



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

ปริญญา

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

วิศวกรรมการบินและอวกาศ

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาและจำลองพฤติกรรมด้านความแข็งแรงของชุดขาล้อในการลงจอดต่างๆ
Study and Simulation of Aircraft Landing Gear Strength Behavior in Various Landing Conditions

นามผู้วิจัย นางสาววาสนา จันทวงษ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(นาวาอากาศโทณัฐพล นิยมไทย, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ศานติ วิริยะวิทย์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่

เดือน

พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาและจำลองพฤติกรรมด้านความแข็งแรงของชุดขาล้อในการลงจอดต่างๆ

Study and Simulation of Aircraft Landing Gear Strength Behavior
in Various Landing Conditions

โดย

นางสาววาสนา จันทวงษ์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ)

พ.ศ. 2554

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วาสนา จันทวงษ์ 2554: การศึกษาและจำลองพฤติกรรมด้านความแข็งแรงของชุดขาล้อ ในการลงจอดต่างๆ ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมการบินและอวกาศ) สาขาวิศวกรรมการบินและอวกาศ ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์หลัก: นาวาอากาศโทณัฐพล นิยมไทย, Ph.D. 94 หน้า

ชุดขาล้อเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างอากาศยาน โดยเฉพาะเมื่ออากาศยานทำการลงจอด ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงพื้นที่วิกฤตของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ (Tricycle landing gear) และแบบลากหาง (Tail dragger landing gear) ของอากาศยานเบา ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายและส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อโครงสร้างของชุดขาล้อมากที่สุด เมื่อต้องลงจอดด้วยสภาพการณ์ที่แตกต่างกันไปตามมาตรฐานของ FAR 23 - Appendix C: Basic landing conditions

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ชุดขาล้อทั้งสองแบบทั้งการลงจอดด้วยการกระโดดและการกระโดดสูงสุด โดยใช้การวิเคราะห์แบบสถิตย์ (Static) ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ ซึ่งมีการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 10 กรณี แบ่งเป็นการวิเคราะห์ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ 6 กรณีและการวิเคราะห์ชุดขาล้อแบบลากหาง 4 กรณี

ผลการวิจัยพบว่า พื้นที่วิกฤตของชุดขาล้อคือบริเวณมุมโคนขาล้อและด้านล่างของโคนขาล้อ การลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดขาล้อแบบขาสามล้อมากที่สุดคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยการกระโดดสูงสุด ส่วนการลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดขาล้อแบบลากหางมากที่สุดคือการลงจอดด้วยการกระโดดสูงสุดทั้งกรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าสัมผัสพื้นพร้อมกันและกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น หากเปรียบเทียบถึงความสามารถในการลงจอดระหว่างชุดขาล้อทั้งสองแบบด้วยกรณีลงจอดเดียวกัน นั่นคือกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นหรือเรียกว่าการลงจอดแบบเปิดมุมปะทะสูงสุด พบว่า ชุดขาล้อแบบขาสามล้อมีความสามารถในการทำการลงจอดได้ดีกว่าชุดขาล้อแบบลากหางแม้จะทำการลงจอดโดยอาศัยเพียงล้อหลักเท่านั้น

/ /

ลายมือชื่อนิติกร

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Wassana Chanthawong 2011: Study and Simulation of Aircraft Landing Gear Strength Behavior in Various Landing Conditions. Master of Engineering (Aerospace Engineering), Major Field: Aerospace Engineering, Department of Aerospace Engineering. Thesis Advisor: Wing Commander Nattapol Niyomthai, Ph.D. 94 pages.

The landing gear is one of the important components of the aircraft structure, especially when the aircraft is landing. This research aims to study, analyze and compare the critical areas between Tricycle and Tail dragger landing gear of light aircraft that will affect with both landing gear structures when landing in various landing condition reference from FAR 23 - Appendix C: Basic landing condition.

The researcher had statically analyzed both of landing conditions with limit load and ultimate load by used Finite Element Analysis Software method, Which was totally analyzed in 10 cases (6 cases for Tricycle and 4 for Tail dragger).

The results showed that, the highest stress occurred at the corner and lower root of the strut. For Tricycle landing gear, the landing conditions that had the most influential was level landing with nose wheel just clear of ground with ultimate load. For Tail dragger landing gear, the level landing and tail down landing were most influential. In addition, the comparison in landing ability of both landing gears in the same landing condition, tail down landing or landing with highest angle of attack, found that the Tricycle landing gear had a good landing ability than Tail dragger gear, although landing with only main gear.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ทุกประการ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย ดังนี้

ขอขอบพระคุณนาวาอากาศโท ดร.ณัฐพล นิยมไทย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลักที่ให้ความรู้ คำปรึกษาแนะนำในการทำงานวิจัยตลอดจนการตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์จนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ด้วยความกรุณามาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์นาวาอากาศเอก ดร.สมชาย หาญกล้า ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำแนะนำข้อเสนอแนะและความรู้อันเป็นประโยชน์ยิ่งต่องานวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ และอาจารย์โรงเรียนนายเรืออากาศทุกท่าน ที่ได้อบรมสั่งสอนให้คำแนะนำและมอบความรู้อันมีค่ายิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

และขอขอบคุณเพื่อนๆทุกท่านที่คอยช่วยเหลือสนับสนุน ให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้เสมอมา

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับครอบครัวซึ่งเป็นที่ยกย่อง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพรักทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา

วาสนา จันทวงษ์

เมษายน 2554

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	14
อุปกรณ์	14
วิธีการ	15
ผลและวิจารณ์	43
ผล	43
วิจารณ์	56
สรุปและข้อเสนอแนะ	62
สรุป	62
ข้อเสนอแนะ	64
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	65
ภาคผนวก	67
ภาคผนวก ก ภารกิจของชุดขาล้อแบบขาสามล้อและแบบลากหาง	68
ภาคผนวก ข ค่าความเค้นสูงสุด	71
ภาคผนวก ค ขนาดของชุดขาล้อแบบขาสามล้อและแบบลากหาง	74
ภาคผนวก ง โปรแกรม Solidworks Simulation	83
ภาคผนวก จ ผลการวิเคราะห์เพิ่มเติม	87
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	94

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	เปรียบเทียบคุณสมบัติสมบัติต่าง ๆ ของชุดขาล้อแบบติดตั้งตายตัว และแบบพับเก็บได้	4
2	สมรรถนะของอากาศยานรุ่น Cessna 150	21
3	สมรรถนะของอากาศยานรุ่น Cessna 170	22
4	คุณสมบัติเชิงกลของ Steel AISI 4340	30
ตารางผนวกที่		
ก1	ภารกรรมการลงจอดของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ	69
ก2	ภารกรรมการลงจอดของชุดขาล้อแบบลากหาง	70
ข1	ค่าความเค้นสูงสุดของชุดขาล้อทั้งสองแบบ	72
ข2	Margin of Safety ของชุดขาล้อทั้งสองแบบ	73

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างส่วนประกอบหลักของชุดขาล้อแบบติดตั้งตายตัว	1
2	รูปแบบการจัดวางชุดขาล้อ	4
3	การแบ่งประเภทของล้อตามจำนวนล้อและการจัดวาง	6
4	FAR 23 Appendix C: Basic landing conditions	8
5	ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ขาล้อ จากการศึกษาของ Morrison, Neff และ Zahraee	13
6	แบบจำลองแผ่นบางเจาะรูและการกำหนดจุดยึดและการกรรม	16
7	แบบจำลองชุดมือหมุน	19
8	การกำหนดการกรรมและจุดยึดของชุดมือหมุน	19
9	อากาศยานรุ่น Cessna 150	20
10	อากาศยานรุ่น Cessna 170	21
11	แบบจำลองขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสากล	28
12	แบบจำลองขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสากล	29
13	แบบจำลองขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง	29
14	แบบจำลองขาล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง	30
15	การกำหนดจุดยึดของขาล้อหลัก	31
16	การกำหนดจุดยึดของขาล้อหน้า	32
17	การกำหนดจุดยึดของขาล้อหาง	32
18	ทิศทางการกรรมที่กระทำกับขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสากล กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ	33
19	ทิศทางการกรรมที่กระทำกับขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสากล กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ	34
20	ทิศทางการกรรมที่กระทำกับล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสากล กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้น	35

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
21	ทิศทางการกรรมที่กระทำกับลื้อหลักของชุดขาลื้อแบบขาสามลื้อ กรณีลง จุดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น	35
22	ทิศทางการกรรมที่กระทำกับลื้อหลักของชุดขาลื้อแบบลากหาง กรณีลง จุดในลักษณะที่ลื้อหน้าสัมผัสพื้นพร้อมกัน	36
23	ทิศทางการกรรมที่กระทำกับลื้อหลักของชุดขาลื้อแบบลากหาง กรณีลง จุดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น	37
24	ทิศทางการกรรมที่กระทำกับลื้อหางของชุดขาลื้อแบบลากหาง กรณีลง จุดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น	37
25	เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า	39
26	เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า	39
27	เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งแบบพื้นที่ผิวสามเหลี่ยม	40
28	เอลิเมนต์ลำดับที่สองแบบพื้นที่ผิวที่สามเหลี่ยม	40
29	กราฟแสดงการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม	41
30	ความเค้นที่ขาลื้อหลักของชุดขาลื้อแบบขาสามลื้อ กรณีลงจุดในลักษณะ ที่ลื้อหน้าและลื้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับ ขาลื้อด้วยการกรรมจำกัด	44
31	ความเค้นที่ขาลื้อหน้าของชุดขาลื้อแบบขาสามลื้อ กรณีลงจุดในลักษณะ ที่ลื้อหน้าและลื้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับ ขาลื้อด้วยการกรรมจำกัด	44
32	ความเค้นที่ขาลื้อหลักของชุดขาลื้อแบบขาสามลื้อ กรณีลงจุดในลักษณะ ที่ลื้อหน้าและลื้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับ ขาลื้อด้วยการกรรมสูงสุด	45
33	ความเค้นที่ขาลื้อหน้าของชุดขาลื้อแบบขาสามลื้อ กรณีลงจุดในลักษณะ ที่ลื้อหน้าและลื้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับ ขาลื้อด้วยการกรรมสูงสุด	46

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
34	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมจำกัด	47
35	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมสูงสุด	48
36	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมจำกัด	49
37	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมสูงสุด	50
38	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันด้วยการกรรมจำกัด	51
39	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันด้วยการกรรมสูงสุด	52
40	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมจำกัด	53
41	ความเค้นที่ล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมจำกัด	54
42	ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมสูงสุด	55
43	ความเค้นที่ล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมสูงสุด	55
44	เปรียบเทียบพื้นที่วิกฤตที่ขาล้อหลักจากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง	61

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ค1 ขนาดขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ	75
ค2 ขนาดล้อและยางของขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ	76
ค3 ขนาดขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ	77
ค4 ขนาดล้อและยางของขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ	78
ค5 ขนาดขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง	79
ค6 ขนาดล้อและยางของขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง	80
ค7 ขนาดขาล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง	81
ค8 ขนาดล้อและยางของขาล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง	82
จ1 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยภาระกรรมจำกัด	89
จ2 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยภาระกรรมสูงสุด	90
จ3 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยภาระกรรมจำกัด	91
จ4 ความเค้นที่ขาล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยภาระกรรมจำกัด	91
จ5 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยภาระกรรมสูงสุด	92
จ6 ความเค้นที่ขาล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยภาระกรรมสูงสุด	93

การศึกษาและจำลองพฤติกรรมด้านความแข็งแรงของชุดขาล้อในการลงจอดต่าง ๆ

Study and Simulation of Aircraft Landing Gear Strength Behavior in Various Landing Conditions

คำนำ

ในปัจจุบัน อุตสาหกรรมการบินมีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าได้มีการทำงานวิจัยและพัฒนาเพื่อรองรับอย่างแพร่หลายแล้วก็ตาม แต่ก็พบว่ามีบางด้านที่ทีมงานวิจัยรองรับค่อนข้างจำกัด โครงสร้างอากาศยานเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งของอากาศยานที่จะต้องศึกษาและทำการวิจัย เพื่อให้เกิดความรู้ความเข้าใจอย่างแท้จริง เพื่อที่จะสามารถออกแบบและพัฒนา รวมไปถึงการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ชุดขาล้อเป็นส่วนประกอบสำคัญส่วนหนึ่งของโครงสร้างอากาศยาน ทำหน้าที่ช่วยรองรับแรงกระแทกที่เกิดขึ้นในขณะที่อากาศยานทำการลงจอด รวมถึงช่วยให้อากาศยานบินขึ้นได้ อีกทั้งยังช่วยรองรับอากาศยานในขณะที่อยู่บนพื้นดิน

อาจจะกล่าวได้ว่า ชุดขาล้อเป็นส่วนประกอบหนึ่งของโครงสร้างอากาศยานที่มีความวิกฤต โดยเฉพาะเมื่ออากาศยานทำการลงจอด เนื่องจากในขณะที่ลงจอดภาระกรรมทั้งหมดที่เกิดขึ้นกระทำกับชุดขาล้อโดยตรง ซึ่งภาระกรรมทั้งหมดนี้จะถูกส่งผ่านไปยังส่วนประกอบต่างๆของชุดขาล้อ หากอากาศยานทำการลงจอดแบบกระแทกอย่างรุนแรงแล้ว ภาระกรรมที่กระทำกับส่วนประกอบต่างๆของชุดขาล้อก็จะรุนแรงขึ้นและอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้นกับชุดขาล้อได้

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นในการศึกษาถึงพฤติกรรมของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ (Tricycle landing gear) และแบบลากหาง (Tail dragger landing gear) ของอากาศยานเบาเมื่อต้องลงจอดด้วยสภาพที่แตกต่างกันไปตามมาตรฐานการลงจอดของ FAR 23 Appendix C : Basic landing conditions เพื่อวิเคราะห์ เปรียบเทียบถึงลักษณะสำคัญของชุดขาล้อทั้งสองแบบ อีกทั้งเพื่อศึกษาถึงพื้นที่ของชุดขาล้อที่จะเกิดความเสียหายขึ้นเป็นอันดับแรกหรือพื้นที่ที่เกิดความเสียหายมากที่สุดที่จะส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงกับโครงสร้างของชุดขาล้อ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อจำลองรูปแบบการลงจอดของชุดขาล้ออากาศยานเบา ได้แก่ ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ และแบบลากหางด้วยวิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์

2. เพื่อศึกษา วิเคราะห์ถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่วิกฤตของชุดขาล้อที่จะสร้างความเสียหายกับชุดขาล้อทั้งสองแบบ เมื่อลงจอดตามมาตรฐานการลงจอดของ FAR 23 Appendix C : Basic landing conditions ทั้ง 5 กรณี

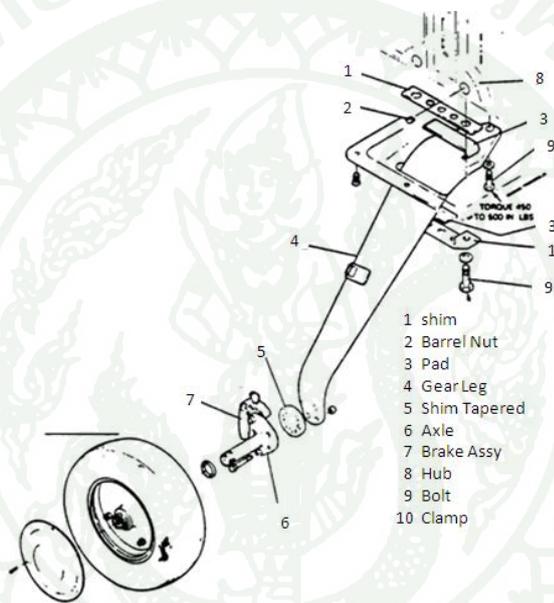
3. เพื่อเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ ด้านพฤติกรรม โครงสร้าง ความแข็งแรงของชุดขาล้อทั้งสองแบบ

ขอบเขตของงานวิจัยนี้ มุ่งวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงความแข็งแรงของโครงสร้างขาล้อของชุดขาล้อทั้ง 2 แบบ โดยใช้วิธีระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ ซึ่งจะพิจารณาเฉพาะการลงจอดตามมาตรฐานของ FAR 23 Appendix C ทั้ง 5 กรณีเท่านั้น เนื่องจากงานวิจัยนี้ เป็นการวิจัยโดยเปรียบเทียบความแข็งแรงของโครงสร้างชุดขาล้อทั้ง 2 แบบในการลงจอดกรณีเดียวกัน ซึ่งการลงจอดตามมาตรฐานของ FAR 23 Appendix C ทำให้ทราบถึงข้อแตกต่างของลักษณะการลงจอดของชุดขาล้อทั้ง 2 แบบได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังมีรายละเอียดที่นำไปใช้วิเคราะห์อย่างครบถ้วน เช่น ทิศทางและการคำนวณหาภาระกรรม เป็นต้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลการวิจัยได้ ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงพิจารณาเพียง 5 กรณีนี้เท่านั้น โดยไม่พิจารณากรณีอื่นที่มีใน FAR 23 อาทิ การลงจอดโดยมีภาระกรรมกระทำด้านข้าง (Side load conditions) การลงจอดด้วยล้อหลักข้างเดียว (One wheel landing conditions) และการลงจอดโดยการห้ามล้อ (Braked roll conditions) เป็นต้น

การตรวจเอกสาร

1. ลักษณะชุดขาล้อของอากาศยาน

ชุดขาล้อ (Landing gears) คือ ส่วนล้อของอากาศยานที่จะใช้สำหรับอำนวยความสะดวกในการขึ้นและลงของอากาศยานทั้งบนพื้นทางขับ และทางวิ่งขึ้นลง ดังภาพที่ 1 ที่แสดงส่วนประกอบของชุดขาล้อหลักที่ใช้กับอากาศยานเบา ได้แก่ ลูกล้อและขาล้อแบบติดตั้งตายตัวซึ่งไม่สามารถพับเก็บได้



ภาพที่ 1 โครงสร้างส่วนประกอบหลักของชุดขาล้อแบบติดตั้งตายตัว

ที่มา: Roskam (1985)

ลักษณะของชุดขาล้อสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภท คือ แบบติดตั้งตายตัว (Fixed gear) และแบบที่สามารถพับเก็บได้ (Retractable gear) โดยอากาศยานที่บินด้วยความเร็วมากกว่า 150 kts มักจะเลือกใช้ชุดขาล้อแบบพับเก็บได้เนื่องจากสามารถลดแรงต้านทานที่เกิดขึ้นกับชุดขาล้อได้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติของชุดขาล้อแบบติดตั้งตายตัวและแบบที่สามารถพับเก็บได้ ข้อดีของชุดขาล้อแบบติดตั้งตายตัวคือ มีน้ำหนักที่เบา ไม่มีความซับซ้อนและแทบจะไม่ต้องทำการซ่อมบำรุงรักษา แต่ข้อเสียคือชุดขาล้อแบบนี้ทำให้มีแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์สูงมากขณะที่ทำการบิน ส่วนชุดขาล้อแบบที่สามารถพับเก็บได้มีข้อดีคือ มีแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์น้อยกว่า

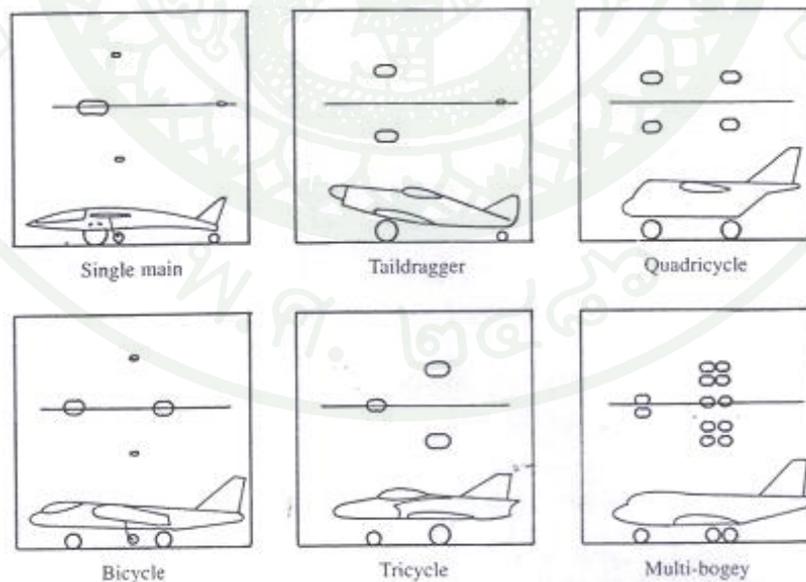
ข้อเสียคือมีน้ำหนักมากกว่า โครงสร้างของชุดขาล้อมีความซับซ้อนมากกว่า อีกทั้งยังมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงรักษาด้วย

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติต่างๆของชุดขาล้อแบบติดตั้งตายตัวและแบบพับเก็บได้

Gear Type	Fixed Gear	Retractable Gear
Characteristics :		
Aerodynamic drag	High	Minimal
Weight	Low	High
Complexity and cost	Low	High
Maintenance cost	Insignificant	Significant

ที่มา: Roskam (1985)

การจัดวางรูปแบบของชุดขาล้อ สามารถเลือกการจัดวางจากที่มีใช้โดยทั่วไป 6 รูปแบบ ดังแสดงในภาพที่ 2 โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 2 รูปแบบการจัดวางชุดขาล้อ

ที่มา: Raymer (1999)

1. ชุดขาล้อแบบมีล้อหลักเดี่ยว (Single main gear)

เป็นรูปแบบที่ใช้กับเครื่องบิน เพราะเป็นแบบที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน ขาล้อสามารถจัดวางให้อยู่ในตำแหน่งด้านหน้าหรือด้านหลังของจุดศูนย์กลางถ่วงของอากาศยานก็ได้

2. ชุดขาล้อแบบจักรยาน (Bicycle landing gear)

มีล้อหลักสองล้อติดตั้งที่ด้านหน้าและด้านหลังลักษณะคล้ายจักรยาน และมีล้อเล็ก ๆ ติดที่ด้านข้างเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศยานล้ม ซึ่งอากาศยานที่มีขาล้อแบบนี้จะต้องวิ่งขึ้นและลงจอดในลักษณะที่ลำตัวขนานกับพื้น เหมาะสำหรับอากาศยานที่มีแรงยกสูงในขณะที่มีมุมปะทะต่ำ หรือใช้กับอากาศยานที่มีรูปทรงคล้ายหัวลูกศรและปีกกว้าง

3. ชุดขาล้อแบบลากหาง (Tail dragger landing gear)

มีล้อหลักอยู่ด้านหน้าสองล้อและมีล้อช่วยติดอยู่ที่ด้านท้าย จุดศูนย์กลางถ่วงจะอยู่ที่ด้านหลังล้อหน้า เป็นรูปแบบขาล้อที่มีการใช้กันมากในอดีต โดยส่วนมากแล้วอากาศยานที่ติดตั้งล้อหางเป็นอากาศยานรุ่นเก่า ซึ่งในปัจจุบันนี้ การติดตั้งล้อที่ตำแหน่งนี้ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากการบังคับอากาศยานในขณะที่อยู่บนพื้นดินกระทำได้ยาก

4. ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ (Tricycle landing gear)

เป็นรูปแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากมีล้อหลักอยู่ด้านหลังจุดศูนย์กลางถ่วง และมีล้อหน้าอยู่หน้าจุดศูนย์กลางถ่วง ทำให้อากาศยานมีความสมดุลขณะวิ่งอยู่บนพื้นทางขับ สามารถเลี้ยวได้ในมุมที่แคบโดยล้อหน้าไม่สิ้นไถลออกนอกพื้นทางขับ ชุดขาล้อแบบนี้ยังเพิ่มวิสัยทัศน์ทางด้านหน้าของอากาศยาน อีกทั้งยังทำให้อากาศยานวางตัวอยู่ในแนวระดับเหมาะสำหรับการบรรทุกผู้โดยสารและการบรรทุกสัมภาระ

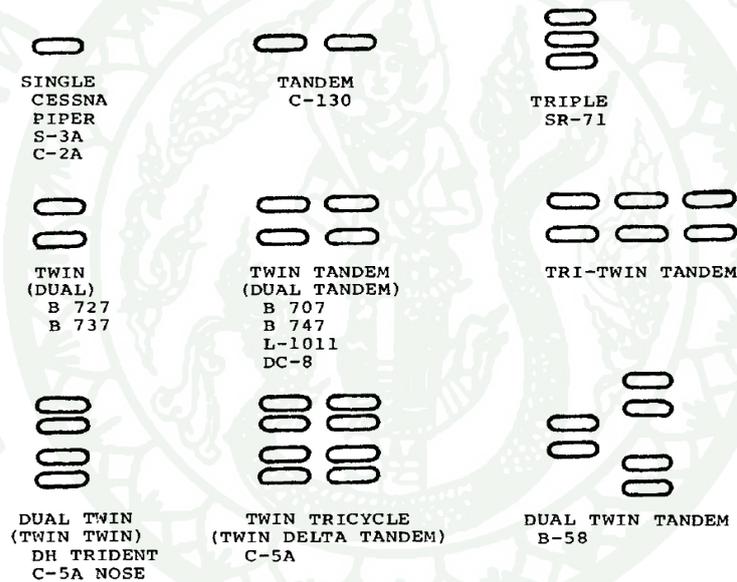
5. ชุดขาล้อแบบสี่เหลี่ยม (Quadricycle landing gear)

มีลักษณะคล้ายคลึงกับชุดขาล้อแบบจักรยานแต่มีสี่ล้อ ชุดขาล้อแบบนี้สามารถทำให้พื้นลำตัวของอากาศยานอยู่ต่ำมาก เหมาะสำหรับการบรรทุก

6. ชุดขาล้อแบบหลายล้อ (Multi-bogey)

เป็นรูปแบบที่มีล้อตั้งแต่ 2 - 4 ล้อหรือมากกว่า อยู่ในแต่ละตำแหน่งที่มีการวางขาล้อ ซึ่งจะใช้สำหรับอากาศยานที่มีน้ำหนักมาก และโดยส่วนมากแล้วล้อหน้าก็จะเป็นแบบล้อคู่ เพื่อความปลอดภัยในกรณียางแบน

ในรูปแบบการจัดวางชุดขาล้อแต่ละแบบที่ได้กล่าวถึงนั้น ล้อแต่ละตำแหน่งสามารถที่จะมีจำนวนล้อได้มากกว่าหนึ่งล้อขึ้นอยู่กับน้ำหนักของอากาศยาน โดยสามารถแบ่งประเภทตามจำนวนล้อและการจัดวางดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การแบ่งประเภทของล้อตามจำนวนล้อและการจัดวาง

ที่มา: Currey (1988)

2. ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์

การวิเคราะห์ปัญหาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ แบ่งกระบวนการในการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ (ปราโมทย์และคณะ, 2552)

2.1 กระบวนการขั้นต้น (Pre-processing)

เป็นการสร้างรูปทรงเรขาคณิตของปัญหาแล้วแบ่งรูปทรงนั้นๆออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ ซึ่งเอลิเมนต์เหล่านี้จะเชื่อมต่อกันที่จุดต่อใดๆ (node) บนผิวของรูปทรงเรขาคณิตนั้นๆ จึงก่อให้เกิดรูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element model) ที่ใกล้เคียงของจริงมากที่สุด

2.2 กระบวนการวิเคราะห์ (Analysis)

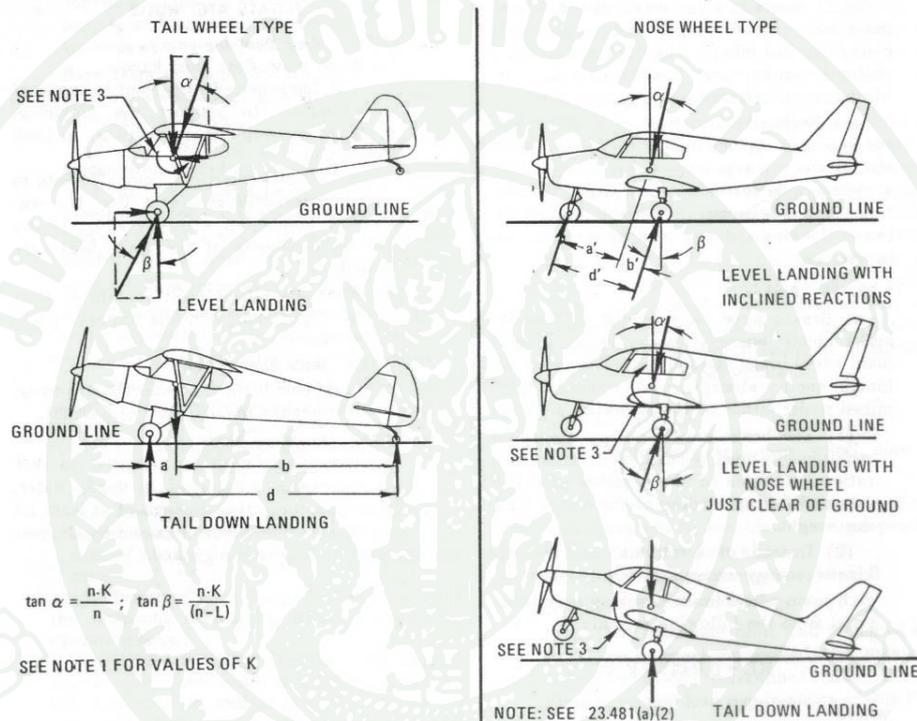
หลังจากได้สร้างรูปแบบข้อมูลไฟไนต์เอลิเมนต์ และกำหนดเงื่อนไข ขอบเขต ข้อมูลอื่นๆที่จำเป็นแล้ว ขั้นตอนนี้เป็นกรนำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนแรกมาวิเคราะห์เพื่อหาผลลัพธ์ โดยในกระบวนการนี้เป็นการปล่อยให้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ผลให้ หากปัญหานั้นมีขนาดใหญ่อาจใช้เวลานานในการคำนวณ แต่ถ้าปัญหานั้นมีขนาดไม่ใหญ่นักเวลาที่ใช้ในการคำนวณจะค่อนข้างสั้น

2.3 กระบวนการขั้นท้าย (Post – processing)

หลังจากกระบวนการวิเคราะห์เสร็จสิ้นแล้ว ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นไม่ว่าจะเป็นค่าการเสียรูปตามจุดต่อต่างๆ รวมทั้งค่าที่สำคัญอื่นๆที่เกิดขึ้นในแต่ละเอลิเมนต์ จะถูกคำนวณออกมาเป็นจำนวนมากในรูปแบบของตัวเลข การพลอตตัวเลขเหล่านี้ออกเป็นระดับสีจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ผู้ใช้งานเข้าใจถึงปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว

3. เงื่อนไขการลงจอด

การลงจอดโดยอาศัยล้อหน้าหรือล้อหาง เป็นรูปแบบพื้นฐานในการลงจอดของอากาศยาน เปรียบตามมาตรฐานของ FAR 23 – Appendix C: Basic landing conditions ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งได้นำมาพิจารณาหาการกระทำกับขาล้อขณะลงจอดตามเงื่อนไขการลงจอดดังต่อไปนี้



ภาพที่ 4 FAR 23 Appendix C: Basic landing conditions

ที่มา: Pazmany (1986)

3.1 การหาการกระทำสำหรับชุดขาล้อแบบขาสามล้อ (Tricycle landing gear)

3.1.1 กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ (Level landing with inclined reaction) สามารถหาการกระทำที่ล้อหลักได้จากสมการที่ 1 และ 2

$$V_r = \frac{(n-L)Wa'}{d'} \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (1)$$

$$D_r = \frac{KnWa'}{d'} \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (2)$$

ส่วนการกรรมที่ล้อหน้า หาได้จากสมการ 3 และ 4

$$V_f = \frac{(n-L)Wb'}{d'} \quad (3)$$

$$D_f = \frac{KnWb'}{d'} \quad (4)$$

3.1.2 กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้น (Level landing with Nose wheel just clear of ground) สามารถหาการกรรมที่ล้อหลักได้จากสมการที่ 5 และ 6

$$V_r = (n-L)W \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (5)$$

$$D_r = KnW \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (6)$$

ส่วนการกรรมที่ล้อหน้า หาได้จากสมการ 7 และ 8

$$V_f = 0 \quad (7)$$

$$D_f = 0 \quad (8)$$

3.1.3 กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น (Tail down landing) จะได้การกรรมที่กระทำกับล้อหลักตามสมการ 9 และ 10

$$V_r = (n-L)W \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (9)$$

$$D_r = 0 \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (10)$$

ส่วนการกรรมที่ล้อหน้า หาได้จากสมการ 11 และ 12

$$V_f = 0 \quad (11)$$

$$D_f = 0 \quad (12)$$

3.2 การหาการกรรมสำหรับชุดขาล้อแบบลากหาง (Tail dragger landing gear)

3.2.1 กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน (Level landing) สามารถหาการกรรมที่ล้อหลักได้ตามสมการ 13 และ 14

$$V_r = (n - L)W \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (13)$$

$$D_r = KnW \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (14)$$

ส่วนการกรรมที่ล้อหาง หาได้จากสมการ 15 และ 16

$$V_f = 0 \quad (15)$$

$$D_f = 0 \quad (16)$$

3.2.2 กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น (Tail down landing) สามารถหาการกรรมที่ล้อหลักได้ตามสมการ 17 และ 18

$$V_r = \frac{(n - L)Wb}{d} \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (17)$$

$$D_r = 0 \quad (\text{ทั้งสองล้อ}) \quad (18)$$

ส่วนการกรรมที่ล้อยาง หาได้จากสมการ 19 และ 20

$$V_f = \frac{(n-L)Wa}{d} \quad (19)$$

$$D_f = 0 \quad (20)$$

ในกรณีที่ชุดขาล้อทั้งสองแบบมีการกรรมที่กระทำในแนวเฉียง สามารถหามุมที่การกรรมกระทำได้จาก

$$\tan \beta = \frac{n.K}{n-L} \quad (21)$$

โดยที่

- V_r = แรงกระทำในแนวตั้งที่กระทำกับล้อหลัก
- D_r = แรงต้านที่กระทำกับล้อหลัก
- V_f = แรงกระทำในแนวตั้งที่กระทำกับล้อหน้าหรือล้อยาง
- D_f = แรงต้านที่กระทำกับล้อหน้าหรือล้อยาง
- L = สัมประสิทธิ์แรงยกปีก (Ratio of the assumed wing lift to the airplane weight) มีค่าไม่เกิน 0.667
- n = limit load factor under FAR 23.473 (d), (f) and (g)
- K = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน โดย $K = 0.25$ สำหรับน้ำหนัก $\leq 3,000$ lbs และ $K = 0.33$ สำหรับน้ำหนัก $\geq 6,000$ lbs
- W = น้ำหนัก
- a = ระยะห่างระหว่างล้อหลักกับจุดศูนย์กลางถ่วงอากาศยานของขาล้อแบบลากหาง
- b = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงอากาศยานกับล้อยางของชุดขาล้อแบบลากหาง
- d = ระยะห่างระหว่างล้อหลักกับล้อยางของชุดขาล้อแบบลากหาง
- a' = ระยะห่างระหว่างล้อหน้ากับจุดศูนย์กลางถ่วงอากาศยานของขาล้อแบบขาสวมล้อ
- b' = ระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางถ่วงอากาศยานกับล้อหลักของขาล้อแบบขาสวมล้อ
- d' = ระยะห่างระหว่างล้อหลักกับล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสวมล้อ

จากสมการข้างต้น เป็นการหาภาระกรรมที่กระทำกับชุดขาตั้งทั้งสองแบบตามมาตรฐานการลงจอดของ FAR 23 – Appendix C: Basic Landing Conditions ซึ่งงานวิจัยนี้มุ่งพิจารณาการลงจอดของชุดขาตั้งทั้งสองแบบเพียง 5 เงื่อนไขเท่านั้นตาม FAR 23 – Appendix C โดยพิจารณาทั้งการลงจอดด้วยภาระกรรมจำกัด (Limit load) และภาระกรรมสูงสุด (Ultimate load) ซึ่งค่าภาระกรรมสูงสุดนี้สามารถหาได้จากการนำภาระกรรมจำกัดคูณด้วยค่า Safety Factor มีค่าเท่ากับ 1.5

$$\text{ภาระกรรมสูงสุด} = \text{ภาระกรรมจำกัด} \times \text{Safety Factor} \quad (22)$$

ค่า Safety Factor 1.5 เป็นค่าที่นิยมใช้มาตั้งแต่ ค.ศ. 1930 เป็นอัตราส่วนระหว่าง Ultimate tensile load กับ Yield load ของอลูมิเนียมอัลลอย 24ST (Raymer, 1999)

ในงานด้านการออกแบบอากาศยานนั้น อาจกล่าวถึงค่า Margin of Safety (M.S.) แทนค่า Safety Factor ซึ่งค่าสามารถหาได้จากสมการ (Nui, 1999)

$$\text{Margin of Safety (M.S.)} = \frac{F}{(S.F. \times f)} - 1 \geq 0 \quad (23)$$

โดยที่

F = Allowable Stress หรือ Ultimate Strength

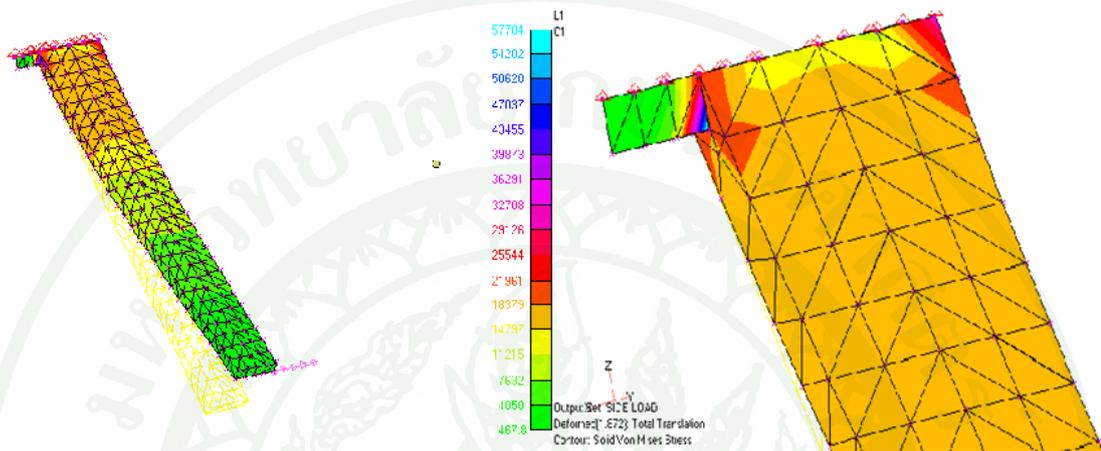
f = Applied Stress

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Morrison, Neff และ Zahraee ศึกษาถึงการเกิดความเค้น (Stress) การเสียรูป (Deformation) ของชุดขาตั้งหลักชนิดขาแข็ง (Solid – Spring landing gear) ของอากาศยานเบารุ่น Berkut โดยการวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และใช้การวิเคราะห์ด้วยการคำนวณโดยอาศัยโปรแกรม Maple V ช่วยในการคำนวณ

ผลการศึกษาพบว่า ค่าความเค้นดัดสูงสุด (Highest bending stress) ที่ได้จากการคำนวณมีค่า 86,309 psi ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่า Yield stress (42,000 psi) ของอลูมิเนียม โดยเกิดความเค้นดัดสูงสุด

บริเวณด้านบนของโคนขาตั้งตรงจุดยึดติดกับตัวอากาศยาน ส่วนผลที่ได้จากการศึกษาด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่า ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 89,376 psi และบริเวณที่เกิดความเค้นสูงสุดคือ พื้นที่เล็กๆบริเวณมุมด้านบนของโคนขาตั้ง ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ความเค้นที่เกิดขึ้นที่ขาตั้ง จากการศึกษานี้ของ Morrison, Neff และ Zahraee

นอกจากนี้ จากการคำนวณยังทำให้ทราบถึงค่าการเปลี่ยนแปลง (Deflection) ที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 6.008 inches เมื่อ design load factor ที่ 2.05 g

อุปกรณ์และวิธีการ

ในหัวข้อนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกกล่าวถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย และส่วนที่สองกล่าวถึงวิธีการและขั้นตอนการวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

อุปกรณ์

1. ข้อมูลของชุดขาล้อแบบขาสามล้อและแบบลากหาง
2. โปรแกรม Solidworks Simulation 2010
3. เครื่องคอมพิวเตอร์แบบพกพา (Intel Core 2 Duo T5250) ความเร็ว 2.39 กิกะเฮิรตซ์ (GHz)

วิธีการ

ในการศึกษาวิจัย ผู้วิจัยได้ทำการศึกษา รวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการวิจัยดังนี้

1. การทดสอบโปรแกรม

โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย คือ Solidworks Simulation 2010 การทดสอบโปรแกรมมีขึ้นเพื่อสร้างความมั่นใจในความถูกต้องและความมีเสถียรภาพในการคำนวณของโปรแกรม ซึ่งความจริงแล้วก่อนที่นำโปรแกรมออกสู่ตลาดได้นั้น บริษัทผู้ผลิตจะต้องทดสอบโปรแกรมมาเป็นอย่างดี ดังนั้นประโยชน์โดยแท้จริงคือ ให้ผู้ใช้ได้ศึกษาการใช้งานของโปรแกรมให้มีความถูกต้องตลอดจนฝึกฝนและสร้างประสบการณ์จนเกิดความมั่นใจ ก่อนที่จะนำโปรแกรมนั้นๆ ไปวิเคราะห์กับปัญหาในงานวิจัยด้านต่างๆ (ภาครณ, 2551)

1.1 การวิเคราะห์แผ่นบางเจาะรู (Rectangular Hollow plate)

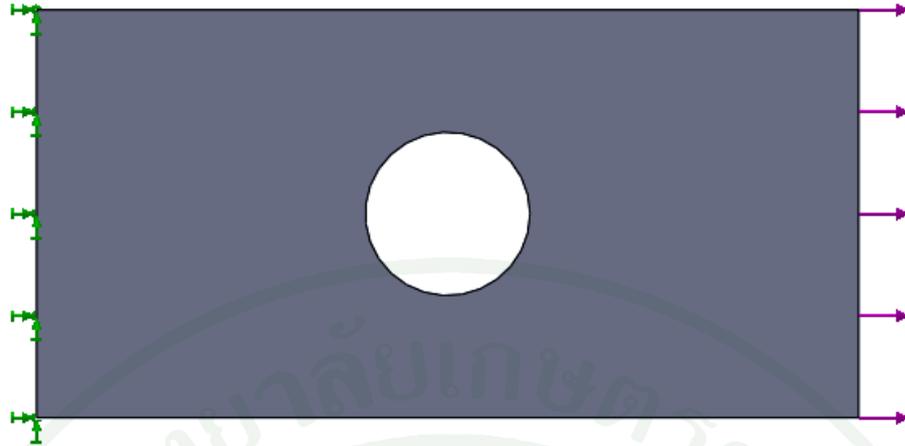
เป็นการวิเคราะห์การกระทำให้กระทำกับแผ่นบางเจาะรูแบบสถิตย์ (Static) คือการกระทำที่มีขนาดและทิศทางคงที่ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังนี้

1.1.1 การสร้างแบบจำลองแผ่นบางเจาะรู

กำหนดรูปร่างและขนาดของแบบจำลองที่ใช้ในการทดสอบ โดยให้แบบจำลองมีขนาด 200 mm x 100 mm x 10 mm และเจาะรูตรงกึ่งกลางแผ่นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 mm กำหนดวัสดุเป็นเหล็ก (Steel) AISI 304

1.1.2 กำหนดการกระทำที่กระทำและจุดยึด

กำหนดให้มีแรงดึงที่ส่วนปลายของแผ่นบางขนาด 111,210 N และอีกด้านหนึ่งของแผ่นบางกำหนดให้เป็นจุดยึดแบบ fixed ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 แบบจำลองแผ่นบางเจาะรูและการกำหนดจุดยึดและภาระกรรม

1.1.3 การสร้างเอลิเมนต์

ในการเลือกรูปแบบของเอลิเมนต์ที่เหมาะสม ได้กำหนดให้เป็นแบบอัตโนมัติ โดยให้โปรแกรมเป็นผู้เลือกรูปแบบที่เหมาะสมที่สุด และกำหนดขนาดเอลิเมนต์เป็นแบบละเอียดที่สุดมีขนาด 2.86 mm

1.1.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม

เมื่อโปรแกรมทำการวิเคราะห์เสร็จสิ้นแล้ว ผลของความเค้นสูงสุดที่ได้เท่ากับ 417.1 MPa

1.1.5 การเปรียบเทียบผลที่ได้จากโปรแกรมกับการคำนวณ

สมการคำนวณเพื่อหาความเค้นสูงสุดของแผ่นบางเจาะรู มีการหาดังนี้

$$\sigma_n = \frac{P}{(W-D) \times T} \quad (24)$$

$$K_n = 2 + \left(1 - \frac{D}{W}\right)^3 \quad (25)$$

$$\sigma_{\max} = K_n \times \sigma_n \quad (26)$$

โดยที่ σ_n = ความเค้น (normal stress)
 K_n = Stress concentration factor
 σ_{\max} = ความเค้นสูงสุด (Maximum principal stress)
 P = แรงดึง (Tensile force)
 W = ความกว้างแผ่นบาง
 T = ความหนาแผ่นบาง
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางรู

จากสมการที่ 24 จะได้ดังนี้

$$\sigma_n = \frac{111,210 \text{ N}}{(100 \text{ mm} - 40 \text{ mm}) \times 10 \text{ mm}}$$

$$\sigma_n = 185.35 \text{ MPa}$$

จากสมการที่ 25 จะได้

$$K_n = 2 + \left(1 - \frac{40 \text{ mm}}{100 \text{ mm}}\right)^3$$

$$K_n = 2.216$$

จากสมการที่ 26 จะได้

$$\sigma_{\max} = 2.216 \times 185.35 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\max} = 410.74 \text{ MPa}$$

ผลการคำนวณหาความเค้นสูงสุดมีค่าเท่ากับ 410.74 MPa จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด โดยเปรียบเทียบค่าความแตกต่างระหว่างคำตอบที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมและคำตอบจากทฤษฎี ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$\text{error stress} = \frac{|\sigma_T - \sigma_S|}{\sigma_T} \times 100 \% \quad (27)$$

โดยที่ error stress = ค่าความผิดพลาดของความเค้นสูงสุด
 σ_S = ค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากโปรแกรม
 σ_T = ค่าความเค้นสูงสุดที่ได้จากทฤษฎี

จะได้

$$\text{error stress} = \frac{|410.74 - 417.1|}{410.74} \times 100 \% = 1.55 \%$$

จะเห็นว่า ผลจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมมีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณจากทฤษฎี

1.2 การวิเคราะห์ชุดมือหมุน (Locking arm)

เพื่อให้มั่นใจว่าผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมได้อย่างถูกต้องถูกวิธี ก่อนการใช้งานจึงได้ศึกษาวิธีการใช้จากคู่มือการใช้งานของโปรแกรม และได้ทดสอบการวิเคราะห์ผลหลังจากการศึกษาคู่มือการใช้งาน โดยในการทดสอบนี้ได้เลือกการวิเคราะห์ชุดมือหมุน ซึ่งขั้นตอนในการวิเคราะห์นี้ได้ทำตามขั้นตอนการวิเคราะห์จากคู่มือการใช้งานที่ได้ศึกษา มีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

1.2.1 การสร้างแบบจำลองชุดมือหมุน

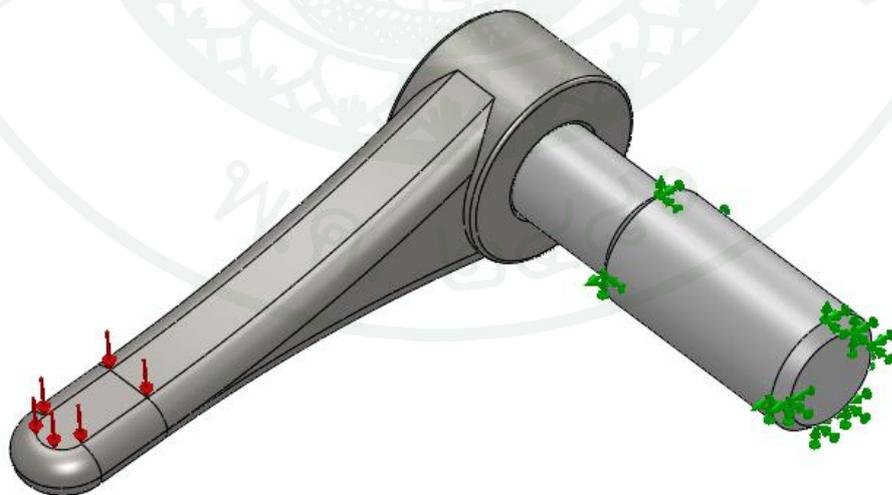
ชุดมือหมุนประกอบไปด้วยมือหมุนที่ทำจากวัสดุ Alloy Steel และแกนหมุนที่ทำจากวัสดุ Chrome Stainless Steel ซึ่งแบบจำลองนี้ได้มาจากตัวอย่างที่มีอยู่ในโปรแกรมดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 7 แบบจำลองชุดมือหมุน

1.2.2 กำหนดการกระทำที่กระทำและจุดยึด

ทำการจับยึดแน่นที่บริเวณส่วนปลายของแกนหมุน และกำหนดการกระทำที่ด้ามมือหมุนขนาด 10 N/mm^2 ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การกำหนดการกระทำและจุดยึดของชุดมือหมุน

1.2.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดสอบ

เมื่อขั้นตอนการวิเคราะห์เสร็จสิ้นแล้ว ความเค้นที่ได้จากการทดสอบมีค่าเท่ากับ 299.8 MPa และค่าที่ได้จากคู่มือเท่ากับ 307.2 MPa จะเห็นได้ว่าผลจากการทดสอบมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากคู่มือการใช้งานของโปรแกรม โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างเท่ากับ 2.4 %

2. การกำหนดอากาศยานต้นแบบ

อากาศยานเบาต้นแบบที่ได้นำมาใช้เพื่อจำลองเอารูปแบบชุดขาล้อมมาใช้ในงานวิจัย ได้แก่ อากาศยานรุ่น Cessna 150 และ Cessna 170 ซึ่งเป็นอากาศยานต้นแบบที่นำเอารูปแบบชุดขาล้อมมาเป็นแบบจำลองของชุดขาล้อมแบบขาสามล้อและแบบลากหางตามลำดับ

ลักษณะของอากาศยานรุ่น Cessna 150 ที่ได้จำลองเอารูปแบบชุดขาล้อมมาเป็นต้นแบบของชุดขาล้อมแบบขาสามล้อที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 อากาศยานรุ่น Cessna 150

ที่มา: Wikipedia (2553)

สำหรับสมรรถนะของอากาศยานรุ่น Cessna 150 ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมรรถนะของอากาศยานรุ่น Cessna 150

สมรรถนะ	ค่า
น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Kg)	730
ความเร็วสูงสุด (Km/hr)	259
ความเร็วร่อน (Km/hr)	78
อัตราการใช้ (m/s)	3.4

ที่มา: Wikipedia (2553)

ลักษณะของอากาศยานรุ่น Cessna 170 ซึ่งเป็นอากาศยานต้นแบบที่ได้จำลองเอารูปแบบชุดขาล้อมมาเป็นต้นแบบของชุดขาล้อมแบบลากหางที่ใช้ในงานวิจัย ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 อากาศยานรุ่น Cessna 170

ที่มา: Wikipedia (2553)

สำหรับสมรรถนะของอากาศยานรุ่น Cessna 170 ดังที่ได้แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 สมรรถนะของอากาศยานรุ่น Cessna 170

สมรรถนะ	ค่า
น้ำหนักบรรทุกสูงสุด (Kg)	998
ความเร็วสูงสุด (Km/hr)	245
ความเร็วร่อน (Km/hr)	79
อัตราไต่ (m/s)	3.5

ที่มา: Wikipedia (2553)

3. การหาการกระทำได้กับชุดขาล้อทั้งสองแบบ

การหาการกระทำได้กับชุดขาล้อทั้ง 2 แบบในการลงจอดแต่ละเงื่อนไข สามารถที่จะคำนวณหาได้จากสมการที่ 1 – 20 การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆเพื่อใช้ในการคำนวณ มีรายละเอียดดังนี้

$$\text{สัมประสิทธิ์แรงยกปีก (L)} = 0.667$$

$$\text{สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (K)} = 0.25$$

$$\text{Load factor (n)} = 2.67$$

$$\text{น้ำหนักอากาศยาน (m)} = 864 \text{ kg.}$$

$$\text{Safety factor (S.F)} = 1.5$$

ระยะของชุดขาล้อแบบสามล้อ :

$$a' = 1.165 \text{ m.}$$

$$b' = 0.406 \text{ m.}$$

$$d' = 1.572 \text{ m.}$$

ระยะของชุดขาล้อแบบขาล้อ :

$$a = 0.554 \text{ m.}$$

$$b = 5.058 \text{ m.}$$

$$d = 5.61 \text{ m.}$$

หมายเหตุ น้ำหนักของอากาศยาน ได้จากการเฉลี่ยน้ำหนักอากาศยานของต้นแบบทั้งสองลำ เพื่อให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการวิจัย

ค่า Load factor (n) เป็นค่าที่ได้มาจาก FAR 23.473 (d), (f) และ (g) ซึ่งการหาค่า n ตามข้อกำหนดใน (d), (f) นั้นมีความยุ่งยาก เนื่องจากมีหลายปัจจัยที่ใช้ในการคำนวณและการทดสอบเพื่อหาค่า n ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ค่า n เท่ากับ 2.67 ซึ่งได้จากข้อกำหนด (g)

ในการคำนวณหาภาระกรรมนี้ ขอยกตัวอย่างเพื่ออธิบายถึงวิธีการหาภาระกรรมของชุดขาล้อทั้งสองแบบ เพื่อให้มีความเข้าใจในวิธีการคำนวณอย่างคร่าวๆ ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

3.1 การคำนวณหาภาระกรรมของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ

ในการคำนวณหาภาระกรรมที่กระทำกับชุดขาล้อแบบขาสามล้อนี้ จึงขอยกตัวอย่างการคำนวณหาภาระกรรมในกรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงที่กระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

3.1.1 ภาระกรรมที่กระทำกับล้อหลัก

- แรงกระทำในแนวตั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 1

$$V_r = \frac{(n-L)Wa'}{d'} \quad (\text{ทั้งสองล้อ})$$

$$V_r = \frac{(2.67 - 0.667) \times 864 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 1.165 \text{ m}}{1.572 \text{ m}}$$

$$V_r = 12,581.635 \text{ N}$$

$$V_r = 6,290.82 \text{ N} \quad (\text{ต่อล้อ})$$

กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุด

$$V_{r,ul} = V_r \times S.F$$

$$V_{r,ul} = 6,290.82 \text{ N} \times 1.5$$

$$V_{r,ul} = 9,436.23 \text{ N} \quad (\text{ต่อล้อ})$$

แรงเฉียดทาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2

$$D_r = \frac{K_n W a'}{d'} \quad (\text{ทั้งสองล้อ})$$

$$D_r = \frac{0.25 \times 2.67 \times 864 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 1.165 \text{ m}}{1.572 \text{ m}}$$

$$D_r = 4,192.83 \text{ N}$$

$$D_r = 2,096.42 \text{ N} \quad (\text{ต่อล้อ})$$

กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุด

$$D_{r,ul} = D_r \times S.F$$

$$D_{r,ul} = 2,096.42 \text{ N} \times 1.5$$

$$D_{r,ul} = 3,144.62 \text{ N} \quad (\text{ต่อล้อ})$$

3.1.2 ภาระกรรมที่กระทำกับล้อย่น้ำ

- แรงกระทำในแนวตั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$V_f = \frac{(n-L)Wb'}{d'}$$

$$V_f = \frac{(2.67 - 0.667) \times 864 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.406 \text{ m}}{1.572 \text{ m}}$$

$$V_f = 4,384.67 \text{ N}$$

กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุด

$$V_{f,ul} = V_f \times S.F$$

$$V_{f,ul} = 4,384.67 \text{ N} \times 1.5$$

$$V_{f,ul} = 6,577.01 \text{ N}$$

- แรงเสียดทาน สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4

$$D_f = \frac{KnWb'}{d'}$$

$$D_f = \frac{0.25 \times 2.67 \times 864 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.406 \text{ m}}{1.572 \text{ m}}$$

$$D_f = 1,461.19 \text{ N}$$

กรณีลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด

$$D_{f,ul} = D_f \times S.F$$

$$D_{f,ul} = 1,461.19 \text{ N} \times 1.5$$

$$D_{f,ul} = 2,191.79 \text{ N}$$

3.2 ตัวอย่างการคำนวณหาภาระกรรมของชุดขาสื่อแบบลากหาง

การคำนวณหาภาระกรรมที่กระทำกับชุดขาสื่อแบบลากหาง ได้ยกตัวอย่างการคำนวณในกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น เนื่องจากกรณีนี้อาศัยทั้งล้อหลักและล้อหางช่วยในการลงจอด ซึ่งมีรายละเอียดในการคำนวณดังนี้

3.2.1 ภาระกรรมที่กระทำกับล้อหลัก

- แรงกระทำในแนวตั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 17

$$V_r = \frac{(n-L)Wb}{d} \quad (\text{ทั้งสองล้อ})$$

$$V_r = \frac{(2.67 - 0.667) \times 864 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 5.058 \text{ m}}{5.61 \text{ m}}$$

$$V_r = 15,306.63 \text{ N}$$

$$V_r = 7,653.32 \text{ N} \quad (\text{ต่อล้อ})$$

กรณีลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด

$$V_{r,ul} = V_r \times S.F$$

$$V_{r,ul} = 7,653.32 \text{ N} \times 1.5$$

$$V_{r,ul} = 11,479.98 \text{ N} \quad (\text{ต่อล้อ})$$

- แรงเสียดทาน การลงจอดในกรณีนี้ไม่มีแรงเสียดทานเมื่อยางสัมผัสพื้นเกิดขึ้น

3.2.2 การกระทำที่กระทำกับล้อหาง

- แรงกระทำในแนวตั้ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 19

$$V_f = \frac{(n-L)Wa}{d}$$

$$V_f = \frac{(2.67 - 0.667) \times 864 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2 \times 0.554 \text{ m}}{5.61 \text{ m}}$$

$$V_f = 1,676.53 \text{ N}$$

กรณีลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด

$$V_{f,ul} = V_f \times S.F$$

$$V_{f,ul} = 1,676.53 \text{ N} \times 1.5$$

$$V_{f,ul} = 2,514.79 \text{ N}$$

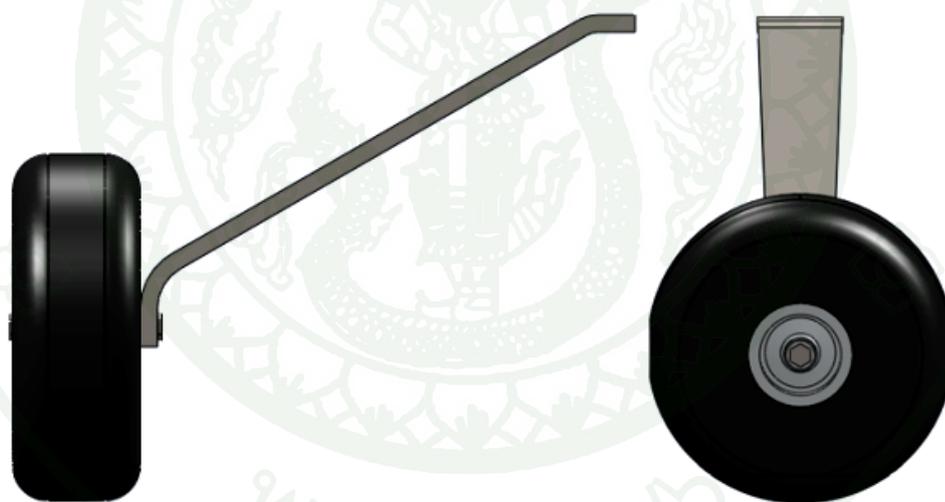
- แรงเสียดทาน การลงจอดในกรณีนี้ไม่มีแรงเสียดทานเมื่อยางสัมผัสพื้น

ผลการคำนวณหาการกรรมในการลงจอดทั้ง 5 เงื่อนไข ของชุดขาทั้งสองแบบได้แสดง
ในภาคผนวก ก

4. สร้างแบบจำลองชุดขาล้อ

การสร้างแบบจำลองของชุดขาล้อทั้งสองแบบ เนื่องจากผู้วิจัยไม่ทราบถึงรายละเอียดขนาดของชุดขาล้อทั้งสองแบบจากบริษัทผู้ผลิตได้ ดังนั้นจึงได้ใช้วิธีการเทียบอัตราส่วนของความยาวปีกอากาศยานจริงกับความยาวปีกของภาพ จากนั้นวัดขนาดขาล้อของภาพนำมาคูณกับอัตราส่วนที่วัดได้ ก็จะได้ขนาดของชุดขาล้อที่ใช้สร้างแบบจำลอง

ชุดขาล้อแบบสามล้อ ประกอบไปด้วย ขาล้อหน้า 1 ขาล้อ และขาล้อหลัก 2 ขาล้อ ซึ่งขาล้อหลักนี้มีความสมมาตรกันระหว่างขาล้อซ้ายและขวา ดังนั้น การสร้างแบบจำลองของขาล้อหลักจึงได้สร้างแบบจำลองเพียงข้างเดียวเนื่องจากความสมมาตร ซึ่งภาพที่ 11 ได้แสดงถึงแบบจำลองขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบสามล้อที่สร้างขึ้นเพื่อใช้ในการงานวิจัย



ภาพที่ 11 แบบจำลองขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบสามล้อ

สำหรับแบบจำลองขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ ดังแสดงในภาพที่ 12



ภาพที่ 12 แบบจำลองขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ

ส่วนชุดขาล้อแบบลากหาง ประกอบไปด้วย ขาล้อหลัก 2 ขาล้อ และขาล้อหาง 1 ขาล้อ การสร้างแบบจำลองของขาล้อหลักจะจำลองเพียงข้างเดียวเนื่องจากความสมมาตรเช่นเดียวกับชุดขาล้อแบบขาสามล้อ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 แบบจำลองขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง

สำหรับแบบจำลองสัณฐานของชุดขาตั้งแบบลากหาง ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แบบจำลองขาตั้งของชุดขาตั้งแบบลากหาง

5. การจำลองการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์โดยใช้โปรแกรม Solidworks Simulation ในการวิเคราะห์แบบสถิตย์ ขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากการกำหนดชนิดวัสดุที่ใช้ การกำหนดขอบเขตเงื่อนไขของปัญหา ไปจนถึงการสั่งให้โปรแกรมทำการวิเคราะห์แบบจำลอง

5.1 การกำหนดชนิดวัสดุ

วัสดุที่เลือกใช้ในแบบจำลองชุดขาตั้ง ได้แก่ Steel AISI 4340 ซึ่งเป็นวัสดุหนึ่งที่นิยมใช้ในการทำขาตั้งและชิ้นส่วนอื่นๆของอากาศยาน (Currey, 1988) โดยมีคุณสมบัติเชิงกลดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 คุณสมบัติเชิงกลของ Steel AISI 4340

Property Name	Value
Young's modulus (GPa)	205
Poisson's ratio	0.29
Tensile Yield strength (MPa)	710
Tensile Ultimate strength (MPa)	1110

5.2 การกำหนดเงื่อนไขแบบจำลอง

การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง เป็นขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญที่จะนำไปสู่การวิเคราะห์ผลให้มีความถูกต้องเชื่อถือได้ ขั้นตอนนี้เป็นกรกำหนดเงื่อนไขในการจับยึดชิ้นงาน การกำหนดการกรรมต่างๆในแบบจำลองด้วยค่าการกรรมที่ได้จากการคำนวณในขั้นตอนแรก

5.2.1 เงื่อนไขการจับยึดชิ้นงาน

การกำหนดเงื่อนไขการจับยึดชิ้นงาน สำหรับล้อหลักได้กำหนดให้บริเวณโคนขาล้อที่ยึดติดระหว่างขาล้อกับตัวอากาศยานเป็นจุดจับยึดแน่น (Fixed) คือไม่สามารถเคลื่อนที่และหมุนรอบแนวแกน X, Y, Z ได้ ดังภาพที่ 15



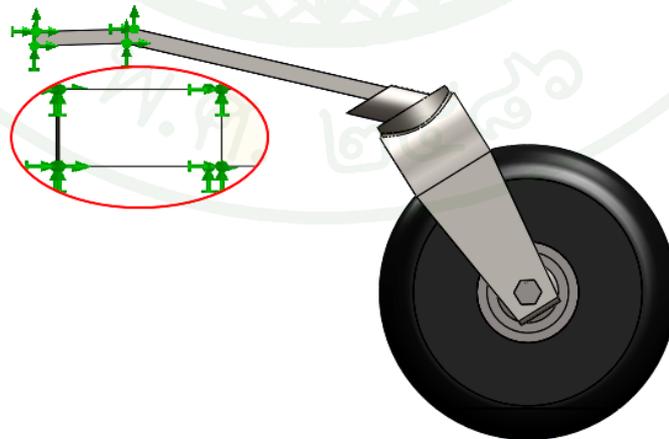
ภาพที่ 15 การกำหนดจุดยึดของขาล้อหลัก

สำหรับขาล้อหน้า ได้กำหนดให้บริเวณโคนขาล้อที่ยึดติดระหว่างขาล้อกับตัวอากาศยานเป็นจุดยึดแบบจับยึดแน่นเช่นกัน ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 การกำหนดจุดยึดของขาล้อหน้า

สำหรับล้อหาง ได้กำหนดให้บริเวณส่วนโคนขาล้อที่ยึดติดระหว่างขาล้อกับตัวอากาศยานเป็นจุดยึดแบบจับยึดแน่น ดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แสดงการกำหนดจุดยึดของขาล้อหาง

5.2.2 การกำหนดเงื่อนไขการกรรมในแบบจำลอง

1) ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ

1.1) กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลังสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ สำหรับล้อหลังนั้นการกรรมที่กระทำได้แก่ แรงกระทำในแนวเฉียงทำมุม 18.43 องศา (สามารถคำนวณหาค่ามุมได้จากสมการที่ 21) กับขาล้อ 6,290.82 N แรงเสียดทานเมื่อขาล้อสัมผัสกับพื้นทางซ้าย 2,096.42 N

กรณีลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด แรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อหลักมีค่า 9,436.23 N แรงเสียดทานมีค่า 3,144.62 N

ภาพที่ 18 แสดงถึงการกรรมทั้งหมดที่กระทำกับขาล้อหลัก โดยลูกศรสีน้ำเงินคือทิศทางของแรงที่กระทำในแนวเฉียงกับขาล้อและสีแดงคือทิศทางแรงเสียดทาน



ภาพที่ 18 ทิศทางการกรรมที่กระทำกับขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลังสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ

สำหรับล้อหน้า มีภาระกรรมที่กระทำเช่นเดียวกับล้อหลัก คือแรงกระทำในแนวเฉียงโดยทำมุม 18.43 องศากับขาล้อ 4,384.67 N และแรงเสียดทาน 1,461.19 N

กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุด แรงกระทำในแนวเฉียงกับล้อหน้ามีค่าเท่ากับ 6,577.01 N และแรงเสียดทานเมื่อสัมผัสพื้นทางขับ 2,191.79 N ทิศทางของภาระกรรมต่างๆที่กระทำกับล้อหน้าดังแสดงในภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ทิศทางภาระกรรมที่กระทำกับล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสากล้อกรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน แล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ

1.2) กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้น มีภาระกรรมที่กระทำกับล้อหลัก คือแรงกระทำในแนวเฉียงโดยทำมุม 18.43 องศากับขาล้อมีค่า 8,488.55 N แรงเสียดทานเมื่อสัมผัสกับพื้นทางขับมีค่า 2,828.81 N

กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุด แรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อหลักมีค่า 12,732.83 N แรงเสียดทานมีค่า 4,243.22 ทิศทางของภาระกรรมที่กระทำดังแสดงในภาพที่ 20

สำหรับล้อหน้าซึ่งไม่ได้รับการกรรมในเงื่อนไขนี้ จึงไม่นำมาพิจารณา



ภาพที่ 20 ทิศทางภาระกรรมที่กระทำกับล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อกรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้น

1.3) กรณีลงจอดในลักษณะที่ทางสัมผัสพื้น ภาระกรรมที่กระทำกับล้อหลักมีเพียงแรงกระทำกับขาล้อ (ทิศทางตั้งฉากกับขาล้อ) มีค่า 8,488.55 N และเท่ากับ 12,732.83 N กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุด ดังแสดงในภาพที่ 21

สำหรับล้อหน้าซึ่งไม่ได้รับการกรรมในเงื่อนไขนี้ จึงไม่นำมาพิจารณา



ภาพที่ 21 ทิศทางภาระกรรมที่กระทำกับล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อกรณีลงจอดในลักษณะที่ทางสัมผัสพื้น

2) ชุดขาล้อแบบลากหาง

2.1) กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน สำหรับขาล้อหลักมีภาระกรรมที่กระทำคือ แรงกระทำในแนวเฉียงโดยทำมุม 18.43 องศากับขาล้อ มีค่าเท่ากับ 8,488.55 N และแรงเสียดทานเมื่อยางสัมผัสกับพื้นทางขับมีค่า 2,828.81 N

กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุด แรงที่กระทำในแนวเฉียงกับขาล้อมีค่า 12,732.83 N และแรงเสียดทานเมื่อยางสัมผัสกับพื้นทางขับมีค่า 4,243.22 N ทิศทางของภาระกรรมที่กระทำดังแสดงในภาพที่ 22

สำหรับล้อหางซึ่งไม่ได้รับภาระกรรมในเงื่อนไขนี้ จึงไม่นำมาพิจารณา



ภาพที่ 22 ทิศทางภาระกรรมที่กระทำกับล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน

2.2) กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น ภาวกรรมที่กระทำกับล้อหลักมีเพียงแรงกระทำกับขาล้อ (ทิศทางตั้งฉากกับขาล้อ) มีค่า $7,653.32 \text{ N}$ และกรณีลงจอดด้วยภาวกรรมสูงสุดมีค่า $11,479.98 \text{ N}$ ทิศทางของภาวกรรมที่กระทำดังแสดงในภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ทิศทางภาวกรรมที่กระทำกับล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น

สำหรับภาวกรรมที่กระทำกับล้อหาง แรงกระทำทิศทางตั้งฉากกับขาล้อมีค่า $1,676.53 \text{ N}$ และ เท่ากับ $2,514.79 \text{ N}$ กรณีลงจอดด้วยภาวกรรมสูงสุด ทิศทางของภาวกรรมที่กระทำดังแสดงในภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ทิศทางภาวกรรมที่กระทำกับล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของชุดขาล้อโดยทั่วไปจะทำการสร้างแบบจำลองเพียงแค่ขาล้อเท่านั้น แต่ในงานวิจัยนี้มุ่งแสดงเพื่อให้เกิดความเข้าใจว่าในการบินลงจอดจริงนั้นการกรรมได้กระทำที่บริเวณหน้าสัมผัสของยางที่สัมผัสกับพื้น จึงได้สร้างแบบจำลองของลูกล้อและยางด้วย ในการกำหนดหน้าสัมผัสของยางนั้นได้กำหนดตามค่ามาตรฐานของบริษัทผู้ผลิตยาง และกระจายการกรรมให้มีค่าเท่ากันทุกหน้าสัมผัส เนื่องจากได้กำหนดให้ยางเป็นวัตถุแข็ง ดังนั้นในกระบวนการวิเคราะห์ของโปรแกรมยางจึงสามารถส่งผ่านพลังงานทั้งหมดไปยังขาล้อได้โดยที่ไม่มีการดูดกลืนพลังงานเก็บไว้ที่ตัวยาง อีกทั้งผลการวิเคราะห์ที่ได้ก็มีค่าเท่ากับการวิเคราะห์โดยใช้เพียงขาล้อ

5.4 การกำหนดผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงาน

การกำหนดผิวสัมผัสของชุดขาล้อในแต่ละตำแหน่ง ได้กำหนดเงื่อนไขผิวสัมผัสเป็นแบบ Bonded ให้ส่วนประกอบของชุดขาล้อเชื่อมต่อเป็นชิ้นส่วนเดียวกันทั้งหมด

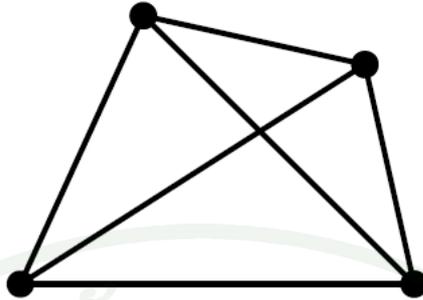
5.5 การกำหนดรูปแบบของเอลิเมนต์

การเลือกรูปแบบของเอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์นั้น ส่งผลอย่างมากต่อความถูกต้อง ความแม่นยำของผลการวิเคราะห์ปัญหาต่างๆ ซึ่งชนิดของเอลิเมนต์ในเบื้องต้นนี้มี 4 แบบ (ภากรณ์, 2551) คือ

5.5.1 เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า (First Order Solid Tetrahedral Element)

เอลิเมนต์ชนิดนี้สร้างจากเส้นตรง โดยความสัมพันธ์ของระยะระหว่างโหนดบนพื้นผิวและขอบของชิ้นงาน การเขียนความสัมพันธ์ของระยะยึดหุดจะพิจารณาจากสมการความเครียด (Strain) และส่งแรงไปยังเอลิเมนต์รอบข้างเรื่อยๆ จนครบทุกชิ้นส่วน โดยในแต่ละเอลิเมนต์มีทั้งหมด 4 โหนด ซึ่งกระจายอยู่ตามมุมของเอลิเมนต์ แต่ละโหนดมีระดับขั้นความเสรี (Degree of Freedom : DOF) เท่ากับ 3 หมายถึงแต่ละ โหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทาง ดังภาพที่ 25

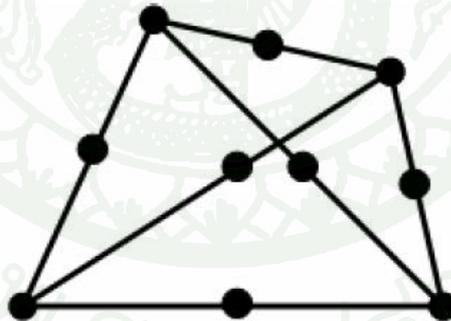
ขอบของเอลิเมนต์ชนิดนี้ตรงและแบนราบ จึงเหมาะสำหรับชิ้นงานที่มีขอบตรงและพื้นผิวแบนราบ แต่ถ้าชิ้นงานมีหน้าตัดกลมหรือมีผิวโค้งจะทำให้เกิดข้อผิดพลาดเนื่องจากการสร้างโมเดลเอลิเมนต์ซึ่งมีขนาดไม่เท่ากับของจริง



ภาพที่ 25 เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งทรงสี่หน้า

5.5.2 เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า (Second Order Solid Tetrahedral Element)

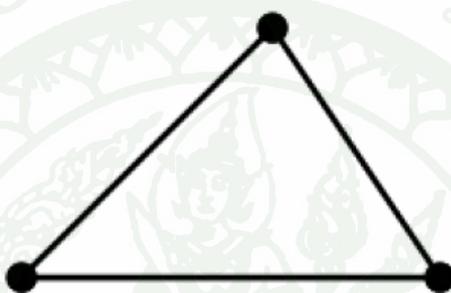
เอลิเมนต์ชนิดนี้สร้างจากเส้นโค้งพาราโบลา (Parabolic) โดยการกำหนดความสัมพันธ์ของระยะระหว่างโหนดในแต่ละเอลิเมนต์ (มีทั้งหมด 10 โหนด คือมีโหนดที่มุม 4 มุม และที่กึ่งกลาง 6 โหนด) ซึ่งแต่ละโหนดมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 3 หมายถึงแต่ละโหนดสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทาง ดังภาพที่ 26



ภาพที่ 26 เอลิเมนต์ลำดับที่สองทรงสี่หน้า

5.5.3 เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งแบบพื้นที่ผิวสามเหลี่ยม (First Order Triangular Shell Element)

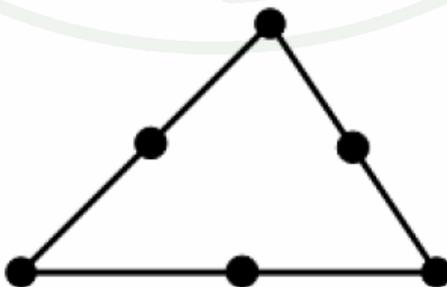
เอลิเมนต์ชนิดนี้ สร้างจากเส้นตรงลากระหว่างโหนด ซึ่งแต่ละโหนดจะอยู่บนขอบหรือบนพื้นผิวของชิ้นงาน โดยในแต่ละเอลิเมนต์มี 3 โหนด (บริเวณมุมของเอลิเมนต์) แต่ละโหนดมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 6 หมายถึงแต่ละโหนดเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทาง และหมุนรอบ 3 แกน ดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 เอลิเมนต์ลำดับที่หนึ่งแบบพื้นที่ผิวสามเหลี่ยม

5.5.4 เอลิเมนต์ลำดับที่สองแบบพื้นที่ผิวสามเหลี่ยม (Second Order Triangular Shell Element)

เอลิเมนต์ชนิดนี้สร้างจากเส้นโค้งพาราโบลา แต่ละเอลิเมนต์จะมี 6 โหนด (3 โหนดอยู่ที่มุมและ 3 โหนดอยู่ที่กึ่งกลางมุม) ในแต่ละโหนดมีระดับขั้นความเสรีเท่ากับ 6 หมายถึงสามารถเคลื่อนที่ได้ 3 ทิศทางและหมุนรอบได้ 3 แกน ดังภาพที่ 28

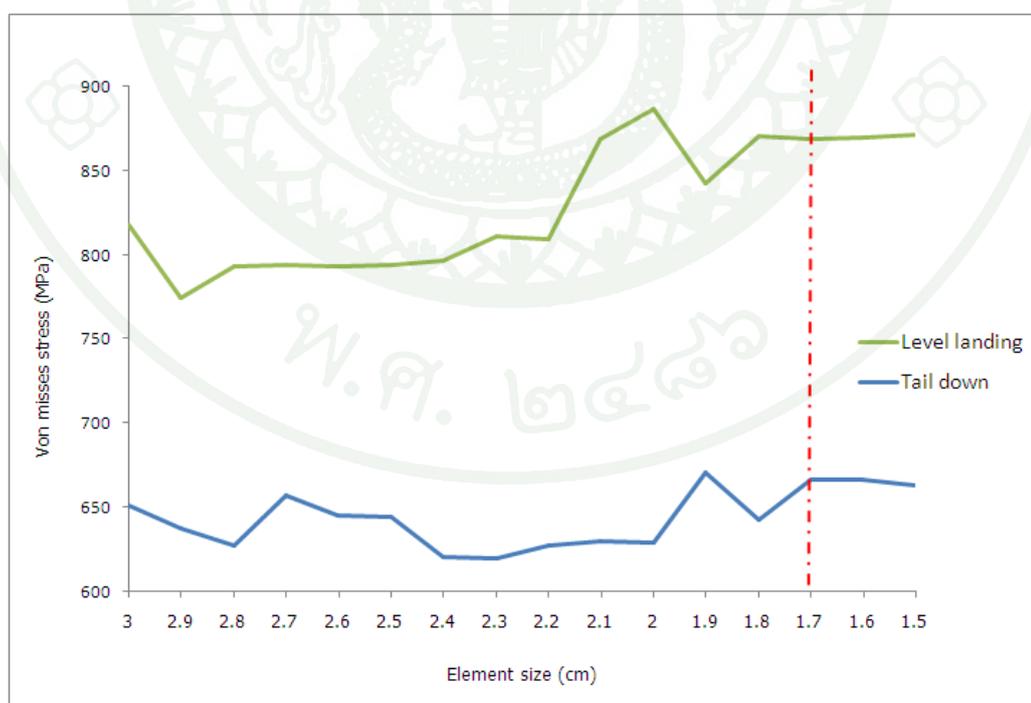


ภาพที่ 28 เอลิเมนต์ลำดับที่สองแบบพื้นที่ผิวสามเหลี่ยม

งานวิจัยนี้ได้กำหนดรูปแบบของเอลิเมนต์เป็นแบบอัตโนมัติโดยให้โปรแกรมเป็นผู้เลือกรูปแบบของเอลิเมนต์ที่เหมาะสมกับแบบจำลองมากที่สุด การกำหนดขนาดของเอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้เริ่มต้นที่เอลิเมนต์ขนาด 3 cm และลดขนาดเอลิเมนต์ลงจนทำให้ขนาดไม่มีผลต่อคำตอบที่ได้

การทดสอบเพื่อหาขนาดของเอลิเมนต์ที่เหมาะสม โดยทำการทดสอบกับล้อยหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง ทั้งในกรณีลงจอดลักษณะที่ล้อยหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันและกรณีลงจอดลักษณะหางสัมผัสพื้น กำหนดขนาดของเอลิเมนต์เริ่มต้นที่ 3 cm และลดขนาดเอลิเมนต์ลงเรื่อยๆ และบันทึกค่าความเค้นที่ได้

จากผลการทดสอบซึ่งพลอตออกมาเป็นกราฟดังภาพที่ 29 พบว่า เมื่อลดขนาดของเอลิเมนต์ลงเรื่อยๆ ค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ที่ได้จะมีค่าสูงขึ้น จนกระทั่งถึงจุดที่ค่าความเค้นวอนมิสมีค่าสูงที่สุด หลังจากนั้นค่าจะลดลงเล็กน้อยและกลับมามีค่าใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าสูงสุด ซึ่งจากจุดนี้เป็นต้นไปเมื่อลดขนาดเอลิเมนต์ลงค่าความเค้นวอนมิสที่ได้ก็ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 29 กราฟแสดงการหาขนาดเอลิเมนต์ที่เหมาะสม

ผลจากกราฟพบว่า กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน ขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1.8 cm เป็นต้นไป เป็นขนาดที่ไม่ทำให้ค่าความเค้นวอนมิตเปลี่ยนแปลง สำหรับกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น ขนาดเอลิเมนต์ตั้งแต่ 1.7 cm เป็นต้นไป เป็นขนาดที่ไม่ทำให้ค่าความเค้นวอนมิตเปลี่ยนแปลงเช่นกัน ดังนั้นจึงได้กำหนดให้เอลิเมนต์ขนาด 1.7 cm เป็นเอลิเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



ผลและวิจารณ์

ผล

งานวิจัยนี้ได้จำลองการลงจอดของชุดขาต่อแบบขาสามล้อและแบบลากหางตามมาตรฐาน FAR 23 – Appendix C: Basic Landing Conditions โดยใช้การวิเคราะห์แบบสถิตย์ ซึ่งพิจารณาทั้งการลงจอดด้วยการกรรมจำกัดและการลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ถึงพื้นที่วิกฤตที่จะสร้างความเสียหายกับชุดขาต่อทั้งสองแบบ เมื่อต้องลงจอดด้วยสภาพการณ์ที่แตกต่างกันไป รวมทั้งสิ้น 10 กรณี

เนื่องจากยางซึ่งถือว่าเป็นวัสดุที่มีพฤติกรรมซับซ้อน (Complex material) มีความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นที่ได้รับกับความเครียดแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Relation) ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของยางจึงแตกต่างจากวัสดุประเภทอื่นๆ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์แบบสถิตย์ ดังนั้นการวิเคราะห์ผลของโปรแกรมจึงไม่พิจารณาถึงการดูดซับพลังงานของยาง โดยยางสามารถส่งผ่านภาระกรรมไปยังขาต่อได้ทั้งหมด

1. ชุดขาต่อแบบขาสามล้อ

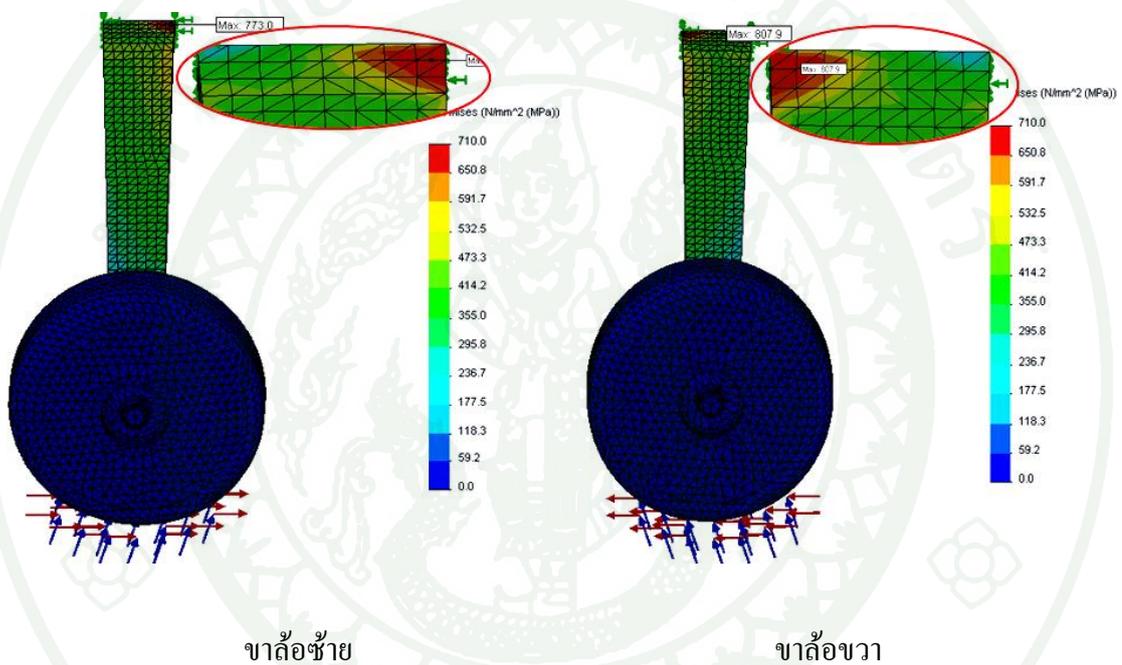
1.1 กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันและมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาต่อ (Level landing with inclined reaction)

1.1.1 กรณีลงจอดด้วยการกรรมจำกัด

ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบความเค้นที่เกิดกับขาต่อหลักได้กระจายจากช่วงล่างไปยังส่วนโคนขาต่อที่ยึดติดกับอากาศยาน พื้นที่วิกฤตคือ พื้นที่เล็กๆบริเวณมุมโคนขาต่อ โดยขาต่อซ้ายมีพื้นที่วิกฤตที่มุมขวาของโคนขาต่อ ส่วนขาต่อขวามีพื้นที่วิกฤตที่มุมซ้ายของโคนขาต่อ ค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 580.35 MPa และมีค่า M.S. เท่ากับ 0.28 (สามารถคำนวณหาได้จากสมการ 23) ค่า M.S. ที่ได้ในกรณีนี้มีค่ามากกว่าศูนย์ ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยังไม่ทำให้โครงสร้างขาต่อเกิดความเสียหาย รูปแบบพื้นที่วิกฤตที่เกิดขึ้นดังภาพที่ 30

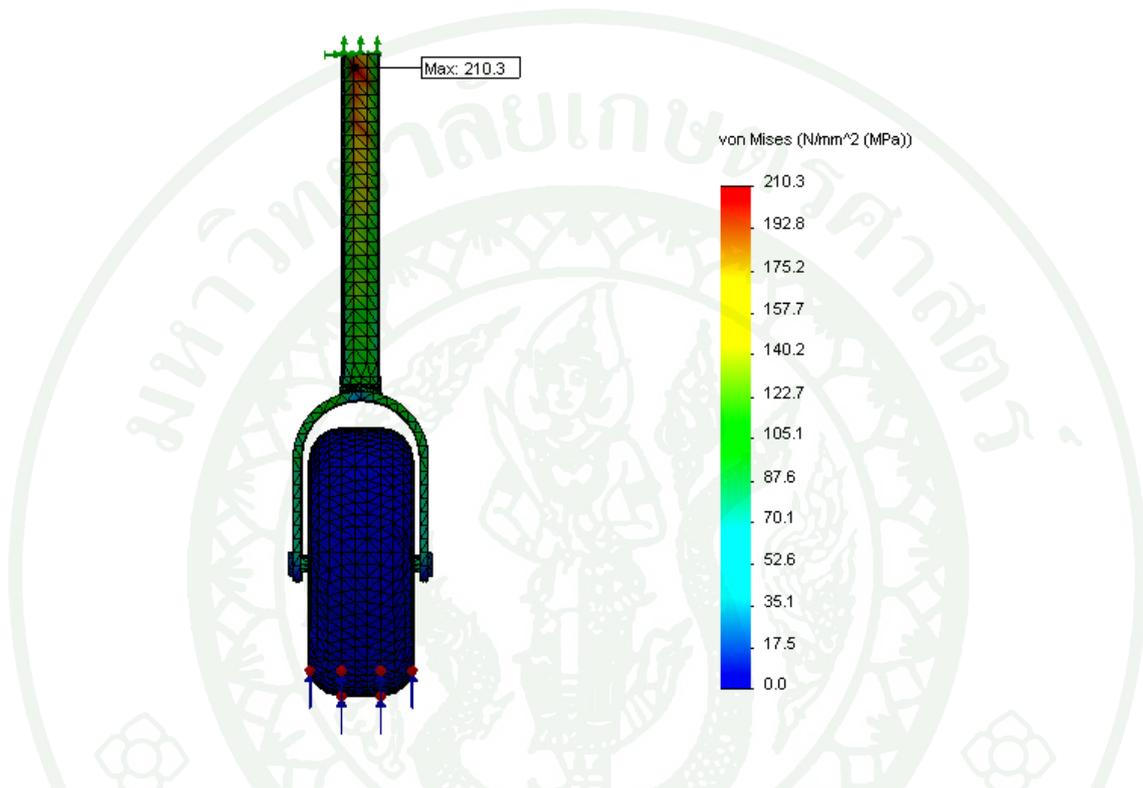
1.1.2 กรณีลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่วิกฤตที่เกิดขึ้นกับขาล้อหลักเป็นบริเวณเดียวกับกรณีที่ลงจอดด้วยการกรรมจำกัดแต่มีพื้นที่กระจายเป็นบริเวณกว้างกว่า อีกทั้งความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นที่บริเวณพื้นที่วิกฤตยังมีค่าสูงกว่าโดยมีค่าเท่ากับ 877.55 MPa และมีค่า M.S. เท่ากับ -0.16 เป็นค่าที่บ่งบอกว่าการลงจอดในกรณีนี้ไม่มีความปลอดภัยต่อโครงสร้างขาล้อ ส่งผลให้เกิดความเสียหายขึ้น ดังภาพที่ 32



ภาพที่ 32 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเดียวกับขาล้อด้วยการกรรมสูงสุด

สำหรับขาล้อหน้า มีลักษณะเช่นเดียวกรณีลงจอดด้วยการกรรมจำกัด คือ มีพื้นที่วิกฤตเกิดที่บริเวณ โคนขาล้อ ใกล้กับจุดยึดติดกับอากาศยาน แต่พื้นที่การเกิดกว้างกว่าเล็กน้อย และมีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 210.3 MPa และมีค่า M.S. เท่ากับ 2.52 ซึ่งเป็นค่าที่มีความปลอดภัยสูงที่ไม่ส่งผลเสียหายต่อโครงสร้างขาล้อ ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ความเค้นที่ขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยการกรรมสูงสุด

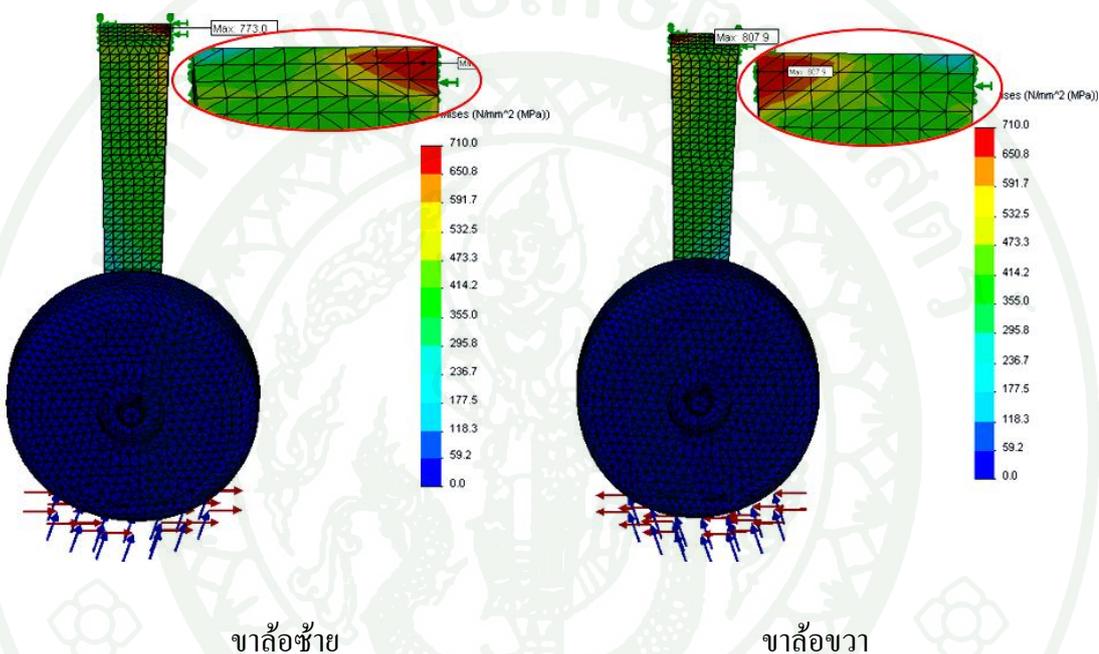
1.2 กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้น (Level landing with nose wheel just clear of ground)

1.2.1 กรณีลงจอดด้วยการกรรมจำกัด

ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบความเค้นที่ขาล้อหลักได้กระจายจากช่วงล่างของขาล้อไปยังส่วน โคนขาล้อที่ติดกับอากาศยาน พื้นที่วิกฤตที่เกิดขึ้นคล้ายคลึงกับการลงจอดในกรณีแรก โดยขาล้อซ้ายมีพื้นที่วิกฤตบริเวณมุมขวาของโคนขาล้อ ส่วนขาล้อขวามีพื้นที่วิกฤตบริเวณมุมซ้าย

ของโคนขาเสื้อ แต่การลงจอดในกรณีนี้พื้นที่วิกฤตมีบริเวณกว้างกว่าและค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 790.45 Mpa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุ (Yield strength: 710 Mpa) อยู่เล็กน้อย อีกทั้งมีค่า M.S. เท่ากับ -0.06 ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างขาเสื้อ ดังภาพที่ 34

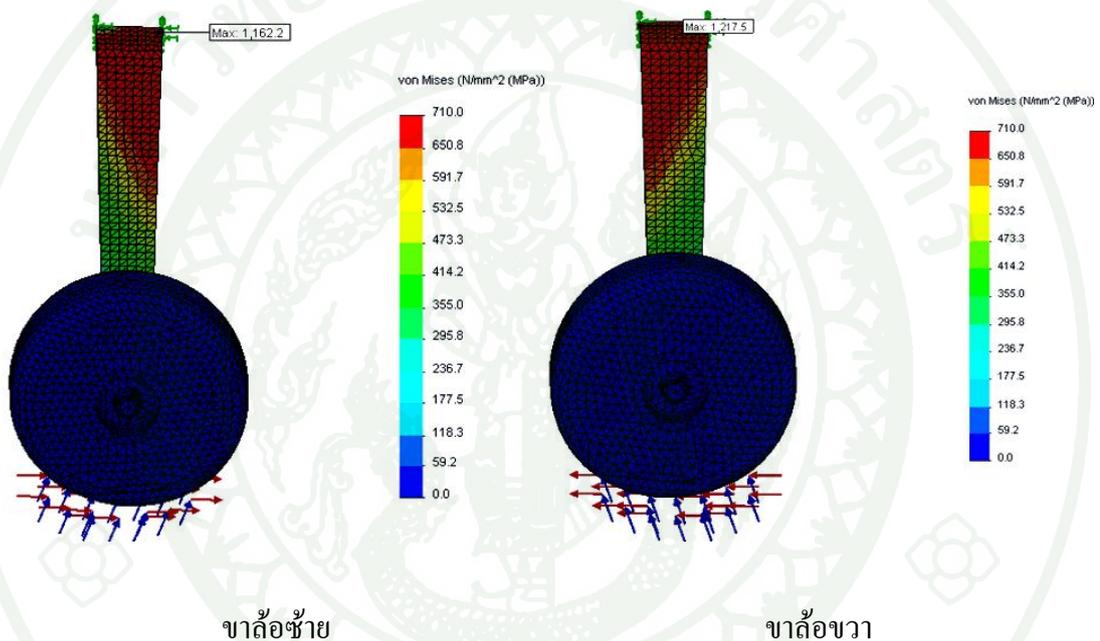
สำหรับล้อยหน้าที่ไม่ได้รับการกรรมกระทำจากการลงจอดกรณีนี้ จึงไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงขึ้น



ภาพที่ 34 ความเค้นที่ขาเสื้อหลักของชุดขาเสื้อแบบสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมจำกัด

1.2.2 กรณีลงจอดด้วยการกระแทกสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า มีพื้นที่วิกฤตเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่ขาล้อหลัก ตั้งแต่โคนขาล้อไปจนถึงช่วงกึ่งกลางของขาล้อทั้งด้านบนและด้านล่างขาล้อ อีกทั้งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 1,189.85 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุด (Ultimate strength : 1110 MPa) ของวัสดุ และยังมีค่า M.S. เท่ากับ -0.38 จึงทำให้การลงจอดในกรณีนี้สร้างความเสียหายต่อโครงสร้างขาล้อเป็นอย่างมาก ดังภาพที่ 35



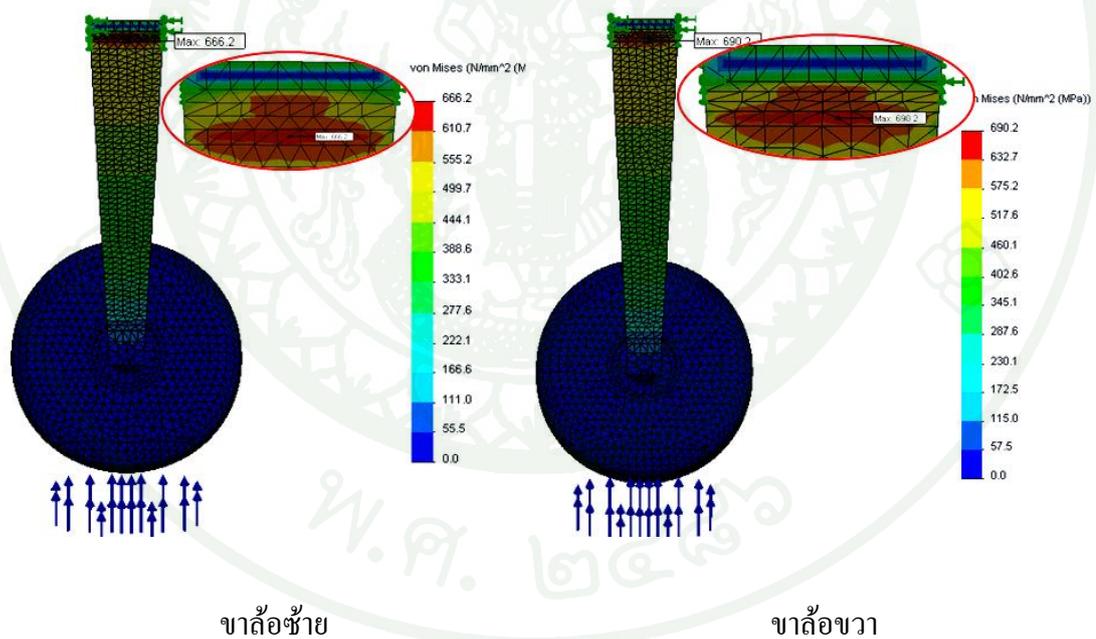
ภาพที่ 35 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยการกระแทกสูงสุด

1.3 กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น (Tail down landing)

1.3.1 กรณีลงจอดด้วยการกระกรมจำกัด

ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบความเค้นที่เกิดที่ขาล้อหลักได้กระจายจากช่วงล่างไปยังส่วน โคนขาล้อที่ยึดติดกับอากาศยาน บริเวณที่เกิดพื้นที่วิกฤต คือ บริเวณด้านหลังของโคนขาล้อ ซึ่งเกิดเพียงพื้นที่เล็กๆเท่านั้น โดยมีลักษณะพื้นที่วิกฤตเหมือนกันทั้งขาล้อซ้ายและขาล้อขวา ซึ่งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 636.80 Mpa และมีค่า M.S. เท่ากับ 0.16 โดยไม่เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างขาล้อ ดังภาพที่ 36

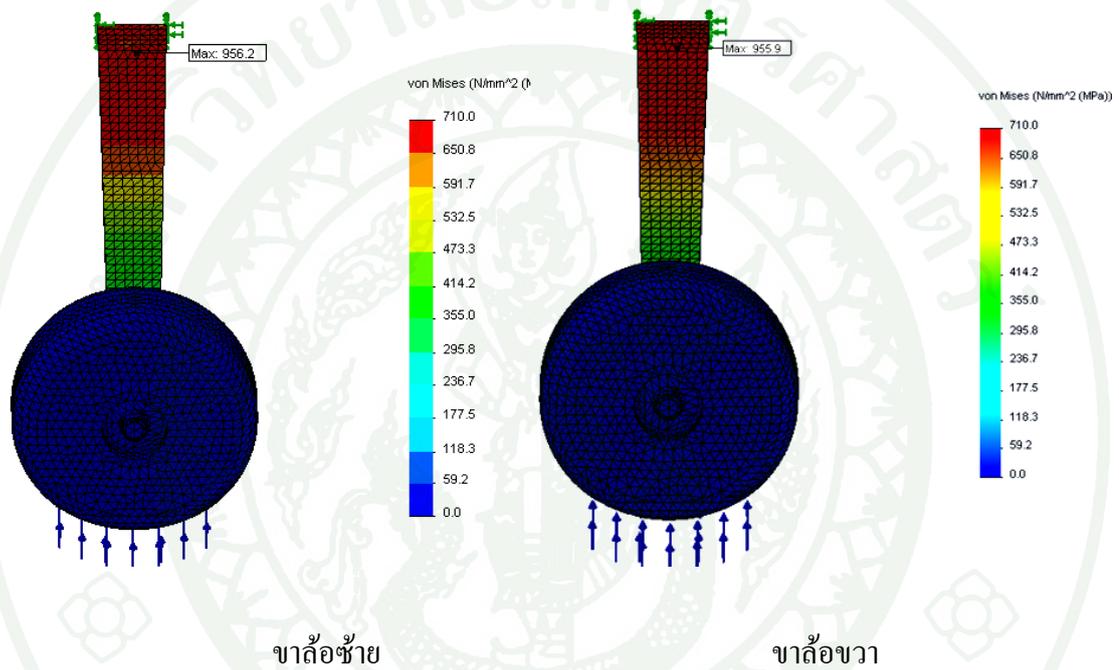
สำหรับล้อหน้าที่ไม่ได้รับการกระกรมกระทำจากการลงจอดกรณีนี้ จึงไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



ภาพที่ 36 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกระกรมจำกัด

1.3.2 กรณีลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า มีพื้นที่วิกฤตเป็นบริเวณกว้างประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่ขาล้อตั้งแต่โคนขาล้อจนถึงช่วงกึ่งกลางขาล้อ โดยมีลักษณะเหมือนกันทั้งขาล้อซ้ายและขวา ค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 956.05 Mpa และมีค่า M.S. เท่ากับ -0.23 โดยส่งผลทำให้โครงสร้างขาล้อเสียหายอย่างมาก ดังภาพที่ 37



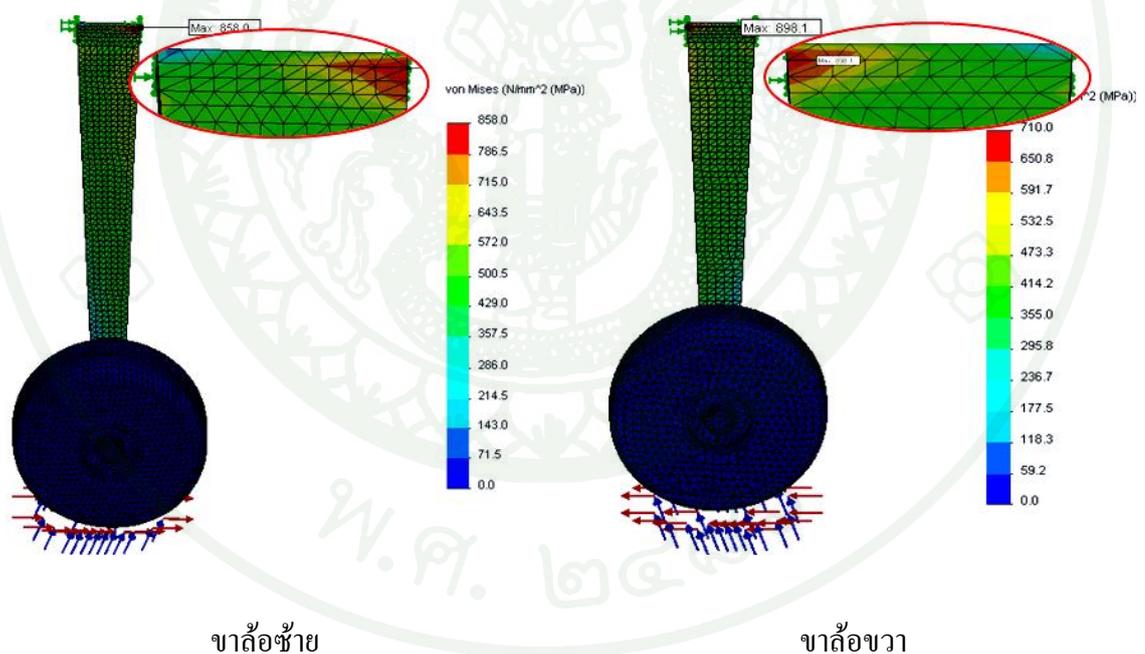
ภาพที่ 37 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่ทางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมสูงสุด

2. ชุดขาตั้งแบบลากหาง

2.1 กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน (Level landing)

2.1.1 กรณีลงจอดด้วยการกรรมจำกัด

ผลการศึกษาพบว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นกับขาตั้งหลักได้กระจายจากช่วงล่างขาตั้งไปยังส่วนโคนขาตั้งที่ยึดติดอากาศยาน บริเวณพื้นที่วิกฤตคือ บริเวณมุมโคนขาตั้ง โดยขาตั้งซ้ายเกิดพื้นที่วิกฤตบริเวณมุมขวาของโคนขาตั้ง ส่วนขาตั้งขวาเกิดที่มุมซ้ายของโคนขาตั้ง และค่าความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 878.05 MPa ซึ่งมากกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุเล็กน้อย ทั้งยังมีค่า M.S. เท่ากับ -0.16 เป็นค่าที่ทำให้ไม่มีความปลอดภัยต่อโครงสร้างขาตั้งในการลงจอดกรณีนี้ ส่งผลให้เกิดความเสียหาย ดังภาพที่ 38

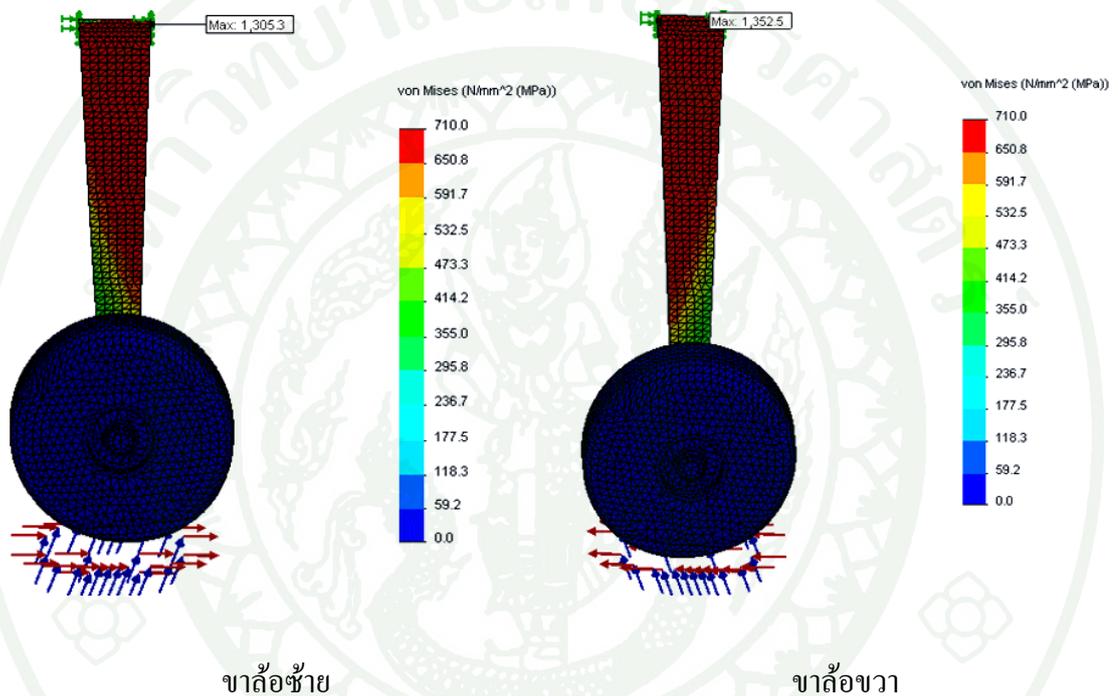


ภาพที่ 38 ความเค้นที่ขาตั้งหลักของชุดขาตั้งแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันด้วยการกรรมจำกัด

สำหรับล้อหางไม่ได้รับการกระทบกระเทือนจากการลงจอดในกรณีนี้ จึงไม่เกิดความเปลี่ยนแปลงขึ้น

2.1.2 กรณีลงจอดด้วยการกระตุกสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า มีพื้นที่วิกฤตกระจายเป็นบริเวณกว้างประมาณสามในสี่ส่วน ของพื้นที่ขาตั้งหลัก ตั้งแต่โคนขาตั้งไปจนถึงช่วงล่างขาตั้ง อีกทั้งค่าความเค้นสูงสุดยังมีค่าสูงกว่า ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ โดยมีค่าเท่ากับ 1,328.90 Mpa และมีค่า M.S. เท่ากับ -0.44 ซึ่งเป็น ค่าที่ไม่ปลอดภัยต่อโครงสร้างขาตั้ง ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นอย่างมาก ดังภาพที่ 39

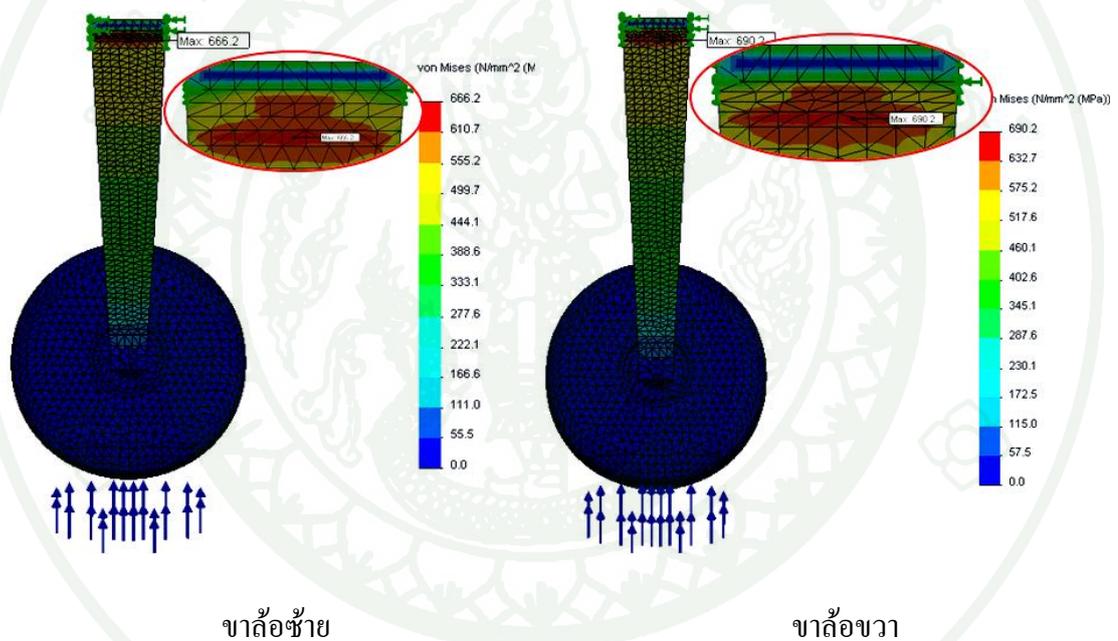


ภาพที่ 39 ความเค้นที่ขาตั้งหลักของชุดขาตั้งแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันด้วยการกระตุกสูงสุด

2.2 กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น (Tail down landing)

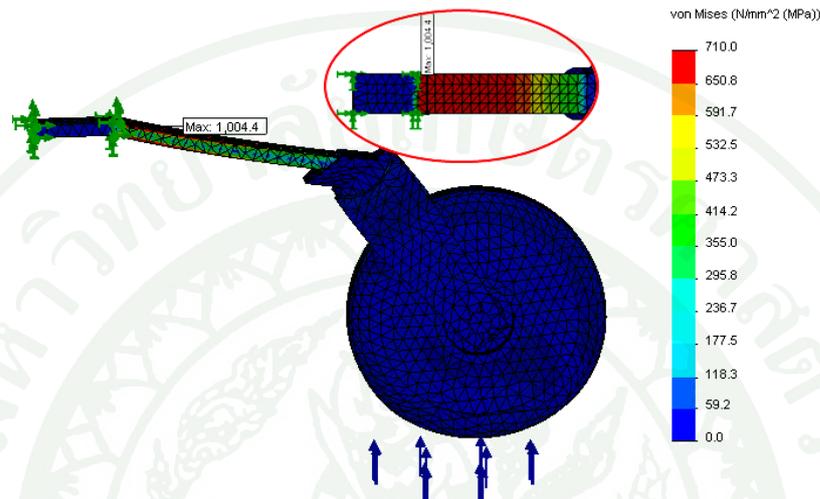
2.2.1 กรณีลงจอดด้วยการกระกรมจำกัด

ผลการศึกษาพบว่า ความเค้นที่เกิดขึ้นกับล้อหลักได้กระจายจากช่วงล่างของขา ล้อไปยังส่วนโคนขาล้อที่ยึดติดกับอากาศยาน บริเวณพื้นที่วิกฤตคือ บริเวณด้านหลังของโคนขา ล้อมีลักษณะคล้ายคลึงกับชุดขาล้อแบบสามล้อในการลงจอดกรณีเดียวกัน โดยค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นมีค่าเท่ากับ 678.20 Mpa และมีค่า M.S. เท่ากับ 0.09 ซึ่งเป็นค่าที่มีความปลอดภัยสูงไม่ทำให้ โครงสร้างขาล้อเกิดความเสียหาย ดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกระกรมจำกัด

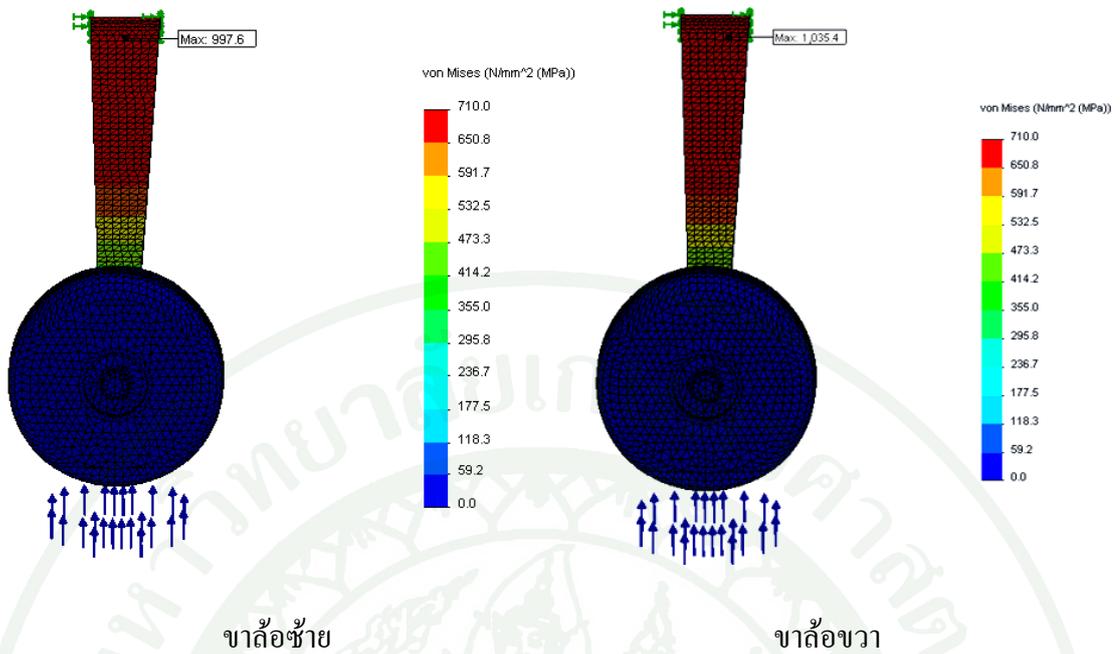
สำหรับล้อยาง มีพื้นที่วิกฤตกระจายเป็นบริเวณกว้างประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่ขาล้อ อีกทั้งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,004.40 Mpa และมีค่า M.S. เท่ากับ -0.26 โดยส่งผลเสียหายต่อโครงสร้างขาล้อ ดังภาพที่ 41



ภาพที่ 41 ความเค้นที่ล้อยางของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมจำกัด

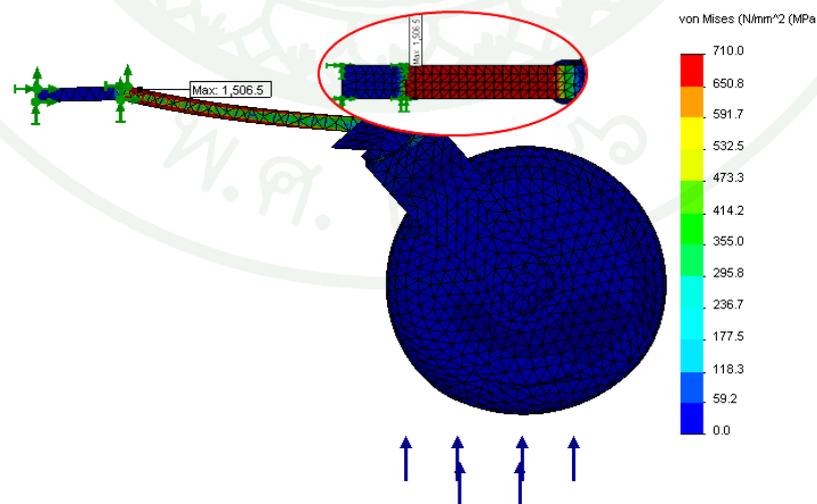
2.2.2 กรณีลงจอดด้วยการกรรมสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่วิกฤตมีการกระจายเป็นบริเวณกว้างประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่ขาล้อหลัก ตั้งแต่โคนขาล้อไปจนถึงกึ่งกลางของขาล้อ ซึ่งมีลักษณะคล้ายคลึงกับชุดขาล้อแบบขาสามล้อในการลงจอดกรณีเดียวกัน โดยมีค่าความเค้นสูงสุดเท่ากับ 1,016.50 Mpa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุแต่ก็ยังมีค่าต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ และยังมีค่า M.S. เท่ากับ -0.27 ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อโครงสร้างขาล้อ โดยเกิดความเสียหายขึ้นอย่างมาก ดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 ความเค้นที่ขาล้อยหลักของชุดขาล้อยแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกระแทกสูงสุด

สำหรับล้อยาง มีพื้นที่วิกฤตกระจายไปทั่วทั้งขาล้อย อีกทั้งค่าความเค้นที่เกิดขึ้นยังมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ โดยมีค่าเท่ากับ 1,506.50 MPa และมีค่า M.S. เท่ากับ -0.51 ซึ่งทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อล้อยางในการลงจอดกรณีนี้ ดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 ความเค้นที่ล้อยางของชุดขาล้อยแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้นด้วยการกระแทกสูงสุด

วิจารณ์

การวิจารณ์ผลการวิจัยเป็นการวิจารณ์เชิงเปรียบเทียบผล เพื่อเปรียบเทียบผลของชุดชาล้อย่อยเดียวกันในกรณีการลงจอดที่แตกต่างกัน และเปรียบเทียบระหว่างชุดชาล้อย่อยทั้งสองแบบในกรณีลงจอดเดียวกันรวมทั้งสิ้น 8 กรณี ดังนี้

1. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของชุดชาล้อย่อยแบบสามล้อในการลงจอดทั้ง 3 กรณีด้วยภารกิจจำกัด

ผลวิเคราะห์การลงจอดของชุดชาล้อย่อยแบบสามล้อด้วยภารกิจจำกัดทั้ง 3 กรณี พบว่าการลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดชาล้อย่อยแบบสามล้อมากที่สุดคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้น เนื่องจากการลงจอดในลักษณะนี้อาศัยเพียงล้อหลัก 2 ล้อเท่านั้น ล้อหลักจึงเป็นล้อที่ได้รับการกระตุ้นทั้งหมด ดังนั้นการลงจอดในกรณีนี้จึงส่งผลเสียหายกับชาล้อย่อยหลักมากกว่ากรณีอื่น

หากพิจารณาเทียบกับกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น พบว่ามีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ เป็นการลงจอดโดยอาศัยเพียงล้อหลัก แต่ภารกิจที่กระทำกับชาล้อย่อยมีเพียงแรงที่กระทำในแนวตั้งเท่านั้น ซึ่งต่างกับกรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นที่มีทั้งแรงกระทำในแนวเฉียงและแรงต้านกับชาล้อย่อย

แม้ว่ากรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยภารกิจจำกัดจะมีอิทธิพลมากที่สุดต่อชุดชาล้อย่อยแบบสามล้อ แต่การลงจอดกรณีนี้ก็ไม่ได้ส่งผลเสียหายกับชาล้อย่อยและอากาศยานแต่อย่างใด

2. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของชุดชาล้อย่อยแบบสามล้อในการลงจอดทั้ง 3 กรณีด้วยภารกิจสูงสุด

ผลวิเคราะห์การลงจอดของชุดชาล้อย่อยแบบสามล้อด้วยภารกิจสูงสุดทั้ง 3 กรณี พบว่าการลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดชาล้อย่อยแบบสามล้อมากที่สุดคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นเช่นเดียวกับการลงจอดด้วยภารกิจจำกัด แต่กรณีนี้ส่งผลเสียหายกับชาล้อย่อยหลักมากกว่า โดยทำให้ชาล้อย่อยเกิดการพังขึ้น หากพิจารณารูปที่ 34 จะเห็นว่า ความเค้นได้กระจายอยู่ทั่วบริเวณช่วงบนของชาล้อย่อยและความเค้นที่เกิดขึ้นนี้ยังมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ กล่าวคือ ชาล้อย่อยไม่สามารถทนต่อภารกิจที่กระทำได้จึงก่อให้เกิดความเสียหายดังกล่าวขึ้น

อย่างไรก็ตาม ความเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อหลักนี้ อาจจะไม่ได้ทำให้การทำการลงจอดในขณะนั้นเกิดความวิกฤตถึงขั้นที่ไม่สามารถควบคุมการลงจอดได้ หรืออาจจะลงจอดได้โดยไม่เกิดอันตรายใดๆต่อผู้ทำการบิน แต่อาจจะส่งผลทำให้อากาศยานไม่สามารถทำการบินในครั้งต่อไปได้ เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับล้อ

3. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของชุดล้อแบบสามล้อในการลงจอดทั้ง 3 กรณีระหว่างการลงจอดด้วยการกรรมจำกัดและกรรมสูงสุด

หากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การลงจอดของชุดล้อแบบสามล้อทั้ง 3 กรณีระหว่างการลงจอดด้วยการกรรมจำกัดและกรรมสูงสุด พบว่าการลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดล้อแบบสามล้อมากที่สุดคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยการกรรมสูงสุด จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่า ความเสียหายที่เกิดขึ้นเมื่อทำการลงจอดในกรณีนี้ สาเหตุอาจเนื่องมาจากการลงจอดด้วยการกรรมสูงสุดนั้นใช้ในการลงจอดกรณีฉุกเฉิน (Emergency landing) อาทิ มีความเสียหายเกิดขึ้นกับเครื่องยนต์ ระบบ หรือสภาพอากาศ ซึ่งเป็นการลงจอดที่อยู่นอกเหนือปัจจัยการควบคุม ดูแลของนักบิน เป็นต้น ซึ่งนักบินอาจไม่สามารถควบคุมการบินให้อยู่ในสภาพปกติได้ แต่ต่างจากการลงจอดด้วยการกรรมจำกัดที่เป็นารลงจอดเมื่อทำการบินปกติ

4. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของชุดล้อแบบลากหางในการลงจอดทั้ง 2 กรณีด้วยการกรรมจำกัด

ผลวิเคราะห์การลงจอดของชุดล้อแบบลากหางด้วยการกรรมจำกัดทั้ง 2 กรณี พบว่าการลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดล้อแบบลากหางมากที่สุดคือ กรณีลงจอดในลักษณะหางสัมผัสพื้น เนื่องจากการลงจอดในกรณีนี้ก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นที่ล้อหางเป็นบริเวณกว้าง โดยมีความเค้นกระจายอยู่ตั้งแต่โคนล้อไปจนถึงช่วงกึ่งกลางล้อและความเค้นที่เกิดขึ้นยังมีค่าใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุซึ่งเป็นค่าที่วัสดุจะสามารถทนได้โดยไม่เกิดการพังขึ้น

หากเปรียบเทียบเฉพาะล้อหลักในการลงจอดทั้ง 2 กรณี พบว่า กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันมีความวิกฤตต่อล้อหลักมากกว่า แต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างล้อหลัก อีกทั้งไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับล้อหาง ต่างกับกรณีการลงจอดในลักษณะหางสัมผัสพื้นที่เกิดความวิกฤตกับล้อหาง ซึ่งเป็นเพียงล้อช่วยเล็กๆที่ทำหน้าที่ช่วยบังคับทิศทาง แต่ได้รับการกรรมมากจนเกินไป ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นอย่างมากต่อล้อหางและส่งผลกระทบต่อารลงจอด ด้วย

เหตุนี้จึงส่งผลให้การลงจอดในลักษณะที่ห่างสัมพันธ์กับพื้นมีอิทธิพลกับชุดขาถือแบบลากหางมากที่สุด

5. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของชุดขาถือแบบลากหางในการลงจอดทั้ง 2 กรณีด้วยการกรรมสูงสุด

สำหรับการลงจอดของชุดขาถือแบบลากหางด้วยการกรรมสูงสุดทั้ง 2 กรณี พบว่า การลงจอดทั้งสองกรณีต่างก็มีอิทธิพลต่อชุดขาถือแบบลากหาง โดยกรณีลงจอดในลักษณะล้อหลักสัมพันธ์พื้นพร้อมกันก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากกับล้อหลัก ทำให้ล้อหลักเกิดการพัง เนื่องจากการลงจอดในกรณีนี้มีเพียงล้อหลักเท่านั้นที่รับภาระกรรมที่เกิดขึ้น สำหรับล้อหางที่ไม่ได้รับการกรรมจึงไม่เกิดความเสียหาย

สำหรับกรณีลงจอดในลักษณะที่ห่างสัมพันธ์พื้น ก่อให้เกิดความเสียหายอย่างมากต่อขาถือ โดยเฉพาะล้อหางที่มีความเสียหายเกิดขึ้นทั้งขาถือ สาเหตุอาจเกิดจากการที่ล้อหางได้รับการกรรมมากจนเกินไปจนเกินขีดความสามารถที่ล้อหางจะทนได้จึงทำให้เกิดการพังขึ้น ส่วนขาถือหลักก็มีความเสียหายเช่นกันแม้ว่าจะเสียหายน้อยกว่ากรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมพันธ์พื้นพร้อมกัน แต่ก็ส่งผลกระทบต่อกรลงจอดได้เช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตามความเสียหายทั้งหมดที่เกิดขึ้นนี้ อาจจะไม่ได้ทำให้การลงจอดในขณะนั้นเกิดความวิกฤตถึงขั้นที่ไม่สามารถควบคุมการลงจอดได้ หรือด้วยความชำนาญของผู้ทำการบินที่ทำให้อาจจะลงจอดได้ทั้งๆที่โครงสร้างขาถือเกิดความเสียหายโดยไม่เป็นอันตรายใดๆ อีกทั้งอาจส่งผลทำให้อากาศยานไม่สามารถทำการบินในครั้งต่อไปได้เนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้นกับขาถือ

6. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ของชุดขาถือแบบลากหางในการลงจอดทั้ง 2 กรณีระหว่างการลงจอดด้วยการกรรมจำกัดและการกรรมสูงสุด

หากเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์การลงจอดของชุดขาถือแบบลากหางทั้ง 2 กรณี ระหว่างการลงจอดด้วยการกรรมจำกัดและการกรรมสูงสุด พบว่า การลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดขาถือแบบลากหางมากที่สุดคือ การลงจอดด้วยการกรรมสูงสุดทั้งกรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าสัมพันธ์พื้นพร้อมกันและกรณีลงจอดในลักษณะที่ห่างสัมพันธ์พื้นดังที่ได้กล่าวสรุปในหัวข้อข้างต้น สาเหตุอาจเนื่องมาจากการลงจอดด้วยการกรรมสูงสุดนั้นใช้ในการลงจอดกรณีฉุกเฉิน อาทิ เกิดความเสียหาย

กับเครื่องยนต์ ระบบ หรือสภาพอากาศซึ่งเป็นการลงจอดที่อยู่นอกเหนือปัจจัยการควบคุมของผู้ทำการบิน เป็นต้น ซึ่งผู้ทำการบินอาจไม่สามารถควบคุมให้บินในสภาพปกติได้ ต่างจากการลงจอดด้วยการกรรมจำกัดที่เป็นการลงจอดเมื่อทำการบินปกติ

7. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์ระหว่างชุดขาล้อแบบขาสามล้อและแบบลากหางในกรณีการลงจอดเดียวกัน

7.1 กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น

หากเปรียบเทียบความสามารถในการทำการลงจอดระหว่างชุดขาล้อแบบขาสามล้อและชุดขาล้อแบบลากหางด้วยกรณีลงจอดเดียวกันคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นหรือเป็นการลงจอดแบบเปิดมุมปะทะสูงสุด พบว่า ชุดขาล้อแบบขาสามล้อมีความสามารถในการทำการลงจอดได้ดีกว่าชุดขาล้อแบบลากหางแม้จะทำการลงจอดโดยอาศัยเพียงล้อหลักเท่านั้น

สำหรับชุดขาล้อแบบลากหาง สาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อกรลงจอดนั้น สาเหตุหลักเกิดจากล้อหาง ซึ่งเป็นเพียงล้อช่วยเหลือๆ ทำหน้าที่ช่วยบังคับทิศทางขณะที่อากาศยานขับเคลื่อนบนพื้นทางขับได้รับการกรรมมากเกินไปจนเกินขีดความสามารถที่ล้อหางจะทนได้ ทำให้ล้อหางเกิดความเสียหายส่งผลกระทบต่อกรทำการลงจอดและส่งผลกระทบต่อไปยังอากาศยานด้วย

7.2 กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้น

การลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นของชุดขาล้อแบบขาสามล้อคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้น สำหรับชุดขาล้อแบบลากหางคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน เปรียบเทียบความสามารถในการทำการลงจอดระหว่างชุดขาล้อทั้ง 2 แบบ พบว่า ชุดขาล้อแบบขาสามล้อมีความสามารถในการทำการลงจอดได้ดีกว่าชุดขาล้อแบบลากหาง

สาเหตุเนื่องมาจาก ชุดขาล้อแบบลากหางมีพื้นที่วิกฤตที่ขาล้อหลักกว้างกว่าชุดขาล้อแบบขาสามล้อ อีกทั้งความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นยังมีค่าสูงกว่าทั้งกรณีลงจอดด้วยการกรรมจำกัดและกรรมกรรมสูงสุด จึงส่งผลให้ชุดขาล้อแบบลากหางมีความวิกฤตในการทำการลงจอดมากกว่าชุดขาล้อแบบขาสามล้อ

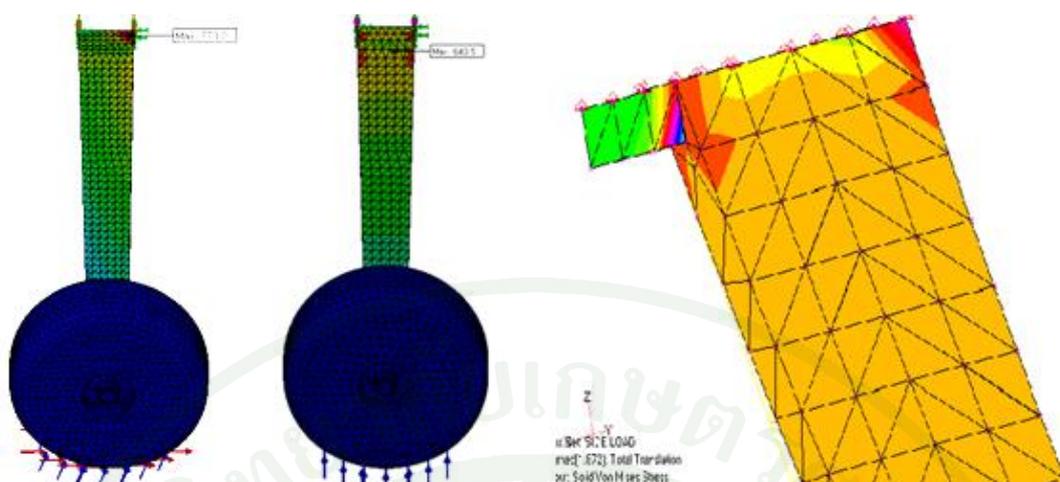
7.3 กรณีลงจอดแบบสามล้อพร้อมกัน

การลงจอดแบบสามล้อพร้อมกันของชุดขาล้อแบบขาสามล้อคือ กรณีลงจอดลักษณะที่ ล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันและมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ สำหรับชุดขาล้อแบบ ลากหางคือ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น กล่าวคือ เป็นการลงจอดโดยอาศัยล้อหลักและ ล้อหาง หากเปรียบเทียบความสามารถในการลงจอดกรณีนี้ระหว่างชุดขาล้อทั้ง 2 แบบ พบว่าชุดขา ล้อแบบขาสามล้อมีความสามารถในการทำการลงจอดได้ดีกว่าชุดขาล้อแบบลากหาง

สาเหตุเนื่องจาก ชุดขาล้อแบบลากหางมีความวิกฤตเกิดขึ้นทั้งล้อหลักและล้อหาง โดย ล้อหลักมีพื้นที่วิกฤตเป็นบริเวณกว้างตั้งแต่โคนขาล้อไปจนถึงช่วงกึ่งกลางขาล้อ ส่วนล้อหางมีพื้นที่ วิกฤตทั้งขาล้ออีกทั้งความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นยังมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุด้วย ซึ่งต่างจาก ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ โดยล้อหน้ามีพื้นที่วิกฤตเพียงพื้นที่เล็กๆบริเวณ โคนขาล้อ ส่วนขาล้อหลัก เกิดพื้นที่วิกฤตเพียงบริเวณมุม โคนขาล้อ อีกทั้งความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นถึงแม้จะมีค่าสูงกว่าค่าความ แข็งแรงของวัสดุแต่ยังอยู่ภายใต้ค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ จึงส่งผลให้ชุดขาล้อแบบลากหางมี ความวิกฤตในการทำการลงจอดมากกว่าชุดขาล้อแบบขาสามล้อ

8. เปรียบเทียบผลวิเคราะห์กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากผลการศึกษาของ Morrison, Neff และ Zahraee ที่ได้ศึกษาถึงการเกิดความเค้นและการ เปลี่ยนรูปของโครงสร้างขาล้อหลักของอากาศยานรุ่น Berkut พบว่า บริเวณพื้นที่วิกฤตที่มีความเค้น สูงสุดเกิดขึ้นคือ บริเวณมุม โคนขาล้อทั้งสองข้าง ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ที่มีพื้นที่วิกฤตเกิดขึ้นบริเวณมุม โคนขาล้อหลักเช่นกัน ดังภาพที่ 44



ผลวิเคราะห์ในงานวิจัย

ผลวิเคราะห์ในงานวิจัยอ้างอิง

ภาพที่ 44 เปรียบเทียบพื้นที่วิกฤตที่ขาดหลักจากงานวิจัยและงานวิจัยอ้างอิง

ข้อแตกต่างของการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอ้างอิงคือ งานวิจัยอ้างอิงใช้เพียงการวิเคราะห์โดยกำหนดให้มีภาระกระทำในแนวตั้งกดลงที่ขาด แต่การวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์หลากหลายกรณีมากกว่า เพราะเป็นการวิเคราะห์โดยการจำลองการลงจอดทั้ง 5 กรณี ตามมาตรฐานของ FAR 23 – Appendix C

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การวิเคราะห์โครงสร้างของชุดขาตั้งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการออกแบบชุดขาตั้งรวมถึงการนำไปใช้งานจริง เพราะทำให้ทราบถึงจุดวิกฤตที่จะก่อให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างขาตั้งและทำให้สามารถแก้ไขปรับปรุงเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือได้ก่อนนำไปใช้งาน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาวิเคราะห์และเปรียบเทียบถึงพื้นที่วิกฤตของชุดขาตั้ง 2 แบบ คือชุดขาตั้งแบบขาสามล้อและแบบลากหางของอากาศยานเบา ที่จะก่อให้เกิดความเสียหายและส่งผลกระทบต่ออย่างรุนแรงต่อโครงสร้างของชุดขาตั้งมากที่สุด เมื่อต้องลงจอดในลักษณะที่แตกต่างกันไปตามเงื่อนไขการลงจอดมาตรฐานของ FAR 23 - Appendix C: Basic landing conditions โดยได้วิเคราะห์ชุดขาตั้งทั้งสองแบบทั้งการลงจอดด้วยการกระโดดและการกระโดดสูงสุด และได้ใช้การวิเคราะห์แบบสถิติด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ ซึ่งมีการวิเคราะห์ทั้งสิ้น 10 กรณี แบ่งเป็นการวิเคราะห์ชุดขาตั้งแบบขาสามล้อ 6 กรณีและการวิเคราะห์ชุดขาตั้งแบบลากหาง 4 กรณี

ซึ่งผลการวิจัยนี้มีความสอดคล้องและบรรลुकับวัตถุประสงค์ในการวิจัย ดังนี้

1. การวิเคราะห์รูปแบบการลงจอดของชุดขาตั้งอากาศยานเบาทั้ง 2 แบบ ใช้การวิเคราะห์ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยซอฟต์แวร์ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีความถูกต้องแม่นยำและน่าเชื่อถือได้ อีกทั้งยังช่วยลดระยะเวลาในการวิเคราะห์ลดค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน และยังทำให้ผู้วิจัยมีความรู้ความเข้าใจในการวิเคราะห์โดยใช้วิธีนี้ด้วย

2. การศึกษาและวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่วิกฤตที่จะสร้างความเสียหายกับชุดขาตั้งทั้ง 2 แบบ ทำให้ทราบถึงพื้นที่วิกฤตของชุดขาตั้ง คือบริเวณมุมโคนขาตั้งและด้านล่างของโคนขาตั้งซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Morrison, Neff และ Zahraee ที่กล่าวว่าพื้นที่วิกฤตของขาตั้งหลักของอากาศยานรุ่น Berkut เกิดที่บริเวณมุมโคนขาตั้งทั้งสองข้าง

3. การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ด้าน โครงสร้างของชุดขาตั้งทั้ง 2 แบบพบว่า กรณีการลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดขาตั้งแบบสามล้อมากที่สุดคือ กรณีการลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสกับพื้นด้วยภาระกรรมสูงสุด สำหรับการลงจอดที่มีอิทธิพลกับชุดขาตั้งแบบลากหางมากที่สุดคือ การลงจอดด้วยภาระกรรมสูงสุดทั้งกรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าสัมผัสพื้นพร้อมกันและการลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้น หากเปรียบเทียบถึงความสามารถในการลงจอดระหว่างชุดขาตั้งทั้ง 2 แบบด้วยกรณีลงจอดเดียวกันคือ การลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นหรือการลงจอดแบบเปิดมุมปะทะสูงสุด การลงจอดด้วยล้อหลัก และการลงจอดแบบสามล้อพร้อมกัน พบว่า ชุดขาตั้งแบบสามล้อมีความสามารถในการทำการลงจอดได้ดีกว่าชุดขาตั้งแบบลากหาง

สำหรับชุดขาตั้งแบบลากหาง สาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการลงจอดนั้นเกิดจากล้อหาง ซึ่งเป็นล้อช่วยเล็กๆ ที่ช่วยบังคับทิศทางของอากาศยานขณะขับเคลื่อนบนพื้นทางขับได้รับการกรรมขณะทำการลงจอดมากเกินไป ส่งผลให้ล้อหางเกิดความเสียหาย

จากการวิเคราะห์ในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้ยางเป็นวัสดุแข็ง ดังนั้นในการวิเคราะห์ผลของโปรแกรมจึงไม่พิจารณาถึงการดูดซับพลังงานของยาง โดยยางสามารถส่งผ่านภาระกรรมไปยังขาตั้งได้ทั้งหมด ซึ่งจากการวิเคราะห์ทั้งหมดที่ได้อาจมีค่าเกินจากความเป็นจริงอยู่บ้าง เนื่องจากการไม่พิจารณาถึงการดูดซับพลังงานของยาง แต่ในการลงจอดจริงนั้นยางสามารถดูดซับพลังงานที่กระทำกับขาตั้งได้บางส่วน ทำให้ภาระกรรมที่กระทำกับขาตั้งลดลง

ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อวิเคราะห์โครงสร้างและหาพื้นที่วิกฤติของชุดขาตั้งแบบอื่นๆ ได้ โดยใช้หลักการในการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวถึงในงานวิจัยนี้ อาทิ ชุดขาตั้งแบบจักรยานสามารถวิเคราะห์การลงจอดโดยการประยุกต์ใช้หลักการวิเคราะห์ของชุดขาตั้งแบบสามล้อ หรือชุดขาตั้งแบบมีล้อหลักเดี่ยวสามารถนำเอาหลักการวิเคราะห์ของชุดขาตั้งแบบลากหางเพื่อใช้ในการวิเคราะห์การลงจอดได้ เพราะมีความคล้ายคลึงกันในการจัดวางตำแหน่งขาตั้ง

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้สามารถเป็นแนวทางในการวิเคราะห์ขาล้อประเภทอื่นๆ ได้ อาทิ ชุดขาล้อแบบล้อหลักเดี่ยว ชุดขาล้อแบบจักรยาน เป็นต้น ในการวิเคราะห์การลงจอดทั้ง 5 กรณีดังที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และยังสามารถวิเคราะห์ถึงการลงจอดในกรณีอื่นๆ ที่ FAR ระบุไว้ เช่น การลงจอดโดยอาศัยล้อหลักข้างเดียว หรือการลงจอดโดยมีการกระทำความดันข้าง ในการวิเคราะห์การลงจอดนี้ยังสามารถวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์แบบไดนามิกส์ (Dynamic) เนื่องจากในการลงจอดจริงนั้นชุดขาล้อมีการเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลาและภาระกรรมที่กระทำไม่คงที่

อีกทั้งยังสามารถพิจารณาถึงความสัมพันธ์ของขงที่มีผลต่อการลงจอด เช่น การพิจารณา ระยะบูตตัวเมื่อขงสัมผัสพื้น การดูดซับพลังงานและการส่งผ่านพลังงานไปยังขาล้อ เป็นต้น

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ปราโมชย์ เตชะอำไพ, ยศกร ประทุมวัลย์, วิโรจน์ ลิ้มตระการ และ เสฏฐวรรธ สุจริตภวัตสกุล
2552. การประยุกต์ใช้ไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย **Solideorks Simulation**. สำนักพิมพ์ ส.ส.ท,
กรุงเทพฯ.
- ภากรณ์ ทรัพย์เจริญ. 2551. การวิเคราะห์หุ้มมอลอยตัวของชุดจับยึดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ด้วยระเบียบ
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Raymer Daniel P. 1999. **Aircraft Design A Conceptual Approach**. American Institute of
Aeronautics and Astronautics, USA.
- G.K. Neo, H.W. Ng, W.X. Chu and X.W. Xie. n.d. **F 16 Landing Gear Simulation for
Structural and Reliability Analysis**. Nanyang Technological University, Singapore.
- Pazmany L. 1986. **Landing Gear Design for Light Aircraft**. Pazmany Aircraft Corporation,
USA.
- Micheal, C. Y. Nui. 1989. **Airframe Structural Design**. Technical Book Company. USA.
- Micheal, C. Y. Nui. 1999. **Airframe Stress Analysis and Sizing**. 2nd edition. Technical Book
Company. USA.
- Morrison D., Neff D. and Zahraee M. 1995. **Aircraft Landing Gear Simulation and Analysis**.
Allied Signal/ McNair Summer Undergraduate Research Internship. USA.
- Roskam, J. 1986. **Airplane Design Part IV: Layout Design of Landing Gear and System**.
Roskam Aviation and Engineering, USA.

Wikipedia. 2553. **Cessna 150**. Source: [http:// en.wikipedia.org/wiki/Cessna_150](http://en.wikipedia.org/wiki/Cessna_150), July 17, 2010.

Wikipedia. 2553. **Cessna 170**. Source: [http:// en.wikipedia.org/wiki/Cessna_170](http://en.wikipedia.org/wiki/Cessna_170), July 17, 2010.





ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ภารกรรมการลงจอดของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ

การลงจอด	ภารกรรม (N)	ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ			
		ภารกรรมจำกัด		ภารกรรมสูงสุด	
		ล้อหลัก (ต่อล้อ)	ล้อหน้า	ล้อหลัก (ต่อล้อ)	ล้อหน้า
กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน แล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ (Level landing with inclined reaction)	V _f	6,290.82	-	9,436.23	-
	D _f	2,096.42	-	3,144.62	-
	V _r	-	4,384.67	-	6,577.01
	D _r	-	1,461.19	-	2,191.79
กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้น (Level landing with Nose wheel just clear of ground)	V _f	8,488.55	-	12,732.83	-
	D _f	2,828.81	-	4,243.22	-
	V _r	-	0	-	0
	D _r	-	0	-	0
กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น (Tail down landing)	V _f	8,488.55	-	12,732.83	-
	D _f	0	-	0	-
	V _r	-	0	-	0
	D _r	-	0	-	0

ตารางผนวกที่ ก2 ภารกรรมการลงจอดของชุดขาล้อแบบลากหาง

การลงจอด	ภารกรรม (N)	ชุดขาล้อแบบลากหาง			
		ภารกรรมจำกัด		ภารกรรมสูงสุด	
		ล้อหลัก (ต่อล้อ)	ล้อหาง	ล้อหลัก (ต่อล้อ)	ล้อหาง
กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน (Level landing)	V _f	8,488.55	-	12,732.83	-
	D _f	2,828.81	-	4,243.22	-
	V _r	-	0	-	0
	D _r	-	0	-	0
กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น (Tail down landing)	V _f	7,653.32	-	11,479.98	-
	D _f	0	-	0	-
	V _r	-	1,676.53	-	2,514.79
	D _r	-	0	-	0



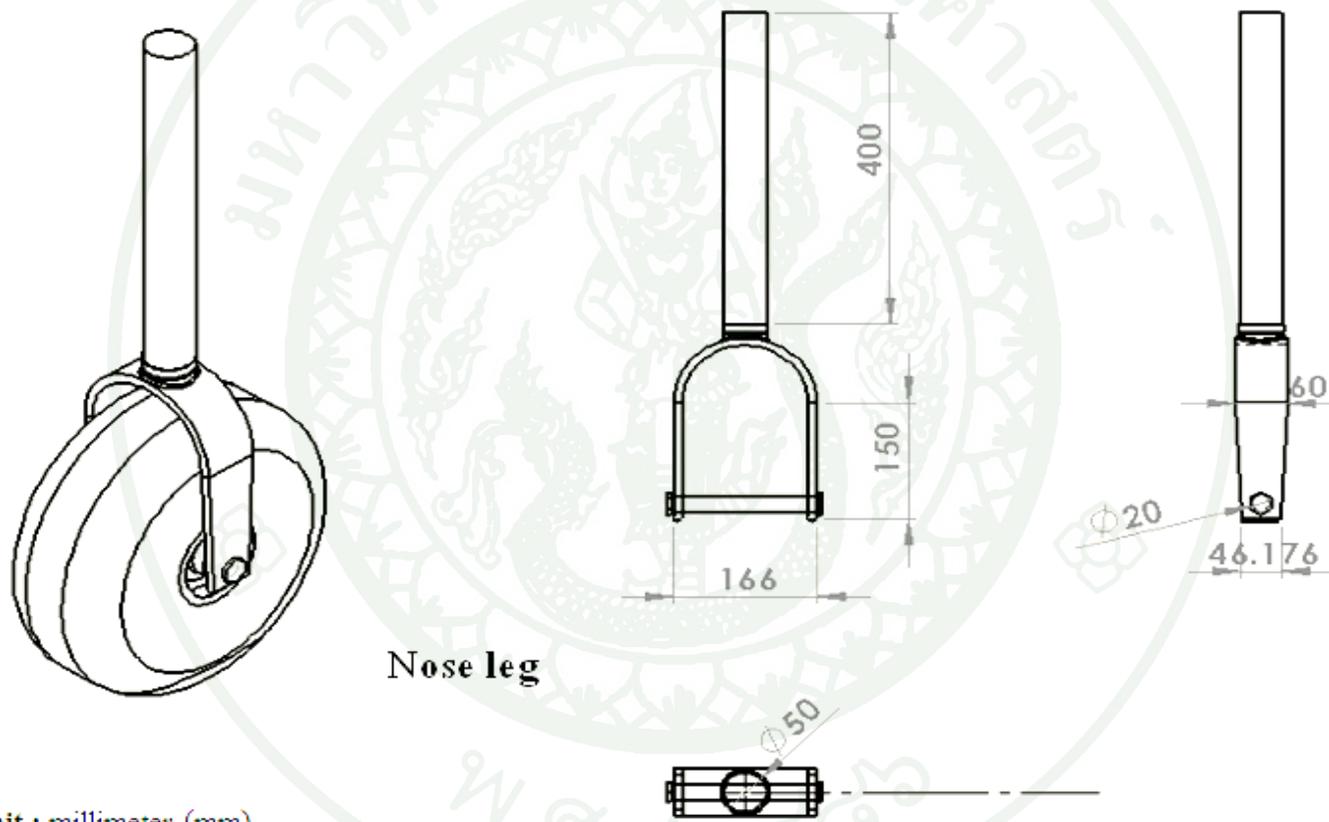
ตารางผนวกที่ ข1 ค่าความเค้นสูงสุดของชุดขาล้อทั้งสองแบบ

การลงจอด	ความเค้นสูงสุด (MPa)							
	ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ				ชุดขาล้อแบบลากหาง			
	ภาระกรรมจำกัด		ภาระกรรมสูงสุด		ภาระกรรมจำกัด		ภาระกรรมสูงสุด	
	ล้อหลัก	ล้อหน้า	ล้อหลัก	ล้อหน้า	ล้อหลัก	ล้อหาง	ล้อหลัก	ล้อหาง
กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน แล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ (Level landing with inclined reaction)	580.35	140.20	877.55	210.30	-	-	-	-
กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้น (Level landing with Nose wheel just clear of ground)	790.45	-	1,189.85	-	-	-	-	-
กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน (Level landing)	-	-	-	-	878.05	-	1,328.90	-
กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น (Tail down landing)	636.80	-	956.05	-	678.20	1,004.40	1,016.50	1,506.50

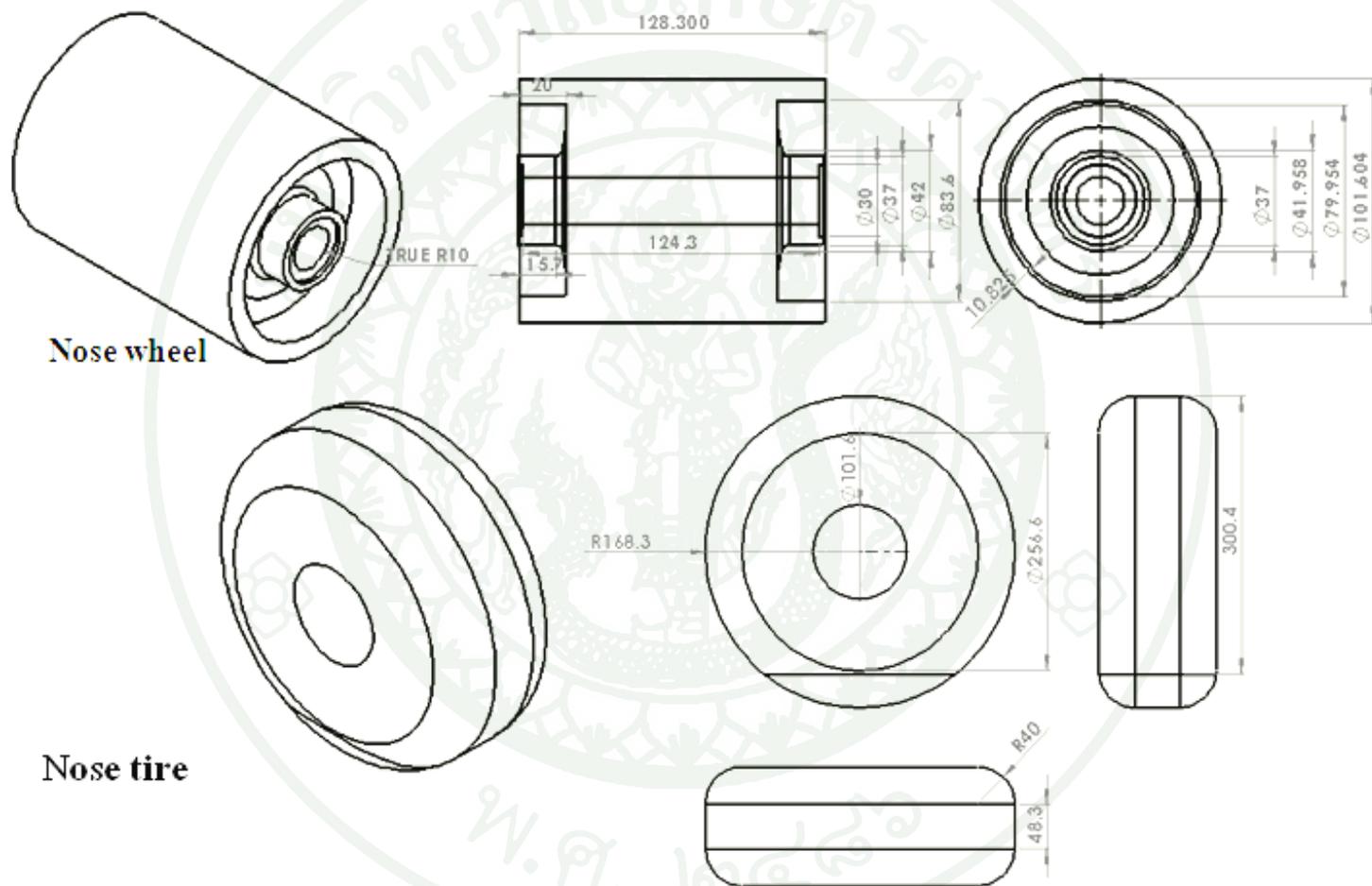
ตารางผนวกที่ ข2 Margin of Safety ของชุดขาล้อทั้งสองแบบ

การลงจอด	Margin of Safety							
	ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ				ชุดขาล้อแบบลากหาง			
	การกรรมจำกัด		การกรรมสูงสุด		การกรรมจำกัด		การกรรมสูงสุด	
	ล้อหลัก	ล้อหน้า	ล้อหลัก	ล้อหน้า	ล้อหลัก	ล้อหาง	ล้อหลัก	ล้อหาง
กรณีลงจอดในลักษณะล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน แล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ (Level landing with inclined reaction)	0.28	4.28	-0.16	2.52	-	-	-	-
กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้น (Level landing with Nose wheel just clear of ground)	-0.06	-	-0.38	-	-	-	-	-
กรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกัน (Level landing)	-	-	-	-	-0.16	-	-0.44	-
กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสกับพื้น (Tail down landing)	0.16	-	-0.23	-	0.09	-0.26	-0.27	-0.51





ภาพผนวกที่ 1 ขนาดขาต่อหน้าของชุดขาต่อแบบขาสามล้อ

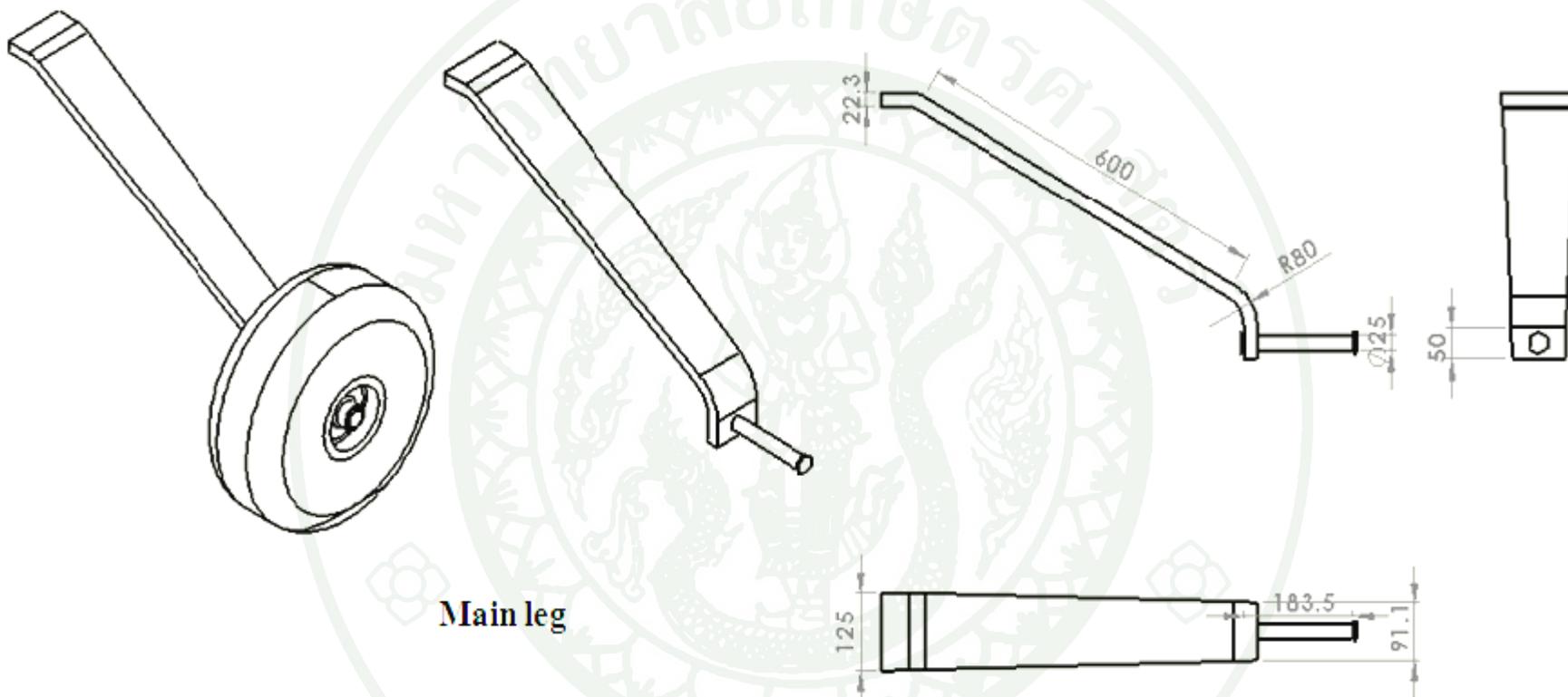


Nose wheel

Nose tire

Unit : millimeter (mm)

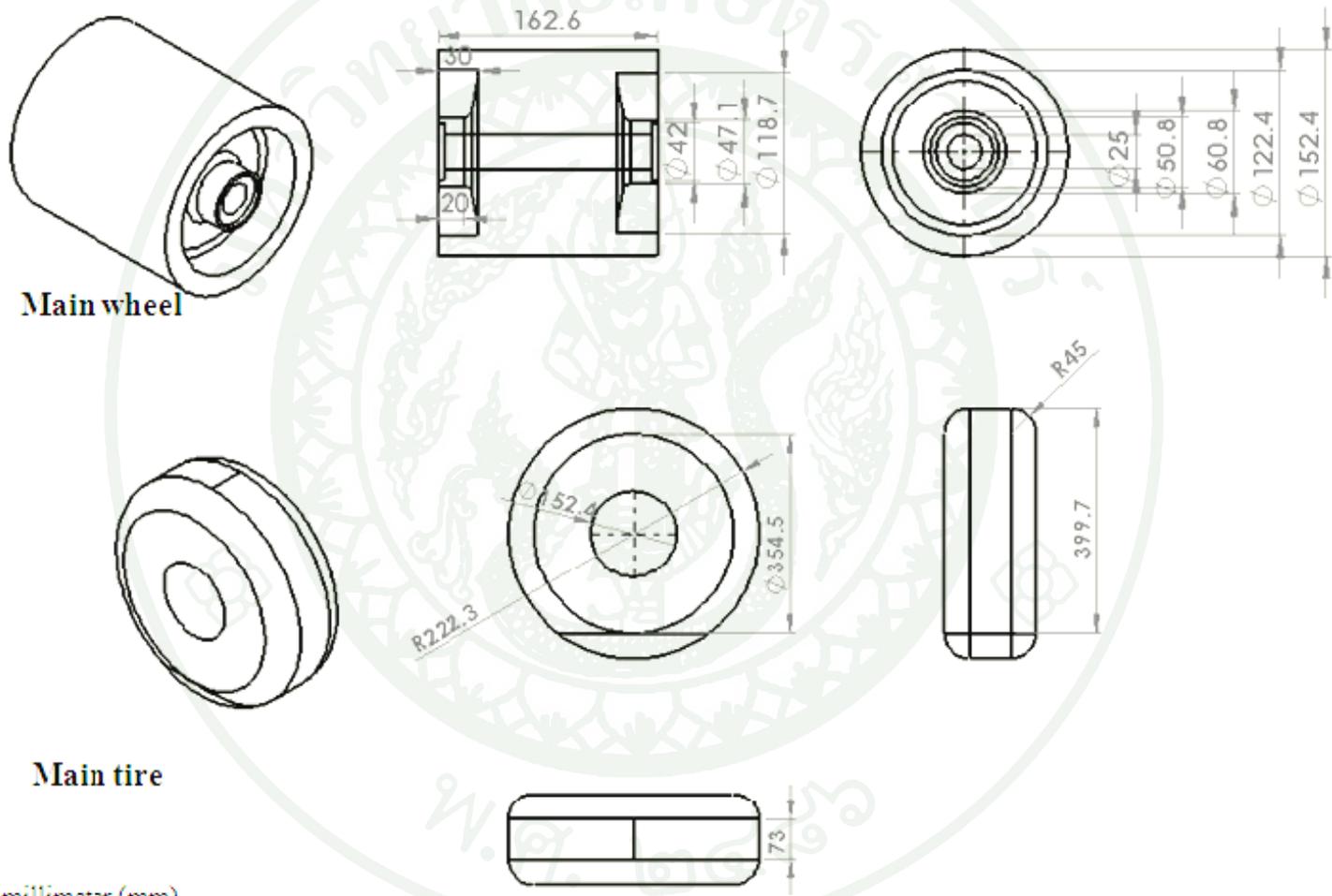
ภาพผนวกที่ 2 ขนาดล้อและยางของขาล้อหน้าของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ



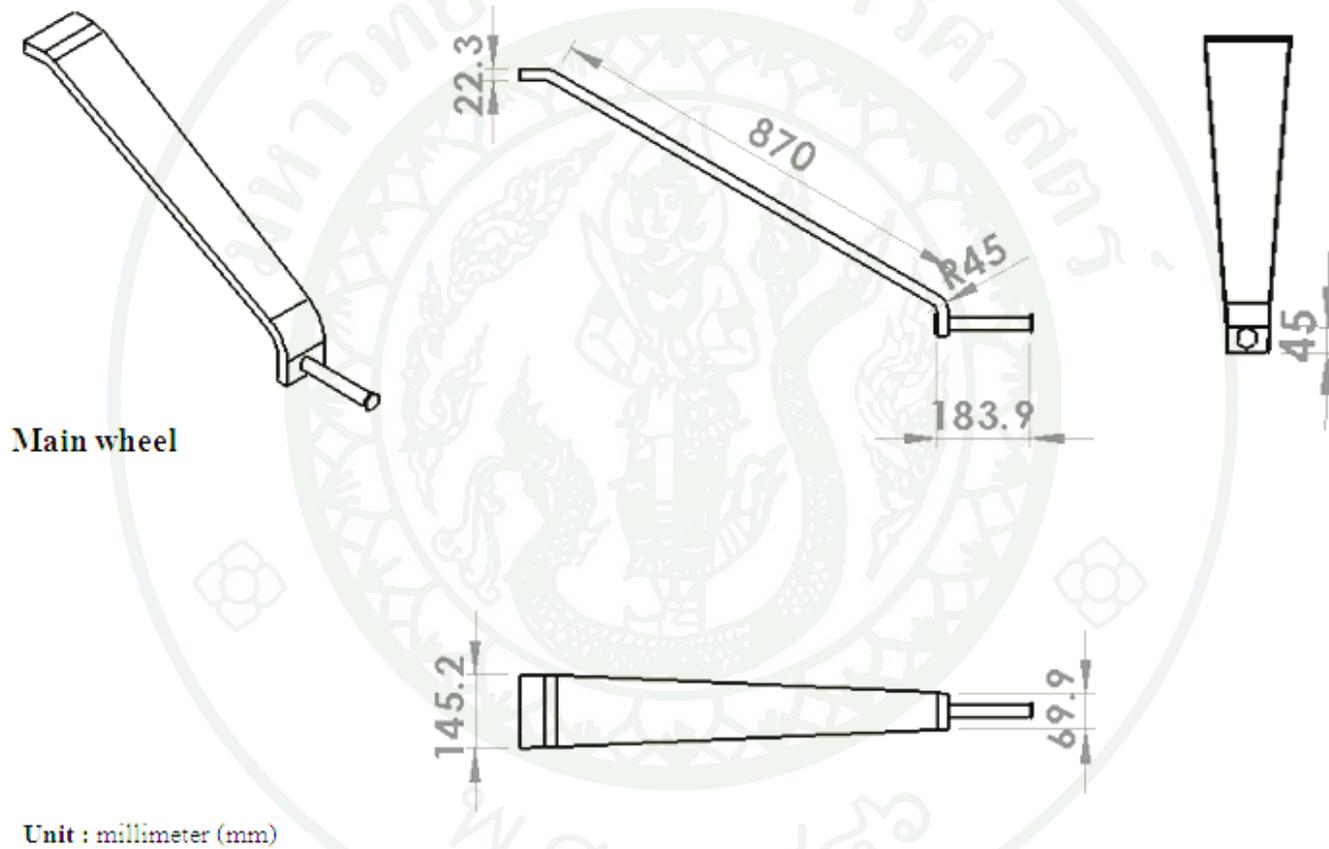
Main leg

Unit : millimeter (mm)

ภาพผนวกที่ 3 ขนาดขาตั้งหลักของชุดขาตั้งแบบขาสามล้อ



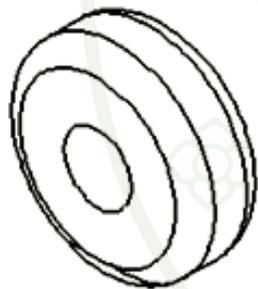
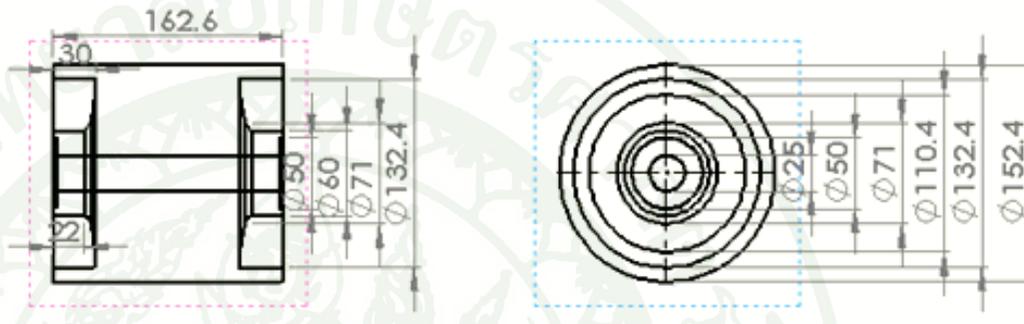
ภาพผนวกที่ 4 ขนาดล้อและยางของขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ



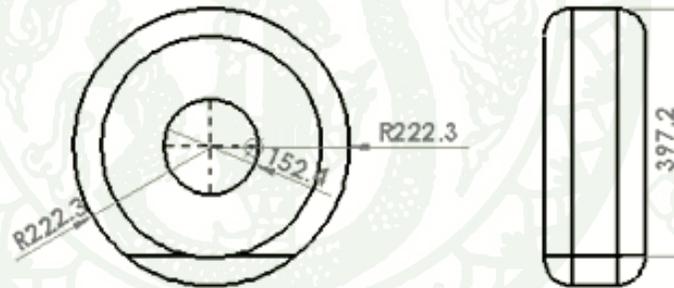
ภาพผนวกที่ 5 ขนาดขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง



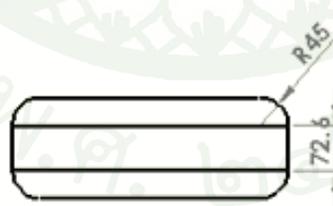
Main wheel



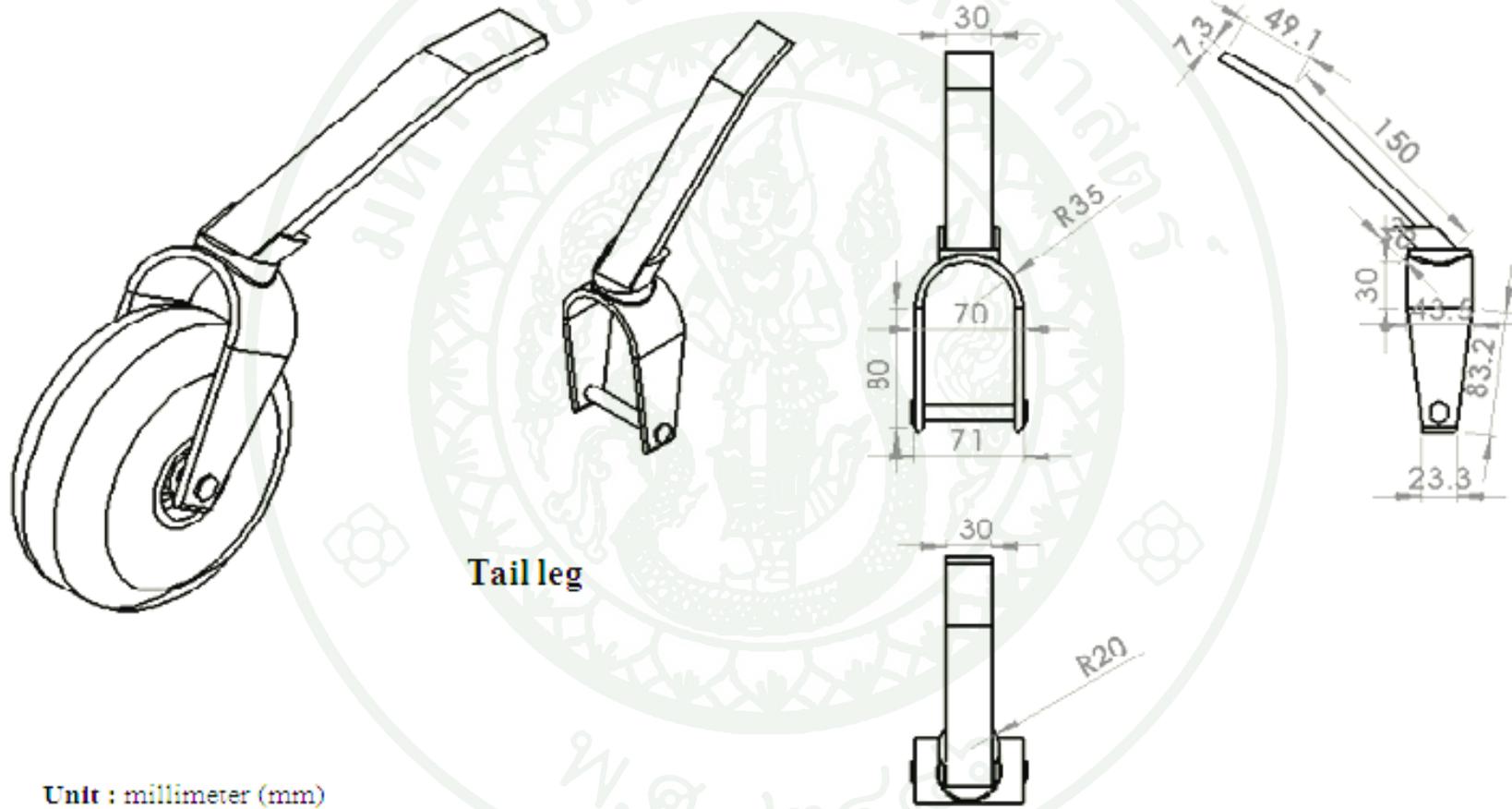
Main tire



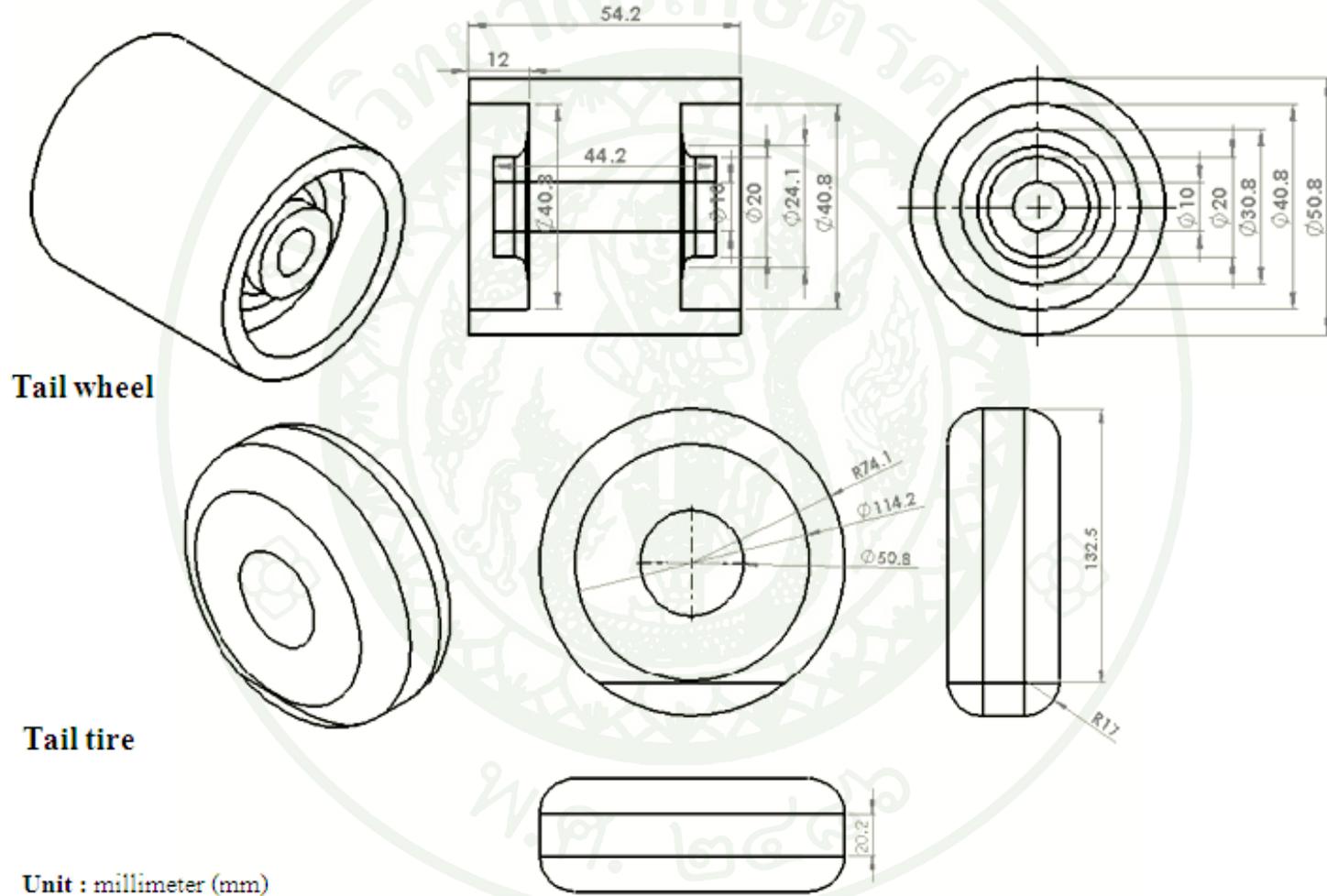
Unit : millimeter (mm)



ภาพผนวกที่ 6 ขนาดล้อและยางของขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง



ภาพผนวกที่ 7 ขนาดขาต่อหางของชุดขาต่อแบบลากหาง



ภาพผนวกที่ 8 ขนาดล้อและยางของขาล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง



ภาคผนวก ง
โปรแกรม Solidworks Simulation

1. Solidworks Simulation คืออะไร

Solidworks Simulation เดิมชื่อ COSMOSWorks เป็นเครื่องมือช่วยในการวิเคราะห์ปัญหาทางวิศวกรรมด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer Aided Engineering, CAE) ซึ่งช่วยให้การใช้งาน CAD (Computer Aided Design) และ CAE มีความต่อเนื่อง สะดวกรวดเร็ว และมีประสิทธิภาพมากขึ้น

Solidworks Simulation สร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคระเบียบวิธีเชิงตัวเลขหรือที่เรียกว่า Finite - Element Analysis (FEA) สำหรับการหาคำตอบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์ย่อย (Partial Differential Equation) พร้อมๆกับสมการปริพันธ์ โดยผลลัพธ์ที่ได้จากระเบียบวิธีนี้มีพื้นฐานมาจากการกำจัดสมการเชิงอนุพันธ์อย่างสมบูรณ์ (สำหรับปัญหาในสถานะคงที่) หรือมาจากการปรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ให้กลายเป็นระบบโดยประมาณของสมการเชิงอนุพันธ์สามัญซึ่งเป็นปริพันธ์ทางคณิตศาสตร์ด้วยการใช้เทคนิคมาตรฐานทางคณิตศาสตร์เช่น Euler method เป็นต้น

2. ขั้นตอนการใช้งาน Solidworks Simulation

Solidworks Simulation เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้งานภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows Operation System) ในการใช้งานเพื่อวิเคราะห์หาค่าความเค้นที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานทดสอบ มีขั้นตอนการใช้งานซอฟต์แวร์ Solidworks Simulation 6 ขั้นตอน ดังนี้

2.1 การสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์ (CAD model creation)

เป็นขั้นตอนการสร้างรูปทรงเรขาคณิตของปัญหาชิ้นงานที่ต้องการทดสอบ โดยสร้างให้มีค่าใกล้เคียงกับของจริงมากที่สุด นั่นหมายความว่า สมการซึ่งแสดงรูปทรงทางเรขาคณิต เช่น สมการเส้นโค้ง สมการผิวโค้ง จำเป็นต้องถูกสร้างและฝังตัวเองอยู่ในซอฟต์แวร์ เพื่อให้รูปแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะเกิดขึ้นตามมามีความถูกต้องมากที่สุด หากรูปร่างของปัญหาที่มีความซับซ้อนมากและยากแก่การสร้างรูปร่างนั้นโดยตรงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ สามารถทำการสแกน (Scan) รูปแบบของจริง แล้วส่งไฟล์นำเข้า (Import file) ไปยังไฟไนต์เอลิเมนต์ซอฟต์แวร์ได้ (ปราโมทย์ และคณะ, 2552)

2.2 การเรียกใช้ Simulation ภายในซอฟต์แวร์ Solidworks

การเรียกใช้ Simulation นั้น จะต้องเข้าไปกำหนดในแถบเครื่องมือ (Tools) แล้วเลือก Add – In จากนั้นเลือก Solidworks Simulation

2.3 การสร้างโมเดลไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Model) หรือ เมช (Mesh)

ขั้นตอนนี้เป็น การสร้างเมชหรือการแบ่งรูปทรงทางเรขาคณิตที่สร้างขึ้นในขั้นตอนแรก ออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ โดยเอลิเมนต์เหล่านี้จะถูกเชื่อมต่อกันด้วยจุดต่อ (Node) ความละเอียดของขนาดเอลิเมนต์สามารถปรับขนาดได้อย่างง่าย โดยการเลื่อนสไลด์ระหว่างเมชหยาบ (Coarse) และ เมชละเอียด (Fine) หรือถ้าต้องการกำหนดขนาดเอลิเมนต์ก็สามารถทำได้เช่นกัน

อีกทั้งยังต้องกำหนดคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ โดยทำการเลือกวัสดุจากข้อมูลที่มีอยู่แล้ว ในฐานข้อมูลของ Solidworks (Solidworks materials) หากวัสดุที่ต้องการใช้ในการทดสอบไม่มีอยู่ในฐานข้อมูล สามารถทำการป้อนข้อมูลและเก็บไว้ใช้ในครั้งต่อไปได้

2.4 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของปัญหา (Boundary Condition : BC)

ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ต้องการทดสอบ ไม่ว่าจะเป็นการกำหนดจุดยึดชิ้นงาน โดยเป็นการกำหนดตำแหน่งและลักษณะของการจับยึด เช่น การจับยึดแบบยึดติด (Fixed) แบบห้อย (Fixed Hinge) หรือแบบที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Roller/Slide) เป็นต้น และทำการกำหนดการกระทำที่กระทำกับชิ้นงานตามความต้องการ อาทิ แรง (Force) แรงดัน (Pressure) แรงบิด (Torque) และ แรงโน้มถ่วง (Gravity) เป็นต้น

2.5 การคำนวณหาค่าตอบ

หลังจากเตรียมข้อมูลต่างๆครบถ้วนแล้ว การคำนวณหาค่าตอบสามารถทำได้ง่าย ๆ โดยการสั่งให้ซอฟต์แวร์ทำการคำนวณผล ด้วยการคลิกคำสั่ง Run ที่แถบเมนูคำสั่ง จากนั้นซอฟต์แวร์จะคำนวณหาค่าตอบให้ทันที หากปัญหานั้นมีขนาดใหญ่อาจใช้เวลาในการคำนวณ แต่หากปัญหามีขนาดเล็กไม่ใหญ่นัก เวลาที่ใช้ในการคำนวณจะค่อนข้างสั้น

2.6 การแสดงผลลัพธ์ที่ได้

หลังจากคำนวณเสร็จแล้ว ซอฟต์แวร์จะแสดงการเสียรูป (Deformed shape) ของชิ้นงาน และแสดงค่าความเค้นวอนมิส (Von Mises Stress) ที่เกิดขึ้น โดยซอฟต์แวร์จะส่งผลลัพธ์เข้ามาพร้อมแสดงผลจำนวน 3 ค่า ได้แก่ ค่าความเค้นวอนมิส ค่าการเคลื่อนตัวรวม (Resultant Displacement) และค่าความเครียด (Equivalent Strain)

การแสดงผลลัพธ์ของปัญหา 3 มิติ นอกจากจะแสดงให้เห็นความเค้นที่ผิวค้ำนออกทั้งหมดแล้ว ยังสามารถดูความเค้นที่เกิดขึ้นภายในได้โดยใช้คำสั่ง Section Clipping เพื่อตัดชิ้นส่วนในแนวระนาบที่ต้องการได้



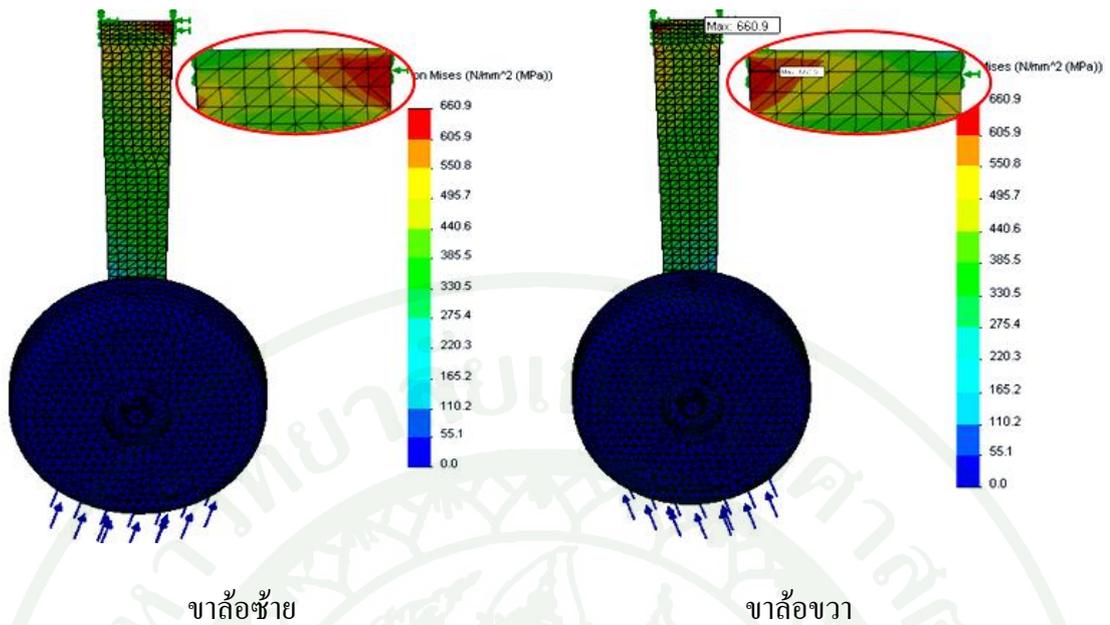
จากการวิเคราะห์เพื่อหาพื้นที่วิกฤตของชุดขาล้อแบบขาสามล้อและแบบลากหางเมื่อทำการลงจอดในสภาพที่แตกต่างกันไปตามมาตรฐานของ FER 23 Appendix C หากพิจารณาถึงลักษณะที่การกระแทกกับชุดขาล้อพบว่า การลงจอดของชุดขาล้อแบบขาสามล้อกรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าและล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันแล้วมีแรงกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ และกรณีการลงจอดในลักษณะที่ล้อหน้าไม่สัมผัสพื้นมีการกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ โดยทำมุม 18.43 องศา ส่วนกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นนั้นมีการกระทำในแนวตั้งฉากกับขาล้อ สำหรับชุดขาล้อแบบลากหาง มีการกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อในกรณีลงจอดในลักษณะที่ล้อหลักสัมผัสพื้นพร้อมกันโดยทำมุม 18.43 องศากับขาล้อ ส่วนกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นนั้นมีการกระทำในแนวตั้งฉากกับขาล้อ

จะเห็นได้ว่า กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นของชุดขาล้อทั้ง 2 แบบ มีการกระทำในแนวตั้งฉากกับขาล้อ ซึ่งแตกต่างจากกรณีลงจอดอื่น ๆ ที่มีการกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการวิจัยเพิ่มเติมกรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีการกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อ โดยทำมุม 18.43 องศา เพื่อศึกษาถึงพื้นที่วิกฤตที่จะสร้างความเสียหายต่อโครงสร้างชุดขาล้อทั้ง 2 แบบ ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ดังนี้

1. ชุดขาล้อแบบขาสามล้อ

1.1 กรณีลงจอดด้วยการกระแทก

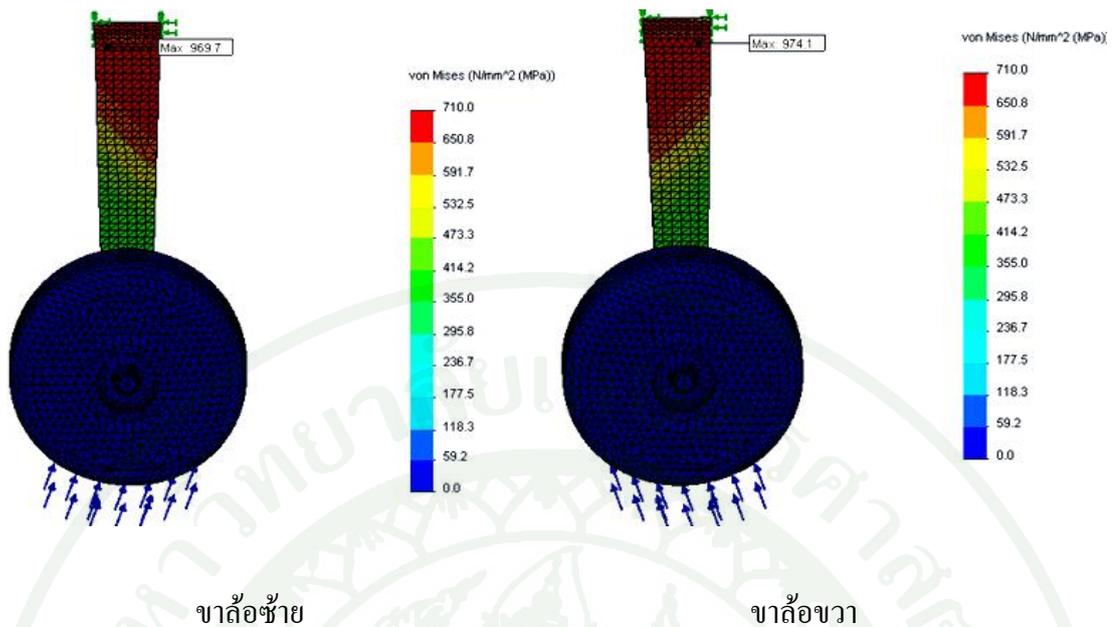
ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบความเค้นที่เกิดกับขาล้อหลักได้กระจายจากช่วงล่างไปยังส่วนโคนขาล้อที่ยึดติดกับอากาศยาน พื้นที่วิกฤตคือ บริเวณมุมโคนขาล้อ โดยขาล้อซ้ายจะเกิดพื้นที่วิกฤตที่มุมขวาของโคนขาล้อ ส่วนขาล้อขวาเกิดพื้นที่วิกฤตที่มุมซ้ายของโคนขาล้อ โดยมีค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 660.90 MPa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นในกรณีที่มีการกระทำในแนวตั้งฉากกับขาล้ออยู่เล็กน้อย โดยมีค่า M.S. เท่ากับ 0.12 เป็นค่าที่ยังมีความปลอดภัยต่อโครงสร้างขาล้อ ดังภาพผนวกที่ 9



ภาพผนวกที่ 9 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีการกระทำได้ในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยการกระจกัก

1.2 กรณีลงจอดด้วยการกระสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบความเค้นที่เกิดกับขาล้อหลักได้กระจายจากช่วงล่างไปยังส่วนโคนขาล้อที่ยึดติดกับอากาศยาน โดยมีพื้นที่วิกฤตเกิดขึ้นเป็นบริเวณกว้างประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่ขาล้อ ตั้งแต่โคนขาล้อไปจนถึงช่วงกึ่งกลางของขาล้อ มีลักษณะพื้นที่วิกฤตเหมือนกันทั้งขาล้อซ้ายและขวา ซึ่งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 971.90 Mpa โดยมีค่า M.S. เท่ากับ -0.24 เป็นค่าที่น้อยกว่าศูนย์ ทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยหรือเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างขาล้อหลัก เมื่อทำการลงจอดในกรณีนี้ ดังภาพผนวกที่ 10

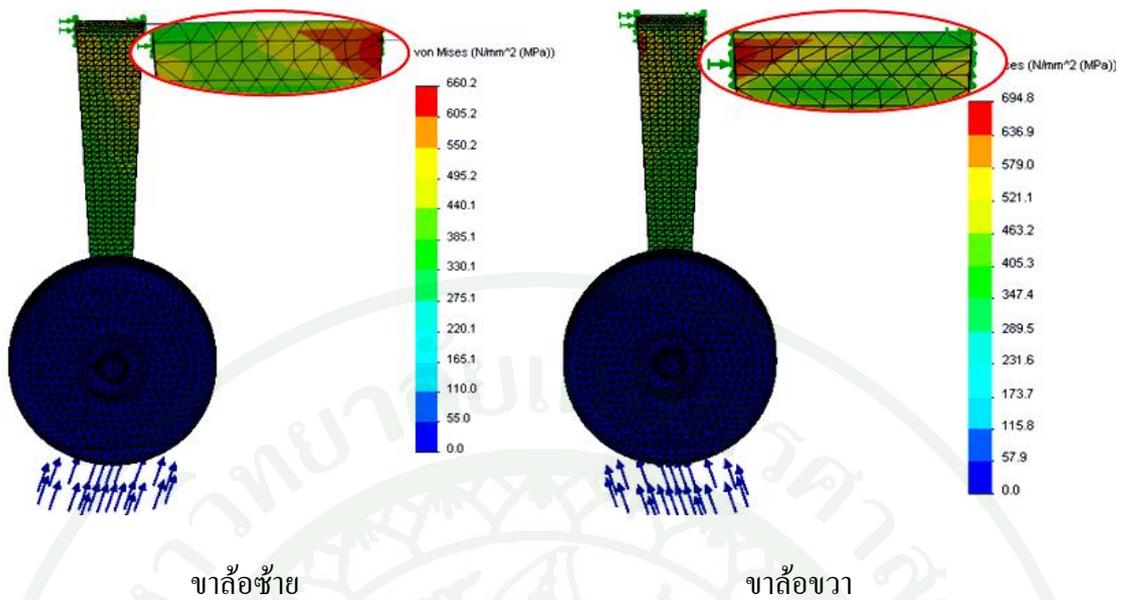


ภาพผนวกที่ 10 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบขาสามล้อ กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยภาระสูงสุด

2. ชุดขาล้อแบบลากหาง

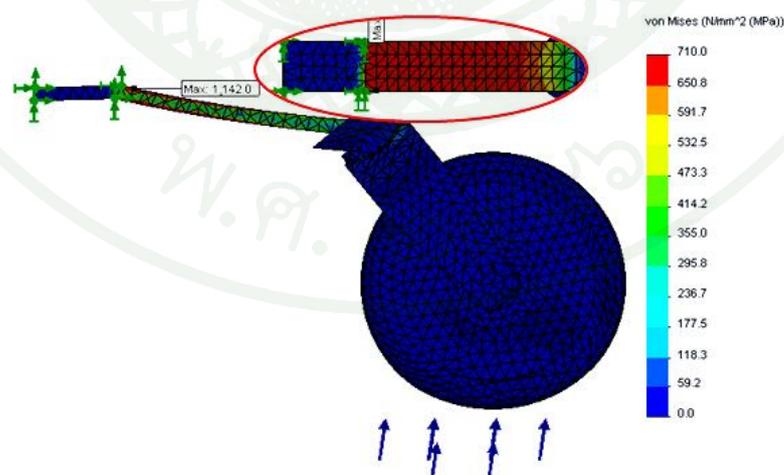
2.1 กรณีลงจอดด้วยภาระกรรมจำกัด

ผลการศึกษาพบว่า รูปแบบความเค้นที่เกิดกับขาล้อหลักได้กระจายจากช่วงล่างไปยังส่วนโคนขาล้อที่ยึดติดกับอากาศยาน พื้นที่วิกฤตคือ บริเวณมุมโคนขาล้อ โดยขาล้อซ้ายจะเกิดพื้นที่วิกฤตที่มุมขวาของโคนขาล้อ ส่วนขาล้อขวาเกิดพื้นที่วิกฤตที่มุมซ้ายของโคนขาล้อ โดยมีค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นเท่ากับ 667.50 MPa และมีค่า M.S. เท่ากับ 0.11 โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างขาล้อเมื่อลงจอดในกรณีนี้ ดังภาพผนวกที่ 11



ภาพผนวกที่ 11 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีการกรรมกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยการกรรมจำกัด

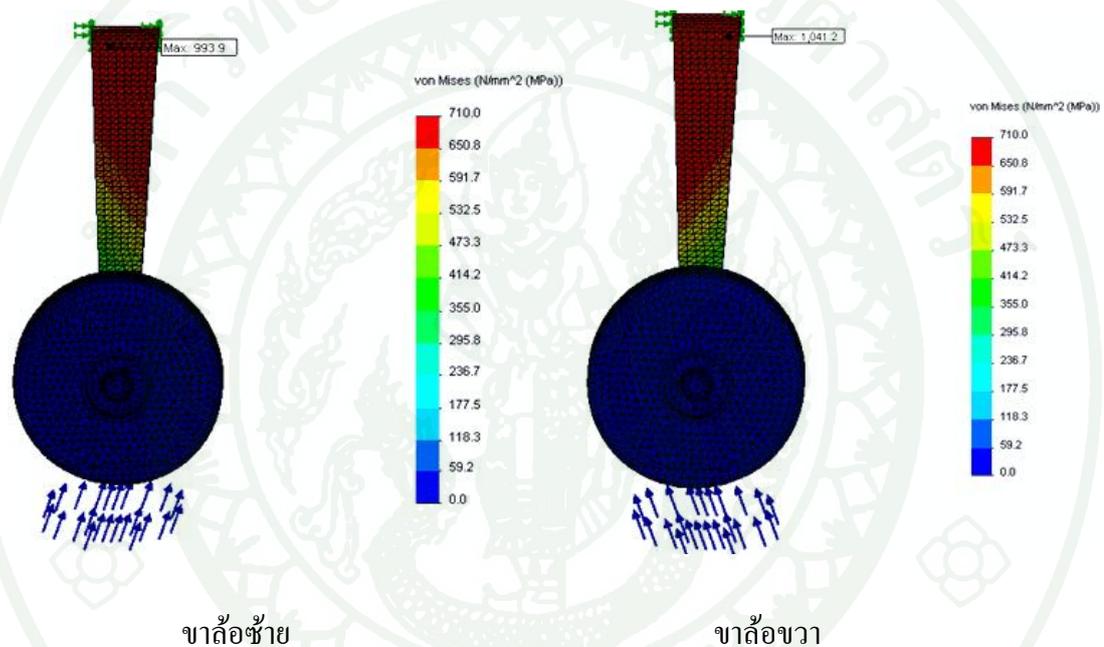
สำหรับล้อหาง มีพื้นที่วิกฤตกระจายเป็นบริเวณกว้างทั่วทั้งพื้นที่ขาล้อ อีกทั้งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นยังมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,142 Mpa และยังมีค่า M.S. เท่ากับ -0.35 เป็นค่าที่ก่อให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อหรือเกิดความเสียหายต่อโครงสร้างขาล้อจึงเกิดความเสียหายขึ้น ดังภาพผนวกที่ 12



ภาพผนวกที่ 12 ความเค้นที่ขาล้อหางของชุดขาล้อแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีการกรรมกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยการกรรมจำกัด

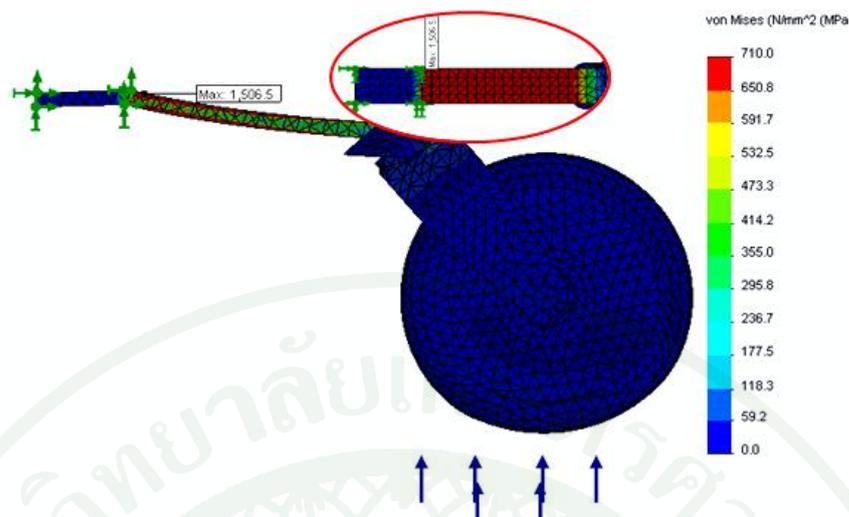
2.2 กรณีลงจุดด้วยการกรรมสูงสุด

ผลการศึกษาพบว่า มีพื้นที่วิกฤตเป็นบริเวณกว้างประมาณครึ่งหนึ่งของพื้นที่ขาล้อหลัก ตั้งแต่โคนขาล้อไปจนถึงกึ่งกลางของขาล้อ มีความเค้นสูงสุดเท่ากับ 1,017.50 Mpa ซึ่งมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงของวัสดุแต่ยังต่ำกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุ และยังมีค่า M.S. เท่ากับ -0.27 เป็นค่าที่น้อยกว่าศูนย์ซึ่งทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อโครงสร้างขาล้อจึงก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น ดังภาพผนวกที่ 13



ภาพผนวกที่ 13 ความเค้นที่ขาล้อหลักของชุดขาล้อแบบลากทาง กรณีลงจุดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกรรมกระทำในแนวเฉียงกับขาล้อด้วยการกรรมสูงสุด

สำหรับล้อหาง มีพื้นที่วิกฤตกระจายไปทั่วทั้งพื้นที่ขาล้อ อีกทั้งค่าความเค้นสูงสุดที่เกิดขึ้นยังมีค่าสูงกว่าค่าความแข็งแรงสูงสุดของวัสดุด้วย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1,506.5 Mpa และยังมีค่า M.S. เท่ากับ -0.51 โดยค่า M.S. ที่เกิดขึ้นในกรณีนี้ส่งผลให้เกิดความไม่ปลอดภัยต่อโครงสร้างขาล้อทำให้เกิดความเสียหายขึ้นอย่างมากทั้งขาล้อ ดังแสดงในภาพผนวกที่ 14



ภาพผนวกที่ 14 ความเค้นที่ขาคือหางของชุดขาคือแบบลากหาง กรณีลงจอดในลักษณะที่หางสัมผัสพื้นและมีภาระกรรมกระทำในแนวเดียวกับขาคือด้วยภาระกรรมสูงสุด

หากเปรียบเทียบความสามารถในการทำการลงจอดในกรณีนี้ของชุดขาคือทั้ง 2 แบบ พบว่าชุดขาคือแบบขาสามล้อมีความสามารถทำการลงจอดได้ดีกว่าชุดขาคือแบบลากหาง แม้จะทำการลงจอดโดยอาศัยเพียงล้อหลักเท่านั้น

สำหรับชุดขาคือแบบลากหาง สาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อการลงจอดนั้น สาเหตุหลักเกิดจากล้อหางได้รับการกรรมมากเกินไปจนเกินขีดความสามารถที่ล้อหางจะทนได้ ทำให้ล้อหางเกิดความเสียหายอย่างมาก ซึ่งส่งผลต่อการทำการลงจอดและส่งผลกระทบไปยังอากาศยานด้วย

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ -นามสกุล	วาสนา จันทร์ทงษ์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	21 สิงหาคม 2528
สถานที่เกิด	จังหวัดหนองคาย
ประวัติการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต มหาวิทยาลัยรามคำแหง

