

**การทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ลของเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน
สำหรับหัวเผาเชื้อเพลิงผง**

Examination of swirl number from a swirl generator for pulverized burner

พงศธร ปุยา^{1*} และ จารุวัตร เจริญสุข¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

* ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2326-4197 โทรสาร: 0-2326-4198 E-mail: champ_kmitl52@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน โดยใช้เทคนิคแผงรังผึ้ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาไหม้เชื้อเพลิงกลบแบบผง (Pulverized) ขนาด 100 kW แบบ มีการหมุนเวียนก๊าซไอเสียภายในห้องเผาไหม้กลับมาใช้ใหม่ โดยในการทดสอบได้ทำการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของ อากาศส่วนที่ 1 คืออากาศที่ใช้ในการป้อนเชื้อเพลิงและอากาศส่วนที่ 2 คืออากาศที่ใช้ในการสร้างอากาศหมุนวน ในห้องเผาไหม้เป็น 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 และทำการปรับมุมใบพัดของกังหันเป็น 10, 20, 25 และ 30 องศาตามลำดับ จากผลการทดสอบพบว่าค่าตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าสูงสุดที่มุมของใบพัดของกังหันเท่ากับ 20° โดยมี ค่าเท่ากับ 0.25 และ 0.3 ที่อากาศส่วนเกิน 10% และ 20% ตามลำดับ อีกทั้งได้มีการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ ได้กับตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการคำนวณพบว่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในย่านเดียวกันกับค่าตัวเลข สเวิร์ลที่ได้จากการคำนวณ ยังคงมีความผิดพลาดอยู่ ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำค่าความผิดพลาดไปใช้ชดเชยค่าตัวเลข สเวิร์ลที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาต่อไป

คำสำคัญ: ตัวเลขสเวิร์ล, หัวเผาเชื้อเพลิงผง, แผงรังผึ้ง

Abstract

This research aims to find the swirl count of a swirl generator that is installed in the 100 kW of flue gas recirculation pulverized burner by using the honeycomb technique. The primary/secondary air ratios were adjusted as: 50:50, 60:40, 70:30 and 80:20, while adjusting the blade angle of the swirl generator from 10-degrees up to 30-degrees. It was found that the maximum swirl count occurred at a 20-degree blade angle. There is 0.25 and 0.3 excess air at 10% and 20%. Moreover, the swirl number from the experiment and calculations are in the same range but there is an error. This error will be compensated for to improve the swirl number in the performance tests of the future.

Keywords: swirl number, pulverized burner, honeycomb technique.

1. บทนำ

ปัจจุบันพลังงานเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญ ในการตอบสนองความต้องการขั้นพื้นฐาน ของประชากรและ เป็นปัจจัยพื้นฐาน การผลิตในภาคธุรกิจและ อุตสาหกรรมดังนั้นจึงต้องมีการจัดหาพลังงานให้มี ปริมาณที่เพียงพอสอดคล้องกับความต้องการของ ประชากร จากที่ประเทศไทยเป็นประเทศแห่ง เกษตรกรรมจึงมีชีวมวลบางส่วนที่เหลือจาก การเกษตรซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนใน ภาคอุตสาหกรรม รวมถึงการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นจึงได้มีการนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาปรับใช้กับ เทคโนโลยีสมัยใหม่ ซึ่งการเผาไหม้เป็นวิธีที่ใช้กัน มากในการนำเชื้อเพลิงแข็งมาใช้ให้เกิดประโยชน์ โดย ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคโนโลยีการเผาไหม้แบบระบบการ เผาไหม้แบบเชื้อเพลิงผงซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่นิยมใช้ กันอย่างแพร่หลาย แต่เทคโนโลยีนี้ยังต้องการ พัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบ โดยหนึ่งใน วิธีการพัฒนา คือ การหมุนเวียนก๊าซไอเสียที่มีอุณหภูมิ สูงกลับมาใช้ใหม่ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้โดยระบบ ของหัวเผาเชื้อเพลิงผงแบบมีการหมุนเวียนก๊าซไอเสีย ย้อนกลับมาใช้ใหม่ที่สร้างขึ้นมีการติดตั้งเครื่องกำเนิด กระแสหมุนวนเพื่อสร้างความปั่นป่วนและยืด ระยะเวลาการเผาไหม้ ทำให้ลักษณะของเปลวไฟเป็น รูปดอกบัวและเกิดการหมุนเวียนก๊าซไอเสียทั้งแบบ หมุนวนภายใน (Internal recirculation zone) และ หมุนวนภายนอก (External recirculation zone) ซึ่ง จะส่งผลให้ประสิทธิภาพของหัวเผาดีขึ้น

สำหรับการศึกษาลักษณะทางอากาศพลศาสตร์ ภายในห้องเผาไหม้โดยเฉพาะการไหลแบบหมุนวนมีความ จำเป็นที่จะนำไปใช้ในการออกแบบและเพิ่ม ประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ซึ่งสามารถศึกษาได้จาก Beer และ Chigier [1] Greitzer และคณะ [2] Lefebvre [3] และ Schlüter [4] Wicker และ Eaton [5] ได้แสดงให้เห็นถึงข้อดีของการใช้ตัวสร้างการไหลแบบหมุนวน ซึ่งทำให้การกระจายตัวของอากาศเกิดอย่างรวดเร็วและช่วยให้เกิดการผสมกันของอากาศและ เชื้อเพลิงดีขึ้น Sadd A.Ahmed [6] แสดงให้เห็นว่าการ

ไหลแบบหมุนวนจะทำให้เกิดกระแสการไหลย้อนกลับ ณ บริเวณตรงกลางห้องเผาไหม้และทำให้ กระแสการไหลมีโครงสร้างที่ปั่นป่วนมากขึ้น จึงทำให้อากาศและเชื้อเพลิงเกิดการผสมกันที่ดี

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาเชื้อเพลิงผงขนาด 100 kW และทำการเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับการคำนวณหาตัวเลขสเวิร์ลทางทฤษฎี

2. ทฤษฎีที่ใช้ในการวิเคราะห์

การออกแบบการสร้างการไหลแบบหมุนวนให้มีความเหมาะสมและเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้โดยที่ขนาดของมุม จำนวนและขนาดของใบพัด จะส่งผลถึงความแรงของการหมุนวนและบ่งบอกถึงขนาดของการไหลวนกลับของกระแสอากาศตรงกลางห้องเผาไหม้ โดยที่ความรุนแรงของการไหลแบบหมุนวน บ่งบอกด้วยตัวเลขสเวิร์ล (Sw) ซึ่งการไหลภายในห้องเผาไหม้จะถูกนิยามด้วยอัตราส่วนของ โมเมนตัมเชิงมุมต่อโมเมนตัมเชิงเส้นหารด้วยคุณสมบัติเชิงความยาว จึงได้นำเทคนิคดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ดัง สมการ

$$Sw_{ril} = \frac{\tan \text{ gentinal momentum}}{\text{axial momentum}} \quad (1)$$

$$Sw_{ril} = \frac{\rho_{air} v_r A v_{\theta} r}{((\rho_{air} v_1 A_1 + \rho_{air} v_r A_2) v_{exit}) D} \quad (2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัด

ρ_{air} คือ ค่าความถ่วงจำเพาะของอากาศ

v_r คือ ความเร็วในแนวรัศมี

v_{θ} คือ ความเร็วในแนวสัมผัส

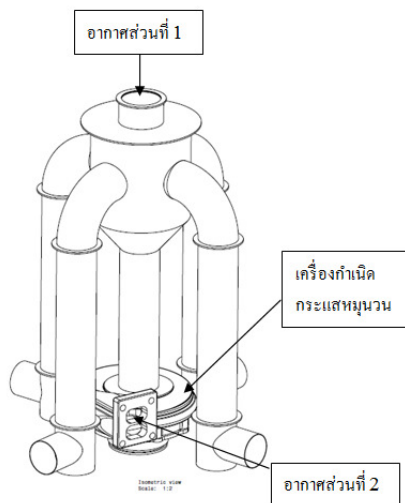
v_{exit} คือ ความเร็วทางออก

r คือ รัศมี

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ

3. อุปกรณ์ทดสอบตัวเลขสเวิร์ล

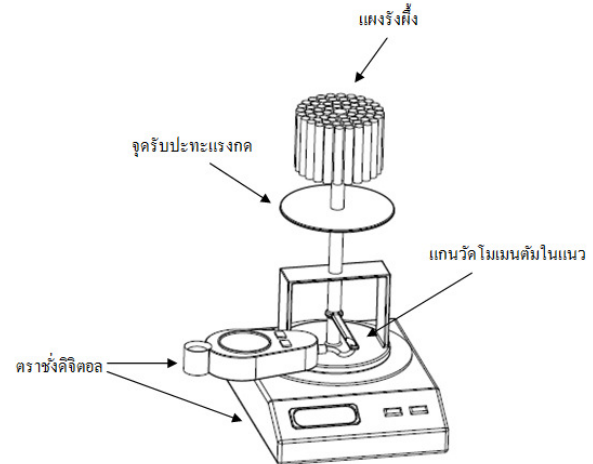
งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้กังหันแปรผันที่ห่อหุ้มด้วยชิพรุ่น 3C04 รูปทรงหอยโข่ง ที่สามารถปรับมุมของใบพัดได้ 10-30 องศา มาเป็นเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวนที่ โดยการติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางหัวเผาซึ่งอากาศที่ใช้ในการสร้างกระแสหมุนวนคืออากาศส่วนที่ 2 ที่ถูกจ่ายเข้าสู่บริเวณทางเข้าของกังหันในแนวรัศมีและถูกปรับมุมของการไหลด้วยใบพัดแปรผัน ไหลออกเป็นลักษณะหมุนวนเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ในขณะที่อากาศส่วนที่ 1 จะถูกจ่ายเข้าสู่หัวเผาในแนวแกนที่บริเวณด้านบนของหัวเผาผ่านเจ็ทปัดด้วยความเร็วสูงดังแสดงในรูปที่ 1.



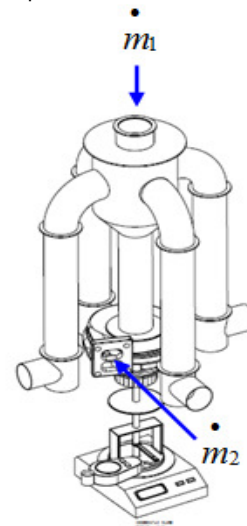
รูปที่ 1 แสดงท่อทางเข้าของอากาศส่วนที่ 1 และ 2 และเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน

ในการทดลองวัดหาตัวเลขสเวิร์ลทำโดยการหาอัตราส่วนของโมเมนตัมในแนวสัมผัสและแนวแกน โดยโมเมนตัมในแนวสัมผัส ทำการวัดด้วยเทคนิคการวัดทอร์กสถิตย์ที่เกิดจากการสูญเสียของโมเมนตัมภายในแผงรังสี ที่ถูกติดตั้งถัดจากทางออกของกังหัน โดยจะวัดด้วยเครื่องชั่งดิจิตอลในลักษณะของแรงดึงค่าที่ได้จะเป็นแรงดึงที่เกิดจากการต้านแรงการหมุนวนของอากาศ เพราะฉะนั้นโมเมนตัมในแนวสัมผัสจะได้จากการหาทอร์กของแรงดึงที่เกิดขึ้น ส่วนโมเมนตัมในแนวแกนได้จากผลคูณของแรงกดอันเนื่องมาจากอัตราการไหลรวมที่วัดบริเวณทางออกของกังหันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อทางออก โดยแรงกดได้จาก

การอ่านค่าจากตราชั่งดิจิตอลที่อยู่กับแกนของจุดรับปะทะแรงกด ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้นจึงทำการติดตั้งชุดทดสอบเข้ากับระบบของท่ออากาศส่วนที่ 1 และ 2 ดังแสดงในรูปที่ 3



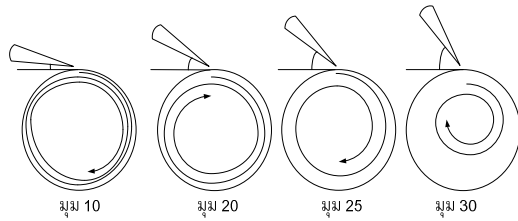
รูปที่ 2 ชุดอุปกรณ์ทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ล



รูปที่ 3 ลักษณะการติดตั้งชุดทดสอบหาตัวเลขสเวิร์ล

ในขณะที่อากาศส่วนที่ 2 ไหลเข้าเครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน ปริมาณอากาศทั้งหมดจะไหลตามทิศทางของมุมของใบพัดที่สามารถปรับมุมได้ 10, 20, 25 และ 30 องศา กับแนวสัมผัส ดังนั้นปริมาณอากาศที่ไหลผ่านใบพัดจะมีลักษณะหมุนวนเกิดเป็นกระแสหมุนวนของอากาศที่มีขนาดต่างกันตามการเปลี่ยนแปลงมุมของใบพัด โดยขนาดของกระแสหมุนวนแสดงได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าขนาดความรุนแรงของโมเมนตัมในแนวสัมผัสจะมี ขนาดลดลงตามการเพิ่มของมุมของใบพัด ดังนั้นสมมุติฐาน

ในการทดลอง คาดว่าการเพิ่มมุมของใบพัดจะส่งผลให้ค่าตัวเลขสเวิร์ลมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเมนตัมในแนวสัมผัสมีมาก



รูปที่ 5 ลักษณะกระแสหมุนวนของอากาศ

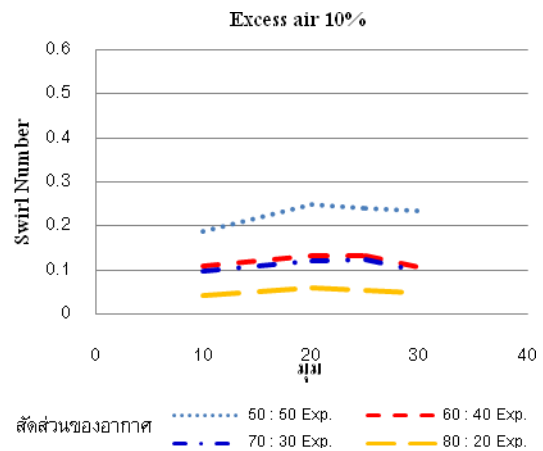
4. วิธีการทดลอง

เตรียมอุปกรณ์การทดลองดังแสดงในรูปที่ 3 โดยการนำชุดทดสอบตัวเลขสเวิร์ลไปติดตั้งตรงปลายทางออกของกังหันซึ่งการทดสอบนี้จะใช้พัดลมต้นกำลังขนาด 9 แรงม้า สำหรับใช้ในการอัดอากาศเข้าสู่ด้านบนของหัวเผาผ่านเจ็ทปั๊มด้วยความเร็วสูงและเข้าสู่เครื่องกำเนิดกระแสหมุนวน จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 (Primary air) และอากาศส่วนที่ 2 (Secondary air) ตามเงื่อนไขดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งในการวัดอัตราการไหลของอากาศทั้งสองส่วนโดยจะใช้ Pitot tube ควบคุมอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 (Primary air) และส่วนที่ 2 (Secondary air) ด้วย Ball valves จากนั้นทำการปรับอัตราการไหลอากาศพร้อมกับปรับมุมของกังหันตามเงื่อนไขในขณะเดียวกันก็ทำการบันทึกผลการทดลองตารางที่ 1. เงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองที่ Excess air 10% และ Excess air 20%

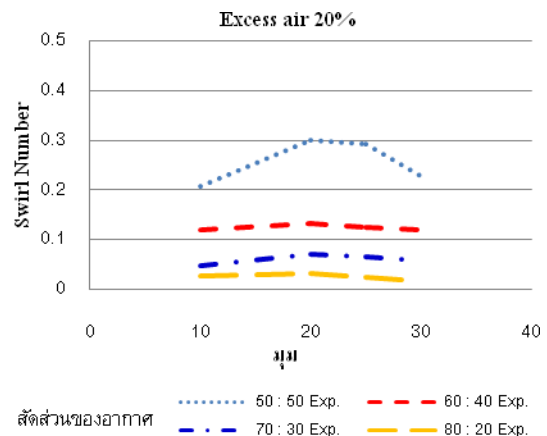
$m_1 : m_2$		มุมของใบพัดของเทอร์โบแปรผันเทียบกับแนวสัมผัส (องศา)
50%	50%	10 , 20 , 25 , 30
60%	40%	10 , 20 , 25 , 30
70%	30%	10 , 20 , 25 , 30
80%	20%	10 , 20 , 25 , 30

5. ผลการทดลอง

5.1 ค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดสอบ



รูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของมุมใบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสเวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10%



รูปที่ 7 แสดงอิทธิพลของมุมใบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสเวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 20%

จากรูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของมุมใบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสเวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10% จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มมุมของใบพัด ค่าตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมใบพัด 20° จากนั้นตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าลดลงต่ำที่มุม 30° โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งค่าตัวเลขสเวิร์ลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.25 ที่สัดส่วนอากาศ 50:50 ซึ่งผลการทดลองที่ได้ขัดแย้งกับสมมติฐานของงานวิจัย ทั้งนี้คาดว่าที่มุมของใบพัด 10° ค่าตัวเลขสเวิร์ลมีค่าน้อยเพราะเกิดการลดลงของ

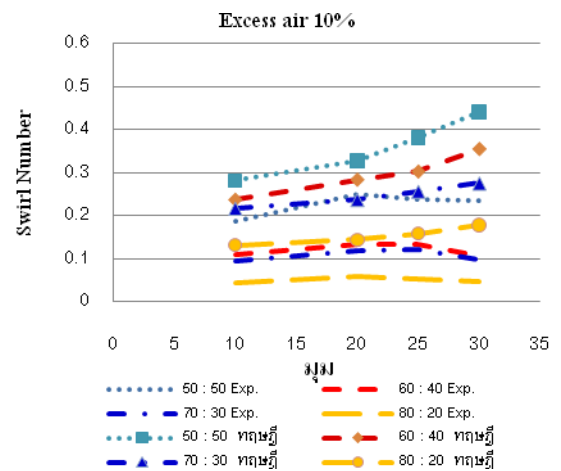
โมเมนต์ในแนวสัมผัส เนื่องจากปริมาณอากาศพุ่งเข้าไปปะทะกับผนังของท่อทางออกของเทอร์โบ ส่วนการตกลงของค่าตัวเลขสเวิร์ลในกรณีมุมไบพัดมากกว่า 20° เนื่องจากโมเมนต์ในแนวสัมผัสสูญเสียไปกับโมเมนต์ในแนวแกน เพราะขนาดกระแสมุมวนที่ถูกสร้างขึ้นมีขนาดเล็กแสดงดังรูปที่ 5 นอกจากนี้พบว่า การเพิ่มสัดส่วนของอากาศทั้งสองส่วนส่งผลให้ ค่าตัวเลขสเวิร์ลมีค่าน้อยลงเนื่องจาก โมเมนต์ในแนวแกนมีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มอัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1

จากรูปที่ 7. แสดงอิทธิพลของมุมไบพัดที่มีผลต่อตัวเลขสเวิร์ลที่สัดส่วนอากาศต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 20% จากการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มมุมของไบพัด ค่าตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมไบพัด 20° จากนั้นตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าลดลงต่ำสุดที่มุม 30° โดยมีแนวโน้มเดียวกันในทุกเงื่อนไขการทดลอง ซึ่งค่าตัวเลขสเวิร์ลสูงสุดมีค่าเท่ากับ 0.3 ที่สัดส่วนอากาศ 50:50 พฤติกรรมของค่าตัวเลขสเวิร์ลในของอากาศส่วนเกินทั้งสองกรณีจะเป็นไปในแนวโน้มเดียวกัน แต่ค่าตัวเลขสเวิร์ลโดยเฉลี่ยของกรณีอากาศส่วนเกินเท่ากับ 20% ที่สัดส่วน 70:30 และ 80:20 มีค่าน้อยกว่า ค่าตัวเลขสเวิร์ลของสัดส่วนเดียวกัน ที่อากาศส่วนเกิน 10% คาดว่าเป็นเพราะที่อากาศส่วนเกิน 20% มีปริมาณอัตราการไหลรวมของระบบมากกว่า จึงทำให้เมื่อเพิ่มสัดส่วนของอากาศส่วนที่ 1 แล้วส่งผลให้โมเมนต์ในแนวแกนมีความรุนแรงมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีอากาศส่วนเกิน 10%

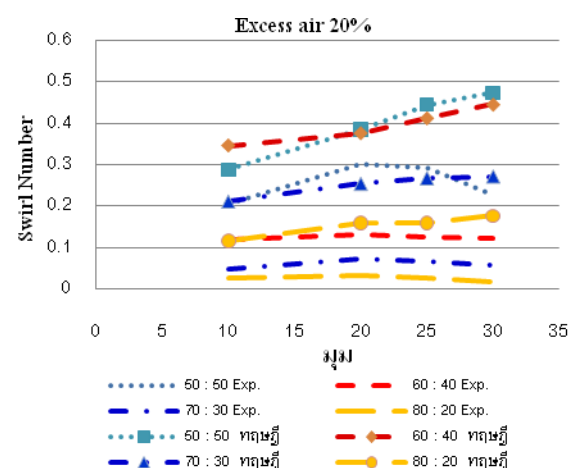
รูปที่ 8 และ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี ที่สัดส่วนอากาศและมุมต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10% และ 20 % ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบพบว่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดลองมีค่าอยู่ในย่านเดียวกันกับค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการคำนวณ แต่อย่างไรก็ตาม ความคลาดเคลื่อน (error) อยู่มาก โดยค่าความคลาดเคลื่อนจะน้อยลงตามการเพิ่มสัดส่วนอากาศทั้งสองส่วน คาดว่าเกิดจากการทดลอง มีความเสียดทาน

ของตลับลูก การรั่วของปริมาณลม หรือความผิดพลาดเนื่องจากการวัดและการอ่านค่า ทั้งหมดนี้จึงทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าตัวเลขสเวิร์ล ของทั้งสองวิธี ซึ่งทางผู้วิจัยจะนำค่าความผิดพลาดไปใช้ชดเชยค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ใช้ในการทดสอบสมรรถนะของหัวเผาต่อไป

5.2 การเปรียบเทียบค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดลองและจากการคำนวณทางทฤษฎีตามสมการที่ 2



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี ที่สัดส่วนอากาศและมุมต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 10%



รูปที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าตัวเลขสเวิร์ลที่ได้จากการทดลองและทางทฤษฎี ที่สัดส่วนอากาศและมุมต่างๆ กรณีอากาศส่วนเกิน 20%

6. สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าตัวเลขสเวิร์ลจะมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดที่มุมใบพัด 20° จะมีค่าลดลงต่ำที่มุม 30° ทุกๆ เงื่อนไขของการทดลอง และเมื่อมีการปรับสัดส่วน อัตราการไหลของอากาศส่วนที่ 1 เพิ่มขึ้นและอากาศส่วนที่ 2 ลดลงจะส่งผลทำให้ตัวเลขสเวิร์ลมีค่าลดลงตามอันเนื่องมาจากโมเมนตัมในแนวแกนที่มีมากกว่าโมเมนตัมในแนวสัมผัสจึงเกิดการสูญเสียโมเมนตัมเป็นผลทำให้เกิดการหมุนควงที่น้อยทำให้ตัวเลขสเวิร์ลมีค่าลดลง อีกทั้งในการปรับมุมใบพัดของเทอร์โบแปรผันที่พอเหมาะจะผลต่อตัวเลขสเวิร์ลถ้ามุมองศาที่แคบเกินไปกระแสมุมควงแคบและมุมองศาที่กว้างมากเกินไปการหมุนควงห่างจากแนวสัมผัสทำให้เกิดโมเมนตัมที่น้อยจึงเป็นผลให้ตัวเลขสเวิร์ลมีค่าต่ำ เนื่องจากการทดลองดังกล่าวยังมีความคลาดเคลื่อนของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนั้นอาจมีความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Beer, J. M. and Chigier, N. A., Combustion Aerodynamics, Applied Science Publishers LTD, 1972.
- [2] Greitzer, E. M., Tan, C. S. and Graf, M. B., Internal Flow: Concepts and Applications, Cambridge University Press, 2004.
- [3] Lefebvre A. H., Gas Turbine Combustion 2nd Ed., Taylor & Francis, Philadelphia, 1999.
- [4] Schlüter, J. U., Large Eddy Simulations of Flow and Mixing in Jets and Swirl Flows: Application to a Gas Turbine, Doctorat de L'I.N.P.T, 2002.
- [5] Wicker, R.B. and Eaton, J.K., Structure of a swirling, recirculating coaxial free jet and its effect on particle motion, International of Multiphase Flow, Volume 27, Issue 6, June 2001, Page 949-970.

- [6] Saad A.Ahmed, Velocity measurement and turbulence statistics of a confined isothermal swirling flow, Journal of Experimental Engineering Thermal and Fluid Science 17 (1998) 256-264.