บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยเป็นการใช้แนวทางการหาค่าเหมาะสมสุดแบบมีประสิทธิภาพของภาพ ใหญ่ (Efficient Global Optimization: EGO) เพื่อออกแบบลักษณะของปีกเครื่องบินโดยใช้วิธีการ แก้ปัญหาด้วยระเบียบวิธีเซิงตัวเลขผ่านโปรแกรม Open Vehicle Sketch Pad (OpenVSP) ที่มี พื้นฐานการคำนวณมาจากวิธีแถบตาข่ายลมวน (Vortex lattice) สำหรับข้อมูลความแม่นยำต่ำ และ พลศาสตร์ของไหลเซิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics: CFD) ด้วยระเบียบวิธีเซิงตัวเลข ผ่านโปรแกรม ANSYS Fluent ที่มีพื้นฐานการคำนวณมาจากวิธี Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations สำหรับการเก็บข้อมูลความแม่นยำสูง หลังจากนั้นนำมาสร้างแบบจำลอง ลูกผสม (Hybrid surrogate model) เพื่อสร้างสมการความสัมพันธ์หรือฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามของข้อมูลความแม่นยำต่ำและข้อมูลความแม่นยำสูงเพื่อนำไปสู่การ ได้มาซึ่งรูปร่างเหมาะสมสุดของปีกเครื่องบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับที่มีประสิทธิภาพการบิน เหมาะสมที่สุด

3.1 ขั้นตอนการศึกษาวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งวิธีการดำเนินการศึกษาเพื่อเก็บข้อมูลผลการวิจัยออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของ ข้อมูลที่มีความแม่นยำต่ำและส่วนที่มีความแม่นยำสูง โดยมีความเกี่ยวข้องกันในด้านเงื่อนไขตัวแปร การออกแบบและวัตถุประสงค์การออกแบบ หรือกล่าวได้ว่าเป็นการออกแบบปีกเครื่องบินด้วย กระบวนการ Multi-Fidelity EGO โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 กระบวนการ Multi-Fidelity EGO

3.1.1 การกำหนดเงื่อนไขการออกแบบ (Determine Condition)

เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการออกแบบปีกเครื่องบินสำหรับการใช้ในการฝึกบินให้กับ นักบินมือใหม่ โดยอากาศยานที่ต้องการออกแบบนี้มีภารกิจการบินคือ การฝึกการบินและการควบคุม ให้คุ้นเคยกับสถานการณ์ต่างๆ ตั้งแต่เริ่มออกตัวจนถึงลงจอดอย่างปลอดภัย ดังนั้นการออกแบบครั้งนี้ เป็นการออกแบบเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการบินให้สูงขึ้นในแง่ของการประหยัดพลังงานและ ป้องกันการเสียหายจากการลงจอดจากเครื่องบินรุ่นต้นแบบที่เป็นอากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึง ที่ใช้แพนอากาศชนิด S8036 และมีลักษณะปีกเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้ากว้าง 28 เซนติเมตร ยาว 180 เซนติเมตร พื้นที่ปีกเท่ากับ 0.504 ตารางเมตร และไม่มีมุมบิดที่บริเวณปลายปีก แสดงดังรูปที่ 3.2 อากาศยานรุ่นนี้มีน้ำหนักอยู่ที่ 53.955 นิวตัน โดยถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในการฝึกบิน ดังนั้นเพื่อให้ เหมาะกับการฝึกบินมากขึ้นจึงกำหนดวัตถุประสงค์ของการออกแบบครั้งนี้เป็น 2 ประการ โดย วัตถุประสงค์ข้อที่ 1 คือ การลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน (drag coefficient: C_D) ให้เหลือน้อยที่สุด เมื่ออากาศยานอยู่ในสภาวะการบินระดับ (cruise condition) เพื่อเป็นการเพิ่มระยะเวลาการบินหรือ ช่วยลดการบริโภคพลังงานขณะบิน และวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 คือ การเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (lift coefficient: *C_L*) ให้มีค่ามากที่สุดเมื่ออากาศยานอยู่ในสภาวะการลงจอด (landing approach) เพื่อป้องกันการลดแรงกระแทกขณะลงจอดสำหรับนักบินฝึกหัด โดยสภาวะอากาศที่ใช้ในการ ออกแบบกำหนดให้อุณหภูมิอยู่ที่ 30℃ ความหนาแน่นของอากาศเท่ากับ 1.164 kg/m³ และค่าความ หนืดของอากาศเท่ากับ 1.872×10⁻⁵ kg/ms ซึ่งมีค่าเท่ากับสภาวะการบินจริง



รูปที่ 3.2 อากาศยานไร้คนขับประเภทปีกตรึงรุ่นต้นแบบ

3.1.1.1 เงื่อนไขการบินระดับสำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1

การลดค่าสัมประสิทธิ์แรงต้านให้น้อยที่สุดจะพิจารณาการไหลของอากาศ ผ่านอากาศยานขณะที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 18 เมตรต่อวินาที โดยมุมปะทะ (Angle of Attack, AoA) ถูกกำหนดให้เป็นมุมที่สามารถสร้างแรงยกได้เพียงพอสำหรับการสมดุลกับน้ำหนักของอากาศ ยานก่อนการออกแบบปีก เนื่องจากในช่วงการบินระดับที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความสูง แรงยกและ น้ำหนักของอากาศยานจะมีค่าเท่ากัน ดังสมาการที่ (3.1) และสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงยกที่ สามารถทำให้แรงยกมีค่าเท่ากับน้ำหนักได้จากสมการที่ (3.2)

$$Lift = Weight \tag{3.1}$$

$$\left(\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^{2}\right) \times S \times C_{L} = Weight$$
(3.2)

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวมาเพื่อคำนวณหาสัมประสิทธิ์แรงยกจะได้ดังสมการที่ (3.3)

$$\left(\frac{1}{2} \times 1.164 \times 18^2\right) \times 0.504 \times C_L = 53.955, \rightarrow C_L = 0.56772$$
 (3.3)

ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่ทำให้อากาศยานอยู่ในสภาบินระดับได้จะ

เท่ากับ 0.56772 ซึ่งการไหลนี้มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) เท่ากับ 1.4886×10⁶ การวัดประสิทธิภาพของปีกสำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 1 โดยปกติแล้ว

ส่วนมากจะทำการพิจารณาค่าแรงยกที่สามารถทำได้ต่อแรงต้านที่เกิดขึ้น (lift to drag ratio, L/D) แต่สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้มีการออกแบบโดยเปรียบเทียบปีกที่สามารถสร้างแรงยกได้เท่ากัน ดังนั้น ตัววัดประสิทธิภาพของวัตถุประสงค์การออกแบบข้อที่ 1 จะทำโดยการพิจารณาถึงแรงต้านอากาศที่ เกิดขึ้นหรือสัมประสิทธิ์แรงต้านของปีก ($C_{D,objl}$) ในสภาวะการบินระดับ

3.1.1.2 เงื่อนไขการบินระดับสำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2

เนื่องจากการออกแบบครั้งนี้เป็นการออกแบบอากาศยานไร้คนขับสำหรับ การฝึกบิน ดังนั้นการลงจอดควรสามารถทำได้ง่ายเพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายจากการลงจอด ประสิทธิภาพการลงจอดจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะช่วยยืดอายุการใช้งานของอากาศยานได้ นอกจากนี้การ ลดระยะของการลงจอดหรือระยะรันเวย์ที่ใช้ในการลงจอดก็จะสามารถทำให้เลือกพื้นที่การลงจอดได้ ง่ายขึ้นอีกด้วย โดยสมาการของระยะการลงจอดสามารถหาได้จากสมการที่ (3.4)

$$S_G = \frac{V_T^2}{2g\left(\mu_R - \frac{C_D}{C_L}\right)}$$
(3.4)

เมื่อ V_T คือ ความเร็วขณะอากาศยานสัมผัสพื้น (touchdown velocity)

g คือ แรงโน้มถ่วง (gravitational acceleration)

 $\mu_{\scriptscriptstyle R}$ คือ สัมประสิทธิ์แรงต้านทานของพื้น (runway friction coefficient)

โดยประสิทธิภาพของอากาศยานที่สามารถปรับปรุงได้มี 2 ตัวแปร คือ สัมประสิทธิ์แรงต้าน (C_D) ที่ช่วยลดความเร็วขณะลงจอดและสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) ที่ช่วยให้ อากาศยานสามารถรักษาระดับความสูงได้ที่ความเร็วที่ต่ำ ช่วยให้เครื่องบินเข้าสู่รันเวย์ด้วยความเร็ว ต่ำได้และลงจอดอย่างปลอดภัย ด้วยเหตุผลที่กล่าวมานั้นการออกแบบครั้งนี้จึงทำการเลือกการ ปรับปรุงค่าสัมประสิทธิ์แรงยกให้มากขึ้นขณะลงจอด โดยมีค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (C_L) เป็นตัววัด ประสิทธิภาพของปีกสำหรับวัตถุประสงค์ข้อที่ 2 ซึ่งจะพิจารณาภายใต้สภาวะการบินที่อากาศยานมี ความเร็ว 8 เมตรต่อวินาที และมีมุมปะทะเท่ากับ 11.3 องศา ซึ่งมีค่าตัวเลขเรย์โนลด์เท่ากับ 6.6159×10^5

3.1.1.3 ตัวแปรการออกแบบ (Design Variables)

งานวิจัยนี้เลือกใช้แพนอากาศชนิด NACA รุ่น 6 หลัก แทนการใช้แพน อากาศรุ่น S8036 ที่เป็นแพนอากาศของปีกต้นแบบเนื่องจากต้องการคุณสมบัติพิเศษของแพนอากาศ ชนิด NACA รุ่น 6 หลักที่มีลักษณะเป็นรักษาค่าแรงต้านเมื่อแรงยกเปลี่ยนแปลงและเพื่อให้ง่ายต่อ อิสระของความหนาของแพนอากาศ โดยตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบอากาศยานไร้คนขับประเภทปีก ตรึง (Fixed-Wing UAV) ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย: ความหนาของแพนอากาศ (thickness-tochord of airfoil, t/c), อัตราส่วนเรียวของปีกเครื่องบิน (taper ratio, λ) และมุมบิดของปีก เครื่องบิน (twist angle, θ) ซึ่งขอบเขตของตัวแปรการออกแบบเหล่านี้แสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขอบเขตของตัวแปรการออกแบบ

| ตัวแปรการออกแบบ | ขอบเขตการออกแบบ |
|---|-----------------|
| ความหนาของแพนอากาศ, t/c | 0.08 ถึง 0.24 |
| อัตราส่วนเรียวของปีกเครื่องบิน, λ | 0.3 ถึง 1 |
| มุมบิดของปีกเครื่องบิน, $	heta(^\circ)$ | -3 ถึง 3 |

จากการกำหนดเงื่อนไขการออกแบบดังกล่าว สามารถเขียนเป็นสมการ

สำหรับการหาค่าเหมาะสมสุดได้ดังสมการที่ (3.5) และ (3.6)

$$\min: f_1(t/c, \lambda, \theta) = C_D \quad at \quad V = 18 \, m/s \,, \, \text{Re} = 1.4886 \times 10^6 \\ and \ C_L = 0.56772$$
(3.5)

$$max: f_2(t/c, \lambda, \theta) = C_L \quad at \quad V = 8 \, m/s, \text{Re} = 6.6159 \times 10^5$$

and $\alpha = 11.3^\circ$ (3.6)

3.1.2 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

การออกแบบการทดลองถูกดำเนินการแบ่งออกแบบสำหรับแบบจำลองความ แม่นยำต่ำ (Low-Fidelity Model, LF) จำนวน 100 ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.2 และแบบจำลอง ความแม่นยำสูง (High-Fidelity Model, HF) จำนวน 20 ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 3.3 โดยใช้วิธีการ สุ่มแบบ Latin Hypercube Sampling (LHS) เพื่อสร้างจุดตัวอย่างเริ่มต้นอย่างมีประสิทธิภาพ

| แบบจำลอง | | | | แบบจำลอง | | | | แบบจำลอง | | | |
|---------------|--------|--------|---------|---------------|--------|--------|---------|---------------|--------|--------|---------|
| ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | heta |
| ลำดับที่ | | | | ลำดับที่ | | | | ลำดับที่ | | | |
| 1 | 0.1518 | 0.5403 | -0.2903 | 16 | 0.0812 | 0.9478 | 0.4397 | 31 | 0.2255 | 0.4316 | -2.3227 |
| 2 | 0.1500 | 0.7450 | 0.8649 | 17 | 0.0960 | 0.6669 | 1.4057 | 32 | 0.1385 | 0.7806 | -1.2523 |
| 3 | 0.2143 | 0.9601 | 1.9831 | 18 | 0.2365 | 0.7012 | -0.9102 | 33 | 0.0893 | 0.4335 | 0.7603 |
| 4 | 0.1305 | 0.8232 | 0.1763 | 19 | 0.1774 | 0.3790 | 2.2711 | 34 | 0.1280 | 0.9203 | -0.3990 |
| 5 | 0.1452 | 0.6149 | -1.8951 | 20 | 0.1116 | 0.9395 | 1.6514 | 35 | 0.1937 | 0.8441 | -2.8185 |
| 6 | 0.2331 | 0.8003 | -0.4971 | 21 | 0.1405 | 0.5889 | -1.4945 | 36 | 0.2009 | 0.5089 | -1.7446 |
| 7 | 0.0857 | 0.5570 | -0.8897 | 22 | 0.1006 | 0.4024 | -0.4531 | 37 | 0.1569 | 0.6262 | 2.1848 |
| 8 | 0.2350 | 0.9724 | 2.9285 | 23 | 0.1142 | 0.9329 | -1.2620 | 38 | 0.1860 | 0.7664 | -2.9048 |
| 9 | 0.1064 | 0.9867 | 0.9934 | 24 | 0.1122 | 0.8102 | 1.9168 | 39 | 0.2208 | 0.8661 | 2.4415 |
| 10 | 0.1797 | 0.8783 | 1.4764 | 25 | 0.1249 | 0.8876 | 1.6917 | 40 | 0.0901 | 0.7100 | -2.5958 |
| 11 | 0.1676 | 0.5028 | 1.5704 | 26 | 0.1052 | 0.4401 | -0.8071 | 41 | 0.1221 | 0.6914 | 1.1545 |
| 12 | 0.1843 | 0.5963 | -1.5406 | 27 | 0.1288 | 0.7530 | 1.3570 | 42 | 0.0870 | 0.4707 | -0.3597 |
| 13 | 0.1327 | 0.4131 | -0.0125 | 28 | 0.0986 | 0.7368 | 2.8326 | 43 | 0.1079 | 0.6079 | -1.8112 |
| 14 | 0.1722 | 0.8112 | 0.3409 | 29 | 0.2184 | 0.3563 | 1.9581 | 44 | 0.1901 | 0.7720 | 0.4931 |
| 15 | 0.2064 | 0.8946 | -1.9880 | 30 | 0.0972 | 0.5507 | 1.5281 | 45 | 0.1908 | 0.8965 | -2.1718 |

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลตัวอย่างการออกแบบเริ่มต้นของแบบจำลองความแม่นยำต่ำ

| แบบจำลอง | | | | แบบจำลอง | | | | แบบจำลอง | | | |
|---------------|--------|--------|----------|---------------|--------|--------|----------|---------------|--------|--------|----------|
| ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ |
| ลำดับที่ | | | | ลำดับที่ | | | | ลำดับที่ | | | |
| 46 | 0.2156 | 0.7884 | 1.2005 | 61 | 0.1527 | 0.6317 | -2.1458 | 76 | 0.1185 | 0.3748 | -0.0935 |
| 47 | 0.1658 | 0.3109 | 0.7919 | 62 | 0.1749 | 0.7298 | 0.3865 | 77 | 0.2035 | 0.7234 | -1.9654 |
| 48 | 0.0914 | 0.7580 | -2.7255 | 63 | 0.1245 | 0.9708 | -2.9510 | 78 | 0.2212 | 0.8736 | 2.7003 |
| 49 | 0.2226 | 0.5866 | -2.6837 | 64 | 0.1035 | 0.7964 | 1.8301 | 79 | 0.1709 | 0.9809 | 0.6623 |
| 50 | 0.2026 | 0.5765 | -2.0699 | 65 | 0.1485 | 0.5362 | 2.3689 | 80 | 0.2170 | 0.6811 | -0.6921 |
| 51 | 0.1179 | 0.3515 | -2.8685 | 66 | 0.1339 | 0.8540 | 2.6403 | 81 | 0.2317 | 0.9963 | 2.7622 |
| 52 | 0.1558 | 0.8305 | -0.7414 | 67 | 0.1994 | 0.3636 | 2.9487 | 82 | 0.1600 | 0.6582 | 1.0731 |
| 53 | 0.2385 | 0.4621 | 2.0956 | 68 | 0.1975 | 0.3161 | -0.2377 | 83 | 0.1931 | 0.6370 | -0.5431 |
| 54 | 0.1873 | 0.4052 | 0.9245 | 69 | 0.1839 | 0.3369 | -1.6607 | 84 | 0.1637 | 0.4765 | 2.3217 |
| 55 | 0.2087 | 0.4831 | 0.0654 | 70 | 0.1015 | 0.3894 | -2.4242 | 85 | 0.0838 | 0.5638 | 0.2052 |
| 56 | 0.1419 | 0.4925 | 2.5084 | 71 | 0.0828 | 0.4570 | -0.1761 | 86 | 0.1431 | 0.6188 | 0.2681 |
| 57 | 0.1458 | 0.6550 | -2.4859 | 72 | 0.1612 | 0.4483 | 0.6312 | 87 | 0.1737 | 0.3297 | 1.2659 |
| 58 | 0.1625 | 0.6728 | 2.5951 | 73 | 0.1212 | 0.3042 | 1.7861 | 88 | 0.1547 | 0.9152 | -1.3524 |
| 59 | 0.1154 | 0.5223 | -2.3424 | 74 | 0.2302 | 0.6431 | -2.5438 | 89 | 0.1352 | 0.3272 | -1.7059 |
| 60 | 0.1967 | 0.5243 | 0.0032 | 75 | 0.2369 | 0.3484 | 1.0977 | 90 | 0.2276 | 0.5711 | 0.5674 |

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลตัวอย่างการออกแบบเริ่มต้นของแบบจำลองความแม่นยำต่ำ (ต่อ)

| แบบจำลอง | | | |
|---------------|--------|--------|---------|
| ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ |
| ลำดับที่ | | | |
| 91 | 0.2068 | 0.8493 | 2.5373 |
| 92 | 0.2103 | 0.5102 | -0.9610 |
| 93 | 0.1364 | 0.7150 | -2.2681 |
| 94 | 0.1686 | 0.8368 | -0.6086 |
| 95 | 0.2126 | 0.9070 | -1.5887 |
| 96 | 0.2264 | 0.9520 | -1.0954 |
| 97 | 0.1818 | 0.3916 | 2.1379 |
| 98 | 0.1103 | 0.4215 | -1.0597 |
| 99 | 0.1790 | 0.9282 | -1.1502 |
| 100 | 0.0941 | 0.6984 | -1.3967 |

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลตัวอย่างการออกแบบเริ่มต้นของแบบจำลองความแม่นยำต่ำ (ต่อ)

| แบบจำลอง ความแม่นยำสูง ลำดับที่ | t/c | λ | θ | แบบจำลอง ความแม่นยำสูง ลำดับที่ | t/c | λ | θ |
|---------------------------------------|--------|--------|---------|---------------------------------------|--------|--------|---------|
| 1 | 0.1732 | 0.7262 | -1.3543 | 11 | 0.1381 | 0.6923 | 1.0398 |
| 2 | 0.1988 | 0.6350 | -1.1653 | 12 | 0.1808 | 0.8268 | -2.7270 |
| 3 | 0.1633 | 0.8989 | -1.9764 | 13 | 0.2105 | 0.6735 | -0.0335 |
| 4 | 0.2379 | 0.4963 | 1.7536 | 14 | 0.1144 | 0.8715 | 0.2591 |
| 5 | 0.0956 | 0.5181 | 0.5400 | 15 | 0.1885 | 0.5996 | 2.1964 |
| 6 | 0.2020 | 0.4261 | 1.9779 | 16 | 0.1278 | 0.9708 | -0.7486 |
| 7 | 0.1021 | 0.9367 | 2.4754 | 17 | 0.2294 | 0.4481 | -1.5569 |
| 8 | 0.0906 | 0.7881 | 2.1516 | 18 | 0.2206 | 0.3641 | 0.7515 |
| 9 | 0.1465 | 0.5668 | -2.3370 | 19 | 0.1098 | 0.3748 | 1.4557 |
| 10 | 0.1331 | 0.7824 | -2.4956 | 20 | 0.1584 | 0.3004 | -0.3165 |

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลตัวอย่างการออกแบบเริ่มต้นของแบบจำลองความแม่นยำสูง

3.1.3 การประมาณค่าประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์

3.1.3.1 กระบวนการข้อมูลความแม่นยำต่ำ (Low-Fidelity Process)

การวิเคราะห์แบบจำลองความแม่นยำต่ำดำเนินการผ่านวิธี Vortex Lattice Method (VLM) โดยใช้โปรแกรม OpenVSP แสดงในรูปที่ 3.3 ซึ่งสามารถประมาณค่า ประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์เบื้องต้นได้อย่างรวดเร็ว การประมาณค่าประสิทธิภาพในระดับ ความแม่นยำต่ำดำเนินการภายใต้ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number: Re) สองค่า ซึ่งสะท้อนถึง สภาวะอากาศพลศาสตร์ที่แตกต่างกันตามวัตถุประสงค์การออกแบบ สำหรับเงื่อนไขการบินระดับ (Cruise Condition) ค่า Re ถูกกำหนดไว้ที่ 1.4886×10⁶ ซึ่งสอดคล้องกับสภาพการบินในความเร็ว ระดับ สำหรับช่วงการลงจอด (Final Approach) ค่า Re ถูกกำหนดไว้ที่ 6.6159×10⁵ ซึ่งสะท้อนถึง สภาพการบินที่มีความเร็วต่ำในช่วงก่อนลงจอด



รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม OpenVSP สำหรับการประมาณค่าประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์

ในด้านการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) การประมาณค่า ประสิทธิภาพในระดับความแม่นยำต่ำถูกเปรียบเทียบกับต้นแบบอากาศยานตั้งต้นซึ่งเป็นปีก สี่เหลี่ยมผืนผ้าโดยใช้แพนอากาศ S8036 และไม่มีมุมบิด (Twist) โดยพื้นที่ปีกและน้ำหนักถูก กำหนดให้เท่ากับการออกแบบใหม่ที่ 0.504 ตารางเมตร และ 53.955 นิวตันตามลำดับ ผลการจำลอง ในระดับความแม่นยำต่ำได้ค่าแรงยกสัมประสิทธิ์ (*C*_L) เท่ากับ 0.637394 ซึ่งมีความแตกต่างจาก ข้อมูลการบินทดสอบจริงอยู่ที่ 12.3% แม้จะมีความคลาดเคลื่อนในด้านความแม่นยำ แต่ข้อได้เปรียบ สำคัญของกระบวนการนี้คือความรวดเร็ว

จากการเก็บข้อมูลความแม่นยำต่ำสามารถแสดงค่าประสิทธิภาพทาง อากาศพลศาสตร์ในด้านของสัมประสิทธิ์แรงต้านสำหรับวัตถุประสงค์การออกแบบที่ 1 (*C_{D,obj1}*) และ สัมประสิทธิ์แรงยกสำหรับวัตถุประสงค์การออกแบบที่ 2 (*C_{L,obj2}*) ได้ดังตารางที่ 3.4

| แบบจำลอง | | | | | | แบบจำลอง | | | | | |
|---------------|--------|--------|---------|--------------|--------------|---------------|--------|--------|---------|--------------|--------------|
| ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | heta | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ | ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | heta | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ |
| ลำดับที่ | | | | | | ลำดับที่ | | | | | |
| 1 | 0.1518 | 0.5403 | -0.2903 | 0.0267 | 1.0937 | 16 | 0.0812 | 0.9478 | 0.4397 | 0.0267 | 1.1160 |
| 2 | 0.1500 | 0.7450 | 0.8649 | 0.0266 | 1.1329 | 17 | 0.0960 | 0.6669 | 1.4057 | 0.0266 | 1.1494 |
| 3 | 0.2143 | 0.9601 | 1.9831 | 0.0268 | 1.1752 | 18 | 0.2365 | 0.7012 | -0.9102 | 0.0268 | 1.0726 |
| 4 | 0.1305 | 0.8232 | 0.1763 | 0.0267 | 1.1081 | 19 | 0.1774 | 0.3790 | 2.2711 | 0.0266 | 1.1497 |
| 5 | 0.1452 | 0.6149 | -1.8951 | 0.0270 | 1.0432 | 20 | 0.1116 | 0.9395 | 1.6514 | 0.0267 | 1.1623 |
| 6 | 0.2331 | 0.8003 | -0.4971 | 0.0267 | 1.0841 | 21 | 0.1405 | 0.5889 | -1.4945 | 0.0269 | 1.0568 |
| 7 | 0.0857 | 0.5570 | -0.8897 | 0.0268 | 1.0759 | 22 | 0.1006 | 0.4024 | -0.4531 | 0.0268 | 1.0860 |
| 8 | 0.2350 | 0.9724 | 2.9285 | 0.0269 | 1.2109 | 23 | 0.1142 | 0.9329 | -1.2620 | 0.0269 | 1.0510 |
| 9 | 0.1064 | 0.9867 | 0.9934 | 0.0267 | 1.1365 | 24 | 0.1122 | 0.8102 | 1.9168 | 0.0267 | 1.1704 |
| 10 | 0.1797 | 0.8783 | 1.4764 | 0.0266 | 1.1554 | 25 | 0.1249 | 0.8876 | 1.6917 | 0.0267 | 1.1634 |
| 11 | 0.1676 | 0.5028 | 1.5704 | 0.0266 | 1.1456 | 26 | 0.1052 | 0.4401 | -0.8071 | 0.0268 | 1.0780 |
| 12 | 0.1843 | 0.5963 | -1.5406 | 0.0269 | 1.0551 | 27 | 0.1288 | 0.7530 | 1.3570 | 0.0266 | 1.1500 |
| 13 | 0.1327 | 0.4131 | -0.0125 | 0.0268 | 1.0975 | 28 | 0.0986 | 0.7368 | 2.8326 | 0.0268 | 1.1999 |
| 14 | 0.1722 | 0.8112 | 0.3409 | 0.0267 | 1.1140 | 29 | 0.2184 | 0.3563 | 1.9581 | 0.0267 | 1.1389 |
| 15 | 0.2064 | 0.8946 | -1.9880 | 0.0271 | 1.0252 | 30 | 0.0972 | 0.5507 | 1.5281 | 0.0266 | 1.1478 |

ตารางที่ 3.4 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองความแม่นยำต่ำ

| แบบจำลอง | | | | | | แบบจำลอง | | | | | |
|---------------|--------|--------|----------|--------------|--------------|---------------|--------|--------|----------|--------------|--------------|
| ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ | ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ |
| ลำดับที่ | | | | | | ลำดับที่ | | | | | |
| 31 | 0.2255 | 0.4316 | -2.3227 | 0.0272 | 1.0383 | 46 | 0.2156 | 0.7884 | 1.2005 | 0.0266 | 1.1446 |
| 32 | 0.1385 | 0.7806 | -1.2523 | 0.0268 | 1.0575 | 47 | 0.1658 | 0.3109 | 0.7919 | 0.0268 | 1.1066 |
| 33 | 0.0893 | 0.4335 | 0.7603 | 0.0267 | 1.1186 | 48 | 0.0914 | 0.7580 | -2.7255 | 0.0273 | 1.0064 |
| 34 | 0.1280 | 0.9203 | -0.3990 | 0.0268 | 1.0845 | 49 | 0.2226 | 0.5866 | -2.6837 | 0.0273 | 1.0198 |
| 35 | 0.1937 | 0.8441 | -2.8185 | 0.0273 | 0.9972 | 50 | 0.2026 | 0.5765 | -2.0699 | 0.0271 | 1.0394 |
| 36 | 0.2009 | 0.5089 | -1.7446 | 0.0270 | 1.0516 | 51 | 0.1179 | 0.3515 | -2.8685 | 0.0274 | 1.0278 |
| 37 | 0.1569 | 0.6262 | 2.1848 | 0.0266 | 1.1726 | 52 | 0.1558 | 0.8305 | -0.7414 | 0.0268 | 1.0745 |
| 38 | 0.1860 | 0.7664 | -2.9048 | 0.0273 | 0.9994 | 53 | 0.2385 | 0.4621 | 2.0956 | 0.0266 | 1.1562 |
| 39 | 0.2208 | 0.8661 | 2.4415 | 0.0268 | 1.3942 | 54 | 0.1873 | 0.4052 | 0.9245 | 0.0267 | 1.1204 |
| 40 | 0.0901 | 0.7100 | -2.5958 | 0.0272 | 1.0147 | 55 | 0.2087 | 0.4831 | 0.0654 | 0.0267 | 1.1025 |
| 41 | 0.1221 | 0.6914 | 1.1545 | 0.0266 | 1.1419 | 56 | 0.1419 | 0.4925 | 2.5084 | 0.0266 | 1.1708 |
| 42 | 0.0870 | 0.4707 | -0.3597 | 0.0268 | 1.0906 | 57 | 0.1458 | 0.6550 | -2.4859 | 0.0272 | 1.0219 |
| 43 | 0.1079 | 0.6079 | -1.8112 | 0.0270 | 1.0461 | 58 | 0.1625 | 0.6728 | 2.5951 | 0.0267 | 1.1885 |
| 44 | 0.1901 | 0.7720 | 0.4931 | 0.0267 | 1.1195 | 59 | 0.1154 | 0.5223 | -2.3424 | 0.0272 | 1.0336 |
| 45 | 0.1908 | 0.8965 | -2.1718 | 0.0271 | 1.0181 | 60 | 0.1967 | 0.5243 | 0.0032 | 0.0267 | 1.1020 |

ตารางที่ 3.4 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองความแม่นยำต่ำ (ต่อ)

| แบบจำลอง | | | | | | แบบจำลอง | | | | | |
|---------------|--------|--------|----------|--------------|--------------|---------------|--------|--------|----------|--------------|--------------|
| ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ | ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ |
| ลำดับที่ | | | | | | ลำดับที่ | | | | | |
| 61 | 0.1527 | 0.6317 | -2.1458 | 0.0271 | 1.0344 | 76 | 0.1185 | 0.3748 | -0.0935 | 0.0268 | 1.0931 |
| 62 | 0.1749 | 0.7298 | 0.3865 | 0.0267 | 1.1164 | 77 | 0.2035 | 0.7234 | -1.9654 | 0.0270 | 1.0356 |
| 63 | 0.1245 | 0.9708 | -2.9510 | 0.0273 | 0.9825 | 78 | 0.2212 | 0.8736 | 2.7003 | 0.0268 | 1.2004 |
| 64 | 0.1035 | 0.7964 | 1.8301 | 0.0266 | 1.1671 | 79 | 0.1709 | 0.9809 | 0.6623 | 0.0267 | 1.1237 |
| 65 | 0.1485 | 0.5362 | 2.3689 | 0.0266 | 1.1712 | 80 | 0.2170 | 0.6811 | -0.6921 | 0.0268 | 1.0804 |
| 66 | 0.1339 | 0.8540 | 2.6403 | 0.0266 | 1.1791 | 81 | 0.2317 | 0.9963 | 2.7622 | 0.0269 | 1.2049 |
| 67 | 0.1994 | 0.3636 | 2.9487 | 0.0266 | 1.1628 | 82 | 0.1600 | 0.6582 | 1.0731 | 0.0266 | 1.1384 |
| 68 | 0.1975 | 0.3161 | -0.2377 | 0.0269 | 1.0855 | 83 | 0.1931 | 0.6370 | -0.5431 | 0.0267 | 1.0860 |
| 69 | 0.1839 | 0.3369 | -1.6607 | 0.0271 | 1.0554 | 84 | 0.1637 | 0.4765 | 2.3217 | 0.0266 | 1.3084 |
| 70 | 0.1015 | 0.3894 | -2.4242 | 0.0272 | 1.0370 | 85 | 0.0838 | 0.5638 | 0.2052 | 0.0267 | 1.1089 |
| 71 | 0.0828 | 0.4570 | -0.1761 | 0.0268 | 1.0952 | 86 | 0.1431 | 0.6188 | 0.2681 | 0.0267 | 1.1118 |
| 72 | 0.1612 | 0.4483 | 0.6312 | 0.0267 | 1.1163 | 87 | 0.1737 | 0.3297 | 1.2659 | 0.0268 | 1.1194 |
| 73 | 0.1212 | 0.3042 | 1.7861 | 0.0267 | 1.1262 | 88 | 0.1547 | 0.9152 | -1.3524 | 0.0269 | 1.0483 |
| 74 | 0.2302 | 0.6431 | -2.5438 | 0.0272 | 1.0208 | 89 | 0.1352 | 0.3272 | -1.7059 | 0.0271 | 1.0543 |
| 75 | 0.2369 | 0.3484 | 1.0977 | 0.0267 | 1.1182 | 90 | 0.2276 | 0.5711 | 0.5674 | 0.0267 | 1.1201 |

ตารางที่ 3.4 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองความแม่นยำต่ำ (ต่อ)

| แบบจำลอง | | | | | |
|---------------|--------|--------|----------|--------------|--------------|
| ความแม่นยำต่ำ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ |
| ลำดับที่ | | | | | |
| 91 | 0.2068 | 0.8493 | 2.5373 | 0.0268 | 1.1938 |
| 92 | 0.2103 | 0.5102 | -0.9610 | 0.0268 | 1.0741 |
| 93 | 0.1364 | 0.7150 | -2.2681 | 0.0271 | 1.0256 |
| 94 | 0.1686 | 0.8368 | -0.6086 | 0.0268 | 1.0792 |
| 95 | 0.2126 | 0.9070 | -1.5887 | 0.0270 | 1.0397 |
| 96 | 0.2264 | 0.9520 | -1.0954 | 0.0268 | 1.0567 |
| 97 | 0.1818 | 0.3916 | 2.1379 | 0.0266 | 1.1485 |
| 98 | 0.1103 | 0.4215 | -1.0597 | 0.0269 | 1.0711 |
| 99 | 0.1790 | 0.9282 | -1.1502 | 0.0268 | 1.0555 |
| 100 | 0.0941 | 0.6984 | -1.3967 | 0.0268 | 1.0562 |

ตารางที่ 3.4 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองความแม่นยำต่ำ (ต่อ)

3.1.3.2 กระบวนการข้อมูลความแม่นยำสูง (High-Fidelity Process)

การวิเคราะห์แบบจำลองความแม่นยำสูงดำเนินการผ่านสมการ Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent R1 2023 เพื่อ ประเมินผลอย่างละเอียดและแม่นยำ โดยการศึกษาครั้งนี้ใช้โดเมนอากาศรูปหัวกระสุนในการคำนวณ ลักษณะการไหลของอากาศผ่านอากาศยานแบบสมมาตร โดยรัศมีของโดเมนการไหลถูกกำหนดให้มี ค่าเท่ากับ 20 เท่าของความยาวลำตัวเครื่องบิน ในขณะที่ความยาวด้านหลังถูกกำหนดเป็น 40 เท่า ของความยาวลำตัว แสดงดังภาพที่ 3.4





การศึกษาผลความละเอียดของโครงข่ายองค์ประกอบย่อย (Mesh Independence) การศึกษาครั้งนี้ได้ทำการแบ่งองค์ประกอบย่อยจำนวน 6 ระดับตามตารางที่ 3.5 โดยโครงข่ายละเอียดที่สุดมี 12.7 ล้านเอลิเมนท์ เพื่อเปรียบเทียบกับโครงข่ายระดับอื่นๆ ความ แตกต่างของค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านอยู่ในระดับต่ำกว่า 10% ยกเว้นกรณีที่ใช้ โครงข่ายขนาด 2.6 ล้านเอลิเมนท์ ระยะเวลาที่ใช้สำหรับการคำนวณประสิทธิภาพทางอากาศ พลศาสตร์ของข้อมูลระดับความแม่นยำต่ำแต่ละครั้งใช้เวลาเพียง 5 นาทีต่อ 1 ข้อมูลการออกแบบ โดยความรวดเร็วนี้สามารถทำให้สำรวจความแตกต่างของรูปทรงปีกต่างๆ ได้อย่างรวดเร็วซึ่งเป็น ปัจจัยสำคัญในกระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพ (Optimization Process)

| จำนวนเอลิเมนท์ | C_{L} | C_D | % diff C_L | % diff C_D |
|----------------|---------|--------|--------------|--------------|
| 2,683,495 | 0.5656 | 0.0670 | 0.3461 | 10.2290 |
| 3,376,733 | 0.5671 | 0.0657 | 0.0894 | 7.9864 |
| 4,348,308 | 0.5682 | 0.0646 | 0.1129 | 6.1526 |
| 5,740,141 | 0.5680 | 0.0632 | 0.0814 | 3.9798 |
| 8,303,672 | 0.5680 | 0.0620 | 0.0796 | 1.9695 |
| 12,712,338 | 0.5676 | 0.0608 | - | - |

ตารางที่ 3.5 การศึกษาจำนวนของการแบ่งองค์ประกอบย่อย

จากการศึกษาพบว่า โครงข่ายขนาด 4.3 ล้านเอลิเมนท์ แสดงในรูปที่ 3.5

มีความเพียงพอในการคำนวณทั้งในด้านของเวลาที่ใช้คำนวณและความแม่นยำของผลการคำนวณ โดยมีความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 7% และเมื่อนำผลการจำลองมาเปรียบเทียบกับผลข้อมูลการบินจริง ของอากาศยานตั้งต้นพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ต่างกันน้อยกว่า 0.1% ซึ่งแสดงถึงความน่าเชื่อถือของ แบบจำลองนี้ ดังตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.5 ลักษณะความละเอียดของโครงข่ายขนาด 4.3 ล้านเอลิเมนท์

ตารางที่ 3.6 การตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณทางคอมพิวเตอร์

| จำนวนเอลิเมนท์ | $C_{\scriptscriptstyle L}$ | % diff $C_{L,Flight Test}$ |
|------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| ผลการทดสอบจริง (Flight test) | 0.5677 | - |
| 2,683,495 | 0.5656 | 0.3732 |
| 3,376,733 | 0.5671 | 0.1164 |
| 4,348,308 | 0.5682 | 0.0857 |
| 5,740,141 | 0.5680 | 0.0542 |
| 8,303,672 | 0.5680 | 0.0525 |
| 12,712,338 | 0.5676 | 0.0278 |

สำหรับการเก็บข้อมูลความแม่นยำสูงในครั้งนี้ ตั้งสมมุติฐานของการจำลอง การไหลเป็นแบบการไหลคงที่ (steady Flow) ที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible) เนื่องจากการบิน ของอากาศที่ออกแบบมีความเร็วสูงสุดเพียง 18 m/s หรือมีความเร็วมัคเท่ากับ 0.0514 ซึ่งยังคงอยู่ ในช่วงความเร็วต่ำ (subsonic flow) ที่มีความเร็วมัค (Mach number) น้อยกว่า 0.8 จึงไม่จำเป็นที่ จะจำลองการไหลแบบอัดตัวได้ (compressible) และเนื่องจากการไหลของสภาวะการบินของการ ออกแบบครั้งนี้มีค่าตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) เท่ากับ 1.4886×10⁶ และ 6.6159×10⁵ สำหรับวัตถุประสงค์การออกแบบข้อที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่เข้าสู่ช่วงการ ไหลแบบปั่นป่วน (turbulent Flow) ดังนั้นจึงตั้งสมมุติฐานประเภทการไหลเป็นแบบปั่นป่วน (turbulent Flow)

แบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ แบบจำลองประเภท $k - \omega SST$ เนื่องจากมีความแม่นยำในการวิเคราะห์การไหลที่ซับซ้อนรอบปีก อากาศยาน เนื่องจากแบบจำลองนี้เป็นการคำนวณที่ผสมผสานการคำนวณแบบ $k - \omega$ ที่มีความ แม่นยำสำหรับบริเวณใกล้ผนังกับ $k - \varepsilon$ ที่มีความแม่นยำในบริเวณพื้นที่ห่างออกไปจากผนัง ดังนั้น $k - \omega SST$ จึงสามารถทำการคำนวณได้ดีทั้งอากาศที่ไหลผ่านบริเวณใกล้ผนังและไกลผนัง การ คำนวณครั้งนี้ใช้รูปแบบ Coupled ในการจับคู่ระหว่างความดัน-ความเร็ว และแบ่งส่วนเชิงพื้นที่โดย ใช้วิธี Least Squares Cell-Based Gradient นอกจากนี้สำหรับสมการควบคุมความต่อเนื่องของ โมเมนตัมเชิงเส้นและความปั่นป่วนใช้รูปแบบ upwind ลำดับที่หนึ่งในการคำนวณ ดังนั้นเวลาในการ คำนวณค่าประสิทธิภาพของข้อมูลความแม่นยำสูงในงานวิจัยนี้อยู่ที่ประมาณ 8 ชั่วโมงต่อ 1 ข้อมูล การออกแบบ

จากการเก็บข้อมูลความแม่นยำสูงสามารถแสดงค่าประสิทธิภาพทาง อากาศพลศาสตร์ในด้านของสัมประสิทธิ์แรงต้านสำหรับวัตถุประสงค์การออกแบบที่ 1 ($C_{D,obj1}$) และ สัมประสิทธิ์แรงยกสำหรับวัตถุประสงค์การออกแบบที่ 2 ($C_{L,obj2}$)ได้ดังตารางที่ 3.7

| แบบจำลอง ความแม่นยำสูง ลำดับที่ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ | แบบจำลอง ความแม่นยำสูง ลำดับที่ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ |
|---------------------------------------|--------|--------|---------|--------------|--------------|---------------------------------------|--------|--------|---------|--------------|--------------|
| 1 | 0.1732 | 0.7262 | -1.3543 | 0.0870 | 0.6491 | 11 | 0.1381 | 0.6923 | 1.0398 | 0.0835 | 0.6896 |
| 2 | 0.1988 | 0.6350 | -1.1653 | 0.1081 | 0.5773 | 12 | 0.1808 | 0.8268 | -2.7270 | 0.0909 | 0.6226 |
| 3 | 0.1633 | 0.8989 | -1.9764 | 0.0987 | 0.5967 | 13 | 0.2105 | 0.6735 | -0.0335 | 0.1135 | 0.5768 |
| 4 | 0.2379 | 0.4963 | 1.7536 | 0.1258 | 0.5576 | 14 | 0.1144 | 0.8715 | 0.2591 | 0.0630 | 0.8436 |
| 5 | 0.0956 | 0.5181 | 0.5400 | 0.0898 | 0.7569 | 15 | 0.1885 | 0.5996 | 2.1964 | 0.0732 | 0.7897 |
| 6 | 0.2020 | 0.4261 | 1.9779 | 0.1260 | 0.5622 | 16 | 0.1278 | 0.9708 | -0.7486 | 0.0828 | 0.6729 |
| 7 | 0.1021 | 0.9367 | 2.4754 | 0.0684 | 0.5911 | 17 | 0.2294 | 0.4481 | -1.5569 | 0.1213 | 0.5352 |
| 8 | 0.0906 | 0.7881 | 2.1516 | 0.0656 | 0.9225 | 18 | 0.2206 | 0.3641 | 0.7515 | 0.1160 | 0.5733 |
| 9 | 0.1465 | 0.5668 | -2.3370 | 0.0830 | 0.6507 | 19 | 0.1098 | 0.3748 | 1.4557 | 0.0672 | 0.8470 |
| 10 | 0.1331 | 0.7824 | -2.4956 | 0.0830 | 0.6494 | 20 | 0.1584 | 0.3004 | -0.3165 | 0.0993 | 0.6084 |

ตารางที่ 3.7 ผลการประมาณค่าประสิทธิภาพของแบบจำลองความแม่นยำสูง

3.1.4 แบบจำลองตัวแทนลูกผสมและการปรับปรุงโดยการเพิ่มข้อมูลตัวอย่าง

ในงานวิจัยนี้ ได้มีการนำแบบจำลองตัวแทนลูกผสม (Hybrid Surrogate Model) มาใช้โดยการผสานข้อมูลจากแบบจำลองข้อมูลความแม่นยำสูง (High-Fidelity) ที่ถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Kriging model โดยอิงจากข้อมูลที่มีความแม่นยำสูง และแบบจำลองความแม่นยำต่ำ (Low-Fidelity) ซึ่งถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Radial Basis Functions (RBF) เพื่อแทนค่าความเบี่ยงเบนของข้อมูล โดยอิงจากข้อมูลที่มีความแม่นยำต่ำ เนื่องจากงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์การออกแบบ (Objective Functions) อยู่สองประการ จึงได้มีการสร้างแบบจำลองตัวแทนลูกผสมสำหรับทั้งสองฟังก์ วัตถุประสงค์การออกแบบจากสมการที่ 3.1 และ 3.2 จากนั้นแบบจำลองตัวแทนลูกผสมดังกล่าวถูก นำไปใช้ในฟังก์ชันการคัดเลือกข้อมูล (Acquisition Function) โดยใช้การคำนวณตามสมการ 3.3 ผ่านฟังก์ชัน EHVI (Expected Hypervolume Improvement) เพื่อช่วยในการค้นหาและปรับปรุง ค่าความเหมาะสมของแบบจำลอง

$$max: EHVI\left[f_1(t/c,\lambda,\theta), f_1(t/c,\lambda,\theta)\right] = \int_{-\infty}^{f_1} \int_{f_2}^{\infty} HVI\left[f_1, f_2\right] \times \phi_1(f_1)\phi_2(f_2)df_1df_2 \quad (3.3)$$

กระบวนการปรับปรุงข้อมูล (Data Improvement Process) ในงานวิจัยนี้ได้ ดำเนินการโดยการเพิ่มค่า Hypervolume Improvement ให้มากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ เพื่อระบุพื้นที่ ที่มีความไม่แน่นอนสูงสุดในฟังก์ชัน EHVI ได้มีการใช้ Genetic Algorithm (GA) ซึ่งเป็นเทคนิคการ ปรับแต่งค่าพื้นฐานที่มักใช้ในการแก้ปัญหาเชิงวัตถุประสงค์เดียว การตั้งค่าสำหรับขั้นตอนนี้กำหนดให้ ขนาดประชากร (Population Size) ถูกกำหนดไว้ที่ 100 ตัว และมีจำนวนรุ่น (Generations) ทั้งหมดเท่ากับ 50 รุ่น โดยกระบวนการผสมพันธุ์ (Crossover) ใช้ Blend Crossover Operator (BLX) โดยมีอัตราการผสมพันธุ์ (Crossover Rate) เท่ากับ 0.9 และใช้อัตราการกลายพันธุ์ (Mutation Rate) เท่ากับ 0.1 เพื่อเพิ่มความหลากหลายและหลีกเลี่ยงปัญหาการหยุดนิ่งของ ประชากร ซึ่งในการศึกษานี้ได้ทำการเพิ่มข้อมูลตัวอย่างโดยใช้กระบวนการเก็บข้อมูลของข้อมูล ระดับสูงในการประมาณค่าประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของข้อมูลตัวอย่างเพิ่มเติมจำนวน 20 ตัวก่อนจบกระบวนการหาค่าเหมาะสมสุดในครั้งนี้ ประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ที่ได้จากการ เพิ่มข้อมูลตัวอย่างเพิ่มเติม แสดงในตารางที่ 3.8

| ตัวอย่าง เพิ่มเติม ลำดับที่ | แบบจำลอง ความแม่นยำ สูง ลำดับที่ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ | ตัวอย่าง เพิ่มเติม ลำดับที่ | แบบจำลอง ความแม่นยำ สูง ลำดับที่ | t/c | λ | θ | $C_{D,obj1}$ | $C_{L,obj2}$ |
|-----------------------------------|---|--------|--------|---------|--------------|--------------|-----------------------------------|---|--------|--------|---------|--------------|--------------|
| 1 | 21 | 0.0845 | 0.7986 | 2.7493 | 0.0698 | 0.9308 | 11 | 31 | 0.1715 | 0.8031 | -1.9506 | 0.0709 | 0.7690 |
| 2 | 22 | 0.0847 | 0.7981 | 2.7365 | 0.0699 | 0.9332 | 12 | 32 | 0.1012 | 0.4525 | 1.1191 | 0.0650 | 0.8694 |
| 3 | 23 | 0.0856 | 0.7525 | 2.9286 | 0.0604 | 0.9358 | 13 | 33 | 0.1563 | 0.8260 | -2.5159 | 0.0685 | 0.7701 |
| 4 | 24 | 0.0856 | 0.7753 | 2.8088 | 0.0604 | 0.9457 | 14 | 34 | 0.1120 | 0.9937 | 2.3171 | 0.0659 | 0.8666 |
| 5 | 25 | 0.0845 | 0.7986 | 2.7523 | 0.0605 | 0.9472 | 15 | 35 | 0.1485 | 0.8129 | -1.7832 | 0.0678 | 0.7610 |
| 6 | 26 | 0.0802 | 0.6968 | 3.0000 | 0.0686 | 0.9380 | 16 | 36 | 0.1113 | 0.9299 | -0.3376 | 0.0657 | 0.8260 |
| 7 | 27 | 0.0805 | 0.7779 | 2.9988 | 0.0627 | 0.9529 | 17 | 37 | 0.1550 | 0.7349 | -2.1631 | 0.0681 | 0.7749 |
| 8 | 28 | 0.0926 | 0.7042 | 3.0000 | 0.0614 | 0.9338 | 18 | 38 | 0.1147 | 0.9537 | 2.9736 | 0.0660 | 0.8803 |
| 9 | 29 | 0.0905 | 0.7975 | 3.0000 | 0.0715 | 0.9073 | 19 | 39 | 0.2038 | 0.5285 | 2.0685 | 0.0974 | 0.6662 |
| 10 | 30 | 0.1308 | 0.9089 | -0.1319 | 0.0662 | 0.8052 | 20 | 40 | 0.1917 | 0.7049 | -0.6436 | 0.1069 | 0.5918 |

ตารางที่ 3.8 ประสิทธิภาพทางอากาศพลศาสตร์ของข้อมูลตัวอย่างเพิ่มเติม