

ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยเมชเปลี่ยนรูปร่างในการวิเคราะห์ของไหลผ่านวัตถุ ลักษณะรูปทรงกระบอกขณะหมุนที่เลขเรย์โนลด์สูง

The Finite Element with Near-Wall Deformation Mesh Method in the Prediction of Flow Past a Rotating Isolated Cylinder at High Reynolds Number

สิทธิชัย รัชชชโยธิน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช บางพุด ปากเกร็ด นนทบุรี 11120

Sitthichai Ruchayosyothin

School of Science and Technology, Sukhothai Thammathirat Open University, Bangpood, Pakkret, Nonthaburi,
11120, Thailand

*Corresponding Author E-mail: sitthichai.ruc@stou.ac.th

Received: Jun 02, 2022; Revised: Sep 07, 2022; Accepted: Sep 08, 2022

บทคัดย่อ

การศึกษาเชิงคำนวณนี้นำเสนอพฤติกรรมการไหลภายนอกแบบปั่นป่วนผ่านวัตถุลักษณะรูปทรงกระบอกที่หมุนในระบบแกน 3 มิติ ของเลขเรย์โนลด์ที่ 100,000 ถึงอัตราหมุนไร้หน่วยที่ 2 วัตถุลักษณะรูปทรงกระบอกนี้มีลักษณะผนังเรียบและเจาะร่อง อีกทั้งทรงกระบอกประกอบด้วยดิสก์ที่ปลายทั้งสอง โดยใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนชนิด high Re $k-\epsilon$ ซึ่งปริมาณความเค้นเรย์โนลด์มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับความเครียดเฉื่อยของชั้นการไหลทำให้เกิดการแยกตัวกัน พฤติกรรมนี้มีผลต่อการเกิดกระแสวนขึ้น รวมถึงใช้สมการมาตรฐานของความเร็วเป็นไปตามกฎลอการิทึมที่บริเวณชั้นย่อยเนื่องการไหลปั่นป่วนที่ผนัง ระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ได้กำหนดเพื่อทำการดิสกรีไทซ์ตัวแปรการไหลในสนามการคำนวณและรูปร่างเมชมีการเปลี่ยนรูปที่ผนังเจาะร่องตามช่วงเวลาและปรับความสมดุลการไหลต่อเนื่องสำหรับเมชที่ใกล้ผนังทรงกระบอกผลการคำนวณได้ยืนยันความถูกต้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ทำให้ได้ข้อมูลระดับความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์ในการคำนวณและแนวโน้มของแรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นนอกเหนือช่วงการทดลองของแต่ละวัตถุลักษณะรูปทรงกระบอก โดยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นได้อธิบายผลจากลักษณะการกระจายตัวของขอบเขตชั้นของการไหลรอบผนัง อีกทั้งลักษณะสนามการไหลของฟลักซ์ที่เกิดขึ้น

คำสำคัญ: ไฟไนต์อีลิเมนต์ของไหลพลศาสตร์, ทรงกระบอกเจาะร่องและปลายดิสก์ที่หมุน, แบบจำลองการไหลปั่นป่วน

Abstract

The computational study has presented the 3D convective turbulent flow past a rotating isolated cylinder at a Reynolds number of 100,000, for spin ratios growing up to 2. The rotating cylinders have plain and grooved surfaces, moreover, the combination with end discs has been purposed in the investigation. The high Re $k-\epsilon$ turbulent approach, including the linear approximated form of the viscosity equation, in which the Reynolds stresses correspond to mean strain tensors, to determine the different turbulent scales separating from the free flow. Also, the standard “log-law” near-wall function has been suggested for the strategies of resource effectiveness to capture the fully turbulent region of the inner boundary layer. The

finite element method has been provided to discretize unknown fluxes along with the computational domain. The deformation mesh has facilitated the interactive flow with the arc grooves and balanced the continuity flow in each computational element closing to the rotating walls. These predictions have been validated with available experimental work to strengthen the competence of the turbulent approach. Also, the prediction has expanded to the higher spin ratios from those earlier data, the trend is beneficial for further implementation and design work. These findings have clearly indicated that the cylinder surfaces and combination parts have significantly influenced the aerodynamic force and turbulent behavior with the spin ratios due to the distribution pattern of the boundary layer and flow domain, which has been the most considerable discrepancy in each of these tests.

Keywords: Finite Element Method of Fluid Dynamic, Rotating Grooved and Cylinder with End Discs, Turbulent Model

1. บทนำ

การขับเคลื่อนของวัตถุที่หมุนภายใต้การไหลผ่านของของไหลก่อให้เกิดการขับเคลื่อนจากแรงกระทำอากาศพลศาสตร์อันเป็นไปตามปรากฏการณ์แมกนัส [1] จากพฤติกรรมที่เกิดขึ้นนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนอากาศยานที่มีผนังโค้งและเคลื่อนที่แบบหมุนได้ โดยเฉพาะชิ้นส่วนรูปทรงกระบอกที่สามารถนำไปใช้เป็นชิ้นส่วนเพื่อก่อกำเนิดแรงขับซึ่งเกิดจากองค์ประกอบของแรงยกและแรงต้านส่วนใหญ่ ทำให้สามารถเคลื่อนตัวในมหาสมุทรได้ สำหรับเรือเดินสมุทร Flettner Rotor Ship รุ่น E-Ship I ในขณะที่ความเร็วในการเดินเรืออยู่ที่ 110 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อแล่นในทิศทางลมปรากฏที่มีความเหมาะสมจะสามารถลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากพลังงานฟอสซิลได้ถึงร้อยละ 46 [2] หรือมีการใช้ชิ้นส่วนประกอบจากทรงกระบอกกับชิ้นส่วนดิสก์ที่ปลายเพื่อก่อให้เกิดแรงยกสำหรับอากาศยานขนาดเล็กไร้คนขับ (Unman Micro Air Vehicle) มีการติดตั้งปีกเครื่องบินทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 มิลลิเมตร ความยาว 200 มิลลิเมตร ทำให้สามารถขับเคลื่อนเกิดสัดส่วนแรงยกเทียบกับแรงต้านเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า [3] สำหรับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นถือว่าเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานอย่างมาก นอกจากวัตถุประสงค์การออกแบบเพื่อลดการใช้พลังงานแล้ว ยังได้มาซึ่งองค์ความรู้ของการควบคุมการไหลแบบแอคทีฟเพื่อให้ได้มาซึ่งการควบคุมการกระแสน้ำไหลที่เลขเรย์โนลด์ที่สูงซึ่งลักษณะขอบเขตชั้นของไหล (Boundary Layer) ที่ผนังและกระแสน้ำมีลักษณะ

ไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบหรืออยู่ในช่วงการไหลได้เลขเรย์โนลด์วิกฤติ (Sub-critical Reynolds Number) [4] จากสถานะการไหลที่มีความซับซ้อนนี้ทำให้เกิดข้อจำกัดในการดำเนินการวิจัยจากวิธีการทดลองหรือการคำนวณเชิงตัวเลขจากสมการการไหลทั่วไปอย่างมาก นักวิจัยจึงได้ให้ความสำคัญและดำเนินการพัฒนาระบบการและวิธีการทดลองหรือการพยากรณ์ปรากฏการณ์จากการวิเคราะห์เชิงคำนวณจากตัวแบบการไหลแบบปั่นป่วนขึ้นเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมและใช้ต่อยอดในการออกแบบชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์การทำงานจากพื้นฐานวัตถุรูปทรงกระบอกหรือรูปทรงฐานทรงกระบอกที่สำคัญที่เลขเรย์โนลด์ที่สูง

งานวิจัยที่สำคัญที่มีความเกี่ยวข้องกับการพาการไหลซึ่งมีการถ่ายเทโมเมนตัม (Convective flow) เมื่อผ่านวัตถุรูปทรงกระบอกหรือวัตถุฐานทรงกระบอกอื่นที่หมุนนั้น เช่น การทดลองในอดีตเพื่อพิจารณาแรงของไหลพลศาสตร์เนื่องจากการไหลผ่านทรงกระบอกหน้าตัดวงกลม กากบาท และ ทรงประกอบทรงกระบอกกับแพนอากาศ ผันราบเรียบ ของ Reid (1924) [5] ที่เลขเรย์โนลด์ (Re , อัตราส่วนระหว่างแรงเนื่องจากโมเมนตัมการไหลเทียบกับแรงจากความหนืด, $\frac{\rho U_\infty D}{\mu}$) ระหว่าง 36,000–108,000 โดยมีการแปรเปลี่ยนอัตราการหมุนไร้หน่วย (α , Spin ratio: $\omega D/2$) ที่เป็นอัตราส่วนระหว่างความเร็วในแนวสัมผัสที่ผนังกับความเร็วการไหลอิสระ (U_∞) สูงสุดที่ 3.6 หรือการทดลองของ Thom (1925) [6] ที่มีการศึกษาผลของความหยาบของผนังจากการพันดัดเม็ดทราย ที่สถานะไร

หน่วยสูงสุดของเลขเรย์โนลด์ที่ 33,325 และอัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 5.5 หรือการทดลองการของ Clayton (1985) [7] ที่มีการประกอบคิส์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนที่แตกต่างกันเข้ากับทรงกระบอก ที่เลขเรย์โนลด์สูงสุด 48,941 และอัตราการหมุนไร้หน่วย ที่ 3.2 ซึ่งการทดลองทั้งหมดนี้ได้ข้อมูลผลลัพธ์ที่สำคัญส่งผลในปัจจุบันได้อาศัยข้อมูลเบื้องต้นนี้สู่การประยุกต์ใช้งานจริงและขยายผลงานวิจัยสู่เลขเรย์โนลด์ที่สูงกว่ามาก การทดลองของ Aoki & Ito (2001) [8] ได้ทำการศึกษาสนามการไหลผ่านทรงกระบอกผนังเรียบที่อัตราการหมุนไร้หน่วย 1 ที่เลขเรย์โนลด์ 140,000 หรือ Takayama & Aoki (2005) [9] ได้ศึกษาผลของแรงอากาศพลศาสตร์ผ่านวัตถุสี่เหลี่ยมทรงกระบอกผนังเรียบที่มีความลึกแตกต่างกัน ที่อัตราการหมุนไร้หน่วย 1 และที่เลขเรย์โนลด์สูงสุดที่ 180,000 อีกทั้งการสร้างรูปทรงประกอบระหว่างทรงกระบอกที่หมุนกับแผ่นอากาศของ Badalamenti, (2010) [3] ที่ทำการทดลองที่สภาวะการหมุนไร้หน่วยสูงสุด 2 ที่เลขเรย์โนลด์ 241,000 เพื่อให้ได้มาซึ่งการวัดผลแรงพลศาสตร์เช่นกัน

ข้อจำกัดของงานวิจัยเชิงทดลองข้างต้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นเนื่องจากการติดตั้งเครื่องมือวัดที่เป็นส่วนขัดขวางสนามการไหล และความจำเป็นในการใช้ขนาดการวัดที่เล็กให้สอดคล้องกับขนาดการไหลปั่นป่วน (Turbulent Length Scale) อีกทั้งยังสูญเสียทรัพยากรการวิจัยที่มากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณของไหลพลศาสตร์ในปัจจุบันจึงมีส่วนอย่างมากในการได้มาซึ่งข้อมูลเชิงกายภาพที่ไม่สามารถดำเนินการทดลองได้ แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบไม่คงตัวจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาโดยต่อยอดจากสมการการไหลทั่วไปและได้ถูกนำมาใช้วิเคราะห์การไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกและสี่เหลี่ยมทรงกระบอกที่หมุนที่เลขเรย์โนลด์ที่สูง จากแบบจำลอง Standard k- ϵ [10] RNG k- ϵ [8] หรือ LES [11] แต่อย่างไรก็ตามยังมีการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วนอื่นเพื่อทดสอบรูปทรงกระบอกที่หยุดนิ่ง เช่น DES [12] หรือ PANS [13] หรือวัตถุผนังโค้งทรงกลมที่หมุนด้วยแบบจำลอง RSM [14] อย่างไรก็ตามงานวิจัยการคำนวณของไหลพลศาสตร์ข้างต้น นิยมใช้รูปแบบการประมาณค่าผลลัพธ์ของ

ปริมาตรคำนวณแบบไฟไนต์วอลุ่มถึงแม้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำที่ดีที่เลขเรย์โนลด์ที่สูง แต่เป็นการวิเคราะห์ในลักษณะงานที่เฉพาะสำหรับการคำนวณทางของไหลทำให้เกิดทรัพยากรด้านต้นทุนที่สูงในการวิจัย

จากข้อจำกัดเชิงกายภาพและเพื่อให้การวิเคราะห์ผลการประมาณค่าสามารถครอบคลุมกับการคำนวณเชิงวิศวกรรมอื่น เช่น การวิเคราะห์เชิงกลศาสตร์ของแข็งงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคการประมาณค่าตัวแปรการไหลแบบไฟไนต์อีลิเมนต์สำหรับเมชการไหล (mesh) ซึ่งงานวิจัยของไหลพลศาสตร์ผ่านทรงกระบอกหรือวัตถุสี่เหลี่ยมทรงกระบอกด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ก่อนหน้านี้ นิยมวิเคราะห์ที่เลขเรย์โนลด์ที่ต่ำจากสมการการไหลทั่วไปหรือราบเรียบเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ที่เลขเรย์โนลด์ที่ 100,000 ซึ่งเป็นปริมาณที่มีพลังงานการไหลแบบปั่นป่วนที่สูง โดยวิเคราะห์จากแบบจำลองการไหลปั่นป่วน ชนิด high Re k- ϵ ที่ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds stresses) และความเครียดเฉลี่ย (mean strain) ของ boundary layer เป็นแบบเชิงเส้น และแก้ไขปัญหาการไม่สมดุลของสมการความต่อเนื่องการไหลในเมชซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ได้รับผลลัพธ์ที่ไม่แม่นยำโดยใช้เทคนิคเมชแบบเปลี่ยนรูป (deformation mesh) รอบผนังเพื่อให้ได้มาซึ่งผลการวิเคราะห์ของข้อมูลกายภาพของการไหลใน 3 มิติจากวัตถุสี่เหลี่ยมทรงกระบอกแบบผนังโค้งเรียบหรือเซาะร่องที่แม่นยำ สู่การวิเคราะห์ข้อมูลกายภาพเชิงลึกและสามารถยืนยันผลความสามารถของโครงสร้างเพื่อการประมาณค่าแบบไฟไนต์อีลิเมนต์ต่อไป

2. แบบจำลองการไหลปั่นป่วน

การไหลปั่นป่วนที่เลขเรย์โนลด์สูงนี้มีผลต่อ boundary layer ที่ผนังอยู่ในสภาวะปั่นป่วนเพื่อความสอดคล้องกับลักษณะกายภาพที่เกิดขึ้น การวิเคราะห์ผลเชิงคำนวณจึงจำเป็นต้องใช้สมการการไหลแบบปั่นป่วนที่พัฒนามาจากสมการการไหลทั่วไปในสภาวะไหลต่อเนื่อง และสมการอนุพันธ์โมเมนตัม โดยสมการการไหลปั่นป่วนนี้จะประกอบด้วยองค์ประกอบพลศาสตร์ของโมเมนตัม ได้แก่

ความเร็วเฉลี่ย (U , Mean Velocity) และ ฟลักซ์การไหลปั่นป่วน ได้แก่ พลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน (k , turbulent kinetic energy) ซึ่งเป็นพลังงานจลน์อันเกิดจากอัตราความเร็วกวัดแกว่ง (u' , Fluctuation Velocity) จากความเร็วเฉลี่ยเทียบหนึ่งหน่วยมวล และ อัตราการฟุ้งกระจายของของไหลปั่นป่วน ($\mathcal{E}$, Turbulent Kinetic Energy Dissipation Rate) คือ อัตราการถ่ายทอดพลังงานต่อหนึ่งหน่วยมวลจากการจากเลเซอร์การไหลคงตัวสู่กระแสนวน (Eddy) ขนาดใหญ่ หรือจาก eddy ขนาดใหญ่สู่ขนาดเล็ก เนื่องจากการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันอันก่อให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนขึ้น สำหรับตัวแปรความดันเฉลี่ย (P , Pressure) จะใช้เทคนิคการประมาณการจากความเร็ว โดยตัวแบบ “SIMPLE” จึงได้สมการการไหลปั่นป่วนแบบของไหลไม่ขุ่นตัวในสภาวะการไหลไม่คงตัวที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง (Launder and Spalding, 1974) [15] คือ

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\rho k + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho U_i k) \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma(k)} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \rho(P_k - \mathcal{E} - D) \\ \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_{\mathcal{E}}} \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial x_j} \right) + C_{\mathcal{E}l} \frac{\varepsilon}{k} v_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \right. \\ & \left. \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} - C_{\mathcal{E}l} \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (2)$$

ทั้งนี้ระดับความหนืดการไหลแบบปั่นป่วน (ν_t) มีการแปรเปลี่ยนขนาดตาม turbulent length scale และอัตราก่อกำเนิดพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน (P_k , Turbulent Kinetic Energy Production Rate)

$$\nu_t = \frac{c_{\mu} k^2}{\varepsilon} \quad (3)$$

ค่าความเค้นเรย์โนลด์เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราการเคลื่อนย้ายตัวของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Transport Term) สู่บริเวณอื่น นำไปสู่การวิเคราะห์อัตรา P_k ที่เมฆการไหลนั้น โดยสามารถวิเคราะห์ได้จาก

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \delta_{ij} \frac{2}{3} k \quad (4)$$

จากสมมติฐานของการกระจายตัวที่เท่ากันในทุกทิศทางของระดับพลังงานการไหลปั่นป่วน (Iso-tropic Turbulent Kinetic Energy) อีกทั้งขนาดของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเร็วในทิศทางเดียวกันกับการเคลื่อนที่ $\frac{\partial \bar{U}}{\partial x}$ $\frac{\partial \bar{V}}{\partial y}$ และ $\frac{\partial \bar{W}}{\partial z}$ มีขนาดที่น้อยมากจึงสามารถประมาณค่าความเค้นเรย์โนลด์ในองค์ประกอบทุกทิศทางตั้งฉากในสมการ (4) ได้เป็น

$$\overline{u^2} \cong \overline{v^2} \cong \overline{w^2} \cong \frac{2}{3} k \quad (5)$$

เพื่อเป็นการควบคุมค่าสูงสุดของความหนืดในการไหลปั่นป่วนและสัดส่วนของขนาดที่เหมาะสมระหว่าง k กับ ε โดย Launder and Spalding (1974) [15] ได้กำหนดค่าคงที่ของเทอมความหนืดสำหรับสมการการไหลปั่นป่วน ($C_{\mathcal{E}1}$ และ $C_{\mathcal{E}2}$) เป็น 1.44 และ 1.92 ตามลำดับ ค่าคงที่พลังงานจลน์ ($\sigma^{(k)}$) และอัตราการฟุ้งกระจายของพลังงานจลน์ ($\sigma_{\mathcal{E}}$) เป็น 1.0 และ 1.3 ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดการไหลปั่นป่วน (c_{μ}) คือ 0.09 และใช้ค่าจำแนกความเป็นเนื้อเดียวกันของไหลเนื่องจากการฟุ้งกระจายตัว (D)

การลดทรัพยากรการประมวลผลเป็นสิ่งที่สำคัญในการวิเคราะห์นี้ จากพฤติกรรมของเลเซอร์ในชั้นย่อยเฉื่อย (inertial sub-layer) ใกล้ผนังที่มีลักษณะการไหลปั่นป่วนเต็มรูปแบบจึงสามารถใช้กฎลอการิทึมเพื่อระบุฟลักซ์การไหลที่เมฆติดกับผนังจากสมการการไหลใกล้ผนัง โดยระยะห่างไร้หน่วย (y^+) ที่เหมาะสมสำหรับโครงสร้างนี้อยู่ระหว่าง 30–150 [16]

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log(Ey^+) \quad (6)$$

3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

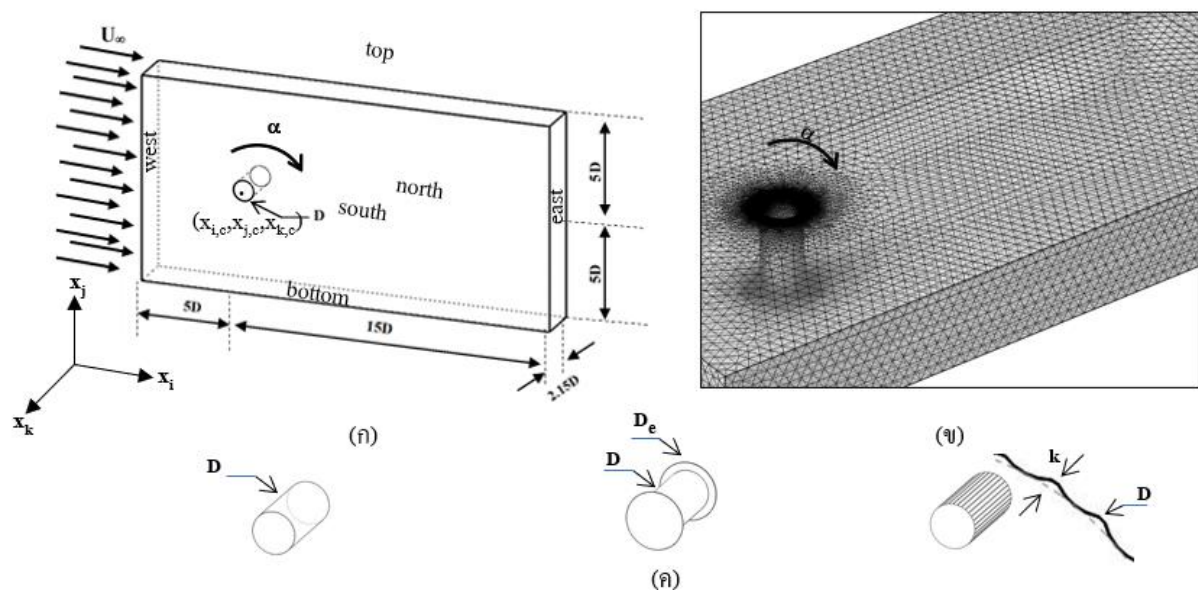
ในการศึกษาเชิงคำนวณนี้ได้ใช้โปรแกรมเพื่อการวิเคราะห์ของไหลพลศาสตร์ COMSOL Multiphysics 5.6 ภายใต้การใช้งานโมดูล CFD [17] ซึ่งเป็นโปรแกรมทางการค้า ได้สิทธิ์สามารถเผยแพร่ผลงานวิจัยได้ ลักษณะโปรแกรมสามารถดำเนินการใช้โดยติดตั้งบนระบบปฏิบัติการ Linux-Ubuntu Desktop 18.04 รูปแบบที่

ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองการไหลพลศาสตร์นี้เป็นแบบการสร้างการประมาณการอนุพันธ์เชิงแบบโครงสร้างรูปทรงจตุรมุข (Tetrahedral Structure) สำหรับคำนวณแบบไฟไนต์อีลิเมนต์ ซึ่งใช้การประมาณการฟลักซ์ในเมชที่เกิดจากการฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักแบบเชิงเส้นระหว่างจุดวิเคราะห์ที่ล้อมรอบเมชสำหรับคำนวณนั้น

นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ปริมาณฟลักซ์การไหลนี้ ได้ใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขต่างๆ เข้ามาเพื่อแก้ปัญหาจากสมการหลัก คือ การจัดรูปความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์สัมประสิทธิ์ปริมาณฟลักซ์การไหลที่ตำแหน่งต่าง ๆ กับแหล่งแจกจ่ายปริมาณการไหลแบบปั่นป่วน ได้แก่ การพิจารณาฟลักซ์การไหลแบบไม่คงตัวโดยระเบียบวิธีแควงกันโคลลัน และมีการแก้ระบบสมการโดยวิธี Geometric Multigrid (GMG) ซึ่งมีการใช้เมทริกซ์จำลองก่อนทำซ้ำด้วยระเบียบวิธีทำซ้ำแบบเกาส์-ไซดอล ต่อไปเพื่อได้มาซึ่งการเข้าสู่ของคำตอบได้ดี โดยมีการใช้ตัวประกอบค่าผ่อนปรนเพื่อส่งเสริมการเข้าสู่คำตอบได้ ในขณะเดียวกันมีการให้ความสัมพันธ์ควบคู่ระหว่างความดันและความเร็วในรูปแบบ the SIMPLE algorithm เพื่อใช้วิเคราะห์หาความดันจากการดิครีไทซ์ความเร็วอันเนื่องมาจากสมการหลักไม่ได้ให้ความสัมพันธ์แบบชัดเจนของปริมาณความดันที่เกิดขึ้น

3.1 สนามการคำนวณการไหล

ในการวิเคราะห์นี้ได้ใช้สนามการวิเคราะห์แบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยมีระยะความยาวตามแนวนานการไหล (x_i) ความกว้างตามแนวตั้งฉากการไหล (x_j) และแนวลึกของการไหล (x_k) เป็น 20 10 และ 2.15 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง รูปที่ 1(ก) ได้กำหนดทิศทางการหมุนของทรงกระบอกและวัตถุพื้นฐานรูปทรงกระบอกในทิศทางตามเข็มนาฬิกา และมีการระบุหน้าตัดเพื่อใช้กำหนดเงื่อนไขขอบต่างๆ รูปที่ 1(ข) ได้แสดงลักษณะเมชเพื่อใช้ในการดิครีไทซ์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์โดยมีการการปรับความละเอียดใกล้วัตถุพื้นฐานทรงกระบอกและมีขนาดคงที่ที่ระยะห่างออกไป สำหรับรูปที่ 1(ค) ได้แสดงลักษณะรูปทรงที่เป็นตัวกลางการไหลผ่านของของไหล โดยมีการเรียงลำดับจากทรงกระบอกผนังเรียบทรงกระบอกปลายติดตั้งคัสก์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D_c) เป็น 1.375 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก (D) และทรงกระบอกผนังเขาร่องที่มีสัดส่วนความลึกของร่อง (k) เทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางพืวนอก เป็น 7.25×10^{-3} โดยวัตถุทั้งหมดมีขนาดสัดส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง (AR: Aspect Ratio) ที่ 2.15 ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่สิ้นสุดระยะขอบทั้งสองด้านตามแนวลึกของสนามการไหล



รูปที่ 1 ลักษณะ (ก) สนามการคำนวณการไหล (ข) เมชแบบจตุรมุข และ (ค) ตัวกลางผนังวัตถุพื้นฐานทรงกระบอก

ตารางที่ 1 ได้แสดงจำนวนโครงสร้างเพื่อรองรับการวิเคราะห์สำหรับวัตถุพื้นฐานทรงกระบอกแต่ละแบบ ในระบบ 3 มิติ สำหรับผนังเซาะร่องจำเป็นต้องสร้างโครงสร้างสำหรับสนามการไหลและเงื่อนไขขอบที่ผนังที่มากเนื่องจากเกิดพื้นที่การไหลระหว่างร่องที่เซาะเกิดขึ้น

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างความโค้งจากรูปหลายเหลี่ยมเพื่อให้ได้ความโค้งตามต้องการ และเมฆที่เกิดขึ้นนี้หากคิดผนังจะถูกระบุให้พฤติกรรมการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและสามารถดำเนินการวิเคราะห์ตามสมการที่ (6) ได้อย่างถูกต้อง

ตารางที่ 1 จำนวนโครงสร้างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์สนามการไหลแต่ละวัตถุพื้นฐานรูปทรงกระบอก

ลักษณะวัตถุพื้นฐานรูปทรงกระบอก	จำนวนเมฆ	
	สนามการไหล	เงื่อนไขขอบ
ผนังเรียบ	254,210	17,708
ติดตั้งดิสก์ที่ปลายขนาด $D_0/D = 1.375$	321,166	66,292
ผนังเซาะ 32 ร่อง ขนาดร่อง $k/D = 7.25 \times 10^{-3}$	760,827	70,346

3.2 เงื่อนไขขอบ

เพื่อให้ผลการวิเคราะห์การไหลผ่านวัตถุพื้นฐานทรงกระบอกมีความสอดคล้องกับการทดลองของ Takayama & Aoki (2005) [9] ดังนั้นการกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับสนามการคำนวณการไหล อีกทั้งตำแหน่ง และการวางตัวของทรงกระบอกจึงจำเป็นต้องระบุเพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำ สำหรับงานวิจัยนี้ได้มีการมุ่งเน้นการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเปลี่ยนรูปเมฆที่มีความเร็วการหมุนเชิงมุมเกิดขึ้น ดังนั้นนอกจากพื้นที่หน้าตัดของสนามการไหลตามรูปที่ 1(ก) แล้วจึงจำเป็นต้องกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับโครงสร้างที่มีความเร็วเชิงมุมเกิดขึ้นด้วยดังรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามเพื่อความชัดเจนในการกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับสนามการไหลนี้รายละเอียดของเงื่อนไขขอบได้แสดงดังตารางที่ 2

การกำหนดเงื่อนไขนี้ได้มีการใช้ความสัมพันธ์ตามกฎมาตราส่วน (Scaling Rule) ของตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Unit) ขนาดเรย์โนลด์ 100,000 จึงสามารถระบุสภาวะการไหลเข้า (Inlet Boundary Condition) ที่หน้าตัดด้านทิศ west มีการระบุความเร็วของของไหลเฉพาะทิศทางขนานกับการไหลอิสระที่ 1 เมตรต่อวินาที สำหรับตัวแปรการไหลปั่นป่วนได้กำหนดระดับความเข้มของการไหลปั่นป่วน (I , Turbulent Intensity) ที่ร้อยละ 1 ส่งผลต่อค่าพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนตามสมการ และอัตราส่วนความหนืดการไหลปั่นป่วนต่อความหนืดจลน์ของของไหล (β , Turbulent

Viscosity Ratio) ที่ 10 เท่าซึ่งส่งผลต่อระดับการฟุ้งกระจายของการไหลปั่นป่วนเช่นกัน สำหรับตัวแปรความดันได้กำหนดให้ไม่เกิดอัตราการเปลี่ยนแปลงในทิศทางการไหล

ที่หน้าตัดควบคู่ ทิศ south-north และ ทิศ bottom-top ได้กำหนดให้เกิดเงื่อนไขขอบเพื่อให้สภาวะการไหลไม่เกิดผลอันเนื่องมาจากผนังมีความสอดคล้องกับการติดตั้งวัตถุให้ถูกระเบิดของไหลพัดผ่าน การเว้นช่องว่างขนาดเล็กที่ปลายทรงกระบอกกับผนังอุโมงค์ลมในทิศ south-north และการไม่เกิดผลกระทบของผนังอุโมงค์ในทิศ bottom-top เนื่องจากระยะห่างที่มาก จึงสามารถกำหนดเงื่อนไขขอบแบบคาบ (Periodic Boundary Condition) ให้กับสนามการวิเคราะห์ในส่วนผนัง (Wall Boundary Condition) ของทรงกระบอกและวัตถุพื้นฐานทรงกระบอกได้มีการกำหนดให้ผนังหยุดนิ่ง และไม่มีการแลกเปลี่ยนพลังงานการไหลปั่นป่วนและโมเมนตัมในทิศทางตั้งฉากสำหรับอัตราการหมุนเชิงมุมจะกำหนดไว้ที่เมฆแบบปรับเปลี่ยนรูป โดยมีขนาดความหนาเป็น $0.025D$ และตัวแปรการไหลปั่นป่วนของเมฆจะมีเงื่อนไขขนาดที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างในแนวตั้งฉากเมื่อเทียบกับระยะชั้นย่อยหนืด (y_v , viscous sub-layer distance) อย่างไรก็ตามการไหลผ่านที่บริเวณรอยต่อที่เชื่อมกัน (identity pair element) ที่บริเวณรอยต่อที่สนามการไหลจากภายนอกสู่ภายในเมฆแบบเปลี่ยนรูปถือได้ว่าเป็นการอนุรักษ์การไหล (Continuity on Interior Boundary Condition) ดังรูปที่ 2

ตารางที่ 2 เงื่อนไขขอบการวิเคราะห์สนามการไหลด้วยเทคนิคการเปลี่ยนรูปเมช

Face	Boundary Condition	U	V	W	k	ε	P
west	inlet	1	0	0	$(U_\infty)^2$ when $I = 1\%$	$\frac{c_\mu k^2}{\beta v}$ when $\beta = 10$	$\frac{\partial P}{\partial x_i} = 0$
east	Far Field	$n \cdot \nabla U = 0$	$n \cdot \nabla V = 0$	$n \cdot \nabla W = 0$	$n \cdot \nabla k = 0$	$n \cdot \nabla \varepsilon = 0$	0
bottom	periodic I	$\phi_{j=1} = \phi_{j=Nj-1}$ and $\phi_{j=Nj} = \phi_{j=2}$ when $\phi = U, V, W, k, \varepsilon$ and P					
top							
south	periodic II	$\phi_{k=1} = \phi_{k=Nk-1}$ and $\phi_{k=Nk} = \phi_{k=2}$ when $\phi = U, V, W, k, \varepsilon$ and P					
north							
Cylinder	wall	0	0	0	$\frac{\partial k}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial P}{\partial n} = 0$
Deformation Mesh	Rotating Domain	$\frac{-2\alpha U_\infty \sin\theta PC }{D}$ เมื่อ P คือ จุดในโครงสร้างหมุน C คือจุดศูนย์กลาง	$\frac{2\alpha U_\infty \cos\theta PC }{D}$ เมื่อ P คือ จุดในโครงสร้างหมุน C คือจุดศูนย์กลางทรงกระบอก	0	$\frac{(\tau_w/\rho)}{\sqrt{c_\mu}}$ $y \leq y_v$ k_p $y > y_v$	$\varepsilon = \frac{2\nu k_p}{y_v^2}$ $y \leq y_v$ $\varepsilon = \frac{k_p^{3/2}}{c_l y}$ $y > y_v$	P-V Couple SIMPLE Algorithm
	Continuity on Interior Boundary	$\nabla \cdot (u_i + v_j + w_k) = 0$ at identity pair element					

การกำหนดเงื่อนไขขอบที่ทางออก (Far Field Boundary Condition) หรือที่หน้าตัดในทิศทาง east จำเป็นต้องระบุให้สอดคล้องกับการไหลผ่านภายนอกโดยทุกตัวแปรมีการกำหนดการคงตัวของขนาดในทิศทางตั้งฉากกับหน้าตัดทางออก ในขณะที่ความดันถูกกำหนดค่าสำหรับประมวลผลเป็น 0 ซึ่งแสดงถึงสภาวะความดันพิจารณาที่ 1 บรรยากาศ

3.3 การแปลงรูปเมช

เมื่อพิจารณาเมชแบบเปลี่ยนรูปนั้น จะมีการถ่ายทอดโมเมนต์กันระหว่างสนามการไหลกับเมชแบบเปลี่ยนรูป ในขณะที่เมชแบบเปลี่ยนรูปเกิดการหมุนด้วยความเร็วเชิงมุมเมื่อของไหลผ่านผนังเจาะร่องทำให้มีการเสียรูปในแนวตั้งฉากจากกับผนังที่ปะทะ (X, Prescribed Normal Mesh Velocity) ซึ่งสนามของเมชแบบเปลี่ยนรูปจะมีพฤติกรรมไป

ตามสมการกำหนดความเร็วของเมชในแนวเสียรูปตั้งฉากกับผนังแต่ละโครงสร้าง โดยทั่วไป คือ

$$\frac{\partial X}{\partial t} \cdot n = v_0 + v_{mbs} \quad (7)$$

โดยค่าปรับค่าเพื่อให้เกิดความราบเรียบ (v_{mbs}) มีความสัมพันธ์กับค่าความเร็วในแนวตั้งฉากที่ออกแบบ (v_0) คือ

$$v_{mbs} = \delta_{mbs} |v_0| hH \quad (8)$$

และขนาดค่าเฉลี่ยความโค้งของผิวโครงสร้าง (H) มีขนาด คือ

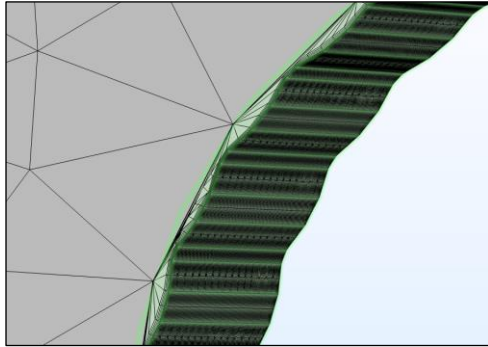
$$H = -\frac{1}{2} \nabla n_T \quad (9)$$

เมื่อ

δ_{mbs} คือ ค่าคงตัวสำหรับปรับความราบเรียบของความเร็ว (0.5)

h คือ ขนาดโครงสร้างคำนวณ

∇_T คือ กราเดียนต์ของเวกเตอร์ผิว



รูปที่ 2 บริเวณเมชแบบเปลี่ยนรูป

4. ผลการวิเคราะห์และอภิปรายผล

จากการศึกษาการไหลผ่านของของไหลผ่านวัตถุทรงกระบอกและฐานทรงกระบอกที่หมุน ซึ่งข้อมูลของแรงของไหลพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นเป็นข้อมูลที่สำคัญเพื่อใช้ในการออกแบบทางวิศวกรรม โดยมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะ Boundary Layer และสนามการไหลที่เกิดขึ้น รายละเอียดข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญจากผลการศึกษาเชิงคำนวณได้แสดงในรายละเอียดแต่ละส่วนต่อไป

4.1 แรงของไหลพลศาสตร์

แนวโน้มของแรงของไหลพลศาสตร์ได้แสดงดังรูปที่ 3 โดยจำแนกออกเป็นสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงดันที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลไหลผ่านวัตถุผนังทรงกระบอกผนังราบเรียบและติดตั้งดิสก์ รูปที่ 3(ก) และ 3(ข) โดยเน้นการวิเคราะห์จากเมชปรับตัวหมุนรอบผนัง (Rotating Mesh) พบว่าเมื่อยืนยันผลการศึกษาเชิงคำนวณกับการทดลองก่อนหน้านี้ที่สภาวะทรงกระบอกผนังเรียบไม่มีการหมุนกับการศึกษาการทดลองก่อนหน้านี้ [9] พบว่าทั้งเมชแบบคงตัวและเปลี่ยนรูปไม่เกิดค่าสัมประสิทธิ์แรงยกซึ่งมีความสามารถในการยืนยันผล ในส่วนของเมชเปลี่ยนรูปนั้นเมื่อพิจารณาทรงกระบอกผนังเรียบที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 1 ผลการศึกษาเชิงคำนวณมี

แนวโน้มเดียวกันกับการทดลองเช่นกัน ซึ่งสามารถใช้แนวโน้มของค่าในการคาดการณ์ปรากฏการณ์ที่มีอัตราการหมุนสูงกว่าได้

อย่างไรก็ตามผลการคำนวณสัมประสิทธิ์แรงยกยังมีความแตกต่างในช่วงสภาวะอัตราการหมุนไร้หน่วย 0.2–0.8 ซึ่งเกิดการปรับเปลี่ยนลักษณะของ Boundary Layer ที่ผนังจากแบบเรียบสู่ปั่นป่วน (Laminar to Turbulence Transition Boundary Layer) ทำให้เกิดแนวโน้มของแรงยกผกผัน (Reversal Lift Force) ซึ่งเป็นช่วงที่เกิดข้อจำกัดของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์โดยวิธีการ RNG k- ϵ ที่ถือว่าเป็นวิธีการที่มีความสามารถในการพิจารณาผลของ Turbulent length scale ที่เล็กกว่าและแปรเปลี่ยนอัตราก่อกำเนิดการไหลปั่นป่วนตามระยะห่างจากผนังในบริเวณ viscous sub-layer [8] นอกจากนี้ ข้อจำกัดการวิเคราะห์ในช่วงปรับเปลี่ยน Boundary layer ที่ผนังนี้ไม่สามารถวิเคราะห์ด้วยสมการการไหลปั่นป่วนแบบหนึ่งสมการ (One-Equation) [18] ที่พัฒนาขึ้นมาสำหรับการไหลภายนอกที่ boundary layer ที่ผนังไหลแบบราบเรียบเช่นกัน สำหรับแนวโน้มของสัมประสิทธิ์แรงดันเมื่อเกิดการเพิ่มขึ้นของอัตราการหมุนไร้หน่วยนั้น พบว่า ความสอดคล้องของการคำนวณและการทดลองจะใกล้เคียงกันที่อัตราการหมุนไร้หน่วยมากกว่า 0.75 โดยผลความแตกต่างเล็กน้อยที่เกิดขึ้นเกิดจากทิศทางระหว่างแรงพลศาสตร์ลัพธ์กับแรงดัน [14] สำหรับเมชคงตัว (Fixed Mesh) ได้ใช้วิเคราะห์ผลเพิ่มเติมที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 0 และ 0.25 ได้ค่าสัมประสิทธิ์แรงดันมีความคลาดเคลื่อนสัมพันธ์กับการทดลองร้อยละ 7 ซึ่งเบื้องต้นสามารถแสดงถึงความสามารถของเมชชนิดนี้ในกรณีหยุดนิ่งหรืออัตราการหมุนไร้หน่วยต่ำดังกล่าวได้

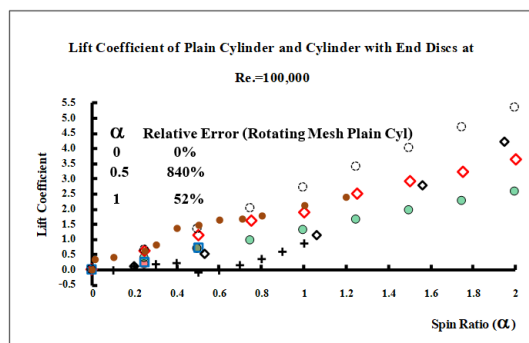
ขณะที่ทรงกระบอกติดตั้งดิสก์ $D_c/D = 1.375$ ที่ปลายทั้งสองด้านได้ทำการเทียบเคียงแนวโน้มกับการทดลองก่อนหน้านี้ [7] ที่เลขเรย์โนลด์ 48,900 โดยมีแนวโน้มของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงดันที่เป็นไปในแนวทางเดียวกันที่อัตราการหมุนไร้หน่วยมากกว่า 1 แต่ยังพบค่าการวิเคราะห์ของสัมประสิทธิ์แรงยกที่สูงกว่าการทดลองไม่มากในบางช่วงอัตราการหมุนไร้หน่วยอันเนื่องมาจากตำแหน่งวิกฤติของ Boundary layer แตกต่างกัน โดยทั่วไปแรงยกจะมีขนาดมากขึ้นหากแนวโน้ม

การเคลื่อนตำแหน่งของความดันดูด (Suction Points) ที่เป็นตำแหน่งที่มีความดันลบขนามากที่สุดและแตกต่างกัน (Stagnation Point) ที่มีพลังงานศักย์ความดันเพื่อยับยั้งการไหลผ่านสูงสุด เคลื่อนเข้าใกล้ด้านตรงข้ามกันที่มุม $\pm 90^\circ$ อย่างไรก็ตามแบบจำลองการไหลปั่นป่วนและเทคนิคเชิงตัวเลขและสนามการไหลของการศึกษาเชิงคำนวณนี้ถือว่ามีความน่าเชื่อถือที่จะใช้วิเคราะห์พฤติกรรมที่ทรงกระบอกที่มีอัตราหมุนไร้หน่วยเกิดขึ้นได้

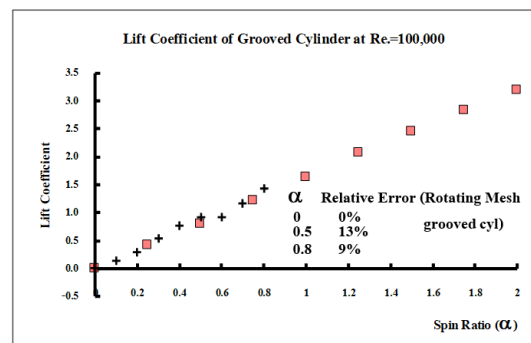
หากทำการเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่างการหมุนของทรงกระบอกหนึ่งเรียบกับการติดตั้งคิส์ พบว่าที่อัตราหมุนไร้หน่วย 2 การติดตั้งคิส์จะส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของสัมประสิทธิ์แรงยกมากกว่าทรงกระบอกหนึ่งเรียบ คือ 3.66 และ 2.56 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามที่อัตราหมุนเดียวกันนี้สัมประสิทธิ์แรงต้านระหว่างรูปทรงมีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ 0.79 และ 0.80 ตามลำดับ นอกจากนี้ผลการศึกษายังได้แสดงผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำกว่าการ

วิเคราะห์การไหลใน 2 มิติ ซึ่งแสดงถึงการไม่สามารถละเว้นการพิจารณาผลการไหลใน 3 มิติ ได้อย่างไรก็ตามหากพิจารณาที่อัตราการหมุนไร้หน่วยระหว่าง 0.4-0.7 ซึ่งเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงสภาวะ Boundary Layer ที่ผนังแบบราบเรียบสู่ปั่นป่วนทำให้สัมประสิทธิ์แรงยกที่วิเคราะห์ได้ยังมีความคลาดเคลื่อนกันกับการทดลองเพราะปรากฏการณ์สัมประสิทธิ์แรงยกผันกลับจากตำแหน่ง stagnation point ที่ผนังมีการเคลื่อนตัวในทิศทางต่างกัน แต่ผลการวิเคราะห์ที่คลาดเคลื่อนนี้เป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการศึกษาเชิงคำนวณก่อนหน้านี้ด้วยแบบจำลอง LES และ RSM [11],[14]

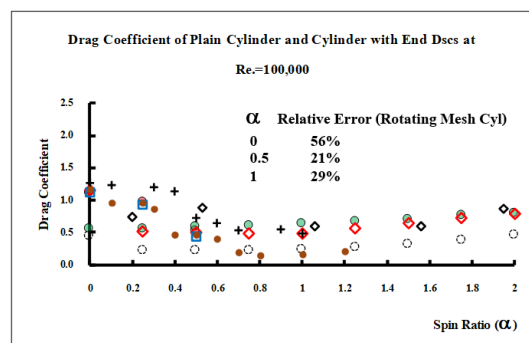
ในขณะที่ผลการวิเคราะห์เชิงคำนวณของการไหลผ่านทรงกระบอกหนึ่งเรียบร่องลึก $k/D = 7.25 \times 10^{-3}$ ตามรูปที่ 3 (ค) และ 3(ง) ได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับการทดลองอย่างมาก ได้แสดงการไม่เกิดผลสัมประสิทธิ์แรงยกในขณะที่สัมประสิทธิ์แรงต้านของการศึกษาเชิงคำนวณกับการทดลองใกล้เคียงกันที่ 0.80 และ 0.75 ตามลำดับ



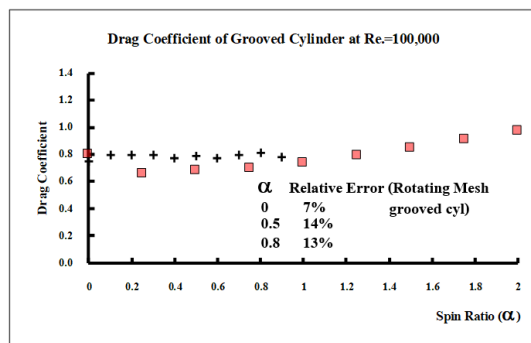
(ก)



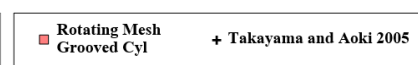
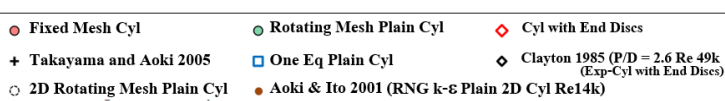
(ค)



(ข)



(ง)



รูปที่ 3 สัมประสิทธิ์แรงพลศาสตร์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ของวัตถุทรงกระบอกหนึ่งเรียบและติดตั้งคิส์ที่ปลาย (ค) แรงยก และ (ง) แรงต้าน ของวัตถุเสมือนทรงกระบอกหนึ่งเรียบ ที่เลขเรย์โนลด์ 100,000

ในกรณีที่ทรงกระบอกผนังเซาะร่องเกิดการหมุนนั้น พบว่าแนวโน้มสัมประสิทธิ์แรงยกมีการเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น โดยไม่พบช่วงการปรับเปลี่ยนสภาพการไหลของ Boundary layer และสูงสุดที่ 3.2 เมื่ออัตราการหมุนไร้หน่วยเป็น 2 และสัมประสิทธิ์แรงต้านโดยเฉลี่ยจากการคำนวณและการทดลองเป็น 0.72 และ 0.79 คิดเป็นความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (Relative Error) ร้อยละ 8.86 ในส่วนข้อมูลที่เกิดความสอดคล้องกับการทดลองได้ยืนยันความสามารถของแบบจำลองการไหลปั่นป่วน และเทคนิคการวิเคราะห์ในการคาดการณ์พฤติกรรมกรณีนี้ได้เป็นอย่างดี

เพื่อเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจสำหรับเลือกใช้เทคนิคการวิเคราะห์ด้วยเมชแบบหมุน โดยแบบจำลองการไหลปั่นป่วนชนิดนี้ในงานวิจัยต่อไป รูปที่ 3 ได้แสดงความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เมื่อเทียบกับการทดลองสำหรับการไหลผ่านทรงกระบอกผนังเรียบที่อัตราการหมุนไร้หน่วย 0.5 และ 1 และผิวเซาะร่องที่อัตราการหมุน 0.5 และ 0.8 ตามลำดับ

หากพิจารณาแรงอากาศพลศาสตร์ของสัมประสิทธิ์แรงยกชั่วขณะ (instantaneous time) แต่ละเวลาไร้หน่วยที่เกิดขึ้น (t^*) ตามรูปที่ 4(ก)–(ค) นั้น ทุกวัตถุตัวกลางที่ไม่มีการหมุนได้ส่งผลต่อการเกิดระดับความกวัดแกว่งของแรงพลศาสตร์ที่สูงอันเนื่องมาจากการแผ่ขยายของกระแสไหลออกสู่บริเวณด้านหลังของวัตถุตามหลักการการแผ่ขยายกระแสไหลออกของคาร์แมน (Kármán vortex shedding) ที่ก่อกำเนิดขึ้นจาก boundary layer ที่บริเวณผนังที่สลับกันระหว่างขอบบนและขอบล่างของวัตถุทรงกระบอกนี้ อย่างไรก็ตามผลของการหมุนของทรงกระบอกทุกแบบได้ยับยั้งการกวัดแกว่งจากพฤติกรรมตามหลักการดังกล่าว

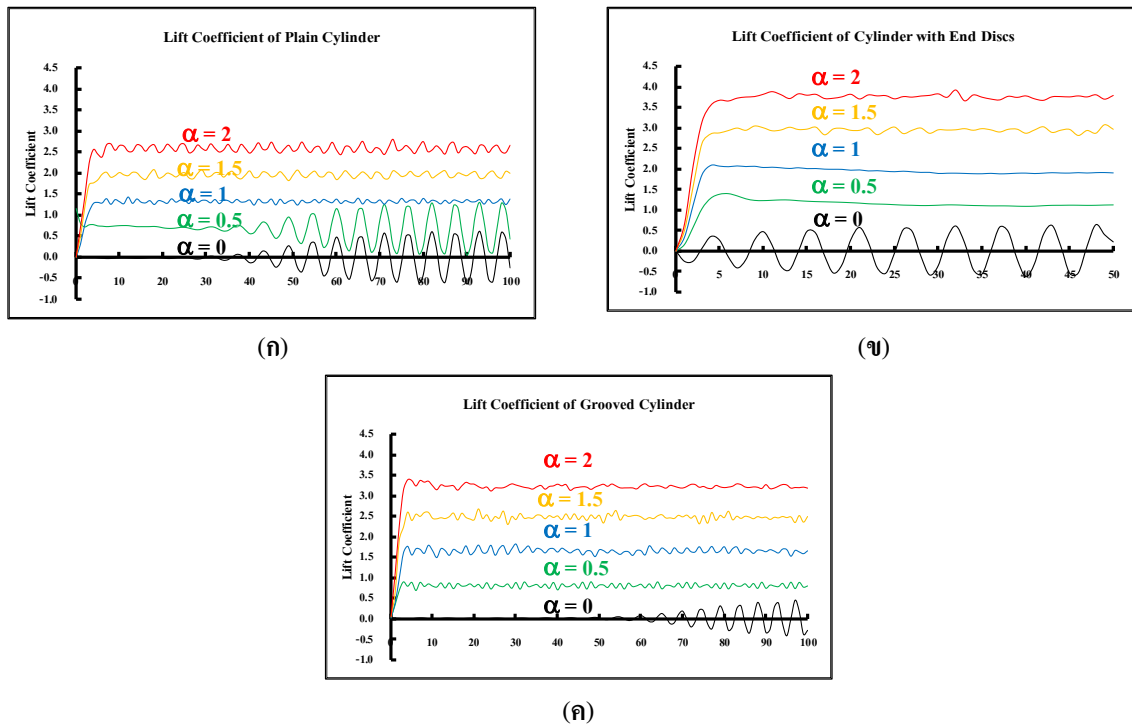
นอกจากนี้หากทำการเปรียบเทียบความสามารถการยับยั้งความไม่คงตัวของสนามการไหลที่เกิดขึ้นโดยการหมุนของวัตถุนั้น พบว่าการติดตั้งดิสก์ที่ปลายทั้งสองของทรงกระบอกสามารถยับยั้งการแผ่ขยายของกระแสได้ดีที่สุดที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 0.5 ในขณะที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่สูงกว่า 1 พบการแกว่งของสัมประสิทธิ์แรงยกเพียงเล็กน้อยอันเนื่องมาจากการเคลื่อนตัวเข้าหากันของจุดวิกฤตก่อให้เกิดความไม่สมดุลพลังงานบางส่วนใน

สายธารการไหลของจุดสแตกเนชันและจุดอานม้า (Saddle Point) ที่เป็จุดที่เป็นค่าสุดขีดพลังงานจลน์การไหล [19]

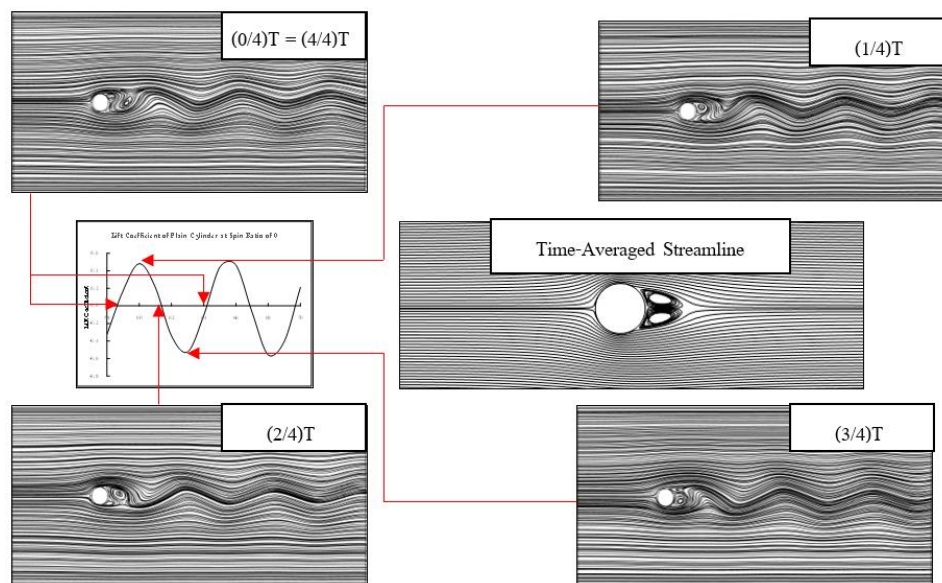
กระบวนการก่อกำเนิดกระแสวนที่มีผลต่อความกวัดแกว่งได้แสดงดังรูปที่ 5 พบว่าที่เวลาเริ่มต้นที่ช่วงคาบ 0/4 นั้นกระแสวนขนาดเล็กได้ก่อกำเนิดที่บริเวณขอบหลังด้านบนและมีขนาดใหญ่ขึ้นที่ช่วงเวลา (1/4) ของคาบซึ่งขนาดที่ใหญ่ทำให้เกิดแรงยกที่เป็นขนาดบวกโดยมีการกระทำในทิศทางแนวตั้งพุ่งขึ้นและเมื่อขนาดโตมากขึ้นก็จะเคลื่อนไปปลายกระแสของสนามการไหลและสลายไปในขณะเดียวกันนั้น กระแสวนขนาดเล็กเริ่มก่อกำเนิดขึ้นที่ขอบหลังด้านล่างที่เวลา (2/4) ของคาบ และเช่นเดียวกันกับช่วงเวลาค้างคาบก่อนหน้านี้ รูปแบบการขยายขนาดเริ่มพัฒนาจนที่เวลา (3/4) ของคาบ และเคลื่อนออกพร้อมสลายตัวไป ซึ่งรูปแบบการก่อกำเนิดมีความแน่นอนทำให้เมื่อพิจารณาแผนภาพสายธารการไหลแบบค่าเฉลี่ยตามเวลา (Time-averaged Streamline) จะเกิดกระแสวนคู่ที่ด้านหลังวัตถุทรงกระบอกและมีความสมมาตรรอบแกนขนานกับทิศทางการไหล

นอกจากนี้องค์ประกอบของแรงกระทำพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นได้จำแนกได้เป็นผลจากความดัน (Pressure Force) และแรงเสียดทานที่ผนัง (Viscous-Friction rate) ดังรูปที่ 6 ซึ่งพบว่าผลของแรงเสียดทานที่ผนังมีขนาดที่น้อยมากเมื่อเทียบกับความดัน โดยที่สภาวะหยุดนิ่งของวัตถุทรงกระบอกผนังเรียบ ติดตั้งดิสก์ที่ปลาย และ เซาะร่องคิดเป็นร้อยละ 3.93 3.45 และ 1.47 ตามลำดับ ในขณะที่อัตราการหมุนเพิ่มขึ้นแนวโน้มของแรงทั้งหมดของทุกรูปแบบวัตถุมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 2 สัดส่วนดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 1.91 1.02 และ 1.81 ตามลำดับ โดยทั่วไปในกรณีที่มิสัดส่วนต่ำกว่าร้อยละ 2 อาจสามารถละเว้นการพิจารณาผลของแรงเสียดทานที่ผนังเนื่องจากของไหลได้

เมื่อทำการวัดผลของ Kármán vortex shedding ในรูปของตัวแปรความถี่ไร้หน่วย (St , The Strouhal number: $\Gamma D/U_\infty$) ดังแสดงในรูปที่ 7 นั้น พบว่าค่าความถี่ไร้หน่วยของทุกวัตถุในสภาวะหยุดนิ่งของทรงกระบอกผนังราบเรียบ และติดตั้งดิสก์ที่ปลายได้ค่าที่ 0.20 ในขณะที่



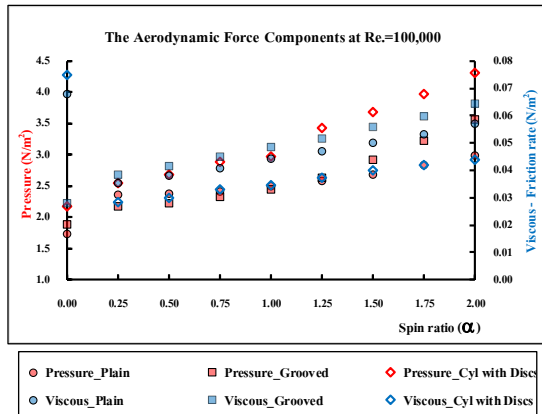
รูปที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ชั่วขณะเวลาไว้หน่วยทรงกระบอก (ก) ผนังราบเรียบ (ข) ปลายดิสก์ และ (ค) ผนังเจาะร่อง



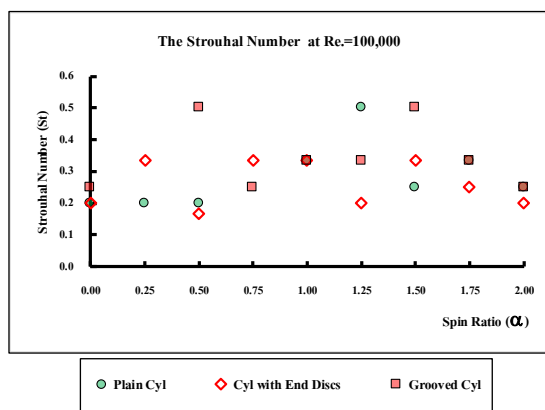
รูปที่ 5 การก่อกำเนิดกระแสวนเมื่อของไหลไหลผ่านทรงกระบอกผนังราบเรียบที่สภาวะหยุดนิ่งแต่ละช่วงคาบเวลา

ทรงกระบอกเจาะร่องมีความถี่ไว้หน่วยที่ 0.25 นอกจากนี้เมื่อวัตถุทุกชนิดมีการหมุนขึ้น ค่าความถี่ไว้หน่วยจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบไม่ขึ้นกับขนาดอัตราหมุนไว้หน่วย ซึ่งพบว่าขนาดสูงสุดในกรณีของวัตถุทรงกระบอกผนังเรียบ คือ 0.50 ที่อัตราหมุนไว้หน่วย 1.25 วัตถุทรงกระบอกปลายดิสก์ คือ 0.33 ที่อัตราหมุนไว้หน่วย 1.50 และ วัตถุ

ทรงกระบอกเจาะร่อง คือ 0.50 ที่อัตราหมุนไว้หน่วย 2 ทั้งนี้ขนาดของค่าความถี่ไว้หน่วยที่สูงเกิดจากการแผ่ขยายของกระแสวนเพียงด้านเดียวและการกวัดแกว่งของแรงพลศาสตร์จะมีแอมพลิจูดที่น้อยลงสู่ความคงตัวของการไหลผ่านวัตถุในสนามการไหลภายนอก



รูปที่ 6 องค์ประกอบของแรงกระทำพลศาสตร์



รูปที่ 7 ความถี่ไร้มวลของการแผ่ขยายกระแสนวน

4.2 รการกระจายตัวของความดันรอบผนัง

จากผลการวิเคราะห์พบว่าแรงเนื่องจากความดันมีอิทธิพลต่อขนาดของอากาศพลศาสตร์ เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายตัวความดันรอบผนังทรงกระบอกที่ระนาบกึ่งกลางวัตถุแต่ละแบบดังรูปที่ 8 ที่สภาวะหยุดนิ่งได้แนวโน้มของการกระจายตัวจะมีความสมมาตรรอบแกนมุมทิศในพิสัยทรงกลม (Azimuthal angle) ที่ 180° และอัตราการหมุนไร้หน่วย 2 จะพบการกระจายตัวที่มีความแตกต่างของความดันมาก โดยเฉพาะด้านส่งเสริมความเร็ว (Acceleration side) จะมีความดันที่ต่ำในขณะที่ด้านยับยั้งความเร็ว (Deceleration side) จะมีความดันที่สูงกว่า อย่างไรก็ตามในกรณีของวัตถุสี่เหลี่ยม ทรงกระบอกจะรบกวนการกระจายตัวของความดันที่เส้นรอบวงในที่นี้เป็นฐานล่างของร่องและเส้นรอบวงนอกที่เป็นขอบปลายของสันโค้งมีแนวโน้มคล้ายกันแต่มีขนาดต่างกันไม่มาก อีกทั้งรูปแบบการกระจายตัวที่สันนอกมีการกวัดแกว่งที่มาก เนื่องจากการปะทะกับของไหลและมีความเร็วที่มากกว่า

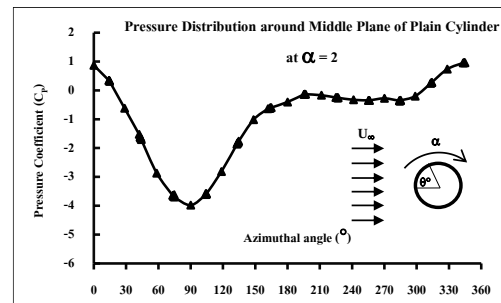
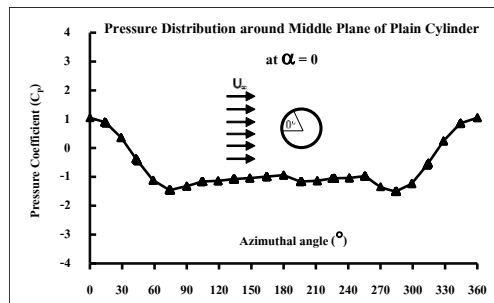
สำหรับการกระจายตัวของความดันนี้ยังสามารถระบุตำแหน่งวิกฤติของเลเยอร์ที่ผนังได้

รูปที่ 9 ได้ทำการวิเคราะห์บริเวณวิกฤติของ Boundary layer ที่ระนาบหน้าตัดกึ่งกลางทรงกระบอก โดยรูปที่ 9(ก) แสดงผลเมื่อวัตถุมีการหมุนทำให้เกิดแนวโน้มของการเคลื่อนตัวของจุดสแตกเนชันในทิศทางสวนทางกับการหมุนของทรงกระบอก ในขณะที่ตำแหน่งความดันศูนย์กลางของผนังด้านส่งเสริมความเร็วในรูปที่ 9(ข) ได้ผลการเคลื่อนตัวของตำแหน่งดังกล่าวมีแนวโน้มเคลื่อนในทิศทางเดียวกันกับการหมุนจนถึงอัตราการหมุนไร้หน่วย 1 ตำแหน่งดังกล่าวจะเริ่มคงที่สำหรับรูปที่ 9(ค) แสดงผลของจุดความดันศูนย์กลางบริเวณผนังด้านยับยั้งความเร็วมีการเคลื่อนตัวเล็กน้อยเมื่อเกิดอัตราการหมุนไร้หน่วยขึ้น

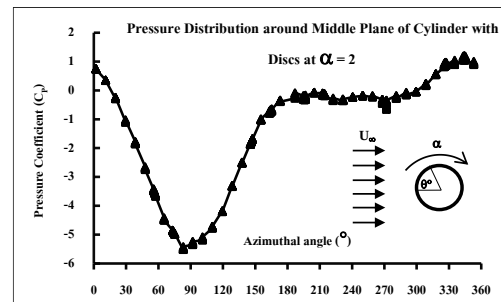
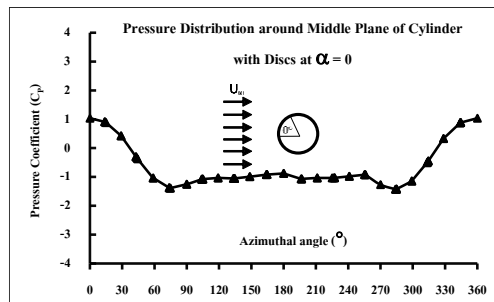
4.3 นามการไหลของฟลักซ์โมเมนตัมการไหล

และตัวแปรการไหลปั่นป่วน

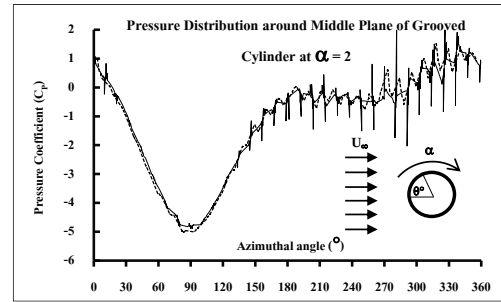
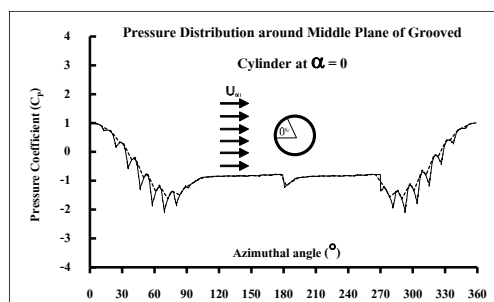
สนามการไหลของระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่กึ่งกลางระนาบของทรงกระบอกแบบค่าเฉลี่ยตามเวลาได้แสดงในรูปที่ 10 โดยระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่สูงจะพบที่บริเวณใกล้ผนังหรือบริเวณ Inertial Sub-layer ซึ่งสอดคล้องกับสมการเงื่อนไขที่เมฆแบบปรับรูปได้ถูกกำหนดและบริเวณกระแสนวนที่เกิดขึ้น สำหรับวัตถุหยุดนิ่งจะมีระดับพลังงานที่สูงกว่าวัตถุที่หมุน โดยแผนภาพได้แสดงในช่วง 0-0.05 และวัตถุหมุนด้วยอัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 2 ได้แสดงในช่วง 0-0.0003 สำหรับการลดระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนอันเนื่องจากการหมุนจะเกิดที่บริเวณไกลจากผนังออกไป นอกจากนี้ยังพบว่าวัตถุทรงกระบอกจะรบกวนส่งผลทำให้กระแสนวนหลังวัตถุมีขนาดใหญ่และมีระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่สูงสุด ผลที่ได้จากแผนภาพนี้สามารถนำไปใช้ออกแบบและกำหนดตำแหน่งการติดตั้งชิ้นส่วนของอากาศยานทุกรูปแบบที่เกี่ยวข้องเพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เส้นทางกระแสการไหลที่มีระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนที่สูงผ่านเข้าสู่บริเวณใช้งานหรือควบคุมความปลอดภัยจากของไหลปั่นป่วนได้ รูปที่ 11 แผนภาพ Q criteria iso-surface ที่ 100 ใน 3 มิติ โดยเป็นขนาดของผลต่างเฉลี่ยระหว่างความอัตราการหมุนเฉลี่ย (Ω) กับอัตราความเครียดเฉลี่ย (S) ระหว่างเลเยอร์การไหล ซึ่ง boundary layer ของกระแสนวนนี้สามารถจำแนกออกจากการไหลที่มีความเร็วอิสระหรือคงตัวได้



(ก)



(ข)



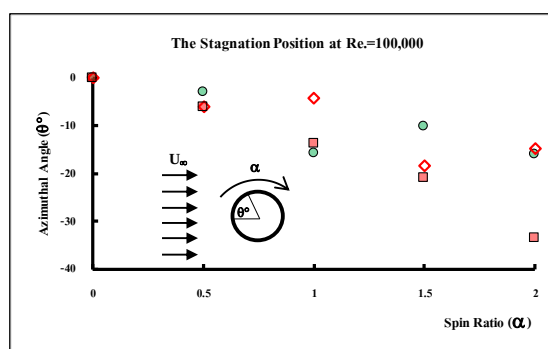
เส้นรคบางลายรค

(ค)

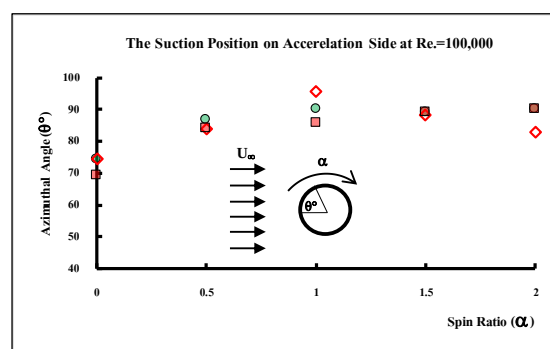
รูปที่ 8 การกระจายตัวของความดันรอบผนังที่สภาวะหยุดนิ่งและหมุนไว้หน่วย 2 ของวัตถุทรงกระบอก (ก) ผนังราบเรียบ (ข) ติดตั้งดิสก์ที่ปลาย และ (ค) เซาะร่อง

อีกทั้งการจำลองการวิเคราะห์เชิงคำนวณจากลักษณะการติดตั้งวัตถุตัวกลางในการทดลองรูปแบบนี้ได้ยืนยันผลการไม่เกิดความแปรปรวนการไหลจากกระแสน้ำที่ปลาย

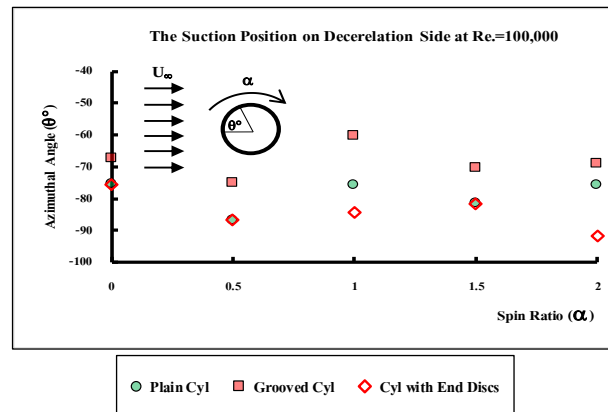
ของวัตถุ (Tip Vortices) โดยผลของการหมุนของวัตถุ สันฐานทรงกระบอกได้ส่งผลต่อการลดขนาดพื้นที่และเส้นทางแผ่ขยายของกระแสน้ำให้สั้นลงได้



(ก)



(ข)



(ค)

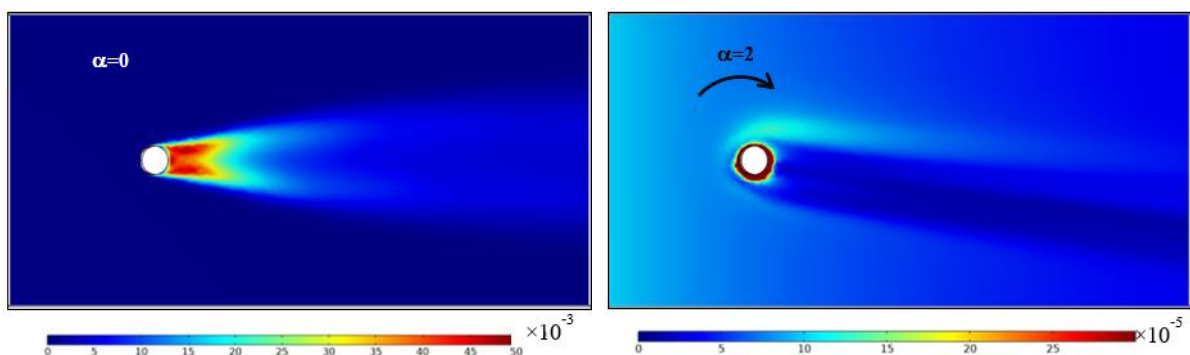
รูปที่ 9 จุดวิกฤติของ boundary layer ที่ผนัง (ก) จุดสแตกเนชัน (ข) จุดความดันดูดด้านส่งเสริม และ (ค) ด้านยับยั้งความเร็ว

5. บทสรุป

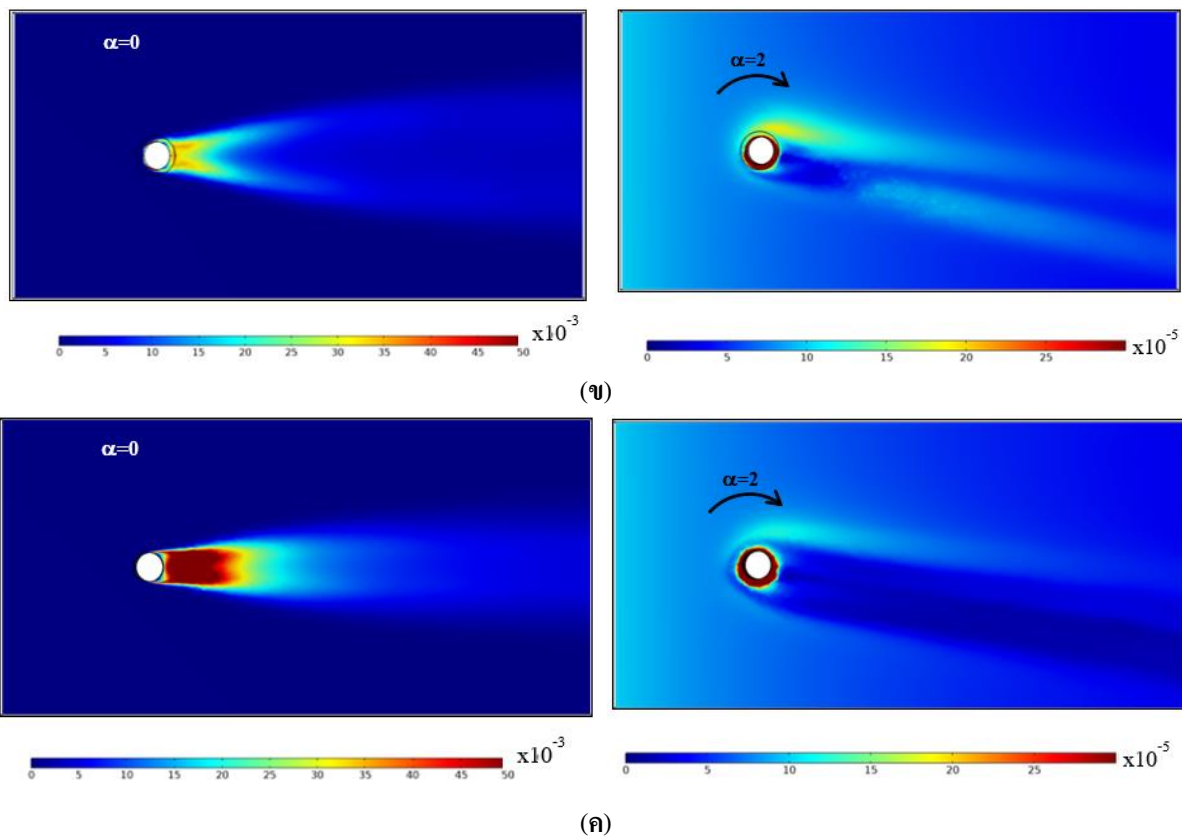
ในการไหลผ่านวัตถุตัวกลางทรงกระบอกและวัตถุฐานทรงกระบอกที่ได้ทำการศึกษาในสภาวะการหมุนและที่เลขเรย์โนลด์ที่สูงนี้ พบว่าลักษณะวัตถุมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของแรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจน รวมถึงพฤติกรรมกายภาพในสนามการไหลและลักษณะ boundary layer ที่ผนังล้วนมีความแตกต่าง ข้อมูลที่ได้นี้ถือว่าเป็นประโยชน์ในทางการออกแบบทางวิศวกรรมเพื่อใช้ในการออกแบบชิ้นส่วนทางของไหลพลศาสตร์โดยมุ่งเน้นการขับเคลื่อนจากผลของแรงยกและแรงดันได้เป็นอย่างดี

อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังได้ยืนยันความสามารถของเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ที่สภาวะวัตถุหมุน และนอกเหนือสภาวะ boundary layer ที่ผนังปรับตัวจาการเรียบสู่ปั่นป่วน ($\alpha > 0.8$)

สำหรับวัตถุทรงกระบอกและติดตั้งดิสก์ที่ปลายทรงกระบอก ซึ่งมีข้อจำกัดในช่วงการหมุนไร้หน่วยที่ boundary layer ที่ผนังยังไม่อยู่ในสภาวะการไหลปั่นป่วนสมบูรณ์แบบ สำหรับทรงกระบอกผนังเซาะร่องให้ผลวิเคราะห์ที่แม่นยำทุกช่วงอัตราการหมุนไร้หน่วยจึงเป็นการดีที่จะประมาณค่าฟลักซ์โมเมนตัม ความดัน และตัวแปรการไหลปั่นป่วนด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์ ประกอบด้วยเมชที่เปลี่ยนรูปร่าง และวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนชนิด high Re k-ε แบบ Linear Eddy Viscosity Model ประกอบกับสมการ Boundary layer ที่ผนังแบบมาตรฐานตามกฎลอการิทึม สำหรับการไหลผ่านวัตถุผนังโค้งมากหรือวัตถุที่มีร่องโค้งได้



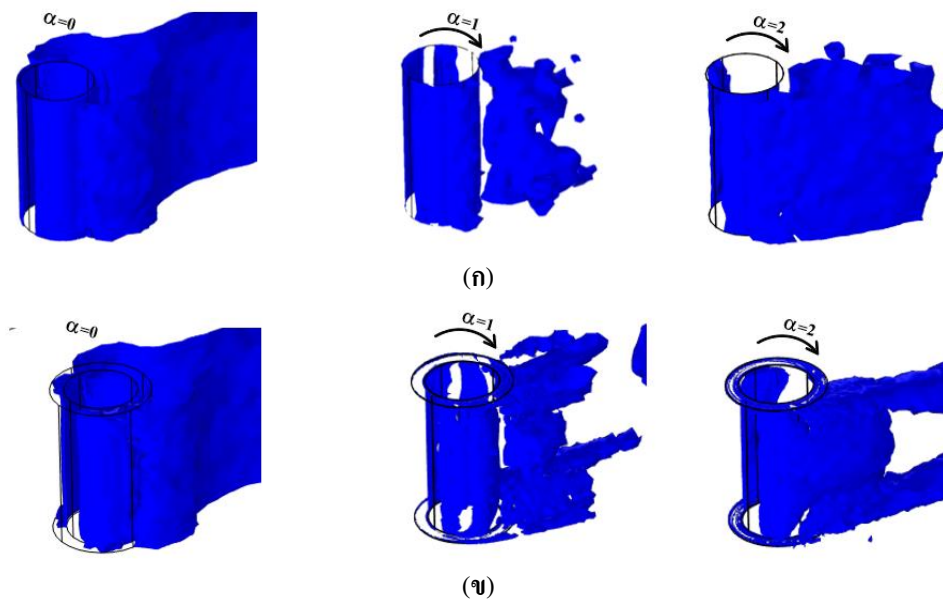
(ก)

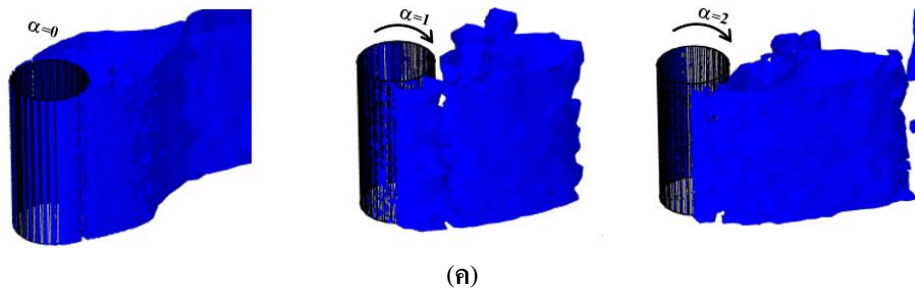


รูปที่ 10 แผนภาพพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน (ก) ของวัตถุทรงกระบอก (ข) ผนังราบเรียบ (ค) ติดตั้งดิสก์ที่ปลาย และ (ค) ผนังเซาะร่อง

ประกอบกับผลแนวโน้มขนาดแรงอากาศพลศาสตร์ได้แสดงถึงประโยชน์จากการหมุนของวัตถุที่สามารถเพิ่มแรงยกและลดระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนที่บริเวณใกล้ผนัง และระดับความรุนแรงของการกระส่ายการไหลปั่นป่วน

เพื่อใช้ออกแบบการติดตั้งชิ้นส่วนของอากาศยานทุกรูปแบบ นอกจากนี้ยังเป็นประโยชน์ทางเศรษฐศาสตร์ในการเลือกใช้เทคนิคดิสก์ไทป์ปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งและของไหลในโปรแกรมที่ประมาณค่าจากเมชชนิดเดียวกัน





รูปที่ 11 แผนภาพระดับ Q-criteria iso-surface ของวัตถุทรงกระบอก (ก) ผนังราบเรียบ (ข) ติดตั้งคิส์ที่ปลาย และ (ค) ผนังเจาะร่อง ที่ระดับ 100 หน่วย

6. คำย่อและนามานุกรม

α	อัตราการหมุนไร้หน่วย	E	ค่าคงที่จากปฏิยานุพัทธ์, 0.09
β	สัดส่วนความหนืดจลน์ของความเฉื่อยกับการไหลปั่นป่วน	f	ความถี่เนื่องจากการแผ่ขยายกระแสวน
δ_{ij}	ค่าคงที่เพื่อสร้างเมทริกซ์หน่วย	H	ขนาดค่าเฉลี่ยความโค้งของผิวโครงสร้างคำนวณ
δ_{mbs}	ค่าคงตัวเพื่อความราบเรียบของความเร็ว, 0.5	h	ขนาดระยะของโครงสร้างคำนวณแบบเปลี่ยนรูป
ε	อัตราการฟุ้งกระจายของพลังงานการไหลปั่นป่วน	I	ระดับความเข้มของพลังงานการไหลปั่นป่วน
θ	มุมในการวัด	i, j, k	ตัวห้อยเพื่อระบุทิศทางในเวกเตอร์องค์ประกอบ
K	ค่าคงตัว Von Kármán, 0.41	k	พลังงานการไหลปั่นป่วน
μ, ν	ความหนืดพลศาสตร์และจลน์	k	ขนาดความลึกของการเจาะร่อง
μ_r, ν_t	ความหนืดพลศาสตร์และจลน์ของการไหลปั่นป่วน	k_p	พลังงานการไหลปั่นป่วนที่กึ่งกลางโครงสร้างติดผนัง
ρ	ความหนาแน่น	n	เวกเตอร์หน่วยตั้งฉาก
$\sigma^{(k)}$	ค่าคงที่พลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน Prandtl number, 1.0	P	ความดัน
σ_ε	ค่าคงที่อัตราการฟุ้งกระจายของพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน Prandtl number, 1.3	P_k	อัตราการก่อกำเนิดพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วน
τ_w	ความเค้นเฉือนที่ผนัง	Q	แผนภาพเสมือน 3 มิติ แบบ Q-criteria
Ω	อัตราการหมุนเฉลี่ยของกระแสวน	S	อัตราความเค้นเฉลี่ยระหว่างเลเซอร์การไหล
ω	อัตราความเร็วเชิงมุม	St	ความถี่ไร้หน่วยเนื่องจากการแผ่ขยายของกระแสวน
AR	อัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	t, t*	เวลาและเวลาไร้หน่วย
$C_{\varepsilon_1}, C_{\varepsilon_2}$	ค่าคงที่ของเทอมความหนืดสำหรับสมการการไหลปั่นป่วน (Hanjalic and Launder, 1972), 1.44 และ 1.92	U, V, W	ความเร็วในแต่ละองค์ประกอบ
c_t	ค่าคงที่สมมูลขนาดการไหลปั่นป่วน, 2.55	U^+, y^+	ความเร็วและระยะห่างไร้หน่วย
D	เส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก	U_∞	ความเร็วของไหลอิสระ
D	ค่าจำแนกความเป็นเนื้อเดียวกันของไหลเนื่องจากการฟุ้งกระจายตัว, 0	u', v'	อัตราการกวัดแกว่งจากความเร็วเฉลี่ย
		v_{mbs}	ความเร็วที่ปรับค่าความราบเรียบในโครงสร้างแบบเปลี่ยนรูป
		v_0	ค่าความเร็วในแนวตั้งฉากกับผิวที่ปะทะ
		x, y, z	ตำแหน่งในพิกัดคาร์ทีเซียน
		X	ตำแหน่งเมฆแบบเปลี่ยนรูป

y_v ความหนาของระยะชั้นย่อยหนืดของการไหล
 ∇_T การเปลี่ยนแปลงของเวกเตอร์ผิว
 DES the Detached-Eddy Simulation method
 LES the Large-Eddy Simulation method
 PANS the Partially Reynolds Averaged Navier- Stokes method
 RSM the Reynolds Stresses Equation models
 RNG the Renormalization Group method
 SIMPLE the Semi- Implicit Method for Pressure- Linkage Equation

7. กิตติกรรมประกาศ

โดยงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (กสว) งบประมาณด้านววน. ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 แพลตฟอร์มการพัฒนากำลังคนและสถาบันความรู้รหัสโครงการ 52304

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการที่ห้องวิจัยการคำนวณทางวิศวกรรม มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช และการให้คำแนะนำในการใช้งานเครื่องประมวลผลสมรรถนะสูง super-micro computer และโปรแกรมเพื่อใช้วิเคราะห์โดยบริษัท ทูรูเวฟ (ประเทศไทย) จำกัด เอกสารอ้างอิง

เอกสารอ้างอิง

- [1] G. Magnus, “Ueber die Abweichung der Geschosse, und: Ueber eine auffallende Erscheinung bei rotirenden Körpern,” *annalen der physik*, vol. 164, no. 1, pp. 1–29, 1853, doi: 10.1002/andp.18531640102.
- [2] ENERCON, “Enercon E- Ship 1: A wind- hybrid commercial cargo ship,” presented at 4th Conference on Ship Efficiency, Hamburg, Germany, Sep. 23–24, 2013, pp. 1–26.
- [3] C. Badalamenti, “On the Application of Rotating Cylinders to Micro Air Vehicles,” PhD. Thesis, School of Engineering and Mathematical Sciences, City University London, London, UK, 2010.
- [4] K. K. Pijush and M. C. Ira, “Boundary Layers and Related Topic,” in *Fluid Mechanics*, 3rd ed., San Diego, CA, USA: Elsevier, 2004, ch. 10, sec. 9, pp. 346–52.
- [5] E. G. Reid, “Tests of Rotating Cylinders,” NACA., Washington, DC, USA, Tech. Notes, 1924.
- [6] A. Thom, “Experiments on the Air Forces on Rotating Cylinders, Aeronautical Research Committee Reports and Memoranda,” Air Ministry, London, UK, Rep. no. 1623, Jan 1925.
- [7] B. R. Clayton, “BWEA Initiative on wind-assisted ship propulsion (WASP) ,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 19, no. 1–3, pp. 251–276, 1985, doi: 10.1016/0167-6105(85)90064-9.
- [8] K. Aoki and T. Ito, “Flow Characteristics around a Rotating Cylinder,” in *Proc. Schl. Eng. Tokai Univ.*, Tokyo, Japan, 2001, pp. 29–34.
- [9] S. Takayama and K. Aoki, “Flow characteristics around a rotating grooved circular cylinder with grooved of different depths,” *Journal of Visualization*, vol. 8, no. 4, pp. 295– 303, 2005, doi: 10.1007/BF03181548.
- [10] T. J. Craft, H. Iacovides, and B. E. Launder, “Dynamic Performance of Flettner Rotors With and Without Thom Discs,” in *TSFP7*, Ottawa, Canada, Jan. 28–31, 2012, pp. 6C13–6C18 .
- [11] S. J. Karabelas, “Large Eddy Simulation of high-Reynolds number flow past a rotating cylinder,” *International Journal of Heat and Fluid Flow*, vol. 31, no. 4, pp. 518–527, 2010, doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.010.
- [12] A. Travin, M. Shur, M. Strelets and P. Spalart, “Detached- Eddy Simulations Past a Circular Cylinder,” *Flow, Turbulence and Combustion* ., vol. 63, pp. 293–313, 2000, doi: 10.1023/A:1009901401183.

- [13] A. Elmiligui, K. Abdol-Hamid, S. Massey and S. Pao, “Numerical Study of Flow Past a Circular Cylinder Using RANS, Hybrid RANS / LES and PANS Formulations,” in *22nd Applied Aerodynamics Conference and Exhibit*, Providence, RI, USA, Aug. 16–19, 2004, pp. 1–18.
- [14] S. Ruchayosyothin, P. Konglerd and S. Tamna, “The computational modelling in the prediction of flow past a rotating sphere at high Reynolds number,” *Journal of Research and Applications in Mechanical Engineering*, vol. 10, no. 1, 2022, Art. no. JRAME-22-10-005, doi: 10.14456/jrame.2022.5.
- [15] B. E. Launder and D. B. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows,” *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269–289, 1974, doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
- [16] U. Piomelli, Large-eddy and direct simulation of turbulent flows, in: *9e conférence annuelle de la société Canadienne de CFD*, Ontario, Canada, May 27–19, 2001, pp. 1–60.
- [17] S. Littmarck and F. Saeidi, “About COMSOL.” COMSOL. Available: <https://www.comsol.com/>, (accessed Aug. 1, 2022).
- [18] P. R. Spalart and S. R. Allmaras, “One-Equation Turbulence Model for Aerodynamic Flows,” in *30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, NV, USA, Jan. 6, 1992, pp. 1–23, doi: 10.2514/6.1992-439.
- [19] S. Mittal and B. Kumar, “Flow past a rotating cylinder,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 476, pp. 303–334, 2003, doi: 10.1017/S0022112002002938.