สารบัญ

บทคัดย่อ ii

Abstract iii

กิตติกรรมประกาศ iv

สารบัญ v

สารบัญตาราง viii

สารบัญรูปภาพ ix

นามานุกรม xiii

อักษรกรีก xiii

อักษรต่างประเทศ xv

คำย่อ xix

บทที่ 1 บทนำ

1.1 วัตถุประสงค์การวิจัย 4

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 5

บทที่ 2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลพื้นฐานการไหลผ่านวัตถุผิวโค้งในสภาวะหยุดนิ่ง 9

2.2 ปรากฏการณ์แมกนัส 12

2.3 ลักษณะขอบเขตเลเยอร์บนพื้นผิวโค้ง 15

2.4 การทดลองการไหลผ่านทรงกลม 20

บทที่ 3 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

3.1 โปรแกรมสำหรับวิเคราะห์ปัญหาของไหลพลศาสตร์ (Computational Fluid Dynamic Program) **29**

3.2 พื้นที่และรูปทรงการคำนวณ (Computational Domain and Geometry) **30**

3.3 รูปแบบการหาอนุพันธ์โดยผลต่างของปริมาตรคำนวณ (Discretization Scheme) **34**

3.4 รูปแบบการพาของไหล (Convection Scheme) **37**

3.5. วิธีทำซ้ำทางอ้อม (Indirect Iterative Method) **40**

3.6 การพิจารณาปริมาณขึ้นอยู่กับเวลา (Time Discretization) **44**

3.7 ความสัมพันธ์ควบคู่ระหว่างความดันและความเร็ว (Pressure Velocity Coupling) **46**

3.8 ตัวประกอบค่าผ่อนปรน (Under Relaxation Factor) **53**

3.9 เกณฑ์การลู่เข้าของคำตอบ (Convergence Criteria) **54**

3.10 สมบัติการไหล (Flow Properties) **55**

3.11 เงื่อนไขขอบการวิเคราะห์ (Boundary Conditions) **55**

3.12 บทสรุป (Concluding Remarks) **60**

บทที่ 4 แบบจำลองการไหลทั่วไปและปั่นป่วน

4.1 สมการ the basic eddy viscosity model **64**

4.2 แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบเชิงเส้น (the Linear high-Re k-ε Model) **65**

4.3 แบบจำลองการไหลปั่นป่วนแบบไม่เชิงเส้น (the Non-Linear high-Re k-ε Model) **66**

4.4 แบบจำลองความเค้นเรย์โนลด์ (the Reynolds Stress Model) **68**

4.5 สมการมาตรฐานการไหลใกล้ผนัง (the Standard (log-law-based) Wall Function) **71**

บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์และอภิปรายข้อมูล

5.1. แรงพลศาสตร์ที่กระทำกับทรงกลม **77**

5.2. สัมประสิทธิ์โมเมนต์ **108**

5.3 สัมประสิทธิ์ของแรงกระทำด้านข้าง **110**

5.4 องค์ประกอบย่อยของแรงกระทำพลศาสตร์ 113
5.5 การกระจายตัวของความดัน 118
5.6 แผนภาพการไหล 122
5.8. สรุป 132

บทที่ 6 บทสรุป
6.1. ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ 133
6.2 ข้อมูลทางแบบจำลองการไหลปั่นป่วน 135
6.3 การพัฒนาต่อยอดงาน 137

บรรณานุกรม 138

ภาคผนวก 143

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 จำนวนโหนดในแต่ละองค์ประกอบตลอดพื้นที่คำนวณ ในการวิเคราะห์ของไหลผ่านทรงกลม โดยแบบจำลอง Reynolds Stress Equation Model 33
ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์ของฟลักซ์การไหลที่โหนดรอบปริมาตรคำนวณที่พิจารณา 40
ตารางที่ 3.3 สัมประสิทธิ์การขนถ่ายโมเมนตัมและการฟุ้งกระจายตัวทุกทิศทางการไหล 40
ตารางที่ 3.4 ตัวประกอบค่าผ่อนปรนที่ใช้ในการศึกษาเชิงคำนวณของไหลผ่านทรงกลมในสภาวะหยุดนิ่ง 54

ตารางที่ 4.1 สัมประสิทธิ์ค่าคงที่สำหรับแบบจำลองประเภท High-Re turbulence model 66
ตารางที่ 4.2 แสดงถึงค่าคงตัวเพื่อใช้ในการปรับค่าใกล้ผนัง หรือควบคุมอัตราความสัมพันธ์ระหว่าง k และ ε ในช่วงการไหลแบบ anisotropic ของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเรย์โนลด์ 67

ตารางที่ 5.1 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่การไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่งในการวิเคราะห์ที่สภาวะเรย์โนลด์ 10,000 80
ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่การไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่งในการวิเคราะห์ที่สภาวะเรย์โนลด์ 70,026 86
ตารางที่ 5.3 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่การไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่งในการวิเคราะห์ที่สภาวะเรย์โนลด์ 96,000 95
ตารางที่ 5.4 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่การไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่งในการวิเคราะห์ที่สภาวะเรย์โนลด์ 134,000 100
ตารางที่ 5.5 สัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่การไหลผ่านทรงกลมหยุดนิ่งในการวิเคราะห์ที่สภาวะเรย์โนลด์ 583,000 105

สารบัญรูปภาพ

ภาพที่ 1.1 การประยุกต์ใช้เรือเหาะทรงกลม (spherical airship) (ก) ต้นแบบในห้องปฏิบัติการ ปี 1982 และ (ข) โมเดล Van Dusen LTA-20 (Donald McKelvy, 2009) 2

ภาพที่ 2.1 การทดลองของ Thom (1934) โดยพิจารณาอากาศไหลผ่านวัตถุทรง (ก) กระบอก (ข) กากบาท และ (ค) กระบอกประกอบแพนอากาศ และผลของสัมประสิทธิ์แรง (ง) ยก และ (จ) แรงต้าน ที่สภาวะเรย์โนลด์ 69,000 7

ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเลเยอร์การไหลผ่านผิวทรงกระบอกหยุดนิ่งในแต่ละช่วง (ก) $Re < 5$ (ข) $5 \leq Re < 40$ (ค) $40 \leq Re < 150$ (ง) $150 \leq Re < 300$ (จ) $300 \leq Re < 3\times10^5$ (ฉ) $3\times10^5 \leq Re < 3.5\times10^5$ และ (ช) $Re \geq 3.5\times10^5$ (Pijush & Ira, 2004) 10

ภาพที่ 2.3 การติดตั้งการทดลองของ Gustuv Magnus มุมมอง (ก) ด้านข้าง และ (ข) ด้านบน (Seifert, 2012) 13

ภาพที่ 2.4 ขอบเขตเลเยอร์รอบผิวโค้งทรงกระบอกขณะ (ก) หยุดนิ่ง และ (ข) หมุนที่อัตราหมุนไร้หน่วย 0.2 (Swanson, 1961) 17

ภาพที่ 2.5 แสดงขนาดเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์ของแรงเฉือนที่ผิว โดย (ก) ภาพฉายของทรงกระบอกแต่ละด้าน (ข) ที่สถานการณ์หยุดนิ่ง และ (ค) ที่อัตราการหมุนไร้หน่วยเป็น 1 ที่สภาวะเรย์โนลด์ 200 (Ruchayosyothin, 2019) 19

ภาพที่ 2.6 ผลของสภาวะเรย์โนลด์ต่อสัมประสิทธิ์แรงต้านของอากาศไหลผ่านทรงกลม (Achenbach, 1972) 20

ภาพที่ 2.7 แรงกระทำที่เกิดขึ้นในแต่ละแกนในระบบ 3 มิติ เมื่อวัตถุทรงกลมหมุนตัวรอบแกน z (Kim et al., 2013) 22

ภาพที่ 2.8 ผลการไหลใน 3 มิติ ส่งลักษณะ (ก) ขนาดของแรงทุกทิศทางเทียบกับเวลา และ (ข) ภาพ mean vorticity isosurface ที่สภาวะเรย์โนลด์ 5×10^4 และอัตราการหมุนไร้หน่วยที่ 0.15 (Norman et al., 2011) 23

ภาพที่ 2.9 สัมประสิทธิ์แรงต้านที่สภาวะเรย์โนลด์ที่ต่ำโดยการศึกษาเชิงคำนวณ (Johnson & Patel, 1999) 24

ภาพที่ 2.10 เส้นสายการไหลในระนาบ (ก) x-y (ข) x-z และ (ค) y-z เมื่อการไหลมีทิศทางขนานแกน x (Johnson & Patel, 1999) 24

ภาพที่ 2.11 ผลความแตกต่างของสัมประสิทธิ์แรงต้านส่งผลให้พฤติกรรมของขอบเขตการไหล (ก) ตำแหน่งการแยกตัว และ (ข) ขนาดของกระแสวนของเลเยอร์ ในแต่ละสภาวะเรย์โนลด์แตกต่างกัน 25

ภาพที่ 2.12 การวิเคราะห์การกระจายตัวรอบเส้นรอบวงของทรงกลมด้วยวิธี LES และ DES ที่สภาวะเรย์โนลด์ 10,000 (Constantinescu & Squires, 2003) 27

ภาพที่ 3.1 ระบบพิกัดทรงกลมในระบบ 3 มิติ 31
ภาพที่ 3.2 พื้นที่ขอบเขตการคำนวณของไหล (ก) โครงสร้างแน่นอนแบบ orthogonal mesh (ข) การปรับความละเอียดโครงสร้างใกล้ผนัง และ (ค) ขอบเขตการวิเคราะห์ทั่วทั้งโดเมน 34
ภาพที่ 3.3 ภาพตัดขวางปริมาตรคำนวณใน 1 มิติ 35
ภาพที่ 3.4 ขนาดของการขนถ่ายพลังงานการไหลระหว่างปริมาตรคำนวณที่ติดกัน (ก) มีเฉพาะการฟุ้งกระจายตัว โดยไร้การพา (Pe$\rightarrow$0) และ (ข) มีการพาและฟุ้งกระจายตัวเกิดขึ้น 37
ภาพที่ 3.5 ปริมาณฟลักซ์ของพื้นที่หน้าตัดการไหลเข้าและออกของปริมาตรคำนวณโดยรูปแบบ UPWIND difference scheme มีลักษณะ positive flow direction 39
ภาพที่ 3.6 ตำแหน่งของโหนดในการพิจารณาปัญหาการไหล (ก) ปริมาตรคำนวณ และ (ข) ระนาบ x-y 44
ภาพที่ 3.7 การกำหนดตำแหน่งความสัมพันธ์ควบคู่ระหว่างความดันและความเร็วในลักษณะ the collocated grid arrangement 46
ภาพที่ 3.8 การบันทึกความเร็วบนปริมาตรคำนวณแบบสับหว่างกัน (ก) ตำแหน่งบันทึกค่าความดันและความเร็ว และ (ข) ตำแหน่งบันทึกค่าความดัน 52
ภาพที่ 3.9 ปริมาตรวิเคราะห์ที่มีการระบุความดันคงที่ในการไหล (ก) 2 มิติ และ (ข) 3 มิติ 58
ภาพที่ 3.10 การกำหนดเงื่อนไข periodic boundary condition ที่บริเวณการไหลแบบอิสระห่างจากทรงกลม 60

ภาพที่ 5.1 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงยกที่สภาวะเรย์โนลด์ 10,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 78
ภาพที่ 5.2 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สภาวะเรย์โนลด์ 10,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 79
ภาพที่ 5.3 ผลการวิเคราะห์แรงพลศาสตร์ของของไหลผ่านวัตถุทรงกลมที่หมุน สัมประสิทธิ์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ที่สภาวะเรย์โนลด์ 10,000 83
ภาพที่ 5.4 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงยกที่สภาวะเรย์โนลด์ 70,026 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 84
ภาพที่ 5.5 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สภาวะเรย์โนลด์ 70,026 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 85
ภาพที่ 5.6 ผลการวิเคราะห์แรงพลศาสตร์ของของไหลผ่านวงกลมที่หมุนในการวิเคราะห์แบบ 2 มิติ สัมประสิทธิ์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ที่สภาวะเรย์โนลด์ 70,026 88
ภาพที่ 5.7 ผลการวิเคราะห์แรงพลศาสตร์ของของไหลผ่านวัตถุทรงกลมที่หมุน สัมประสิทธิ์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ที่สภาวะเรย์โนลด์ 70,026 90
ภาพที่ 5.8 สัมประสิทธิ์แรงลัพธ์ที่กระทำกับทรงกลมที่หมุน (ก) แรงลัพธ์ 2 มิติ ที่สภาวะเรย์โนลด์ 70,026 และ (ข) แรงลัพธ์ 3 มิติ ที่สภาวะเรย์โนลด์ 96,000 91
ภาพที่ 5.9 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงยกที่สภาวะเรย์โนลด์ 96,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 92

ภาพที่ 5.10 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สภาวะเรย์โนลด์ 96,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 94
ภาพที่ 5.11 ผลการวิเคราะห์แรงพลศาสตร์ของของไหลผ่านวัตถุทรงกลมที่หมุน สัมประสิทธิ์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ที่สภาวะเรย์โนลด์ 96,000 97
ภาพที่ 5.12 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงยกที่สภาวะเรย์โนลด์ 134,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 98
ภาพที่ 5.13 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สภาวะเรย์โนลด์ 134,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 99
ภาพที่ 5.14 ผลการวิเคราะห์แรงพลศาสตร์ของของไหลผ่านวัตถุทรงกลมที่หมุน สัมประสิทธิ์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ที่สภาวะเรย์โนลด์ 134,000 102
ภาพที่ 5.15 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงยกที่สภาวะเรย์โนลด์ 583,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 103
ภาพที่ 5.16 ค่าเวลาเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงต้านที่สภาวะเรย์โนลด์ 10,000 วิเคราะห์ผลโดยแบบจำลองสมการ the (ก) Navier-Stokes Equation และ (ข) Reynolds Stress Model 104
ภาพที่ 5.17 ผลการวิเคราะห์แรงพลศาสตร์ของของไหลผ่านวัตถุทรงกลมที่หมุน สัมประสิทธิ์ (ก) แรงยก และ (ข) แรงต้าน ที่สภาวะเรย์โนลด์ 583,000 107
ภาพที่ 5.18 สัมประสิทธิ์โมเมนต์รอบทรงกลมที่หมุนที่สภาวะเรย์โนลด์ (ก) 10,000 (ข) 70,026 (ค) 96,000 (ง) 134,000 และ (จ) 583,000 110
ภาพที่ 5.19 สัมประสิทธิ์ของแรงกระทำด้านข้าง ที่สภาวะเรยโนลด์ (ก) 96,000 (ข) 134,000 และ (ค) 583,000 และ (ง) เปรียบเทียบผลของสภาวะเรย์โนลด์ที่เกิดขึ้นโดยแบบจำลอง the Reynolds Stress Model 113
ภาพที่ 5.20 องค์ประกอบของแรงย่อยที่กระทำกับทรงกลมที่สภาวะเรย์โนลด์ 96,000 ด้วยแบบจำลอง (ก) the Linear high-Re k-ε model และ (ข) the Reynolds Stress Model และ สภาวะเรย์โนลด์ 134,000 ด้วยแบบจำลอง (ค) the Linear high-Re k-ε model และ (ง) the Reynolds Stress Model และ สภาวะเรย์โนลด์ 583,000 ด้วยแบบจำลอง (จ) the Linear high-Re k-ε model และ (ฉ) the Reynolds Stress Model 117
ภาพที่ 5.21 ผลของสภาวะเรย์โนลด์ต่อขนาดองค์ประกอบของแรงพลศาสตร์ 118
ภาพที่ 5.22 การกระจายตัวของความดันเฉลี่ยรอบระนาบกลางของทรงกลมที่หยุดนิ่งและหมุน 120
ภาพที่ 5.23 การกระจายตัวของความดันเฉลี่ยรอบระนาบกลางของทรงกลมที่หยุดนิ่งและหมุน 121
ภาพที่ 5.24 การกระจายตัวของความดันเฉลี่ยรอบระนาบกลางของทรงกลมที่หยุดนิ่งและหมุน 122
ภาพที่ 5.25 แผนภาพการไหล (ซ้าย) Q-criterion iso-surface of 5 (ขวา) ความเร็ว ที่สภาวะเรย์โนลด์ (ก) 96,000 (ข) 134,000 และ (ค) 583,000 ที่สภาวะทรงกลมหยุดนิ่ง และ α = 5 ด้วยแบบจำลอง RSM 126
ภาพที่ 5.26 มุมการมองภาพทรงกลม ในระนาบ (ก) ส่งเสริมความเร็วการไหล (top view) และ (ข) ยับยั้งความเร็วการไหล (bottom view) 128

ภาพที่ 5.27 เส้นแรงเฉือนผิวที่กระทำกับทรงกลมที่สภาวะหยุดนิ่งและหมุน ที่สภาวะเรย์โนลด์ (ก) 96,000 (ข) 134,000 และ (ค) 583,000 วิเคราะห์ผลด้วยแบบจำลอง the Reynolds Stresses Model 131