

## กลไกและการลดปัญหาการเกาะของอนุภาคบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองจากการเผาไหม้

### ฟางข้าวและแกลบร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ในเตาเผาไหม้ตะกรับ

## Mechanisms and mitigation of fouling on superheated steam tube from co-firing of rice straw and rice husk with anthracite in a grate-fired combustor

ธรรมนุญ อุดมมัน<sup>1</sup>, ประสาน สติเรืองศักดิ์<sup>2</sup>, สรวุฒิ สัจวงกาญจน์<sup>2</sup>, ฐานิตย์ เมธิยานนท์<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10530

<sup>2</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10530

\*ติดต่อ: E-mail: tammnoon\_u@yahoo.co.uk โทร 02-988-3655 ต่อ 2350

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการแก้ปัญหาการเกิดฟาวลิงบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองจากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบ 80:20 (โดยน้ำหนัก) ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้น (150 kWth) โดยนำเสนอผลการศึกษาแนวโน้มและกลไกการเกิดฟาวลิง รวมไปถึงการลดปัญหาฟาวลิงด้วยการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ที่ร้อยละ 54 ของน้ำหนักฟางข้าว ผลการศึกษาพบว่าดัชนีฟาวลิงของเชื้อเพลิงมีค่า 1.89 ซึ่งบ่งชี้ถึงแนวโน้มการเกิดฟาวลิงระดับปานกลาง ส่วนผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเคมีคอลแฟลคชันเนชัน ชี้ให้เห็นว่าฟางข้าวมีโพแทสเซียมและคลอรีนในเชื้อเพลิงจะนำไปสู่ปัญหาฟาวลิงที่รุนแรง การเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์สามารถลดการเกิดฟาวลิงได้อย่างชัดเจน โดยค่าเดโพสิตฟลักซ์ลดลงจาก 285 g/m<sup>2</sup>h เหลือ 51 g/m<sup>2</sup>h ผลการวิเคราะห์เดโพสิตด้วย SEM-EDX และแผนที่ธาตุพบว่าเดโพสิตประกอบด้วย Si และ Al จากถ่านหินเป็นหลักที่ผ่านการทำปฏิกิริยากับ K จากถ่านฟางข้าว แล้วเกิดเป็นสารประกอบโพแทสเซียมอลูมิโนซิลิเกต (K-Al-Silicate)

**คำหลัก:** การเผาไหม้ร่วม; ฟางข้าว; ฟาวลิง; เตาเผาไหม้ตะกรับ; ถ่านหินแอนทราไซต์

### Abstract

This research aimed to mitigate the fouling problem on superheated steam tube from firing rice-straw/rice-husk at 80:20 (by weight) in a step grate-fired combustor (150 kWth) which presented the fouling propensities and mechanisms, and alleviated the fouling problem by co-firing with anthracite coal at 54% by weight of rice straw. The results showed that the fouling index of fuels was 1.89 which indicated medium fouling tendency. From chemical fractionation analysis, rice straw was rich in K and Cl, leading to severe fouling tendency. The combustion of rice straw/rice husk mixture with anthracite coal exhibited a promising ability to remedy the fouling problem due to it decreased deposit flux from 285 g/m<sup>2</sup>h to 51 g/m<sup>2</sup>h. For SEM-EDX and mapping analysis results, deposit is mainly composed of Si and Al from coal ash that reacted with K from rice straw ash to form K-Al-Silicate compounds.

**Keywords:** co-firing; rice straw; fouling; grate-fired combustor; anthracite coal

## 1. บทนำ

ประเทศไทยมีฟางข้าวเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพสูงในการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตความร้อนและไฟฟ้า แต่ข้อจำกัดสำคัญคือปัญหาที่เกิดจากเถ้าฟางข้าวซึ่งอาจทำให้ระบบการทำงานของเตาเผาไหม้หรืออุปกรณ์ของหม้อต้มไอน้ำ เนื่องจากในฟางข้าวมีโพแทสเซียม (K) และคลอรีน (Cl) ในสัดส่วนที่สูง เมื่อถูกเผาไหม้จะปลดปล่อยโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) และเกิดสารประกอบจำพวกโพแทสเซียมซิลิเกต (K-Silicate) ซึ่งก่อให้เกิดโพลิตหรือปัญหาฟาวลิง (fouling) บนพื้นผิวอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในหม้อต้มไอน้ำ และอาจก่อให้เกิดปัญหาการหลอมตัวของเถ้า (slagging) ภายในห้องเผาไหม้ได้ ตัวอย่างเช่น การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวเพื่อผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าในต่างประเทศ [1-2] ที่ประสบปัญหาฟาวลิงอย่างรุนแรง เนื่องจากสารประกอบ KCl และ  $K_2SO_4$  ที่ระเหยออกมาจากห้องเผาไหม้ แล้วไปควบแน่นบนผิวท่อไอน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าภายในห้องเผาไหม้และทำหน้าที่คล้ายกาวที่สามารถดักจับอนุภาคของเถ้าเชื้อเพลิงจนมีความหนาเพิ่มมากขึ้นจนทำให้การถ่ายเทความร้อนแยลง นอกจากฟางข้าวแล้วชีวมวลที่มีศักยภาพของประเทศไทย เช่น ทะลายปาล์มเปล่า (Empty fruit bunch: EFB) ก็มีแนวโน้มการเกิดปัญหาเช่นกัน เมื่อเผาไหม้ ทะลายปาล์มเปล่าในเตาเผาไหม้แบบตะกรับพบว่าเกิดปัญหาฟาวลิงที่ผิวท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองอย่างรุนแรงจากเดโพลิตของ KCl เป็นหลัก อีกทั้งยังเกิดปัญหาสแลกกิ้งบนตะกรับจากการทำปฏิกิริยาของโพแทสเซียมที่อยู่ในเถ้าหนักกับสารประกอบในเถ้าเปลี่ยนเป็นสารประกอบ K-Ca-silicate ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ [3]

วิธีการบรรเทาปัญหาที่เกี่ยวกับเถ้าจากการเผาไหม้ชีวมวลที่มีสัดส่วนของ K และ Cl สูง อย่างแพร่หลายคือการใช้เติมสารเติมแต่ง (additive) พบว่าสารเติมแต่งกลุ่ม Al-Si จำพวกเกาลิน (kaolin) มีประสิทธิภาพในการลดปัญหาฟาวลิงและสแลกกิ้งได้ดีกว่าแอมโมเนียมซัลเฟต

และซัลเฟอร์ [4] ซีโอไลต์ (Zeolite) [5] และดินฟอกสี (Bleaching earth) [6] โดยเกาลินด์ ( $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ ) เป็นองค์ประกอบหลักของเกาลินสามารถทำปฏิกิริยากับ KCl เปลี่ยนเป็น Leucite ( $KAlSi_2O_6$ ) และ Kalsillite ( $KAlSiO_4$ ) ที่มีจุดหลอมเหลวสูงจึงช่วยลดปัญหาการหลอมของเถ้าได้ และทำให้ KCl ถูกดักจับไว้ได้จึงลดปัญหาฟาวลิงได้ไปพร้อมกัน แต่เมื่อพิจารณาต้นทุนพลังงานที่มีการเติมเกาลินในสัดส่วนร้อยละ 4-8 โดยน้ำหนักของชีวมวล จะทำให้มีต้นทุนของเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้นในช่วงร้อยละ 10-20 [7-8] จึงทำให้เป็นข้อจำกัดสำคัญในการจะนำไปใช้ในภาคอุตสาหกรรม ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนออีกทางเลือกหนึ่งคือการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับเชื้อเพลิงจำพวกถ่านหิน เนื่องจากถ่านหินเป็นเชื้อเพลิงที่มีค่าความจำเพาะร้อนสูง ขนส่งได้สะดวก จึงสร้างเสถียรภาพให้ทั้งในการจัดหาเชื้อเพลิงและพฤติกรรมการเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ จากงานวิจัยที่ศึกษาการเผาไหม้ร่วมของเปลือกเมล็ดมะกอก (olive kernel) ร้อยละ 20 โดยมวลกับถ่านหินลิกไนต์ [9] ฟางข้าวสาเลี้อยละ 25 โดยพลังงานกับถ่านพีท (peat) [10] ฟางข้าวร้อยละ 20 และ 50 โดยมวลกับถ่านพีท [11] สามารถลดการเกิดปัญหาฟาวลิงและสแลกกิ้งได้ในทำนองเดียวกับการใช้เกาลิน เนื่องจากเถ้าของถ่านหินประกอบด้วยสารประกอบจำพวกอลูมิโนซิลิเกต (aluminosilicate) เช่นเดียวกับเกาลินนั่นเอง [12]

คณะผู้วิจัยได้ศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้เชื้อเพลิงจำพวกถ่านหินภายในประเทศ พบว่าซับบิทูมินัส (Sub-bituminous) มีการนำเข้ามามากที่สุด ส่วนแอนทราไซด์ก็ถูกนำเข้าเป็นเชื้อเพลิงในเตาถลุงเหล็กในโรงงานเหล็ก ทั้งนี้จากการสำรวจเบื้องต้น พบว่าซับบิทูมินัสมีสัดส่วนอะลูมิเนียมค่อนข้างต่ำซึ่งไม่เหมาะต่อการนำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาฟาวลิงและสแลกกิ้ง ขณะที่แอนทราไซด์มีความเหมาะสมมากกว่าเพราะมีปริมาณอะลูมิเนียมสูง ซึ่งเป็นประเด็นที่น่าสนใจเนื่องจากยังไม่ปรากฏการศึกษาที่

เผยแพร่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการแก้ไขปัญหาฟาวลิงด้วยการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับแอนทราไซต์ที่มีปริมาณอะลูมิเนียมสูง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการลดปัญหาการเกาะของอนุภาคบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองจากการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ในเตาเผาไหม้ตะกรับ อย่างไรก็ตามเพื่อคาดการณ์ในเรื่องต้นว่าแอนทราไซต์จะสามารถช่วยลดการเกิดปัญหาฟาวลิงหรือจะยังทำให้เกิดปัญหาที่รุนแรงมากขึ้น จึงได้ทำการวิเคราะห์ด้วยดัชนีเชื้อเพลิง (fuel indices) และวิธีการเคมีคอลแฟลคชันเนชัน (chemical fractionation) ก่อนการทดลองการเผาไหม้

## 2. วิธีการดำเนินงาน

### 2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านเชื้อเพลิง

ฟางข้าวที่ใช้ได้จากส่วนที่เป็นอาหารสัตว์ และแกลบจากโรงสีข้าวในพื้นที่เขตหนองจอก กรุงเทพมหานคร ส่วนถ่านหินแอนทราไซต์ได้มาจาก บริษัท ไทยแลนด์แอนทราไซต์ จำกัด โดยการเตรียมถ่านเชื้อเพลิงของฟางข้าวและแกลบทำโดยนำเชื้อเพลิงมาให้ความร้อนภายในเตาเผา (ashing) ที่อุณหภูมิ 550°C ขณะที่ถ่านหินแอนทราไซต์ใช้อุณหภูมิ 750°C จากนั้นนำไปวิเคราะห์เพื่อหาองค์ประกอบของถ่านโดยใช้เครื่อง X-Ray Fluorescence Spectrometer (XRF) Phillip Model PW 2400

### 2.2 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยใช้ดัชนีเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์นี้จะนำองค์ประกอบของถ่านเชื้อเพลิงที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF โดยนำร้อยละโดยน้ำหนักของออกไซด์ของธาตุแต่ละชนิดมาคำนวณดัชนีเชื้อเพลิง ได้แก่ Base-acid ratio (B/A) และ Fouling index (FI) ซึ่งเป็นดัชนีเชื้อเพลิงที่มักนำมาใช้ [13-14] และถูกเลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ดังแสดงในตารางที่ 1 ที่ประกอบด้วยสูตรการคำนวณดัชนีเชื้อเพลิง และแนวโน้มของการเกิดปัญหาฟาวลิงหรือระดับความรุนแรง

กรณีที่ถ่านเชื้อเพลิงที่มีค่า B/A และ FI มาก หรือมีส่วนของออกไซด์ที่เป็นต่างสูงโดยเฉพาะ  $K_2O$  และ  $Na_2O$  จะมีแนวโน้มการเกิดฟาวลิงและสแลกกิ้งได้ง่าย โดย FI แสดงถึงอิทธิพลของ  $K_2O$  และ  $Na_2O$  เนื่องจากโลหะอัลคาไลน์ (K และ Na) เป็นธาตุสำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดทั้งฟาวลิงและสแลกกิ้งโดยตรง

### ตารางที่ 1 ดัชนีเชื้อเพลิงและระดับความรุนแรง

ดัชนีเชื้อเพลิง		ระดับของความรุนแรง		
		ต่ำ	ปานกลาง	สูง
Base-acid ratio (B/A)	$(Fe_2O_3 + CaO + MgO + K_2O + Na_2O) / (SiO_2 + TiO_2 + Al_2O_3)$	<0.5	0.5-1.0	>1.0
Fouling index (FI)	$(B/A) \times (K_2O + Na_2O)$	<0.6	0.6-40	>40

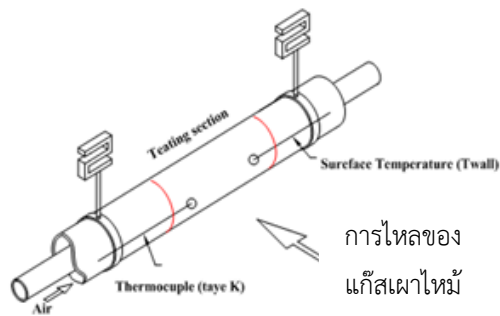
### 2.3 การวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยใช้เทคนิคเคมีคอลแฟลคชันเนชัน (Chemical fractionation)

รายละเอียดของวิธีการวิเคราะห์นี้ได้รายงานไว้ในงานวิจัยคณะผู้วิจัยที่ผ่านมา [15] โดยหลักการวิเคราะห์โดยสังเขปเป็นการสกัดทางเคมีโดยอาศัยการชะละลาย (Leaching) ของสารละลายตามลำดับความรุนแรงของการสกัดจากน้อยไปหามาก สำหรับองค์ประกอบของเชื้อเพลิงที่ละลายในน้ำและแอมโมเนียมอะซิเตต (Ammonium acetate) แสดงว่ามีสภาพการเคลื่อนย้าย (Mobility) สูง จึงมีแนวโน้มที่จะระเหยไปได้โดยง่ายระหว่างการเผาไหม้ และเป็นสาเหตุของการเกิดโคพิลิตและปัญหาฟาวลิง ส่วนองค์ประกอบที่ละลายในกรดไฮโดรคลอริกและคงเหลือในกากของแข็งเป็นส่วนที่จะไม่ระเหยไประหว่างการเผาไหม้แต่จะอยู่ในรูปของถ่านที่ยาบที่อาจทำให้เกิดปัญหาสแลกกิ้งได้

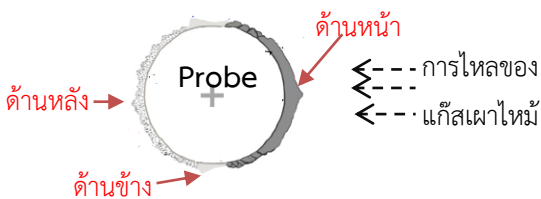
### 2.4 การทดลองเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขั้นบันได (Step grate-fired combustor)

ในงานวิจัยนี้ทำการทดลองการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบในอัตราส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับถ่านหิน

แอนทราไซด์ที่ร้อยละ 54 ของน้ำหนักฟางข้าว ซึ่งเป็นอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์ (Stoichiometric ratio) ที่ Al จากถ่านหินทำปฏิกิริยาได้พอดีกับ K จากฟางข้าว เปรียบเทียบกับการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบในอัตราส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) โดยศึกษาในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นบันไดขนาดพิกัด 150 kW<sub>th</sub> และท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองสำหรับการศึกษารูปการเกิดฟาวลิ่ง แสดงดังรูปที่ 1 โดยรายละเอียดของเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นบันไดและวิธีการทดลองสามารถศึกษาได้จากงานวิจัยของฐานิตย์และคณะ [16] เงื่อนไขการทดลองในการศึกษานี้แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งทุกการทดลองมีการอุ่นอากาศปฐมภูมิที่ 150°C



(ก) แผนภาพท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (Probe)



(ข) ตำแหน่งของเดโพลิตบน Probe ที่ถูกนำมาวิเคราะห์รูปที่ 1 ท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลองสำหรับการศึกษารูปการเกิดฟาวลิ่ง

การศึกษารูปการเกิดปัญหาฟาวลิ่งพิจารณาจากปริมาณเดโพลิตฟลักซ์ (Deposit flux) บนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง ส่วนการศึกษากลไกของการเกิดฟาวลิ่งจะพิจารณาจากลักษณะของเดโพลิต (deposit) ที่เกิดขึ้นและองค์ประกอบทางเคมีของเดโพลิตที่วิเคราะห์ด้วยการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) ร่วมกับ

เอ็กซ์เรย์สเปกโตรสโคปแบบกระจายพลังงาน (Energy disperse X-ray: EDX) ร่วมกับผลการวิเคราะห์แผนที่ธาตุ (Elemental mapping)

ตารางที่ 2 เงื่อนไขและข้อมูลสถานะการทดลองการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบ

ลำดับ	เงื่อนไขการทดลอง		ผลการทดลอง			
	แกลบ:ฟางข้าว (โดยน้ำหนัก)	$\lambda$	T1 (°C)	T2 (°C)	T <sub>Upsteam</sub> (°C)	Deposit Flux (g/m <sup>2</sup> h)
1	20:80 ร่วมกับถ่านหิน แอนทราไซด์ ร้อยละ 54	1.3 *	926	759	795	51
2	20:80 [16]	2.0	849	804	801	285

\* ปรับเปลี่ยนตามการเติมถ่านหินแอนทราไซด์

### 3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์

#### 3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเถ้าเชื้อเพลิง

ผลการวิเคราะห์เถ้าเชื้อเพลิงด้วยเครื่อง XRF แสดงผลดังตารางที่ 3 ในรูปออกไซด์ของธาตุองค์ประกอบต่างๆ

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าเชื้อเพลิงในรูปของออกไซด์

องค์ประกอบทางเคมีของเถ้า (wt%)	ชนิดเชื้อเพลิง		
	ฟางข้าว	แกลบ	ถ่านหินแอนทราไซด์
SiO <sub>2</sub>	71.40	90.50	43.30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.22	0.11	31.50
K <sub>2</sub> O	11.90	2.32	3.62
TiO <sub>2</sub>	0.01	0.00	0.63
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.07	10.60
CaO	3.17	0.59	3.30
MgO	2.04	0.58	1.39
Na <sub>2</sub> O	0.45	0.05	1.15
SO <sub>3</sub>	0.86	0.30	3.62
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.22	0.93	0.35
Cl	3.00	0.14	0

จากตารางที่ 3 พบว่าถ้าเชื้อเพลิงทั้งหมดมีซิลิกอน (Si) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยถ้าแกลบ ถั่วฟางข้าว และถั่วถ่านหินมีซิลิกอนร้อยละ 90.5, 71.9 และ 43.3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณาธาตุองค์ประกอบที่มีแนวโน้มก่อให้เกิดปัญหาฟาวลิงและสแลกกิ้ง พบว่าถั่วฟางข้าวมีโพแทสเซียมออกไซด์ ( $K_2O$ ) สูงถึงร้อยละ 11.9 แต่ปรากฏน้อยในถั่วแกลบและถั่วถ่านหินร้อยละ 2.32 และ 3.62 ตามลำดับ ส่วนคลอรีน (Cl) ในถั่วฟางข้าวมีสัดส่วนสูงถึงร้อยละ 3 แต่พบในถั่วแกลบน้อยมากและไม่ปรากฏในถั่วถ่านหิน ในขณะที่ถั่วถ่านหินมีเหล็กออกไซด์ ( $Fe_2O_3$ ) สูงถึงร้อยละ 10.60 ซึ่งเป็นออกไซด์ที่เป็นต่างชนิดหนึ่งที่สามารถก่อให้เกิดปัญหาการเผาไหม้ได้ สำหรับอะลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ซึ่งเป็นธาตุสำคัญชนิดหนึ่งที่มีแนวโน้มทำให้ถั่วมีจุดหลอมเหลวสูงและมีสมบัติเป็นสารเติมแต่งในการลดปัญหาฟาวลิงและสแลกกิ้งได้ มีสัดส่วนน้อยมากในถั่วฟางข้าวและถั่วแกลบ แต่พบในถั่วแอนทราไซต์ถึงร้อยละ 31.50 นอกจากนี้ ถั่วแอนทราไซต์ยังมีซัลเฟอร์ (S) ร้อยละ 3.62 ซึ่งมากกว่าในถั่วของฟางข้าวและแกลบ

### 3.2 ผลการวิเคราะห์เชื้อเพลิงโดยใช้ดัชนีเชื้อเพลิง

การพิจารณาแนวโน้มการเกิดฟาวลิงจากการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบในสัดส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับแอนทราไซต์ที่ร้อยละ 54 ของน้ำหนักฟางข้าว โดยใช้การคำนวณองค์ประกอบเชื้อเพลิงผสมด้วยการผสม (Mixing rule) จากนั้นจึงนำไปคำนวณค่าดัชนีเชื้อเพลิงต่างๆ แสดงผลดังตารางที่ 4 ทำให้สามารถวิเคราะห์แนวโน้มการเกิดปัญหาฟาวลิงได้ดังนี้

สำหรับ Base-acid ratio (B/A) พบว่าทั้งเชื้อเพลิงเดี่ยวและเชื้อเพลิงผสมมีค่า B/A อยู่ในช่วง 0.20-0.27 จึงจัดว่ามีแนวโน้มการเกิดฟาวลิงต่ำ แต่เมื่อพิจารณา Fouling index (FI) พบว่าเชื้อเพลิงทั้งหมดมีแนวโน้มการเกิดฟาวลิงปานกลางค่อนข้างต่ำ แต่เป็นที่น่าสนใจว่าแอนทราไซต์มีค่า FI เท่ากับ 1.27 ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาฟาวลิงได้เช่นเดียวเชื้อเพลิงฟางข้าวและแกลบในสัดส่วน

80:20 (โดยน้ำหนัก) แม้ว่าแอนทราไซต์มีส่วนของ  $K_2O$  ต่ำเพียง 3.62 แต่ค่าของ B/A สูงกว่า เนื่องจากมีสัดส่วนของ  $Fe_2O_3$  ที่สูงนั่นเอง ดังนั้น ทำให้การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวและแกลบในสัดส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับแอนทราไซต์ที่ร้อยละ 54 ของน้ำหนักฟางข้าว จึงมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาฟาวลิงระดับปานกลางจากการที่มี FI เท่ากับ 1.89

### ตารางที่ 4 ดัชนีเชื้อเพลิงของเชื้อเพลิงที่เกี่ยวข้อง

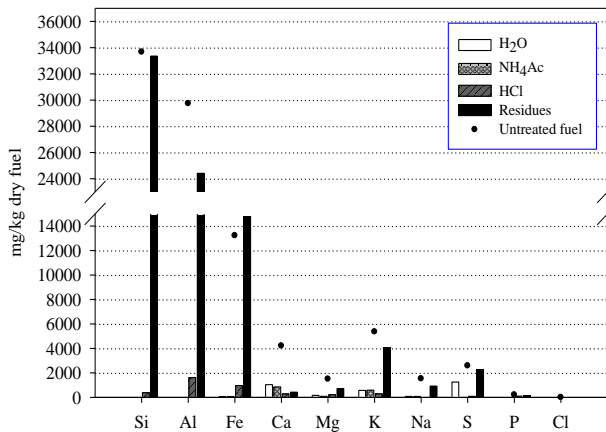
ดัชนีเชื้อเพลิง	ชนิดเชื้อเพลิง		
	ฟางข้าว:แกลบ (80:20)	แอนทราไซต์	เชื้อเพลิงผสม*
Base-acid ratio (B/A)	0.20 ต่ำ	0.27 ต่ำ	0.22 ต่ำ
Fouling index (FI)	2.04 ปานกลาง	1.27 ปานกลาง	1.89 ปานกลาง

\* เชื้อเพลิงผสม คือ ฟางข้าวและแกลบในสัดส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์ที่ร้อยละ 54 ของน้ำหนักฟางข้าว

### 3.3 ผลการประเมินแนวโน้มการฟาวลิงโดยใช้วิธีการเคมีคอลแฟลคชันเนชัน

สำหรับในงานวิจัยนี้จะแสดงเฉพาะผลการวิเคราะห์ของแอนทราไซต์ ดังรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงสัดส่วนของธาตุองค์ประกอบในเชื้อเพลิงในหน่วย mg/kg dry fuel และการละลายของธาตุองค์ประกอบในตัวทำละลายต่างๆ จากผลการทดลองจะเห็นว่าแอนทราไซต์มี Si, Al และ Fe เป็นองค์ประกอบหลัก โดย K, S และ Ca ที่สามารถละลายในน้ำและสารละลายแอมโมเนียมอะซิเตด ( $NH_4Ac$ ) ได้เพียงบางส่วน แสดงว่าธาตุองค์ประกอบเกือบทั้งหมดจะคงอยู่ในถ่านหิน มีเพียง K, S และ Ca บางส่วนที่มีสภาพการเคลื่อนย้ายสูง (high mobility) ที่จะระเหยเป็นไอไปในแก๊สเผาไหม้ นั่นคือ การเผาไหม้แอนทราไซต์จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาฟาวลิงอย่างแน่นอน ส่วน K ที่คงเหลืออยู่ในถ่านหินที่มีสัดส่วนเพียงเล็กน้อยก็ จะไม่ส่งผลให้เกิดปัญหาสแลกกิ้งแต่อย่างไร





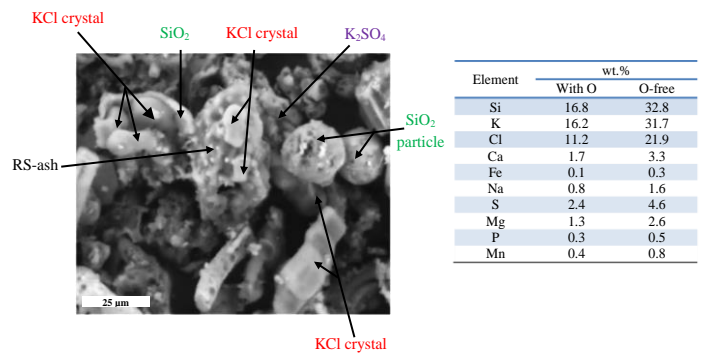
รูปที่ 2 สัดส่วนมวลของแต่ละองค์ประกอบในถ่านหินแอนทราไซต์จากการวิเคราะห์เคมีคอลแฟลคชันเนชัน

จากผลการประเมินแนวโน้มการเกิดฟาวลิงด้วยดัชนีเชื้อเพลิงบ่งชี้ว่าแอนทราไซต์จะก่อให้เกิดปัญหาฟาวลิงระดับปานกลางเช่นเดียวกับเชื้อเพลิงฟางข้าวและแกลบในสัดส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) แต่ผลที่ได้จากการเคมีคอลแฟลคชันเนชันแสดงให้เห็นว่าแอนทราไซต์จะไม่ก่อให้เกิดปัญหาฟาวลิง ทั้งนี้เมื่อพิจารณาพร้อมกับการศึกษาของคณะผู้วิจัยที่ผ่านมา [15,17] ที่แสดงให้เห็นว่าผลการวิเคราะห์จากวิธีการเคมีคอลแฟลคชันเนชันสอดคล้องกับผลจากการทดลองเผาไหม้เชื้อเพลิงจริงมากกว่าผลการวิเคราะห์ด้วยดัชนีเชื้อเพลิง ดังนั้น อาจกล่าวโดยสรุปได้ว่าการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบร่วมกับแอนทราไซต์จะไม่ทำให้เกิดปัญหาฟาวลิงที่รุนแรงมากขึ้น

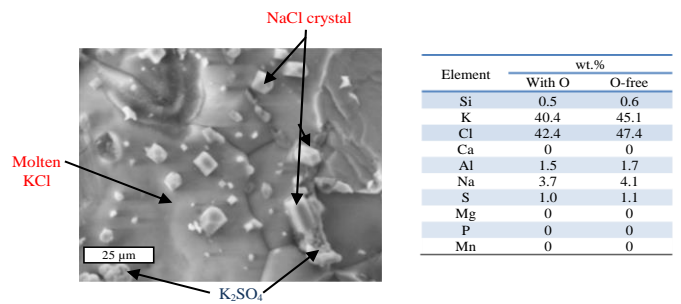
### 3.4 ผลการทดลองเผาไหม้ในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบชั้นบันได

เมื่อทำการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวและแกลบในสัดส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) ร่วมกับแอนทราไซต์ที่อัตราส่วนร้อยละ 54 ของน้ำหนักฟางข้าว พบว่ามีเดโพลิตฟลักซ์เท่ากับ  $51 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  ดังข้อมูลในตารางที่ 2 ขณะที่ผลการทดลองการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวและแกลบในสัดส่วน 80:20 (โดยน้ำหนัก) มีค่าเดโพลิตฟลักซ์สูงถึง  $285 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  [16] หรือเกิดปัญหาฟาวลิงอย่างรุนแรง จากผลการทดลองข้างต้นนี้แสดงให้เห็นว่าการ

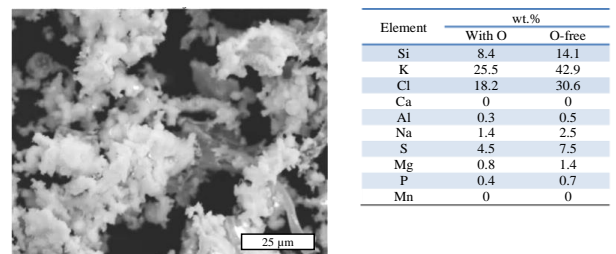
เผาไหม้ชีวมวลร่วมกับแอนทราไซต์ช่วยลดการเกิดเดโพลิตหรือปัญหาฟาวลิงได้อย่างชัดเจน เพื่อให้เข้าใจกลไกของการบรรเทาปัญหาฟาวลิงด้วยการเผาไหม้ชีวมวลร่วมกับแอนทราไซต์ จึงได้วิเคราะห์เดโพลิตด้วยเทคนิค SEM/EDX ที่เกิดขึ้นบนท่อไอน้ำร้อนยวดยิ่งจำลอง (Probe) ที่ตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ 1 (ข) โดยเปรียบเทียบกับเดโพลิตที่เกิดกรณีการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวและแกลบที่ไม่ผสมแอนทราไซต์ แสดงผลดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4



(ก) ด้านหน้า Probe



(ข) ด้านข้าง Probe



(ค) ด้านหลัง Probe

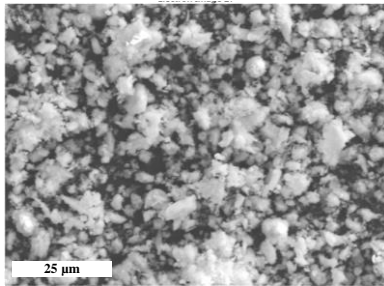
รูปที่ 3 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเดโพลิตจากการเผาไหม้ ฟางข้าว : แกลบ (80:20 โดยน้ำหนัก) วิเคราะห์โดย SEM-EDX (1,000 เท่า)

จากรูปที่ 3 เป็นการวิเคราะห์เดโพลิตจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟางข้าวและแกลบที่ไม่ผสมแอนทราไซต์พบว่าเดโพลิตแต่ละตำแหน่งบน Probe มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีโดยเดโพลิตด้านหน้า Probe ในรูปที่ 3 (ก) มีขนาดมากกว่า 25  $\mu\text{m}$  เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีองค์ประกอบหลักของคือ Si, K และ Cl รองลงมาคือ S และ Ca เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนโดยโมลของ  $(\text{K}+\text{Na})/(\text{2S}+\text{Cl})$  มีค่าประมาณ 0.98 (~1.0) แสดงว่า K และ Na ทั้งหมดอยู่ในรูปของ KCl และ NaCl เป็นส่วนใหญ่ (~70%) และ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  บางส่วน (~30%) จากปฏิกิริยาซัลเฟชัน (Sulphation) ของ KCl และ NaCl กับแก๊ส  $\text{SO}_2/\text{SO}_3$  [1-3,6] แสดงให้เห็นว่าทั้งกลไกการควบแน่นของ KCl และกลไกการปะทะโดยแรงเฉื่อย (inertial impaction) ของอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิง (RS-ash,  $\text{SiO}_2$ ) ขนาดใหญ่ [6] ต่างมีบทบาทต่อการเกิดเดโพลิตในกรณีนี้ โดยอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิงอาจถูกเคลือบด้วย KCl และ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  ในกระแสแก๊สแล้วมาเกาะติดที่ Probe หรือเกิดจาก KCl และ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  มาควบแน่นบนอนุภาคเถ้าที่ถูกดักจับไว้บน Probe ก่อนแล้วทำให้อนุภาคเถ้ามีความเหนียว (Sticky) ทำหน้าที่คล้ายกาวจึงสามารถยึดจับอนุภาคอื่นได้อีก จนก่อให้เกิดชั้นเดโพลิตที่หนามากขึ้น นอกจากนี้ จะเห็นได้ว่าเดโพลิตด้านหน้า Probe มีสัดส่วนของ K ประมาณร้อยละ 32 ซึ่งต่ำกว่าด้านข้างและด้านหลังที่มี K ประมาณร้อยละ 45 และ 43 ตามลำดับ เนื่องจากผลของการเจือจาง (Dilution) ด้วยอนุภาคของเถ้าเชื้อเพลิงซึ่งพิจารณาได้จากเดโพลิตมี Si ถึงประมาณร้อยละ 33

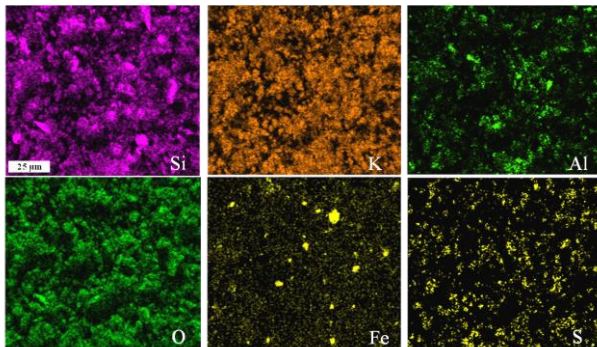
แต่ในขณะที่เดโพลิตด้านข้าง Probe ในรูปที่ 3 (ข) มีอัตราส่วนโดยโมลของ  $(\text{K}+\text{Na})/(\text{Cl})$  มีค่า ~1.0 นั่นคือ K และ Na เกือบทั้งหมดอยู่ในรูปของ KCl และ NaCl จากการควบแน่นแล้วหลอมตัวกันเป็นเนื้อเดียว เพราะเป็นสารประกอบที่จุดหลอมเหลวต่ำ ( $740^\circ\text{C}$ ) จึงมีลักษณะเป็นชั้นสีขาว โดยพบ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  อยู่เพียงเล็กน้อย และแทบไม่พบอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิงอยู่ สำหรับรูปที่ 3 (ค) เป็น

เดโพลิตด้านหลัง Probe ที่มีองค์ประกอบหลักคือ K ร้อยละ 42.9 และ Cl ร้อยละ 30.6 รองลงมาคือ Si และ S มีอัตราส่วนโดยโมลของ  $(\text{Na}+\text{K})/(\text{Cl}+\text{2S})$  เท่ากับ 0.91 นั่นคือ K และ Na ทั้งหมดอยู่ในรูปของ KCl และ NaCl เป็นส่วนใหญ่ และอาจมี  $\text{K}_2\text{SO}_4$  และ  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟชันเช่นเดียวกับเดโพลิตด้านหน้า Probe และจากลักษณะของเดโพลิตคาดว่าประกอบด้วยอนุภาคขนาดซึบไมครอน (Submicron) หรือแอโรซอลมาเกาะรวมกันลักษณะคล้ายเกล็ดหิมะที่กอง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการควบแน่นของไอของ KCl ที่ควบแน่นแบบเนื้อเดียวในกระแสแก๊สบริเวณรอบ Probe ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของ KCl แอโรซอลเหล่านี้ อาจถูกเหนี่ยวนำเข้าสู่บริเวณผิว Probe โดยกลไกเทอร์โมโฟริซิสซึ่งเป็นกลไกที่อาศัยแรงสุทธิที่กระทำต่ออนุภาคอันเนื่องมาจากผลของความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิแก๊สกับอุณหภูมิของผิว Probe นอกจากนี้การไหลวนด้านหลัง Probe ทำให้แอโรซอลไปเกาะติดอยู่รวมทั้งอนุภาคเถ้าเชื้อเพลิงขนาดเล็กที่มี Si เป็นองค์ประกอบหลัก ยืนยันได้จากที่พบว่ามี Si ร้อยละ 14.1 ในเดโพลิตส่วนนี้ และทำให้เดโพลิตมีสีขาวปนเทาตนเอง

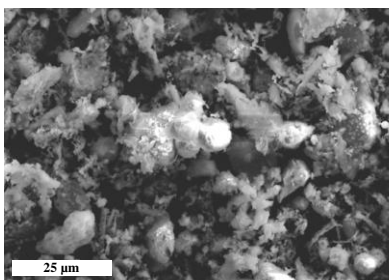
สำหรับรูปที่ 4 แสดงโครงสร้าง องค์ประกอบทางเคมี และแผนที่ธาตุของเดโพลิตจากการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบร่วมกับแอนทราไซต์ เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับรูปที่ 3 ในภาพรวมแล้วพบว่า 1) ลักษณะของเดโพลิตที่ส่วนใหญ่มีความละเอียดหรือขนาดเล็กกว่า 2) ธาตุองค์ประกอบหลักคือ Si, K, Al และ S รองลงมาคือ Fe ซึ่ง Al, Fe รวมถึง S เป็นองค์ประกอบหลักที่มาจากเถ้าของแอนทราไซต์ซึ่งพบน้อยมากจากเดโพลิตในรูปที่ 3 และที่น่าสนใจคือไม่ปรากฏ Cl อยู่เลย แต่กลับมีสัดส่วนของ S สูงมากขึ้น 3) ลักษณะของเดโพลิตในแต่ละตำแหน่งของ Probe มีลักษณะและองค์ประกอบใกล้เคียงกัน 4) Fe ที่พบอยู่ในรูปของ  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  จึงทำให้เดโพลิตมีสีแดงปนน้ำตาล



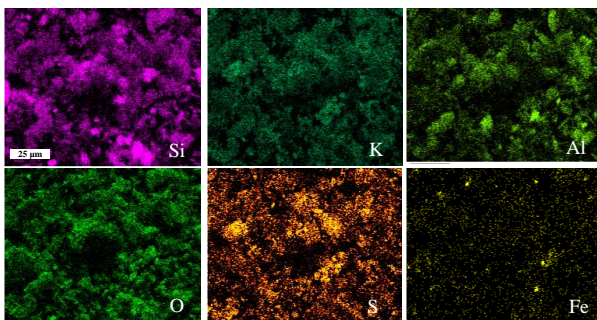
Element	wt. %	
	With O	O-free
Si	10.4	22.3
K	19.8	42.6
Cl	0	0
Ca	0	0
Al	6.4	13.7
Na	0.7	1.4
Mg	0.4	0.9
P	0	0
Fe	2.1	4.6
Mn	0	0
S	6.8	14.6



(ก) ด้านหน้า Probe



Element	wt. %	
	With O	O-free
Si	12.8	29.2
K	15	34.2
Cl	0	0
Ca	1.2	2.7
Al	7.3	16.8
Na	0.4	1.0
Mg	0.9	2.0
P	0.4	1.0
Fe	1.2	2.7
Mn	0	0
S	4.5	10.4



(ข) ด้านหลัง Probe

รูปที่ 4 โครงสร้างและแผนที่ธาตุของเดโพลิตที่จากการเผาไหม้ ฟางข้าว : แกลบ (80:20 โดยน้ำหนัก) ร่วมกับแอนทราไซต์ที่ร้อยละ 54 ของน้ำหนักฟางข้าว วิเคราะห์โดย SEM-EDX (1,000 เท่า)

รูปที่ 4 (ก) เป็นเดโพลิตบริเวณด้านหน้า Probe ส่วนใหญ่ประกอบด้วย Si, K, Al และ S เมื่อเปรียบเทียบกับองค์ประกอบของเดโพลิตของรูปที่ 3 (ก) พบว่ามี K และ

S ในสัดส่วนร้อยละ 42.6 และ 14.6 ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าอย่างชัดเจน และไม่ปรากฏ Cl หรือไม่มีสารประกอบ KCl ในเดโพลิตเลย ซึ่งถ้าเป็นอย่างนั้นแล้วเมื่อไม่มี KCl ที่ทำหน้าที่เหมือนกาวที่ดักจับอนุภาคต่างๆ ได้จึงควรมีเดโพลิตเกาะติดบน Probe น้อยมาก แต่กลับพบว่าเดโพลิตฟลักซ์สูงถึง  $51 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  แสดงว่าเดิมทีนั้นมีสารประกอบ KCl ที่มาควบแน่นบน Probe หรือควบแน่นบนเก้าอี้เพลิงแล้วมาปะทะเกาะติดที่ Probe ในปริมาณพอสมควรมาก่อน ซึ่งน่าจะเป็น KCl ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาซัลเฟชันและไม่ได้ทำปฏิกิริยากับสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตในเก้าอี้ถ่านหิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับถ่านพีท [10-11] ที่ยังคงพบแก๊ส KCl ในกระแสแก๊สจากการเผาไหม้ จากนั้น KCl (l,s) จึงเปลี่ยนเป็น  $\text{K}_2\text{SO}_4$  ด้วยปฏิกิริยาซัลเฟชันในเวลาต่อมา [10] เมื่อพิจารณาจากอัตราส่วนโดยโมลของ  $(\text{K}+\text{Na})/2\text{S}$  มีค่าเป็น 1.26 แสดงว่าปริมาณซัลเฟอร์ไม่เพียงพอต่อการทำปฏิกิริยาซัลเฟชันกับ KCl และ NaCl ได้อย่างสมบูรณ์ แม้ว่าจะได้ S เพิ่มจากแอนทราไซต์ที่มีสัดส่วนของ S มากกว่าชีวมวลดังแสดงในตารางที่ 3 ขณะที่อัตราส่วนโดยโมลของ  $(\text{K}+\text{Na})/(2\text{S}+\text{Al})$  มีค่าเท่ากับ 0.81 แสดงให้เห็นว่ามีการทำปฏิกิริยาของ KCl กับสารประกอบอลูมิเนียมซิลิเกตในเก้าอี้ถ่านหินร่วมกับด้วยเปลี่ยนเป็นสารประกอบ K-Al-Silicate แล้วมาปะทะเกาะติดที่ Probe ซึ่งสอดคล้องกับแผนที่ธาตุของเดโพลิตในรูปที่ 4 (ก) ที่เห็นได้ว่าการกระจายของ Si, Al และ K ซ้อนทับกันอยู่ทั่วไป อีกทั้งยังพบการซ้อนทับกันของ K และ S จากสารประกอบ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  กระจายอยู่เช่นเดียวกัน ซึ่งคาดว่าเกิดจากการควบแน่นของแอมโมเนียของ  $\text{K}_2\text{SO}_4$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาซัลเฟชันของ KCl ท่ามกลางกระแสแก๊สเผาไหม้ (Homogeneous sulphation) และปฏิกิริยาซัลเฟชันของ KCl ที่ควบแน่นบน Probe (Heterogeneous sulphation) ดังนั้น เดโพลิตบริเวณด้านหน้า Probe นี้จึงประกอบด้วย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  เป็นส่วนใหญ่วิ่งร่วมกับอนุภาคเก้าอี้ถ่านหินที่ได้ทำปฏิกิริยากับ KCl



เปลี่ยนเป็น K-Al-Silicate ส่วนเดโพลิตด้านข้าง Probe เป็นชั้นที่บางมากจนไม่สามารถเก็บตัวอย่างไปวิเคราะห์ได้ สำหรับเดโพลิตด้านหลัง Probe ในรูปที่ 4 (ข) องค์ประกอบด้วยจากอนุภาคเถ้าแอนทราไซต์ที่ได้ทำปฏิกิริยากับ KCl (K-Al-Silicate) ที่กระจายอยู่ร่วมกับ  $K_2SO_4$  และไม่ปรากฏ Cl เช่นเดียวกันกับเดโพลิตบริเวณด้านหน้า Probe โดยมีการเปลี่ยนแปลงของ K, Cl และ S เช่นเดียวกับเดโพลิตด้านหน้า Probe ที่ได้อธิบายไว้แล้ว จากนั้นแอรซอลที่เกิดขึ้นและอนุภาคเถ้าแอนทราไซต์ทำปฏิกิริยาแล้วจะถูกส่งไปเกาะติด Probe ด้วยกลไกเทอร์โมฟิสิกส์และจากการไหลวนของกระแสแก๊สตามที่เคยได้กล่าวไว้แล้ว นอกจากนี้ การที่เดโพลิตที่เกิดจากการเผาไหม้ร่วมกับแอนทราไซต์มีเฉพาะ  $K_2SO_4$  และไม่ปรากฏ KCl จึงมีข้อดีที่  $K_2SO_4$  ไม่มีสมบัติการกัดกร่อนเหมือน KCl [6,10-11] ดังนั้น แม้ว่าจะมีเดโพลิตฟลักซ์มากกว่ากรณีการใช้กาลิน ( $29 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ ) [18] แต่การเผาไหม้ร่วมกับแอนทราไซต์สามารถลดการกัดกร่อนที่อาจเกิดขึ้นกับท่อไอน้ำได้

#### 4. สรุปผลการทดลอง

(1) การวิเคราะห์ด้วยวิธีการเคมีคอลแฟลคชันเนชัน พิสูจน์ให้เห็นว่าสามารถใช้บ่งชี้ธาตุที่จะเกิดเป็นสารประกอบในเถ้าและสารประกอบที่จะระเหยไประหว่างการเผาไหม้ได้อย่างดี และสอดคล้องกับผลการทดลองการเผาไหม้มากกว่าการใช้ดัชนีเชื้อเพลิง โดยแสดงให้เห็นว่าเถ้าถ่านหินแอนทราไซต์มี Al สูงซึ่งเป็นคุณลักษณะเป็นสารเติมแต่งได้ดีและไม่ก่อให้เกิดปัญหาฟาวลิงที่รุนแรงมากขึ้น

(2) การเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์สามารถลดเดโพลิตฟลักซ์เหลือเพียง  $51 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$

(3) กลไกการแก้ปัญหาฟาวลิงด้วยวิธีการเผาไหม้ร่วมกับถ่านหินแอนทราไซต์เป็นผลมาจากปฏิกิริยาของเถ้าถ่านหินแอนทราไซต์กับ KCl ทำให้เกิดเป็นสารประกอบ K-Al-Silicate และปฏิกิริยาซัลเฟชันของ

KCl ทำมากลางกระแสแก๊สเผาไหม้ (Homogeneous sulphation) และปฏิกิริยาซัลเฟชันของ KCl ที่ควบแน่นบน Probe (Heterogeneous sulphation)

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจาก ฝ่ายบริหารคณบดีและโปรแกรมวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

#### 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Jensen, P.A., Stenholm M., Hald P. (1997). Deposition investigation in straw-fired boilers, *Energy Fuel*, vol. 11, pp. 1048-1055.
- [2] Hansen, L.A., Nielsen, H.P., Frandsen, F.J., Dam-Johansen, K., Horlyck, S., Karlsson, A. (2000). Influence of deposit formation on corrosion at a straw-fired boiler, *Fuel Processing Technology*, vol. 64, pp. 189-209.
- [3] Madhiyanon, T., Sathitruangsak, P., Sungworagarn, S., Pipatmanomai, S., and Tia, S. (2012). A pilot-scale investigation of ash and deposition formation during oil-palm empty-fruit-bunch (EFB) combustion, *Fuel Processing Technology*, vol. 96, pp. 250-264.
- [4] Davidsson, K.O., Åmand, L.-E., Steenari, B.-M., Elled, A.-L., Eskilsson, D., Leckner, B. (2008). Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler, *Chemical Engineering Science*, vol. 63 (21), pp. 5314-5329.
- [5] Wang, L., Skreiberg, Ø., Becidan, M. (2014). Investigation of additives for preventing ash fouling and sintering during barley straw combustion, *Applied Thermal Engineering*, vol. 70(2), pp. 1262-1269.

- [6] Wu, H., Glarborg, P., Frandsen, F.J., Dam-Johansen, K., Jensen, A.D. (2011). Dust-Firing of Straw and Additives: Ash Chemistry and Deposition Behavior, *Energy Fuels*, vol. 25(7), pp. 2862-2873.
- [7] Konsomboon, S., Pipatmanomai. S., Madhiyanon. T., Tia, S. (2011). Effect of kaolin addition on ash characteristics of palm empty fruit bunch (EFB) upon combustion, *Applied Energy*, vol. 88(1), pp. 298-305.
- [8] Sommersacher, P., Brunner, T., Obernberger I., Kienzl N., Kanzian, W. (2013). Application of Novel and Advanced Fuel Characterization Tools for the Combustion Related Characterization of Different Wood/Kaolin and Straw/Kaolin Mixtures, *Energy Fuels*, vol. 27 (9), pp. 5192–5206.
- [9] Vamvuka, D., Pitharoulis, M., Alevizos, G., Repouskou, E., Pentari, D. (2009). Ash effects during combustion of lignite/biomass blends in fluidized bed, *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 2662–2671.
- [10] Kassman. H., Pettersson, J., Steenari, B-M., Åmand, L-E. (2013). Two strategies to reduce gaseous KCl and chlorine in deposits during biomass combustion-injection of ammonium sulphate and co-combustion with peat, *Fuel Processing Technology*, vol. 105, pp. 170-180.
- [11] Khalil, R. A., Houshfar, E., Musinguzi, W., Becidan†, M., Skreiberg, Ø., Goile, F., Løvås, T., Sørum, L. (2011). Experimental Investigation on Corrosion Abatement in Straw Combustion by Fuel Mixing, *Energy Fuels*, 2011, vol. 25 (6), pp 2687–2695.
- [12] Xue, Z., Zhong, Z., Zhang, B., Zhang, J., Xie, X. (2017). Potassium transfer characteristics during co-combustion of rice straw and coal, *Applied Thermal Engineering*, vol. 124, pp. 1418-1424.
- [13] Garcia-Maraver A., Mata-Sanchez J., Carpio M., A. Perez-Jimenez J., (2017), Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency, *Journal of the Energy Institute*, vol. 90, pp. 214-228.
- [14] Theis M., Skrifvars B.-J., Zevenhoven M., Hupa M., and Tran H., (2006), Fouling tendency of ash resulting from burning mixtures of biofuels. Part 3: influence of probe surface temperature, *Fuel*, vol. 85, pp. 2002–2011.
- [15] ธรรมนูญ อุดมมัน, ประวิทย์ สิงห์โตทอง, ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2560). การศึกษาข้อมูลพื้นฐานของการเผาไหม้ของฟางข้าว แกลบ และถ่านหินปิทูมินัส : แนวโน้มการเกิดปัญหาจากเปลี่ยนแปลงของเถ้าเชื้อเพลิงในขณะการเผาไหม้, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16, จังหวัดเชียงใหม่
- [16] ฐานิตย์ เมธิยานนท์, สราวุฒิ สังวรกาญจน์ (2560). ผลของการอุ่นอากาศที่ใช้เผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในเตาเผาไหม้ตะกรับต่อการเกิดฟาวลิ่งบนท่อไอน้ำร้อนยิ่งยวด, การประชุมวิชาการเรื่องการถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 16, จังหวัดเชียงใหม่
- [17] ธรรมนูญ อุดมมัน, ประสาน สถิตย์เรืองศักดิ์ และ ฐานิตย์ เมธิยานนท์ (2562). การประเมินแนวโน้มการเกิดสแลกกิ้งและฟาวลิ่งจากการเผาไหม้ฟางข้าวและแกลบ, การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวลในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 18, จังหวัดกระบี่
- [18] ฐานิตย์ เมธิยานนท์, สราวุฒิ สังวรกาญจน์, รัตติกาล สมัน (2562). ศึกษาการแก้ปัญหาการเกาะของอนุภาคบนท่อไอน้ำร้อนยิ่งยวดซึ่งจำลองจากการเผาไหม้ฟางข้าวร่วมกับแกลบในเตาเผาไหม้ตะกรับแบบขึ้น, การประชุมวิชาการเรื่อง การถ่ายเทพลังงานความร้อนและมวล ในอุปกรณ์ด้านความร้อนและกระบวนการ ครั้งที่ 18, จังหวัดกระบี่