

การศึกษาเชิงตัวเลขของผลจากการไหลหมุนควงต่อสมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ใน ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซโดยใช้ Standard k- ϵ Turbulence Model

The Numerical Study of Swirling Effect to Aerodynamic Performance of Gas Turbine Burner Using Standard k- ϵ Turbulence Model

Sujin Wanchat^{1*}, Karan Sengpanich¹, and Vejapong Juttijudata¹

¹ Department of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900

*Email: b4605615@ku.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาเชิงตัวเลขของผลของการไหลหมุนควงต่อการผสมในสเกลขนาดใหญ่และความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลงในห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซแบบ Non-premixed (swirl-type) โดยใช้ Standard k- ϵ Turbulence Model การศึกษาในเบื้องต้นสมมติให้การไหลในห้องเผาไหม้เป็นแบบคงตัวและสมมาตรรอบแกน ปฏิกริยาเคมีมีผลน้อยมากต่อการผสมในสเกลขนาดใหญ่ของอากาศกับเชื้อเพลิงจนไม่ได้นำมาพิจารณาในการศึกษา นอกจากนี้ยังสมมุติว่าการผสมในสเกลขนาดใหญ่ของ อากาศกับอากาศ และ อากาศกับเชื้อเพลิงนั้นเหมือนกัน ดังนั้นในการคำนวณนี้จึงศึกษาเฉพาะการผสมในสเกลใหญ่ของอากาศกับอากาศเท่านั้น การไหลหมุนควงจะถูกกำหนดโดยเงื่อนไขขอบเขตที่ความเร็วทางเข้าของเจ็ทอากาศหมุนควง ตัวเลขสเวิร์ล (Swirl number) และ ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number) ของเจ็ทหมุนควงที่ศึกษาอยู่ในช่วงของ 0.3 ถึง 1.2 และ 15,900 ถึง 47,500 ตามลำดับและตัวเลขเรย์โนลด์ส์ของเจ็ทอากาศที่ไม่หมุนควงถูกกำหนดให้มีค่าคงที่เท่ากับ 15,900

การยืนยันผลการคำนวณทำโดยการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองของ Roback และ Johnson [1] ซึ่งผลการคำนวณสามารถทำนายค่าความเร็วเฉลี่ยภายในห้องเผาไหม้ได้เป็นที่น่าพอใจ เมื่อเพิ่มตัวเลขสเวิร์ลบริเวณ central toroidal recirculation zone มีขนาดใหญ่ขึ้นแสดงให้เห็นว่าการผสมเพิ่มขึ้นเมื่อตัวเลขสเวิร์ลเพิ่มขึ้น นอกจากนี้บริเวณดังกล่าวยังมี turbulent viscosity ratio ที่มีค่าสูงขึ้นสนับสนุนข้อสรุปของการขยายบริเวณการผสมที่เพิ่มขึ้นเมื่อตัวเลขสเวิร์ลเพิ่มขึ้น ในทางกลับกันความดันรวมเฉลี่ยกลับลดลงมากขึ้น ตัวเลขสเวิร์ลที่ดีที่สุดต่อการผสมและความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลงสำหรับห้องเผาไหม้จะถูกศึกษาต่อไป

Abstract

This numerical study focused on a swirling effect to a large-scale mixing and a mean total pressure drop in a non-premixed, swirl-type gas turbine burner using standard k- ϵ turbulence model. As a preliminary study, flows in the burner were assumed to be steady (stationary) and axis-symmetric. A chemical reaction was assumed to play a negligible role in a large-scale mixing; a chemical reaction was not included in this study. Furthermore it was assumed that the large scale mixing of air/air is similar to a/f; this study focused only the mixing of air/air. The swirling effect was incorporate into the computational model by means of an inlet velocity boundary condition of a swirling jet. Swirl number and Reynolds number of swirling air jet were varied from 0.3 to 1.2 and 15,900 to 47,500, respectively, while the Reynolds number of non-swirling air jet was fixed at 15,900.

Validation against the experiment of Roback and Johnson [1] suggested that standard k- ϵ turbulence model predicted the mean velocity in the burner satisfactorily. As swirl number increased, the central toroidal recirculation zone enlarges suggesting that the mixing zone increases. The region of large turbulent viscosity ratio also increased supporting the conclusion of the increase of the mixing zone. While the mixing activity was enhanced as swirl increased, the mean total pressure drop increased. The issue of the optimal swirl number will be addressed in the future work.

Keywords: Swirl, Large-Scale Mixing, Pressure Drop, Reynolds-Average Navier-Stokes Equation (RANS), Standard k-ε Turbulence Model

บทนำ

จากความต้องการเครื่องยนต์กังหันก๊าซที่มีประสิทธิภาพสูงแต่มี Specific Fuel Consumption (SFC) ของเครื่องยนต์ที่ต่ำกว่าในอดีต รวมทั้งจากความต้องการที่จะลดการปล่อยมลพิษของเครื่องยนต์กังหันก๊าซ โดยเฉพาะ NO_x และ CO ดังนั้น จึงมีความต้องการที่จะพัฒนาห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้มีประสิทธิภาพในการเผาไหม้สูงกว่าเดิม แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่ห้องเผาไหม้ของเครื่องยนต์กังหันก๊าซนั้นก็ยังเป็นส่วนที่ได้รับการพัฒนาและปรับปรุงน้อยกว่าส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากความสลับซับซ้อนของพฤติกรรมและการไหลของอากาศภายในห้องเผาไหม้ รวมทั้งคุณลักษณะการติดไฟและการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้อีกด้วย

ห้องเผาไหม้นั้น มีหน้าที่สำคัญคือ ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเคมีจากเชื้อเพลิงเป็นพลังงานความร้อน เพื่อนำไปผลิตกังหันกำลังต่อไป องค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ประกอบด้วย [4]

- อัตราส่วนระหว่างเชื้อเพลิงกับอากาศ
- อัตราส่วนระหว่างอากาศกับอากาศ
- การสูญเสียความดันรวม
- ประสิทธิภาพในการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
- อุณหภูมิของห้องเผาไหม้

ซึ่งจะเห็นได้ว่า กระบวนการที่สำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพของห้องเผาไหม้ก็คือ กระบวนการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง หรืออากาศกับอากาศ ซึ่งการผสมที่ดีนั้นจะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ ลมมลภาวะ มีการเผาไหม้ที่เสถียร ไม่เกิดอาการ Flameout และมีการกระจายตัวของอุณหภูมิที่ออกจากห้องเผาไหม้อย่างสม่ำเสมอ แต่จะก่อให้เกิดการสูญเสียความดันรวมเพิ่มขึ้น ดังนั้น เราจึงต้องหาจุดเหมาะสมที่จะทำให้เกิดการผสมดีแต่มีการสูญเสียความดันรวมเพียงเล็กน้อย

นอกจากนี้ ในห้องเผาไหม้นั้นก็จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมเสถียรภาพของเปลวไฟ เพื่อให้เปลวไฟที่ติดหลังจากเกิดการสันดาปครั้งแรกนั้น สามารถที่ยังคงลุกไหม้ต่อไปได้แม้ว่าจะไม่ใช้หัวเทียนช่วยจุดแล้วก็ตาม ซึ่งอุปกรณ์ที่ช่วยควบคุมเสถียรภาพของเปลวไฟนี้จะมีหลากหลายชนิด แต่ในที่นี้สนใจศึกษาตัวสร้างกระแสหมุนควง (Swirler) โดยตัวสร้างกระแสหมุนควงนี้จะทำให้กระแสอากาศที่ไหลเข้ามาในห้องเผาไหม้เกิดการหมุนควงซึ่งเรียกว่าการไหลหมุนควง (Swirling flow) ซึ่งเป็นการผสมคุณลักษณะของการเคลื่อนที่แบบหมุน โดยการเคลื่อนที่แบบหมุนที่มาจากการหมุนควงจะถูกส่งผ่านไปยังเจ็ท

ที่ออกมาจากหัวฉีดให้มีความเร็วในแนวสัมผัสทำให้เกิด Adverse Pressure Gradient ในแนวแกนกลางของเจ็ท ดังนั้นในการไหลหมุนควงที่มีระดับความแรงค่อนข้างสูงจะทำให้เกิด Adverse Pressure Gradient ที่มีความรุนแรงมากจนเกิดบริเวณการไหลหมุนวน (Recirculation zone) ซึ่งมีความสำคัญต่อการผสมระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิง และเสถียรภาพของเปลวไฟในห้องเผาไหม้ แต่อย่างไรก็ตาม การเกิดการไหลหมุนวนจะทำให้ห้องเผาไหม้สูญเสียความดันรวม เป็นผลให้สมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซตกลงตามไปด้วย [3]

การศึกษานี้มีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองคือ 1. ตัวเลขสเวิร์ล, S_w ใช้วัดความแรงของการไหลหมุนควง 2. ตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re) ใช้ในการแยกลักษณะการไหลของของไหล 3. ความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลง (Average total pressure drop) ใช้วัดความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลงระหว่างหน้าตัดทางออกกับหน้าตัดทางเข้า 4. Turbulent viscosity ratio, β ใช้วัดค่าการผสมภายในห้องเผาไหม้

นิยามของตัวเลขสเวิร์ล, S_w

ระดับความแรงของการไหลหมุนควงถูกนิยามโดยตัวเลขสเวิร์ล ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างโมเมนตัมเชิงมุมของเจ็ท (G_θ) กับโมเมนตัมเชิงเส้นในแนวแกนของเจ็ท (G_x) ดังสมการ

$$S_w = \frac{G_\theta}{RG_x} \quad (1)$$

โดยที่

R = รัศมีของห้องเผาไหม้ทรงกระบอก, m

นอกจากนี้ จาก [2] ยังสามารถกำหนดค่าตัวเลขสเวิร์ลได้จากการเปรียบเทียบกันระหว่างความเร็วในแนวแกน (u_x) กับความเร็วหมุนควง (u_θ) และสามารถคำนวณได้จากได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$S_w = \frac{\frac{u_\theta}{2u_x}}{1 - \left(\frac{u_\theta}{2u_x}\right)^2} \quad (2)$$

นิยามของตัวเลขเรย์โนลด์ส์ (Reynolds number, Re)

ตัวเลขเรย์โนลด์ส์คืออัตราส่วนระหว่างแรงเฉื่อย (Inertial forces, $v_s \rho$) ต่อแรงหนืด (viscous forces, μ/L) และเป็นปริมาณที่มีความสำคัญในการแยกลักษณะการไหลของของไหลที่ต่างกันออกเป็น 2 รูปแบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow, $Re < 2100$) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow, $Re > 2300$) สามารถแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$Re = \frac{\rho v_s L}{\mu} \quad (3)$$

โดยที่

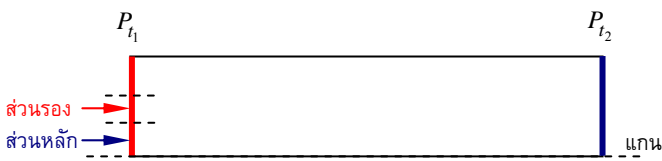
v_s = ความเร็วเฉลี่ยของของไหล, m/s

L = Characteristic length, m

μ = ความหนืดพลศาสตร์ของไหล, N.s/m²

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m³

นิยามของความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลง (Average total pressure drop)



รูปที่ 1 ตำแหน่งที่ใช้วัดค่าผลต่างความดันรวมเฉลี่ยของหน้าตัด (ΔP_t)
พิจารณาแบบสมมาตรรอบแกน

การวัดความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลงภายในห้องเผาไหม้ทำได้โดยการวัดค่าผลต่างของความดันรวมเฉลี่ยของหน้าตัดทางออก (P_{t2}) กับความดันรวมเฉลี่ยของหน้าตัดทางออก (P_{t1}) ดังแสดงในรูปที่ 1 ตามสมการต่อไปนี้

$$\Delta P_t = P_{t2} - P_{t1} \quad (4)$$

ถ้าค่าผลต่างของความดันรวมเฉลี่ยมีค่าสูงขึ้นจะทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์กึ่งกังหันก๊าซลดลง

นิยามของ Turbulent viscosity ratio, β

เพื่อที่จะวัดค่าการผสมภายในห้องเผาไหม้นั้น เราจะใช้ค่า Turbulent viscosity ratio ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Viscosity, μ_{turb}) กับความหนืดของการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Viscosity, μ_{lam}) เป็นตรรกะนี้วัดการผสมดังสมการต่อไปนี้

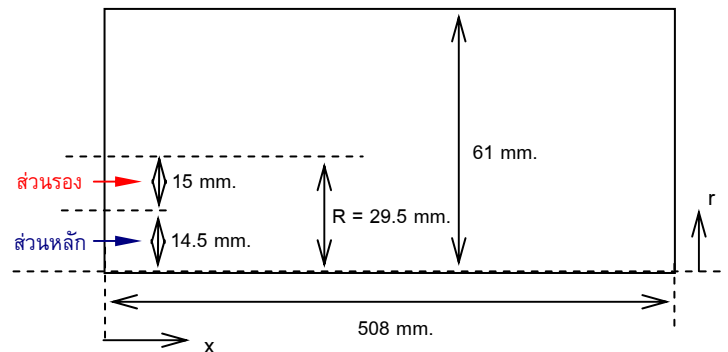
$$\beta = \frac{\mu_{turb}}{\mu_{lam}} \quad (5)$$

ซึ่งค่า Turbulent viscosity ratio ที่วัดได้นี้ เกิดขึ้นเนื่องจากผลของความหนืดของการไหลแบบปั่นป่วนมีค่าสูงขึ้นตามความแรงของกระแสไหลหมุนวนที่ทำให้เกิดความเร็วในแนวสัมผัสมากขึ้น เป็นการเพิ่มแรงหนีศูนย์กลาง ทำให้บริเวณการไหลวนขยายตัวออกตามแนว

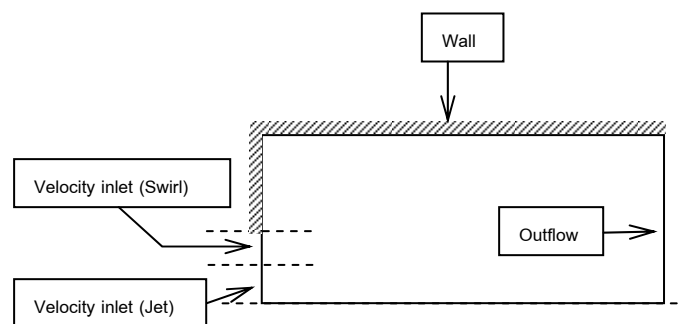
รัศมี และมีขนาดใหญ่ขึ้นตามความยาว นั่นหมายความว่าบริเวณที่เกิดการผสมกันได้ดีมีขนาดใหญ่ขึ้นนั่นเอง ถ้าบริเวณใดมีค่า Turbulent viscosity ratio มากขึ้นก็จะทำให้บริเวณนั้นเกิดการผสมกันดีขึ้น และสามารถวัดการผสมของทั้งห้องเผาไหม้ได้โดยการหาค่าเฉลี่ยของค่า Turbulent viscosity ratio ทั้งห้องเผาไหม้

แบบจำลองการคำนวณ

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Fluent คำนวณการผสมและความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลงโดยใช้ Standard k- ϵ Turbulence Model สมมติให้การไหลในห้องเผาไหม้เป็นแบบคงตัวและสมมาตรรอบแกน การไหลของอากาศกับเชื้อเพลิงเป็นแบบไม่อัดตัวและไม่ทำปฏิกิริยากัน รูปทรงของห้องเผาไหม้เป็นทรงกระบอกไม่มีรูพรุนสำหรับปล่อยเจ็ทในแนวขวางที่ผนังของห้องเผาไหม้ มีทางเข้าเป็นเจ็ทส่วนหลัก (เจ็ทไม่หมุนวน) และเจ็ทส่วนรอง (เจ็ทหมุนวน) มิติของห้องเผาไหม้จาก [1] ถูกแสดงในรูปที่ 2 ในที่นี้จะไม่สร้างรูปทรงของตัวสร้างการไหลหมุนวนในห้องเผาไหม้แต่จะคำนวณผลของการไหลหมุนวนโดยการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ความเร็วทางเข้าของเจ็ทส่วนรอง เงื่อนไขขอบเขตทั้งหมดของห้องเผาไหม้แสดงในรูปที่ 3 ส่วนตัวแปรคุณสมบัติของการไหลในห้องเผาไหม้จาก [1] ที่ใช้คำนวณแสดงไว้ในตารางที่ 1



รูปที่ 2 มิติของห้องเผาไหม้ พิจารณาแบบสมมาตรรอบแกน



รูปที่ 3 การตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตของห้องเผาไหม้ พิจารณาแบบสมมาตรรอบแกน

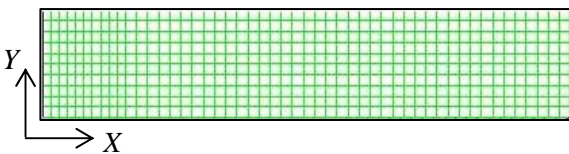
ตารางที่ 1 คุณสมบัติของการไหลในห้องเผาไหม้

	ส่วนหลัก	ส่วนรอง
ตัวเลขเรย์โนลด์ส์	15,900	47,500
ความเร็วเฉลี่ยรอบแกน (m/s)	0.66	1.52
ตัวเลขเวิร์ล, S_w	0.0	0.45
รัศมีไฮดรอลิก (m)	0.029	0.03
ความหนาแน่น (kg/m^3)	1,000	
ความหนืด ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$)	9.84×10^{-4}	

จากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่าลักษณะการไหลภายในห้องเผาไหม้เป็นการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งมีพฤติกรรมที่ซับซ้อน ยากต่อการคำนวณ

การศึกษา Grid independence

การศึกษา Grid independence ที่ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนความเร็วแนวแกนต่อความเร็วอ้างอิง ซึ่งการแบ่งเอลิเมนต์ในโดเมนของห้องเผาไหม้แสดงในรูปที่ 4 และความละเอียดของ grid ในแต่ละกรณีแสดงไว้ในตารางที่ 2 โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ [1] ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของห้องเผาไหม้แสดงในรูปที่ 5 และผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 6 และ 7



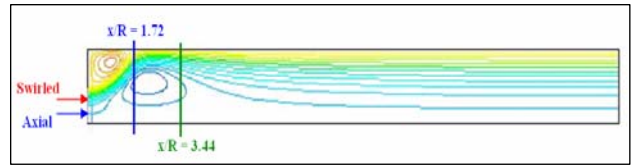
รูปที่ 4 การแบ่งเอลิเมนต์ในโดเมนของห้องเผาไหม้

ตารางที่ 2 ความละเอียดของ grid ในกรณีต่างๆ

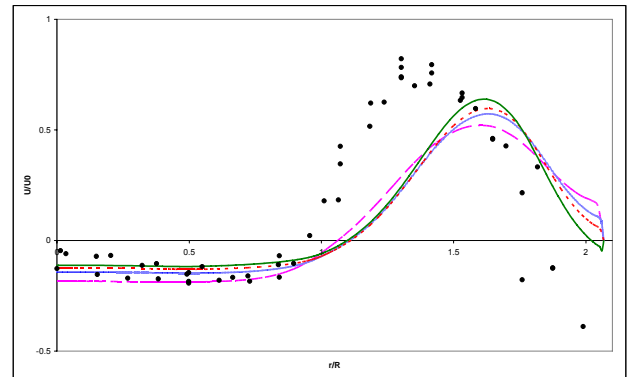
กรณีที่	ความละเอียด (X × Y)
1	45 × 40
2	65 × 50
3	82 × 60
4	109 × 80

จากการศึกษาแสดงให้เห็นผลการคำนวณของ grid ในกรณีที่ 4 เริ่มไม่เปลี่ยนแปลงไปจากแนวโน้มของ grid อื่นๆแล้ว ทำให้การศึกษานี้ใช้ความละเอียดของ grid ในกรณีที่ 4 ทดสอบ

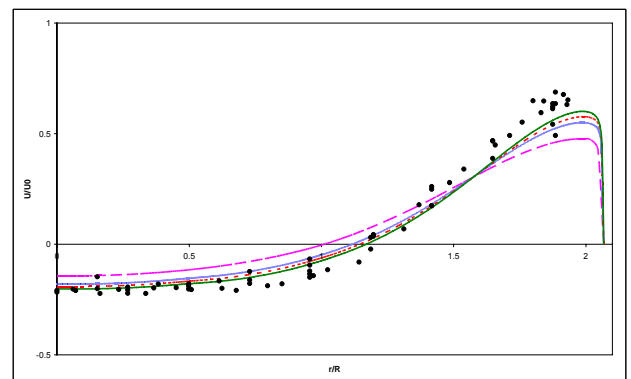
จากผลการทดสอบ การคำนวณโดยใช้ Standard k-ε Turbulence Model สามารถทำนายผลการทดลองได้เป็นที่น่าพอใจ จากลักษณะของเส้นกราฟที่ลากผ่านผลการทดลองที่กระจายเป็นจุด



รูปที่ 5 แนวชั้นการไหลและตำแหน่งที่ทำการเปรียบเทียบอัตราส่วนความเร็วแนวแกนต่อความเร็วอ้างอิง



รูปที่ 6 ผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ ที่ตำแหน่ง $x/R = 1.72$ ของการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีความละเอียดต่างกัน; ● = ผลการทดลองจาก [1], - - = กรณีที่ 1, = กรณีที่ 2, - . - = กรณีที่ 3, — = กรณีที่ 4

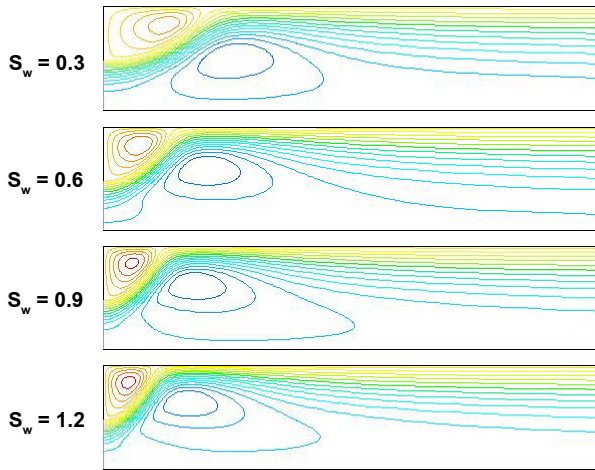


รูปที่ 7 ผลการเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกนภายในห้องเผาไหม้ ที่ตำแหน่ง $x/R = 3.44$ ของการแบ่งเอลิเมนต์ที่มีความละเอียดต่างกัน; ● = ผลการทดลองจาก [1], - - = กรณีที่ 1, = กรณีที่ 2, - . - = กรณีที่ 3, — = กรณีที่ 4

ผลการคำนวณ

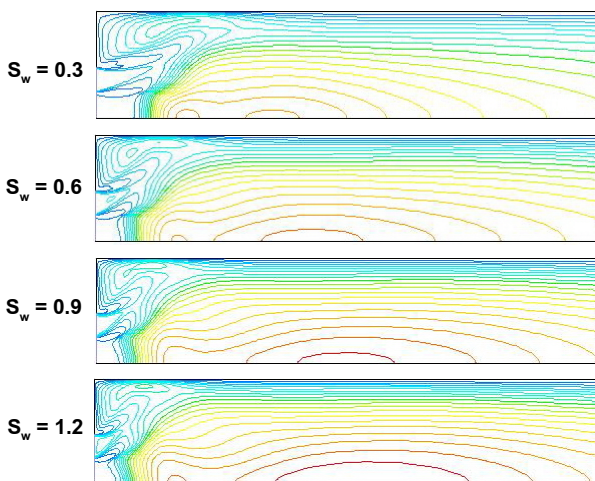
การแสดงผลการผสมในเชิงกายภาพใช้ Stream function เพื่อแสดงให้เห็นขนาดของ Recirculation zone แสดงในรูปที่ 8 และใช้

Turbulent viscosity ratio เพื่อแสดงให้เห็นบริเวณที่มีการผสมกันระหว่างอากาศกับเชื้อเพลิงแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 8 แนวชั้นการไหลของ Stream function (kg/s) ณ ค่า S_w ต่างๆ โดยเส้นสีแดงมีค่ามากที่สุดคือ 1 kg/s และเส้นสีน้ำเงินมีค่าน้อยที่สุดคือ 0 kg/s

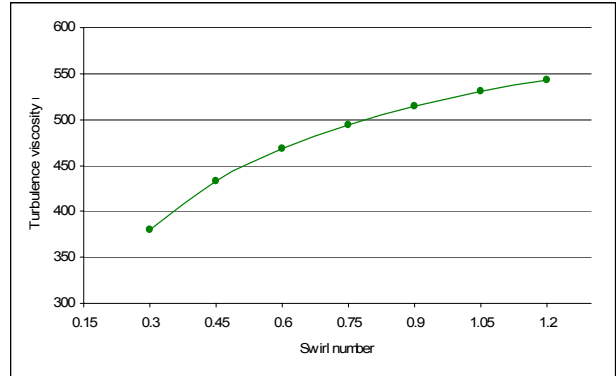
จากรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าเมื่อตัวเลข swirl เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิดบริเวณการไหลหมุนวน (Central toroidal recirculation zone) กว้างขึ้น เนื่องจากผลของ Adverse Pressure Gradient ในแนวแกน บริเวณการไหลหมุนวนที่มีขนาดใหญ่ขึ้นจะส่งผลให้เกิด Shear Rate ที่บริเวณรอยต่อระหว่างบริเวณการไหลหมุนวนกลางกับบริเวณการไหลหมุนวนที่หัวมุมด้านบนสูงขึ้น และมีพื้นที่ของการผสมกันระหว่างอากาศและเชื้อเพลิง (พื้นที่ล้อมรอบบริเวณการไหลหมุนวน) ที่กว้างขึ้น ทำให้เกิดการผสมกันมากขึ้น



รูปที่ 9 ค่า Turbulent viscosity ratio ณ ค่า S_w ต่างๆ เส้นสีแดงมีค่ามากที่สุดคือ 1260 และเส้นสีน้ำเงินมีค่าน้อยที่สุดคือ 1

จากรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าบริเวณตรงแนวแกนกลางเป็นบริเวณที่มีค่า β สูงและจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อตัวเลข swirl มีค่าสูงขึ้น ซึ่งเกิดเนื่องมาจากบริเวณไหลหมุนวนที่มีขนาดใหญ่ดังที่ได้อภิปรายไปแล้ว

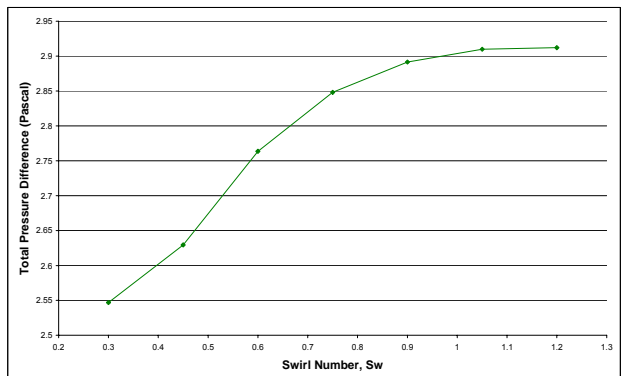
การแสดงผลการผสมกันในเชิงปริมาณโดยใช้ Turbulent viscosity ratio กับตัวเลข swirl แสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบค่า Turbulence viscosity ratio ณ S_w ต่างๆ

จากรูปที่ 10 เป็นการยืนยันในเชิงปริมาณว่าเมื่อตัวเลข swirl มีค่าสูงขึ้น ค่า Turbulent viscosity ratio ก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย

การแสดงผลของค่าผลต่างความดันรวมเฉลี่ย (Average total pressure difference) ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 ผลการเปรียบเทียบค่าของความดันรวมเฉลี่ยที่ลดลงในห้องเผาไหม้ที่แต่ละ S_w

ผลการทดสอบจากรูปที่ 10 จะเห็นได้ว่าค่าผลต่างความดันรวมเฉลี่ยที่วัดระหว่างหน้าตัด P_2 กับหน้าตัด P_1 จะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความแรงของการไหลหมุนวน ซึ่งได้แสดงให้เห็นว่าการลดลงของความดันรวมตามความแรงของ S_w

สรุปผล

บริเวณการไหลหมุนวนนั้นมีบทบาทสำคัญต่อการรักษาเสถียรภาพของการติดไฟและการผสมของอากาศกับเชื้อเพลิง สาเหตุที่เป็นเช่นนั้นก็เป็นเพราะเกิดบริเวณที่กระแสไหลวนของเชื้อเพลิงกับอากาศมีการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันมากกว่าการไหลแบบเจ็ทอิสระ เมื่อตัวเลขเวิร์ลมีค่าเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีบริเวณการไหลหมุนวนที่ใหญ่ขึ้น Shear rate ที่บริเวณรอยต่อระหว่างบริเวณการไหลหมุนวนกลางกับบริเวณการไหลหมุนวนที่หัวมุด้านบนสูงขึ้น ทำให้อากาศกับเชื้อเพลิงมีเวลาในการผสมกันมากขึ้นและเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสของชั้นเชื้อเพลิงและอากาศรอบบริเวณการไหลหมุนวน นอกจากนั้นในบริเวณไหลหมุนวนก็ยังเก็บกักความร้อนให้อยู่ภายในศูนย์กลางของเจ็ทใกล้กับทางออกหัวฉีด ซึ่งจะช่วยเร่งปฏิกิริยาการสันดาปให้สมบูรณ์เร็วยิ่งขึ้น

ในทางกลับกันความแรงของการไหลหมุนวนที่เพิ่มขึ้นตามตัวเลขสเวิร์ลก็จะทำให้ค่าผลต่างความดันรวมเฉลี่ยเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลทำให้เกิด Pressure drop มากขึ้น ทำให้สมรรถนะของเครื่องยนต์กังหันก๊าซตกลงตามไปด้วย ฉะนั้นการพิจารณาสร้างเครื่องยนต์กังหันก๊าซให้มีสมรรถนะตามต้องการนั้นขึ้นอยู่กับทางเลือกความสมดุลระหว่างการผสมที่ดีกับความดันรวมที่ลดลงตามแต่ละเอียดเป้าหมายที่ได้ออกแบบไว้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้สนับสนุนเงินทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Roback, R. and Johnson, B. V., *Mass and Momentum Turbulent Transport Experiments with confined Swirling Coaxial Jets*. NASA CR-168252, 1983.
- [2] Greitzer, E. M., Tan, C. S. and Graf, M. B., *Internal Flow: Concepts and Applications*, Cambridge University Press, 2004.
- [3] Beer, J. M. and Chigier, N. A., *Combustion Aerodynamics*, Applied Science Publishers LTD, 1972.
- [4] Saravanamuttoo, H. I. H. and Rogers, G. F. C., *Gas Turbine Theory*, Pearson Prentice Hall, 2001.