บทความวิจัย

การประเมินความผิดพลาดของการติดตั้งสลักย้ำอากาศยานด้วยการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว

ณัฐกร ไตรรัตนวนานนท์* และ ประจวบ กล่อมจิตร
สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมอุสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 1022 1756 อีเมล: trirattanawanan_n@silpakorn.edu DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.05.002
รับเมื่อ 16 เมษายน 2564 แก้ไขเมื่อ 11 มิถุนายน 2564 ตอบรับเมื่อ 11 สิงหาคม 2564 เผยแพร่ออนไลน์ 3 พฤษภาคม 2565
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

โครงสร้างอากาศยานหลายชิ้นส่วนถูกยึดเข้าด้วยกันอย่างถาวรด้วยสลักย้ำอากาศยาน (Aircraft Riveting) หากชิ้นส่วนหนึ่งส่วนใดได้รับความเสียหายจากอุบัติเหตุ (Accident) หรือการกัดกร่อน (Corrosion) ผู้ปฏิบัติหน้าที่นายช่างภาคพื้นดินจำเป็นต้องมีความชำนาญในการย้ำสลัก (Rivet Installation) โดยการย้ำสลักมีขั้นตอนที่เป็นมาตรฐานในการติดตั้ง แต่อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนมาตรฐานดังกล่าวไม่ได้อธิบายวิธีการอย่างละเอียด ทำให้การฝึกปฏิบัติย้ำสลักต้องใช้ระยะเวลาและประสบการณ์ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อค้นหาสาเหตุความผิดพลาดของขั้นตอนการฝึกปฏิบัติย้ำสลักด้วยการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault Tree Analysis; FTA) แล้วนำผลการประเมินความผิดพลาดนี้ไปพัฒนาขั้นตอนหรือเทคนิควิธีการฝึกปฏิบัติย้ำสลัก อาจจะทำให้ผู้ฝึกปฏิบัติเกิดความเข้าใจและมีความชำนาญได้รวดเร็ว ซึ่งงานวิจัยนี้ได้รวมบรวมข้อมูลการประเมินผลงานและขั้นตอนการปฏิบัติงานของนักศึกษาหลักสูตรนายช่างบำรุงรักษาอากาศยาน สถาบันการบินพลเรือน ประจำปีการศึกษา 2561 จำนวน 10 ชิ้นงาน ชิ้นงานฝึกปฏิบัติถูกติดตั้งสลักย้ำจำนวน 6 ตัวต่อหนึ่งชิ้นงาน โดยเลือกใช้สลักย้ำทั่วไป (Common Solid Shank Rivet) รหัส AN470AD4-4 ยึดกับแผ่นอะลูมิเนียมผสมรหัส 2024-T3 จำลองเป็นพื้นผิวโครงสร้างอากาศยาน จากนั้นนำข้อมูลดังกล่าวที่ถูกประเมินตามมาตรฐานแล้ววิเคราะห์ FTA และคำนวณหาค่าโอกาสการเกิดเหตุการณ์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลวสามารถแยกลักษณะความเสียหายได้เป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ ความเสียหายต่อพื้นผิวของชิ้นงาน ความเสียหายต่อหัวสลักยำ และความเสียหายต่อแกนสลักย้ำ ผลการคำนวณความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์และโอกาสการเกิดเหตุการณ์พบว่า เหตุการณ์ที่ส่งผลต่อความเสียหายมากที่สุด คือ ความเสียหายต่อหัวสลักย้ำมีโอกาสเกิดเหตุการณ์มากที่สุดอยู่ที่ร้อยละ 76 ซึ่งเหตุการณ์ย่อยที่ส่งผลต่อความเสียหายมากที่สุด คือ หัวสลักย้ำไม่แนบชิดกับชิ้นงาน โดยมีสาเหตุพื้นฐานมาจากปืนสลักย้ำไม่คงที่ ซึ่งทำให้ปืนสลักย้ำเลื่อนออกจากหัวสลักย้ำแล้วปืนสลักย้ำกระแทกหัวสลักย้ำเอียงหรือไม่ตรงหัวสลักย้ำ โดยสาเหตุพื้นฐานของเหตุการณ์อื่นๆ เกิดจากผู้ปฏิบัติตั้งค่าแรงดันลมของปืนไม่ถูกต้อง และร่างแบบเจาะไม่ถูกต้องส่งผลทำให้ได้แบบเจาะไม่เป็นไปตามแบบ ดังนั้นผู้วิจัยแนะนำให้ผู้ฝึกสอน สอนเน้นเทคนิคการใช้งานและควบคุมปืนสลักย้ำเพิ่มเติม เพื่อลดความผิดพลาดและความเสียหายของการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน หรือปรับปรุงขั้นตอนการฝึกปฏิบัติให้ละเอียดกว่าเดิม

คำสำคัญ: หัวสลักย้ำ แกนสลักย้ำ สลักย้ำ ปืนสลักย้ำ ต้นไม้แห่งความล้มเหลว

การอ้างอิงบทความ: ณัฐกร ไตรรัตนวนานนท์ และ ประจวบ กล่อมจิตร, "การประเมินความผิดพลาดของการติดตั้งสลักย้ำอากาศยานด้วยการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 33, ฉบับที่ 3, หน้า 1–13, เลขที่บทความ 233-024967, ก.ค.–ก.ย. 2566.

วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ปีที่ 33 ฉบับที่ 3 ก.ค.–ก.ย. 2566
The Journal of KMUTNB., Vol. 33, No. 3, Jul.–Sep. 2023

Research Article

Failure Assessment of Aircraft Rivet Installation Using Fault Tree Analysis

Nuttakorn Trirattanawananon* and Prachuab Klomjit
Department of Industrial Engineering and Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University, Sanam Chandra Palace Campus, Nakhon Pathom, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 1022 1756, E–mail: trirattanawanan_n@silpakorn.edu DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.05.002
Received 16 April 2021; Revised 14 June 2021; Accepted 11 August 2021; Published online: 3 May 2022
© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Several aircraft structures are permanently fastened together with the aircraft rivets. If any of the parts are damaged by accident or corrosion, considerable expertise in rivet installation in an aircraft structure is required. Despite standard operating procedures, the processes do not come with detailed instructions. It requires experience and time for the development of skills specifically in the aircraft riveting. This research aims to look into the factors contributing to riveting practice errors using Fault Tree Analysis (FTA) method. Based on outcomes, powerful standardized practices and procedures relevant to the tasks will be established. The intervention would enable trainees to develop their specific skills. The research practice involved data collection on job evaluation and operational procedures of the 2018-academic-year students enrolled in the Aircraft Maintenance Engineer License Course at Civil Aviation Training Center. In total 10 practical workpieces, each mounted with six AN470AD4-4 solid rivets were gathered. The aircraft rivets were used to fasten a simulated surface of an aircraft-quality 2024 T3 aluminum sheet. Then the standards-based assessment data were analyzed by FTA and the results were brought for calculating the probability of occurrence and the likelihood of occurrence. The result of FTA is classified into 3 common types of damage: common damage to the workpiece surface, to the rivet head, and to the rivet shank. The results of the probability of occurrence and the likelihood of occurrence found the common damage to the rivet head is the most likely to the likelihood of occurrence at 76%. The most damaging effect was found to occur when the latch head was not close to the workpiece surface due to an unsteady aircraft rivet gun; then the gun bounced off or did not run straight to the structure. Additionally, errors were found from trainees' negligence factors, e.g. problems caused by rivet gun air pressure calibration and incorrect layout patterns. It is thus recommended that more emphasis be placed on necessary riveting skills alongside techniques of rivet gun operation. Practice and procedure manual of solid riveting techniques must offer more detailed and comprehensive guidance than ever in order to reduce possible damage in aircraft assembling.

Keywords: Rivet Head, Rivet Shank, Rivet, Rivet Gun, Fault Tree Analysis

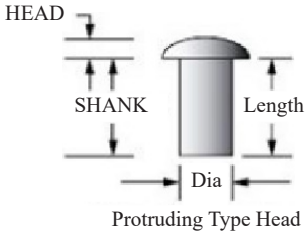
Please cite this article as: N. Trirattanawananon and P. Klomjit, "Failure assessment of aircraft rivet installation using fault tree analysis," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, pp. 1–13, ID. 233-024967, Jul.–Sep. 2023 (in Thai).

1. บทนำ

หน่วยงานซ่อมบำรุงอากาศยาน (Maintenance Repair and Overhaul; MRO) มีหน้าที่ดูแลรักษาและซ่อมบำรุงอากาศยาน เพื่อคงความสมควรเดินอากาศอย่างต่อเนื่อง (Continued Airworthiness) ให้การเดินทางปลอดภัยและมีความน่าเชื่อถือ ในหน่วยงานดังกล่าวประกอบด้วยช่างสองประเภทหลัก ได้แก่ ช่างโครงสร้างและระบบเครื่องยนต์อากาศยาน (Airframe and Power Plant) ช่างระบบไฟฟ้า (Avionics Technician) ซึ่งช่างเหล่านี้ต้องมีทักษะทางเทคนิคและความตระหนักถึงความปลอดภัย [1] สำหรับโครงสร้างอากาศยานส่วนใหญ่ยึดชิ้นส่วน พื้นผิวหรือส่วนประกอบต่างๆ ด้วยสลักย้ำอากาศยาน (Aircraft Rivet) สลักย้ำอากาศยานเป็นอุปกรณ์ยึดติดชิ้นงานสองชิ้นเข้าหากันคล้ายกับสกรู แต่แตกต่างกันที่เป็นการยึดติดอย่างถาวร ซึ่งขั้นตอนการปฏิบัตินั้นช่างต้องใช้ความชำนาญอย่างสูง จึงจะสามารถติดตั้งสลักย้ำอากาศยานได้รวดเร็วและได้มาตรฐาน ภายใต้แรงกดดันทางเวลาและแรงกดดันจากเพื่อนร่วมงาน

สลักย้ำอากาศยานทั่วไป (Aircraft Solid Shank Rivet) เป็นชนิดตัวยึดที่ใช้มากที่สุดในโครงสร้างอากาศยาน เพื่อยึดโครงสร้างหรือชิ้นงานอย่างถาวรกว่าสลักเกลียว (Bolt) หรือแป้นเกลียว (Nut) โดยสลักย้ำจะใช้สำหรับยึดโครงสร้าง ชิ้นส่วนหรือพื้นผิวของอากาศยานเข้าหากัน โดยอาศัยการขยายตัวของแกนสลักย้ำ (Rivet Shank) โดยสลักย้ำอากาศยานที่นิยมใช้ผลิตจากอะลูมิเนียมผสม (Aluminum Alloy) ซึ่งแยกตามรหัสของสลัก ในรูปที่ 1 จะเห็นว่านอกจากวัสดุที่แตกต่างกันแล้วสลักย้ำอากาศยานยังมีส่วนอื่นๆ ที่แตกต่างกัน ได้แก่ รูปทรงหัวสลัก (Head Shape) ความยาวของแกนสลัก (Shank) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (Diameter) [2]–[4]

วิธีการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault Tree Analysis; FTA) สามารถประยุกต์ในการวิเคราะห์กระบวนการหรือขั้นตอนการทำงาน เพื่อหาสาเหตุและลดความผิดพลาดของการทำงานลง โดยไม่จำเป็นต้องสะสมประสบการณ์จากการลองผิดลองถูก วิธีการนี้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อการวิเคราะห์ด้านความปลอดภัยและความน่าเชื่อถือของระบบที่มีความซับซ้อน โดยวิธีดังกล่าวใช้วิเคราะห์



รูปที่ 1 ตัวอย่างรหัสสลักย้ำอากาศยาน [3] (Aircraft Rivet Code Numbers)

เหตุการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น เพื่อหาสาเหตุของเหตุการณ์โดยใช้ตรรกบูลีน (Boolean Logic) เพื่อใช้ประเมินเหตุการณ์โดยวิธีการ FTA นี้ ใช้โมเดลรูปภาพสำหรับแสดงสาเหตุ และความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ขึ้น ซึ่งสาเหตุอาจเกิดจากความผิดพลาดจากมนุษย์หรือความผิดพลาดของส่วนประกอบของระบบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลวนั้นในด้านวิเคราะห์หาสาเหตุของอุบัติเหตุ [5]

พิมพา และอารุณ [6] ได้ประเมินความเสี่ยงของการจัดการขยะมูลฝอยติดเชื้อในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลด้วยวิธีการ FTA บูรณาการร่วมกับกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างศึกษาเป็นโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล อำเภอหนองแค จังหวัดสระบุรี จำนวน 8 แห่ง โดยการจัดการมูลฝอยติดเชื้อมีกระบวนการ 4 กระบวนการ ได้แก่ การคัดแยก การเก็บ การขนย้าย และการกำจัดใช้วิธีการ FTA หาสาเหตุ และให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินค่าน้ำหนักของระดับความเสี่ยง โอกาสการเกิดและความรุนแรงของแต่ละเหตุการณ์พื้นฐาน โดยกิจกรรมที่มีความเสี่ยงสูงสุดคือกระบวนการกำจัด ทั้งนี้ วิธีการต้นไม้แห่งความล้มเหลวนั้นยังสามารถประยุกต์เพื่อวิเคราะห์หาเหตุการณ์ที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น สำหรับในด้านการประยุกต์ใช้วิธีการวิเคราะห์ FTA หาความน่าเชื่อของระบบที่ออกแบบหรือสร้างขึ้น

Shu และคณะ [7] ศึกษาความน่าเชื่อถือของตัวควบคุมยานยนต์ไฟฟ้าด้วยการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว โดยแยกการวิเคราะห์ความล้มเหลวในแต่ละมอดูล (Failure

of Module) จำนวน 5 มอดูล ประกอบไปด้วย มอดูลควบคุม มอดูลขับเคลื่อน มอดูลคลายประจุ มอดูลการสื่อสาร และมอดูลอื่นๆ ที่ช่วยในการควบคุมมอเตอร์ โดยอัตราการเสียแต่ละมอดูลขึ้นอยู่กับแผ่นวงจรพิมพ์กับตัวอุปกรณ์ ซึ่งอัตราการเสียของอุปกรณ์แยกตามชนิดของตัวอุปกรณ์ โดยเฉลิมชาติ [8] ได้ใช้การวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลวเพื่อลดกระบวนการเชื่อมลวดไฟฟ้า โดยเก็บข้อมูลย้อนหลัง และประเมินความเสี่ยงจากแบบสอบถาม และใช้การวิเคราะห์ดังกล่าวหารากของปัญหาในแต่ละขั้นตอน และสร้างแผนการจัดการความเสี่ยง 5 แผน เพื่อปรับปรุงกระบวนการ ซึ่งผลปรากฏว่าลดระดับความเสี่ยงในการสูญเสียลวดเชื่อมวงจรไฟฟ้าได้ลดลงร้อยละ 15.1 และ Anchal และคณะ [9] นำเสนอการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว เพื่อปรับปรุงความน่าเชื่อถือของหน่วยความจำที่ใช้ในหน่วยประมวลผลข้อมูลกลาง ผลการวิจัยชี้เห็นในว่าวิธีการดังกล่าวสามารถนำมาวิเคราะห์ความล้มเหลวของหน่วยความจำชนิด DDR4 DIMM ได้

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต FTA สามารถนำมาวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของระบบหรือกระบวนการ หรือวิเคราะห์ความเสี่ยงที่อาจส่งผลทำให้เกิดอุบัติเหตุหรือเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ได้ แต่อย่างไรก็ตาม ยังมีวิธีอื่นๆ ที่สามารถค้นหารากเหง้า หรือบ่งชี้สาเหตุของเหตุการณ์ที่ส่งต่อความสูญเสียหรือความเสียหายได้ เช่น การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) เฉลิมศักดิ์ และคณะ [10] นำเสนอวิธีการค้นหาสาเหตุที่แท้จริงของกระบวนการผลิตลวดเหล็กขึ้นรูปสำหรับเบาะรถยนต์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ปัญหาด้วยการถามว่าทำไม-ทำไม ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการทราบสาเหตุที่แท้จริง เพื่อนำไปลดปริมาณของเสียในกระบวนการผลิตลงอย่างน้อยร้อยละ 20 โดยเลือกลุ่มตัวอย่างจากกระบวนการผลิตที่พบของเสียที่มากที่สุดที่แผนกซีเอ็นซี ซึ่งมี 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการตั้งลวด ตั้งชิ้นงาน และผลิตงาน โดยมีของเสียในแต่ละขั้นตอนดังนี้ 252.2, 134.6 และ 72 กิโลกรัม ตามลำดับ จากนั้นลำดับความสำคัญด้วยแผนภูมิพาเรโตแล้วค้นหาสาเหตุด้วยแผนผังแสดงเหตุและผล จากนั้นหารากเหง้าของปัญหาด้วยการวิเคราะห์การถามว่าทำไม-ทำไม ผลการวิจัยพบว่า ของเสียที่เกิดจากขั้นตอนการตั้งลวดมีสาเหตุมาจากไม่มีเครื่องมือตรวจสอบความตรงของลวด สำหรับขั้นตอนการตั้งชิ้นงานมีสาเหตุมาจากไม่มีมาตรฐานในการปรับแต่ง และขั้นตอนการผลิตงานมีสาเหตุมาจากพนักงานไม่รู้วิธีการลบโปรแกรม เมื่อทราบถึงปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยนำสาเหตุที่เกิดขึ้นไปออกแบบเครื่องมือตรวจสอบความตรงลวด กำหนดมาตรฐานปรับตั้งลด กำหนดค่าเผื่อการดีดกลับตัวของลวดและกำหนดหมวดโปรแกรม เพื่อให้พนักงานเรียกใช้งานง่าย ส่งผลทำให้ลดปริมาณของเสียในขั้นตอนดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 43.13

นอกจากวิธีการวิเคราะห์ทำไม-ทำไมแล้ว ยังมีวิธีการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis; FMEA) ที่สามารถหาสาเหตุของเหตุการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ ธีรวัฒน์และอำนาจเจริญ [11] นำเสนอการเพิ่มผลผลิตด้วยเทคนิคการซ่อมบำรุงเครื่องจักรด้วยการวิเคราะห์ความล้มเหลวและผลกระทบ เพื่อหาความสำคัญของสาเหตุที่ควรได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน ซึ่งงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสาเหตุ และปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการเกิดชำรุดเสียหาย (Breakdown) ของเครื่องจักรอัดรีด (Extruder) แล้วปรับปรุงค่าเวลาเฉลี่ยความเสียหาย (MTBF) ให้น้อยกว่า 198 ชั่วโมง และค่าเวลาเฉลี่ยซ่อมบำรุง (MTTR) ไม่เกิน 2 ชั่วโมง ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี FMEA พบว่า 3 อันดับแรกของปัญหาเร่งด่วนที่ต้องได้รับการแก้ไข ได้แก่ ปั๊มรั่ว อุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนรั่ว และอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อนตัน ซึ่งงานวิจัยชิ้นนี้ปรับปรุงระบบด้วยการทำส่วนเบี่ยง (Bypass) ทั้งปั๊มและอุปกรณ์ถ่ายเทความร้อน ดัดแปลงเพลาปั๊มและปรับปรุงคุณภาพน้ำพร้อมทั้งกำหนดช่วงเวลาการระบายออกอย่างรวดเร็ว (Flushing) ผลการปรับปรุงดังกล่าวทำให้ MTBF เพิ่มขึ้นจากเดิม 127.48 ชั่งโมง และค่า MTTR ลดลงจากเดิม 5.11 ชั่วโมงเป็น 1.17 ชั่วโมง

จากงานวิจัยในอดีตผู้วิจัยเลือกใช้การวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (FTA) มาค้นหาสาเหตุความผิดพลาดของขั้นตอนการฝึกปฏิบัติย้ำสลัก แล้วนำผลการประเมินความผิดพลาดนี้ไปพัฒนาขั้นตอน เทคนิค หรือวิธีการฝึกปฏิบัติย้ำสลัก ซึ่งอาจทำให้ผู้ฝึกปฏิบัติเกิดความเข้าใจและมีความชำนาญได้รวดเร็ว

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้รวมบรวมข้อมูลการประเมินผลงานและขั้นตอนการปฏิบัติงานของนักศึกษาหลักสูตรนายช่างบำรุงรักษาอากาศยาน สถาบันการบินพลเรือน ประจำปีการศึกษา 2561 ที่ถูกประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ 1 คน ที่มีประสบการณ์การมากกว่า 3 ปี ผลงานที่ศึกษามีจำนวน 10 ชิ้นงาน พร้อมเอกสารผลการประเมินขั้นตอนปฏิบัติงาน 10 ชุด ซึ่งผลงานดังกล่าวจะถูกติดตั้งสลักย้ำจำนวน 6 ตัวต่อหนึ่งชิ้นงาน โดยเลือกใช้สลักย้ำทั่วไป (Common Solid Shank Rivet) รหัส AN470AD4-4 ซึ่งเป็นมาตรฐานกองทัพอากาศ - กองทัพเรือ (Air force - Navy Standard) เป็นหัวแบบทั่วไป (Universal Head) ผลิตจากอะลูมิเนียมผสมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 4/32 นิ้ว ความยาวเท่ากับ 4/16 นิ้ว ยึดกับวัสดุโลหะแผ่นอะลูมิเนียมผสมรหัส 2024-T3 ความหนา 0.040 นิ้ว และนำผลการประเมินนี้มาวิเคราะห์หารากของปัญหาด้วยต้นไม้แห่งความล้มเหลวของแต่ละความเสียหายแล้วหาโอกาสการเกิดความเสี่ยงของแต่ละเหตุการณ์ย่อย ซึ่งการวิจัยนี้กำหนดให้ความเสียหายของแต่ละเหตุการณ์เป็นอิสระต่อกัน โดยเครื่องมือการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน ขั้นตอนการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน มาตรฐานการประเมินผลงานและขั้นตอนการปฏิบัติงาน และการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว ซึ่งมีรายละเอียดแต่ละขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 เครื่องมือทั่วไปสำหรับติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน (Aircraft Rivet Tools)

ในการติดตั้งสลักย้ำอากาศยานมีเครื่องมือแตกต่างกันไปตามลักษณะของชิ้นงานที่ต้องการยึด ลักษณะหัวของสลักย้ำหรือวิธีการยึด โดยเครื่องมือที่ใช้สำหรับสลักย้ำในงานวิจัยนี้ ซึ่งเป็นสลักย้ำทั่วไป รหัส AN470AD4-4 มาตรฐานกองทัพอากาศ-กองทัพเรือเป็นหัวแบบทั่วไป จะมีเครื่องมือพื้นฐานทั่วไปสำหรับติดตั้งสลักย้ำอากาศยานแสดงดังในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เครื่องมือติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน

เครื่องมือ	ภาพประกอบ	เครื่องมือ	ภาพประกอบ
Air Rivet Gun		De-burring Tool	
Rivet Sets		Air Drill	
Bucking Bars		Drill Bits Sets	
Retainer Springs			

2.2 ขั้นตอนการฝึกปฏิบัติติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน (Aircraft Rivet Installation) แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการฝึกปฏิบัติ

ขั้นตอนการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน	รายละเอียด
1. ร่างแบบ	เป็นการร่างระยะเจาะรู เพื่อทำการติดตั้งสลักย้ำ โดยมีระยะตามแบบที่กำหนด และต้องระวังไม่เกิดความผิดพลาดในระยะที่สำคัญในการติดตั้งสลักย้ำ 3 ระยะ 1) ที่ติดตั้งถึงขอบชิ้นงาน (Edge Distract) 2) ระยะความห่างที่ติดตั้งสลักย้ำ (Rivet Pitch) 3) ระยะความห่างระหว่างแถว (Transverse Pitch)
2. เลือกสลักย้ำ	เลือกสลักย้ำผู้ฝึกจะได้ฝึกเลือกสลักย้ำตามรหัสที่ระบุในเอกสารซึ่งการศึกษาครั้งนี้ใช้สลักย้ำรหัส AN470AD4-4 โดยมีความหมายดังนี้ AN = มาตรฐานผู้ผลิต 470 = ลักษณะหัวสลักย้ำ AD = วัสดุที่ใช้ทำสลักย้ำ 4 = เส้นรอบวง เช่น 4/32 นิ้ว –4 = ความยาว เช่น 4/16 นิ้ว

ตารางที่ 2 ขั้นตอนการฝึกปฏิบัติ (ต่อ)

ขั้นตอนการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน	รายละเอียด
3. การเจาะ	การเจาะต้องเจาะให้พอดีกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง โดยเมื่อได้ระยะเจาะที่ต้องการให้ตอกนำศูนย์ด้วยเหล็กตอกนำศูนย์ และเจาะด้วยดอกนำ (Pilot Drill) จากนั้นค่อยๆ เพิ่มขนาดดอกเจาะเป็นขนาดเท่ากับแกนของสลักย้ำจะทำให้สลักย้ำไม่หลวมหรือพอดีเกินไป
4. การลบสันขอบร่อง	การลบสันขอบร่องรูที่เจาะแล้วด้วยเครื่องมือลบสันขอบร่อง (De-burring tool) เพื่อลบเศษโลหะที่ไม่เรียบที่อาจครูดสลักย้ำทำให้สารเคลือบป้องกันสนิมหมดไป อีกทั้งส่งผลต่อการติดตั้งสลักย้ำไม่ได้มาตรฐาน
5. การย้ำสลัก	การย้ำสลักในงานวิจัยนี้ใช้การย้ำแบบปืนแรงดันลม (Pneumatic Rivet Gun) โดยประกอบเข้ากับหัวปืนสลักย้ำ (Rivet Sets) โดยเลือกให้มีขนาดเดียวกับหัวสลักย้ำแล้วยึดทั้งสองเข้าหากันทางด้านปลายด้วยสปริง (Retainer Springs) จากนั้นควรทดสอบแรงดันลมและปรับตั้งให้เหมาะสม จากนั้นติดตั้งสลักด้วยกันปืนแรงดันลมด้านหนึ่งอีกด้านหนึ่งที่แกนสลักย้ำประคองด้วยบาร์ (Bucking Bar) เพื่อให้ปืนสลักย้ำกระแทกหัวสลักย้ำไปที่แกน โดนแกนสลักย้ำกระแทกบาร์ ทำให้แกนสลักขยายตัวออก ลักษณะการติดตั้งสลักย้ำอากาศยานแสดงดังในรูปที่ 2 และ 3 จะทำให้สลักย้ำยึดชิ้นงาน 2 ชิ้นเข้าหากันได้อย่างสมบูรณ์

2.3 การประเมินผลการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน (Aircraft Rivet Installing Assessment)

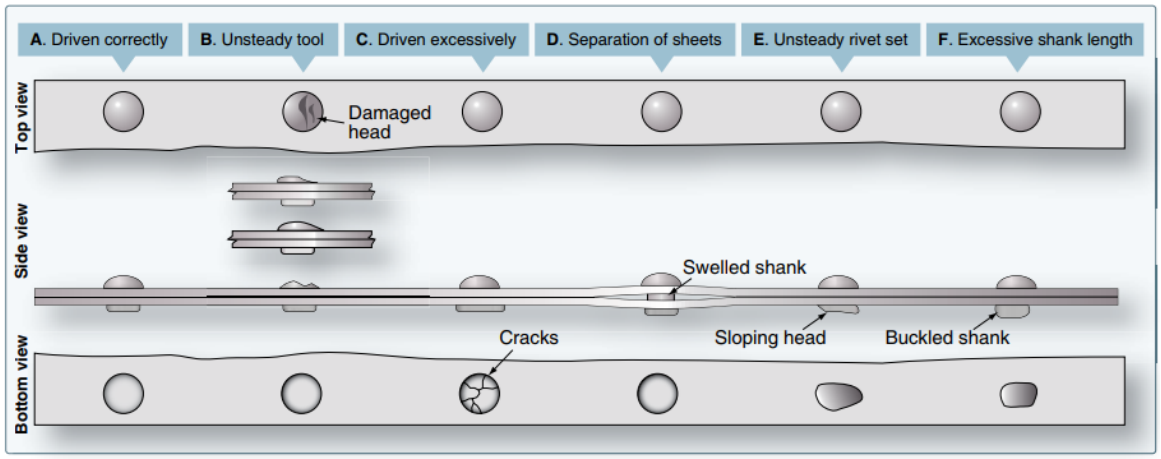
การประเมินผลงานและขั้นตอนการปฏิบัติงานของกลุ่มตัวอย่างจำนวน 10 ชิ้นงาน ติดตั้งสลักย้ำอากาศยานทั้งหมด 6 ตัวต่อหนึ่งชิ้นงาน รวมเป็น 60 ตัว ซึ่งรวมบรวมข้อมูลดังกล่าวจากนักศึกษาหลักสูตรนายช่างบำรุงรักษาอากาศยาน สถาบันการบินพลเรือน ประจำปีการศึกษา 2561 โดยผลงาน

รูปที่ 2 ตัวอย่างการติดตั้งสลักย้ำอากาศยานด้านบน [12]

รูปที่ 3 ตัวอย่างการติดตั้งสลักย้ำอากาศยานด้านล่าง [12]

และขั้นตอนการปฏิบัติงานถูกประเมินด้วยผู้สอนที่เชี่ยวชาญจำนวน 1 คน มีประสบการณ์การมากกว่า 3 ปี ด้านการซ่อมบำรุงและโครงสร้างอากาศยาน

ผลการประเมินจำแนกส่วนที่เกิดความเสียหายออกเป็น 3 ส่วน ตามมาตรฐานองค์การบริหารการบินแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (Federal Aviation Administration; FAA) ดังในรูปที่ 4 ได้แก่ ส่วนความเสียหายด้านบน (Common Failure of Top View) ความเสียหายด้านข้าง (Common Failure of Side View) และสความเสียหายด้านล่าง (Common Failure of Bottom) โดยตารางที่ 3 แสดงจำนวนครั้งของความเสียหายที่เกิดขึ้นของกลุ่มตัวอย่างชิ้นงานที่ศึกษา



รูปที่ 4 ตัวอย่างความเสียหายของการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน [13]

จำนวนครั้งของความเสียหาย คือ จำนวนความเสียหายที่ไม่สามารถยอมรับได้เกินกว่ามาตรฐานกำหนดส่งผลต่อความแข็งแรงของโครงสร้าง

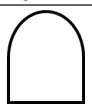
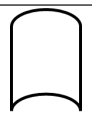
ตารางที่ 3 จำนวนส่วนความเสียหายที่ยอมรับไม่ได้

ลำดับ	ส่วนที่เกิดความเสียหายของการติดตั้ง	จำนวนครั้ง
1	ด้านบน (Top View)	20
2	ด้านบน (Slide View)	3
3	ด้านล่าง (Bottom View)	18

2.4 การวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (FTA)

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการ FTA เป็นเทคนิคที่ช่วยการวิเคราะห์เพื่อค้นหารากเหง้าแห่งความผิดพลาด (Root Cause) ทั้งนี้เพื่อทำการขจัดรากเหง้าอันทำให้เกิดความผิดพลาดนั้นไม่ให้เกิดขึ้นอีก ขั้นตอนในการวิเคราะห์ด้วยวิธีดังกล่าว เริ่มต้นให้พิจารณาเลือกเหตุการณ์แรก (Top Event) ที่จะเกิดขึ้นที่จะส่งกระทบต่อมาตรฐานการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน จากนั้นวิเคราะห์หาสาเหตุ (Intermediate Event) ที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ร้ายแรงนั้น และวิเคราะห์ลงลึกลงไปให้ถึงสาเหตุหรือเหตุการณ์ปกติที่เกิดขึ้นได้ (Basic Event) [5] โดยแผนภาพของวิธี FTA จะถูกแทนแต่ละเหตุการณ์ด้วยสัญลักษณ์ในตารางที่ 2

ตารางที่ 4 สัญลักษณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว [5]

สัญลักษณ์	ชื่อ	ความหมาย
	AND Gate สาเหตุหลายสาเหตุ	เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากหลายสาเหตุของเหตุการณ์ย่อย
	OR Gate สาเหตุใดสาเหตุหนึ่ง	เหตุการณ์จะเกิดขึ้นได้เนื่องจากสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งของเหตุการณ์ย่อย
	Basic Event เหตุการณ์เกิดขึ้นได้โดยปกติ	เหตุการณ์ย่อยที่เกิดขึ้นได้ตามปกติ ซึ่งทราบถึงสาเหตุได้ชัดเจนโดยไม่ต้องทำการวิเคราะห์หาสาเหตุต่อไป
	Fault Tree Event เหตุการณ์ย่อย	เหตุการณ์ที่ส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ต่อเนื่องจนเป็นเหตุให้เกิดอุบัติภัย

จากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญ เพื่อเน้นวิเคราะห์ความความเสียหายสามารถแยกตามลักษณะความเสียหายที่เกิดขึ้นกับตัวสลักย้ำ จากมาตรฐานที่ประเมินได้เป็นความเสียหายต่อพื้นผิวของชิ้นงาน ความเสียหายต่อหัวสลักยำ และความเสียหายต่อแกนสลักย้ำ ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของส่วนที่เกิดความเสียหายดังในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างส่วนและลักษณะของการเกิดความเสียหาย

ส่วนที่เกิดความเสียหาย	ลักษณะการเกิดความเสียหาย
ด้านบน (Top View)	หัวสลักย้ำ พื้นผิวชิ้นงานบน
ด้านบน (Slide View)	หัวสลักย้ำ ชิ้นงานด้านข้าง
ด้านล่าง (Bottom View)	แกนสลักย้ำ พื้นผิวชิ้นงานด้านล่าง

ซึ่งผู้วิจัยได้รวบรวมและแยกข้อมูลใหม่ทำให้ได้จำนวนตามเสียหายในแต่ละลักษณะดังในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 จำนวนครั้งลักษณะความเสียหายมี่ยอมรับไม่ได้

ลักษณะความเสียหาย	จำนวนครั้ง	ร้อยละ
พื้นผิวชิ้นงาน	17	28.33
หัวสลักย้ำ	10	16.66
แกนย้ำ	27	45

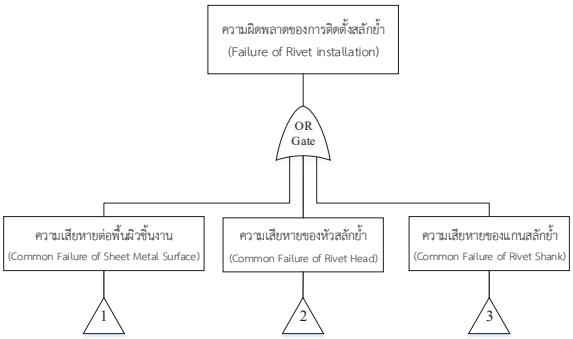
เมื่อเขียนแผนภูมิของวิธี FTA แล้ว คำนวนณหาความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ และการวิเคราะห์ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์โอกาสในการเกิดเหตุการณ์พื้นฐานในแต่ละเหตุการณ์ ซึ่งสามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นของโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ได้ดังในสมการที่ (1) และ (2) โดย แทนความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ย่อยที่ไม่พึงประสงค์

$$AND\ gate = F_1 \times F_2 \times \ldots \times F_n \qquad (1)$$

AND gate แทน ตรรกะความน่าจะเป็นของเหตุการณ์สองหรือมากกว่าเกิดขึ้นพร้อมกันจะส่งผลถึงเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ได้

$$OR\ gate = 1-(1-F_1)\times(1-F_2)\times(1-F_n) \qquad (2)$$

OR gate แทน ตรรกะความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ใดเหตุการณ์หนึ่งของสองหรือมากกว่าเกิดขึ้นเพียงเหตุการณ์เดียวหรือปัจจัยเดียว จะส่งผลทำให้เกิดเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ได้ [6]



รูปที่ 5 การวิเคราะห์ความผิดพลาดของการติดตั้งสลักย้ำ (Failure Analysis of Rivet Installation)

3. ผลการทดลอง

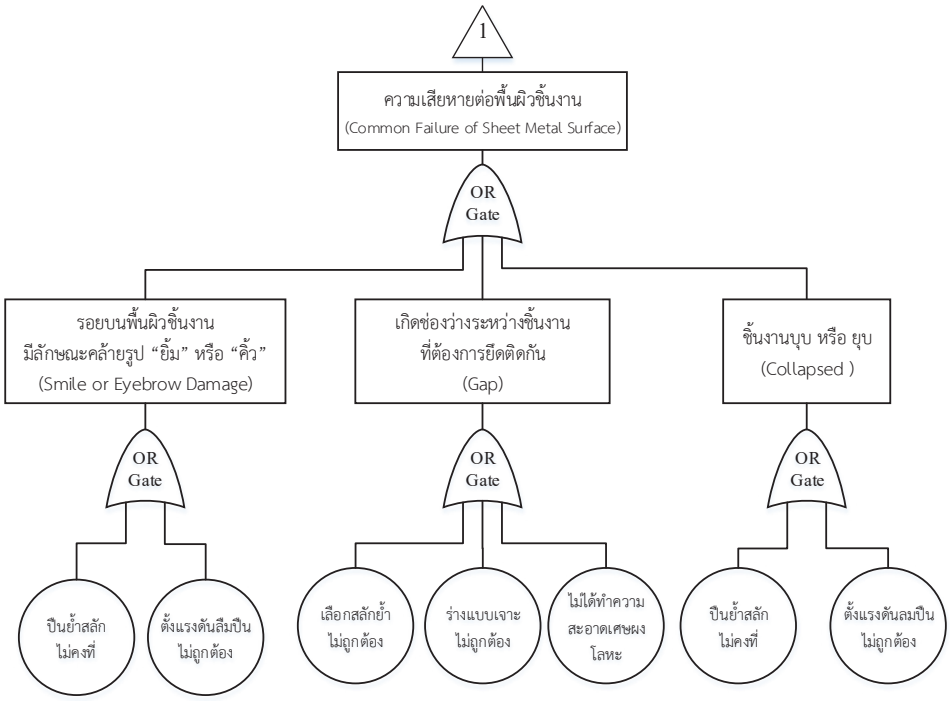
ผลการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลวแยกความเสียหายทั่วไปตามของผู้เชี่ยวชาญดังในรูปที่ 5 ได้แก่ 1) ความเสียหายต่อพื้นผิวชิ้นงาน (Common Failure of Sheets Metal) 2) ความเสียหายต่อหัวสลักย้ำ (Common Failure of Rivet Head) และ 3) ความเสียหายต่อแกนสลักย้ำอากาศยาน (Common Failure of Rivet Shank) จากความเสียหาย 3 ลักษณะความเสียหายดังกล่าวผู้วิจัยวิเคราะห์วิธี FTA เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุพื้นฐานในแต่ละเหตุการณ์ โดยโอกาสการเกิดของเหตุการณ์เป็นอิสระต่อกันในแต่ละความเสียหาย โดยคำนวณความน่าจะเป็นของเหตุการณ์เชิงปริมาณตามข้อมูลในตารางที่ 6 ทำให้ได้ความน่าจะเป็นของการเกิดความเสียหายในตารางที่ 7 แล้วนำค่าความน่าจะเป็นนี้คำนวณโอกาสการเกิดแต่ละเหตุการณ์ตามสมการที่ (1) และ (2) ดังตัวอย่างดังนี้

$$OR\ gate_1 = 1-(1-0.600)\times(1-0.400) = 0.7600$$
$$OR\ gate_2 = 1-(1-0.300)\times(1-0.200)\times(1-0.500) = 0.7200$$
$$OR\ gate_3 = 1-(1-0.666)\times(1-0.333) = 0.7778$$

1) ผลการวิเคราะห์ความเสียหายต่อพื้นผิวชิ้นงาน ดังในรูปที่ 6 ประกอบไปด้วย 3 เหตุการณ์ย่อย ได้แก่ เหตุการณ์ย่อยที่ 1 เกิดรอยความเสียหายเป็นลักษณะรูปยิ้ม (Simile

ตารางที่ 7 ความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดความเสียหายแต่ละลักษณะ โดยความเสียหายของแต่ละเหตุการณ์ย่อยเป็นอิสระต่อกัน

เหตุการณ์ (Event)	ความน่าจะเป็นของเกิดความเสียหาย	โอกาสในการเกิดเหตุการณ์ (%)
1. ความเสียหายต่อพื้นผิวชิ้นงาน	0.300	73.251 %
GATE 1 รอยบนพื้นผิวชิ้นงานมีลักษณะคล้ายรูป “ยิ้ม”	0.278	
EVENT 1 ปืนย้ำสลักไม่คงที่	0.600	76.000 %
EVENT 2 ตั้งแรงดันลมปืนไม่ถูกต้อง	0.400	
GATE 2 เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานที่ต้องการยึดติดกัน	0.556	
EVENT 1 เลือกสลักย้ำไม่ถูกต้อง	0.300	72.000 %
EVENT 2 ร่างแบบเจาะไม่ถูกต้อง	0.200	
EVENT 3 ไม่ได้ทำความสะอาดเศษผงโลหะ	0.500	
GATE 3 ชิ้นงานบุบ หรือยุบ	0.167	
EVENT 1 ปืนย้ำสลักไม่คงที่	0.667	77.770 %
EVENT 2 ตั้งแรงดันลมปืนไม่ถูกต้อง	0.333	
2. ความเสียหายของหัวสลักย้ำ	0.167	76.000 %
GATE 1 หัวสลักย้ำไม่แนบชิดกับชิ้นงาน	0.400	
EVENT 1 ปืนย้ำสลักไม่คงที่	0.750	81.250 %
EVENT 2 การเจาะรูไม่ถูกต้อง	0.250	
GATE 2 หัวสลักย้ำมีรอยชัดเจน	0.600	
EVENT 1 เลือกใช้ขนาดของ Rivet Sets ผิด	0.667	77.770 %
EVNET 2 ปืนย้ำสลักไม่คงที่	0.333	
3. ความเสียหายของแกนสลักย้ำ	0.450	75.034 %
GATE 1 แกนสลักย้ำมีระยะความยาวไม่ได้มาตรฐาน	0.481	76.331 %
SUB-GATE 1 แกนสลักย้ำสั้นเกินไป	0.385	
EVENT 1 ตั้งแรงดันลมปืนไม่ถูกต้อง	0.400	71.200%
EVENT 2 ร่างแบบเจาะไม่ถูกต้อง	0.400	
EVENT 3 เลือกสลักย้ำไม่ถูกต้อง	0.200	
SUB-GATE 2 แกนสลักย้ำยาวเกินไป	0.615	
EVENT 1 ร่างแบบเจาะไม่ถูกต้อง	0.375	53.125 %
EVENT 2 ปืนย้ำสลักไม่คงที่	0.250	
EVENT 3 ตั้งแรงดันลมปืนไม่ถูกต้อง	0.375	
GATE 2 ลักษณะแกนสลักไม่ได้มาตรฐาน	0.519	75.510 %
SUB-GATE 1 แกนสลักย้ำไม่ตรง	0.571	
EVENT 1 Bucking Bar ไม่คงที่	0.375	23.430 %
EVNET 2 ตั้งแรงดันลมปืนไม่ถูกต้อง	0.625	
SUB-GATE 2 แกนสลักย้ำขยายไม่เท่ากัน	0.429	
EVENT 1 Bucking Bar ไม่คงที่	0.667	83.333 %
EVENT 2 เจาะรูขนาดไม่ถูกต้อง	0.500	

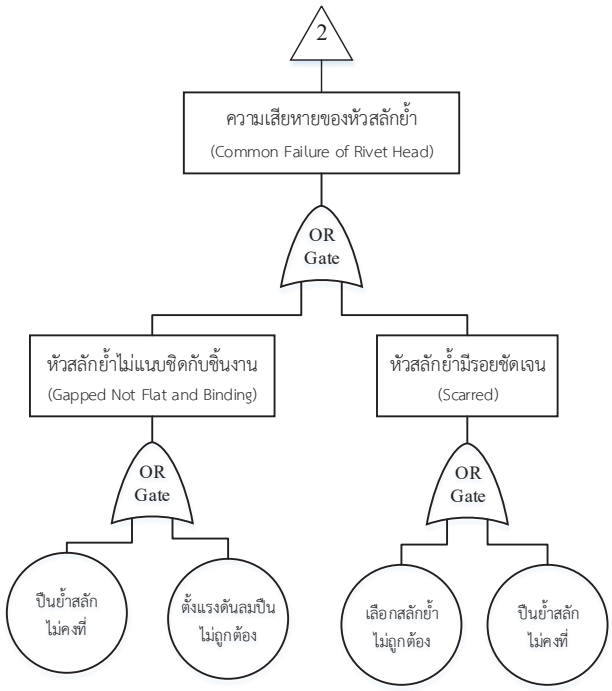


รูปที่ 6 การวิเคราะห์ความเสียหายต่อพื้นผิวชิ้นนาน (Common Failure Analysis of Sheet Metal Surface)

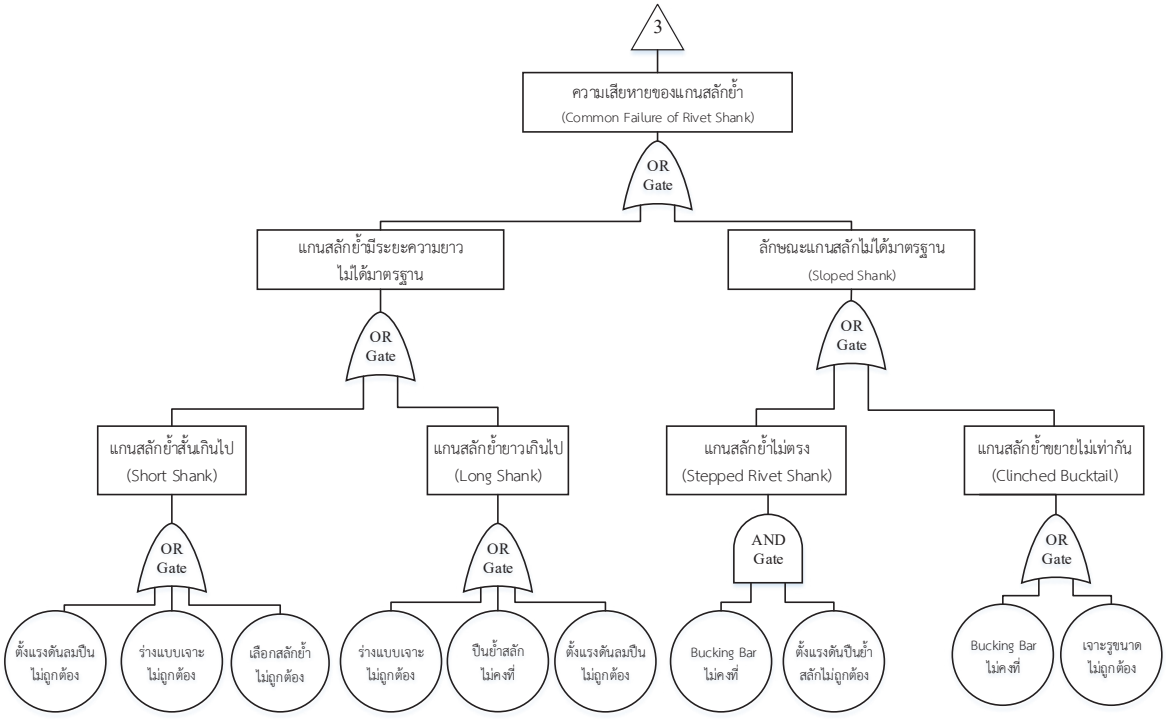
Damage) มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 76 โดยความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.6 และ 0.4 ตามลำดับ เหตุการณ์ย่อยที่ 2 เกิดช่องว่างระหว่างชิ้นงานที่ต้องการยึดติดกัน (Gap) มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 72 โดยความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.3, 0.2 และ 0.5 ตามลำดับ เหตุการณ์ย่อยที่ 3 ชิ้นงานยุบ (Collapsed) ค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 77.77 โดยความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.667, และ 0.333 ตามลำดับ

2) ผลการวิเคราะห์ความเสียหายของหัวสลักย้ำ ดังในรูปที่ 7 ประกอบไปด้วย 2 เหตุการณ์ย่อย ได้แก่ เหตุการณ์ย่อยที่ 1 หัวสลักย้ำไม่แนบชิดกับชิ้นงาน (Rivet Head Not Flat) มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 81.25 โดยความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.75 และ 0.25 ตามลำดับ เหตุการณ์ย่อยที่ 2 หัวสลักย้ำมีรอยชัดเจน (Scarred) มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 77.77 โดยความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.66 และ 0.33 ตามลำดับ

3) ผลการวิเคราะห์ความเสียหายของแกนสลักย้ำ ดังในรูปที่ 8 ประกอบไปด้วย 2 เหตุการณ์ย่อย ได้แก่ เหตุการณ์ย่อยที่ 1 ความเสียหายที่เกิดจากแกนสลักย้ำมีระยะความยาวไม่ได้มาตรฐาน มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 76.33 โดยมีเหตุกาณ์ย่อยอีก 2 เหตุการณ์ ที่ส่งผลถึงเหตุการณ์นี้ เหตุการณ์ย่อยที่ 1 เกิดจากแกนสลักย้ำสั้นเกินไป (Short Shank) มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 71.2 โดยมีความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.4, 0.4 และ 0.2 ตามลำดับ และเหตุการณ์ย่อยที่ 2 ของเหตุการณ์ความเสียหายจากแกนสลักย้ำมีระยะความยาวไม่ได้มาตรฐาน คือ แกนสลักย้ำยาวเกินไป (Long Shank) มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 53.12 โดยมีความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.375, 0.25 และ 0.375 ตามลำดับ



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ความเสียหายต่อหัวสลักย้ำ



รูปที่ 8 การวิเคราะห์ความเสียหายต่อแกนสลักย้ำ

เหตุการณ์ย่อยที่ 2 ลักษณะแกนสลักย้ำไม่ได้มาตรฐาน ประกอบไปด้วยสาเหตุย่อย 2 สาเหตุ คือ แกนสลักย้ำไม่ตรง (Sloped) มีค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 23.43 โดยมีความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.375 และ 0.625 ตามลำดับ และเหตุกาณณ์ย่อยที่ 2 แกนสลักย้ำขยายไม่เท่ากัน (Stepped) ค่าความน่าจะเป็นของโอกาสการเกิดเท่ากับร้อยละ 83.33 โดยมีความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ย่อยพื้นฐานเท่ากับ 0.66 และตามลำดับ

4. อภิปรายผลและสรุป

จากผลการวิเคราะห์ผลงานและขั้นตอนการปฏิบัติย้ำอากาศยานด้วยวิเคราะห์ FTA ค่าโอกาสการเกิดเหตุการณ์แสดงให้เห็นว่าสาเหตุที่ทำให้มีเกิดความผิดพลาดการติดตั้งสลักย้ำอากาศยานมากที่สุด คือ ความเสียหายต่อหัวสลักย้ำไม่แนบชิดกับชิ้นงาน มีสาเหตุพื้นฐาน คือ ผู้ฝึกปฏิบัติควบคุมปืนสลักย้ำไม่คงที่ ซึ่งทำให้ปืนสลักย้ำเลื่อนออกจากหัวสลักย้ำแล้วปืนสลักย้ำกระแทกหัวสลักย้ำเอียง หรือไม่ตรงหัวสลักย้ำ โดยสาเหตุพื้นฐานของเหตุการณ์อื่นๆ เกิดจากผู้ปฏิบัติตั้งค่าแรงดันลมของปืนไม่ถูกต้องและร่างแบบเจาะไม่ถูกต้องที่ทำให้ได้แบบเจาะไม่เป็นไปตามแบบ ดังนั้นผู้วิจัยแนะนำให้ผู้ฝึกสอน สอนเน้นเทคนิคการใช้งานและควบคุมปืนสลักย้ำเพิ่มเติม เพื่อลดความผิดพลาดและความเสียของการติดตั้งสลักย้ำอากาศยาน หรือระบุขั้นตอนการฝึกปฏิบัติให้ละเอียดกว่าเดิม

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Weerasombat, “Technicians’ skills demands in robotic and aviation (MRO) industries,” *Human Resource and Organization Development Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 1–25, 2020 (in Thai).

[2] N. Bonacci, *Aircraft Sheet Metal*. Frankfurt. GERMANY: Jeppesen Sanderson, 1987.

[3] L. Reithmaier, *Standard Aircraft Handbook for Mechanics and Technicians*. McGraw Hill, 1999.

[4] D. Hurst, *Aircraft Structural Technician*. Virginia: Avotek, 2001.

[5] R. L. Brauer, *Safety and Health for Engineers*. New Jersey: Wiley, 2016.

[6] P. Buapim and A. Ketsakorn, “Risk assessment by the fault tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) of infectious waste management in health promoting hospital,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 3, pp. 465–480, 2019 (in Thai).

[7] X. Shu, Y. Guo, H. Yang, H. Zou, and K. Wei, “Reliability study of motor controller in electric vehicle by the approach of fault tree analysis,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 121, pp. 105–165, 2021.

[8] C. Theeraviriya, “Loss reduction in wire bonding process using risk management framework,” *Journal of Science and Technology Ubon Ratchathani University*, vol. 19, no. 2, pp. 86–97, 2017 (in Thai).

[9] A. Lakhotia, R. Chang, D. Santos, and C. Greene, “Fault tree analysis to understand and improve reliability of memory modules used in data center server rack,” in *Proceedings FAIM*, 2020, pp. 989–997.

[10] C. Thavornwat, R. Kanchana, S. Jarupinyo, and V. Wattanajitsiri, “The defect reduction in wire parts process for car seat,” *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 25–33, 2017 (in Thai).

[11] T. Somsirikanjanakoon and A. Inthadok, “Productivity improvement by maintenance techniques,” *Thai Industrial Engineering Network Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 23–30, 2015 (in Thai).

[12] Eastwood. (2016). *Rivet Bucking Bar*. [Online]. Available: https://www.eastwood.com/rivet-bucking-bar.html

[13] FAA. (2018). Aviation Maintenance Technician Handbook Airframe. USA. [Online]. Available: https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/media/amt_airframe_hb_vol_1.pdf