

การกรองอนุภาคฝุ่นในแก๊สเตาผลิตด้วยเครื่องกรองแก๊สแบบเม็ดชนิดชั้นการกรองหมุนเวียน

Filtration of Dust Particulates in Producer Gas with a Circulating Granular Moving Bed Gas Filter

จตุรงค์ แป้นพงษ์¹

Received: July, 2015; Accepted: August, 2015

บทคัดย่อ

จุดประสงค์ของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของขนาดและอัตราการไหลของทรายที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคและความดันลดของเครื่องกรองแก๊สแบบเม็ดชนิดชั้นการกรองหมุนเวียน ในงานวิจัยนี้ ใช้เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแบบไหลลงผลิตแก๊สจากเศษไม้ โดยการดักจับอนุภาคในแก๊สเตาผลิตด้วยเครื่องกรองแบบเม็ดที่มีตัวกลางกรองเป็นทรายหมุนเวียนกลับมาใช้งานตลอดเวลา โดยทรายที่ใช้ในงานวิจัยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.300 - 0.600 0.600 - 1.160 และ 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของทราย 2 4 และ 8 กรัมต่อนาที จากการทดลองพบว่าประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคและความดันลดภายในเครื่องกรองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทรายมีขนาดเล็กและอัตราการไหลต่ำ และประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคและความดันลดภายในเครื่องกรองมีค่าลดลง เมื่อขนาดและอัตราการไหลของทรายเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในแก๊สเตาผลิตสูงสุดร้อยละ 92.16 ที่ขนาดทราย 0.300 - 0.600 มิลลิเมตร และอัตราการไหลทราย 2 กรัมต่อนาที และความดันลดภายในเครื่องกรองมีค่าน้อยที่สุด 46.61 นิวตัน/เมตร² ที่ขนาดทราย 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร และอัตราการไหลทราย 8 กรัมต่อนาที

คำสำคัญ : แก๊สซิฟิเคชัน; เครื่องกรองแก๊สแบบเม็ด; ประสิทธิภาพการดักจับ; ตัวกลางกรอง

¹ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ตาก
E-mail: jaturong_p@yahoo.com

Abstract

The aim of research was to study the influence of the sand size and mass flow rate on the collection efficiency of a circulating granular moving bed gas filter and the pressure drop across the filter. In this research, the experimental were carried out in down draft gasifier which produces the producer gas from wood chip. The collection efficiency and pressure drop of a circulating granular moving bed filter were investigated at three filter media size of 0.300 - 0.600 0.600 - 1.160 and 1.160 - 2.360 mm, and three different filter media mass flow rate of 2 4 and 8 kg/min. The results showed that the pressure drop and the collection efficiency increased with the decrease of the mass flow rate and the size of the filter media. In addition, the maximum collection efficiency of the filter was 92.16% which occurred when applying the sand size and the mass flow rate of 0.300 - 0.600 mm and 2 kg/min, respectively, and the minimum pressure drop across the filter was 46.61 N/m² which occurred when applying the sand size and the mass flow rate of 1.160 - 2.360 mm and 8 kg/min, respectively.

Keywords: Gasification; Granular Gas Filter; Collection Efficiency; Filter Media

บทนำ

ในปัจจุบันวิกฤตการณ์การขาดแคลนพลังงานและปัญหาสิ่งแวดล้อม จำเป็นที่ต้องหาแหล่งพลังงานสำรองอื่น ๆ ขึ้นมาทดแทนพลังงานจากซากฟอสซิล แหล่งพลังงานทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจคือ การนำพลังงานจากชีวมวล (Biomass Energy) ซึ่งเป็นพลังงานหมุนเวียน (Renewable Energy) มาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดยชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรกรรม ได้แก่ แกลบ ชังข้าวโพด และเห้งมันสำปะหลัง มาผลิตเป็นเชื้อเพลิงแก๊สด้วยกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification Process) เชื้อเพลิงแก๊สที่ได้เรียกว่า แก๊สเตาผลิต (Producer Gas) สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ได้ การนำแก๊สเตาผลิตไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ จำเป็นต้องกำจัดสิ่งเจือปนออกก่อน เพราะสิ่งเจือปนเหล่านี้ทำให้เกิดความเสียหายแก่ชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ได้ ปริมาณของน้ำมันดินและอนุภาคฝุ่นผงในแก๊สเตาผลิตที่ยอมรับได้สำหรับนำไปใช้ในเครื่องยนต์เบนซินและดีเซลต้องมีค่าไม่เกิน 50 mg/Nm³ (Baker, E.G. et al., 1986) โดยทั่วไปการกำจัดอนุภาคฝุ่นผงที่เจือปนในแก๊สเตาผลิตใช้ไซโคลนและสครับเบอร์ ซึ่งไซโคลนยังมีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคขนาดใหญ่ได้ดี แต่มีประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 ไมโครเมตรต่ำมาก และไม่สามารถใช้ได้อกับอนุภาคที่มีลักษณะเหนียวและเป็นเส้นใย ส่วนสครับเบอร์นั้นสามารถทำงานด้วยประสิทธิภาพการดักจับสูง เมื่อทำงานด้วยระบบเปียก ซึ่งจำเป็นต้องใช้น้ำเป็นส่วนประกอบหลักของระบบนี้ การนำน้ำกลับมาใช้ใหม่จำเป็นต้องมีระบบบำบัดน้ำ และเมื่อปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ อาจเกิดปัญหามลพิษทางน้ำ ทำให้การใช้สครับเบอร์

มีค่าดำเนินการและบำรุงรักษาสูง และแก๊สที่ออกจากอุปกรณ์ควบคุมจะมีความชื้นสูง (Smid, J. et al., 2005; Smid, J. et al., 2004) สำหรับแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงนั้น การกรองด้วยถุงกรองอาจจะเกิดปัญหาเนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำถุงกรองไม่สามารถทนอุณหภูมิสูงได้ เครื่องกรองที่มีการสนับสนุนให้ใช้กับแก๊สที่มีอุณหภูมิสูงคือกรองเซรามิกแบบแท่ง (Candle Filter) และกรองแบบเม็ด (Granular Filter) กรองเซรามิกสามารถกรองแก๊สที่มีอุณหภูมิระหว่าง 250 - 400 องศาเซลเซียส แต่เมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานาน พบว่าความหนาของชั้นการกรองเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากอนุภาคฝุ่นผงไปเกาะติดเป็นจำนวนมาก ทำให้ความดันลดภายในเครื่องกรองเพิ่มขึ้น จนเครื่องกรองไม่สามารถทำงานต่อไปได้ จำเป็นต้องหยุดการทำงานเพื่อทำความสะอาด (Xiao, G. et al., 2013) ส่วนเครื่องกรองแบบเม็ดมีการศึกษาอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ สามารถเลือกใช้ตัวกลางกรองที่ทำมาจากวัสดุที่อุณหภูมิสูง ราคาถูก และใช้วัสดุจากธรรมชาติได้ (Bai, J. C. et al., 2007) การศึกษาเครื่องกรองแบบเม็ดนี้ส่วนใหญ่ทดลองในสภาวะอุณหภูมิห้อง (Bai, J. C. et al., 2007; Brown, R. C. et al., 2003; Chen, Y. S. et al., 2009; El-Hedok, I. A. et al., 2011; Paenpong, C. and Pattiya, A., 2013; Stanghelle, D. et al., 2007) และงานวิจัยบางส่วนทดลองในสภาวะอุณหภูมิระหว่าง 200 - 400 องศาเซลเซียส (Chen, Y. S. et al., 2014; Yang, S. I. et al., 2012) ตัวแปรที่ศึกษาเป็นอัตราการไหลของตัวกลางกรอง (Brown, R. C. et al., 2003; Chen, Y. S. et al., 2009; El-Hedok, I. A. et al., 2011; Paenpong, C. and Pattiya, A., 2013;) อุณหภูมิของตัวกลางกรอง (Yang, S. I. et al., 2012) ขนาดของตัวกลางกรองและจำนวนชั้นการกรอง (Paenpong, C. and Pattiya, A., 2013;) ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาไม่มีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเครื่องกรองแบบเม็ดที่มีการหมุนเวียนตัวกลางกรองมาใช้ดักจับอนุภาคฝุ่นในแก๊สเตาผลิต ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาการใช้เครื่องกรองดังกล่าว โดยเป็นการศึกษาผลกระทบจากขนาดและอัตราการไหลของตัวกลางกรองที่ใช้ในการกรองแก๊สเตาผลิตในเตาผลิตแก๊สแบบไหลลง

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาผลกระทบของขนาดและอัตราการไหลของทรายที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคฝุ่นและความดันลดของเครื่องกรองแก๊สแบบเม็ดชนิดชั้นการกรองหมุนเวียน โดยทรายนี้ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางกรองของเครื่องกรองแก๊ส

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การกรองเป็นการแยกอนุภาคของแข็งออกจากของไหล โดยการบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านตัวกรองหรือตัวกลางกรองที่มีลักษณะเป็นรูพรุน อนุภาคของแข็งจะถูกกักอยู่บนรูและสะสมตัวกลายเป็นชั้นเค้ก (Cake) เกาะติดบนพื้นผิวของตัวกรอง ในขณะที่ของไหลจะไหลผ่านชั้นและตัวกรองออกไป การกรองอนุภาคแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ การกรองตามความลึก (Depth Filtration) และการกรองผ่านตัวกลาง (Membrane Filtration) การกรองอนุภาคตามความลึกเป็นการดักกรองภายในเนื้อตัวกลางกรองเอง โดยสิ่งปนเปื้อนจะแทรกอยู่ภายในช่องว่างของตัวกลางกรอง โดยตัวกลางกรองเป็นวัสดุที่มีความหนา

มักเป็นเส้นใยซ้อนกันหลายชั้น การกรองแบบนี้จะเกิดขึ้นในตัวกลางกรอง เพราะว่าอนุภาคของแข็งมีขนาดใหญ่กว่าช่องของตัวกลางกรอง ดังนั้นจึงถูกดักจับไว้ในตัวกลางกรอง ส่วนการกรองผ่านตัวกลางเป็นการกรองที่ใช้ตัวกลางกรองที่มีรูเล็กมาก จนสิ่งปนเปื้อนไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านได้ อนุภาคของแข็งตกค้างอยู่บนตัวกรอง เครื่องกรองแบบมีหน้าที่แยกอนุภาคออกจากของเหลว ตัวกลางกรองเป็นวัสดุที่มีช่องการกรองเกิดขึ้นจากการที่ของเหลวไหลผ่านช่องเล็ก ๆ วัสดุที่เป็นตัวกรองส่วนใหญ่เป็นพอลิเมอร์นำมาขึ้นรูปให้เป็นแผ่น ประสิทธิภาพของการกรองแบบนี้ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและขนาดของช่องภายในตัวกรอง นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับความหนาของตัวกรอง ความเร็ว ความหนืดของของไหล และแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างอนุภาคและผนังของรูพรุน

เครื่องกรองแบบเมคที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้จะดักจับอนุภาคฝุ่นเกิดขึ้นภายในตัวกลางกรอง โดยตัวกลางกรองมีลักษณะเป็นเมคขนาดเล็กจำนวนมาก แก๊สสามารถไหลผ่านตัวกลางกรองของเครื่องกรองชนิดนี้โดยไหลแทรกผ่านระหว่างตัวกลางกรอง ดังนั้นอนุภาคขนาดใหญ่ติดในตัวกลางกรอง หลักการกรองของเครื่องกรองแบบเมคนี้แสดงดังรูปที่ 1 ข้อดีของเครื่องกรองชนิดนี้คือ ตัวกลางกรองสามารถเคลื่อนที่ได้ อนุภาคฝุ่นที่ติดในตัวกลางกรองเคลื่อนที่ไปพร้อมกับตัวกลางกรองด้วย และตัวกลางกรองที่ไม่มีอนุภาคฝุ่นเจือปนจะไหลเข้ามาแทนที่ ดังนั้นจึงสามารถกำจัดสิ่งเจือปนหรืออนุภาคที่ติดอยู่ภายในเครื่องกรองได้ ทำให้สามารถใช้งานติดต่อกันเป็นระยะเวลานานได้ ขณะที่เครื่องกรองประเภทอื่น ๆ จะต้องหยุดการทำงานของเครื่องกรองเพื่อกำจัดอนุภาคฝุ่นหรือชั้นเค้กที่ขึ้นการกรอง ทำให้ไม่สามารถทำงานต่อเนื่องได้

การกรองหรือการดักจับอนุภาคของเครื่องกรองชนิดต่าง ๆ สร้างกลไกการดักจับชนิดต่าง ๆ ขึ้น เพื่อดักจับอนุภาكدังกล่าว (Brown, R. C. and Colver, G. M., 2002) โดยกลไกการดักจับอนุภาคที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกรองแบบเมคนี้ประกอบด้วย การกระทบเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial Impaction) การแพร่ (Diffusion) และการสกัดกั้นโดยตรง (Interception) โดยกลไกการดักจับแบบการกระทบเนื่องจากความเฉื่อยเกิดขึ้นมากที่สุด โดยค่า Stokes Number (S_t) เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเกิดกลไกดังกล่าว ค่า Stokes Number เป็นไปตามสมการ

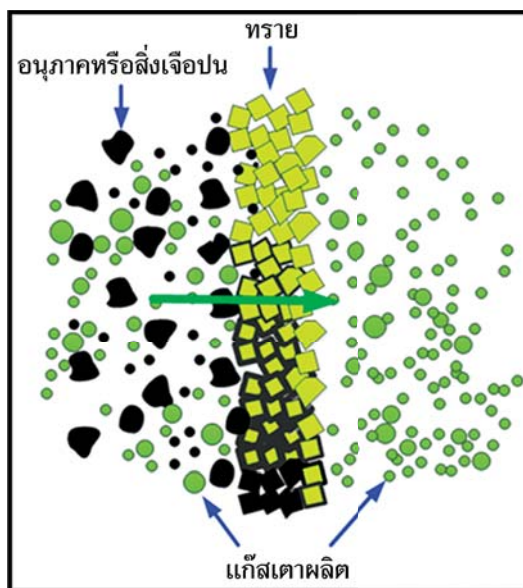
$$S_t = \frac{\rho_p d_p^2 U C_s}{9 \mu d_g} \quad (1)$$

เมื่อ	ρ_p	คือ	ความหนาแน่นของอนุภาค (กิโลกรัม/เมตร ³)
	d_p	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถ่านชาร์ (เมตร)
	U	คือ	ความเร็วของแก๊สเตาผลิตที่หน้าชั้นการกรอง (เมตร/วินาที)
	C_s	คือ	Cunningham's Correction Factor
	μ	คือ	ความหนืดเชิงพลศาสตร์ของแก๊สเตาผลิต (กิโลกรัม/เมตร.วินาที)
	d_g	คือ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของทราย (เมตร) สำหรับการกรองอนุภาคขนาดใหญ่ ค่า $S_t > 0.01$ ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจะมีค่ามากกว่าร้อยละ 90

สำหรับการกรองอนุภาคที่มีขนาดโตกว่า 0.1 ไมโครเมตร กลไกการดักจับแบบการแพร่จะเกิดขึ้นน้อย ส่วนกลไกการดักจับแบบการสกัดกันโดยตรง เกิดขึ้นจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กเคลื่อนที่ตามกระแสแก๊สไปสัมผัสกับตัวกลางกรอง และถูกจับไว้ ค่า R เป็นค่าที่บ่งบอกถึงการเกิดกลไกนี้เป็นไปตามสมการ

$$R = \frac{d_p}{d_g} \quad (2)$$

กลไกการดักจับแบบการสกัดกันนี้สัมพันธ์กับค่า R โดยตรง ถ้าค่า $R < 0.001$ แสดงว่ากลไกการดักจับแบบนี้ไม่เกิดขึ้น



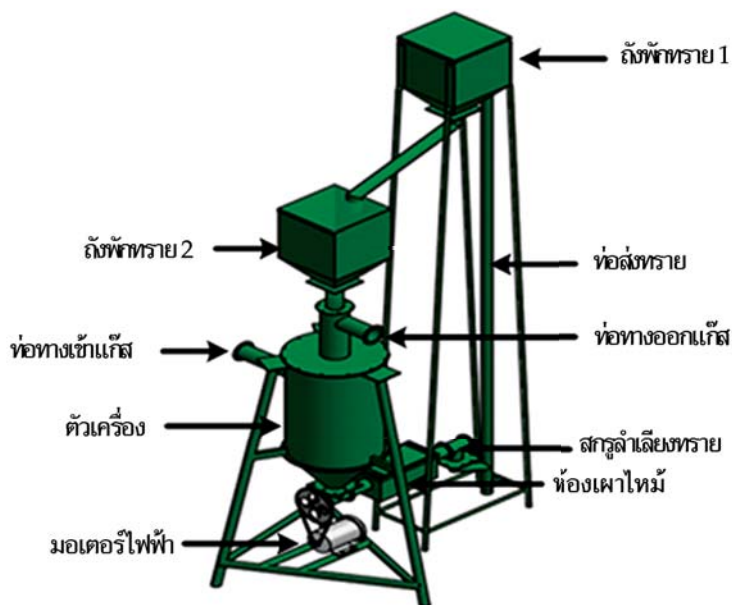
รูปที่ 1 ลักษณะการกรองของทรายในเครื่องกรองแก๊สแบบเม็ด

วิธีดำเนินการวิจัย

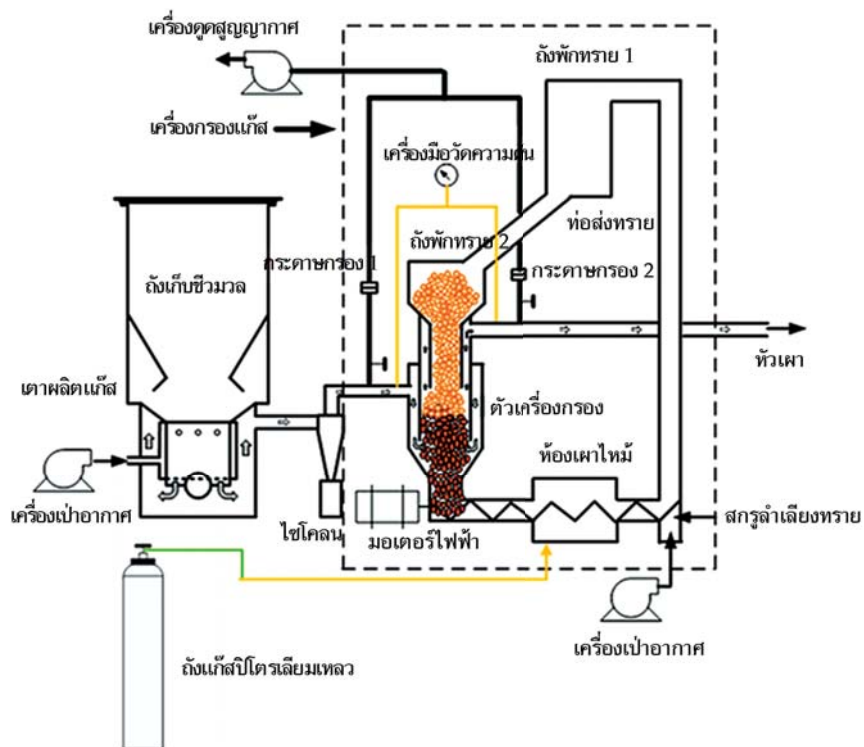
ลักษณะของเครื่องกรองแบบเม็ดชนิดตัวกลางกรองหมุนเวียนแสดงในรูปที่ 2 ส่วนรายละเอียดภายในเครื่องกรองแสดงไว้ในรูปที่ 3 แก๊สจากเตาไหลเข้าสู่ไซโคลนเพื่อกำจัดฝุ่นขนาดใหญ่ หลังจากนั้นไหลเข้าสู่เครื่องกรองแบบเม็ดบริเวณด้านข้างของเครื่อง แก๊สไหลย้อนสู่ด้านล่างของเครื่อง และไหลผ่านทรายที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางกรอง ฝุ่นผงขนาดเล็กจะถูกดักจับด้วยทรายดังกล่าว แก๊สไหลออกจากเครื่องกรองบริเวณด้านข้างของเครื่องด้านตรงข้ามกับท่อด้านเข้า และไหลออกไปยังท่อกวนเพื่อเผาไหม้ต่อไป แก๊สเตาผลิตนี้ไม่สามารถไหลผ่านชั้นสู่ด้านบนของเครื่องกรองได้เนื่องจากทรายเรียงตัวกันหนาแน่นและความหนาของชั้นทรายมาก ส่วนทรายที่มีฝุ่นเจือปนไหลลงสู่ด้านล่างของเครื่องกรอง ไหลลงสู่สกรูลำเลียงที่ถูกขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาด 36 วัตต์ ทรายถูกลำเลียงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ที่มี

การเผาไหม้ด้วยเชื้อเพลิงจากแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่อุณหภูมิ 600 - 700 องศาเซลเซียส เพื่อเผาไหม้ฝุ่นที่เจือปนกับทราย ทรายที่ถูกเผาไหม้นี้ถูกลำเลียงมาจนสุดปลายสกรู หลังจากนั้นถูกเป่าขึ้นผ่านท่อส่งทรายไปเก็บที่ถังพักทราย 1 ด้วยเครื่องเป่าอากาศ หลังจากนั้นทรายไหลลงสู่ถังพักทราย 2 และไหลลงสู่เครื่องกรองอีกครั้ง ทรายที่ถูกนำมาใช้เป็นตัวกลางกรองมีการหมุนเวียนนำกลับมาใช้ตลอดเวลา ทรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นทรายแม่น้ำจากแม่น้ำปิง ข้อดีของทรายแม่น้ำคือปริมาณซิลิกอนสูงกว่าทรายชนิดอื่น ๆ ที่มาจากธรรมชาติ ทำให้ทนอุณหภูมิสูงกว่า 400 องศาเซลเซียส และสามารถจัดทำได้ง่าย แต่ข้อเสียของการใช้ตัวกลางกรองที่เป็นทรายคือเมื่อใช้งานเป็นระยะเวลานานทรายจะเกิดการสึกกร่อนและมีขนาดเล็กลง ซึ่งทำให้ความดันลงในเครื่องกรองเพิ่มขึ้นได้ ลักษณะของทรายแสดงดังรูปที่ 4 ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ทรายแม่น้ำที่มีจำหน่าย ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ขนาด ตามลักษณะที่ดูนำไปใช้ในงานก่อสร้างคือทรายละเอียดมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.300-0.600 มิลลิเมตร ทรายขนาดกลาง เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.600-1.160 มิลลิเมตร และทรายหยาบหรือขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.160-2.360 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของทราย 2 4 และ 8 กรัมต่อนาที แต่ละขนาดมีความหนาแน่น 1380 1440 และ 1460 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

เตาผลิตแก๊สที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบไหลลง (Downdraft) อัตราการผลิตแก๊ส 5 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง วัตถุดิบผลิตแก๊สคือเศษไม้จากโรงงานเฟอร์นิเจอร์ มีไฮโดรคาร์บอนติดกับฝุ่นหรืออนุภาคขนาดใหญ่ อุณหภูมิภายในเตาในช่วงผลิตแก๊สประมาณ 800 - 900 องศาเซลเซียส



รูปที่ 2 ลักษณะของเครื่องกรองแก๊สแบบเม็คชนิดตัวกลางกรองหมุนเวียน



รูปที่ 3 แผนผังติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

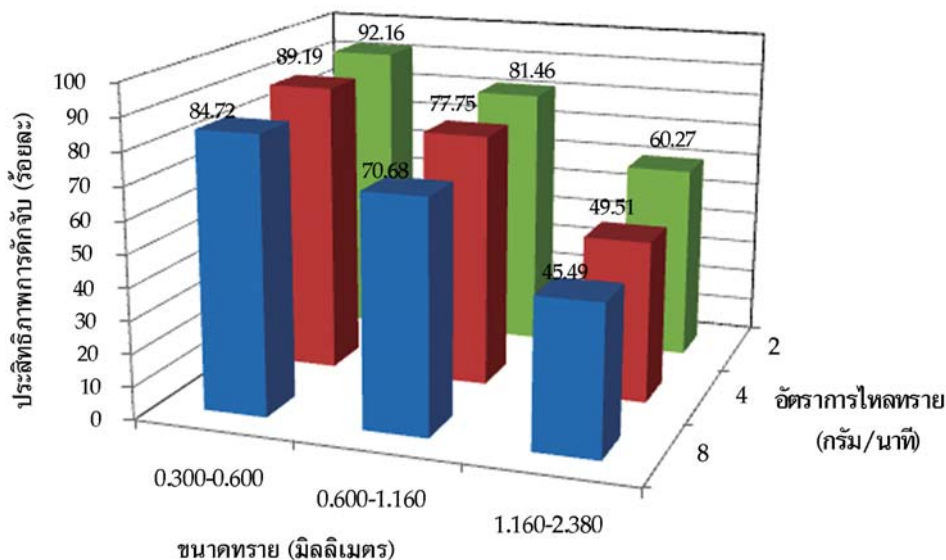


(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 4 ลักษณะของทรายที่นำมาใช้เป็นตัวกลางกรอง (ก) ขนาด 0.300 - 0.600 มิลลิเมตร (ข) ขนาด 0.600 - 1.160 มิลลิเมตร (ค) ขนาด 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคที่ขนาดและอัตราการไหลของทราย

ประสิทธิภาพของเครื่องกรองแก๊สพิจารณาจากประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นและความดันลดของเครื่องกรอง

การวัดประสิทธิภาพการดักจับฝุ่นของเครื่องกรองกระทำโดยเครื่องมือในการเก็บตัวอย่างแก๊สที่สร้างขึ้น ประกอบด้วย ชุดเก็บตัวอย่างมีหัวเก็บตัวอย่าง (Probe Nozzle) และท่อชักตัวอย่าง (Probe Liner) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มิลลิเมตร เพื่อทำการเก็บตัวอย่างแก๊สจากท่อที่เข้าเครื่องกรอง การเก็บตัวอย่างแก๊สโดยการติดตั้งหัวเก็บตัวอย่างแก๊สตำแหน่งกึ่งกลางท่อเพื่อให้ตัวอย่างแก๊สมีความเร็วเท่ากับความเร็วของแก๊สเตาผลิต (Isokinetic Sampling) ที่เข้าสู่เครื่องกรอง อุปกรณ์ที่สำคัญตัวหนึ่งของการเก็บตัวอย่างแก๊สคือ บัมดูดอากาศ โดยจะดูดตัวอย่างแก๊สผ่านกระดาศกรองตัวที่ 1 เพื่อเก็บตัวอย่างแก๊สก่อนเข้าเครื่องกรอง และดูดแก๊สผ่านกระดาศกรองตัวที่ 2 เพื่อเก็บตัวอย่างแก๊สหลังจากออกเครื่องกรองในอัตราการไหล 1.65 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างแก๊สทุก 5 นาที ดังนั้นในการทดลองแต่ละครั้งเปลี่ยนกระดาศกรองทุก 5 นาทีด้วย ในการทดลองแต่ละสภาวะมีเวลาการทดลอง 1 ชั่วโมง

ฝุ่นที่มีขนาดเล็กถูกดักไว้ที่แผ่นกรองชนิดใยแก้ว (ยี่ห้อ Whatman รุ่น GF-C ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 47 มิลลิเมตร ขนาดรูพรุน 12.8 ไมโครเมตร) ความเข้มข้นของอนุภาคฝุ่นในแก๊สเตาผลิต ถูกคำนวณได้จากปริมาณของฝุ่นบนกระดาศกรองที่ซึ่งได้กับปริมาตรของตัวอย่างแก๊สที่ผ่านแผ่นกรองดังกล่าว กระดาศกรองนี้มีการอบลดความชื้นเป็นเวลา 2 ชั่วโมง และทราบน้ำหนักแล้ว เมื่อเสร็จสิ้นการเก็บตัวอย่างแก๊สแล้วนำกระดาศกรองนี้เก็บลงในโถดูดความชื้นและชั่งน้ำหนักอีกครั้ง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณฝุ่นทั้งหมด (Total Dust) โดยใช้วิธี Gravimetric (Filter Weight) ตามมาตรฐาน ASTM D6331-98 (ASTM International, 1998)

ดังนั้นการคำนวณหาประสิทธิภาพการกรองได้ด้วยสมการ

$$\eta = \left[1 - \left(\frac{C_{\text{avgหลัง}}}{C_{\text{avgก่อน}}} \right) \right] \times 100 \quad (3)$$

โดยที่ η คือประสิทธิภาพการดักจับฝุ่น (ร้อยละ) $C_{\text{avgก่อน}}$ คือ ค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นก่อนเข้าเครื่องกรอง (กรัม/ลูกบาศก์เมตร) และ $C_{\text{avgหลัง}}$ คือค่าความเข้มข้นเฉลี่ยของฝุ่นที่กระดาษกรองหลังจากออกเครื่องกรอง (กรัม/ลูกบาศก์เมตร) ความเข้มข้นของฝุ่นนี้คำนวณจาก

$$C_{\text{avg}} = \frac{m}{Q \cdot t} \quad (4)$$

เมื่อ m คือ มวลของฝุ่นที่ติดบนกระดาษกรอง (กรัม)
 Q คือ อัตราการไหลแก๊สเตาผลิต (ลูกบาศก์เมตร/วินาที)
 t คือ เวลาในช่วงของการทดลองและเก็บตัวอย่างแก๊สมีค่าประมาณ 5 นาที

ส่วนค่าความดันลดของเครื่องกรอง ได้จากการวัดความดันแตกต่างด้านทางเข้าและออกของเครื่องกรองด้วยมาโนมิเตอร์ จากงานวิจัยของ Brown, R. C. et al. (Brown, R. C. et al., 2003) และ Paenpong, C. และ Pattiya, A. (Paenpong, C. and Pattiya, A., 2013) พบว่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในเครื่องกรองมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงแรกของการกรอง เพราะฝุ่นที่ไหลไปติดหน้าชั้นการกรองมีความหนาเพิ่มขึ้น ความดันของแก๊สที่บริเวณหน้าชั้นการกรองเพิ่มขึ้น ดังนั้นความดันลดที่เกิดขึ้นของเครื่องกรองมีค่าสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของความดันแก๊ส ทำให้แก๊สสามารถไหลทะลุผ่านชั้นฝุ่นและตัวกลางกรองได้ ดังนั้นความดันลดของเครื่องกรองมีค่าลง และเมื่อความหนาของฝุ่นนี้มีค่าคงตัว ความดันลดของเครื่องกรองมีค่าคงตัวด้วย

แผนการทดลองในงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 1 โดยตัวแปรต้นของการทดลองคือ ขนาดและอัตราการไหลของทราย ส่วนตัวแปรตามคือประสิทธิภาพการดักจับและความดันลดของเครื่องกรองแก๊สการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial โดยขนาดของตัวกลางกรองมี 3 ระดับ คือ 0.300 - 0.600 0.600 - 1.160 และ 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของทรายมี 3 ระดับ คือ อัตราการไหลของทราย 2 4 และ 8 กรัมต่อวินาที และจากการออกแบบการทดลองแบบ Full Factorial มีการทดลองในงานวิจัยนี้ทั้งหมด 9 สภาวะ และการทดลองแต่ละสภาวะมีการทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีการทดลองทั้งหมด 36 ครั้ง

ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

1. ผลกระทบเนื่องจากขนาดของทราย

จากรูปที่ 5 แสดงประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในแก๊สแตกผลผลิตของเครื่องกรอง จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของเครื่องกรอง พบว่ามีประสิทธิภาพสูงที่สุดเมื่อทรายมีขนาดเล็กสุดและอัตราการไหลของทรายต่ำที่สุด ทรายที่มีขนาด 0.300-0.600 มิลลิเมตร ให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคมากที่สุดมีค่าเท่ากับร้อยละ 92.16 เมื่อเพิ่มขนาดของทรายเป็น 0.600 - 1.160 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคลดลงเป็นร้อยละ 81.46 และเพิ่มขนาดทรายเป็น 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร ประสิทธิภาพการดักจับเหลือเพียงร้อยละ 60.27 เหตุผลที่ตัวกลางกรองหรือทรายที่มีขนาดเล็กสามารถดักจับอนุภาคได้มาก ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคสูง เพราะว่าทรายที่มีขนาดเล็กทำให้มีปริมาณมาก เมื่อเปรียบเทียบกับทรายที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นทรายขนาดเล็กจึงมีพื้นที่ผิวรวมมากกว่าทรายที่มีขนาดใหญ่ ตัวกลางกรองที่มีพื้นที่ผิวมาก ทำให้เกิดกลไกการกระทบ เนื่องจากความเฉื่อยมากซึ่งแสดงด้วยสมการที่ (1) พบว่าขนาดรัศมีของทรายมีค่าน้อย ค่า Stoke Number มีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคของทรายที่มีขนาดเล็กจึงมีสูงกว่าทรายขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Paenpong, C. และ Pattiya, A. (Paenpong, C. and Pattiya, A., 2013) Bai, J. C. (Bai, J. C., 2007) และ Wey, M.-Y. et al. (Wey, M.-Y. et al., 2005) ที่พบว่าเครื่องกรองแบบเม็ดที่มีตัวกลางกรองขนาดเล็กให้ประสิทธิภาพการดักจับสูงกว่าการใช้ตัวกลางกรองขนาดใหญ่

เมื่อพิจารณาความดันตกภายในเครื่องกรองดังแสดงในรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเพิ่มขนาดของทรายความดันตกภายในเครื่องกรองมีค่าลดลง โดยความดันตกมีค่าน้อยที่สุดเมื่อทรายมีขนาด 1.160-2.360 มิลลิเมตร เท่ากับ 46.61 นิวตันต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของทราย 8 กรัมต่อนาที และมีความมากที่สุดที่ขนาด 0.300 - 0.600 มิลลิเมตร ที่ 110.36 นิวตันต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลของทราย 2 กรัมต่อนาที ขนาดทรายที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดความดันตกสูงกว่าทรายขนาดใหญ่ นั้น จากงานวิจัยของ Brown, R. C. et al. (Brown, R. C. et al., 2003) พบว่าทรายขนาดเล็กเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ช่วงว่างระหว่างเม็ดทราย (Void Fraction) น้อย แก๊สแตกผลผลิตไหลผ่านได้ยาก ขณะเดียวกันทรายที่มีขนาดใหญ่มีช่องว่างระหว่างเม็ดทรายสูง จึงเกิดความดันตกภายในเครื่องกรองต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Bai, J. C. et al. (Bai, J. C. et al., 2007) ที่พบในเครื่องกรองแบบเม็ดว่าการใช้ตัวกลางกรองขนาดเล็ก ทำให้เกิดความหนาแน่นในชั้นการกรองสูง ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปติดได้ง่ายกว่าตัวกลางกรองขนาดใหญ่

2. ผลกระทบเนื่องจากอัตราการไหลของทราย

อัตราการไหลของทรายในงานวิจัยนี้มี 3 ระดับ คือ 2 4 และ 8 กรัมต่อนาที ผลกระทบของอัตราการไหลของทรายที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคแสดงดังรูปที่ 5 การเพิ่มอัตราการไหลของทราย ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคลดลง อัตราการไหลของทราย 2 กรัมต่อนาที ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 92.16 ที่ขนาดทราย 0.300 - 0.600 มิลลิเมตร ส่วนอัตราการไหลของทราย 8 กรัมต่อนาที ให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคต่ำที่สุดร้อยละ 45.49 ที่ขนาดทราย 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร จากงานวิจัยของ Ritzert, J. A. (Ritzert, J. A., 2004) พบว่าการกรองเกิดขึ้นบริเวณหน้าชั้นการกรอง

ประมาณร้อยละ 86 บริเวณขึ้นการกรองของเครื่องกรองนี้คือบริเวณด้านบนของทรายที่อยู่ในขึ้นการกรอง ทรายบริเวณนี้ไหลลงสู่ด้านล่างของเครื่องกรองตลอดเวลา ทำให้อนุภาคที่ติดอยู่ขึ้นการกรองถูกกำจัดออกตลอดเวลา ซึ่งอนุภาคที่ติดอยู่บริเวณขึ้นการกรองนี้ ทำให้ประสิทธิภาพการดักจับเพิ่มสูงขึ้น ดังนั้นเมื่ออัตราการไหลของทรายเพิ่มสูงขึ้น ทำให้อนุภาคหน้าขึ้นการกรองถูกกำจัดเร็วขึ้น ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคจึงมีค่าลดลง เหตุผลอีกประการหนึ่งซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Brown, R. C. et al. (Brown, R. C. et al., 2003) คืออัตราการไหลของทรายต่ำ ทำให้ทรายเรียงตัวกันอย่างหนาแน่น ทำให้เกิดช่องว่างระหว่างเม็ดทรายมีน้อย ทำให้อนุภาคที่ไหลมากับแก๊สเตาผลิตถูกดักจับได้ง่ายกว่าการใช้อัตราการไหลของทรายที่มีค่ามาก

ส่วนผลของอัตราการไหลของทรายที่มีต่อความดันลดลงภายในเครื่องกรอง พบว่าอัตราการไหลของทรายเพิ่มขึ้น ทำให้ความดันลดลงภายในเครื่องกรองมีค่าลดลง ความดันลดมีค่าน้อยที่สุดมีค่าเท่ากับ 46.6 นิวตันต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลทราย 8 กรัมต่อนาที และขนาด 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร และความดันลดเกิดขึ้นมากที่สุด 110.36 นิวตันต่อตารางเมตร ที่อัตราการไหลทราย 2 กรัมต่อนาที และขนาด 0.300 - 0.600 มิลลิเมตร

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาผลกระทบของขนาดและอัตราการไหลของทรายที่มีต่อประสิทธิภาพการดักจับและความดันลดของเครื่องกรองแก๊สแบบเม็คชนิดขึ้นการกรองหมุนเวียนในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันนั้น โดยศึกษาขนาดของทราย 3 ขนาด คือ 0.300 - 0.600 0.600 - 1.160 และ 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร และอัตราการไหลของทราย 3 ระดับ คือ อัตราการไหลของทราย 2 4 และ 8 กรัมต่อนาที พบว่าการเพิ่มขนาดทรายทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในแก๊สเตาผลิตลดลง ขณะเดียวกันความดันลดภายในเครื่องกรองมีค่าลดลงด้วย เมื่อลดขนาดทรายทำให้ประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคและความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนอัตราการไหลของทรายมีผลต่อประสิทธิภาพการดักจับและความดันลดภายในเครื่องกรองเช่นเดียวกับขนาดของทราย เมื่ออัตราการไหลของทรายเพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการดักจับและความดันภายในเครื่องกรองมีค่าลดลง โดยประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคในแก๊สเตาผลิตเกิดขึ้นสูงสุดร้อยละ 92.16 ที่ขนาดทราย 0.300 - 0.600 มิลลิเมตร และอัตราการไหลทราย 2 กรัมต่อนาที และความดันลดภายในเครื่องกรองมีค่าน้อยที่สุด 46.61 นิวตันต่อตารางเมตร ที่ขนาดทราย 1.160 - 2.360 มิลลิเมตร และอัตราการไหลทราย 8 กรัมต่อนาที จากงานวิจัยพบว่าความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคและความดันลดของเครื่องกรอง เมื่อประสิทธิภาพการดักจับอนุภาคสูงขึ้น ความดันลดของเครื่องกรองเพิ่มสูงขึ้นด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์วีระพรรณ จันทร์เหลื่อง หัวหน้าสาขาวิชาช่างจักรกลหนักที่สนับสนุนเครื่องมือครุภัณฑ์และบุคลากร เชวงศักดิ์ ประดับวงษ์ ธนาธร ขำศิริ และขวัญชัย วงษ์คำ นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ดำเนินงานและเก็บผลการทดลอง

References

- ASTM International. (1998). *ASTM D3685-98 Standard test methods for sampling and determination of particulate matter in stack gases*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700. West conshohocken, PA 19428-2959. United States
- Bai, J. C., Wu, S. Y., Lee, A. S. and Chu, C. Y. (2007). Filtration of dust in a circulating granular bed filter with conical louver plates (CGBF-CLPs). *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 142. Issue 1-2. pp. 324-331
- Baker, E. G., Brown, M. D., Moore R. H., Mudge, L. K. and Elliott, D. C. (1986). *Engineering analysis of biomass gasifier product gas cleaning technology*. Medium: ED; Size: p. 100
- Brown, R. C. and Colver, G. M. (2002). *Control of interfacial dust cake to improve efficiency of moving bed granular filters in Technical report*. Center for sustainable environmental technologies, Iowa state university. p. 114
- Brown, R. C., Shi, H., Colver, G. and Soo, S. C. (2003). Similitude study of a moving bed granular filter. *Powder Technology*. Vol. 138. Issue 2-3. pp. 201-210
- Chen, Y. S., Hsiau, S. S., Lai, S. C., Chyou, Y. P., Li, H. Y. and Hsu, C. -J. (2009). Filtration of dust particulates with a moving granular bed filter. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 171. Issue 1-3. pp. 987-994
- Chen, Y. S., Chyou, Y. P. and Li, S. C. (2015). Hot gas clean-up technology of dust particulates with a moving granular bed filter. *Applied Thermal Engineering*. Vol. 74. pp. 146-155
- El-Hedok, I. A., Whitmer, L. and Brown, R. C. (2011). The influence of granular flow rate on the performance of a moving bed granular filter. *Powder Technology*. Vol. 214. Issue 1. pp. 69-76
- Paenpong, C. and Pattiya, A. (2013). Filtration of fast pyrolysis char fines with a cross-flow moving-bed granular filter. *Powder Technology*. Vol. 245. pp. 233-240
- Ritzert, J. A. (2004). *Factors influencing the efficiency of a moving bed granular filter*. Mechanical engineering. Iowa State University
- Smid, J., Peng, C. Y., Lee, H. T. and Hsiau, S. S. (2004). Hot gas granular moving bed filters for advanced power systems. *Filtration & Separation*. Vol. 41. No. 10. pp. 32-35
- Smid, J., Hsiau, S. S., Peng, C. Y. and Lee, H. T. (2005). Granular moving bed filters and adsorbers (GM-BF/A) patent review: 1970-2000. *Advanced Powder Technology*. Vol. 16. Issue 4. pp. 301-345

- Stanghelle, D., Slungaard, T., Sønju, O. K. (2007). Granular bed filtration of high temperature biomass gasification gas. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 144. Issue 3. pp. 668-672
- Wey, M. -Y., Chen, K. -H. and Liu, K. -Y. (2005). The effect of ash and filter media characteristics on particle filtration efficiency in fluidized bed. *Journal of Hazardous Materials*. Vol. 121. Issue 1-3. pp. 175-181
- Xiao, G., Wang, X., Zhang, J., Ni, M., Gao, X., Luo, Z. and Cen, K. (2013). Granular bed filter: A promising technology for hot gas clean-up. *Powder Technology*. Vol. 244. pp. 93-99
- Yang, S. I., Chung, I. L. and Wu, S. R. (2012). An experimental study of the influence of temperature on char separation in a moving granular bed. *Powder Technology*. Vol. 228. pp. 121-127