

การประยุกต์ใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุสำหรับทำนายปริมาณ NOx จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่น

Application of Multiple-linear Regression Method for Predicting NOx Level from the Combustion of Gas Fuel on Packed-bed Porous Burner

อนุชา กล้าน้อย¹ บัณฑิต กฤตาคม^{*2}

¹คณะวิทยาศาสตร์และศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

²ห้องปฏิบัติการวิจัยในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (DiTo-Lab) คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

Anucha Klamnoi¹ Bundit Krittacom^{*2}

¹Faculty of Science and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhonrachasima, 3000

²Development in Technology of Porous Materials Research Laboratory (DiTo-Lab), Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Isan, Muang, Nakhonrachasima, 3000

Tel : 0-4423-3000 E-mail: bundit.kr@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

ความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อปริมาณออกไซด์ของไนโตรเจน (Oxide of Nitrogen, NOx) ซึ่งปลดปล่อยมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลพีจีของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่นจะถูกทำการศึกษาด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ (multiple-linear regression method) วัสดุพรุนที่เลือกใช้ในห้องพ่นไฟของงานวิจัยนี้จะเป็นเซรามิกส์เม็ดกลมทำมาจากอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (d) และค่าความพรุน (ε) เท่ากับ 3 cm และ 0.322 ตามลำดับ ในการวิเคราะห์ทางสถิติของวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ จะดำเนินการภายใต้ขอบเขตของปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้ ความสูงของชั้นวัสดุพรุน (H) อยู่ในช่วง 2.5–12.5 cm อัตราความเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อนระหว่างแอลพีจีกับอากาศ (V_{mix}) อยู่ในช่วง 5–35 m³/h และอัตราส่วนผสมมวล (Φ) อยู่ระหว่าง 0.55–1.0 ซึ่งพิจารณาอ้างอิงกับสถานะเสถียรของการเผาไหม้จากการวิเคราะห์ พบว่าปัจจัยหลัก (H, Φ และ V_{mix}) ปัจจัยร่วมแบบสองตัว (HV_{mix} , $H\Phi$ และ $V_{mix}\Phi$) และปัจจัยร่วมแบบสามตัว

($H\Phi V_{mix}$) มีผลต่อปริมาณ NOx ของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนแบบนี้ แต่ในบทความวิจัยนี้ ขอเสนอสมการความสัมพันธ์ที่สามารถใช้ทำนายปริมาณ NOx ได้อย่างน่าเชื่อถือคือ $NOx = -2.099H + 33.443\Phi - 8.048V_{mix} + 1.055(HV_{mix}) + 11.839(\Phi V_{mix}) - 1.492(H\Phi V_{mix})$ แม้ว่า R^2 จะมีค่าเท่ากับ 0.792 คำหลัก หัวพ่นไฟ วัสดุพรุน การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ ออกไซด์ของไนโตรเจน

Abstract

A relation between the significant factors and Oxide of nitrogen (NOx) released from the combustion of Liquid Petroleum Gas (LPG) on the spherical packed-bed porous burner was investigated by using the multiple-regression linear method. Alumina-Cordierite ceramic balls having the average diameter (d) of 3 mm. and the porosity (ε) of 0.322 are employed as porous media. In statistical analysis of the multiple-regression linear method, the data were analyzed on the condition following as: porous thickness (H) in the range of

2.5 – 12.5 cm, the volumetric premixed gas flow rate (V_{mix}) in a range of 5 – 35 m³/h and equivalence ratio (Φ) of 0.55 – 1.0 depended on combustion stability. From the data analysis, the main factors (H , Φ and V_{mix}), the two-way interaction factors (HV_{mix} , $H\Phi$ and $V_{mix}\Phi$), and the three-way interaction factors ($H\Phi V_{mix}$) had significant to the amount of NOx released from this porous burner. Moreover, a reliable equation used in prediction the amount of NOx was recommended by $NOx = -2.099H + 33.443\Phi - 8.048V_{mix} + 1.055(HV_{mix}) + 11.839(\Phi V_{mix}) - 1.492(H\Phi V_{mix})$ although the coefficient of determination (R^2) become 0.792.

Keywords: porous burner, multiple-linear regression method, oxide of nitrogen

1. บทนำ

หัวพ่นไฟหรือหัวเผาวัสดุพรุน (porous burner) เป็นที่รู้จักกันดีและมีการวิจัยพัฒนาอย่างกว้างโดยนักวิจัยและวิศวกรหลายกลุ่มในช่วงสามทศวรรษที่ผ่านมา [1-3] เนื่องจากหัวพ่นไฟแบบนี้มีการส่งถ่ายพลังงานความร้อนในรูปการแผ่รังสีได้สูง สามารถใช้กับเชื้อเพลิงที่มีค่าความร้อนต่ำ ๆ ได้ และปลดปล่อยมลพิษจากการเผาไหม้ในปริมาณที่น้อยมากหากเทียบกับหัวพ่นไฟแบบปกติ

ในกรณีของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดที่ใช้เชื้อเพลิงแก๊ส (gas porous burner) นั้น ถือได้ว่าเป็นหัวพ่นไฟรูปแบบแรก ๆ ที่มีการศึกษาและนำเสนอ ซึ่งช่วงแรกงานวิจัยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่เสถียรภาพของเปลวไฟและกลไกการถ่ายเทความร้อนเป็นหลัก [4-5] และในภายหลังจึงเริ่มมีความสนใจและรายงานผลของแก๊สไอเสีย [6-7] ในที่นี้ คือ คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) และออกไซด์ของไนโตรเจน (NOx) เพราะปริมาณของ CO จะบ่งบอกถึงการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ของเชื้อเพลิงแก๊สหรือไม่ และปริมาณของ NOx จะบ่งบอกถึงระดับอุณหภูมิการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟนั้น ๆ [8] จากงานวิจัยต่าง ๆ เหล่านี้ พบว่าปริมาณ CO มีระดับที่ค่อนข้างต่ำ เพราะกลไกการเผาไหม้ของหัวพ่นไฟชนิดเชื้อเพลิงแก๊สจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ จึงส่งผลต่อปริมาณของ NOx โดยตรง เนื่องจากเมื่อเกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ระดับ

อุณหภูมิย่อมสูงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยส่วนหนึ่งให้ความสนใจกับปริมาณ NOx เพื่อหาแนวทางการลดระดับของ NOx รวมทั้งทำนายการปลดปล่อย NOx ด้วยวิธีการคำนวณมากมาย [9-11] อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธีการทำนายของงานวิจัยดังกล่าวจะมีความแม่นยำและยอมรับได้ แต่ทุกวิธีล้วนต้องทราบค่าสมบัติทางกายภาพอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องหลายค่า เช่น ค่าความหนืด ค่าความจุความร้อนจำเพาะ ความหนาแน่น หรือค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน เป็นต้น ไม่สามารถใช้งานได้ทันที นอกจากนี้เป็นโปรแกรมการคำนวณขนาดใหญ่ มีความยุ่งยาก และซับซ้อนในการใช้งาน

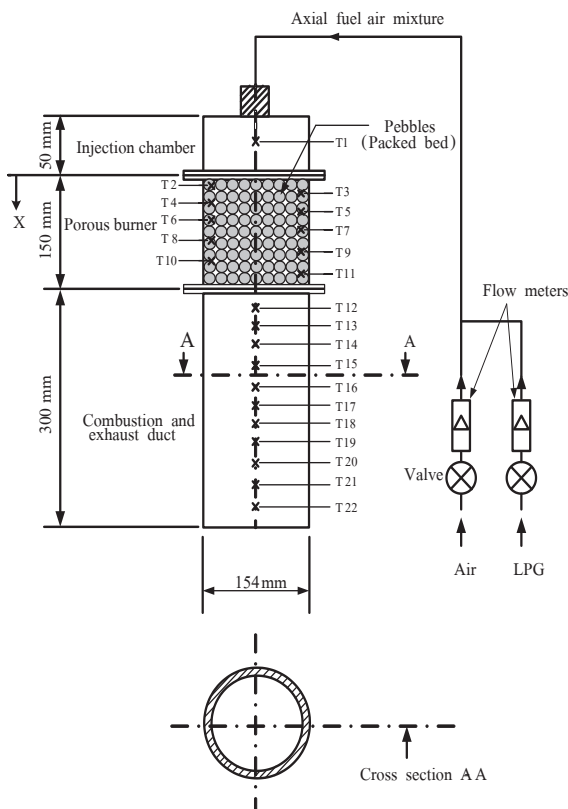
ดังนั้นคณะผู้เขียนบทความนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างสมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่มีความน่าเชื่อถือ สำหรับการทำนายการปลดปล่อย NOx จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลพีจีของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่น ด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ (multiple-linear regression method) ซึ่งเมื่อเร็ว ๆ นี้คณะผู้เขียนบทความได้เสนอสมการเชิงเส้นสำหรับทำนายอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่นมาแล้ว [12, 13] โดยใช้ผลการทดลองจากกลุ่มวิจัยห้องปฏิบัติการวิจัยในเทคโนโลยีของวัสดุพรุน (Development in Technology of Porous Materials Research laboratory: DiTo-Lab) ซึ่งเป็นหนึ่งในผู้เขียนบทความนี้ [14-15] มาเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ จากผลการใช้งาน พบว่าสมการดังกล่าวมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำอุณหภูมิที่ทำนายได้มาเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบและพัฒนาหัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเชื้อเพลิงแก๊สเพื่อใช้ในงานจริงได้จากที่กล่าวมาทั้งหมดสมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายสำหรับการทำนายปริมาณ NOx ที่จะนำเสนอในบทความวิจัยนี้ จึงคาดว่าจะจะเป็นประโยชน์เช่นเดียวกับกรณีของอุณหภูมิการเผาไหม้

2. หัวพ่นไฟเชื้อเพลิงแก๊สและวัสดุพรุน

2.1 หัวพ่นไฟวัสดุพรุนชนิดเชื้อเพลิงแก๊ส

รูปที่ 1 แสดงอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่นที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิงซึ่งแบ่งออกได้ 3 ขอบเขตที่สำคัญ ประกอบไปด้วยขอบเขตที่หนึ่งเป็นส่วนที่ป้อนเชื้อเพลิง (injection zone) หรือการจ่ายไอดี (อากาศกับแอลพีจี) เข้าสู่วัสดุพรุนแบบ

เม็ดกลมอัดแน่น ขอบเขตที่สองเป็นการอุ่นไอดีหรือตำแหน่งการติดตั้งวัสดุพอร์น (porous burner zone) เรียงตัวบรรจุอยู่ในท่อสแตนเลสที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ 154 mm หนา 2 mm นอกจากนี้เพื่อกันความร้อนสูญเสียสู่ภายนอก จึงหล่อปูนทนไฟ (cement) หนา 2 mm ภายในท่อสแตนเลส ตลอดช่วงที่มีการบรรจุวัสดุพอร์น (150 mm) และขอบเขตสุดท้ายคือการเผาไหม้และท่อไอเสีย (combustion and exhaust duct zone) จากส่วนประกอบทั้งหมดของหัวพ่นไฟแบบนี้จะมีหลักการทำงาน คือ เมื่อไอดี (อากาศผสมกับแอลพีจี) ไหลผ่าน Injection zone เข้าสู่ Porous burner zone ไอดีจะไหลผ่านชั้นวัสดุพอร์น และจะมีระดับอุณหภูมิที่สูงขึ้น หลังจากนั้นไอดีจะไหลไปยังบริเวณทางออกของชั้นวัสดุพอร์นเข้าสู่ขอบเขตที่สาม ก่อให้เกิดการจุดติดไฟ (ignition) และเผาไหม้ในที่สุด (combustion zone) เปลวไฟที่เกิดขึ้นจะแผ่รังสีความร้อนย้อนกลับไปยังชั้นวัสดุพอร์น ทำให้มีความร้อนหมุนเวียนภายในระบบเป็นวัฏจักรเกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่องตรงที่มีการจ่ายเชื้อเพลิงเข้ามายังชั้นวัสดุพอร์น



รูปที่ 1 แผนผังอุปกรณ์การทดลองของหัวพ่นไฟวัสดุพอร์นชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

2.2 วัสดุพอร์น

วัสดุพอร์นรูปแบบเม็ดกลมอัดแน่นที่ทำการศึกษาคือจะอ้างอิงมาจากการวิจัยของปรีชา ศรีสุวรรณ [15] กล่าวคือ เป็นเซรามิกส์เม็ดกลมชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ (Alumina-Cordierite, Al-Co) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย (d) และค่าความพอร์น (ϵ) เท่ากับ 3 cm และ 0.322 ตามลำดับ ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 เซรามิกส์เม็ดกลมชนิดอะลูมินา-คอร์ดีไรท์ที่เลือกใช้เป็นวัสดุพอร์นชนิดเม็ดกลมอัดแน่น

3. การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองแบบเส้นตรงเชิงพหุ

เพื่อให้ได้ผลการเชิงเส้นแบบหลายตัวแปรที่สามารถทำนายปริมาณ NO_x ได้อย่างน่าเชื่อถือ การวิเคราะห์ทางสถิติของการทดลองจะมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญดังรายละเอียดต่อไปนี้ 1) ขั้นตอนแรกจะใช้วิธีการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (factorial experimental method) [16] เพื่อทำการวิเคราะห์หาความสำคัญหรืออิทธิพลของปัจจัยหลัก (main factors) ที่มีผลต่อปริมาณ NO_x สำหรับปัจจัยหลักที่นำมาศึกษาในบทความวิจัยนี้จะมี 3 ปัจจัย ได้แก่ ความสูงของชั้นวัสดุพอร์น (porous thickness, H) อัตราความเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อนระหว่างแอลพีจีกับอากาศ (volumetric flow rate of premixed LPG and air, V_{mix}) และอัตราส่วนสมมูล (equivalent ratio, Φ) โดยแต่ละปัจจัยจะใช้ข้อมูลการทดลองจากผลงานวิจัยที่ผ่านมาของคณะผู้เขียนบทความ [14, 15] โดยมีขอบเขตของข้อมูล ดังนี้ ค่า H อยู่ในช่วง 2.5–12.5 cm ค่า V_{mix} อยู่ในช่วง 5–35 m^3/h และ Φ อยู่ระหว่าง 0.55–1.0 ซึ่งพิจารณาอ้างอิงกับสถานะเสถียรของการเผาไหม้ ด้วยเหตุนี้ปัจจัยร่วมแบบสองตัว (two-way interaction factors) คือ HV_{mix} , $H\Phi$

และ $V_{mix}\Phi$ รวมทั้งปัจจัยร่วมแบบสามตัว (three-way interaction factors, $H\Phi V_{mix}$) ก็ย่อมต้องถูกวิเคราะห์ เช่นเดียวกัน การวิเคราะห์เช่นนี้คือจัดการกับข้อมูลด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) [16] โดยกำหนดให้เปอร์เซ็นต์ความเชื่อมั่นไม่เกิน 5 % หรือระดับค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และ 2) ขั้นตอนสุดท้าย คือ การใช้วิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ (multiple-linear regression method) [18] เพื่อสร้างสมการที่เหมาะสมในการทำนายปริมาณ NO_x ที่ปลดปล่อยออกมาจากหัวพ่นไฟว์สตูพรุนแบบเม็ดกลมอัดแน่นที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง

4. ผลการวิเคราะห์และการอภิปรายผล

4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวน

ตารางที่ 1 แสดงการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) สำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล พบว่าปัจจัยหลักทั้ง 3 ตัว (H , Φ และ V_{mix}) มีอิทธิพลต่อปริมาณ NO_x อธิบายได้จากระดับค่า P-value กล่าวคือมีค่าต่ำกว่า 0.05 และมีข้อสังเกตว่าทุกปัจจัยหลักมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ หากพิจารณาเพียงทศนิยมตำแหน่งที่สามเท่านั้น ส่วนปัจจัยร่วมแบบสองตัว (HV_{mix} , $H\Phi$ และ $V_{mix}\Phi$) รวมทั้งปัจจัยร่วมแบบสามตัว (three-way interaction factors, $H\Phi V_{mix}$) ก็ล้วนมีความสำคัญหรืออิทธิพลต่อปริมาณ NO_x ทุกปัจจัย สามารถอธิบายด้วยเหตุผลของระดับค่า P-value ที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (แสดงจุดทศนิยมเพียงสามตำแหน่ง) และมีค่าต่ำกว่า 0.05 ดังนั้น จึงใช้ปัจจัยทั้ง 7 ตัวนี้ (H , Φ , V_{mix} , HV_{mix} , $H\Phi$, $V_{mix}\Phi$ และ $H\Phi V_{mix}$) ไปวิเคราะห์ด้วยวิธีการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ เพื่อสร้างสมการเชิงเส้นที่สามารถใช้ทำนายปริมาณ NO_x ได้อย่างน่าเชื่อถือต่อไป

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียลที่มี 3 ปัจจัย

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	P-value
H	21720.724	4	5430.181	0.000
Φ	191657.267	23	8332.925	0.000
V_{mix}	20723.649	5	4144.730	0.000
HV_{mix}	821.414	20	41.071	0.000
$H\Phi$	68178.495	49	1391.398	0.000
$V_{mix}\Phi$	16220.404	108	150.189	0.000
$H\Phi V_{mix}$	13756.482	213	64.584	0.000
Error	846.000	423	2.000	
Total	701064.016	846		

4.2 การถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ

จากผลของตารางที่ 1 หรือจากปัจจัยทั้ง 7 ตัว สามารถสร้างเป็นสมการการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุได้ทั้งหมด 127 สมการ แต่ในบทความนี้จะขอนำเสนอเพียง 6 สมการที่มีความน่าเชื่อถือเท่านั้น ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 2 จากสมการทั้ง 6 พบว่ามีค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด (determination coefficient, R^2) ต่ำกว่า 0.8 ซึ่งยังมีค่าที่ค่อนข้างห่างจาก 1 มากพอสมควร แต่หากพิจารณาค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard error of Estimate, SE) ถือว่ามีระดับที่ค่อนข้างต่ำ ด้วยเหตุนี้สมการทั้ง 6 สามารถนำมาใช้ทำนายปริมาณ NO_x ของการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สจากหัวพ่นไฟว์สตูพรุนชนิดเม็ดกลมอัดแน่นได้อย่างสมเหตุสมผล อย่างไรก็ตามในบทความวิจัยนี้ขอเสนอแนะให้เลือกใช้สมการที่ 1 ซึ่งคาดว่าจะมีความน่าเชื่อถือมากที่สุด เนื่องจากมีค่า R^2 สูงสุด และ SE ก็มีค่าต่ำสุดด้วยเช่นกัน

ตารางที่ 2 สมการการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ จำนวน 6 สมการที่เลือกมาจากทั้งหมด 127 สมการ

ลำดับ	สมการ	R^2	SE
1	$NO_x = -2.099(H) + 33.443(\Phi) - 8.048(V_{mix}) + 1.055(HV_{mix}) + 11.839(\Phi V_{mix}) - 1.492(\Phi HV_{mix})$	0.792	13.142
2	$NO_x = 35.149(\Phi) - 8.038(V_{mix}) - 3.238(\Phi H) + 0.953(HV_{mix}) + 11.740(\Phi V_{mix}) - 1.335(\Phi HV_{mix})$	0.790	13.182
3	$NO_x = 15.430(\Phi) - 8.097(V_{mix}) + 0.968(HV_{mix}) + 12.750(\Phi V_{mix}) - 1.510(\Phi HV_{mix})$	0.778	13.567
4	$NO_x = -8.071(V_{mix}) + 1.250(\Phi H) + 0.965(HV_{mix}) + 13.428(\Phi V_{mix}) - 1.563(\Phi HV_{mix})$	0.759	14.126
5	$NO_x = -8.000(V_{mix}) + 0.951(HV_{mix}) + 13.317(\Phi V_{mix}) - 1.482(\Phi HV_{mix})$	0.751	14.365
6	$NO_x = 29.610(\Phi) - 2.687(V_{mix}) - 2.423(\Phi H) + 4.537(\Phi V_{mix})$	0.729	14.982

4.3 การเปรียบเทียบอิทธิพลของ H

รูปที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของค่า H ที่มีต่อปริมาณ NOx ระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง (เครื่องหมายวงกลมดำ) กับผลของการคำนวณด้วยสมการที่ 1 ถึง 6 (เส้นกราฟต่าง ๆ) โดยในรูปที่ 3 นี้ จะเป็นการเปรียบเทียบที่สภาวะ $V_{mix} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ และ $\Phi = 0.7$ พบว่าปริมาณ NOx ที่ได้จากการทดลองและสมการต่าง ๆ มีแนวโน้มสอดคล้องและไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ค่า NOx จะลดลงเมื่อ H เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นพฤติกรรมทั่วไปของหัวพ่นไฟรูปแบบนี้ เนื่องจากกลไกการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในชั้นนิวตูลุพรมมีระดับที่มากขึ้น [9, 10, 14, 15] หากทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นกราฟต่าง ๆ จะสังเกตได้ว่าผลการคำนวณจากสมการที่ 1 (เส้นทึบหนาสีดำ) กรณีสภาวะของ H ที่มีต่อ NOx จะให้ความสอดคล้องกับผลการทดลองดีที่สุด ในบรรดาเส้นกราฟต่าง ๆ อธิบายได้ด้วยค่า R^2 ของสมการที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด

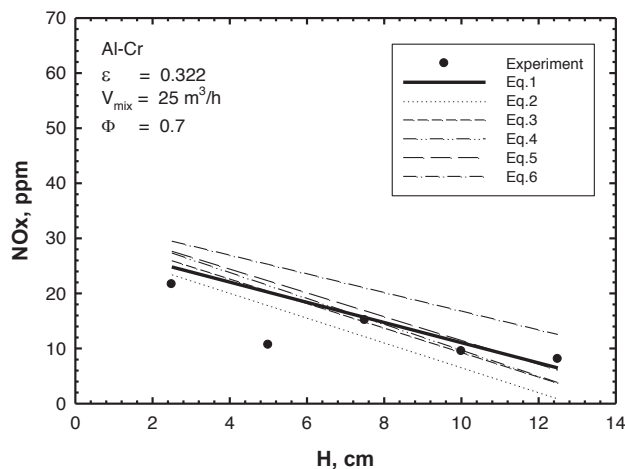
4.4 การเปรียบเทียบอิทธิพลของ Φ

รูปที่ 4 แสดงผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของค่า Φ ที่มีต่อปริมาณ NOx ระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง (เครื่องหมายวงกลมดำ) กับผลของการคำนวณด้วยสมการที่ 1 ถึง 6 (เส้นกราฟต่าง ๆ) เป็นการเปรียบเทียบที่สภาวะ $V_{mix} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$ และ $H = 5 \text{ cm}$ พบว่าปริมาณ NOx ที่ได้จากการทดลองและสมการต่าง ๆ มีแนวโน้มสอดคล้องและไปในลักษณะเดียวกัน กล่าวคือ ค่า NOx จะเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อ Φ เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเผาไหม้ปกติ หรือเข้าใกล้สภาวะ

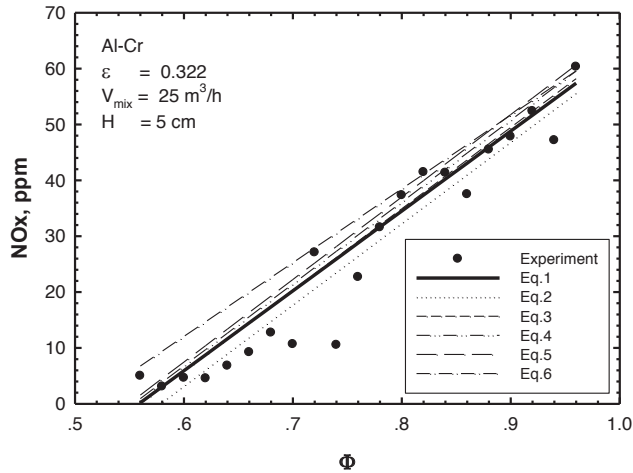
สโตยชิโอเมตริก (stoichiometric condition, $\Phi = 1$) ดังนั้น เมื่อระบบได้รับปริมาณเชื้อเพลิงเพิ่มขึ้น การเผาไหม้ย่อมมีความรุนแรงมากขึ้น ส่งผลให้อุณหภูมิสูงขึ้นและก่อให้เกิด NOx (Thermal NOx) [8, 17] หากทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นกราฟต่าง ๆ จะสังเกตได้ว่าผลการคำนวณจากสมการที่ 1 (เส้นทึบหนาสีดำ) จะให้ความสอดคล้องกับผลการทดลองดีที่สุด อธิบายได้ด้วยค่า R^2 ของสมการที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด เช่นเดียวกับกรณีอิทธิพลของ H

4.5 การเปรียบเทียบอิทธิพลของ V_{mix}

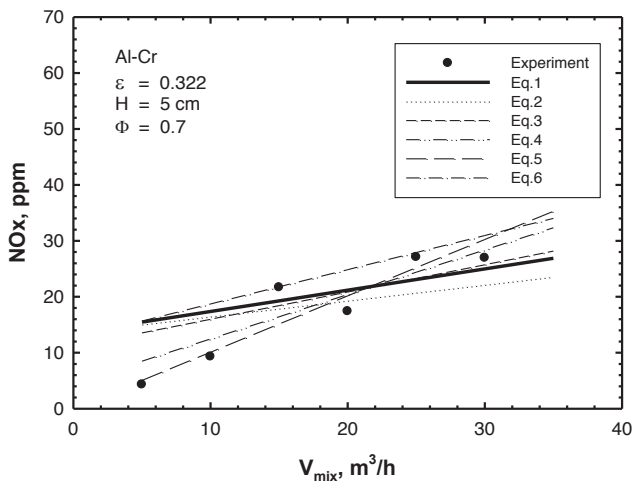
รูปที่ 5 แสดงผลการเปรียบเทียบอิทธิพลของค่า V_{mix} ที่มีต่อปริมาณ NOx ระหว่างผลที่ได้จากการทดลอง (เครื่องหมายวงกลมดำ) กับผลของการคำนวณด้วยสมการที่ 1 ถึง 6 (เส้นกราฟต่าง ๆ) เป็นการเปรียบเทียบที่สภาวะ $\Phi = 0.7$ และ $H = 5 \text{ cm}$ จากการเปรียบเทียบพบว่าปริมาณ NOx ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณของสมการต่าง ๆ มีแนวโน้มสอดคล้องและไปในลักษณะเดียวกัน (NOx เพิ่มขึ้นตามระดับ V_{mix} ที่มากขึ้น) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การเผาไหม้ปกติ เมื่อเชื้อเพลิงถูกป้อนเข้าไปในระบบเร็วขึ้น ย่อมส่งผลให้เกิดการเผาไหม้อย่างต่อเนื่อง มีความรุนแรง ดังนั้นระดับอุณหภูมิการเผาไหม้จึงสูงขึ้นและทำให้เกิด Thermal NOx นอกจากนี้ หากทำการเปรียบเทียบเฉพาะผลการคำนวณ (เส้นกราฟต่าง ๆ) จะพบว่าสมการที่ 1 (เส้นทึบหนาสีดำ) จะทำนายปริมาณ NOx ได้สอดคล้องกับผลการทดลองที่สุด เพราะค่า R^2 มีค่าใกล้เคียงกับ 1 มากที่สุด



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบระหว่างสมการการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ จำนวน 6 สมการ กับผลการทดลอง [15] กรณีอิทธิพลความสูงของชั้นนิวตูลุพรม (H)



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบระหว่างสมการการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ จำนวน 6 สมการ กับผลการทดลอง [15] กรณีอัตราส่วนผสม (Φ)



รูปที่ 5 การเปรียบเทียบระหว่างสมการการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ จำนวน 6 สมการกับผลการทดลอง [15] กรณีอัตราส่วนผสมอัตราความเร็วเชิงปริมาตรของเชื้อเพลิงแก๊สผสมก่อนระหว่างแอลพีจีกับอากาศ (V_{mix})

5. สรุป

จากผลการวิเคราะห์อัตราส่วนผสมของ H , Φ และ V_{mix} ที่มีผลต่อปริมาณ NO_x ซึ่งปลดปล่อยมาจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแอลพีจีของหัวพ่นไฟฟัดพุ่นแบบเม็ดกลมอัดแน่น สามารถสรุปได้ดังนี้

1) ปัจจัยหลักแบบเดี่ยวทั้ง 3 ตัว (H , Φ และ V_{mix}) ปัจจัยร่วมแบบสองตัว (HV_{mix} , $H\Phi$ และ $V_{mix}\Phi$) และปัจจัยร่วมแบบสามตัว ($H\Phi V_{mix}$) ล้วนมีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยปริมาณ NO_x เนื่องจากระดับค่า P -value มีค่าต่ำกว่า 0.05

2) สมการการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุสามารถสร้างได้ทั้งหมด 127 สมการ แต่นำเสนอ 6 สมการที่มีความน่าเชื่อถือที่สุด โดยพิจารณาจากการเรียงลำดับค่า R^2 จากมากไปหาน้อย ซึ่งแม้ว่าค่า R^2 จะต่ำกว่า 0.8 แต่ค่า SE ถือว่ามีระดับที่ค่อนข้างต่ำ ด้วยเหตุนี้สมการทั้ง 6 สามารถนำมาใช้ทำนายปริมาณ NO_x ได้อย่างสมเหตุสมผล

3) สมการที่ 1 จะมีความน่าเชื่อถือมากที่สุดและใช้การใช้งานจริงได้ในการทำนายปริมาณ NO_x เนื่องจากมีค่า R^2 สูงสุด และ SE ก็มีค่าต่ำสุด ซึ่งแสดงได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{NO}_x = & -2.099(H) + 33.443(\Phi) - 8.048(V_{\text{mix}}) \\ & + 1.055(HV_{\text{mix}}) + 11.839(\Phi V_{\text{mix}}) \\ & - 1.492(\Phi HV_{\text{mix}}) \end{aligned}$$

โดยมีขอบเขตการใช้งานในสภาวะ $2.5 \leq H \leq 12.5$ cm,
 $5 \leq V_{\text{mix}} \leq 35$ m³/h และ $0.55 \leq \Phi \leq 1.0$

4) การเปรียบเทียบอิทธิพลของค่า H, Φ และ V_{mix} ที่มีผลต่อปริมาณ NO_x ระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับผลของการคำนวณด้วยสมการการถดถอยแบบเส้นตรงเชิงพหุ จะมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ นายปรีชา ศรีสุวรรณ และนายศาสตรา บุญมาก สำหรับเอื้อเฟื้อข้อมูลการทดลองบางส่วนเพื่อใช้ในการวิเคราะห์หรือดำเนินการวิจัยครั้งนี้ จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Howell, J.R., Hall, M.J., Ellzey, J.L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media. *Progress in Energy and Combustion Science*. 1996; 22(2):121-145.
- [2] Wood, S., Harris, A.T. Porous burners for lean-burn applications. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2008; 34(5):667-684.
- [3] Mujeebu, M.A., Abdullah, M.Z., Abu Bakar, M. Z., Mohamad, A.A., Muhad, R.M.N., Abdullah, M.K. Combustion in porous media and its applications – a comprehensive survey, *Journal of Environmental Management*. 2009; 90(8): 2287-2312.
- [4] Echigo, R., Ichimiya, K., Kurusu, M., Yoshizawa, Y. Combustion augmentation of extremely low caloric gases: application of the effective energy conversion method from gas enthalpy to thermal radiation. *Proceedings of the ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference, Honolulu, Hawaii, USA*. 1983;20-24.
- [5] Yoshizawa, Y., Sakaki, K., Echigo, R. Analytical study of the structure of radiation controlled flames, *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1988; 31(2):311-319.
- [6] Hsu, P.F., Evans, W.D., Howell, J.R. Experimental and numerical study of premixed combustion within non-homogeneous porous ceramics. *Combustion Science and Technology*. 1993; 90:149-72.
- [7] Trimis, D., Durst, F. Combustion in a porous medium – advances and applications. *Combustion Science and Technology*. 1996; 121(6):153-168.
- [8] สำเริง จักรใจ. การเผาไหม้. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2547.
- [9] Pereira, J.C.E., Zhou, X.Y. Comparison of combustion model for simulating the premixed combustion in inert porous media. *Fir and Materials*. 1998; 22:187-197.
- [10] Lui, J.F., Hsieh, W.H. Experimental investigation of combustion in porous heating burners. *Combustion and Flame*. 2004; 138: 295-303.
- [11] Hossainpour, S., Haddadi, B. Numerical study of the effects of porous burner parameters on combustion and pollutants formation. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2008, Vol II, July 2-4, 2008, London U.K.*
- [12] ศาสตรา บุญมาก, บัณฑิต กฤดาคม. การทำนายอุณหภูมิการเผาไหม้เชื้อเพลิงแก๊สของหัวพ่นไฟวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่นโดยวิธีการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบสองระดับ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 9. 8-10 พฤษภาคม 2556 จังหวัดนครนายก.
- [13] Klamnoi, A., Yotha, N., Krittacom, B. Prediction of combustion temperature of Liquefied Petroleum Gas (LPG) on the spherical packed-bed porous burner. *International Congress on Natural Science and Engineering (ICNSE)*, May 7-9, 2015, Kyoto, Japan.

- [14] บัณฑิต กฤดาคม, พิพัฒน์ อมตฉายา, ปวีนิติ วรามิตร. หัวพันไฟวัสดุพูนเชื้อเพลิงแก๊สแอลพีจีที่ใช้อะลูมินา-คอร์ดีไรท์เม็ดกลมเป็นวัสดุพูนแบบเม็ดกลมอัดแน่น. วิศวกรรมสารฉบับวิจัยและพัฒนา. 2556; (24)1:42-49.
- [15] ปรีชา ศรีสุวรรณ. การศึกษาเชิงทดลองหัวพันไฟวัสดุพูนชนิดเซรามิกส์เม็ดกลมที่ใช้แอลพีจีเป็นเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน. 2556.
- [16] Montgomery, D.C., Peck, E.A., Vining, G.G. Introduction to Linear Regression Analysis (4th Ed.), WILEY, New York, USA. 2006.
- [17] Anamalai, K., Puri, I.K. Combustion Science and Engineering. CRC Press Taylor & Francis Group, New York, USA. 2007.