บทที่ 6
บทสรุป

จากการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ตามวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษาพฤติกรรมและประโยชน์ของของไหลปั่นป่วนผ่านวัตถุทรงกลมที่หยุดนิ่งและหมุน โดยมีการพิจารณาผลของแรงที่เกี่ยวข้องซึ่งอาศัยข้อมูลจากลักษณะกายภาพของของไหลบริเวณใกล้ผนังและพื้นที่การคำนวน และเพื่อการระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของไหลชนิดปั่นป่วนผ่านวัตถุทรงกลมขณะหมุนที่สภาวะเรย์โนลด์ที่สูง ในรูปแบบ 3 มิติ นั้น โดยมีการวิเคราะห์จากแบบจำลองของไหลด้วยแบบจำลองการไหลทั่วไป การพิจารณาการไหลมีทั้งอยู่ในรูปแบบการไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) เพื่อรองรับในกรณีที่ของไหลอาจอยู่ในสภาวะการปรับเปลี่ยนขอบเขตเลเยอร์การไหลจากการไหลแบบราบเรียบสู่การไหลแบบปั่นป่วน (transition laminar-turbulent flow boundary layer) นั้น และการวิเคราะห์การไหลในสภาพการไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (fully turbulent flow) โดยอาศัยการวิเคราะห์ด้วยสมการ the high-Re k-ε turbulence model ซึ่งประกอบด้วยการใช้สมการการไหลใกล้ผนังร่วมวิเคราะห์เพื่อลดทรัพยากรในการประมวลผล โดยเทอม the eddy-viscosity equation เป็นฟังก์ชันแบบเชิงเส้น (linear function) และพหุนามกำลังสอง (quadratic function) นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ด้วยสมการ the Reynolds Stress Model โดยแบบจำลองมีความสัมพันธ์ของเทอมความเค้นเรย์โนลด์ในแต่ละองค์ประกอบสอดคล้องกับพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนภายนอก

โดยผลการวิเคราะห์การไหลผ่านวัตถุทรงกลด้วยแบบจำลองดังกล่าวข้างต้นได้ให้ข้อมูลทางวิศวกรรมศาสตร์ที่สำคัญที่สามารถนำไปใช้การออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์หรืออากาศยานเพื่อการขับเคลื่อนได้ ซึ่งสามารถสรุปได้ ดังนี้

6.1. ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยในการศึกษาพฤติกรรมและประโยชน์ของของไหลปั่นป่วนผ่านวัตถุทรงกลมที่หยุดนิ่งและหมุน โดยมีการพิจารณาผลของแรงที่เกี่ยวข้องซึ่งอาศัยข้อมูลจากลักษณะกายภาพของของไหลบริเวณใกล้ผนังและพื้นที่การคำนวน นั้น พบว่า

6.1.1 การเกิดขึ้นของแรงกระทำต่อวัตถุทรงกลมทั้งในกรณีหยุดนิ่งและหมุนมีการเกิดขึ้นแบบไร้รูปแบบซึ่งทำให้ขนาดของแอมปลิจูดของแรงพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นตามเวลาไม่สามารถคาดการณ์ได้ อันเนื่องมาจากผลของความแตกต่างขนาดระนาบของทรงกลมในแต่ละหน้าตัดในแนวแกน 3 มิติ ทำให้

เกิดผลของแรงในแต่ละระนาบมีความแตกต่างกันและเกิดทิศทางการไหลของสายธารการไหลทุกทิศทาง

6.1.2 การไหลของของไหลผ่านทรงกลมที่สภาวะหยุดนิ่งยังคงมีการเกิดขึ้นของการแผ่ของกระแสวนจากผนังทรงกลมด้านส่งเสริมและยับยั้งความเร็วการไหลของของไหลซึ่งมีผลทำให้แอมปลิจูดของแรงต้านตามเวลามีขนาดที่น้อยกว่าแอมปลิจูดของแรงยก

6.1.3 สัมประสิทธิ์แรงยกที่กระทำกับทรงกลมขณะหมุนจะมีขนาดสูงสุดที่อัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 2 ที่สภาวะการหมุนไร้หน่วยที่สูงกว่านี้ไม่ช่วยสนับสนุนให้เกิดขนาดแรงยกที่มากขึ้น ซึ่งมีความแตกต่างกับการหมุนผ่านทรงกระบอกที่หมุนที่แนวโน้มของแรงดังกล่าวจะเพิ่มขึ้นต่อเนื่องตามอัตราการหมุนไร้หน่วยที่เพิ่มขึ้นในทุกสภาวะเรย์โนลด์ที่ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้

6.1.4 สัมประสิทธิ์แรงต้านที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงอัตราการหมุนไร้หน่วยถึง 1 และจะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่สภาวะอัตราการหมุนไร้หน่วยที่สูงกว่านั้นที่ทุกสภาวะเรย์โนลด์ที่ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้

6.1.5 เมื่อทรงกลมหยุดนิ่งจะเกิดผลของโมเมนต์อันเนื่องมาจากแรงเฉือนที่กระทำในแนวสัมผัสกับผิว และเมื่อทรงกลมมีอัตราการหมุนที่สูงขึ้นจะเกิดขนาดโมเมนต์รอบแกนการหมุนที่สูงขึ้น โดยแรงที่ก่อให้เกิดโมเมนต์อยู่ในทิศทางสวนทางกับการไหลสำหรับการไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่ง และมีทิศทางเดียวกันกับการหมุนของผนังในองค์ประกอบความเร็วที่ขนานกับการไหลอิสระของของไหล (แกน x) สำหรับการไหลผ่านทรงกลมที่หมุนที่ทุกสภาวะเรย์โนลด์ในการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสำหรับงานวิจัยนี้

6.1.6 การเกิดขึ้นของแรงกระทำกับทรงกลมทั้งขณะหยุดนิ่งและหมุนนอกจากเกิดแรงยกและแรงต้านแล้ว ยังพบว่ามีแรงกระทำด้านข้างเกิดขึ้นอีกด้วย อย่างไรก็ตามการเกิดขึ้นของแรงกระทำด้านข้างยังคงมีขนาดที่น้อยเมื่อเทียบกับแรงต้านและแรงยก และมีแนวโน้มที่กวัดแกว่งรอบค่ากลางของข้อมูลเมื่อเทียบกับอัตราการหมุนไร้หน่วยต่างๆ

6.1.7 เมื่อพิจารณาองค์ประกอบแรงย่อยของแรงพลศาสตร์ พบว่าเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากแรงดันที่กระทำกับผิวและแรงเฉือนที่ผิวอันเนื่องมาจากเลเยอร์การไหล ซึ่งเมื่ออัตราการหมุนไร้หน่วยสูงขึ้นจะทำให้ขนาดของแรงทั้งสองมีขนาดเพิ่มขึ้นตาม แต่อย่างไรก็ตามที่การหมุนอัตราการหมุนไร้หน่วยที่ต่ำหรือหยุดนิ่งผลของแรงเฉือนมีขนาดที่น้อยมากเมื่อเทียบกับแรงดัน (น้อยกว่าร้อยละ 2) แต่อย่างไรก็ตามยังส่งผลให้ทรงกลมเกิดการกวัดแกว่งตัวรอบมุมยอว์ได้

6.1.8 การกระจายตัวของแรงดันรอบผิวทรงกลมแต่ละแบบจำลองหรือแต่ละสภาวะเรย์โนลด์มีรูปร่างที่สมมาตรหากไม่มีสัมประสิทธิ์แรงยกเกิดขึ้นสำหรับการไหลผ่านทรงกลมสภาวะหยุดนิ่ง และมีรูปร่างเป็นแบบอสมมาตรรอบแกนขนานกับการไหลอิสระหากสัมประสิทธิ์แรงยกมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ที่สภาวะทรงกลมหยุดนิ่งด้วยแบบจำลอง the high-Re k-ε model และที่สภาวะอัตราการหมุนไร้หน่วยที่น้อยกว่า 2 ที่การวิเคราะห์โดยทุกแบบจำลอง โดยสามารถวิเคราะห์จุดวิกฤติของเลเยอร์การไหลได้แก่ จุดการแยกตัวการไหล จุดความดันสูงสุด จุดสัมผัสหลังการแยกตัวได้ แต่สำหรับอัตราการไหลที่สูงกว่าทำให้เกิดการกระจายตัวของความดันระหว่างตำแหน่งใกล้เคียงกันมีความกวัดแกว่งมาก

6.1.9 เมื่อทรงกลมมีการหมุนทำให้จุด the stagnation point เคลื่อนตัวไปทิศทางตรงข้ามกับการหมุน และบริเวณ the separation points เคลื่อนตัวไปในทิศทางเดียวกันกับการหมุนเสมอ นอกจากนี้ บริเวณ the suction pressure จะพบอยู่ด้านผนังส่งเสริมความเร็วการไหลและเคลื่อนตัวในทิศทางเดียวกันกับการหมุนเมื่ออัตราการหมุนไร้หน่วยสูงขึ้น

6.1.10 เมื่ออัตราการหมุนไร้หน่วยสูงขึ้นจะทำให้ของไหลโอบล้อมรอบผนังทรงกลมเป็นวงแหวนขึ้นซึ่งก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงพลศาสตร์และระดับพลังงานการไหลปั่นป่วนที่ลดลงตลอดสนามการไหลได้

6.1.11 เมื่อสภาวะเรย์โนลด์สูงขึ้นและประกอบกับอัตราการหมุนไร้หน่วยที่สูงขึ้นจะทำให้พื้นที่ของไหลบริเวณที่มีระดับความเค้นเรย์โนลด์และอัตราการไหลแบบวนที่สูงเพิ่มมากขึ้น และพบระดับพลังงานจลน์การไหลปั่นป่วนสูงที่ด้านผนังทรงกลมที่ยับยั้งความเร็วการไหลของของไหล

6.1.12 เมื่อพิจารณาเส้นแรงเฉือนที่ผิวของทรงกลมที่หยุดนิ่งจะพบบริเวณจุดวิกฤติ และแนวจุดวิกฤติต่างๆ มีความซับซ้อนมากกว่าทรงกลมที่หมุน โดยพบแนวแยกตัว แนวสัมผัสหลังการแยกตัวแต่ละองศาแตกต่างกันไปตลอดผิวทรงกลม ในขณะที่จุดวิกฤติของทรงกลมที่หมุนอัตราการหมุนไร้หน่วยที่ต่ำจะเป็นลักษณะโหนด คือ detachment และ reattachment nodes ในขณะที่อัตราการหมุนที่สูงจะพบแนว reattachment node ตลอดแนวครึ่งของทรงกลม

6.2 ข้อมูลทางแบบจำลองการไหลปั่นป่วน

เพื่อทำการระบุแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมในการทำนายพฤติกรรมของไหลชนิดปั่นป่วนผ่านวัตถุทรงกลมขณะหมุนที่สภาวะเรย์โนลด์ที่สูง ในรูปแบบ 3 มิติ ทำให้พบว่า

6.2.1 เมื่อทำการสอบเทียบการไหลของของไหลผ่านวัตถุทรงกลมที่หยุดนิ่งที่ทุกสภาวะเรย์โนลด์แบบจำลองการไหลปั่นป่วน the Reynolds Stress Model ให้ผลการสอบเทียบแรงเนื่องจากอากาศพลศาสตร์ที่น่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้วิเคราะห์สภาพกายภาพการไหลได้ ในขณะที่การวิเคราะห์การไหลผ่านทรงกลมที่หมุนทุกแบบจำลองการไหลปั่นป่วนให้ผลการวิเคราะห์ที่ใกล้เคียงกันโดยไม่มีนัยความแตกต่างมากที่ช่วง sub-critical หรือ critical หรือ super-critical Reynolds numbers

6.2.2 ในช่วงการปรับเปลี่ยนการไหลจากราบเรียบสู่การไหลปั่นป่วนซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองก่อนหน้าที่บางสภาวะเรย์โนลด์ (เกิดขึ้นที่อัตราการหมุนไร้หน่วยน้อยมีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 0.8) ทั้งแบบจำลองการไหลทั่วไป (the Navier-Stokes Equation) ยังให้ผลเชิงตัวเลขและแนวโน้มที่แตกต่างกับการทดลองเล็กน้อย แต่เมื่ออัตราการหมุนไร้หน่วยสูงขึ้นผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขมีลักษณะใกล้เคียงกับการทดลองก่อนหน้า

6.2.3 เมื่อทำการสอบเทียบข้อมูลทุกแบบจำลองการไหลปั่นป่วนและการไหลทั่วไปที่สภาวะการไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่งตามที่การเกิดขึ้นของแรงมีลักษณะไร้รูปแบบทำให้การวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน the Linear high-Re k-ε model และ the Quadratic high-Re k-ε model และ the Reynolds Stress Model ให้ผลที่แตกต่างกันมากน้อยตามแต่สภาวะเรย์โนลด์ แต่เมื่อทรงกลมหมุนที่สภาวะอัตราการหมุนไร้หน่วยที่ต่ำจะส่งผลให้ได้พฤติกรรมใกล้เคียงกันมากขึ้น

6.2.4 จากผลการทดลองที่เผยแพร่ก่อนหน้ายังมีความแตกต่างของการเกิดขึ้นของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกซึ่งการสนามการไหลมีความอสมมาตรรอบแกนขนานกันไหลที่สภาวะการไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่งโดยแต่ละช่วงสภาวะเรย์โนลด์ แบบจำลองการไหลปั่นป่วน the Quadratic high-Re k-ε model จะทำนายผลในลักษณะแบบนี้ ในขณะที่แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบอื่นจะทำนายผลลู่เข้าสู่ความสมมาตรการไหลรอบแกนขนานกับทิศทางการไหลซึ่งเป็นการวิเคราะห์ที่มีความน่าเชื่อถือมากกว่า

6.2.5 เมื่อวิเคราะห์การไหลผ่านทรงกลมที่หมุนที่สภาวะเรย์โนลด์ที่สูง การวิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลองการไหลปั่นป่วน the Linear high-Re k-ε model และ the Quadratic high-Re k-ε model และ the Reynolds Stress Model โดยการพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตเลเยอร์การไหลด้วย the Standard Wall Function ยังส่งผลให้เกิดการทำนายปรากฏการณ์ได้สอดคล้องกับพฤติกรรมทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริงได้ ดังนั้นแบบจำลองการไหลปั่นป่วนดังกล่าวนี้มีสมรรถนะเพียงพอที่จะใช้ทำนายผลการไหลผ่านภายนอกผนังโค้งที่หมุนได้ดี โดยพิจารณาจากข้อมูลกายภาพและลักษณะตำแหน่งวิกฤติต่างๆของเลเยอร์การไหล

6.3 การพัฒนาต่อยอดงาน

จากการวิเคราะห์ผลการคำนวณของของไหลผ่านทรงกลมซึ่งเป็นรูปร่างที่ถือว่ามีความซับซ้อนมากเมื่อเทียบกับทรงกระบอกหรือทรงเหลี่ยมอื่นอันเนื่องจากขนาดภาพตัดขวางของพื้นที่ในแต่ระนาบของทรงกลมมีขนาดที่แตกต่างกันตามแต่ละหน้าตัด อีกทั้งความโค้งของผนังยังส่งผลต่อความแม่นยำของการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองการไหลมาก อย่างไรก็ตามงานวิจัยครั้งนี้ได้รับข้อมูลที่ดีมากทั้งในส่วนพฤติกรรมกายภาพและรายละเอียดแบบจำลองการไหลปั่นป่วนรวมถึงระเบียบวิธีทางตัวเลขที่เกี่ยวข้อง ซึ่งสามารถขยายผลสู่งานวิจัยด้านอากาศพลศาสตร์อื่นต่อไปได้ และสามารถการประเมินผลการไหลผ่านทรงกลมด้วยวิธีการการวิเคราะห์อากาศพลศาสตร์อื่นที่มีความแม่นตรงมากขึ้นแต่ใช้ทรัพยากรในการประมวลผลที่สูง เช่น the large eddy simulation method หรือการพิจารณาการไหลผ่านวัตถุหรือชิ้นส่วนผนังโค้งอื่นหรือชิ้นส่วนประกอบโดยใช้แบบจำลองการไหลปั่นป่วนในงานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์ให้ได้มาซึ่งข้อมูลที่สำคัญในการออกแบบหรือสอบเทียบเครื่องมือวัดหรือสร้างต้นแบบจริง ต่อไป