

# การศึกษามลพิษในรูปอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์

ภัทรภรณ์ แซ่เตี๋ย<sup>1</sup>, Mitsuhiro Hata<sup>2</sup>, Furuuchi Masami<sup>2</sup>,  
อัจฉริยา สุริยะวงศ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,  
ถนนพญาไท, ปทุมวัน, กรุงเทพมหานคร 10330, ประเทศไทย

<sup>2</sup> Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University,  
Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan

<sup>1</sup> Achariya.S@eng.chula.ac.th

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ลักษณะของการเผาไหม้ ปริมาณและการเกิดอนุภาคระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ และชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย และใยปาล์ม และการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงดังกล่าวที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50 โดยทำการเผาไหม้แบบเบทซ์ในเตาเผาเพื่อศึกษาปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้น และทำการเผาไหม้ด้วยเครื่อง Thermogravimetric-Differential Thermal Analysis (TG-DTA) ที่เชื่อมต่อกับเครื่องวัดปริมาณตามขนาดอนุภาค Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) เพื่อศึกษาลักษณะของการเผาไหม้และการเกิดอนุภาคระหว่างการเผาไหม้ ผลการศึกษาพบว่าปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้กากอ้อยมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ ใยปาล์ม แกลบ และถ่านหินลิกไนต์ โดยมีปริมาณอนุภาคเท่ากับ 58.3, 36.0, 12.6 และ 10.4 มิลลิกรัมต่อกรัมเชื้อเพลิงตามลำดับ และในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงทุกชนิดพบว่าปริมาณอนุภาคละเอียด ( $dp < 1.1$  ไมครอน) มีมากกว่าอนุภาคหยาบ ( $dp > 1.1$  ไมครอน) โดยน้ำหนัก จากการศึกษาลักษณะการเผาไหม้และการเกิดอนุภาคพบว่าการเผาไหม้ของชีวมวลเริ่มขึ้นที่อุณหภูมิใกล้เคียงกับการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ แต่การเผาไหม้คาร์บอนของถ่านหินลิกไนต์เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงกว่าชีวมวล การเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์อย่างใดอย่างหนึ่งเพียงชนิดเดียวก่อให้เกิดอนุภาคมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 270°C สำหรับชีวมวล และที่อุณหภูมิ 400°C สำหรับถ่านหินลิกไนต์ สำหรับการเผาไหม้ร่วมกันพบว่าอุณหภูมิที่เกิดอนุภาคมากที่สุดนั้นต่ำกว่าการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์และสูงกว่าการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว

## คำสืบค้น

ชีวมวล, ถ่านหิน, การเผาไหม้ร่วมกัน, ฝุ่นละออง

# Characteristics of particles generated during combustion of biomass, lignite coal and co-combustion of lignite coal and biomass

Pattaraporn Saetiew<sup>1</sup>, Mitsuhiko Hata<sup>2</sup>, Furuuchi Masami<sup>2</sup>, and Achariya Suriyawong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.*

<sup>2</sup>*Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa 920-1192, Japan.*

<sup>1</sup>*Achariya.S@eng.chula.ac.th*

## ABSTRACT

This study investigated characteristic of particles generated during combustion and co-combustion of lignite coal and three types of agricultural by-products, including rice husk, bagasse, and palm oil fiber. Experiments were conducted using a lab-scale furnace connected to a cascade impactor to quantify amount of particles generated from combustion process at different size-range, and a Thermogravimetric-Differential Thermal Analysis (TG-DTA) connected to a Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) to identify combustion characteristics and to measure particles generated during combustion. Experimental results showed that combustion of bagasse generated the highest amount particles (58.3 mg/g fuel), followed by palm-oil-fiber (36.0 mg/g fuel), rice husk (12.6 mg/g fuel) and lignite coal (10.4 mg/g fuel); and the amount of the fine ash ( $d_p < 1.1$  micron) was higher than the coarse ash ( $d_p > 1.1$  micron) for all combustion experiments. For all investigated biomass and lignite coal, combustion process started generating particle at similar temperature, while char combustion of lignite coal occurred at higher temperature than that of investigated biomass.

The highest particle number concentration was found at combustion temperature around 270°C for all investigated biomass, and approximately 400°C for lignite coal. For co-combustion of biomass and lignite coal, combustion temperature that generated the highest particle number concentration was found lower than lignite coal combustion, but higher than biomass combustion.

## KEYWORDS

biomass, coal, co-combustion, particulate formation

## I. บทนำ

พลังงานเป็นปัจจัยที่มีสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและคุณภาพชีวิตของคนในประเทศ ปัจจุบันการขยายตัวของเศรษฐกิจ สังคมและอุตสาหกรรมส่งผลให้อัตราความต้องการใช้พลังงานเพิ่มสูงขึ้นจากในอดีตและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต ในภาคอุตสาหกรรมแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในโรงงานคือ ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเตา ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีจำกัดในประเทศ เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม วัสดุเหลือใช้จากการเกษตรหรือชีวมวลเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนหรือใช้ร่วมกับเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรม จากข้อมูลปริมาณการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศไทยพบว่าปริมาณการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในประเทศปัจจุบันถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในรูปแบบต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างมากโดยมีการเพิ่มขึ้นจากในปี 2547 ซึ่งมีการใช้วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเพียง 192 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ หรือคิดเป็นสัดส่วนการใช้พลังงานเพียง 1.2% ต่อมาในปี 2548 ถึงปี 2551 ปริมาณการใช้เพิ่มสูงขึ้นเป็น 4.4% 9.0% 10.9% และ 11.1% ตามลำดับ[1] เชื้อเพลิงชีวมวลที่ใช้ในปัจจุบันมีหลายชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย ไม้พิน ไยปาล์ม เป็นต้น โดยเฉพาะเชื้อเพลิงไม้พินถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอุตสาหกรรมที่ต้องใช้ความร้อน อาทิเช่น อุตสาหกรรมการผลิตยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoke Sheet, RSS) ซึ่งเป็นอุตสาหกรรมที่มีการใช้พลังงานจากไม้พินเป็นจำนวนมากในขั้นตอนของการรมควันยาง อุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ซึ่งมีการนำไยปาล์มหรือกากปาล์มมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม และอุตสาหกรรมน้ำตาล ซึ่งมีการนำกากอ้อยมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนในกระบวนการผลิตน้ำตาล เป็นต้น การเผาไหม้ชีวมวลในกระบวนการดังกล่าวก่อให้เกิดอนุภาคฝุ่นและควันจำนวนมาก จากการศึกษาพบว่าอนุภาคควันที่เกิดจากการเผาไหม้ของชีวมวลมีองค์ประกอบของสารเคมีที่ก่อเกิดมลภาวะที่อันตรายหลายชนิดเช่น สารประกอบ Polycyclic Aromatic Hydrocarbons หรือ PAHs และโลหะหนัก เป็นต้น[2-9] ซึ่งกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงมีผลต่อองค์ประกอบของมลพิษที่เกิดขึ้น เช่น เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ไนโตรเจนและกำมะถัน ในสภาวะอากาศเกินพอ มลพิษที่เกิดขึ้นคือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซไนโตรเจนไดออกไซด์ และ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบของเชื้อเพลิงนั้น ไม่ได้มีเพียงคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และกำมะถัน เท่านั้น แต่ยังมีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบอีกด้วย ซึ่งเมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีโลหะหนักเป็นองค์ประกอบ ก็มักจะพบโลหะหนักในฝุ่นละอองและเถ้าด้วย[10] จากผลการศึกษาในหลายงานวิจัยพบว่ากระบวนการเกิดอนุภาคขนาดเล็กในกระบวนการเผาไหม้มีความซับซ้อนและขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างได้แก่ ชนิดของเชื้อเพลิง อุณหภูมิในการเผาไหม้ อัตราส่วนของเชื้อเพลิงต่ออากาศ และ เวลาที่ใช้ในการเผาไหม้ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีผลต่อลักษณะและการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่เกิดขึ้น[8-10, 12] สำหรับประเทศไทยการนำเชื้อเพลิงชีวมวล เช่น แกลบ, ฟางข้าว, กะลาปาล์ม มาทำการเผาไหม้ หรือเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินเพื่อนำพลังงานจากโครงสร้างทางเคมีของมวลชีวภาพเหล่านั้นกลับมาใช้ได้เกิดขึ้นเป็นระยะเวลาพอสมควรแล้ว แต่การศึกษาลักษณะมลภาวะที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลเหล่านี้ยังไม่ปรากฏมากนัก งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะของการเผาไหม้ ปริมาณและการเกิดเถ้าลอยระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ และชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย และไยปาล์ม และการเผาไหม้ร่วมกันของถ่านหินลิกไนต์และชีวมวลชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50 ผลจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้ประกอบในการสร้างฐานข้อมูลลักษณะมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลที่ใช้ในประเทศและเพื่อเลือกระบบควบคุมการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อไป

## II. วิธีการวิจัย

### 2.1 ปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ห้องประกอบของเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์และชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ กาก อ้อย และใยปาล์ม โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ CHNS/O analyzer (Vario EL III, Elementar Analysensysteme GmbH.) เพื่อวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ หลังจากนั้นจึงทำการศึกษาปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้โดยใช้เตาเผาชนิดท่อ ซึ่งมีขั้นตอนการวิจัยดังนี้ (1) การเตรียมเชื้อเพลิง (2) วิธีการเผาไหม้ และ (3) วิธีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ แผนภาพการดำเนินการทดลองแสดงดังรูปที่ 1

#### (1) การเตรียมเชื้อเพลิง

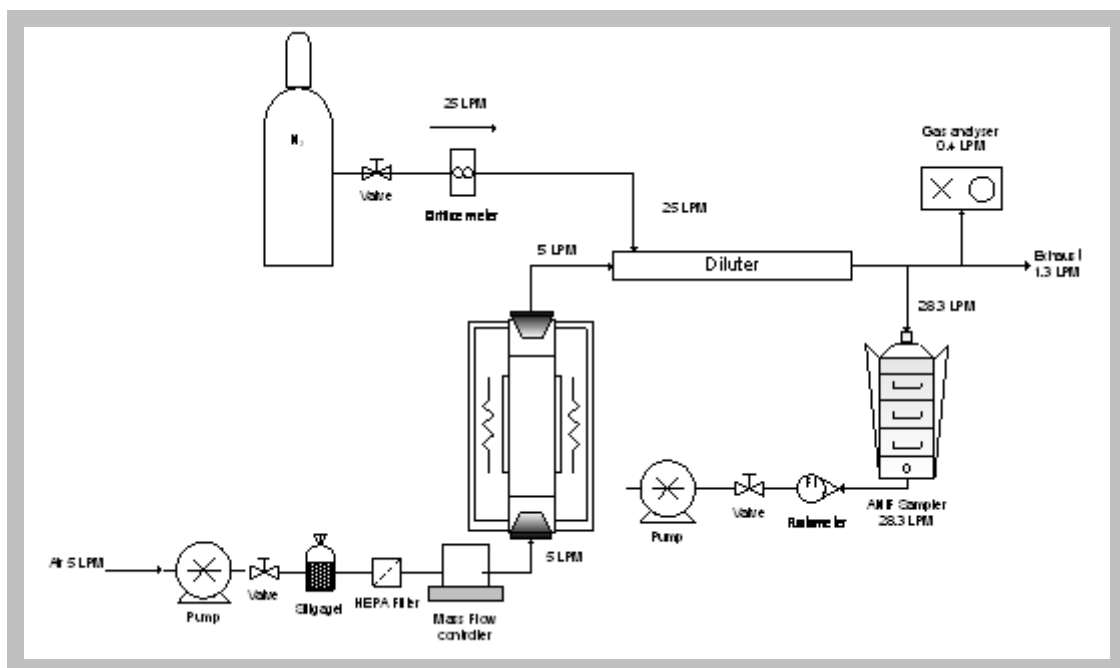
นำเชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดลองไปบดแล้วนำไปร่อนผ่านตะแกรงให้มีขนาดน้อยกว่า 710 ไมครอน สำหรับตัวอย่างเชื้อเพลิงชีวมวลผสมถ่านหินลิกไนต์ ใช้อัตราส่วนผสมของชีวมวลต่อถ่านหินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก

#### (2) การเผาไหม้เชื้อเพลิง

การทดลองนี้ใช้เตาเผาแบบท่อขนาดห้องปฏิบัติการ (ISUZU EPKR-17K) ทำการเผาเชื้อเพลิงด้วยสภาวะที่มีอากาศมากเกินไปโดยป้อนเชื้อเพลิง 0.3 กรัมที่อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่เตา 5 ลิตรต่อวินาที โดยเพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องถึง 700°C ด้วยอัตรา 20°C ต่อวินาที

#### (3) วิธีการเก็บตัวอย่างและวิเคราะห์

อากาศร้อนพร้อมเถ้าลอยที่ออกจากเตาเผาจะถูกเพิ่มปริมาตรด้วยก๊าซไนโตรเจนเข้าตรงทางออกของเตาด้วยอัตรา 25 ลิตรต่อวินาทีเพื่อให้มีอัตราการไหลรวมเท่ากับ 28.3 ลิตรต่อวินาที ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์เก็บตัวอย่างพร้อมแยกขนาด Andersen Sampler with Inertial Filter จากนั้นนำเถ้าลอยบนกระดาษกรองที่ถูกแยกขนาดแล้วใส่เดซิเคเตอร์เพื่อไล่ความชื้นเป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำไปชั่งน้ำหนัก

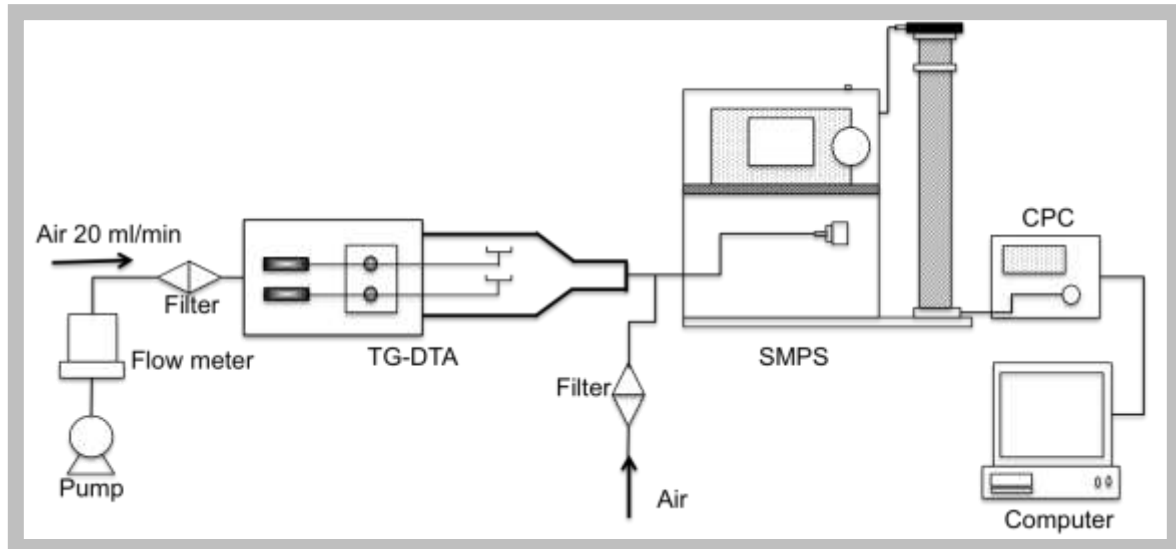


รูปที่ 1 แผนภาพการดำเนินการทดลองด้วยเตาเผาชนิดท่อ

## 2.2 ลักษณะการเผาไหม้และการเกิดอนุภาคจากการเผาไหม้

การศึกษาลักษณะการเผาไหม้และการเกิดเถ้าลอยจากการเผาไหม้ทำโดยใช้ Thermogravimetric/differential thermal combined analyser (TG-DTA, TG8120, Rigaku Inc.) เพื่อศึกษาความแตกต่างและการเปลี่ยนแปลงในการ

ลดลงของน้ำหนักเชื้อเพลิงและปฏิกิริยาคายความร้อนและดูดความร้อน โดย TG-DTA นั้นได้ต่อกับเครื่อง Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS, 3034 Model, TSI Inc.) เพื่อหาปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นในรูปของจำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นต่อปริมาตรอากาศในแต่ละช่วงอุณหภูมิขณะทำการเผาไหม้ โดยใช้เชื้อเพลิง 5 มิลลิกรัม สำหรับการเผาไหม้ร่วมกันนั้นใช้อัตราส่วนผสมร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก อัตราการป้อนอากาศ 20 มิลลิลิตรต่อนาที เพิ่มอุณหภูมิในเตาตั้งแต่อุณหภูมิห้องถึง 700 องศาเซลเซียส โดยใช้อัตราเพิ่มอุณหภูมิเท่ากับ  $20^{\circ}\text{C}$  ต่อนาที



รูปที่ 2 แผนภาพการดำเนินการทดลองด้วย TG-DTA และ SMPS

### III. ผลการวิจัย

#### 3.1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของเชื้อเพลิงถ่านหินลิกไนต์และชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย และไยปาล์ม พบว่าถ่านหินให้ค่าพลังงานสูงสุด (10.2 เมกะจูล/กิโลกรัม) ตามด้วยไยปาล์ม (8.2 เมกะจูล/กิโลกรัม) กากอ้อย (7.3 เมกะจูล/กิโลกรัม) และแกลบ (5.6 เมกะจูล/กิโลกรัม) โดยกากอ้อยมีปริมาณธาตุคาร์บอนสูงสุด (41.6%) ตามมาด้วยไยปาล์ม (39.4%) แกลบ (33.8%) และถ่านหิน (33.8%) แต่เมื่อทำการวิเคราะห์ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายพบว่าชีวมวลทุกชนิดมีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายมากกว่าถ่านหินลิกไนต์ และขณะเดียวกันถ่านหินลิกไนต์มีคาร์บอนคงตัวสูงกว่าชีวมวลทุกชนิดดังแสดงในตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิงเหล่านี้จะมีผลต่อการเผาไหม้และเถ้าลอยที่เกิดขึ้น

#### 3.2 ปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้

##### 3.2.1 ปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินเพียงอย่างเดียว

ปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์และชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย และไยปาล์ม แสดงดังตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณน้อยกว่าการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว ซึ่งปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้มากที่สุดคือ กากอ้อย โดยมีปริมาณเท่ากับ 53.8 มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิง ส่วนปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ต่ำสุดคือ ถ่านหินลิกไนต์ โดยมีปริมาณเท่ากับ 10.4 มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิง เนื่องจากกากอ้อยมีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 จึงก่อให้เกิดเถ้าลอยมากกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่น และถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำที่สุดจึงก่อให้เกิดเถ้าลอยเล็กน้อยที่สุด โดยเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ในเชื้อเพลิงทุกชนิดมีปริมาณ

อนุภาคละเอียด ( $dp < 1.1$  ไมครอน) มากกว่าอนุภาคหยาบ ( $dp > 1.1$  ไมครอน) ซึ่งปริมาณอนุภาคละเอียดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้แกลบ กากอ้อย ใบปาล์ม และลิกไนต์ เพียงอย่างเดียวมีปริมาณเท่ากับ 17.6, 44.92, 28.0 และ 7.26 มิลลิกรัม อนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิงและมีปริมาณอนุภาคหยาบเท่ากับ 8.28, 8.84, 7.93 และ 3.94 มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิงตามลำดับ อนุภาคละเอียดที่ขนาด 0.07-0.43 ไมครอน มีปริมาณอนุภาคมากที่สุดในเชื้อเพลิงทุกชนิดโดย แกลบ กากอ้อย ใบปาล์ม และลิกไนต์ มีปริมาณอนุภาคขนาด 0.07-0.43 ไมครอนเท่ากับ 6.73, 14.28, 10.53 และ 4.03 มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิงตามลำดับ สำหรับอนุภาคหยาบนั้นพบว่าปริมาณอนุภาคแต่ละขนาดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์นั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน

### 3.2.2 ปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์

ปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้แกลบและลิกไนต์ กากอ้อยและลิกไนต์ ใบปาล์มและลิกไนต์ ในอนุภาคละเอียด ( $dp < 1.1$  ไมครอน) มีปริมาณเท่ากับ 9.9, 29.7 และ 16.62 มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิงและในอนุภาคหยาบ ( $dp > 1.1$  ไมครอน) มีปริมาณเท่ากับ 7.99, 5.81 และ 4.16 มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิงตามลำดับ อนุภาคละเอียดที่อนุภาคขนาด 0.07-0.43 ไมครอน มีปริมาณอนุภาคมากที่สุดในเชื้อเพลิงทุกชนิดได้แก่ แกลบและลิกไนต์ กากอ้อยและลิกไนต์ ใบปาล์มและลิกไนต์ โดยมีค่าเท่ากับ 4.80, 12.95 และ 7.15 มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิงตามลำดับ สำหรับอนุภาคหยาบนั้นพบว่าปริมาณอนุภาคแต่ละขนาดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์นั้นมีปริมาณใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์เพียงอย่างเดียวจะเห็นได้ว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นในแต่ละขนาดจากการเผาไหม้ร่วมกันของเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์มีปริมาณน้อยกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3 ยกเว้นอนุภาคบางขนาดที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของแกลบและถ่านหินลิกไนต์ที่ขนาด 2.1-3.3, 4.7-7.0 และ 7.0-11.0 ไมครอน (ดังแสดงในภาพที่ 3ก.) ซึ่งมีปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นมากกว่าการเผาไหม้เชื้อเพลิงแกลบ ใบปาล์ม และถ่านหินลิกไนต์เพียงอย่างเดียวเพียงเล็กน้อย (โดยมากเกิดขึ้นในอนุภาคหยาบ) ซึ่งอาจเนื่องมาจากลักษณะของลักษณะองค์ประกอบทางเคมีที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิงนั้นก่อให้เกิดอนุภาคในบางขนาดเพิ่มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้แกลบ หรือถ่านหินลิกไนต์เพียงอย่างเดียว [14] จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินนั้นเปลี่ยนแปลงลักษณะของเถ้าลอยหรืออนุภาคที่เกิดขึ้น ในกรณีนี้การเผาไหม้ร่วมระหว่างแกลบและถ่านหินลิกไนต์ก่อให้เกิดอนุภาคขนาดใหญ่ในบางขนาดเพิ่มมากขึ้น และก่อให้เกิดอนุภาคละเอียดลดลง โดยทั่วไปอนุภาคขนาดใหญ่จะเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าอนุภาคขนาดเล็กดังนั้นการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์อาจช่วยลดมลพิษที่เกิดขึ้นต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมได้ ขณะเดียวกันยังเป็นการนำชีวมวลซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาใช้ประโยชน์ได้อีกด้วย

การวิเคราะห์โดยประมาณ	ชนิดของเชื้อเพลิง			
	ชีวมวล			ถ่านหิน
	แกลบ	กากอ้อย	ไยปาล์ม	ลิกไนต์
เถ้า <sup>1</sup>	18.4	18.9	7.9	21.1
ค่าความชื้น <sup>2</sup>	10.1	3.4	8.8	21.9
สารอินทรีย์ระเหยง่าย <sup>1</sup>	54.2	65.6	59.2	38.4
คาร์บอนคงตัว <sup>1</sup>	24.6	14.7	30.6	33.3
ค่าความร้อน <sup>2</sup> (เมกะจูล/กิโลกรัม)	5.6	7.3	8.2	10.2
การวิเคราะห์ปริมาณธาตุ <sup>1</sup>	แกลบ	กากอ้อย	ไยปาล์ม	ลิกไนต์
คาร์บอน	33.8	41.6	39.4	33.7
ไฮโดรเจน	3.5	3.4	3.4	2.0
ไนโตรเจน	0.4	1.0	0.3	1.1
ซัลเฟอร์	0.0	0.1	0.0	2.0
แคลเซียม	1.93	2.19	2.56	0.61
แมกนีเซียม	6.25	8.60	5.21	2.45

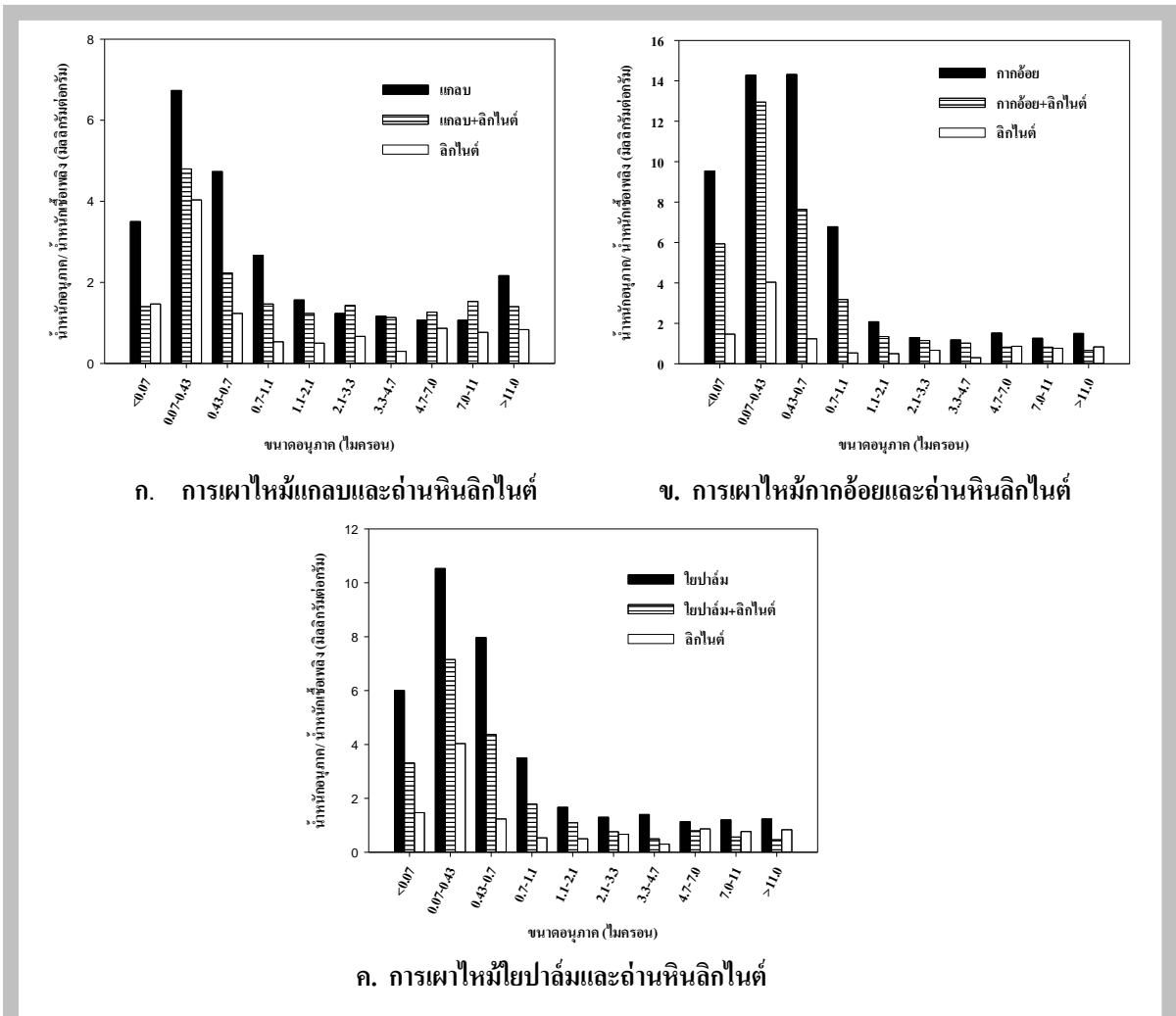
โดย <sup>1</sup> คือ ผลการวิเคราะห์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง

<sup>2</sup> คือ ผลการวิเคราะห์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเปียก โดยคำนวณจากตัวอย่างที่มีความชื้นตามสภาพของตัวอย่างที่ได้รับ

#### ตารางที่ 1 องค์ประกอบของเชื้อเพลิง

ชนิดเชื้อเพลิง	ปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ (มิลลิกรัมอนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิง)
แกลบ	25.9
กากอ้อย	53.8
ไยปาล์ม	36.0
ลิกไนต์	10.4

#### ตารางที่ 2 ปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

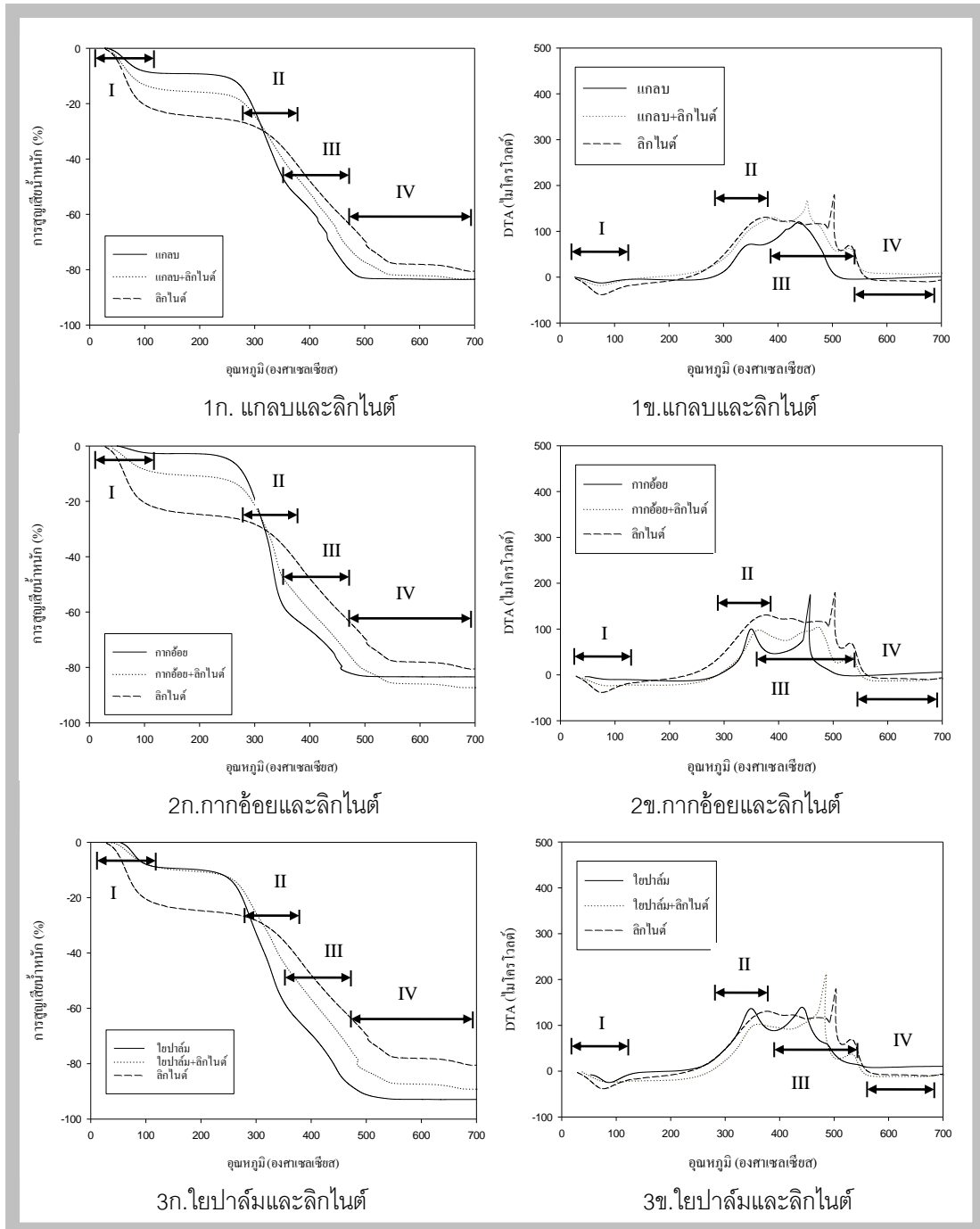


รูปที่ 3 ปริมาณอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

### 3.3 ลักษณะการเผาไหม้และการเกิดเถ้าลอย

ลักษณะการเผาไหม้ของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์ได้ทำการศึกษาโดยใช้ TG-DTA เพื่อศึกษาลักษณะการเผาไหม้ที่อุณหภูมิต่างๆ ของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์ ซึ่งผลการทดลอง TG-DTA แสดงดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าเชื้อเพลิงทุกชนิดมีปฏิกิริยาดูดความร้อนเกิดขึ้น (I) ซึ่งในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการระเหยน้ำออกจากเชื้อเพลิง และมีปฏิกิริยาคายความร้อน 2 ช่วง (II, III) โดยช่วงที่ II นั้นเป็นการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่าย และช่วงที่ III เป็นการเผาไหม้ชาร์ ส่วนช่วงที่ IV เป็นช่วงที่การเผาไหม้เสร็จสิ้นแล้ว [3] การเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์พบว่าการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายและการเผาไหม้ชาร์อย่างชัดเจน โดยเกิดการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายในช่วงอุณหภูมิ 300-400 องศาเซลเซียส และการเผาไหม้ชาร์ที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส สำหรับชีวมวล และเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่ายที่ 300-500 องศาเซลเซียส และเผาไหม้ชาร์ที่อุณหภูมิ 500-570 องศาเซลเซียสสำหรับถ่านหินลิกไนต์ดังแสดงในภาพที่ 4.1ข 4.2ข และ 4.3ข โดยอุณหภูมิดังกล่าวสัมพันธ์กับน้ำหนักที่ลดลงของเชื้อเพลิง ซึ่งในช่วงที่ II นั้นน้ำหนักของเชื้อเพลิงลดลงอย่างรวดเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 4.1ก 4.2ก และ 4.3ก ซึ่งเกิดมาจากการเผาไหม้สารระเหย และช่วงที่สามน้ำหนักลดลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากการเผาไหม้ชาร์นั่นเอง โดยการเผาไหม้ร่วมกันของถ่านหินลิกไนต์และชีวมวลจะพบว่าลักษณะการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงผสมมีพฤติกรรมใกล้เคียงกับการเผาไหม้ถ่านหินมีการปล่อยพลังงานมากกว่าการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว

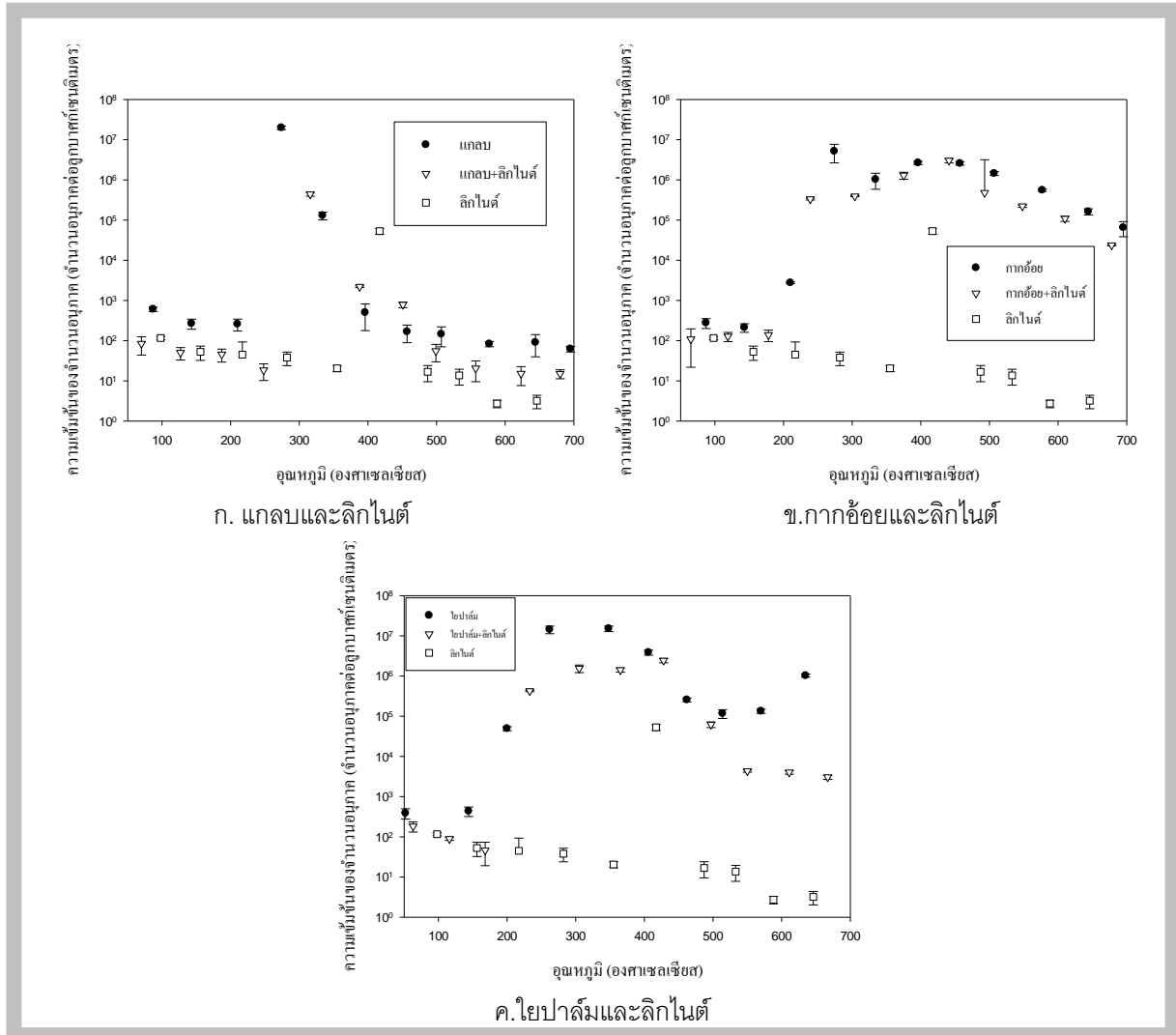




รูปที่ 4 TG-DTA ของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์

ปริมาณแก๊สลอยในรูปจำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์ และการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์แสดงดังรูปที่ 5 การเผาไหม้ชีวมวลนั้นเริ่มเกิดอนุภาคขึ้นตั้งแต่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส โดยมีความเข้มข้นเชิงจำนวน (จำนวนอนุภาคต่อปริมาตรอากาศ) มากที่สุดที่อุณหภูมิ 274 274 และ 252 องศาเซลเซียส สำหรับการเผาไหม้แกลบ กากข่อย และไยปาล์มตามลำดับ ส่วนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์นั้นมีปริมาณอนุภาคน้อยมากดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 1 คือการศึกษาปริมาณแก๊สลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์ซึ่งปริมาณแก๊สลอยที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์น้อยกว่าการเผาไหม้ชีวมวล เนื่องจาก

ถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายต่ำกว่าชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ 1 จึงเป็นผลให้อนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ที่มีปริมาณน้อยมาก เมื่อพิจารณาอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้พบว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นนั้นสัมพันธ์กับรูปที่ 4 คือ ในช่วงที่ I เป็นช่วงการระเหยน้ำในเชื้อเพลิง จะเห็นได้ว่าไม่มีอนุภาคเกิดขึ้น ในช่วงที่ II และ III เกิดการเผาไหม้สารระเหยและการเผาไหม้ซาร์นั้นก่อให้เกิดอนุภาคเป็นจำนวนมากดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 5 จำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลและถ่านหินลิกไนต์

เมื่อทำการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินจึงพบว่าจำนวนอนุภาคลดลงเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว เนื่องจากองค์ประกอบที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิง กล่าวคือเมื่อนำชีวมวลมาเผาไหม้ร่วมกันกับถ่านหินจึงเป็นการลดสัดส่วนของสารอินทรีย์ระเหยง่าย และปริมาณธาตุกลุ่มโลหะหมู่สอง ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยนี้คืออนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ร่วมกันของชีวมวลและถ่านหินมีปริมาณน้อยกว่าอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว

#### IV. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาลักษณะของการเผาไหม้ ปริมาณและการเกิดเถ้าลอยระหว่างการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์และชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ แกลบ กากอ้อย และใบปาล์ม และการเผาไหม้ร่วมกันของถ่านหินลิกไนต์และชีวมวลชนิดต่างๆ ที่อัตราส่วนผสมร้อยละ 50 จากการศึกษพบว่า การเผาไหม้ชีวมวลทุกชนิดมีปริมาณเถ้าลอยเกิดขึ้นมากกว่าการเผาไหม้

ถ่านหินลิกไนต์ โดยกากอ้อยมีปริมาณอนุภาคมากที่สุด รองลงมาคือใยปาล์ม แกลบ และถ่านหินลิกไนต์ ตามลำดับ แต่เมื่อทำการเผาไหม้ร่วมกันปริมาณเถ้าลอยที่เกิดขึ้นมีปริมาณลดลงเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียว และจากผลการศึกษาลักษณะการเผาไหม้เชื้อเพลิงพบว่า การเผาไหม้ชีวมวลเริ่มมีอนุภาคเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส และมีปริมาณอนุภาคมากที่สุดที่อุณหภูมิประมาณ 270 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดการเผาไหม้สารอินทรีย์ระเหยง่าย ส่วนการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ก่อให้เกิดอนุภาคน้อยมากเนื่องจากองค์ประกอบของสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีน้อยกว่าชีวมวล สำหรับการเผาไหม้ร่วมกันจำนวนอนุภาคที่เกิดขึ้นลดลงเมื่อเทียบกับการเผาไหม้ชีวมวลเพียงอย่างเดียวเนื่องจากองค์ประกอบที่เปลี่ยนไปของเชื้อเพลิง เช่น ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่าย และธาตุกลุ่มโลหะหมู่สอง เป็นต้น ผลจากงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประกอบในการสร้างฐานข้อมูลลักษณะมลพิษที่เกิดขึ้นจากการเผาไหม้ชีวมวลที่ใช้ในประเทศ และเพื่อเลือกกระบวนการควบคุมการปลดปล่อยมลพิษทางอากาศได้อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพต่อไป

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนการศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาประจำปีงบประมาณ 2554 สถาบันวิจัยพลังงาน จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุน 90 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2553

## บรรณานุกรม

- [1] พัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน .กรม ,รายงานพลังงานทดแทนของประเทศไทย 2551. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา : [http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/upload/nov50/june53/Thailand\\_Alter2008.pdf](http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/upload/nov50/june53/Thailand_Alter2008.pdf) [22 กันยายน 2553].
- [2] C. Venkataraman, G. Negi, S.B. Sardar, and R. Rastogi, 2002. Size distributions of polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosol emission from biofuel combustion. *Journal of Aerosol Science*. 33: 503-518.
- [3] E. Hedberg, A. Kristensson, C. Ohlsson, P. Johnsson, E. Swietlicki, V. Vesely, U. Wideqvist, and R. Westerholm. 2002. Chemical and physical characterization of emission from birch wood combustion in a wood stove. *Atmospheric Environment*. 36: 4823-4837.
- [4] M.D. Hays, N. D. Smith, J. Kinesy, Y.Dong, and P. Kariher. 2003. Polycyclic aromatic hydrocarbon size distribution in aerosol from appliances of residential wood combustion as determined by direct thermal desorption-GC/MS. *Journal of Aerosol Science*. 34: 1061-1084.
- [5] J. Francisco, H. Juan, M.Ayala, and G. Venerando, 2005. Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons from combustion of agricultural and sylvicultural debris. *Atmospheric Environment*. 39: 6654-6663.
- [6] P. Tekasakul, M. Furuuchi, S. Tekasakul, J. Chomanee, and Y. Otani. 2008. Characteristics of PAHs in Particulates in the Atmospheric Environment of Hat Yai City Thailand and Relationship with Rubber-wood Burning in Rubber Sheet Production. *Aerosol and Air Quality Research*. 8(3): 265-278.

- [7] J. Chomanee, S. Tekasakul, P. Tekasakul, M. Furuuchi, and Y. Otani. 2009. Effects of Moisture Content and Burning Period on Concentration of Smoke Particles and Particle-Bound Polycyclic Aromatic Hydrocarbon from Rubber-Wood Combustion. *Aerosol and Air Quality Research*, 2071-1409.
- [8] B. Miller, D. Dugwell, and R. Kandiyoti. 2006. The fate of trace elements during the co-combustion of wood-bark with waste. *Energy and Fuels*. 20 : 531-520
- [9] C. Bakisgan, A.G. Dumanli, and Y. Yürüm. 2009. Trace elements in Turkish biomass fuels: Ashes of wheat straw, olive bagasse and hazelnut shell. *Fuel*. 88: 1842-1851.
- [10] Z. Gogebakan, and N. Selçuk. 2009. Trace elements partitioning during co-firing biomass with lignite in a pilot-scale fluidized bed combustor. *Journal of Hazardous Material*. 162 : 1134-1129
- [11] D.B. Kittelson. 1998. Engines and nanoparticles: a review. *Journal of Aerosol Science*. 29: 575-588.
- [12] W. P. Linak and J. O. L. Wendt. 1994. Trace-metal transformation mechanisms during coal combustion. *Fuel Process. Technol.* 39: 173-198.
- [13] Y. Zhuang and P. Biswas. 2001. Submicrometer particle formation and control in a bench-scale pulverized coal combustor. *Energy Fuel*. 15(3): 510-516.
- [14] A. Suriyawong, R. Magee, K. Peebles, and P. Biswas. 2009. Energy recycling by co-combustion of coal and recovered paint solids from automobile paint operations. *J Air Waste Manag Assoc*. 59(5):560-567.