บทที่ 4
วิธีดำเนินการทดสอบ

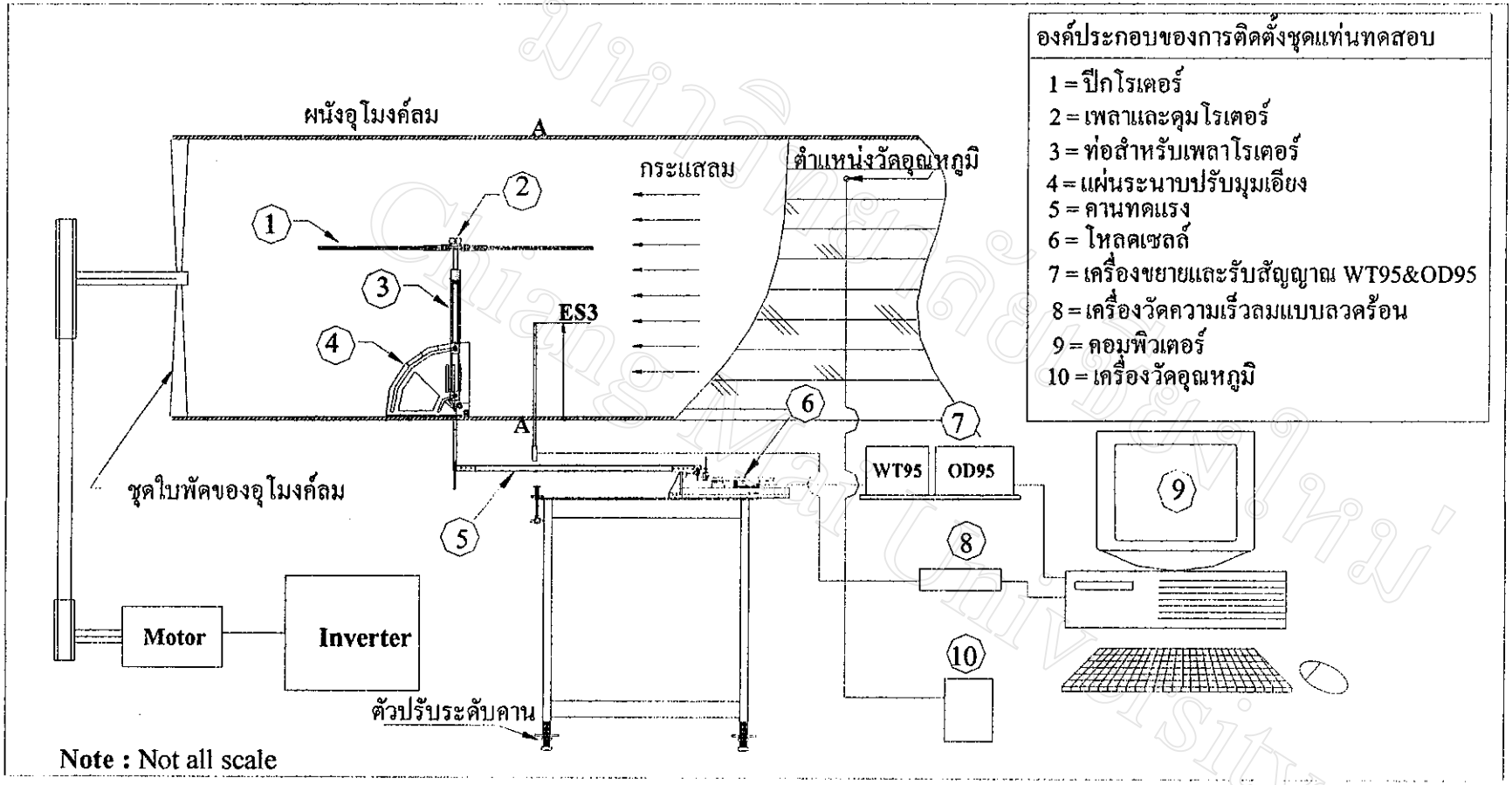
สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการทดสอบหาแรงยกที่เกิดขึ้นในแนวแกนเพลาโรเตอร์ของชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโร และคำนวณหาแรงยก โดยใช้ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์และการสูญเสียที่ปลายปีกในสภาวะออโต้ไจโร

การดำเนินการทดสอบจะแบ่งออกเป็นสองขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกจะเป็นการทดสอบชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโรที่จำลองขึ้น สำหรับในส่วนที่สองจะเป็นขั้นตอนการสร้างโปรแกรมการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีทั้งสอง โดยจะดำเนินการทดสอบเป็นลำดับดังนี้

4.1 การทดสอบแรงยกในแนวแกนเพลาโรเตอร์ของชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโร

4.1.1 กำหนดความเร็วลมที่ใช้ในการทดสอบเป็นความเร็วต่ำอยู่ในช่วง 4 ถึง 8 เมตรต่อวินาที ซึ่งผลจากการทดสอบอุโมงค์ลม (ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ก) จะพบว่าสามารถสร้างความเร็วลมในช่วงนี้โดยการตั้งความถี่ให้แก่เครื่องปรับรอบมอเตอร์ที่ 15 17 20 23 และ 25 เฮิร์ท ซึ่งจะใช้สร้างความเร็ว v_1 v_2 v_3 v_4 และ v_5 เมตรต่อวินาที เพราะที่ความถี่ 15 เฮิร์ท เป็นความถี่เริ่มต้นที่ชุดใบพัดของอุโมงค์ลมสามารถทำให้เกิดกระแสลมที่มีความเร็วเพียงพอทำให้ชุดโรเตอร์สามารถทำงานโดยประมาณความเร็วอยู่ในช่วง 4.3 ถึง 4.6 เมตรต่อวินาที

4.1.2 ทำการติดตั้งชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโรในอุโมงค์ลมดังแสดงในรูปที่ 4.1 ด้วยการประกอบชุดโรเตอร์เข้ากับชุดคานทดแรงและนำไปติดตั้งในอุโมงค์ลม นำแท่งวัดความเร็วของเครื่องวัดความเร็วลมมาสอดเข้าไปทางด้านใต้ของอุโมงค์ลมโดยให้จุดเซ็นเซอร์ที่อ่านค่าความเร็วลมวางอยู่ที่ตำแหน่งที่เหมาะสม ที่ซึ่งในที่นี้คือ ตำแหน่ง ES3 บนภาคตัด A-A ของอุโมงค์ลม (ดูเพิ่มเติมได้ในรูปที่ ก2. ของภาคผนวก ก) และเชื่อมการทำงานของเครื่องวัดความเร็วลมเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านทางสายเคเบิลและติดตั้งเทอร์โมคับเปิลเข้ากับผนังด้านข้างภายนอกของอุโมงค์ลม จากนั้นจัดตำแหน่งของคานให้ขนานกับแนวระดับโดยปรับที่ฐานของแท่นวางคานให้ได้ในแนวระดับและทำการเชื่อมต่อสัญญาณของโหลดเซลล์เข้าสู่เครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95 และต่อไปยังคอมพิวเตอร์



รูปที่ 4.1 แสดงการติดตั้งชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโรในอุโมงค์

4.1.3 ปรับสัญญาณของเครื่องขยายสัญญาณ WT 95 เพื่อขยายสัญญาณของการรับแรงสูงสุด 100 กิโลกรัมจากโหลดเซลล์ให้เป็น 20 กิโลกรัม ทั้งนี้เพราะช่วงการใช้งานในการวัดแรงยกสูงสุดของการทดแรงจะไม่เกิน 20 กิโลกรัม โดยที่การขยายสัญญาณสามารถขยายเพิ่มขึ้นหรือต่ำลงกว่า 20 กิโลกรัมได้ แต่ต้องขึ้นกับขนาดโหลดสูงสุดของโหลดเซลล์ที่ใช้ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค.

4.1.4 เริ่มทดสอบโดยตั้งมุมเอียงโรเตอร์ไว้ที่ตำแหน่งศูนย์องศาดังแสดงในรูปที่ 4.1 และถอดปีกออกจากชุดโรเตอร์เพื่อทดสอบหาแรงเนื่องจากเพลาและดุมโรเตอร์ที่ไม่ติดปีกซึ่งมีขั้นตอนการทดสอบตามลำดับต่อไปนี้ โดยขั้นตอนที่จะกล่าวถึงนี้สามารถใช้ร่วมกับที่ตำแหน่งมุมเอียง 15 30 และ 45 องศา

ก. ตั้งความถี่เริ่มต้นให้กับเครื่องปรับรอบมอเตอร์ไว้ที่ 15 เฮิร์ท (หรือความเร็วลม v_1) และบันทึกความดันบรรยากาศจากบารอมิเตอร์ พร้อมทั้งปรับสัญญาณเนื่องจากน้ำหนักของชุดแท่นทดสอบที่กดลงบนคานทดแรงให้เป็นศูนย์จากเครื่องขยายสัญญาณ WT 95 ดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ค.

ข. บันทึกค่าอุณหภูมิในอุโมงค์ลมจากเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน และอุณหภูมิบรรยากาศจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ค. หลังจากเสร็จจากการบันทึกค่าความดันและอุณหภูมิ ให้เปิดเครื่องวัดความเร็วลมเพื่อเริ่มทำการวัดและบันทึกความเร็วลมลงในแฟ้มข้อมูลที่เลือก และเปิดเครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95 เพื่อเริ่มบันทึกข้อมูลลงในแฟ้มข้อมูลที่เลือกเช่นกัน จากนั้นจึงเปิดเครื่องปรับรอบมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์ทำงาน

ง. ขณะทดสอบ เมื่อมีกระแสลมไหลผ่านชุดโรเตอร์อย่างต่อเนื่องเครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95 สามารถแสดงเส้นแนวโน้มของแรงเทียบกับเวลาทุกๆ 2 วินาที บนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ในกรณีทดสอบหาแรงเนื่องจากเพลาและดุมโรเตอร์ที่ไม่ติดปีกนี้จะบันทึกแรงและความเร็วลมที่ค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาซึ่งความเร็วลมจะเข้าสู่ค่าสม่ำเสมอก่อน ในขณะที่แรงยังคงเพิ่มอยู่จนกระทั่งสัญญาณของแรงมีความสม่ำเสมออย่างน้อย 60 วินาที จึงสิ้นสุดการบันทึก

จ. หลังจากบันทึกสัญญาณของแรงได้อย่างน้อย 60 วินาที ให้บันทึกค่าอุณหภูมิในอุโมงค์ลมและบรรยากาศอีกครั้งก่อนที่จะปิดเครื่องวัดความเร็วลม ปิดเครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95 และปิดเครื่องปรับรอบมอเตอร์เพื่อสิ้นสุดการทดสอบในแต่ละครั้ง

ฉ. จากนั้นให้ปรับสัญญาณของแรงที่หลงเหลือหลังการทดสอบให้เป็นศูนย์ด้วยทุกครั้งและให้เปลี่ยนความถี่ของเครื่องปรับรอบมอเตอร์ เพื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น v_2 v_3 v_4 และ v_5 เมตรต่อวินาที ในแต่ละความเร็วให้ทำการทดสอบใหม่โดยเริ่มที่ข้อ ข.

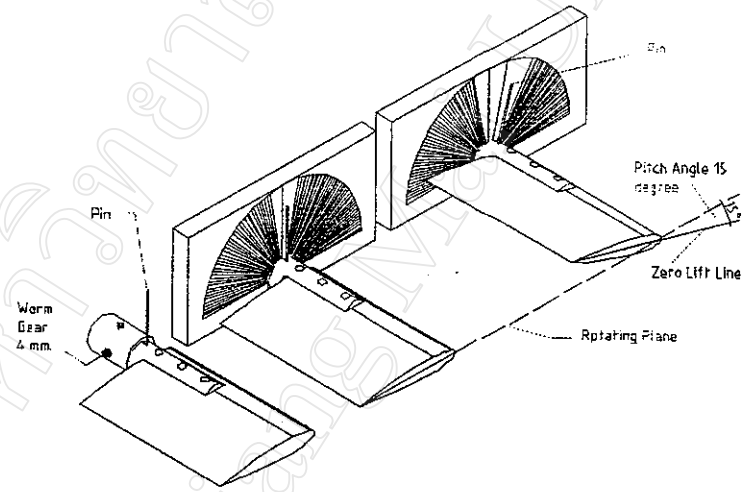
4.1.5 เมื่อทำการทดสอบหาแรงเนื่องเพลาและดุมโรเตอร์ที่ไม่ติดปีกที่ตำแหน่งมุมเอียงศูนย์องศาหรือที่ตำแหน่งมุมเอียงใดมุมเอียงหนึ่งแล้วเสร็จให้ติดตั้งปีกจำนวน 2 ใบ กลับเข้าที่ตำแหน่งเดิม โดยต่อเข้ากับตัวยึดจับปีกบนดุมโรเตอร์และให้ทำการทดสอบดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

ก. เริ่มทดสอบโดยตั้งตำแหน่งมุมพิทช์เริ่มต้นที่ศูนย์องศา สำหรับวิธีในการตั้งมุมพิทช์จะถูกแสดงในรูปที่ 4.2 โดยมีรายละเอียดดังนี้คือ

ก1. คลายสกูรตัวหนอนเพื่อปลดล็อคทำให้ตัวยึดจับปีกที่ยึดปีกสามารถหมุน

ก2. นำตัวช่วยปรับพิทช์มาสวมเข้ากับตัวยึดจับปีกที่เชื่อมติดกับดุมโรเตอร์

ก3. ปรับตัวยึดจับปีกให้ได้มุมที่ต้องการโดยให้เข็มเล็ง (Pin) ซ้อนทับกับแนวเส้นมุมองศาของตัวช่วยปรับมุมพิทช์ ซึ่งในการทดสอบนี้จะทดสอบภายในช่วงมุมพิทช์เป็นบวก (Positive) ดังนั้นมุมที่ปรับจะมีแนวเส้นที่แรงยกเป็นศูนย์ (Zero Lift Line) ของภาคตัดปีกจะต่ำกว่าระนาบการหมุนของโรเตอร์ (Rotating Plane)

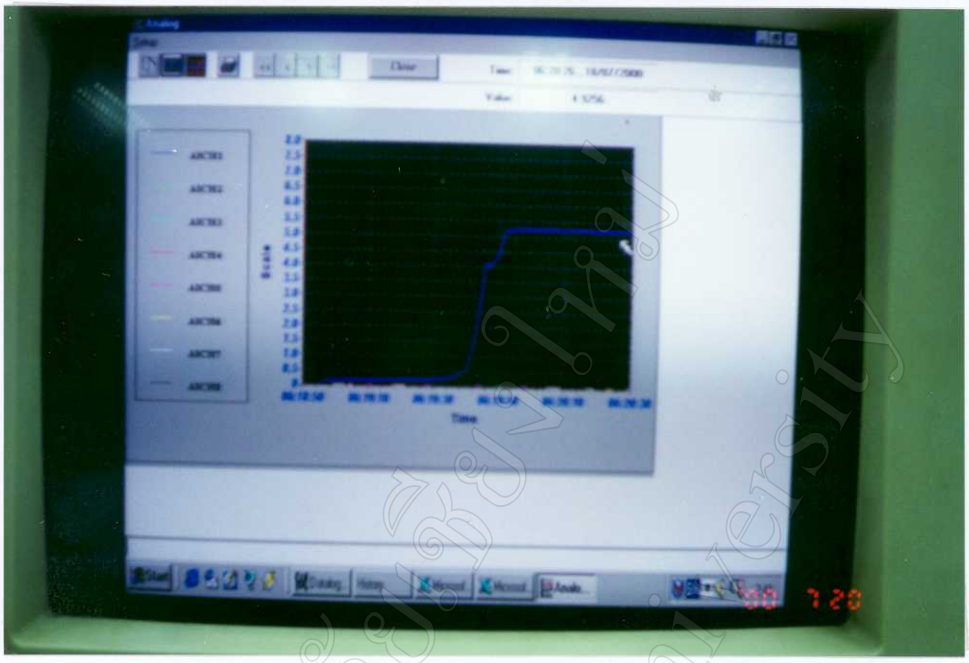


รูปที่ 4.2 แสดงตัวอย่างการปรับมุมพิทช์ของปีกที่มุมพิทช์ 15 องศา

ข. ปรับสัญญาณของเครื่องขยายสัญญาณ WT 95 ใหม่ โดยให้สัญญาณเนื่องจากน้ำหนักของชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ที่กดลงบนคานทดแรงเป็นศูนย์ เพราะมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นจากการติดตั้งปีก และปรับความถี่ของเครื่องปรับรอบมอเตอร์กลับมาที่ 15 เฮิร์ท

ค. บันทึกค่าอุณหภูมิในอุโมงค์ลมจากเครื่องวัดความเร็วลมแบบลวดร้อน และอุณหภูมิบรรยากาศจากเครื่องมือวัดอุณหภูมิ

ง. หลังเสร็จจากการบันทึกค่าความดันและอุณหภูมิ ให้เปิดเครื่องวัดความเร็วลมเพื่อเริ่มทำการวัดและบันทึกความเร็วลมลงในแฟ้มข้อมูลที่เลือกใหม่ และเปิดเครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95 เพื่อเริ่มบันทึกข้อมูลลงในแฟ้มข้อมูลที่เลือกใหม่เช่นกัน จากนั้นจึงเปิดเครื่องปรับรอบมอเตอร์เพื่อให้มอเตอร์ทำงาน



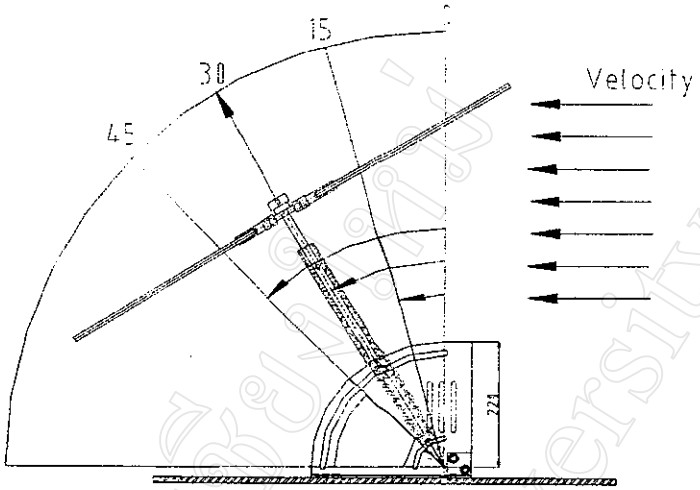
รูปที่ 4.3 แสดงสัญญาณของแรงยกขณะทำการทดสอบจากชุดวัดแรงเทียบกับเวลา

จ. ขณะทดสอบความเร็วลมและแรงยกจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาซึ่งความเร็วลมจะเข้าสู่ค่าสม่ำเสมอก่อนในขณะที่แรงยกและรอบการหมุนยังคงเพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อเครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95 เริ่มแสดงค่าของแรงยกที่มีความสม่ำเสมอดังแสดงในรูปที่ 4.3 ให้ทำการวัดและบันทึกความเร็วรอบของโรเตอร์ในหน่วยรอบต่อนาที (RPM) ด้วยการยิงสัญญาณจากเครื่องวัดรอบในรูปของแสงไปที่แถบสะท้อนแสงของชิ้นส่วนสำหรับวัดรอบที่ติดตั้งบนคุมโรเตอร์ และการทดสอบจะดำเนินบันทึกค่าความเร็วรอบทุกๆ 15 วินาที จนกระทั่งมีช่วงเวลาบันทึกความเร็วรอบอย่างน้อย 60 วินาที จึงสิ้นสุดการบันทึกค่า

ฉ. เมื่อบันทึกความเร็วรอบแล้วเสร็จ ให้บันทึกค่าอุณหภูมิในอุโมงค์ลมและบรรยากาศอีกครั้งก่อนที่จะปิดเครื่องวัดความเร็วลม ปิดเครื่องขยายและรับสัญญาณ WT 95 และ OD 95 และปิดเครื่องปรับรอบมอเตอร์เพื่อสิ้นสุดการทดสอบในแต่ละครั้ง

ช. จากนั้นให้ปรับสัญญาณของแรงที่หลงเหลือหลังการทดสอบให้เป็นศูนย์ด้วยทุกครั้งและให้เปลี่ยนความถี่ของเครื่องปรับรอบมอเตอร์ เพื่อเพิ่มความเร็วลมเป็น v_2 v_3 v_4 และ v_5 เมตรต่อวินาที ในแต่ละความเร็วให้ทำการทดสอบใหม่โดยเริ่มที่ข้อ ค.

ซ. (ยกเว้นกรณีทดสอบที่ตำแหน่งมุมเอียงศูนย์องศา) หลังเสร็จจากการทดสอบมุมพิทช์เริ่มต้นที่ตำแหน่งมุมพิทช์ศูนย์องศาหรือมุมพิทช์ใดมุมพิทช์หนึ่งให้เปลี่ยนตำแหน่งของมุมพิทช์ใหม่และเริ่มทำการทดสอบใหม่ที่ข้อ ค.



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของการปรับมุมเอียงของเพลาโรเตอร์

4.1.6 หลังจากเสร็จสิ้นการทดสอบในหัวข้อ 4.1.4 และ 4.1.5 ตามที่กล่าวผ่านมาข้างต้นให้เริ่มทำการทดสอบใหม่ด้วยการเปลี่ยนตำแหน่งของมุมเอียงเป็น 15 30 หรือ 45 องศา ดังแสดงในรูปที่ 4.4 และทุกครั้งที่เปลี่ยนตำแหน่งมุมเอียงให้ทำการทดสอบหาแรงเนื่องจากเพลาและดุมโรเตอร์ดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.4 สำหรับการแปรค่าของตำแหน่งมุมพิทช์ในแต่ละตำแหน่งของมุมเอียงซึ่งให้ทำการทดสอบหาแรงยกดังได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 4.1.5 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ก. ที่ตำแหน่งมุมเอียง 0 องศา ตั้งตำแหน่งมุมพิทช์ที่ 0 องศา เพียงตำแหน่งเดียว

ข. ที่ตำแหน่งมุมเอียง 15 องศา ตั้งตำแหน่งมุมพิทช์ที่ 0 2 6 10 และ 15 องศา

ค. ที่ตำแหน่งมุมเอียง 30 องศา ตั้งตำแหน่งมุมพิทช์ที่ 0 2 6 10 15 และ 30 องศา

ง. ที่ตำแหน่งมุมเอียง 45 องศา ตั้งตำแหน่งมุมพิทช์ที่ 0 2 6 10 15 30 และ 45 องศา

หากได้ทำการทดสอบจากการแปรค่ามุมพิทช์ที่ตำแหน่งมุมเอียงใดมุมเอียงหนึ่งที่ตำแหน่ง 0 15 30 และ 45 องศา จนครบตามที่ได้กำหนดไว้ให้ปรับตำแหน่งของมุมเอียงใหม่ โดยที่การปรับมุมเอียงจะเริ่มต้นที่ตำแหน่ง 0 15 30 และ 45 องศา ตามลำดับ

จากขั้นตอนการทดสอบที่กล่าวผ่านมาจะทำการทดสอบสองซ้ำเป็นอย่างต่ำและสำหรับความดันบรรยากาศจะทำการบันทึกค่าทุกๆ 2 ชั่วโมง ในขณะทำการทดสอบด้วยทุกครั้ง

4.1.7 รวบรวมข้อมูลจากการทดสอบทั้งหมดเพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ โดยมีขั้นตอนในการวิเคราะห์ตามลำดับต่อไปนี้คือ

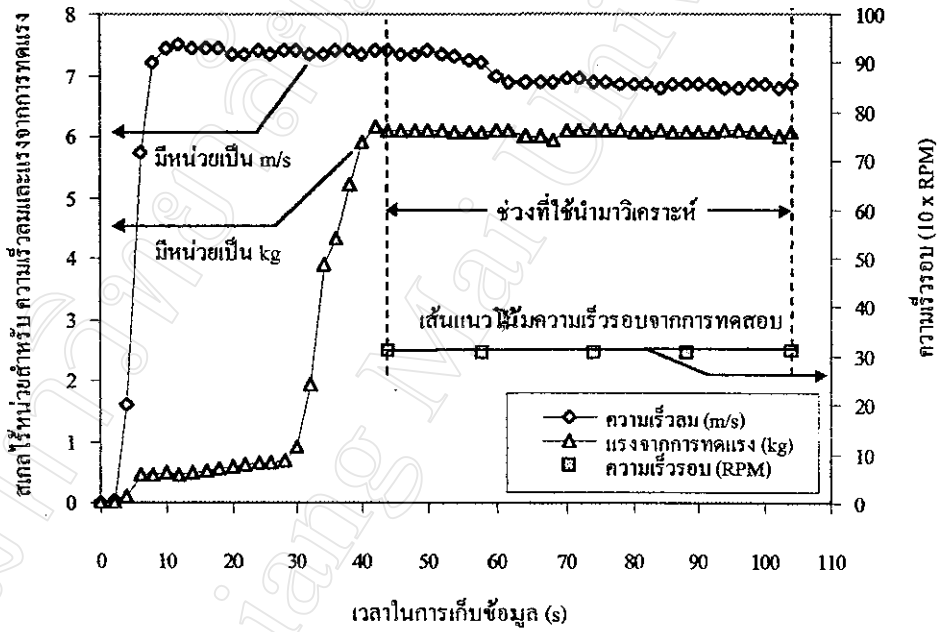
ก. หาความหนาแน่นของบรรยากาศ (ρ) ซึ่งสามารถประมาณค่าได้จากความดันบรรยากาศและอุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดสอบทั้งหมดมีหน่วยกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3) จากสมการดังต่อไปนี้คือ (Walker and Jenkins, 1997)

$$\rho = \frac{1.226 \times 288 \times P}{760 \times (T + 273.15)} \qquad \text{.....(4.1)}$$

โดยที่ P คือ ความดันบรรยากาศเฉลี่ยตลอดการทดสอบมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรปรอท (mm.Hg)

T คือ อุณหภูมิเฉลี่ยตลอดการทดสอบมีหน่วยเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}C$)

ข. นำข้อมูลที่ได้คือ แรงยกของโรเตอร์จากการทดแรง ความเร็วลม และความเร็วรอบในแต่ละตำแหน่งมาเรียบเรียงข้อมูลใหม่ดังแสดงในรูปตัวอย่างที่ 4.5 โดยเลือกใช้ข้อมูลในช่วงที่แรงยกของโรเตอร์ ความเร็วลม และความเร็วรอบมีความสม่ำเสมอเท่านั้น



รูปที่ 4.5 ตัวอย่างแสดงข้อมูลของตัวแปรที่ได้จากการทดสอบและการเลือกช่วงข้อมูลเพื่อใช้คำนวณหาค่าแรงยกของโรเตอร์ ความเร็วลม และความเร็วรอบของแต่ละการทดสอบ

ค. เปลี่ยนค่าแรงยกของโรเตอร์จากการทดแรง (F_2') ในหน่วยกิโลกรัมให้เป็นค่าของแรงยก (F_2) ในหน่วยนิวตันและแทนค่าลงในสมการการทดแรงดังแสดงในตาราง 4.1 เพื่อกำหนดให้เป็นแรงยกบนโรเตอร์ขณะทำการทดสอบ (สมการจากตาราง 4.1 ได้จากการทดสอบคานก่อนที่จะเข้าสู่การทดสอบหาแรงยกของโรเตอร์นี้ซึ่งสามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ในภาคผนวก ง) จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ทางสถิติ สำหรับเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในตารางจะหมายถึงค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยระหว่างแรงที่ได้จากการแทนค่าในสมการ F_1 เทียบกับแรงที่เกิดขึ้นจริงในการทดสอบคานโดยแรง F_1 คือ แรงยกบนชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโรในหน่วยนิวตัน

ตาราง 4.1 แสดงสมการการทดแรงของคานในแต่ละมุมเอียง

มุมเอียง	สมการ	จำนวนข้อมูล	R^2	%ความคลาดเคลื่อน
0	$F_1 = 6(10^{-6})F_2^{\prime 3} - 0.0011F_2^{\prime 2} + 0.0911F_2^{\prime}$	20	0.9979	11.23
15	$F_1 = 1(10^{-6})F_2^{\prime 3} - 0.0007F_2^{\prime 2} + 0.1049F_2^{\prime}$	24	0.9979	10.08
30	$F_1 = 4(10^{-5})F_2^{\prime 3} - 0.0050F_2^{\prime 2} + 0.2205F_2^{\prime}$	36	0.9955	10.30
45	$*F_1 = 9.81[0.01311(10^{-6})F_2^{\prime 3} - 0.1213F_2^{\prime 2} + 0.3752F_2^{\prime}]$	36	0.9979	4.43

หมายเหตุ : * เป็นสัญลักษณ์ของสมการการทดแรง สำหรับแทนค่าของ $F_2^{\prime}$ ในหน่วยกิโลกรัม

ง. การวิเคราะห์ทางสถิติจะนำข้อมูลความเร็วลม ความเร็วรอบ และแรงยก F_1 ในหน่วยนิวตัน มาวิเคราะห์หาข้อมูลที่ออกนอกอย่างผิดปกติ (Outlier) ก่อน เพราะเนื่องจากข้อมูลมีจำนวนค่อนข้างมากและมีการกระโดดของข้อมูลอยู่ตลอดเวลา โดยมีวิธีดังต่อไปนี้

ง1. ทำการหาค่าควอไทล์ที่ 1 (Q_1) ซึ่งค่าควอไทล์ (Quartile) หมายถึง ค่าทางสถิติที่แบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็น 4 ส่วน เท่าๆกัน ตามขนาดของการกระจาย โดยที่ควอไทล์ที่ 1 จะหมายถึงตัวสถิติที่ทำการแบ่งข้อมูล 1 ใน 4 มีค่าน้อยกว่าค่าของมัน

ง2. ทำการหาค่าควอไทล์ที่ 2 หรือค่ามัธยฐาน (Median) และควอไทล์ที่ 3

ง3. ทำการหาค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ (IRQ) ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากผลต่างระหว่างควอไทล์ที่ 3 และ 1 ($Q_3 - Q_1$)

ง4. ทำการหาค่าน้อยสุดของข้อมูล ($Q_1 - 1.5IRQ$) และค่ามากสุดของข้อมูล ($Q_3 + 1.5IRQ$) โดยข้อมูลใดก็ตามที่มีค่าน้อยกว่าค่าน้อยสุดหรือมีค่ามากกว่าค่ามากสุด ให้ถือว่าเป็นข้อมูลที่ออกนอกอย่างผิดปกติไม่ควรนำมาใช้ในการวิเคราะห์

ง5. นำข้อมูลที่ผ่านการวิเคราะห์หาข้อมูลที่ออกนอกอย่างผิดปกติไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

จ. สำหรับแรงยกเฉลี่ยที่ได้ยังถือว่าเป็นแรงยกที่คิดรวมกับแรงเนื่องจากเพลาและดุมโรเตอร์ ดังนั้นนำค่าแรง ($T^{\prime}$) และความเร็วลม (v) ที่ได้จากการทดสอบเพลาและดุมโรเตอร์ที่ไม่ติดปีกมาหาสมการความสัมพันธ์ของแรงที่แปรผันกับความเร็วลมยกกำลังสองของแต่ละมุมเอียงคือ $T^{\prime}_{0,15,30,45}\left(v^2\right)$ จากนั้นนำมาหักออกจากแรงยกเฉลี่ยของแต่ละตำแหน่งเพื่อเป็นแรงยกที่ต้องการสำหรับนำไปใช้เปรียบเทียบสมรรถนะกับแรงยกที่ได้จากการคำนวณ

ฉ. นำตัวแปรที่ได้จากการทดสอบคือ ความเร็วลม ความเร็วรอบในแต่ละตำแหน่งของมุมพิทช์และมุมเอียง และความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดการทดสอบ แทนค่าลงในโปรแกรมคำนวณเพื่อคำนวณหาค่าแรงยกด้วยทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์และการสูญเสียที่ปลายปีกซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

ช. จากนั้นหาตำแหน่งการเอียงของเพลาและมุมพิทช์ของปีกที่ดีที่สุดสำหรับชุดแท่นทดสอบโรเตอร์ออโต้ไจโรจากการพิจารณา แรงยกในแนวแกนเพลา แรงต้านของการเคลื่อนที่ในแนวระดับ และรวมถึงสัมประสิทธิ์แรงยกซึ่งได้กล่าวถึงวิธีและผลการวิเคราะห์ในบทต่อไป

4.2 วิธีคำนวณทางโปรแกรม

การคำนวณโดยใช้ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์และการสูญเสียที่ปลายปีกจะมีขั้นตอนการคำนวณเหมือนกัน ดังนั้นเพื่อให้การใช้งานโปรแกรมเป็นไปอย่างสะดวกจะสร้างโปรแกรมการคำนวณสำหรับทฤษฎีทั้งสองและนำมารวมกันเพื่อให้ผู้ใช้ได้เลือกใช้งาน โดยในโปรแกรมสามารถแยกพิจารณาการคำนวณออกเป็นสามขั้นตอน ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

4.2.1 การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

เป็นขั้นตอนที่ใช้สำหรับคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านจากสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะและความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านกับสัมประสิทธิ์แรงยก

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการดังต่อไปนี้ โดยอ้างอิงสมการ (2.4) คือ

$$C_l = k_1\alpha + \alpha_0 \qquad \text{.....(4.2)}$$

โดยที่ k_1 คือ ค่าความชันระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะของภาคตัดปีกที่เลือกใช้

α_0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกที่มุมปะทะเป็นศูนย์

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านกับสัมประสิทธิ์แรงยกสามารถจัดให้อยู่ในรูปของสมการ (2.6) ได้คือ

$$C_d = C_{d0} + k_2 C_l^2 \qquad \text{.....(4.3)}$$

โดยที่ k_2 คือ ค่าคงที่ที่สามารถหาได้จากข้อมูลของสัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงยก

C_{d0} คือ ค่าของสัมประสิทธิ์แรงต้านเมื่อแรงยกเป็นศูนย์หรือไม่เกิดแรงยก

จากสมการ (4.2) และ (4.3) จะเลือกวิธีสร้างสมการจากการประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นกับข้อมูลไม่เชิงเส้นสำหรับข้อมูล n ข้อมูล ซึ่งเป็นระเบียบวิธีที่ง่ายสำหรับในการสร้างสมการเส้นตรงซึ่งมีรูปสมการคือ (สมการ (4.3) สามารถประยุกต์ให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง)

$$f(x) = a_0 + a_1 x \qquad \text{.....(4.4)}$$

โดยที่ a_0 และ a_1 คือ ค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่าแต่สามารถคำนวณหาค่าได้จากเงื่อนไขที่ว่าสมการเส้นตรงที่ประดิษฐ์ขึ้นมานี้จะก่อให้เกิดค่าความผิดพลาดโดยเฉลี่ยที่น้อยที่สุดจากข้อมูล n ข้อมูล โดยจะแทนค่าความผิดพลาดด้วยสัญลักษณ์ E ที่สามารถเขียนให้อยู่ในรูปสมการคือ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ 2542)

$$E = \sum_{i=1}^{n} \left[y_i - \left(a_0 + a_1 x \right) \right]^2 \qquad \text{.....(4.5)}$$

โดยที่ i คือ จำนวนข้อมูลใดๆ

สมการ (4.5) สามารถคำนวณหาค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า a_0 และ a_1 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least Squares) ซึ่งทำจากวิธีการหาค่าต่ำสุดของความผิดพลาดคือ $\frac{\partial E}{\partial a_0} = 0$ และ $\frac{\partial E}{\partial a_1} = 0$ จากเงื่อนไขดังกล่าวนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์ได้ดังนี้คือ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ 2542)

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i & \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \sum_{i=1}^{n} y_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i y_i \end{Bmatrix} \qquad \text{.....(4.6)}$$

ซึ่งเมื่อแก้ระบบสมการ (4.6) สามารถหาค่าคงที่ a_0 และ a_1 ได้คือ

$$a_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} y_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)^2} \qquad \text{.....(4.7)}$$

และ

$$a_1 = \frac{n \left(\sum_{i=1}^{n} x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right) \left(\sum_{i=1}^{n} y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^{n} x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)^2} \qquad \text{.....(4.8)}$$

ดังนั้นจากสมการ (4.7) และ (4.8) ค่าคงที่ α_0 และ k_1 ของสมการ (4.2) สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$\alpha_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} C_{li}\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i C_{li}\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i\right)^2} \qquad \text{.....(4.9)}$$

และ

$$k_1 = \frac{n\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i C_{li}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} C_{li}\right)}{n\left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \alpha_i\right)^2} \qquad \text{.....(4.10)}$$

จากนั้นแทนค่าคงที่ α_0 และ k_1 จากสมการ (4.9) และ (4.10) ลงในสมการ (4.2) สำหรับค่าคงที่ C_{d0} และ k_2 ของสมการ (4.3) จะมีรูปแบบสมการคือ

$$C_{d0} = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} C_{di}\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right)^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right) C_{di}\right)\left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right)\right)}{n\left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right)^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right)\right)^2} \qquad \text{.....(4.11)}$$

และ

$$k_2 = \frac{n\left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right) C_{di}\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right)\right)\left(\sum_{i=1}^{n} C_{di}\right)}{n\left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right)^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}^2\right)\right)^2} \qquad \text{.....(4.12)}$$

จากนั้นแทนค่าสมการ (4.11) และ (4.12) ลงในสมการ (4.3) และทำการตรวจสอบสมการที่สร้างขึ้นด้วยสัมประสิทธิ์การตัดสินใจหรือ R^2 (Coefficient of Determination) สำหรับสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะค่า R^2 หาได้จาก (Chapra and Canale, 1988)

$$R_{C_l}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li}' - \overline{C_l}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n} \left(C_{li} - \overline{C_l}\right)^2} \qquad \text{.....(4.13)}$$

ส่วนสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์แรงต้านกับสัมประสิทธิ์แรงยกค่า R^2 หาได้จาก

$$R^2_{C_d} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(C'_{di} - \overline{C_d}\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(C_{di} - \overline{C_d}\right)^2} \qquad \text{.....(4.14)}$$

โดยที่ C'_l และ C'_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านที่ได้จากสมการ

$\overline{C_l}$ และ $\overline{C_d}$ คือ ค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์แรงยกและแรงต้านของข้อมูลทั้งหมดตามลำดับ

จากสมการ (4.9) ถึง (4.14) นำมาเขียนโปรแกรมโดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.6 โดยมีรูปแบบการทำงานคือ โปรแกรมจะรับค่าตัวแปรของมุมปะทะ สัมประสิทธิ์แรงต้านและสัมประสิทธิ์แรงยกที่ป้อน จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการวนซ้ำเพื่อหาค่าคงที่ α_0 k_1 C_{d0} และ k_2 ซึ่งจะสิ้นสุดการทำงานเมื่อได้สมการและทราบค่า R^2 ของทั้งสองสมการ

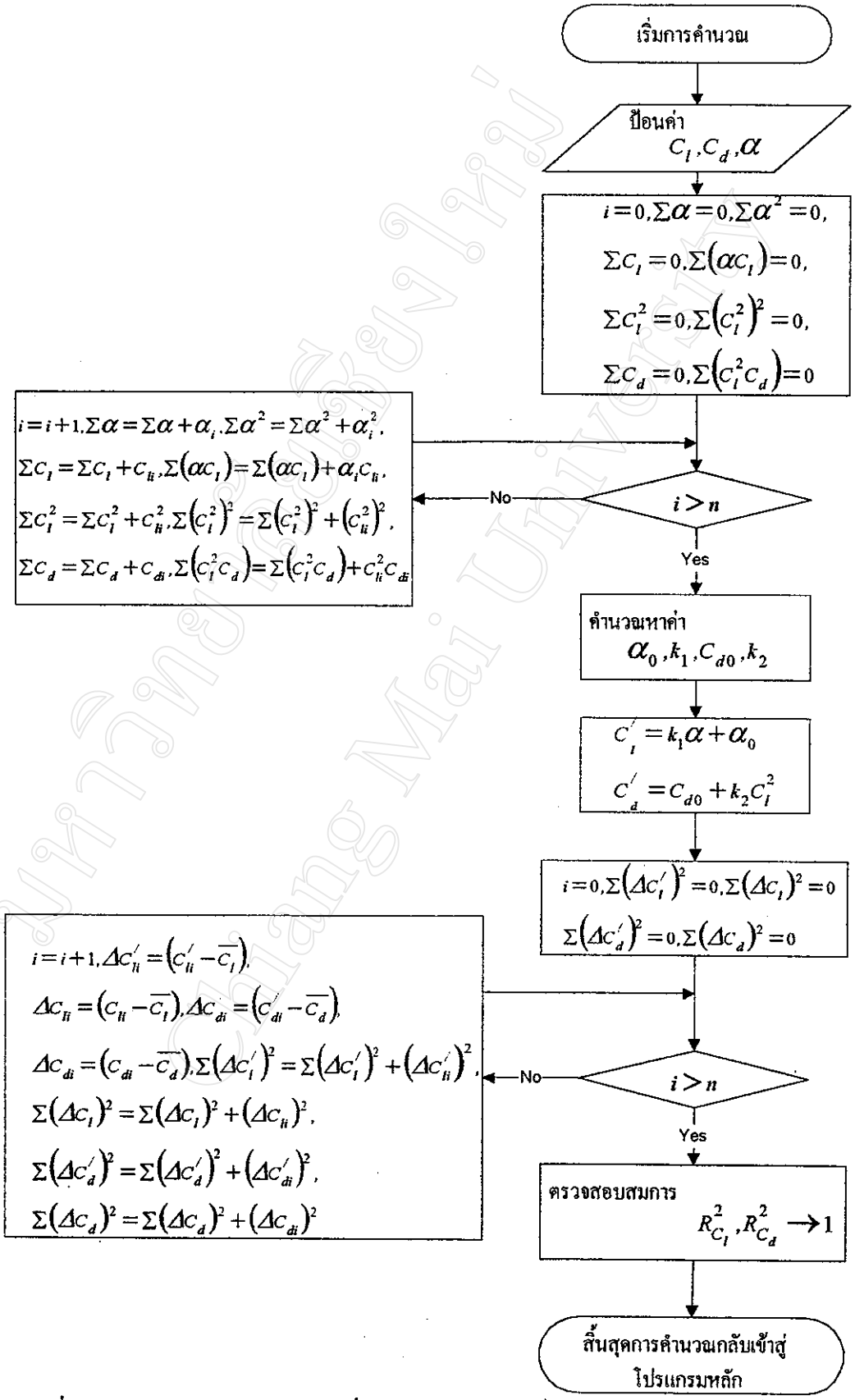
ตรวจสอบการทำงานของโปรแกรม โดยการป้อนค่าตัวแปรทั้งสามของภาคตัดปีก NACA 0015 จากคู่มือ Rice ดังแสดงในตาราง 4.2 และผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรมจะถูกแสดงในตาราง 4.3

ตาราง 4.2 ตัวอย่างของ α C_l และ C_d ของภาคตัดปีก NACA 0015

α	C_l	C_d		α	C_l	C_d
-8	-0.600	0.030		2	0.150	0.012
-6	-0.450	0.020		4	0.300	0.015
-4	-0.300	0.015		8	0.600	0.030
-2	-0.150	0.012		12	0.900	0.060
0	0	0.010		16	1.200	0.095

ตาราง 4.3 ผลลัพธ์ของตัวอย่างการคำนวณทางโปรแกรมด้วยวิธีการประยุกต์การถดถอยแบบเชิงเส้นกับข้อมูลไม่เชิงเส้น (ความสมบูรณ์ใช้ได้ที่ $-8^\circ \le \alpha \le +16^\circ$)

ความสัมพันธ์	สมการ	จำนวน	ค่ารากกำลังสอง R^2	%ความคลาดเคลื่อน
C_l กับ α	$C_l = 0.075\alpha$	10	1	0
C_d กับ C_l	$C_d = 5.9543(10^{-2})C_l^2 + 9.6701(10^{-3})$	10	0.9982	4



รูปที่ 4.6 แสดงแผนผังการคำนวณเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้าน

4.2.2 การคำนวณหาค่าแรงยกออโต้ไจโรบนภาคตัดย่อยๆ ของปีก

เป็นขั้นตอนการคำนวณหาค่าแรงยกที่ระยะรัศมี r ใดๆของปีกหมุนโดยประกอบด้วยตัวแปรที่สำคัญดังต่อไปนี้คือ ความเร็วลม (v) ความเร็วรอบ (ω) มุมเอียง (δ) มุมพิทช์ (β) มุมการไหล (ϕ) ความดัน (P) อุณหภูมิ (T) ระยะคอร์ด (c) รัศมีวงนอกของโรเตอร์ (r_2) รัศมีดุมปีกหมุน (r_1) จำนวนปีก (B) และแฟคเตอร์การไหลภายในแนวแกนและระนาบการหมุน (a และ b) สำหรับแฟคเตอร์ a และ b จะเป็นตัวแปรที่ไม่ทราบค่าแต่สามารถคำนวณหาได้โดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson Method) ซึ่งเป็นระเบียบวิธีแบบเปิดที่เริ่มจากค่าเริ่มต้นเพียงค่าเดียวและอาจนำไปสู่ผลลัพธ์ได้โดยรวดเร็ว

วิธีนิวตัน-ราฟสันนั้น ตั้งอยู่บนรากฐานของการใช้อนุกรมเทย์เลอร์ (Taylor Series) สำหรับ n ตัวแปรซึ่งสามารถเขียนได้ในรูปแบบดังนี้ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ 2542)

$$\sum_{j=1}^{n} \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \Delta x_j = -f_i \qquad \text{.....(4.15)}$$

ถ้าหากมีระบบสมการที่ประกอบด้วยสองสมการย่อยดังนั้น n เท่ากับ 2 และอันดับ i และ j เท่ากับ 1 และ 2 ($i, j = 1, 2$) ทำให้สมการ (4.15) สามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \qquad \text{.....(4.16)}$$

สำหรับการแก้สมการไม่เชิงเส้นที่ประกอบด้วย n สมการ วิธีของนิวตัน-ราฟสัน จะนำไปสู่สมการในรูปแบบของ

$$\underset{(n\times n)}{[J]} \underset{(n\times 1)}{\{\Delta x\}} = -\underset{(n\times 1)}{\{f\}} \qquad \text{.....(4.17)}$$

โดยที่ $[J]$ คือ ค่ายาโคเบียนเมตริกซ์ (Jacobian Matrix) และ $\{\Delta x\}$ เป็นเวกเตอร์ของการเปลี่ยนแปลงผลลัพธ์ของราก x_i โดยที่ i เท่ากับ 1 2 ... n ที่เกิดขึ้นในการทำซ้ำแต่ละครั้ง สำหรับเวกเตอร์ $\{f\}$ ประกอบด้วยฟังก์ชัน f_i โดย i เท่ากับ 1 2 ... n ที่ขึ้นอยู่กับ x_i การทำซ้ำจะเกิดขึ้นจนกระทั่ง x_i จะลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่ถูกต้องแล้วฟังก์ชัน f_i เหล่านี้จะมีค่าเท่ากับศูนย์

ในการคำนวณหาค่าแฟคเตอร์ a และ b ของการคำนวณโดยคิดรวมการสูญเสียที่ปลายปีกจะประกอบด้วยสมการ 2 สมการย่อยคือ สมการ f_a และ f_b จากสมการ (2.27) และ (2.28) คือ

$$f_a = (1-a)^2 \frac{\sigma C_l \cos\phi}{\sin^2\phi}\left(1+\frac{C_d}{C_l}\tan\phi\right) - 4aF(1-aF) \qquad \text{.....(4.18)}$$

และ

$$f_b = (1-a)^2 \frac{\sigma C_l}{\sin\phi}\left(1-\frac{C_d}{C_l\tan\phi}\right) - 4bF(1-aF)\lambda \qquad \text{.....(4.19)}$$

สำหรับการคำนวณด้วยทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์ค่าแฟคเตอร์ F ของสมการ (4.18) และ (4.19) มีค่าเป็นหนึ่ง

จากอนุกรมเทย์เลอร์ที่ประกอบด้วยสองสมการ สามารถเขียนในรูปแบบของเมตริกซ์ได้ดังนี้คือ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ 2542)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f_a}{\partial a} & \frac{\partial f_a}{\partial b} \\ \frac{\partial f_b}{\partial a} & \frac{\partial f_b}{\partial b} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta a \\ \Delta b \end{Bmatrix} = -\begin{Bmatrix} f_a \\ f_b \end{Bmatrix} \qquad \text{.....(4.20)}$$

ขนาดของยาโคเบียน (Jacobian) คือ

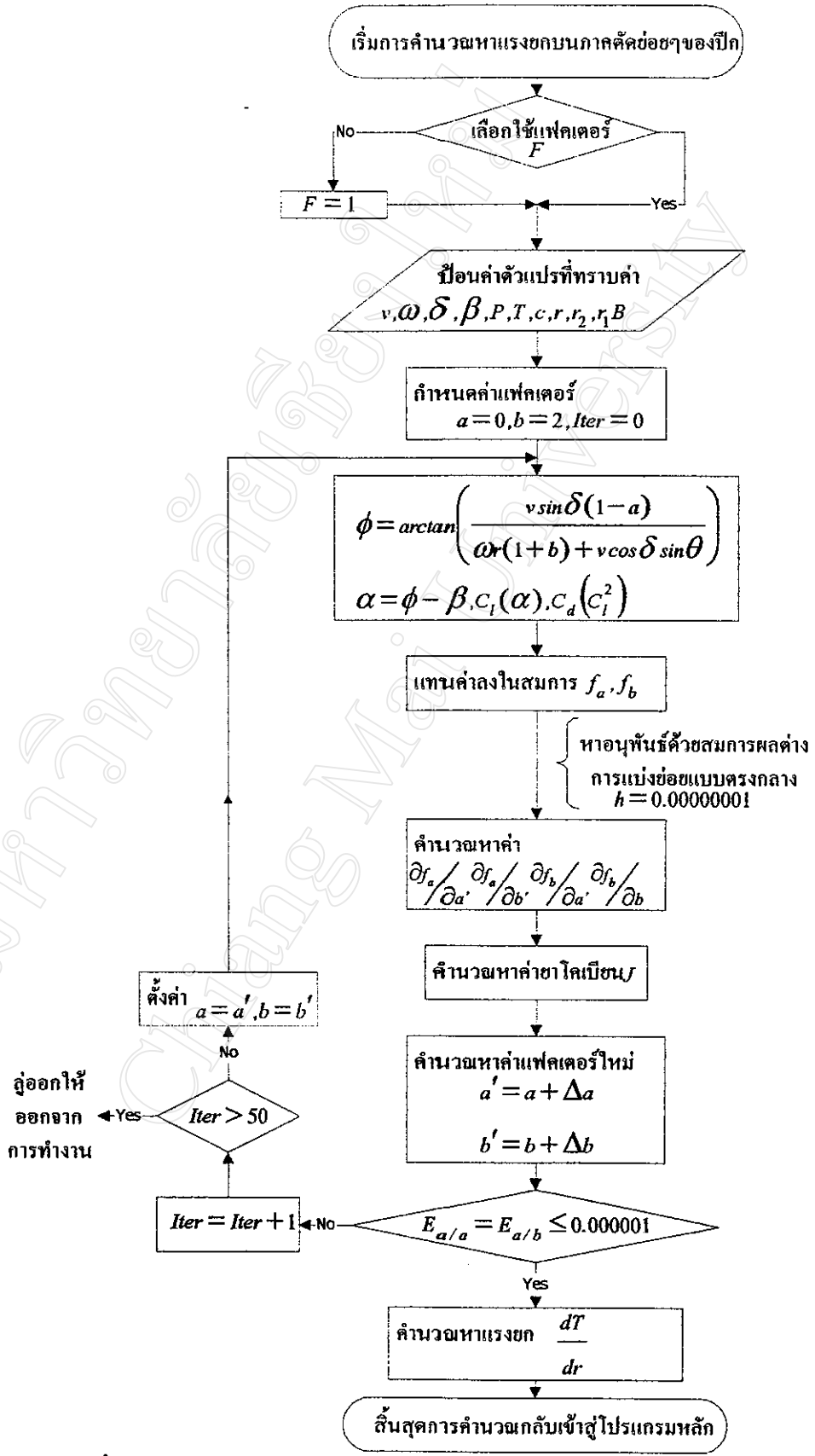
$$J = \frac{\partial f_a}{\partial a}\frac{\partial f_b}{\partial b} - \frac{\partial f_a}{\partial b}\frac{\partial f_b}{\partial a} \qquad \text{.....(4.21)}$$

ดังนั้นค่าแฟคเตอร์ a และ b ใหม่ที่ใช้สำหรับการวนซ้ำ ซึ่งจะแทนสัญลักษณ์ด้วย a' และ b' โดยมีรูปสมการดังต่อไปนี้

$$a' = a + \left[\frac{-f_a\frac{\partial f_b}{\partial b} + f_b\frac{\partial f_a}{\partial b}}{J}\right] \qquad \text{.....(4.22)}$$

และ

$$b' = b + \left[\frac{-f_b\frac{\partial f_a}{\partial a} + f_a\frac{\partial f_b}{\partial a}}{J}\right] \qquad \text{.....(4.23)}$$



รูปที่ 4.7 แสดงแผนผังการคำนวณหาค่าแรงยกบนภาคตัดย่อยๆของปีก

นำสมการ (4.18) ถึง (4.23) มาเขียนโปรแกรมโดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.7 โดยมีรูปแบบการทำงานคือ เริ่มต้นจากการเลือกวิธีการคำนวณโดยใช้ทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์หรือการสูญเสียที่ปลายปีก จากนั้นจึงรับค่าของตัวแปรที่ป้อนดังได้กล่าวในตอนต้นเพื่อเข้าสู่การคำนวณแบบวนซ้ำซึ่งกระบวนการวนซ้ำจะเกิดขึ้นจนกระทั่ง a และ b ลู่เข้าหาผลลัพธ์ที่ถูกต้องโดยตั้งเกณฑ์ให้มีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์โดยประมาณของแฟคเตอร์ a ($E_{a/a}$) และ b ($E_{a/b}$) ไม่น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.000001 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดจำนวนการทำซ้ำไม่เกิน 50 ครั้ง ถ้ามากกว่านี้ถือว่าลู่ออกไม่สามารถหาคำตอบได้

$$E_{a/a} \leq 0.000001 \ \% \qquad \text{.....(4.24)}$$

และ

$$E_{a/b} \leq 0.000001 \ \% \qquad \text{.....(4.25)}$$

โดยในรูปที่ 4.7 ค่า *Iter* เป็นค่าที่ใช้บอกครั้งที่ของการทำซ้ำ

เมื่อกระบวนการวนซ้ำสามารถลู่เข้าสู่ผลลัพธ์ที่ซึ่งจะทำให้ทราบค่าตัวแปรทั้งหมดและนำค่าตัวแปรที่ได้แทนค่าลงในสมการ (2.33) เพื่อคำนวณแรงยกบนภาคตัดย่อยๆของปีก

$$\frac{dT}{dr} = (1-a)^2 \sigma \frac{C_l \cos\phi}{\sin^2\phi}\left[1+\frac{C_d}{C_l}\tan\phi\right]\frac{1}{2}\rho v_S{}^2 2\pi r \qquad \text{.....(2.33)}$$

สำหรับวิธีการหาอนุพันธ์จะคำนวณด้วยสมการผลต่างการแบ่งย่อยแบบตรงกลางที่ให้ค่าความผิดพลาดอันดับ h^2 จากอนุกรมเทย์เลอร์ 1 ตัวแปร (ปราโมทย์ เดชะอำไพ 2542)

$$f'(x_i) = \frac{f(x_i+h)-f(x_i-h)}{2h} + o(h^2) \qquad \text{.....(4.26)}$$

โดยที่ h คือ ค่าเปลี่ยนแปลงของตัวแปรต้นซึ่งลู่เข้าสู่ศูนย์

เมื่อประยุกต์ใช้กับสมการสองสมการสองตัวแปรผลลัพธ์ที่ได้คือ

$$\frac{\partial f_a}{\partial a} = \frac{f_a(a+h_a,b)-f_a(a-h_a,b)}{2h} \qquad \text{.....(4.27)}$$

$$\frac{\partial f_b}{\partial a} = \frac{f_b(a+h_a,b)-f_b(a-h_a,b)}{2h} \qquad \text{.....(4.28)}$$

$$\frac{\partial f_a}{\partial b} = \frac{f_a(a,b+h_b) - f_a(a,b+h_b)}{2h} \qquad \text{.....(4.29)}$$

และ

$$\frac{\partial f_b}{\partial b} = \frac{f_b(a,b+h_b) - f_b(a,b+h_b)}{2h} \qquad \text{.....(4.30)}$$

โดยที่ในการคำนวณนี้จะกำหนด h_a และ h_b มีค่า 0.00000001

ตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมสำหรับการลู่เข้าสู่คำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน โดยสมมติสมการอย่างง่ายขึ้นมา 2 สมการ 2 ตัวแปร และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นดังแสดงในตาราง 4.4

ตาราง 4.4 ผลลัพธ์ของตัวอย่างการลู่เข้าสู่คำตอบด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน สำหรับ 2 สมการ 2 ตัวแปร

สมการ	ค่าเริ่มต้น	จำนวนการวนซ้ำ	คำตอบที่ได้
$Y = x_2 - x_1 - 1$	$x_1 = 2$	2	$x_1 = 1$
$Y = x_2^2 + x_1 - 5$	$x_2 = 2$		$x_2 = 2$

4.2.3 การคำนวณหาค่าแรงยกที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ออโต้ไจโร

เป็นขั้นตอนการคำนวณหาแรงยกที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ เริ่มแรกจะหาค่าอินทิกรัลของแรงยก ($\frac{dT}{dr}$) ตลอดรัศมีของปีกหมุนโดยใช้วิธีซิมป์สัน 1/3 แบบหลายช่วง (Multiple-Segment Simpson' 1/3 Method)

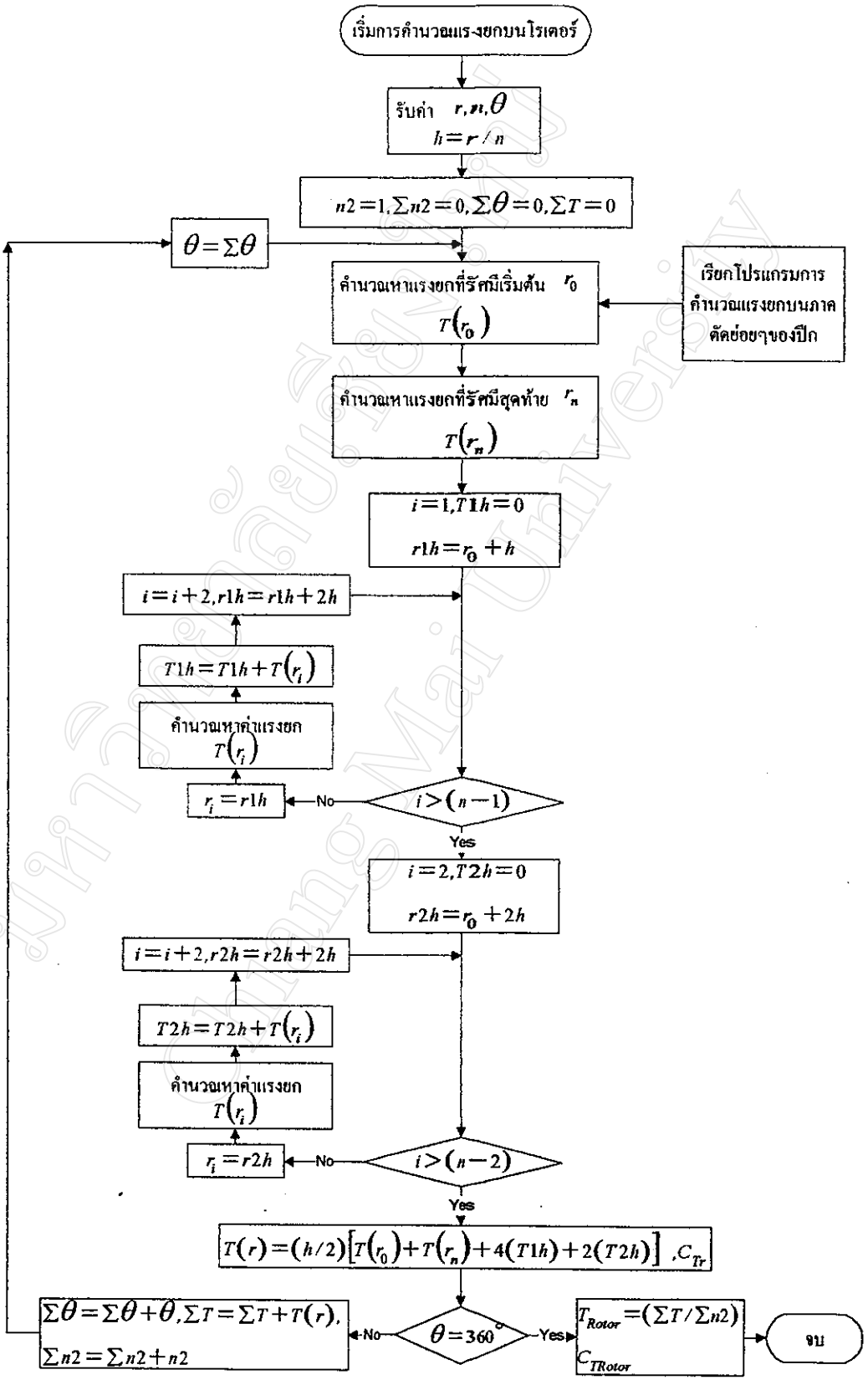
จากกฎของซิมป์สันจะแบ่งรัศมีช่วง r_1 ถึง r_2 ทั้งหมดนั้นออกเป็น n ช่วงย่อยๆ โดยที่ความกว้างของแต่ละช่วงย่อย (h) คือ (ปราโมทย์ เดชะอำไพ 2542)

$$h = \frac{r_2 - r_1}{n} \qquad \text{.....(4.31)}$$

สมการของการหาค่าอินทิกรัลของฟังก์ชัน $f(x)$ ที่กำหนดให้ในช่วง $u \le x \le v$ นั่นคือ

$$I = \int_u^v f(x)dx \qquad \text{.....(4.32)}$$

ถ้าแตกการหาค่าอินทิกรัลนี้ออกเป็น n / 2 ช่วง โดยเริ่มจาก $x_0 \le x \le x_2$ $x_2 \le x \le x_4$ เรื่อยไปจนถึงช่วง $x_{n-2} \le x \le x_n$ ดังนี้คือ



รูปที่ 4.8 แสดงแผนผังการคำนวณหาค่าแรงยกบนโรเตอร์ออโต้ไจโร

$$I=\int_{x_0}^{x_2} f(x)dx+\int_{x_2}^{x_4} f(x)dx+...+\int_{x_{n-2}}^{x_n} f(x)dx \qquad \text{.....(4.33)}$$

เมื่อประยุกต์กฎของซิมป์สันลงในแต่ละช่วงจะได้สมการอินทิกรัลของซิมป์สันที่ใช้ในการคำนวณ

$$I=\frac{h}{3}\left[f(x_0)+f(x_n)+4\sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i)+2\sum_{i=2,4,6}^{n-2} f(x_i)\right] \qquad \text{.....(4.34)}$$

และเมื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาแรงยก $T(r)$ ตลอดความยาวปีกสมการที่ได้มีรูปแบบดังนี้

$$T(r)=\left(\frac{r_2-r_1}{3n}\right)\left[T(r_0)+T(r_n)+4\sum_{i=1,3,5}^{n-1} T(r_i)+2\sum_{i=2,4,6}^{n-2} T(r_i)\right] \qquad \text{.....(4.35)}$$

โดยที่ r_2 และ r_1 คือ รัศมีนอกสุดของโรเตอร์และรัศมีคุมปีกหมุน มีหน่วยเป็น เมตร (m)

จากนั้นนำสมการ (4.31) และ (4.35) มาเขียนโปรแกรมโดยมีลำดับขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยมีรูปแบบการทำงานคือ เริ่มจากกำหนดจำนวนช่วงรัศมีปีกออกเป็น n ย่อยๆ โดยที่จำนวนย่อย n ที่กำหนดต้องเป็นเลขคู่เท่านั้น จากนั้นคำนวณค่าแรงยกของปีกในแต่ละรัศมีย่อยๆ โดยการทำซ้ำจนได้แรงยกตลอดรัศมี นำค่าที่ได้แทนลงในสมการ (4.35) เพื่อหาค่าแรงยกตลอดรัศมีปีก แต่จุดประสงค์ในการคำนวณแรงยกโรเตอร์ออโต้ไจโรคือ ต้องการคำนวณหาแรงยกตลอดระนาบการหมุนเนื่องจากคิดผลกระทบจากความเร็วลมที่เข้าหาระนาบการหมุน (v_C) โดยเพิ่มมุมการหมุน (θ) ทีละ 1 องศา (เป็นค่าที่ใช้ในการคำนวณสำหรับการวิจัยครั้งนี้) หรือแล้วแต่ความต้องการของผู้ใช้จนครบรอบการหมุน 360 องศา และสำหรับจำนวนของมุมการหมุนทั้งหมดคือ $\sum n2$

นำค่าแรงยกทั้งหมดที่คำนวณได้ในแต่ละมุมการหมุนมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อคิดเป็นแรงยกที่เกิดขึ้นบนโรเตอร์ ($\overline{T}$) ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\overline{T}=T_{Rotor}=\frac{\sum_{\theta=1}^{360}(T_\theta)}{\sum n2} \qquad \text{.....(4.36)}$$

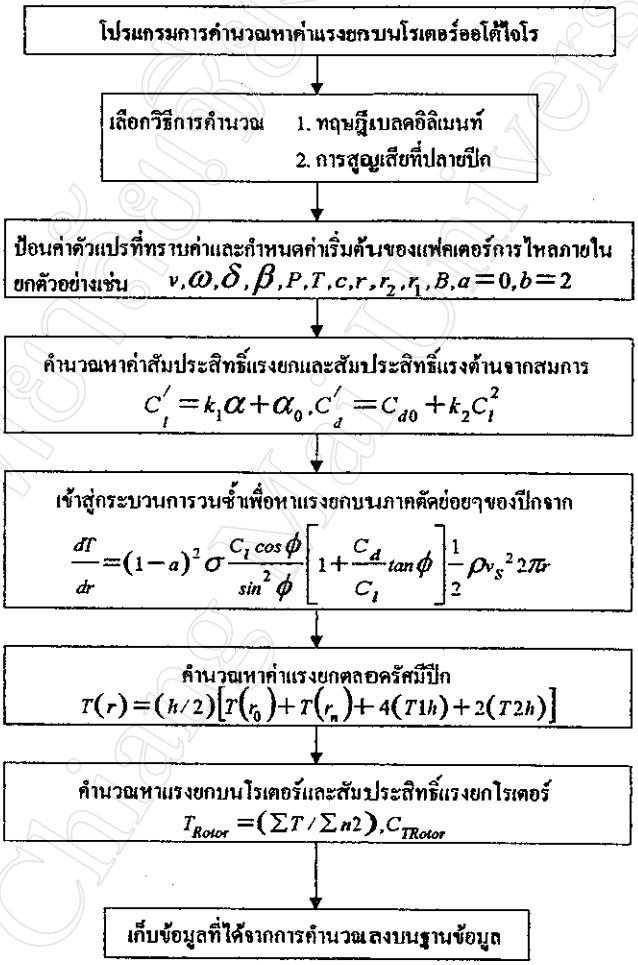
และค่าสัมประสิทธิ์แรงยกสามารถคำนวณได้จากการแทนค่าแรงยกจากสมการ (4.36) ลงในสมการ (4.37)

$$\overline{C_T}=\frac{\overline{T}}{\frac{1}{2}\rho v_S \sin\delta\pi\left(r_2^2-r_1^2\right)} \qquad \text{.....(4.37)}$$

ตรวจสอบการทำงานของโปรแกรมสำหรับการอินทิกรัลด้วยวิธีซิมป์สัน 1/3 แบบหลายช่วง โดยสมมติสมการอย่างง่ายขึ้นมา 2 สมการ และผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ดังแสดงในตาราง 4.5

ตาราง 4.5 การอินทิกรัลด้วยวิธีซิมป์สัน 1/3 แบบหลายช่วงของตัวอย่างสมการ 2 สมการ

สมการ	ช่วงการอินทิกรัล	จำนวนการอินทิกรัล	คำตอบที่ได้
$dy/dx = x^2 + x + 4$	0 - 1	20	$y = 6.3333$
$dy/d\theta = \sin\theta$	$0^\circ - 360^\circ$	20	$y = 0.0000$



รูปที่ 4.9 แสดงแผนผังลำดับขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรมที่เขียนขึ้น

4.2.4 การทำงานของโปรแกรม

จากขั้นตอนทั้งหมดที่กล่าวผ่านมาข้างต้นเมื่อนำมารวมกัน สามารถสรุปการทำงานของโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยมีขั้นตอนดังนี้คือ

ก. เลือกวิธีการคำนวณจากทฤษฎีเบลดอิลิเมนท์หรือการสูญเสียที่ปลายปีก

ข. ป้อนและรับค่าตัวแปรทั้งหมดรวมทั้งค่าสัมประสิทธิ์แรงยก สัมประสิทธิ์แรงต้านและมุมปะทะ

ค. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์แรงยกและสัมประสิทธิ์แรงต้านจากสมการความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์แรงยกกับมุมปะทะและสัมประสิทธิ์แรงต้านกับสัมประสิทธิ์แรงยก

ง. เข้าสู่กระบวนการทำซ้ำ เพื่อคำนวณหาแรงยกบนภาคตัดย่อยๆของปีกตลอดรัศมีปีก

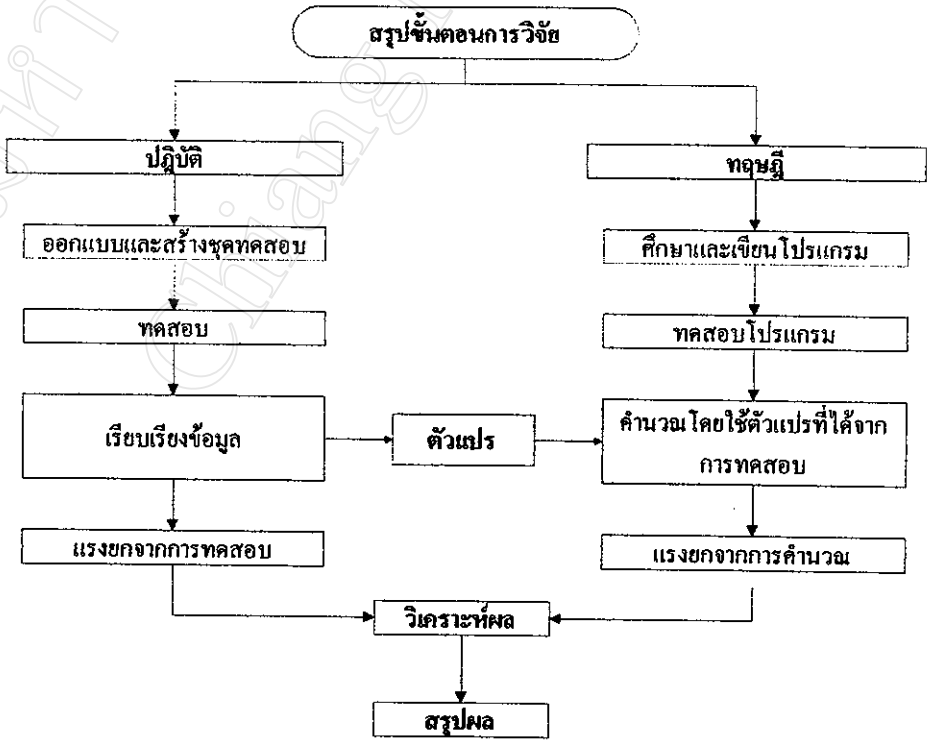
จ. คำนวณหาแรงยกของปีกโดยการอินทิเกรตหาแรงยกตลอดรัศมีปีก

ฉ. คำนวณหาแรงยกเฉลี่ยตลอดระนาบการหมุนของโรเตอร์จากค่าของแรงยกบนปีกตั้งแต่มุมการหมุน θ ที่ 0 จนถึง 360 องศา โดยจำนวนการคำนวณถูกแทนด้วยสัญลักษณ์ $\sum n2$

ช. บันทึกค่าที่ได้จากการคำนวณลงในฐานข้อมูล

ท้ายสุดนี้สามารถสรุปขั้นตอนการวิจัยได้ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และผลของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากการเปรียบเทียบสมรรถนะแรงยกของการทดสอบและแรงยกของการคำนวณด้วยทฤษฎีทั้งสองจะอยู่ในรูปเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละมุมพิทช์ที่ได้จากการแปรค่าของความเร็วลมภายในช่วงไม่เกิน 8 เมตรต่อวินาทีโดยยึดผลของแรงยกจากการทดสอบเป็นหลัก ดังนั้นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสามารถหาได้จาก

$$\%ความคลาดเคลื่อน = \frac{แรงยกของการทดสอบ - แรงยกของการคำนวณ}{แรงยกของการทดสอบ} \times 100 \quad \text{.....(4.38)}$$



รูปที่ 4.10 แสดงแผนผังสรุปขั้นตอนการวิจัย