Abstract

This Project Report presents the experimental studies on firing of Thai oil palm residues – palm kernel shell (PKS) and empty fruit bunch (EFB) – in a fluidized-bed combustor with a cone-shaped bed (referred to as 'conical FBC') using alternative bed materials, such as alumina sand, dolomite, and limestone, to prevent bed agglomeration. To extend awareness of fuel properties, morphological and thermogravimetric characteristics of the two biomasses were investigated at the first stage of the Project. As revealed by the morphological and thermogravimetric studies, the two biomasses had excellent combustion properties and a great potential as a feedstock for heat and power generation. With thinner cell walls, greater porosity, higher content of cellulose, and lower burnout temperature, EFB exhibited higher thermal and combustion reactivity compared to PKS.

Prior to the main combustion study, preliminary experimental tests on firing peanut and tamarind shells (less problematic biomass fuels compared to the selected oil palm residues) when using alumina sand as the bed material were performed to assess the combustion and emission performance of the conical FBC, and the potential of alumina sand to prevent bed agglomeration. During the combustion of peanut and tamarind shells, experimental tests were conducted at a fuel feed rate of 60 kg/h and 45 kg/h, respectively, with excess air of 20–80%. Temperature and gas concentrations were measured in radial and axial directions inside the reactor and at stack. The axial temperature and gas concentration profiles in the combustor showed sensible effects of fuel properties and operating conditions on the combustion and emission performance. High (~99%) combustion efficiency and acceptable levels of CO, C_xH_y, and NO emissions can be achieved when firing peanut shells at excess air of about 40%, whereas 60% is more preferable for burning tamarind shells. During all preliminary tests, the combustor showed no features of bed agglomeration.

A special test series was then performed with the aim to investigate the effects of biomass particle size and operating conditions on combustion and emission performance of the conical FBC using alumina sand as the bed material, when firing palm kernel shell of different mean particle sizes (1.5 mm, 4.5 mm, 7.5 mm, and 10.5 mm). During the tests, PKS was burned at a 45 kg/h feed rate, when varying excess air from 20% to 80%. The experimental results revealed that the CO and C_xH_y emissions can be effectively controlled by decreasing the feedstock particle size and/or increasing excess air, whereas the NO emission can be mitigated using coarser biomass particles and/or lower excess air. A cost-

based approach was applied to determine the optimal values of biomass particle size and excess air, ensuring minimum emission costs of burning PKS in this combustor. From the optimization analysis, the best combustion and emission performance of the conical FBC is achievable when burning PKS with a mean particle size of about 5 mm at excess air of 40–50%. Under these conditions, the combustor can be operated with high (99.4–99.7%) combustion efficiency, while controlling the gaseous emissions at acceptable levels.

During the main combustion experiments, PKS and EFB were burned at similar heat input to the combustor (~200 kW_{th}) with excess air within 20–80% when using alumina sand, dolomite, and limestone as the bed material. In each test run, temperature and gas concentrations were monitored along the axial direction inside the reactor as well as at stack. To achieve high (~99%) combustion efficiency and acceptable CO and NO emissions, excess air of about 40% should be applied when burning EFB and PKS in a fluidized bed of alumina, whereas 60% excess air is more suitable with limestone and dolomite.

Special attention was given to the behavior (condition) of each bed material in long-term combustor operation. Physical and chemical conditions of the bed materials and particulate matter (PM) were examined at different operating times using SEM−EDS and XRF techniques, as well as a particle size analyzer. When using alumina sand as the bed material, an interaction between alumina grains and fuel char/ashes results in formation of a coating on the grain surfaces, generally consisting of ash-related elements (K, Si, and Ca), with the contents increasing in the bed composition with time. Collisions and attrition of bed grains lead to generation of Al-rich fine particles carried over from the combustor as part of PM, thus causing a substantial time-domain decrease of Al_2O_3 in the bed. This gradual diminishing of Al_2O_3 accompanied by the increasing of ash-related K_2O, SiO_2, and CaO in the used/reused bed material enhances the risk of bed agglomeration in long-term operation.

The use of limestone/dolomite results in a quite weak interaction between the bed materials and fuel chars/ashes, thus leading to an insignificant accumulation of ash-related elements and compounds in the bed. Calcination, attrition, and breakage of limestone and dolomite grains into fine particles in the fluidized bed lead to a substantial carryover of some of the bed material from the reactor, and, consequently, result in a gradual decrease of the bed weight with time. Additional fresh limestone/dolomite is therefore required to provide the continuous/recurrent substitution of the lost bed material in long-term combustor operation.

Keywords: Oil palm residues; Conical fluidized-bed combustor; Alternative bed materials, Emissions; Combustion efficiency; Bed agglomeration prevention.

บทคัดย่อ

โครงงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลองการเผาไหม้วัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน ได้แก่ กะลาปาล์ม และทะลายปาล์ม ในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบทรงกรวยที่ใช้วัสดุเบดทางเลือก ได้แก่ ทรายอะลูมินา โดโลไมต์ และหินปูน เพื่อป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบด ก่อนทำการทดลองการเผาไหม้ในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบด ได้มีการนำเชื้อเพลิงไปตรวจสอบหาคุณสมบัติทางกายภาพคุณสมบัติทางความร้อน จากการตรวจสอบพบว่า วัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมันทั้งสองชนิดมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการเผาไหม้เพื่อการใช้ในการผลิตพลังงาน เมื่อเปรียบกันระหว่างเชื้อเพลิงทั้งสองแล้ว เห็นได้ว่าปาล์มน้ำมันมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางความร้อนที่ดีกว่ากะลาปาล์ม เนื่องจากมีผนังของเซลล์ที่บางกว่าและมีปริมาณของ เซลลูโลส ที่สูงกว่า ซึ่งทำให้มีความไวต่อการเผาไหม้ที่ดีกว่า

ก่อนทำการเผาไหม้ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน ได้มีการทำการทดลองเผาไหม้เปลือกถั่วลิสงและเปลือกมะขามในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบทรงกรวยโดยใช้ทรายอะลูมินาเป็นวัสดุเบด เพื่อทำการประเมินสมรรถนะการเผาไหม้และการปลดปล่อยมลพิษของเตาเผา และทดสอบความสามารถในการป้องกันการเกาะตัวกันของวัสดุเบดของทรายอะลูมิน่า โดยการทดลองถูกทดลองที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 60 kg/h และ 45 kg/h และทำการควบคุมอากาศส่วนเกินให้อยู่ที่ช่วง 20% ถึง 80% มีการวัดอุณหภูมิและความเข้มของก๊าซมลพิษในแนวรัศมีและแกนกลางของเตาเผา และที่ปลายปล่องไอเสีย จากผลการทดลองพบว่า คุณสมบัติของเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงานของเตามีผลกระทบต่อพฤติกรรมการกระจายตัวของอุณหภูมิและก๊าซมลพิษ และยังส่งผลต่อประสิทธิภาพการเผาไหม้และการปล่อดปล่อยมลพิษด้วย เมื่อทำการเผาไหม้ หากทำการเผาไหม้เปลือกถั่วลิสงที่อากาศส่วนเกิน 40% และทำการเผาไหม้เปลือกมะขามที่ 60% อากาศส่วนเกิน ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาอยู่ที่ประมาณ 99% และมีการปลดปล่อย CO C_xH_y และ NO อยู่ในระดับต่ำ นอกจากนี้ ไม่พบการเกาะตัวกันของวัสดุเบดเกิดขึ้นระหว่างการทดลอง

ได้มีการทดสอบเพื่อทำการศึกษาผลของขนาดเชื้อเพลิงและสภาวะการทำงานต่อสมรรถนะการทำงานของเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดทรงกรวยที่ใช้ทรายอลูมินาเป็นวัสดุเบด การทดลองนี้ได้ใช้กะลาปาล์มที่มีขนาดต่างกัน ได้แก่ 1.5 mm 4.5 mm 7.5 mm และ 10.5 m เป็นเชื้อเพลิงในการทดสอบ ในการทดสอบนี้ มีการควบคุมการป้อนเชื้อเพลิงในอัตรา 45 kg/h และอากาศส่วนอยู่ระหว่าง 20% ถึง 80% ผลการทดสอบชี้ให้เห็นว่าการปลดป่อย CO และ C_xH_y สามารถถูกควบคุมให้อยู่ในระดับต่ำได้ด้วยการลดขนาดของเชื้อเพลิงหรือเพิ่ม

ปริมาณอากาศส่วนเกิน แต่ขณะที่ NO จะมีพฤติกรรมในทางตรงกันข้าม ก็คือจะมีการปลดปล่อยลดลง ก็ต่อเมื่อมีการใช้เชื้อเพลิงที่มีขนาดใหญ่และอากาศส่วนเกินปริมาณน้อย มีการใช้วิธีการ cost-based approach เพื่อหาจุดเหมาะสมของสภาวะการทำงานและขนาดเชื้อเพลิงที่เหมาะสมกับการเผาไหม้ จากวิธีการนี้พบว่า ขนาดเชื้อเพลิงที่ประมาณ 5 mm และอากาศส่วนเกินที่ 40–50% สามารถทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเตาเผาดีที่สุด และนอกจากนี้ยังสามารถควบคุมการปลดปล่อยมิลพิษให้อยู่ในปริมาณที่ต่ำได้ จากการทดลองนี้ ไม่พบว่า เกิดการจับตัวกันของวัสดุเบด

การทดสอบหลักของโครงการวิจัยนี้คือการเผาไหม้กะลาปล์มและทะลายปาล์มในเตาเผาฟลูอิไดซ์เบดแบบทรงกรวยที่มีการใช้วัสดุเบดทางเลือกได้แก่ ทรายอะลูมิน่า โดโลไมต์ และหินปูน เพื่อป้องกันการจับตัวกันของวัสดุเบด โดยการทดสอบได้มีการควบคุมปริมาณความร้อนป้อนของเตาเผาให้มีขนาดเท่ากันคือประมาณ 200 kW_{th} และควบคุมอากาศส่วนเกินที่ 20–80% ในทุกๆการทดลอง มีการวัดอุณหภูมิและความเข้มของก๊าซมลพิษในแนวแกนกลางของเตาเผาและที่ปลายปล่องไอเสีย จากการทดลองพบว่าเตาเผาสามารถเผาไหม้ให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ 99% และการปลดปล่อย CO และ NO ในปริมาณต่ำ หากมีการควบอากาศส่วนเกินที่ 40% เมื่อใช้ทรายอะลูมิน่า และ 60% อากาศส่วนเกิน เมื่อใช้โดโลไมต์และหินปูน

นอกจากนี้หลังจากการทำการทดลองเสร็จสิ้น ได้มีการตรวจสอบสภาวะของวัสดุเบดที่ใช้สำหรับการทดลอง โดยมีการใช้วิธี SEM–EDS และ XRF techniques เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุเบดและเถ้าลอยหรือฝุ่นละออง นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบหาขนาดเฉลี่ยของวัสดุเบดหลังการทดลองอีกด้วย สำหรับการใช้ทรายอูลูมิน่าเป็นวัสดุเบดพบว่า ผิวของทรายถูกเคลือบด้วยชั้นบางๆ ซึ่งเกิดจาการทำปฏิกิริยากับเถ้าลอย โดยชั้นที่ถูกพบนี้ประกอบไปด้วยธาตุทางเคมีที่เหมือนกับที่มีอยู่ในเถ้าของเชื้อเพลิงอันได้แก่ K Si และ Ca และถูกพบว่า มีการเพิ่มปริมาณขึ้นตามระยะเวลาการทดลอง แต่เนื่องจากในระหว่างการเผาไหม้ มีการชนกันของอนุภาคอย่างรุ่นแรงทำให้เกิดการแตกหรือหลุดออกของชั้นเคลือบเหล่านี้ และทำให้เม็ดทรายแตกออก เป็นผลให้มีการสร้างฝุ่นหรือเศษของฝุ่นที่มีส่วนประกอบของ Al สูง และเนื่องจากขนาดและน้ำหนักที่เบาของเศษผงฝุ่นเหล่านี้ ทำให้ถูกพัดพาออกจากเตาเผา และทำให้ Al_2O_3 ในวัสดุเบดลดลง การลดลงของ Al_2O_3 และการเพิ่มขึ้นของ SiO_2 และ CaO อาจทำให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดการเกาะตัวกันของวัสดุเบดหากมีการใช้วัสดุเบดนี้เป็นเวลานาน

จากการใช้หินปูน/โดโลไมต์ พบว่า วัสดุเบดกับเถ้าของเชื้อเพลิงมีการทำปฏิกิริยากันน้อยมาก ซึ่งสามารถยืนยันได้โดยปริมาณการสะสมของเถ้าในวัสดุเบด แต่อย่างไรก็ตามการเกิด calcination การผุก่อน

และการแต่ของพวกหินปูนและโดโลไมต์ เป็นสาเหตุสำคัญที่ให้วัสดุเบดทั้งสองขนาดเล็กลงและมีส่วนประกอบเป็นฝุ่นเล็กๆเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก จนเป็นผลทำให้เกิดการหลุดลอยของฝุ่นเหล่านั้นออกไปกับเถ้าลอยในระหว่างการเผาไหม้ ซึ่งทำให้น้ำของวัสดุเบดค่อยๆ ลดลงตามระยะเวลาของการทดลอง ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการเติมวัสดุเบดเข้าไปในระหว่างช่วงเวลาของการทดลองเพื่อให้การทดลองการเผาไหม้เป็นไปอย่างราบเรียบตลอดการทดลอง

คำสำคัญ: วัสดุเหลือใช้จากปาล์มน้ำมัน เตาเผาฟลูอิไดซ์เบดทรวงกรวย วัสดุเบดทางเลือก มลพิษ ประสิทธิภาพการเผาไหม้ การป้องกันการจับตัวของวัสดุเบด