

การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแมกนีตรอนของเครื่องเร่งอนุภาค
เชิงเส้นระดับพลังงาน 6 MeV สำหรับการปลดเชื้อผลไม้



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2563

**THE ANALYSIS AND CONTROL SYSTEM DESIGN OF
MAGNETRON OF 6 MeV LINEAR ACCELERATOR
FOR FRUITS STERILIZATION**



Nattawat Yachum

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechatronics Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2020

การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแมกนีตรอนของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นระดับ
พลังงาน 6 MeV สำหรับการปลูกเนื้อผลไม้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาโทวิชาชีพ

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสธา)

กรรมการ



(ผศ. ดร.โสรวาน แจ็งการ)

กรรมการ

สุรเดช ด้วงขยงตัน

(อ. ดร.สุรเดช ด้วงขยงตัน)

กรรมการ



(รศ. ดร.นิตราชัย โชติชูยางกูร)

รักษาการแทนรองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
และประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ณัฐวัฒน์ ยะขุ่ม : การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมแมกนีตรอนของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นระดับพลังงาน 6 MeV สำหรับการปลอดเชื้อผลไม้ (THE ANALYSIS AND CONTROL SYSTEM DESIGN OF MAGNETRON OF 6 MeV LINEAR ACCELERATOR FOR FRUITS STERILIZATION) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 193 หน้า.

ระบบการผลิตคลื่นวิทยุแบบแมกนีตรอนเป็นส่วนที่สำคัญของระบบเครื่องเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้นพลังงานสูง ในการผลิตคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้กับระบบเครื่องเร่งที่ความถี่ในย่าน S-Band ซึ่งอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อทั้งความถี่เรโซแนนซ์ของเครื่องเร่งและความถี่ของแมกนีตรอนมีค่าตรงกันตลอดการเร่ง ดังนั้นในการพัฒนาระบบการเร่งอิเล็กตรอนเชิงเส้น ที่พลังงาน 6 MeV ที่ย่านความถี่ S-Band 2.9982 GHz ให้สามารถผลิตรังสีเอ็กซ์ในการปลอดเชื้อผลผลิตทางการเกษตรได้อย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพ จึงจำเป็นต้องควบคุมความถี่ของแมกนีตรอนในโหมดการใช้งานให้มีความแม่นยำสูง เพื่อรักษาเสถียรภาพในการทำงานและจำเป็นต้องทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดี ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เสนอการวิเคราะห์การทำงานที่โดดเด่น การออกแบบระบบควบคุมความถี่ และการจำลองเชิงคณิตศาสตร์ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอน เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาออกแบบและสร้างแมกนีตรอนได้เองภายในประเทศต่อไป ในการวิเคราะห์โหมดการทำงานที่โดดเด่นจะพิจารณาจากผลการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนต่อค่าพิกัดความถี่ของตัวแปรของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนด้วยเทคนิควิศวกรรมย้อนรอย และการใช้ตัวแปรเชิงขนาดมิติของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องวัดพิกัดสามมิติ (CMM) ซึ่งมีความละเอียด 0.5 μm นำไปวิเคราะห์หาค่าความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดการทำงานที่โดดเด่นมากที่สุดของแมกนีตรอน ในขณะที่ค่าพิกัดความถี่ในเชิงขนาดมิติของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนจะวิเคราะห์ด้วยการจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 วิธี คือ วิเคราะห์โดยอาศัยวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนานและวิเคราะห์แบบจำลองสามมิติ ด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell (PIC) simulation ในโปรแกรม CST particle studio

จากผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์, จุดการทำงานที่สร้างความถี่เรโซแนนซ์, โหมดการทำงานแต่ละโหมด และผลการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิกัดความถี่ของแมกนีตรอนทั้ง 6 ตัวแปร ที่ค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและค่าสนามแม่เหล็กของแมกนีตรอนที่เหมาะสมสามารถนำไปออกแบบระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์แบบอัตโนมัติ โดยการประยุกต์ใช้อัลกอริทึมแบบฟัซซีร่วมกับวิธีการอนุमानแบบ Takagi-Sugeno ทำให้สามารถควบคุมเครื่องเร่ง

อิเล็กทรอนิกส์ในการผลิตรังสีเอ็กซ์ได้อย่างต่อเนื่อง และทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ
ในช่วง 38 – 42 องศาเซลเซียส และความดันสุญญากาศในช่วง 1.0×10^{-9} ถึง 5.0×10^{-8} ทอร์



สาขาวิชา วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2563

ลายมือชื่อนักศึกษา

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

NATTAWAT YACHUM : THE ANALYSIS AND CONTROL SYSTEM
DESIGN OF MAGNETRON OF 6 MeV LINEAR ACCELERATOR FOR
FRUITS STERILIZATION. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF.
JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 193 PP.

HOLE-SLOT-TYPE MAGNETRON/PARTICLE-IN-CELL/FUZZY LOGIC

Magnetron is one of the crucial components of a high energy Linear Accelerator (LINAC) to produce a high-power RF wave directly with S-Band 2.9982 GHz frequency and send through the waveguide into the LINAC. Energetic electrons can be achieved when synchronized acceleration over the LINAC length is meet. It means that output frequency of a magnetron should be matched to the frequency of the LINAC during the operation. To obtain a continuous x-ray for agriculture product's sterilization with a high efficiency of the acceleration to at a desired energy of 6 MeV and the resonant frequency of 2.9982 GHz S-Band, the development of the more magnetron working seem inevitable. The magnetron's resonant frequency must be controlled well with a high precision, stability, and robustness to the disturbance. This research presents the analysis of the resonant frequency in a dominant mode of operation, design control algorithm for the automatic frequency adjustment of the magnetron running and physical model analysis of the inner magnetron which influences on the resonant frequency. Both analysis of the dominant mode of operation and inner dimension analysis are great information to develop in-house magnetron prototype later. The analysis of the dominant operation mode will focus mainly on a changing in resonant frequency with the tolerance of the inner-structural magnetron. This methodology is based on reverse engineering technique. As a result of the physical dimension of the

magnetron's cavities determined by using a 3D coordinate measuring machine (CMM), the resonant frequency with a desired operating point of the magnetron in the dominant mode. The tolerance in magnetron dimensions is numerical analyzed and relied on two methods. First method is mathematical model analysis of an equivalent resonant parallel circuit. The other is 3D-model of the magnetron is built up and simulated with measured dimensions. The simulations base on commercial electromagnetic code PIC (Particle-In-Cell) solver in CST (Computer Simulation Technology) particle studio.

The results are demonstrated by the position of the resonant frequency each mode operation, and the six parameters within the structures of the magnetron affect to a resonant frequency change. The suitable parameters of the voltage and magnetic field supply are desired to control a resonant frequency at 2.9982 GHz by using Takagi-Sugeno Fuzzy logic control (FLC) algorithm. This leads to produce a continuous x-ray at a given dose rate with a disturbance variation in a range of 38 to 42 Celsius and 1×10^{-9} to 5×10^{-8} torr in temperature and vacuum pressure in the LINAC, respectively.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

School of Mechatronics Engineering

Academic year 2020

Student's Signature Nattawat

Advisor's Signature Sutep J

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ผู้ทำวิจัยขอขอบพระคุณ บุคคลต่าง ๆ ที่ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และช่วยเหลือ ทั้งในด้านวิชาการ การดำเนินงานวิจัย รวมไปถึงหน่วยงานต่าง ๆ ที่อำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย ดังนี้

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษา สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ได้ให้การสนับสนุนเครื่องมือ และสถานที่ในการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในงานวิจัย ตลอดจนให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตาอย่างสูง ตลอดจนงานวิทยานิพนธ์นี้เสร็จสิ้น

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ อบรมสั่งสอนให้คำแนะนำแก่ผู้ทำวิจัยทั้งในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ขอบคุณ ดร.สุวัฒน์ กลิ่นเขียว, ดร.สมใจ ชื่นเจริญ และดร.นิลเพชร รัศมี สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้ให้คำแนะนำ สำหรับการทำวิจัยในโครงการพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เพื่อประยุกต์ใช้ทางด้านการเกษตรและอุตสาหกรรม ตลอดจนให้คำปรึกษา แนะนำเทคนิคในการทำงานวิจัย และการเขียนบทความทางวิชาการ และขอบคุณเพื่อนร่วมงานทุกท่าน ตลอดทั้ง พี่ ๆ น้อง ๆ กลุ่มวิจัยของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) และผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกคนที่มีส่วนช่วยเหลือให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อสมชาย ยะชุ่ม และคุณแม่สัทยาภรณ์ ยะชุ่ม รวมถึงครอบครัวที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้โอกาสในทางการศึกษาเป็นอย่างดีตลอดมาทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา และตลอดไป

ณัฐวัฒน์ ยะชุ่ม

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตของงาน.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	5
1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์.....	5
2 ทัศนวิสัยการมองเห็นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 บทนำ.....	7
2.2 เครื่องเรือนอนุภาคเชิงเส้น เชิงอุตสาหกรรมและการเกษตร.....	7
2.2.1 หลักการทำงาน.....	9
2.2.2 ปืนอิเล็กทรอนิกส์.....	10
2.2.3 ระบบควบคุมประมวลผลกลาง.....	10
2.3 ทัศนวิสัยการมองเห็นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แมกนีตรอน.....	11

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ	14
2.3.3	งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมพีชชี	17
2.4	สรุป	19
3	แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ	21
3.1	บทนำ	21
3.2	แมกนีตรอน	21
3.2.1	หลอดไมโครเวฟ (Microwave power Tubes)	22
3.2.2	โครงสร้างทางกายภาพของแมกนีตรอน	23
3.2.3	หลักการทำงานของแมกนีตรอน	25
3.2.4	การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนาม	28
3.2.5	วงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์และโหมดการทำงานของระบบ แมกนีตรอน	44
3.2.6	หลักการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์	53
3.2.7	การจำลองผลต่างจำกัดเชิงเวลา (FDTD)	54
3.2.8	วิธีการจำลองด้วยเทคนิค Particle-In-Cell (PIC)	55
3.2.9	หลักการวิเคราะห์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต และมิติ (GD&T)	57
3.3	พิกัดความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ	58
3.4	การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	62
3.4.1	เงื่อนไขการเกิด Hull cut-off	63
3.4.2	เงื่อนไขการเกิดของฮาร์ทรี	64
3.5	การทำงานจุดที่เหมาะสมของระบบแมกนีตรอน	64
3.6	การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองวงจรเรโซแนนซ์	65
3.6.1	แบบจำลองวงจรเทียบเท่าคาปาซิแตนซ์	65

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.2	แบบจำลองวงจรเทียบเท่าอินคักเตนซ์.....	66
3.7	การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ด้วยเทคนิค Particle-In-Cell.....	68
3.8	อุณหภูมิและความเหนียวนำทางไฟฟ้าของแมกนีตรอน.....	69
3.9	สรุป.....	78
4	ผลการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน.....	80
4.1	บทนำ.....	81
4.2	ข้อกำหนดชนิดพารามิเตอร์ของระบบแมกนีตรอน.....	82
4.3	การจำลองระบบและเก็บข้อมูล.....	83
4.3.1	การจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	82
4.3.2	การจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิกัดความถี่ของตัวแปร.....	97
4.4	สรุป.....	106
5	ระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นพลังงาน 6 MeV.....	109
5.1	บทนำ.....	109
5.2	การควบคุมความถี่อัตโนมัติ.....	110
5.3	ระบบควบคุมการทำงานแบบเวลาจริงและสมองกลฝังตัว.....	112
5.4	ระบบควบคุมทางเวลา.....	116
5.5	การออกแบบโปรแกรมอินเตอร์เฟส.....	119
5.5.1	Data Flow and G Programming.....	119
5.5.2	ส่วนประกอบต่าง ๆ ในโปรแกรม LabVIEW.....	120
5.5.3	การออกแบบพีชชีบนโปรแกรม LabVIEW Fuzzy System Designer.....	122
5.6	การออกแบบตัวควบคุมพีชชี.....	127

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.6.1	ระบบควบคุมแบบฟัซซี.....	128
5.6.2	การทำฟัซซี (Fuzzification).....	130
5.6.3	การกำหนดกฎของฟัซซี (Rules Base).....	132
5.6.4	การอนุมาน (Inference) หรือการรวมกฎฟัซซี (Aggregation)	133
5.6.5	การทำดีฟัซซิฟิเคชัน (Defuzzification)	133
5.7	สรุป.....	138
6	ผลการทดลองระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ.....	139
6.1	บทนำ	139
6.2	เครื่องมือทดลอง.....	139
6.3	การควบคุมระบบประมวลผลกลางและรับสัญญาณความถี่.....	151
6.4	การทดสอบและเก็บข้อมูล	157
6.5	สรุป.....	157
7	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	158
7.1	สรุปผลการวิจัย	158
7.2	ข้อเสนอแนะ	163
	รายการอ้างอิง.....	164
	ภาคผนวก	
	ภาคผนวก ก. การสร้างฟัซซีลอจิกด้วย Fuzzy System Designer.....	168
	ภาคผนวก ข. การใช้งานฟัซซีลอจิกบนโปรแกรม LabVIEW.....	174
	ภาคผนวก ค. การใช้งานโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับ FPGA Modules	178
	ภาคผนวก ง. การใช้งานโปรแกรม CST Particle studio	183
	ภาคผนวก จ. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา	191
	ประวัติผู้เขียน	193

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1	ผลการวัดขนาดของตัวแปรรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)..... 61
3.2	ผลการวัดขนาดของตัวแปรความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)..... 61
3.3	ผลการวัดขนาดของตัวแปรรัศมีบล็อกลูกแอโนด (R_A) 61
3.4	ผลการวัดขนาดของตัวแปรความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W)..... 61
3.5	ผลการวัดขนาดของตัวแปรความสูงบล็อกลูกแอโนด (H) 61
3.6	ผลการวัดขนาดของตัวแปรรัศมีแคโทด (R_C) 62
3.7	ขนาดโครงสร้างภายในแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot 62
3.8	ข้อมูลจำเพาะของแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot 63
3.9	ผลการคำนวณแต่ละโหมคของการทำงานแมกนีตรอน..... 67
3.10	องค์ประกอบการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน 68
3.11	ผลการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้วยสมการประมาณค่าเชิงเส้น 72
3.12	พารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม CST particle studio 75
3.13	ผลการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ด้วยโปรแกรม CST particle studio 76
4.1	องค์ประกอบตัวแปรสำหรับการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์..... 81
4.2	เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองความถี่เรโซแนนซ์..... 83
4.3	สรุปผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดรัศมีโพรงห้องคลื่น 3.195 mm 90
4.4	สรุปผลความแตกต่างการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์..... 96
4.5	รายละเอียดของการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนแต่ละกรณี..... 97
4.6	ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิกัดความถี่ของแต่ละตัวแปร 102
4.7	ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิกัดความถี่ต่อจำนวน 2 ตัวแปร 106
5.1	คุณสมบัติของระบบประมวลผลกลาง (NI-cRIO-9063)..... 113
5.2	ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น 116

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
5.3	การกำหนดตัวแปรภาษา, ขนาดอินพุต และเอาต์พุตของระบบควบคุม ความถี่อัตโนมัติ..... 131
5.4	เงื่อนไขการออกแบบกฎของฟัซซีของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ 132
5.5	ผลการทำ Fuzzification และ Defuzzification ของการออกแบบตัวควบคุม ฟัซซีด้วยการอนุมาน โมเดล Takagi-Sugeno 136
6.1	ข้อมูลจำเพาะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก..... 142
6.2	ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นเพื่อผลิต รังสีเอ็กซ์ 150
6.3	ข้อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการทดสอบการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาค เชิงเส้น..... 151
7.1	การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... 159
7.2	ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย กรณีที่ 2.1..... 160
7.3	ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย กรณีที่ 2.2..... 161

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นต้นแบบขนาดพลังงาน 6 MeV	2
2.1	แผนผังการทำงาน ภาพรวมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น	8
2.2	รูปแบบวงจรเทียบเท่าห้องคลื่นเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) ในแมกนีตรอน	11
2.3	แผนภาพระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ	17
3.1	ชนิดของหลอดไมโครเวฟแบบครอสฟิลด์	23
3.2	โครงสร้างแมกนีตรอนและห้องคลื่นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	24
3.3	รูปแบบของบล็อกแอนโอดในแมกนีตรอน	25
3.4	การเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในแมกนีตรอน	26
3.5	สนามไฟฟ้าความถี่สูงที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่อิเล็กตรอน	26
3.6	การหมุนของกลุ่มก้อนอิเล็กตรอน	27
3.7	ระบบพิกัดสามมิติของเส้นทางการเคลื่อนที่ประจุ	28
3.8	ระบบพิกัดสามมิติทรงกระบอกของการเคลื่อนที่ประจุ	31
3.9	ระบบพิกัด x, y ของการเคลื่อนที่ประจุ	31
3.10	การเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า	38
3.11	รูปแบบแมกนีตรอนแบบเชิงเส้น	42
3.12	โครงสร้างภายในแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot ที่มีห้องคลื่น 12 ห้อง	45
3.13	วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานชนิด Current source	45
3.14	วงจรเรโซแนนซ์เทียบเท่าหนึ่งโครงข่าย	46
3.15	วงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แมกนีตรอน	48
3.16	ส่วนของพื้นที่การวิเคราะห์ตัวเทียบเท่าส่วนของห้องคลื่นเรโซแนนซ์	49
3.17	แบบจำลองเซลล์ของยี่	55
3.18	กระบวนการของเทคนิค Particle-In-Cell (PIC)	56
3.19	เครื่องมือวัดพิกัดสามมิติ รุ่น CMM Mitutoyo model BLN707	58
3.20	เครื่องมือวัดขนาดพิกัดสามมิติและการวัดขนาด (CMM Mitutoyo Beyond 707)	59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.21	การเจาะแยกชิ้นส่วนแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot..... 59
3.22	รายละเอียดตัวแปร โครงสร้างภายในของแมกนีตรอน 60
3.23	ผลการคำนวณแรงดันแหล่งจ่ายที่เหมาะสมสำหรับแมกนีตรอน 65
3.24	ผลการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์แต่ละโหมดการทำงาน 67
3.25	กราฟแสดงความสัมพันธ์ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัตถุตัวนำที่ อุณหภูมิต่าง ๆ 70
3.26	ผลการตอบสนองค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าเมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 73
3.27	การออกแบบโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรม SolidWorks 74
3.28	แบบจำลองสามมิติของแมกนีตรอน Hole-Slot-Type บน โปรแกรม CST particle studio 75
3.29	โครงสร้างภายในชุดแมกนีตรอนที่สามารถปรับค่าระยะพื้นที่โพรง ห้องคลื่น (T_{SLOT})..... 76
3.30	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำ ทางไฟฟ้า..... 77
3.31	ผลการตอบสนองค่าความถี่เรโซแนนซ์เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส 78
4.1	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 2.22 mm..... 84
4.2	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 2.72 mm..... 84
4.3	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 2.97 mm..... 85
4.4	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm. เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.22 mm 85
4.5	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.47 mm 86

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.72 mm 86
4.7	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.97 mm 87
4.8	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 4.22 mm 87
4.9	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 5.22 mm. 88
4.10	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 6.22 mm. 88
4.11	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 7.22 mm 89
4.12	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 8.22 mm 89
4.13	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 9.22 mm 90
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์แต่ละตำแหน่ง การปรับจูน T_{SLOT} 91
4.15	ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.145$ และ $L_M = 4.907$ mm. 92
4.16	ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.195$ และ $L_M = 4.907$ mm. 92
4.17	ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.245$ และ $L_M = 4.907$ mm. 93
4.18	ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.145$ และ $L_M = 4.957$ mm. 93

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.19 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.195$ และ $L_M = 4.957$ mm.	94
4.20 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.245$ และ $L_M = 4.957$ mm.	94
4.21 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.145$ และ $L_M = 5.007$ mm.	95
4.22 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.195$ และ $L_M = 5.007$ mm.	95
4.23 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.245$ และ $L_M = 5.007$ mm.	96
4.24 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อค่าพิกัดความถี่ของ รัศมีโพรงห้องคลื่น	98
4.25 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อค่าพิกัดความถี่ของ ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น	99
4.26 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อค่าพิกัดความถี่ของ รัศมีปลอกแวนโนด	99
4.27 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อค่าพิกัดความถี่ของ ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น	100
4.28 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อค่าพิกัดความถี่ของ ความสูงของปลอกแวนโนด	100
4.29 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อค่าพิกัดความถี่ของ รัศมีแคโทด	101
4.30 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.145 mm และค่าพิกัดความถี่ของ ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น	103

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.31 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm. ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.170 mm และค่าพิกัดความเผื่อของความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น	103
4.32 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.195 mm และค่าพิกัดความเผื่อของ ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น	104
4.33 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.220 mm และค่าพิกัดความเผื่อของ ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น	104
4.34 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.245 mm และค่าพิกัดความเผื่อของ ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น	105
5.1 แผนผังบล็อกไดอะแกรมของระบบคลื่นความถี่วิทยุ	110
5.2 แผนผังบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมความถี่อัตโนมัติ	111
5.3 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมประมวลผลกลาง	112
5.4 สัญญาณพัลส์ที่ความถี่ 10 Hz	114
5.5 สัญญาณพัลส์ที่ความถี่ 10 kHz	114
5.6 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ	115
5.7 อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ	116
5.8 ระบบควบคุมกลางสำหรับการสร้างระบบควบคุมทางเวลา	119
5.9 แผนผังการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การสร้างระบบควบคุมทางเวลา	118
5.10 โปรแกรมควบคุมทางเวลาและผลจากการวัดด้วยสโคป	118
5.11 ตัวอย่างหน้าจอ Front panel	120
5.12 ตัวอย่าง Block Diagram	121
5.13 Icon และ Connector	122
5.14 โปรแกรมออกแบบตัวควบคุมพีซี	123
5.15 การกำหนด Membership function ส่วนอินพุตและเอาต์พุต	123

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.16	การกำหนดการอนุมานฟัซซีและการทำ Defuzzification 123
5.17	โปรแกรมระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ 124
5.18	ขอบเขตที่ต้องการของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ 125
5.19	แผนผังการทำงานการออกแบบขอบเขตระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ 126
5.20	โปรแกรมย่อยสำหรับการอ่านค่ารังสีเอ็กซ์ 126
5.21	โปรแกรมย่อยสำหรับการอ่านค่าอุณหภูมิ 127
5.22	บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์สำหรับการควบคุมความถี่วิทยุ 128
5.23	บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมความถี่วิทยุ 128
5.24	โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี 129
5.25	การสร้างตัวแปรสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต 131
5.26	ฟังก์ชันการกำหนดเงื่อนไขกฎของฟัซซี 132
5.27	ระดับความเป็นสมาชิกที่อุณหภูมิ 2.3 องศาเซลเซียส 133
5.28	ระดับความเป็นสมาชิกที่ค่าอินพุตเท่ากับ 70 135
5.29	การทดสอบผลการคำนวณ COS บน Fuzzy System Designer 136
6.1	ภาพรวมระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาดพลังงาน 6 MeV 140
6.2	เครื่องมือสำหรับการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาดพลังงาน 6 MeV 141
6.3	ภาพรวมการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาดพลังงาน 6 MeV 141
6.4	อุปกรณ์แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก 142
6.5	ระบบควบคุมสัญญาณทางเวลา 143
6.6	ผลการตอบสนองของสัญญาณควบคุมทางเวลาความกว้าง 1 μ s. 144
6.7	ผลการตอบสนองของสัญญาณควบคุมทางเวลาความถี่ 200 Hz 144
6.8	ภาพรวมระบบควบคุมชุดสแต็ปปีงมอเตอร์ 145
6.9	ภาพรวมระบบแหล่งจ่ายคลื่นวิทยุ 146
6.10	ระบบตรวจจับสัญญาณความถี่อัตโนมัติ (AFC sensing) 147
6.11	ผลการวัดสัญญาณป้อนกลับ AFC-A และ AFC-B 147
6.12	ข้อมูลจำเพาะกราฟแสดงความแตกต่างของสัญญาณความถี่อัตโนมัติ 148
6.13	อุปกรณ์วัดสัญญาณป้อนกลับความถี่อัตโนมัติ 148

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.14	อุปกรณ์วัดสเปกตรัมสัญญาณความถี่เรโซแนนซ์..... 149
6.15	กราฟแสดงผลค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแมกนีตรอน (MG-7095)..... 149
6.16	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส 152
6.17	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 152
6.18	ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส 153
6.19	ผลการตอบสนองภาพรวมการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ ของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น 154
6.20	ผลการตอบสนองปริมาณรังสีเอ็กซ์..... 154
6.21	ผลการตอบสนองสัญญาณป้อนกลับความถี่อัตโนมัติ 155
6.22	ผลการตอบสนองการปรับจูนตำแหน่งมอเตอร์..... 155
6.23	ผลการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแมกนีตรอน 156
ก.1	หน้าต่าง โปรแกรมเล็ปวิวและการใช้งานส่วนเสริม Fuzzy System Designer 169
ก.2	การกำหนดตัวแปรอินพุต 170
ก.3	รายละเอียดการกำหนดตัวแปรอินพุต..... 170
ก.4	รายละเอียดการกำหนดตัวแปรเอาต์พุต 171
ก.5	ผลการกำหนด Membership functions ของ Input และ Output 171
ก.6	ผลการสร้างกฎการควบคุมฟัซซี่..... 172
ก.7	การทดสอบกฎการควบคุมฟัซซี่..... 172
ข.1	ส่วนแสดงผลหน้าต่าง User Interface และพื้นที่บล็อกไดอะแกรม 175
ข.2	วิธีการใช้งานเครื่องมือส่วนเสริมตัวควบคุม Fuzzy Logic 176
ข.3	ตัวอย่างการสร้างรูปการทำงานการควบคุมแบบฟัซซี่ลอจิก 176
ข.4	การทดสอบการใช้งานตัวควบคุมฟัซซี่ลอจิกบนโปรแกรมเล็ปวิว..... 177
ค.1	โครงสร้างระบบการทำงานโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับระบบเวลาจริงและ ระบบสมองกลฝังตัว..... 179
ค.2	การนำเข้าอุปกรณ์เพื่อการใช้งานระบบควบคุมในโหมดไฮบริดจ์ (Hybrid mode)..... 180
ค.3	การเลือกโหมดระบบเวลาจริง 180

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
ค.4	การสร้างชุดระบบสมองกลฝังตัว 181
ค.5	รายการอุปกรณ์ของระบบทั้ง 2 ส่วน เมื่อติดตั้งสมบูรณ์ 181
ค.6	วิธีการเพิ่ม โมดูลอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต 182
ค.7	การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมในโหมดไฮบริดจ์ 182
ง.1	แบบจำลองสามมิติโดยใช้โปรแกรม SolidWorks 184
ง.2	รูปแบบการจำลองด้วยโปรแกรม CST Particle studio 185
ง.3	การนำเข้า โมเดลสามมิติจากโปรแกรม SolidWorks..... 185
ง.4	ตัวอย่างบล็อกแอสโนดที่เป็นชนิดวัสดุทองแดงอบอ่อน 186
ง.5	การกำหนดทิศทางและตำแหน่งของพอร์ตขาเข้า 186
ง.6	การกำหนดรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าอินพุต 187
ง.7	การตั้งค่าเงื่อนไขการปลดปล่อยอิเล็กทรอนิกส์จากแคโทด..... 188
ง.8	รายละเอียดการปรับตั้งค่าการวัดสนาม ช่วงเวลาการคำนวณ PIC และกำหนด จุดความละเอียดของการจำลอง 189
ง.9	รายละเอียดการปรับตั้งค่าการจำลองแบบสามมิติด้วยวิธี PIC 190

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

LINAC	=	เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น (Linear Accelerator)
q	=	ประจุไฟฟ้า
e	=	ประจุอิเล็กตรอน
m	=	มวลอิเล็กตรอน
N	=	จำนวนโพรงห้องคลื่น
n	=	โหมดการทำงานของแมกนีตรอน
R_c	=	รัศมีแคโทด
R_A	=	รัศมีบล็อกล็อกแอโนด
R_V	=	รัศมีโพรงห้องคลื่น
L_M	=	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น
W	=	ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น
H	=	ความสูงบล็อกล็อกแอโนด
T_{SLOT}	=	ระยะทางการปรับจูนโพรงห้องคลื่น
V_{OC}	=	แรงดันไฟฟ้าเส้นใยจุดตัดผ่าน
V_H	=	แรงดันเส้นใยของฮาร์ทรี
B_{OC}	=	สนามแม่เหล็กถาวร
f_R	=	ความถี่เรโซแนนซ์
ϵ_0	=	ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ
μ_0	=	ค่าสภาพให้ซึมผ่านได้ของอากาศ
Φ	=	ฟลักแม่เหล็กไฟฟ้า
PEC	=	ตัวนำไฟฟ้าที่สมบูรณ์แบบ (Perfect Electric Conductor)
ρ	=	สภาพต้านทานทางไฟฟ้า
σ	=	ความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า
σ_{20}	=	ความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

α	=	สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้า
CST	=	Computer simulation Technology
PIC	=	Particle-In-Cell simulation
CMM	=	Coordinate Measuring Machine
GD&T	=	Geometric Dimensioning & Tolerancing
RF	=	Radio Frequency
μ	=	ค่าระดับความเป็นสมาชิกฟัซซี่
COG	=	Center of Gravity
COS	=	Center of sums
LabVIEW	=	Lab Virtual Instrument Engineering Workbench
NI-cRIO	=	National Instruments Compact-Reconfigurable Input Output
FPGA	=	Field Programmable Gate Array
GUI	=	Graphical User Interface
FLC	=	Fuzzy Logic Control
AFC	=	Automatic Frequency Control
FOR power	=	แรงดันไปข้างหน้า
REFL power	=	แรงดันสะท้อนกลับ

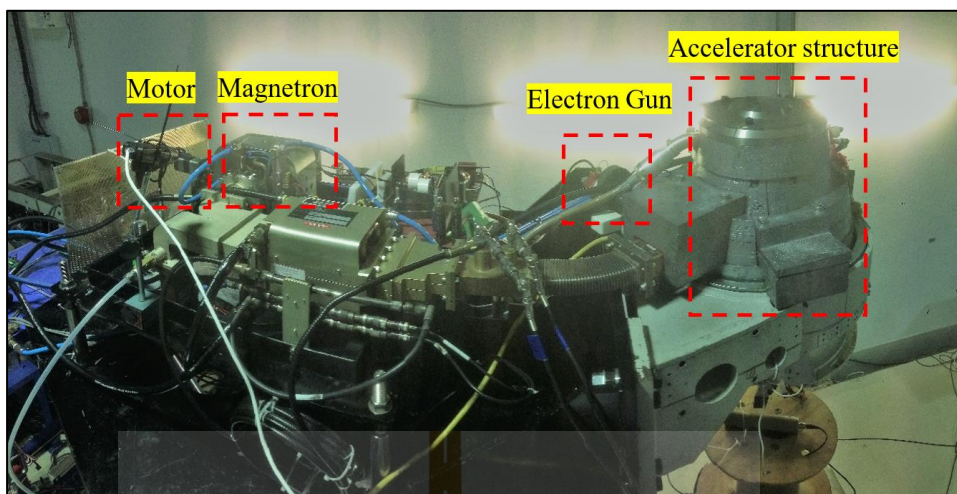
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การเกษตรกรรมในประเทศไทยมีบทบาทที่สำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของประเทศ เพราะประชาชนคนไทยส่วนใหญ่ในประเทศมีอาชีพทำการเกษตร และ ส่งออกผลิตผลทางการเกษตรไปยังต่างประเทศ เป็นหลัก แต่ปัจจุบันการส่งออกผลไม้ ไปยังประเทศ สหรัฐอเมริกา และประเทศอื่น ๆ มีการส่งออกลดน้อยลง เนื่องจาก การปนเปื้อนของแมลงและศัตรูพืช เชื้อจุลินทรีย์และแบคทีเรีย ที่ก่อให้เกิดโรคต่อผู้บริโภค และการเน่าเสียของผลไม้ ด้วยเหตุนี้เพื่อเป็นการยกระดับผลิตผลทางการเกษตรของประเทศไทยให้เป็นที่ยอมรับ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ได้มีการวิจัยและพัฒนา ออกแบบเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นในระดับพลังงานอิเล็กตรอนที่มีค่าพลังงานน้อยกว่า 7.5 MeV ซึ่งเป็นพลังงานตามค่ามาตรฐานสากลที่กำหนดโดยองค์การอนามัยโลก และเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เพื่อการปลอดเชื้อในผักผลไม้สด สำหรับการวิจัยพัฒนาเพื่อปรับปรุงผลไม้สดให้ปราศจากโรค ใช้วิธีการฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ในปริมาณรังสีที่ถูกควบคุมน้อยกว่า 10 kGy ซึ่งเป็นปริมาณรังสีที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายจากสารพิษที่เกิดขึ้นในผลไม้ และไม่ทำให้สี เนื้อ รสชาติ คุณสมบัติทางโภชนาการของผลผลิตเปลี่ยนแปลง

เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น (LINAC) ต้นแบบ ขนาดพลังงาน 6 MeV สำหรับการบำบัดมะเร็ง ที่ได้รับบริจาค โดยโรงพยาบาลศรีนครินทร์ (รูปที่ 1.1) นำไปประยุกต์ใช้ ร่วมกับการฉายผลไม้สด เพื่อผลิตกระแสอิเล็กตรอนขนาด 180 mA สำหรับปริมาณรังสีเอ็กซ์ 1 kGy (1,000 sievert) ซึ่งการผลิตรังสีเอ็กซ์จะผลิตจากการเร่งลำอิเล็กตรอนให้ชนกับเป้าโลหะหนัก และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านรังสีเอ็กซ์ ซึ่งการเร่งลำอิเล็กตรอนต้องอาศัย ส่วนประกอบที่สำคัญหลัก 3 ส่วน ประกอบด้วย ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ที่ผลิตลำอิเล็กตรอน โดยอาศัยความร้อนจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อนในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนอิสระ เพื่อเคลื่อนที่เข้าสู่ท่อเร่งลำอิเล็กตรอน (Accelerator Structure) ที่เป็นอุปกรณ์ที่ส่งผ่านพลังงานจากคลื่นวิทยุพลังงานสูงไปยังตัวอิเล็กตรอนผ่านสนามไฟฟ้า เมื่อท่อเร่งอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายกำลังคลื่นวิทยุหรือแมกนีตรอน (Magnetron) จะเกิดการสั่นพ้องและเกิดสนามไฟฟ้าเป็นคลื่นนิ่งภายในแต่ละห้องคลื่น (Cavities) ของท่อเร่ง



รูปที่ 1.1 เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นต้นแบบ ขนาดพลังงาน 6 MeV

สำหรับการส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุไปยังโครงสร้างท่อเร่งจะส่งผ่านคลื่นความถี่วิทยุกำลังสูงในย่าน S-Band ความถี่ 2.9982 GHz แบบคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ผ่านท่อนำคลื่น (Wave Guide) ไปสู่ภายในท่อเร่งอิเล็กตรอนที่สภาวะสุญญากาศ และเกิดความถี่สั่นพ้อง (Resonant Frequency) ทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งให้มีพลังงานเพิ่มขึ้น และในระหว่างการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาค ที่มีการเร่งพลังงานอิเล็กตรอนอย่างต่อเนื่อง จะมีการสร้างความร้อนจำนวนมาก และแพร่กระจายความร้อนไปยังส่วนของชุดแหล่งกำเนิดความถี่ หรือแมกนีตรอน และ ส่วนของท่อเร่ง โดยความร้อนที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อความถี่สั่นพ้อง ทำให้มีค่าเปลี่ยนแปลง พลังงานอิเล็กตรอนก็จะลดลงอย่างต่อเนื่อง ดังนั้น จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนความถี่ของแหล่งกำเนิด เพื่อให้ระบบมีการส่งความถี่เรโซแนนซ์ไปยังส่วนของท่อเร่งได้อย่างต่อเนื่อง ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่อย่างต่อเนื่อง ทำให้ปริมาตรโครงสร้างของท่อเร่งเปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงต่ออุณหภูมิ โดยรอบที่เปลี่ยนไป และถ้าปริมาตรของท่อเร่งเปลี่ยน จำเป็นต้องมีการออกแบบความถี่สั่นพ้องของท่อเร่งด้วยไม่เช่นนั้นผลของปริมาณรังสีหรือ Dose rate และกำลังไฟฟ้าขาออกของเครื่องกำเนิด จะไม่เพียงพอหรือเหมาะสมกับการเร่งพลังงานอิเล็กตรอน ดังนั้นต้องมีการออกแบบและสร้างระบบระบาย ประกอบด้วย ระบบสารหล่อเย็น เช่น ระบบน้ำหล่อเย็นที่อุณหภูมิ 40°C ในส่วนของท่อเร่งอิเล็กตรอน และเป่ารังสีเอ็กซ์ที่มีระบบสุญญากาศระดับความดัน 10^{-10} - 10^{-11} ทอร์ ออกแบบแหล่งจ่ายไฟฟ้าและควบคุมคลื่นความถี่วิทยุของแมกนีตรอน ซึ่งเป็นสิ่งที่จำเป็นที่ทำให้ระบบ LINAC มีประสิทธิภาพ มีความน่าเชื่อถือ สามารถเร่งพลังงานอิเล็กตรอนได้อย่างเหมาะสม มีประสิทธิภาพ สำหรับการปรับเปลี่ยนความถี่ของแมกนีตรอนสามารถปรับแต่งความถี่ได้เองในตัวแมกนีตรอน โดยทำการปรับแต่งชุดโครงสร้างทางฟิสิกส์ผ่านแกนหมุนด้วยเพลลา (Turning

Shaft) ของระบบแมกนีตรอน ซึ่ง ณ ปัจจุบันการปรับแต่งความถี่ของตัวแมกนีตรอนใช้ระบบขับเคลื่อนหรือชุดมอเตอร์ไฟฟ้าที่ปรับจูนตำแหน่ง โครงสร้างภายในของตัวแมกนีตรอนที่ใช้หลักการควบคุมการสั่นพ้องของแมกนีตรอนที่เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการแก้ไขปัญหาสัญญาณความถี่เรโซแนนซ์ผิดพลาด โดยสามารถแก้ไขโดยปรับจูนความถี่เรโซแนนซ์ด้วยวิธีเชิงกลหรือปรับจูนผ่านมอเตอร์ไฟฟ้าที่คัปปลิงกับชุดขับเคลื่อน โครงสร้างภายในแมกนีตรอน (Tuner Slot Distance; T_{SLOT}) โดยหลักการปรับความถี่นั้นอาศัยความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่กระจายอยู่ในโครงสร้างท่อเร่งให้สามารถเร่งพลังงานได้สูงสุด ดังนั้นจึงต้องทำการเร่งด้วยความถี่เรโซแนนซ์ให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ถ้าผลของความถี่ไม่ตรงกัน ระหว่างความถี่ต้นทางและความถี่เรโซแนนซ์ส่วนท่อเร่ง จะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของพลังงานที่สะท้อนกลับ ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน ไม่มีประสิทธิภาพ และยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อความถี่เรโซแนนซ์คือ อุณหภูมิโดยรอบหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวแมกนีตรอน และท่อเร่งอิเล็กตรอนซึ่งปัจจัยนี้ไม่สามารถทำการควบคุมให้คงที่ได้ตลอดเวลาทำให้การปรับแต่งความถี่ของแมกนีตรอนไม่สามารถที่จะทำการชดเชยความถี่ได้ทันท่วงที ทำให้เกิดความเสียหายต่อการเร่งพลังงานอิเล็กตรอน ที่มีผลให้ปริมาณรังสีที่ใช้งานกับการฉายผลไม่สด มีการตอบสนองไม่คงที่และไม่ได้มาตรฐานของรังสี ที่เหมาะสมกับการฆ่าเชื้อผลผลิตทางการเกษตร

ดังนั้นงานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot ที่มีผลต่อการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz ด้วยเทคนิควิศวกรรมย้อนรอย และสร้างระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน โดยการประยุกต์ใช้พีซีลอจิกเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น พลังงาน 6 MeV สำหรับการประยุกต์ใช้ฆ่าเชื้อผลผลิตทางการเกษตร ที่แบ่งแยกการวิเคราะห์ออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ คือ

1. ใช้เครื่องมือวัดที่มีความน่าเชื่อถือและ มีความละเอียดที่ $0.5 \mu\text{m}$ คือ เครื่องวัดพิกัดสามมิติ (CMM Mitutoyo Beyond 707) วัดขนาดโครงสร้างภายในแมกนีตรอน แล้วนำตัวแปรไปวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อหาจุดการทำงานของแมกนีตรอน ด้วยโหมดการทำงานที่โดดเด่นที่สุด
2. วิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอน เพื่อหาจุดการทำงานที่สร้างความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 วิธี คือ วิเคราะห์โดยอาศัยวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนาน และวิเคราะห์แบบจำลองสามมิติ ด้วยเทคนิควิธี PIC simulation บนโปรแกรม CST particle studio และเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จุดการทำงานที่สร้างความถี่เรโซแนนซ์ โหมดการทำงานแต่ละโหมด และผลการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิกัดความถี่ของแมกนีตรอนจำนวน 6 ตัวแปร

3. ออกแบบและทดลองระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น โดยการป้อนแหล่งจ่ายแรงดัน และสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม โดยใช้ผลการวิเคราะห์จุดทำงานร่วมกับโหมดที่เด่นที่สุดของแมกนีตรอน เพื่อออกแบบตัวควบคุมพีชชี ร่วมกับวิธีการอนุমানแบบ Takagi-Sugeno ให้สามารถควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ตรงกันกับโหลดหรือท่อเร่งอนุภาคแนวตรงที่ 2.9982 GHz ได้ โดยปรับขนาดของโครงสร้างโพรงห้องคลื่นแมกนีตรอน ผ่านชุดสแต็ปปีงมอเตอร์ที่ยึดติดกับแกนหมุนของเพลา เพื่อให้ระบบสามารถควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ในการรักษาระดับรังสีเอ็กซ์คังที่อย่างต่อเนื่อง และทนต่อการรบกวนจากภายนอก คือ อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงช่วง 38 - 42 องศาเซลเซียส และความดันสุญญากาศเปลี่ยนแปลงช่วง 1.0×10^{-9} - 5.0×10^{-8} ทอร์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการทำงานของแมกนีตรอน เพื่อสร้างคลื่นความถี่วิทยุไปยังชุดท่อเร่งอนุภาค สำหรับการเพิ่มพลังงานอิเล็กตรอน โดยใช้เทคนิควิศวกรรมย้อนรอย

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot ที่มีผลต่อการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz สำหรับการสร้างและผลิตแมกนีตรอนใช้งานได้เองในประเทศ

1.2.3 เพื่อออกแบบและสร้างระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนสำหรับเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

1.3.1 ระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาด 6 MeV จะมีการติดตั้งเครื่องกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุหรือแมกนีตรอน ชนิด Twelve-Hole-Slot ย่าน S-Band ที่สามารถปรับจูนความถี่ได้ $2,998 \pm 4$ MHz ด้วยระบบขับเคลื่อนทางกล สแต็ปปีงมอเตอร์ และท่อเร่งพลังงานอิเล็กตรอนชนิดโครงสร้างที่ออกแบบในย่านความถี่วิทยุย่าน S-band ความถี่ 2.9982 GHz แบบคลื่นนิ่ง (Standing wave)

1.3.2 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคลื่นความถี่วิทยุ เนื่องมาจากการปรับเปลี่ยนขนาดโครงสร้างด้วยเทคนิควิศวกรรมย้อนรอย ด้วยตัวแปรของขนาดโครงสร้างแมกนีตรอน 6 ตัวแปร ซึ่งวัดขนาดโดยใช้เครื่องมือวัดพิกัดสามมิติ (CMM Mitutoyo Beyond 707) และมีคุณสมบัติการวัดความละเอียด 0.5 ไมโครเมตร

1.3.3 พิจารณาการเปลี่ยนแปลงคลื่นความถี่วิทยุ เนื่องมาจากการเกิดความร้อนในท่อเร่งอิเล็กตรอน และแมกนีตรอนที่อุณหภูมิ 40.0 ± 0.3 องศาเซลเซียส ความดันสุญญากาศเปลี่ยนแปลงช่วง 1.0×10^{-9} - 5.0×10^{-8} ทอร์ และแหล่งจ่ายแรงดัน 45.0 ± 0.3 กิโลโวลต์

1.3.4 ออกแบบและวิเคราะห์ผลจำลองการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างแมกนีตรอน โดยใช้โปรแกรม CST particle studio และโปรแกรม LabVIEW

1.3.5 ออกแบบตัวควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยตัวควบคุมแบบพีชชี ร่วมกับวิธีการอนุमानแบบ Takagi-Sugeno

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจถึงหลักการทำงานของแมกนีตรอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

1.4.2 ให้ทราบถึงค่าพิกัดความถี่ของแมกนีตรอนที่มีต่อความถี่เรโซแนนซ์ได้

1.4.3 ทำให้เราสามารถผลิตแมกนีตรอนขึ้นเองภายในประเทศได้

1.4.4 สามารถควบคุมการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนสำหรับเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นได้

1.4.5 ลดการพึ่งพาการนำเข้าแมกนีตรอนที่ใช้สำหรับเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นได้

1.5 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์นี้ประกอบด้วย 7 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยย่อดังนี้

บทที่ 1 เป็นบทนำที่กล่าวถึงความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ และเป้าหมายของงานวิจัยวิทยานิพนธ์ ตลอดจนขอบเขต และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นเชิงอุตสาหกรรมและการเกษตร ต้นแบบ ระบบโครงสร้างการทำงานของระบบ และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 กล่าวถึงแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ คือ แมกนีตรอน โดยมีการวิเคราะห์หลักการและพื้นฐานของพฤติกรรมประจุอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า หลักการวิเคราะห์ระบบแมกนีตรอนด้วยการวัดขนาดรูปทรงเรขาคณิต โดยใช้เครื่องมือวัดความแม่นยำสูง เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และการประมาณองค์ประกอบของตัวแปร เพื่อให้สามารถหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการทำงานแมกนีตรอนในโหมดที่โดดเด่น ด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ภายใต้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และพิจารณาตัวแปรของขนาดรูปทรงเรขาคณิตของแมกนีตรอน ด้วยการใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดของพิกัดความถี่ และการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่อ้างอิงถึงหลักการวิเคราะห์วงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนาน นอกจากนี้ได้อธิบายถึงการจำลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมและวิเคราะห์ห่อนุภาคที่มีประจุในการเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์สุญญากาศ

และวิเคราะห์ผลความถี่เรโซแนนซ์ ของแมกนีตรอน โดยใช้โปรแกรม CST particle studio ที่มีเทคนิควิธี Particle-In-Cell simulation ร่วมกับการสร้างแบบจำลองสามมิติ ผ่านโปรแกรม SolidWorks ตามขนาดรูปทรงเรขาคณิตของแมกนีตรอนต้นแบบ และพิจารณาถึง องค์ประกอบอนุหภูมิ และความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัววัสดุของแมกนีตรอนที่พิจารณา

บทที่ 4 ผลการจำลอง การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย เมื่อพิจารณาพิสัยของความถี่ของแต่ละตัวแปร ของขนาดโครงสร้างภายในแมกนีตรอน ด้วยตัวแปรทั้งหมด 6 ตัวแปร และวิเคราะห์ผลของการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์

บทที่ 5 กล่าวถึงการออกแบบ การสร้างเครื่องมือและ โปรแกรมการวัดความถี่เรโซแนนซ์ รวมถึงการออกแบบโปรแกรมควบคุมทางเวลา ภายใต้การทำงานแบบเวลาจริงและการทำงานบนสมองกลฝั่งตัว และองค์ประกอบของการพัฒนาโปรแกรมแล็บวิวเพื่อควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นต้นแบบร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมอัลกอริทึมพีซีซี

บทที่ 6 ผลการทดลองการควบคุมความถี่อัตโนมัติ ของระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น สำหรับการประยุกต์ใช้มาเชื่อมผลผลิตทางการเกษตรต้นแบบ ด้วยเทคนิคการควบคุมแบบพีซีซี พร้อมทั้งวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้ กับการควบคุมระบบ

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

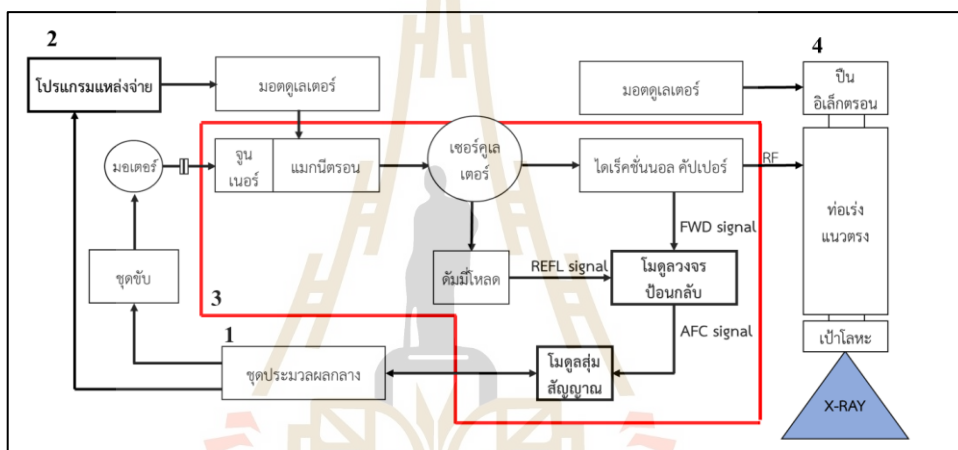
2.1 บทนำ

โครงการการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นในเชิงอุตสาหกรรมและการเกษตร เริ่มมีการพัฒนาเครื่องเร่งอนุภาคเครื่องแรกที่เป็นการผลิตเครื่องเร่งอนุภาคพลังงานสูงในการศึกษา โครงสร้างระดับอะตอมเท่านั้น นับจากนั้นจึงมีการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับ งานวิจัยในหลากหลายสาขาวิชา ซึ่งก่อให้เกิดองค์ความรู้และการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ ใช้ในปัจจุบันเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น (Linear accelerator) ได้เข้ามามีบทบาทใน ชีวิตประจำวันมากยิ่งขึ้นตลอดจนในภาคเกษตรและอุตสาหกรรม ซึ่งการประยุกต์ใช้เครื่องเร่ง อนุภาคเชิงเส้นในปัจจุบัน มีดังนี้ การใช้เครื่องเร่งเพื่อการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติของ Color center ซึ่งเป็นการเกิดสี เนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก การใช้เครื่องเร่งเพื่อการปรับเปลี่ยนสมบัติ ทางเคมีวัสดุ เช่น การปรับปรุงคุณภาพน้ำยางโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Cross-link) ในสายใยโพลีเมอร์ที่อุณหภูมิห้อง การบำบัดน้ำเสียและกากตะกอน เป็นต้น การใช้เครื่องเร่ง เพื่อตรวจจับวัตถุในระบบขนส่งและการปนเปื้อนของธาตุโลหะหนัก การใช้เครื่องเร่งเพื่อปลดเชื้อ ซึ่งในอุตสาหกรรมการปลดเชื่อนั้น ใช้ลำอิเล็กตรอนหลังจากการเร่งจากเครื่องเร่งโดยตรง เช่น การปลดเชื้อสำหรับวัสดุทางการแพทย์ และการใช้รังสีเอ็กซ์ที่ผลิตจากลำอิเล็กตรอนชนเป้าโลหะ หนักสำหรับการปลดเชื้อในผักผลไม้สด อีกทั้งยังช่วยยืดอายุผักผลไม้ หลังการเก็บเกี่ยวไว้ได้นาน

2.2 เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เชิงอุตสาหกรรมและการเกษตร

การพัฒนาการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นในเชิงอุตสาหกรรมและการเกษตร สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จึงได้มีการเริ่มพัฒนาออกแบบและสร้างเครื่องเร่ง อิเล็กตรอนพลังงาน 6 MeV โดยใช้องค์ความรู้และอุปกรณ์ เช่น ชุดปืนอิเล็กตรอน ท่อเร่ง และ เป่ารังสีเอ็กซ์ เป็นต้น ที่ได้มาจากโครงการสร้างเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับบำบัดมะเร็ง ที่เป็น เทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางสำหรับการรักษาโรคมะเร็งใน โรงพยาบาล ซึ่งมีแนวคิดที่สร้างเครื่องต้นแบบของเครื่องเร่งพลังงานอิเล็กตรอนที่ใช้ต้นทุนต่ำ และในปัจจุบันเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นสำหรับบำบัดมะเร็งที่มีพลังงานอิเล็กตรอน 6 MeV ได้ทำ คัดตั้งเครื่องต้นแบบ ภายในชั้นใต้ดินของห้องปฏิบัติการแสงสยาม สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน และได้ทดสอบอุปกรณ์ที่ได้รับการบริจาค โดยโรงพยาบาลศรีนครินทร์ จังหวัดขอนแก่น ซึ่งที่เป็น

ส่วนสำคัญในการเร่งพลังงานอิเล็กตรอน พร้อมสร้างระบบสาธารณูปโภค เช่น ระบบน้ำหล่อเย็น ระบบการวัดรังสี และระบบ Interlock เป็นต้น ซึ่งโครงการประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นในเชิงอุตสาหกรรมและการเกษตร ดังรูปที่ 2.1 จะเป็นการใช้รังสีเอ็กซ์หรืออิเล็กตรอนพลังงานต่ำในการประยุกต์ใช้นายรังสี เพื่อการปลอดเชื้อผลไม้ ให้สามารถเก็บรักษาผลไม้ได้นาน ทำลายจุลินทรีย์และแบคทีเรียที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดโรค ป้องกันการเสื่อมของอาหาร และยับยั้งการงอกของผักและผลไม้ ทำให้อายุการเก็บรักษาของผลไม้บางอย่างเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับปรุงคุณภาพของผลไม้ และรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของผักผลไม้หรือทำให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีการเก็บรักษาผลไม้โดยวิธีอื่น เช่น การแช่เย็น การใช้สารเคมี เป็นต้น



รูปที่ 2.1 แผนผังการทำงาน ภาพรวมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

จากรูปที่ 2.1 คือ แผนผังการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น สำหรับการประยุกต์ใช้นายรังสี เพื่อการปลอดเชื้อผลไม้ โดยมีส่วนประกอบที่สำคัญ สามารถแบ่งออกได้เป็น 7 ส่วนย่อยได้ดังต่อไปนี้

1. ส่วนคอมพิวเตอร์ชุดควบคุมประมวลผลกลาง (Main computer control) ทำหน้าที่รับสัญญาณป้อนกลับความเร็วโซแนนซ์ แล้วประมวลผลด้วยโปรแกรมควบคุมและแสดงผลการวัดค่าต่าง ๆ เช่น ความถี่ ตำแหน่งมอเตอร์ และอุณหภูมิ เป็นต้น จากนั้นนำผลการคำนวณด้วยโปรแกรมควบคุม ไปขับมอเตอร์ ให้เคลื่อนที่ เพื่อขับเคลื่อนโครงสร้างภายในของแมกนีตรอนเปลี่ยนแปลง

2. มอดูเลเตอร์และแหล่งจ่าย (Modulator and power supply) ทำหน้าที่กำเนิดพัลส์แรงดันสูงเพื่อสร้าง HV pulse สำหรับจ่ายให้กับ แมกนีตรอน ประกอบด้วย โปรแกรมแหล่งจ่ายไฟ

ฟ้ากำลังสูง เพื่อให้หม้ออคูเลเตอร์ทำหน้าที่สร้างสัญญาณพัลส์ และหม้อแปลงพัลส์แรงดันสูง (HV Pulse Transformer) ทำหน้าที่ยกระดับแรงดันพัลส์จากอคูเลเตอร์

3. ระบบคลื่นวิทยุ (RF-system) ทำหน้าที่สร้างคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency: RF) เพื่อเร่งอิเล็กตรอนในท่อนำคลื่น (Waveguide) หรือท่อเร่งอนุภาคแนวตรง ที่มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ แมกนีตรอน (Magnetron) ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นวิทยุกำลังสูง, มอเตอร์ปรับจูน (Motor tuning) ทำหน้าที่ปรับตำแหน่งของแมกนีตรอน เพื่อปรับความถี่เรโซแนนซ์ของคลื่นวิทยุ ก่อนถูกส่งไปที่ท่อนำคลื่น, ระบบคลื่นวิทยุ (RF-System) มีส่วนประกอบย่อย ได้แก่ Circulator, Dual Directional coupler, Tuning wand และ Water Load เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ส่งผ่านกำลังจากแมกนีตรอนไปยังท่อเร่งและเป็นทางผ่านของกำลังสะท้อนกลับ, AFC sensing ทำหน้าที่ป้อนกลับสัญญาณไปยังส่วนของ AFC control และ AFC control เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ในการควบคุมความถี่ของคลื่นวิทยุแบบอัตโนมัติ

4. ส่วนของการสร้างลำอิเล็กตรอน (Beam Generation) ทำหน้าที่กำเนิดอิเล็กตรอน และรังสีเอ็กซ์ ประกอบไปด้วย ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน, ท่อเร่ง (Linear Accelerator) หรือท่อนำคลื่น และเป้าเอกซเรย์ (X-Rays target) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์ เมื่อเกิดลำอิเล็กตรอน (E-beam) วิ่งชน

2.2.1 หลักการทำงาน

การทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น สำหรับการฉายผลไม้สด สิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาคือ การออกแบบและสร้างเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นในระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้เพื่อการปลอดเชื้อในผักผลไม้สด ที่ไม่เกินค่ามาตรฐานสากลที่กำหนดไว้โดยองค์การอนามัยโลก ที่ต้องน้อยกว่า 7.5 MeV เพื่อหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดสารกัมมันตรังสีในผลไม้ หลังการฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ดังนั้น สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ได้พัฒนาออกแบบและสร้างเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนพลังงาน 6 MeV เพื่อผลิตรังสีเอ็กซ์สำหรับการปลอดเชื้อผลไม้สดเบื้องต้น และวิธีการฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ที่ผลิตจากเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ต้องมีการฉายรังสีในปริมาณที่ถูกควบคุมน้อยกว่า 10 kGy ซึ่งเป็นปริมาณรังสีที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายจากสารพิษที่เกิดขึ้นในผลไม้ และไม่ทำให้วัตถุได้รับความเสียหาย ในระหว่างการฉายรังสี เช่น ไม่ทำให้สี เนื้อสัมผัส รสชาติและคุณสมบัติทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการออกแบบและสร้างขึ้นเองในประเทศไทย จะเป็นการพัฒนาองค์ความรู้และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง และสามารถนำไปต่อยอดองค์ความรู้ไปสู่เทคโนโลยีขั้นสูงได้ต่อไปในอนาคต ซึ่งการที่ทำให้การทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคทำงานได้ในระดับพลังงานที่ต้องการหรือเหมาะสม ได้อย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง จะต้องทำการออกแบบ และพัฒนาระบบฉายรังสีเอ็กซ์ในแนวตั้งเพื่อปลอดเชื้อผลไม้สดที่พลังงานอิเล็กตรอน 6 MeV

2.2.2 ปืนอิเล็กตรอน

การออกแบบปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) และท่อเร่งอิเล็กตรอน (Accelerator structure) โดยปืนอิเล็กตรอนเป็นชนิดไดโอดที่ประกอบด้วย ขั้วแคโทดและแอโนด และการผลิตอิเล็กตรอนอาศัยหลักการปลดปล่อย เนื่องจากความร้อนโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับขดลวดความร้อน เพื่อส่งผ่านความร้อนไปที่ขั้วแคโทดอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกปลดปล่อยออกมา หลังจากได้รับพลังงานความร้อนที่ผิวแคโทด ค่าความต่างศักย์ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดเท่ากับ -30 kV จะให้การผลักอิเล็กตรอนอิสระที่ปลดปล่อยออกมาจากผิวแคโทดให้วิ่งไปยังขั้วแอโนด และเคลื่อนที่ต่อไปยังท่อเร่งเชิงเส้น โดนท่อเร่งเชิงเส้นอิเล็กตรอนเป็นอุปกรณ์ที่ส่งผ่านพลังงานจากคลื่นวิทยุพลังงานสูงไปยังอิเล็กตรอนผ่านสนามไฟฟ้า ซึ่งการส่งผ่านนี้เกิดขึ้นภายในท่อเร่งอิเล็กตรอนที่สภาวะสุญญากาศและความถี่คลื่นวิทยุย่าน S-Band ความถี่ 2.9982 GHz แบบคลื่นนิ่ง (Standing wave) เมื่อท่อเร่งอิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแหล่งจ่ายกำลังคลื่นวิทยุหรือแมกนีตรอนจะเกิดการสั่งพ้องและเกิดสนามไฟฟ้าเป็นคลื่นนิ่ง ขึ้นภายในแต่ละห้องคลื่นหรือเรียกว่า “เซลล์ของท่อเร่ง” เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ถึงห้องคลื่นที่ 1 พบกับสนามไฟฟ้าที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปข้างหน้า เมื่อเวลาผ่านไปอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปถึงห้องที่ 2 สนามไฟฟ้าเกิดการเปลี่ยนขั้วไปในทางที่ทำให้อิเล็กตรอนพบกับสนามไฟฟ้าที่มีขนาดเท่ากันกับสนามในห้องแรกทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอีกเช่นกัน และจะเป็นเช่นนี้ไปเรื่อย ๆ จนสุดท่อเร่งอิเล็กตรอน โดยแรงกระทำนี้จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับเพิ่มขึ้น ซึ่งการออกแบบท่อเร่งอนุภาคเชิงเส้นนั้นจะคำนึงถึงการกระจายของสนามไฟฟ้าในทิศทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและค่าความถี่สั่งพ้อง (Resonant Frequency) เป็นหลักเพื่อเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานที่ 6 MeV โดยโครงสร้างของท่อเร่งอนุภาคเป็นแบบ Side-coupled cavity ที่ประกอบด้วยเซลล์ที่ใช้เร่งอนุภาค หรือ Accelerating cavity และเซลล์ที่ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับสนามไฟฟ้าของคลื่นนิ่งหรือ Coupled cavity

2.2.3 ระบบควบคุมประมวลผลกลาง

ส่วนงานระบบควบคุมประมวลผลกลางเพื่อติดต่ออุปกรณ์ต่าง ๆ ในการควบคุมลำอิเล็กตรอนและกระบวนการฉายอัตโนมัติ โดยอ้างอิงจากการวัดขนาดมิติของผลผลิตที่ต้องการฉาย ซึ่งการคำนวณ ออกแบบ และสร้างระบบลำเลียงลำอิเล็กตรอนจะใช้แม่เหล็กสองขั้วหรือ Scanning magnet เพื่อผลิตสนามแม่เหล็ก ควบคุมทิศทางในการกวาดลำอิเล็กตรอน เพื่อให้ตกกระทบบนเป้ารังสีเอ็กซ์อย่างทั่วถึง ซึ่งจะดีสำหรับการฉายบนผลผลิตได้ในปริมาณรังสีที่ควบคุมและระบบการฉายรังสีเอ็กซ์ ประกอบด้วยห้องฉายรังสี หรือ Scan horn พร้อมเป้ารังสีเอ็กซ์ในการคำนวณและออกแบบ ที่จำเป็นต้องให้ได้ปริมาณรังสีเอ็กซ์มากที่สุด จากการชนด้วยลำอิเล็กตรอนที่กำลังเฉลี่ย 1.1 kW ที่พลังงาน 6 MeV

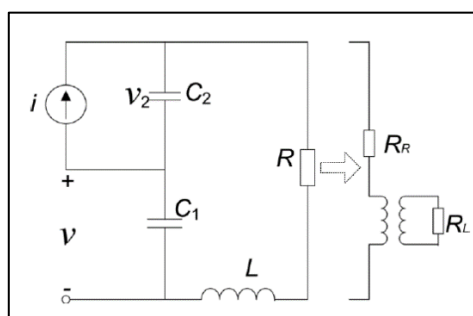
2.3 ปรัชญ์นัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.3.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์แมกนีตรอน

ศึกษาวิธีการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ของแมกนีตรอน ชนิด Sector and Slot ที่มีจำนวนห้องคลื่น 6 ห้อง โดยใช้ทฤษฎีของโมเดลวงจรเทียบเท่าการทำงานของโหมดคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งพิจารณาห้องคลื่นเรโซแนนซ์จำนวนหนึ่งห้องคลื่น และมีวงจรเทียบเท่าที่ประกอบด้วยตัวค่าเทียบเท่าคาปาซิแตนซ์ คอนดักแตนซ์ และอินดักแตนซ์ ทำการขนานกัน โดยรายละเอียดในบทความจะอธิบายถึง การพิจารณาค่าตัวเหนี่ยวนำ ที่วิเคราะห์ที่ใช้กฎของแอมแปร์ และพิจารณาตัวเก็บประจุ ที่ใช้กฎของการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า หรือกฎของเกาส์ ซึ่งโมเดลของวงจรเทียบเท่า ผู้วิจัยได้ใช้โครงสร้างภายในของแมกนีตรอนในการพิจารณา ซึ่งผลการตรวจสอบ โมเดลที่วิเคราะห์จากแบบจำลอง เทียบกับผลการจำลองการประมาณความถี่ด้วยสมการของแม็กเวลล์ มีความผิดพลาดไม่เกิน 3% (Yu-Wei Fan และคณะ, 2009)

ศึกษาวิธีการออกแบบวงจรเทียบเท่าของแมกนีตรอนที่มีรูปแบบของบล็อกลอแอนด์เป็นแบบ Rising-Sun ที่มีการทำงานในโหมดพาย (π -mode) และการคำนวณวงจรเทียบเท่าของค่า Inductance (L) และ Capacitance (C) ของห้องคลื่นเรโซแนนซ์ โดยการพิจารณาจากขนาดของรูปแบบโครงสร้างของแมกนีตรอน และทำการวิเคราะห์จำลองการทำงานของชุดแมกนีตรอนด้วยโปรแกรม CST electromagnetic simulation software ในส่วนการคำนวณหาค่า L และค่า C ผู้วิจัยได้ใช้กฎของฟาราเดย์ และกฎของเกาส์ ผลการจำลองด้วยโปรแกรมพบว่าสอดคล้องกับการคำนวณที่มีความผิดพลาดประมาณ 4 % ซึ่งสามารถที่จะทำการออกแบบแมกนีตรอนโดยใช้ทฤษฎีของวงจรเทียบเท่าได้ (Song Yue และคณะ, 2014)

ศึกษาระบบไดนามิกส์แบบไม่เชิงเส้นในแมกนีตรอนที่มีรูปร่างบล็อกลอแอนด์เป็นแบบ Hole and slot โดยใช้แบบจำลองของวงจรไฟฟ้าในการวิเคราะห์ สำหรับรูปแบบไม่เชิงเส้น ผู้วิจัยได้แก้ไขด้วยสมการระบบอันดับที่สาม ที่วงจรทางไฟฟ้าเทียบเท่ากับหลักการทำงานของแมกนีตรอน



รูปที่ 2.2 รูปแบบวงจรเทียบเท่าห้องคลื่นเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) ในแมกนีตรอน

จากรูปที่ 2.2 ผู้วิจัยได้กำหนดค่า C_1 แทนด้วยบล็อกระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด L และ C_2 แทนด้วย ห้องคลื่นเรโซแนนซ์ R แทนด้วยความต้านทานเทียบเท่าของห้องคลื่นเรโซแนนซ์ โดยกำหนดอินพุตของการวิเคราะห์ห้วงจร เป็น v (แรงดันผลต่างของแรงดันแหล่งจ่ายและแรงดันของเงื่อนไข Hartree) และ i คือ กระแสแอโนดที่อยู่ในเทอมของ v ซึ่งเป็นฟังก์ชันแบบไม่เชิงเส้น โดยผู้วิจัยได้ศึกษากระแสแอโนดจากกราฟแสดงผลความหนาแน่นกระแสและแรงดัน (V-I characteristics chart) ของแมกนีตรอน ซึ่งกระแสแอโนดไม่เชิงเส้นจะมีความคล้ายคลึงกับกระแสที่อยู่ในตัวไดโอดที่เป็นทรงกระบอก โดยมีความสัมพันธ์เกี่ยวข้องกับกฎของ Langmuir-Blodgett's Law และการทดลองผู้วิจัยได้ทำการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์จากสมการระบบอันดับที่ 3 เพื่อสังเกตผลตอบสนองของความผันผวนการแกว่งของการเกิดออสซิลเลตและสภาวะความผิดปกติหรือไม่เป็นระบบ (Chaotic state) ซึ่งผลการศึกษาได้แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมทางไดนามิกส์ของการทำงานของแมกนีตรอน ผ่านการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ เช่น การเปลี่ยนแปลงความต้านทาน และกระแสแอโนด (Daohui Li และคณะ, 2012)

ศึกษาลักษณะเฉพาะของแมกนีตรอน โดยผู้วิจัยได้แนะนำประวัติความเป็นมาของการสร้างแมกนีตรอนเพื่อการใช้งานจริง และรายละเอียดของการใช้งานอุปกรณ์ ที่ใช้เงื่อนไขของ Buneman-Hartree ที่ขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กและการเลือกใช้สนามแม่เหล็ก ที่อาศัยแหล่งจ่ายภายใต้เงื่อนไข Hull criterion (Dmitrii Andreev และคณะ, 2019)

เสนองานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหลักการทำงานพื้นฐานการเกิด Microwave oscillations ซึ่งก็คือ แมกนีตรอน โดยผู้วิจัยได้ทำการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแมกนีตรอน ซึ่งการออกแบบจำลองได้พิจารณา การทำงานพื้นฐานทางไดนามิกของอุปกรณ์ เช่น ทางไฟฟ้า คุณลักษณะเฉพาะของรูปร่างทางเรขาคณิต และผู้วิจัยได้กล่าววาระบบแมกนีตรอน เป็นระบบที่ไม่เชิงเส้น โดยมีเงื่อนไขการทำงานค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้วงจรเรซแนนซ์ RLC เป็นวงจรเทียบเท่าชุดแมกนีตรอน โดยกำหนดให้วงจร RLC แทนห้องคลื่นเรโซแนนซ์ (Cavity) ซึ่งวงจร RLC มีส่วนประกอบดังนี้ ค่า Inductance (L) และค่า Capacitance (C) แทนที่ด้วย Resonant cavity ส่วนค่า R คือ ค่าที่มีผลต่อวงจรโดยจะมีการต่อกับโหลดภายนอก ค่า C_2 คือ ค่า Capacitance ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด ซึ่งจากการพิจารณาวงจร RLC พบว่า กระแสแอโนดเป็นแหล่งกระแสที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นผู้วิจัยได้พิจารณากฎของ Child's Law และใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับที่ 3 ในการนำเสนอระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และใช้กฎพื้นฐานของ Kirchoff's Law ในการแก้สมการ เพื่อให้ได้สมการอนุพันธ์อันดับที่ 3 ที่อยู่ในเทอมของแรงดัน ผลการทดสอบ แมกนีตรอนย่าน X-Band ผู้วิจัยมีวิธีทดสอบอยู่ 2 แบบ คือ การควบคุมกระแส และการควบคุมค่าความต้านทานในระดับที่แตกต่างกัน แล้วนำค่าไปพล็อตกราฟ เพื่อหาระดับที่ระบบ มีลักษณะการเกิด Chaotic หรือค่าสเปกตรัมที่วัดมีค่าไม่คงที่หรือมีการกระเพื่อม นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ สรุปว่า สมการ โมเดล

อนุพันธ์อันดับที่ 3 สามารถนำไปใช้กับระบบแมกนีตรอนที่ไม่เชิงเส้น และการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ตัวควบคุมวงจรเทียบเท่า เช่นเปลี่ยนโมเดลและกระแสแหล่งจ่าย แสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบหรือมีอิทธิพลต่อระบบ (Daohui Li และคณะ, 2009)

ศึกษาการออกแบบแมกนีตรอนที่มีรูปแบบของบล็อกลูกแอโนดเป็นแบบ Hole-Slot-Type และมีห้องคลื่น (Cavity) จำนวน 8 ห้องคลื่น โดยในงานวิจัยนี้มีการพิจารณาหลักการทำงานของชิ้นส่วนที่สำคัญของแมกนีตรอนประกอบด้วย ขั้วแคโทด ระบบเรโซแนนซ์ พื้นที่ที่เกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction space) และวงจรแม่เหล็ก รวมไปถึง การพิจารณาในส่วนของรูปร่าง และขนาดของอุปกรณ์ วงจรไฟฟ้า พารามิเตอร์ที่สำคัญที่ได้มาจากการทดลอง และการกำหนดค่าเริ่มต้นเป็นต้น นอกจากนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรม CST particle studio ในการจำลองการทำงานของแมกนีตรอนในรูปแบบสามมิติ และทำการคำนวณค่าแรงดันสูงสุด และค่าแรงดันต่ำสุด ในการออกแบบค่าแรงดันแหล่งจ่าย ให้เหมาะสมกับขอบเขตการทำงานของแมกนีตรอน ผลการจำลอง ได้ระบุว่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการทำงานของแมกนีตรอน คือ ขนาดรัศมีโพรงห้องคลื่น ช่วงว่างและความกว้างของ Gap แต่ละห้องคลื่น (Turker Isenlik และคณะ, 2013)

ศึกษาวิธีการหาวงจรเทียบเท่าของระบบเรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนที่มีรูปแบบของบล็อกลูกแอโนดเป็นแบบ Sector-and-Slot ซึ่งในงานวิจัยจะแสดงถึงการคำนวณค่า Capacitance และ Inductance รวม ของวงจรเทียบเท่าแมกนีตรอน และทำการหาสมการการคำนวณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ ของแต่ละโหมดการทำงานของแมกนีตรอน โดยพิจารณาจากโครงสร้างของบล็อกลูกแอโนดและขนาดของแมกนีตรอนเป็นหลัก และนอกจากนั้นผู้วิจัยได้ทำการจำลองผลด้วยโปรแกรม CST simulation เพื่อทำการคำนวณหาค่า สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในตัวแมกนีตรอน และทำการเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากวงจรเทียบเท่า ผลที่ได้พบว่ามี ความผิดพลาดประมาณ 15% ยิ่งโหมดที่ใช้งานสูงขึ้น ความผิดพลาดก็จะน้อยลง (Song Yue และคณะ, 2014)

ศึกษาเงื่อนไขของ Buneman-Hartree ที่มีการพิสูจน์มาจาก แบบจำลองการไหลของ Brillouin โดยเงื่อนไขดังกล่าวจะช่วยให้มีความเหมาะสมกับการออกแบบและคำนวณ เงื่อนไขการทำงานของแมกนีตรอนให้สามารถทำงานได้หลากหลายคลื่นความถี่ ซึ่งผลจากการใช้เงื่อนไขของ Buneman-Hartree ในแมกนีตรอนทรงกระบอก พบว่า การเกิดการสั้นพ้องจะเกิดขึ้นอยู่ระหว่างเส้นโค้งของเงื่อนไข Hull cut-off และ เส้นเงื่อนไข Buneman-Hartree เท่านั้น ส่วนภายนอกเส้นทั้งสองจะเป็นส่วนที่การทำงานของแมกนีตรอนไม่เพียงพอที่จะเกิดกาสั้นพ้องได้ (David H.Simon และคณะ, 2010)

ออกแบบการควบคุมแมกนีตรอนที่ความถี่เรโซแนนซ์ ย่าน X-band 9.3 GHz สำหรับระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นสำหรับทางการแพทย์ โดยงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้เลือกวิธีการวิเคราะห์

สมรรถนะการทำงานของแมกนีตรอน โดยใช้โปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิค Particle-In-Cell simulation ซึ่งแมกนีตรอนที่เลือกใช้งาน คือ แมกนีตรอน ชนิด Sector-and-Slot ที่มีโพลงห้องคลื่นจำนวน 40 ห้อง ซึ่งผลการจำลองด้วยโปรแกรม เมื่อกำหนดค่าแหล่งจ่ายแรงดันที่ 36 kV และสนามแม่เหล็ก 0.59 T ระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดพบว่ามีการทำงานที่มีเสถียรภาพในโหมคพายที่มีรูปแบบการรวมตัวของกลุ่มก้อนอิเล็กตรอนที่หมุนรอบแกนแคโทด ด้วยจำนวน 20-electron spokes นอกจากนี้ได้พิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งสามารถปรับจูน ความถี่ ได้ที่ 1.5 MHz/ μm . และมีแบนด์วิทของความถี่เรโซแนนซ์อยู่ที่ 60 MHz (Jeong-Hun Lee และคณะ, 2019)

2.3.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ

ออกแบบระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ (AFC) สำหรับควบคุมท่อเร่งชนิด X-Band 9,300 MHz ขนาด 6 MeV โดยสถาบัน KAERI สำหรับทางการแพทย์ในโรงพยาบาล ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิคของการออกแบบพื้นฐานบนแนวคิดของแบบจำลอง แบบเฟสล็อกลูป (Phase-Locked Loop, PLL) ที่เป็นแนวคิด โดยวิธีการเปรียบเทียบเฟสของความถี่ทางด้านขาออก กับเฟสของความถี่อ้างอิง ซึ่งวิธีนี้มีองค์ประกอบที่สำคัญอยู่ 3 ส่วน คือ การตรวจจับเฟส หรือ เปรียบเทียบสัญญาณ (Phase Detector or Comparator) การกรองความถี่ต่ำผ่านหรือกรองความถี่สูง (Low-pass filter or Loop filter) และการกำเนิดสัญญาณด้วยการควบคุมแรงดัน (Voltage Controlled Oscillator, VCO) เพื่อให้สามารถนำวิธีการ PLL ไปประยุกต์กับการปรับจูนตำแหน่งของแมกนีตรอน สำหรับการปรับจูนความถี่เรโซแนนซ์ที่ความถี่ $9,312 \pm 25$ MHz ผ่านระบบขับเคลื่อนเพลาด้วยมอเตอร์ชนิดสเต็ปป์ที่มีความละเอียดสามารถปรับความถี่ได้ 5 MHz ต่อ 1 รอบ หรือ 500 Step ต่อ 1 รอบ ผลที่ได้จากการทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบการควบคุมความถี่จะเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ที่สำคัญและจำเป็นต่อระบบการเร่งพลังงานอิเล็กตรอนในท่อเร่งที่ทำให้ความถี่ RF ในส่วนของชุดแหล่งจ่ายความถี่ (Magnetron Source) และ โครงสร้างท่อเร่ง (Accelerator Structure) มีความเข้ากันได้ได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้การทำงานมีเสถียรภาพและมีประสิทธิภาพสูงสุด (Sungsu cha และคณะ, 2017)

พัฒนาระบบวัดคลื่นความถี่วิทยุของแมกนีตรอนในขณะการใช้งานเครื่องเร่งอนุภาค เพื่อให้มีการเร่งพลังงานได้อย่างมีเสถียรภาพ ซึ่งผู้วิจัยได้ระบุปัจจัยที่สำคัญมากสำหรับการทำงานของเครื่องเร่งให้ทำงานอย่างต่อเนื่องอยู่ 2 ปัจจัย คือ การที่ไม่ทราบค่าความถี่ RF ของแมกนีตรอน ก็จะทำให้ไม่ทราบค่าปริมาณการปรับความถี่และพลังงาน RF ที่เหมาะสมกับการจ่ายให้กับโครงสร้างท่อเร่งและปัจจัยถึงการตั้งค่าอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นของแม่เหล็กไฟฟ้า และการปรับจูนความถี่ของแมกนีตรอนที่สามารถดำเนินการนำค่าความถี่ไปเป็นข้อมูลอ้างอิง ในองค์ประกอบของการเร่งพลังงานอิเล็กตรอน ซึ่งปริมาตรของโครงสร้างท่อเร่งอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม ทำให้ความถี่เรโซแนนซ์ของโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลง และ

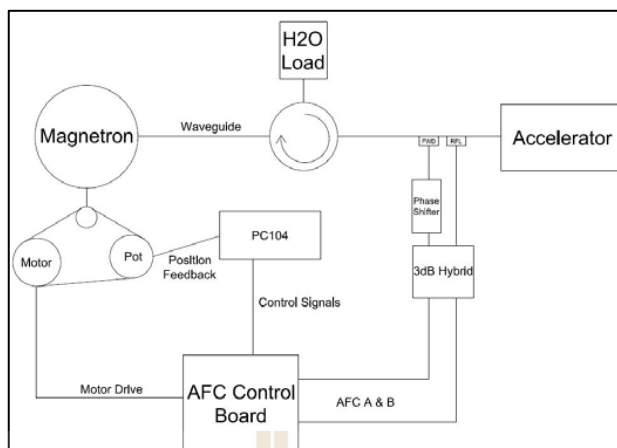
เมื่อความถี่เรโซแนนซ์เปลี่ยนเอาต์พุตของระบบก็จะไม่เสถียรและได้รับพลังงานแสงที่ต่ำ ดังนั้นจะต้องมีการพัฒนาอุปกรณ์วัดความถี่แมกนีตรอนเพื่อให้ระบบการเร่งพลังงานมีความเสถียร ซึ่งผลจากการพัฒนาระบบวัด ผู้วิจัยสามารถมีระบบวัดความถี่ ที่มีความแม่นยำสูงถึง 100 kHz ที่สามารถจัดการในส่วนของความถี่ให้มีความเหมาะสมกับท่อเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน (Sungsu Cha และคณะ, 2015)

ศึกษาการพัฒนาาระบบเครื่องเร่งอนุภาคในรูปแบบ Compact ที่ใช้ความถี่ในย่าน X-Band (9.3 GHz) ที่มีพลังงานของแสงอิเล็กตรอนสูงสุด 6 MeV สำหรับการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ ซึ่งในงานวิจัยได้อธิบายถึงสถานะการพัฒนาเครื่องเร่งฯ ซึ่งเนื้อหาที่สำคัญจะเป็นส่วนของการออกแบบระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ (AFC) ในระหว่างการทำงานของท่อเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งในระหว่างการทำงานของท่อเร่ง ความถี่เรโซแนนซ์จะมีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการกระจายของพลังงานบนผนังของโพรงห้องคลื่น โดยระบบ AFC จะเป็นอุปกรณ์ที่ทำการปรับจูนความถี่โดยอัตโนมัติระหว่างแหล่งจ่าย RF และ RF ของห้องคลื่น (RF cavity) ดังนั้นทำให้ท่อเร่งมีการผลิตลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความเสถียรภาพ ซึ่งหลักการของการวัดสัญญาณความถี่ ผู้วิจัยได้ทำการวัดและเปรียบเทียบกำลังไฟฟ้า RF ที่ไปข้างหน้า และย้อนกลับของระบบแหล่งจ่าย RF จากนั้นทำการสร้างและตั้งสัญญาณไปยังส่วนการปรับแต่งเชิงกลโดยใช้ระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า (B.N. Lee และคณะ, 2014)

ศึกษาระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ (AFC) ในเครื่องเร่งอนุภาคที่ใช้ในทางการแพทย์ (Linear Accelerator for Radiotherapy) โดยใช้แหล่งจ่ายกำเนิดความถี่ 2997.92 MHz (S-band) จากตัว Klystron ขนาด 10 MW ไปเร่งพลังงานอิเล็กตรอนของโครงสร้างท่อเร่งให้มีพลังงานแสงรวม (Beam energy) ที่ 150 MeV ซึ่งการวิจัยได้ประยุกต์ใช้ระบบ AFC ในการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของความถี่อื่น เนื่องมาจากรบกวนของ การเปลี่ยนแปลง ความร้อน และการสร้างสัญญาณความถี่ผิดพลาด เพื่อนำค่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไปคำนวณหาค่าสัญญาณพัลส์ในการปรับจูนมอเตอร์ต่อไป และในส่วนของการใช้งานระบบ AFC ผู้วิจัยได้เลือกใช้โมดูล AFC ของบริษัท AFT Microwave ในการสร้าง แอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ขาเข้าและกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อกำจัดสิ่งรบกวน นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้พูดถึงข้อเสียของการใช้โมดูล AFC ว่าควรทำการจัดเตรียมอุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติม เพื่อทำการขยายขนาดของสัญญาณด้วย ซึ่งผลการทดลองจากการใช้โมดูล AFC พบว่าสัญญาณที่ผ่านชุดโมดูล มีความนิ่งและคงที่ได้ดีกว่าระบบที่ไม่มีการใช้ชุดโมดูล AFC (G. Bazzano และคณะ, 2018)

การออกแบบระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ (AFC system) ของระบบแมกนีตรอนย่าน X-Band ที่มีกำลังขาออก RF สูงสุดที่ 350 kW และสามารถปรับเฟลา (Turning shaft) ของแมกนีตรอน ที่ 0.1% Duty cycle เพื่อแก้ไขปัญหาการปรับจูนหรือสอบเทียบค่าความเข้ากันได้

ระหว่างชุดแมกนีตรอนและชุดท่อเร่งอิเล็กตรอน โดยจะต้องมีการปรับจูนให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) ในท่อเร่งอิเล็กตรอน ซึ่งการปรับจูนตำแหน่งแมกนีตรอน ผู้วิจัยได้พบปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดสอบระบบ คือ ผู้วิจัยไม่สามารถที่จะทำการปรับจูนตำแหน่งของแมกนีตรอนได้อย่างเต็มรูปแบบ เมื่อเครื่องมือถูกใช้ในเงื่อนไขการทำงาน (Beam on) เนื่องจาก ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้ในบริเวณที่มีรังสี ดังนั้นแก้ไขโดยการปรับจูนสัญญาณผ่าน โปรแกรม GUI ที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นผ่านตัวคอมพิวเตอร์ระบบควบคุมกลางที่สามารถเข้าถึงจากระยะไกลหรือระยะที่ปลอดภัยได้ ด้วยการเชื่อมต่อผ่านระบบเครือข่าย Ethernet ประเด็นต่อไป คือ ปัญหาของมอเตอร์กระแสตรงที่ขับเคลื่อนด้วยความกว้างพัลส์แบบ H-Bridge พบว่า มีสัญญาณความผิดพลาด (Error signal) เกิดขึ้นในการเคลื่อนที่มอเตอร์แต่ละครั้ง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ชุดควบคุมมอเตอร์พยายามขับเคลื่อนมอเตอร์อีกครั้ง เมื่อสัญญาณความผิดพลาดที่จะนำไปควบคุม มีค่าไม่เพียงพอต่อการขับเคลื่อนส่วนของโรเตอร์ในชุดมอเตอร์ในชั่วถัดไปได้จะเป็นสาเหตุทำให้มอเตอร์เกิดการกระตุก (Twitches) และมีผลต่อประสิทธิภาพของความละเอียดหรือความไว ต่อการปรับจูนชุดแมกนีตรอน ผู้วิจัยได้ทำการแก้ไข โดยเปลี่ยนชุดระบบขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบสแต็ปปีงมอเตอร์ เพื่อกำจัดในส่วนของการคาดเดาจากชุดตัวควบคุมมอเตอร์ และความเข้ากันของสัญญาณแบบ H-Bridge สำหรับการอ่านค่าตำแหน่งมอเตอร์ ผู้วิจัยทำการกำหนดตำแหน่งมอเตอร์ด้วยการนับพัลส์ของสัญญาณจากบอร์ดควบคุม แทนการอ่านค่าสัญญาณป้อนกลับจากชุด Potentiometer และประเด็นสุดท้าย คือ การทำให้สัญญาณ AFC ปราศจากสัญญาณรบกวน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญต่อประสิทธิภาพการควบคุมความถี่อัตโนมัติ โดยผู้วิจัยได้ออกแบบบอร์ดเก็บข้อมูล DAQ ที่แปลงสัญญาณรูปแบบดิจิทัลให้มีความใกล้เคียงกับแหล่งของสัญญาณมากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และส่งสัญญาณเหล่านั้นไปยังแผงควบคุมผ่านพอร์ต I2C บัส โดยส่งสัญญาณที่เป็นรูปแบบ LVDS (Low-voltage differential signal) ผ่านสายเคเบิลแบบ Ethernet ที่ด้านสัญญาณรบกวน



รูปที่ 2.3 แผนภาพระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ

จากบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.3 ระบบควบคุมสัญญาณ AFC-A และ AFC-B ต้องอาศัยสัญญาณป้อนกลับหรือสัญญาณ RF ที่ดึงมากจากชุด directional coupler ที่ติดตั้งอยู่ในส่วนท่อนำคลื่น ซึ่งชุด Directional coupler จะให้สัญญาณที่เป็นกำลังไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า (FWD) และกำลังสัญญาณแบบสะท้อนกลับ (REFL) โดยที่สัญญาณแบบไปข้างหน้า จะถูกนำเข้าสู่วงจร Phase shifter จากนั้นเข้าสู่ชุด 3-dB Hybrid พร้อมกับสัญญาณ REFL เพื่อทำการลดกำลังลงสองเท่า และชุด 3-dB hybrid จะทำหน้าที่สร้าง แอมพลิจูดของสองสัญญาณขาออก โดยมีสัดส่วนมาจากความต่างเฟสของสองสัญญาณความถี่ขาเข้า และไหลเข้าสู่ RF diode ที่อยู่ในตัววงจร เพื่อทำการ Rectify คลื่นความถี่ เพื่อสร้างเป็นรูปสัญญาณแบบพัลส์ (John C. Tuner, 2012)

2.3.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมพีซีซี

ศึกษาและออกแบบตัวควบคุมพีซีซีลอจิก ที่เป็นการควบคุมค่าพารามิเตอร์เชิงปรับตัว (Parameter Adaptive Control) ซึ่งในงานวิจัย ผู้วิจัยได้ออกแบบวิธีการดังกล่าวเพื่อนำระบบตัวควบคุมแบบพีซีซีร่วมกับชุดควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อชดเชยระบบควบคุมระดับของเหลวในแท็งก์น้ำคู่ ซึ่งวิธีการออกแบบ ผู้วิจัยได้ออกแบบตัวควบคุมพีซีซี ที่มีการระบุและปรับแต่งแบบจำลอง โดยใช้ค่าเอาต์พุตจริงของระบบและค่าอินพุตเป็นตัวกำหนดแบบจำลอง ซึ่งในรายงานฉบับนี้มีการปรับแต่งโมเดลโดยใช้วิธีอัลกอริทึมแบบ “Recursive Least Square algorithm (RLS)” ที่เป็นการออกแบบระบบที่มีรูปแบบที่มีการทำงานซ้ำ ๆ และมีแบบจำลองที่ไม่แน่นอนหรือเป็นระบบที่คลุมเครือ ซึ่งการรบกวนระบบจากภายนอก ก็ไม่สามารถที่จะระบุหรือกำหนดได้ ดังนั้นการออกแบบตัวควบคุมด้วยพีซีซี จึงเหมาะกับการควบคุมดังกล่าว โดยผลการทดลองการควบคุมระดับน้ำเฉพาะแท็งค์ด้านบน เมื่อมีการป้อนสัญญาณแบบ Step ร่วมกับสัญญาณที่เป็นแบบสี่เหลี่ยม (Square wave) เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของชุดควบคุม

ที่เป็นแบบ Adaptive Fuzzy Control (AFC) และ PI control พบว่าเมื่อป้อนสัญญาณเข้าสู่ระบบ บิมน้ำเข้าสู่แท้งที่ 1 มีการปรับสัญญาณที่เป็นรูปสี่เหลี่ยม ช่วงวินาทีที่ 20 และ 30 พบว่า ผลตอบสนองของระบบ AFC มีผลตอบสนองที่รวดเร็วกว่า โดยไม่มี overshoot และประสิทธิภาพ การ Tracking ได้ดีกว่าการควบคุมแบบ PI control และเมื่อมีการปรับแต่งสัญญาณระบบจะมี ผลตอบสนองที่ลู่เข้าสู่จุดอ้างอิงได้เอง ตามที่กำหนดไว้ เมื่อมีสัญญาณรบกวนเข้าสู่ระบบ การควบคุมแบบ AFC จะเพิ่มแรงดันเพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนอย่างรวดเร็ว โดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ ความผิดพลาด เล็กน้อยกว่าการควบคุมแบบ PI โดยมีค่าความผิดพลาดอยู่ที่ 2.92 % ส่วนการควบคุม แบบ PI มีความผิดพลาดอยู่ที่ 14.3% (Abdullah Basci และคณะ, 2016)

การออกแบบระบบควบคุมแบบฟัซซีบนโปรแกรม LabVIEW เพื่อใช้งานกับ ระบบ Shell and Tube Heat Exchanger (STHE) ซึ่งในงานวิจัยมีขั้นตอนและวิธีการทดสอบ โดยผู้วิจัยออกแบบตัวจำลองของระบบเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรก ผู้วิจัยได้นำแบบจำลอง First order plus time delay (FOPDT) มาทำการจำลองผ่านโปรแกรม แบบระบบวงเปิด และส่วนที่ 2 คือ หาแบบจำลองโดยใช้เทคนิคการควบคุมแบบฟัซซีบนโปรแกรม LabVIEW ซึ่งการควบคุมแบบ ฟัซซีจะเป็นระบบที่ทำการปรับพารามิเตอร์ของแบบจำลอง โดยผู้วิจัยต้องมีการแปลงจากภาษา มนุษย์เป็นภาษาของฟัซซีหรือแปลภาษาให้เป็นกฎ “IF-THEN” ซึ่งการออกแบบระบบงานวิจัยนี้ เป็นระบบที่มีอินพุต 2 ตัว (Multi-input) คือ ค่าความผิดพลาดของตัววัดเทียบกับจุดอ้างอิงและอัตรา การเปลี่ยนแปลงค่าความผิดพลาด ในส่วนค่าเอาต์พุตระบบนี้มี 1 ตัว (Single-output) คือ ค่าที่ ผู้วิจัยนำไปควบคุมระบบสำหรับค่าเอาต์พุตของระบบผู้ใช้ได้ทำการดีฟัซซีจากกฎที่อนุมานไว้ โดยใช้อัลกอริทึมวิธีของ Mamdani ผลที่ได้จากการทดลองผู้ใช้ได้มีการเปรียบเทียบผลการทดลอง ระหว่าง การควบคุมแบบฟัซซีกับระบบการควบคุมที่เป็นที่นิยม คือ การควบคุมแบบพีไอดี พบว่า ระบบควบคุมที่เป็นแบบฟัซซีมีการตอบสนองในส่วนของช่วงเวลาเข้าที่ไ้รวดเร็วกว่า และค่าพุงเกินน้อยกว่าการควบคุมแบบพีไอดี สรุปได้ว่าจากผลการทดลอง แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพการควบคุมที่เป็นแบบฟัซซีมีประสิทธิภาพของการตอบสนองความสามารถ การติดตามจุดอ้างอิงได้ดีกว่าการควบคุมแบบพีไอดี (Rajarshi Paul และคณะ, 2015)

ศึกษาการทำงานของระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ การควบคุมเครื่องอนุภาคเชิงเส้นสำหรับบำบัดมะเร็ง โดยใช้หลักการวิเคราะห์โครงสร้างทาง กายภาพของแมกนีตรอน ภายใต้ความถี่ที่ต้องการร่วมกับเงื่อนไขการทำงานของแมกนีตรอน ในโหมดพลาสมาที่กำหนดขอบเขตการเกิดออสซิลเลชันด้วยเงื่อนไขของจุดตัดผ่าน และเงื่อนไขของ ฮาร์โมนิก จากนั้นใช้ค่าที่ออกแบบทั้งสองไปควบคุมแหล่งจ่ายแมกนีตรอน เพื่อสร้างคลื่นความถี่วิทยุ ไปยังท่อเร่งอนุภาคเชิงเส้น สำหรับการสร้างปริมาณรังสีเอ็กซ์และออกแบบตัวควบคุมฟัซซี ด้วยวิธีอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เพื่อรักษาระดับปริมาณรังสีเอ็กซ์ให้คงที่และต่อเนื่อง แม้ว่า

จะมีสิ่งรบกวนภายนอก เช่น อุณหภูมิและความดันบรรยากาศที่ผิดปกติ เป็นต้น (Nattawat Yachum และคณะ, 2019)

นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมต่าง ๆ เพื่อเปรียบเทียบถึงประสิทธิภาพของการควบคุมความเร็วรอบของมอเตอร์แบบไร้แปลงถ่าน ซึ่งการออกแบบตัวควบคุมที่วิเคราะห์ประกอบด้วย Fuzzy PID Controller และ Adaptive Fuzzy PID Controller โดยใช้รูปแบบโมเดลของมอเตอร์บน Simulink ของโปรแกรมเม็ทแล็บ ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบผู้วิจัยได้ออกแบบกฎของสมาชิกฟัซซีด้วยรูปแบบฟังก์ชันที่เป็นรูปสามเหลี่ยม สำหรับสัญญาณอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งผลการจำลองด้วยโปรแกรมเปรียบเทียบและเงื่อนไขของการออกแบบฟัซซีที่ใช้วิธีการอนุมานของ Mamdani พบว่า การออกแบบตัวควบคุมที่เป็น Adaptive Fuzzy PID มีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการออกแบบตัวควบคุม Fuzzy PID Controller และผลการทดสอบ เมื่อเปลี่ยนแปลงโหลด พบว่าการออกแบบตัวควบคุม Adaptive Fuzzy PID Controller มีลักษณะผลตอบสนองที่มีการฟุ้งเกินน้อย การตอบสนองรวดเร็วและเสถียรภาพที่ดีกว่า (P. Hari Krishnan และคณะ, 2014)

2.4 สรุป

จากปริทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องได้นำเสนอหลักการ วิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ จากการวัดขนาดโครงสร้างทางกายภาพของอุปกรณ์ โดยใช้เครื่องมือวัดพิกัดสามมิติที่มีคุณสมบัติการวัดอย่างละเอียดและมีค่าความความถี่ที่น้อยและยอมรับได้ จากการศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของแมกนีตรอนจะอาศัยการวิเคราะห์โครงสร้างภายใน ซึ่งมีผลต่อการสร้างความถี่เรโซแนนซ์เพื่อไปควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์การทำงานของแมกนีตรอน เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ตามที่ต้องการจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ

1. ศึกษาทฤษฎีของการเคลื่อนของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้อุปกรณ์ที่เป็นสุญญากาศ เพื่อหาค่าแรงดันแหล่งจ่ายและสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม สำหรับการควบคุมแมกนีตรอนให้ทำงานอยู่ในโหมดพาย

2. ศึกษาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแมกนีตรอน เพื่อประมาณความถี่เรโซแนนซ์ โดยแบ่งประเภทของการศึกษาแบบจำลอง 2 ส่วน คือ ศึกษาแบบจำลองของวงจรรเรโซแนนซ์แบบขนาน และศึกษาแบบจำลองรูปแบบโมเดลสามมิติ โดยใช้ขนาดของรูปทรงเรขาคณิตที่แม่นยำแล้วจำลองผลบนโปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell

3. ศึกษาการทำงานการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนด้วยผลจากข้อที่ 1 เพื่อควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นให้ผลิตรังสีเอ็กซ์อย่างต่อเนื่อง และทนทานต่อการรบกวนจากปัจจัยภายนอกและชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงของโหลดด้วยการศึกษา

การออกแบบตัวควบคุมพีชชีร่วมกับวิธีการอนุมานของ Takagi-Sugeno เพื่อควบคุมสปีดปิ้งมอเตอร์ ในการปรับจูนตำแหน่งพื้นที่โพลของห้องคลื่นให้คงความถี่ที่ต้องการไว้อยู่ตลอดเวลา



บทที่ 3

แหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุ

3.1 บทนำ

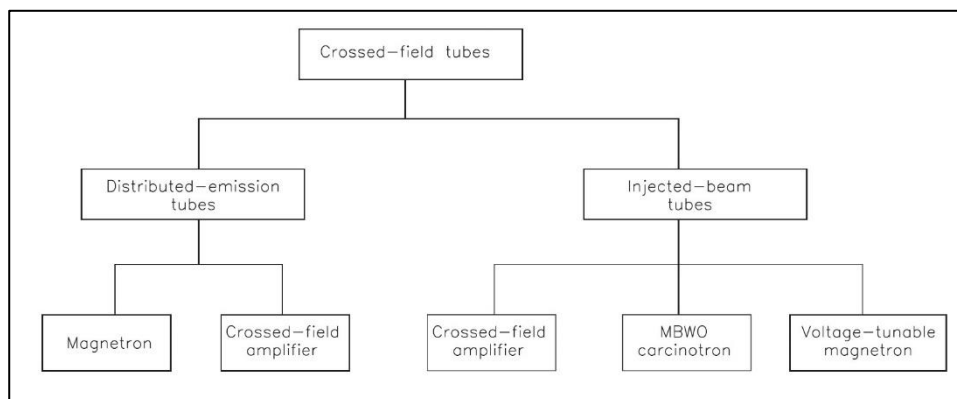
ในบทนี้จะกล่าวถึงชนิดของอุปกรณ์สร้างคลื่นความถี่วิทยุ การประยุกต์ใช้งาน การออกแบบจำลองการเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์จุดการทำงานของชุดแหล่งกำเนิดคลื่นความถี่วิทยุหรือแมกนีตรอนที่ใช้ในงานวิจัยชนิด Twelve-Hole-Slot ในโหมดที่โคคเค้นที่สุด โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ด้วยเทคนิควิศวกรรมย้อนรอย ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์หลักการทำงานของแมกนีตรอนจะวิเคราะห์ในรูปแบบที่อ้างอิงจากอุปกรณ์จริงที่จำเป็นต้องทราบถึงขนาดตัวแปรของรูปทรงเรขาคณิตของโครงสร้างภายในที่มีความละเอียดและแม่นยำร่วมกับการเขียนแบบโมเดลสามมิติ ซึ่งการวิเคราะห์การทำงานของแมกนีตรอน เพื่อให้ได้ผลความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการจะพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ส่วนของการวิเคราะห์ คือ การวิเคราะห์ผลความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนานและแบบจำลองสามมิติด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell simulation บนโปรแกรม CST particle studio ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการใช้เทคนิคของวิศวกรรมย้อนรอย โดยการใช้ขนาดรูปทรงเรขาคณิตมาพิจารณาร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาขนาดของตัวแปรที่เหมาะสมที่สุดกับการทำงานของแมกนีตรอนให้มีประสิทธิภาพ และนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของแมกนีตรอน ที่มีผลต่อการสร้างความถี่เรโซแนนซ์และการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นต่อไป

3.2 แมกนีตรอน

แมกนีตรอนมีการประยุกต์ใช้เพื่อการพัฒนาที่ครอบคลุมได้หลากหลายย่านความถี่ โดยแมกนีตรอนแบบพัลส์ (Pulse Magnetron) ได้รับการพัฒนา ที่ครอบคลุมช่วงย่านความถี่จากย่านความถี่ต่ำ UHF ถึง 100 GHz การใช้งานกำลังไฟฟ้าสูงสุดเริ่มต้นจากไม่กี่ kW ไปสู่ระดับ MW ซึ่งประสิทธิภาพโดยรวมทั่วไปการใช้งานอยู่ที่ 30 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานและความถี่ในการใช้งานสำหรับแมกนีตรอนที่ทำงานแบบต่อเนื่อง (Continuous-wave Magnetron) ยังได้รับการพัฒนาในระดับที่กัลังวัตต์ 100 วัตต์ ในหลอดที่ปรับได้ และสูงถึง 25 kW หรือมากกว่า ในอุปกรณ์ที่มีความถี่สูงที่ โดยช่วงประสิทธิภาพการใช้งานมีตั้งแต่ 30 เปอร์เซ็นต์ถึงมากถึง 70 เปอร์เซ็นต์

3.2.1 หลอดไมโครเวฟ (Microwave power Tubes)

หลอดคลื่นความถี่กำลังไมโครเวฟ มีการประยุกต์ใช้งานได้หลายหลายย่านความถี่ ซึ่งความถี่ที่ใช้งานจะอยู่ในช่วงขอบเขตของ 300 MHz ถึง 300 GHz โดยมีกำลังขาออกอยู่ที่ 200 - 300 วัตต์ ไปจนถึงมากกว่า 10 MW ซึ่งการนำไปใช้งานอุปกรณ์มีตั้งแต่ที่คุ้นเคย เช่น ไมโครเวฟจนถึงเทคโนโลยีสื่อสารดาวเทียม โดยอุปกรณ์ที่รวมอยู่ในหลอดคลื่นพลังงานไมโครเวฟ คือ ไครสตรอน(Klystron) แมกนีตรอน (Magnetron) และทราเวลลิงเวฟทิวป์ (Traveling wave tube) เป็นต้น การใช้งานอุปกรณ์ได้รับการปรับปรุง พัฒนา และออกแบบ เพื่อตอบสนองต่อความต้องการ โดยผู้ผลิตหลอดคลื่นความถี่ไมโครเวฟได้ทำการวิจัยและพัฒนาเพื่อให้ถึงขีดจำกัดของความถี่ การทำงานกำลังสูงและมีประสิทธิภาพ ดังนั้น เทคโนโลยีไมโครเวฟจึงเป็นเทคโนโลยีที่มีส่วนสำคัญในการพัฒนาวงการทางวิทยาศาสตร์ที่มากขึ้น ซึ่งการใช้งานทั่วไปของหลอดไมโครเวฟ ปัจจุบันมีการใช้งาน 2 แบบ คือ หลอดไมโครเวฟแบบลำแสงเชิงเส้น (Linear-beam tube) และหลอดไมโครเวฟครอสฟิลด์ (Crossed-field tubes) โดยที่หลอดแบบลำแสงเชิงเส้น หมายถึง ลำแสงอิเล็กตรอนและองค์ประกอบของวงจรที่มีปฏิสัมพันธ์จัดเรียงตัวเป็นเส้นตรง ซึ่งการจำแนกประเภทของหลอดไมโครเวฟสำหรับหลอดลำแสงเชิงเส้นจะจ่ายแรงดันที่ขั้วบวกในการเร่งอิเล็กตรอนให้ถูกดึงออกมาจากแคโทดเพื่อสร้างลำแสงของพลังงานจลน์ซึ่งพลังศักย์ไฟฟ้าของแหล่งจ่ายจะทำการแปลงเป็นพลังงานจลน์ในลำแสงอิเล็กตรอน ในขณะที่ถูกส่งไปยังวงจรไมโครเวฟพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งที่ถูกส่งไปจะถ่ายโอนไปเป็นพลังงานไมโครเวฟเนื่องจากคลื่นวิทยุ RF ที่ทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ช้าลงหรือถูกหน่วงด้วยสนามไฟฟ้า พลังงานลำแสงที่เหลือจะกระจายไปเป็นความร้อนหรือย้อนกลับไปยังแหล่งจ่ายไฟ เนื่องจากอิเล็กตรอนจะผลัดกันซึ่งกันและกันและมักจะใช้สนามแม่เหล็ก เพื่อรักษาลำแสงอิเล็กตรอนในระหว่างเกิดกระบวนการปฏิสัมพันธ์ (Interaction process) ส่วนหลอดไมโครเวฟครอสฟิลด์ (Crossed-field tubes) เป็นอุปกรณ์หนึ่งที่อยู่ในกลุ่มของหลอดไมโครเวฟชนิดครอสฟิลด์ แม้ว่าลักษณะทางกายภาพจะมีแตกต่างจากหลอดลำแสงแบบเชิงเส้น ซึ่งโดยปกติหลอดแบบครอสฟิลด์จะมีลักษณะเป็นวงกลม และความแตกต่างที่เกิดปฏิสัมพันธ์ที่จะต้องใส่สนามแม่เหล็กกับสนามไฟฟ้าทำมุมกัน 90 องศา โดยหลอดไมโครเวฟชนิดครอสฟิลด์จะมีการใช้งานสนามแม่เหล็กอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างจากหลอดลำแสงแบบเชิงเส้นจะต้องการสนามแม่เหล็กเพื่อรักษาดำแหน่งของลำแสงในบางครั้ง



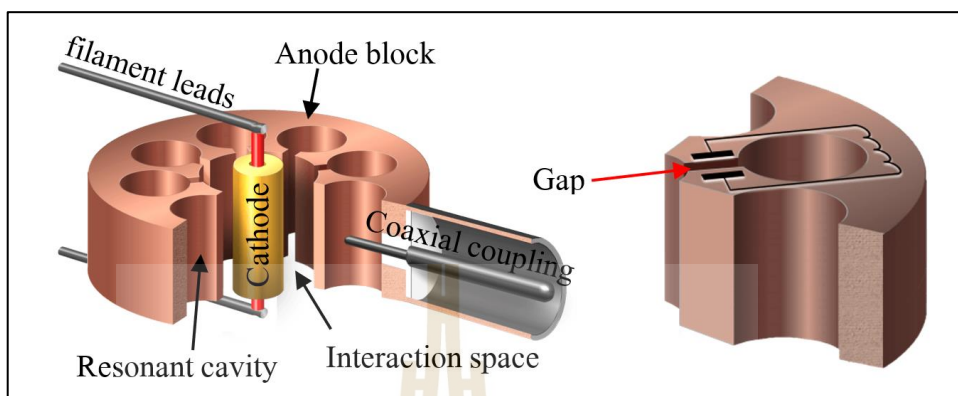
รูปที่ 3.1 ชนิดของหลอดไมโครเวฟแบบครอสฟิลด์

จากรูป 3.1 หลอดไมโครเวฟแบบครอสฟิลด์เป็นอุปกรณ์ที่แปลงไฟฟ้ากระแสตรง (DC) เป็นพลังงานไมโครเวฟ โดยใช้กระบวนการเปลี่ยนแปลงรูปแบบพลังงาน ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้แตกต่างจากหลอดลำแสง ในเรื่องของการทำงานหลัก มากกว่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์ โดยจำกัดความของครอสฟิลด์ (Crossed-field) มาจากลักษณะการทำมุมฉาก (90°) ของสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่จำเป็นสำหรับการโฟกัสแสงในพื้นที่ที่เกิดปฏิสัมพันธ์ (Interaction space) โดยทั่วไปแล้วสนามแม่เหล็กสำหรับการใช้งานกับหลอดไมโครเวฟประเภทนี้ จะใช้แหล่งจ่ายที่เป็นโครงสร้างของแม่เหล็กถาวร เช่น อุปกรณ์ที่เรียกว่า “หลอดชนิด M (M-tubes)” ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้งานในหลอดไมโครเวฟชนิดครอสฟิลด์ จะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ หลอดครอสฟิลด์ชนิดฉีดลำแสง (Injected-beam crossed-field tubes) ที่ใช้หลักการการสร้างกลุ่มอิเล็กตรอนจากปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ที่อยู่ภายนอก และถูกส่งไปยังพื้นที่การปฏิสัมพันธ์ และหลอดไมโครเวฟประเภท Distributed-emission tubes ที่เป็นหลอดชนิดปลดปล่อยกระแสอิเล็กตรอน สำหรับกระบวนการการปฏิสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นโดยตรงภายในพื้นที่การเกิดปฏิสัมพันธ์ จะส่งผลให้อิเล็กตรอนบางตัวถูกผลักไปที่ขั้วลบและชนกับหลอดไมโครเวฟได้

3.2.2 โครงสร้างทางกายภาพของแมกนีตรอน

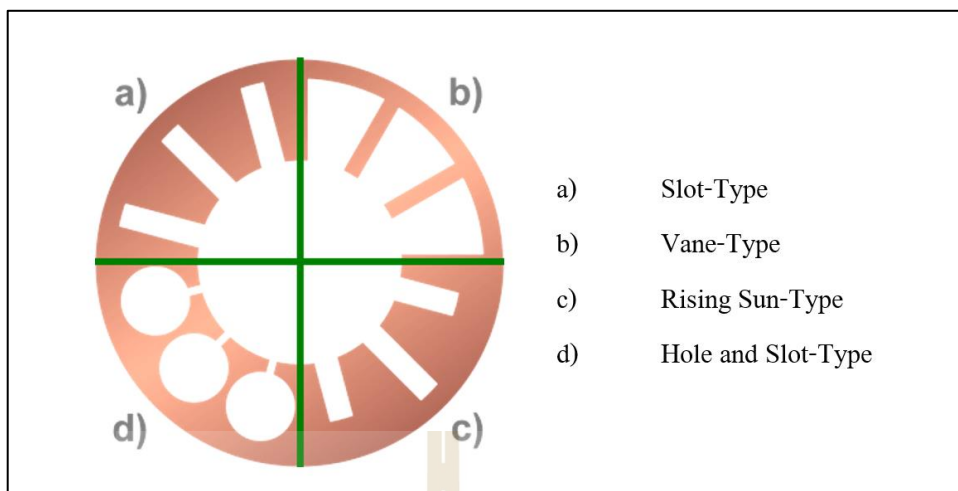
แมกนีตรอนมีโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายไดโอดที่มีทั้งขั้วแอโนดและแคโทด โดยที่ขั้วแอโนดของแมกนีตรอนถูกสร้างเป็นบล็อกรูปทรงกระบอกที่ทำมาจากทองแดง ส่วนขั้วแคโทดและฟิลาเมนต์ (Filament) จะติดตั้งอยู่บริเวณตรงกลางของทรงกระบอก และถูกจ่ายแรงดันที่มาจากแกนของฟิลาเมนต์ ซึ่งแกนฟิลาเมนต์จะมีขนาดใหญ่แข็งแรง ทำให้โครงสร้างของขั้วแคโทดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงไม่มีการเคลื่อนไหว เมื่อขั้วแคโทดถูกเผาด้วยความร้อนด้วยวัสดุที่มีการปลดปล่อยรังสีออกมารอบ ๆ ช่องว่างของทรงกระบอก ที่ปกติจะมีช่องว่าง 8 - 20 ช่อง

โดยจะอยู่รอบ ๆ ขั้วแคโทด เรียกว่า “ห้องคลื่นเรโซแนนซ์ (Resonant cavity)” ซึ่ง Cavity แต่ละห้อง จะมีการทำงานคล้ายกันกับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel resonant circuit) ดังแสดงรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างแมกนีตรอนและห้องคลื่นวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

จากรูปที่ 3.2 ห้องคลื่นวงจรเรโซแนนซ์ ถ้าพิจารณาจากด้านข้างผนังโครงสร้าง Anode เป็นส่วนของ Inductive ส่วนพื้นที่ตรงปลายหรือช่องว่าง (Gap) จะพิจารณาเป็นส่วนของ Capacitor ซึ่งก็จะเทียบเท่ากับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ส่วนความถี่เรโซแนนซ์ถูกกำหนดโดยขนาด (Dimension) ของห้องคลื่น ซึ่งการจ่ายกำลังไฟฟ้าไปกระตุ้นห้องคลื่น 1 ห้อง แล้วห้องคลื่นต่อไปจะทำงานด้วยการลื่นที่มี Phase Delay 180 องศา ซึ่งการเรโซแนนซ์แบบต่อเนื่องจะเป็นแบบ Slow-Wave Structure หรือเรียกอีกอย่างว่า “Multi-cavity travelling-wave magnetron” ขั้วแคโทดของแมกนีตรอนจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านกลไกการถ่ายโอนพลังงานได้ ซึ่งขั้วแคโทดจะติดตั้งอยู่บริเวณตรงกลางของแอโนด โดยมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกกลวงที่เป็นวัสดุที่สามารถกำเนิดแสงได้ (ส่วนใหญ่เป็นวัสดุ Barium Oxide) ด้วยการให้ความร้อนผ่านตัวขดลวดฟิลาเมนต์ที่อยู่ตรงกลางของขั้วแคโทดอีกที ส่วนพื้นที่ช่องว่างระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดจะเรียกว่า “Interaction space” ซึ่งในพื้นที่ว่างนั้นจะเป็นพื้นที่ที่มีสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าทำปฏิกิริยาต่อกันทำให้เกิดแรงไปกระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งสนามแม่เหล็กจะเป็นตัวที่ให้ความเข้มของอิเล็กตรอน โดยแม่เหล็กที่ใช้งานจะเป็นแบบแม่เหล็กถาวรที่ติดตั้งอยู่รอบ ๆ ตัวแมกนีตรอน โดยสนามแม่เหล็กที่ได้จะมีทิศทางที่ขนานกับขั้วแคโทด โดยทั่วไปห้องคลื่นเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) มีการจัดเรียงเป็นแบบแถว ๆ คล้ายรูปดาว ซึ่งมีจำนวนห้องคลื่นเป็นจำนวนเลขคู่ ซึ่งรูปแบบของห้องคลื่นแสดงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 รูปแบบของบล็อกแอโนดในแมกนีตรอน

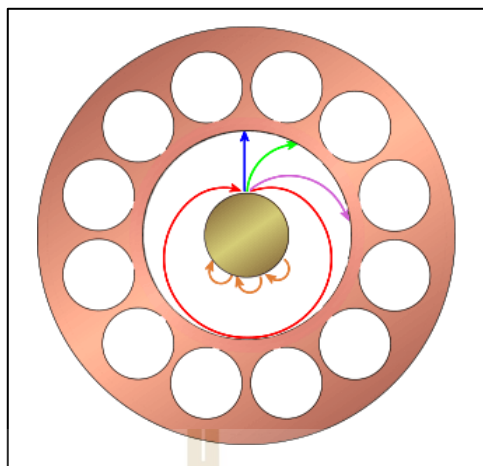
จากรูปที่ 3.3 เป็นรูปแบบของบล็อกแอโนดในตัวแมกนีตรอนที่มีอยู่ 4 รูปแบบ โดยเป็นรูปแบบของ Slot, Hold and Slot และ Rising Sun โดยมีการผลิตมาจากกระบวนการ Hobbing ส่วนชนิดแบบ Vane type สร้างมาจากการใช้วิธีการเชื่อมกับชุดรองรับที่เป็นวงแหวน

3.2.3 หลักการทำงานของแมกนีตรอน

การทำงานของแมกนีตรอนมีลักษณะเป็นการ Modulated velocity เพื่อสร้างความถี่ในย่านไมโครเวฟ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นขั้นตอนการทำงาน 4 ขั้นตอน คือ

1. Generation and acceleration of an electron beam in dc field

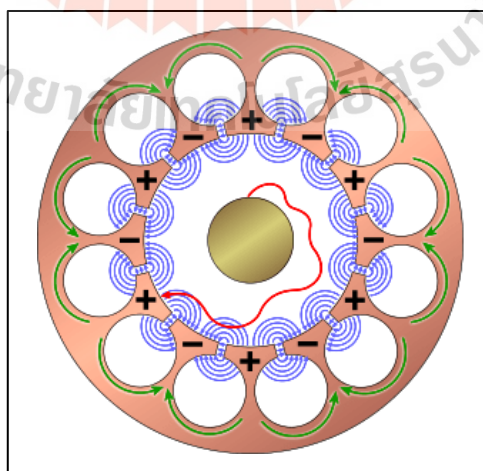
กระบวนการผลิตและเร่งอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้า เนื่องจากขั้วแคโทดรับแรงดันเป็นแบบ Negative ค่าสนามไฟฟ้าสถิตจะอยู่ในทิศทางแนวรัศมีจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทด เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กอยู่ในทิศทางของอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง (รูปที่ 3.4) ซึ่งเมื่อมีสนามแม่เหล็กเกิดขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นโค้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ถ้าความเข้มของสนามแม่เหล็กมีค่ามากจะยิ่งทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งมากขึ้น ในทำนองเดียวกันถ้าความเร็วของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นสนามไฟฟ้ารอบ ๆ ก็จะเพิ่มขึ้นด้วยทำให้เส้นทางของอิเล็กตรอนจะมีการโค้งอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามถ้าสนามไฟฟ้าถึงจุดวิกฤตเส้นทางของอิเล็กตรอนจะถูกเบี่ยงเบนไปจากตัวแอโนดและกระแสก็ลดลงจนมีค่าน้อยมาก และเมื่อสนามที่สร้างขึ้นยังมีค่าสูงจะทำให้กระแสลดลงกลายเป็นศูนย์



รูปที่ 3.4 การเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในแมกนีตรอน

2. Velocity-modulation of the electron beam

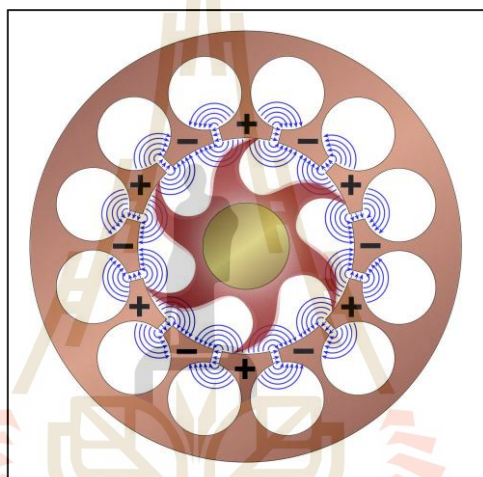
สนามไฟฟ้าที่อยู่ในแมกนีตรอนจะทำการผลิตสนามไฟฟ้า AC และ สนามไฟฟ้า DC โดยสนามไฟฟ้า DC จะขยายรัศมีจากส่วนของขั้วแอโนดที่อยู่ติดกันไปยังขึ้นแคโทด ส่วนสนามไฟฟ้า AC จะแสดงค่าแอมพลิจูดสูงสุด เมื่อเกิดการสลับหรือขึ้นลงของสนามไฟฟ้า AC ระหว่างส่วนที่เป็น Segment ของขั้วแอโนดกับห้องคลื่นเรโซแนนซ์ โดยในรูปที่ 3.5 แสดง สนามไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงที่เกิดขึ้นและมีผลทำให้การเคลื่อนที่อิเล็กตรอนมีทิศทางเปลี่ยนไปจากเดิม



รูปที่ 3.5 สนามไฟฟ้าความถี่สูงที่มีผลต่อทิศทางอิเล็กตรอน

3. รูปแบบการจับเป็นกลุ่มก้อนของอิเล็กตรอน (Space-Charge Wheel)

ด้วยความเร็วที่แตกต่างกันของกลุ่มก้อนอิเล็กตรอนการปรับความเร็วจึงนำไปสู่การปรับความหนาแน่น ดังนั้นการสะสมของอิเล็กตรอนหลาย ๆ ตัว จะย้อนกลับไปท่ขั้วแคโทด ในขณะที่กลุ่มอิเล็กตรอนอื่น ๆ เคลื่อนไปยังขั้วแอโนดในรูปแบบที่คล้ายกับซี่ล้อ (Wheel) ที่เคลื่อนที่เป็นวงล้อ ซึ่งเรียกชื่อว่า “Space-Charge Wheel” ตามที่แสดงในรูปที่ 3.6 โดยวงล้อจะหมุนรอบขั้วแคโทดที่ความเร็วเชิงมุมของ 2 ขั้วแอโนด ต่อรอบของสนามไฟฟ้ากระแสสลับ ซึ่งความสัมพันธ์ของเฟสนี้ช่วยให้อิเล็กตรอนส่งพลังงานอย่างต่อเนื่อง เพื่อรักษาคลื่นวิทยุ RF ที่นำไปใช้งาน



รูปที่ 3.6 การหมุนของกลุ่มก้อนอิเล็กตรอน

4. การจ่ายพลังงานให้กับสนามไฟฟ้ากระแสสลับ (AC field)

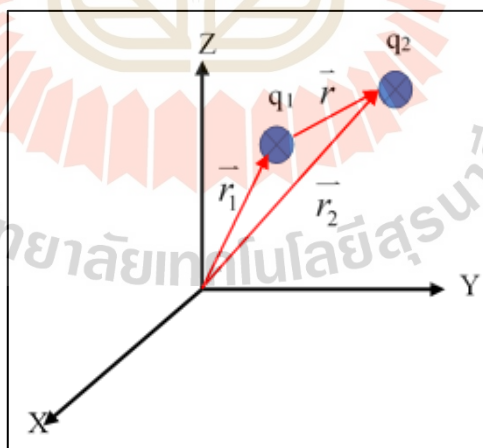
การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในแมกนีตรอนจะมีการเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้า ซึ่งจะถูกรั้งด้วยสนามและรับพลังงานจากสนามไฟฟ้า นอกจากนี้อิเล็กตรอนจะให้พลังงานแก่สนามและมีการเคลื่อนที่ช้าลง ถ้าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนาม อิเล็กตรอนจะใช้พลังงานในแต่ละช่องของห้องคลื่น และเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปถึงขั้วบวกพลังงานก็จะถูกใช้ไป ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงช่วยรักษาการเกิดการสั่น (Oscillations) เนื่องจากใช้พลังงานจากสนามไฟฟ้า DC และส่งไปยังสนามไฟฟ้า AC ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอธิบายเส้นทางการเคลื่อนที่ในรูปที่ 3.4 และการใช้พลังงานอิเล็กตรอน มีประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดถึง 80 เปอร์เซ็นต์

3.2.4 การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนาม

การเกิดปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอน และการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอนถูกระบุว่ามีการเคลื่อนที่อยู่ในสนามสม่ำเสมอ เช่น สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็ก หรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอนในสนามมีความเกี่ยวข้องกับในระบบพิกัดแบบสามมิติ และการแก้ปัญหากรณีส่วนใหญ่จะมีรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสิ่งที่ยากที่มักจะไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอน ในทางกลับกันยังมีอุปกรณ์ไมโครเวฟในปัจจุบันทั้งหมดที่มีการใช้สนามอย่างสม่ำเสมอสำหรับการปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอน ซึ่งพื้นฐานของการทำความเข้าใจของการปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ไมโครเวฟมีลักษณะการเคลื่อนที่ 3 ลักษณะ คือ สนามไฟฟ้า, สนามแม่เหล็ก และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1. การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า (Electron Motion in an electric field)

การปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนและสนามจะมีความเกี่ยวข้องกับกฎทางไฟฟ้าและแม่เหล็ก ซึ่งกฎพื้นฐานของแรงและประจุ คือ กฎของคูลอมบ์ ระบุว่าสถานะระหว่างประจุ 2 ประจุนั้นมีทั้งแรงดึงดูดหรือแรงผลักระหว่างกัน ซึ่งกฎการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า ประกอบด้วย ประจุนิดเดียวกันจะผลักรันและประจุนิดต่างกันจะดึงดูดกันขนาดของแรงที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับผลคูณของประจุทั้งสองและแปรผกผันกับกำลังสองของระยะทางระหว่างประจุและทิศของแรงจะอยู่ในแนวเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างประจุทั้งสอง



รูปที่ 3.7 ระบบพิกัดสามมิติของเส้นทางการเคลื่อนที่ประจุ

จากรูปที่ 3.7 เป็นระยะห่างระหว่างประจุทั้งสองกำหนดระยะทางเป็น $|r|$ เมื่อต้องการหาแรงกระทำบนประจุ q_1 เนื่องจากกฎ q^2 กระทำจากกฎของคูลอมบ์จะได้

$$\vec{F}_{12} = \frac{kq_1q_2\hat{r}}{r^2} \quad \text{เมื่อ } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (3.1)$$

โดยที่ q คือ ประจุในหน่วยคูลอมป์
 ϵ_0 คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ (Permittivity of free space) (8.854×10^{-12} F/m)
 R คือ ระยะห่างระหว่างประจุ (เมตร)
 u คือ Unit vector

และการสร้างสนามไฟฟ้า (Electric Field) สร้างมาจากแรงที่กระทำกับประจุ
 (q) จากสมการที่ 3.2

$$E = \frac{F}{q} \quad (3.2)$$

การกำหนดเส้นทางของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าค่าของแรงจะต้องนำมา
 เกี่ยวข้องกับมวลและการเร่งความเร็วของอิเล็กตรอน โดยกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน

$$\sum F = ma \quad (3.3)$$

การหาเส้นทางของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าแรง (Force) จะมีผลต่อมวล
 และ อัตราเร่งของอิเล็กตรอน โดยอ้างอิงจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน และการเกิดความเข้มของ
 สนามไฟฟ้าที่มาจากแรงที่กระทำกับประจุมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3.4

$$E = \frac{F}{q} \quad \text{หรือ} \quad F = qE \quad (3.4)$$

เมื่อ q เป็นประจุอิเล็กตรอน ดังนั้น

$$F = -eE \quad (3.5)$$

และกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้สมการเป็น

$$F = -eE = ma = m \frac{dv}{dt} \quad (3.6)$$

เมื่อ	m	คือ มวลอิเล็กตรอน (9.109×10^{-31} kg)
	a	คือ ความเร่ง (m/s^2)
	v	คือ ความเร็ว (m/s)
	e	คือ ประจุอิเล็กตรอน (1.602×10^{-19} C)

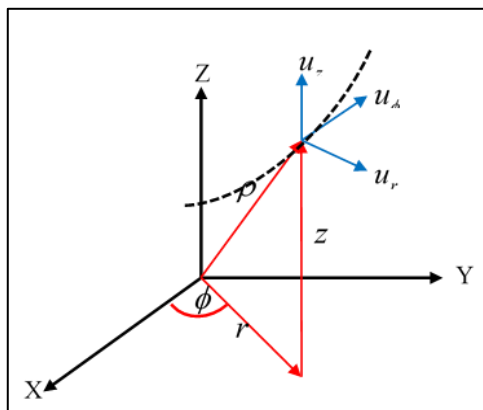
จัดรูปจะได้สมการที่ 3.7

$$-eE = m \frac{dv}{dt}, \quad \frac{dv}{dt} = \frac{-e}{m} E, \quad \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{-e}{m} E \quad (3.7)$$

จะเห็นว่า แรง (Force) อยู่ทิศทางตรงกันข้ามกับสนามไฟฟ้า เพราะอิเล็กตรอนมีประจุเป็นลบ (Negative charge) ดังนั้น เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในสนามไฟฟ้า (E) อิเล็กตรอนจะมีแรงเป็น $-eE$ นิวตัน ซึ่งจะได้สมการเชิงอนุพันธ์ของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าในลักษณะของระบบพิกัดฉาก (Rectangular Coordinates) ในรูปแบบสามมิติ ดังนี้

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{-e}{m} E_x, \quad \frac{d^2y}{dt^2} = \frac{-e}{m} E_y, \quad \frac{d^2z}{dt^2} = \frac{-e}{m} E_z \quad (3.8)$$

จากสมการระบบพิกัดฉากสามารถนำมาใช้กับสมการการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าที่เป็นระบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinates) ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงพิกัดจาก (x,y,z) เป็น (r, ϕ, z)



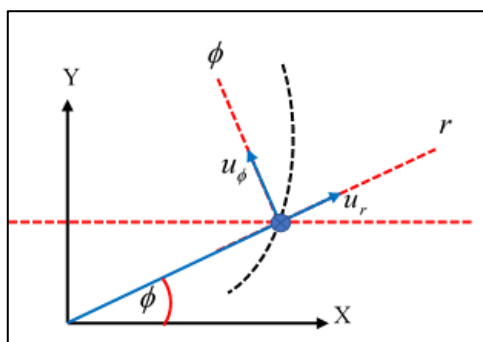
รูปที่ 3.8 ระบบพิกัดสามมิติทรงกระบอกของการเคลื่อนที่ประจุ

จากรูปที่ 3.8 จะได้

$$x = r \cos \phi, \quad y = r \sin \phi, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x} \right) = \sin^{-1} \left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}} \right) \quad (3.9)$$

ระบบเวกเตอร์ (u_r, u_ϕ, u_z) มีทิศทางที่เพิ่มคือ r, ϕ, z ตามลำดับ ในขณะที่ค่า u_z เป็นค่าคงที่ และค่า u_r, u_ϕ เป็นค่าฟังก์ชันของ ϕ จากระบบพิกัดทรงกระบอก เมื่อพิจารณาเฉพาะแกน X, Y สามารถหาค่า u_r, u_ϕ จากความสัมพันธ์ของค่า ϕ ได้ดังนี้



รูปที่ 3.9 ระบบพิกัด x, y ของการเคลื่อนที่ประจุ

จากรูปที่ 3.9 ทำการแตกเวกเตอร์จะได้สมการดังนี้

$$u_r = u_x \cos \phi + u_y \sin \phi, \quad u_\phi = -u_x \sin \phi + u_y \cos \phi \quad (3.10)$$

ทำการดิฟเฟอเรนเชียล สมการ u_r, u_ϕ จะได้

$$\frac{du_r}{d\phi} = \frac{d(u_x \cos \phi + u_y \sin \phi)}{d\phi} = -u_x \sin \phi + u_y \cos \phi \quad (3.11)$$

$$\text{หรือ } \frac{du_r}{d\phi} = u_\phi$$

$$\frac{du_\phi}{d\phi} = \frac{d(-u_x \sin \phi + u_y \cos \phi)}{d\phi} = -u_x \cos \phi - u_y \sin \phi \quad (3.12)$$

$$\text{หรือ } \frac{du_\phi}{d\phi} = -u_r$$

และจากรูปที่ 3.9 สามารถหาเวกเตอร์ของ ρ ในระบบพิกัดทรงกระบอกได้ดังนี้

$$\rho = ru_r + zu_z \quad (3.13)$$

จากสมการที่ 3.13 หาค่าความเร่ง โดยการดิฟเฟอเรนเชียล สมการเทียบกับเวลา 2 ครั้งจะได้ดังนี้

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{d(ru_r + zu_z)}{dt} = u_r \frac{dr}{dt} + r \frac{du_r}{dt} + u_z \frac{dz}{dt} + z \frac{du_z}{dt}$$

$$\text{เมื่อพิจารณา } r \frac{du_r}{dt} = r \frac{du_r}{dt} \left(\frac{d\phi}{d\phi} \right) = r \frac{du_r}{d\phi} \left(\frac{d\phi}{dt} \right) = ru_\phi \frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{d\rho}{dt} = u_r \frac{dr}{dt} + ru_\phi \frac{d\phi}{dt} + u_z \frac{dz}{dt} \quad (3.14)$$

หาความเร่งของสมการโดยดิฟเฟอเรนเชียลสมการที่ 3.14 จะได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{d\rho}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left(u_r \frac{dr}{dt} + ru_\phi \frac{d\phi}{dt} + u_z \frac{dz}{dt} \right)$$

➤ พิจารณาสมการพจน์ที่ 1 $\frac{d}{dt} \left(u_r \frac{dr}{dt} \right)$

$$\frac{d}{dt} \left(u_r \frac{dr}{dt} \right) = \frac{dr}{dt} \frac{du_r}{dt} + u_r \frac{d}{dt} \left(\frac{dr}{dt} \right)$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{d}{dt} \left(u_r \frac{dr}{dt} \right) = u_r \frac{d^2 r}{dt^2}$$

➤ พิจารณาสมการพจน์ที่ 2 $\frac{d}{dt} \left(ru_\phi \frac{d\phi}{dt} \right)$

$$\frac{d}{dt} \left(ru_\phi \frac{d\phi}{dt} \right) = r \frac{d}{dt} \left(u_\phi \frac{d\phi}{dt} \right) = r \left[u_\phi \frac{d}{dt} \left(\frac{d\phi}{dt} \right) + \frac{d\phi}{dt} \frac{du_\phi}{dt} \right]$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{d}{dt} \left(ru_\phi \frac{d\phi}{dt} \right) = r \left[u_\phi \frac{d^2 \phi}{dt^2} - u_r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right]$$

➤ พิจารณาสมการพจน์ที่ 3 $\frac{d}{dt} \left(u_z \frac{dz}{dt} \right)$

$$\frac{d}{dt} \left(u_z \frac{dz}{dt} \right) = u_z \frac{d}{dt} \left(\frac{dz}{dt} \right) + \frac{dz}{dt} \frac{du_z}{dt}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{d}{dt} \left(u_z \frac{dz}{dt} \right) = u_z \frac{d^2 z}{dt^2}$$

จัดรูปสมการทั้ง 3 พจน์ จะได้

$$a = u_r \left[\frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \right] + u_\phi \left[r \frac{d^2 \phi}{dt^2} \right] + u_z \left[\frac{d^2 z}{dt^2} \right] \quad (3.15)$$

ดังนั้น สรุปเป็นสมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าของระบบพิกัดทรงกระบอก คือ

$$\begin{aligned} a_r : \quad & \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m} E_r \\ a_\phi : \quad & r \frac{d^2 \phi}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_\phi \\ a_z : \quad & \frac{d^2 z}{dt^2} = -\frac{e}{m} E_z \end{aligned} \quad (3.16)$$

2. กฎการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็ก (Electron Motion in Magnetic Field)
อนุภาคที่มีประจุเมื่อเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กที่มีความหนาแน่นของฟลักซ์พบว่าแรงที่กระทำกับประจุจะมีสัดส่วนโดยตรงกับประจุ Q ความเร็ว v ความหนาแน่นของฟลักซ์ \vec{B} และทำมุมกันระหว่างเวกเตอร์ของ v และ \vec{B} โดยมีทิศทางของแรงที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของ v และ \vec{B} ดังนั้น แรงที่กระทำกับอนุภาคที่มีประจุในสนามแม่เหล็ก สามารถแสดงด้วยสมการเวกเตอร์ ดังนี้

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.17)$$

เมื่ออนุภาคที่มีประจุ คือ อิเล็กตรอน ดังนั้น

$$\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B})$$

และจากกฎข้อที่ 2 ของนิวตัน จะได้

$$\vec{F} = -e(\vec{v} \times \vec{B}) = ma = m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -\frac{e}{m} (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.18)$$

หาเวกเตอร์ $(\vec{v} \times \vec{B})$ จากระบบพิกัดฉากแบบสามมิติ

$$\vec{v} \times \vec{B} = \det \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{bmatrix}$$

$$\vec{v} \times \vec{B} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} \\ v_x & v_y \\ B_x & B_y \end{vmatrix}$$

$$\vec{v} \times \vec{B} = v_y B_z \hat{x} + v_z B_x \hat{y} + v_x B_y \hat{z} - v_y B_x \hat{z} - v_z B_y \hat{x} - v_x B_z \hat{y}$$

จัดรูปจะได้

$$\vec{v} \times \vec{B} = \hat{x} \left(B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right) + \hat{y} \left(B_x \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dx}{dt} \right) + \hat{z} \left(B_y \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dy}{dt} \right)$$

และทำการแปลงระบบพิกัดจาก เป็นระบบพิกัดทรงกระบอกจะได้

$$\vec{v} \times \vec{B} = \hat{r} \left(B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right) + \hat{\phi} \left(B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right) + \hat{z} \left(B_\phi \frac{dr}{dt} - B_r \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (3.19)$$

ดังนั้น สมการการเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กสำหรับระบบพิกัดทรงกระบอก มีดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\frac{e}{m} \left(B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right) \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= -\frac{e}{m} \left(B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right) \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= -\frac{e}{m} \left(B_\phi \frac{dr}{dt} - B_r \frac{d\phi}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

หรือ

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 &= -\frac{e}{m} \left(B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right) \\ r \frac{d^2 \phi}{dt^2} &= -\frac{e}{m} \left(B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right) \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= -\frac{e}{m} \left(B_\phi \frac{dr}{dt} - B_r \frac{d\phi}{dt} \right) \end{aligned} \quad (3.21)$$

3. การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electron Motion in an Electromagnetic Field)

การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก หากทั้งสองสนามอยู่ในทิศทางเดียวกันหรือในทิศทางตรงกันข้ามสนามแม่เหล็กจะไม่มีแรงออกมากกระทำกับ อิเล็กตรอนและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้า เช่น หลอดอิเล็กตรอน (ชนิด-O) ใช้สนามแม่เหล็กที่แกน พร้อมกับปลดปล่อยแสงอิเล็กตรอนในเวลาเดียวกันและส่งผ่านท่อลำแสง ซึ่งในหลอดเหล่านี้อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานศักย์เต็มพิกัดของสนามไฟฟ้า แต่จะไม่ได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็ก ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จะทำมุมกัน 90 องศา โดยชนิดของสนามไฟฟ้านี้เรียกว่า “Crossed field” โดยในหลอด Crossed Field (ชนิด-M) อิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากแคโทดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเพิ่มความเร็ว และเมื่อความเร็วของอิเล็กตรอนมากเท่าไร เส้นทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนก็จะยังมีทิศทางโค้งงอด้วยสนามแม่เหล็กมากขึ้น ในส่วนของสนามไฟฟ้าทั้ง 2 เมื่ออยู่ในทิศทางเดียวกันหรือทิศตรงข้ามกันสนามแม่เหล็กจะไม่มีผลต่ออิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าเท่านั้น สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีอิทธิพลต่อประจุอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถอธิบายแรงที่กระทำกับประจุเนื่องจากสนามทั้ง 2 นี้ เรียกว่า กฎของแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force Law)

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.22)$$

หรือ
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m \frac{d^2\vec{x}}{dt^2}$$

สมการการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กของระบบพิกัดฉาก และพิกัดทรงกระบอก แสดงได้ดังนี้

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_x + B_z \frac{dy}{dt} - B_y \frac{dz}{dt} \right)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_y + B_x \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dx}{dt} \right)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_z + B_y \frac{dx}{dt} - B_x \frac{dy}{dt} \right) \quad (3.23)$$

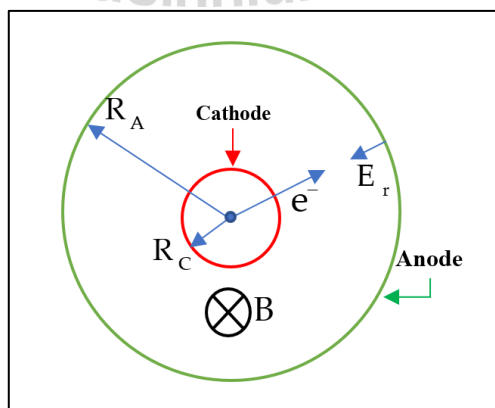
หรือแสดงเป็นระบบพิกัดทรงกระบอกได้ดังนี้

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m} \left(E_r + B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right) \quad (3.24)$$

$$r \frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_\phi + B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right) \quad (3.25)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_z + B_\phi \frac{dr}{dt} - B_r \frac{d\phi}{dt} \right) \quad (3.26)$$

สำหรับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายในทรงกระบอกที่มี รัศมี R_C (Cathode) และผนังรอบนอกของทรงกระบอกรัศมี R_A (Anode Block) ซึ่งระหว่างขั้ว Anode และ Cathode มีการจ่ายศักย์ไฟฟ้าด้วย V_0 และมีความเข้มของสนามแม่เหล็ก B ในทิศทางพุ่งเข้ากระดาด แสดงดังรูปที่ 3.10 ซึ่งการปรับแรงดันไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กจะมีระดับของการปรับเพื่อให้อิเล็กตรอนถูกปลดปล่อยออกจาก แคโทดไปยังผิวของแอโนด และอิเล็กตรอนก็จะย้อนกลับมายังพื้นที่ว่างระหว่างแคโทดและแอโนดเท่านั้น



รูปที่ 3.10 การเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

จากสมการที่ 3.24 เนื่องจากสนามไฟฟ้าจะมีทิศทางตรงข้ามกับทิศของแรงที่กระทำกับประจุลบเสมอ

$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = -\frac{e}{m} \left(E_r + B_z r \frac{d\phi}{dt} - B_\phi \frac{dz}{dt} \right)$$

จะได้
$$\frac{d^2r}{dt^2} - r \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 = \frac{e}{m} E_r - B_z r \frac{d\phi}{dt} \quad (3.27)$$

จากสมการที่ 3.25 เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีทิศทางเดียว คือ ทิศทางเดียวกันกับแรงที่กระทำกับประจุ

$$r \frac{d^2\phi}{dt^2} = -\frac{e}{m} \left(E_\phi^0 + B_r \frac{dz}{dt} - B_z \frac{dr}{dt} \right)$$

จะได้
$$r \frac{d^2\phi}{dt^2} = \frac{e}{m} B_z \frac{dr}{dt} \quad (3.28)$$

จากสมการที่ 3.28 จัดรูปสมการ จะได้

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = \frac{e}{m} B_z \frac{dr}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = \frac{e}{m} B_z r \frac{dr}{dt} = \frac{e}{m} B_z \left(r \frac{dr}{dr} \frac{dr}{dt} \right) = \frac{e}{m} B_z \left(\frac{1}{2} \frac{dr^2}{dr} \frac{dr}{dt} \right) = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z \frac{dr^2}{dr}$$

ดังนั้นจะได้
$$\frac{d}{dt} \left(r^2 \frac{d\phi}{dt} \right) = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z \frac{dr^2}{dr} \quad (3.29)$$

ทำการอินทิเกรตสมการ (3.29) จะได้

$$r^2 \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z r^2 + \text{constant}$$

กำหนดเงื่อนไขขอบเขตการเคลื่อนที่อิเล็กตรอน โดยพิจารณาความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วแคโทดที่เป็นทรงกระบอก ด้วยความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ ดังนั้น

$$\frac{d\phi}{dt} = 0 \text{ และ } r = R_c$$

จะได้ $R_c^2 \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z R_c^2 + \text{constant}$ และหาค่าคงที่

เมื่อ $\text{constant} = -\frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z R_c^2$

ดังนั้น $r^2 \frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z r^2 - \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z R_c^2 = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z (r^2 - R_c^2)$

หรือ $\frac{d\phi}{dt} = \frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z \left(\frac{r^2 - R_c^2}{r^2} \right)$ (3.30)

สำหรับการเกิดเงื่อนไข Cut-Off condition จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการสัมผัสหรือเคลื่อนที่ไปยังส่วนของขั้ว Anode ทำให้ความเร็วในแนวรัศมีของขั้วเป็นศูนย์ ดังนั้นกำหนด $\frac{dr}{dt} = 0$ และ $r = R_A$ เนื่องจากการตั้งสมมติฐานของอิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วแคโทดที่ความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ ตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน เมื่ออิเล็กตรอนถึงขั้วแอโนดพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\frac{1}{2} m v^2 = eV \quad (3.31)$$

$$\text{จัดรูปสมการ } v^2 = \frac{2eV}{m} = v_r^2 + v_\phi^2$$

$$\text{เมื่อ } v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{dR_A}{dt} = 0 \quad \text{และ} \quad v_\phi = R_A \frac{d\phi}{dt}$$

$$\text{ดังนั้น } v^2 = \frac{2eV}{m} = \left(R_A \frac{d\phi}{dt} \right)^2$$

$$\frac{2eV}{m} = R_A^2 \left(\frac{d\phi}{dt} \right)^2 \quad (3.32)$$

แทนค่าสมการที่ 3.30 ลงในสมการที่ 3.32 จะได้

$$\frac{2eV}{m} = R_A^2 \left(\frac{1}{2} \frac{e}{m} B_z \left(\frac{R_A^2 - R_C^2}{R_A^2} \right) \right)^2$$

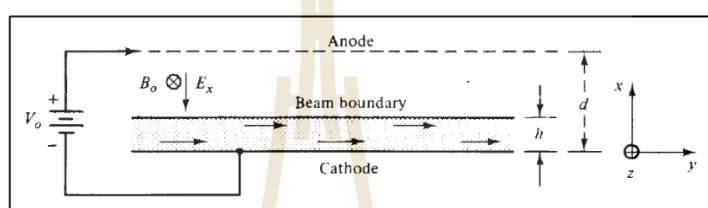
จัดรูปสมการ และกำหนด Cut-off Magnetic Field, $B_{OC} = B_z$

$$B_{OC} = \frac{\sqrt{\frac{8mV}{e}}}{R_A \left(1 - \frac{R_C^2}{R_A^2} \right)} \quad (3.33)$$

และสามารถหาค่า V_{OC} หรือ Cut-off Voltage ($V_{OC} = V$)

$$V_{OC} = \frac{e}{8m} (B_{OC})^2 (R_A)^2 \left(1 - \frac{R_C^2}{R_A^2} \right)^2 \quad (3.34)$$

ต่อไปกำหนดเงื่อนไขของฮาร์ทรี (Hartree Condition) โดยการพิจารณาเงื่อนไข Hull-cutoff Condition และกำหนดตัวแปรแรงดันแอโนด (Anode Voltage) หรือสนามแม่เหล็ก (Magnetic field) ซึ่งมีความจำเป็นสำหรับการทำให้กระแสของแอโนดไม่เป็นศูนย์ โดยรูปแบบของฟังก์ชันสนามแม่เหล็กหรือแรงดันแอโนดในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ในส่วนของเงื่อนไข Hartree Condition จะเป็นตัวกำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนอยู่ในพื้นที่ขอบเขตระยะ h จากส่วนของขั้วแคโทด และระยะห่างระหว่างส่วนของแคโทดและแอโนด คือ d สำหรับการเคลื่อนที่อิเล็กตรอน จะอยู่ในทิศทางบวก y ด้วยความเร็ว ซึ่งเงื่อนไขของ Hartree แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 รูปแบบแมกนีตรอนแบบเชิงเส้น

จากกฎการอนุรักษ์พลังงาน สมการที่ 3.31

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV$$

พิจารณาระบบพิกัดทรงกระบอก

$$v^2 = v_r^2 + v_\theta^2$$

$$v^2 = \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + \left(\frac{rd\theta}{dt}\right)^2 \quad (3.35)$$

เนื่องจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะออกแบบให้มีการเคลื่อนที่ในแนวรัศมีรอบแกนแคโทดที่มีรัศมีเท่ากัน

$$\text{ดังนั้นกำหนดให้ } \frac{dr}{dt} = 0 \text{ จะได้}$$

$$v^2 = \left(\frac{rd\theta}{dt} \right)^2 \quad (3.36)$$

แทนสมการที่ 3.36 ในสมการที่ 3.31 จะได้

$$\frac{1}{2} m \left(\frac{rd\theta}{dt} \right)^2 = eV \quad (3.37)$$

และกำหนดให้

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta'}{dt} + \omega_0 \quad (3.38)$$

เมื่อ θ' คือ มุมที่อ้างอิงถึง ระบบพิกัดการหมุนของของอิเล็กตรอน
 ω_0 คือ ความเร็วเชิงมุมของอิเล็กตรอน

แทนสมการที่ 3.38 ในสมการที่ 3.37 จะได้

$$\frac{1}{2} mr^2 \left(\frac{d\theta'}{dt} \right)^2 + \omega_0 mr^2 \frac{d\theta}{dt} - mr^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} mr^2 \omega_0^2 = eV \quad (3.39)$$

จากสมการที่ 3.30 ที่เกี่ยวข้องกับความเร็วเริ่มต้นของอิเล็กตรอนที่ออก

จากข้อแคะโทดที่เป็นทรงกระบอก ด้วยความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ ดังนั้น $\frac{d\theta'}{dt} = 0$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{eB}{2m} \left(\frac{r^2 - r_c^2}{r^2} \right)$$

$$\frac{1}{2} mr^2 \left(\frac{d\theta'}{dt} \right)^2 + \omega_0 mr^2 \left(\frac{eB}{2m} \left(\frac{r^2 - r_c^2}{r^2} \right) \right) - mr^2 \omega_0^2 + \frac{1}{2} mr^2 \omega_0^2 = eV$$

จัดรูปสมการ อยู่ในทอม ($V = V_H$) จะได้

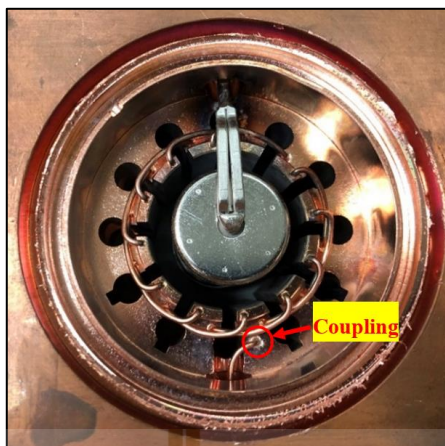
$$V = V_H = \frac{\omega_0 B}{2} (r^2 - R_C^2) - \frac{m}{2e} r^2 \omega_0^2 \quad (3.40)$$

โดยที่	$\omega_0 = \omega/n$	คือ ความถี่ในสนาม RF
	$n = N/2$	คือ โหมดการทำงาน (Mode operation)
	N	คือ จำนวนห้องคลื่น (Resonant Cavities)
	V_H	คือ สมการแรงดันไฟฟ้าแวนดราลในเงื่อนไข Hartree ที่เป็นฟังก์ชันของ ความหนาแน่นพลาสมาแม่เหล็กและระยะห่างระหว่างแคโทดและแอโนด

3.2.5 วงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์และโหมดการทำงานของระบบแมกนีตรอน

แมกนีตรอนที่มีห้องคลื่นเพื่อสร้างความถี่เรโซแนนซ์จำนวนหลาย ๆ ห้อง มีหลักการทำงานของสนามที่ควบคู่กัน คือ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ด้วยโหมดการกระตุ้น การทำงานของแมกนีตรอนหลายโหมดและให้ผลของความถี่เรโซแนนซ์ที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งการทำงานทั่วไปของแมกนีตรอนที่สร้างความถี่เรโซแนนซ์จะมีโหมดการทำงานที่เด่น (Dominant mode) อยู่เพียงโหมดเดียว และการวิเคราะห์ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์โดยทั่วไป จะอาศัยค่าตัวแปรที่เหมาะสมของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 วิธี คือ วิเคราะห์ด้วยแบบจำลองเทียบเท่าวงจรสมมูลของแมกนีตรอนในหนึ่งโครงข่าย และ วิเคราะห์แบบจำลองสามมิติด้วยโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์

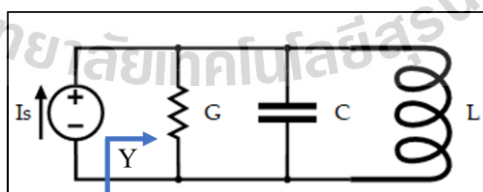
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์ของห้องคลื่นหนึ่งห้อง เป็นวงจรพาสซีฟที่เป็นพื้นฐานของไฟฟ้าสื่อสารที่ใช้ในงานของวงจรเครื่องกำเนิดความถี่หรือ ออสซิลเลเตอร์ เป็นต้น วงจรเรโซแนนซ์ ตามทฤษฎี เกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ วงจรเรโซแนนซ์ แบบอนุกรมหรือแบบขนาน ซึ่งการดึงกำลังคลื่นจากวงจรเรโซแนนซ์แบบโพรง (Resonator Cavity) โดยทั่วไปทำได้ 2 ลักษณะ คือ การยื่นโพรบหรือบ่วงรูปครึ่งวงกลมและการเจาะรูที่ผนัง ร่วมระหว่างวงจรเรโซแนนซ์แบบโพรงและท่อนำคลื่น ซึ่งอุปกรณ์กำเนิดคลื่นความถี่หรือ แมกนีตรอนที่ใช้มีลักษณะการดึงกำลังคลื่นด้วยวิธีการยื่นโพรบหรือบ่วงรูปครึ่งวงกลมเข้าไปใน วงจรเรโซแนนซ์แบบโพรงแสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างภายในแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot ที่มีห้องคลื่น 12 ห้อง

จากรูปที่ 3.12 การดึงกำลังคลื่นออกจากวงจรเรโซแนนซ์ที่ปลายสายด้านหนึ่งต่อเข้ากับโหลดโพรบที่ยื่นเข้าไปในวงจร พลังงานแม่เหล็กไฟฟ้าที่วงจรจะขับให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลบนโพรบและเกิดแรงดันไฟฟ้าที่ขั้ว โดยสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลเทียบเท่ากับวงจรไฟฟ้าแบบขนานแสดงดังรูปที่ 3.13 เมื่อกำหนดให้ C, G, L คือ ค่าเทียบเท่า คาปาซิแตนซ์ คอนดักแตนซ์ และอินดักแตนซ์ ตามลำดับ โดยที่ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรเทียบเท่าอธิบายได้ด้วยสมการ

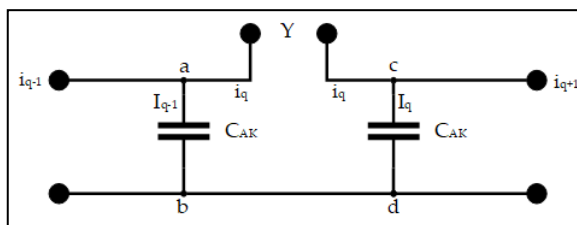
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.41)$$



รูปที่ 3.13 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานชนิด Current source

พิจารณาวงจรเทียบเท่าโครงข่ายในหนึ่งส่วน (Equivalent Network one-section) ที่อธิบายหลักการทำงานของแมกนีตรอนอย่างง่าย ตั้งแต่การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดไปทำปฏิกิริยัมพันธ์กับสนามในพื้นผิวส่วนของบริเวณขั้วแอโนด (Interaction space) ซึ่งการเกิด

ปฏิสัมพันธ์แทนด้วยวงจรพาสซีฟคาปาซิแตนซ์ระหว่างขั้วแอดโนคและแคโทด (C_{AK}) และสามารถสรุปเป็นวงจรสมมูลเทียบเท่าได้ดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 วงจรเรโซแนนซ์เทียบเท่าหนึ่งโครงข่าย

พิจารณาค่าแอดมิตแตนซ์ของวงจร เมื่อกำหนดค่าแอดมิตแตนซ์ (Y) ของวงจรรูปที่ 3.13 และวงจรรูปที่ 3.14 ในสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์จะมีค่าเท่ากัน ดังนั้นพิจารณากฎของเคอร์ชอฟฟ์ในด้านกระแสไฟฟ้า คือ

$$I_{q-1} = i_q - i_{q-1} \quad (3.42)$$

$$I_q = i_{q+1} - i_q \quad (3.43)$$

พิจารณาแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุโหนด A และ B จะได้

$$V_{AB} = \frac{i_{q-1}}{j\omega C_{AK1}}, V_{CD} = \frac{i_q}{j\omega C_{AK2}}, C_{AK1} = C_{AK2}$$

พิจารณาแรงดันคร่อม แอดมิตแตนซ์ หรือ v_q คือ

$$v_q = V_{AB} - V_{CD}$$

แทนค่าจะได้

$$v_q = \frac{i_{q-1}}{j\omega C_{AK}} - \frac{I_q}{j\omega C_{AK}} = \frac{i_q - i_{q-1} - i_{q+1} + i_q}{j\omega C_{AK}}$$

$$v_q = \frac{2i_q - (i_{q-1} + i_{q+1})}{j\omega C_{AK}}$$

ทำการตั้งสมมติฐานกระแสไหลผ่านขอบผิวของขั้วแอโนด โดยมีความแตกต่างกันของค่าคงที่เฟส ดังนี้

$$i_{q-1} = i_q e^{-iy} \quad \text{and} \quad i_{q+1} = i_q e^{iy}$$

แทนค่าในสมการที่ v_q จะได้

$$v_q = \frac{i_q [2 - (e^{-iy} + e^{iy})]}{j\omega C_{AK}} \quad (3.44)$$

และจากสมการของค่าแอดมิตแตนซ์ เท่ากับ

$$Y = \frac{i_q}{v_q} \quad (3.45)$$

นำสมการที่ 3.44 แทนในสมการที่ 3.45 จะได้

$$Y = \frac{j\omega C_{AK}}{2 - (e^{-iy} + e^{iy})}$$

อ้างอิงจากฟังก์ชันตรีโกณมิติ

$$\cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}$$

แทนค่า $\cos z$ ในสมการแอดมิตแตนซ์ จะได้

$$e^{-iy} + e^{iy} = 2\cos\phi$$

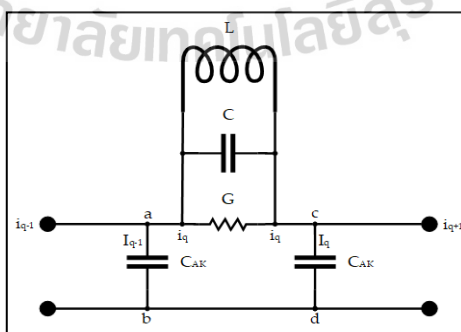
$$\text{เมื่อ } \phi = \text{phase angle} = \frac{2\pi n}{N} \text{ ดังนั้น}$$

$$Y = \frac{j\omega C_{AK}}{2(1 - \cos\gamma)} \quad (3.46)$$

พิจารณาวงจรเรโซแนนซ์รูปที่ 3.13 ในฝั่งของวงจรเรโซแนนซ์ RLC แบบขนาน สามารถเขียนเป็นสมการให้อยู่ในรูปของแอดมิตแตนซ์ ได้ดังนี้

$$Y = j\omega C_1 - j\frac{1}{\omega L_1}$$

เนื่องด้วยการเกิดเรโซแนนซ์บนวงจรไฟฟ้าทำให้ค่าแอดมิตแตนซ์ทั้ง 2 ส่วนของการพิจารณาวงจรสมมูลเทียบเท่าของแมกนีตรอนมีค่าเท่ากัน ดังนั้นสามารถยุบรวมวงจรโครงข่ายหนึ่งส่วน และวงจร RLC แบบขนาน โดยเขียนเป็นวงจรใหม่ดังรูปต่อไปนี้



รูปที่ 3.15 วงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แมกนีตรอน

จากรูปที่ 3.15 เมื่อค่าแอดมิตแตนซ์มีค่าเท่ากันทั้ง 2 ส่วน สามารถที่จะนำวงจรเทียบเท่ารูปที่ 3.13 และ 3.14 มาเชื่อมต่อกันได้ และสมการอธิบายด้วยสมการของวงจรแบบขนานได้ดังนี้

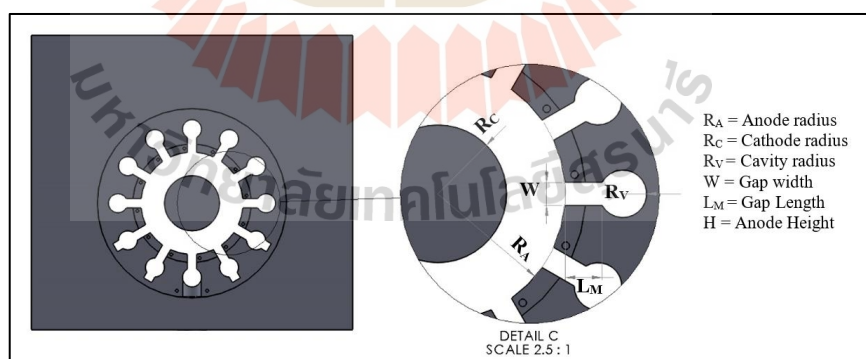
$$-\left(j\omega C_1 - j\frac{1}{\omega L_1}\right) = Y = \frac{j\omega C_{AK}}{2(1 - \cos\phi)}$$

จัดรูปสมการใหม่ให้อยู่ในเทอมของความถี่เรโซแนนซ์ จะได้

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L_1 C_1) \left(1 + \frac{C_{AK}}{2C_1(1 - \cos\phi)}\right)}} \quad (3.47)$$

1. วงจรเทียบเท่าตัวคาปาซิแตนซ์ ของระบบห้องคลื่นเรโซแนนซ์

พิจารณา Schematic ของการกระจายตัวของสนามไฟฟ้า (Electric distribution) โดยขั้นตอนแรกหาสมการ การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าสูงสุดที่เกิดขึ้นในแนวขอบพื้นผิวขั้วแอโนดไปยังจุดศักย์ไฟฟ้าที่เท่ากับศูนย์หรือที่จุดขอบบนสุดของห้องคลื่น ซึ่งสามารถอธิบายด้วยรูปที่ 3.16



รูปที่ 3.16 ส่วนของพื้นที่การวิเคราะห์ตัวเทียบเท่าส่วนของห้องคลื่นเรโซแนนซ์

จากรูปที่ 3.16 พิจารณาส่วนของพื้นที่ที่เทียบเท่าคาปาซิแตนซ์สมมุติการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ เซ็งเส้นเกิดขึ้นจากด้านล่างสุดไปยังด้านบนสุดของโครงสร้างระยะ

ช่องว่างแคบโพรงห้องคลื่นของบล็อกแอดโนตแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot ซึ่งกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$U_1(r) = \frac{U_{\max}}{L_M} (R_{A+L_M} - R)$$

และพิจารณากฎของเกาส์ (Electrostatic Law) ในพื้นที่ดังกล่าวจะได้สนามไฟฟ้า E_1 ทิศทางประมาณแนวเส้นตรง w คือ

$$E_1(R) = \frac{U_1(R)}{w}$$

ดังนั้น ความหนาแน่นประจุบนพื้นผิว The surface charge density (σ_1) ของบล็อกด้านข้างแอดโนต คือ

$$\sigma_1(R) = \frac{\epsilon_0 U_1(R)}{w} = \frac{\epsilon_0 U_{\max} (R_{A+L_M} - R)}{wL_M}$$

และประจุบนพื้นผิวสามารถหาจากการอินทิเกรตระยะจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง จะได้

$$Q_1(R) = \int \sigma_1(R) ds = \int_{R_A}^{R_{A+L_M}} \sigma_1(R) H dR$$

$$Q_1(R) = \int_{R_A}^{R_{A+L_M}} \frac{\epsilon_0 U_{\max} (r_{A+L_M} - R)}{wL} H dR$$

$$\text{จัดรูปสมการ จะได้ } Q_1(R) = \frac{\epsilon_0 U_{\max} H L_M}{2w}$$

พิจารณา C_1 สำหรับการเกิดสนามไฟฟ้าระหว่างผิว ช่องด้านข้าง 2 ส่วน คือ

$$C_1 = \frac{Q_1}{U_{\text{avg}}}$$

เมื่อค่าเฉลี่ยความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 บล็อกแอโนด คือ $U_{\text{avg}} = \frac{U_{\text{max}}}{2}$

ดังนั้น

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 L_M H}{W} \quad (3.48)$$

และสมการเทียบเท่าวงจรเรโซแนนซ์สำหรับพื้นที่ Interaction space

$$C_{\text{AK}} = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{N \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)} + \frac{\epsilon_0 H W}{R_A \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)} \quad (3.49)$$

2. วงจรเทียบเท่าตัวอินดักแตนซ์ ของระบบห้องคลื่นเรโซแนนซ์

ระบบแมกนีตรอน ที่มีห้องคลื่น Resonant Cavity ลักษณะรูปแบบ Twelve-Hole-Slot จะพิจารณาวงจรเทียบเท่า โดยมีลักษณะเหมือนกับสนามแม่เหล็กจากลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านวนรอบตัวนำแบบปิด จากกฎของแอมแปร์กล่าวว่า ถ้าอินทิเกรตสนามแม่เหล็ก รอบเส้นวงปิดอันหนึ่งผลที่ได้คือ กระแสที่ไหลอยู่ในรอบวงปิดนั้น จากรูปที่ 3.16 พิจารณา โครงสร้างของแมกนีตรอนที่เกี่ยวข้องกับค่าอินดักแตนซ์ โดยพิจารณาถึงความหนาแน่นของ กระแสที่ไหลผ่านบริเวณทางเข้าห้องคลื่นเรโซแนนซ์ Slot Area และห้องคลื่นเรโซแนนซ์ (Cavity) สามารถอธิบายด้วยสมการฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณ Slot Area ดังต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{\mu_0 I W L_M}{2H}$$

และสามารถหาค่าตัวเหนี่ยวนำจากการพิจารณาแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ตัวเหนี่ยวนำ ในขดลวด โดยอ้างอิงจากกฎของฟาราเดย์ดังสมการดังนี้

$$L_1 = \frac{\Phi}{I}$$

แทนค่าจะได้

$$L_1 = \frac{\mu_0 W L_M}{2H}$$

และฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณห้องคลื่น (Cavity) จากผลรวมตลอดเส้นทางวงปิดรัศมี R_V และบล็อกแวนไดคสูง H จะได้เส้นรอบวงกลมคือ $2\pi R_V$ ดังนั้นแทนค่าในสมการจะได้

$$B(2\pi R_V H) = \mu_0 I$$

ผลรวมทั้งหมดของฟลักซ์แม่เหล็กในห้องคลื่นเรโซแนนซ์หาได้จากสมการดังนี้

$$\Phi = BA$$

- เมื่อ
- Φ คือ จำนวนฟลักซ์แม่เหล็กที่ผ่านบนพื้นผิว
 - A คือ พื้นที่ตั้งฉากกับฟลักซ์แม่เหล็ก
 - B คือ ความเข้มสนามแม่เหล็ก

$$\text{ดังนั้น } \Phi = \frac{\mu_0 I \phi R_V^2}{4\pi R_V H} = \frac{\mu_0 I R_V}{24H}$$

และค่าตัวเหนี่ยวนำ เมื่ออ้างอิงจาก กฎของฟาราเดย์ จะได้ สมการดังนี้

$$L_2 = \frac{\mu_0 \Gamma_V}{24H}$$

ดังนั้น การพิจารณาตัวเทียบเท่าอินดักแตนซ์รวม เท่ากับ

$$L = L_1 + L_2 = \frac{\mu_0 R_V}{24H} + \frac{\mu_0 W L_M}{2H}$$

$$L = \frac{\mu_0}{2H} \left(\frac{R_V}{12} + WL_M \right) \quad (3.50)$$

แทนค่าจากสมการที่ 3.48, 3.49 และ 3.50 ลงในสมการที่ 3.47 จะได้สมการเพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์แต่ละโหมดการทำงานของแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot ได้ดังสมการต่อไปนี้

$$f_R(n) = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\mu_0}{2H} \left(\frac{R_V}{12} + WL_M \right) \left(\frac{\epsilon_0 L_M H}{W} \right) \left[1 + \frac{\frac{2\pi\epsilon_0 H}{N \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)} + \frac{\epsilon_0 H W}{R_A \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)}{\left(\frac{2\epsilon_0 H L_M}{W}\right) \left(1 - \cos\frac{2\pi n}{N}\right)} \right]}} \quad (3.51)$$

3.2.6 หลักการวิเคราะห์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

อนุภาคประจุอิเล็กตรอน มีการเคลื่อนที่อย่างอิสระและมีความเร็วเฉลี่ยเป็นศูนย์ เนื่องจากการเคลื่อนที่มีทิศทางไม่แน่นอน แต่ถ้าปลายทั้งสองของโลหะ มีศักย์ไฟฟ้าต่างกันจะเกิดสนามไฟฟ้าในแท่งโลหะทำให้เกิดแรงของสนามที่ทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่เป็นระเบียบที่เป็นไปตามกฎของโอห์ม สำหรับการนำไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศที่เป็นหลอดแก้วที่สูบอากาศภายในหลอดออกทั้งหมดจะมีขั้วสำหรับให้อิเล็กตรอนเรียกว่า “แคโทด” และขั้วสำหรับรับอิเล็กตรอนเรียกว่า “แอโนด” ซึ่งการทำให้ศักย์ไฟฟ้าของแอโนดสูงกว่าแคโทดจะทำให้อิเล็กตรอนถูกเร่งจากแคโทดผ่านบริเวณสุญญากาศมายังแอโนด ทำให้มีกระแสไฟฟ้าในหลอดสุญญากาศหรือเรียกว่า “หลอดไดโอด” ดังนั้น กระแสไฟฟ้าในหลอด เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนสามารถจะบังคับทิศทางของการเคลื่อนที่ได้โดยสนามแม่เหล็กที่ตั้งอยู่ภายนอกของหลอดไดโอดปรากฏการณ์สนามแม่เหล็กไฟฟ้าสถิตหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงทางเวลาสามารถที่จะใช้ชุดสมการแมกซ์เวลล์อธิบายได้ โดยนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ ชื่อ James Clark Maxwell ที่รวบรวมกฎต่าง ๆ ทางแม่เหล็กไฟฟ้า คือ กฎฟาราเดย์ กฎแอมแปร์ ซึ่งการวิเคราะห์ที่เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสามารถวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่นิยมใช้ในปัจจุบันอยู่ 2 วิธี คือ วิธีไฟไนท์อีลิเมนต์ (Finite Element Method; FEM) และวิธีผลต่างเชิงเวลา (Finite difference Time Domain; FDTD) ซึ่งการวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี จะมีข้อที่แตกต่างกัน คือ วิธี FEM จะเหมาะสำหรับการเขียน โปรแกรมจำลองที่ใช้คอมพิวเตอร์ที่มีทรัพยากร

หรือหน่วยความจำที่สูง ส่วนวิธีของ FDTD สามารถที่จะเขียนโปรแกรมได้ง่ายและใช้ทรัพยากรที่ไม่สูงมาก ซึ่งเหมาะกับคอมพิวเตอร์ที่ใช้กับบุคคลทั่วไปได้

3.2.7 การจำลองผลต่างเชิงเวลา (FDTD)

วิธีผลต่างเชิงเวลาวิเคราะห์ถึงปัญหาที่เกี่ยวกับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีรูปแบบขอบเขตซับซ้อนหรือไม่สมมาตร ซึ่งต้องกำหนดเงื่อนไขขอบเขตให้เพียงพอต่อการหาคำตอบที่สมบูรณ์ เช่น การกำหนดความหนา ชนิด และขนาดของชั้นวัสดุที่พิจารณาผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ซึ่งการใช้เทคนิควิธี FDTD จะทำการแปลงสมการของแมกซ์เวลล์ ให้อยู่รูปของสมการเวลา โดยใช้สมการแมกซ์เวลล์ในเชิงอนุพันธ์ทั้งหมด 4 สมการ คือ

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.52)$$

$$\nabla \times \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (3.53)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.54)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.55)$$

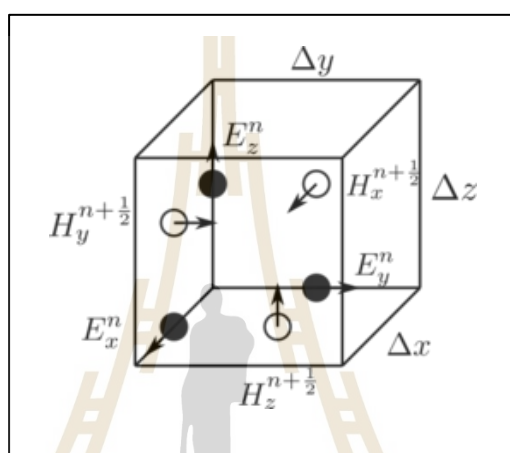
จากสมการแมกซ์เวลล์เชิงอนุพันธ์ แทนค่า $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$, $\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E}$ และ $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ในสมการที่ 3.52 และ 3.53 และกำหนดค่าคงที่ $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ และ $\epsilon_0 = 8.845 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ จะได้การประมาณค่าอนุพันธ์ในเชิงของระยะทาง ดังสมการต่อไปนี้

$$f'(x_0) = \frac{f\left(x_0 + \frac{\Delta x}{2}\right) - f\left(x_0 - \frac{\Delta x}{2}\right)}{\Delta x} \quad (3.56)$$

และการประมาณค่ากึ่งกลางเชิงเวลา คือ

$$f'(x_0) = \frac{f^{n+1}(x_0) - f^n(x_0)}{\Delta t} \quad (3.57)$$

จากสมการที่ (3.56) และ (3.57) สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับวิธีผลต่างเชิงเวลาที่สามารถนำไปใช้กับแบบจำลองที่นิยมใช้ คือ แบบจำลองของยี่ (Yee's Cell) เพื่อสำหรับการจำลองคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในตัวกลางที่เป็นเนื้อเดียวกัน และการประมาณค่าผลสืบต่อเนื่องแบบกึ่งกลางที่ใช้หลักการประมาณค่าของอนุพันธ์เทียบกับช่องว่างและเวลา ซึ่งการหาผลเฉลยของแม่เหล็กไฟฟ้าโดยใช้อัลกอริทึมของยี่ มีลักษณะแบบจำลองเป็นรูปลูกบาศก์ที่มีพิกัดจากสามมิติ และเป็นแบบจำลองที่เป็นหน่วยเล็ก ๆ มีความสมมาตรกัน ดังแสดงรูปภาพที่ 3.17



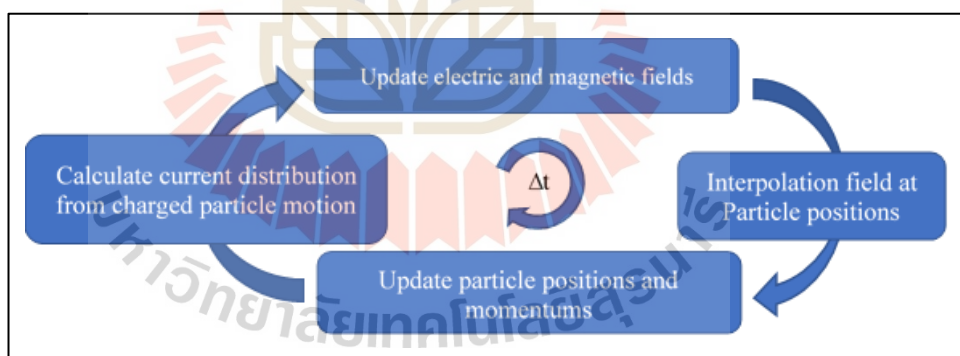
รูปที่ 3.17 แบบจำลองเซลล์ของยี่

3.2.8 วิธีการจำลองด้วยเทคนิค Particle-In-Cell (PIC)

เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์พลวัตของอนุภาคในระบบสามมิติของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า สำหรับอุปกรณ์แหล่งกำเนิดความถี่วิทยุหรือแมกนีตรอนที่มีความแม่นยำและรวดเร็วจะใช้โปรแกรม CST particle studio ที่เป็นเครื่องมือย่อยที่สามารถวิเคราะห์องค์ประกอบลักษณะเฉพาะของอนุภาค เช่น การ Tracking อนุภาคประจุที่เคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็ก (Stationary Particle Tracking solver) คำนวณสนามที่สร้างโดยกลุ่มอนุภาคที่มีประจุ เคลื่อนที่ผ่านรูปทรงเรขาคณิตในพิกัดสามมิติ (Wakefield solver) หรือ วิธีการ Particle-In-Cell คือ วิธีการจำลองพลวัตของอนุภาคในระยะเวลาหนึ่งด้วยวิธี Self-consistent method ที่ให้ผลลัพธ์ทางสัมพันธภาพ ต่อลักษณะการเคลื่อนที่ บนสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังสูง ซึ่งวิธีนี้จะให้ผลที่ดีต่อการจำลองต่ออุปกรณ์ที่มีการใช้กำลังไฟฟ้าที่สูง (High power MW tubes) และการจำลองระบบด้วยเทคนิคนี้อาศัยแบบจำลองในรูปแบบสามมิติที่ต้องสร้างขึ้นเองหรือนำเข้าข้อมูลจากโปรแกรมภายนอก เช่น โปรแกรม SolidWorks เป็นต้น และยังสามารถกำหนดคุณสมบัติชนิด

ของวัสดุให้มีความใกล้เคียงกับอุปกรณ์ต้นแบบได้ เช่น ทองแดงบริสุทธิ์, ทองแดงอบอ่อน หรือ กำหนดให้เป็นพื้นที่สุญญากาศ เป็นต้น

กระบวนการคำนวณด้วยเทคนิค PIC พิจารณาพื้นที่ปฏิสัมพันธ์ระหว่าง อิเล็กตรอนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยกระบวนการเริ่มต้นกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับ ตำแหน่งและความเร็วของอนุภาค ซึ่งจะทราบถึงปริมาณของอนุภาค ณ จุดนั้น และอาจจะได้ ค่าทั้งหมดในมิติของพื้นที่เฟส โดยผลของปริมาณสนามจะให้ผลลัพธ์เฉพาะจุดบนกริด (Grid) ในเชิงของพื้นที่นั้น ๆ ซึ่งก็คือ จุดที่ไม่มีความต่อเนื่องและสามารถที่จะคำนวณ ปริมาณสนามบน กริดนั้นได้ โดยที่ค่าประจุและความหนาแน่นของกระแสบนกริดนั้นจำเป็นที่จะต้องทราบค่าเป็น อันดับแรก ขั้นตอนต่อไป คือ กระบวนการที่กำหนดประจุอนุภาคและกระแสบนกริดนั้น ๆ ด้วยการถ่วงน้ำหนักที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของอนุภาค เมื่อประจุไฟฟ้าและความหนาแน่นที่ถูกสร้างขึ้น บนกริดใช้วิธีการคำนวณเชิงตัวเลขหลาย ๆ วิธี เพื่อที่จะให้ผลค่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ส่วนแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าจะกระทำต่ออนุภาคที่สามารถหาได้จากการประมาณค่าสนาม บนกริดและตำแหน่งของอนุภาค ดังนั้น อิเล็กตรอนสามารถที่จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างต่อเนื่อง ซึ่งกระบวนการนี้จะรวมไปถึงการถ่วงน้ำหนักของส่วนประกอบสนามและอนุภาคนั้น ๆ และ วนลูปการคำนวณไปเรื่อย ๆ ดังแผนภาพรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 กระบวนการของเทคนิค Particle-In-Cell (PIC)

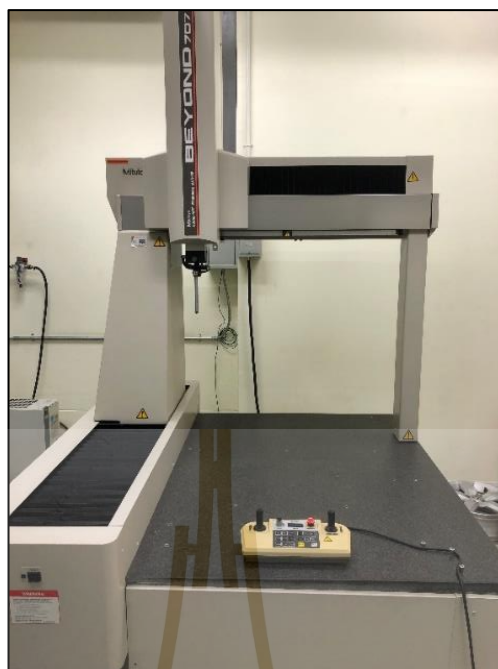
จากรูปที่ 3.18 วิธีการ PIC ใช้เทคนิคของรูปแบบสมการ Partial differential เพื่อติดตามการเคลื่อนที่ของอนุภาคใด ๆ อย่างต่อเนื่องในรูปแบบ Phase space หรือรูปแบบของ Lagrangian แต่ว่าการกระจายตัวของอนุภาค เช่น ความหนาแน่น กระแสจะคำนวณพร้อม ๆ กัน ในจุดแบบตาข่ายที่กำหนดอย่างละเอียด (Mesh points) ซึ่งที่มาของวิธีการ PIC มีการเริ่มใช้งาน ช่วงปี 1955 โดยก่อนหน้านั้นใช้ ภาษา Fortran เป็นตัว Compiler และวิธี PIC เป็นที่นิยมในกลุ่ม

นักวิจัยการจำลองพลาสมาในปี 1950 และ 1960 โดย Buneman, Dawson, Hockne, Birdsall, Morse. ประยุกต์ใช้ในวงการพลาสมาฟิสิกส์ที่เป็นแนวทางวิธีการติดตามอนุภาคประจุในการเกิดสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยตัวเอง และคำนวณโดย กำหนดค่าคงที่ของจตุรรูปแบบตาข่าย (Fixed mesh) ซึ่งหลักวิธีการของ PIC สามารถจำลองการกระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ของอิเล็กทรอนิกส์ด้วยโปรแกรม CST particle studio ร่วมกับเทคนิค PIC simulation และ โปรแกรมสามารถที่กำหนดค่าเริ่มต้นได้เช่นพลังงานจลน์เริ่มต้น ความหนาแน่นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากขดลวดฟิลาเมนต์ นอกจากนี้ สามารถนำเข้าวัสดุที่พิจารณาในรูปแบบสามมิติ จากโปรแกรมภายนอก เช่น โปรแกรม SolidWorks เป็นต้น และกำหนดชนิดของวัสดุให้เหมือนกับอุปกรณ์จริงได้ เช่น วัสดุทองแดง, ทองแดงอบอ่อน วัสดุที่มีความนำไฟฟ้าสมบูรณ์หรือกำหนดให้วัสดุส่วนใดส่วนหนึ่งเป็นสุญญากาศได้ เป็นต้น

3.2.9 หลักการวิเคราะห์เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ (GD&T)

พิกัดความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ (GD&T) เป็นเครื่องมือสำคัญที่ใช้ในกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรมสามารถสื่อสารระหว่างผู้ออกแบบและผู้ผลิตให้เข้าใจและวางแผนการผลิตให้ตรงกัน รวมถึงการตรวจสอบขนาดของชิ้นงานที่ผลิต เพื่อให้ได้คุณภาพถูกต้องตามเงื่อนไขของผู้ออกแบบ ซึ่งเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิต และมิติ (GD&T) จะทำการแบ่งขั้นตอนการออกแบบเป็น 2 วิธี คือ เกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดหรือการเคลื่อนของมิติจะวิเคราะห์ถึงการควบคุมขนาดของแต่ละมิติ และเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปทรงเรขาคณิตจะวิเคราะห์ถึงการควบคุมรูปร่าง ความขนาน ความเอียง ตำแหน่ง และการหนีจากจุดอ้างอิง เป็นต้น ซึ่งข้อดีของการออกแบบ GD&T จะช่วยป้องกันข้อผิดพลาดจากเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนที่สามารถอ้างอิงถึงความผิดพลาดจากผลิตภัณฑ์ของผู้ผลิตหรือผู้ออกแบบเอง

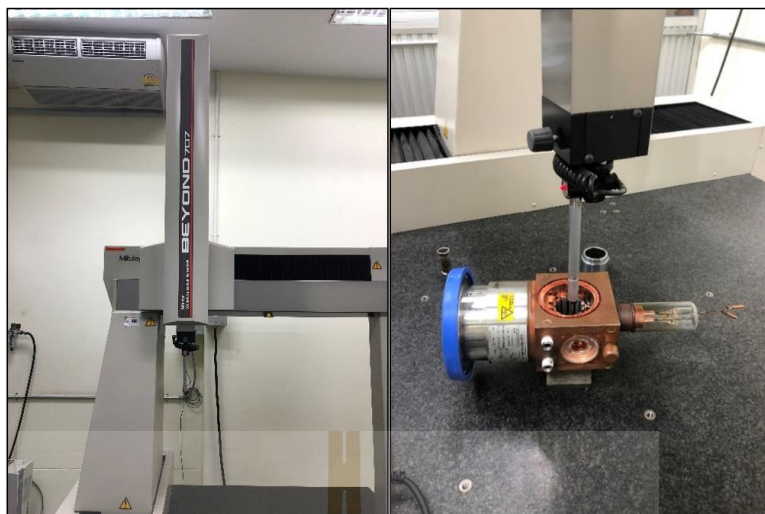
สำหรับเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดและเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของรูปทรงเรขาคณิตจะต้องใช้เครื่องมือวัดและวิธีตรวจสอบสำหรับการวัดที่แตกต่างกัน เช่น การใช้ไมโครมิเตอร์ในการวัดระหว่างจุด 2 จุด สำหรับข้อมูลจำเพาะด้านเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนของขนาดมิติหรือใช้เครื่องจักรที่มีความละเอียดการวัดสามมิติ และมีฟังก์ชันการวัดวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่รองรับคุณสมบัติ GD&T ดังรูปที่ 3.19



รูปที่ 3.19 เครื่องมือวัดพิกัดสามมิติ รุ่น CMM Mitutoyo model BLN707

3.3 พิกัดความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ

การวัดขนาดโครงสร้างภายในแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot ที่มีจำนวน โพรงของห้องคลื่น จำนวน 12 ห้อง จะใช้เครื่องมือวัดที่มีหลักการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ (GD&T) คือ ชุดเครื่องมือวัดพิกัดสามมิติ (Coordinate Measuring Machine; CMM) รุ่น Mitutoyo Beyond 707 แสดงดังรูปที่ 3.20 ที่มีคุณสมบัติของการวัดที่มีความละเอียดถึง 0.5 ไมโครเมตร และมีฟังก์ชันการวิเคราะห์ผลการวัดตอบสนองลักษณะของชิ้นงานที่เป็นไปตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ (Geometry Dimensional and Tolerancing; GD&T) สำหรับขั้นตอนการวัดโครงสร้างภายในแมกนีตรอนเริ่มต้นทำการแยกชิ้นส่วนของอุปกรณ์ด้วยเครื่องมือที่สามารถเจาะวัสดุที่เป็นทองแดงได้ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3.21



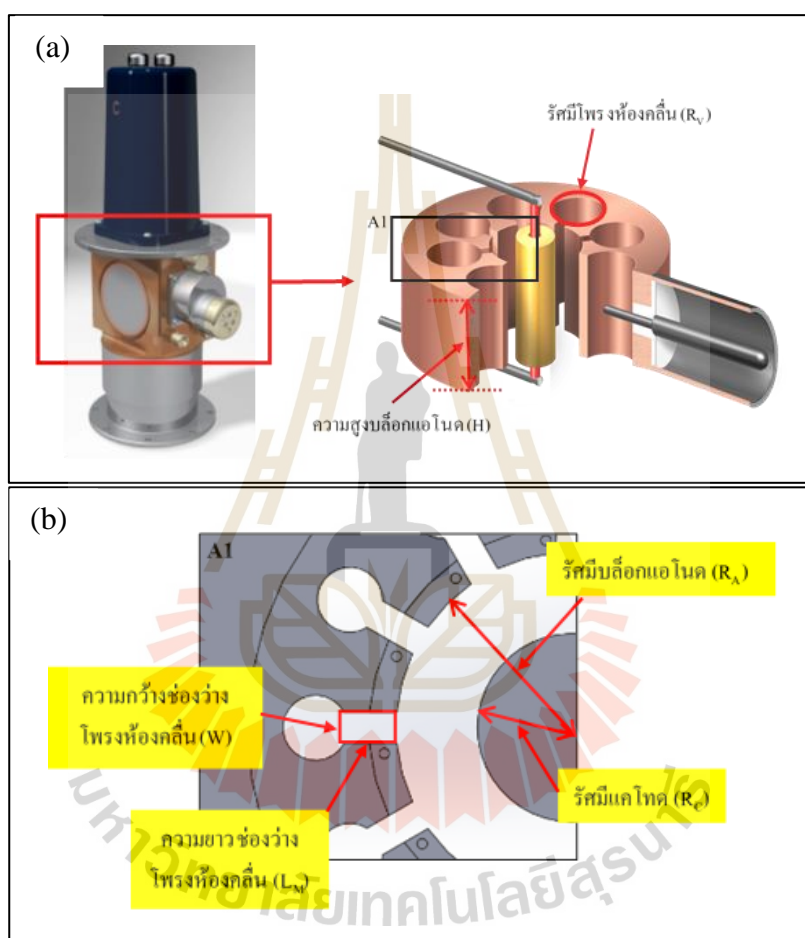
รูปที่ 3.20 เครื่องมือวัดขนาดพิกัดสามมิติและการวัดขนาด (CMM Mitutoyo Beyond 707)



รูปที่ 3.21 การเจาะแยกชิ้นส่วนแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot

ผลการใช้เครื่องมือวัดพิกัดสามมิติสำหรับโครงสร้างทางเรขาคณิตของแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot ที่มีโพรงของห้องคลื่นจำนวน 12 ห้อง โดยใช้เครื่องมือวัดตามจุดที่ต้องการทราบขนาดอย่างละเอียดและแม่นยำ ซึ่งหลักการวัดแต่ละส่วนของตัวแปรโครงสร้างภายในแมกนีตรอนจะใช้โพรงของเครื่องมือวัดแต่ละจุดในรูปทรงต่าง ๆ เช่น ทรงกลมหรือทรงสี่เหลี่ยม ให้ได้จุดอ้างอิง

มากที่สุดยิ่งจุดอ้างอิงมากจะทำให้ผลของการวัดแม่นยำมากที่สุด จากนั้นใช้โปรแกรม MiCAT (Mitutoyo Intelligent Computer Aided Technology) วิเคราะห์ผลของขนาด รูปทรง อย่างละเอียด และแม่นยำ ภายใต้คุณสมบัติของเครื่องมือวัดที่มีความละเอียด 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งการวัดขนาด แต่ละตัวแปรของโครงสร้างแมกนีตรอน (รูปที่ 3.22) ทำการวัด 3 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย โดยสรุปผล ตัวแปรทั้งหมด ดังตารางที่ 3.1 – 3.6



รูปที่ 3.22 รายละเอียดตัวแปร โครงสร้างภายในของแมกนีตรอน

ตารางที่ 3.1 ผลการวัดขนาดของตัวแปรรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)

ชุดข้อมูลที่	การวัดครั้งที่ 1	การวัดครั้งที่ 2	การวัดครั้งที่ 3
1	3.198	3.193	3.198
2	3.210	3.197	3.187
3	3.198	3.189	3.185

ตารางที่ 3.2 ผลการวัดขนาดของตัวแปรความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)

ชุดข้อมูลที่	การวัดครั้งที่ 1	การวัดครั้งที่ 2	การวัดครั้งที่ 3
1	4.958	4.955	4.957
2	4.957	4.956	4.956
3	4.956	4.959	4.958

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดขนาดของตัวแปรรัศมีบล็อกแอนโนด (R_A)

ชุดข้อมูลที่	การวัดครั้งที่ 1	การวัดครั้งที่ 2	การวัดครั้งที่ 3
1	17.024	17.051	17.025
2	17.012	17.022	17.022
3	17.021	17.011	17.021

ตารางที่ 3.4 ผลการวัดขนาดของตัวแปร ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W)

ชุดข้อมูลที่	การวัดครั้งที่ 1	การวัดครั้งที่ 2	การวัดครั้งที่ 3
1	3.089	3.089	3.087
2	3.088	3.090	3.089
3	3.089	3.091	3.088

ตารางที่ 3.5 ผลการวัดขนาดของตัวแปรความสูงบล็อกแอนโนด (H)

ชุดข้อมูลที่	การวัดครั้งที่ 1	การวัดครั้งที่ 2	การวัดครั้งที่ 3
1	32.794	32.799	32.798
2	32.803	32.805	32.798
3	32.806	32.804	32.802

ตารางที่ 3.6 ผลการวัดขนาดของตัวแปรรัศมีแคโทด (R_C)

ชุดข้อมูลที่	การวัดครั้งที่ 1	การวัดครั้งที่ 2	การวัดครั้งที่ 3
1	9.166	9.161	9.167
2	9.170	9.162	9.164
3	9.168	9.165	9.163

จากตารางที่ 3.1 - 3.6 เป็นผลการวัดขนาด โดยการใช้เครื่องมือวัดพิคตสามมิติ และใช้โปรแกรม MiCAT สำหรับการวิเคราะห์ผลของขนาด รูปทรง โครงสร้างภายในแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot ซึ่งหลักการวัด คือ วัดข้อมูลจำนวน 3 ชุดข้อมูล และแต่ละชุดข้อมูลวัดทั้งหมด 3 ครั้ง แล้วนำข้อมูลแต่ละตัวแปรมาหาค่าเฉลี่ย สรุปเป็นตารางตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปร ดังตารางที่ 3.7 โดยผลการวัดตัวแปรต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์หาจุดการทำงานของแมกนีตรอน เพื่อหาค่าแหล่งจ่ายแรงดันและสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมต่อไป

ตารางที่ 3.7 ขนาดโครงสร้างภายในของแมกนีตรอน ชนิด Twelve-Hole-Slot

ตัวแปร	ค่าเฉลี่ย (มิลลิเมตร)
Cavity radius (R_V)	3.195 ± 0.0125
Gap length (L_M)	4.957 ± 0.0020
Anode radius (R_A)	17.023 ± 0.02
Gap width (W)	3.089 ± 0.002
Height of Anode (H)	32.801 ± 0.006
Cathode radius (R_C)	9.165 ± 0.0045

3.4 การเกิดปฏิสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนและสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

การเกิดปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนและการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอนถูกระบุว่า มีการเคลื่อนที่ที่อยู่ในสนามสม่ำเสมอ เช่น สนามไฟฟ้า สนามแม่เหล็กหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยที่ควบคุมการเคลื่อนที่ของลำแสงอิเล็กตรอนในสนามมีความเกี่ยวข้องกับในระบบพิกัดแบบสามมิติ และการแก้ปัญหากรณีส่วนใหญ่จะมีรูปแบบที่ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นสิ่งที่ยากที่มักจะไม่สามารถระบุได้อย่างแน่นอน ในทางกลับกันยังมีอุปกรณ์ไมโครเวฟในปัจจุบันทั้งหมดที่มีการใช้สนามอย่างสม่ำเสมอ สำหรับพื้นฐานการปฏิสัมพันธ์ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ไมโครเวฟมีลักษณะการเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electron Motion in an Electromagnetic

Field) ที่ขึ้นอยู่กับทิศทางของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กทำมุมกัน 90 องศา โดยชนิดของสนามไฟฟ้า เรียกว่า Crossed field อนุภาคประจุอิเล็กตรอนที่ปล่อยออกมาจากแคโทดจะถูกร่งด้วยสนามไฟฟ้าและเพิ่มความเร็ว และมีเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในทิศทางโค้งงอ ด้วยสนามแม่เหล็ก จึงสรุปได้ว่าสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กมีอิทธิพลต่อประจุอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถอธิบายแรงที่กระทำกับประจุเนื่องจากสนามทั้ง 2 นี้ เรียกว่า “กฎของแรงลอเรนซ์ (Lorentz Force Law)” และวิเคราะห์สมการ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้าในระบบพิกัดทรงกระบอก

3.4.1 เงื่อนไขการเกิด Hull cut-off

การเกิดเงื่อนไข Hull cut-off จะเกิดขึ้นเมื่ออิเล็กตรอนมีการสัมผัสหรือเคลื่อนที่ไปยังส่วนของขั้ว Anode ทำให้ความเร็วในแนวรัศมีของขั้วเป็นศูนย์ และตั้งสมมติฐานของอิเล็กตรอนที่ออกจากขั้วแคโทด ที่ความเร็วเริ่มต้นเป็นศูนย์ ตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งสามารถอ้างอิงจากสมการที่ 3.34 และกำหนดเงื่อนไขดังกล่าวเป็นจุดขอบเขตบนของการกำหนดการทำงานของแมกนีตรอนที่เกิดการออกซิเลต ซึ่งในงานวิจัยสำหรับการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นเล็กใช้แมกนีตรอนโมเดล MG-7095 ที่มีลักษณะคุณสมบัติ ดังตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลจำเพาะของแมกนีตรอน ชนิด Twelve-Hole-Slot

No.	Description	Data
1	Frequency range at 40 degrees Celsius	2.993 – 3.002 GHz
2	Peak output power	3.1 MW
3	Permanent Magnet (B_{OC})	0.152 Tesla
4	Tuner revolution range	4.75 (3.22 – 8.22 mm)
5	Number of Cavity	12
6	Target Frequency	2.9982 GHz

จากสมการที่ 3.34

$$V_{OC} = \frac{e}{8m} (B_{OC})^2 (R_A)^2 \left(1 - \frac{R_C^2}{R_A^2}\right)^2$$

เมื่อ $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, 9.11×10^{-31} kg แทนค่าจะได้ $V_{OC} = 74.1234$ kV

3.4.2 เงื่อนไขการเกิดของฮาร์ตรี

เงื่อนไขของ Hartree ที่ออกแบบเพื่อควบคุมการทำงานของแมกนีตรอนจะเป็นตัวกำหนดขอบเขตล่างของการเกิดออสซิลเลชันของแมกนีตรอน ซึ่งเงื่อนไขของสมการฮาร์ตรี อ้างอิงจากสมการที่ 2.40 คือ

$$V_H = \frac{\omega_0 B}{2} (R_A^2 - R_C^2) - \frac{m}{2e} R_A^2 \omega_0^2$$

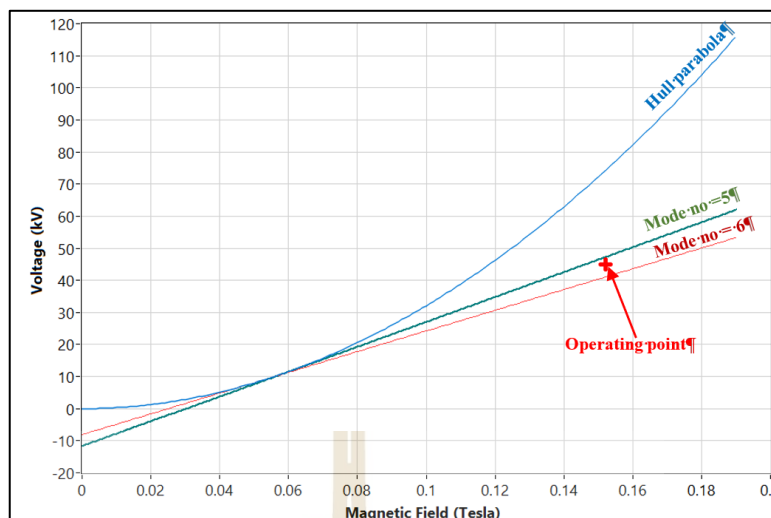
$$\text{เมื่อ } e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C และ } 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi(2.9982\text{GHz})}{6}$$

$$\text{แทนค่าจะได้ } V_H = 40.9716 \text{ kV}$$

3.5 การทำงานจุดที่เหมาะสมของระบบแมกนีตรอน

การหาจุดทำงานที่เหมาะสมของแมกนีตรอนชนิดโมเดล MG-7095 ที่มีจำนวนห้องคลื่น 12 ห้อง อาศัยแหล่งจ่ายที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ให้มีเสถียรภาพทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการวิเคราะห์จุดทำงานของแมกนีตรอน อันดับแรกพิจารณาถึงความเหมาะสมของค่าแหล่งจ่ายแรงดันศักย์ไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กถาวร โดยอาศัยหลักการทางทฤษฎี การเคลื่อนที่อิเล็กตรอนในรูปแบบพิกัดทรงกระบอกสามมิติ และพิจารณาถึงขนาดของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนที่วัดด้วยเครื่องมือวัดชิ้นงานในรูปแบบพิกัดสามมิติ (CMM) ที่มีความละเอียดในการวัด 0.5 μm ผลการวัดขนาดความละเอียดของรูปทรงเรขาคณิต จากโครงสร้างภายในของแมกนีตรอนที่แสดงดังตารางที่ 3.7 นำมาพิจารณาร่วมกับสมการขอบเขตย่านการทำงาน Hull cut-off condition, Hartree condition, และกำหนดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ 2.9982 GHz ผลการคำนวณเลือกใช้แรงดันและสนามแม่เหล็กที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการทำงานของแมกนีตรอนในโหมดพาย คือ 45.0 กิโลโวลต์ และ 0.152 เทสลา ดังกราฟแสดงผลรูปที่ 3.23 ซึ่งผลการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของแมกนีตรอนในโหมดพายสามารถนำไปประยุกต์เพื่อวิเคราะห์ถึงผลการเปลี่ยนแปลงต่อความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป



รูปที่ 3.23 ผลการคำนวณแรงดันแหล่งจ่ายที่เหมาะสมสำหรับแมกนีตรอน

3.6 การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองวงจรเรโซแนนซ์

การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot จะวิเคราะห์โดยอ้างอิงจากวงจรพาสซีฟ ที่ใช้งานวงจรเรโซแนนซ์ออสซิลเลเตอร์ ซึ่งทางทฤษฎีจะเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ วงจรเรโซแนนซ์แบบขนานและวงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม โดยในงานวิจัย แมกนีตรอนที่ทำการทดสอบ เทียบเท่ากับวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน ที่มีการดัดกำลังคลื่นไปใช้งานในรูปแบบชนิด การยื่นโพรมเพื่อดัดกำลังคลื่นหรือบ่วงครึ่งวงกลม เข้าไปในโพรงของห้องคลื่น และวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์จะมีวงจรสมมูลที่ต้องพิจารณาถึงตัวเทียบคาปาซิแตนซ์ และ ตัวเทียบเท่าอินดักแตนซ์

3.6.1 แบบจำลองวงจรเทียบเท่าคาปาซิแตนซ์

การพิจารณาส่วนของวงจรเทียบเท่าคาปาซิแตนซ์จะพิจารณาวงจรเทียบเท่าโครงข่ายในหนึ่งส่วน (Equivalent Network one-section) ที่อธิบายหลักการทำงานของแมกนีตรอนอย่างง่าย ตั้งแต่ การปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทดไปทำปฏิสัมพันธ์กับสนามในบริเวณพื้นผิวส่วนของบริเวณขั้วแอโนด (Interaction space) ซึ่งสามารถอ้างอิงจากสมการที่ 3.48 และ 3.49 จะได้สมการวงจรเทียบเท่าคาปาซิแตนซ์ ส่วนของพื้นที่ช่องว่างโพรงห้องคลื่น (C_1) และวงจรเทียบเท่าคาปาซิแตนซ์ ส่วนของพื้นที่ช่องว่างการเกิดปฏิสัมพันธ์ (C_{AK}) ดังต่อไปนี้

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 L_M H}{W}$$

$$C_{AK} = \frac{2\pi\epsilon_0 H}{N \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)} + \frac{\epsilon_0 HW}{R_A \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)}$$

3.6.2 แบบจำลองวงจรเทียบเท่าอินดักแตนซ์

การพิจารณาวงจรเทียบเท่าอินดักแตนซ์ของระบบแมกนีตรอนที่มีห้องคลื่น Resonant Cavity มีลักษณะรูปแบบ Hole-Slot จะพิจารณาลักษณะเหมือนกับสนามแม่เหล็กจากลวดตัวนำที่มีกระแสไหลผ่านวนรอบตัวนำแบบปิดซึ่งอ้างอิงจากกฎแอมแปร์ ซึ่งส่วนของโครงสร้างของแมกนีตรอน ที่เกี่ยวข้องกับค่าอินดักแตนซ์ พิจารณา 2 ส่วน คือ บริเวณทางเข้าห้องคลื่น เรโซแนนซ์ Slot Area และห้องคลื่นเรโซแนนซ์ (Resonant Cavity) ซึ่งสามารถอธิบายด้วยสมการที่ 3.50 จะได้

$$L = \frac{\mu_0}{2H} \left(\frac{R_V}{12} + WL_M \right)$$

จากการวิเคราะห์ห้วงจรเทียบเท่าทั้ง 2 ส่วนของระบบแมกนีตรอนในสภาวะการเกิดเรโซแนนซ์จะมีค่าแอมิตแตนซ์เท่ากันทั้งสองส่วน ทำให้สามารถยุบรวมวงจรทั้งสองส่วนเพื่อพิจารณาค่าเรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นและสามารถนำสมการที่ 3.51 ที่เป็นวงจรเทียบเท่าอย่างง่ายของแมกนีตรอนที่พิจารณา เพื่อคำนวณค่าเรโซแนนซ์แต่ละโหมดการทำงานได้ดังสมการ

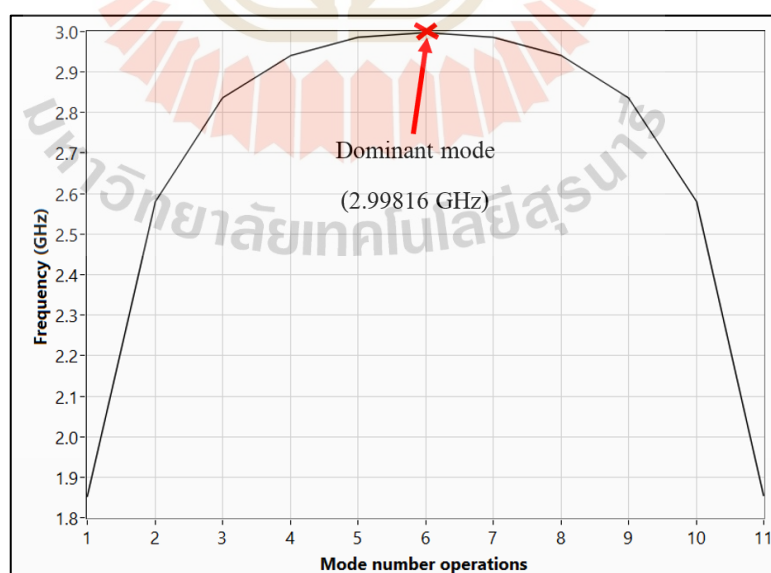
$$f_R(n) = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{\mu_0}{2H} \left(\frac{R_V}{12} + WL_M \right) \left(\frac{\epsilon_0 L_M H}{W} \right) \left(1 + \frac{\frac{2\pi\epsilon_0 H}{N \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)} + \frac{\epsilon_0 HW}{R_A \ln\left(\frac{R_A}{R_C}\right)}}{\left(\frac{2\epsilon_0 H L_M}{W} \right) \left(1 - \cos \frac{2\pi n}{N} \right)} \right)}}$$

จากสมการการหาความถี่เรโซแนนซ์แต่ละโหมดการทำงานของแมกนีตรอน ผลการวิเคราะห์แมกนีตรอนด้วยวงจรสมมูลเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนานหนึ่งโครงข่าย เมื่อพิจารณาขนาดโครงสร้างภายในแมกนีตรอนร่วมกับการพิจารณาจากหลักการการเกิดสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ในบริเวณพื้นที่ภายในโครงสร้างอุปกรณ์ผลการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์ แต่ละโหมดการทำงาน ตั้งแต่โหมด ที่ 1 ถึงโหมดที่ 11 มีผลของค่าความถี่เรโซแนนซ์

จุดสูงสุดอยู่ในโหมดที่ 6 หรือโหมดพายมีค่าเท่ากับ 2.99816 GHz ซึ่งผลความถี่เรโซแนนซ์แต่ละโหมด สรุปลงเป็นข้อมูลตามตารางที่ 3.9 และแสดงผลเป็นรูปภาพที่ 3.24

ตารางที่ 3.9 ผลการคำนวณแต่ละโหมดของการทำงานแมกนีตรอน

โหมดการทำงาน	ความถี่ (GHz)
1	1.85180
2	2.58115
3	2.83755
4	2.94163
5	2.98571
6 (π -mode)	2.99816
7	2.98571
8	2.94163
9	2.83755
10	2.58115
11	1.85180



รูปที่ 3.24 ผลการคำนวณความถี่เรโซแนนซ์แต่ละโหมดการทำงาน

3.7 การวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ด้วยเทคนิค Particle-In-Cell

การออกแบบชิ้นงานและการวิเคราะห์พฤติกรรมของอนุภาคที่มีประจุในการเคลื่อนที่ผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ปืนอิเล็กตรอน หลอดรังสีแคโทด แมกนีตรอน เป็นต้น สนามแม่เหล็กไฟฟ้าของโครงสร้างชิ้นส่วนอุปกรณ์ต่าง ๆ ของระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ขนาด 6 MeV จะมีเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์พลวัตของอนุภาคที่มีประจุ ในระบบพิกัดสามมิติ ได้ โดยโปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิค Particle-In-Cell ซึ่งการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ในส่วนนี้ จะใช้หลักการวัดขนาดของโครงสร้างทางกายภาพของแมกนีตรอน แบบสามมิติ ด้วยเครื่องมือที่มีความละเอียด และมีส่วนเผื่อของความผิดพลาดน้อย และกำหนดความเหมาะสมของแหล่งจ่ายแรงดัน และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้แมกนีตรอนมีการทำงานในโหมดที่โดดเด่นที่สุด โดยผลการวัดและการคำนวณ ที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3.4 และ 3.5 ตามลำดับ พร้อมทั้งกำหนดชนิดของวัสดุที่พิจารณา เช่น ทองแดงอบอ่อน วัสดุที่มีตัวนำทางไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect Electric Conductor; PEC) และพื้นที่ที่เป็นสุญญากาศ (Vacuum) เป็นต้น เพื่อใช้ตัวแปรดังกล่าวเป็นองค์ประกอบในการจำลองผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ของระบบ ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์พลวัตทางไดนามิกของประจุอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ที่เป็นสุญญากาศ ด้วยโปรแกรม CST particle studio ซึ่งองค์ประกอบของแมกนีตรอนที่นำมาวิเคราะห์ มีรายละเอียดดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 องค์ประกอบการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน

ลำดับ	รายละเอียด	ผลลัพธ์
1	บล็อกรอแอนด์	ทองแดงอบอ่อน
2	แคโทด	PEC
3	พื้นที่ปฏิสัมพันธ์	Vacuum
4	ชุดสเตรปป์ริง	PEC
5	ชุดขับเคลื่อนโพรงห้องคลื่น (T _{SLOT})	PEC
6	แรงดันแหล่งจ่าย	45 kV
7	สนามแม่เหล็ก	0.152 Tesla

จากตารางที่ 3.10 เป็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการออกแบบและวัดขนาดรูปทรงเรขาคณิตจากโครงสร้างภายในของอุปกรณ์จริงเพื่อนำไปใช้กับการจำลอง ซึ่งการทำงานของแมกนีตรอนในโหมดพายมีฟังก์ชันที่สามารถปรับจูนความถี่ได้ โดยการปรับระยะช่องว่างของโครงสร้างแมกนีตรอนผ่านตัวขับเคลื่อนทางกลขยับเข้าและออกด้วยมอเตอร์แบบสแต็ปป์

โดยมีระยะขอบเขตที่สามารถปรับได้ที่ 7 mm หรือตั้งแต่ 2.22 ถึง 9.22 mm ซึ่งการจำลอง พิจารณา รูปแบบโมเดลของการกระจายประจุอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิด (Explosive emission model) ที่สามารถตั้งค่าผ่าน โปรแกรม CST particle studio โดยรูปแบบการกระจายตัวของอิเล็กตรอน พิจารณาด้วยค่าเริ่มต้นพลังงานจลน์ 3 eV ความหนาแน่นของการปลดปล่อยที่ 1,056 จุด ระยะเวลา การจำลองระบบที่ 150 ns และกำหนดเวลาขาขึ้น (Rise time) เท่ากับ 1 ns นอกจากนี้การจำลอง บนโปรแกรมสามารถที่จะระบุชนิดของวัสดุบนส่วนประกอบต้นแบบได้ เช่น บล็อกแอสไนต์ กำหนดเป็นวัสดุทองแดงอ่อน, ซิวแคโทดกำหนดเป็นวัสดุที่มีความนำทางไฟฟ้าอย่างสมบูรณ์ และกำหนดพื้นที่ทำปฏิกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสนามเป็น สภาพสุญญากาศ เป็นต้น ซึ่งการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ด้วยโปรแกรมจะต้องทำการตั้งค่าทุกครั้งก่อนการจำลองผล คือ การปรับคุณสมบัติของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับอุณหภูมิ โดยการกำหนดค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า ของวัสดุแต่ละชนิด

3.8 อุณหภูมิและความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของแมกนีตรอน

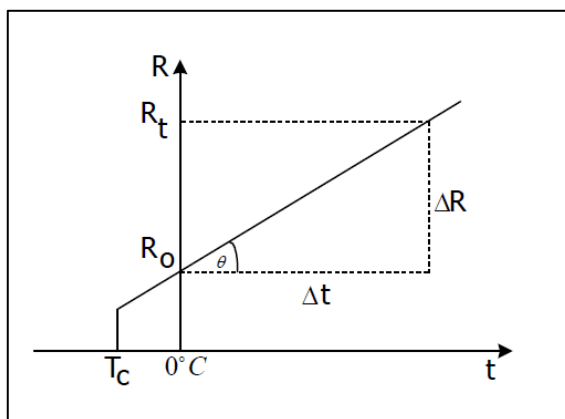
การเคลื่อนที่ของประจุในตัวนำใด ๆ จะมีภาวะของการต้านทานการเคลื่อนที่ของประจุ ซึ่งอาจจะเกิดจากการชนกันของตัวนำพาหะทางไฟฟ้าและวัตถุแต่ละชนิดก็จะมีคุณสมบัติ การต้านทานการเคลื่อนที่ของประจุแตกต่างกัน โดยจะเรียกคุณสมบัติของความต้านทาน การเคลื่อนที่ของประจุหรือการไหลของกระแสว่าความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โอห์ม ซึ่งความต้านทานไฟฟ้าในวัตถุใด ๆ จะมีค่าแปรผันตามความยาว (L) ของตัวนำและแปรผกผัน กับพื้นที่หน้าตัด (A) ที่กระแสไหลผ่านตามสมการที่ 3.58

$$R \propto \frac{L}{A}$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.58)$$

เมื่อ ρ คือ สภาพต้านทานทางไฟฟ้า (Electrical resistivity)

และตัวนำทางไฟฟ้าที่มีความต้านทานจะมีค่าแปรผันตามอุณหภูมิของตัวนำชนิดนั้น ๆ ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความต้านทานของวัตถุจะสูงขึ้นตามไปด้วย และแปรผันตามอุณหภูมิเป็น แบบเชิงเส้น ดังรูปกราฟที่ 3.25



รูปที่ 3.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุตัวนำที่อุณหภูมิต่าง ๆ

จากรูปที่ 3.25 เมื่อพิจารณาความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิจะพบว่า กราฟความสัมพันธ์มีการเปลี่ยนแปลงเป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$R_t = R_0 + (\tan \theta)t$$

เมื่อ $\tan \theta = \frac{\Delta R}{\Delta t}$ แทนค่าในสมการจะได้

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (3.59)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความต้านทานไฟฟ้า

(Temperature coefficient, Kelvin⁻¹)

การพิจารณาความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electrical conductivity, σ) และสภาพต้านทานทางไฟฟ้า (ρ) ของวัสดุ โครงสร้างตัวอย่างร่วมกับการรบกวนของอุณหภูมิโดยรอบ (Ambient Temperature, 20°C) สามารถใช้การประมาณค่าด้วยเทคนิคทางเชิงเส้นได้ ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิโดยรอบไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากเกินไป ดังนั้นสมการของการคำนวณ ค่าเหนี่ยวนำ และสภาพความต้านทานทางไฟฟ้าสามารถคำนวณ โดยการประยุกต์ใช้จากสมการที่ 3.59 ได้ดังต่อไปนี้

$$\sigma = \sigma_{20}(1 + \alpha_{20}(\Delta T)) \quad (3.60)$$

$$\text{เมื่อ } \sigma = \frac{1}{\rho}$$

σ = The electrical conductivity at temperature

σ_{20} = The conductivity at ambient temperature 20°C

T = The target temperature

จากสมการที่ 3.60 การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำหรือค่าความต้านทานทางไฟฟ้าร่วมกับการพิจารณา การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยรอบสิ่งที่จะต้องพิจารณาก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานหรือความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป ซึ่งค่าที่เปลี่ยนไปมีความแตกต่างกันตามลักษณะทางคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุ ถ้าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากเกินไป และค่าผลคูณระหว่างความแตกต่างอุณหภูมิกับค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของวัตถุน้อยกว่า 1 มาก ๆ จะส่งผลให้การวิเคราะห์ด้วยการประมาณค่าเชิงเส้นหรือการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีผลที่เพียงพอต่อแนวทางการวิเคราะห์ข้อมูลคุณสมบัติของวัตถุที่ต้องการอย่างแม่นยำมากขึ้น เช่น การคำนวณค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของทองแดงอบอ่อน (Annealed copper) เมื่อค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของทองแดงที่ 20 องศา คือ $0.00393 \text{ Kelvin}^{-1}$ และค่าความต้านทานทางไฟฟ้าของทองแดง ที่ 20 องศา คือ $1.72 \times 10^{-8} \text{ } \Omega\text{m}$

จากสมการที่ 3.60

$$\sigma = \sigma_{20} (1 + \alpha_{20} (T - 20))$$

แทนค่าในสมการจะได้

$$\sigma = \frac{1}{1.72 \times 10^{-8}} (1 + 0.00393 (20 - 20))$$

$$\sigma = 5.81395 \times 10^7 \text{ S/m}$$

เมื่อระบบที่ 40°C จากสมการที่ 3.60

$$\sigma = \sigma_{20} (1 + \alpha_{20} (T - 20))$$

$$\text{แทนค่าในสมการ } \sigma = \frac{1}{1.72 \times 10^{-8}} (1 + 0.00393(40 - 20))$$

$$\sigma = 5.39028 \times 10^7 \text{ S/m}$$

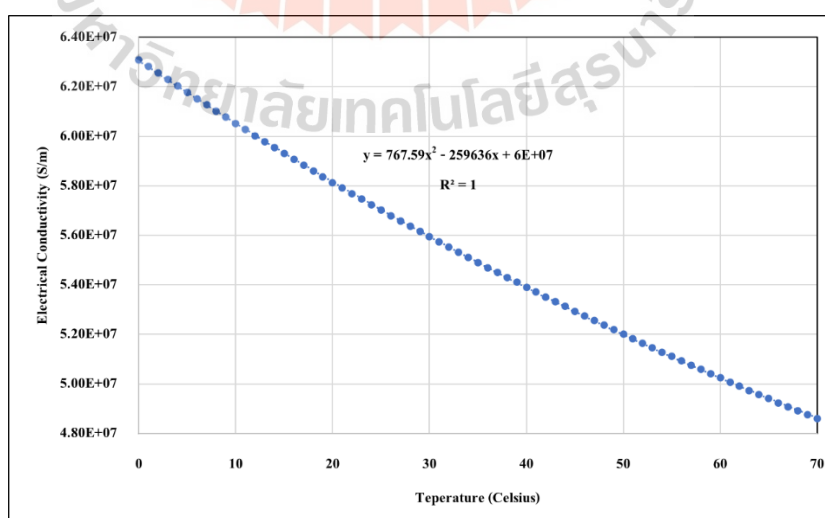
จากสมการที่ 3.60 สามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของวัสดุที่ต้องการ โดยแทนค่าอุณหภูมิของวัสดุในสมการค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุและค่าความต้านทานไฟฟ้าของวัสดุ ที่อุณหภูมิโดยรอบมาตรฐาน 20°C ซึ่งผลการคำนวณช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 70°C แสดงดังตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ผลการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้วยสมการประมาณค่าเชิงเส้น

At temp	rho	sigma	At temp	rho	sigma
0	1.58481E-08	6.30991E+07	28	1.77408E-08	5.63673E+07
1	1.59157E-08	6.28311E+07	29	1.78084E-08	5.61534E+07
2	1.59833E-08	6.25654E+07	30	1.78760E-08	5.59411E+07
3	1.60509E-08	6.23019E+07	31	1.79436E-08	5.57303E+07
4	1.61185E-08	6.20407E+07	32	1.80112E-08	5.55212E+07
5	1.61861E-08	6.17816E+07	33	1.80787E-08	5.53136E+07
6	1.62537E-08	6.15246E+07	34	1.81463E-08	5.51075E+07
7	1.63213E-08	6.12698E+07	35	1.82139E-08	5.49030E+07
8	1.63888E-08	6.10171E+07	36	1.82815E-08	5.47000E+07
9	1.64564E-08	6.07665E+07	37	1.83491E-08	5.44985E+07
10	1.65240E-08	6.05179E+07	38	1.84167E-08	5.42985E+07
11	1.65916E-08	6.02713E+07	39	1.84843E-08	5.40999E+07
12	1.66592E-08	6.00268E+07	40	1.85519E-08	5.39028E+07
13	1.67268E-08	5.97842E+07	41	1.86195E-08	5.37071E+07
14	1.67944E-08	5.95436E+07	42	1.86871E-08	5.35128E+07
15	1.68620E-08	5.93049E+07	43	1.87547E-08	5.33199E+07
16	1.69296E-08	5.90681E+07	44	1.88223E-08	5.31285E+07
17	1.69972E-08	5.88332E+07	45	1.88899E-08	5.29383E+07
18	1.70648E-08	5.86001E+07	46	1.89575E-08	5.27496E+07
19	1.71324E-08	5.83689E+07	47	1.90251E-08	5.25622E+07

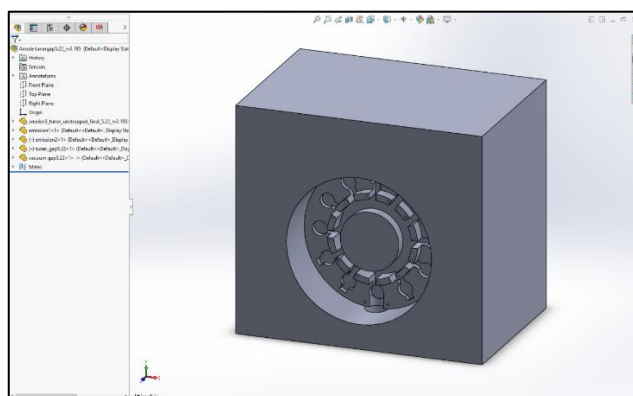
ตารางที่ 3.11 ผลการคำนวณค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าด้วยสมการประมาณค่าเชิงเส้น (ต่อ)

At temp	rho	sigma	At temp	rho	sigma
20	1.72000E-08	5.81395E+07	48	1.90927E-08	5.23761E+07
21	1.72676E-08	5.79119E+07	49	1.91603E-08	5.21913E+07
22	1.73352E-08	5.76861E+07	50	1.92279E-08	5.20078E+07
23	1.74028E-08	5.74621E+07	51	1.92955E-08	5.18256E+07
24	1.74704E-08	5.72397E+07	52	1.93631E-08	5.16447E+07
25	1.75380E-08	5.70191E+07	53	1.94307E-08	5.14650E+07
26	1.76056E-08	5.68002E+07	54	1.94983E-08	5.12866E+07
27	1.76732E-08	5.65829E+07	55	1.95659E-08	5.11094E+07
56	1.96335E-08	5.09335E+07	64	2.01742E-08	4.95682E+07
57	1.97011E-08	5.07587E+07	65	2.02418E-08	4.94027E+07
58	1.97686E-08	5.05851E+07	66	2.03094E-08	4.92382E+07
59	1.98362E-08	5.04128E+07	67	2.03770E-08	4.90749E+07
60	1.99038E-08	5.02416E+07	68	2.04446E-08	4.89127E+07
61	1.99714E-08	5.00715E+07	69	2.05122E-08	4.87515E+07
62	2.00390E-08	4.99026E+07	70	2.05798E-08	4.85913E+07
63	2.01066E-08	4.97348E+07			



รูปที่ 3.26 ผลการตอบสนองค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ

จากรูปที่ 3.26 เป็นผลการประมาณค่ากราฟ ด้วยฟังก์ชัน Fitting curve ของโปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งทำการประมาณ Linear model ด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ และความเหนียวทางไฟฟ้า ของวัสดุ โครงสร้างในรูปแบบของสมการ โพลีโนเมียลอันดับที่ 2 $f(x) = 767.59x^2 - 259636x + 6x10^7$ และมีความแม่นยำของสมการอยู่ที่ $R = 1$ และเมื่อวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงระหว่าง ความต้านทานทางไฟฟ้าของวัสดุเทียบกับแต่ละอุณหภูมิต่อไปเป็นการพิจารณาถึงความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของการปรับระยะการปรับจูน โดยคงค่าขนาดของตัวแปรของรูปทรงเรขาคณิตของอุปกรณ์ จากการใช้เครื่องมือวัดขนาดอย่างละเอียดทางสามมิติ หรือ CMM ซึ่งผลการวัดขนาดโครงสร้างภายในของแมกนีตรอน แสดงดังตารางที่ 3.7 และอธิบายถึงขั้นตอนการวัดในหัวข้อที่ 3.3 จากนั้นนำค่าตัวแปร มาวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ทางไดนามิกของ ประจุอิเล็กตรอน ภายในแมกนีตรอน ที่มีชนิดของโครงสร้างบล็อกเอโนดเป็นแบบ Twelve-Hole-Slot-Type และเคลื่อนที่ภายในอุปกรณ์ภายใต้อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนในโหมดพาย ด้วยการเลือกใช้โปรแกรม CST particle studio ร่วมกับการใช้เทคนิควิธีของ Particle-In-Cell simulation ซึ่งการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่เกิดจากอุปกรณ์ที่ออกแบบจะต้องออกแบบ โมเดล พิกัดสามมิติ ที่มีขนาดโครงสร้างที่ตรงตามขนาด ซึ่งสามารถออกแบบโมเดลบนโปรแกรม CST หรือนำเข้าจากโปรแกรมภายนอก เช่น SolidWorks เป็นต้น โดยผลการแสดงรูปแบบ โมเดลสามมิติ ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks แสดงดังรูปที่ 3.27 และกำหนดตัวขนาดแต่ละตัวแปรของ โครงสร้างภายในแมกนีตรอนร่วมกับการกำหนดการทำงานของแมกนีตรอนในโหมดพายด้วยแรงดันที่และความเข้มของสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม ซึ่งได้อธิบายหลักการคำนวณไว้ในหัวข้อ 3.4 และ 3.5 พร้อมทั้งสรุปผลของตัวแปรที่สำคัญเพื่อการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ ดังตารางที่ 3.12

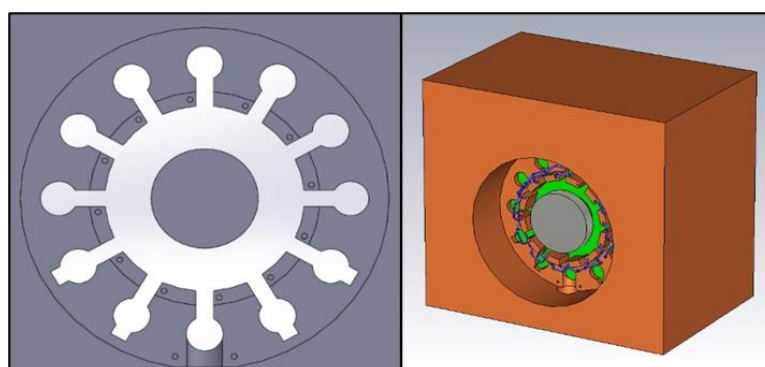


รูปที่ 3.27 การออกแบบโมเดลสามมิติ ด้วยโปรแกรม SolidWorks

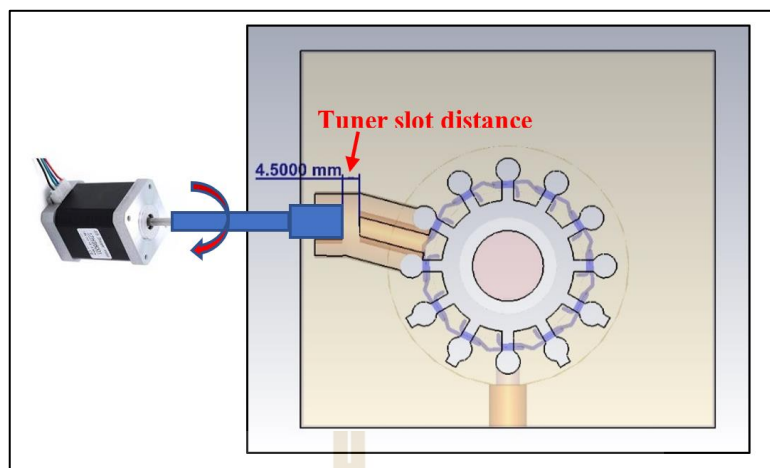
ตารางที่ 3.12 พารามิเตอร์ที่ใช้ร่วมกับโปรแกรม CST particle studio

รายละเอียด	ค่าที่กำหนด
Target Frequency	2.9982 GHz
แรงดันแหล่งจ่าย (V_{OC})	45 kV.
ความเข้มสนามแม่เหล็ก (B_{OC})	0.152 T.
Cavity radius (R_V)	3.195 ± 0.0125 mm
Gap length (L_M)	4.957 ± 0.0020 mm
Anode radius (R_A)	17.023 ± 0.02 mm
Gap width (W)	3.089 ± 0.002 mm
Height of Anode (H)	32.801 ± 0.006 mm
Cathode radius (R_C)	9.165 ± 0.0045 mm
Tuner gap distance (T_{SLOT})	2.22 – 9.22 mm

จากตารางที่ 3.12 การจำลองผลความถี่เรโซแนนซ์จะมีอีก 1 ตัวแปร ที่พิจารณาร่วมกับโครงสร้างสามมิติ คือ การปรับระยะพื้นที่โพรงห้องคลื่น (T_{SLOT}) ด้วยการติดตั้งชุดขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ที่สามารถปรับระยะได้ถึง 7 mm ซึ่งจะมีผลทำให้ความถี่มีการเปลี่ยนแปลงตามสัดส่วนของระยะการปรับ โดยรูปแบบโครงสร้างของแมกนีตรอนที่มีการปรับแตงั้น อธิบายด้วยรูปภาพโครงสร้างภายในของแมกนีตรอน ดังรูปที่ 3.28 และ 3.29 และแสดงผลการจำลองโปรแกรมด้วยความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่มีผลเกี่ยวข้องกับอุณหภูมิบนผิวของแมกนีตรอน พร้อมทั้งทำการปรับจูนความถี่ด้วย T_{SLOT} แต่ละตำแหน่ง ผลการจำลองสรุปเป็นตารางที่ 3.13 และกราฟแสดงผลรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.28 แบบจำลองสามมิติของแมกนีตรอน Hole-Slot-Type บนโปรแกรม CST particle studio



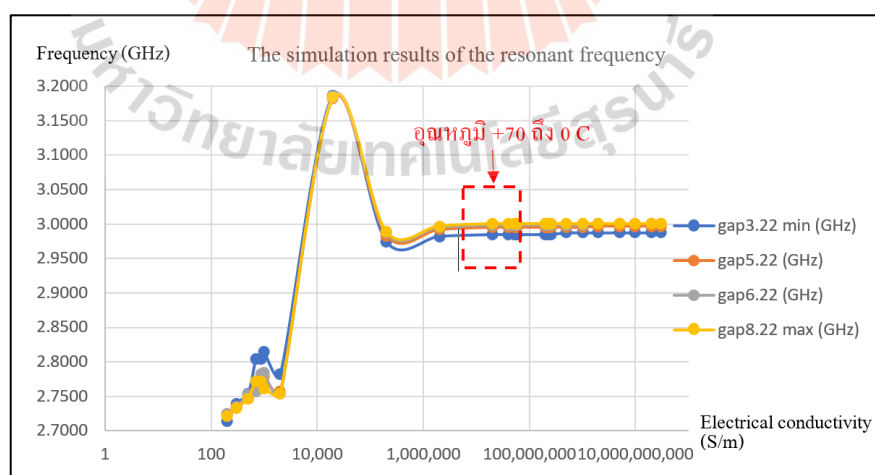
รูปที่ 3.29 โครงสร้างภายในชุดแมกนีตรอนที่สามารถปรับค่าระยะพื้นที่โพรงห้องคลื่น (T_{SLOT})

ตารางที่ 3.13 ผลการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม CST particle studio

Electric conductivity (s/m)	Gap 3.22 mm (GHz)	Gap 5.22 mm (GHz)	Gap 6.22 mm (GHz)	Gap 8.22 mm (GHz)
200	2.7145	2.7237	2.7237	2.7220
300	2.7395	2.7354	2.7354	2.7337
500	2.7544	2.7470	2.7520	2.7470
700	2.8044	2.7604	2.7570	2.7720
900	2.8044	2.7770	2.7820	2.7720
1,000	2.8144	2.7787	2.7837	2.7620
2,000	2.7819	2.7570	2.7537	2.7537
20,000	3.1869	3.1821	3.1838	3.1838
200,000	2.9744	2.9837	2.9871	2.9887
2,000,000	2.9819	2.9921	2.9954	2.9971
20,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
40,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
53,900,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
54,300,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004

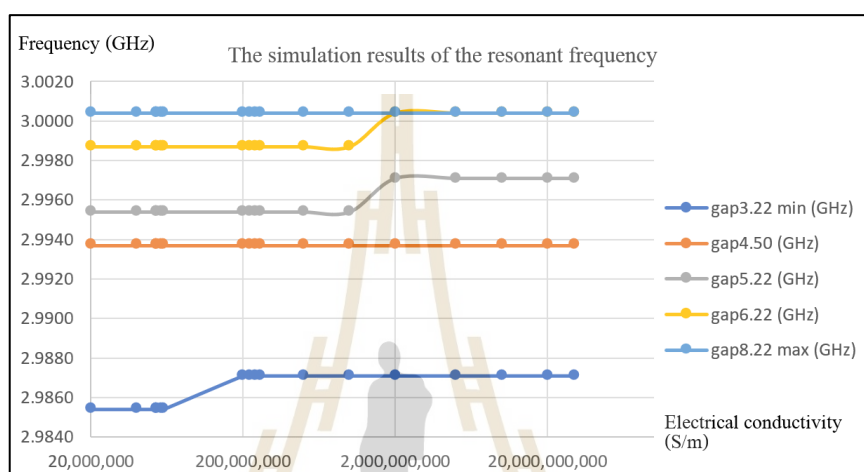
ตารางที่ 3.13 ผลการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยโปรแกรม CST particle studio (ต่อ)

Electric conductivity (s/m)	Gap 3.22 mm (GHz)	Gap 5.22 mm (GHz)	Gap 6.22 mm (GHz)	Gap 8.22 mm (GHz)
58,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
60,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
200,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
220,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
240,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
260,000,000	2.9844	2.9954	2.9987	3.0004
500,000,000	2.9869	2.9954	2.9987	3.0004
1,000,000,000	2.9869	2.9954	2.9987	3.0004
2,000,000,000	2.9869	2.9971	3.0004	3.0004
5,000,000,000	2.9869	2.9971	3.0004	3.0004
10,000,000,000	2.9869	2.9971	3.0004	3.0004
20,000,000,000	2.9869	2.9971	3.0004	3.0004
30,000,000,000	2.9869	2.9971	3.0004	3.0004



รูปที่ 3.30 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์เมื่อเปลี่ยนแปลง ค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้า

จากรูปที่ 3.30 แสดงผลตอบสนองของความถี่เรโซแนนซ์ที่มีลักษณะเป็นรูปแบบผล การตอบสนองระบบอันดับที่ 2 (Second order system) แต่เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นหรือที่ เป็นไปได้ของการทดลองจริงจะอยู่ที่ประมาณ 0 - 70 องศาเซลเซียส หรือประมาณความเหนียวนำ ทางไฟฟ้าที่ $20 \times 10^6 - 30,000 \times 10^6$ S/m ซึ่งผลการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ในช่วงดังกล่าวแสดงผล เป็นรูปกราฟ ได้ดังรูปที่ 3.31



รูปที่ 3.31 ผลการตอบสนองค่าความถี่เรโซแนนซ์เมื่อพิจารณาอุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาจากผลตอบสนองของความถี่เรโซแนนซ์ต่ออุณหภูมิ เมื่อการทดลองระบบ ควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น สามารถที่จะควบคุมอุณหภูมิโดยรอบให้มีค่าคงที่หรือมี การเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย การคำนวณด้วยโปรแกรมสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์บางตัวให้ เป็นค่าคงที่ได้ คือ ค่าเหนียวนำทางไฟฟ้า (Electrical conductivity, σ) มีค่าเท่ากับ 5.8×10^{-7} S/m ถ้าอุณหภูมิโดยรอบมีค่าประมาณ 20°C

3.9 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการศึกษาและวิเคราะห์การทำงานของแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot ที่มี จำนวนโพรงของห้องคลื่น 12 ห้อง โดยใช้เทคนิควิศวกรรมย้อนรอย ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์ เริ่มต้นจากการศึกษา การจำลองการเคลื่อนที่ประจุอิเล็กตรอน ภายในโครงสร้างแมกนีตรอน ที่เคลื่อนที่อยู่รอบ ๆ แกนแคโทดของแมกนีตรอนด้วยอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งผล การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์ที่เป็นสูญญากาศ ทำให้ได้ผลของความถี่ เรโซแนนซ์ จากแมกนีตรอนสามารถนำไปประยุกต์กับการออกแบบการทำงานของแมกนีตรอน

ในโหมคพาย โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์จาก 2 กฎเงื่อนไข เพื่อสร้างขอบเขตของการเกิดออสซิเลต คือ เงื่อนไขของ Hull cut-off และเงื่อนไขของฮาร์ทรีให้ผลของตัวแปรที่เหมาะสมของการทำงาน แมกนีตรอนประกอบด้วย แหล่งจ่ายไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก จากนั้นใช้ผลที่ได้ ร่วมกับการกำหนดขนาดของตัวแปรของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนจำนวน 6 ตัวแปร โดยใช้เครื่องมือวัดพิกัดสามมิติที่มีฟังก์ชันการวิเคราะห์ เหน้ท้ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ (GD&T) ไปประมาณหาค่าความถี่เรโซแนนซ์ โดยการออกแบบการจำลองทางคณิตศาสตร์จำนวน 2 วิธี คือ การประมาณความถี่ โดยอาศัยวงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน และแบบจำลองสามมิติ ที่ใช้เทคนิค PIC บน โปรแกรม CST particle studio ที่สามารถกำหนดคุณสมบัติของวัสดุให้กับแมกนีตรอน และอุณหภูมิที่มีผลต่อวัสดุต่าง ๆ ได้ ซึ่งผลการวิเคราะห์การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ทั้ง 2 วิธี จะทำการเปรียบเทียบผลต่างการทำงานของแมกนีตรอนในโหมคพาย ต่อไป

บทที่ 4

ผลการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน

4.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยเพื่อวิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอน ชนิด Twelve-Hole-Slot ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ด้วยการใช้เทคนิควิศวกรรมย้อนรอยที่ใช้เครื่องมือวัดขนาดรูปทรงของโครงสร้างภายในของแมกนีตรอนในรูปแบบพิกัดสามมิติ เพื่อให้ได้ผลขนาดของตัวแปร ทั้ง 6 ตัวแปร ซึ่งได้อธิบายขั้นตอนการหาค่าตัวแปรไว้ในบทที่ 3 จากนั้นนำตัวแปรไปวิเคราะห์ถึงผลการตอบสนองของการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์ผลความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนาน และแบบจำลองสามมิติ ด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell simulation บนโปรแกรม CST particle studio โดยในบทนี้จะกล่าวถึงการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อการพิจารณาความถี่ของแต่ละตัวแปรที่จำลองบนโปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิควิธีของ PIC simulation ซึ่งผลการจำลองความถี่เรโซแนนซ์จะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากรูปแบบโมเดลทางคณิตศาสตร์ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 3 จากนั้นวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความถี่ต่อค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนที่ตำแหน่งพื้นที่โพรงห้องคลื่นที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ 2.9982 GHz ลำดับถัดไป วิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย โดยการปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่น ด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ของตัวแปร จำนวน 2 ตัวแปร ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด ซึ่งเนื้อหาในบทนี้จะแสดงผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์หลายรูปแบบ เช่น แสดงผลกราฟความถี่เรโซแนนซ์สูงสุด แต่ละระยะการปรับจูนชุดขับเคลื่อน สำหรับการปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่น และแสดงความสัมพันธ์ความถี่เรโซแนนซ์จุดต่ำสุดและสูงสุด เพื่อหาตำแหน่งของพื้นที่การปรับจูนที่ทำให้แมกนีตรอนทำงานที่ความถี่เรโซแนนซ์และแสดงถึงช่วงขอบเขตของความถี่เรโซแนนซ์ที่สามารถปรับจูนได้ภายใต้การออกแบบระบบแมกนีตรอนที่กำหนด โดยใช้หลักการของความถี่ตัวแปรที่พิจารณาไม่เกิน $\pm 50 \mu\text{m}$

4.2 ข้อกำหนดชนิดพารามิเตอร์ของระบบแมกนีตรอน

การหาจุดการทำงานที่เหมาะสมของแมกนีตรอนชนิด Hole-Slot โมเดล MG-7095 ที่มีจำนวนห้องคลื่น 12 ห้อง อาศัยแหล่งจ่ายที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของอุปกรณ์ให้มีเสถียรภาพทำงานได้อย่างต่อเนื่อง ซึ่งการวิเคราะห์จุดทำงานของแมกนีตรอนในโหมดพวย ทำการคำนวณหาค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 โดยตัวแปรที่วิเคราะห์นี้จะเป็นตัวแปรหนึ่งที่ต้องป้อนค่าอินพุตให้กับโปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์และสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณา คือ ตัวแปร โครงสร้างภายในแมกนีตรอน ที่วัดด้วยเครื่องมือวัดอย่างละเอียดในรูปแบบพิกัดสามมิติ (CMM) ที่มีความละเอียดในการวัด $0.5 \mu\text{m}$ ซึ่งข้อกำหนดของตัวแปรแมกนีตรอน แสดงผลการวัดขนาดอย่างละเอียด ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบตัวแปรสำหรับการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์

ตัวแปร	ขนาด (mm)
Cavity radius (R_V)	3.195 ± 0.0125
Gap length (L_M)	4.957 ± 0.0020
Anode radius (R_A)	17.023 ± 0.02
Gap width (W)	3.089 ± 0.002
Height of Anode (H)	32.801 ± 0.006
Cathode radius (R_C)	9.165 ± 0.0045
Tuner slot distance (T_{SLOT})	2.22 – 9.22

4.3 การจำลองระบบและเก็บข้อมูล

การจำลองเพื่อการประมาณความถี่เรโซแนนซ์สำหรับแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot ด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell บนโปรแกรม CST particle studio ร่วมกับการพิจารณาค่าพิกัดความถี่ของตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปร ที่มีขนาดรูปทรงเรขาคณิต โดยใช้ชุดเครื่องมือวัดพิกัดสามมิติ (Coordinate Measuring Machine; CMM) เป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดขนาดรูปทรงเรขาคณิตและมีฟังก์ชันวิเคราะห์ผลการวัดตอบสนองลักษณะของชิ้นงานที่เป็นไปตามเกณฑ์ความคลาดเคลื่อนทางเรขาคณิตและมิติ (Geometry Dimensional and Tolerancing; GD&T) และมีคุณสมบัติของการวัดที่มีความละเอียดถึง 0.5 ไมโครเมตร ซึ่งการวิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนที่มีผลต่อการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพวย ในงานวิจัยจะทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีศึกษาที่ 1 การวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ โดยประยุกต์ใช้ทั้ง 2 วิธีของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และเปรียบเทียบผลต่าง โดยพิจารณาผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ จากการกำหนดค่าพิถีพิถันของตัวแปร รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_v) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่มีช่วงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$

กรณีศึกษาที่ 2 การวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ โดยประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองสามมิติบนโปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิควิธีของ PIC simulation เพื่อหาผลการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ ต่อค่าพิถีพิถันของตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งสามารถแบ่งย่อยการวิเคราะห์ออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีศึกษาที่ 2.1 การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อกำหนดค่าพิถีพิถันของตัวแปรที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ ร่วมกับการปรับจูนระยะพื้นที่โพรงห้องคลื่นที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ของความถี่เรโซแนนซ์เป็น 2.9982 GHz

กรณีศึกษาที่ 2.2 การประมาณความถี่เรโซแนนซ์เมื่อปรับจูนระยะพื้นที่โพรงห้องคลื่นที่สามารถปรับได้ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงค่าพิถีพิถันของตัวแปรจำนวน 2 ตัวแปร ที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด โดยกำหนดค่าพิถีพิถันของตัวแปรที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ ร่วมกับการปรับจูนระยะพื้นที่โพรงห้องคลื่นที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ของความถี่เรโซแนนซ์เป็น 2.9982 GHz

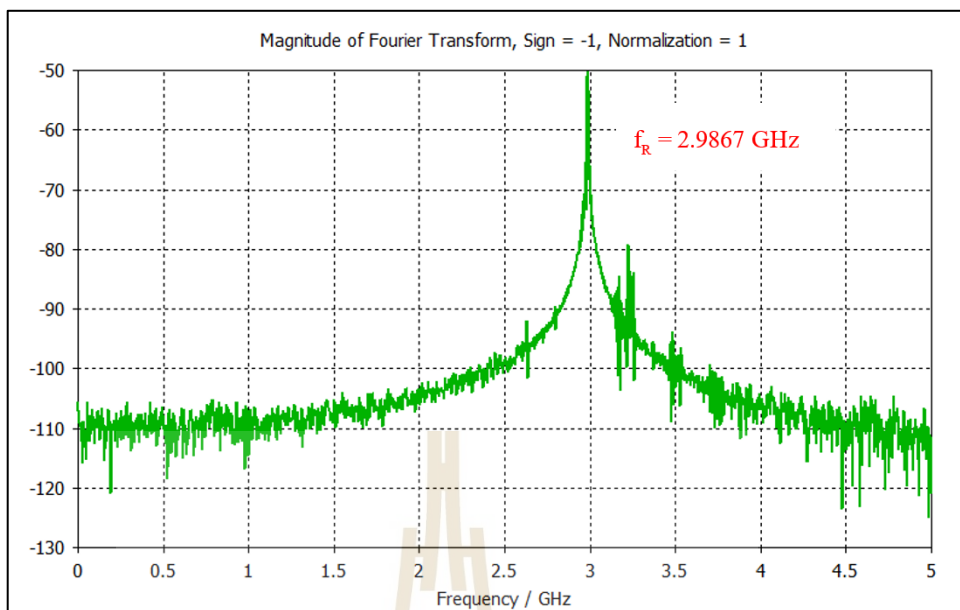
4.3.1 การจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การกำหนดเงื่อนไขการจำลองเพื่อการประมาณความถี่เรโซแนนซ์จะกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้นของการจำลองด้วยโปรแกรม CST particle studio ที่ใช้เทคนิค PIC simulation method และรันบนคอมพิวเตอร์ PC (Intel core-i9 CPU3.1GHz 32GB-RAM) โดยใช้ระยะเวลาการประมวลผลทั้งหมดประมาณ 18 hours ต่อ 1 การทดลองต่อการปรับจูน ตำแหน่งพื้นที่โพรงห้องคลื่น (T_{SLOT}) และพิจารณาค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าของวัสดุทองแดงอบอ่อนที่เป็นส่วนประกอบบล็อกแอดโนด, บริเวณส่วนที่เป็นสุญญากาศสำหรับการเกิดปฏิกิริยัมพันธ์ของอิเล็กตรอน เป็นต้น ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.8 และสรุปเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการจำลองดังตารางที่ 4.2

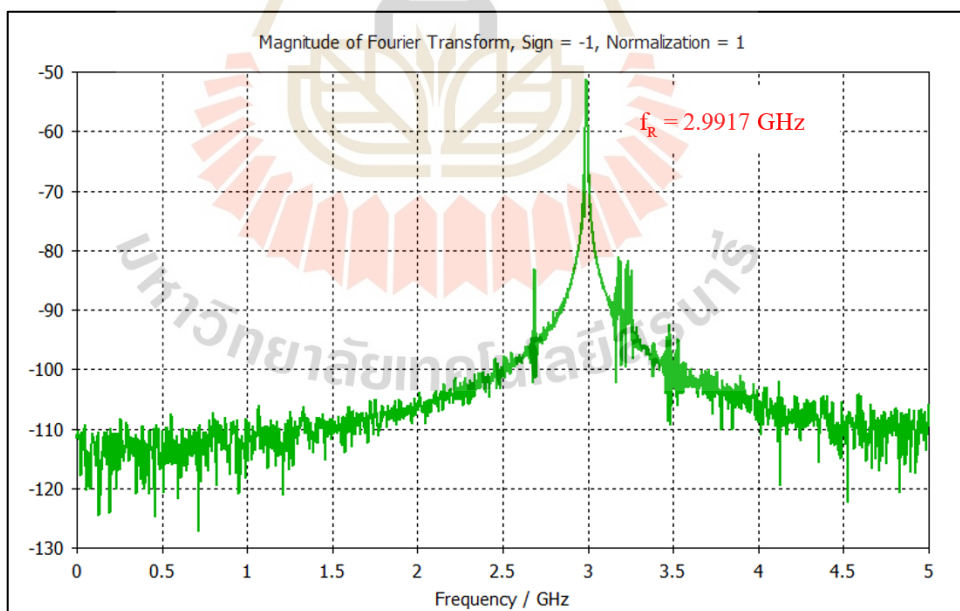
ตารางที่ 4.2 เงื่อนไขเริ่มต้นของการจำลองความถี่เรโซแนนซ์

องค์ประกอบ	จำนวน
Kinetic energy	3 eV
Rise time	1 ns
Duration time	150 ns
Anode material	Copper annealed
Electrical conductivity	5.8×10^7 S/m
Temperature coefficient	0.00393 K^{-1}
Ambient temperatures	20°C

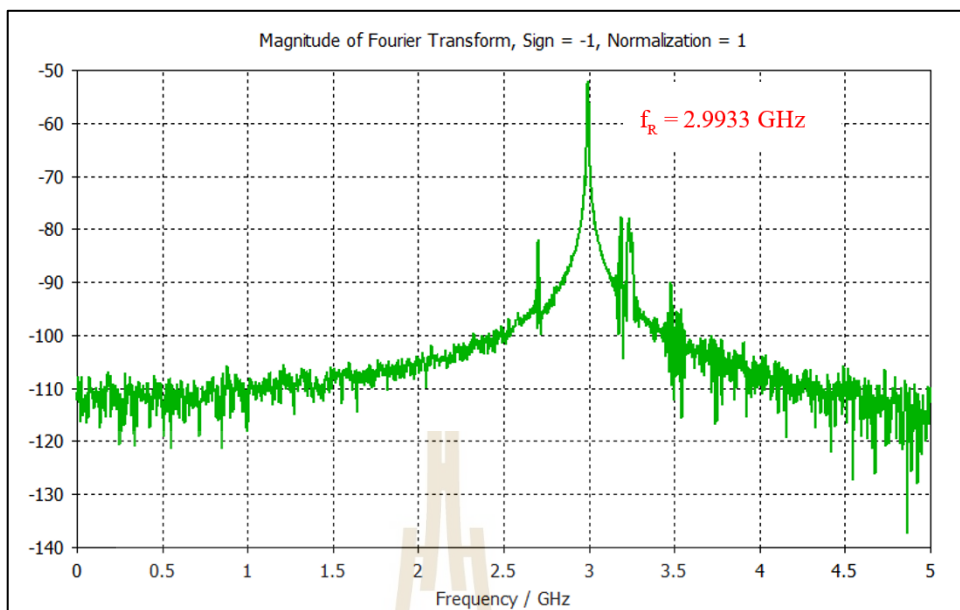
เมื่อพิจารณาถึงค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากผลของอุณหภูมิ ผลการคำนวณช่วงอุณหภูมิ 0 ถึง 70°C แสดงผลการเปลี่ยนแปลงค่าความเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าและความถี่เรโซแนนซ์ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3.8 พบว่า ความถี่เรโซแนนซ์ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งสามารถละเว้นหรือตัดทิ้งได้ขั้นตอนต่อไปทำการจำลองความถี่เรโซแนนซ์โดยใช้โปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell พร้อมทั้งปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายในของแมกนีตรอน คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งพื้นที่โพรงห้องคลื่น (T_{SLOT}) ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนในหน่วยมิลลิเมตร ที่สามารถปรับค่าได้ตามขอบเขตของคุณสมบัติของอุปกรณ์ คือ ระยะตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm และจำลองด้วยโปรแกรมเป็นระยะเวลา 150 ns พร้อมทั้งบันทึกผลตอบสนองค่าความถี่เรโซแนนซ์ ของแมกนีตรอน และสรุปผลการตอบสนองของการประมาณความถี่เรโซแนนซ์สูงสุด ดังรูปที่ 4.1 ถึง 4.13 และสรุปผลข้อมูลรวมตามตารางที่ 4.3



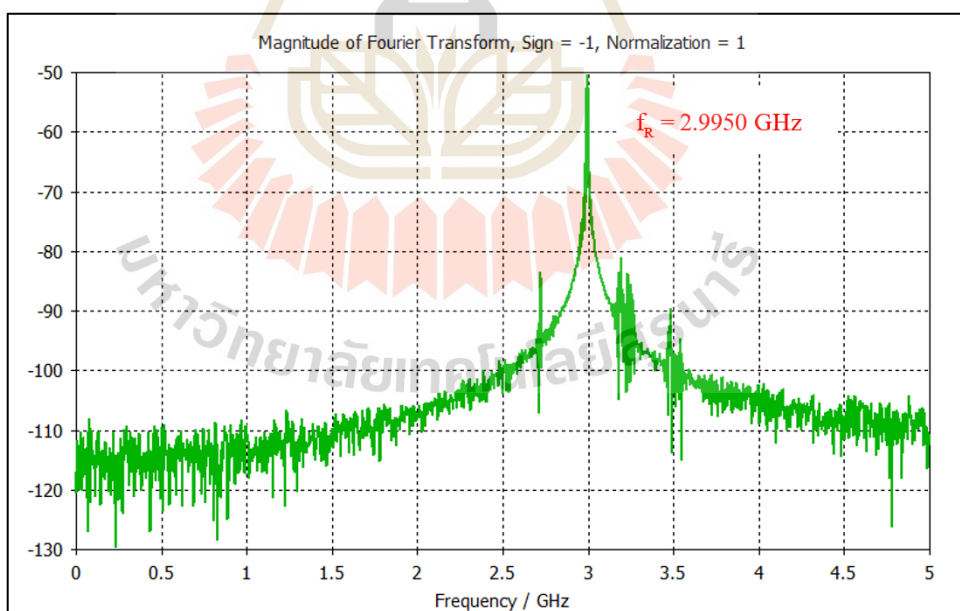
รูปที่ 4.1 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 2.22 mm



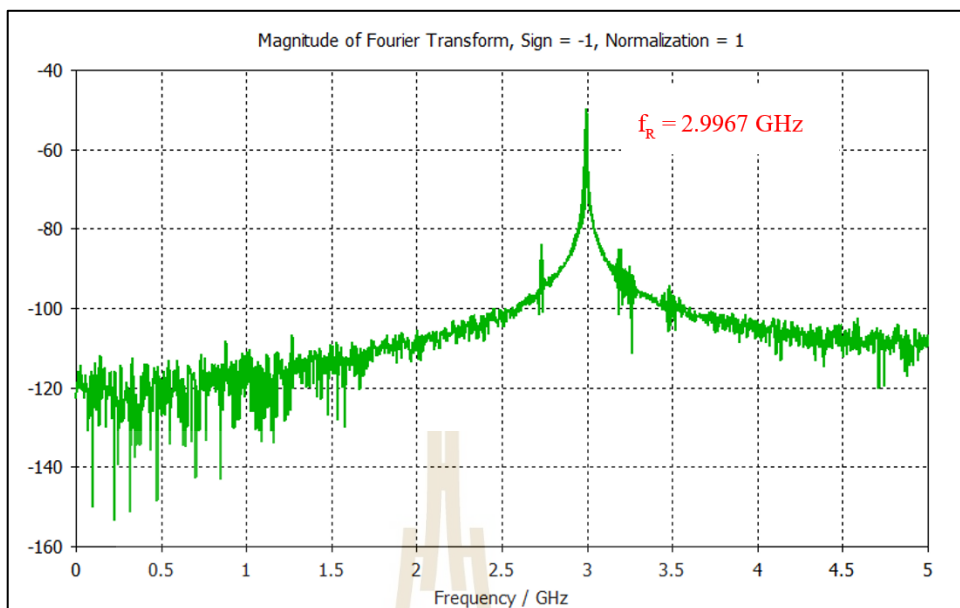
รูปที่ 4.2 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 2.72 mm



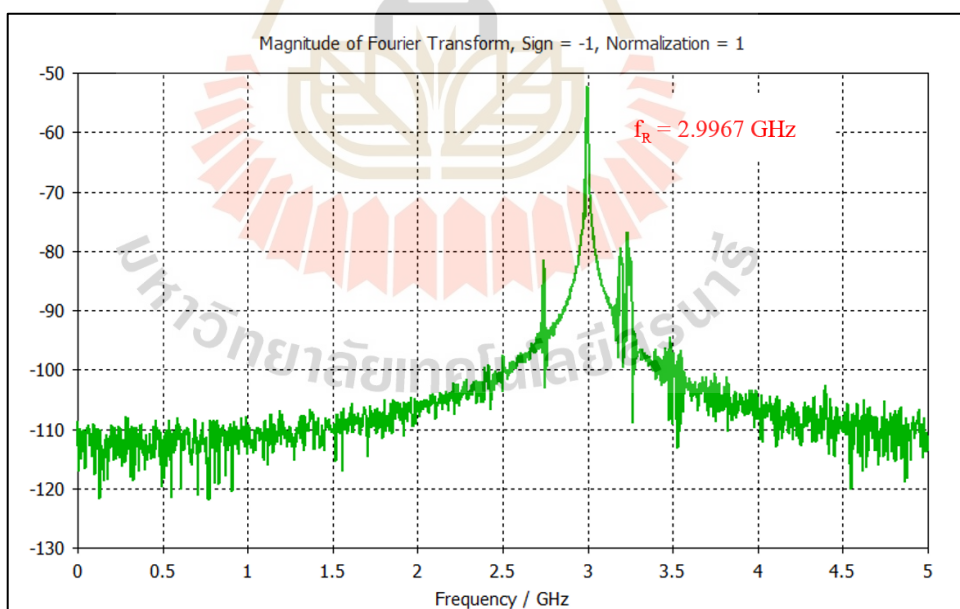
ป้ที่ 4.3 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 2.97 mm.



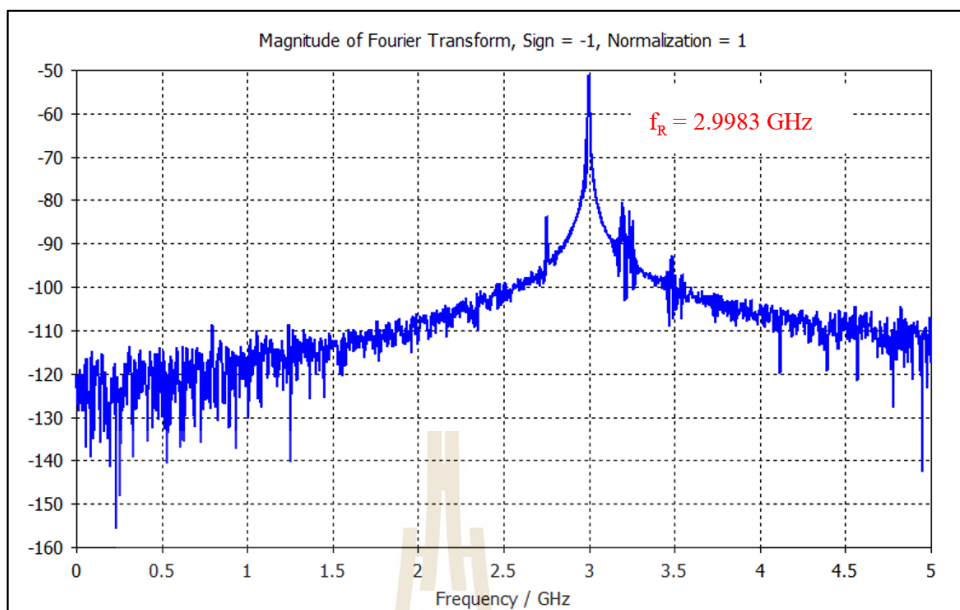
รูปที่ 4.4 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.22 mm



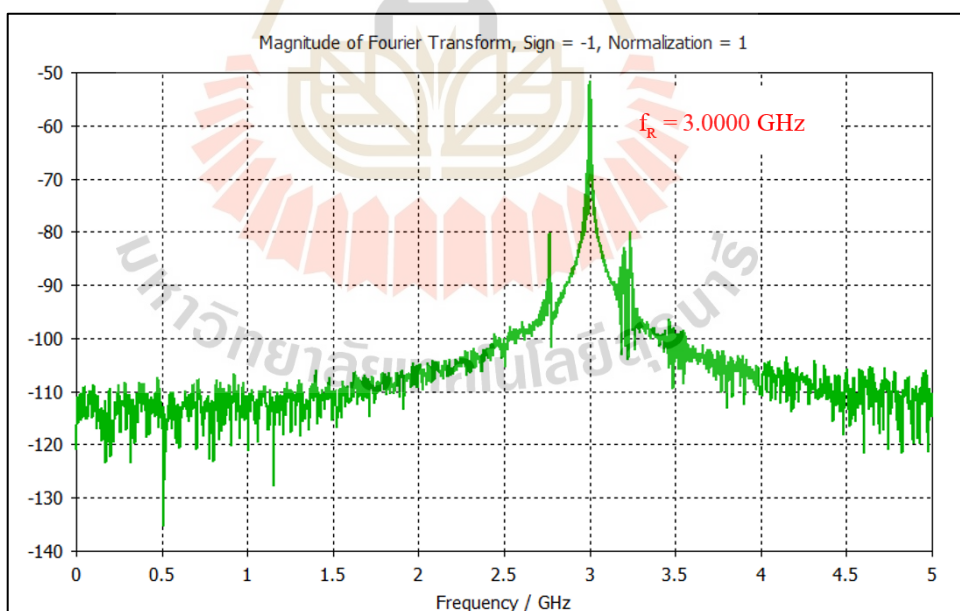
รูปที่ 4.5 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.47 mm



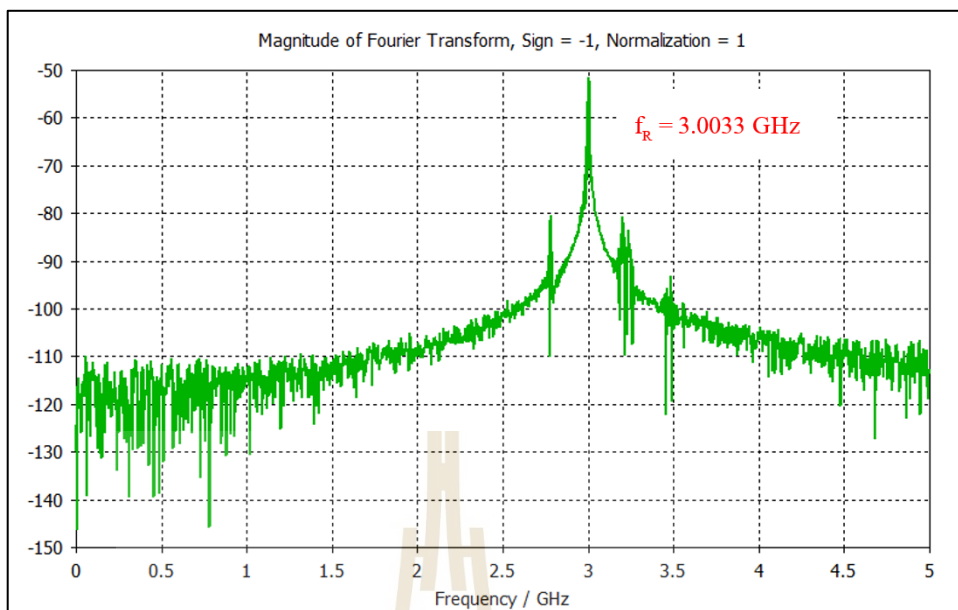
รูปที่ 4.6 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.72 mm



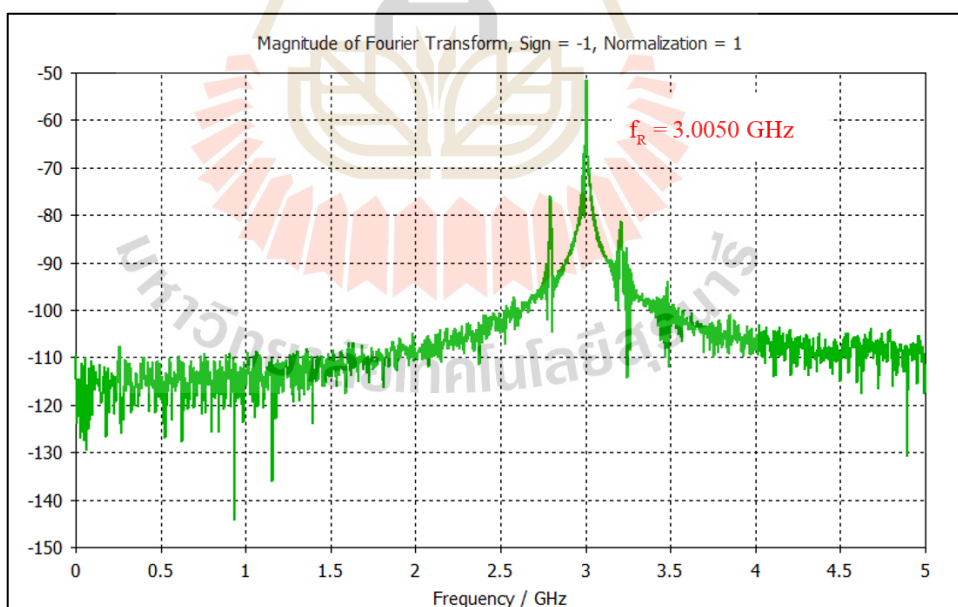
รูปที่ 4.7 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 3.97 mm



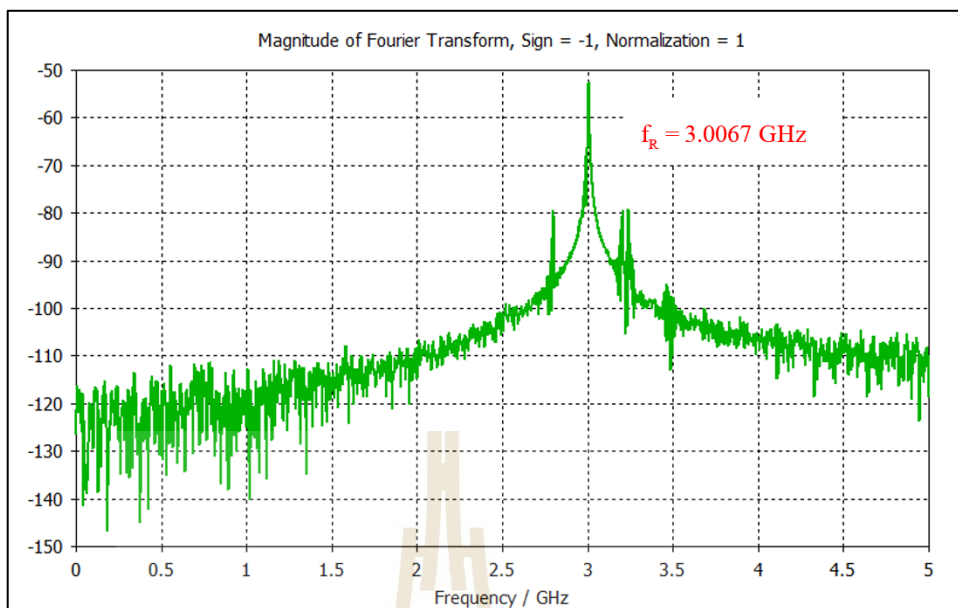
รูปที่ 4.8 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 4.22 mm



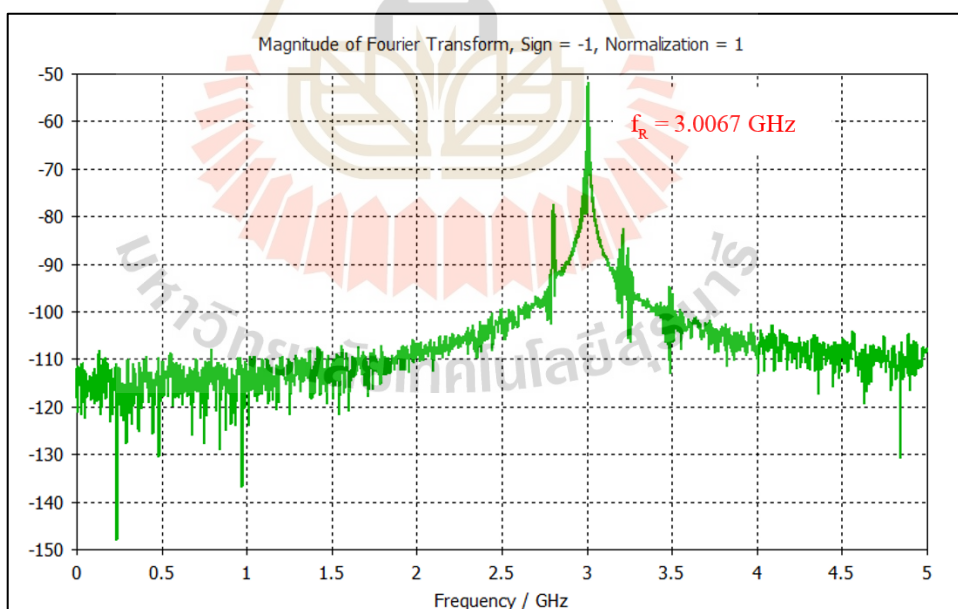
รูปที่ 4.9 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 5.22 mm



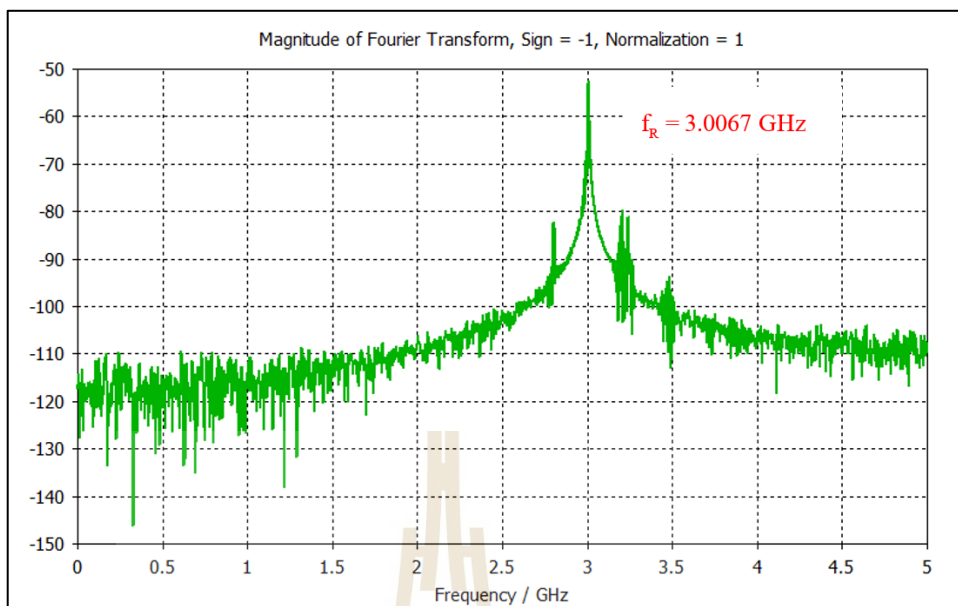
รูปที่ 4.10 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 6.22 mm



รูปที่ 4.11 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 7.22 mm



รูปที่ 4.12 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 8.22 mm

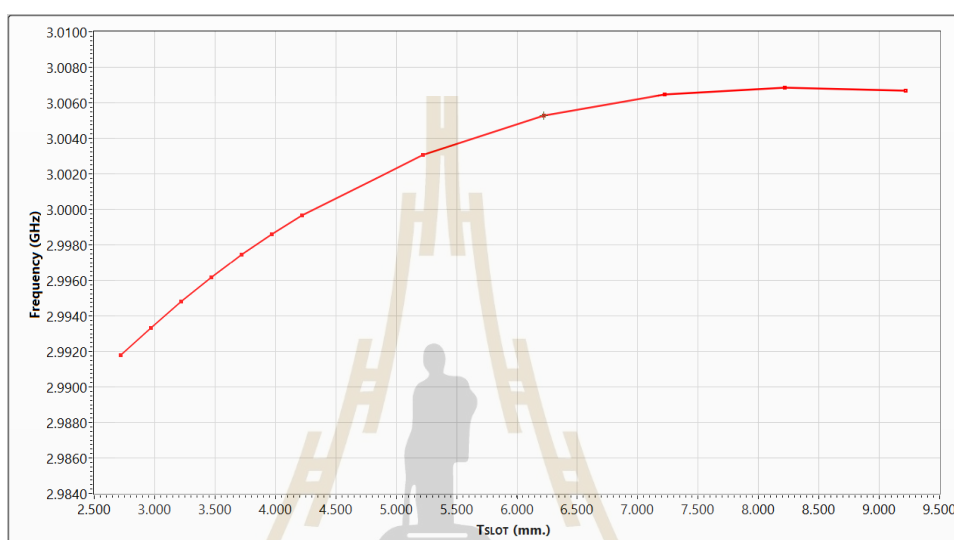


รูปที่ 4.13 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่รัศมีโพรงห้องคลื่นเท่ากับ 3.195 mm
เมื่อกำหนดให้ T_{SLOT} เท่ากับ 9.22 mm

ตารางที่ 4.3 สรุปผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ เมื่อกำหนดรัศมีโพรงห้องคลื่น 3.195 mm

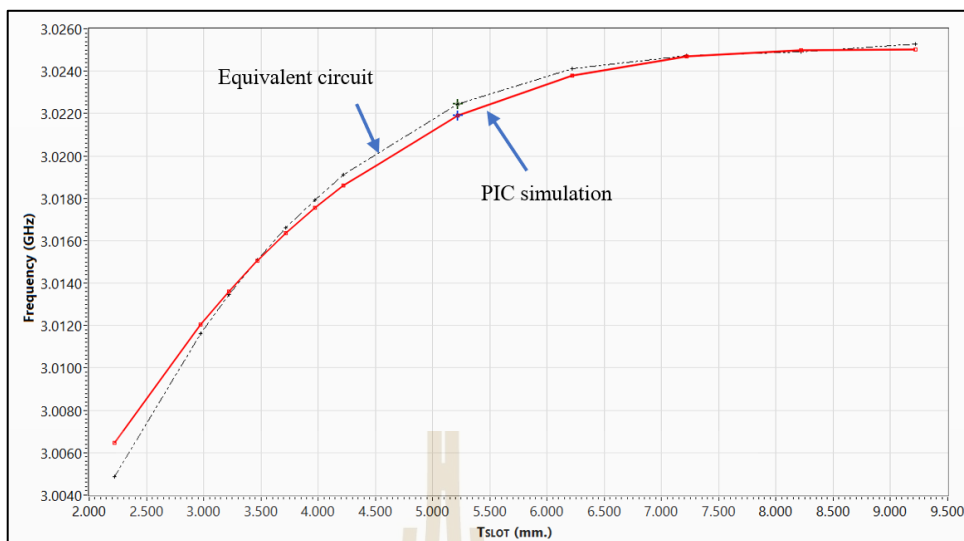
T_{SLOT} (millimeter)	Resonant Frequency (GHz)
2.22	2.9867
2.72	2.9917
2.97	2.9933
3.22	2.9950
3.47	2.9967
3.72	2.9967
3.97	2.9983
4.22	3.0000
5.22	3.0033
6.22	3.0050
7.22	3.0067
8.22	3.0067
9.22	3.0067

จากตารางที่ 4.3 ผลของตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์สูงสุดอยู่ที่ 2.9988 GHz ณ ตำแหน่ง T_{SLOT} เท่ากับ 3.97 mm และผลของขอบเขตการปรับความถี่เรโซแนนซ์อยู่ในช่วงระหว่าง 2.9867 ถึง 3.0067 GHz หรือความกว้างของความถี่เรโซแนนซ์ที่ 20.00 MHz ซึ่งผลของการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน แต่ละระยะการปรับจูนตำแหน่งพื้นที่โพรงห้องคลื่น (T_{SLOT}) สามารถนำผลการตอบสนองไปแสดงเป็นความสัมพันธ์ ดังกราฟรูปที่ 4.14

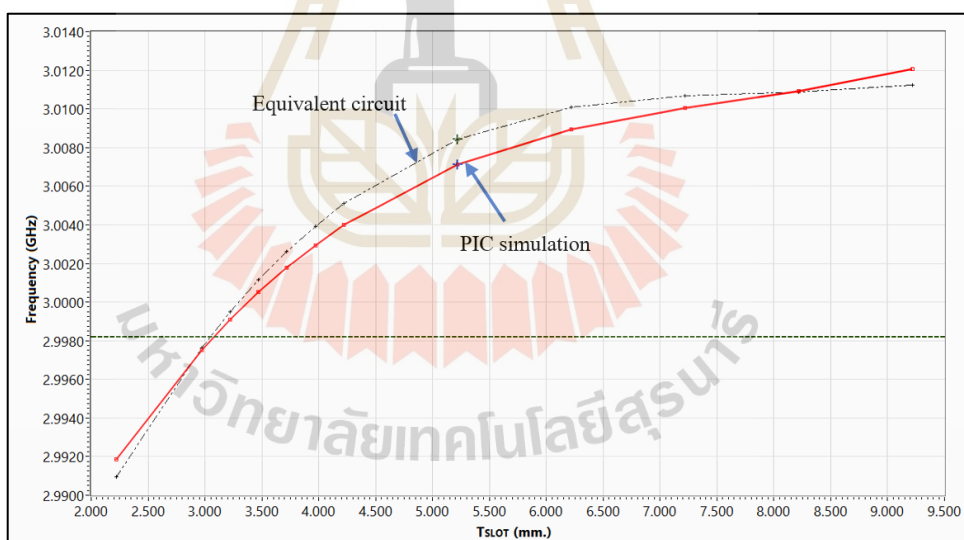


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เรโซแนนซ์แต่ละตำแหน่งการปรับจูน T_{SLOT}

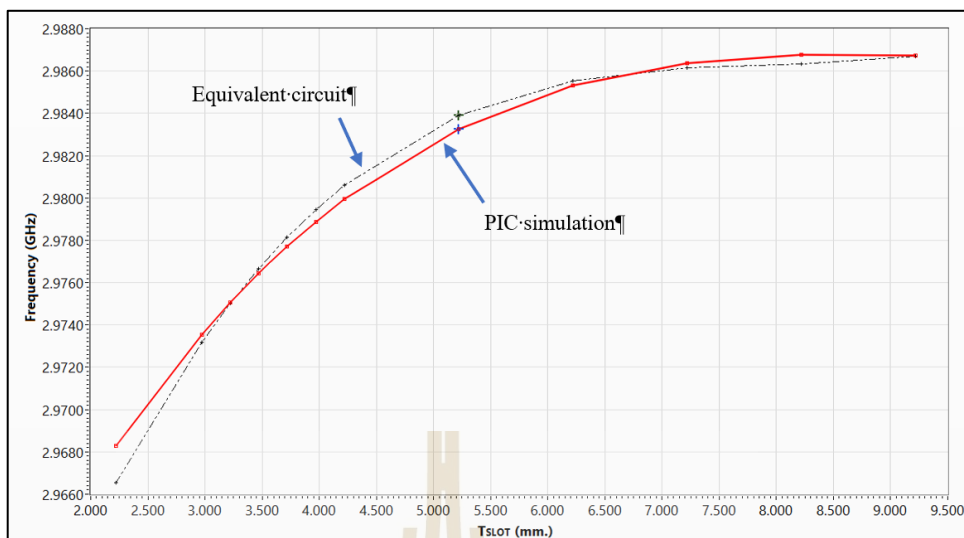
จากผลการทดลองรูปที่ 4.14 เป็นผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน แต่ละระยะการปรับจูนตำแหน่งพื้นที่โพรงห้องคลื่น (T_{SLOT}) ของแมกนีตรอนตั้งแต่ 2.22 ถึง 9.22 mm และกำหนดค่าคงที่ของโพรงของห้องคลื่น (R_V) ที่ 3.195 mm ด้วยการออกแบบจำลองพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในอุปกรณ์สุญญากาศบนโปรแกรม CST particle studio ซึ่งเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณ โดยแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่วิเคราะห์ด้วยโครงสร้างทางกายภาพของแมกนีตรอนที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.6 ผลการเปรียบเทียบผลต่างของความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย ทั้ง 2 วิธี ร่วมกับการพิจารณาปรับเปลี่ยนค่าพิกัดความถี่ของตัวแปรต่าง ๆ ต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด คือ ตัวแปร R_V และ L_M ซึ่งผลการเปรียบเทียบ สรุปผลได้ดังรูปที่ 4.15 ถึง 4.23 และสรุปผลเป็นตารางข้อมูลที่ 4.4



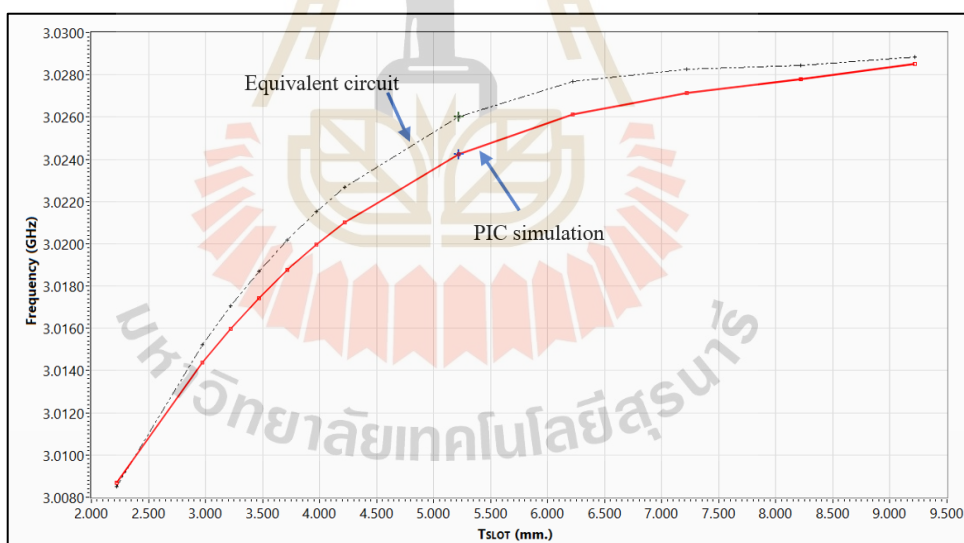
รูปที่ 4.15 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.145$ และ $L_M = 4.907$ mm



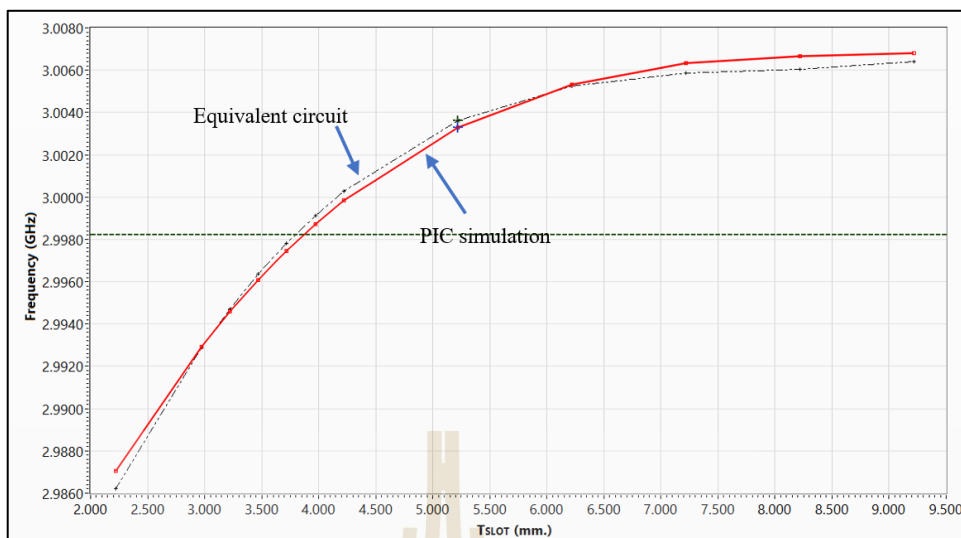
รูปที่ 4.16 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.195$ และ $L_M = 4.907$ mm



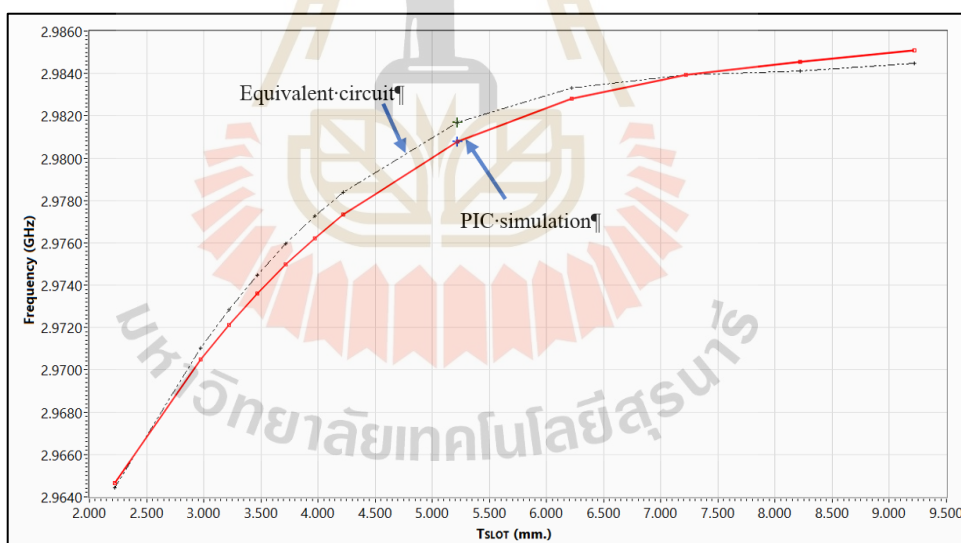
รูปที่ 4.17 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.245$ และ $L_M = 4.907$ mm



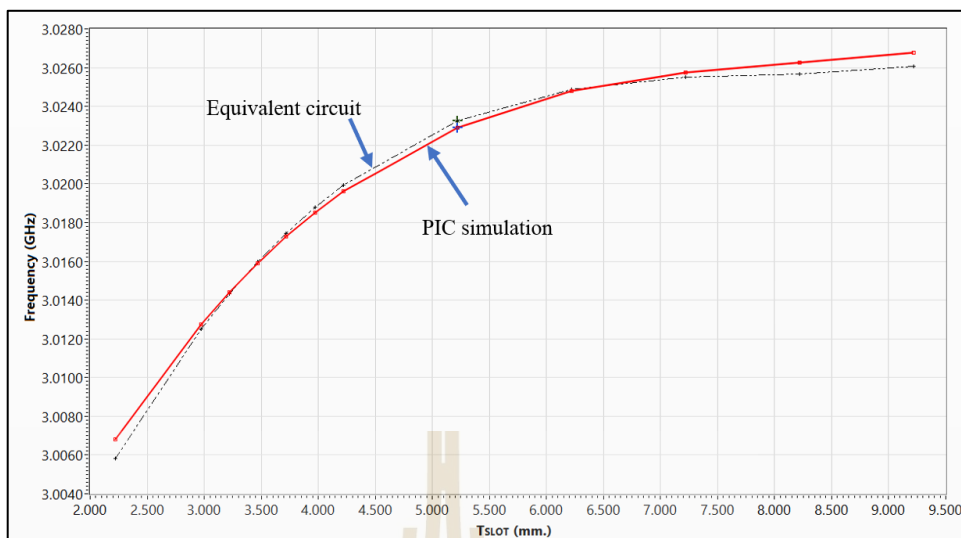
รูปที่ 4.18 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.145$ และ $L_M = 4.957$ mm



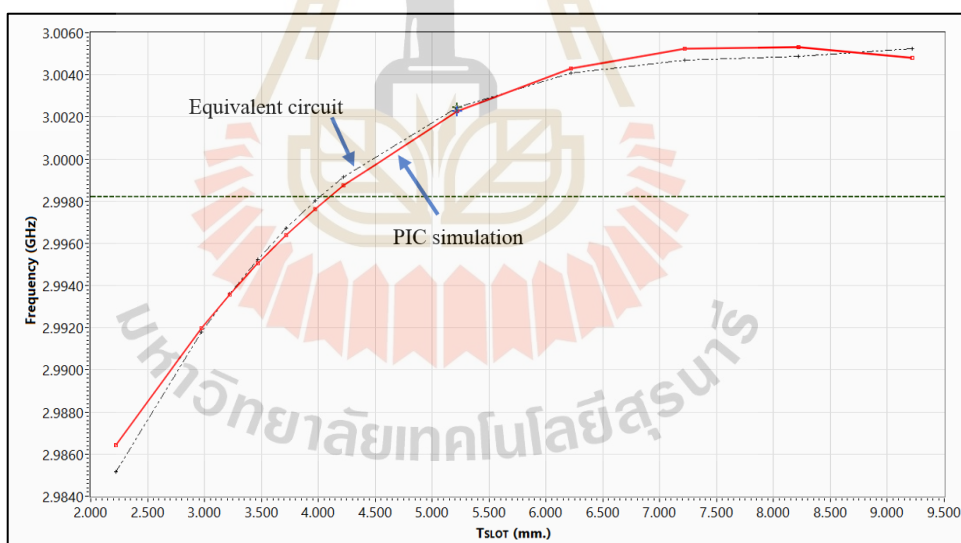
รูปที่ 4.19 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.195$ และ $L_M = 4.957$ mm



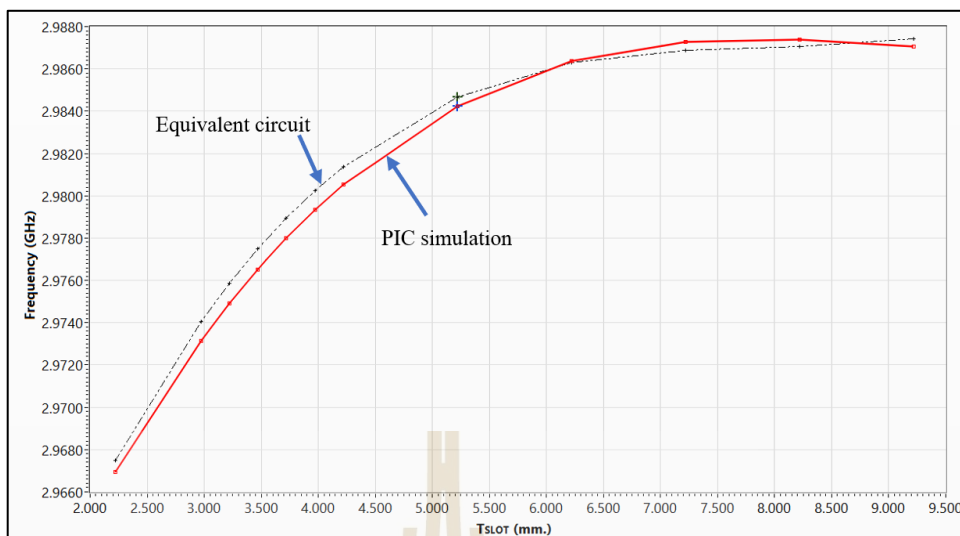
รูปที่ 4.20 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.245$ และ $L_M = 4.957$ mm



รูปที่ 4.21 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.145$ และ $L_M = 5.007$ mm



รูปที่ 4.22 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.195$ และ $L_M = 5.007$ mm



รูปที่ 4.23 ผลการจำลองการเปรียบเทียบผลต่างความถี่เรโซแนนซ์
เมื่อกำหนดค่า $R_V = 3.245$ และ $L_M = 5.007$ mm

ตารางที่ 4.4 สรุปผลความแตกต่างการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขนาดของตัวแปร		แบบจำลองคณิตศาสตร์		ผลต่าง (GHz)
รัศมีโพรงห้อยคลื่น R_V (mm.)	ความยาวช่องว่าง โพรงห้อยคลื่น L_M (mm.)	Equivalent Circuit (GHz)	CST program (GHz)	
3.145	4.907	3.0224	3.0219	0.0005
3.195		3.0084	3.0071	0.0013
3.245		2.9839	2.9833	0.0006
3.145	4.957	3.0260	3.0242	0.0018
3.195		3.0036	3.0033	0.0003
3.245		2.9817	2.9808	0.0009
3.145	5.007	3.0232	3.0229	0.0003
3.195		3.0025	3.0022	0.0003
3.245		2.9847	2.9842	0.0005

4.3.2 การจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ต่อค่าพิกัดความถี่ของตัวแปร

การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนในโหมคพาย ต่อค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$. โดยการประยุกต์ใช้ แบบจำลองสามมิติบนโปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิควิธีของ PIC simulation จะแบ่งการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ออกเป็นจำนวน 2 กรณีย่อย ซึ่งแต่ละกรณีจะพิจารณาถึงตัวแปรของโครงสร้างแมกนีตรอน ที่ประกอบด้วย การวิเคราะห์จากตัวแปรแต่ละตัวแปรทั้งหมด 6 ตัวแปร และวิเคราะห์จากตัวแปรจำนวน 2 ตัวแปร ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนมากที่สุด ซึ่งแต่ละกรณีมีขั้นตอนการวิเคราะห์และการจำลองผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ด้วยโปรแกรม CST particle studio สรุปรายละเอียดการจำลองดังตารางที่ 4.5

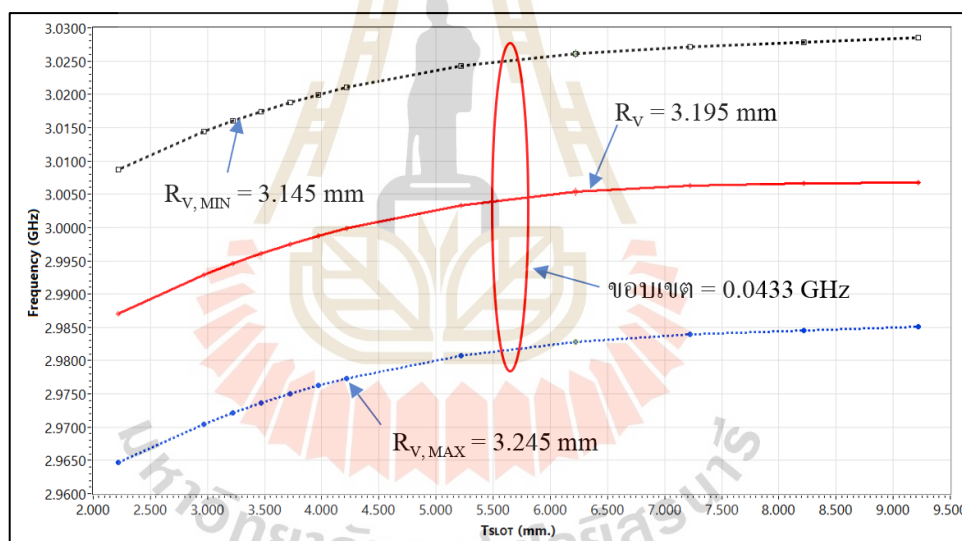
ตารางที่ 4.5 รายละเอียดของการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนแต่ละกรณี

กรณี	จำนวนตัวแปร	ตัวแปรที่พิจารณา	ขนาดมาตรฐานและความถี่ (mm)
1	6	- รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.195 ± 0.05
		- ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05
		- รัศมีปลอกแอโนด (R_A)	17.023 ± 0.05
		- ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W)	3.089 ± 0.05
		- ความสูงปลอกแอโนด (H)	32.801 ± 0.05
		- รัศมีแคโทด (R_C)	9.165 ± 0.05
2	2	- รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.145
		- ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05
		- รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.170
		- ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05
		- รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.195
		- ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05
		- รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.220
		- ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05
		- รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.245
		- ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05

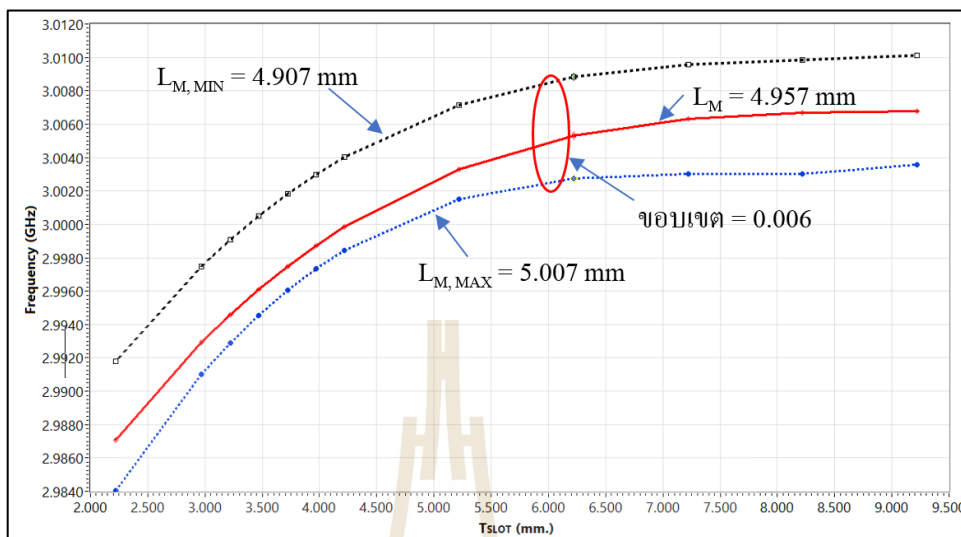
1. ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนในโหมคพายแต่ละตัวแปร

การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิกัดความถี่ของแต่ละตัวแปรทั้งหมดจำนวน 6 ตัวแปร ด้วยโปรแกรม CST particle studio ประกอบด้วย รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V), ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M), รัศมีบล็อกแอโนด (R_A), ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W), ความสูงบล็อกแอโนด (H) และรัศมีแคโทด (R_C) ที่กำหนดค่าขนาดมาตรฐานและพิกัดความถี่ที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ ตามข้อมูลตารางที่ 4.5 กรณีที่ 1 และพิจารณาร่วมกับการปรับจูนระยะพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนสเต็ปปีงมอเตอร์ (T_{SLOT}) ที่ทำให้ได้ผลลัพธ์ของความถี่เรโซแนนซ์เป็น 2.9982 GHz ในช่วงระยะที่สามารถปรับจูนตำแหน่งได้ ตั้งแต่ 2.22 ถึง 9.22 mm ซึ่งการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าตัวแปรแต่ละตัวแปรของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนในโหมคพาย มีผลการจำลองดังรูปที่ 4.24 ถึง 4.29

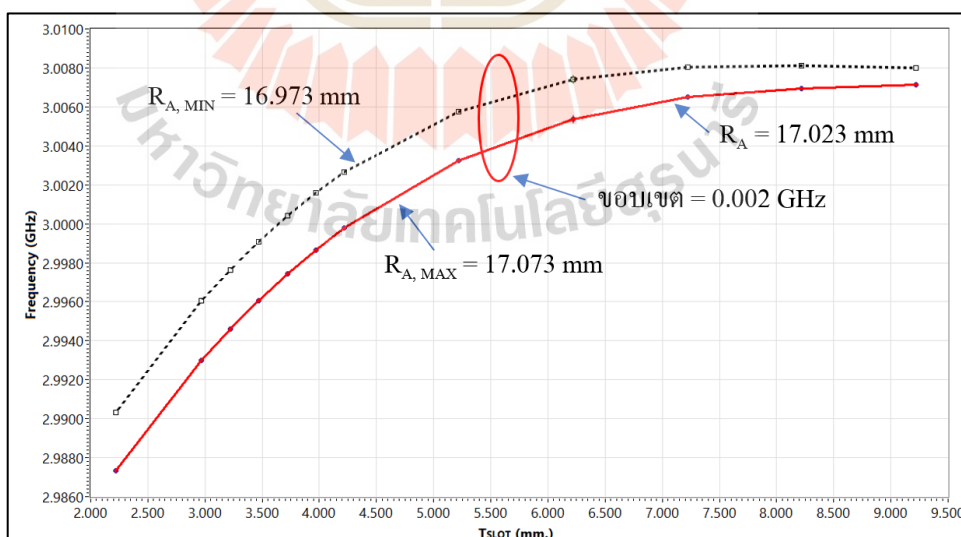
(1.1) รัศมีโพรงของห้องคลื่น (Cavity Radius; R_V)



รูปที่ 4.24 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อค่าพิกัดความถี่เรโซแนนซ์ของรัศมีโพรงของห้องคลื่น

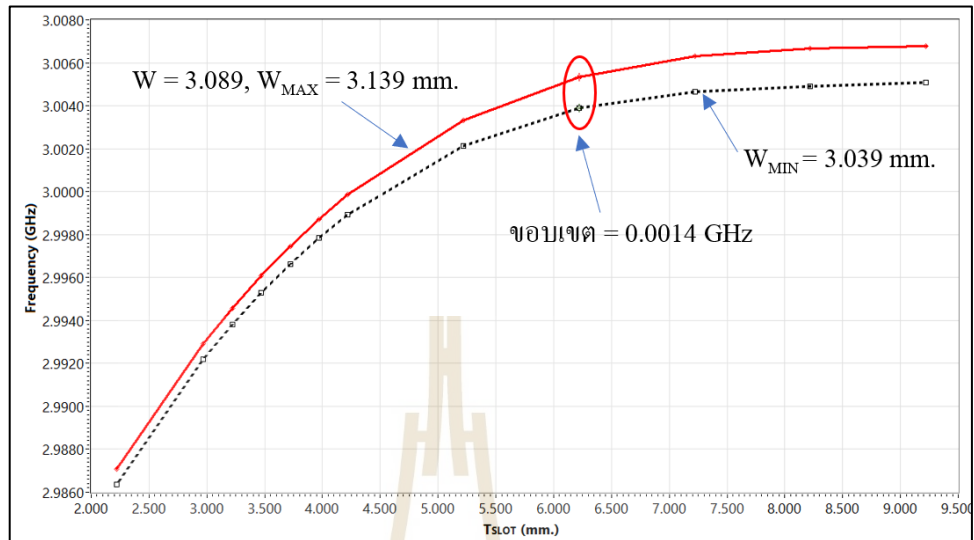
(1.2) ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (Slot gap length; L_M)

รูปที่ 4.25 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm
ต่อค่าพิกัดความถี่ของความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น

(1.3) รัศมีบล็อกแอโนด (Anode block; R_A)

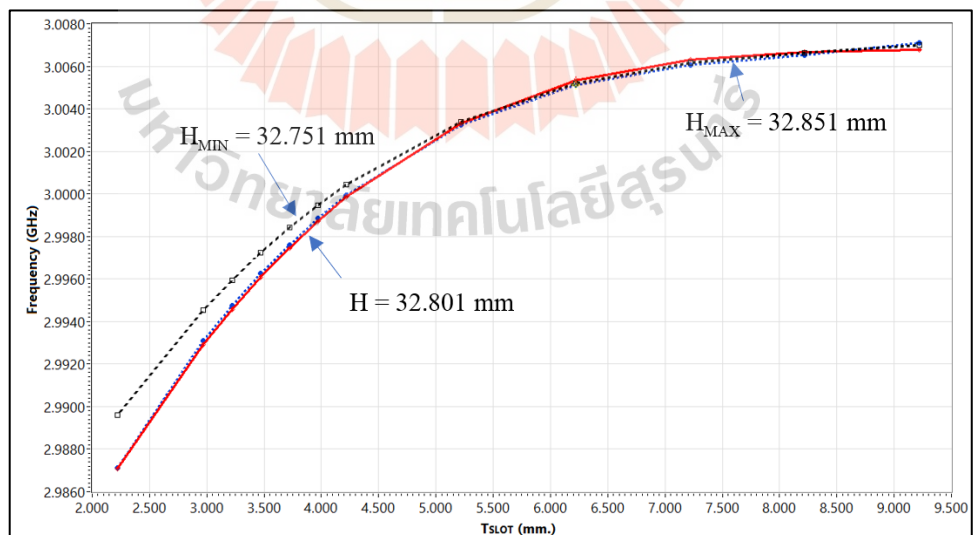
รูปที่ 4.26 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm
ต่อค่าพิกัดความถี่ของรัศมีบล็อกแอโนด

(1.4) ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (Slot gap width; W)

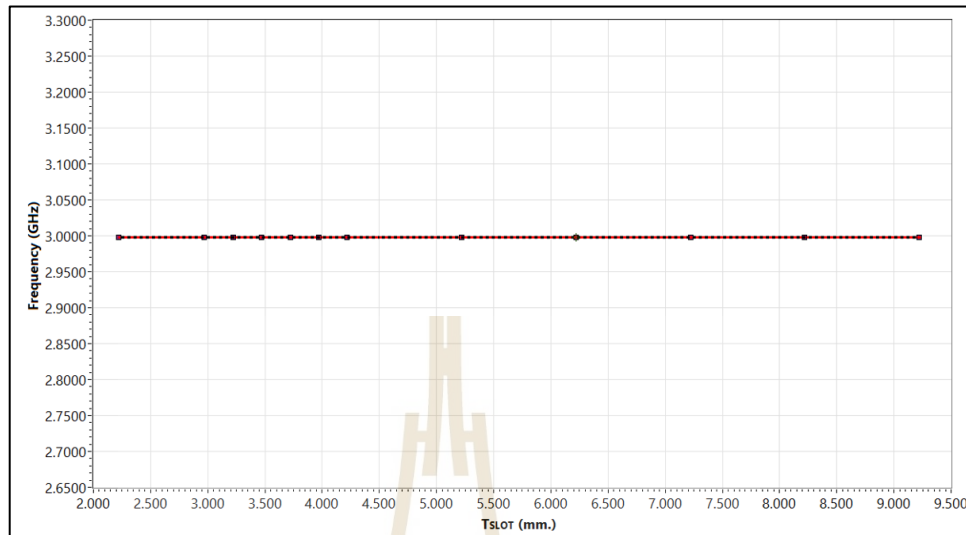


รูปที่ 4.27 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm
ต่อค่าพิคัดความถี่ของความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น

(1.5) ความสูงขั้วแอโนด (Height of Anode; H)



รูปที่ 4.28 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm
ต่อค่าพิคัดความถี่ของความสูงของขั้วแอโนด

(1.6) รัศมีแคโทด (Cathode; R_c)

รูปที่ 4.29 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm
ต่อค่าพิสัยความถี่ของรัศมีแคโทด

จากผลการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนในโหมดพาย โดยใช้โปรแกรม CST particle studio ด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell simulation ที่แสดงผลกราฟดังรูปที่ 4.24 ถึง 4.29 โดยกำหนดเงื่อนไขการพิจารณาความถี่ของแต่ละตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปร ในช่วงขอบเขตการเปลี่ยนแปลงที่ $\pm 50 \mu\text{m}$ พบว่าสามารถปรับจูนตำแหน่งโพรงห้องคลื่นที่ขับเคลื่อนด้วยชุดสแต๊ปมอเตอร์ได้ผลตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์ 2.9982 GHz ที่ระยะประมาณ 3.887 mm และผลการจำลองการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากค่าพิสัยความถี่ต่าง ๆ ของตัวแปร ณ ตำแหน่งความถี่เรโซแนนซ์ดังกล่าว สรุปเป็นผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ดังตารางที่ 4.6

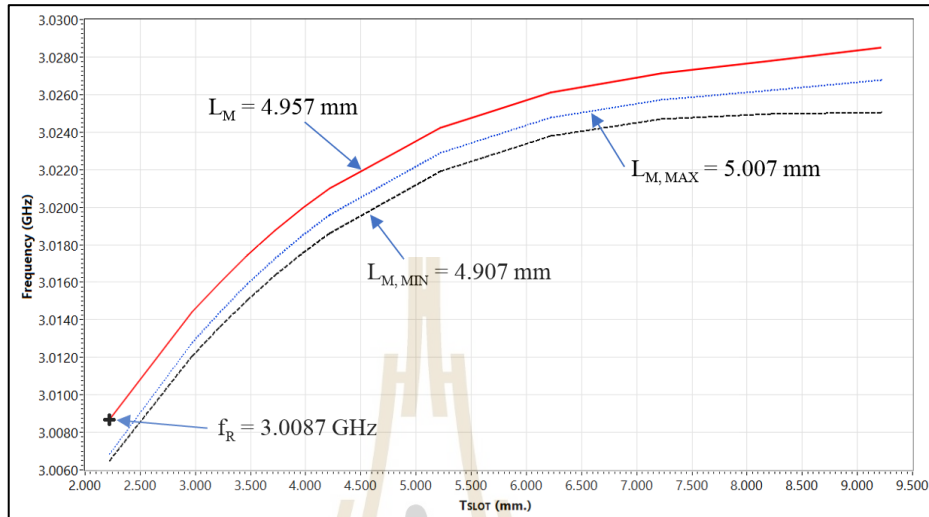
ตารางที่ 4.6 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ต่อค่าพิกัดความถี่ของแต่ละตัวแปร

ลำดับ	ตัวแปร	พิกัดความถี่ (mm)	ผลลัพธ์	
			ตำแหน่งโพรง ห้องคลื่น (mm)	ความถี่ เรโซแนนซ์ (GHz)
1	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.195 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0219
2	ความยาวช่องว่างโพรง ห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0029
3	รัศมีบล็อกเอโนด (R_A)	17.023 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0015
4	ความกว้างช่องว่างโพรง ห้องคลื่น (W)	3.089 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0004
5	ความสูงบล็อกเอโนด (H)	32.801 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0003
6	รัศมีแคโทด (R_C)	9.165 ± 0.05	3.887	2.9982

2. ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนในโหมตพาย 2 ตัวแปร

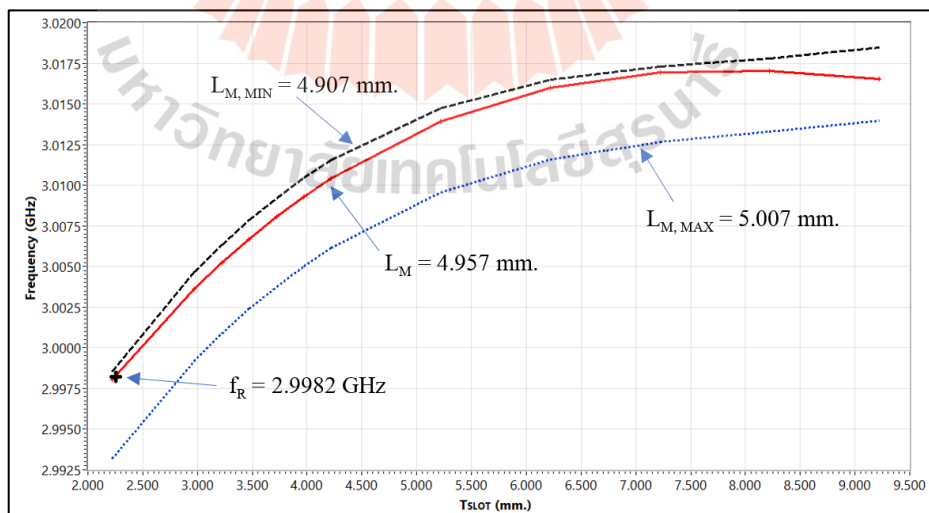
การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ต่อค่าพิกัดความถี่ของแต่ละตัวแปรในกรณีที่ 2 กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น โดยพิจารณาผลการประมาณความถี่จากกรณีที่ 1 คือ เลือกตัวแปร จำนวน 2 ตัวแปร ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด ประกอบด้วย รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) โดยแต่ละตัวแปรจะกำหนดช่วงของการจำลองด้วยพิกัดความถี่ในช่วง $\pm 50 \mu\text{m}$ และปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนสเต็ปมอเตอร์ (T_{SLOT}) ในช่วงระยะที่สามารถปรับจูนได้ ตั้งแต่ 2.22 ถึง 9.22 mm ซึ่งแสดงรายละเอียดจากการออกแบบการทดลอง เพื่อการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ดังตารางข้อมูลที่ 4.5 กรณีที่ 2 ซึ่งผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์แต่ละกรณีของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนในโหมตพาย มีผลการจำลอง ดังรูปที่ 4.30 ถึง 4.34

- (2.1) กำหนดครีสมิโพรงของห้องคลื่น (R_v) ที่ 3.145 mm และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่ 4.957 ± 0.05 mm.



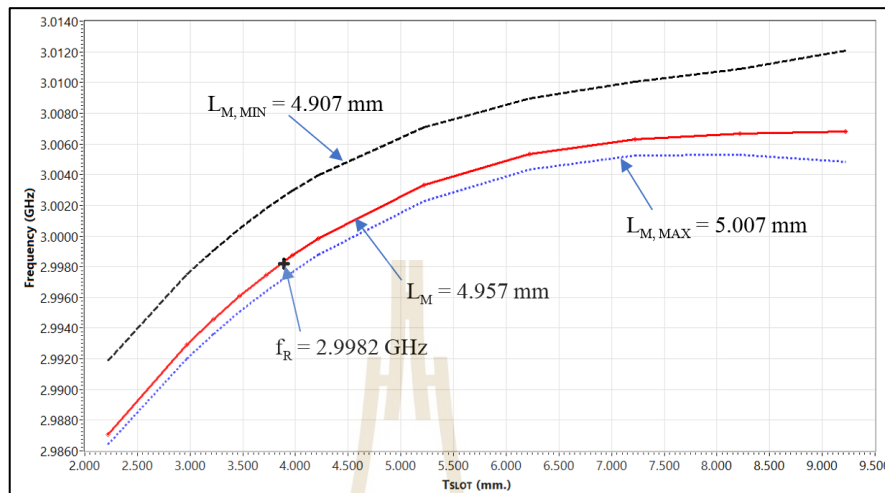
รูปที่ 4.30 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อครีสมิโพรงห้องคลื่นที่ 3.145 mm และค่าพิคัดความถี่ของความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น

- (2.2) กำหนดครีสมิโพรงของห้องคลื่น (R_v) ที่ 3.170 mm และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่ 4.957 ± 0.05 mm



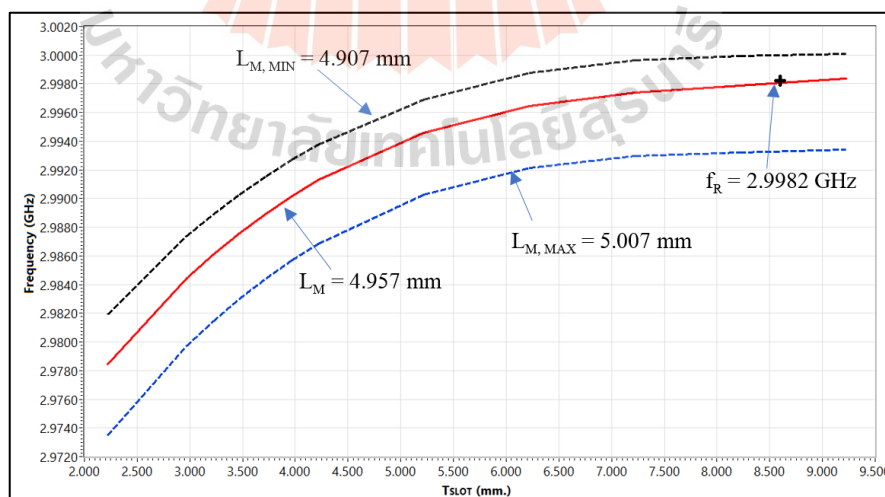
รูปที่ 4.31 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อครีสมิโพรงห้องคลื่นที่ 3.170 mm และค่าพิคัดความถี่ของความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น

- (2.3) กำหนดรัศมีโพรงของห้องคลื่น (R_V) ที่ 3.195 mm และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่ 4.957 ± 0.05 mm



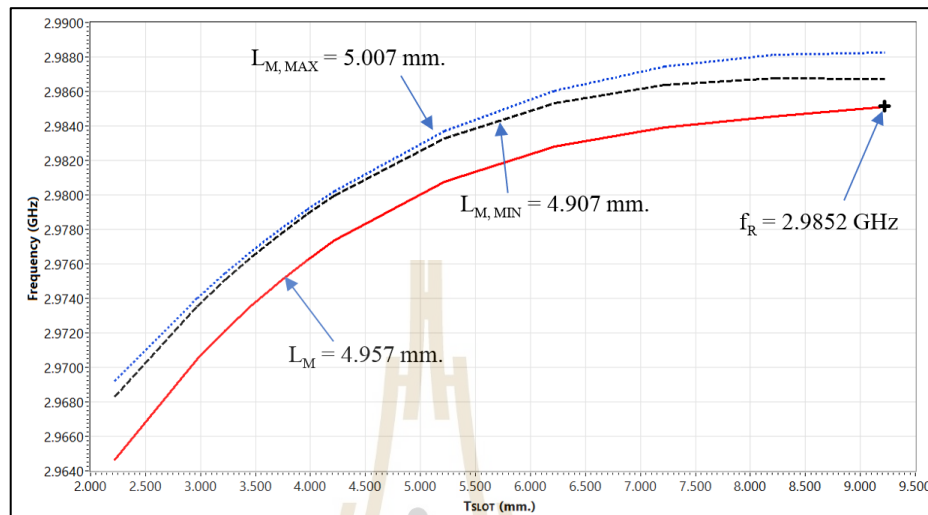
รูปที่ 4.32 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.195 mm และค่าพิสัยของความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น

- (2.4) กำหนดรัศมีโพรงของห้องคลื่น (R_V) ที่ 3.220 mm และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่ 4.957 ± 0.05 mm



รูปที่ 4.33 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.220 mm และค่าพิสัยของความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น

- (2.5) กำหนดรัศมีโพรงของห้องคลื่น (R_V) ที่ 3.245 mm และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่ 4.957 ± 0.05 mm



รูปที่ 4.34 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ที่ระยะการปรับจูน T_{SLOT} ตั้งแต่ 2.22 – 9.22 mm ต่อรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.245 mm และค่าพิกัดความถี่ของ ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น

จากผลการจำลองโดยใช้โปรแกรม CST particle studio ในรูปกราฟที่ 4.30 ถึง 4.34 คือ ผลการจำลองเพื่อประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิกัดความถี่ของตัวแปร จำนวน 2 ตัวแปร ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด คือ ตัวแปร รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) พร้อมกับการปรับจูนพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนสแต็ปมอเตอร์ (T_{SLOT}) ในช่วงระยะที่สามารถปรับจูนได้ ตั้งแต่ 2.22 ถึง 9.22 mm เพื่อค้นหาตำแหน่งของโพรงห้องคลื่นที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ 2.9982 GHz ซึ่งผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดคพาย ณ ตำแหน่งการเกิดความถี่เรโซแนนซ์ต่อพิกัดความถี่ของ 2 ตัวแปร และผลการประมาณขอบเขตของความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดคพายที่ 2.9982 GHz สรุปเป็นตารางผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ต่อค่าพิถีความถี่จำนวน 2 ตัวแปร

ลำดับ	ตัวแปร	พิถีความถี่ (mm)	ผลลัพธ์	
			ตำแหน่งโพรง ห้องคลื่น (mm)	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)
1	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.145	2.220	3.0087 ± 0.0012
	ความยาวช่องว่างโพรง ห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
2	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.170	2.251	2.9982 ± 0.0026
	ความยาวช่องว่างโพรง ห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
3	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.195	3.887	2.9982 ± 0.0029
	ความยาวช่องว่างโพรง ห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
4	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.220	8.596	2.9982 ± 0.0034
	ความยาวช่องว่างโพรง ห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
5	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.245	9.220	2.9852 ± 0.0015
	ความยาวช่องว่างโพรง ห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		

4.4 สรุป

ผลการจำลองในบทที่ 4 เป็นการใช้เทคนิควิศวกรรมย้อนรอยเพื่อประมาณค่าพิถีความถี่ต่าง ๆ ของตัวแปร ทั้ง 6 ตัวแปร ประกอบด้วย รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V), ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M), รัศมีบล็อกแอโนด (R_A), ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W), ความสูงบล็อกแอโนด (H) และรัศมีแคโทด (R_C) ซึ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot ที่วัดขนาดอย่างละเอียดและแม่นยำ โดยใช้เครื่องมือวัดสามมิติ CMM และมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งการประมาณค่าความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายจะวิเคราะห์ผลจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 วิธี คือ การวิเคราะห์ผลด้วย แบบจำลองวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนาน และแบบจำลองสามมิติ ด้วยเทคนิควิธี Particle-In-Cell

simulation บนโปรแกรม CST particle studio โดยมีผลการจำลองความถี่เรโซแนนซ์ แต่ละกรณี ดังต่อไปนี้

กรณีที่ 1 การวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ โดยประยุกต์ใช้ทั้ง 2 วิธี คือ การวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนาน และแบบจำลองสามมิติ บนโปรแกรม CST particle studio เมื่อกำหนดจุดการทำงานของแมกนีตรอนให้ทำงานอยู่ในโหมดพาย ผลการจำลอง การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ให้ผลของ 2 ตัวแปร คือ รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ช่วงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ ที่มีค่าความแตกต่างสูงสุดระหว่าง 2 วิธี คือ 0.0018 GHz ณ ขนาดของรัศมีโพรงห้องคลื่นที่ 3.145 mm และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่นที่ 4.957 mm ซึ่งผลการจำลองที่ได้สามารถประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนานและวิธีแบบจำลองสามมิติที่ใช้เทคนิค PIC simulation บนโปรแกรม CST particle studio ให้ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย มีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

กรณีที่ 2 คือ ผลการวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย โดยประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองสามมิติ ที่ใช้เทคนิควิธี Particle-In-Cell บนโปรแกรม CST particle studio เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ ต่อค่าพิกัดความถี่ของตัวแปรต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอน ซึ่งสามารถสรุปผลการจำลอง ออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 2.1 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายที่ 2.9982 GHz เมื่อกำหนดขนาดของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนด้วยค่ามาตรฐาน ประกอบด้วย รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) ที่ 3.195 mm, ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่ 4.957 mm, รัศมีบล็อกล็อกแอนด์ (R_A) ที่ 17.023 mm, ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W) ที่ 3.089 mm, ความสูงบล็อกล็อกแอนด์ (H) ที่ 32.801 mm และรัศมีแคโทด (R_C) ที่ 9.165 mm ร่วมกับการปรับจูน พื้นที่โพรงห้องคลื่น เพื่อปรับหาความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz พบว่า ตำแหน่งของระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ที่ทำให้เกิดความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการ คือ ระยะพื้นที่โพรงห้องคลื่น เท่ากับ 3.887 mm และเมื่อพิจารณาพิกัดความถี่ของแต่ละตัวแปรที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ จำนวน 6 ตัวแปร ร่วมกับพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ที่ระยะ 3.887 mm พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ของรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายที่ 2.9982 ± 0.0219 GHz มากที่สุด และการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ของรัศมีแคโทด (R_C) ไม่มีผลกระทบต่อเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายที่ 2.9982 GHz

กรณีที่ 2.2 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายที่ 2.9982 GHz เมื่อกำหนดการปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ในช่วงระยะ 2.22 - 9.22 mm

ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ของแต่ละตัวแปรจำนวน 2 ตัวแปร ที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด คือ รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) พบว่า ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายที่ 2.9982 GHz ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ของรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ในลำดับที่ 2, 3, 4 จากผลตารางที่ 4.7 สามารถปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ในช่วงระยะขอบเขต 2.22 - 9.22 mm. ได้ แต่ว่าผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ในลำดับที่ 1 และ 5 พบว่า ไม่สามารถปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ในช่วงระยะขอบเขต 2.22 - 9.22 mm ให้อยู่ในย่านของความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz ได้



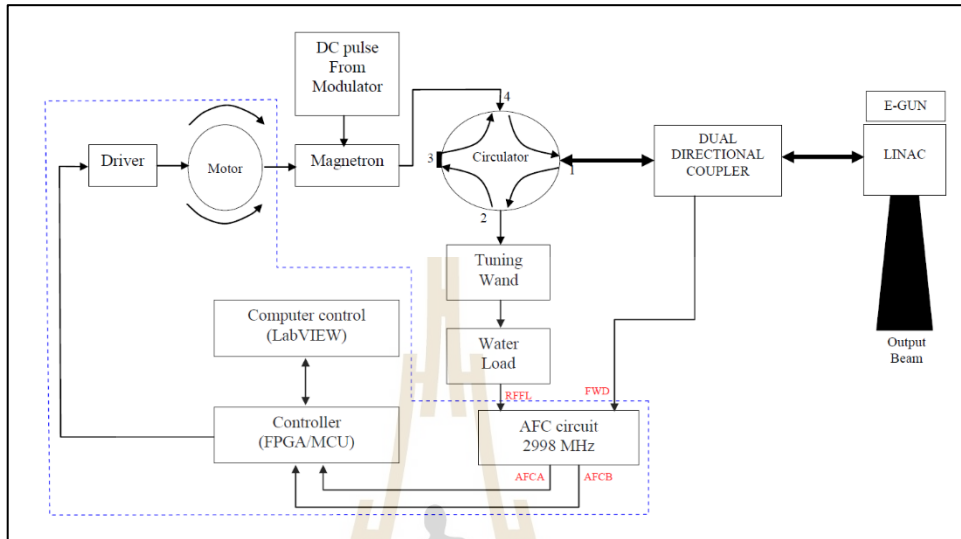
บทที่ 5

ระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นพลังงาน 6 MeV

5.1 บทนำ

เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เป็นเครื่องเร่งอนุภาคสำหรับการฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้นตลอดจนในภาคการเกษตร อุตสาหกรรม และทางการแพทย์ การประยุกต์ใช้เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เพื่อการบำบัดมะเร็ง การปลอดเชื้อเพื่อวัสดุทางการแพทย์และการฉายรังสีเพื่อการปลอดเชื้อในผลไม้ เป็นต้น การออกแบบระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นเพื่อให้เครื่องเร่งเชิงเส้นมีการทำงานในระดับพลังงานอิเล็กตรอน 6 MeV และฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ในปริมาณที่ถูกควบคุมน้อยกว่า 10 kGy ได้อย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอจะต้องออกแบบระบบควบคุมความถี่ของแหล่งกำเนิดให้มีความเข้ากันได้กับท่อเร่งพลังงานอิเล็กตรอนอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะต้องอาศัยกระบวนการควบคุมความถี่ของแหล่งกำเนิดหรือแมกนีตรอน ในการปรับจูนค่าความถี่วิทยุกำลังสูง โดยการปรับแต่งโครงสร้างภายในของตัวแมกนีตรอนผ่านระบบขับเคลื่อนทางกลหรือมอเตอร์ไฟฟ้า (Tuning Motor) ในการเปลี่ยนแปลงความถี่ที่ต้องการได้ แต่เนื่องจากอุณหภูมิโดยรอบหรือความร้อนที่เกิดขึ้นในตัวแมกนีตรอนและท่อเร่งอิเล็กตรอนมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง และไม่สามารถทำการควบคุมให้คงที่ได้ตลอดเวลา ทำให้การปรับแต่งความถี่ของชุดแมกนีตรอนไม่สามารถที่จะทำการปรับแต่งความถี่ได้ทันทั่วทั้ง การออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติที่ต้องอาศัยสัญญาณป้อนกลับความถี่หรือสัญญาณ RF ที่มาจากชุดตัวตรวจรู้ (Directional Coupler) ที่ติดตั้งอยู่ในส่วนของท่อนำคลื่น (Wave Guide) โดยชุด Directional Coupler จะให้สัญญาณที่เป็นกำลังไฟฟ้าแบบไปข้างหน้า (Forward, FWD) และกำลังสัญญาณแบบสะท้อนกลับ (Reflect, REFL) และทำการนำสัญญาณมาเปรียบเทียบเฟส หรือเปรียบเทียบความต่างเฟสระหว่างสัญญาณความถี่อินพุตและเอาต์พุต ซึ่งการเปรียบเทียบเฟสแต่ละสัญญาณจะต้องผ่านการกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อกำจัดในส่วน of สัญญาณความถี่สูงออกไปหรือกำจัดส่วนประกอบทางไฟฟ้ากระแสสลับที่ปะปนเข้ามา และทำการสร้างแอมพลิจูดของสัญญาณในรูปแบบพัลส์ โดยมีสัดส่วนที่เปลี่ยนแปลงไปตามความต่างเฟสของคลื่นความถี่อินพุต ซึ่งหลักการดังกล่าวจะเป็นหลักการของวงจรมอดูลควบคุมความถี่อัตโนมัติ (Automatic Frequency Control, AFC) ซึ่งเป็น โมดูลที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบควบคุม เพื่อปรับจูนความถี่การทำงานของอุปกรณ์ระหว่าง แมกนีตรอนกับท่อเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนให้เกิดการเข้ากันได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้โมดูลวงจรมอดูล AFC เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของ

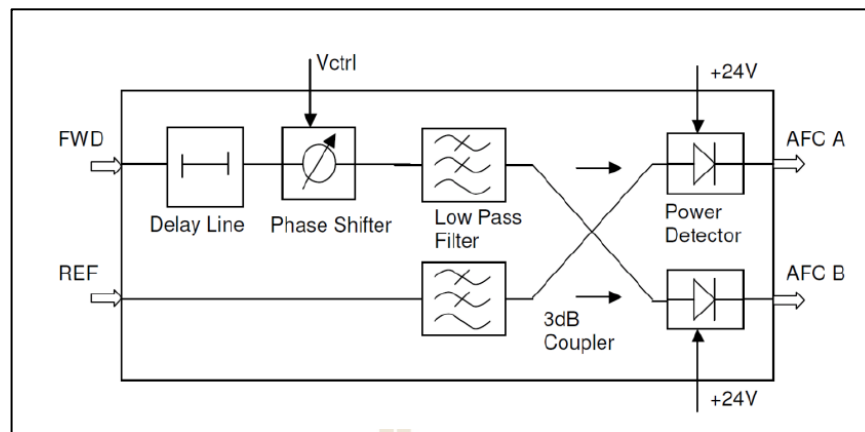
ระบบที่จะทำการออกแบบระบบควบคุมให้มีความน่าเชื่อถือและมีเสถียรภาพดียิ่งขึ้น ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนผังของระบบคลื่นความถี่วิทยุ ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 แผนผังบล็อกไดอะแกรมของระบบคลื่นความถี่วิทยุ

5.2 การควบคุมความถี่อัตโนมัติ

การควบคุมคลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency: RF) ต้องอาศัยการควบคุมชุดมอเตอร์เพื่อไปปรับจูน (Motor Tuning) ตำแหน่งของแมกนีตรอน (Magnetron) ให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ของคลื่นวิทยุในย่าน S-Band ความถี่ 2.9982 GHz โดยผ่านท่อนำคลื่น (Wave Guide) เพื่อไปเร่งลำอิเล็กตรอนที่ถูกยิงออกจากปืนอิเล็กตรอนให้ชนกับเป้า X-Ray โดยใช้ชุดอุปกรณ์ที่มีความสามารถทำการวัดค่ารังสีเอ็กซ์ (Dose rate) และเป็นตัวเซนเซอร์วัดแสดงผลบนโปรแกรม ในส่วนของความถี่เรโซแนนซ์อาจมีการเปลี่ยนแปลงมาจากสิ่งรบกวนที่เป็นอุณหภูมิของแมกนีตรอนและท่อเร่งที่มีค่าไม่คงที่หรือปัจจัยอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อความสม่ำเสมอจากการวัดปริมาณรังสี ซึ่งความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงนี้จะถูกตรวจจับผ่านระบบ AFC sensing ที่เป็นเซนเซอร์วัดสัญญาณแรงดันป้อนกลับของค่า Forward Power และ Reflect Power โดยสัญญาณป้อนกลับทั้ง 2 ค่าต้องนำมาเปรียบเทียบกันให้มีค่าใกล้เคียงศูนย์หรือมีค่าน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ โดยใช้ตัวอุปกรณ์ที่มีความสามารถรับสัญญาณความถี่เรโซแนนซ์ที่เหมาะสมกับระบบท่อเร่งอนุภาค คือ ชุดตรวจวัดความถี่อัตโนมัติ ซึ่งมีแผนผังการทำงานดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 แผนผังบล็อกไดอะแกรมของวงจรควบคุมความถี่อัตโนมัติ

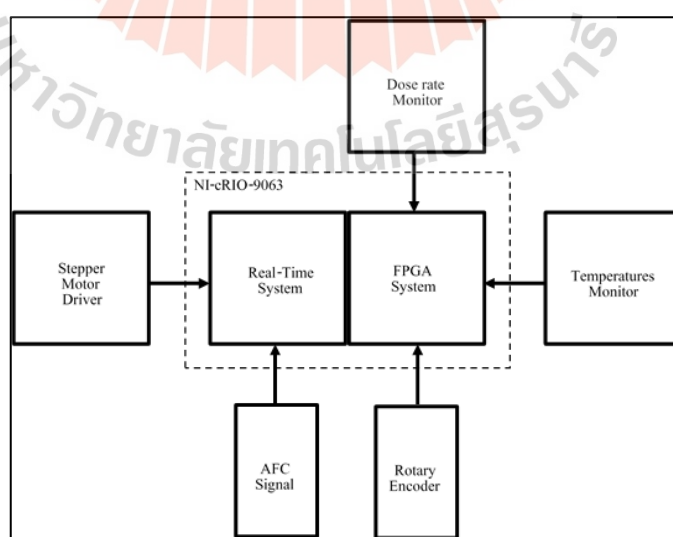
จากรูปที่ 5.2 เป็นอุปกรณ์ที่เป็นตัวสำคัญที่เป็นระบบการป้อนกลับของระบบเครื่องเร่งอนุภาค ซึ่งตัวอุปกรณ์จะให้สัญญาณควบคุมสำหรับความถี่ของแมกนีตรอนที่ความถี่เรโซแนนซ์ โดยชุดอุปกรณ์นี้จะเป็นชุดที่มีขนาดเล็กกระทัดรัดที่มีกระบวนการนำค่าสัญญาณอินพุตที่เป็นชนิดไปข้างหน้าและสะท้อนกลับมาเปรียบเทียบผลต่าง ซึ่งผลต่างจากการเปรียบเทียบจะมีสัดส่วนแปรผันไปตามความต่างเฟสของความถี่เรโซแนนซ์อินพุต ซึ่งวิธีการปรับความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนจะใช้หลักการการออกแบบโปรแกรมควบคุมเพื่อปรับจูนความถี่ โดยอาศัยหลักการของอัลกอริทึมแบบฟัซซี (Fuzzy Logic Algorithm) เพื่อสร้างสัญญาณความถี่ชดเชยกับระบบท่อเร่งอนุภาค นอกจากนี้มีการออกแบบระบบชุดมอนิเตอร์ค่าอุณหภูมิจากการทดลองทั้งหมด 8 ตำแหน่ง เพื่อสังเกตค่าอุณหภูมิที่มีผลทำให้ความถี่เรโซแนนซ์มีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งการทำงานของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ (กรอบเส้นประ รูปที่ 5.1) มีหลักการในการทดลองระบบ เริ่มต้นใช้คอมพิวเตอร์หลัก เขียน โปรแกรมควบคุมการทำงานทั้งระบบ โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เป็นตัวควบคุมผ่านระบบ Remote Network ทั้งหมด เพื่อหลีกเลี่ยงการทำงานที่อยู่ในสถานที่ที่มีรังสี ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ทำการควบคุมระบบ สำหรับการออกแบบชุดควบคุมประมวลผลกลางจะเป็นชุดคอนโทรลเลอร์ที่เป็นส่วนของระบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) และระบบเวลาจริง (Real-time system) ในการอ่านค่าตำแหน่งของมอเตอร์และควบคุมสปีดปิ้งมอเตอร์ ตามลำดับ ซึ่งหลักการการควบคุมมอเตอร์ใช้โมดูลโปรแกรม NI-SoftMotion เป็นโปรแกรมกลางในการติดต่อระหว่างโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์ (NI-9512) และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Driver Motor) เพื่อทำการปรับจูนตำแหน่งของแมกนีตรอน (Magnetron) ที่ทำหน้าที่กำเนิดคลื่นวิทยุกำลังสูงในย่าน S-Band ที่ความถี่ 2.9982 GHz ผ่านท่อนำคลื่นไปยังท่อเร่งอนุภาค (Accelerator) เพื่อเร่งอิเล็กตรอนที่ถูกยิง

ออกมาจากป็นอิเล็กทรอนิกส์ จากนั้นใช้เซนเซอร์วัดค่ารังสี (Radiation sensor) แสดงผลบนโปรแกรมควบคุมกลาง

ในส่วนของการปรับความถี่เรโซแนนซ์ของคลื่นวิทยุที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นมีการติดตั้งเซนเซอร์วัดสัญญาณป้อนกลับ (AFC sensing) ผ่านชุด Directional coupler (FWD power) และชุด Circulator ที่เป็นทางผ่านของคลื่นสะท้อนกลับ (REFL power) ซึ่งสัญญาณทั้ง 2 จะต้องทำการเปรียบเทียบสัญญาณผ่านชุด AFC circuit ที่ความถี่ 2.9982 GHz จนได้สัญญาณที่เป็น AFC-A และ AFC-B จากนั้นใช้โมดูลที่มีความสามารถในการ Sampling สัญญาณที่สูง เพื่ออ่านค่าสัญญาณแรงดันที่มีความกว้าง (Pulse Width) ประมาณ 5 μ s แล้วเอามาหักล้างกัน และควรมีค่าใกล้เคียงศูนย์ให้มากที่สุด ซึ่งผลของค่าสัญญาณที่หักล้างกัน ต้องนำไปใช้ร่วมกับโปรแกรมกลาง เพื่อปรับจูนมอเตอร์ ตามอัลกอริทึมที่กำหนดต่อไป

5.3 ระบบควบคุมการทำงานแบบเวลาจริงและสมองกลฝังตัว

ระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติจะเป็นการควบคุมสมดุลของแรงดันระหว่างสัญญาณ Reflect Power (AFC-A) และ Forward Power (AFC-B) ซึ่งสัญญาณทั้ง 2 ต้องนำมาเปรียบเทียบกัน เพื่อให้สัญญาณเข้าใกล้ค่าศูนย์ให้มากที่สุด ซึ่งการทำงานของระบบควบคุมจะมีการออกแบบเพื่อทำงานในลักษณะที่เป็นระบบเวลาจริงและระบบสมองกลฝังตัว รวมถึงต้องออกแบบระบบเพื่อให้อุปกรณ์แต่ละชนิดทำงานพร้อมกันด้วยการกำหนดระบบควบคุมทางเวลา ซึ่งการออกแบบอุปกรณ์การทดสอบ แสดงผังแผนผังการทำงาน ดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 แผนผังการทำงานของระบบควบคุมประมวลผลกลาง

ระบบประมวลผลกลางที่ทำหน้าที่ปรับจูนความถี่และเก็บข้อมูลสัญญาณป้อนกลับหรือสัญญาณคลื่นความถี่สะท้อนกลับจะออกแบบระบบภายใต้การทำงานเวลาจริง (Realtime system) และบางฟังก์ชันจะออกแบบระบบให้ทำงานบนสมองกลฝังตัว (Embedded system) เพื่อลดขั้นตอนการประมวลผลบนโปรแกรมหลัก ทำให้การควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นมีการทำงานที่รวดเร็วและมีประสิทธิภาพในการชดเชยความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ทันทั่วทั้งซึ่งการทำงานของระบบภายใต้เวลาจริง ประกอบด้วย ฟังก์ชันของการเปรียบเทียบผลต่างของสัญญาณความถี่อ้างอิงจากตัวอุปกรณ์วัดความถี่อัตโนมัติ เพื่อแปลงข้อมูลเป็นสัญญาณพัลส์แล้วนำค่าผลต่างไปทำงานบนโปรแกรมและควบคุมมอเตอร์ต่อไป ทำให้มีผลต่อโครงสร้างของแมกนีตรอนเปลี่ยนแปลง และชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับการออกแบบระบบสมองกลฝังตัวจะทำการออกแบบในส่วนของการป้อนกลับสัญญาณตำแหน่งของเอ็นโค้ดเดอร์หรือสัญญาณป้อนกลับตำแหน่งมอเตอร์ รวมไปถึงการมอเตอร์ คำรังสีเอ็กซ์ และอุณหภูมิตามจุดต่างๆ ของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ซึ่งอุปกรณ์ควบคุมระบบประมวลผลกลางทั้งหมดมีรายละเอียดข้อจำกัดของการใช้งานอุปกรณ์ดังต่อไปนี้

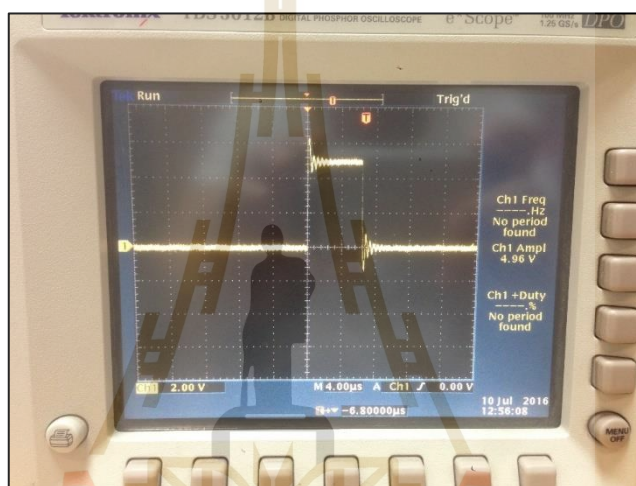
1. ชุดควบคุมระบบประมวลผลกลางมีการประมวลผลจำนวน 2 ส่วน คือ การประมวลผลแบบเวลาจริงและการประมวลผลแบบสมองกลฝังตัว ซึ่งการทำงานของชุดเครื่องมือสามารถออกแบบเพื่อเขียนโปรแกรมแล็ปวิิวให้ทำงานหรือติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้ และยังสามารถเขียนโปรแกรมชนิดสมองกลฝังตัวเพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างอัตโนมัติ โดยไม่ต้องรันโปรแกรมแล็ปวิิวตลอดเวลา ซึ่งอุปกรณ์ดังกล่าวมีรายละเอียดคุณสมบัติดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติของระบบประมวลผลกลาง (NI-cRIO-9063)

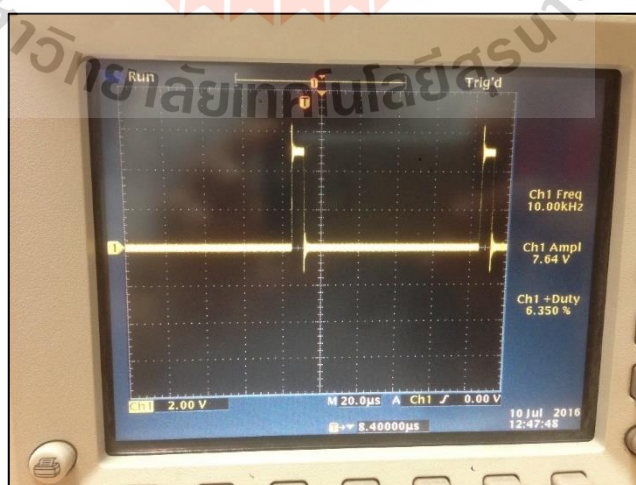
ลำดับ	หมวด	รายละเอียด
1	ชนิด	Xilinx Zynq-7000
2	การประมวลผล	477 MHz 2 Cores
3	หน่วยความจำ	256 MB
4	Real time clock	5 ppm
5	Flash reboot endurance	100000 cycles

2. ชุดโมดูลควบคุมมอเตอร์ (NI-9512 Motor Drive Interface Module) และชุดโมดูลอ่านค่าตำแหน่งมอเตอร์ (NI-9411 Differential Single-Ended) เป็นชุดของการออกแบบระบบควบคุมสแต็ปปีงมอเตอร์หรือเป็นการออกแบบเพื่อเขียนโปรแกรมขับเคลื่อนให้เหมาะสมกับมอเตอร์ที่มีแรงหมุนไม่เกิน 0.7 Nm. ซึ่งเป็นค่าขั้นต่ำของการติดตั้งระบบร่วมกับโครงสร้างการปรับจูน

แมกนีตรอน เพื่อไม่ให้มอเตอร์หมุนด้วยแรงทอร์คเกินไป ซึ่งมีผลทำให้เกิดความเสียหายต่อแท่งแกนของตัวปรับจูน ที่ติดตั้งอยู่ภายในตัวโครงสร้างแมกนีตรอนได้ โดยในงานวิจัยจะมีการควบคุมอยู่ 2 ส่วน คือ การสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมมอเตอร์ภายใต้การทำงานบนเวลาจริง โดยใช้อุปกรณ์สร้างสัญญาณพัลส์จากโมดูล NI-9512 ที่มีรูปร่างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างของสัญญาณ และแอมพลิจูดคงที่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5.4 และ 5.5 เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ พร้อมทั้งส่งค่าสัญญาณป้อนกลับตำแหน่งไปยังชุด I/O Modules NI-9411 เพื่อรับค่าตำแหน่งเอ็นโค้ดเดอร์ที่เขียนด้วยโปรแกรมแล็บวิว ซึ่งทำงานอยู่ภายใต้ระบบสมองกลฝังตัว



รูปที่ 5.4 สัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 10 Hz

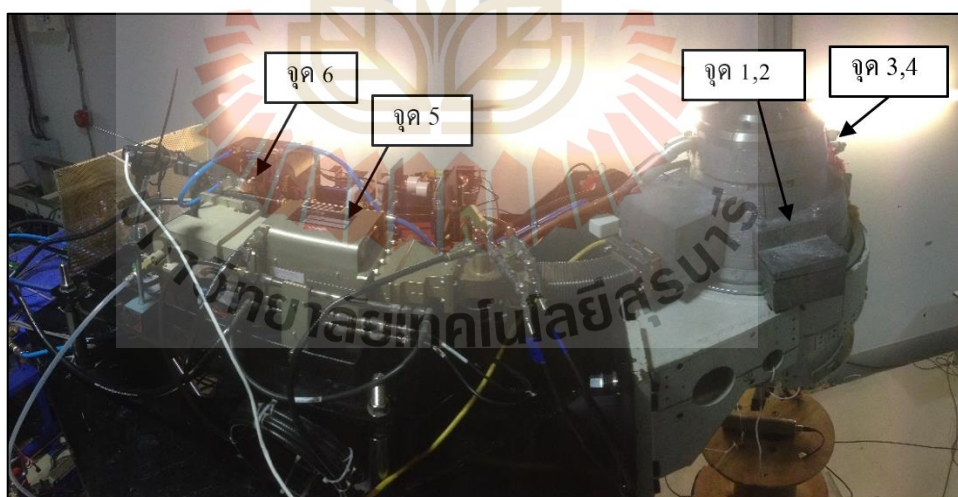


รูปที่ 5.5 สัญญาณพัลส์ที่มีความถี่ 10 kHz

3. ชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง เป็นชุดแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 24 VDC เพื่อเป็นไฟเลี้ยงให้กับชุด I/O Modules เช่น โมดูลอ่านค่าตำแหน่งมอเตอร์ โมดูลอ่านค่าอุณหภูมิ โมดูลอ่านค่าวัดรังสีเอ็กซ์ และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ (Motor Driver)

4. อุปกรณ์วัดรังสี ที่ใช้ในงานทดลองระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติจะเป็นเครื่องมือวัดรังสีเอ็กซ์โดยเฉพาะที่สามารถทนต่อพื้นที่ที่มีรังสีอยู่ตลอดเวลา แล้วไม่มีความผิดเพี้ยนต่อค่ารังสีที่แสดงผลออกมา ซึ่งจากระบบประมวลผลกลางได้ทำการเขียนโปรแกรมแล็ปวิฟเพื่ออ่านค่ารังสีเอ็กซ์ จากอุปกรณ์ภายนอก และแสดงผลอยู่ในหน่วยของ $\mu\text{Sv/hr}$. ด้วยการเขียนโปรแกรมให้ทำงานอยู่ภายใต้ระบบสมองกลฝังตัว ที่รองรับพอร์ตเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แบบอนุกรม (RS-232)

5. อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่วัดและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ เพื่อตรวจสอบถึงค่าอุณหภูมิ สภาพแวดล้อมของการทดลองว่าอุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่ ซึ่งในการทดลองได้มีการออกแบบการวัดอุณหภูมิทั้งหมด 8 จุด รอบ ๆ ระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น โดยแสดงดังรูปที่ 5.6 และเขียนโปรแกรมแล็ปวิฟบนระบบประมวลผลกลาง เพื่อมอนิเตอร์อุณหภูมิร่วมกับการติดต่อกับอุปกรณ์เก็บข้อมูล ดังรูปที่ 5.7 และการเขียนโปรแกรมดังกล่าว จะเขียนให้ทำงานภายใต้ระบบสมองกลฝังตัว ที่รองรับพอร์ตเชื่อมต่อกับอุปกรณ์แบบอนุกรม (RS-232)



รูปที่ 5.6 ตำแหน่งของการวัดอุณหภูมิ



รูปที่ 5.7 อุปกรณ์เก็บข้อมูลอุณหภูมิ

จากรูปที่ 5.6 อธิบายตำแหน่งการวัดอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ เพื่อเก็บข้อมูลไปใช้ควบคุมระบบหล่อเย็นแหล่งจ่ายให้มีการหล่อเย็นทั้งระบบของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นคองที่ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งจุดการวัดอุณหภูมิแต่ละจุดสรุปเป็นตารางที่ 5.2

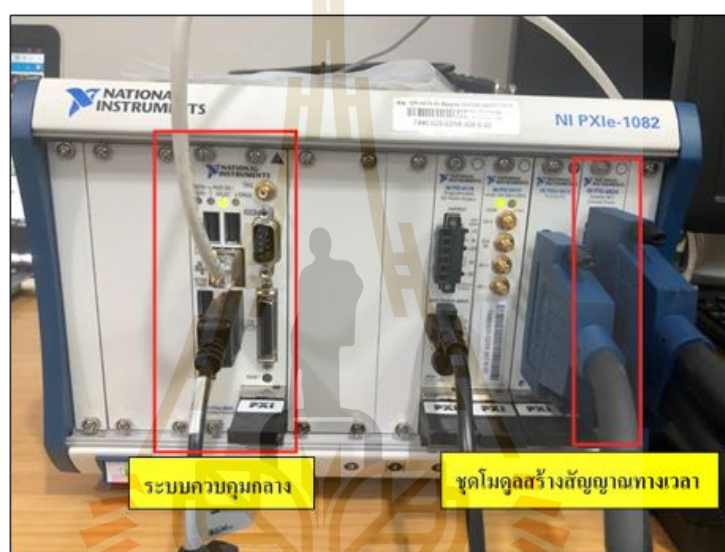
ตารางที่ 5.2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

ตำแหน่ง	รายละเอียด
1 และ 2	จุดวัดอุณหภูมิบริเวณผิวของท่อเร่ง
3	จุดวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าท่อเร่ง
4	จุดวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าตัว Target
5	จุดวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าตัว Circulator
6	จุดวัดอุณหภูมิของน้ำก่อนเข้าตัว Magnetron
7	จุดวัดอุณหภูมิน้ำต้นทาง ก่อนเข้าสู่อุปกรณ์อื่น ๆ
8	จุดวัดอุณหภูมิของตัวทำความร้อน Main Chiller

5.4 ระบบควบคุมทางเวลา

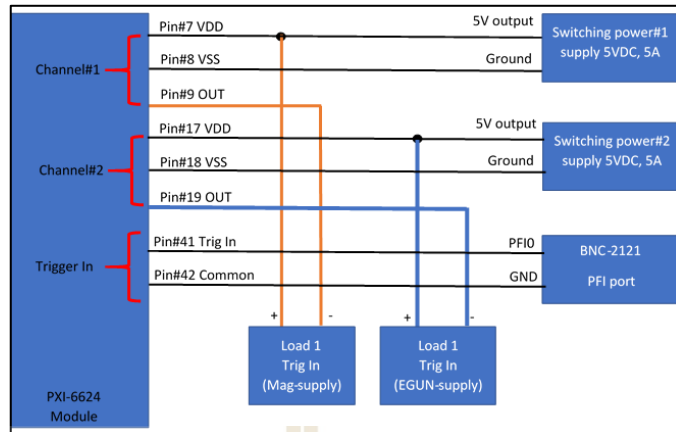
ระบบควบคุมทางเวลาสำหรับการทริกเกอร์เครื่องมือ เป็นสิ่งที่สำคัญของระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาด 6 MeV เพื่อให้อุปกรณ์ทั้งหมดทำงานภายใต้ช่วงเวลาเดียวกัน เนื่องจากระบบการทำงานมีการใช้แหล่งจ่ายทางไฟฟ้าอยู่ 2 ส่วน คือ แหล่งจ่ายซัพพลายของแมกนีตรอน

และแหล่งจ่ายชีพพลายของป็นอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งการสร้างระบบควบคุมทางเวลาได้ใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดของอัตราการสุ่มสัญญาณที่สูงที่ทำให้สามารถเก็บค่าที่มีคาบเวลา ที่เล็กมาก ๆ ได้ทันทีที่ประมาณ 5 ไมโครวินาที อัตราคาบความถี่ที่ประมาณ 300 Hz และสามารถควบคุมโดยตรงผ่านโปรแกรมแล็ปวิวได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชุดอุปกรณ์เก็บข้อมูล NI PXIe-1082 เป็นตัวระบบควบคุมกลาง เพื่อทำหน้าที่ใช้งานเครื่องมือสร้างสัญญาณทางคาบเวลาได้อย่างละเอียดด้วยโมดูล NI PXI-6624 ซึ่งเครื่องมือเพื่อการทดสอบการสร้างสัญญาณพัลส์และกำหนด Duty cycle แสดงในรูปที่ 5.8



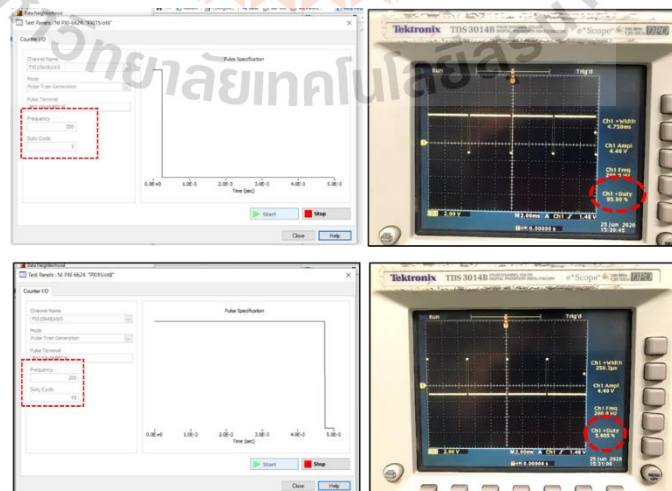
รูปที่ 5.8 ระบบควบคุมกลางสำหรับการสร้างระบบควบคุมทางเวลา

จากรูปที่ 5.8 ระบบควบคุมทางเวลาในงานวิจัยได้ทำการออกแบบสร้างสัญญาณที่สามารถกำหนด คาบเวลาได้แคบถึง 1 ไมโครวินาที และกำหนดความถี่ 200 – 300 Hz จำนวน 2 ช่องทาง คือทำการทริกสัญญาณให้ชุดมอดูเลเตอร์ของแมกนีตรอนและป็นอิเล็กทรอนิกส์ ให้ทำงานภายใต้เวลาเดียวกัน ซึ่งหลักการออกแบบวงจรทางเวลาสรุปเป็นแผนผังดังรูปที่ 5.9



รูปที่ 5.9 แผนผังการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์การสร้างระบบควบคุมทางเวลา

จากรูปที่ 5.9 การเขียน โปรแกรมเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์สร้างสัญญาณทางเวลาจะเขียนด้วยโปรแกรมแล็ปวิว และเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ผ่านทางระบบเครือข่ายแบบ Remote ซึ่งขั้นตอนการสร้างสัญญาณจะทำการสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้างที่เล็กมาก ๆ หรือในระบบความกว้าง 1 - 5 ไมโครวินาที และความถี่ตั้งแต่ 200 – 300 Hz ซึ่งอุปกรณ์ที่ออกแบบจะมีข้อจำกัดในการสร้างสัญญาณที่จำเป็นต้องกำหนดค่า Duty cycle แบบกลับด้าน คือ กำหนดค่า Duty cycle ที่ 5 % แต่สัญญาณที่วัดด้วยออสซิโลสโคปที่มีพิคคัสสัญญาณ 1.25 GS/s วัดผลได้ 95 % ในทางกลับกันเมื่อกำหนดค่า Duty cycle ที่ 95 % สัญญาณที่วัดด้วยสโคปจะวัดผลได้ 5 % และแสดงการตั้งค่าโปรแกรม และผลของการวัดด้วยออสซิโลสโคป ดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 โปรแกรมควบคุมทางเวลาและผลจากการวัดด้วยสโคป

5.5 การออกแบบโปรแกรมอินเทอร์เฟซ

ระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติของระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นมีการออกแบบการควบคุมอุปกรณ์ทุกตัว โดยใช้โปรแกรม LABVIEW ที่มีการเชื่อมต่อผ่านพอร์ตสื่อสารต่าง ๆ เช่น พอร์ตอนุกรม พอร์ตจีพีไอบี และพอร์ตไอทีเทอร์เน็ต เป็นต้น และทำงานร่วมกับชุดฮาร์ดแวร์ที่เป็นชุดควบคุมที่มีการประมวลผลแบบสมองกลฝังตัว (Compact-RIO) ซึ่งชุดควบคุมดังกล่าวมีการติดตั้งโมดูลที่สามารถสร้างสัญญาณพัลส์เพื่อควบคุมมอเตอร์ (NI-9512) แบบสเต็ปปิ้ง โดยเฉพาะและอ่านค่าตำแหน่งของมอเตอร์ พร้อมทั้งสร้างโปรแกรมเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์เครื่องมือวัดเพื่ออ่านค่าสถานะของค่าแรงเสียดทานและค่าอุณหภูมิทั้งหมด 8 ตำแหน่ง เพื่อตรวจสอบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อระบบ ซึ่งโปรแกรม LABVIEW มีการพัฒนามาจาก บริษัท เนชั่นแนลอินสทริวเม้นส์ เพื่อใช้ในการสร้างระบบการวัด ทดสอบ และควบคุม ซึ่งโปรแกรม LabVIEW จะมีการเขียนโปรแกรมด้วยภาษาโค้ดรูปภาพ (Graphical programming) และมีการต่อสายส่งข้อมูลคล้ายกับการวาด flow chart ที่สามารถทำให้ผู้เขียนเข้าใจได้ง่ายขึ้น ซึ่งชุดพัฒนาจะมาพร้อมกับฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์และวิศวกรรมหลายหลายรูปแบบสำหรับการวิเคราะห์ ประมวลผล และแสดงข้อมูล รวมถึงสามารถใช้งานร่วมกันฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์อื่น ๆ ได้ดี ในปัจจุบัน นอกจาก LabVIEW จะถูกใช้งานบนพีซีทั่วไปเพื่อตั้งสัญญาณหรือควบคุมเครื่องมือวัดแล้ว ยังขยายขีดความสามารถของแพลตฟอร์มให้สามารถออกแบบได้ทั้งระบบ ตั้งแต่ส่วนของการออกแบบซอฟต์แวร์ การคำนวณ ไปจนถึงการตั้งสัญญาณและการติดตั้งลงไปในฮาร์ดแวร์ทั้งแบบ วินโดวส์ เรียลไทม์ และ FPGA โดยใช้แพลตฟอร์ม LabVIEW เพียงแพลตฟอร์มเดียว ทำให้สามารถต่อยอดได้ทันทีเมื่อเวลาที่เราต้องการทำงานกับพีซีบนวินโดวส์ไปเป็นฮาร์ดแวร์แบบฝังตัว ซึ่งโปรแกรม LABVIEW มีองค์ประกอบพื้นฐานต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

5.5.1 DATA FLOW and G-Programming

โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้รูปภาพ หรือสัญลักษณ์แทนการเขียนด้วยตัวอักษร ซึ่งข้อดีคือสามารถลดความผิดพลาดในการสะกดคำผิดหรือพิมพ์ผิดออกไป ข้อแตกต่างอีกอย่างหนึ่งของการเขียนโปรแกรมแบบ G กับการเขียนด้วยตัวหนังสือ คือ การเขียนด้วยภาษา G จะเป็นการเขียนโปรแกรมโดยใช้หลักการของ Data Flow ซึ่งเมื่อเริ่มส่งข้อมูลเข้าสู่โปรแกรม เราต้องกำหนดทิศทางไหลของข้อมูลว่าจะไปทิศทางไหน และผ่านการประมวลผลคำนวณในส่วนใดบ้างและมีการแสดงผลอย่างไร ลักษณะการเขียนภาษา G หรือ Data Flow จะมีลักษณะเหมือนกับการเขียน Block diagram ซึ่งทำให้ผู้เขียนโปรแกรมสามารถให้ความสนใจกับการเคลื่อนที่ของข้อมูลได้โดยไม่ต้องจดจำรูปแบบคำสั่งที่ยุ่งยาก การเขียนแบบ Block Diagram วิศวกรส่วนใหญ่จะมีความคุ้นเคยอยู่แล้ว จึงเป็นการง่ายที่จะทำความเข้าใจและนำไปพัฒนาหรือประยุกต์ใช้ การเขียนโปรแกรมถ้าหากเรามีการเขียน Flow Chart ก่อนที่จะเริ่มเขียนโปรแกรมใน

LabVIEW จะทำให้ช่วยลดขั้นตอนการเขียน โปรแกรมไปอย่างมากเพราะจะช่วยลดข้อผิดพลาดที่เราอาจเขียนโปรแกรมผิดขั้นตอนและลดระยะเวลาในการเขียนโปรแกรมด้วย

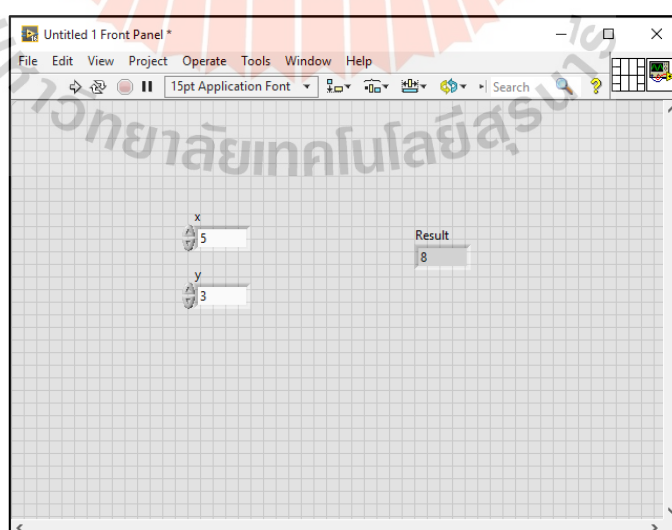
LabVIEW จะมี Front panel ซึ่งเปรียบเสมือนได้กับสิ่งที่ผู้ใช้เห็นและควบคุมการทำงาน โดย Front panel จะมีส่วนประกอบต่าง ๆ ให้ใช้มากมาย เช่น ปุ่มกด ปุ่มหมุน สวิตช์ หรือกราฟ เป็นต้น โดย LabVIEW จะแสดงผลและควบคุมการทำงานผ่านและพื้นที่ส่วนเขียนโปรแกรมจะเรียกว่า “Block diagram” ซึ่งจะเปรียบเสมือนกับ ฮาร์ดแวร์ สำหรับเครื่องมือวัด และมีการเขียนโปรแกรมโดยอาศัยรูปภาพ

5.5.2 ส่วนประกอบต่างๆ ในโปรแกรม LabVIEW

โปรแกรมที่เขียนขึ้นมาโดยโปรแกรม LabVIEW จะเรียกว่า Virtual Instrument หรืออุปกรณ์เครื่องมือวัดเสมือน เพราะลักษณะที่ปรากฏทางจอภาพเมื่อผู้ใช้งานจะเหมือนกับอุปกรณ์ทางวิศวกรรม ในขณะที่เดียวกันภายในอุปกรณ์เสมือนจริงจะเป็นการทำงานของฟังก์ชันและโปรแกรมหลักเหมือนกับภาษาทั่วไป สำหรับ VI จะประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 3 ส่วน คือ

1. หน้าต่างโปรแกรม (Front Panel)

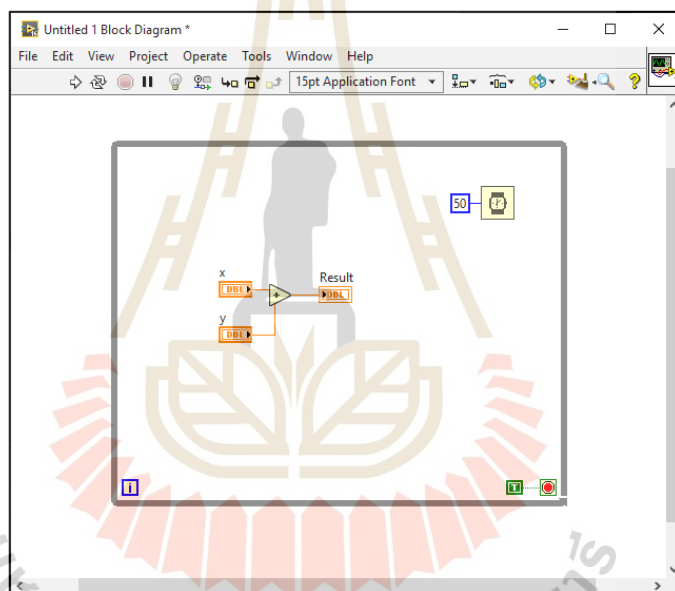
เป็นส่วนที่ใช้สื่อสารระหว่างผู้ใช้งับโปรแกรม หรือ User Interface โดยทั่วไปจะมีลักษณะเหมือนกับหน้าปัทม์ของเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่ใช้งานด้านการวัดทั่ว ๆ ไป ซึ่งประกอบด้วย สวิตช์ปิด - เปิด ปุ่มกด จอแสดงผลหรือค่าที่ผู้ใช้กำหนดขึ้น สำหรับผู้ที่คุ้นเคยกับการเขียนโปรแกรมประเภท Visual จะเข้าใจกันดีว่า Front panel นี้เปรียบเสมือน GUI ของโปรแกรมทั่ว ๆ ไป โดยแสดงดังรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 ตัวอย่างหน้าจอ Front panel

2. แผนผังโค้ดโปรแกรม (Block Diagram)

Block Diagram ของ LabVIEW จะอยู่ในรูปของภาษา G ที่เปรียบเสมือนกับ Source code ของโปรแกรมทั่ว ๆ ไป ซึ่งถือว่าเป็น Executable Program คือ สามารถทำงานได้ทันที และข้อดีอีกอย่างหนึ่งคือ สามารถตรวจสอบความผิดพลาดของโปรแกรมได้ตลอดเวลาทำให้โปรแกรมทำงานได้ก็ต่อเมื่อไม่มีข้อผิดพลาด ส่วนประกอบภายใน Block Diagram ประกอบด้วย ฟังก์ชันค่าคงที่ โปรแกรมควบคุมการทำงาน จากนั้นในแต่ละส่วนจะปรากฏในรูปของ Block จะต้องมีการต่อสายเข้าด้วยกันและต้องเป็นชนิดเดียวกันด้วย เพื่อกำหนดลักษณะการไหลของข้อมูลระหว่าง Block ให้ถูกต้องตาม Data Flow ที่เราต้องการ โดยแสดงดังรูปที่ 5.12 และแสดงผลค่าที่ได้ออกสู่ Front panel รูปที่ 5.11



รูปที่ 5.12 ตัวอย่าง Block Diagram

3. ไอคอน (Icon) และ คอนเนกเตอร์ (Connector)

เปรียบเสมือนโปรแกรมย่อย (Subroutine) ในโปรแกรมปกติทั่ว ๆ ไป โดย Icon จะหมายถึง Block diagram ตัวหนึ่งที่มีการส่งข้อมูลเข้าและออกผ่านทาง Connector ซึ่งใน LabVIEW จะเรียก Subroutine ว่า “Sub-VI” ข้อดีของการเขียนโปรแกรมด้วยภาษา G นี้คือ สามารถสร้าง VI ที่ละส่วนขึ้นมาให้ทำงานด้วยตัวเองได้อย่างอิสระ จากนั้นภายหลังหากต้องการใช้งานสามารถเขียนโปรแกรมอื่นขึ้นมาเพื่อเรียกใช้งาน VI ที่เคยสร้างขึ้นก่อนหน้านี้ทีละตัว ทำให้ VI ที่เขียนขึ้นก่อนจะกลายเป็น Sub-VI ไป การเขียนในลักษณะนี้เรียกว่า “การเขียนแบบ

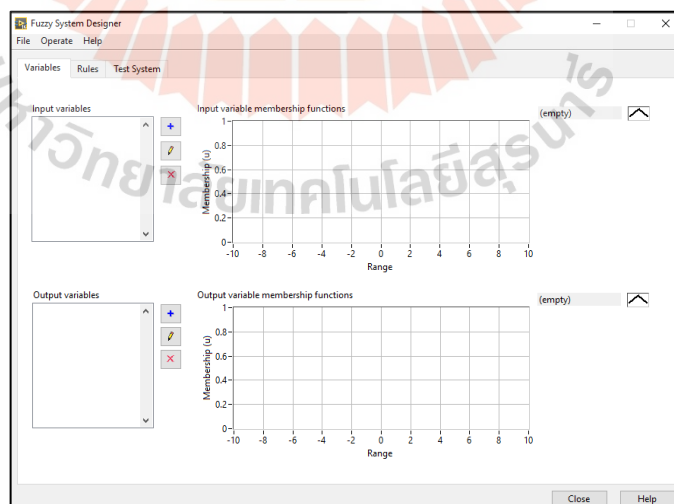
Module” สำหรับลักษณะทั่วไปของ Icon และ Connector จะแสดงในรูปที่ 5.13 ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อแสดงในรูปของ Connector จะพบว่ามีช่องต่อข้อมูลหรือเรียกว่า Terminal ปรากฏขึ้นมาให้เห็น



รูปที่ 5.13 Icon และ Connector

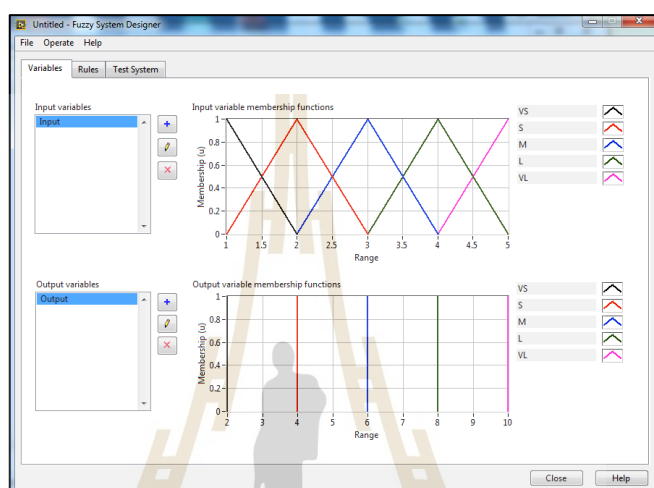
5.5.3 การออกแบบพีชชีบนโปรแกรม LabVIEW Fuzzy System Designer

โปรแกรม LabVIEW มีระบบการสร้างโปรแกรม หรือออกแบบ ระบบที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีที่อยู่ในรูปของฟังก์ชัน Fuzzy Logic Toolbox โดยผู้ใช้งานสามารถทำการติดตั้งส่วนเสริม คือ LabVIEW Control Design and Simulation Module แสดงดังรูปที่ 5.14 สำหรับหัวข้อนี้จะแสดงให้เห็นถึงการสร้างฟัซซีลอจิกอย่างง่าย เพื่อให้เรียนรู้และเข้าใจการทำงานเบื้องต้นของชุดเครื่องมือ เพื่อออกแบบตัวควบคุมฟัซซี ที่อยู่ภายใต้โปรแกรมแล็บวิว ก่อนที่จะนำไปใช้งานกับงานระบบจริง



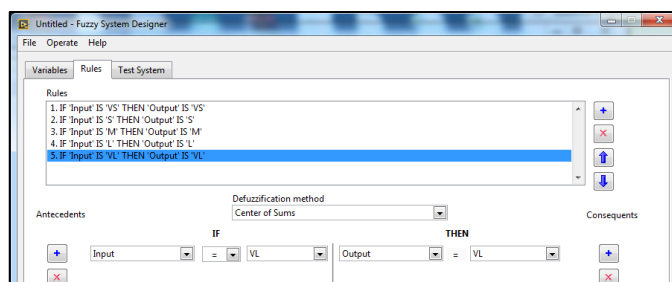
รูปที่ 5.14 โปรแกรมออกแบบตัวควบคุมฟัซซี

จากรูปที่ 5.14 คือ ส่วนการสร้างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุตพร้อมสามารถปรับขอบเขตของตัวแปร ซึ่งต้องกำหนดตัวแปรที่มีขนาดต่ำสุดและสูงสุดของขอบเขตสมาชิก ส่วนรูปแบบฟังก์ชันของสมาชิก (Membership function) จะสามารถกำหนด ชื่อ, สี และรูปร่าง เช่น สามเหลี่ยม ตีเหลี่ยมคางหมู เส้นตรง หรือรูปแบบฟังก์ชันเก๊าซ์ เป็นต้น ซึ่งแสดงผลการกำหนดค่าต่าง ๆ ดังรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 การกำหนด Membership function ส่วน อินพุตและเอาต์พุต

การสร้างกฎของฟัซซี ที่เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบอัลกอริทึมของระบบ จะอยู่ในส่วนของหมวด Rules โดยแสดงดังรูปที่ 5.16 ซึ่งโปรแกรมออกแบบสามารถที่จะกำหนดเงื่อนไข Antecedent connective และ วิธีการ Defuzzification method ต่าง ๆ เช่น วิธีแบบ Center of Gravity ของการอนุมานแบบ Mamdani หรือ Weight Average ของการอนุมานแบบ Takagi-Sugeno เป็นต้น



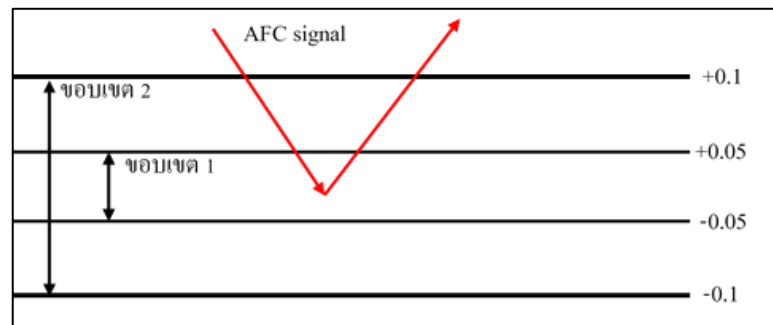
รูปที่ 5.16 การกำหนด การอนุมานฟัซซีและการทำ Defuzzification

จากกระบวนการสร้างโปรแกรม User Interface บนโปรแกรม LABVIEW สามารถที่จะพัฒนาการออกแบบด้วยภาษา G-programming เพื่อการใช้งานโปรแกรมควบคุมความถี่อัตโนมัติ ให้สามารถใช้งานได้สะดวก และทำความเข้าใจได้ง่ายต่อการใช้งานควบคุมระบบ โดยสามารถอธิบายฟังก์ชันการทำงานแต่ละฟังก์ชันการใช้งานได้ดังรูปที่ 5.17

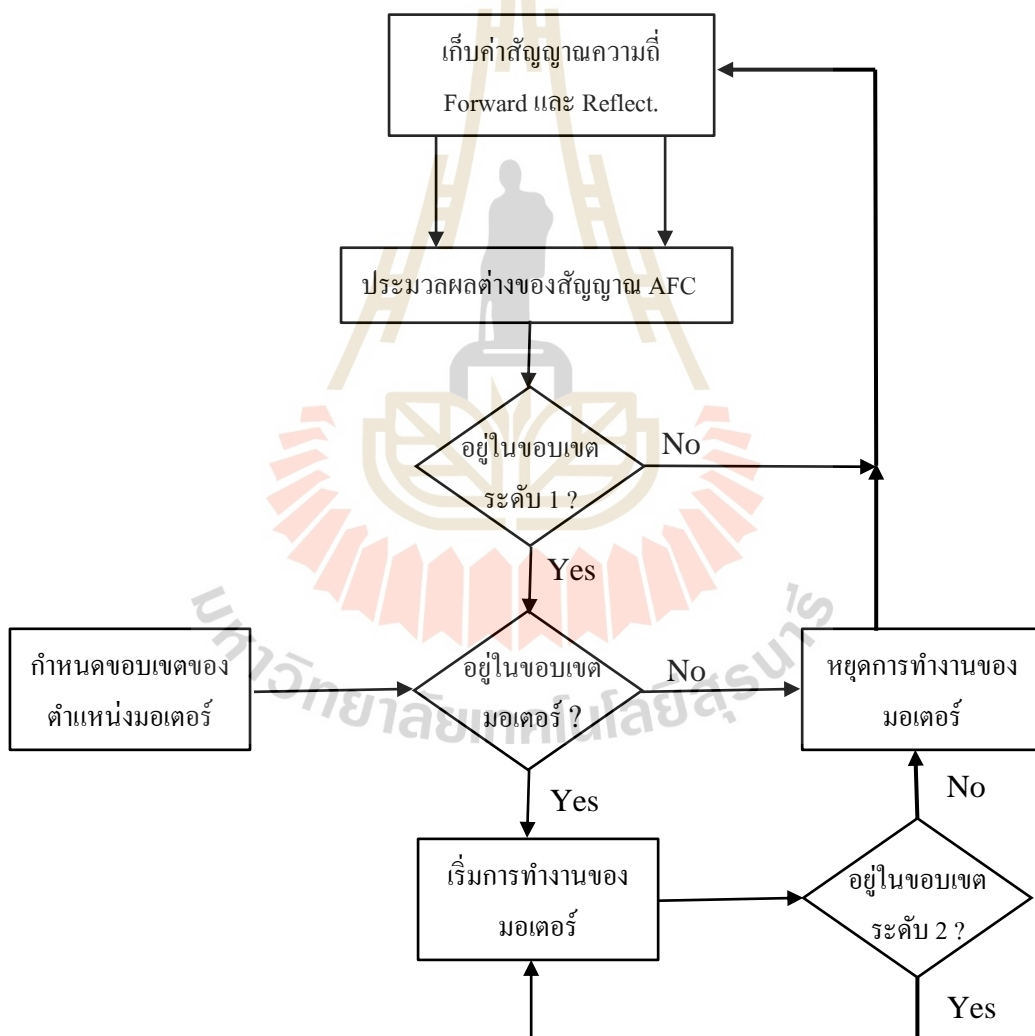


รูปที่ 5.17 โปรแกรมระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ

1. โหมดการทำงานแบบปกติ (Manual) คือโหมดการปรับมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ตามต้องการโดยการป้อนค่าพารามิเตอร์ เช่น ชนิดของการเคลื่อนที่แบบ Absolute หรือ Relative ความถี่ที่ทำให้มอเตอร์หมุนช้าหรือเร็วและตำแหน่งที่ต้องการ
2. โหมดการทำงานแบบอัตโนมัติ (Auto) คือ โหมดการทำงานของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติที่มีการใช้ลอจิกฟัซซี (Fuzzy Logic control) มาช่วยในการปรับตำแหน่งของมอเตอร์ ซึ่งหลักการออกแบบอัลกิริทึมใช้หลักการออกแบบกฎของขอบเขตสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งกำหนดสัญญาณอินพุตเป็นความผิดพลาดของค่าแรงดันของสัญญาณ AFC และสัญญาณอ้างอิง ส่วนสัญญาณเอาต์พุตคือค่าความถี่และตำแหน่งที่ควบคุมมอเตอร์ให้เคลื่อนที่ ซึ่งการควบคุมความถี่อัตโนมัติ ในงานวิจัยได้เพิ่มฟังก์ชันการกำหนดขอบเขตของสัญญาณ AFC ที่ยอมรับได้ในช่วงขอบเขตที่ต้องการ ซึ่งขอบเขตของการควบคุมจะมีอยู่ 2 ขอบเขต แสดงดังรูปที่ 5.18



รูปที่ 5.18 ขอบเขตที่ต้องการของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ



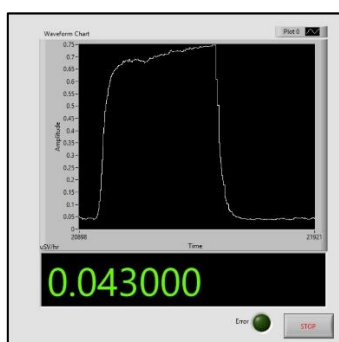
รูปที่ 5.19 แผนผังการทำงานการออกแบบขอบเขตระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ

จากรูปที่ 5.18 แสดงถึงขอบเขต 2 ขอบเขตที่กำหนดในโปรแกรมควบคุมความถี่อัตโนมัติ ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า เมื่อสัญญาณ AFC มีค่าลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งอยู่ในขอบเขตช่วงที่ 1 (ช่วง -0.05 ถึง $+0.05$ โวลต์) จะทำให้โปรแกรมมีการขยายขอบเขตของสัญญาณให้กว้างขึ้นเป็นขอบเขตช่วงที่ 2 (ช่วง -1.0 ถึง $+1.0$ โวลต์) จนกระทั่งสัญญาณ AFC มีการเปลี่ยนแปลงแล้วหลุดออกจากขอบเขตที่ 2 เมื่อไหร่ ขอบเขตของโปรแกรมก็จะแคบลงเป็นขอบเขตที่ 1 ซึ่งการขยายขอบเขตให้กว้างขึ้นนั้น การเปลี่ยนแปลงค่าสัญญาณ AFC ต้องมีค่าสัญญาณที่เข้าไปในขอบเขตที่ 1 อีกครั้ง โปรแกรมก็จะขยายขอบเขตให้กว้างขึ้นต่อไป ซึ่งกระบวนการทำงานต่าง ๆ ของขอบเขตที่กำหนดอธิบายเป็นแผนผังการทำงาน ดังรูปที่ 5.19

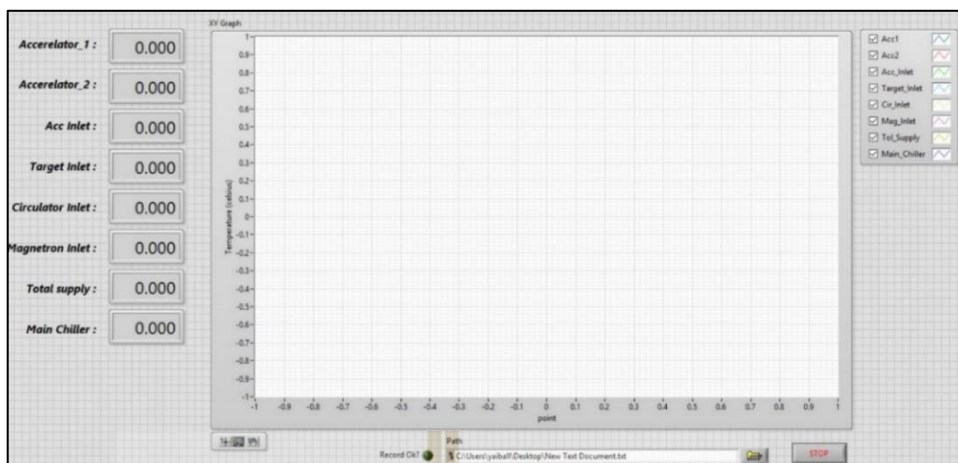
3. ส่วนการแสดงผลค่าตำแหน่งการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ ประกอบด้วยค่าตำแหน่ง 2 ส่วน เพื่อนำค่าเปรียบเทียบผลต่างความผิดพลาด ซึ่งประกอบด้วย ค่าตำแหน่งมอเตอร์ที่วัดผ่านการโปรแกรมบนสมองกลฝั่งตัว และอ่านค่าตำแหน่งจากตัวโมดูล NI-9512 ด้วยเครื่องมือชุด NI-Soft Motion บนโปรแกรม และมีการแสดงผลการวัดค่ารังสีที่อ่านจากตัวเซนเซอร์ในหน่วย $\mu\text{Sv/hr}$.

4. ส่วนการแสดงผลสถานะการทำงานของมอเตอร์และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ ที่แสดงผลแบบเวลาจริง เช่น มอเตอร์กำลังเคลื่อนที่ (Busy) มอเตอร์ถึงเป้าหมาย (Done) หรือมอเตอร์ถูกหยุดฉุกเฉิน (Abort) เป็นต้น

5. ส่วนการแสดงผลในรูปแบบกราฟ ประกอบด้วย ผลตอบสนองของปริมาณรังสีเอ็กซ์ ตำแหน่งมอเตอร์ สัญญาณป้อนกลับ AFC และอุณหภูมิที่วัดได้ ต่อหน่วยเวลา เป็นต้น พร้อมทั้งสามารถบันทึกข้อมูลลงบนคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์ ซึ่งการติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอกเพื่ออ่านค่าปริมาณรังสีเอ็กซ์ และอุณหภูมิตามจุดต่าง ๆ ของระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น จะออกแบบเพื่อเขียนโปรแกรมย่อยควบคุมอุปกรณ์ ในการแชร์ข้อมูลผ่านระบบเครือข่าย (Shared Variable) ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 5.20 และ 5.21 ตามลำดับ เพื่อลดขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมหลักให้น้อยลง และประหยัดทรัพยากรของการประมวลผลบนคอมพิวเตอร์



รูปที่ 5.20 โปรแกรมย่อยสำหรับการอ่านค่ารังสีเอ็กซ์



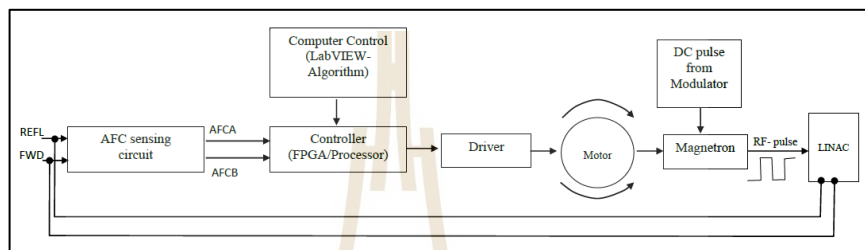
รูปที่ 5.21 โปรแกรมย่อยสำหรับการอ่านค่าอุณหภูมิ

5.6 การออกแบบตัวควบคุมพีชชี

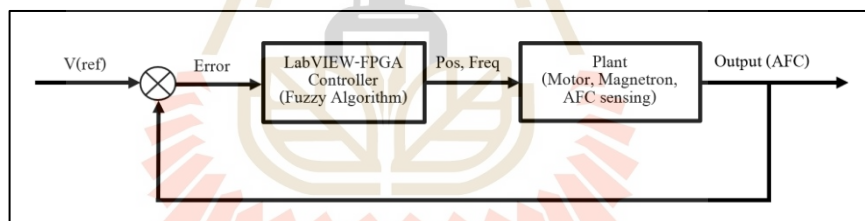
หลักการการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นสามารถอธิบายได้พอสังเขป เมื่อมอดูเลเตอร์สร้างสัญญาณพัลส์ ซึ่งกำหนดความกว้างของสัญญาณตั้งแต่ 5 - 10 μs และความถี่ 200 - 300 Hz ผ่านหม้อแปลงพัลส์จนได้แรงดันพัลส์แรงดันสูงประมาณ 45 kV เข้าสู่แมกนีตรอน ซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างคลื่นความถี่วิทยุกำลังสูงในย่าน S-Band ที่ความถี่ 2.9982 GHz ผ่านอุปกรณ์ต่าง ๆ จนเข้าสู่ท่อนำคลื่นหรือท่อเร่ง เพื่อเร่งลำอิเล็กตรอนที่ถูกยิงออกจากปืนอิเล็กตรอนให้ชนกับโลหะหนักหรือเป้าเอกซเรย์ จนเกิดลำรังสีเอ็กซ์ โดยมีอุปกรณ์วัดรังสีแสดงผลในหน่วย $\mu\text{Sv/hr}$

ความถี่เรโซแนนซ์เกิดการเปลี่ยนแปลงอาจมีสาเหตุมาจาก อุณหภูมิของแมกนีตรอน ความดันในท่อเร่งเปลี่ยนแปลง หรือปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ซึ่งความถี่นี้จะมีผลต่อความสม่ำเสมอของการวัดปริมาณรังสี (Dose rate) ความถี่ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้จะถูกตรวจจับหรือถูกป้อนกลับโดยสัญญาณ FWD (Forward power) และ REFL (Reflect power) ผ่าน AFC-Sensing ซึ่งเปรียบเสมือนกับเซนเซอร์วัดสัญญาณป้อนกลับได้เป็นสัญญาณแรงดัน AFC-A และ AFC-B ซึ่งในทางอุดมคติแล้วสัญญาณทั้งสองเมื่อหักล้างกันควรมีค่าใกล้เคียงศูนย์หรือน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการปรับหรือควบคุมสัญญาณทั้งสองคือ คอนโทรลเลอร์ (Controller) ประกอบด้วยการประมวลผลแบบเวลาจริง (Real-time) และแบบสมองกลฝังตัว (FPGA) ที่อินเตอร์เฟซกับอัลกอริทึม ของโปรแกรม LabVIEW โดยในงานวิจัยเลือกใช้การออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก ด้วยการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno เนื่องจากเป็นการออกแบบการควบคุมที่รองรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น และระบบสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรอยู่ตลอดเวลา (An on-line adjustment) เพื่อชดเชยให้ระบบมีพฤติกรรมที่เหมาะสมกับระบบที่ใช้งานอยู่ และสร้างสัญญาณชดเชย

ในการควบคุมมอเตอร์ที่ต่อโดยตรงกับแมกนีตรอนเพื่อปรับจูนความถี่เรโซแนนซ์ผ่านสัญญาณดังกล่าว ซึ่งสามารถเขียนไดอะแกรมของอุปกรณ์ได้ดังรูปที่ 5.22 และไดอะแกรมของระบบควบคุมความถี่คลื่นวิทยุ แสดงดังรูปที่ 5.23 ซึ่งประกอบด้วย ชุดคอมพิวเตอร์ และโปรแกรม LabVIEW-FPGA ที่ออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซี และพลานต์ที่ประกอบด้วย สเต็ปป์มอเตอร์, แมกนีตรอน และระบบตรวจวัดสัญญาณความถี่ โดยมีการกำหนดสัญญาณ Input/Output เป็นความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการควบคุม



รูปที่ 5.22 บล็อกไดอะแกรมอุปกรณ์สำหรับการควบคุมความถี่วิทยุ



รูปที่ 5.23 บล็อกไดอะแกรมการออกแบบตัวควบคุมความถี่วิทยุ

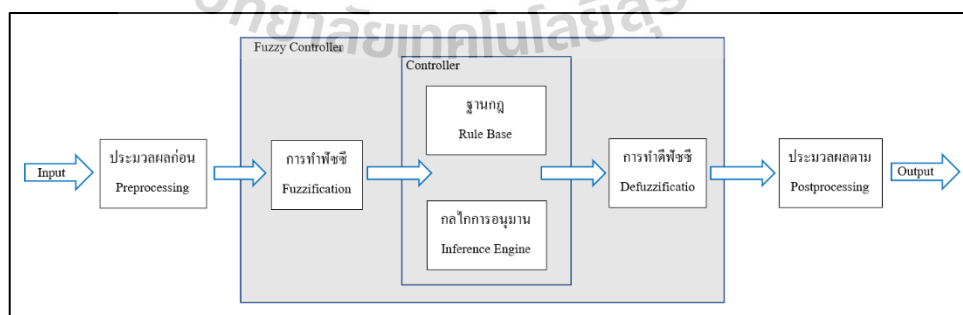
จากรูปที่ 5.23 เป็นบล็อกไดอะแกรมสำหรับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซี เพื่อทำการกำหนดขอบเขตของการควบคุมมอเตอร์ที่เป็นพลานต์ของระบบ โดยจะต้องใช้ตำแหน่งและความถี่ที่คำนวณหรือปรับตัวแปรด้วยการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าว ซึ่งการออกแบบตัวแปร ตำแหน่งและความถี่ของมอเตอร์จะต้องทำการออกแบบระบบ เพื่อกำหนดสัญญาณอินพุตเอาต์พุต และกฎเกณฑ์การควบคุมอัลกอริทึมของฟัซซีให้เหมาะสมกับระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ซึ่งหลักการควบคุมแบบฟัซซีสามารถอธิบายได้ดังต่อไปนี้

5.6.1 ระบบควบคุมแบบฟัซซี

การควบคุมอุปกรณ์หรือพลานต์ (Plant) ในปัจจุบัน โดยทั่วไปส่วนใหญ่เป็นระบบที่อาศัยการควบคุมแบบวงปิดทั้งสิ้นและวิธีการควบคุมที่นิยมมากที่สุด คือ การควบคุมแบบพีไอดี

(PID Controller) ที่เป็นระบบควบคุมป้อนกลับ ที่ไม่มีความซับซ้อนมากนัก โดยมีการปรับแต่งตัวแปรจำนวน 3 เทอม เพื่อให้เหมาะสมกับระบบที่ต้องการ เนื่องจากชุดควบคุมแบบ PID เป็นระบบที่เหมาะสมกับระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear) แต่ถ้าระบบที่ควบคุมเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear) อาจจะต้องมีการปรับค่าเกณฑ์ตามตารางเวลา ซึ่งจะมีความซับซ้อนและยุ่งยากมากขึ้น นอกจากนี้ยังมีระบบอีกชนิดหนึ่งที่เหมาะสมกับงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นและรู้จักกันแพร่หลายโดยเฉพาะในงานระบบควบคุม คือ การควบคุมแบบฟัซซี (Fuzzy Control) ซึ่งการควบคุมดังกล่าวอาศัยการออกแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic) มาเป็นเครื่องมือในการควบคุม ที่เป็นระบบที่ควบคุมอย่างชาญฉลาดและให้ประสิทธิภาพสูง เนื่องจากอาศัยข้อมูล ความรู้ และประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญในระบบที่พิจารณาเป็นพื้นฐานการออกแบบตัวควบคุม โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ เนื่องจากการควบคุมแบบฟัซซี เหมาะสมกับระบบที่มีความซับซ้อน คลุมเครือ และมีหลายอินพุต ซึ่งต่างจากการควบคุมโดยทั่วไป คือ การควบคุมแบบ LOW-HIGH หรือ สูง-ต่ำ ซึ่งวิธีทั่วไปสามารถที่จะแบ่งแยกได้ชัดเจน ซึ่งแตกต่างจากการควบคุมแบบฟัซซี ที่ต้องอาศัยการตัดสินใจจากมนุษย์ เช่น การแยกสีเทาออกจากสีขาวกับสีดำ พบว่าไม่สามารถแยกได้ว่าเป็นขาวหรือดำโดยสิ้นเชิง ด้วยเหตุนี้จึงเรียกฟัซซีลอจิกว่าเป็น “ ตรรกศาสตร์คลุมเครือ ” คือ มีความคลุมเครือในการตัดสินใจ ปัจจุบันได้มีผู้นามาใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบควบคุม เช่น ฟัซซีปรับอุณหภูมิเตาอบควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่และอุปกรณ์ไฟฟ้า เป็นต้น

สำหรับการออกแบบสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี มีองค์ประกอบต่าง ๆ ของตัวควบคุม ตามแนวทางสำหรับการออกแบบในเชิงวิศวกรรม ซึ่งมีการประมวลผลก่อนและหลังเพื่อทำการปรับค่าอินพุตและเอาต์พุต ที่ใช้ในการควบคุมแบบฟัซซีให้มีความเหมาะสมกับระบบที่ต้องการ ซึ่งมีรูปแบบโครงสร้างกระบวนการควบคุมแบบฟัซซี ดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 โครงสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี

5.6.2 การทำฟัซซี (Fuzzification)

การกำหนดค่าอินพุต เพื่อนำไปใช้กับกฎของฟัซซี (Rules base) จำเป็นต้องมีการแปลงข้อมูลอินพุตเสมอ หรือเรียกว่า การทำฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) เพื่อให้ค่าอินพุตมีรูปแบบที่เหมาะสมกับระบบ หรือแปลงเป็นตัวแปรภาษา (Linguistic variable) ส่วนการกำหนดค่าเอาต์พุต ต้องมีการแปลงข้อมูล ก่อนนำไปใช้งานกับระบบ เช่นเดียวกับข้อมูลอินพุตหรือเรียกว่า การตัดฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) ซึ่งการแปลงข้อมูลเกิดจากค่าอินพุตที่ผ่านกฎและขั้นตอนการอนุมาน (Inference engine) ซึ่งเมื่อมีการแปลงข้อมูลแล้วจะได้ผลลัพธ์เป็นค่าระดับสมาชิกของตัวแปรภาษา (Degree of Membership)

การหาระดับความเป็นสมาชิกของฟัซซี จะมีการประเมินค่าเป็นตัวแปรภาษาที่บ่งบอกถึงลักษณะของขนาด มากหรือน้อย สูงหรือต่ำ แล้วคำนวณหรือประเมินค่าเป็นตัวเลข ซึ่งการกำหนดค่าตัวแปรอาจจะมีการกำหนดค่าอินพุตและเอาต์พุตให้เหมือนกันได้ เพราะวาลิ่งสำคัญที่ควรรู้ คือ ขนาดของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุตของระบบว่ามีขนาดเท่าไรถึงจะสามารถควบคุมได้ตามที่ต้องการ แต่ว่าหากไม่ทราบค่าสามารถที่จะกำหนดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ (0 - 100%) สำหรับรูปร่างของการหาค่าสมาชิกของฟัซซีจะมีการคำนวณจากรูปร่างกราฟที่มีลักษณะเป็นรูปร่างแบบสามเหลี่ยม (Triangle) ซึ่งเป็นการคำนวณระดับสมาชิกอย่างง่าย ผลของการคำนวณจะได้ผลลัพธ์เป็นค่าระดับความเป็นสมาชิก (μ) โดยมีการคำนวณดังสมการที่ (5.1) และ (5.2) และแสดงตัวอย่างของการแสดงพารามิเตอร์ของตัวแปรภาษาดังตารางที่ 5.3

$$\mu_x = \frac{X - A_0}{A_1 - A_0}; A_0 \leq X < A_1 \quad (5.1)$$

หรือ

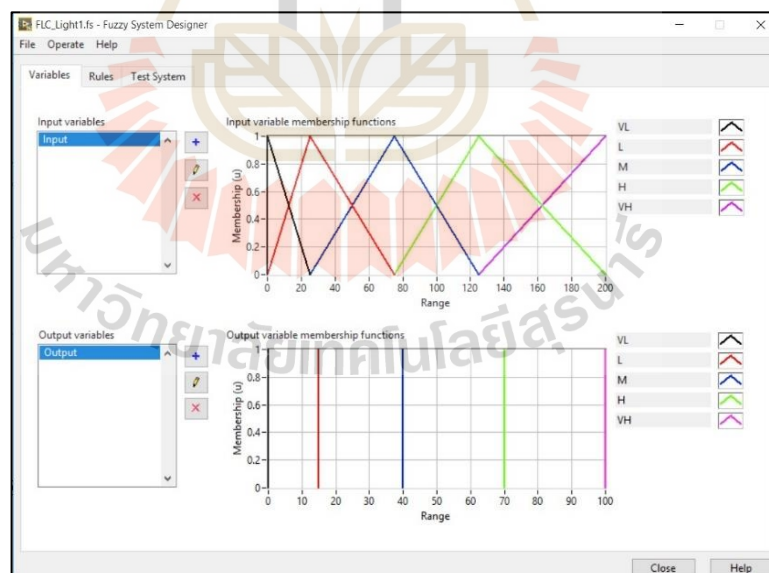
$$\mu_x = \frac{X - A_2}{A_1 - A_2}; A_1 \leq X \leq A_2 \quad (5.2)$$

จากสมการที่ (5.1) และ (5.2) กำหนดตัวแปรสมาชิกฟัซซีอินพุต และเอาต์พุต โดยให้พารามิเตอร์ของตัวแปรภาษา มีค่าที่เหมาะสมกับระบบ คือ กลุ่มสมาชิกตัวแปรอินพุตที่ 0 - 200% และกลุ่มสมาชิกตัวแปรเอาต์พุตที่ 0 - 100% ซึ่งผลการออกแบบสมาชิกตัวแปรภาษาสรุปเป็นตารางข้อมูลดังนี้

ตารางที่ 5.3 การกำหนดตัวแปรภาษา, ขนาดอินพุต และเอาต์พุตของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ

No.	Input (Error)	Variable Input	Variable Output	Output (%)	Mean of Variable
1	≤ 0	VL	VL	0	Very Low
2	25	L	L	15	Low
3	75	M	M	40	Medium
4	125	H	H	70	High
5	≥ 200	VH	VH	100	Very High

จากตารางที่ 5.3 นำข้อมูลขอบเขตและตัวแปรต่าง ๆ ไปสร้างฟังก์ชันสมาชิกพีชซี ด้วยโปรแกรม Fuzzy System Designer ซึ่งเป็นเครื่องมือที่เอาไว้ออกแบบตัวควบคุมบนโปรแกรมแล็ปวิว ซึ่งการออกแบบในโปรแกรม เลือกใช้รูปภาพที่มีลักษณะเป็นรูปร่างแบบสามเหลี่ยม ซึ่งเป็นการคำนวณระดับสมาชิกอย่างง่ายและเหมาะสมกับระบบ ซึ่งสามารถอธิบายเป็นรูปภาพฟังก์ชันความเป็นสมาชิกอินพุต และเอาต์พุต ได้ดังรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 การสร้างตัวแปรสมาชิกอินพุตและเอาต์พุต

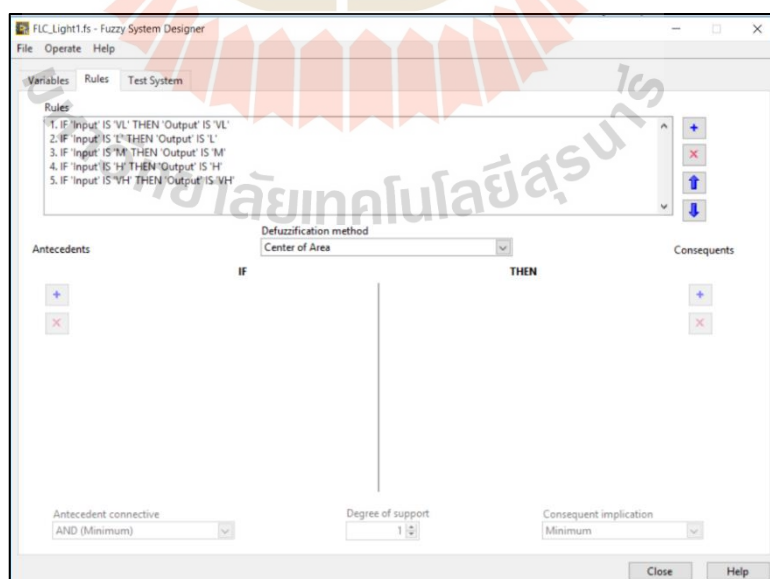
5.6.3 การกำหนดกฎของฟัซซี (Rules Base)

การออกแบบ Fuzzy Logic สามารถกำหนดค่าอินพุตและเอาต์พุตให้มีสัญญาณเข้าออกได้ทั้งแบบทางเดียว (Single-Input and Single-Output) หรือหลายทาง (Multiple-Input and Multiple-Output) ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้ระบบที่มี 1 อินพุต และ 1 เอาต์พุต ซึ่งสามารถสร้างกฎโดยง่ายด้วยประโยคเงื่อนไข คือ ถ้า...แล้ว (IF-THEN) และสรุปเป็นตารางการกำหนดกฎฟัซซีได้ดังนี้

ตารางที่ 5.4 เงื่อนไขการออกแบบกฎของฟัซซีของระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ

No.	If Input is	Then Output is
1	VL	VL
2	L	L
3	M	M
4	H	H
5	VH	VH

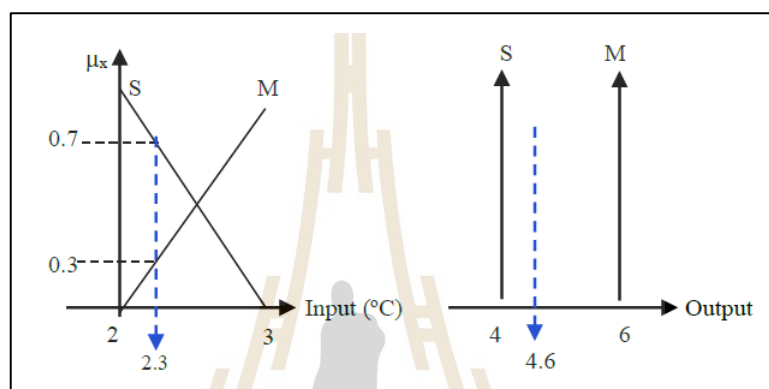
จากตารางที่ 5.4 สามารถนำกฎของฟัซซีที่ออกแบบ ไปสร้างในโปรแกรม Fuzzy System Designer ในส่วนของฟังก์ชัน Rules เพื่อกำหนดค่าสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตให้มีค่าตรงกันตามที่ต้องการ และแสดงดังรูปที่ 5.26



รูปที่ 5.26 ฟังก์ชันการกำหนดเงื่อนไขกฎของฟัซซี

5.6.4 การอนุมาน (Inference) หรือการรวมกฎฟัซซี (Aggregation)

การกำหนดกฎหรือเงื่อนไขต่าง ๆ ต้องอาศัยความรู้ (Knowledge Base) หรือประสบการณ์ของผู้เชี่ยวชาญ และเมื่อกำหนดกฎต่าง ๆ เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการสรุป หรือการรวมกฎตัวอย่างเช่น ระบบมีความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิเท่ากับ 2.3 องศาเซลเซียส ผลลัพธ์ค่าสมาชิกอินพุตแสดงดังรูปที่ 5.27 คือ ความเป็นสมาชิกเท่ากับ 0.7 และ 0.3 ที่อยู่ในกฎข้อที่ 2 และ 3 จากตารางที่ 5.4 ดังนั้น ผลของเอาต์พุตอยู่ระหว่าง S (Small) และ M (Medium)



รูปที่ 5.27 ระดับความเป็นสมาชิกที่อุณหภูมิ 2.3 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 5.27 ค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ของระบบ คือ ความแตกต่างของสัญญาณป้อนกลับ A และสัญญาณป้อนกลับ B เทียบกับ ค่าสัญญาณอ้างอิง (Reference Input) และค่าความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเป็นค่าที่ต้องนำไปใช้ในกฎของฟัซซี ซึ่งก่อนที่จะนำข้อมูลไปใช้ในชุดควบคุมแบบฟัซซีต้องนำข้อมูลดังกล่าวมาประมวลผลก่อน (Preprocessing) โดยแปลงค่าข้อมูลจากระบบจริงที่วัดได้ เป็นข้อมูลของระบบฟัซซี เช่น การแปลงข้อมูลจากสัญญาณอนาล็อกที่วัดได้เป็นสัญญาณดิจิทัลที่เหมาะสมกับกฎของฟัซซี ที่กำหนดไว้ และเมื่อข้อมูลผ่านการตรวจสอบเงื่อนไขจากกฎของฟัซซีต้องมีการแปลงข้อมูลเอาต์พุตของฟัซซี (Postprocessing) เพื่อนำไปใช้งานจริงกับระบบ เช่น การแปลงค่าเอาต์พุต เป็นตัวเลขของระดับสัญญาณพัลส์ (0 - 100%) หรือแรงดัน 0 - 10 โวลต์ เพื่อป้อนค่าข้อมูลที่เหมาะสมไปยังพลานต์ (Plant) ที่ต้องการควบคุม

5.6.5 การทำดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

ขั้นตอนการแปลงค่าฟัซซีผ่านกรรมวิธีต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปที่สามารถนำเอาต์พุตไปใช้งานได้จริงโดยการทำดีฟัซซี มีหลายหลายวิธี เช่น วิธีการของ Mamdani (The Mamdani model) และวิธีการของ Takagi-Sugeno (The Takagi-Sugeno model) เป็นต้น โดยทั้งสองวิธีการเน้นไปที่

ลักษณะ (Specification) ของฟังก์ชันควบคุม (Control Function) และสิ่งที่เป็นฟัซซีทั้งสองวิธี คือ แบบจำลอง (Model) และวิธีการ (Method) ส่วนการควบคุมจะเป็นคริปป์ (Crisp) เสมอ สำหรับวิธีการอนุมานของ Mamdani จะใช้วิธี COG (Center of gravity) และวิธีการของ Sugeno ใช้วิธี COS (Center of sums) ซึ่งในงานวิจัยสำหรับระบบการควบคุมความถี่อัตโนมัติเลือกใช้วิธีการของ Takagi-Sugeno เนื่องจากเป็นวิธีที่ช่วยลดขั้นตอนการคำนวณทำให้มีการประมวลผลสำหรับการอนุมานกฎของฟัซซีได้รวดเร็วกว่าและวิธีที่นำเสนอการอนุมานฟัซซีของ Sugeno ใช้รูปแบบของฟังก์ชันสมาชิกเอาต์พุต เป็นเส้นตรงโทนแทนการใช้ฟังก์ชันสมาชิกแบบฟัซซีเซต สำหรับการทำให้ฟัซซี เพื่อหาค่าเอาต์พุตจากกลุ่มกราฟเส้นตรงที่ได้กำหนดไว้ในรูปที่ 5.25 และการอนุมานของ Sugeno ที่ใช้วิธีการ Center of sum (COS) สามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (5.3)

$$\text{COS} = \sum_{m=1}^L \frac{\mu_{(k_m)} k_m}{\mu_{(k_m)}} \quad (5.3)$$

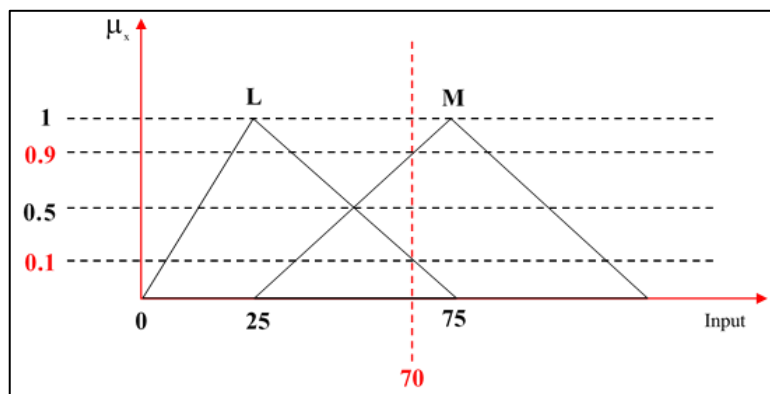
เมื่อ $\mu_{(k_m)}$ คือ ค่าระดับความเป็นสมาชิกอินพุต
 k_m คือ ขนาดของเอาต์พุต

เมื่อพิจารณาระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ สมมุติวัดค่า Error ของระบบได้เท่ากับ 70 เมื่อนำไปพิจารณาในกฎของฟัซซีสามารถระบุระดับความเป็นสมาชิกอินพุตได้ดังรูปที่ 5.28 ซึ่งสรุปว่าเป็นสมาชิกที่อยู่ในระดับ L และ M และเมื่อวิเคราะห์จากรูปที่ 5.25 ในส่วนวิธีการคำนวณเพื่อหาค่าระดับสมาชิกสามารถคำนวณจากสมการที่ (5.1) และ (5.2) จะได้ผลการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\mu_L = \frac{70 - 75}{25 - 75} = \frac{-5}{-50} = 0.1$$

$$\mu_M = \frac{70 - 25}{75 - 25} = \frac{45}{50} = 0.9$$

จากการคำนวณระดับตัวแปรสมาชิกฟัซซีที่มีสัญญาณอินพุตเท่ากับ 70 สามารถสรุปผลการคำนวณเป็นรูปกราฟสามเหลี่ยมในระดับ L และระดับ M และแสดงผลเป็นรูปกราฟได้ดังรูปที่ 5.28

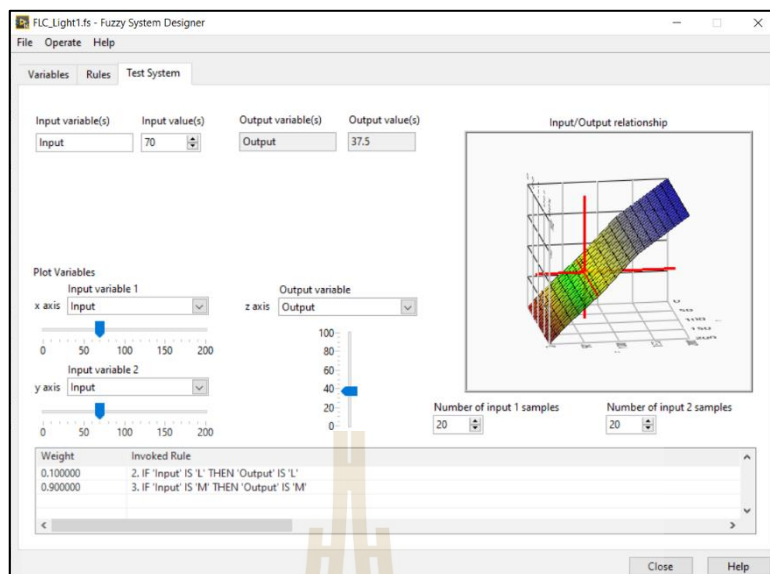


รูปที่ 5.28 ระดับความเป็นสมาชิกที่ค่าอินพุตเท่ากับ 70

จากการคำนวณหาค่าระดับความเป็นสมาชิกพบว่า เมื่อพิจารณาเส้น โทนของ เอادتพุตดังรูปที่ 5.25 พบว่าค่าเอادتพุตอยู่ระหว่าง ค่าตัวแปร $L = 15$ และ $M = 40$ ดังนั้นสามารถ คำนวณหาค่า COS โดยใช้สมการที่ (5.3) ดังนี้

$$\text{COS} = \frac{(0.1)(15) + (0.9)(40)}{0.1 + 0.9} = 37.5\%$$

ดังนั้น สรุปได้ว่า ถ้าค่าความผิดพลาดของระบบเมื่อมีการเปรียบเทียบกันระหว่าง สัญญาณอ้างอิงและสัญญาณป้อนกลับ มีค่าต่างกันเท่ากับ 70 ค่าตัวแปรเอادتพุตของระบบที่ผ่านการดีฟัซซี่ จะมีค่าเท่ากับ 37.5% ซึ่งการคำนวณหาค่า COS สามารถดูผลการทดสอบการคำนวณ ทั้งหมดของระดับความเป็นสมาชิกทุกระดับตัวแปรที่ออกแบบ ผ่านโปรแกรม Fuzzy System Designer ได้ในหมวด Test System ซึ่งแสดงผลดังรูปที่ 5.29



รูปที่ 5.29 การทดสอบผลการคำนวณ COS บน Fuzzy System Designer

จากรูปที่ 5.29 สามารถสรุปผลการคำนวณทั้งหมดเป็นตารางการแสดงผลของระดับความเป็นสมาชิก และผลการทำดีฟัซซี่ ได้ดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทำ Fuzzification และ Defuzzification ของการออกแบบตัวควบคุมพีชชีด้วยการอนุมานโมเดล Takagi-Sugeno

%Input data	$\mu_{k_m}, 1$	$\mu_{k_m}, 2$	%Defuzzification
5	0.8VL	0.2L	3
10	0.6VL	0.4L	6
15	0.4VL	0.6L	9
20	0.2VL	0.8L	12
25	1L	-	15
30	0.9L	0.1M	17.5
35	0.8L	0.2M	20
40	0.7L	0.3M	22.5
45	0.6L	0.4M	25
50	0.5L	0.5M	27.5

ตารางที่ 5.5 ผลการทำ Fuzzification และ defuzzification ของการออกแบบตัวควบคุมพีชชีด้วยการ
อนุมานโมเดล Takagi-Sugeno (ต่อ)

%Input data	$\mu_{k_m}, 1$	$\mu_{k_m}, 2$	%Defuzzification
55	0.4L	0.6M	30
60	0.3L	0.7M	32.5
65	0.2L	0.8M	35
70	0.1L	0.9M	37.5
75	1M	-	40
80	0.9M	0.1H	43
85	0.8M	0.2H	46
90	0.7M	0.3H	49
95	0.6M	0.4H	52
100	0.5M	0.5H	55
105	0.4M	0.6H	58
110	0.3M	0.7H	61
115	0.2M	0.8H	64
120	0.1M	0.9H	67
125	1H	-	70
130	0.933333H	0.066667VH	72
135	0.866667H	0.133333VH	74
140	0.8H	0.2VH	76
145	0.733333H	0.266667VH	78
150	0.666667H	0.333333VH	80
155	0.6H	0.4VH	82
160	0.533333H	0.466667VH	84
165	0.466667H	0.533333VH	86
170	0.4H	0.6VH	88
175	0.333333H	0.666667VH	90
180	0.266667H	0.733333VH	92

ตารางที่ 5.5 ผลการทำ Fuzzification และ defuzzification ของการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีด้วยการ
อนุมานโมเดล Takagi-Sugeno (ต่อ)

%Input data	$\mu_{k_m}, 1$	$\mu_{k_m}, 2$	%Defuzzification
185	0.2H	0.8VH	94
190	0.133333H	0.866667VH	96
195	0.066667H	0.933333VH	98
200	1VH	-	100

5.7 สรุป

ในบทนี้ได้ทำการศึกษาและออกแบบระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาดพลังงาน 6 MeV ซึ่งระบบควบคุมส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์ที่มีมาตรฐานที่เข้ากันได้กับอุปกรณ์ที่มีการใช้งานในส่วนของแม่เหล็กไฟฟ้าหรือ EMC standard ซึ่งสามารถป้องกันสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นกับระบบได้ เนื่องจากการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เป็นระบบที่ต้องการความละเอียดสูงและความน่าเชื่อถือและติดตั้งอยู่ในพื้นที่ที่มีรังสี โดยรายละเอียดของการออกแบบจะเป็นการออกแบบระบบควบคุมที่ต้องอาศัยการทำงานในระบบเวลาจริงระบบสมองกลฝังตัว เพื่อลดการทำงานที่มีกระบวนการหลายส่วนและการออกแบบระบบควบคุมทางเวลาที่เป็นส่วนสำคัญของการทำงานกับอุปกรณ์ทั้งหมดเพื่อให้มีการทำงานที่พร้อมกัน นอกจากนี้ได้ทำการออกแบบตัวควบคุมแบบฟัซซีด้วยการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno เพื่อทำการออกแบบระบบควบคุมเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงของความถี่เรโซแนนซ์ ที่เป็นระบบการทำงานแบบไม่เชิงเส้น ซึ่งจะเหมาะสมกับการออกแบบตัวควบคุมดังกล่าว เพราะว่าระบบควบคุมแบบฟัซซีมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรสมาชิกฟัซซีเซตอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้เหมาะสมหรือเข้ากันกับระบบงานวิจัย ซึ่งจะทำให้ระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นมีระบบการทำงานที่มีเสถียรภาพ ประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือ

บทที่ 6

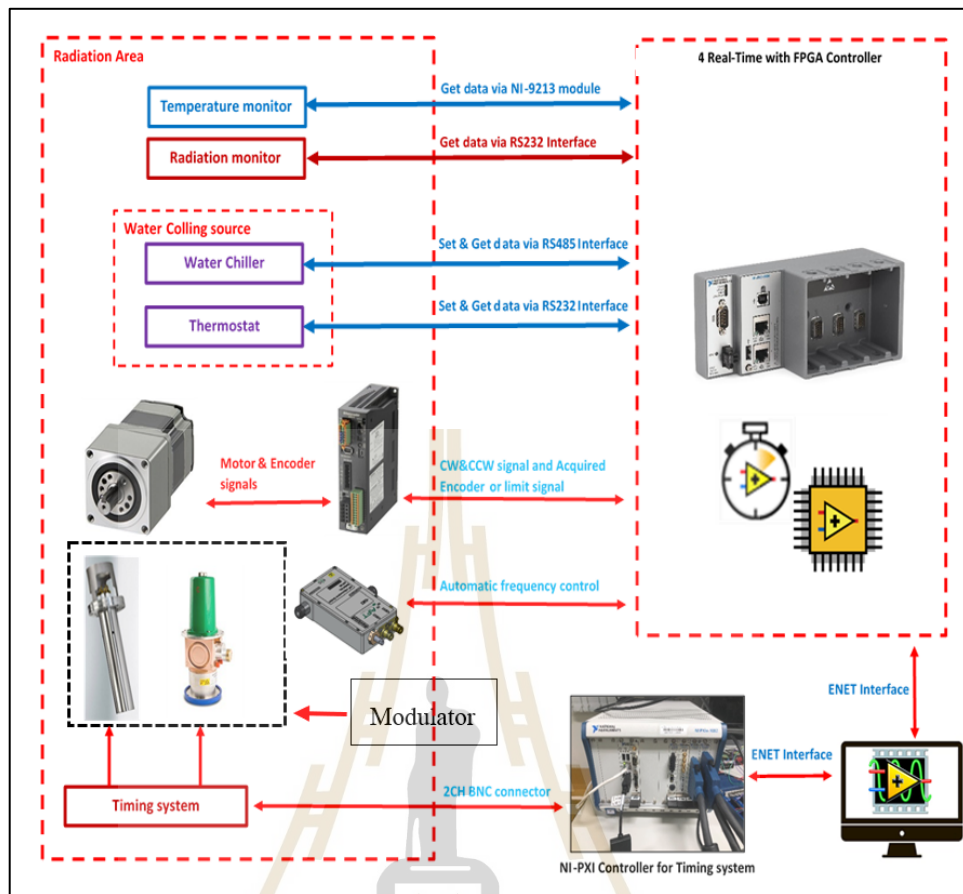
ผลการทดลองระบบควบคุมความถี่อัตโนมัติ

6.1 บทนำ

บทนี้จะกล่าวถึง เครื่องมือการทดลอง กระบวนการใช้งานระบบควบคุมประมวลผลกลาง และการควบคุมทางเวลา รวมไปถึงการออกแบบอุปกรณ์ เพื่อวัดค่าสัญญาณความถี่เรโซแนนซ์ ซึ่งการออกแบบการทดลองและเก็บข้อมูล ระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน สำหรับการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาดพลังงาน 6 MeV จะประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ จุดการทำงานของแมกนีตรอนใน โหมดพายด้วยตัวแปรของแหล่งจ่ายไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก ที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.5 เพื่อให้แมกนีตรอนสร้างคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz ไปยังท่อเร่งพลังงานอิเล็กตรอน สำหรับการสร้างปริมาณรังสีเอ็กซ์ให้คงที่และต่อเนื่องภายใต้ อุณหภูมิ 38 – 42 องศาเซลเซียส และความดันสุญญากาศในช่วง 1.0×10^{-9} – 5.0×10^{-8} ทอร์ และ ออกแบบตัวควบคุมพีซี เพื่อชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ของระบบท่อเร่งอนุภาคให้มีค่าคงที่ เมื่อมีสิ่งรบกวนที่ทำให้ระบบมีการทำงานที่ผิดปกติ โดยอาศัยหลักการความแตกต่างของความถี่เรโซแนนซ์เทียบกับความถี่อ้างอิง เพื่อไปควบคุมระบบขับเคลื่อนสเต็ปป์มอเตอร์ที่ยึดติดกับ โครงสร้างของตำแหน่งพื้นที่โพรงห้องคลื่น (T_{SLOT}) ของแมกนีตรอนในการปรับจูนตำแหน่ง เพื่อให้ได้ความถี่เรโซแนนซ์ตามที่ต้องการ

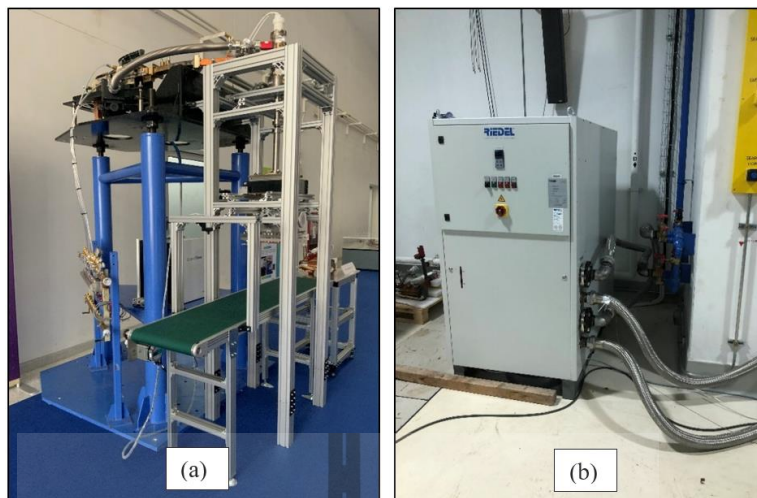
6.2 เครื่องมือทดลอง

ในขั้นตอนของงานวิจัยการทดสอบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาดพลังงาน 6 MeV ทั้งหมด จะทำการเขียนโปรแกรมควบคุมที่มีหน้าจ่อินเตอร์เฟสให้สามารถ มอนิเตอร์ ควบคุม และเก็บข้อมูลการวัดสัญญาณทางไฟฟ้าอยู่ตลอดเวลาด้วยโปรแกรมแล็ปวิว พร้อมด้วยติดตั้งเครื่องมือส่วนเสริม คือ ส่วนเสริมสำหรับควบคุมการทำงานของสเต็ปป์มอเตอร์ (NI Soft-Motion Module) ส่วนเสริมสำหรับการออกแบบระบบควบคุมพีซี (Control Design and simulation module และ Fuzzy System Designer tool) เป็นต้น นอกจากนี้ ทำการเชื่อมต่อกับ อุปกรณ์ที่ทำงานแบบสมองกลฝังตัว (Embedded system) พร้อมระบบการทำงานที่อ้างอิงด้วย เวลาจริง (Real-time system) ซึ่งการทำงานเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมทั้งหมดจะทำงานภายใต้ ชุด NI-cRIO-9063 ที่เปรียบเสมือนชุดการทำงานสมองกลฝังตัว ซึ่งอธิบายเป็นภาพรวมไดอะแกรม ของการเลือกใช้อุปกรณ์เพื่อควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นทั้งหมดที่แสดงดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 ภาพรวมระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นขนาดพลังงาน 6 MeV

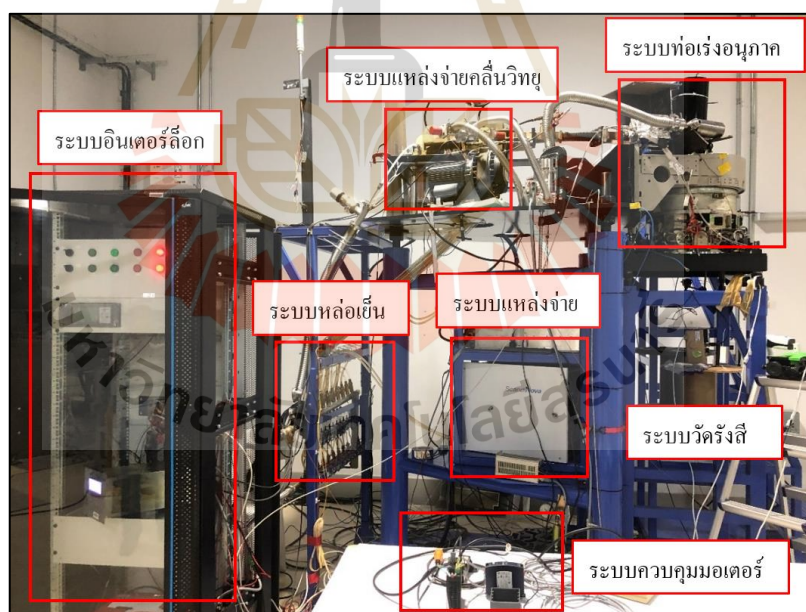
จากรูปที่ 6.1 อธิบายถึงภาพรวมของการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่มีการออกแบบเพื่อควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น ระบบอินเตอร์ล๊อค ระบบหล่อเย็น ระบบแหล่งจ่าย เป็นต้น และสามารถอธิบายเป็นระบบย่อยของการควบคุมแต่ละส่วน โดยการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การควบคุมแบบเวลาจริง และการควบคุมแบบสมองกลฝังตัว ซึ่งการควบคุมทั้ง 2 ส่วน จะออกแบบระบบให้มีการควบคุมระยะไกลทั้งหมด (Remote System) เนื่องจากการทำงานของอุปกรณ์ส่วนใหญ่อยู่ในบริเวณที่มีรังสี โดยส่วนประกอบที่สำคัญต่อการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่แบ่งหมวดหมู่ของระบบการควบคุมจะแสดงดังรูปที่ 6.2 และดังรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.2 เครื่องมือสำหรับการควบคุม เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ขนาดพลังงาน 6 MeV

(a) ชุดตัวต้นแบบระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

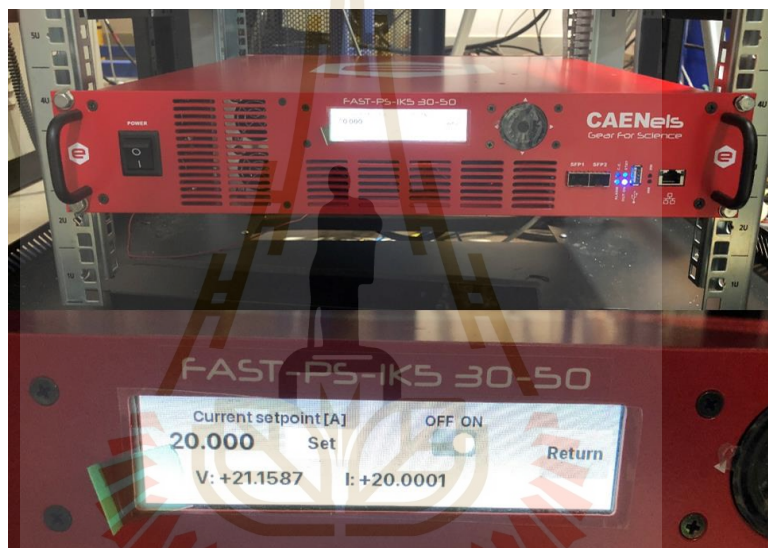
(b) ชุดระบบทำความเย็น สำหรับการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น



รูปที่ 6.3 ภาพรวม การควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ขนาดพลังงาน 6 MeV

1. ระบบอินเทอร์ล็อก ประกอบด้วยการทำงานโดยรวมของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่มีระบบป้องกันหลายส่วน เช่น ป้องกันความดันที่ผิดปกติ ป้องกันระบบการทำงานเครื่องทำความเย็น ป้องกันระบบควบคุมทางเวลาที่ต้องทำงานพร้อมกัน (synchronization) เป็นต้น

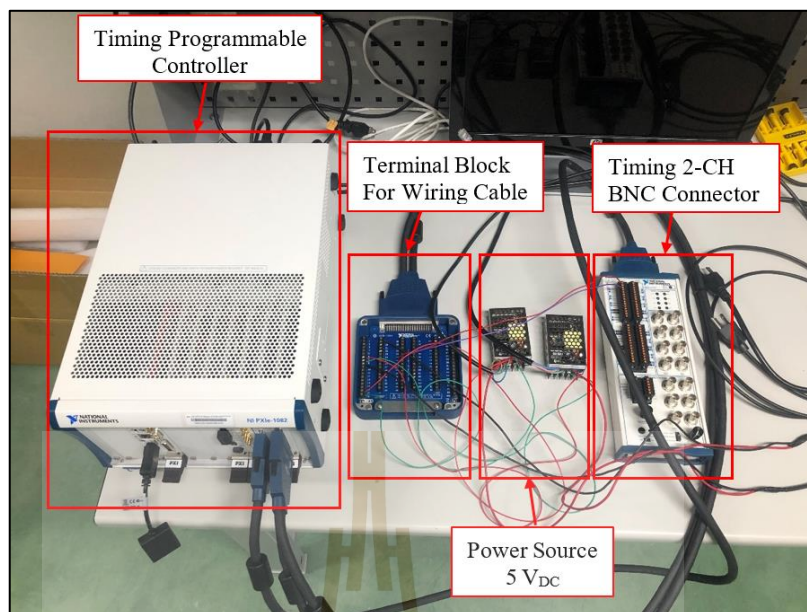
2. ระบบแหล่งจ่าย ประกอบด้วยแหล่งจ่ายไฟฟ้ากำลัง 3 เฟส ให้กับชุดมอดดูเลเตอร์ที่มีค่าแรงดันขาออกที่มีการประยุกต์ใช้ค่าแหล่งจ่ายแรงดันที่ 45 kV และสนามแม่เหล็กไฟฟ้าถาวรที่ต้องการ คือ 0.152 เทสลา ซึ่งการสร้างสนามแม่เหล็กไฟฟ้าอาศัยอุปกรณ์แหล่งจ่ายที่มีค่ากระแสไฟฟ้าที่สูง ซึ่งเป็นอุปกรณ์เฉพาะทาง ดังรูปที่ 6.4 และแสดงตารางการปรับกระแสให้เหมาะสมดังตารางที่ 6.1 เพื่อควบคุมการทำงานของแมกนีตรอนให้มีการทำงานในโหมดที่เด่นที่สุดซึ่งสามารถสร้างความถี่เรโซแนนซ์ได้ 2.9982 GHz แล้วส่งผ่านความถี่ไปยังส่วนของท่อเร่งอนุภาคเชิง เพื่อให้มีการผลิตรังสีเอ็กซ์ต่อไปและการควบคุมมอดดูเลเตอร์จะอาศัยการทำงานของชุดควบคุมเวลาที่แสดงดังรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.4 อุปกรณ์แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าเพื่อสร้างสนามแม่เหล็ก

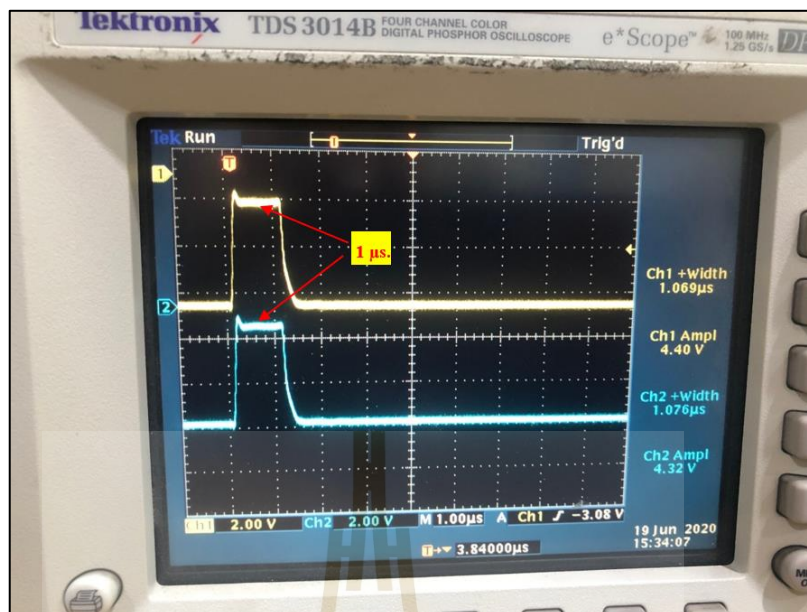
ตารางที่ 6.1 ข้อมูลจำเพาะของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)	สนามแม่เหล็ก (เทสลา)
10	0.0832
15	0.1218
17	0.1357
20	0.1520
21	0.1568
23	0.1653

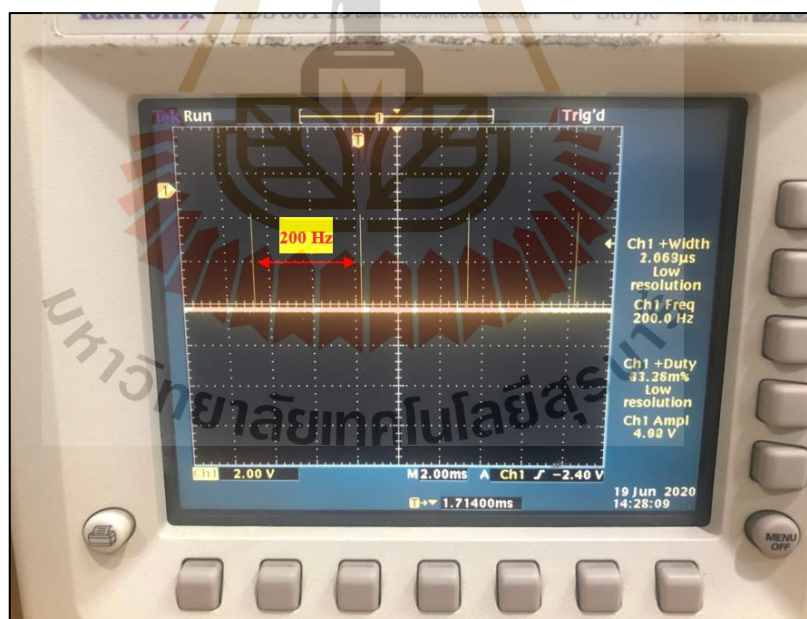


รูปที่ 6.5 ระบบควบคุมสัญญาณทางเวลา

จากรูปที่ 6.5 แสดงถึงอุปกรณ์ที่สามารถกำหนดสัญญาณความถี่อ้างอิงหรือระบบควบคุมเวลาที่ทำให้ชุดอุปกรณ์มีการทำงานที่ซิงโครไนซ์ต่อกัน และมีความจำเป็นต่อการควบคุมระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้งานจะเป็นวัสดุที่มีมาตรฐานและทนต่อการรบกวนของสนามแม่เหล็กได้ดีมีการทำงานที่เข้ากันได้กับการใช้โปรแกรมแล็บวิวเพื่อควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น และสามารถเพิ่มค่าแอมพลิจูดของสัญญาณทางเวลาได้ด้วยแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงได้สูงสุด 60 โวลต์ ตามข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์สร้างสัญญาณทางเวลาเพื่อให้ระบบสัญญาณทางเวลาไม่ถูกรบกวนหรือลดทอนสัญญาณแอมพลิจูดลง ซึ่งผลการตอบสนองเมื่อใช้งานระบบควบคุมทางเวลา เพื่อให้ระบบแหล่งจ่ายแมกนีตรอนและปืนอิเล็กตรอนทำงานพร้อมกันที่ความกว้างพัลส์ $1 \mu\text{s}$ และความถี่ 200 Hz ซึ่งแสดงเป็นรูปภาพที่วัดด้วยออสซิลโลสโคป ดังรูปที่ 6.6 และ 6.7



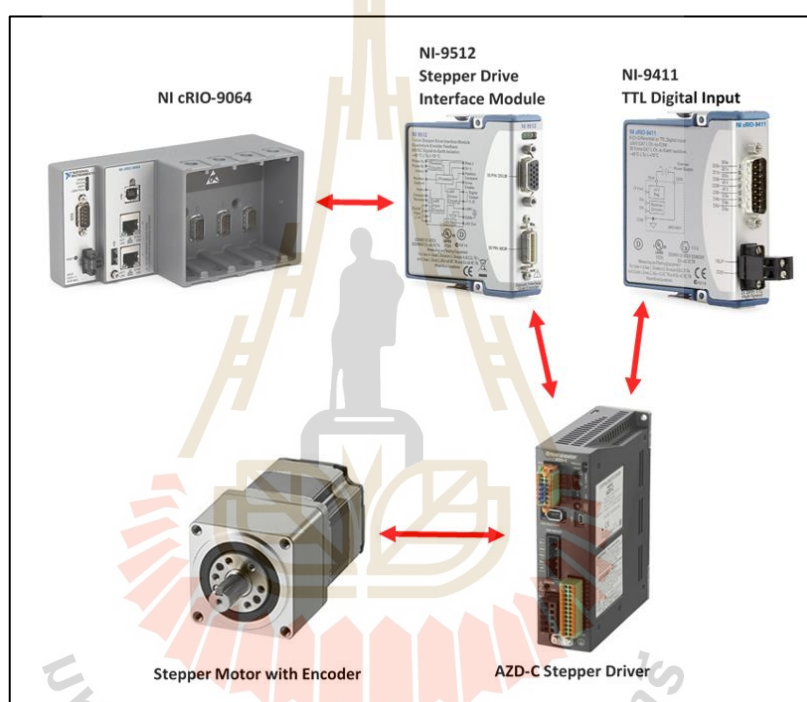
รูปที่ 6.6 ผลการตอบสนองของสัญญาณควบคุมทางเวลา ความกว้าง 1 μs.



รูปที่ 6.7 ผลการตอบสนองของสัญญาณควบคุมทางเวลา ความถี่ 200 Hz

- ระบบควบคุมมอเตอร์ คือ ระบบที่ต้องออกแบบเพื่อใช้ร่วมกับโครงสร้างทางกายภาพ ที่เป็นโครงสร้างภายในของแมกนีตรอนเพื่อปรับเปลี่ยนโครงสร้างภายใน ซึ่งมีผลเป็นสัดส่วน

โดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ขาออกของแมกนีตรอน ซึ่งในงานวิจัยเพื่อควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นทำการออกแบบตัวควบคุมชุดการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ด้วยวิธีการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิกร่วมกับการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่ทำการปรับตัวแปรอยู่ตลอดเวลา (on-line parameters) และการควบคุมนี้ จะเหมาะสมกับระบบที่มีการทำงานแบบไม่เชิงเส้น เพื่อให้ระบบมีการชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วเนื่องจากอุณหภูมิหรือความดันเปลี่ยนแปลง ซึ่งการออกแบบระบบควบคุมมอเตอร์มีแผนผังไดอะแกรมดังรูปที่ 6.8

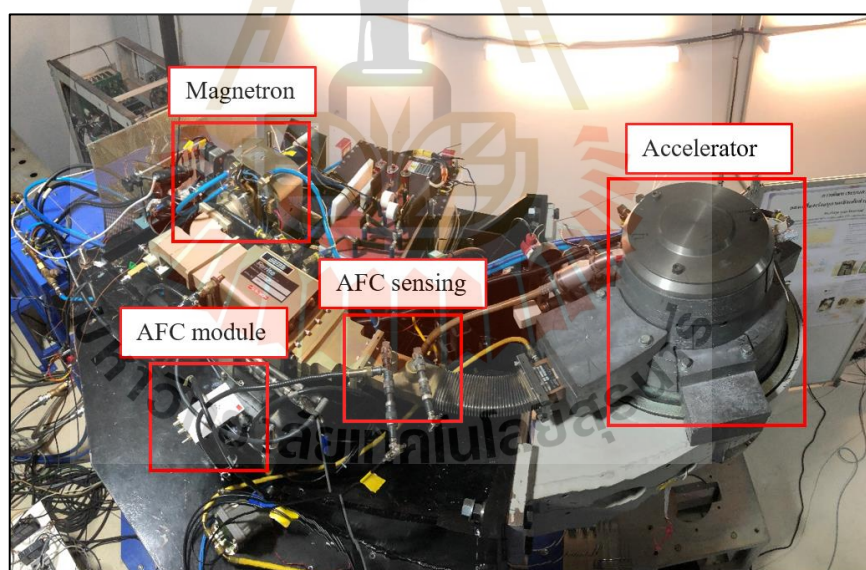


รูปที่ 6.8 ภาพรวมระบบควบคุมชุดเคลื่อนที่ของมอเตอร์

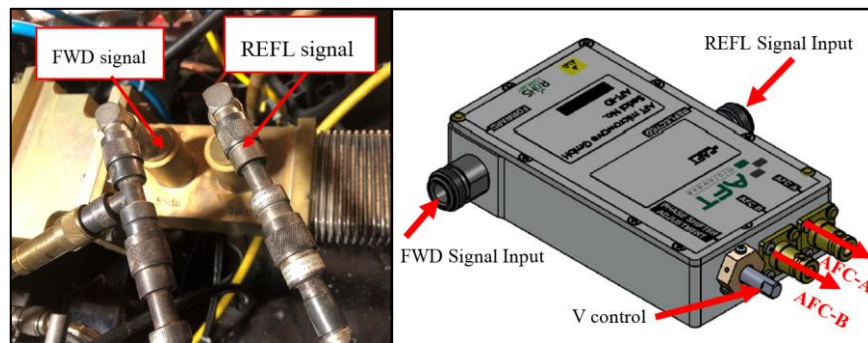
จากรูปที่ 6.8 คือ อุปกรณ์และโมดูลที่สำคัญสำหรับการควบคุมมอเตอร์ เพื่อทำการขับเคลื่อนโครงสร้างภายในของแมกนีตรอนด้วยการคับปลิงกับแกนของแมกนีตรอนที่สามารถเปลี่ยนแปลงช่องว่างระยะของแก๊บของห้องคลื่นได้ (T_{SLOT}) ซึ่งหลักการทำงานของระบบควบคุมมอเตอร์อาศัยหลักการทำงานของระบบประมวลผลกลางที่ทำหน้าที่ 2 ระบบ คือ ระบบเวลาจริงที่สร้างสัญญาณพัลส์หรือความถี่ด้วยโมดูลสร้างสัญญาณพัลส์ NI-9512 เพื่อให้มอเตอร์ทำการหมุนชุดขับเคลื่อน และเมื่อมอเตอร์หมุนจะมีการป้อนกลับของสัญญาณหรือชุดเอ็นโค้ดเดอร์ไปยังชุดไดร์เวอร์ AZD-C Stepper จากนั้นสามารถแสดงผลเป็นตำแหน่งของมอเตอร์ด้วยการเปรียบเทียบ

สัญญาณพัลส์ เฟส A และ B ด้วยโมดูล NI-9411 ซึ่งการแสดงผลจะใช้ระบบสมองกลฝังตัวเป็นตัวรับสัญญาณเพื่อลดกระบวนการทำงานของโปรแกรมลง

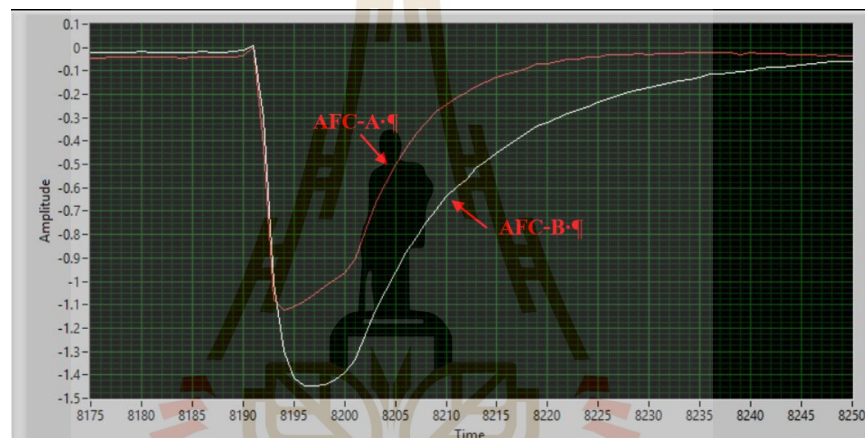
3. ระบบแหล่งจ่ายคลื่นวิทยุ ดังรูปที่ 6.9 จะเป็นระบบที่เป็นส่วนการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ด้วยแมกนีตรอน ให้ตรงกัน กับท่อเร่งอนุภาค ที่ 2.9982 GHz โดยที่ระบบป้อนกลับของ AFC sensing system หรือสัญญาณป้อนกลับคลื่นความถี่สะท้อน (REFL power) ที่เกิดจากการรบกวนของระบบความร้อน อุณหภูมิ หรือความดัน เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยจะต้องมีการออกแบบชุดระบบการเก็บข้อมูลที่ต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความสามารถทำการทริกเกอร์ข้อมูลป้อนกลับได้ทันที แล้วใช้ชุดโมดูลความถี่อัตโนมัติ (AFC module) ที่ออกแบบด้วยความถี่ 2.9982 GHz ดังแสดงรูปภาพที่ 6.10 เป็นตัวรับสัญญาณ เพื่อคำนวณแรงดัน AFC-A และ AFC-B ดังแสดงรูปภาพที่ 6.11 แล้วนำค่าดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิงใน โปรแกรม จากนั้นแปลงข้อมูลดังกล่าวเป็นสัญญาณพัลส์เพื่อความคุมสแต็ปมอเตอร์ในการปรับจูนโครงสร้างของแมกนีตรอน ในช่วงขอบเขตที่กำหนดด้วยอัลกอริทึมพีซีซี เพื่อชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ต่อไป



รูปที่ 6.9 ภาพรวมระบบแหล่งจ่ายคลื่นวิทยุ



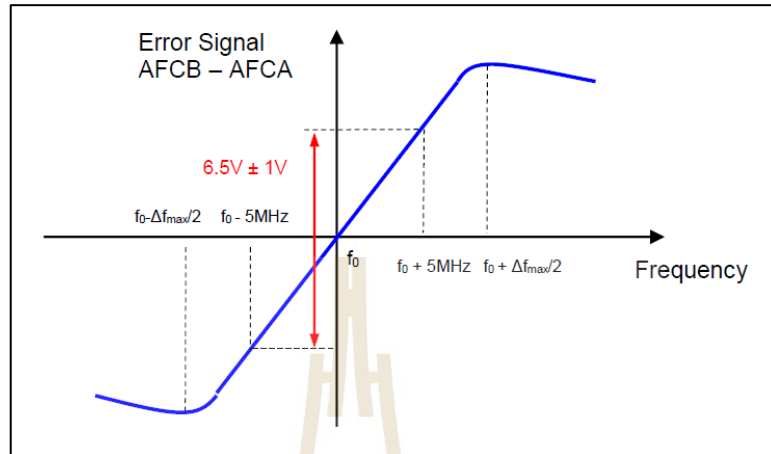
รูปที่ 6.10 ระบบตรวจจับสัญญาณความถี่อัตโนมัติ (AFC sensing)



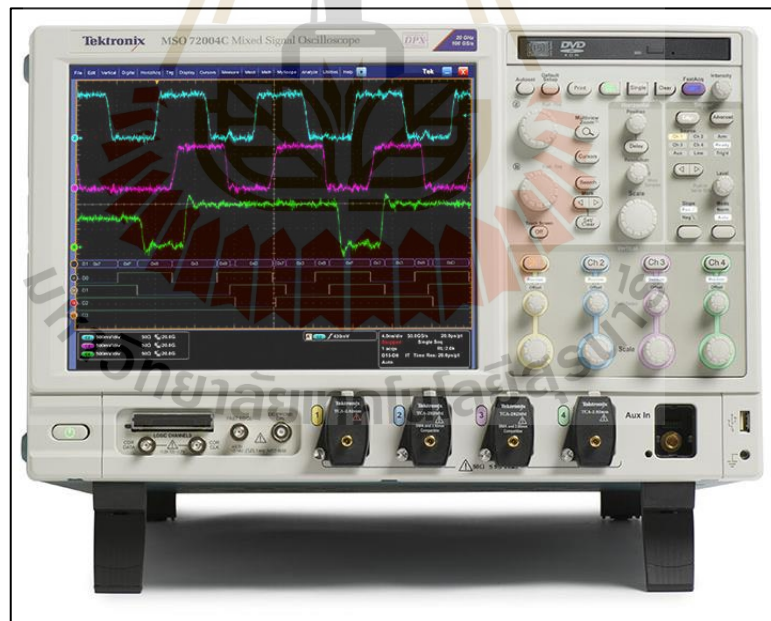
รูปที่ 6.11 ผลการวัดสัญญาณป้อนกลับ AFC-A และ AFC-B

จากรูปที่ 6.11 เป็นสัญญาณป้อนกลับความถี่เรโซแนนซ์ 2.9982 GHz ที่ใช้ชุด AFT module ดังรูปที่ 6.10 เป็นตัววัดสัญญาณความผิดพลาดที่อ้างอิงจาก ความถี่กลางที่ 2.998 GHz โดยมี Bandwidth ที่ ± 10 MHz ซึ่งแรงดันขาออกของสัญญาณ AFC-A และ AFC-B จะมีขอบเขตที่ 6.5 ± 1 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าผลต่างของการเปรียบเทียบเฟสของความถี่เรโซแนนซ์และอธิบายเป็นกราฟความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6.12 และสัญญาณป้อนกลับ AFC-A และ AFC-B จะเป็นสัญญาณที่มีความกว้างของพัลส์ที่มีขนาดน้อยมากที่ 1 - 5 μ s ซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณที่มีอัตราสุ่มสัญญาณที่สูง (Sampling) และมีคุณสมบัติที่สามารถติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจจับภายในบริเวณที่มีรังสีและสามารถเก็บข้อมูลเข้าสู่ระบบประมวลผลกลาง เพื่อนำค่าไปเข้าสู่ระบบควบคุมที่มีรีจิสเตอร์และสามารถเก็บข้อมูลเข้าสู่ระบบประมวลผลกลาง เพื่อนำค่าไปเข้าสู่ระบบควบคุมที่เป็นอัลกอริทึมวิธีการพีซีต่อไป ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้ชุด ออกซิไลสโคป ดังรูปที่ 6.13 เป็นตัววัดสัญญาณและอ่านค่าสัญญาณป้อนกลับแบบเวลาจริง และเลือกใช้อุปกรณ์วัดสเปกตรัม (Spectrum

Analyzer) เพื่อเป็นตัวตรวจสอบสัญญาณความถี่เรโซแนนซ์ว่ามีค่าจุดสูงสุดใกล้เคียงกับค่าที่วัดด้วย
ออสซิลโลสโคปหรือไม่ โดยอุปกรณ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.12 ข้อมูลจำเพาะกราฟแสดงความแตกต่างของสัญญาณความถี่อัตโนมัติ



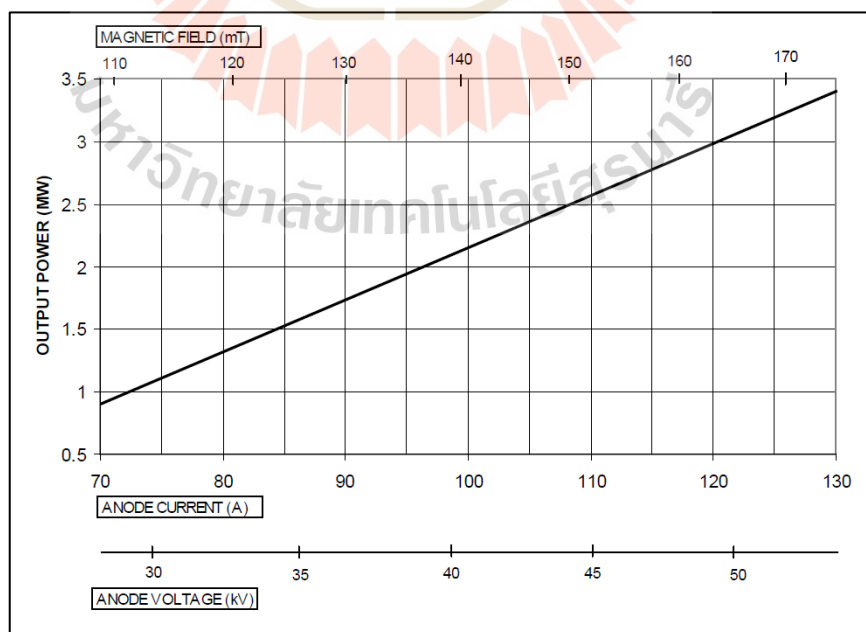
รูปที่ 6.13 อุปกรณ์วัดสัญญาณป้อนกลับความถี่อัตโนมัติ



รูปที่ 6.14 อุปกรณ์วัดสเปกตรัมสัญญาณความถี่เรโซแนนซ์

6.3 การควบคุมระบบประมวลผลกลางและรับสัญญาณความถี่

หลักการทดสอบและการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นจะใช้หลักการเร่งอิเล็กตรอนในท่อเร่งพลังงาน โดยใช้คลื่นความถี่วิทยุเป็นตัวเร่งเพื่อให้อิเล็กตรอนชนกับเป้าโลหะหนัก เพื่อผลิตรังสีเอ็กซ์ ซึ่งคลื่นความถี่วิทยุนี้กำเนิดมาจากชุดแมกนีตรอนถูกส่งผ่านทางท่อนำคลื่นไปยังท่อเร่งพลังงาน ซึ่งการผลิตกำลังคลื่นวิทยุจากแมกนีตรอนมีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องหลายตัว เช่น สนามแม่เหล็กที่ล้อมรอบโพรงห้องคลื่นของแมกนีตรอน และแรงดันพัลส์ที่จ่ายให้กับแมกนีตรอน ทั้งระดับแรงดัน ความกว้าง และความถี่ของแรงดันพัลส์ ซึ่งค่าพารามิเตอร์เหล่านี้จะมีผลทำให้กำลังคลื่นวิทยุที่จ่ายออกมาจากแมกนีตรอนมีค่าแตกต่างกันไป ดังแสดงในรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงผลค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับแมกนีตรอน (MG-7095)

จากรูปที่ 6.15 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันแอมโตนหรือสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กับกำลังขาออกที่เหมาะสมกับการทำงานของแมกนีตรอน (MG-7095) ซึ่งการศึกษาเพื่อการทดสอบผลิตภัณฑ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้จากผลของการปรับเปลี่ยนกำลังคลื่นวิทยุที่จ่ายให้ท่อเร่งอนุภาค เพื่อให้การปรับกำลังคลื่นวิทยุด้านขาออกเหมาะสมกับโหลดท่อเร่งพลังงานจึงให้มีการปรับค่าพารามิเตอร์บางส่วนให้มีคงที่ คือ ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ได้ออกแบบไว้ในบทที่ 3 เท่ากับ 45.0 กิโลโวลต์ และ 0.152 เทสลา ตามลำดับ ส่วนความกว้างและความถี่ของแรงดันพัลส์จะปรับเปลี่ยนค่าเพื่อควบคุมกำลังจ่ายแมกนีตรอน ซึ่งจะมีผลให้ได้กำลังคลื่นวิทยุที่ระดับต่าง ๆ กันไป ซึ่งพารามิเตอร์ที่กำหนดสำหรับควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นสรุปเป็นตารางข้อมูลที่ 6.2

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลพารามิเตอร์ที่ใช้ควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เพื่อผลิตรังสีอิเล็กซ์

องค์ประกอบ	พารามิเตอร์	ขนาด
ระบบทางเวลา	ความกว้างพัลส์	5 μ s
	Synchronize Modulator	0 delay
	ความถี่	200 Hz
แหล่งจ่ายมอดูเลเตอร์	ความกว้างพัลส์	5 μ s
	แรงดัน	980 -1,043 V (Input) 45 kV (Output)
ปืนอิเล็กตรอน	ความกว้างพัลส์	5 μ s
	แรงดัน	1,000 V (Input) 30 kV (Output)
ระบบจูนความถี่ (T _{SLOT})	รอบการหมุนมอเตอร์	4.75 รอบ (36,000 พัลส์/รอบ)
ระบบหล่อเย็น	อุณหภูมิ	40 °C

จากตารางที่ 6.2 การควบคุมอุปกรณ์ต่าง ๆ จำเป็นจะต้องทำการออกแบบระบบที่มีการควบคุมจากระยะทางไกล เพื่อหลีกเลี่ยงในบริเวณพื้นที่ ที่มีรังสีอยู่ตลอดเวลา ซึ่งการควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น จะใช้โปรแกรมเล็บวิว เป็นโปรแกรมกลางในการควบคุมอุปกรณ์ทั้งหมด ที่มีการออกแบบระบบ เป็น 2 ส่วน คือ ระบบเวลาจริง และระบบสมองกลฝังตัว ซึ่งทั้ง 2 ระบบ ได้อธิบายขั้นตอนการทำงานในบทที่ 5 และการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคที่ต้องใช้แหล่งจ่ายคลื่นความถี่วิทยุ เพื่อเร่งพลังงานอิเล็กตรอน ในท่อเร่งอนุภาคชนกับเป้ารังสีอิเล็กซ์ จะใช้การควบคุมความถี่เรโซแนนซ์เพื่อเร่งพลังงานอิเล็กตรอน โดยใช้หลักการ

ออกแบบตัวควบคุมที่เป็นแบบพีชชีลอจิก ด้วยวิธีการอนุมานของ Takagi-Sugeno ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 หัวข้อ 5.6

6.4 การทดสอบและเก็บข้อมูล

การควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นเพื่อประยุกต์ใช้สำหรับงานฆ่าเชื้อผลผลิตทางการเกษตร ในงานวิจัยใช้อัลกอริทึมแบบพีชชีลอจิกร่วมกับการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno และกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น เพื่อทดลองการควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคในกรณีต่าง ๆ ของการผลิตรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสรุปเป็นเงื่อนไขเริ่มต้นการทดลอง ดังตารางที่ 6.3

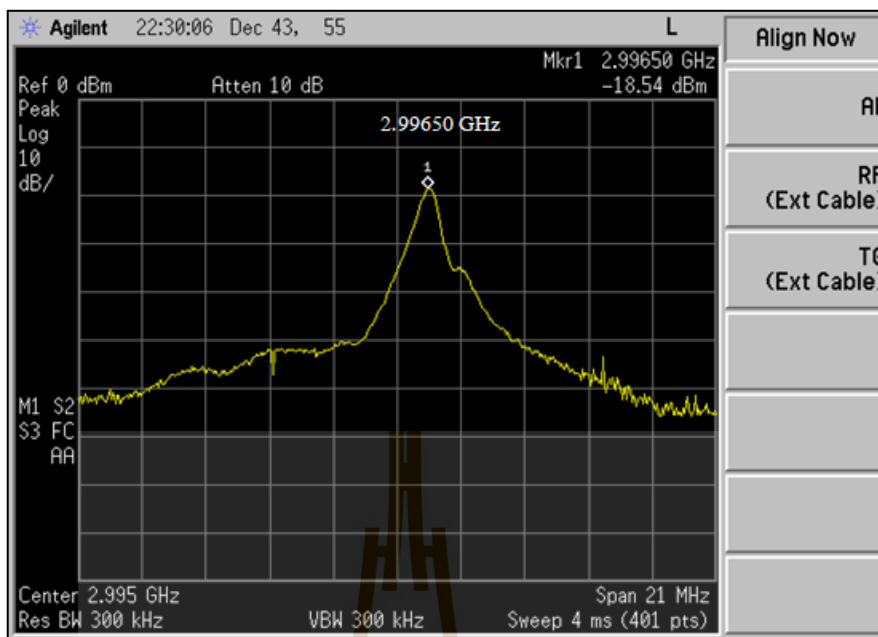
ตารางที่ 6.3 ข้อกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้นสำหรับการทดสอบการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น

องค์ประกอบ	ขนาด
อุณหภูมิหล่อเย็น	38 - 42 องศาเซลเซียส
ความดันสุญญากาศ	1.0×10^{-9} - 5.0×10^{-8} ทอร์
แรงดันแหล่งจ่ายแมกนีตรอน	45 โวลต์
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า	0.152 เทสลา

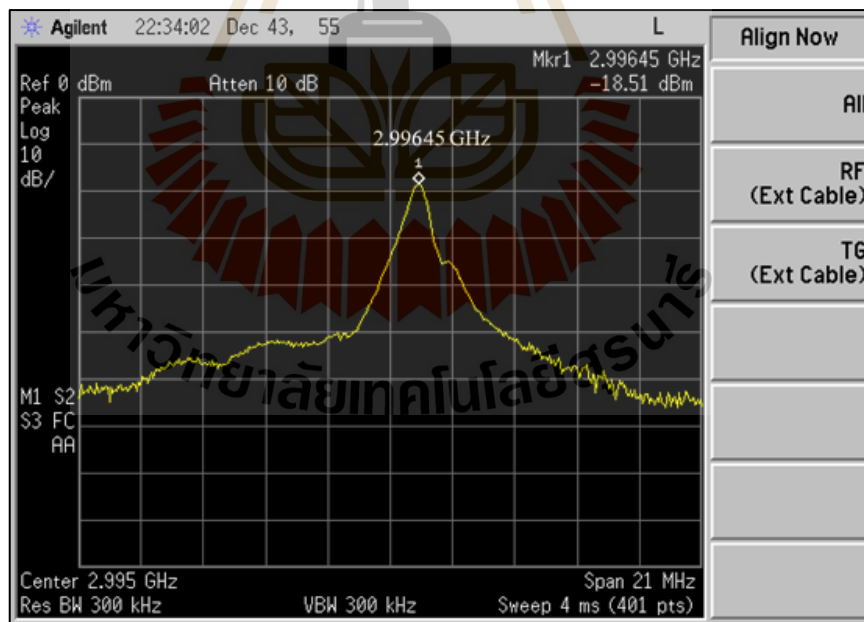
จากตารางเงื่อนไขที่ 6.3 ได้กำหนดเป็นเงื่อนไขเริ่มต้น โดยอันดับต่อไปออกแบบการทดลอง เพื่อใช้หลักการควบคุมระบบ โดยการใช้เทคนิคการควบคุมแบบพีชชี ซึ่งได้อธิบายไว้ในบทที่ 5 ซึ่งงานวิจัยได้ออกแบบการทดสอบ เพื่อผลิตรังสีเอ็กซ์ของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น และใช้ตัวควบคุมแบบพีชชีทำการปรับตำแหน่งโครงสร้างภายในแมกนีตรอนด้วยระบบขับเคลื่อนทางกลของสเต็ปปีงมอเตอร์ เพื่อจูนความถี่เรโซแนนซ์ที่กำหนดมาจากแมกนีตรอนรักษาระดับปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่วัดให้มีค่าคงที่ ซึ่งการทดลองจะวัดผลของปริมาณรังสีในหน่วย $\mu\text{Sv/hr}$ โดยการออกแบบการทดลองในงานวิจัยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 การทดสอบความถี่เรโซแนนซ์เมื่อเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำหล่อเย็น

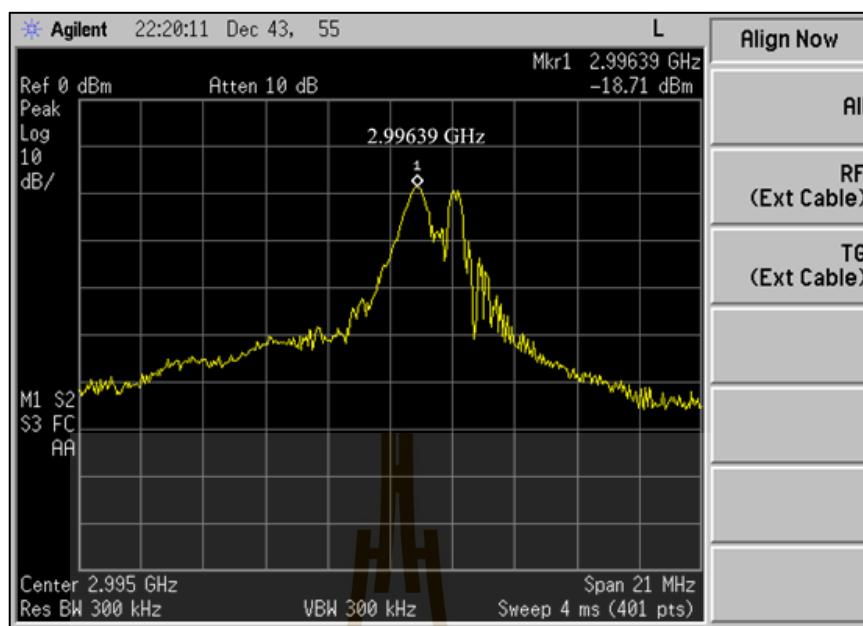
การทดสอบคลื่นความถี่วิทยุจากแมกนีตรอน โดยกำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยรวมของระบบ เช่น 38, 40, และ 42 องศาเซลเซียส จากนั้นวัดผลการตอบสนองของความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัม (Spectrum Analyzer) ซึ่งผลการตอบสนองของตำแหน่ง ณ จุดที่มีความถี่สูงสุด แสดงผลลัพธ์ดังรูปที่ 6.16 ถึง 6.18



รูปที่ 6.16 ผลการตอบสนอง ความถี่เรโซแนนซ์ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 38 องศาเซลเซียส



รูปที่ 6.17 ผลการตอบสนอง ความถี่เรโซแนนซ์ ที่อุณหภูมิตั้งที่ 40 องศาเซลเซียส



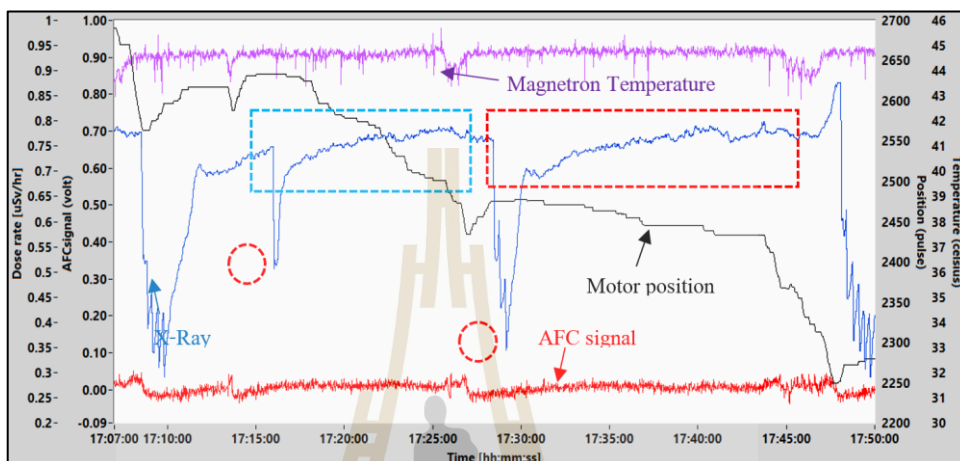
รูปที่ 6.18 ผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่อุณหภูมิ 42 องศาเซลเซียส

จากรูปที่ 6.16 ถึง 6.18 คือ การวัดผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ด้วยเครื่องมือวัดวิเคราะห์ความถี่ (Network Analyzer) เพื่อเก็บข้อมูลและเปรียบเทียบผลต่างของความถี่เรโซแนนซ์ของระบบภายใต้การทดสอบช่วงขอบเขตของอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นระบบที่เปลี่ยนแปลง คือ 38, 40 และ 42 องศาเซลเซียส เมื่อไม่มีการพิจารณาไหลของท่อเร่งอนุภาคเชิงเส้นพบว่า ผลการเปลี่ยนแปลง ผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ ณ จุดตำแหน่งสูงสุด คือ 2.99650, 2.99645 และ 2.99639 GHz ตามลำดับ และมีความแตกต่างของความถี่เรโซแนนซ์ แต่ละเงื่อนไขของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงประมาณ 0.000055 GHz ซึ่งผลการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ ส่งผลเล็กน้อยต่อการควบคุมความถี่จากแมกนีตรอน

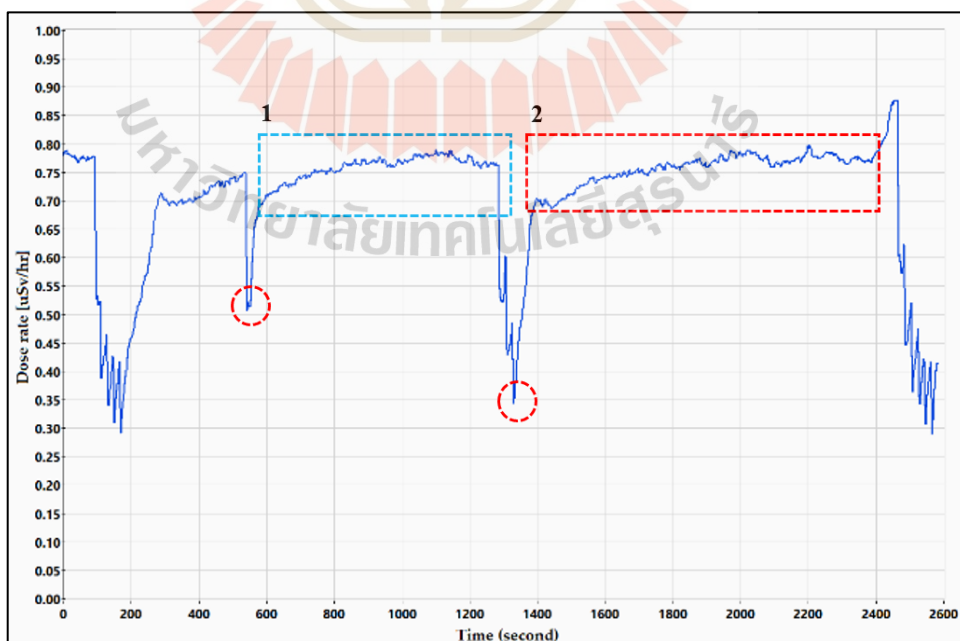
กรณีที่ 2 การควบคุมความถี่เรโซแนนซ์โดยใช้อัลกอริทึมแบบพีซี

การทดลองเพื่อควบคุมผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนในสถานะอุณหภูมิ น้ำหล่อเย็นที่กำหนดไว้ 40 องศาเซลเซียส และความดันสุญญากาศบริเวณท่อเร่งพลังงาน แนวตรงไม่สูงกว่า 5.0×10^{-8} ทอร์ เนื่องจากถ้าความดันสูงเกินไป จะส่งผลต่อพลังงานอิเล็กตรอนที่ไม่เสถียร และระบบควบคุมทั้งหมดจะถูกยกเลิกการทำงานทันทีด้วยระบบอินเตอร์ล็อกที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งเงื่อนไขเริ่มต้นการทดลองกำหนดการใช้ตัวแปรที่เหมาะสมกับการทำงานของแมกนีตรอนในโหมดพาย ให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยออกแบบให้มีการทำงานอยู่ในช่วงขอบเขตจุดตัดผ่านและเงื่อนไขฮาร์ที ซึ่งได้อธิบายรายละเอียดไว้ในบทที่ 3 คือ การใช้แหล่งจ่ายไฟฟ้า 45.0 กิโลโวลต์ และสนามแม่เหล็กไฟฟ้า 0.152 เทสลา เพื่อให้แมกนีตรอนสร้าง

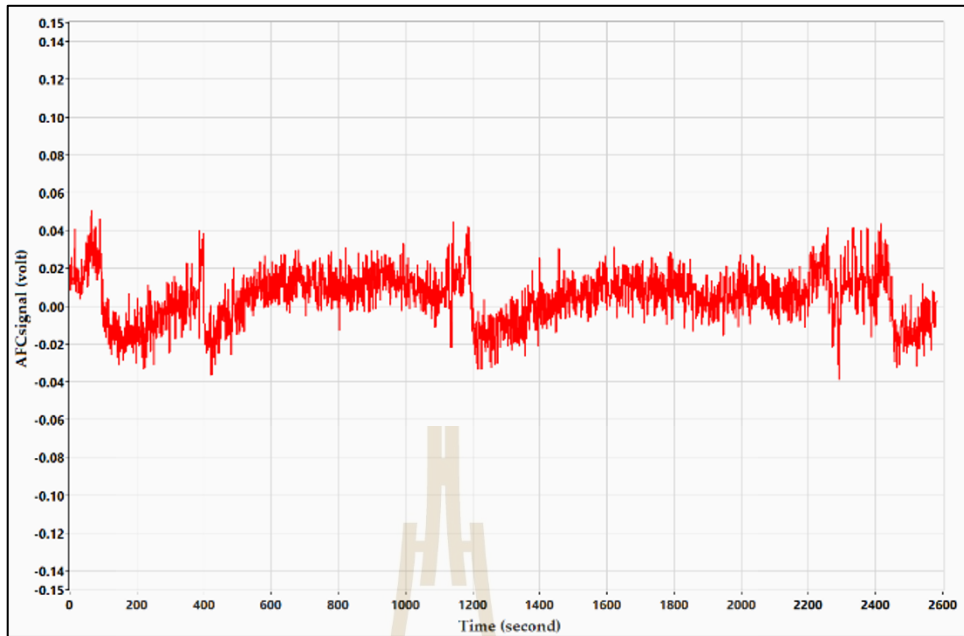
ความถี่เรโซแนนซ์ได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ซึ่งผลการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงของ ปริมาณรังสีเอ็กซ์ สัญญาณป้อนกลับ ตำแหน่งการปรับจูนความถี่ของแมกนีตรอนและอุณหภูมิของแมกนีตรอน จากการควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น แสดงผลการตอบสนอง ดังรูปที่ 6.19 – 6.23



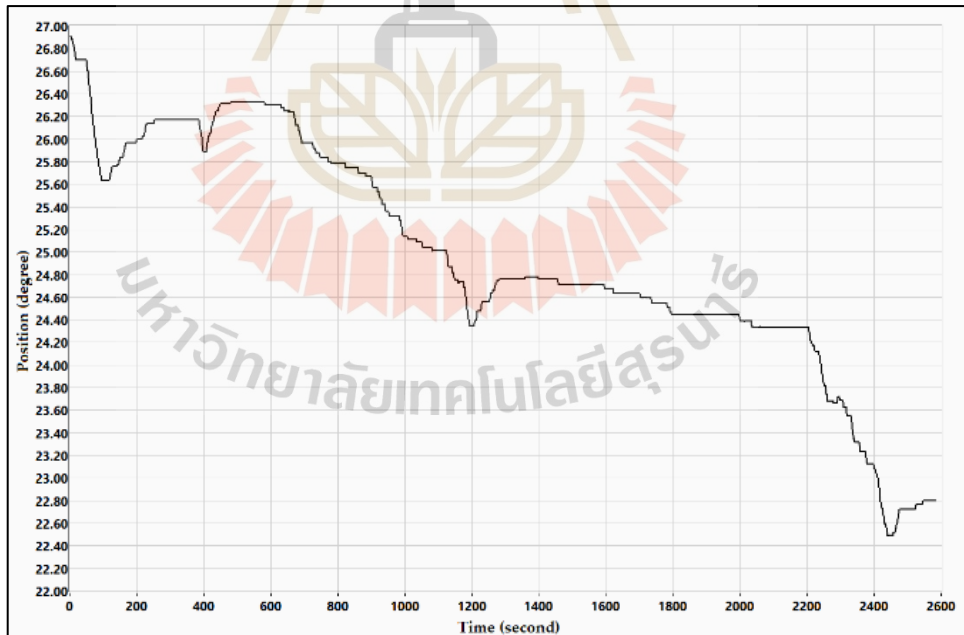
รูปที่ 6.19 ผลการตอบสนองภาพรวมการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์
สำหรับระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น



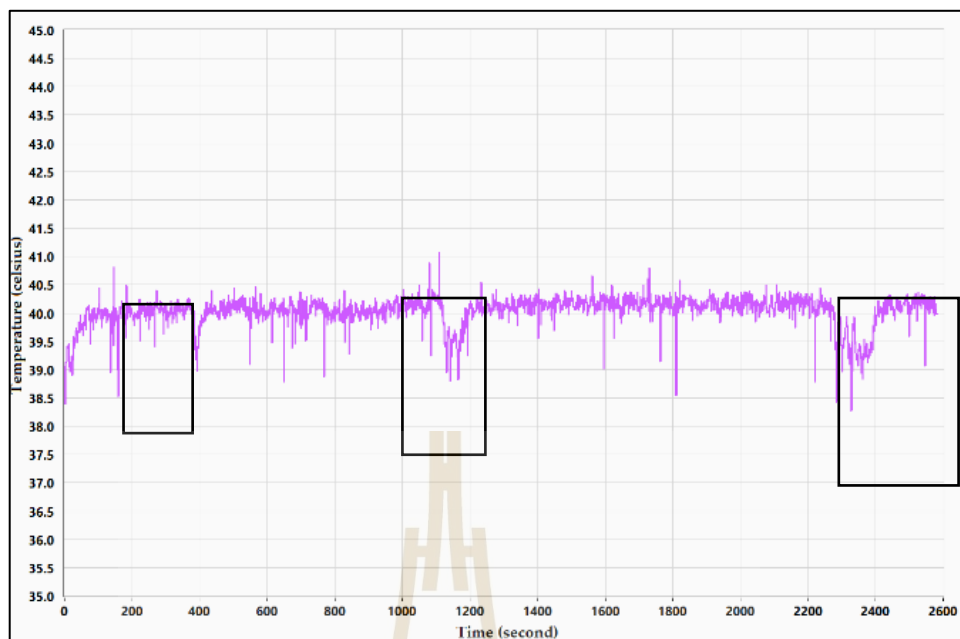
รูปที่ 6.20 ผลการตอบสนองปริมาณรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 6.21 ผลการตอบสนองสัญญาณป้อนกลับความถี่อัตโนมัติ



รูปที่ 6.22 ผลการตอบสนอง การปรับจูนตำแหน่งมอเตอร์



รูปที่ 6.23 ผลการตอบสนองการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแมกนีตรอน

ผลการทดลองจากรูปที่ 6.19 คือ การทดลองเพื่อควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคภายใต้ระยะเวลาการทดสอบประมาณ 45 นาที เมื่อกำหนดเงื่อนไขการทดสอบ อุณหภูมิของน้ำหล่อเย็นทั้งระบบรวมทั้ง 40 องศาเซลเซียส ระบบการป้องกัน ความเสียหายของ ความดันสุญญากาศต้องไม่สูงกว่า 5.0×10^{-8} ทอร์ ซึ่งผลการตอบสนองของระบบใช้เทคนิคการควบคุมอัลกอริทึมฟัซซีลอจิก (Fuzzy Logic control) ด้วยการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno พบว่า จากรูปที่ 6.20 คือ ผลการตอบสนองของระบบสามารถรักษาระดับ รังสีเอ็กซ์ ให้มีค่าคงที่ประมาณ $0.8 \mu\text{Sv/hr}$ ต่อเนื่องเป็นระยะเวลาประมาณ 12 นาที (กรอบหมายเลข 1) และ ระยะเวลา 20 นาที (กรอบหมายเลข 2) แต่ว่าการทดสอบระบบควบคุมมีการพบความเสียหายจากรอยรั่วของระบบสุญญากาศ (วงกลม จากรูปที่ 6.20) และอุณหภูมิของระบบเปลี่ยนแปลงประมาณ 1.5 องศาเซลเซียส (กรอบสี่เหลี่ยม ดังรูปที่ 6.23) ซึ่งมีผลทำให้ระบบอินเตอร์ล๊อคทำงานทันที ซึ่งในงานวิจัยได้ตั้งค่าความดันสุญญากาศที่มีค่าไม่เกินกว่า 5.0×10^{-8} ทอร์ และกำหนดให้อินเตอร์ล๊อคทำการปิดการทำงานของอุปกรณ์ทุกตัวลง เป็นระยะเวลา 7 วินาที และเมื่อความดันสุญญากาศ กลับคืนสู่ขอบเขตของความดันที่รับได้ ระบบก็จะสามารถกลับเข้าสู่ภาวะปกติทันทีด้วยผลการตอบสนองของปริมาณรังสีเอ็กซ์ ที่มีลักษณะการตอบสนองของค่าคงที่ทางเวลา ประมาณ 43 วินาที ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกที่สามารถทำให้ระบบการสร้างรังสีเอ็กซ์ มีค่าคงที่ได้อย่างรวดเร็ว ด้วยการปรับความถี่ของแมกนีตรอนซดเซชให้กับท่อเร่งอนุภาค ผ่านการหมุนของ

ระบบขับเคลื่อนด้วยสตีปิ้งมอเตอร์ที่ยึดติดกับโครงสร้างภายในแมกนีตรอน และการปรับจูนความถี่เรโซแนนซ์เพื่อชดเชยให้กับระบบ อาศัยสัญญาณป้อนกลับ เอเอฟซี ดังรูปที่ 6.21 ที่มีค่าอ้างอิงความถี่เรโซแนนซ์ที่ตำแหน่ง 0 โวลต์ คือ ความต่างของ สัญญาณ Forward และ Reflect ที่ผ่านการเคลื่อนที่ของกลไกระบบขับเคลื่อนสตีปิ้งมอเตอร์ ดังรูปที่ 6.22

6.5 สรุป

ผลการทดลองในบทที่ 6 เป็นผลการทดลองระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นร่วมกับการเลือกใช้ตัวแปรที่เหมาะสม โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อควบคุมแมกนีตรอนสร้างคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz ร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิกด้วยการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno สำหรับการควบคุมระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นผลิตรังสีเอ็กซ์เพื่อการประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ โดยมีรายละเอียดของการสรุปผลการทดสอบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ดังนี้

กรณีที่ 1 ผลการออกแบบระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอนที่ส่งผ่านท่อนำคลื่นไปยังท่อเร่งอนุภาคเพื่อผลิตรังสีเอ็กซ์ร่วมกับการประยุกต์ใช้เงื่อนไขเริ่มต้นการทดสอบคือ แรงดันแหล่งจ่ายที่ 45.0 กิโลโวลต์ และสนามแม่เหล็กถาวรที่ 0.152 เทสลา เพื่อควบคุมแมกนีตรอนในโหมดพาย ที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ Twelve-Hole-Slot-Type และกำหนดอุณหภูมิของแหล่งจ่าย ระบบหล่อเย็น ที่มีค่าเท่ากับ 38, 40, และ 42 องศาเซลเซียส พบว่าผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ ที่ใช้เครื่องมือวัดสเปกตรัม เพื่อวิเคราะห์หาตำแหน่งของความถี่เรโซแนนซ์ที่มีค่าสูงสุดหรือตำแหน่งของจุดอ้างอิงมอเตอร์ที่ 0 องศา พบว่า มีค่าความถี่เรโซแนนซ์เท่ากับ 2.9965, 2.99645 และ 2.99639 GHz ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบผลการตอบสนองของความถี่แต่ละอุณหภูมิที่ทดสอบพบว่า ค่าความถี่เรโซแนนซ์มีความต่างประมาณ 50 kHz

กรณีที่ 2 การออกแบบระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นที่ประยุกต์แรงดันแหล่งจ่าย ที่ 45 กิโลโวลต์ และสนามแม่เหล็กถาวรที่ 0.152 เทสลา เพื่อควบคุมแมกนีตรอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบ Twelve-Hole-Slot-Type ร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมอัลกอริทึมพีชชีลอจิกด้วยการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno ผลการทดสอบสามารถควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz ซึ่งตรงกันกับความถี่เรโซแนนซ์ของโหลดท่อเร่งอนุภาคเชิงเส้นและสามารถควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น สร้างรังสีเอ็กซ์ได้อย่างต่อเนื่อง คงที่ และชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ให้กลับเข้าสู่สภาวะปกติด้วยผลการตอบสนองของปริมาณรังสีเอ็กซ์ที่มีลักษณะการตอบสนองของค่าที่ทางเวลาประมาณ 43 วินาที โดยอาศัยการออกแบบตัวควบคุมพีชชีลอจิก เพื่อปรับจูนตำแหน่งระยะพื้นที่โพรงของห้องคลื่น (T_{SLOT}) เมื่อโหลดของท่อเร่งอนุภาคเชิงเส้นถูกรบกวนด้วยอุณหภูมิ 38 - 42 องศาเซลเซียส และความดันสูญญากาศที่ผิดปกติประมาณ 1.0×10^{-9} - 5.0×10^{-8} ทอร์

บทที่ 7

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการศึกษาและวิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของแมกนีตรอนชนิด Twelve-Hole-Slot ที่มีผลต่อการสร้างความถี่เรโซแนนซ์ด้วยการใช้เทคนิควิศวกรรมย้อนรอย และสร้างระบบควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ของแมกนีตรอน โดยการประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบ พิชชี่ด้วยวิธีการอนุมาณของ Takagi-Sugeno เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาค เชิงเส้นพลังงาน 6 MeV สำหรับการประยุกต์ใช้ฆ่าเชื้อผลผลิตทางการเกษตร โดยงานวิจัยดังกล่าว เป็นประโยชน์ต่อการใช้งานแมกนีตรอนของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นและการพัฒนาอุปกรณ์ ต้นแบบ เพื่อสร้างคลื่นความถี่วิทยุกำลังสูงในย่านคลื่นความถี่ตามที่ต้องการควบคุมความถี่ เรโซแนนซ์ เพื่อการฉายรังสีเอ็กซ์ให้เป็นที่ยอมรับและสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้มาใช้บริการ และลดการพึ่งพาการนำเข้าแมกนีตรอนที่ใช้สำหรับเครื่องเร่งอนุภาค ซึ่งสามารถสรุปผลที่ได้ จากงานวิจัย ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาและวิเคราะห์จุดการทำงานของแมกนีตรอน ในย่านขอบเขตของการเกิด ออสซิลเลต โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ประจุอิเล็กตรอนในสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใต้ เงื่อนไขของพื้นที่จุดตัดผ่านขอบเขตบนของการทำงาน (Cut-off Condition) และขอบเขตล่างภายใต้ เงื่อนไขของฮาร์ตรี (Hartree Condition) ซึ่งผลที่ได้คือ องค์กรประกอบตัวแปรที่เหมาะสมสำหรับการทำให้แมกนีตรอนสามารถสร้างคลื่นความถี่วิทยุที่ 2.9982 GHz ได้อย่างต่อเนื่อง สำหรับระบบ ที่มีแหล่งจ่ายไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่ 45 กิโลโวลต์ และ 0.152 เทสลา

2. ศึกษาและวิเคราะห์ค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนที่มี ผลต่อความถี่เรโซแนนซ์ โดยใช้เทคนิควิศวกรรมย้อนรอย ด้วยชุดเครื่องมือวัดขนาดสามมิติที่มีความละเอียด 0.5 μm วัดขนาดโครงสร้างแมกนีตรอน เพื่อนำค่าที่ได้ไปประมาณผลการตอบสนอง ความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายในรูปแบบการประมาณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 2 วิธี คือ วิธีแบบจำลองวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนาน และวิธีแบบจำลองสามมิติที่ใช้เทคนิค PIC simulation บนโปรแกรม CST particle studio ซึ่งสามารถวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัด ความถี่ต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอนต่อการประมาณการตอบสนองความถี่ เรโซแนนซ์ในโหมดพาย โดยการประยุกต์ใช้ทั้ง 2 วิธี ได้ดังนี้

ผลการวิเคราะห์ กรณีที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ โดยประยุกต์ใช้ทั้ง 2 วิธี เมื่อกำหนดจุดการทำงานของแมกนีตรอนให้ทำงานอยู่ในโหมดพาย และพิจารณาค่าพิกัดความถี่ต่าง ๆ ของ 2 ตัวแปร คือ รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_v) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของ 2 ตัวแปร ได้ผลที่มีความแตกต่างระหว่าง 2 วิธีสูงสุดที่ 0.0018 GHz ดังแสดงในตารางที่ 7.1 แสดงว่าการประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองวงจรเทียบเท่าเรโซแนนซ์แบบขนาน และวิธีแบบจำลองสามมิติ ที่ใช้เทคนิค PIC simulation บนโปรแกรม CST particle studio ให้ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ในโหมดพายมีแนวโน้มในการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

ตารางที่ 7.1 การเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ขนาดของตัวแปร		แบบจำลองคณิตศาสตร์		ผลต่าง (GHz)
รัศมีโพรงห้องคลื่น R_v (mm.)	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น L_M (mm.)	Equivalent Circuit (GHz)	CST program (GHz)	
3.145	4.907	3.0224	3.0219	0.0005
3.195		3.0084	3.0071	0.0013
3.245		2.9839	2.9833	0.0006
3.145	4.957	3.0260	3.0242	0.0018
3.195		3.0036	3.0033	0.0003
3.245		2.9817	2.9808	0.0009
3.145	5.007	3.0232	3.0229	0.0003
3.195		3.0025	3.0022	0.0003
3.245		2.9847	2.9842	0.0005

ผลการวิเคราะห์ กรณีที่ 2 เป็นการวิเคราะห์ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ ในโหมดพาย โดยประยุกต์ใช้วิธีแบบจำลองสามมิติที่ใช้เทคนิควิธี Particle-In-Cell บนโปรแกรม CST particle studio เพื่อหาการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ ต่อค่าพิกัดความถี่ของตัวแปรต่าง ๆ ของโครงสร้างภายในแมกนีตรอน สามารถแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

กรณีศึกษาที่ 2.1 การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมคพายที่ 2.9982 GHz จะได้รับรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) ที่ 3.195 mm, ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ที่ 4.957 mm, รัศมีบล็อกลูกแอโนด (R_A) ที่ 17.023 mm, ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W) ที่ 3.089 mm, ความสูงบล็อกลูกแอโนด (H) ที่ 32.801 mm และรัศมีแคโทด (R_C) ที่ 9.165 mm ร่วมกับพื้นที่โพรงห้องคลื่น เพื่อปรับความถี่เรโซแนนซ์ด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ที่ระยะ 3.887 mm

เมื่อพิจารณาพิถีพิถันความถี่ของแต่ละตัวแปรที่มีช่วงการเปลี่ยนแปลงขอบเขต $\pm 50 \mu\text{m}$ จำนวน 6 ตัวแปร ร่วมกับพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ที่ระยะ 3.887 mm ความถี่เรโซแนนซ์ในโหมคพายจะมีการเปลี่ยนแปลง ดังแสดงในตารางที่ 7.2 โดยการเปลี่ยนแปลงค่าพิถีพิถันของรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ในโหมคพายที่ 2.9982 ± 0.0219 GHz มากที่สุด และการเปลี่ยนแปลงค่าพิถีพิถันของรัศมีแคโทด (R_C) ไม่มีผลกระทบต่อค่าพิถีพิถันการเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์ในโหมคพายที่ 2.9982 GHz

ตารางที่ 7.2 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมคพาย กรณีศึกษาที่ 2.1

ลำดับ	ตัวแปร	พิถีพิถันความถี่ (mm)	ผลลัพธ์	
			ตำแหน่งโพรงห้องคลื่น (mm)	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)
1	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.195 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0219
2	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0029
3	รัศมีบล็อกลูกแอโนด (R_A)	17.023 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0015
4	ความกว้างช่องว่างโพรงห้องคลื่น (W)	3.089 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0004
5	ความสูงบล็อกลูกแอโนด (H)	32.801 ± 0.05	3.887	2.9982 ± 0.0003
6	รัศมีแคโทด (R_C)	9.165 ± 0.05	3.887	2.9982

กรณีศึกษาที่ 2.2 การประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมคพายที่ 2.9982 GHz โดยการปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่น ด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ที่สามารถปรับระยะได้ในช่วง 2.22 ถึง 9.22 mm ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพิถีพิถันของตัวแปรจำนวน 2 ตัวแปร ที่มีผลต่อ

การเปลี่ยนแปลงความถี่เรโซแนนซ์มากที่สุด ตามลำดับในกรณีที่ 2.1 คือ รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) ดังแสดงในตารางที่ 7.3 สามารถสรุปได้ ดังนี้

- ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายที่ 2,9982 GHz ในลำดับที่ 2, 3, 4 ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ของรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) นั้น สามารถปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่นด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ในช่วงระยะขอบเขต 2.22 – 9.22 mm ได้

- ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายในลำดับที่ 1, 5 ต่อการเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดความถี่ของรัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V) และความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M) นั้น ไม่สามารถปรับพื้นที่โพรงห้องคลื่น ด้วยชุดระบบขับเคลื่อนมอเตอร์ (T_{SLOT}) ในช่วงระยะขอบเขต 2.22 – 9.22 mm เพื่อหาความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายที่ 2,9982 GHz ได้

ตารางที่ 7.3 ผลการประมาณความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพาย กรณีที่ 2.2

ลำดับ	ตัวแปร	พิกัดความถี่ (mm)	ผลลัพธ์	
			ตำแหน่งโพรงห้องคลื่น (mm)	ความถี่เรโซแนนซ์ (GHz)
1	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.145	2.220	3.0087 ± 0.0012
	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
2	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.170	2.251	2.9982 ± 0.0026
	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
3	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.195	3.887	2.9982 ± 0.0029
	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
4	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.220	8.596	2.9982 ± 0.0034
	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		
5	รัศมีโพรงห้องคลื่น (R_V)	3.245	9.220	2.9852 ± 0.0015
	ความยาวช่องว่างโพรงห้องคลื่น (L_M)	4.957 ± 0.05		

3. การออกแบบและทดลองระบบการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น เพื่อผลิตรังสีเอ็กซ์ ในบริเวณชั้นใต้ดินที่ห้องปฏิบัติการแสงสยามมีการทดสอบระบบควบคุมที่กำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

- การวัดผลตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ ด้วยอุปกรณ์ควบคุมระบบประมวลผลกลาง ประกอบด้วย บอร์ดควบคุม NI-cRIO ที่มีการประมวลผลการทำงาน 2 ส่วน คือ การทำงานบนเวลาจริง และการทำงานบนสมองกลฝังตัวร่วมกับการสร้างโปรแกรม (GUI) ด้วยตัวควบคุมอัลกอริทึมพีซีโลจิกบนโปรแกรมแล็ปวิว

- การทดสอบระบบการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ภายใต้การทำงานในช่วงอุณหภูมิ 38 – 42 องศาเซลเซียส และความดันสุญญากาศ 1.0×10^{-9} – 5.0×10^{-8} ทอร์ โดยออกแบบการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ สำหรับการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ใช้ผลการศึกษาและวิเคราะห์จุดการทำงานของแมกนีตรอนในโหมดพาย ด้วยองค์ประกอบตัวแปรที่เหมาะสมจากหัวข้อที่ 1 คือ ใช้แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า 45 กิโลวัตต์ และสนามแม่เหล็ก 0.152 เทสลา เพื่อให้แมกนีตรอนสร้างคลื่นความถี่เรโซแนนซ์ที่ 2.9982 GHz ไปยังระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นให้ผลิตรังสีเอ็กซ์ได้อย่างต่อเนื่อง

- การออกแบบตัวควบคุมพีซี โดยอาศัยความแตกต่างของความถี่เรโซแนนซ์เทียบกับความถี่อ้างอิง 2.9982 GHz แล้วแปลงค่าความผิดพลาด ให้อยู่ในรูปของตัวแปรภาษาในขอบเขตของกฎพีซี คือ 0 – 200 % แล้วทำการตีพีซีด้วยการอนุมาน กฎวิธีของ Takagi-Sugeno แล้วแปลงค่ากลับให้อยู่ในรูปแบบสัญญาณพัลส์ ไปควบคุมสตีปีงมอเตอร์ในขอบเขต 0 – 100 % เพื่อปรับจูนตำแหน่งโพรงของห้องคลื่น (T_{SLOT}) ของแมกนีตรอน ไปชดเชยความถี่เรโซแนนซ์ของท่อเร่งอนุภาค ที่ถูกรบกวนจากปัจจัยภายนอก

ผลการทดสอบการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ 2.9982 GHz สำหรับระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น โดยการออกแบบตัวควบคุมอัลกอริทึมแบบพีซีโลจิก ร่วมกับการอนุมานวิธีของ Takagi-Sugeno สามารถรักษาระดับผลการตอบสนองของปริมาณรังสีเอ็กซ์ได้คงที่สูงสุดประมาณ $0.8 \mu\text{Sv/hr}$ และชดเชยผลการตอบสนองความถี่เรโซแนนซ์ที่เปลี่ยนแปลง เมื่อโหลดของท่อเร่งอนุภาคเชิงเส้นถูกรบกวน จากความดันสุญญากาศ ในช่วง 1.0×10^{-9} – 5.0×10^{-8} ทอร์ และอุณหภูมิที่ผิดปกติในช่วง 38 – 42 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบสามารถเข้าสู่สภาวะปกติได้ทันทีด้วยผลการตอบสนองของปริมาณรังสีเอ็กซ์ ที่มีลักษณะการตอบสนองของค่าคงที่ทางเวลาประมาณ 43 วินาที

การควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ในโหมดพายของแมกนีตรอนนั้นต้องการความแม่นยำสูง เสถียรภาพในการทำงานและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพสิ่งแวดล้อม สำหรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น จึงทำให้แมกนีตรอนมีค่าราคาแพง

และต้องนำเข้าจากต่างประเทศ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนแปลงของความเร็วไอโซเนนซ์ในโหมคพายของแมกนีตรอนต่อค่าพิกัดความถี่ของตัวแปร โครงสร้างภายในของแมกนีตรอน ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการสร้างตัวต้นแบบของแมกนีตรอนให้ได้ย่านขอบเขตของความเร็วไอโซเนนซ์ตามที่ต้องการ และการออกแบบตัวควบคุมอัลกอริทึมพีซีซีโลจิกเป็นตัวควบคุมที่เหมาะสมกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อชดเชยความเร็วไอโซเนนซ์สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการควบคุมการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นให้ผลิตรังสีอิเล็กซ์ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถนำไปเป็นองค์ความรู้ของการสร้างชิ้นงานที่เป็นส่วนสำคัญเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น และลดการนำเข้าวัสดุจากต่างประเทศได้

7.2 ข้อเสนอแนะ

การศึกษาเพื่อการวิเคราะห์พิกัดความถี่ของโครงสร้างการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมความเร็วไอโซเนนซ์ของแมกนีตรอน สำหรับระบบเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้น ผลิตรังสีอิเล็กซ์ที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้มาเชื่อมผลผลิตทางการเกษตร มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. การวัดขนาดและพิจารณาพิกัดความถี่ของโครงสร้างทางกายภาพของแมกนีตรอน ควรเลือกใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดสูง เพราะค่าผลของขนาดโครงสร้างภายใน ถ้ามีความละเอียดมากจะทำให้ผลการจำลองความเร็วไอโซเนนซ์มีความแม่นยำมากขึ้นตามไปด้วย
2. การวิเคราะห์การจำลองความเร็วไอโซเนนซ์ สามารถนำไปประยุกต์ เพื่อสร้างตัวต้นแบบของแมกนีตรอนได้ และเครื่องจักรผลิตชิ้นงานต้องมีความละเอียดไม่สูงกว่า $0.5 \mu\text{m}$ และมีความถี่ของความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 50 \mu\text{m}$
3. การออกแบบระบบควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นในส่วนของ การเลือกใช้ตัวเซนเซอร์สำหรับตรวจวัดความเร็วไอโซเนนซ์ต้องเลือกใช้อุปกรณ์ที่สามารถปรับค่าออฟเซตได้ เนื่องจากอุปกรณ์ติดตั้งในบริเวณพื้นที่ที่มีรังสี
4. การเลือกใช้ชุดคัปปลิ่งระหว่างมอเตอร์และแกนของแมกนีตรอนควรใช้เป็นแบบยึดหยุ่นเพื่อป้องกันการเกิดเชิงศูนย์ทางกล ซึ่งอาจจะส่งผลต่อการสั่นสะเทือนได้
5. การเลือกใช้มอเตอร์สำหรับการปรับจูนความเร็วไอโซเนนซ์ของแมกนีตรอนจะต้องเลือกใช้มอเตอร์ที่มีกำลังแรงบิดอยู่ในขอบเขตของข้อมูลจำเพาะสำหรับแมกนีตรอนที่เลือกใช้งาน เนื่องจากอาจส่งผลต่อโครงสร้างภายในแมกนีตรอน
6. การออกแบบระบบหล่อเย็นของระบบเครื่องเร่งอนุภาคแนะนำการออกแบบระบบให้เป็นรูปแบบขนานและมีระบบควบคุมอุณหภูมิด้วยตัวเอง เพื่อง่ายต่อการควบคุม

รายการอ้างอิง

- บัณฑิต โรจน์อารยานนท์. (2559) **วิศวกรรมไมโครเวฟ**. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- A. El Helou, Peter E. Radd and P. Komarov. (2018). Temperature Dependence of the Thermoreflectance Coefficient of Gold by the Use of a Phase-Locked Single-Point Measurement Approach, **34th SEMI-THERM Symposium**, 2018, pp. 161-164.
- B.N. Lee et. al. (2014). Status of KAERI 6 MeV 9.3 GHz X-band Electron LINAC for Cancer Treatment System, **5th International Particle Accelerator Conference (IPAC2014)**, Dresden, Germany, pp. 2168-2170.
- Charged Particle Simulation. (2019). **CST STUDIO SUITE[®] 2019**, Computer simulation Technology product, GMBH, a Dassault Systèmes company.
- D. Li, Y. Alfadhl, and X. Chen. (2009). Nonlinear Dynamics and Chaos in a Circuitry Model of Magnetron. **IFT conference on High Power RF Technologies**, 26 Feb 2009.
- Daohui Li, Xiaodong Chen. (2012). Study of nonlinear dynamics in magnetron by using circuitry model. **American Institute of Physics**, Physic of Plasmas 19, 2012, pp. 1-6
- David H. Simon et al. (2010). Buneman-Hartree Condition Revisited. **IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)**, 18-20 May 2010, pp. 513-514.
- Dmitrii A., Artem K., and Edl S. (2019). Review of the relativistic magnetron, **Matter and Radiation Extreme 4**, 067201(2019), 11 October 2019.
- Dopendra J. Mistry and Mauro Mineo. (2017). **Magnetron Development at E2V**, ARMMS April 2017 pages 1-9
- E. Petritoli, F. Leccese and M. Cagnetti. (2019). Takagi-Sugeno Discrete Fuzzy Modelling Modeling: an IoT Controlled ABS for UAV, **IEEE Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT)**, 4-6 June 2019, pp. 191-195.
- F. Qin, Y. Zhang, S. Xu, L. Lei, B. Ju and D. Wang. (2020). A Frequency-Agile Relativistic Magnetron with Axial Tuning, **IEEE Electron Device Letters**, VOL.41 No.5 MAY 2020, pp. 781 – 783.

- G. Bazzano., P. Nenzi., C. Ronsivalle., L. Picadri., M. Vadrucchi. (2018). Characterization of Automatic Frequency Control Systems for S-Band Proton LINAC “TOP-IMPLART”. **9th International Particle Accelerator Conference**, IPAC2018 Vancouver, BC, Canada, June 2018, pp. 701-704.
- G.B. Collins. (1948). Microwave Magnetron Vol.6, **New York: McGrew-Hill 1948**, pp. 49-54.
- Hyoung Suk Kim. (2011). Electromagnetic Waves in Cavity Design, **Behaviour of Electromagnetic Waves in Different Media and Structures**, ISBN 978-953-307-302-6, Intech, pp. 77-100, July 2011.
- Isa Araz, A. Dursun, E. Demirci, E. Korkmas and K. Yegin. (2011). Simulation of an 18-Vane Magnetron in CST-PIC. **IEEE URSI General Assembly and Scientific Symposium**, 13-20 August 2011.
- J. Tuner. (2012). Magnetron Automatic Frequency Control System, **EE498 senior design project report**, October 2012, pp.1-8.
- Jaindong Lang. (2016). Investigation of Spatial Harmonic Magnetrons for High Power Millimetre and THz Wave Operations, **Doctor of Philosophy in Electronic Engineering**, Queen Mary, University of London, United Kingdom, November 2016.
- Jeong-Hun Lee et. Al. (2019). Investigation of X-band coaxial Magnetron using Three-dimensional Particle-In-Cell simulation. **IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)**, 28 April-1 May 2019.
- Jerry C. Whitaker. (2000). Microwave Power Tubes, **Power Vacuum Tubes Handbook 2nd Edition**, CRC Press LLC, 2000
- Jung-Hoon Han and Seung-Kab Ryu. (2019). Optimal Operating Conditions Based on Mode competition for Maximum Efficiency of Double-strapped Magnetron. **IEEE Transactions on Plasma science**, VOL.47 No.7 July 2019, pp. 3160-3167.
- K. Premkumar and Dr.B.V.Manikandan. (2013). Adaptive fuzzy logic speed controller for Brushless DC motor, **IEEE International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)**, 6-8 February 2013.
- L. Ma, 3D Computer Modeling of Magnetrons. (2004). **Doctor of philosophy in Electrical Engineering**, Department of Electronic Engineering, Queen Mary, University of London, United Kingdom, 2004.

- Laith Abed Sabri and Hussein Ahmed AL-Mshat. (2015). Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level System using LabView, **International Journal of Computer Applications**, (0975 – 8887) Volume 116 – No. 11, April 2015, pp 6-10.
- N. Juntong., R. Chimchang., S. Rimjaem., Ch. Saisa-ard. (2016). Design of Electron Gun and S-Band Structure for Medical Electron Linear Accelerator. **Proceeding of IPAC2016**, Busan, Korea, pp.1930-1932
- N. Yachum, N. Russamee and J. Srisertpol. (2018). Automatic frequency control of the magnetron system for medical linear accelerator using fuzzy logic control, **Proceedings of XLVI International Summer School-Conference APM 2018**, pp. 275-285.
- Nattawat Yachum et al. (2021). Parameter Optimization of Hole-Slot-Type Magnetron for Controlling Resonant Frequency of Linear Accelerator 6 MeV by Reverse Engineering Technique, **Journal of Applied Sciences**. Volume 11 Issue 5, March 2021.
- P. Hari Krishnan and M. Arjun. (2014). Control of BLDC Motor Based on Adaptive Fuzzy Logic PID Controller, **IEEE International Conference on Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCEE)**, 6-8 March 2014.
- R. B MILLER. (2005). Electronic Irradiation of Foods an Introduction to the Technology, **Food Engineering Series**, Springer, ISBN 0-387-23784-4, 2005, pp173-193.
- Rajarshi Pual, Dr. Shreesha C and Sumit Shinde. (2015). LabVIEW Implementation of Fuzzy Logic Controller for Heat Exchanger Process, **IEEE 1st International conference on futuristic trend in computational analysis & knowledge management (ABLAZE 2015)**, 25-27 February 2015.
- Rajendra Kumar Verma et al. (2017). Particle-In-Cell (PIC) Simulation of Spatial-Harmonic Magnetron (SHM), **IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies (ICETCCT)**, 17-18 November 2017.
- S. Maurya, V.V.P. Singh and Sharda Prasad. (2008). Study of mode control in a S-band pulsed tunable magnetron, **IEEE International Conference on Recent Advances in Microwave Theory and Applications**, 21-24 November 2008.
- Salma Khatoon et al. (2018). Design and simulation of 8-cavity hole-slot type magnetron in CST. **IEEE 2nd International Conference on Electronics, Materials Engineering & Nanotechnology (IEMENTech)**, 4-5 May 2018.

- SAMUEL Y. LIAO. (1997). Microwave Devices and Circuit, Third Edition: **PRENTICE HALL**, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, pp. 6-14, 1997.
- Sergiy V. Sosnytskiy and Dmytro M. Vavriv. (2002). Theory of the Spatial-Harmonic Magnetron an Equivalent Magnetron: An Equivalent Network Approach, **IEEE Transactions on Plasma Science**, VOL.30, Issue.3, June 2002. pp 984-991.
- Shulim E. Tsimring. (2007). Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics, **WILEY-INTERSCIENCE**, John Wiley & Sons, Inc, 2007.
- Song Yue, Zhao-chuan Zhang, Dong-ping Gao. (2014). Equivalent circuit method of Π -mode frequency of rising-sun magnetron. **Terahertz Science and Technology**, ISSN 1941-7411, Vol. 7, No. 4, December 2014, pp. 193-197.
- Song Yue, Zhaochuan Zhang, Dongping Gao. (2014). Equivalent Circuit Method of Resonant System of Magnetron with Sector-and-slot Resonant Cavities. **IEEE Transactions on Plasma Science**, Vol. 42, No. 12, December 2014, pp. 3968-3974.
- Sung Cha et al. (2015). Development of an Automatic Frequency Measurement System for RF Linear Accelerator Magnetrons. **Journal of the Korean Physical Society**, Vol.66, No. 11, June 2015, pp.1664-1668.
- Sungsu C., Yujong K., Byung C., Hyung D., Seung H., Pikad B. (2017). Development of an automatic frequency control system for an X-band (=9300 MHz) RF electron linear accelerator, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 855**, March 2017, pp.102-108.
- Turker Isenlik and Korkut Yegin. (2013). Tutorial on Design of Hole-Slot-Type Cavity Magnetron Using CST Particle Studio, **IEEE Transactions on Plasma Science**, VOL. 41. NO. 2, February 2013, pp. 296-304.
- Yu-Wei Fan, J. Liu, H. Zhong, T. Shu and Z. Li. (2009). Theoretical investigation of the fundamental mode frequency of A6 magnetron, **Journal of Applied physics**. 105,083310. 2009

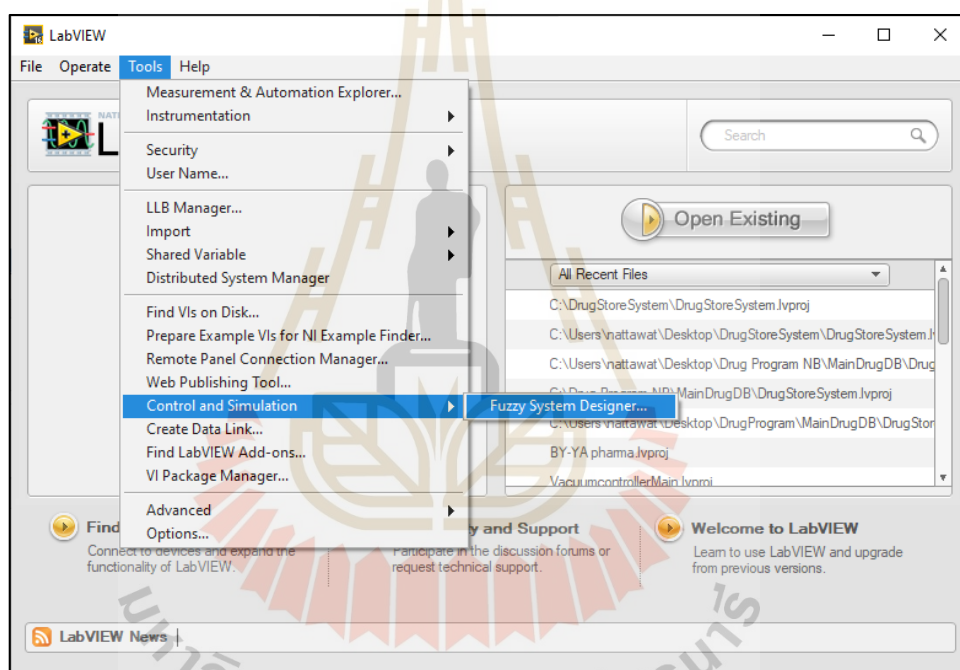
ภาคผนวก ก

การสร้างฟัซซีลอจิกด้วย Fuzzy System Designer

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ก.1 ข้อมูลโปรแกรม Fuzzy system Designer

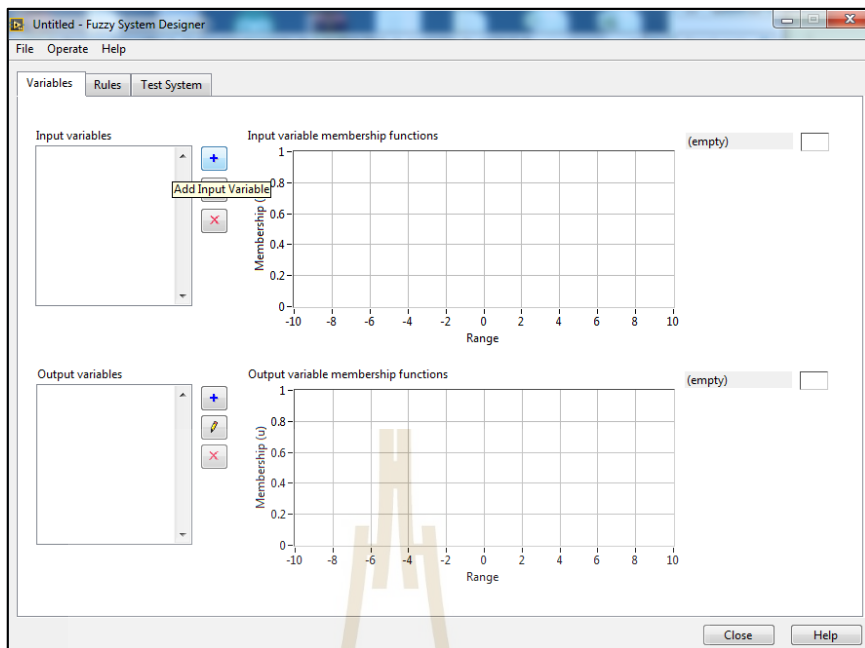
โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมที่สามารถออกแบบเครื่องมือวัดเสมือนที่ผู้ใช้สามารถออกแบบกระบวนการทำงาน ด้วยการกำหนดการออกแบบโค้ดฟังก์ชันการทำงานตามที่ต้องการ และออกแบบ User Interface ให้เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุด ซึ่งโปรแกรมแล็บวิวมีเครื่องมือส่วนเสริมที่ช่วยออกแบบตัวควบคุมอัลกอริทึมฟัซซีหรือฟังก์ชัน Fuzzy System Designer ซึ่งผู้ใช้งานจำเป็นต้องทำการติดตั้งส่วนเสริมที่ชื่อว่า LabVIEW Control Design and Simulation Module ให้เรียบร้อย หลังจากติดตั้งแล้วเสร็จสามารถเข้าใช้งานเครื่องมือ ดังรูปที่ ก.1 และแสดงตัวอย่างการสร้างฟัซซีลอจิกอย่างง่ายก่อนที่นำไปใช้งานกับระบบจริง โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



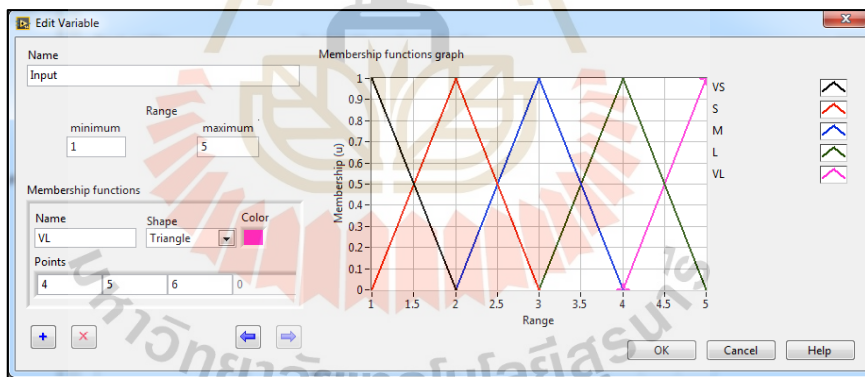
รูปที่ ก.1 หน้าต่างโปรแกรมแล็บวิวและการเข้าใช้งานส่วนเสริม Fuzzy System Designer

ก.2 วิธีการสร้างตัวควบคุมแบบฟัซซี

1. สร้างตัวแปรอินพุต โดยคลิกปุ่ม Add Input Variable และกำหนดชื่อตัวแปร พร้อมทั้งกำหนดขอบเขตสำหรับพารามิเตอร์ Membership functions เช่น กำหนดตัวแปรชื่อ Name โดยมีค่าขอบเขตอยู่ที่ 1 ถึง 5 เลือกรูปแบบของข้อมูลเป็นแบบสามเหลี่ยม กำหนดสีกำหนดจุดต่าง ๆ ตามแต่ละระดับที่ออกแบบจะได้ดังรูปที่ ก.2 และรูปที่ ก.3

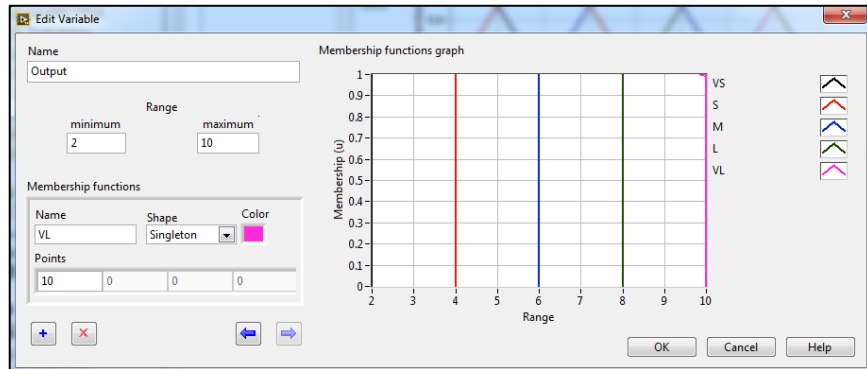


รูปที่ ก.2 การกำหนดตัวแปรอินพุต

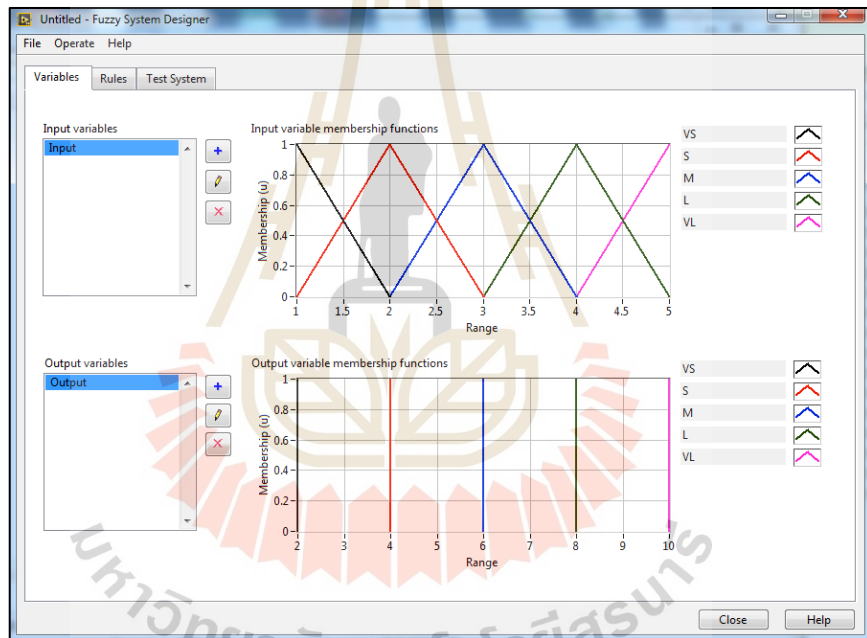


รูปที่ ก.3 รายละเอียดการกำหนดตัวแปรอินพุต

2. สร้างตัวแปรเอาต์พุต โดยคลิกปุ่ม Add Output Variable ในหมวดของ Output variables และกำหนดขอบเขต สำหรับพารามิเตอร์ Membership functions ในรูปร่างแบบเส้นตรง โทน หรือ Singleton โดยมีค่าขอบเขตอยู่ที่ 1 ถึง 10 และกำหนดสีและค่าตำแหน่งต่าง ๆ ตามที่ออกแบบ ซึ่งสามารถแสดงผลการกำหนดตัวแปรเอาต์พุต และสมาชิกฟังก์ชันทั้งหมด ดังรูปที่ ก.4 และรูปที่ ก.5 ตามลำดับ

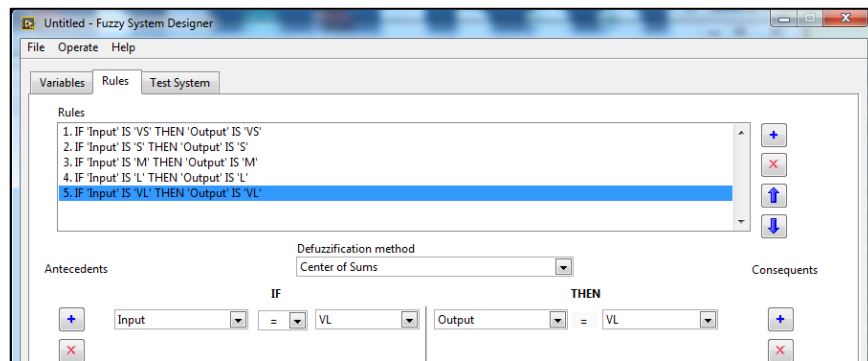


รูปที่ ก.4 รายละเอียดการกำหนดตัวแปรเอาต์พุต



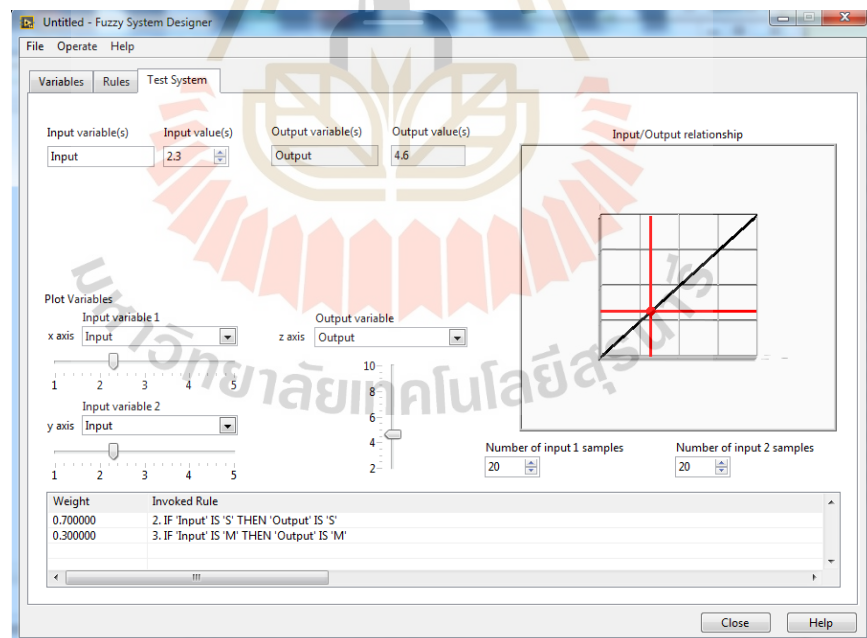
รูปที่ ก.5 ผลการกำหนด Membership functions ของ Input และ Output

3) กำหนดกฎการควบคุมของฟัซซี่ โดยเลือกเก็บของ Rules ในหน้าต่างเครื่องมือส่วนเสริม Fuzzy System Designer โดยกำหนดพารามิเตอร์ที่ออกแบบดังนี้ Antecedent connective เป็น AND (minimum) และกำหนดวิธีดีฟัซซี่ (Defuzzification Method) เป็น Center of Sums จะได้ผลการกำหนดกฎการควบคุมแต่ละระดับที่ออกแบบ ดังรูปที่ ก.6



รูปที่ ก.6 ผลการสร้างกฎการควบคุมฟัซซี

4) ผลการจำลองกฎการควบคุมฟัซซี ผู้ใช้สามารถจำลองผลที่ได้ แต่ละระดับของสมาชิก อินพุตที่รับเข้ามา ผ่านกฎการควบคุมที่ออกแบบไว้ในหัวข้อย่อยที่ 3 แล้วทำการดีฟัซซีข้อมูลให้อยู่ ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานระบบจริง ซึ่งผลการจำลองค่าเอาต์พุตที่ได้ มีค่าเท่ากับผล ทางทฤษฎี โดยสามารถเลือกแถบข้อมูล Test System เพื่อยืนยันความถูกต้องของข้อมูล ดังรูปที่ ก.7



รูปที่ ก.7 การทดสอบกฎการควบคุมฟัซซี

5) หลังจากสร้างตัวควบคุมอัลกอริทึมฟัซซีเสร็จสิ้น ผู้ออกแบบโปรแกรมต้องทำการบันทึกข้อมูลตัวควบคุมฟัซซี โดยไปที่ เมนู File แล้ว Save As โดยข้อมูลที่บันทึกจะนำไปใช้กับโปรแกรมแลปถัดไป ซึ่งข้อมูลที่บันทึกนี้จะอยู่ในรูปของไฟล์ Fuzzy system (*.fs)





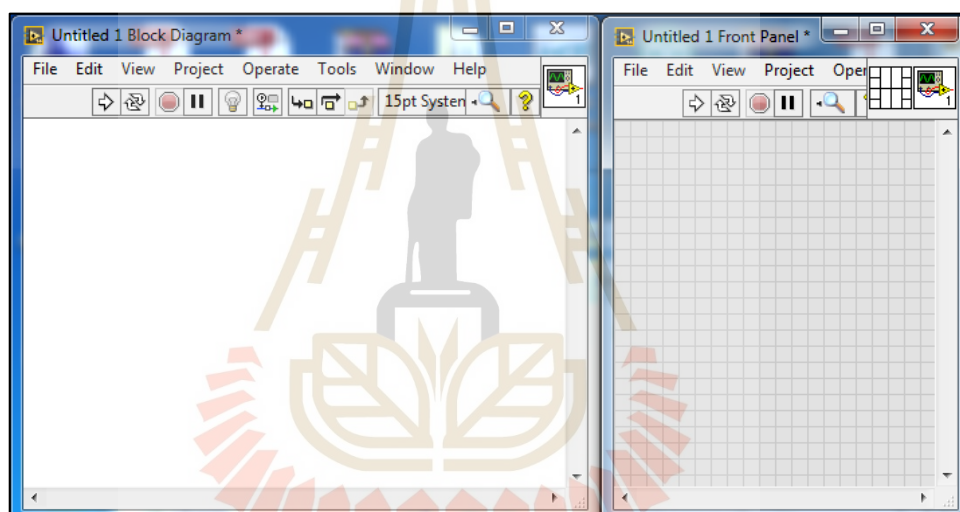
ภาคผนวก ข

การใช้งานพีชชีลอจิกบนโปรแกรม LabVIEW

ข.1 การใช้งานตัวควบคุมฟัซซีร่วมกับโปรแกรม LabVIEW

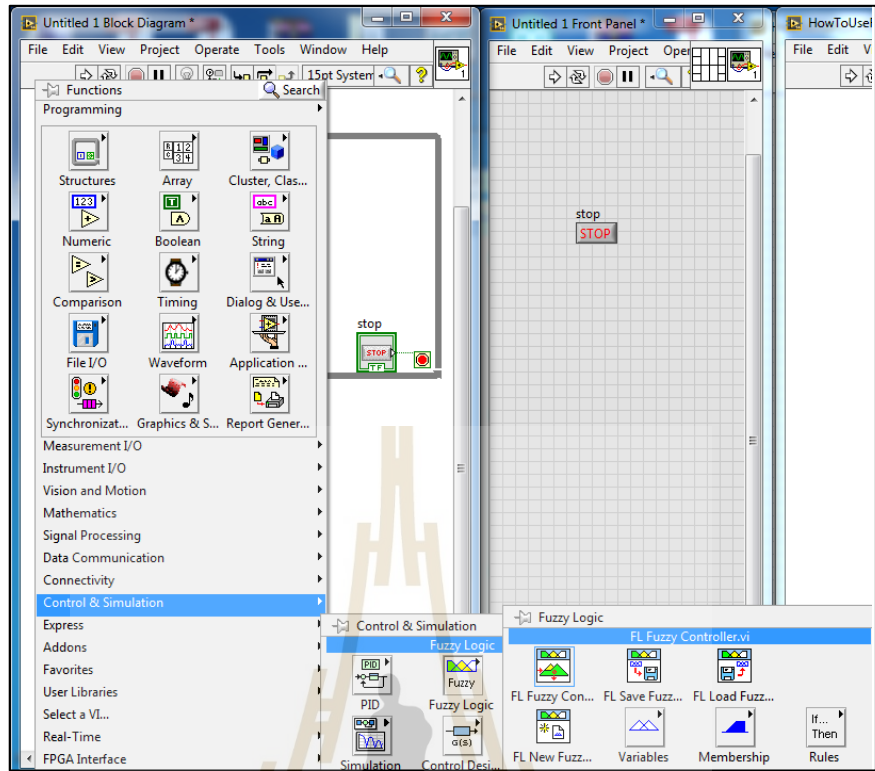
การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี บนส่วนเสริมที่ชื่อว่า Fuzzy System Designer เป็นการสร้างกฎการเงื่อนไขการควบคุม ที่อยู่ภายใต้การกำหนดขอบเขตที่ผู้ใช้ต้องออกแบบจำนวนสมาชิกฟัซซีให้เหมาะสมกับระบบจริงของการควบคุมเครื่องมือ ซึ่งเมื่อออกแบบตัวควบคุมฟัซซีตามเงื่อนไขที่กำหนดแล้วจะต้องบันทึกข้อมูลให้อยู่ในรูปของ Fuzzy system file (*.fs) ซึ่งไฟล์ดังกล่าวจะต้องใช้ร่วมกับโปรแกรมแล็บวิว ดังรูปที่ ข.1 ที่ต้องติดตั้งโมดูลส่วนเสริมที่ชื่อว่า Control Design and Simulation Module และขั้นตอนการใช้งานตัวควบคุมฟัซซี มีวิธีดังต่อไปนี้

1. สร้างโปรเจกต์หรือหน้าต่างแสดงผลที่ประกอบด้วย หน้าต่าง User Interface และส่วนของบล็อกไดอะแกรม โดยแสดงดังรูปที่ ข.1

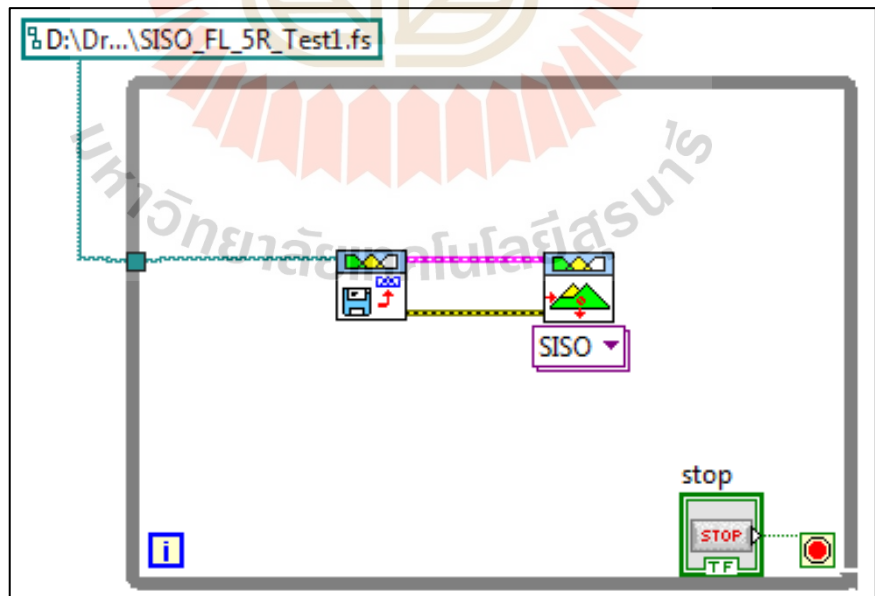


รูปที่ ข.1 ส่วนแสดงผลหน้าต่าง User Interface และพื้นที่บล็อกไดอะแกรม

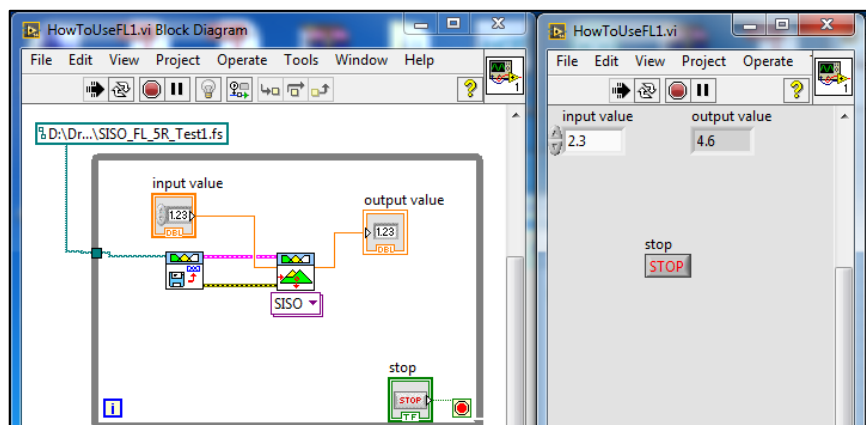
2. สร้างกระบวนการสร้าง การควบคุมระบบด้วยตัวควบคุมฟัซซี ซึ่งผู้ใช้สามารถเลือกฟังก์ชันการโหลดไฟล์ นามสกุล Fuzzy system (*. fs) ไปที่ Control Design & Simulation >> Fuzzy Logic >> FL Load Fuzzy System.vi และฟังก์ชันการใช้งานตัวควบคุมฟัซซี ไปที่ Control Design & Simulation >> Fuzzy Logic >> FL Fuzzy controller.vi โดยแสดงตัวอย่างบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ ข.2 - ข.4



รูปที่ ข.2 วิธีการใช้งานเครื่องมือส่วนเสริมตัวควบคุม Fuzzy Logic



รูปที่ ข.3 ตัวอย่างการสร้างรูปการทำงาน การควบคุมแบบฟัซซีลอจิก



รูปที่ ข.4 การทดสอบการใช้งานตัวควบคุมฟัซซีลอจิก บนโปรแกรมแล็บวิว

จากรูปที่ ข.4 คือ การทดสอบโปรแกรมแล็บวิวร่วมกับฟังก์ชันการควบคุมแบบฟัซซี เมื่อป้อนค่าอินพุตเข้าสู่ฟังก์ชัน กระบวนการควบคุมฟัซซีภายใต้กฎเงื่อนไขที่ได้ออกแบบบนไฟล์ Fuzzy system ผลที่ได้ค่าเอาต์พุตที่แสดง จะตรงตามกับทฤษฎีที่ได้ออกแบบไว้ หรือตรงกับค่าการคำนวณด้วยมือ ซึ่งผู้ใช้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบจริงที่ต้องการควบคุมที่สามารถจัดการกับปัญหาระบบที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถสร้างระบบที่เป็นแบบ MIMO (Multi Input Multi Output) ทำให้สามารถแก้ปัญหาระบบที่ซับซ้อนได้ดียิ่งขึ้น



ภาคผนวก ค

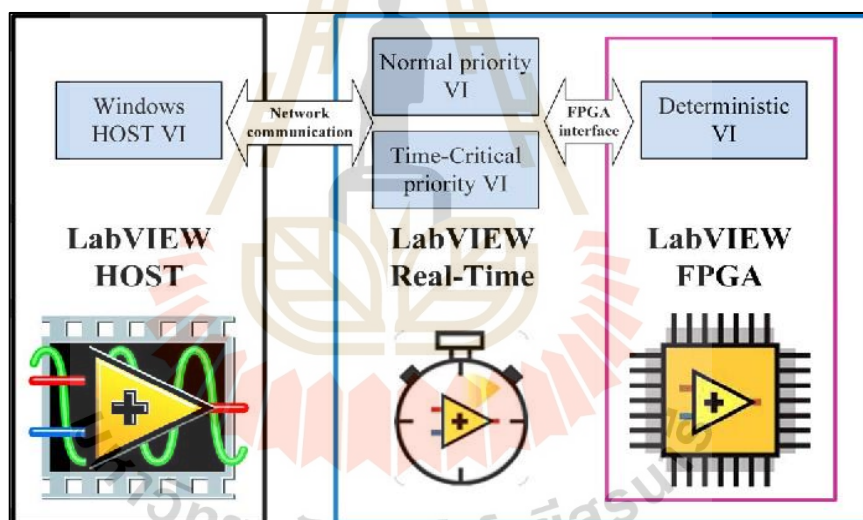
การใช้งานโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับ FPGA Modules

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ค.1 การใช้โปรแกรม LabVIEW ร่วมกับ FPGA modules

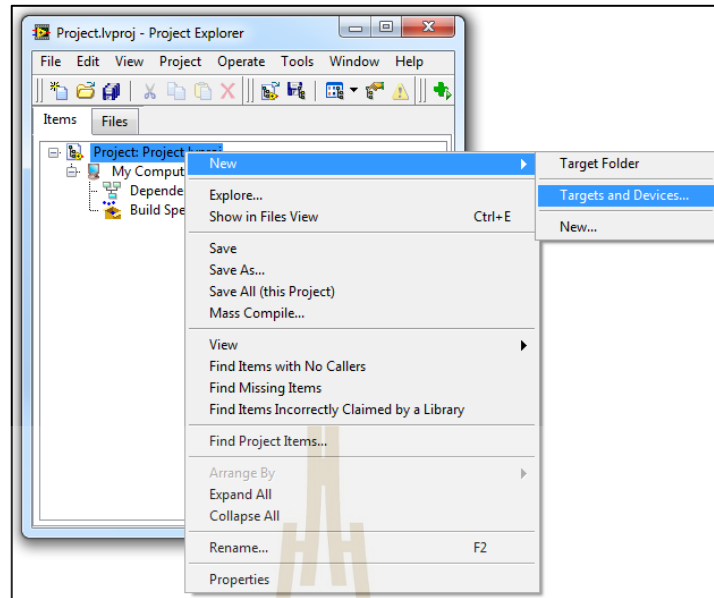
การใช้โปรแกรม LabVIEW เพื่อการออกแบบระบบการควบคุมความถี่เรโซแนนซ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพต่อการควบคุมเครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นมีการออกแบบโครงสร้างโปรแกรมด้วยกัน 2 ส่วน คือ การควบคุมระบบเวลาจริง (Real-time system) และการควบคุมแบบระบบสมองกลฝังตัว (FPGA) ซึ่งการออกแบบโปรแกรมเพื่อควบคุมระบบทั้ง 2 ส่วน ภายใต้โปรแกรม LabVIEW นั้น ต้องออกแบบโครงสร้างที่ต้องมีการทำงานร่วมกันอยู่ตลอดเวลาหรือการควบคุมระบบในโหมดไฮบริดจ์ (Hybrid mode) ร่วมกับชุดอุปกรณ์ Compact-Reconfigurable Input Output (cRIO) โดยมีขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรมส่วนเสริมอื่น ๆ และการตั้งค่าการใช้โหมดไฮบริดจ์ดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW ส่วนเสริมต่าง ๆ คือ โมดูล FPGA และโมดูลระบบ Real-time โดยแสดงดังรูปที่ ค.1



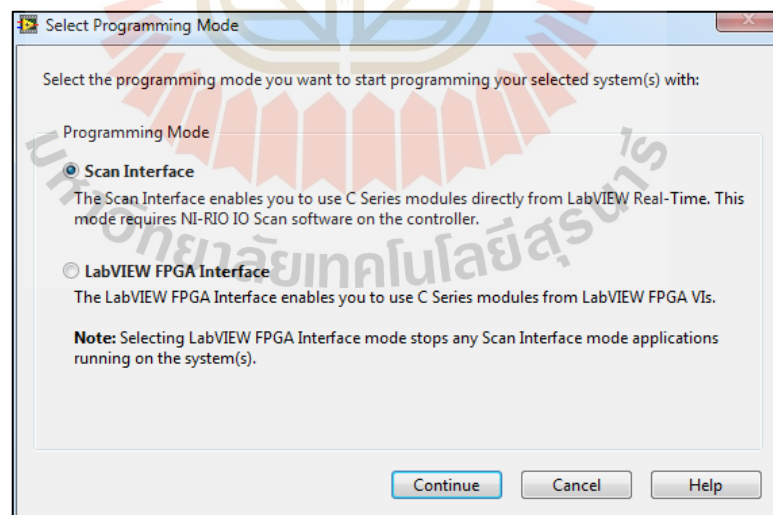
รูปที่ ค.1 โครงสร้างระบบการทำงานโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับระบบเวลาจริง และระบบสมองกลฝังตัว

2. สร้าง Project LabVIEW แล้ว Import อุปกรณ์ NI-cRIO โดยมีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ ค.2



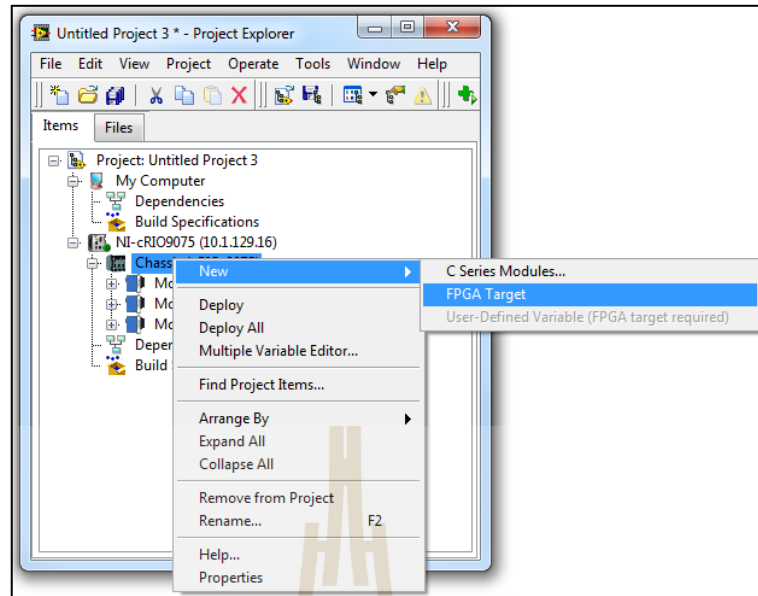
รูปที่ ค.2 การนำเข้าอุปกรณ์ เพื่อการใช้งานระบบควบคุมในโหมดไฮบริดจ์ (Hybrid mode)

3. หลังจากเพิ่มอุปกรณ์ NI-cRIO ต้องเลือกโหมดระบบเวลาจริงเป็นขั้นตอนแรกหรือ Scan Interface mode แล้วกดยืนยัน โดยมีตัวอย่างแสดงดังรูปที่ ค.3



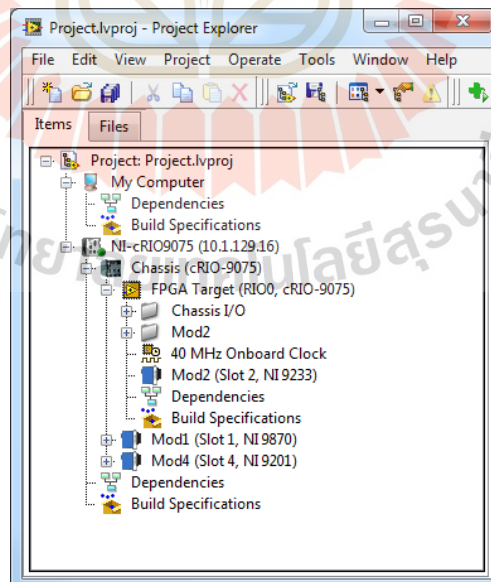
รูปที่ ค.3 การเลือกโหมดระบบเวลาจริง

4. เมื่อเพิ่มระบบการควบคุมแบบเวลาจริงเสร็จสิ้น ต่อไปเพิ่มระบบสมองกลฝังตัวโดยมีขั้นตอนการสร้างระบบเพิ่มเติม ดังรูปที่ ค.4



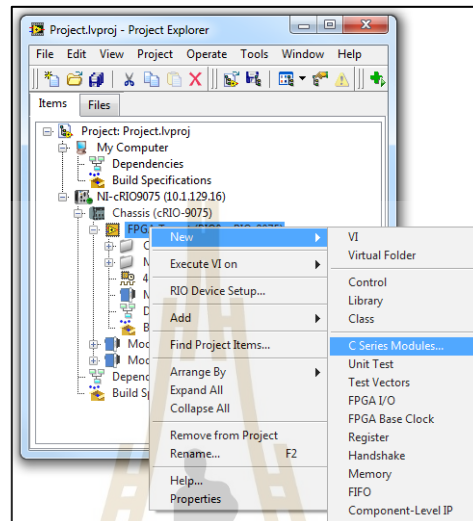
รูปที่ ค.4 การสร้างชุดระบบมองกลฝั่งตัว

5. เมื่อเพิ่มระบบการควบคุมทั้ง 2 ระบบแล้ว ข้อสำคัญต้องไม่ทำการรัน โปรแกรมเพื่อใช้งานกับอุปกรณ์ทันที (Deployment) เมื่อติดตั้งระบบสำเร็จ จะแสดงผลดังรูปที่ ค.5



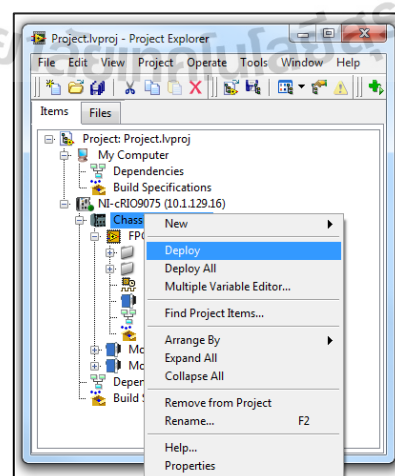
รูปที่ ค.5 รายการอุปกรณ์ของระบบทั้ง 2 ส่วน เมื่อติดตั้งสมบูรณ์

6. หลังจากติดตั้งระบบการควบคุมทั้ง 2 แล้ว สามารถเพิ่ม โมดูลอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุตต่าง ๆ ได้ เช่น โมดูลควบคุมมอเตอร์, ควบคุมสัญญาณดิจิทัล และควบคุมสัญญาณอนาล็อก เป็นต้น โดยมีขั้นตอนในการเพิ่มโมดูลต่าง ๆ ดังรูปที่ ค.6



รูปที่ ค.6 วิธีการเพิ่มโมดูลอุปกรณ์อินพุตและเอาต์พุต

7. เมื่อติดตั้งโมดูลอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วทำการเชื่อมต่อระหว่างโปรแกรมและอุปกรณ์ทั้งหมดด้วยการเลือกคำสั่ง Deploy บนอุปกรณ์ NI-cRIO เพื่อให้ระบบมีการควบคุมการทำงานแบบ 2 ระบบอย่างอัตโนมัติ ซึ่งสามารถรันโปรแกรม ดังรูปที่ ค.7



รูปที่ ค.7 การเริ่มต้นใช้งานโปรแกรมในโหมดไฮบริดจ์



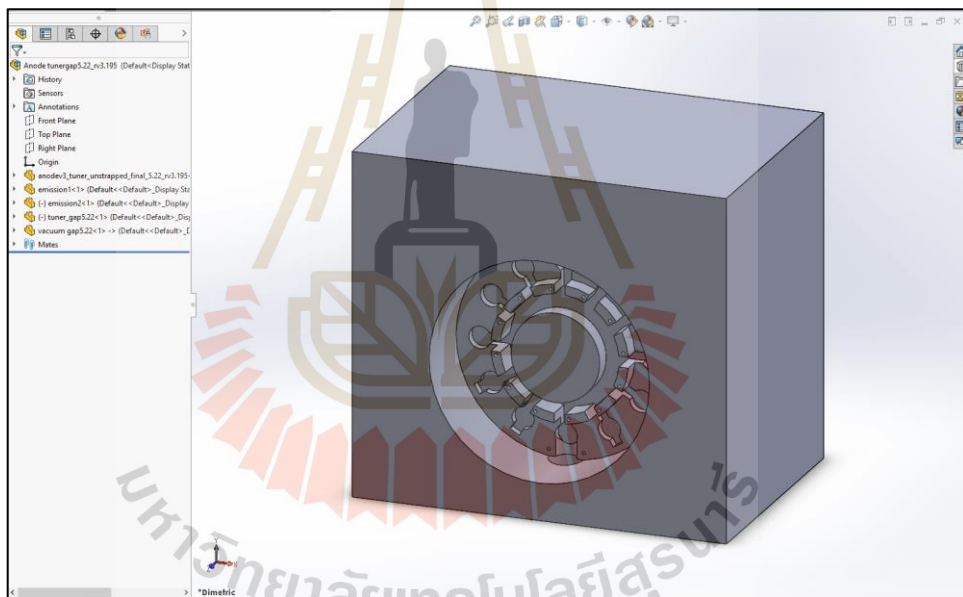
ภาคผนวก ง

การใช้งานโปรแกรม CST Particle studio

ง.1 การใช้โปรแกรม CST Particle studio

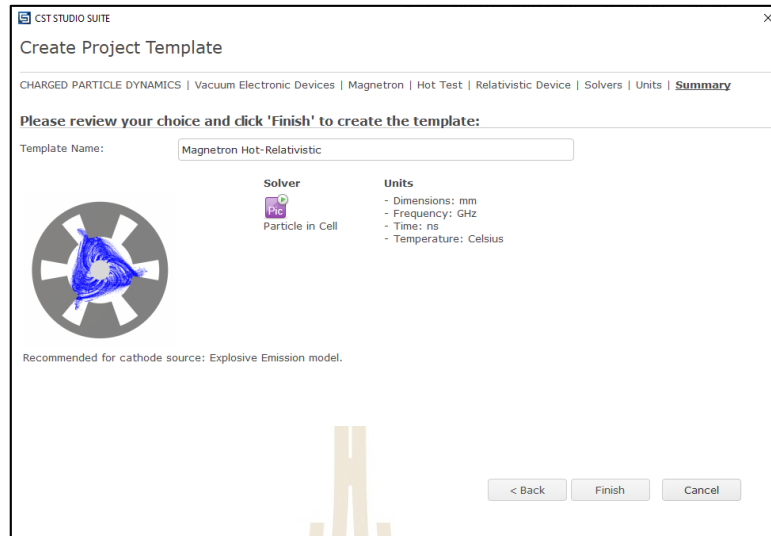
การใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบลักษณะของอนุภาคประจุที่ใช้โมเดลสามมิติ พิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในพิกัดสามมิติ ซึ่งโปรแกรมที่สามารถวิเคราะห์ถึงพฤติกรรม การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะใช้โปรแกรม CST Particle studio ที่มีฟังก์ชันการจำลองพลวัตของการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังสูงหรือเทคนิควิธี Particle-In-Cell (PIC) ซึ่งขั้นตอนวิธีการตั้งค่า และปรับแต่งพารามิเตอร์ต่าง ๆ มีวิธีการใช้งาน ดังต่อไปนี้

1. สร้างแบบจำลองสามมิติ โดยอ้างอิงจากขนาดอย่างแม่นยำของชิ้นงานที่ต้องการทราบ ซึ่งควรสร้างแบบจำลองเป็นหลาย ๆ ส่วนที่มีความสำคัญ ต่อการนำไปคำนวณกับโปรแกรม CST particle studio เช่น ชิ้นส่วนบล็อกแอโนด แคโทด และชิ้นส่วนที่เป็นพื้นที่ของความเป็นสุญญากาศ เป็นต้น โดยแสดงดังรูปที่ ง.1

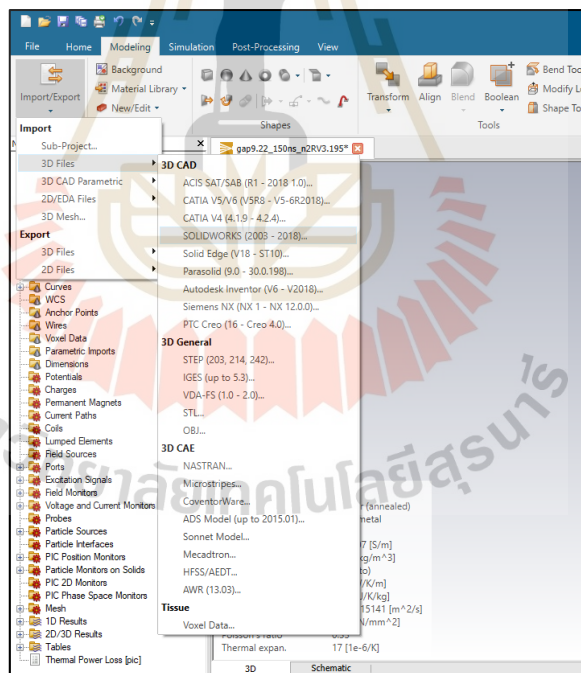


รูปที่ ง.1 แบบจำลองสามมิติ โดยใช้โปรแกรม SolidWorks

3. เปิดโปรแกรม CST particle studio แล้วเลือกเทมเพลต ดังรูปที่ ง.2 สำหรับการจำลอง การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ในสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังสูง หรือเทคนิควิธี Particle-In-Cell (PIC) Simulation จากนั้นนำเข้าโมเดลสามมิติของแมกนีตรอน ที่สร้างแบบจำลองจากโปรแกรมภายนอก ดังรูปที่ ง.3

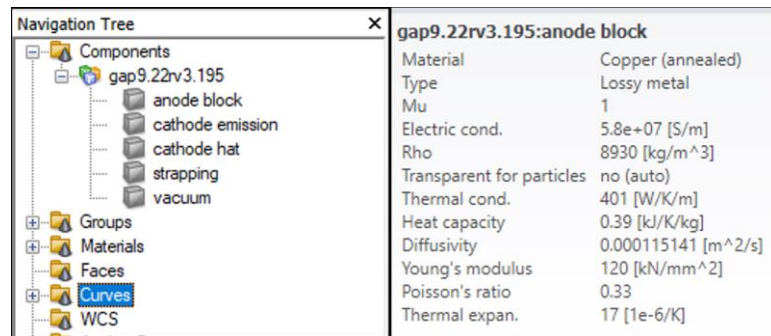


รูปที่ ง.2 รูปแบบการจำลอง ด้วยโปรแกรม CST Particle studio



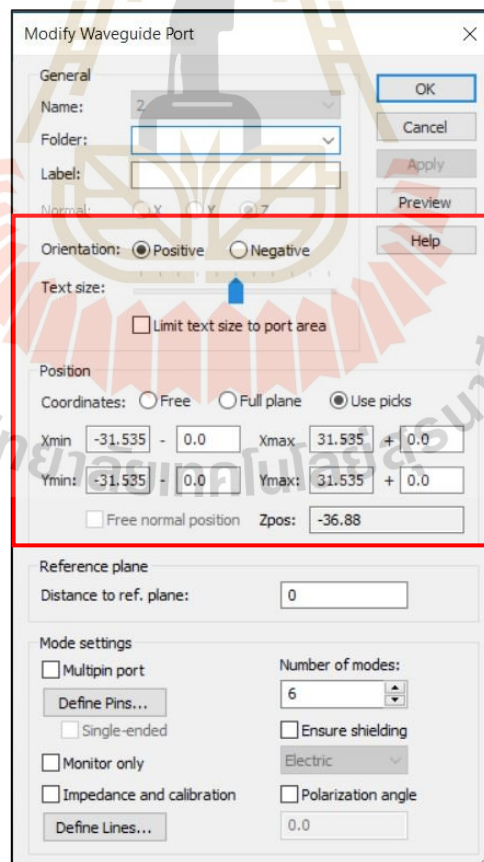
รูปที่ ง.3 การนำเข้าโมเดลสามมิติจากโปรแกรม SolidWorks

3. เมื่อนำเข้าโมเดลสามมิติแล้ว ผู้ใช้งานสามารถที่จะกำหนดชนิดของวัสดุให้เป็นชนิดตามที่ต้องการได้ เช่น ทองแดงบริสุทธิ์ ทองแดงอ่อน วัสดุนำไฟฟ้าได้ดี และวัสดุสุญญากาศ เป็นต้น โดยสามารถเลือกแสดงรายละเอียดแต่ละวัสดุ ดังรูปที่ ง.4



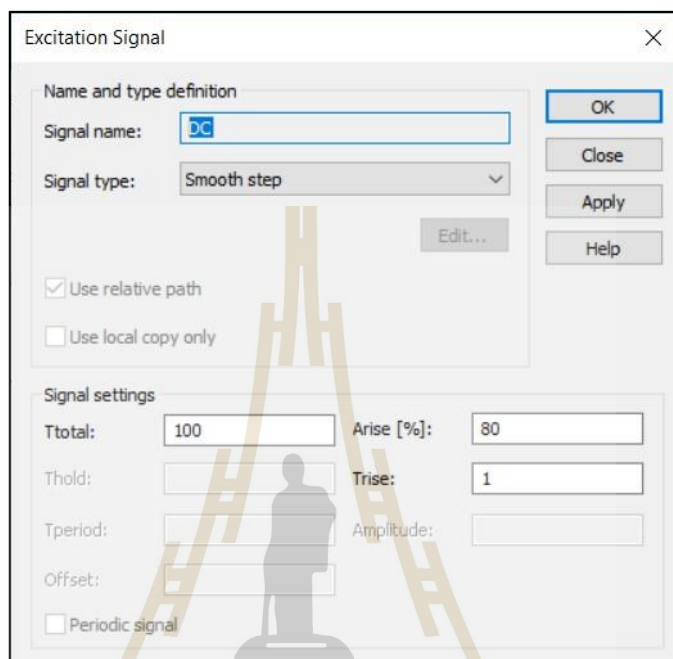
รูปที่ ๓.4 ตัวอย่างบล็อกแอโนดที่เป็นชนิดวัสดุทองแดงอ่อน

4. ก่อนการเริ่มการจำลองโมเดลสามมิติจะต้องกำหนดทิศทางพอร์ตขาเข้า ในแนวแกนระนาบที่ถูกต้อง ซึ่งการกำหนดจะอ้างอิงไปยังค่าแรงดันไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่เหมาะสม ดังรูปที่ ๓.5



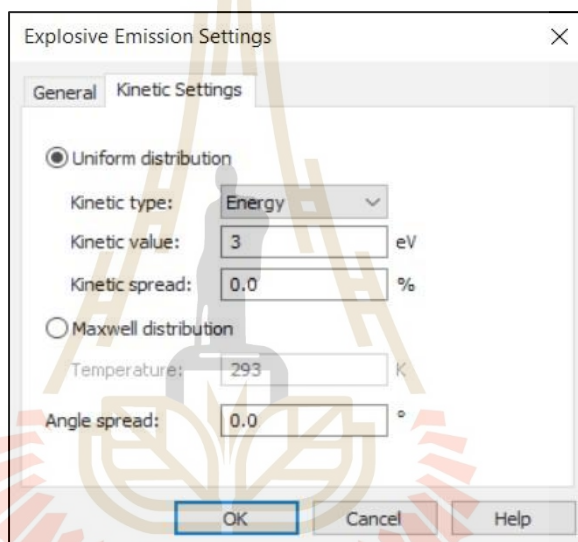
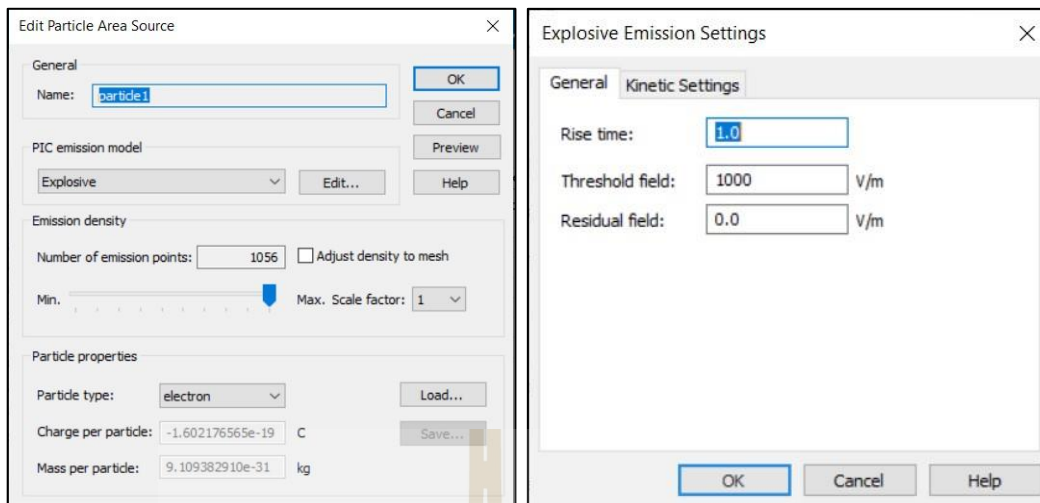
รูปที่ ๓.5 การกำหนดทิศทางและตำแหน่งของพอร์ตขาเข้า

5. กำหนดชนิดของสัญญาณขาเข้าว่ามีลักษณะของรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าเป็นแบบไหน เช่น การกำหนดสัญญาณมีชื่อว่า DC มีลักษณะรูปแบบสัญญาณที่เป็นสเต็ป และสามารถกำหนดคาบของสัญญาณทางเวลา ช่วงขาขึ้นและขาลง เป็นต้น ดังรูปที่ ง.6



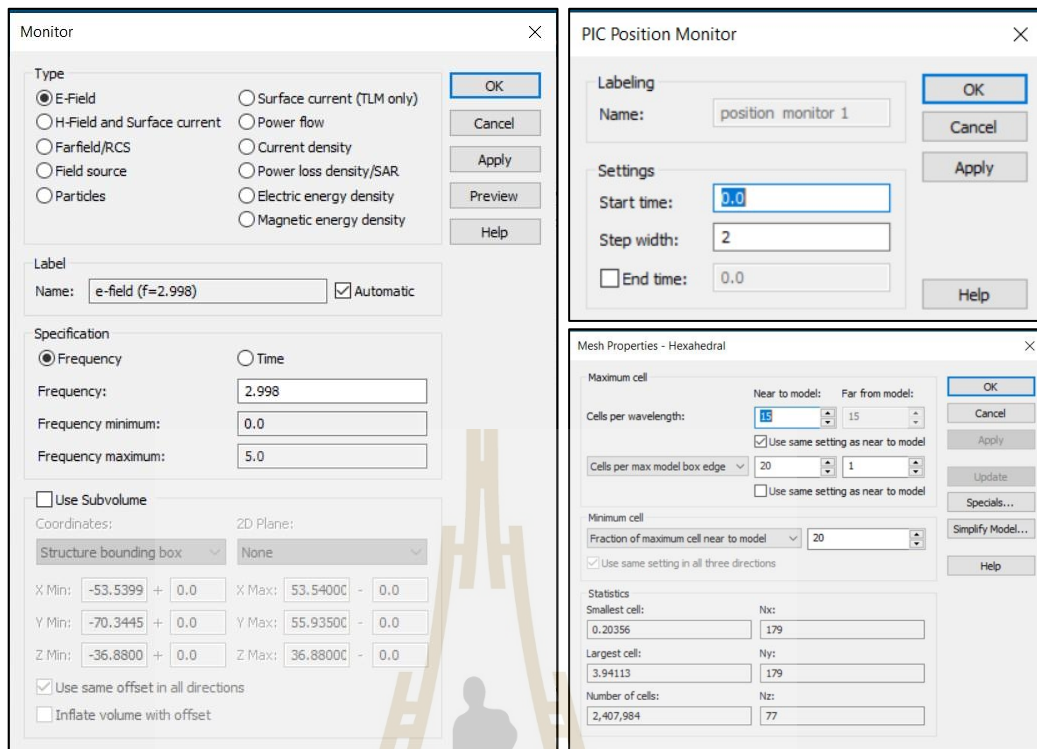
รูปที่ ง.6 การกำหนดรูปแบบสัญญาณทางไฟฟ้าอินพุต

5. กำหนดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากชั้นส่วนของขั้วแคโทด ซึ่งการกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ จะต้องอ้างอิงกับผิวทรงกระบอกของวัสดุโดยรอบ การกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ที่สำคัญประกอบด้วย รูปแบบการกระจายตัวของอิเล็กตรอน ซึ่งโปรแกรมจะคำนวณจุดทั้งหมดของการกระจายตัวของวัสดุโดยรอบ ซึ่งเมื่อกำหนดจุดเยอะ ระยะเวลาการจำลองก็จะเยอะตามไปด้วย และการกำหนดฟังก์ชันย่อยของรูปแบบการกระจายตัว สามารถที่จะกำหนดช่วงเวลาขาขึ้น ชนิดของค่าเริ่มต้นของพลังงานจลน์ โดยแสดงตัวอย่างการปรับแต่งดังรูปที่ ง.7



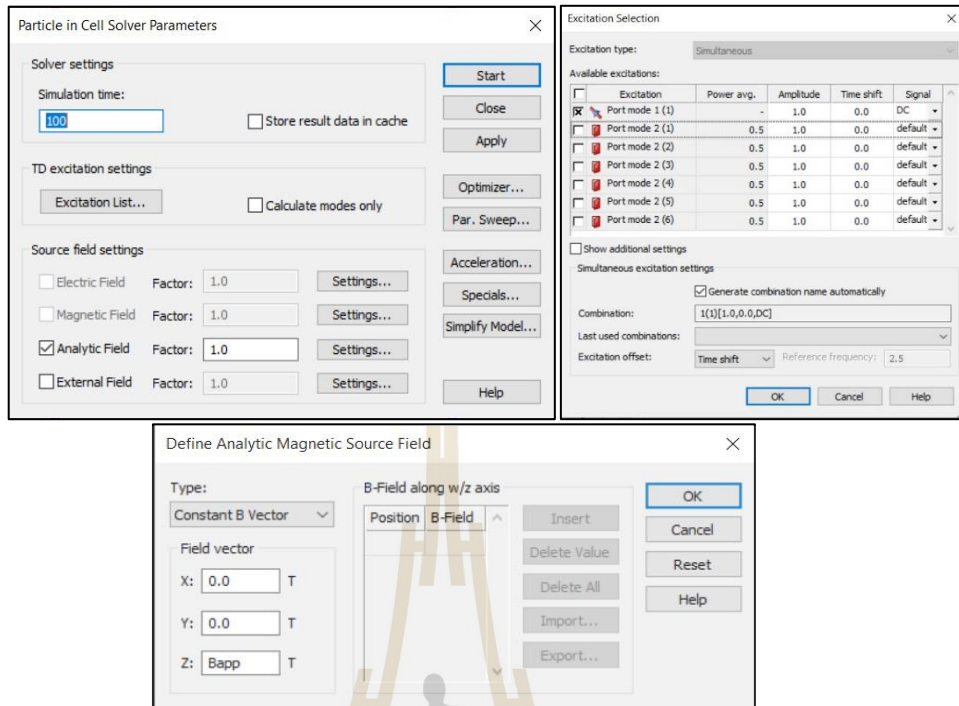
รูปที่ ๗.7 การตั้งค่าเงื่อนไขการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากแคโทด

6. กำหนดการวัดค่าอื่น ๆ เช่น การกำหนดจุดสนามไฟฟ้าที่ความถี่ที่ต้องการการกำหนด ช่วงระยะเวลาของการคำนวณด้วยเทคนิค Particle-In-Cell และการกำหนดความละเอียดของจุด Mesh ของการคำนวณอย่างละเอียด เป็นต้น โดยแสดงตัวอย่างการปรับแต่งพารามิเตอร์ ดังรูปที่ ๗.8



รูปที่ ๗.8 รายละเอียดการปรับตั้งค่าการวัดสนาม ช่วงเวลาการคำนวณ PIC และ กำหนดจุดความละเอียดของการจำลอง

7. เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ เรียบร้อย ขั้นตอนต่อไปเข้าสู่ขั้นตอนการกำหนดระยะเวลาการจำลองโมเดลสามมิติในหน่วยนาโนวินาที การตั้งค่าแรงดันไฟฟ้า ที่อ้างอิงจากตัวแปรหัวข้อที่ 4 และรูปแบบของสัญญาณที่อ้างอิงจากหัวข้อที่ 5 และการกำหนดค่าสนามแม่เหล็กตามทิศทางที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดการปรับแต่งดังรูปที่ ๗.9



รูปที่ ง.9 รายละเอียดการปรับตั้งค่าการจำลองแบบสามมิติด้วยวิธี PIC

ภาคผนวก จ

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Nattawat Yachum, Somjai Chunjarean, Nilaped Russamee and Jiraphon Srisertpol (2021) “Parameter Optimization of Hole-Slot-Type Magnetron for Controlling Resonant Frequency of Linear Accelerator 6 MeV by Reverse Engineering Technique” **Applied sciences**. 2021, 11, 2384.

Nattawat Yachum, Nilaped Russamee and Jiraphon Srisertpol (2018) “Automatic frequency control of the magnetron system for medical linear accelerator using fuzzy logic control” **Proceeding of XLVI International Summer School-Conference APM 2018**, St. Petersburg, Russia, 25-30 June 2018, pp. 275-285.



ประวัติผู้เขียน

นายณัฐวัฒน์ ยะชุ่ม เกิดเมื่อวันที่ 24 ตุลาคม พ.ศ. 2526 ที่อำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน ปัจจุบันมีชื่อในทะเบียนบ้านเลขที่ 1111/46 หมู่ 4 หมู่บ้านสิริสุข วิลล์เลข 3 ตำบลหนองจะบก อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มต้นการศึกษาในระดับประถมศึกษาชั้นปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนศรีเวียงสาวิทยาการ อำเภอเวียงสา จังหวัดน่าน จากนั้นศึกษาต่อในระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 - 6 ที่โรงเรียนศรีสวัสดิ์วิทยาการ อำเภอเมือง จังหวัดน่าน ต่อมาได้ศึกษาในระดับอุดมศึกษาที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2548 จากนั้นได้ทำงานในตำแหน่งวิศวกรไฟฟ้าของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เป็นเวลา 7 ปี จากประสบการณ์ในการทำงานและสนใจในด้านระบบควบคุม จึงได้ขอลาศึกษาต่อในระดับปริญญาโท-เอก และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต เมื่อปี พ.ศ. 2559 และในปีต่อมา ได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาเอก สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาภายในประเทศจากกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม

