6. สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง และข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

จากการดำเนินโครงการวิจัยเรื่อง 'สายอากาศแบบหมุนในระบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาคย่านความถี่วิทยุ' ได้มีการออกแบบ ประดิษฐ์ และวัดประสิทธิภาพของสายอากาศที่มีส่วนประกอบคือ สวิตช์ single-pole-eight-throw แบบหมุน ที่ใช้เทคโนโลยีเครื่องจักรกลไฟฟ้าจุลภาคหรือ MEMS โดยต้องการสาธิตศักยภาพการนำไปใช้งานของสวิตช์ดังกล่าว ซึ่งสายอากาศที่ใช้เป็นแบบ Tapered slot ที่เรียกว่า Vivaldi เพื่อใช้งานที่ความถี่ย่าน X-band ที่มีความถี่กลางเท่ากับ 10 GHz โดยใช้ข้อจำกัดของแผ่นซับเสตรท RF-35 มาประกอบการออกแบบให้สอดคล้องกับทฤษฎี ทำให้ได้สมการการบานออกของสายอากาศ คือ $y=0.5e^{0.4x}$ การออกแบบสายอากาศได้ใช้โปรแกรมจำลองโครงสร้างสามมิติสำหรับความถี่สูงมาใช้ จากนั้นลำดับต่อไปคือการประดิษฐ์สายอากาศด้วยการติดตั้งสวิตช์ SP8T MEMS แบบหมุนเข้ากับสายอากาศ 8 อันบนแผ่น RF-35 มีการเชื่อมต่อด้วย bond wire และติดตั้ง port สำหรับสัญญาณขาเข้า และขั้วไฟตรงสำหรับขับเคลื่อนการเปลี่ยนตำแหน่งของโรเตอร์ในสวิตช์ นอกจากนี้ยังมีการประกอบสายอากาศ horn ที่ทำจากแผ่น FR-4 เข้ากับสายอากาศทั้ง 8 อันเพื่อป้องกันการคู่ควบระหว่างสายอากาศ

การวัดประสิทธิภาพของสายอากาศที่ประดิษฐ์ทำโดยการวัด Return loss และ รูปแบบการแผ่รังสีหรือ Radiation pattern ซึ่งจากผลการวัดปรากฏว่า Return loss ดังในรูปที่ 13 มีค่าต่ำสุดที่ 7 GHz และ 13 GHz แตกต่างจากที่ออกแบบที่ความถี่ 10 GHz โดยผลของสายอากาศแต่ละอันมีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ความแตกต่างอาจเกิดได้จากความไม่เหมาะสมกันของอิมพีแดนซ์ หรือ impedance mismatch ระหว่าง bonded wire กับสายสัญญาณ coplanar waveguide บนสวิตช์ และระหว่าง bonded wire กับสายสัญญาณ microstrip บนซับสเตรทของสายอากา ศ ซึ่งการควบคุม bonded wire ทำได้ยาก เนื่องจากมีข้อจำกัดในแง่ของขนาดของเส้นทองที่ใช้ ที่ต้องมีขนาดเล็กเท่ากับ 25 ไมโครเมตร เนื่องจากสายสัญญาณ CPW บนสวิตช์มีความกว้างเพียง 80 ไมโครเมตร ถ้าใช้เส้นทองที่ใหญ่ขึ้น อาจเกิดปัญหาการที่เส้นทองถูกกดทับระหว่างการเชื่อมต่อ bonded wire แล้วลัดวงจรกับสายดินของสายสัญญาณ CPW ได้ ทำให้ชิ้นงานเสียหาย นอกจากนี้การควบคุมความยาวของเส้นทองยังเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก โดยเฉพาะในการเชื่อมต่อบนตำแหน่งที่ต่างระดับกัน นั่นคือตำแหน่งหนึ่งอยู่บนซับเสตรตควอทซ์สำหรับสวิตช์ และอีกตำแหน่งหนึ่งอยู่บนซับเสตรตแผ่น RF-35 สำหรับสายอากาศ เพราะในทางปฏิบัติจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรหลากหลายเช่น แรงกด, แรงสั่น, loop height, มุมของการดึงเส้นทองหลังจากเชื่อมต่อที่ตำแหน่งที่หนึ่ง และมุมที่เส้นทองจะลดลงเพื่อเชื่อมต่อที่ตำแหน่งที่สอง เป็นต้น เพื่อให้เกิดความเครียด (stress) ในเส้นทองให้น้อยที่สุด มิเช่นนั้นจะส่งผลให้เส้นทองหลุดขาดง่าย ขั้นตอนการเชื่อมต่อ bond wire ถือว่าเป็นขั้นตอนที่กระทำได้ยากที่สุด เพราะหากเกิดความผิดพลาด เช่นเส้นทองไม่เชื่อมต่อกับตัวนำบนซับเสตรต จะทำให้พื้นผิวของตัวนำนั้นสกปรก ซึ่งหมายถึงชิ้นงานเสียหายไม่เหมาะต่อการใช้งานต่อไป จึงต้องมีการควบคุมตัวแปรต่างๆของการ bond wire ให้เหมาะสมกับตำแหน่งแต่ละตำแหน่ง ดังนั้นค่าความต้านทานของ

การเชื่อมต่อของแต่ละตำแหน่งอาจไม่เท่ากัน ส่งผลต่อ impedance mismatch ของสายสัญญาณและความคลาดเคลื่อนของความถี่ที่ return loss ต่ำสุดของสัญญาณได้

การที่มี impedance mismatch และการสูญเสียภายในเส้นทอง ยังส่งผลต่อความแรงของสัญญาณขณะวัดผลรูปแบบการแผ่รังสีในระนาบ E-plane ดังแสดงในรูปที่ 14 ก) และ ข) โดยในรูป 14 ก) ความแตกต่างของสัญญาณที่รับได้จากสายอากาศ 'Beam 3' กับสายอากาศอื่นๆคือ ประมาณ 10 dB ซึ่งแตกต่างจากการประมวลผลจากแบบจำลอง ที่มีความแตกต่างกันประมาณ 20 dB (รูปที่ 7) ทั้งนี้สามารถอธิบายความแตกต่างนี้ได้จากการที่ห้องที่ทำการวัดผลเป็นห้องที่ใช้เอนกประสงค์ ไม่ได้มีลักษณะเฉพาะที่เหมาะสมกับการวัดการแผ่รังสี เพราะมีความเป็นไปได้ที่จะมีการสะท้อนของสัญญาณจากพื้น เพดาน ผนัง หน้าต่าง และวัสดุโลหะต่างๆ นอกจากนี้ยังสามารถอธิบายได้จากการที่มีสัญญาณรั่ว ซึ่งอาจเกิดที่สวิตช์แบบหมุน หรือที่บริเวณตรงกลางของแผ่นซับเสตรต RF-35 ทั้งนี้จากประสิทธิภาพของสวิตช์แบบหมุนตามรูปที่ 1 ข) พบว่าค่า isolation ที่ 10 GHz มีค่าประมาณ 35 dB ดังนั้นจึงไม่น่าจะเป็นไปได้ที่จะมีสัญญาณรั่วผ่านสวิตช์ สำหรับการมีสัญญาณรั่วผ่านบริเวณตรงกลางของแผ่นซับเสตรต RF-35 นั้นอาจเกิดขึ้นได้ ถึงแม้ว่าในการประมวลผลแบบจำลองจะไม่มีการคู่ควบระหว่างสายอากาศปรากฏอยู่ และในทางปฏิบัติได้ป้องกันการคู่ควบด้วย horn antenna อีกด้วย แต่อาจเป็นไปได้ที่มีการเชื่อมต่อกันของสัญญาณตรงบริเวณตรงกลางของแผ่นซับเสตรต RF-35 ใต้สวิตช์ที่ไม่มี horn antenna อยู่ ทำให้สัญญาณจากสายอากาศที่สถานะ ON ถูกส่งถึงสายอากาศทุกอันที่เหลือได้ ซึ่งหมายความว่ามีความคลาดเคลื่อนจากการประมวลผลจากแบบจำลองสามมิติ

นอกจากนี้ผลการวัดรูปแบบการแผ่รังสีที่แสดงในรูปที่ 14 ข) ซึ่งเป็นลักษณะของลำสัญญาณของสายอากาศต่างๆ พบว่าลำสัญญาณมีความแตกต่างกันบ้าง อันเนื่องมาจากความไม่สมมาตรของสายสัญญาณที่สามารถอธิบายได้จากการเชื่อมต่อด้วย bond wire นอกจากนี้ ยังมีความเป็นไปได้ที่การสัมผัสกันระหว่างโรเตอร์กับสายสัญญาณ CPW แต่ละสายบนสวิตช์จะมีความแตกต่างกัน เพราะผิวหน้าของสายสัญญาณ CPW อาจมีความขรุขระ ซึ่งปัญหานี้จะลดลงเมื่อใช้งานสวิตช์นานขึ้น เพราะผิวหน้าจะถูกฝนให้เรียบขึ้น

จากการดำเนินโครงการวิจัยนี้สามารถให้ข้อสรุปได้ว่า ได้มีการสาธิตศักยภาพการใช้งานของสวิตช์แบบหมุนในการใช้เป็นสายอากาศได้สำเร็จ ทำให้ได้เพิ่มการนำสวิตช์ MEMS แบบหมุนไปใช้งาน แต่ผลการวัดประสิทธิภาพยังมีความแตกต่างจากที่ออกแบบอยู่ เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่นความคลาดเคลื่อนจากผลของแบบจำลอง การควบคุมตัวแปรในการ bond wire และ สถานที่ที่ใช้ในการวัดผล เป็นต้น ทั้งนี้ข้อแนะนำสำหรับงานวิจัยในอนาคตคือ การตรวจสอบผลจากการออกแบบสายอากาศก่อนการสร้างชิ้นงานจริง การออกแบบสายอากาศที่ลดการคู่ควบ และการเปลี่ยนแปลงการเชื่อมต่อสัญญาณแทนการใช้ bond wire ซึ่งการ flip chip อาจเป็นแนวทางที่เป็นไปได้ แต่ต้องมีความพร้อมในด้านเครื่องมือที่ใช้ และอาจมีความจำเป็นต้องปรับเปลี่ยนการออกแบบสายสัญญาณของสวิตช์ MEMS แบบหมุนเพื่อการ flip chip รวมไปถึงการดำเนินโครงการวิจัยที่สาธิตการใช้งานจริงของสายอากาศที่ประดิษฐ์ขึ้น ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำหีบห่อสำหรับสวิตช์.