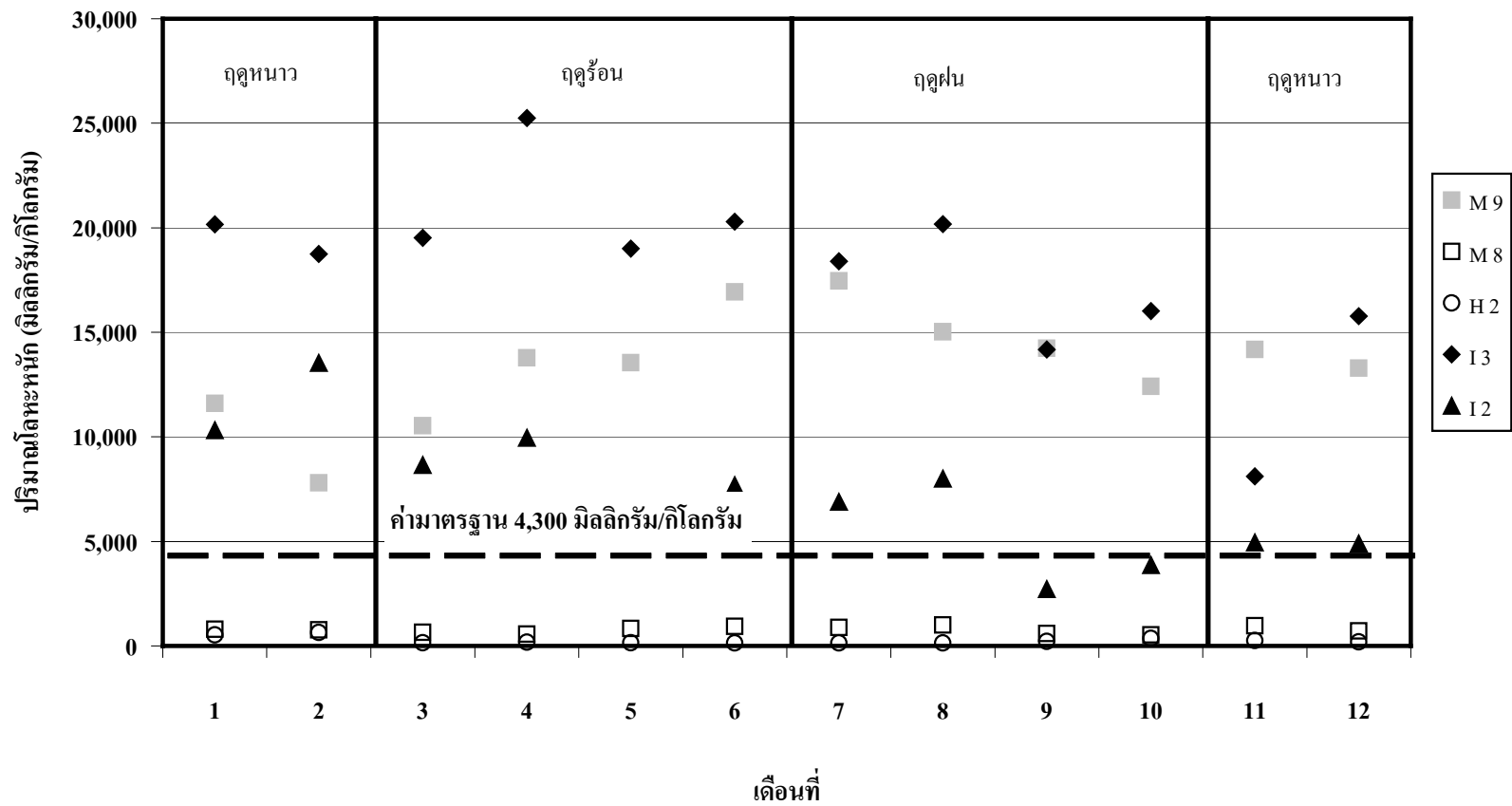
รูปที่ 40 ปริมาณตะกั่วของตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียบางแห่งที่จัดเก็บในรอบ 12 เดือน



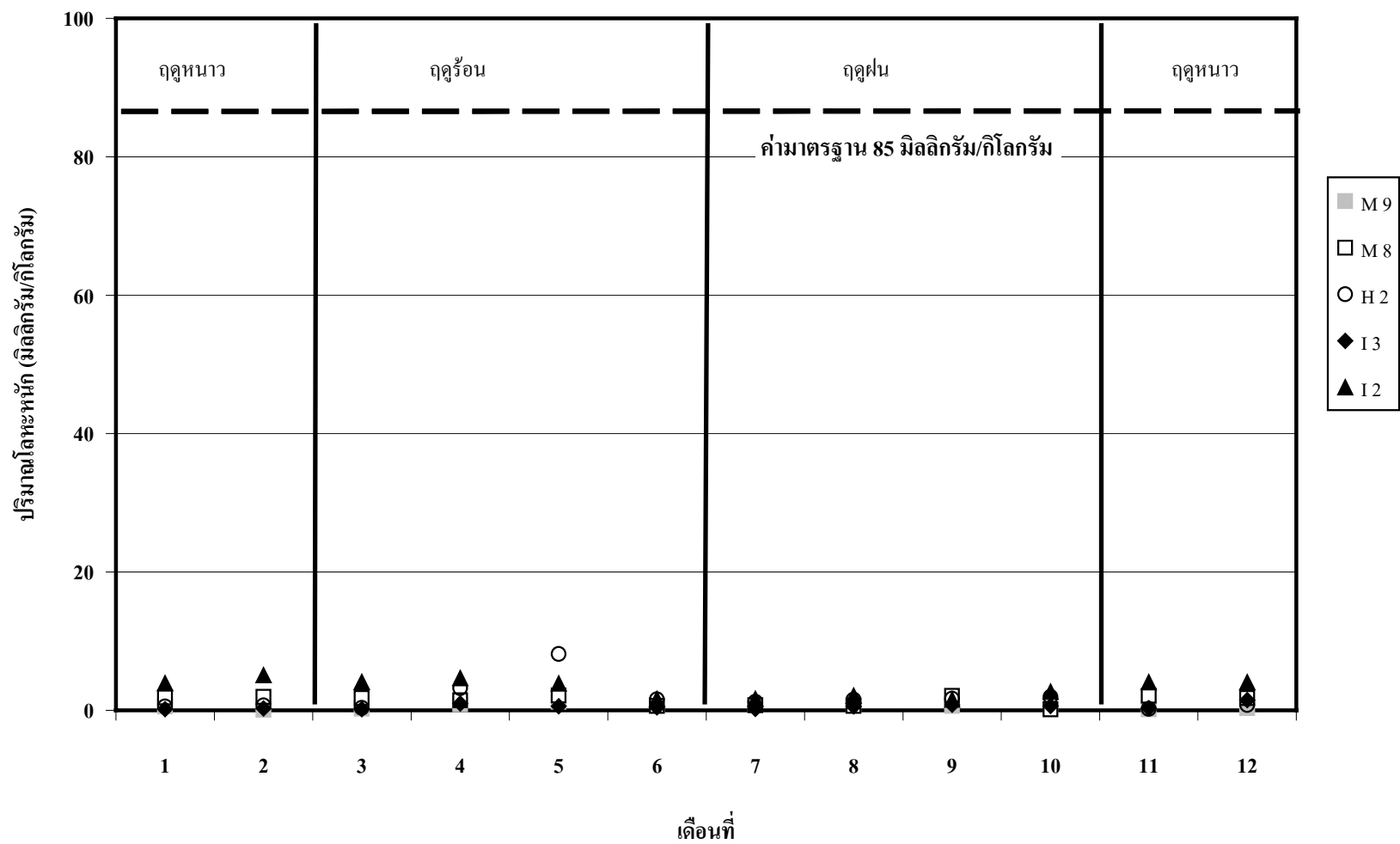
รูปที่ 39 ปริมาณนิกเกิลของตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียบางแห่งที่จัดเก็บในรอบ 12 เดือน



รูปที่ 38 ปริมาณ โมลิบดีนัมของตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียบางแห่งที่จัดเก็บในรอบ 12 เดือน



รูปที่ 37 ปริมาณทองแดงของตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียบางแห่งที่จัดเก็บในรอบ 12 เดือน



รูปที่ 36 ปริมาณแคดเมียมของตัวอย่างกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียบางแห่งที่จัดเก็บในรอบ 12 เดือน

ภาคผนวก ง.

คู่มือกระบวนการไฟโรไลซิส

บทที่ 1

ทฤษฎีเบื้องต้นของกระบวนการไพโรไลซิส

เพื่อให้สามารถเข้าใจถึงกระบวนการไพโรไลซิสจากตะกอนมากขึ้นนั้น จำเป็นจะต้องทำความเข้าใจถึงภาพรวมของกระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไปเสียก่อน ดังที่แสดงไว้ในหัวข้อที่ 1.1

1.1 นิยามของกระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการสลายตัววัสดุโดยใช้ความร้อนซึ่งเกิดขึ้นในระบบที่ปราศจากอากาศ (หรือออกซิเจน) กระบวนการนี้อาจแบ่งได้เป็น 3 กระบวนการย่อยขึ้นกับอุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ เป็นปัจจัยสำคัญ กล่าวคือ ถ้าเป็นกระบวนการซึ่งใช้อุณหภูมิปานกลาง (ประมาณ 500 องศาเซลเซียส) เวลาที่ไอซึ่งระเหยจากวัตถุดิบอยู่ในระบบสั้น (ถึงสั้นมากๆ) เรียกว่า ‘กระบวนการไพโรไลซิสเร็ว (Fast pyrolysis)’ ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันชีวภาพในปริมาณมาก ถ้าเป็นกระบวนการซึ่งใช้อุณหภูมิต่ำลง และให้เวลาที่ไออยู่ในระบบนานขึ้นมากกว่ากระบวนการไพโรไลซิสเร็ว ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้ก็จะเป็น ถ่านชาร์ (Charcoal) ในปริมาณมากจึง เรียกกระบวนการนี้ว่า ‘กระบวนการไพโรไลซิสช้า (Slow Pyrolysis)’ ซึ่งบางครั้งเรียกว่า ‘กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)’ ในขณะที่กระบวนการสุดท้ายเป็นกระบวนการที่ใช้อุณหภูมิภายในระบบสูงมาก โดยที่เวลาที่ไออยู่ในระบบนาน ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์จำพวกแก๊สมากกว่าทั้งสองกระบวนการข้างต้น และเรียกว่า ‘กระบวนการแก๊สฟิเคชัน (Gasification)’ ซึ่งสภาวะ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากแต่ละกระบวนการถูกสรุปอยู่ในตารางที่ 1.1

กระบวนการไพโรไลซิสเร็วนั้นโดยทั่วไปแล้วมักจะเกิดขึ้นในช่วงเวลาไม่กี่วินาที ซึ่งลักษณะที่สำคัญของกระบวนการไพโรไลซิสเร็วเน้นการผลิตน้ำมันชีวภาพประกอบด้วย

- มีอัตราการให้ความร้อน และอัตราการถ่ายโอนความร้อนสูงมากที่บริเวณพื้นผิวระหว่างวัฏภาคที่เกิดปฏิกิริยา
- มีการควบคุมอุณหภูมิของปฏิกิริยาไพโรไลซิสอย่างระมัดระวังให้อยู่ที่ประมาณ 500 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของวัฏภาคไออยู่ในช่วง 400-450 องศาเซลเซียส
- ระยะเวลาที่ไอซึ่งระเหยออกมาจากวัตถุดิบอยู่ในระบบสั้นมาก และโดยทั่วไปแล้วไม่ควรจะเกิน 2 วินาที

- มีการทำให้ไอน้ำเย็นตัวลงอย่างรวดเร็วเพื่อให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันชีวภาพ ซึ่งถ้ามีการควบคุมสภาวะต่างๆ ให้ดีแล้วจะได้ปริมาณน้ำมันชีวภาพถึงประมาณ 75% โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 1 สรุปลักษณะกระบวนการไพโรไลซิสที่สำคัญโดยใช้วัตถุดิบจำพวกไม้

กระบวนการ	สภาวะของระบบ	ผลิตภัณฑ์ที่ได้ (%น้ำหนักสารป้อน)		
		น้ำมัน ชีว ภาพ	ถ่าน ชาร์	แก๊ส
ไพโรไลซิสเร็ว	อุณหภูมิปานกลาง (ประมาณ 400-500°C), เวลาที่ไอซึ่งระเหยจากวัตถุดิบอยู่ในระบบสั้น (น้อยกว่า 2 วินาที)	75	12	13
คาร์บอไนเซชัน	อุณหภูมิต่ำกว่าไพโรไลซิสเร็ว, แต่เวลาที่ไอออยู่ในระบบนานขึ้นกว่า	30	35	35
แกสซิฟิเคชัน	อุณหภูมิสูงกว่าไพโรไลซิสเร็ว, และเวลาที่ไอออยู่ในระบบนานกว่าคาร์บอไนเซชัน	5	10	85

1.2 กลไกของกระบวนการไพโรไลซิสโดยทั่วไป

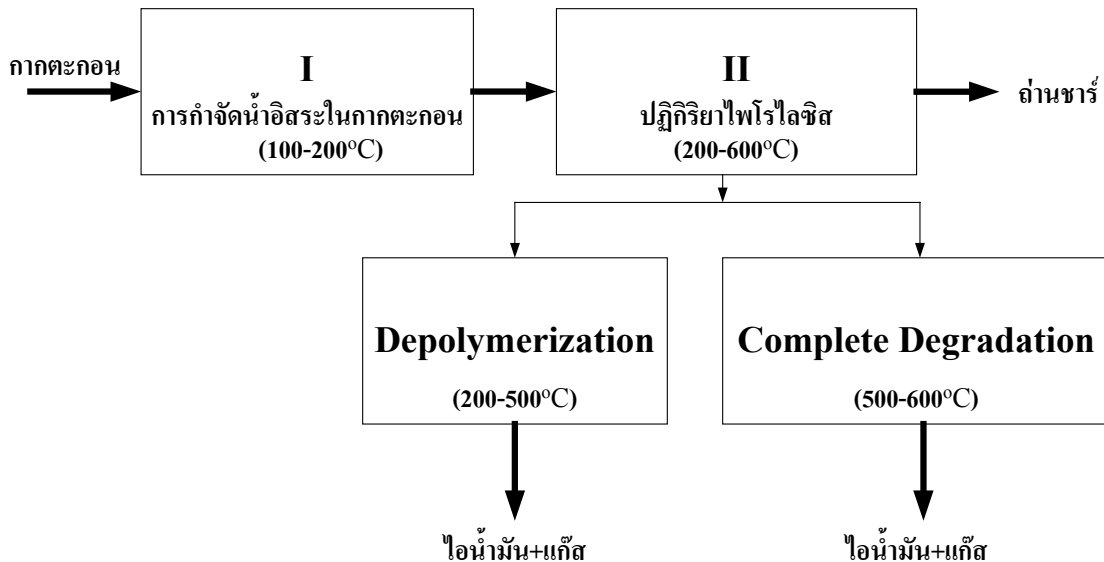
แม้ว่ากลไกของปฏิกิริยาไพโรไลซิสค่อนข้างจะซับซ้อนขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง แต่ในภาพรวมแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วงที่สำคัญ คือ

- **ช่วงก่อนไพโรไลซิส (Pre-Pyrolysis):** ช่วงนี้เกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 120-200 องศาเซลเซียส ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบจะเกิดการจัดเรียงตัวขึ้นมาใหม่ กล่าวคือส่วนที่เป็นน้ำอิสระ (Free water) จะระเหยออกมา และเกิดการทำลายพันธะเคมีในโมเลกุลของวัตถุดิบบางส่วน รวมทั้งเริ่มมีอนุมูลอิสระ (Free radical) ขึ้น นอกจากนี้แล้วหมู่ฟังก์ชันคาร์บอนิล (Carbonyl group) หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (Carboxyl group) และหมู่ไฮโดรเปอร์ออกไซด์ (Hydroperoxide group) จะเริ่มหลุดออกจากโมเลกุล แล้วทำปฏิกิริยาได้น้ำ

(H₂O) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ออกมาจากเนื้อวัตถุดิบบางส่วน และการระเหยของน้ำอิสระ CO₂ และ CO นี้ทำให้น้ำหนักของวัตถุดิบลดลงเล็กน้อย (ประมาณ 5-10% ของน้ำหนักวัตถุดิบทั้งหมด)

- **ช่วงการสลายตัว(Decomposition):** เป็นขั้นตอนหลักของกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยามากที่สุด และเกิดผลิตภัณฑ์มากที่สุด โดยทั่วไปแล้วพบว่า น้ำหนักของวัตถุดิบกว่า 85% ของน้ำหนักทั้งหมดจะสูญหายไปในช่วงนี้ ซึ่งในช่วงการสลายตัวนี้จะเกิดการแตกตัวของสายโซ่โมเลกุลที่มีขนาดยาว ณ ตำแหน่งพันธะของ C-O, C-S และ C-C ออกเป็นโมเลกุลที่มีสายโซ่ที่สั้นลง หรือมีขนาดเล็กลง ได้สารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยา (Intermediate) เป็นจำนวนมาก ซึ่งสารผลิตภัณฑ์ระหว่างปฏิกิริยาเหล่านี้ก็จะตั้งโมเลกุลของไฮโดรเจนจากสารประกอบอื่นมา และเกิดปฏิกิริยาที่ต่อเนื่องไปเรื่อยๆ บางครั้งเรียกปฏิกิริยานี้ว่า ‘ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (Depolymerization)’

โดยลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิสนี้สามารถสรุปได้ดังแสดงในรูปที่ 42



รูปที่ 42 ลักษณะกลไกของกระบวนการไพโรไลซิส

ปกติแล้วไอน้ำมันที่ได้จากช่วงการสลายตัวเมื่อถูกนำไปควบแน่นก็จะได้เป็นน้ำมันชีวภาพซึ่งมีคุณค่าความร้อนประมาณ 16-19 เมกกะจูลต่อกิโลกรัม (ประมาณ 40% ของคุณค่าความร้อนน้ำมันเตา) ขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบ และปริมาณของน้ำที่มีอยู่ในน้ำมันชีวภาพเอง (ซึ่งไม่เกิน 25% โดยน้ำหนักของน้ำมัน)

1.3 เครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

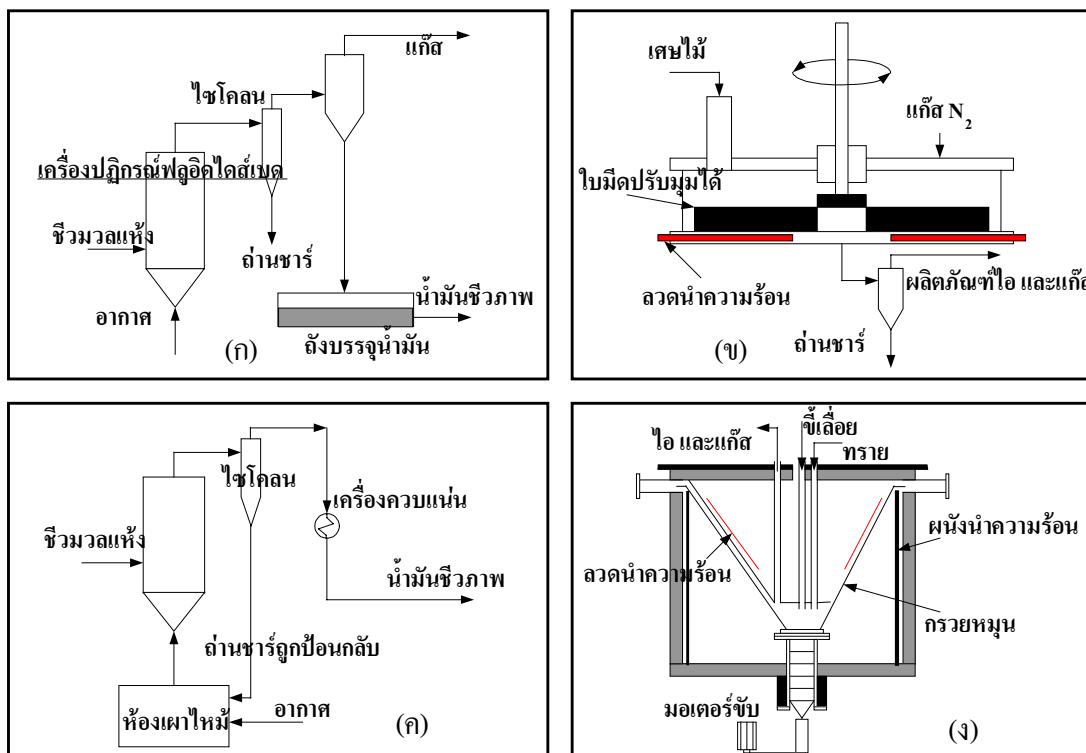
เครื่องปฏิกรณ์เป็นส่วนที่สำคัญมากอย่างหนึ่งในการแปรรูปกากตะกอน (หรือของเสียอินทรีย์) ไปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เนื่องจากว่าเครื่องปฏิกรณ์แต่ละชนิดนั้นดำเนินการโดยใช้สภาวะที่จำเพาะเจาะจง ลักษณะสภาวะที่แตกต่างกันก็จะให้ผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ ในเชิงคุณภาพและปริมาณที่แตกต่างกันด้วย

โดยทั่วไปแล้วเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสมีอยู่หลากหลายชนิด ซึ่งในที่นี้จะยกตัวอย่างชุดเครื่องปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่พัฒนาในระดับนำร่อง หรือใช้ในระดับอุตสาหกรรมปัจจุบันซึ่งโดยภาพรวมแล้วมีอยู่ประมาณ 6 ชนิดซึ่งได้แก่ (ก) ชนิดฟลูอิดไดส์เบด (ข) ชนิด Ablative (ค) ชนิดฟลูอิดไดส์เบดแบบป้อนเวียน (CFB) และ (ง) ชนิดกรวยหมุน ซึ่งแต่ละแบบก็มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1.2

ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไดส์เบดนั้น โดยทั่วไปแล้วมักจะใช้แก๊สเฉื่อยป้อนเข้าทางด้านล่างของเครื่องปฏิกรณ์เพื่อสร้างสภาวะฟลูอิดไดส์ให้กับเบด (ซึ่งเบดโดยมากแล้วเป็นทราย) เมื่อให้ความร้อนกับเบด และป้อนตัวอย่างวัตถุดิบมาในระบบ ความร้อนก็จะถูกส่งผ่านไปยังวัตถุดิบ พร้อมกับเกิดกระบวนการไพโรไลซิส ส่วนที่เป็นไอน้ำ แก๊ส และถ่านชาร์เบาจะลอยออกมาทางด้านบนของเครื่อง จากนั้นจึงเข้าสู่เครื่องไซโคลนสำหรับแยกผลิตภัณฑ์วัฏภาคไอ (และแก๊ส) กับวัฏภาคของแข็ง (คือ ถ่านชาร์) ออกจากกัน โดยถ่านชาร์จะตกมาด้านล่างของเครื่อง ในขณะที่ วัฏภาคไอจะลอยออกทางด้านบน และเข้าสู่เครื่องควบแน่นได้น้ำมันชีวภาพออกมาตามลำดับ

ชนิดที่สองเป็นชนิดที่เรียกว่า Ablative (รูป 1.2 ข) ซึ่งเป็นเครื่องที่อาศัยหลักการรีดวัตถุดิบพร้อมกับให้ความร้อน กล่าวคือ เมื่อป้อนวัตถุดิบลงมา วัตถุดิบจะถูกใบมีดกรีดบนพื้นผิวร้อน ทำให้ส่วนที่ได้รับความร้อนเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เป็นไอน้ำ และแก๊สจะลอยออกมาเข้าสู่เครื่องไซโคลนเพื่อแยกไอน้ำกับถ่านชาร์ออกจากกัน จากนั้นไอน้ำมันจะเข้าสู่หน่วยควบแน่นต่อไป

ชนิดที่สาม (รูป 1.2 ค) เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคส์เบคชนิดป้อนเวียน ซึ่งมีหลักการทำงาน คล้ายคลึงกับเครื่องปฏิกรณ์แบบฟลูอิดไคส์เบคในชนิดที่หนึ่งซึ่งได้กล่าวไว้แล้ว จุดที่ต่างคือ มีการป้อน ถ่านชาร์ และทรายเบาซึ่งได้จากเครื่องไซโคลนกลับไปยังห้องเผาไหม้ซึ่งอยู่ด้านล่างสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง ในห้องเผาไหม้นั้นเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้ว แก๊สที่ได้จากการเผาไหม้ (Flue gas) ซึ่งมีความร้อนสูง จะทำหน้าที่ให้เบดเกิดสภาวะฟลูอิดไคส์



รูปที่ 43 แสดงตัวอย่างเครื่องปฏิกรณ์ไฟโรไลซิสแบบต่างๆ (ก) แบบฟลูอิดไคส์เบค (ข) แบบ Ablative (ค) แบบฟลูอิดไคส์เบคแบบป้อนเวียน และ (ง) แบบกรวยหมุน ตามลำดับ

ชนิดที่สี่ (รูป 1.2 ง) เป็นเตาชนิดใหม่ โดยเครื่องปฏิกรณ์นั้นมีลักษณะเป็นรูปกรวย และหมุนได้ด้วยการใช้มอเตอร์ควบคุมรอบการหมุน พื้นผิวด้านในของกรวยติดตั้งลวดนำความร้อนไว้ เมื่อกรวยหมุนพร้อมกับป้อนวัตถุดิบจะกลิ้งไปรอบกรวยโดยอาศัยหลักของแรงหนีศูนย์กลาง และเมื่อได้รับความร้อน ผลิตภัณฑ์ไอ (และแก๊ส) จะลอยออกมาทางด้านบนของเครื่อง ในขณะที่ส่วนที่เป็นถ่านชาร์ซึ่งมีน้ำหนักมากจะตกมาทางด้านล่างของกรวย

หลังจากที่ได้เห็นภาพรวมของกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว ในบทถัดๆ ไปจะได้นำเสนอถึงขั้นตอนในการนำกากตะกอนเข้าสู่กระบวนการไพโรไลซิสอย่างรอบด้าน

บทที่ 2

การคัดเลือกกากตะกอนสำหรับกระบวนการไพโรไลซิส

กากตะกอนเป็นของเสีย (Waste) อย่างหนึ่งที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียทั่วไป มีลักษณะเป็นซากของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลายสารมลพิษที่มีในน้ำเสีย ดังนั้นสิ่งที่ประกอบประกอบของกากตะกอนจึงมักเป็นสารอินทรีย์ โลหะหนัก หรือเชื้อโรค ฯลฯ ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดด้วยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง เพื่อลดผลกระทบเนื่องจากกากตะกอนเหล่านี้ที่จะมีต่อสิ่งแวดล้อม และส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางตรง และทางอ้อม

เนื่องจากกากตะกอนระบบบำบัดน้ำเสียมีองค์ประกอบที่เป็นอินทรีย์สาร (Organics compounds) ดังนั้นจึงสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงในเชิงโครงสร้างภายใต้สภาวะที่อุณหภูมิสูง และปราศจากออกซิเจนได้ (คือ สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงในกระบวนการไพโรไลซิส) ผลิตภัณฑ์ที่เป็นสารประกอบอินทรีย์ อาทิเช่น แก๊สไฮโดรคาร์บอนที่มีคุณค่าความร้อนปานกลาง หรือน้ำมันชีวภาพ (Bio-oil) อย่างไรก็ตามเนื่องจากน้ำเสียที่ถูกป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียนั้นมีลักษณะในเชิงคุณภาพต่างกัน ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าองค์ประกอบของกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียแต่ละแห่งนั้นต่างกันด้วย

ด้วยเหตุนี้การคัดเลือกกากตะกอนจึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงคุณภาพของกากตะกอนด้วย กล่าวคือ กากตะกอนจากบางแห่งมีคุณภาพต่ำ (มีปริมาณเถ้าเป็นองค์ประกอบค่อนข้างมาก) ทำให้ต้องใช้พลังงานในกระบวนการมาก เป็นการเพิ่มต้นทุนให้กับระบบ ดังนั้นสำหรับกากตะกอนเหล่านี้อาจจะใช้วิธีการอื่นในการกำจัดน่าจะเหมาะสมกว่า และในหัวข้อถัดจากนี้จึงเป็นการแนะนำ และนำเสนอถึงขั้นตอนในการพิจารณาคุณภาพของกากตะกอน

2.1 การศึกษาองค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณ (Proximate Analysis)

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกากตะกอนแบบประมาณ (Proximate Analysis of Sludge) นั้น เป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักในเชิงคุณสมบัติของกลุ่มสารประกอบซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งออกได้เป็น ปริมาณสารระเหย (Volatile Matter Content) ปริมาณเถ้า (Ash Content) ปริมาณความชื้น (Moisture Content) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) ซึ่งข้อมูลของแต่ละชนิดมีประโยชน์ดังต่อไปนี้

- **สารระเหย:** ปริมาณสารระเหยเป็นดัชนีชี้ให้เห็นถึงความเหมาะสมของกากตะกอนตัวอย่าง ในฐานะที่เป็นวัตถุดิบของกระบวนการไพโรไลซิสว่าจะสามารถได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (หรือ น้ำมันชีวภาพ) ได้มากหรือน้อยเพียงใด ด้วยเหตุนี้การหาปริมาณสารระเหยในกากตะกอนจึงมีความจำเป็นอย่างมาก
- **คาร์บอนคงตัว:** คาร์บอนคงตัวคือ คาร์บอนองค์ประกอบซึ่งไม่ได้อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ ดังนั้นโดยทั่วไปแล้วเมื่อผ่านกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งไม่มีการออกซิไดส์ คาร์บอนกลุ่มนี้จะรวมอยู่ในถ่านชาร์ (Char) ด้วยเหตุนี้จึงสามารถใช้เป็นดัชนีอย่างหนึ่งในการชี้ถึงปริมาณถ่านชาร์ที่ได้
- **เถ้า:** เนื่องจากในกากตะกอนมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอยู่ โดยมีหลักการคิดว่า ถ้านำสารประกอบเหล่านี้ไปเผาไหม้อย่างสมบูรณ์จะได้ส่วนที่เป็นเถ้าซึ่งเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะเหล่านี้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสนั้นใช้อุณหภูมิไม่สูงมากเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ โลหะหนักเหล่านี้จึงค่อนข้างเสถียร และรวมอยู่ในถ่านชาร์ได้ ด้วยเหตุนี้ปริมาณเถ้าจึงอาจจะใช้เป็นอีกดัชนีในการชี้ถึงระดับปริมาณของถ่านชาร์ที่ได้ด้วย นอกจากนี้แล้วเนื่องจากปริมาณเถ้าเป็นส่วนที่ไม่มีคุณค่าในเชิงความร้อน ดังนั้นถ้ากากตะกอนมีปริมาณเถ้ามากก็ย่อมจะมีคุณค่าในเชิงความร้อนต่ำด้วย
- **ความชื้น:** ในที่นี้หมายถึง น้ำอิสระ (Free Water) ที่มีอยู่ในเนื้อกากตะกอน ดังนั้นถ้ามีปริมาณความชื้นมากก็จะทำให้น้ำที่ระเหยออกไปนี้ไปผสมกับน้ำมันชีวภาพมาก ข้อดีคือช่วยลดความหนืดของน้ำมันชีวภาพ แต่ข้อด้อยคือ จะทำให้คุณค่าความร้อน และคุณลักษณะความเป็นน้ำมันจะลดลงด้วย นอกจากนี้แล้วถ้ากากตะกอนมีความชื้นมากก็ย่อมจะต้องใช้พลังงานที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ซึ่งก็ทำให้ต้นทุนในการดำเนินกระบวนการสูงขึ้นด้วย
- **คุณค่าความร้อน (Heating Value):** แม้ว่าการวิเคราะห์หาคุณค่าความร้อนจะไม่ได้อยู่ในหมวดการวิเคราะห์แบบประมาณตามวิธีการมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing Materials) 5865 03 a แต่อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (หรือแบบวิเคราะห์ธาตุ) สามารถนำไปแทนค่าในสหสัมพันธ์ (Correlation) สำหรับใช้ประเมินคุณค่าความร้อนของกากตะกอนได้

2.1.1 ขั้นตอนในการหาค่าประกอบแบบประมาณของกากตะกอนตามวิธีมาตรฐาน ASTM

วิธีมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) เป็นวิธีการวิเคราะห์สมบัติของวัสดุต่างๆ ที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป ซึ่งสำหรับการหาค่าประกอบแบบประมาณของกากตะกอนนั้นดำเนินการตามวิธีการมาตรฐาน ASTM D 3172-3175 และ ASTM D 5865 ซึ่งมีดังต่อไปนี้

การหาความชื้นในกากตะกอน

- . เตรียมกากตะกอนที่ผ่านการบด และคัดขนาดแล้วจำนวน 1.0 กรัม (A)
- . ใส่กากตะกอนตัวอย่างลงในถาดสังกะสีมาตรฐานที่ทราบน้ำหนักแล้ว
- . นำถาดสังกะสีนี้ไปใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิประมาณ 105-110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- . จากนั้นจึงนำมาใส่ในอุปกรณ์กันความชื้น และทิ้งไว้ให้เย็น
- . ชั่งน้ำหนักกากตะกอนตัวอย่างหลังจากที่ผ่านการอบแล้ว (B)
- . คำนวณหาความชื้นตามสูตร

$$\% moisture = \left[\frac{(A - B)}{A} \right] \times 100$$

การหาปริมาณเถ้าในกากตะกอน

- . เตรียมกากตะกอนตัวอย่างที่บด และคัดขนาดแล้วจำนวน 1.0 กรัม (A)
- . ใส่ตัวอย่างลงในแคปซูลกระเบื้อง ซึ่งทราบน้ำหนักพร้อมฝาแล้ว (B) แล้วปิดฝา
- . นำแคปซูลที่ใส่ตัวอย่างกากตะกอนพร้อมปิดฝาแล้วใส่ในเตาเผา และตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 450-500 องศาเซลเซียส ภายในเวลาประมาณ 1 ชั่วโมง
- . จากนั้นตั้งอัตราการเผาที่ทำให้อุณหภูมิภายในเตาเผาเป็น 700-750 องศาเซลเซียส เมื่อสิ้นสุดชั่วโมงที่สอง
- . รักษาอุณหภูมิของเตาเผาที่ 700-750 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- . นำแคปซูลออกจากเตาเผา เปิดฝา ทิ้งให้เย็นภายในอุปกรณ์กันความชื้น
- . ชั่งน้ำหนักแคปซูลพร้อมฝา และเถ้าที่เหลือภายในแคปซูลทั้งหมด (C)
- . คำนวณตามสูตร

$$\% ash = \left[\frac{(C - B)}{A} \right] \times 100$$

การหาปริมาณสารระเหย

- . นำตัวอย่างกากตะกอนที่บด และค้ชขนาดแล้วจำนวน 1.0 กรัมใส่ในครุชเบิล (Platinum crucible) ปิดฝา และชั่งน้ำหนักทั้งหมด (A)
- . นำครุชเบิล ใส่ในเตาเผาแบบท่อที่ตั้งาแหน่งกึ่งกลางเตา (อุณหภูมิที่กึ่งกลางเตาอยู่ที่ 950 องศาเซลเซียส)
- . ในช่วงนี้จะสังเกตเห็นเปลวไฟลุกขึ้นอย่างรวดเร็วเป็นเวลา 2-3 นาที
- . เมื่อเปลวไฟดับลงให้ยกครุชเบิลไว้ที่ปากเตา แล้วหย่อนครุชเบิลไว้ที่กลางเตาไว้ที่กลางอีกครั้งหนึ่ง
- . ทำซ้ำจนกระทั่งเวลาที่ใช้โดยรวมเป็น 7 นาที นำครุชเบิลออกจากเตา และทิ้งไว้ให้เย็น
- . ชั่งน้ำหนักตัวอย่างที่อยู่ในครุชเบิล (B)
- . คำนวณน้ำหนักที่หายไป (C) และสารระเหยได้ดังสูตร

$$\% C = \left[\frac{(A - B)}{A} \right] \times 100 \quad \text{และ}$$

$$\% Volatile = C - D$$

เมื่อ D คือ % ความชื้น

การหาคาร์บอนคงตัว

การคำนวณหาปริมาณคาร์บอนคงตัวนั้นสามารถทำได้โดยใช้สูตร

$$\% Fixed carbon = 100 - \% moisture - \% Ash - \% Volatile$$

ซึ่งข้อมูลองค์ประกอบแบบประมาณที่ได้สามารถนำไปคำนวณหา คุณค่าความร้อนของกากตะกอนได้ตามสหสัมพันธ์

$$HV^A = 276.04V + 289.70F - 51.45M + 2847.53$$

ซึ่ง

 HV^A คือ คุณค่าความร้อน (กิโลจูลต่อกิโลกรัม) V คือ ปริมาณสารระเหย F คือ ปริมาณคาร์บอนคงตัว M คือ ปริมาณความชื้นในกากตะกอนที่วัดได้จากวิธี ASTM

ข้อมูลที่ได้คุณค่าความร้อนที่ได้สามารถจัดแบ่งกากตะกอนออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีคุณภาพสูง กลุ่มที่มีคุณภาพปานกลาง และกลุ่มที่มีคุณภาพต่ำ ได้ตามตารางที่ 2.1 ซึ่งข้อมูลในตารางนี้ได้จากการทดสอบจากกากตะกอนจำนวน 20 แห่งทั่วประเทศจำนวนกว่า 200 ตัวอย่าง

ตารางที่ 2 องค์ประกอบแบบประมาณของกากตะกอน และการจัดแบ่งคุณภาพ

	กากตะกอน		
	คุณภาพต่ำ	คุณภาพปานกลาง	คุณภาพสูง
คุณสมบัติ			
- ความชื้น	7.84 %	5.32 %	5.82 %
- สารระเหย	24.82 %	40.10 %	54.70 %
- เถ้า	65.40 %	50.47 %	32.78 %
- คาร์บอนคงตัว	1.94%	4.11%	6.70 %
- คุณค่าความร้อน	3.39MJ/kg	9.69 MJ/kg	15.0 MJ/kg

ตัวอย่าง

การคำนวณหาคุณค่าความร้อนของกากตะกอนเมื่อทราบข้อมูลองค์ประกอบโดยประมาณ

สมมติให้กากตะกอนตัวอย่างเมื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณพบว่ามี ปริมาณสารระเหย 20% ความชื้น 5% เถ้า 70% และคาร์บอนคงตัว 5%

จากสหสัมพันธ์ระหว่างคุณค่าความร้อน และองค์ประกอบกากตะกอน

$$HV^A = 276.04V + 289.70F - 51.45M + 2847.53$$

แทนค่าต่างๆลงไปจะได้ว่า

$$\begin{aligned} HV &= 276.04(0.2) + 289.7(0.05) - 51.45(0.05) + 2847.53 \\ &= 2914.65 \text{ กิโลจูลต่อกิโลกรัมกากตะกอน} \\ &= 2.91 \text{ เมกกะจูลต่อกิโลกรัม} \end{aligned}$$

ซึ่งจะเห็นได้ว่ากากตะกอนนี้เป็นกากตะกอนที่มีคุณภาพต่ำไม่เหมาะกับการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการไฟโรไลซิส

บทที่ 3

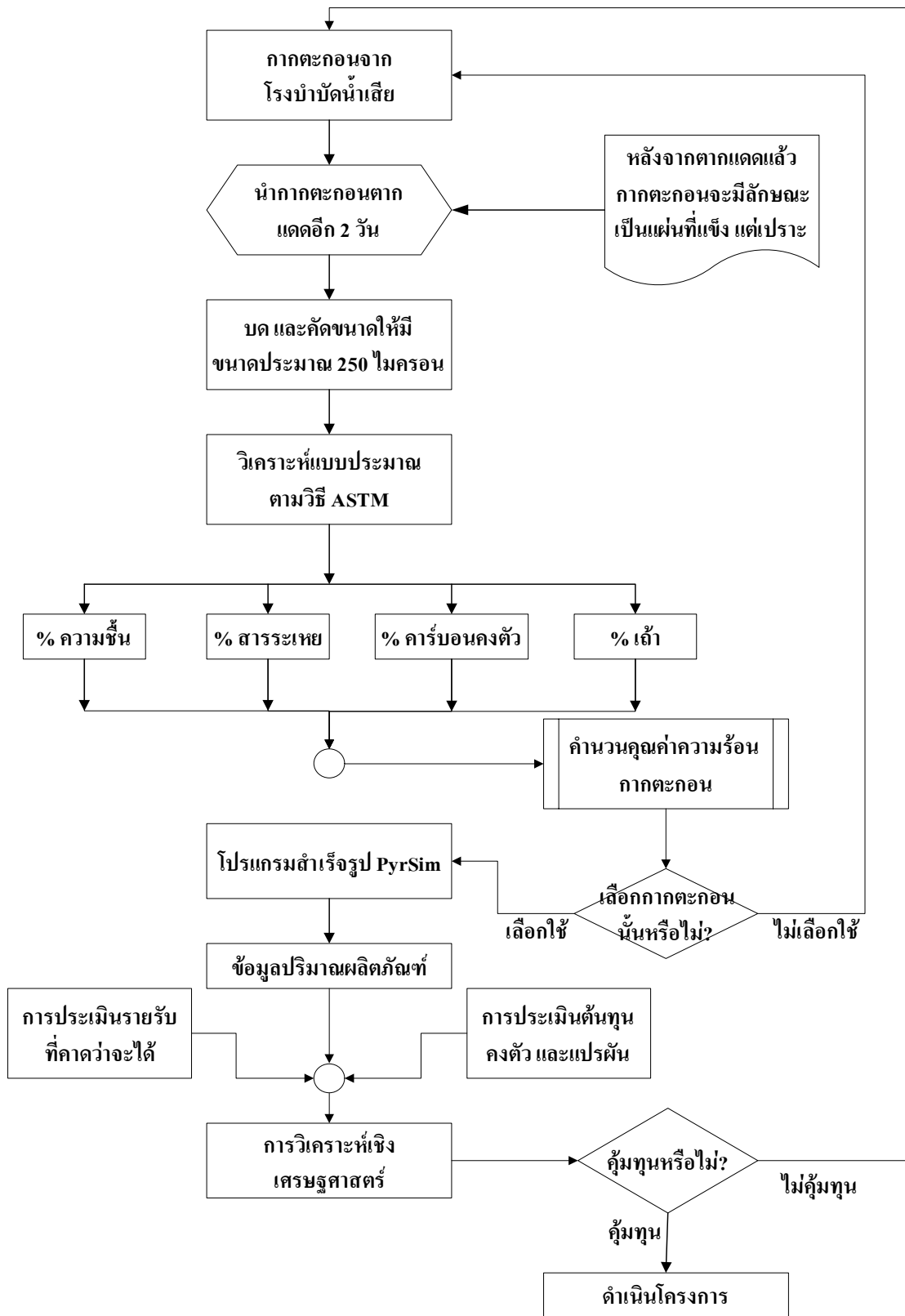
สรุป

จากที่กล่าวมา แสดงให้เห็นว่า ปัจจัยหลักในการพิจารณาโครงการแปรรูปกากตะกอนให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าเพิ่มขึ้นนั้นคือ การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ ซึ่งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการดำเนินการในขั้นตอนต่างๆ (ดูรูปที่ 5.1 ประกอบ)

ข้อมูลองค์ประกอบแบบประมาณ (ประกอบด้วย ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า ปริมาณความชื้น และปริมาณคาร์บอนคงตัว) สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาคุณค่าความร้อนของกากตะกอนเพื่อจัดคุณภาพ ทำให้ตัดสินใจเบื้องต้นได้ว่ากากตะกอนแหล่งใดสมควรใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการ ไพโรไลซิสหรือไม่

เมื่อเลือกกากตะกอนที่เหมาะสมได้แล้วสามารถนำข้อมูลองค์ประกอบแบบประมาณ และคุณค่าความร้อนที่ได้ในไปประเมินปริมาณผลิตภัณฑ์ต่างๆที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PyrSim ทำให้ได้ข้อมูลสำหรับการประเมินรายรับของโครงการได้

ดังนั้น ถ้าสามารถสุ่มเลือกตัวอย่างกากตะกอนได้อย่างถูกต้องตามหลักวิชาการจนได้ตัวแทนของกากตะกอน แล้วนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณในปริมาณเพียงเล็กน้อย (ประมาณไม่เกิน 20 กรัม) จากกากตะกอนโรงบำบัดน้ำเสียหนึ่งๆ ก็สามารถใช้ในการประเมินเบื้องต้นว่า ถ้ามีการดำเนินโครงการแปรรูปกากตะกอนด้วยกระบวนการไพโรไลซิสจะมีคุ้มค่าต่อการลงทุนไม่? เพียงไร? ซึ่งทำให้การศึกษาความเป็นไปได้ของโครงการใช้ต้นทุนต่ำ และสามารถใช่วิธีการนี้ในการประเมินความสามารถของกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสียในจำนวนมากได้



รูปที่ 44 แผนภาพคู่มือประกอบสำหรับการตัดสินใจกระบวนการไฟโรไลซิสขั้นตอนต่างๆ

ภาคผนวก จ.

คู่มือการใช้งาน

โปรแกรมสมดุลมวลสารพลังงานปฏิกิริยาไฟโรไลซิสของกากตะกอน

PyrSim

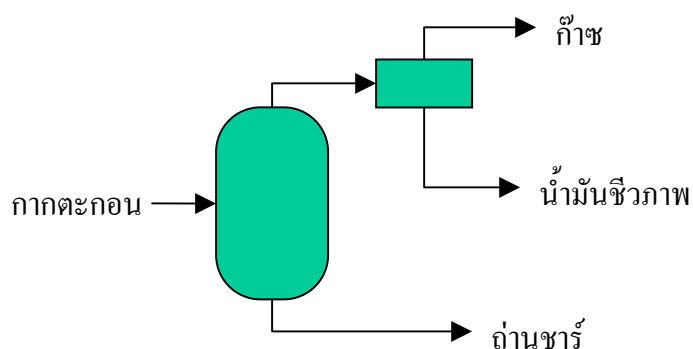
โดย โครงการการศึกษาและพัฒนารูปแบบการแปรรูปกากตะกอนให้เป็นเชื้อเพลิง

PyrSim คืออะไร?

PyrSim คือโปรแกรมใช้สำหรับคำนวณสมดุลมวลสารและพลังงานรอบปฏิกิริยาไพโรไลซิสของวัสดุประเภทกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียต่างๆ โดยที่เราป้อนข้อมูลคุณสมบัติของกากตะกอนที่จะทำไพโรไลซิสและเข้าไป โปรแกรมจะทำการคำนวณและจะแสดงผลให้เราทราบถึงปริมาณผลิตภัณฑ์ที่จะเกิดขึ้น และปริมาณพลังงานที่ต้องป้อนให้กับกระบวนการด้วย ซึ่งผู้ใช้สามารถนำไปประกอบการพิจารณาระบบไพโรไลซิสมาใช้ในเชิงปฏิบัติได้

ระบบไพโรไลซิสใน PyrSim เป็นอย่างไร?

ระบบไพโรไลซิสใน PyrSim แสดงได้ดังรูปที่ 42 โดยมีสารป้อนเป็นกากตะกอนแห้ง และเมื่อผ่านกระบวนการจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นไอระเหยออกทางด้านบน และส่วนของของแข็ง (ถ่านชาร์) เหลืออยู่ในระบบ ส่วนที่เป็นไอระเหยจะผ่านหน่วยควบแน่น และไอบางส่วนจะถูกควบแน่นกลายเป็นของเหลวเรียกว่าน้ำมันชีวภาพ (Bio oil) ส่วนพลังงานที่ป้อนจะแบ่งเป็นสองส่วน คือ พลังงานความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อป้อนเข้าสู่ปฏิกิริยาหลัก และพลังงานไฟฟ้าในส่วนงานกลเช่นการป้อนกากตะกอน หรือเครื่องควบแน่นเป็นต้น



รูปที่ 45 ระบบไพโรไลซิส

PyrSim ต้องการข้อมูลอะไรบ้าง?

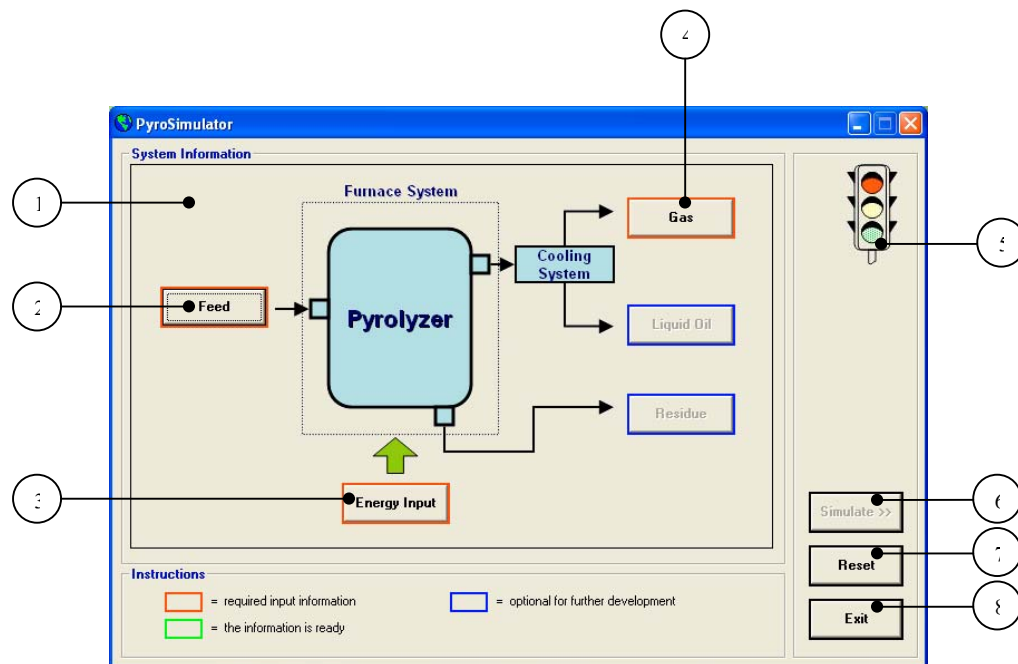
ข้อมูล PyrSim ต้องการแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลส่วนที่จำเป็นและส่วนที่เป็น option ซึ่งส่วนหลังนี้ผู้ใช้อาจเลือกให้โปรแกรมทำการคำนวณให้โดยอัตโนมัติ หรือจะป้อนค่าเองก็ได้ โดย PyrSim ได้ถูกออกแบบให้ทำการคำนวณในส่วนนี้ได้ โดยจะอ้างอิงจากฐานข้อมูลของโปรแกรมที่มีอยู่ แต่ทั้งนี้หากผู้ใช้มีข้อมูลของตัวเองจากการทดลองและต้องการป้อนข้อมูลที่ได้ทำการทดลองมาแล้วก็สามารถทำได้ ข้อมูลทั้งหมดที่ต้องป้อนมีดังต่อไปนี้

- . คุณสมบัติของกากตะกอน ซึ่งได้แก่
 - ผลวิเคราะห์แบบประมาณของกากตะกอน ได้แก่ ปริมาณร้อยละความชื้น สารระเหย คาร์บอนคงตัว และเถ้า
 - ค่าความร้อนของกากตะกอน
- . ค่าตัวแปรของกระบวนการผลิต ได้แก่
 - ค่าพลังงานป้อนของระบบ
 - อุณหภูมิในปฏิกรณ์ไพโรไลซิส
 - ประสิทธิภาพการถ่ายโอนความร้อนของระบบ (สมมติฐาน)
- . คุณสมบัติของก๊าซผลิตภัณฑ์
 - องค์ประกอบของก๊าซผลิตภัณฑ์
 - ค่าความร้อนของก๊าซผลิตภัณฑ์

การใช้โปรแกรม PyroSim

ขั้นตอนการใช้โปรแกรม

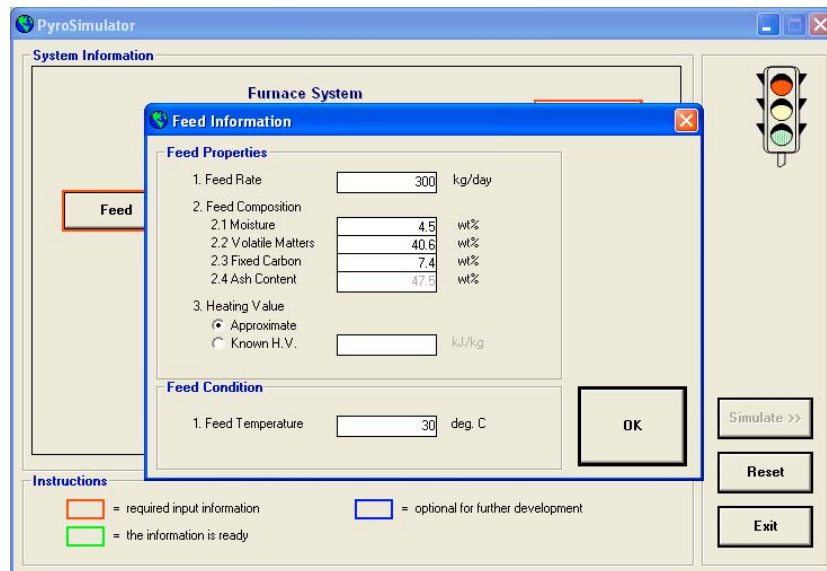
1. เมื่อเริ่มต้นโปรแกรม PyroSim จะปรากฏหน้าจอเริ่มต้นดังรูปที่ 2 โดยมีรายละเอียดส่วนประกอบต่างๆ ดังที่ได้แสดงไว้



- ① หน้าจอแสดงแผนภาพระบบไพโรไลซิส
- ② คลิกเพื่อป้อนข้อมูลของสารป้อน (รูปที่ 3)
- ③ คลิกเพื่อป้อนข้อมูลพลังงานป้อน (รูปที่ 4)
- ④ คลิกเพื่อป้อนข้อมูลก๊าซผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 5)
- ⑤ ภาพไฟจราจรแสดงสถานะระบบ
- ⑥ คลิกเพื่อทำการคำนวณและแสดงผล (รูปที่ 6)
- ⑦ คลิกเพื่อ reset ข้อมูลทั้งหมด
- ⑧ คลิกเพื่อออกจากโปรแกรม

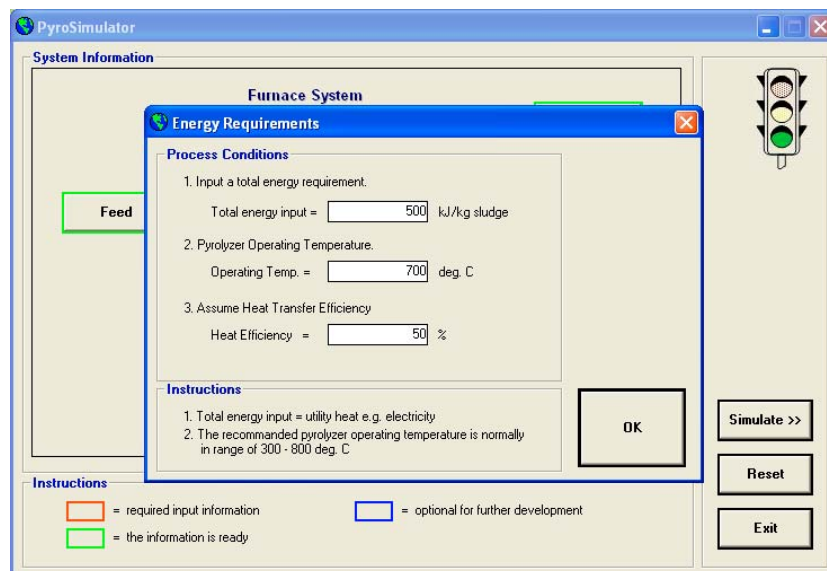
รูปที่ 46 หน้าจอ interface เริ่มต้นของ PyroSim

2. ป้อนข้อมูลเกี่ยวกับสารป้อน (รูปที่ 44) พลังงาน (รูปที่ 45) และก๊าซผลิตภัณฑ์ (รูปที่ 46) หากป้อนข้อมูลไม่ครบโปรแกรมจะไม่สามารถคำนวณผลได้ (สังเกตจากไฟจราจร)



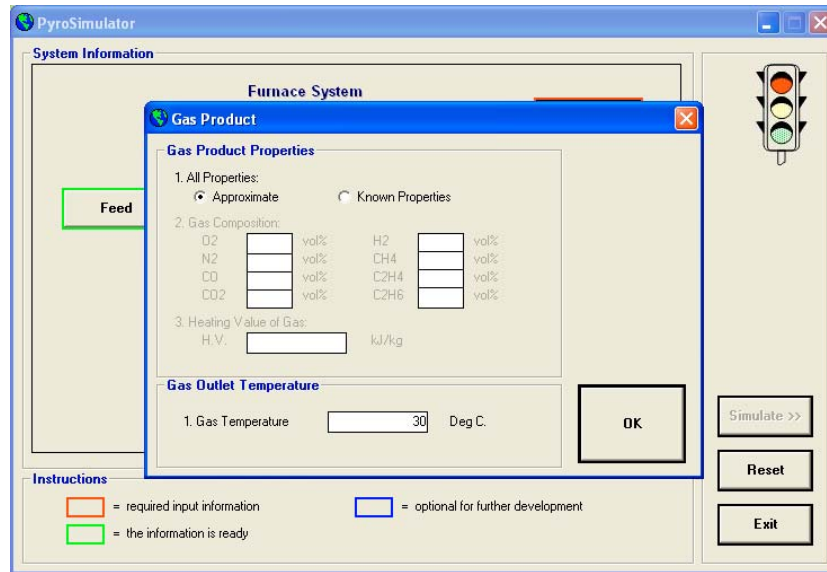
The image shows the 'PyroSimulator' window with the 'Feed Information' dialog box open. The dialog box is titled 'Feed Information' and contains two sections: 'Feed Properties' and 'Feed Condition'. In the 'Feed Properties' section, there are five input fields: '1. Feed Rate' (300 kg/day), '2.1 Moisture' (4.5 wt%), '2.2 Volatile Matters' (40.6 wt%), '2.3 Fixed Carbon' (7.4 wt%), and '2.4 Ash Content' (47.5 wt%). There are also two radio buttons for '3. Heating Value': 'Approximate' (selected) and 'Known H.V.' (empty). In the 'Feed Condition' section, there is one input field: '1. Feed Temperature' (30 deg. C). The dialog box has an 'OK' button. In the background, the 'Furnace System' window is visible, showing a traffic light icon on the right. The traffic light has three lights: red, yellow, and green. The red light is lit, indicating that the required input information is not complete.

รูปที่ 47 Dialog เพื่อป้อนข้อมูลสารป้อน



The image shows the 'PyroSimulator' window with the 'Energy Requirements' dialog box open. The dialog box is titled 'Energy Requirements' and contains two sections: 'Process Conditions' and 'Instructions'. In the 'Process Conditions' section, there are three input fields: '1. Input a total energy requirement.' (Total energy input = 500 kJ/kg sludge), '2. Pyrolyzer Operating Temperature.' (Operating Temp. = 700 deg. C), and '3. Assume Heat Transfer Efficiency' (Heat Efficiency = 50 %). The dialog box has an 'OK' button. In the background, the 'Furnace System' window is visible, showing a traffic light icon on the right. The traffic light has three lights: red, yellow, and green. The green light is lit, indicating that the required input information is complete.

รูปที่ 48 Dialog เพื่อป้อนข้อมูลพลังงานป้อน



รูปที่ 49 Dialog เพื่อป้อนข้อมูลก๊าซผลิตภัณฑ์

3. เมื่อป้อนข้อมูลครบถ้วน คลิก Simulate เพื่อทำการคำนวณผลโปรแกรมจะทำการคำนวณและแสดงผลการทำสมดุลด้านมวลสารและพลังงานดังรูปที่ 6 และหากต้องการแก้ไขข้อมูลสามารถคลิกปุ่ม Back เพื่อแก้ไขข้อมูลและทำการคำนวณใหม่ได้

STREAM PROPERTIES

	Flow Rate (kg/day)	Temp. (deg. C)	Heating Value (kJ/kg)
Feed			
Sludge	300.00	30.0	10,686.0
Product			
Gas*	32.23	30.0	20,793.2 (kJ/m3)
Liquid Oil	90.43	30.0	23,559.1
Solid Residue	177.34	N/A	N/A

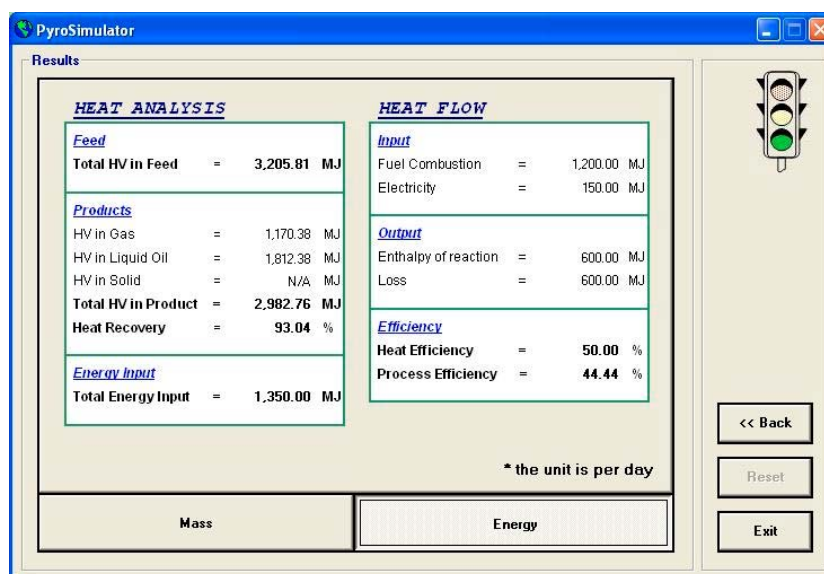
***Composition of Gas**

Gas	vol%	Gas	vol%
O ₂	1.29	H ₂	34.74
N ₂	6.41	CH ₄	13.05
CO	11.28	C ₂ H ₄	.43
CO ₂	2.05	C ₂ H ₆	1.74

Mass Energy

<< Back Reset Exit

รูปที่ 50 (ก) หน้าจอ interface แสดงผลการคำนวณสมดุลมวลสาร



รูปที่ 50 (ข) หน้าจอ interface แสดงผลการคำนวณสมดุลพลังงาน

ตัวอย่างข้อมูลป้อนเข้าโปรแกรม PyrSim

ประเภท	ประเภทย่อย	ค่าป้อน
Feed	Feed rate	-
	Composition	
	Moisture	2-15 %
	Volatile Matters	20-70 %
	Fixed Carbon	2-15 %
	Heating Value	2,000 - 18,000 kJ/kg
	Feed Temperature	-
Energy Requirement	Total energy input	400 - 600 kJ/kg SS
	Operating temperature	300 - 800 °C
	Heat efficient	40-70 %
Gas Product	Gas composition	-
	Gas temperature	-