

การวิจัยความผิดพลาดแบบชาญฉลาดสำหรับระบบควบคุมที่คงทนต่อ
ความผิดพลาดของท่อสุญญากาศในเครื่องเร่งอนุภาค



นางสาวสุนทรี แสงศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2565

INTELLIGENT FAULT DIAGNOSIS APPROACH TO FAULT-TOLERANT
CONTROL OF ACCELERATOR VACUUM SYSTEM

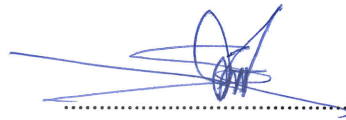


A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Doctor of Philosophy in Mechatronics Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2022

การวินิจฉัยความผิดพลาดแบบชาญฉลาดสำหรับระบบควบคุมที่คงทนต่อ
ความผิดพลาดของท่อสุญญากาศในเครื่องเร่งอนุภาค

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาตรีบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



(ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว)

ประธานกรรมการ



(รศ. ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)



(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

กรรมการ



(ผศ. ดร.โสรวภา แข็งการ)

กรรมการ



(ผศ. ดร.สุรเดช ตัญตริรัตน์)

กรรมการ



(รศ. ดร.ฉัตรชัย โชติษฐยางกูร)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ



(รศ. ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุนทรื แสงศรี : การวินิจฉัยความผิดพลาดแบบชาญฉลาดสำหรับระบบควบคุมที่คงทนต่อความผิดพลาดของท่อสุญญากาศในเครื่องเร่งอนุภาค (INTELLIGENT FAULT DIAGNOSIS APPROACH TO FAULT-TOLERANT CONTROL OF ACCELERATOR VACUUM SYSTEM) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล, 154 หน้า.

คำสำคัญ: ความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษ/ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน/ความเร็วในการสูบ/โครงข่ายประสาทเทียม/โมฟโลว์/การควบคุมที่มีความสามารถคงทนต่อความผิดพลาด

วิทยานิพนธ์นี้เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบควบคุมความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษด้วยพีซีที่สามารถคงทนต่อข้อผิดพลาดสำหรับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่มีปฏิสัมพันธ์กันในช่วงแวนกักเก็บอิเล็กตรอนของห้องปฏิบัติการแสงสยาม ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) การผลิตแสงซินโครตรอนจะต้องให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในท่อลำเลียงแสงที่มีสภาวะความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษประมาณ 10^{-9} ทอร์ เพื่อป้องกันการรบกวน การหักเห และการชนกับมวลอากาศของลำอิเล็กตรอน กระบวนการทำสุญญากาศเริ่มต้นที่ระดับความดันบรรยากาศ ถึง 10^{-2} ทอร์ ด้วยปั๊มแบบเลื่อนแห้งและทำความดันต่อเนื่องถึง 10^{-7} ทอร์ ด้วยปั๊มชนิดดิงดูดโมเลกุลสูง จากนั้น จะใช้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่มีการทำงานโดยใช้เทคนิคการจับโมเลกุลของก๊าซให้เกาะติดอยู่ในบริเวณพื้นที่จำกัดสามารถทำความดันได้ถึง 10^{-12} ทอร์ ปัจจุบันสถาบันฯ ใช้วิธีการติดตั้งปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนจำนวนมากและทำงานเต็มประสิทธิภาพตลอดเวลาเพื่อรักษาระดับความดันสุญญากาศตลอดช่วงการเคลื่อนที่ลำอิเล็กตรอน จึงมีแนวคิดออกแบบระบบควบคุมสำหรับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่มีปฏิสัมพันธ์กันในช่วงแวนกักเก็บอิเล็กตรอนด้วยทฤษฎีพีซีลोजิกเพื่อรักษาค่าความดันสุญญากาศในระดับสูงพิเศษตลอดการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนให้มีประสิทธิภาพการทำงานเหมาะสมที่สุด สามารถประมาณค่าประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มได้ด้วยแบบจำลองที่สร้างจากโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับซอฟต์แวร์ Molflow+ สามารถตรวจสอบ วินิจฉัยข้อผิดพลาดของตัวกระตุ้นที่อาจเกิดขึ้นจากการทำงานผิดพลาดในระบบสุญญากาศ ทำให้ความดันสุญญากาศแยกลง แสงซินโครตรอนที่ผ่านบริเวณนั้นจะมีคุณภาพลดลง ข้อดีของวิธีการนี้คือผู้ควบคุมจะทราบข้อมูลการชดเชยของระบบควบคุมที่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการแก้ไข ปรับปรุง เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่มีความผิดปกติหรือผิดพลาดในระบบได้อย่างทันท่วงที ก่อนที่ระบบจะได้รับความเสียหาย และที่สำคัญเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นของระบบสุญญากาศ ณ ห้องปฏิบัติการแสงสยาม ผลการวิจัยระบบควบคุมสามารถตรวจรู้ความผิดพลาดในระบบ

สัญญาณได้อย่างแม่นยำ ควบคุมความดันสัญญาณในท่อลำเลียงได้ 10^{-9} ทอร์ ค่าความแม่นยำของแบบจำลองประมาณ 99%



สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
ปีการศึกษา 2565

ลายมือชื่อนักศึกษา.....สุนทร
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....ส

SOONTAREE SEANGSRI : INTELLIGENT FAULT DIAGNOSIS APPROACH TO
FAULT-TOLERANT CONTROL OF ACCELERATOR VACUUM SYSTEM. THESIS
ADVISOR : ASSOC. PROF. JIRAPHON SRISERTPOL, Ph.D., 154 PP.

Keyword: ULTRA-HIGH VACUUM/SPUTTER-ION VACUUM PUMP/PUMPING
SPEED/FUZZY/ARTIFICIAL NEURAL NETWORK/MOLFLOW+/FAULT
TOLERANT CONTROL

This thesis focuses on the design of an ultra-high vacuum pressure control system with fuzzy fault tolerance for a sputter-ion vacuum pump used in the electron storage ring at the Siam Photon Source Laboratory of the Synchrotron Light Research Institute (a public organization). In synchrotron light production, it is necessary to maintain an ultra-high vacuum pressure of around 10^{-9} Torr to prevent interference, refraction, and collision with air masses while the electrons move in a beam. The vacuum process starts at atmospheric pressure, then reaches up to 10^{-2} Torr with a dry scroll pump, and continues at a pressure of 10^{-7} Torr with a high turbo molecular pump. A sputter-ion vacuum pump is then used, which operates by capturing gas molecules and trapping them in a confined space, allowing it to produce a pressure of 10^{-12} Torr. Currently, the Siam Photon Source Laboratory uses multiple sputter-ion vacuum pumps, which operate at full capacity at all times to maintain the ultra-high vacuum pressure level throughout the electron beam movement range. Therefore, a control system for the sputter-ion vacuum pump was developed using fuzzy logic theory to maintain an optimum performance ultra-high vacuum pressure value throughout the electron beam movement. The efficiency of the pumping speed can be estimated using a neural network model created with Molflow+ software. The control system can also diagnose actuator failures resulting from malfunction in the vacuum system, which could worsen the vacuum pressure and reduce the quality of the synchrotron light that passes through the region. The advantage of this method is that the operator will receive compensation information of the control system where the error occurred, making it easier to correct, improve, or replace equipment with abnormalities or errors in the system in a timely manner before the system is damaged. Furthermore, it increases the confidence of the vacuum system at the Siam Photon Source Laboratory. The research results have shown that the control system can accurately

detect faults in vacuum systems, and the vacuum pressure in the pipeline can be controlled to 10^{-9} torr. The accuracy of the model is about 99%.



School of Mechatronics Engineering
Academic Year 2022

Student's Signature.....

Advisor's Signature.....

Sontaree
Sutpal S.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี เนื่องจากได้รับโอกาสและความกรุณาเป็นอย่างสูงจาก รองศาสตราจารย์ ดร.จิระพล ศรีเสริฐผล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือ ให้คำปรึกษา คำแนะนำ ทั้งในด้านวิชาการและการดำเนินการวิจัย ปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง ตลอดจนให้การสนับสนุนข้าพเจ้าในการดำเนินชีวิตด้วยความเมตตา อย่างสูง เป็นต้นแบบในการดำเนินชีวิตที่ดียิ่ง ผู้วิจัยตระหนักถึงความตั้งใจจริง ความทุ่มเทของ อาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ น.ท.ดร.สรวุฒิ สุจิตจร ที่ได้กรุณาให้โอกาสในการศึกษาทั้ง ระดับปริญญาโทและเอก ให้คำปรึกษาด้วยความเมตตาเสมอมา เป็นแบบอย่างที่ดีในการดำเนินชีวิต หลาย ๆ ด้าน

ขอขอบพระคุณ ดร.สุพัฒน์ กลิ่นเขียว ดร.ณัฐวัฒน์ ยะชุ่ม ดร.สมใจ ชื่นเจริญ คุณสุพรรณ บุญสุยา คุณศุภวรรณ ศรีจันทร์ คุณจักรี นาดิ์ปานกลาง คุณदनัย คัมภีรานนท์ พี่ ๆ น้อง ๆ สถาบันวิจัย แสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ได้ให้คำแนะนำ ให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การ มหาชน) ที่ให้ทุนสนับสนุนทำวิจัย ในโครงการพัฒนาบุคลากร ด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมของเครื่อง เร่งอนุภาคและเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เพื่อสถานสำหรับดำเนินการวิจัย รวมถึงเครื่องมือ และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัย

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล และเจ้าหน้าที่ประจำหลักสูตร วิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีทุกท่าน ที่อำนวยความสะดวกด้านธุรการ เอกสารต่าง ๆ ในระหว่างการศึกษา ให้คำแนะนำและกำลังใจอย่างดียิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณ ดร.สุรัชย์ วงษ์ฟูเกียรติ คุณธนศักดิ์ หวังล้อมกลาง คุณอนุภาค ปัญญาชนสมบัติ และพี่ ๆ น้อง ๆ สมาชิก System and Control Engineering (SCE) Laboratory ทุกท่านที่ให้ความ ช่วยเหลือ แลกเปลี่ยนความรู้ และให้กำลังใจในการดำเนินการวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ทางด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อชูชาติ คุณแม่บุษบง แสงศรี รวมถึงญาติ พี่น้องของผู้วิจัยทุกท่าน ที่ให้ความรัก กำลังใจ การอบรมเลี้ยงดูและส่งเสริมการศึกษาเป็นอย่างดี มาโดยตลอด จนทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

สุนทรี แสงศรี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ค
กิตติกรรมประกาศ.....	จ
สารบัญ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญรูป.....	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ท
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	5
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	5
1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย	6
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	9
1.6 สถานที่ดำเนินงานวิจัย.....	9
1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์	9
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.1 บทนำ.....	11
2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสัญญาภาค.....	11
2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแบบคลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก	14
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยใช้โปรแกรม Molflow+.....	16
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม	17
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจจับความผิดพลาดเสียหาย และระบบควบคุมที่คงทนต่อความต่อความเสียหาย	18
2.7 สรุป.....	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3	วิธีดำเนินการวิจัย 25
3.1	บทนำ..... 25
3.2	วิธีดำเนินการวิจัย 25
3.3	ระบบสัญญาณ..... 27
3.3.1	เทคโนโลยีสัญญาณ..... 27
3.3.2	แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสัญญาณ..... 33
3.3.3	อุปกรณ์การทดลองระบบสัญญาณ 36
3.3.4	ระบบทดลองสัญญาณ..... 38
3.3.5	การสร้างระบบทดลองสัญญาณ..... 40
3.3.6	การตรวจสอบรบกวนในในระบบทดลองสัญญาณ 42
3.4	สรุป..... 43
4	การควบคุมความดันสัญญาณด้วยฟัซซี 44
4.1	บทนำ..... 44
4.2	ระบบควบคุมฟัซซี..... 44
4.3	ปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออน..... 47
4.4	การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีในระบบสัญญาณบนโปรแกรม LabVIEW..... 50
4.4.1	การทำฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)..... 51
4.4.2	การกำหนดกฎของฟัซซี (Rules Base) 52
4.4.3	การอนุมาน (Inference) หรือการรวมกฎฟัซซี (Aggregation)..... 54
4.4.4	การทำดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) 54
4.5	การทดสอบและเก็บข้อมูลการทดลอง 61
4.6	ผลการทดลอง 62
4.6.1	ผลการควบคุมในระบบทดลองสัญญาณที่ 1 62
4.6.2	ผลการควบคุมในระบบทดลองสัญญาณที่ 2 64
4.7	สรุป..... 67
5	การประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออน 69
5.1	บทนำ..... 69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2	ความเร็วการสูบของปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออน.....	69
5.3	การจำลองสถานการณ์สุญญากาศด้วยโปรแกรม Molflow+.....	70
5.3.1	ผลการจำลองสถานการณ์ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1	72
5.3.2	ผลการจำลองสถานการณ์ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2	75
5.4	การประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบด้วยโครงข่ายประสาทเทียม บนโปรแกรม MATLAB	78
5.4.1	การรวบรวมข้อมูลและการประมวลผลล่วงหน้า	79
5.4.2	การเลือกสถาปัตยกรรมและการฝึกสอนแบบจำลอง โครงข่ายประสาทเทียม 2	80
5.5	สรุป.....	84
6	ระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศที่มีความคงทนต่อความเสียหาย	86
6.1	บทนำ.....	86
6.2	การออกแบบระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศที่มีความสามารถคงทน ต่อความเสียหาย.....	86
6.3	ผลการควบคุมแบบ Fault Tolerance Control ในระบบทดลองสุญญากาศ UHV.....	88
6.3.1	กรณีใช้เงื่อนไขลักษณะเฉพาะเดิมของปั๊ม.....	89
6.3.2	กรณีใช้เงื่อนไขลักษณะเฉพาะใหม่ของปั๊ม.....	93
6.4	สรุป.....	96
7	บทสรุปและข้อเสนอแนะ.....	98
7.1	สรุปผลการวิจัย.....	98
7.1.1	การควบคุมความดันสุญญากาศในระดับสูงพิเศษ ด้วยตัวควบคุมฟัซซี่	98
7.1.2	การประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊ม ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+	99
7.1.3	การควบคุมค่าความดันสุญญากาศที่มีความสามารถคงทน ต่อความเสียหาย	99
7.2	ข้อเสนอแนะ.....	100

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

7.2.1	ข้อเสนอแนะจากการวิจัยในด้านการควบคุมความดันสุญญากาศ ในระดับ UHV ด้วยพีซี	100
7.2.2	ข้อเสนอแนะจากการวิจัยในด้านการประมาณประสิทธิภาพ ความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน ด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+	101
7.2.3	ข้อเสนอแนะจากการวิจัยในด้านการควบคุมค่าความดันสุญญากาศ UHV ที่มีความสามารถคงทนต่อความเสียหาย	101
รายการอ้างอิง		102
ภาคผนวก		
ภาคผนวก ก.	การใช้งานพีซีลอจิกบนโปรแกรม LabVIEW	108
ภาคผนวก ข.	การใช้งานโปรแกรม Molflow+	111
ภาคผนวก ค.	การใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมบนโปรแกรม MATLAB	117
ภาคผนวก ง.	บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา.....	124
ประวัติผู้เขียน		154

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1	ระดับความดันบรรยากาศ.....7
1.2	เปรียบเทียบหน่วยของความดัน.....8
3.1	ข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์การทดลองในระบบสุญญากาศ..... 37
4.1	ความสัมพันธ์ของความเร็วในการสูบของปั๊มที่แรงดันไฟฟ้า 3000, 5000 และ 7000 โวลต์..... 49
4.2	ความสัมพันธ์ของความเร็วในการสูบของปั๊มที่แรงดันไฟฟ้า 3000, 4000, 5000, 6000 และ 7000 โวลต์..... 50
4.3	การออกแบบตัวควบคุมพีซีสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 2..... 53
5.1	ประสิทธิภาพการสูบที่ความเร็ว 288 ลิตร/วินาที สำหรับระบบทดลอง ห้องสุญญากาศ 1..... 71
5.2	ข้อมูลค่าความดันสุญญากาศแต่ละแนวแกนโดยโปรแกรม Molflow+ ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1..... 73
5.3	ข้อมูลค่าความดันสุญญากาศแต่ละแนวแกนโดยโปรแกรม Molflow+ ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2..... 76
5.4	การทำนายอัตรา outgassing โดยแบบจำลอง ANN..... 83
5.5	ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลการทดลอง..... 84
6.1	พารามิเตอร์ในการควบคุมด้วย FTC ในกรณีชดเชยได้..... 90
6.2	พารามิเตอร์ในการควบคุมด้วย FTC ในกรณีคงค่าเดิม..... 91
6.3	ความสัมพันธ์ของความเร็วในการสูบของปั๊มที่แรงดันไฟฟ้า 3000, 5000 และ 7000 โวลต์..... 94
6.4	พารามิเตอร์ในการควบคุมด้วย FTC ในกรณีเส้นสมการสมมติขึ้น..... 95

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	คุณสมบัติของแสงซินโครตรอน.....	2
1.2	เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน.....	3
3.1	แผนภูมิการดำเนินการวิจัย	26
3.2	โครงสร้างของบีมทั่วไป	29
3.3	ช่วงความดันการทำงานสำหรับบีมสุญญากาศชนิดต่าง ๆ.....	30
3.4	การอ่านค่าความดันจากเครื่องมือวัดสุญญากาศ.....	31
3.5	ช่วงความดันสำหรับมาตรวัดชนิดต่าง ๆ.....	31
3.6	คุณลักษณะระบบการไหล.....	32
3.7	ระบบสุญญากาศบีมสุญญากาศ	33
3.8	ระบบสุญญากาศเชื่อมต่อผ่านท่อสุญญากาศเป็นแบบอนุกรม	34
3.9	การเชื่อมต่อท่อสุญญากาศแบบอนุกรม.....	35
3.10	การเชื่อมต่อท่อสุญญากาศแบบขนาน.....	36
3.11	อุปกรณ์การทดลองในระบบสุญญากาศ	37
3.12	ระบบสุญญากาศทดลองที่ 1.....	39
3.13	ระบบสุญญากาศทดลองที่ 2.....	39
3.14	แผนภูมิขั้นตอนการสร้างระบบทดลองสุญญากาศ.....	41
3.15	การตรวจสอบรอยรั่วไหลในระบบทดลองสุญญากาศ	42
4.1	ตรรกะที่แท้จริง (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบพีซี (พีซีลอจิก).....	45
4.2	ชนิดของระบบกฎพีซี.....	46
4.3	โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบพีซี	47
4.4	ความเร็วในการสุบจากข้อมูลจำเพาะของบีมแบบสปีดเตอร์ไอออน.....	48
4.5	หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW สำหรับใช้งานพีซี.....	51
4.6	ฟังก์ชันสมาชิกของระบบทดลองสุญญากาศที่ 2	52
4.7	กฎพีซีที่ออกแบบของระบบทดลองสุญญากาศที่ 2	53
4.8	การกำหนดวิธีการทำดีพีซีพีเคชั้นบนโปรแกรม LabVIEW	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 (ก) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 9×10^{-14} เอาต์พุตมีค่าเป็น 0.....	56
4.9 (ข) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3.75×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 0.....	56
4.9 (ค) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3.76×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 25.....	57
4.9 (ง) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 7.5×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 25	57
4.9 (จ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 7.51×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 50.....	58
4.9 (ฉ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3×10^{-8} เอาต์พุตมีค่าเป็น 50.....	58
4.9 (ช) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3.01×10^{-8} เอาต์พุตมีค่าเป็น 75.....	59
4.9 (ซ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 1.506×10^{-7} เอาต์พุตมีค่าเป็น 75	59
4.9 (ฌ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 1.507×10^{-7} เอาต์พุตมีค่าเป็น 100	60
4.9 (ญ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 5×10^{-5} เอาต์พุตมีค่าเป็น 100.....	60
4.10 ตัวควบคุมป้อนแบบสปีดเตอร์ไอออน (4UHV-controller).....	62
4.11 ระบบทดลองสุญญากาศที่ 1	63
4.12 ผลการควบคุมพีซีสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 1	63
4.13 ระบบทดลองสุญญากาศที่ 2	65
4.14 ผลการควบคุมพีซีสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 2.....	65
4.15 ภาพขยายผลการควบคุมพีซีสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 2	66
5.1 พฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 ด้วยโปรแกรม Molflow+	73
5.2 พฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2 ด้วยโปรแกรม Molflow+	75
5.3 ภาพขยายพฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2	76
5.4 กระบวนการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	79
5.5 แบบจำลองการทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียมโดยแบ่งการทำนาย ออกเป็นสองแบบจำลอง 1.อัตรา outgassing 2.ความเร็วปั๊ม.....	80
5.6 โปรแกรม MATLAB สำหรับการตั้งค่าการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม.....	81
5.7 MSE ของแบบจำลองการทำนายอัตรา outgassing และความเร็วของปั๊ม	82
5.8 R-squared ของแบบจำลองอัตรา outgassing และความเร็วปั๊ม	83
6.1 แผนภูมิการควบคุมด้วย FTC สำหรับระบบสุญญากาศ	88
6.2 ผลการควบคุมด้วย FTC ในกรณีชดเชยได้.....	89

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
6.3 ผลการควบคุมด้วย FTC ในกรณีคงค่าเดิม	91
6.4 เส้นสมการการความเร็วในการสูบของปั๊มที่สมมติขึ้น.....	93
6.5 ผลการควบคุมด้วย FTC ในกรณีเส้นสมการสมมติขึ้น.....	94
ก.1 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW และการใช้งานส่วนเสริม Fuzzy System Designer	109
ก.2 หน้าต่างการออกแบบฟัซซีบนโปรแกรม LabVIEW	110
ก.3 การกำหนดตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต.....	111
ก.4 ผลการสร้างกฎการควบคุมฟัซซี	111
ก.5 การทดสอบกฎการควบคุมฟัซซี.....	112
ข.1 หน้าต่างโปรแกรม Mlflow+.....	114
ข.2 รูปทรงเรขาคณิตของระบบสัญญาณ	115
ข.3 ระบายของความดันที่พิจารณา.....	115
ข.4 กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบสัญญาณ	116
ข.5 พล็อตพฤติกรรมความดันสัญญาณในระบบ	116
ค.1 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB.....	118
ค.2 การเข้าใช้ Neural Networks บนโปรแกรม MATLAB.....	119
ค.3 หน้าต่างการเข้าสู่การใช้งาน Neural Networks.....	119
ค.4 การให้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกับ Neural Networks.....	120
ค.5 การแบ่งข้อมูลออกเป็นเพื่อการ Training, Validation และ Testing	120
ค.6 กำหนดจำนวน Hidden Layer ของ Neural Networks.....	121
ค.7 เลือกอัลกอริทึมในการ Training ของ Neural Networks	121
ค.8 ประสิทธิภาพการ Training ของ Neural Networks.....	122
ค.9 ขั้นตอนการ Retraining ของ Neural Networks.....	122
ค.10 การรับแบบจำลองของ Neural Networks ไปใช้งาน	123
ค.11 การบันทึกแบบจำลองที่ได้จาก Neural Networks.....	123

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ANN	=	Artificial Neural Network (โครงข่ายประสาทเทียม)
FAFE	=	Fast Adaptive Fault Estimation (การประมาณค่าความผิดพลาดแบบปรับตัวได้อย่างรวดเร็ว)
FDD	=	Fault Detection and Diagnosis (การตรวจจับและวินิจฉัยข้อผิดพลาด)
FDI	=	Fault Detection and Isolation (การตรวจสอบและระบุความผิดพลาด)
FTC	=	Fault Tolerance Control (ระบบควบคุมที่มีความสามารถคงทนต่อข้อผิดพลาด)
LMI	=	Linear Matrix Inequality (ความไม่เท่าเทียมกันของเมทริกซ์เชิงเส้น)
LPV	=	Linear Parameter Varying (พารามิเตอร์เชิงเส้นแปรผัน)
MRC	=	Model Reference Control (การควบคุมผ่านแบบจำลองอ้างอิง)
NCS	=	Networked Control Systems (ระบบเครือข่ายที่ความซับซ้อนและขนาดใหญ่)
NEG	=	Non-Evaporable Getter Pumps (ปั๊มสุญญากาศที่ไม่สามารถระเหยได้)
Pa	=	Pressure of sensor A (ความดันที่ตำแหน่งเครื่องมือวัดจุด A)
Pb	=	Pressure of sensor B (ความดันที่ตำแหน่งเครื่องมือวัดจุด B)
Pc	=	Pressure of sensor C (ความดันที่ตำแหน่งเครื่องมือวัดจุด C)
Pch	=	Chamber Pressure (ความดันที่ห้องสุญญากาศ)
Pd	=	Pressure of sensor D (ความดันที่ตำแหน่งเครื่องมือวัดจุด D)
Pi	=	Ion Pump Pressure (ความดันที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน)
Ppump1	=	Pressure of Ion Pump No.1 (ความดันที่ปั๊มสุญญากาศตัวที่ 1)
Ppump2	=	Pressure of Ion Pump No.2 (ความดันที่ปั๊มสุญญากาศตัวที่ 2)
Q	=	Outgassing (อัตราการปล่อยก๊าซจากพื้นผิววัสดุ)
Qa	=	Outgassing of zone A (อัตราการปล่อยก๊าซจากพื้นผิววัสดุโซน a)
Qb	=	Outgassing of zone B (อัตราการปล่อยก๊าซจากพื้นผิววัสดุโซน b)
Qc	=	Outgassing of zone C (อัตราการปล่อยก๊าซจากพื้นผิววัสดุโซน c)
SIP	=	Sputter Ion Pump (ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน)

- TDS = Thermal Desorption Spectroscopy (วิธีการของการสังเกตหลุดออกของโมเลกุลจากพื้นผิวเมื่ออุณหภูมิพื้นผิวที่จะเพิ่มขึ้น)
- UHV = Ultra-High Vacuum (ค่าความดันสุญญากาศในระดับสูงพิเศษ)



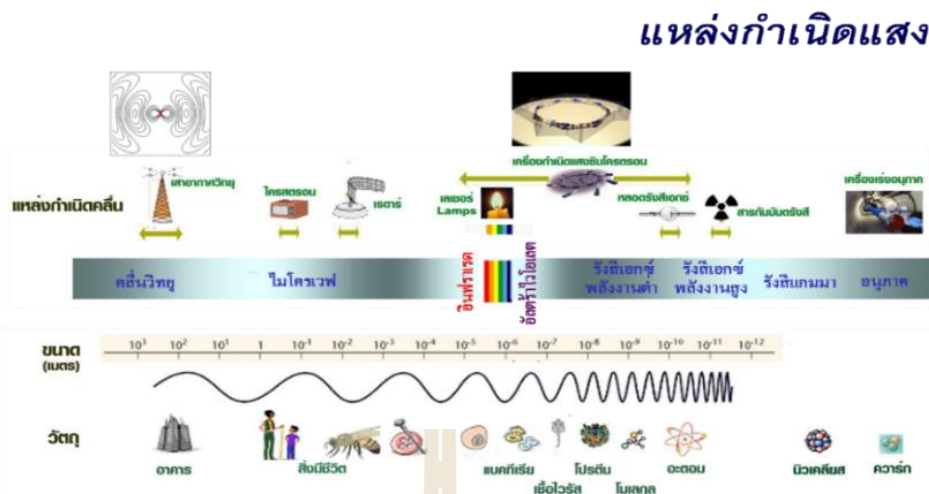
บทที่ 1

บทนำ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ ศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมฟิชซีเพื่อรักษา ค่าความดันสัญญาณในระดับสูงพิเศษสำหรับปั๊มสัญญาณแบบสปันเตอร์ไอออนของวงแหวนกักเก็บ อิเล็กตรอน ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) รวมถึงการประมาณค่าประสิทธิภาพ ความเร็วในการสูบของปั๊มด้วยการประยุกต์ใช้ Molflow+ ซอฟต์แวร์ร่วมกับโครงข่ายประสาทเทียม ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าพารามิเตอร์ในระบบสัญญาณ ระบบควบคุมในงานวิจัยนี้ ยังมีความสามารถในการตรวจสอบ วินิจฉัยข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระบบอันเนื่องมาจากปั๊มสัญญาณ แบบสปันเตอร์ไอออนมีประสิทธิภาพการสูบลดลง สามารถปรับกลไกชุดควบคุมให้เหมาะสมรองรับ การทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเบื้องต้นบทนำในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมาและ ความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย กรอบแนวคิดการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ สถานที่ดำเนินการวิจัย และลำดับเนื้อหาในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย

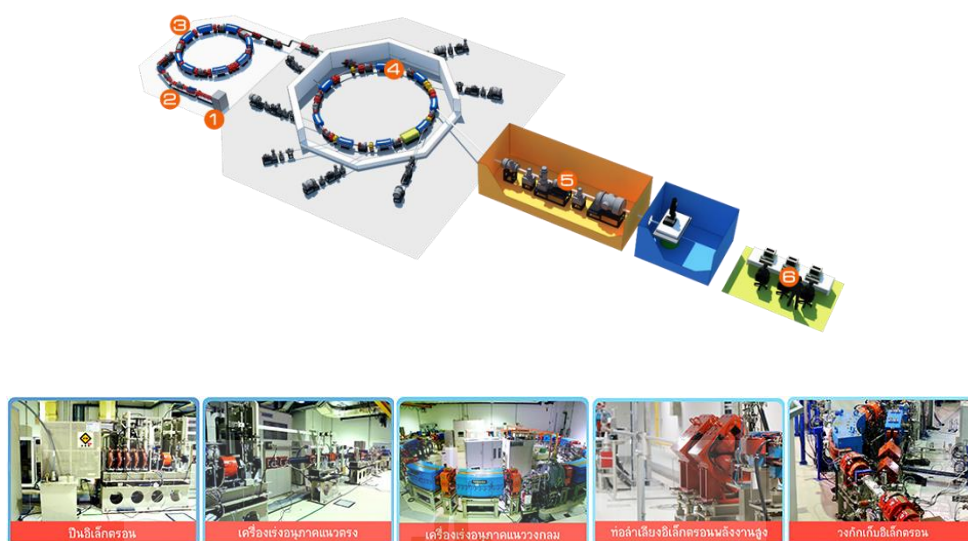
สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เป็นสถาบันฯ ที่มีห้องปฏิบัติการเพื่อให้ บริการการใช้ประโยชน์จากแสงซินโครตรอน แสงซินโครตรอนเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเช่นเดียวกับแสง ที่มาจากดวงอาทิตย์ แสงซินโครตรอนถูกสร้างขึ้นจากการทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง เกือบเท่าความเร็วแสงและบังคับให้เลี้ยวโค้งด้วยสนามแม่เหล็ก ทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงาน บางส่วนและปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Radiation) คือคลื่นตามขวางที่ประกอบด้วยสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าตั้งฉากซึ่งกันและกัน สามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่ต้องผ่านตัวกลาง เช่น คลื่นวิทยุ (Radio waves) คลื่น ไมโครเวฟ (Microwaves) รังสีอินฟราเรด (Infrared) รังสีเอกซ์ (X-rays) เป็นต้น แสงซินโครตรอนมี ความเข้มสูงและมีค่าพลังงานต่อเนื่องครอบคลุม 4 ช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ แสงอินฟราเรด แสงที่ตา มองเห็น แสงอัลตราไวโอเล็ต และรังสีเอกซ์ แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 คุณสมบัติของแสงซินโครตรอน¹

กระบวนการผลิตแสงซินโครตรอนของสถาบันวิจัยแสงสยามประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 6 ส่วน ได้แก่ ปืนอิเล็กตรอน (Electron Gun) เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง (Linear Accelerator : Linac) เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลม (Booster Synchrotron) วงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน (Storage Ring) ระบบลำเลียงแสง (Beamlines: BL) และสถานีทดลอง (Experimental Station) ปืนอิเล็กตรอนก่อให้เกิดอิเล็กตรอนจำนวนมาก ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มที่เรียกว่ากลุ่มอิเล็กตรอน (Electron bunch) และเร่งให้มีพลังงานสูงถึง 40 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (40 MeV) ในแนวเส้นตรงโดยคลื่นไมโครเวฟด้วยเครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง เครื่องเร่งอนุภาคแนววงกลมจะเพิ่มพลังงานของอิเล็กตรอนขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งมีพลังงานเท่ากับ 1,000 ล้านอิเล็กตรอนโวลต์ (1 GeV) ในเวลาประมาณ 0.6 วินาที หรือเกือบเท่าความเร็วแสงโดยใช้คลื่นวิทยุ และวงแหวนกักเก็บจะเร่งอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงถึง 1.2 GeV ภายในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนประกอบด้วยแม่เหล็กสองขั้ว สี่ขั้ว และหกขั้ว ทำหน้าที่บังคับให้อิเล็กตรอนพลังงานสูงเหล่านี้เคลื่อนที่ภายในท่อสุญญากาศ โดยบริเวณแม่เหล็กบังคับเลี้ยวสองขั้ว (Bending magnet) จะเป็นบริเวณที่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่เรียกว่า “แสงซินโครตรอน” ระบบลำเลียงแสงทำหน้าที่เลือกย่านพลังงานที่ต้องการและนำแสงซินโครตรอนที่ผลิตได้มายังสถานีทดลองซึ่งเป็นจุดที่แสงซินโครตรอนวิ่งชนกับตัวอย่างแล้วเกิดปฏิกิริยาทางวิทยาศาสตร์ต่าง ๆ ได้แก่ การกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) การปลดปล่อย (Emission) หรือการเรืองรังสี (Fluorescence) แล้วผ่านตัวตรวจวัดสัญญาณ (Detector) เพื่อนำข้อมูลไปยังคอมพิวเตอร์และประมวลผลโดยนักวิทยาศาสตร์ในการวิเคราะห์โครงสร้างอะตอมหรือโครงสร้างระดับโมเลกุลของสสารแสดงได้ดังรูปที่ 1.2

แหล่งที่มา; ¹ <http://www.slri.or.th/th/index.php/what-is-synchrotron-light/forpeople.html>



รูปที่ 1.2 เครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน²

การผลิตแสงซินโครตรอนจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีสุญญากาศขั้นสูงที่ระดับความดันประมาณ 10^{-8} ทอร์ ถึง 10^{-11} ทอร์ ในท่อลำเลียงอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันการรบกวน การหักเห และการชนกับมวลอากาศของลำอิเล็กตรอน หากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ชนกับผนังของท่อลำเลียงจะทำให้เกิดความร้อนและเกิดการแตกตัวของก๊าซหรือไอจากผนังท่อ ความดันอากาศบริเวณนั้นจะเพิ่มสูงขึ้นหรือกล่าวได้ว่าความดันเป็นสุญญากาศแย่งลง ส่งผลให้คุณภาพของแสงที่ผ่านบริเวณนั้นลดลง การสร้างความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษในท่อลำเลียงอิเล็กตรอนหรือการทำให้ความดันอากาศที่เพิ่มขึ้นนั้นลดลงได้อย่างรวดเร็วจะต้องใช้ปั๊มสุญญากาศมากกว่าหนึ่งตัว เนื่องจากปั๊มสุญญากาศแต่ละประเภทมี्यानการทำงานที่ระดับความดันแตกต่างกัน เริ่มต้นจากทำความดันสุญญากาศตั้งแต่ว่าระดับความดันบรรยากาศถึง 10^{-2} ทอร์ ด้วยปั๊มที่ภายในมีลักษณะเป็นเกลียวหมุนขบกัน การหมุนขบกันของเกลียวจะทำให้เกิดความแตกต่างของความดันขึ้นภายในระบบ ทำให้สามารถขับดันให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ภายในบริเวณห้องปิดออกสู่บรรยากาศภายนอก เรียกว่าปั๊มแบบเลื่อนแห้ง และทำความดันสุญญากาศต่อเนื่องจนถึง 10^{-8} ทอร์ ด้วยปั๊มชนิดดั่งตุตโมเลกุลสูง จากนั้น ใช้ปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออนที่มีหลักการการทำงานโดยใช้เทคนิคการจับโมเลกุลของก๊าซให้เกาะหรือติดอยู่ในบริเวณพื้นที่จำกัดสามารถทำความดันสุญญากาศได้ถึง 10^{-12} ทอร์ [59] จะเห็นได้ว่าระบบควบคุมเพื่อรักษาระดับความดันสุญญากาศให้มีความเหมาะสมในการลำเลียงแสงซินโครตรอนนั้นเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งและหลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากนี้จะมีความจำเป็นและสำคัญต่องานวิจัยที่ใช้แสงซินโครตรอนแล้ว ยังใช้เป็นตัวชี้วัดหรือบ่งบอกถึงคุณภาพและมาตรฐานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอนอีกด้วย ปัจจุบันทาง

แหล่งที่มา; ² <http://www.slri.or.th/th/index.php/what-is-synchrotron-light/for-research.html>

สถาบันฯ ยังไม่มีระบบควบคุมความดันสุญญากาศในท่อลำเลียงแสง แต่มีแนวทางการรักษาระดับความดันสุญญากาศให้อยู่ในระดับสูงพิเศษต่อเนื่องตลอดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนโดยใช้วิธีการเพิ่มจำนวนปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนในบริเวณที่ต้องการลดความดันลงและใช้งานเต็มประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มเพื่อให้ความดันลดลงอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง การแก้ปัญหาค่าระดับความดันสุญญากาศที่ไม่คงที่และปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นสิ่งรบกวนระบบก่อให้เกิดค่าความดันสุญญากาศที่ผิดปกติไปจนไม่สามารถผลิตแสงซินโครตรอนที่มีคุณภาพได้ ทางสถาบันฯ จะต้องดำเนินการหยุดการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อให้บุคลากรที่มีความสามารถเฉพาะด้านตรวจสอบหาสาเหตุและแก้ไขด้วยการปรับปรุงหรือปรับเปลี่ยนและหรือติดตั้งอุปกรณ์ใหม่เพิ่มเติมในระบบแล้วจึงเริ่มกระบวนการทำความดันสุญญากาศใหม่อีกครั้ง ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้สถาบันฯ ต้องใช้บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ ชำนาญการในการติดตั้งระบบและทรัพยากรทางเทคโนโลยีจำนวนมาก อีกทั้งปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนนั้นมีราคาที่สูงมากและต้องใช้เป็นจำนวนมาก เพื่อรักษาระดับความดันสุญญากาศให้เหมาะสมต่อการใช้งาน

จากปัญหาที่ได้กล่าวมา เพื่อลดความสูญเสียและเพิ่มประสิทธิภาพของคุณภาพลำแสงซินโครตรอน ทางสถาบันฯ และผู้วิจัยจึงมีแนวคิดพัฒนาและออกแบบระบบควบคุมการทำงานของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนแต่ละตัวให้มีความเหมาะสมเพียงพอต่อระบบความดันสุญญากาศในท่อลำเลียงแสงเพื่อรักษาค่าความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษในท่อสุญญากาศลำเลียงแสงซินโครตรอน ลดอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงเกินความจำเป็นด้วยตัวควบคุมแบบพีซี สามารถประมาณความเร็วในการสูบของปั๊มได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับซอฟต์แวร์ Molflow+ อีกทั้งยังเพิ่มความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบจากระบบควบคุมแบบเดิมทั่วไปให้มีความสามารถในการตรวจสอบ วิเคราะห์ วินิจฉัยข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นได้ในระบบและปรับกลไกชุดควบคุมให้เหมาะสมรองรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพในกรณีมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากการทำงานผิดพลาดของระบบสุญญากาศทำให้ความดันสุญญากาศเพิ่มสูงขึ้น ผลกระทบจากอุณหภูมิทำให้ตัวกระตุ้นทำงานไม่ถูกต้อง หรือแม้แต่การอ่านค่าผิดพลาดของตัวตรวจรู้ หากเป็นระบบควบคุมแบบเดิมทั่วไปจะพยายามชดเชยให้ระบบมีค่าความดันสุญญากาศตามต้องการภายใต้ความสามารถของชุดควบคุม แต่ผู้ใช้งานไม่มีทางทราบได้เลยว่าการชดเชยของชุดควบคุมนั้นเกิดจากความผิดปกติของส่วนใดในระบบจำเป็นต้องได้รับการแก้ไขตรวจสอบหรือปรับเปลี่ยนอย่างเร่งด่วนหรือไม่ และหากชดเชยความผิดปกตินั้น จนเกินความสามารถของชุดควบคุมแล้วนั้นระบบจะได้รับความเสียหายในวงกว้างซึ่งอาจก่อให้เกิดอันตรายได้ เพื่อเป็นการป้องกันความเสียหายของระบบ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมความดันสุญญากาศสำหรับท่อสุญญากาศในการลำเลียงแสงโดยอาศัยทฤษฎีระบบควบคุมที่เรียกว่า Fault-Tolerant Control (FTC) ให้ระบบมีความคงทนรองรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพต่อ

ข้อผิดพลาดสามารถปรับกลไกชุดควบคุมให้เหมาะสมได้อย่างอัตโนมัติ โดยระบบจะนำข้อมูลที่ได้อามาจากการตรวจสอบ วิเคราะห์ วินิจฉัยและบอกความผิดปกติของค่าความดันสัญญาณที่เกิดขึ้นในท่อสัญญาณผ่านเทคนิค Fault Detection and Diagnosis (FDD) เข้าสู่กระบวนการควบคุมเพื่อรักษา ระดับความดันสัญญาณให้อยู่ในระดับที่ต้องการต่อไปได้มากที่สุดที่จะเป็นไปได้ มุ่งเน้นให้ระบบเกิดความเสียหายน้อยที่สุด ผลจากการวิจัยนี้สามารถเป็นต้นแบบในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานและความน่าเชื่อถือของระบบควบคุมความดันสัญญาณระดับสูงพิเศษ

ดังนั้น การศึกษาและวิจัยการออกแบบระบบควบคุมที่คงทนต่อความผิดพลาดของความดันภายในท่อสัญญาณของเครื่องเร่งอนุภาคจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง ถือเป็นการพัฒนาองค์ความรู้ทางด้านเทคโนโลยีสัญญาณขั้นสูง ลดการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ลดการสูญเสียงบประมาณจำนวนมาก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของคุณภาพและมาตรฐานของเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน ยังเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจจากการสนับสนุนให้บริการใช้แสงซินโครตรอนของภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม รวมถึงทางการแพทย์ จากหน่วยงานและองค์กรทั้งภาครัฐและเอกชน ทั้งในและต่างประเทศที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อออกแบบระบบควบคุมความดันสัญญาณระดับสูงพิเศษสำหรับปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออนให้มีประสิทธิภาพการทำงานเหมาะสมที่สุด

1.2.2 เพื่อสร้างระบบตรวจสอบและวินิจฉัยความผิดปกติหรือข้อผิดพลาดสำหรับปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออนที่มีปฏิสัมพันธ์กันในระบบควบคุมความดันสัญญาณระดับสูงพิเศษ

1.2.3 เพื่อความเชื่อมั่นและความมั่นคงต่อการทำงานของระบบสัญญาณที่มีปฏิสัมพันธ์กันในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของห้องปฏิบัติการแสงสยาม

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 ระบบทดสอบจะทำการติดตั้งปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออนจำนวน 2 ตัว เชื่อมต่อกันด้วยท่อสัญญาณผ่านการปิดกั้นการรั่วไหลของก๊าซด้วยปะเก็นทองแดง

1.3.2 พิจารณาระบบสัญญาณที่ประกอบด้วยปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออนจำนวน 2 ตัว เชื่อมต่อกันด้วยท่อสัญญาณผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรูปแบบเชิงเส้น

1.3.3 ออกแบบและสร้างระบบควบคุมเพื่อรักษา ระดับความดันสัญญาณในท่อสัญญาณที่มีความสามารถในการตรวจพบข้อผิดพลาดหรือผิดปกติของความดันในท่อสัญญาณ สามารถระบุและชดเชยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ ภายใต้ขอบเขตความสามารถของปั๊มสัญญาณ

1.3.4 ควบคุมความดันสัญญาณให้อยู่ในระดับสูงพิเศษ (UHV) ด้วยตัวควบคุมพีซี

1.3.5 การประมาณความเร็วในการสูบของปั๊มได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นโดยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับซอฟต์แวร์ Molflow+

1.3.6 ใช้เทคนิค FTC ซึ่งเป็นวิธีการควบคุมที่รองรับการทำงานของระบบเมื่อมีกรณีความผิดพลาดขึ้นในระบบ เพื่อรักษาระดับความดันสุญญากาศที่ได้จากการทำงานของปั๊มแบบสปีดเตอร์โอออนต่อไป โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายเท่ากับระบบที่ไม่มีการติดตั้งเทคนิค FTC

1.3.7 การคำนวณที่มีความซับซ้อนและการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัยนี้ จะใช้โปรแกรม MATLAB/SIMULINK และ Control System Toolbox เป็นเครื่องมือในการคำนวณ

1.3.8 การควบคุมการทำงานของปั๊มแบบสปีดเตอร์โอออนเชื่อมต่อสื่อสารผ่านโปรแกรม LabVIEW

1.4 กรอบแนวคิดการวิจัย

จากการศึกษาระบบทำความดันสุญญากาศ ทำให้ทราบว่าปั๊มสุญญากาศแต่ละประเภทมีกลไกการทำงานและย่านใช้งานที่เหมาะสมกับระดับความดันสุญญากาศที่แตกต่างกัน การเลือกใช้งานประเภทของปั๊มสุญญากาศให้มีความเหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญในอันดับแรกของการเริ่มกระบวนการทำความดันสุญญากาศ การรักษาระดับความดันสุญญากาศที่สร้างขึ้นมาได้แล้วนั้นต้องอาศัยชุดควบคุมที่มีความสามารถในการชดเชยผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ ที่มีต่อความดันสุญญากาศ อย่างถูกต้องแม่นยำ เนื่องจากการสร้างระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษในท่อสุญญากาศของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมที่มีความน่าเชื่อถือในประสิทธิภาพการชดเชยของระบบเป็นอย่างมาก หากมีข้อผิดพลาดบางประการเกิดขึ้นระบบควบคุมนี้จะต้องได้รับข้อมูลความผิดปกติหรือข้อผิดพลาดที่ถูกต้องเพื่อตัดสินใจดำเนินการรักษาความดันสุญญากาศอย่างเหมาะสมโดยไม่ทำให้ระบบได้รับความเสียหาย ทั้งยังเป็นแนวทางการวางแผนปรับเปลี่ยนหรือแก้ไขระบบได้อย่างทันที่

กระบวนการทำความดันสุญญากาศในงานวิจัยนี้ต้องอาศัยปั๊มสุญญากาศในการทำความดันที่สามารถแบ่งความสามารถในการดึงดูดโมเลกุลออกเป็นสองประเภท คือ

1.4.1 การสูบหรือการดึงดูดโมเลกุลก๊าซออกจากบริเวณปิดที่ต้องการสร้างภาวะสุญญากาศโดยตรง เช่น

1) ปั๊มเชิงกล (Mechanical pump) มีการปนเปื้อนของน้ำมัน มีส่วนเคลื่อนไหวทำให้เกิดความสั่นสะเทือน แต่สามารถทำความดันจากความดันบรรยากาศถึง 10^{-3} Torr

2) ปั๊มดึงดูดโมเลกุลสูง (Turbo molecular pump) มีความสะอาดเนื่องจากก๊าซจะถูกสูบออกโดยไม่ใช้น้ำมัน แต่จะใช้การถ่ายเทโมเมนตัมไปสู่ก๊าซ ทำให้สูบโมเลกุลใหญ่ได้ดี มีส่วนที่เคลื่อนไหว ความเร็วของการสูบต่ำ ความดันจะเพิ่มขึ้นในทิศทางที่ออกจากภาชนะ

3) ปั๊มกระจายน้ำมัน (Oil diffusion pump) ไม่มีส่วนเคลื่อนไหวน ทนอุณหภูมิได้สูง มีไอน้ำมันในสุญญากาศ ด้วยการระเหยน้ำมัน

1.4.2 การดึงดูดโมเลกุลของก๊าซให้เกาะหรือติดอยู่ภายในบริเวณจำกัดหรือฝังอยู่ในวัสดุ เพื่อลดจำนวนโมเลกุลก๊าซภายในบริเวณปิดที่ต้องการสร้างภาวะสุญญากาศ กรณีนี้จะทำให้ความดันในภาชนะหรือบริเวณที่ต้องการสร้างภาวะสุญญากาศมีความดันลดลง เช่น

1) ปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออน (Sputter ion pump) ก๊าซถูกทำให้แตกตัวโดยไฟฟ้าแรงดันสูง ไอออนหมุนควงในสนามแม่เหล็กฝังเข้าไปในขั้ววาโนดซึ่งเคลือบด้วยไททาเนียม ไม่มีส่วนเคลื่อนไหวน ไม่ใช้น้ำมัน ทำให้มีความสะอาด

2) ปั๊มไครโอ (Cryogenic pump) สะอาดมาก โมเลกุลควบแน่น บนพื้นผิวที่เย็น ไม่มีส่วนเคลื่อนไหวน

ปั๊มสุญญากาศแต่ละประเภทมีช่วงการใช้งานที่ค่าความดันต่างกัน ซึ่งค่าความดันสุญญากาศแบ่งออกได้เป็นหลายระดับ อธิบายได้ด้วยตารางที่ 1.1 และแสดงความสัมพันธ์ของค่าความดันสุญญากาศในหน่วยสากลต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 ระดับความดันบรรยากาศ

ย่านของ ความดัน	หน่วยของความดัน			
	ปาสคาล		ทอร์	
	น้อยที่สุด	มากที่สุด	น้อยที่สุด	มากที่สุด
ต่ำ (LV)	3.3×10^3	1.0×10^5	2.5×10	7.5×10^2
กลาง (MV)	1.0×10^{-1}	3.3×10^3	7.5×10^{-4}	2.5×10
สูง (HV)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-1}	7.5×10^{-7}	7.5×10^{-4}
สูงมาก (VHV)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-4}	7.5×10^{-10}	7.5×10^{-7}
สูงพิเศษ (UHV)	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-7}	7.5×10^{-13}	7.5×10^{-10}
สูงยิ่งยวด (XHV)	$\leq 1.0 \times 10^{-10}$		$\leq 7.5 \times 10^{-13}$	

ตารางที่ 1.2 เปรียบเทียบหน่วยของความดัน

	Pa (Nm ⁻²)	mbar	Torr (mmHg at 0°C)	Technical Atmospheres (at)	Physical Atmospheres (atm)
Pa (Nm ⁻²)	1	1.0×10^{-2}	7.5×10^{-3}	1.02×10^{-5}	9.87×10^{-6}
mbar	1.0×10^2	1	7.5×10^{-1}	1.02×10^{-3}	9.87×10^{-4}
Torr (mmHg at 0°C)	1.33×10^2	1.33	1	1.36×10^{-3}	1.32×10^{-3}
Technical Atmospheres (at)	9.8×10^4	9.8×10^2	7.36×10^2	1	9.68×10^{-1}
Physical Atmospheres (atm)	1.0×10^5	1.0×10^2	7.6×10^2	1.03	1

การทำความดันสุญญากาศให้ได้ในระดับสูงพิเศษจะไม่สามารถทำให้บรรลุได้ด้วยปั๊มตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียว ดังนั้น กระบวนการทำความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษจะเริ่มจากการทำความดันสุญญากาศขั้นต้นโดยใช้ปั๊มแบบเลื่อนแห้ง (Dry scroll vacuum pumps) ทำหน้าที่เป็นปั๊มแบบหยาบ (Roughing pump) และปั๊มด้านท้าย (Backing pump) เพื่อให้ระบบมีความดันสุญญากาศอยู่ในระดับ 10^{-1} ถึง 10^{-2} ทอร์ จากนั้นจะใช้ปั๊มดิ่งคูดโมเลกุลสูง (Turbo Molecular pump) ทำให้ระบบมีความดันสุญญากาศอยู่ในระดับ 10^{-2} ถึง 10^{-8} ทอร์ ซึ่งในทางปฏิบัติการทำความดันสุญญากาศให้ได้ในระดับ 10^{-7} ถึง 10^{-8} ทอร์ ต้องใช้เวลานานและยากสำหรับระบบที่มีขนาดใหญ่ มาก ๆ จึงอาศัยการให้ความร้อน (Temperature Controller) กับระบบเพื่อกระตุ้นให้เกิดการแตกตัวของก๊าซหรือไอ (Outgassing) เมื่อค่าความดันสุญญากาศอยู่ในระดับ 10^{-8} ทอร์ จึงเริ่มใช้งานปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออน (Sputter Ion Pump) จากนั้นทำการปิดระบบการทำงานของปั๊มแบบเลื่อนแห้งและปั๊มดิ่งคูดโมเลกุลสูง เพื่อทำให้เป็นสุญญากาศระบบปิดโดยใช้งานปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออนเพียงอย่างเดียว ซึ่งเป็นปั๊มที่เหมาะสมสำหรับงานที่ต้องการความเป็นสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (Ultra-High Vacuum; UHV) มีหลักการทำงานคือทำให้อากาศที่เหลืออยู่ในบริเวณนั้นแตกตัวเป็นไอออน แล้วควบคุมการเคลื่อนที่ต่อไปด้วยความเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก มาพุ่งชนไททาเนียมบริสุทธิ์ให้หลุดออกมาจับกับโมเลกุลของอากาศ และฝังตัวอยู่ในเซลล์ของตัวปั๊ม ปั๊มชนิดนี้ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนที่ จึงไม่มีการเสียดสีเทือน เกจวัดค่าความดันในงานวิจัยจะใช้พีรานีเกจ (Pirani Gauge) สำหรับวัดความดันสุญญากาศที่ระดับความดันตั้งแต่ บรรยากาศ ถึง 10^{-4} ทอร์ และใช้ไอออนเกจ (Ionization Gauge) สำหรับวัดค่าความดันตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 10^{-12} ทอร์ จะเห็นได้ว่าความพยายามในการทำความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษต้องใช้หลากหลายขั้นตอนและอุปกรณ์ที่มีราคาสูง รวมถึงเทคโนโลยีและเทคนิคมากมาย ดังนั้นการรักษาวัวซึ่งระดับความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษที่สร้างขึ้นมาได้แล้วนั้น

จำเป็นต้องอาศัยระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพ รองรับการดำเนินงานในสภาวะความผิดปกติหรือข้อผิดพลาดได้ในขีดความสามารถการควบคุมได้ หากระบบควบคุมแบบเดิมทั่วไปขัดเซยการทำงาน ของระบบผิดพลาดอย่างต่อเนื่อง อาจก่อให้เกิดอันตรายและความเสียหายกับระบบที่ประมาณค่าไม่ได้ เพื่อความน่าเชื่อถือและเสถียรภาพของระบบควบคุมในการรักษาความดันระดับสูงพิเศษที่มีความสำคัญและจำเป็นอย่างมาก จึงนำเทคนิคการตรวจสอบ วิเคราะห์ วินิจฉัยความผิดปกติในระบบ มาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบควบคุมที่มีความสามารถรองรับความผิดพลาดได้ โดยจะพิจารณาความผิดพลาดหรือผิดปกติในกรณีการทำงานผิดพลาดของระบบสัญญาณทำให้ความดันสัญญาณเพิ่มสูงขึ้น

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ลดการจ่ายพลังงานไฟฟ้าแรงดันสูงให้กับปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออนที่เกินความจำเป็นและยังคงรักษาระดับความดันสัญญาณให้อยู่ในระดับสูงพิเศษได้อย่างต่อเนื่อง

1.5.2 ได้ข้อมูลการขัดเซยระบบที่ถูกต้องส่งไปยังชุดควบคุมแบบปรับตัวเองในการปรับปรุงเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ทำให้สามารถแก้ไข ปรับปรุง เปลี่ยนแปลงอุปกรณ์ที่มีความผิดปกติหรือผิดพลาดในระบบได้ทันท่วงที ก่อนที่ระบบจะได้รับความเสียหาย

1.5.3 การทำงานของระบบสัญญาณที่มีปฏิริยาต่อกันในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของห้องปฏิบัติการแสงสยามมีความมั่นคงและเชื่อมั่นได้ว่าสามารถรักษาความดันสัญญาณระดับสูงพิเศษได้ตามที่ต้องการต่อไปเท่าที่จะทำได้ แม้จะมีความผิดปกติหรือข้อผิดพลาดเกิดขึ้น

1.6 สถานที่ดำเนินงานวิจัย

1.6.1 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)

1.6.2 ห้องปฏิบัติการ 4104 อาคารศูนย์เครื่องมือ 4 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6.3 อาคารบรรณสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.7 การจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถแบ่งเนื้อหาออกเป็น 7 บท ซึ่งมีรายละเอียดโดยสังเขปดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นบทที่กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาการวิจัย วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย กรอบแนวคิดการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และสถานที่ดำเนินการวิจัย

บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เป็นบทที่กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับความดันสุญญากาศ ปัมป์แบบสปัตเตอร์ไอออน ตัวควบคุมพีซีซี ประสิทธิภาพความเร็วในการสูบลำโพงข่ายประสาทเทียม ซอฟต์แวร์ Molflow+ และความคงทนต่อความผิดพลาดในระบบ

บทที่ 3 ระเบียบวิธีดำเนินงานวิจัย เป็นบทที่กล่าวถึงภาพรวมในขั้นตอนการดำเนินการวิจัยในหัวข้อต่าง ๆ ได้แก่ การสร้างระบบทดลองสุญญากาศ การตรวจสอบรอยรั่วไหลของก๊าซ เพื่อใช้ในการควบคุมค่าความดันสุญญากาศ การประมาณประสิทธิภาพความเร็วในการสูบลำโพงข่ายประสาทเทียม

บทที่ 4 เป็นบทที่กล่าวถึงการออกแบบและควบคุมความดันสุญญากาศในระบบให้มีค่าอยู่ในระดับความดันสุญญากาศสูงพิเศษด้วยตัวควบคุมแบบพีซีซี พร้อมแสดงให้เห็นถึงผลการควบคุม

บทที่ 5 เป็นบทที่กล่าวถึงการประมาณประสิทธิภาพความเร็วในการสูบลำโพงข่ายประสาทเทียมของปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออนด้วยแบบจำลองที่สร้างโดยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับซอฟต์แวร์ Molflow+

บทที่ 6 เป็นบทที่กล่าวถึงการรักษาค่าความดันสุญญากาศในระบบที่มีความสามารถคงทนต่อความผิดพลาดได้

บทที่ 7 บทสรุปและข้อเสนอแนะ



บทที่ 2

ปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยด้านสุญญากาศ เป็นที่รู้จักและมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ด้วยเหตุที่ว่าประโยชน์ของเทคโนโลยีสุญญากาศสามารถนำมาประยุกต์ใช้ได้มากมายมหาศาลทั้งในทางการแพทย์ ภาควัตถุศาสตร์หรือแม้แต่ในครัวเรือน เช่น การบรรจุอาหารด้วยสุญญากาศ ซึ่งเป็นการพัฒนาแนวทางการถนอมอาหารมาจากการใช้ถุงพลาสติกเก็บอาหารไว้ในตู้เย็นเพื่อยืดอายุของอาหารและจะยิ่งยาวนานขึ้นหากอาหารนั้นไม่สัมผัสกับอากาศ การบรรจุสิ่งของด้วยสุญญากาศทำให้สิ่งของนั้นมีขนาดเล็กกลง ง่ายต่อการขนส่ง สุญญากาศถูกนำมาใช้พัฒนาอุปกรณ์แปรรูปอาหารมากมาย เช่น เครื่องทำแห้งสุญญากาศ (vacuum drier) เครื่องทอดสุญญากาศ (vacuum fryer) เครื่องระเหยสุญญากาศ (vacuum evaporator) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) เพื่อรักษาคุณภาพของอาหาร ช่วยคงความสดของอาหาร สุญญากาศใช้พัฒนาเครื่องมือทางการแพทย์จนเป็นนวัตกรรมระดับประเทศมีคุณภาพเทียบเท่าเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงสำหรับเครื่องรักษาแผลเรื้อรังด้วยแรงดันสุญญากาศใช้ในการดูแลแผลเปิดทั้งชนิดเฉียบพลันและแผลเรื้อรัง เพื่อลดระยะเวลาในการรักษาบาดแผลเรื้อรังของผู้ป่วย ลดความเจ็บปวดและทรมานในการรักษาบาดแผลของผู้ป่วย และในอีกหลายวิจัยแสดงถึงความสำคัญและประโยชน์ของสุญญากาศ

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับสุญญากาศ

ในศตวรรษที่ 20 ได้มีการทำสุญญากาศสูงสุดสำเร็จได้ด้วยปั๊มอากาศที่ 10^{-4} mm ของปรอท ในช่วงระยะเวลา 45 ปีถัดมา งานวิจัยได้เผยให้เห็นว่ามีความพยายามมากมายที่จะทำให้ได้ค่าความดันสุญญากาศที่ต่ำ แต่ทว่าไม่เป็นเช่นนั้นเพราะเพียงแต่ได้ผลักดันให้ค่าความดันสุญญากาศลดลงเท่านั้น ด้วยการเพิ่มความเร็วของปั๊มขึ้นอย่างมหาศาลและจัดการให้ปั๊มดำเนินการได้ง่ายและสะดวกขึ้น ทั้งยังกล่าวอีกด้วยว่าปั๊มสุญญากาศคือกลไกสำหรับการสร้าง การปรับปรุง และหรือการบำรุงรักษาสุญญากาศ (Dmitry Yu. Tsipenyuk, 2009) [13]

ปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออน (Sputter Ion pump; SIP) ได้รับการคิดค้นขึ้นเพื่อใช้เป็นปั๊มสะอาดของหลอดอิเล็กทรอนิกส์ ต่อมาเทคโนโลยี UHV ได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยใช้ฟิล์มสีกส์พลังงานสูงและวิทยาศาสตร์พื้นผิว งานวิจัยส่วนใหญ่ในช่วงสองทศวรรษต่อมามุ่งเน้นปรับปรุงการดำเนินงานที่ความดันระดับสูงของ SIP ความสำเร็จส่วนใหญ่เกิดจากปั๊มเทอร์โบโมเลกุลซึ่งกลายเป็นส่วนประกอบ

ที่เหมาะสมสำหรับ SIP ในช่วงความดันสูง และปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออนเหมาะสมในการใช้งานที่ UHV มากกว่าอย่างชัดเจน ปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออนที่มีตัวรับการระเหยในปั๊มระเหิดไททาเนียมได้รับการดำเนินการมาตั้งแต่ต้น การพัฒนาล่าสุดคือการใช้ฟิล์ม NEG ใน SIP ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นครั้งแรกโดยองค์การวิจัยนิวเคลียร์ยุโรป (CERN) (Dolcino, L., และคณะ, 2010) [14]

โดยทั่วไปปั๊มสุญญากาศเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่สุดของระบบสุญญากาศใด ๆ ซึ่งมีหน้าที่ทำให้บรรลุความเป็นสุญญากาศตามที่ต้องการในพื้นที่ปิดสนิท แต่สำหรับการทำสุญญากาศช่วงกว้าง ๆ สุญญากาศทั้งหมดจะไม่สามารถสร้างขึ้นได้ด้วยปั๊มสุญญากาศเพียงตัวเดียว จำเป็นต้องใช้ปั๊มประเภทต่าง ๆ เพื่อสร้างสุญญากาศในช่วงที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกใช้งานปั๊มสุญญากาศให้เหมาะสมจึงมีความสำคัญเป็นอันดับแรกซึ่งก็มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเลือกปั๊มที่เหมาะสมเช่นกัน หลักเกณฑ์แนวทางในการเลือกปั๊มสุญญากาศอย่างง่ายและแน่นอนให้เหมาะสมกับแต่ละช่วงการผลิตสุญญากาศถูกนำเสนอในบทความนี้ (Akram, H. M., 2014) [1]

การสร้างระบบการเคลือบสุญญากาศขนาดเล็กให้เหมาะกับชิ้นงานขนาดเล็กทำให้ประหยัดทั้งค่าใช้จ่ายและเวลาสำหรับการเคลือบในแต่ละครั้ง ระบบที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วย (1) ปั๊มสุญญากาศแบบเลื่อนแห้ง 2 จังหวะ เพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งปั๊มหยาบ (roughing pump) และปั๊มด้านท้าย (backing pump) สำหรับภาชนะสุญญากาศ (chamber) และ (2) ปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (diffusion pump) ซึ่งเป็นปั๊มที่สามารถลดความดันให้ต่ำลงจนถึงประมาณ 10^{-7} ทอร์ จากผลการทดลองระบบที่สร้างขึ้นพบว่า ภาชนะสุญญากาศถูกสูบล้างอากาศออกจากความดันบรรยากาศจนถึงความดัน 2.2×10^{-2} ทอร์ ในเวลา 6 นาที ด้วยปั๊มสุญญากาศแบบเลื่อนแห้ง และสามารถลดความดันลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 4.5×10^{-5} ทอร์ ในเวลา 30 นาที ด้วยปั๊มแพร่ไอน้ำมัน (สรพงษ์ และคณะ, 2013) [60]

ปั๊มสุญญากาศแบบเลื่อนแห้งและปั๊มไอฟุ้งกระจายในปริมาตรที่แตกต่างกัน เมื่อทำการวัดความดันขณะทำการสูบล้างพบว่าตำแหน่งที่แตกต่างกันจะทำให้เวลาในการสูบล้างแตกต่างกันด้วยเนื่องจาก รอยร้าวและปริมาตรที่แตกต่างกันของในแต่ละอุปกรณ์ ปริมาตรยิ่งน้อยยิ่งสูบล้างได้เร็วมากขึ้น และพบว่า ปั๊มสุญญากาศแบบเลื่อนแห้งสามารถทำความดันได้ต่ำสุดประมาณ 9×10^{-3} ทอร์ แล้วค่อยทำการสูบล้างโดยปั๊มไอฟุ้งกระจายจึงจะทำให้ได้ความดันต่ำสุดที่ประมาณ 8×10^{-4} ทอร์ (สนอง กลิ่นเกสร, 2010) [61]

ความดัน 4×10^{-12} ทอร์ คือ ความดันต่ำสุดที่ทำได้ในห้องสุญญากาศที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม SUS304 โดยในระบบประกอบด้วยปั๊มไอออน ปั๊มระเหิดไททาเนียมและปั๊มน้ำไม่สามารถระเหยได้ เพื่อศึกษาการทำสุญญากาศของปั๊มโดยสังเกตจากเกจวัดและ Ti-ball ในระหว่างขั้นตอนก่อนให้ความร้อน และศึกษาผลกระทบจากการหายไปของก๊าซในระหว่างทำการอบแห้งและหลังจาปิดการทำงานของปั๊ม (Liu, Y. C., และคณะ, 1985) [34]

การบรรลุ UHV / XHV โดยไม่ต้องใช้การอบที่อุณหภูมิสูงกลายเป็นสิ่งจำเป็นในการใช้งานจำนวนมาก จึงได้ศึกษาการใช้ซิลิกาที่มีราคาไม่แพงและไทเทเนียมออกไซด์ฟิล์มบาง ๆ เคลือบบนชิ้นส่วนองค์ประกอบของห้องสุญญากาศ เพื่อลดการดูดซับของน้ำบนผนังห้อง ซึ่งน้ำสามารถแตกตัวออกเป็นออกซิเจนและไฮโดรเจนในวัสดุและทำหน้าที่เป็นแหล่งของไฮโดรเจนได้ นอกจากนี้ ยังสนับสนุนให้สำรองปั๊มเทอร์โบด้วยปั๊มไอออนเพื่อลดเวลาในการทำสุญญากาศของปั๊มลงในช่วงความดัน UHV / XHV (Dong, C., และคณะ, 2002) [15]

แบบจำลองระบบสุญญากาศที่สร้างด้วยวิธีการออกแบบเชิงกลของระบบ ปั๊มสุญญากาศสำหรับ SNS (Spallation Neutron Source) DTL (Drift Tube Linac) และ CCL (Coupled Cavity Linac) เพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดเลือกใช้ปั๊มที่เหมาะสมที่สุด การรวมอัตราการหายไปของก๊าซที่ขึ้นอยู่กับเวลาและความเร็วในการสูบที่ขึ้นอยู่กับความดันเข้าไว้ในแบบจำลองสำหรับก๊าซหลากหลายชนิด ข้อมูลนี้ทำให้สามารถแก้ปัญหาความดันระหว่างปั๊มแบบหยาบ ปั๊มเทอร์โบและปั๊มแบบไอออนได้ จำนวนและขนาดของปั๊มแต่ละตัวถูกปรับให้เหมาะสมเพื่อให้ได้ความดันที่ต้องการโดยมีต้นทุนต่ำสุด การหายไปของก๊าซบนพื้นผิวโลหะทั้งหมด การรั่วไหลของปริมาณก๊าซบริเวณปะเก็นคาดว่าจะได้รับจากอุปกรณ์ตรวจวินิจฉัยทั้งหมด ระบบที่ออกแบบให้ความดันของ DTL ต่ำกว่า 1.8×10^{-7} ทอร์ และความดันของลำแสง CCL ต่ำกว่า 9.2×10^{-8} ทอร์ แม้อยู่ภายใต้เงื่อนไขความผิดพลาด (Shen, S., และคณะ, 2001) [49]

ความเร็วในการสูบของ SIP คำนวณจากความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ติดอยู่ในเซลล์เพนนิ่งและจำนวนไอออนที่สอดคล้องกันในปัจจุบัน ไม่ใช่ค่าสัมประสิทธิ์เชิงประจักษ์หรือสมการทั่วไปที่ใช้สำหรับคำนวณความเร็วในการสูบ ในทางตรงกันข้ามจะมีพารามิเตอร์ที่จะช่วยให้ประมาณความเร็วในการสูบของก๊าซอื่น ๆ ที่ไม่ใช่ไนโตรเจนหรือคาร์บอนมอนอกไซด์ วิธีการคำนวณนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่วัดได้ทั้งสนามแม่เหล็กสูงและต่ำ (Suetsugu, Y., 1995) [51]

การประยุกต์ใช้ปั๊มสุญญากาศที่ไม่สามารถระเหยได้ (Non Evaporable Getter; NEG) ในมาตรวัดสุญญากาศได้รับการถกเถียงเป็นพิเศษเกี่ยวกับมาตรฐานการขยายตัวของสุญญากาศเชิงสถิติ การศึกษาพบว่า หากใช้ปั๊มเทอร์โบโมเลกุลร่วมกับปั๊ม NEG ความดันต่ำสุดที่ได้เท่ากับ 7.9×10^{-10} ปาสคาล และเมื่อใช้ก๊าซเฉื่อยเป็นก๊าซทดสอบกับปั๊ม NEG สุญญากาศมีการขยายตัวเชิงสถิติได้ถึง 10^{-7} ปาสคาล (Detian, L., และคณะ, 2011) [12]

ผลของการศึกษาเกี่ยวกับวัสดุที่ใช้ในการผลิต SIP ได้แก่ ไททาเนียมสำหรับแคโทดและสแตนเลสสำหรับแอโนดและตัวเครื่อง เทคนิค TDS ซึ่งเป็นที่ยอมรับโดยอุตสาหกรรมสุญญากาศในการลดปริมาณก๊าซที่ดูดซับในวัสดุเหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการทำความสะอาดที่แตกต่างกัน เริ่มจากทำความสะอาดทางเคมีหนึ่งครั้งกับตัวอย่างทั้งหมด จากนั้น ทดสอบการยิงแบบสุญญากาศพบว่าแอโนดมีประสิทธิภาพมากกว่าวัสดุของแคโทด ในความเป็นจริงไททาเนียมที่

ทำความสะอาดด้วยกระบวนการใด ๆ เหล่านี้ไฮโดรเจนที่มีสัดส่วนประมาณ 97% ของก๊าซที่ปิดสนิททั้งหมดแม้ว่าการเผาแบบสุญญากาศจะลดการหายไปของก๊าซได้เกือบ 80% แต่ไฮโดรเจนยังคงแหล่งถูกดูดซึมซับหลัก (Calcatelli, A., และคณะ, 1996) [4]

2.3 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบควบคุมแบบคลุมเครือหรือฟัซซีลอจิก

ทฤษฎีฟัซซีลอจิกเป็นตรรกะทางคณิตศาสตร์ประเภทหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความไม่แน่นอน มักใช้ในระบบควบคุมเพื่อจัดการกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งอาจไม่สามารถคาดเดาเงื่อนไขได้ทั้งหมด ในกรณีของระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การผลิตเซมิคอนดักเตอร์ เทคโนโลยีอวกาศ และการวิจัยขั้นสูง สามารถใช้ตรรกะคลุมเครือเพื่อควบคุมสภาวะภายในห้องสุญญากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ การศึกษาบางส่วนของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องนำเสนอได้ดังต่อไปนี้

การประยุกต์ใช้การควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับระบบสุญญากาศสูงพิเศษ การศึกษานี้เสนอตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับระบบสุญญากาศสูงพิเศษเพื่อปรับปรุงความเสถียรและประสิทธิภาพ ระบบสุญญากาศสูงพิเศษมีหลากหลายตัวแปรที่ต้องควบคุมพร้อมกัน เช่น ความดัน อุณหภูมิ อัตราการไหลของก๊าซ และอัตราการแตกตัวเป็นไอออน ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสามารถจัดการกับตัวแปรหลายตัวและปรับการควบคุมให้เหมาะสมตามเวลาจริง เพื่อให้มั่นใจว่าระบบทำงานในระดับที่ต้องการสำหรับแต่ละตัวแปร ผลการวิจัยพบว่าตัวควบคุมฟัซซีมีประสิทธิภาพในการควบคุมความดันและอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศ (Chen, K. C., และ Lee, C. K., 2015) [8]

การควบคุมลอจิกแบบฟัซซีของระบบสุญญากาศสูงพิเศษสำหรับการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ การศึกษานี้เสนอตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับระบบสุญญากาศสูงพิเศษที่ใช้ในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีให้การควบคุมความดันและอัตราการไหลในห้องสุญญากาศได้ดีกว่าตัวควบคุมแบบ PID แบบเดิม (Kim, T. Y., และ Kim, S. H., 2013) [27]

การควบคุมแบบคลุมเครือของระบบสุญญากาศสูงพิเศษในเทคโนโลยีอวกาศ การศึกษานี้สำรวจการใช้การควบคุมฟัซซีลอจิกสำหรับระบบสุญญากาศสูงพิเศษที่ใช้ในเทคโนโลยีอวกาศ ตัวควบคุมแบบฟัซซีได้รับการออกแบบมาเพื่อควบคุมความดันและอุณหภูมิภายในห้องสุญญากาศระหว่างการทำงานของยานอวกาศ ผลการวิจัยพบว่า หนึ่งในข้อได้เปรียบหลักของการควบคุมฟัซซีลอจิกคือความสามารถในการจัดการกับระบบที่ซับซ้อนและไม่เชิงเส้น ระบบสุญญากาศสูงพิเศษอาจขึ้นอยู่กับปัจจัยภายนอกต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน เช่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความดัน ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกสามารถปรับให้เข้ากับสภาวะการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ ให้การควบคุมที่ทนทานและเชื่อถือได้ นอกจากนี้ ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกมักจะใช้งานง่ายและปรับแต่งได้ง่ายกว่าวิธีการควบคุมแบบเดิม (Choi, J. H., และ Park, K. S., 2011) [6]

การควบคุมแบบฟัซซีลอจิกของระบบสุญญากาศสูงพิเศษสำหรับการวิจัยขั้นสูง ตัวควบคุมได้รับการออกแบบมาเพื่อรักษาความดันและอัตราการไหลในห้องสุญญากาศระหว่างการทดลอง ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบฟัซซีสามารถให้การควบคุมที่แม่นยำและมีเสถียรภาพในสถานะที่มีการรบกวน ถึงแม้ว่าการควบคุมแบบฟัซซีลอจิกจะมีข้อดีมากมาย แต่ก็มีความท้าทายบางประการในการนำไปใช้ในระบบสุญญากาศสูงพิเศษ ตัวอย่างเช่น กฎฟัซซีลอจิกและฟังก์ชันการเป็นสมาชิกจำเป็นต้องได้รับการออกแบบอย่างระมัดระวังและปรับให้เหมาะสมสำหรับแต่ละระบบ ซึ่งอาจใช้เวลานานและต้องอาศัยความเชี่ยวชาญ นอกจากนี้ ไดนามิกของระบบอาจเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป ทำให้ตัวควบคุมฟัซซีลอจิกต้องได้รับการปรับแต่งใหม่เป็นระยะ ๆ (Kim, M. J., และ Lee, J. S., 2008) [26]

การควบคุมแบบฟัซซีของระบบสุญญากาศสำหรับกระบวนการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ในบทความนี้ผู้เขียนใช้การควบคุมฟัซซีเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพความเร็วการสูบและความเสถียรของปั๊มสุญญากาศที่ใช้ในการผลิตเซมิคอนดักเตอร์ ตัวควบคุมแบบฟัซซีจะปรับความเร็วของปั๊มและตำแหน่งวาล์วตามความดันสุญญากาศและอัตราการไหลของก๊าซ ส่งผลให้สภาพแวดล้อมของสุญญากาศมีความเสถียรและมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Lee, H., และ Lee, C., 1999) [31]

การควบคุมลอจิกแบบฟัซซีของระบบสุญญากาศสำหรับการประมวลผลแผ่นเวเฟอร์ใช้การควบคุมแบบฟัซซีเพื่อปรับปรุงความสะอาดและความเสถียรของระบบสุญญากาศที่ใช้ในการแปรรูปแผ่นเวเฟอร์ ตัวควบคุมแบบฟัซซีจะปรับความเร็วของปั๊มและตำแหน่งวาล์วตามระดับความสะอาดและองค์ประกอบของก๊าซในสภาพแวดล้อมของสุญญากาศ ส่งผลให้สภาพแวดล้อมของสุญญากาศสะอาดขึ้นและมีเสถียรภาพมากขึ้น (Choi, J. W., Lee, H. J., Kim, D. J., และ Kim, H. J., 2007) [7]

การควบคุมแบบฟัซซีของหุ่นยนต์สุญญากาศสำหรับการจัดการเวเฟอร์ใช้การควบคุมแบบฟัซซีเพื่อปรับปรุงความแม่นยำและความเสถียรของหุ่นยนต์ดูดฝุ่นที่ใช้ในการจัดการแผ่นเวเฟอร์ Fuzzy Controller จะปรับตำแหน่งของหุ่นยนต์และแรงจับยึดตามตำแหน่งและสภาพพื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์ ส่งผลให้กระบวนการจัดการแผ่นเวเฟอร์มีความแม่นยำและเสถียรยิ่งขึ้น (Hsu, C. F., Chen, Y. H., Lee, C. S., และ Wu, S. M., 2002) [19]

การควบคุมฟัซซีของกริปเปอร์สุญญากาศสำหรับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมใช้การควบคุมฟัซซีเพื่อปรับแรงจับของกริปเปอร์สุญญากาศที่ใช้ในระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม เพื่อปรับให้เข้ากับวัตถุที่แตกต่างกันและให้จำนวนแรงที่เหมาะสม (Hsu, H. T., และ Wu, C. W., 2007) [20]

การควบคุมตรรกะฟัซซีของระบบสุญญากาศสำหรับเครื่องเร่งอนุภาค ใช้การควบคุมฟัซซีเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบสุญญากาศที่ใช้ในตัวเร่งอนุภาค คอนโทรลเลอร์ฟัซซีปรับความดันสุญญากาศเพื่อรักษาสภาพแวดล้อมที่มั่นคงสำหรับอนุภาคและปรับปรุงประสิทธิภาพของตัวเร่งความเร็ว (Jha, S. C., และ Gupta, S. K., 2009) [22]

การควบคุมฟลักซ์ของระบบสุญญากาศสำหรับเตาหลอมแก้ว ใช้การควบคุมฟลักซ์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบสุญญากาศที่ใช้ในเตาหลอมแก้ว คอนโทรลเลอร์ฟลักซ์ปรับระดับสุญญากาศและความดันเพื่อปรับปรุงกระบวนการหลอมละลายและลดการใช้พลังงาน (Zhao, X., และ Wang, Y., 2005) [58]

การศึกษาเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการควบคุมแบบฟลักซ์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพและความเสถียรของระบบสุญญากาศ ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อกระบวนการทางอุตสาหกรรมต่างๆ Fuzzy Logic ให้แนวทางที่ยืดหยุ่นและแข็งแกร่งในการจัดการกับความไม่แน่นอนและความแปรปรวนที่มีอยู่ในระบบสุญญากาศ ทำให้เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์สำหรับการควบคุมและเพิ่มประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของระบบได้

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยใช้โปรแกรม Molflow+

Molflow+ ถูกนำมาใช้ในการจำลองและเพิ่มประสิทธิภาพระบบสุญญากาศสำหรับ เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรง European Spallation Source (ESS) โดยใช้จำลองการไหลของก๊าซในส่วนประกอบสุญญากาศต่าง ๆ เช่น ปัมไอออน ปัมเทอร์โบ และท่อลำเลียง เพื่อประเมินประสิทธิภาพและระบุจุดที่ต้องปรับปรุง (Stipcich, S., Comunian, M., และ Ferianis, M., 2016) [50]

Molflow+ ถูกใช้เพื่อจำลองการไหลของก๊าซในระบบสุญญากาศของเครื่องตรวจจับ Compact Muon Solenoid (CMS) ที่ CERN ประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบและเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบเพื่อลดการปนเปื้อนของก๊าซและปรับปรุงความไวของเครื่องตรวจจับ (Ansari, A. R., Cerqueira, A. S., Lopes, L. F., และ Rufino, J. L., 2019) [2]

Molflow+ ใช้ในการจำลองการแพร่กระจายของฮีเลียมผ่านวัสดุที่ใช้ในระบบสุญญากาศ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุต่าง ๆ ในการป้องกันการรั่วไหลของฮีเลียมและลดการปนเปื้อนในการทดลองทางฟิสิกส์พลังงานสูง (Martinez, J. C., Baccaro, S., Chigiato, P., และ D'Antone, I., 2018) [36]

การจำลองโดยใช้ Molflow+ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบระบบสุญญากาศสำหรับ เครื่องเร่งอนุภาคแนวตรงในทางการแพทย์ โดยจำลองการไหลของก๊าซในส่วนประกอบต่าง ๆ เช่น ปัมไอออนและท่อลำเลียง ทำให้สามารถประเมินประสิทธิภาพในการระบุจุดที่ต้องปรับปรุง (Kikuchi, D., Nishimura, H., Matsuo, K., และ Miyahara, N., 2018) [25]

Molflow+ ใช้ในการจำลองเตาหลอมเหนียวนำสุญญากาศ โดยใช้เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบสุญญากาศและเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการหลอมและลดการใช้พลังงาน (Cui, H., Li, Y., Wang, X., Liu, G., และ Xie, J., 2020) [10]

Molflow+ ถูกใช้จำลองการไหลของก๊าซใน Radio Frequency Quadrupole (RFQ) ของโรงงาน HIE-ISOLDE ที่ CERN ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบสุญญากาศและปรับการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อปรับปรุงการส่งผ่านของไอออนกัมมันตภาพรังสี (Mandry, P., Jones, R. M., Jones, A. M., Pasini, M., และ Voulot, D., 2016) [35]

Molflow+ ถูกใช้ในการจำลองและเพิ่มประสิทธิภาพการไหลของก๊าซในวงแหวนกักเก็บของแหล่งกำเนิดรังสีซินโครตรอน โดยนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของระบบสุญญากาศและปรับการออกแบบให้เหมาะสมเพื่อลดการปนเปื้อนของก๊าซและปรับปรุงคุณภาพของ X-ray spectra (Zhang, Y., Gu, M., Wang, H., Zhang, L., และ Zhang, Y., 2021) [57]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) เป็นการเรียนรู้ของเครื่องจักรและปัญญาประดิษฐ์มานานหลายทศวรรษ ถูกนำไปใช้กับงานที่หลากหลาย เช่น การรู้จำภาพ การพูด และการประมวลผลภาษาธรรมชาติหุ่นยนต์ รวมถึงการพยากรณ์ทางการเงิน เป็นต้น (Goodfellow, I., Bengio, Y., และ Courville, A., 2016) [16]

หนึ่งในแอปพลิเคชันแรก ๆ ของ ANN ถูกนำมาใช้เพื่อจำแนกภาพตัวเลขที่เขียนด้วยลายมือ อัลกอริทึม Multilayer Perceptron (MLP) เป็นหนึ่งในรุ่น ANN ที่ประสบความสำเร็จสำหรับงานนี้ ต่อมาได้มีการพัฒนาแนะนำให้รู้จักกับโครงข่ายประสาทแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network, CNN) จัดเป็น “Deep learning” ประเภทหนึ่ง ซึ่งได้รับประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในงานการจดจำภาพ (LeCun, Y., Bengio, Y., และ Hinton, G., 2015) [30]

ANN ยังถูกนำมาใช้ในงานการประมวลผลภาษาธรรมชาติ เช่น การแปลภาษาและการวิเคราะห์ความเชื่อมั่น (Recurrent Neural Networks, RNN) เป็นประเภทของ ANN ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างแบบจำลองข้อมูลตามลำดับเช่นข้อความ เครือข่ายหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาว (Long Short-Term Memory, LSTM) ซึ่งเป็นตัวแปรของ RNN ได้รับการแสดงเพื่อทำงานได้ดีในการสร้างแบบจำลองภาษาและงานการแปลของเครื่อง (Schmidhuber, J., 2015) [48]

ANN ถูกใช้เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์และทำการจดจำวัตถุ การเรียนรู้การเสริมแรงซึ่งเป็นประเภทของการเรียนรู้ของเครื่องจักรที่ตัวแทนเรียนรู้จะดำเนินการตามสัญญาณรางวัลถูกนำมาใช้เพื่อฝึก ANN สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ (Jurafsky, D., และ Martin, J. H., 2020) [24]

ANN ยังถูกนำไปใช้กับการพยากรณ์ทางการเงินซึ่งนำมาใช้ในการทำนายราคาหุ้นและแนวโน้มของตลาด การทำนายอนุกรมเวลาเป็นแอปพลิเคชันทั่วไปของ ANN ในการเงิน ซึ่งอินพุตเป็น

ลำดับของข้อมูลประวัติและเอาต์พุตเป็นการคาดการณ์ของค่าในอนาคต (Mnih, V., และคณะ, 2015) [38]

ในขณะที่ ANN ได้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่น่าทึ่งในงานที่หลากหลายพวกเขายังมีข้อจำกัด บางประการ การขยายข้อมูลการฝึกอบรมการขาดความสามารถในการตีความและข้อกำหนดการคำนวณและการจัดเก็บข้อมูลจำนวนมากเป็นความท้าทายของ ANN (Hwang, S., และ Lee, S., 2020) [21]

การเรียนรู้แบบการถ่ายโอนเป็นเทคนิคที่ใช้โมเดล ANN ที่ผ่านการฝึกอบรมมาก่อนหน้าเป็นจุดเริ่มต้นสำหรับการฝึกอบรมโมเดลใหม่ในงานที่แตกต่างกัน การเรียนรู้การถ่ายโอนแสดงให้เห็นว่ามีประสิทธิภาพในการลดจำนวนข้อมูลการฝึกอบรมและการคำนวณที่จำเป็นสำหรับงานใหม่ (Pan, S. J., และ Yang, Q., 2010) [43], (Yosinski, J., Clune, J., Bengio, Y., และ Lipson, H., 2014) [54]

ANN อาจเสี่ยงต่อการมีอินพุตที่เป็นอันตรายอาจทำให้การทำนายของโมเดลเข้าใจผิดปรากฏการณ์เช่นนี้ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางและมีการเสนอกฎการป้องกันหลายอย่างเพื่อลดผลกระทบ (Goodfellow, I. J., Shlens, J., และ Szegedy, C., 2014) [17], (Papernot, N., McDaniel, P., และ Goodfellow, I., 2018) [44]

ความสามารถในการอธิบายและการตีความ ANN มักถูกพิจารณาว่าเป็น "กล่องดำ (black boxes)" เพราะเป็นเรื่องยากที่จะเข้าใจว่าการคาดการณ์ของ ANN นั้นเป็นมาอย่างไร นักวิจัยได้ทำงานเกี่ยวกับเทคนิคการพัฒนาเพื่ออธิบายพฤติกรรมของ ANN ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการสร้างความไว้วางใจในการใช้งานในแอปพลิเคชันที่สำคัญ (Lipton, Z. C., 2018) [33], (Molnar, C. 2021) [39]

การคำนวณ Neuromorphic เป็นงานวิจัยที่มีจุดมุ่งหมายในการออกแบบระบบฮาร์ดแวร์ที่เลียนแบบโครงสร้างและการทำงานของเซลล์ประสาทชีวภาพและ synapses สิ่งนี้อาจนำไปสู่ ANN ที่มีประสิทธิภาพและยืดหยุ่นมากขึ้นซึ่งเหมาะกับงานต่างๆ เช่นการควบคุมแบบเรียลไทม์และการตัดสินใจ (Davies, M., และคณะ, 2018) [11], (Merolla, P. A., และคณะ, 2014) [37]

โดยสรุป ANN ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางและนำไปใช้กับโดเมนต่าง ๆ พร้อมผลลัพธ์ที่มีแนวโน้ม การพัฒนาโมเดลและเทคนิคใหม่ของ ANN รวมถึงความก้าวหน้าในฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์มีแนวโน้มที่จะขับเคลื่อนต่อไป

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบตรวจจับความผิดพลาดเสียหายและระบบควบคุมที่คงทนต่อความเสียหาย

FTC คือเทคนิคที่ถูกออกแบบและพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ไขข้อจำกัดของ feedback control เมื่อมีเหตุการณ์ที่ระบบ (plant) เกิดความผิดพลาด (faults: e.g. actuator fault, sensor fault and

component fault) หรือมีสิ่งรบกวนจากภายนอก (external disturbances; e.g. EMI, noise, temperature) เข้ามาทำให้ระบบเสถียรภาพสมดุล (unstable) จนทำให้ทฤษฎีระบบควบคุมแบบเดิม ๆ ไม่สามารถรับมือได้

FTC เป็นระบบควบคุมที่มีความสามารถในการรองรับความผิดพลาดที่เกิดจากส่วนประกอบของระบบโดยอัตโนมัติ กล่าวคือระบบยังคงสามารถทำงานต่อไปได้อย่างเหมาะสม แม้ว่าจะเกิดความผิดปกติหรือความผิดพลาดขึ้นในระบบ โดยมีหลักการทำงานคือระบบจะตรวจสอบและวินิจฉัยความผิดปกติหรือความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ว่าเกิดขึ้นที่ตำแหน่งใด ลักษณะเป็นอย่างไร มีขนาดเท่าไร จากนั้นระบบจะส่งผ่านข้อมูลต่อไปยังชุดควบคุมแบบปรับตัวเองเพื่อปรับปรุงเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม (Controller) ทำให้ระบบสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการต่อไปเท่าที่จะทำได้ โดยปัญหาการประมาณความผิดพลาดโดยใช้ตัวสังเกตการณ์ในการวินิจฉัยข้อผิดพลาดแบบปรับตัวได้ ถูกนำมาใช้กับการประมาณค่าความผิดพลาดแบบปรับตัวได้อย่างรวดเร็ว (fast adaptive fault estimation; FAFE) เพื่อปรับปรุงความเร็วในการประมาณความผิดพลาด โดยอาศัยเทคนิคความไม่เท่าเทียมกันของเมทริกซ์เชิงเส้น (linear matrix inequality; LMI) ด้วยอัลกอริทึมที่ใช้สำรวจในการแก้ปัญหาการออกแบบค่าพารามิเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการตรวจสอบความผิดพลาดของตัวตรวจรู้ด้วยวิธีการ FAFE ที่นำเสนอด้วยผลการจำลองในบทความ (Zhang, K., และคณะ, 2008) [56]

ปัญหาการควบคุมความผิดพลาดเป็นโดเมนของระบบควบคุมที่มีความซับซ้อน ซึ่งจะต้องมีข้อมูลและความชำนาญในการควบคุมประกอบกัน บทความนี้ได้รวบรวมปริทัศน์วรรณกรรมขั้นพื้นฐานที่ครอบคลุมทุกภาคส่วนของการควบคุมความผิดพลาด รวมถึงแสดงทฤษฎีที่มีการศึกษาโดยอิงกับระบบการบินและอวกาศเป็นส่วนใหญ่ พร้อมให้ข้อสรุปและคำแนะนำบางประการที่จำเป็นเกี่ยวกับประเด็นปัญหาในอนาคต ทั้งยังกล่าวด้วยว่า FTC เป็นระบบที่ต้องใช้การบูรณาการหลากหลายสาขาวิชาวิจัยร่วมกันอย่างแท้จริง จึงเป็นเหตุผลให้งานวิจัยที่เกิดขึ้นยังไม่สมบูรณ์ครบถ้วนเต็มที่ เพราะ FTC ไม่ได้เป็นเพียงแค่การยอมรับความผิดพลาด แต่เกี่ยวกับความน่าเชื่อถือ ความมั่นคง และความแข็งแรงของระบบควบคุมที่มีความซับซ้อน ดังนั้นจำเป็นต้องใช้เวลาในการตรวจสอบความต้องการของระบบที่มีข้อผิดพลาดอย่างรอบคอบ (Patton, R. J., 1997) [45]

แนวคิดในการรวบรวมการประมาณความผิดพลาดที่แข็งแกร่งเข้าไว้ภายในระบบควบคุมเพื่อให้เกิดการควบคุมความผิดพลาดที่สามารถปรับตัวได้เป็นเรื่องที่น่าสนใจอย่างมากในงานวิจัยล่าสุด การศึกษาในปัจจุบันมีแรงจูงใจจากความต้องการในการพัฒนาแบบจำลองตามรูปแบบของ FTC สำหรับระบบที่ไม่สมดุลอย่างเป็นเอกลักษณ์และนั่นเป็นเรื่องยากที่จะทำให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้นได้ กลยุทธ์ของระบบเชิงเส้นแปรผันตามพารามิเตอร์มีความเหมาะสมอย่างมากกับการควบคุมบนพื้นฐานของแบบจำลองและการประมาณความผิดพลาดสำหรับในบางระบบ เสถียรภาพและ

สมรรถนะของตัวประมาณระบบเชิงเส้นแปรผันตามพารามิเตอร์แบบหลายความผิดพลาดที่ใช้ในโครงสร้างของ FTC จะได้รับการรับประกันจากการวางตำแหน่งโพลให้อยู่ภายในขอบเขตที่เหมาะสม กลยุทธ์การออกแบบที่นำเสนอนี้แสดงให้เห็นโดยใช้กับระบบแขนหุ่นยนต์แบบสองทิศทางที่ไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีแรงเสียดทานกระทำพร้อมกันในแต่ละข้อต่อ แรงเสียดทานที่ถูกประมาณค่านั้นถือเป็นความผิดพลาดของตัวกระตุ้นในกรณีพิเศษ และผลกระทบเหล่านั้นจะได้รับการชดเชยภายในระบบควบคุมที่เป็นโพลีโทป (Polytope) ส่งผลให้รูปแบบที่แข็งแกร่ง FTC แบบปรับตัวได้ใช้งานง่ายกับระบบหุ่นยนต์จริง (Patton, R. J., และคณะ, 2012) [46]

หัวใจสำคัญของยุทธศาสตร์การออกแบบ FTC สำหรับระบบ LTI แบบหลายตัวแปร คือ การบูรณาการนำเทคนิคการตรวจสอบและระบุความผิดพลาด (Fault Detection And Isolation; FDI) มาใช้ในการวิเคราะห์ความผิดพลาดอย่างชัดเจน วิธีการออกแบบเช่นนี้เป็นที่รู้จักกันดีและใช้กันอย่างแพร่หลายในชื่อของการทำให้ระบบควบคุมมีความแข็งแกร่งทน วิธีการออกแบบ FTC สามารถทำได้อย่างอิสระจากตัวควบคุมเดิมที่มีอยู่ในระบบ นั้นหมายความว่าการทำงานของระบบ FTC ที่นำเสนอนี้สามารถชดเชยความผิดพลาดที่เกิดขึ้นด้วยดำเนินการปรับปรุง เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของชุดควบคุมได้อย่างเหมาะสมเมื่อ FDI พบความผิดพลาดในระบบ (Cieslak, J., และคณะ, 2006) [9]

การออกแบบระบบควบคุมความผิดพลาด (FTC) สำหรับระบบเครือข่ายที่ความซับซ้อนและขนาดใหญ่ (networked control systems; NCS) เป็นงานที่ยาก เนื่องจากมีตัวตรวจรู้และตัวกระตุ้นเป็นจำนวนมากที่เชื่อมต่อกันในระบบเป็นเครือข่าย แม้จะมีความพยายามในการวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบ FTC ก็ตาม การพัฒนาเหล่านี้ส่วนใหญ่ได้รับการออกแบบชุดควบคุมผ่านภาพรวมของทั้งระบบซึ่งไม่เพียงพอต่อการแก้ปัญหาของ FTC แบบรวมศูนย์ใน NCS บทความนี้ได้นำเสนอเครื่องมือที่อาศัยหลายตัวแทนระบบเพื่อใช้ในการออกแบบระบบ FTC สำหรับ NCS เป็นครั้งแรก (Sá da Costa, J., และคณะ, 2007) [47]

ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมได้มีกลยุทธ์ใหม่สำหรับระบุความผิดพลาดที่ปรากฏขึ้น โดยอาศัยความต่างของค่า residual ในระบบ ซึ่งเริ่มจากกำหนดให้ระบบมีค่า residual เท่ากันหากไม่พบความผิดปกติใด ๆ และมีค่าแตกต่างกันเมื่อตรวจพบข้อผิดพลาดขึ้น จากนั้นกำหนดรูปแบบการแยกความผิดพลาดแต่ละประเภทของกระบวนการด้วยอัตราส่วนที่เหลือของค่า residual เพื่อบรรลุการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีการที่เหมาะสมจากการวิเคราะห์วิวัฒนาการความผิดพลาดตามดัชนีที่คำนวณได้นี้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับวิศวกรที่จะหาที่มาของผิดพลาดนั้นได้อย่างถูกต้อง (Wang, J., และคณะ, 2016) [52]

การนำระบบการควบคุมความผิดพลาดมาใช้เพื่อรองรับการทำงานผิดพลาดของตัวกระตุ้น (actuator) และหรือความผิดพลาดอันเกิดจากตัวตรวจรู้ (sensor) ที่แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการ

ทำงานของกระบวนการลดลงอย่างเห็นได้ชัด เทคนิคการตรวจสอบและระบุความผิดพลาด (Fault Detection And Isolation; FDI) ด้วยแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจากการอาศัยความเข้าใจในข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับพฤติกรรมของกระบวนการผ่านชุดตัวกรองคาลมานที่มีข้อจำกัด และประเมินค่าประสิทธิภาพของตัวกระตุ้นและหรือตัวตรวจรู้ที่ผิดพลาดในกรณีที่เกิดการรบกวนระบบ การออกแบบตัวควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนได้ โดยแสดงผลจากการจำลองระบบเมื่อเกิดความผิดพลาดของตัวกระตุ้น (Nabil, E และคณะ, 2010) [40]

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในกระบวนการอัตโนมัติ มักจะทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่พึงประสงค์และอาจนำไปสู่การหยุดชะงักการทำงานของระบบ นั่นอาจก่อให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ บุคลากร และสิ่งแวดล้อมของระบบได้ การควบคุมความผิดพลาดรวมถึงการวินิจฉัยด้วยระเบียบวิธีการควบคุมเพื่อจัดการกับความผิดพลาดอย่างชาญฉลาด มีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความผิดพลาดแบบง่าย ๆ ที่จะก่อให้เกิดขึ้นเป็นความล้มเหลวอย่างร้ายแรง ในขณะที่เดียวกันก็เพื่อเพิ่มความพร้อมของระบบและลดความเสี่ยงของอันตรายหากเกิดความผิดพลาดขึ้น FTC เป็นการรวบรวมศาสตร์ระบบควบคุมที่หลากหลายเพื่อควบคุมให้บรรลุเป้าหมายดังกล่าว ระบบจะได้รับการตรวจสอบและวินิจฉัยความผิดพลาดอย่างอัตโนมัติและดำเนินการแก้ไขข้อผิดพลาดอย่างเหมาะสมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบบางอย่างของความผิดพลาด ในการแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นทำได้อย่างหลากหลาย ในบางครั้งการแก้ไขก็เป็นไปอย่างง่ายตายซึ่งขึ้นอยู่กับระดับความซับซ้อนในกระบวนการควบคุม ในบางกรณีสามารถวัดความผิดพลาดได้ด้วยการประมาณแทนการวัดจากตัวตรวจรู้เช่นเซอร์ที่ไม่ถูกต้องหรือบางกรณีมีความจำเป็นต้องปรับปรุง เปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่ซับซ้อนหรือออกแบบตัวควบคุมใหม่ (Blanke, M. และคณะ, 2001) [3]

วิธีการควบคุมความผิดพลาดที่อธิบายไว้ในบทความนี้กล่าวถึงความผิดพลาดอันเกิดจากตัวกระตุ้นและของตัวตรวจรู้เอง ซึ่งมักส่งผลกระทบต่อระบบอัตโนมัติทำให้สูญเสียประสิทธิภาพของตัวดำเนินการหรือการตรวจวัดผิดพลาด โดยมีจุดประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการประมาณค่าและวิธีการชดเชยความผิดพลาดของตัวกระตุ้นและตัวตรวจรู้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการตรวจจับและแยกแยะความผิดปกติที่เกิดขึ้นได้แล้วนั้นจะลดผลกระทบที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อระบบได้โดยง่าย และการควบคุมกระบวนการจะกลับมาทำงานอีกครั้ง อย่างไรก็ตามขีดจำกัดของวิธีการนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการสูญเสียของตัวกระตุ้นโดยสมบูรณ์ กรณีเช่นนี้ผู้ใช้ทำได้เพียงสำรองฮาร์ดแวร์หรือส่วนประกอบของระบบที่มีประสิทธิภาพไว้เท่านั้นเพื่อเป็นการรับประกันความน่าเชื่อถือของประสิทธิภาพในระบบควบคุม (Noura, H., และคณะ, 2000) [42]

เนื่องด้วยประสิทธิภาพของระบบควบคุมขึ้นอยู่กับความสามารถและความคล่องตัวของชุดควบคุมที่มีอยู่ในระบบ ส่งผลให้ระบบควบคุมนั้นมีประสิทธิภาพการทำงานเท่ากับขีดจำกัดสูงสุดของตัวกระตุ้น ระบบควบคุมยังคงทำงานต่อไปได้หากเกิดความผิดพลาดขึ้นกับตัวกระตุ้นบางตัว

ตัวกระตุ้นที่เหลือควรมีการจัดการเลือกใช้อย่างชาญฉลาดเพื่อให้ระบบควบคุมอยู่ในสภาพที่ปลอดภัยจนกว่าภารกิจเสร็จสิ้น ในขณะที่เดียวกันตัวตรวจรู้ถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบควบคุม ความล้มเหลวของตัวตรวจรู้ย่อมจะนำไปสู่การตัดสินใจในการควบคุมที่ผิดพลาด ซึ่งอาจเป็นอันตรายต่อการทำงานของระบบทั้งหมด เพราะว่าตัวตรวจรู้ให้ข้อมูลที่จำเป็นสำหรับตัวควบคุมและตัวกระตุ้น แม้จะไม่มีส่วนร่วมโดยตรงในการควบคุมก็ตาม ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ตัวตรวจรู้หลายตัวเพื่อตรวจสอบสถานะการทำงานของกันและกัน ถือว่ายังเป็นการเพิ่มความน่าเชื่อถือโดยรวมของระบบการวัดอีกด้วย ซึ่งแนวโน้มในอนาคตปัจจุบันมักเลือกใช้ตัวตรวจรู้แบบอัจฉริยะที่มีความสามารถในการตรวจสอบด้วยตนเองแล้วด้วย (Jiang, J., 2005) [23]

การสั่งงานมุมใบพัดของกังหันลมให้เป็นไปตามที่ต้องการอย่างแม่นยำมีความจำเป็นสำหรับระบบควบคุมกังหันลมอย่างมากเพื่อให้ได้คุณสมบัติของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าอย่างเหมาะสมและสมบูรณ์แบบที่ว่าด้วยอัตราความเร็วรอบต้องอยู่ในระดับที่มาตรฐานกำหนดคือบริเวณพื้นที่การทำงานที่สาม ในระบบควบคุมแกนหมุนของกังหันลมสามารถเกิดความผิดพลาดขึ้นได้ง่าย ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบที่ไม่เหมาะสมหรือแม้แต่การสั่นสะเทือนของกังหันลมเอง ทำให้ระบบกังหันลมไม่เสถียรและไม่ปลอดภัย วิธีควบคุมความผิดพลาดที่นำเสนอนี้ใช้กลยุทธ์ของ FTC ร่วมกับตัวควบคุมพีโอแบบดั้งเดิมพร้อมชดเชยความผิดพลาดของตัวกระตุ้นระยะพิทช์ (pitch) เพื่อกู้คืนสู่ค่าระยะพิทช์ที่มีประสิทธิภาพ โดยการปรับโหมดการเคลื่อนแบบทีละขั้นตอน ซึ่งสามารถจัดการกับความผิดพลาดแบบไม่เชิงเส้นได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยการออกแบบที่เรียบง่าย ประสิทธิภาพของกลยุทธ์การออกแบบนี้ได้รับการยืนยันด้วยผลการทดลองในระบบกังหันลมที่ยอมรับและเชื่อถือได้ (Lan, J., และคณะ, 2016) [29]

สำหรับระบบที่ไม่สมดุลงเชิงเส้นมีรูปแบบการปรับจูนค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ซ้ำกัน เช่นระบบหุ่นยนต์ที่มีหลายจุดเชื่อมต่อ ระบบ FTC แบบดั้งเดิมจะไม่สามารถชดเชยความผิดพลาดผ่านการประมาณค่าด้วยวิธีการเชิงเส้นแบบไม่แปรเปลี่ยนตามเวลาได้โดยง่าย บทความนี้จึงเสนออยู่ทวิธี FTC ที่ใช้ตัวประมาณความผิดพลาดแบบปรับตัวได้บนพื้นฐานการควบคุมผ่านแบบจำลองอ้างอิง (model reference control; MRC) ความแปลกใหม่อยู่ที่การประมาณความผิดพลาดแบบออนไลน์และการออกแบบ FTC ที่ใช้กับระบบแบบจำลองอ้างอิง ในการออกแบบแบบจำลองอ้างอิงจะดำเนินการด้วยระเบียบวิธีการวางตำแหน่งโพล และการออกแบบประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ถูกสังเคราะห์ผ่านเมทริกซ์ของอสมการเชิงเส้น (Linear Matrix Inequalities; LMI) (Nie, C., และคณะ, 2011) [41]

ชุดควบคุมที่มีความสามารถในการรองรับความผิดพลาดได้นั้น กำลังเป็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมีบทบาทสำคัญในการรักษาความปลอดภัยของระบบเทคโนโลยีที่ทันสมัย ระบบ FTC มีพื้นฐานมาจากการวิเคราะห์ความต้องการของระบบที่ให้ความสำคัญกับด้านความปลอดภัยเป็นอย่างสูง การพัฒนาของวิธีการ FTC แบบพาสซีฟมีทั้งข้อดีและข้อเสียเมื่อพิจารณาตามข้อกำหนด

ด้านความปลอดภัยที่ต้องการ ความก้าวหน้าล่าสุดของวิธีการออกแบบ FTC แบบปรับตัวได้คือมีการตรวจสอบเป็นลำดับขั้นตอนในการตรวจหาและวินิจฉัยข้อผิดพลาด (fault detection and diagnosis; FDD) มีความสามารถในการควบคุมการกำหนดค่าใหม่และมีการรวมกันใหม่อีกครั้งของทุกองค์ประกอบในระบบควบคุม บทความนี้สรุปไว้ว่าต่อไปประเด็นด้านความปลอดภัยจะเป็นกุญแจสำคัญในการพัฒนาชุดควบคุม FTC ในอนาคต (Yu, X., และคณะ, 2015) [55]

ฝ่ายเทคโนโลยีเครื่องเร่งอนุภาคและฝ่ายเทคนิคและวิศวกรรมของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน อาศัยหลักการและทฤษฎีระบบควบคุมที่เรียกว่า Fault-Tolerant Control (FTC) ในการออกแบบและพัฒนาระบบควบคุมตำแหน่งของลำอิเล็กตรอน ในเดือนสิงหาคม 2555 ที่ผ่านมามีสถาบันฯ ประสบความสำเร็จในการควบคุมลำอิเล็กตรอนได้ดีกว่า 5 ไมครอน ในช่วงเวลา 11 ชั่วโมงของการให้บริการ โดยใช้เทคนิค FTC ดังกล่าวฯ FTC ยังได้แสดงให้เห็นว่า ถึงแม้อุณหภูมิภายในอาคารปฏิบัติการแสงสยามจะเพิ่มสูงขึ้นถึง 2-3 องศาเซลเซียส ระบบควบคุม (controller) ที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้น ยังสามารถรักษาเสถียรภาพและควบคุมการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนได้เป็นอย่างดี แต่ในทางกลับกันเมื่อไม่มีระบบ FTC ดังกล่าวฯ อิเล็กตรอนภายในวงแหวนกักเก็บฯ มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปมากกว่า 40 ไมครอน ทั้งแนวแกน X และ Y ภายในเวลาเพียงแค่หนึ่งชั่วโมง (Klinkhieo, S. และคณะ, 2012) [28]

จากการศึกษาผลงานวิจัยที่น่าเสนอในปรัทัศน์วรรณกรรมข้างต้นพบว่าระบบสุญญากาศมีความจำเป็นและสำคัญต่อการพัฒนาคุณภาพชีวิตในทุกภาคส่วน ในขณะที่เดียวกันการควบคุมความดันสุญญากาศให้อยู่ในระดับสูงพิเศษนั้นเป็นเรื่องที่ยากและต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง จึงทำให้ชุดควบคุมความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษมีราคาสูงมากและยังคงต้องนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ด้วยเหตุผลเหล่านี้ทำให้การควบคุมความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษภายในท่อเร่งอนุภาคนั้นมีความซับซ้อนและยุ่งยากจึงเป็นประเด็นกระตุ้นความสนใจของผู้วิจัยที่จะศึกษาพัฒนาการออกแบบระบบควบคุมความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษภายในท่อเร่งอนุภาคที่สามารถตรวจสอบ วิเคราะห์ วินิจฉัย ค่าความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบได้อย่างอัตโนมัติ ด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิค FDD และ FTC ร่วมกับการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีในระบบสุญญากาศ เพื่อพัฒนาระบบควบคุมความดันสุญญากาศให้มีความเสถียร แม่นยำและน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

2.7 สรุป

จากปรัทัศน์วรรณกรรมที่ศึกษาได้นำเสนอหลักการการทำงานของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน การออกแบบและประยุกต์ใช้ระบบควบคุมฟัซซีลอจิก หลักการทำงานของระบบควบคุมที่มีความสามารถในการคงทนต่อความผิดพลาด ประโยชน์จากการใช้โครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยต่าง ๆ และการใช้งาน Molflow+ ซอฟต์แวร์เพื่อการศึกษาพฤติกรรมความดันสุญญากาศ ซึ่งเกี่ยวข้อง

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องการควบคุมรักษาระดับความดันสุญญากาศ UHV ในระบบโดยใช้ตัวควบคุมพีซีซึ่งมีความเหมาะสมกับลักษณะการทำงานของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน การเรียนรู้พฤติกรรมความดันสุญญากาศในระบบผ่าน Molflow+ ซอฟต์แวร์ การประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมในการสร้างแบบจำลองระบบสุญญากาศ รวมถึงความต้องการให้ระบบควบคุมที่ออกแบบมีความสามารถในการตรวจพบและวินิจฉัยข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในระบบได้ ระบบควบคุมสามารถชดเชยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เกิดระเบียบวิธีการวิจัยเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์นี้ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

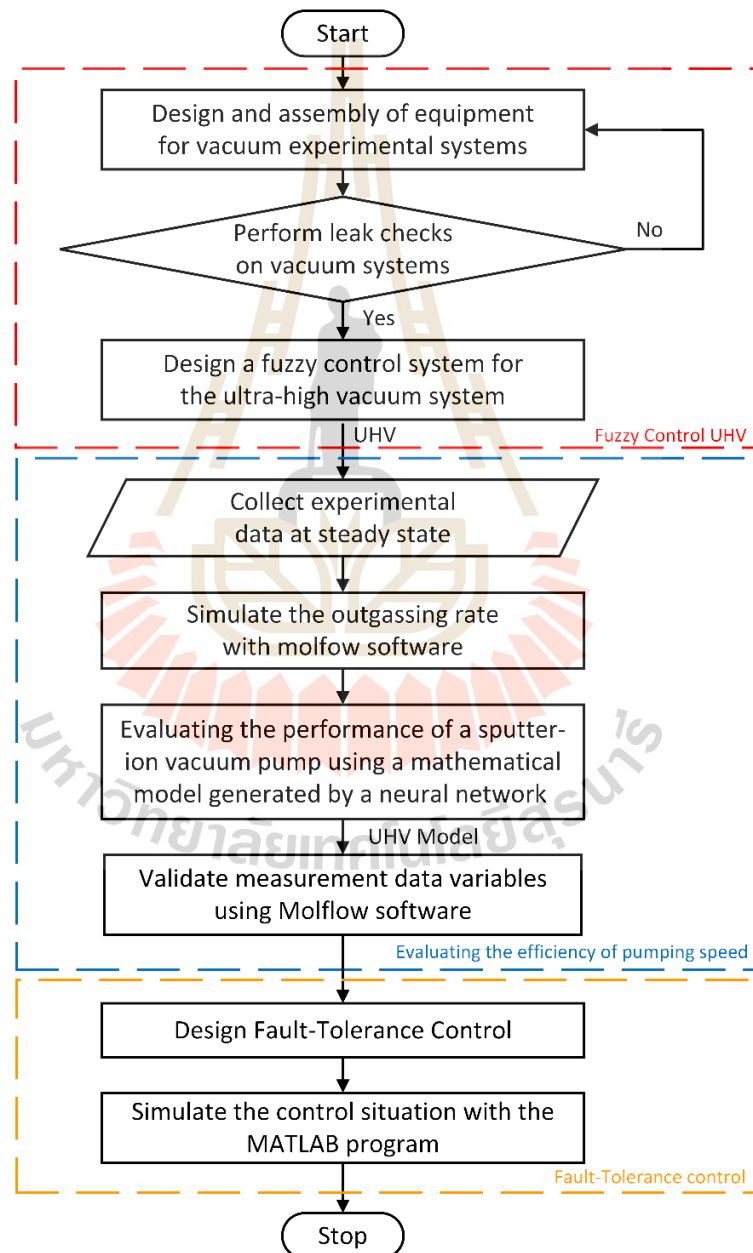
3.1 บทนำ

จากความมุ่งหมายของผู้วิจัยที่สนใจศึกษาและวิจัยระบบควบคุมเพื่อรักษาค่าความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน เพื่อรักษาเสถียรภาพของระบบ เพิ่มความเชื่อมั่น และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน จากปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในบทที่ 2 ผู้วิจัยจึงมีกรอบแนวคิดในการดำเนินการวิจัยโดยได้ศึกษาระบบควบคุมแบบคลุมเครือหรือทฤษฎีฟัซซีลอจิกเพื่อใช้ในการควบคุมการทำงานของปั๊มแบบสปีดเตอร์โอออนโดยสั่งการแบบเรียลไทม์บนโปรแกรม LabView เชื่อมต่อกับอุปกรณ์ควบคุมการทำงานของปั๊ม ผลของการควบคุมเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้ นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มแบบสปีดเตอร์โอออนด้วยสร้างแบบจำลองจากโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+ ความถูกต้องของแบบจำลองในการทำนายค่าความเร็วในการสูบของปั๊มจะทดสอบกับข้อมูลการทดลองจริงของระบบสุญญากาศในสถานะคงตัว ซึ่งทำให้สามารถทราบประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มได้นั่นเอง และด้วยระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษมีความสำคัญยิ่งสำหรับการลำเลียงแสง การป้องกันความเสียหายของระบบสุญญากาศต่อปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าความดันสุญญากาศจึงเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ เช่น อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ค่าความดันในท่อลำเลียงแสงมีค่าสูงขึ้น เป็นต้น ผู้วิจัยจึงศึกษาและออกแบบระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศให้มีความสามารถคงทนต่อข้อผิดพลาดได้ในขีดความสามารถของระบบอีกด้วย เพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุง แก้ไขระบบต่อไป

3.2 วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นสามประเด็นหลักกล่าวคือ การควบคุมค่าความดันในระดับ UHV ผ่านการออกแบบตัวควบคุมแบบคลุมเครือหรือทฤษฎีฟัซซี ประเด็นถัดมาคือการประเมินประสิทธิภาพของความเร็วปั๊มโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+ และในประเด็นหลักสุดท้ายคือการควบคุมค่าความดันสุญญากาศที่มีความสามารถคงทนต่อข้อผิดพลาดสำหรับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์โอออนที่มีปฏิริยาต่อกัน โดยเริ่มต้นด้วยการเตรียมระบบทดสอบ ขั้นตอนการสร้างสุญญากาศ การทดสอบรอยรั่วในระบบสุญญากาศ การออกแบบตัวควบคุมฟัซซี การควบคุมค่าความดันสุญญากาศแบบเรียลไทม์ผ่านโปรแกรม Labview การเก็บข้อมูลค่าความดันในตำแหน่งต่าง ๆ ของการ

ทดลองในสภาวะคงตัวจะถูกรวบรวมเพื่อสร้างแบบจำลองในการประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนโดยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+ จากนั้นเป็นการจำลองสถานการณ์ระบบควบคุมที่มีความสามารถทนต่อข้อผิดพลาดสำหรับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนที่มีปฏิสัมพันธ์กันด้วยโปรแกรม Molflow+ ซึ่งขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังที่กล่าวมาข้างต้นแสดงเป็นแผนภูมิได้ดังรูปที่ 3.1 ผู้วิจัยได้แบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ส่วนหลัก ๆ โดยสามารถอธิบายขั้นตอนโดยสังเขป ดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนภูมิการดำเนินการวิจัย

3.3 ระบบสุญญากาศ

ในทางฟิสิกส์วิทยาศาสตร์ สุญญากาศหมายถึงพื้นที่หรือบริเวณที่ว่างเปล่าของสสาร รวมทั้งโมเลกุลของอากาศและอนุภาคอื่น ๆ เป็นสถานะที่มีความกดอากาศต่ำมาก โดยที่มีค่าความดันต่ำกว่าความดันบรรยากาศอย่างมาก แต่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่จะได้พื้นที่ว่างที่สมบูรณ์แบบโดยไม่มีสสารหรือโมเลกุลและอนุภาคใด ๆ เนื่องจากจะมีโมเลกุลของก๊าซหรืออนุภาคอื่น ๆ หลงเหลืออยู่เสมอ อย่างไรก็ตาม นักวิทยาศาสตร์ได้พัฒนาวิธีการสร้างสภาพแวดล้อมที่มีความดันต่ำมาก เช่น สภาพแวดล้อมที่พบในห้องสุญญากาศหรือในอวกาศซึ่งมีความหนาแน่นของอนุภาคต่ำมาก สุญญากาศมีความสำคัญในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์หลายสาขา รวมถึงอิเล็กทรอนิกส์ ทัศนศาสตร์ และวัสดุศาสตร์ นอกจากนี้ ยังใช้ในการใช้งานในชีวิตประจำวันหลายอย่าง เช่น เครื่องดูดฝุ่น หลอดไฟฟลูออเรสเซนต์ และบรรจุภัณฑ์อาหารแบบซีลสุญญากาศ เช่นเดียวกับในงานวิจัยที่มีความจำเป็นต้องบรรลุความดันสุญญากาศในระดับสูงพิเศษ (Ultra-High Vacuum, UHV) ซึ่งหมายถึงสภาพแวดล้อมที่มีความดันต่ำมาก ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความดันจะน้อยกว่า 10^{-9} ทอร์ นี่คือระดับของสุญญากาศที่ยากยิ่งต่อการรักษาและบำรุงรักษา เป็นงานที่ซับซ้อนและท้าทายอย่างมาก โดยต้องใช้อุปกรณ์และเทคนิคพิเศษจำนวนมาก เช่น ปั๊มสุญญากาศ ห้องสุญญากาศ เกล็ดความดัน ตลอดจนการทำความสะอาดอย่างระมัดระวังและการจัดการส่วนประกอบทั้งหมดเพื่อป้องกันการปนเปื้อน ยังรวมถึงการลดปริมาณการปล่อยก๊าซออกจากวัสดุในระบบให้น้อยที่สุด การควบคุมอุณหภูมิของระบบ และการใช้เทคนิคพิเศษเพื่อหลีกเลี่ยงการนำก๊าซใหม่หรือสารปนเปื้อนเข้าสู่สภาพแวดล้อมที่เป็นสุญญากาศ เมื่อบรรลุสภาพความเป็น UHV แล้วจึงสามารถเข้าสู่กระบวนการทดลองต่อไปได้ ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงการสร้างระบบสุญญากาศซึ่งจะอธิบายถึงเทคโนโลยีสุญญากาศ อุปกรณ์ ขั้นตอนการสร้างระบบทดลองสุญญากาศ รวมถึงการตรวจสอบรอยรั่วไหลในระบบทดลองสุญญากาศ ในงานวิจัยนี้

3.3.1 เทคโนโลยีสุญญากาศ

สุญญากาศ (Vacuum) คือปริมาตรของช่องว่างซึ่งไม่มีสสารใดอยู่ภายใน กล่าวได้ว่าเป็นปริมาตรที่มีความดันก๊าซน้อยกว่าความดันบรรยากาศมาก ๆ จนกลายเป็นพื้นที่ที่ควบคุมที่ไม่มีก๊าซหรือไอ นั่นคือแนวคิดในทางอุดมคติ ในความเป็นจริงไม่สามารถทำให้ปริมาตรของช่องว่างใด ๆ ว่างเปล่าได้โดยมีความดันก๊าซเป็นศูนย์ ที่เรียกว่าสุญญากาศสมบูรณ์ (perfect vacuum) ทำได้เพียงให้มีอากาศเหลือน้อยที่สุดเท่านั้น นักฟิสิกส์จึงใช้คำว่าสุญญากาศแทนสุญญากาศสมบูรณ์ และใช้คำว่าสุญญากาศบางส่วน (partial vacuum) แทนสุญญากาศที่เกิดขึ้นได้จริง คุณภาพของสุญญากาศวัดจากความดันของก๊าซที่เหลืออยู่จากระดับสถานะที่เข้าใกล้สุญญากาศสมบูรณ์ ความดันก๊าซยิ่งเหลือน้อยหมายถึงคุณภาพยิ่งมากขึ้น อวกาศเป็นสภาพสุญญากาศที่มีคุณภาพสูงโดยธรรมชาติ และสุญญากาศที่มีคุณภาพสูงกว่านั้นสามารถสร้างขึ้นได้ด้วยเทคโนโลยีปัจจุบัน สำหรับสุญญากาศ

คุณภาพต่ำได้ถูกใช้เพื่อการดูดและการสูบลมมากกว่าหลายพันปีแล้ว ก๊าซจะมีพฤติกรรมที่สมบูรณ์แบบ ก็ต่อเมื่อเป็นดังสมมติฐานที่ว่าโมเลกุลในสถานะก๊าซไม่มีแรงกระทำต่อกันไม่ว่าจะเป็นแรงดึงดูดหรือแรงผลักร และปริมาตรของโมเลกุลมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับปริมาตรของภาชนะ ก๊าซจะแสดงพฤติกรรมที่เป็นไปตามกฎของก๊าซในอุดมคติที่ว่า

$$PV = nRT \quad (3.1)$$

เมื่อ P คือ ความดัน มีหน่วยเป็น $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$

V คือ ปริมาตร มีหน่วยเป็น m^3

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ มีค่าเท่ากับ $8.3144621 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$

T คือ อุณหภูมิ มีหน่วยเป็น K

n คือ จำนวนโมลในปริมาตร

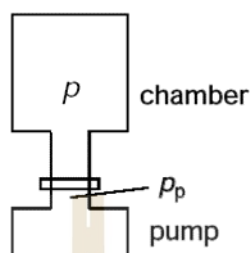
แต่ก๊าซจริงไม่ได้มีพฤติกรรมเหมือนกับสมการที่ (3.1) เสมอต้นเสมอปลาย ดังนั้น จะไม่สามารถใช้ได้ในทุกสภาวะ เช่น ถ้าความดันสูงมาก ๆ โมเลกุลของก๊าซจะอยู่ใกล้ชิดกันมากจนถึงระดับหนึ่งก็จะเกิดแรงดึงดูดและยึดเหนี่ยวกันจนก๊าซกลายเป็นของเหลวในที่สุด ซึ่งไม่เป็นจริงตามสมมติฐานที่กล่าวว่ามีโมเลกุลในสถานะก๊าซไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล ก๊าซก็จะควบแน่นเป็นของเหลวไม่ได้ เป็นต้น

ก๊าซเป็นของไหลที่สามารถบีบอัดได้ (compressible fluid) ซึ่งไม่เหมือนกับของเหลว นั่นคือไม่เพียงแต่เปลี่ยนแปลงรูปร่างไปตามภาชนะได้เท่านั้น แต่ยังสามารถเพิ่มปริมาณการบรรจุเข้าไปในภาชนะได้อีก อนุภาคของก๊าซอยู่ในตำแหน่งที่ไม่แน่นอนและไม่เป็นระเบียบ มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคน้อยมากเนื่องจากอนุภาคของก๊าซอยู่ห่างกันมาก เมื่อสารถูกเปลี่ยนจากของแข็งหรือของเหลวเป็นก๊าซจะเรียกว่า ไอ (Vapor) และก๊าซเป็นสสารที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าของแข็งและของเหลว ดังนั้นจึงแสดงการไหลในรูปของจำนวนโมเลกุลต่อเวลา มีหน่วยเป็น ลิตร/นาที่ ไม่ใช่ปริมาตรต่อเวลา เนื่องจากมีปริมาตรไม่แน่นอนโดยจะแพร่กระจายเต็มภาชนะที่บรรจุเพราะอนุภาคเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็ว ดังสมการที่ (3.2)

$$Q = \frac{dN}{dt} \propto P \frac{dV}{dt} \equiv PS \quad (3.2)$$

และ $N \propto PV \quad (3.3)$

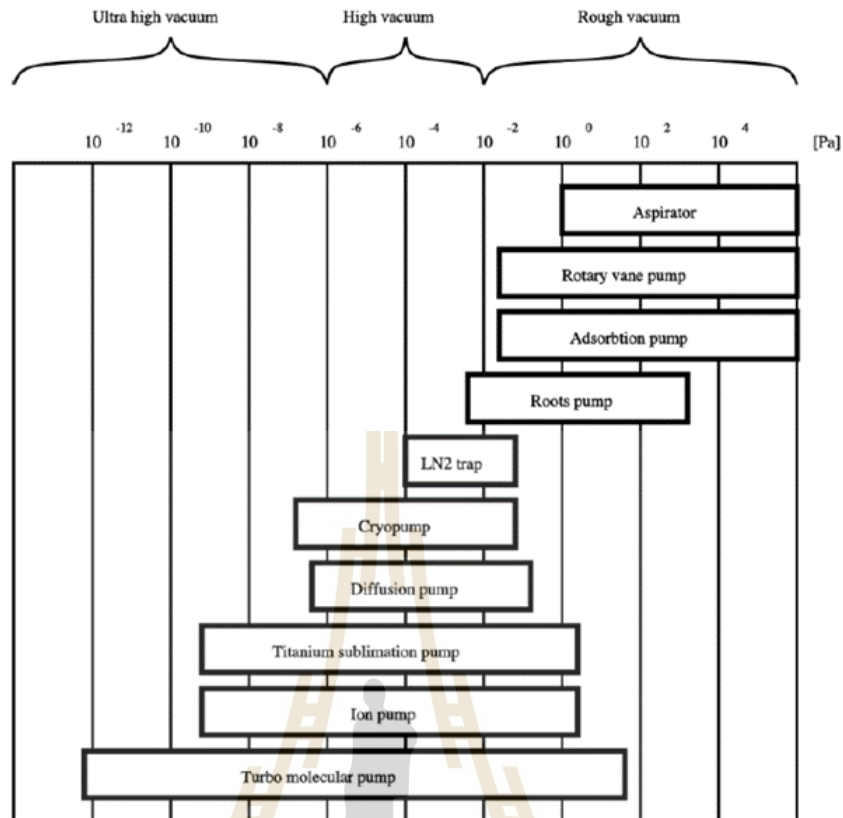
การไหลของก๊าซที่มีองค์ประกอบของค่าความนำภายในสุญญากาศ (Conductance, C) และค่าความแตกต่างของความดันระหว่างรอยต่อปริมาตรสุญญากาศ แสดงได้ดังสมการที่ (3.4) และในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 โครงสร้างของปั๊มทั่วไป³

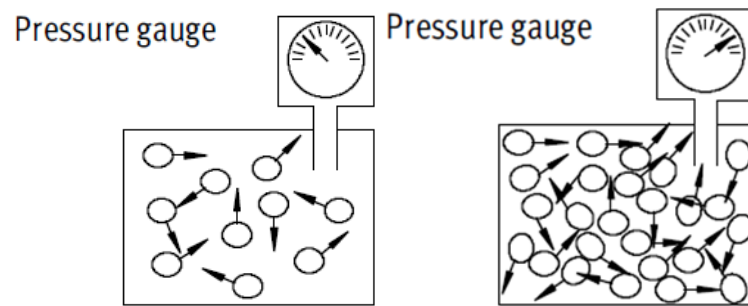
$$Q = C(p - p_p) \quad (3.4)$$

ช่วงความดันในการทำงานของปั๊มสุญญากาศแต่ละประเภทจะมีความเหมาะสมแตกต่างกัน เช่น ที่ความดันสูงปั๊มสุญญากาศต่ำมักไม่ทำงานและยังทำให้ระบบปนเปื้อนอีกด้วย ในขณะที่ปั๊มบางชนิดที่เหมาะสมกับช่วงความดันสุญญากาศสูงก็จะทำให้เกิดการปนเปื้อนหากใช้งานที่ความดันต่ำ โดยปกติปั๊มจะทำงานได้ดีถ้าเลือกใช้งานภายในช่วงความดันที่แนะนำดังรูปที่ 3.3

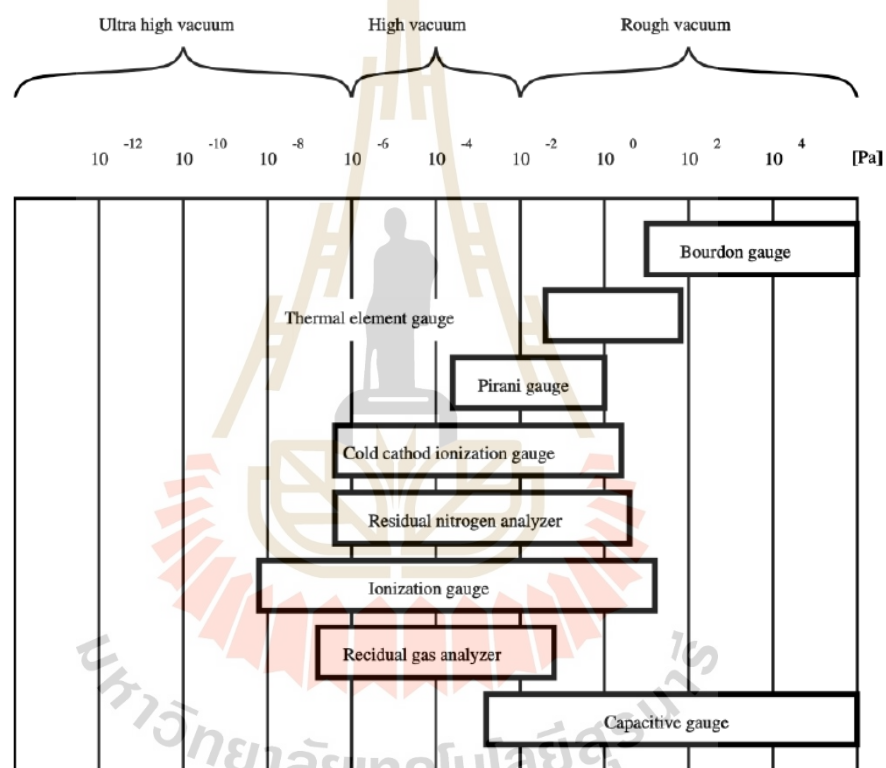


รูปที่ 3.3 ช่วงความดันการทำงานสำหรับปั๊มสุญญากาศชนิดต่าง ๆ (Xia, C., และ Zhu, J., 2013) [53]

จากรูปที่ 3.3 แสดงให้เห็นว่าการใช้งานปั๊มตัวใดตัวหนึ่งเพียงตัวเดียวไม่สามารถทำให้จากความดันบรรยากาศเป็นสุญญากาศระดับสูงหรือสูงพิเศษได้ จำเป็นต้องใช้ปั๊มอย่างน้อยสองตัวหรือมากกว่าเพื่อให้ได้ความดันสุญญากาศตามต้องการและรักษาระดับความดันนั้นไว้ เช่นเดียวกันกับการใช้เครื่องมือวัดสุญญากาศที่มีหลักการวัดความเป็นสุญญากาศจากจำนวนโมเลกุลในห้องที่อุณหภูมิคงที่ ก็จะมีย่านการวัดความดันต่ำที่เหมาะสมในแต่ละชนิดของเครื่องมือวัด ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.4 และรูปที่ 3.5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.4 การอ่านค่าความดันจากเครื่องมือวัดสุญญากาศ⁴



รูปที่ 3.5 ช่วงความดันสำหรับมาตรวัดชนิดต่าง ๆ (Xia, C., และ Zhu, J., 2013) [53]

ระบบสุญญากาศไม่ได้มีเพียงแต่ตัวปั๊มเองเท่านั้น แต่ยังประกอบด้วยท่อและวาล์วจำนวนมาก แต่ละการไหลในท่อสุญญากาศ อธิบายได้จากสมการที่ (3.5)

$$Q = P_1 S_1 = P_2 S_2 \quad (3.5)$$

แหล่งที่มา; ⁴ http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?pageid=20&bookID=1043&read=true&count=true

สอดคล้องกับการไหลผ่านของก๊าซที่ต่อเนื่องกันแต่ละจำนวนท่อตามลำดับ ข้ามผ่านส่วนที่ 1, 2 ไปจนถึงส่วนที่ n ความแตกต่างของความดันระหว่างรอยต่อของท่อ $P_1 - P_2$ คือสัดส่วนของก๊าซที่ไหลผ่านท่อ (S_p) และความต้านทานของท่อ (W) อธิบายได้ดังสมการที่ (3.6)

$$P_1 - P_2 = S_p \cdot W \quad (3.6)$$

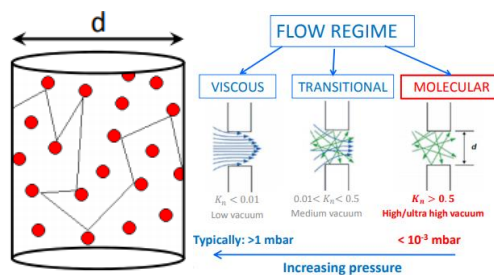
ในทางปฏิบัติความเร็วการสูบของปั๊ม (S) ไม่คงที่สำหรับทุก ๆ การผ่านแต่ละส่วน สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปั๊มที่ทางเข้าของท่อ (S_1) ที่ทางออก (S_2) และความต้านทาน (W) หรือความนำ (C) ของท่อได้จากสมการที่ (3.7)

$$S_1 = \frac{1}{\frac{1}{S_2} + W} = \frac{1}{\frac{1}{S_2} + \frac{1}{C}} \quad (3.7)$$

ระบบการไหล แสดงได้ด้วยเลขของ Knudsen ที่สามารถบอกประเภทการไหลของก๊าซ ดังในรูปที่ 3.6 และสมการที่ (3.8)

$$K_n = \frac{l}{d} \quad (3.8)$$

- เมื่อ l คือ ความยาวการไหลเฉลี่ย มีหน่วยเป็น เมตร
 ที่ความดันบรรยากาศ มีค่าเท่ากับ 6.5×10^{-8} m
 ที่วังกักเก็บอิเล็กตรอน (10^{-9} mbar) มีค่าเท่ากับ 66 km
- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องทางการไหล มีหน่วยเป็น เมตร
- K_n คือ เลขปริมาณของ Knudsen



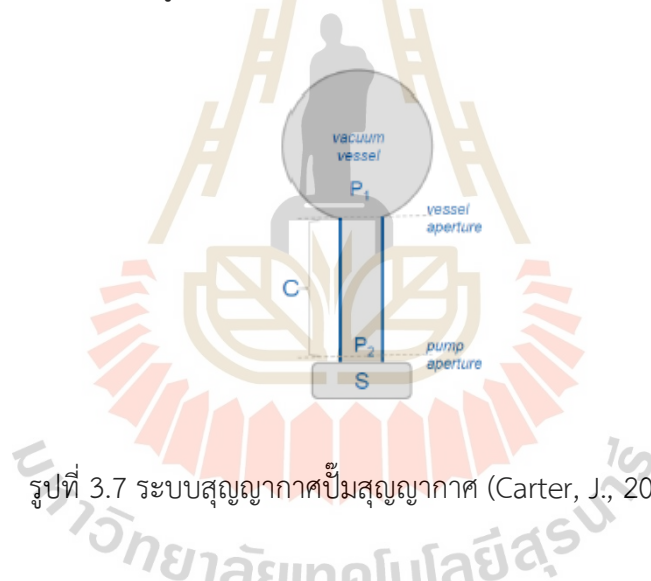
รูปที่ 3.6 คุณลักษณะระบบการไหล (Grabski, M., 2016) [18]

กระบวนการทำระบบสุญญากาศคือการผสานกันระหว่างปั๊ม วาล์ว และท่อที่สร้างขึ้นเพื่อลดความดันของก๊าซที่เหลืออยู่จากพื้นที่ปิดใด ๆ โดยการนำอากาศออก การได้มาซึ่งสุญญากาศที่ต้องการนั้นไม่ใช่เรื่องง่าย จะต้องเคลื่อนย้ายอากาศปกติเดิมในท่อเป็นปริมาณที่เพียงพอ ในความเป็นจริงเมื่อเคลื่อนย้ายแล้วจะพบว่ารอยต่อระหว่างการเดินทางของก๊าซมีสถานะเป็นแหล่งจ่ายต่อเนื่องกันและทำงานร่วมกัน การได้สุญญากาศที่ต้องการนั้นคือความสามารถในการจัดการกับศักย์ภาพของปั๊มให้เคลื่อนย้ายก๊าซออกไป

3.3.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสุญญากาศ

แบบจำลองระบบสุญญากาศอย่างง่าย โดยแบ่งประเภทการจำลองระบบออกเป็น 2 ระบบ ได้แก่ ระบบที่ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศเพียงตัวเดียว และระบบที่มีการเชื่อมต่อระหว่างห้องสุญญากาศด้วยท่อสุญญากาศแบบอนุกรม ดังนี้

ระบบที่ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศเพียงตัวเดียว เชื่อมต่อไปยังหนึ่งห้องสุญญากาศด้วยท่อสุญญากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.7

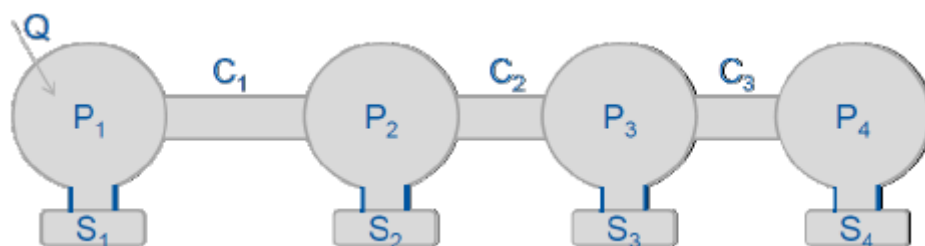


รูปที่ 3.7 ระบบสุญญากาศปั๊มสุญญากาศ (Carter, J., 2015) [5]

พิจารณาความดันสุญญากาศจากการไหลของก๊าซ และประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศ (S_{eff}) จะขึ้นกับค่าความนำไฟฟ้าท่อสุญญากาศ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศในระบบ (P) ค่าความนำไฟฟ้า (C) การไหลของก๊าซ (Q) และความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศ (S) ได้ดังนี้

$$Q = C_1 (P_1 - P_2) = SP_2 = S_{eff} P_1 \quad (3.9)$$

ระบบที่ประกอบด้วยห้องสุญญากาศเชื่อมต่อซึ่งกันและกันด้วยท่อสุญญากาศแบบอนุกรม โดยแต่ละห้องสุญญากาศจะมีปั๊มเป็นของตัวเอง ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 ระบบสุญญากาศเชื่อมต่อผ่านท่อสุญญากาศเป็นแบบอนุกรม (Carter, J., 2015) [5]

แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศในระบบ (P) ค่าความนำไฟฟ้า (C) การไหลของก๊าซ (Q) และความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศ (S) ได้ดังนี้

$$Q = P_1 S_1 = C_1 (P_1 - P_2) \quad (3.10)$$

$$C_1 (P_1 - P_2) = C_2 (P_2 - P_3) + P_2 S_2 \quad (3.11)$$

$$C_2 (P_2 - P_3) = C_3 (P_3 - P_4) + P_3 S_3 \quad (3.12)$$

$$C_3 (P_3 - P_4) = P_4 S_4 \quad (3.13)$$

สำหรับในระบบสุญญากาศที่มีการเชื่อมต่อกันเป็นจำนวน n สถานีสูบและมีระยะห่างระหว่างห้องสุญญากาศ (ความยาวท่อสุญญากาศ) เท่ากันในแต่ละสถานีเท่ากับ Δx สามารถแทนระบบโดยรวมทั้งหมดโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในสมการที่ (3.14) ดังนี้ (Li, Y., and Liu, X., 2015) [32]

พิจารณาสมการการไหลในท่อสุญญากาศได้ว่า

$$S(x) \cdot P(x) - C(x) \cdot \frac{d^2 P(x)}{dx^2} = Q(x) \quad (3.14)$$

จัดรูปสมการได้

$$\frac{d}{dx} \left(C_i \frac{dP_i}{dx} \right) - S_i \cdot P_i + Q_i = 0$$

จะได้ว่า

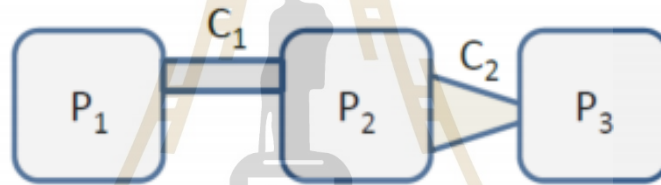
$$\frac{d}{dx} \left(C_i \frac{dP}{dx} \right) = \frac{(C_{i+1} - C_i)P_{i+1} + (C_i - C_{i-1})P_{i-1}}{2\Delta x^2} - \frac{(C_{i+1} - C_{i-1} + 2C_i)P_i}{2\Delta x^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{C_i + C_{i-1}}{2} P_{i-1} + \left\{ \frac{-(C_{i+1} + C_{i-1} + 2C_i)}{2} - S_i \Delta x^2 \right\} P_i + \frac{C_{i+1} + C_i}{2} P_{i+1} = q_i \Delta x^2 \quad (3.15)$$

เมื่อ q คือ อัตราการแตกตัวของก๊าซ มีหน่วยเป็น Torr-liter/sec

โดยที่รูปแบบการเชื่อมต่อท่อสุญญากาศมีผลต่อค่าความนำไฟฟ้า ดังนี้
เชื่อมต่อท่อสุญญากาศแบบอนุกรม



รูปที่ 3.9 การเชื่อมต่อท่อสุญญากาศแบบอนุกรม (Grabski, M., 2016) [18]

จากสมการการไหลของก๊าซ จะได้ว่า

$$Q_1 = C_1 (P_1 - P_2)$$

$$Q_2 = C_2 (P_2 - P_3)$$

ดังนั้น จะได้ว่า การไหลของก๊าซโดยรวม คือ

$$Q_{tal} = C_{tal} (P_1 - P_3) \quad (3.16)$$

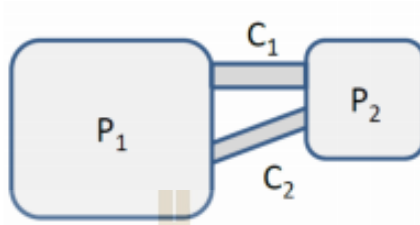
และเมื่อเวลาผ่านไปจนอยู่ในสภาวะคงตัว จะได้ว่า $Q_1 = Q_2$

ค่าความนำไฟฟ้าโดยรวม จะมีค่าเป็น

$$C_{tal} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\text{จะได้ว่า } \frac{1}{C_{tal}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \sum_1^i \frac{1}{C_i} \quad (3.17)$$

เชื่อมต่อท่อสุญญากาศแบบขนาน



รูปที่ 3.10 การเชื่อมต่อท่อสุญญากาศแบบขนาน (Grabski, M., 2016) [18]

จากสมการการไหลของก๊าซ จะได้ว่า

$$Q_1 = C_1(P_1 - P_2)$$

$$Q_2 = C_2(P_1 - P_2)$$

ดังนั้น จะได้ว่า การไหลของก๊าซโดยรวม คือ

$$Q_{tal} = C_{tal}(P_1 - P_2)$$

$$Q_{tal} = Q_1 + Q_2$$

(3.18)

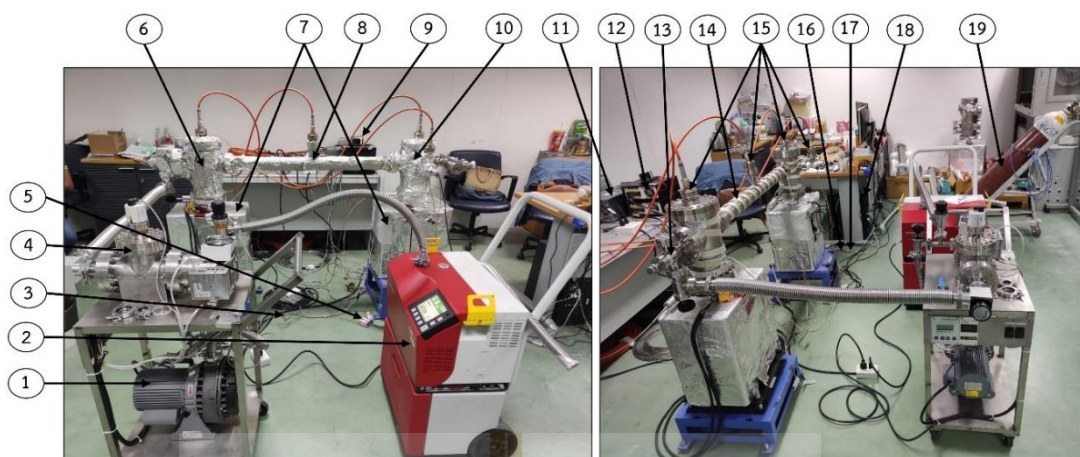
ค่าความนำไฟฟ้าโดยรวม จะมีค่าเป็น

$$C_{tal} = C_1 + C_2 = \sum_1^i C_i$$

(3.19)

3.3.3 อุปกรณ์การทดลองระบบสุญญากาศ

การทดลองสุญญากาศในงานวิจัยนี้สร้างขึ้นจากวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้งานจริงซึ่งได้รับการสนับสนุนจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) อุปกรณ์ประกอบด้วยส่วนของระบบสุญญากาศ อุปกรณ์ทำความสะอาดเพื่อเตรียมชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการสร้างสุญญากาศ อุปกรณ์การตรวจสอบรั่วไหลในระบบสุญญากาศ อุปกรณ์ควบคุมและอุปกรณ์ประมวลผล โดยมีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 3.11 และอธิบายข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์เพิ่มเติมในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.11 อุปกรณ์การทดลองในระบบสุญญากาศ

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์การทดลองในระบบสุญญากาศ

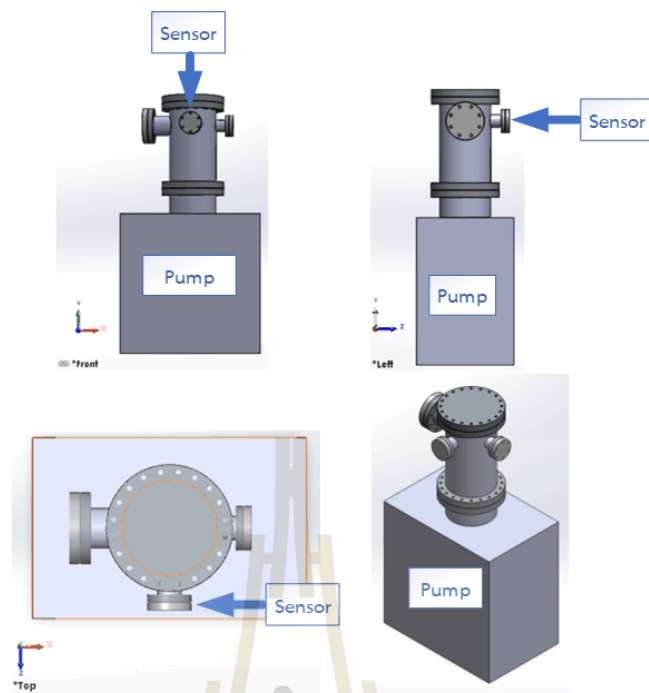
ลำดับ	ชื่อเฉพาะ	คุณสมบัติ	จำนวน
1	Scroll Vacuum Pump	- 0.4 kW, 50 Hz - 250 L/min (4.2 L/s), 1.2^{-2} torr - 2.5 L/s helium pumping speed	1
2	Helium Leak Detector	- Minimum detectable leakage rate for helium 10^{-13} Pa m ³ /s	1
3	Thermocouple	- Type K	5
4	Turbo-Molecular Pump	- 1000 RPM, 0.4 A, 220 V	1
5	NI USB-TC01	- Type J, K, R, S, T, N, E and B thermocouple	5
6	Vacuum Chamber 1	- D = 146 mm, H = 310 mm	1
7	Sputter-Ion Pump	- Star cell, 500 L/s, typically 3–7 kV - pressures as low as 10^{-11} mbar	2
8	Vacuum Pipe	- L = 1000 mm, D = 65 mm	1
9	Pfeiffer Vacuum TPG 300 Pressure Gauge	- Measures Pressure from Atmospheric Range, down to 10^{-11} mbar - Pirani gauges/ Cold cathode gauges	2
10	Vacuum Chamber 2	- D = 146 mm, H = 285 mm	1

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลเฉพาะของอุปกรณ์การทดลองในระบบสุญญากาศ (ต่อ)

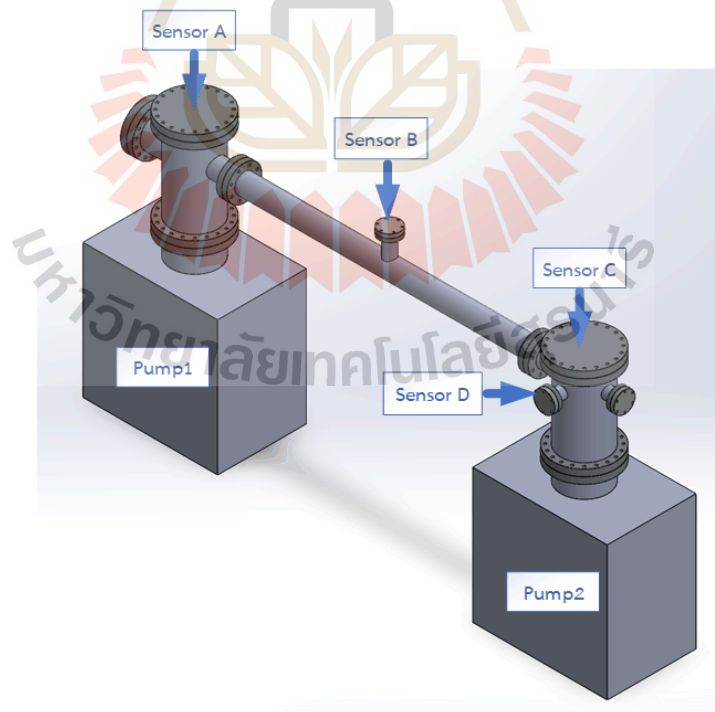
ลำดับ	ชื่อเฉพาะ	คุณสมบัติ	จำนวน
11	Sputter-Ion Pump Controller	- 2 Channels - Output 3000 V–7000 V	1
12	Baking Controller	- Max 10 A, 220 V - 304 stainless steel	2
13	All Metal Angle Valves	- Leak rate < 5–10 mbar.L/s - Temperature operating range from 450° C to –250° C	4
14	Heater	- V = 240 V, p = 170 W, L = 1.5 m	5
15	Ionization Gauge	- Bakeout temp ≤ 250 °C - Measuring range 5×10^{-3} to 1×10^{-11} mbar	4
16	MOXA	- UPort 1110 V1.4.1, 5 VDC	3
17	RS-232		3
18	Computer	- Intel® Core™ i9-9900 CPU @3.1 GHz - RAM 32 GB, 64 bit	1
19	Helium Gas		1

3.3.4 ระบบทดลองสุญญากาศ

ระบบทดลองสุญญากาศได้รับการออกแบบเพื่อศึกษาการควบคุมค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ระบบทดสอบ ได้แก่ ระบบสุญญากาศทดลองที่ 1 จะประกอบด้วยห้องสุญญากาศขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 146 มิลลิเมตร สูง 310 มิลลิเมตร ติดตั้งปั๊มสปัตเตอร์ไอออนที่มีความเร็วในการสูบน้ำเท่ากับ 500 ลิตร/วินาที เกจวัดค่าความดันติดตั้งในตำแหน่งที่แสดงดังในรูปที่ 3.12 และระบบสุญญากาศทดลองที่ 2 ประกอบด้วยห้องสุญญากาศสองห้องเชื่อมต่อกันด้วยท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตร และยาว 1,000 มิลลิเมตร ทั้งสองห้องนี้ ติดตั้งปั๊มสปัตเตอร์ไอออนที่มีความเร็วในการสูบน้ำ 500 ลิตร/วินาที และเกจวัดแรงดันติดตั้งไว้ 4 ตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 3.13



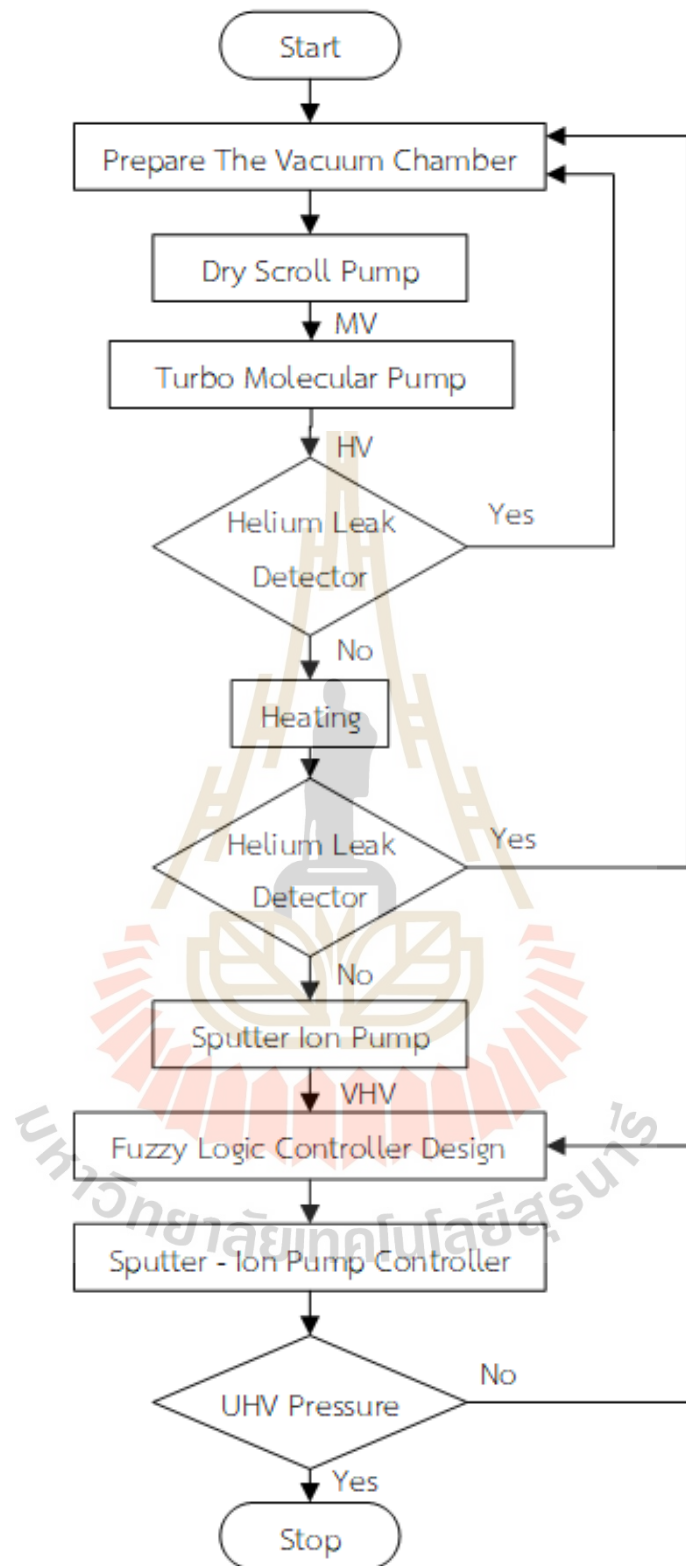
รูปที่ 3.12 ระบบสัญญาณทดสอบที่ 1



รูปที่ 3.13 ระบบสัญญาณทดสอบที่ 2

3.3.5 การสร้างระบบทดลองสุญญากาศ

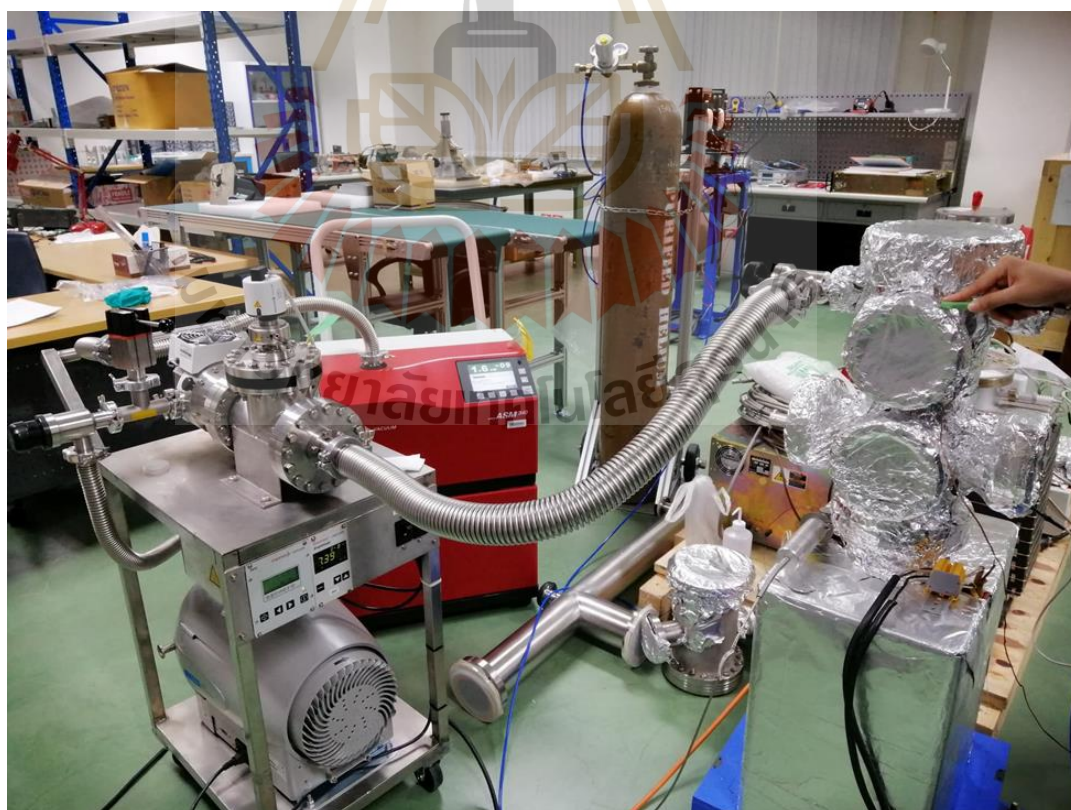
ขั้นตอนการสร้างระบบความดันสุญญากาศในระดับ UHV กระบวนการเริ่มต้นด้วยการทำความสะอาดชิ้นงาน (ห้องสุญญากาศ, ท่อลำเลียง, ปัมป์สุบ, เกจวัดค่าความดัน) ด้วยเอทานอลเพื่อเตรียมพร้อมสำหรับกระบวนการทำความสะอาด UHV เพื่อให้ได้ความดัน UHV ความดันจะต้องค่อย ๆ เพิ่มจากความดันบรรยากาศเป็นค่า 10^{-1} ถึง 10^{-2} ทอร์ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบเลื่อนแห้ง และจากนั้นเป็นความดัน 10^{-2} ถึง 10^{-7} ทอร์ โดยใช้ปั๊มเทอร์โบ จากนั้นชิ้นงานจะถูกให้ความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 120 องศาเซลเซียส เพื่อปล่อยแก๊สออก เป็นเวลาอย่างน้อย 3 วัน ก่อนและหลังการให้ความร้อน จะทำการทดสอบการรั่วไหลของระบบสุญญากาศโดยการพ่นก๊าซฮีเลียมจากภายนอกชิ้นงานในจุดรอยต่อระหว่างชิ้นงานหรือจุดที่สงสัยว่าจะมีการรั่วไหล เช่น ตามข้อต่อหน้าแปลนในจุดเชื่อมต่อของห้องสุญญากาศและท่อต่าง ๆ หน้าแปลน CF (Con Flat) ใช้ปะเก็นทองแดงที่มีค่าการนำความร้อนสูงซึ่งขึ้นรูปเป็นลักษณะเส้นรอบวงตามขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่างหน้าแปลนเชื่อมต่อ คุณสมบัติที่อ่อนนุ่มของปะเก็นทองแดงช่วยให้ซิลแน่นมากระหว่างหน้าแปลนโลหะทั้งสองโดยทำให้ปะเก็นบิดเบี้ยว หน้าแปลน CF สามารถทำงานได้ที่แรงดันประมาณ 10^{-13} ทอร์ หากตรวจพบการรั่วไหล ก๊าซฮีเลียมจะซึมผ่านรอยรั่วและเข้าไปในชิ้นงาน ซึ่งเครื่องตรวจจับการรั่วของฮีเลียมจะตรวจพบ หากไม่พบการรั่วไหล กระบวนการจะดำเนินต่อไปโดยใช้ปั๊มสปีดเตอร์ไอออนจนกว่าแรงดันสุญญากาศจะถึงระดับ 10^{-8} ทอร์ และไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก วาล์วระหว่างห้องสุญญากาศ ปั๊มสกโรลล์แบบแห้ง และระบบปฏิบัติการปั๊มดึงคูโมเลกุลสูงจะถูกปิด ทำให้สามารถอพยพระบบโดยใช้ปั๊มสปีดเตอร์ไอออนเท่านั้น ต่อมาเราได้ออกแบบตัวควบคุมแบบพีซีเพื่อสั่งตัวควบคุมปั๊มสปีดเตอร์-ไอออนให้รักษาแรงดันสุญญากาศผ่านโปรแกรม LabVIEW ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ผ่าน RS-232 และโมดูล MOXA ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภูมิขั้นตอนการสร้างระบบทดลองสุญญากาศ

3.3.6 การตรวจสอบรอยร้าวไหลในระบบทดลองสุญญากาศ

การทดสอบการรั่วไหลของสุญญากาศเป็นขั้นตอนสำคัญในกระบวนการสร้างสุญญากาศ กระบวนการเกี่ยวข้องกับการบรรจุสุญญากาศของระบบที่ 10^{-6} ทอร์ โดยใช้ปั๊มสุญญากาศแบบเลื่อนแห้งร่วมกับปั๊มชนิดดิงดูดโมเลกุลสูง จากนั้น จึงนำก๊าซฮีเลียมเข้ามาฉีดพ่นภายนอกชิ้นงานในจุดที่สงสัยว่าจะมีการรั่วไหล หากตรวจพบการรั่วไหล ก๊าซฮีเลียมจะซึมผ่านรอยรั่วและเข้าไปในชิ้นงาน ซึ่งเครื่องตรวจจับการรั่วของฮีเลียมจะตรวจจับได้ การตรวจสอบรอยรั่วจะดำเนินการจากบนลงล่างเนื่องจากก๊าซฮีเลียมจะลอยขึ้นสู่ที่สูง การทำเช่นนี้จะทำให้เราทราบจุดรั่วของระบบได้ทันทีที่เครื่องตรวจจับได้ และยังคงทราบปริมาณของก๊าซฮีเลียมที่ถูกนำเข้าสู่ระบบอีกด้วย การมีอยู่ของก๊าซฮีเลียมจะถูกใช้เพื่อระบุการรั่วไหลที่อาจเกิดขึ้น หากตรวจสอบแล้วปรากฏว่าระบบมีการรั่วไหลจะต้องกลับไปดำเนินการแก้ไขตั้งแต่กระบวนการประกอบชิ้นงานใหม่ จนเข้าสู่การทำสุญญากาศอีกครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.15 หากไม่พบจุดรั่วไหล จะใช้ปั๊มสปีดเตอร์ไอออนเพื่อรักษาแรงดันสุญญากาศไว้ที่ 10^{-8} ทอร์ เพื่อดำเนินการเข้าสู่การทำความดันสุญญากาศระดับ UHV ต่อไป ดังนั้น การทดสอบการรั่วไหลจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้มั่นใจถึงความสมบูรณ์และประสิทธิภาพของระบบ UHV นั้นเอง



รูปที่ 3.15 การตรวจสอบรอยรั่วไหลในระบบทดลองสุญญากาศ

3.4 สรุป

เนื้อหาในบทนี้กล่าวถึงระเบียบวิธีการดำเนินการวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ซึ่งประกอบด้วยสามส่วนสำคัญ ได้แก่การควบคุมระดับความดันสุญญากาศด้วยทฤษฎีพีซซี การประมาณประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออนจากแบบจำลองที่สร้างโดยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+ และการออกแบบระบบควบคุมให้มีความสามารถทนต่อความผิดพลาดอันเนื่องมาจากประสิทธิภาพของปั๊มลดลง ซึ่งเนื้อหาโดยละเอียดของแต่ละส่วนงานวิจัยจะกล่าวในบทถัดไป อีกทั้งยังกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับระบบสุญญากาศ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบสุญญากาศ อุปกรณ์การทดลองที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย การออกแบบระบบทดลองสุญญากาศระดับ UHV ซึ่งจะมีทั้งสิ้น 2 กรณี คือระบบที่ประกอบด้วยห้องสุญญากาศ 1 ห้องเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน 1 ตัว และกรณีที่ 2 แสดงถึงระบบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนที่มีปฏิกิริยาต่อกัน คือระบบที่ประกอบด้วยห้องสุญญากาศ 2 ห้องกับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน 2 ตัว เชื่อมต่อกับท่อสุญญากาศความยาว 1000 มิลลิเมตร รวมถึงขั้นตอนการสร้างระบบทดลองสุญญากาศและการตรวจสอบรั่วไหลในระบบทดลองสุญญากาศ ซึ่งเป็นรายละเอียดส่วนสำคัญขั้นตอนแรกในการสร้างระบบสุญญากาศ UHV

บทที่ 4

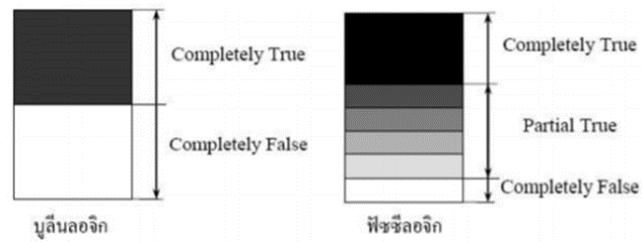
การควบคุมความดันสุญญากาศด้วยฟัซซี

4.1 บทนำ

สุญญากาศระดับสูงพิเศษ (UHV) หมายถึงสุญญากาศที่มีค่าความดันในระดับต่ำกว่า 10^{-9} ทอร์ การควบคุมแบบฟัซซีเป็นวิธีการควบคุมระบบโดยใช้ฟัซซีลอจิกซึ่งเป็นเครื่องมือทางคณิตศาสตร์สำหรับการแสดงและจัดการข้อมูลที่ไม่แน่นอนหรือไม่แม่นยำ ในระบบควบคุมแบบฟัซซี อินพุตและเอาต์พุตจะถูกแมปกับชุดฟัซซี และชุดของกฎฟัซซีจะถูกใช้เพื่อกำหนดการดำเนินการควบคุม การใช้ตัวควบคุมฟัซซีสำหรับระบบ UHV ช่วยให้ระบบสามารถใช้งานเข้ากับสถานะที่เปลี่ยนแปลงและตัดสินใจบนพื้นฐานของข้อมูลที่ไม่แม่นยำหรือไม่แน่นอน สิ่งนี้สามารถช่วยเพิ่มเสถียรภาพและประสิทธิภาพการทำงานของระบบได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังเพิ่มความทนทานในการใช้งานของระบบต่อการรบกวนและความไม่แน่นอนได้อีกด้วย เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงระบบควบคุมฟัซซี หลักการทำงานและข้อมูลจำเพาะของปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออน การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับ UHV บนโปรแกรม LabVIEW การทำฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification) การกำหนดกฎของฟัซซี (Rules Base) การอนุมาน (Inference) หรือการรวมกฎฟัซซี (Aggregation) การทำดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification) การทดสอบและเก็บข้อมูลการทดลองของฮาร์ดแวร์ รวมถึงผลลัพธ์ของการควบคุมความดันสุญญากาศด้วยฟัซซีในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 และ 2

4.2 ระบบควบคุมฟัซซี

ทฤษฎีฟัซซีเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้เหตุผลและการตัดสินใจในสถานการณ์ที่มีความไม่แน่นอน คลุมเครือ หรือไม่แน่ชัด ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Lotfi A. Zadeh ในทศวรรษที่ 1965 นับตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาก็ได้พบการใช้งานเป็นอย่างมากในหลากหลายสาขาตั้งแต่วิศวกรรมไปจนถึงเศรษฐศาสตร์ โดยมีแนวคิดพื้นฐานกำหนดระดับความจริงหรือคำตอบจากระดับความเป็นสมาชิกระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งจะแตกต่างกับตรรกะแบบบูลีนที่มีคำตอบเป็นไบนารีที่มีคำตอบเพียง “จริง” กับ “เท็จ” หรือ “0” กับ “1” เท่านั้น ทำให้มีความยืดหยุ่นมากกว่าและช่วยให้สามารถตัดสินใจได้อย่างเหมาะสมกว่าตรรกะไบนารีแบบดั้งเดิม ดังแสดงในรูปที่ 4.1

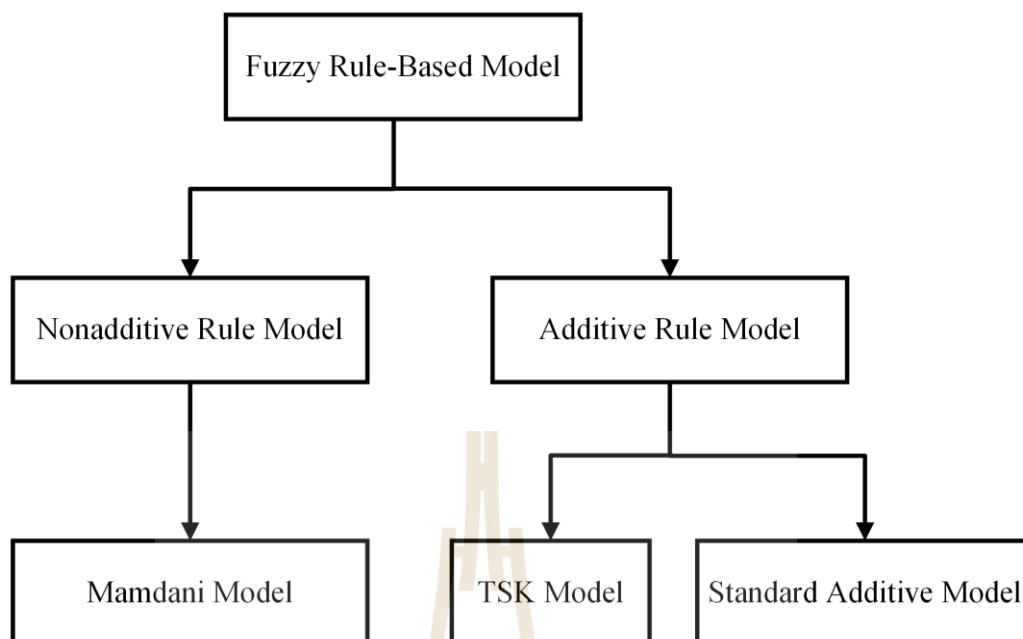


รูปที่ 4.1 ตรรกะแท้จริง (บูลีนลอจิก) กับตรรกะแบบฟัซซี (ฟัซซีลอจิก)

ชนิดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกที่ใช้งานทั่วไปมีหลายชนิด เช่น ฟังก์ชันสามเหลี่ยม (triangular membership function), ฟังก์ชันสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal membership function), ฟังก์ชันเกาส์เซียน (Gaussian membership function), ฟังก์ชันระฆังคว่ำ (Bell-shaped membership function), ฟังก์ชันตัวเอส (Smooth Membership Function) และฟังก์ชันตัวแซด (Z-membership function) เป็นต้น แต่ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกรูปสามเหลี่ยม ซึ่งกำหนดค่าดังสมการที่ 4.1

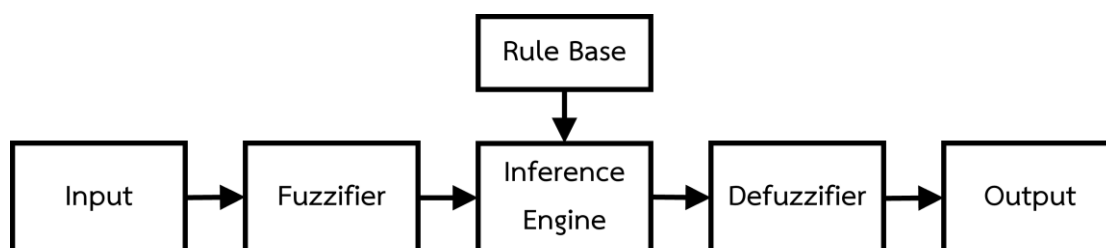
$$\text{triangular}(x: a, b, c) = \begin{cases} 0 & x < a \\ (x - a) / (b - a) & a \leq x \leq b \\ (c - x) / (c - b) & b \leq x \leq c \\ 0 & x > c \end{cases} \quad (4.1)$$

ชนิดของระบบกฎฟัซซี แสดงได้ดังรูปที่ 3



รูปที่ 4.2 ชนิดของระบบกฎฟuzzy

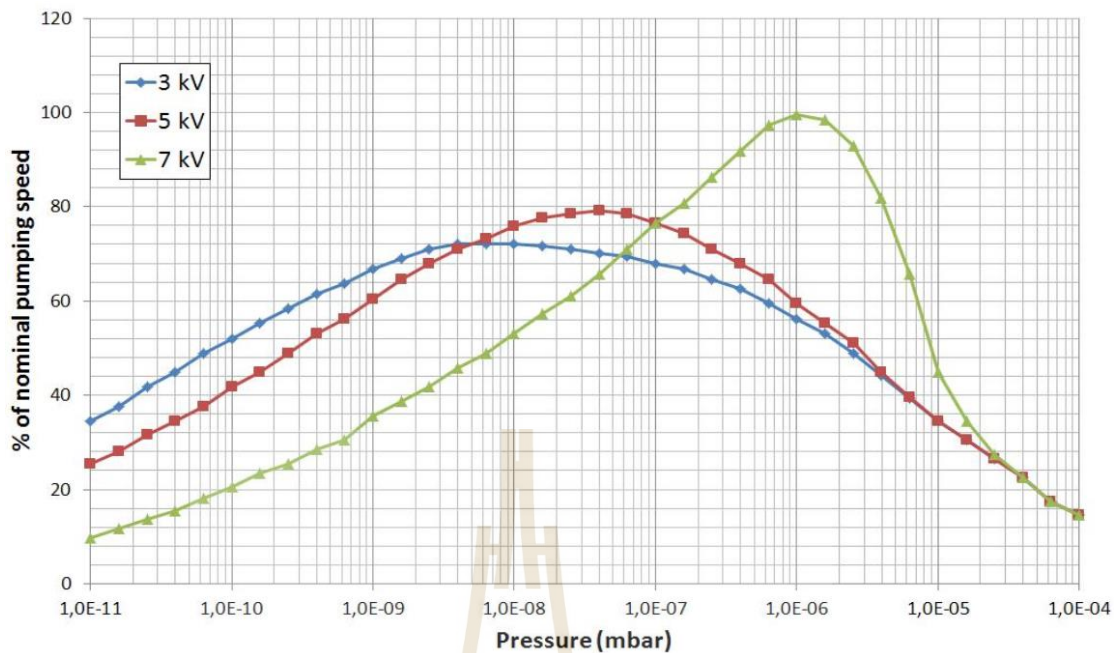
ระบบกฎฟuzzyมีการประมาณค่าฟังก์ชัน (function approximation) ที่ใช้ 3 ชนิดใหญ่ ๆ ได้แก่ รูปแบบ Mamdani, Takagi-Sugeno-Kang (TSK) และ Standard Additive Model (SAM) โดยรูปแบบ Mamdani เป็นการรวมผลการอนุมาน (inference) ของกฎโดยวิธีการซ้อนทับ (superimposition) จากกฎหลาย ๆ ข้อ ซึ่งไม่ได้เป็นแบบบวกกัน จึงเรียกว่าเป็น nonadditive rule model ระบบนี้ใช้กฎคลุมเครือเพื่อแมปตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาต์พุต และมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการจัดการกับระบบที่ซับซ้อนซึ่งมีอินพุตและเอาต์พุตจำนวนมาก แต่สำหรับ TSK และ SAM มีการอนุมานแบบรวมค่าน้ำหนัก (weighted sum) จากหลาย ๆ กฎ เพื่อรวมเป็นข้อสรุปสุดท้ายจึงเรียกระบบแบบนี้ว่า additive rule model ระบบการอนุมานแบบคลุมเครือของ TSK ใช้การผสมผสานระหว่างตรรกะคลุมเครือและตรรกะที่ชัดเจนในการตัดสินใจ ระบบนี้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับระบบที่มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนและไม่เชิงเส้นระหว่างอินพุตและเอาต์พุต SAM มีความสามารถในการจัดการความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นระหว่างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต และมีความยืดหยุ่นในการจัดการอินพุตและเอาต์พุตหลายตัว ในทางปฏิบัตินิยมใช้ระบบกฎฟuzzyแบบ Mamdani มากที่สุดระบบหนึ่ง การหาผลสรุปฟuzzyในรูปแบบ Mamdani เป็นการใช้ตัวดำเนินการค่าต่ำสุด (minimum operator) สำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “and” และใช้ตัวดำเนินการค่าสูงสุดสำหรับการเชื่อมประโยคแบบ “or” [4] โดยโครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟuzzyซึ่งประกอบด้วยสี่ส่วนที่สำคัญดังแสดงในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างพื้นฐานของการประมวลผลแบบฟัซซี

4.3 ปัมแบบสปัตเตอร์ไอออน (Sputter Ion Pump)

ปัมแบบสปัตเตอร์ไอออนหรือที่เรียกว่าปัมไอออน เป็นปัมสุญญากาศสูงประเภหนึ่งที่ทำงานตามหลักการของไอออนไนซ์และการสปัตเตอร์ ปัมประกอบด้วยแคโทดที่ทำจากโลหะ เช่น ไททาเนียม ซึ่งอยู่ห่างกันเล็กน้อยภายในห้องสุญญากาศ เมื่อมีการใช้ไฟฟ้าแรงสูงระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โมเลกุลของก๊าซในห้องจะถูกทำให้แตกตัวเป็นไอออนโดยสนามไฟฟ้า ทำให้เกิดไอออนบวก จากนั้นไอออนบวกเหล่านี้จะถูกเร่งไปยังแคโทดโดยสนามไฟฟ้า ซึ่งจะชนกับอะตอมที่พื้นผิวและทำให้ถูกขับออกจากแคโทดในกระบวนการที่เรียกว่าการสปัตเตอร์ จากนั้นอะตอมที่สปัตเตอร์จะก่อตัวเป็นชั้นหนาแน่นบนผิวแคโทด ซึ่งดักจับและปัมโมเลกุลของก๊าซที่เหลืออกจากห้องสุญญากาศได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัมสปัตเตอร์ไอออนเป็นที่รู้จักในด้านความน่าเชื่อถือสูงและอายุการใช้งานที่ยาวนาน ต้องการการบำรุงรักษาน้อยมากและสามารถทำงานได้เป็นระยะเวลานานโดยไม่จำเป็นต้องซ่อมแซมบ่อยครั้ง ความเร็วในการสูบของปัมสปัตเตอร์ไอออนหมายถึงอัตราที่ปัมสามารถกำจัดโมเลกุลของก๊าซออกจากห้องได้ โดยปกติจะวัดเป็นลิตรต่อวินาที (L/s) หรือลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง (m³/h) ความเร็วในการสูบของปัมสปัตเตอร์ไอออนขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย รวมถึงความแรงของสนามไฟฟ้าที่ใช้ในการทำให้ไอออนไนซ์ก๊าซ ขนาดของปัม ขนาดและรูปทรงเรขาคณิตของห้องสุญญากาศ อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับความดันและประเภของก๊าซอีกด้วย ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วในการสูบกับค่าความดันสุญญากาศที่แรงดันแหล่งจ่าย 3,000, 5,000 และ 7,000 โวลต์ แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความเร็วในการสูบจากข้อมูลจำเพาะของปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออน แหล่งที่มา: ION Pumps for UHV Systems; Synchrotrons and Particle Accelerators.

การทำงานของปั๊มสปัตเตอร์ไอออนขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มซึ่งสัมพันธ์กับค่าความดันสุญญากาศในแต่ละย่าน แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายมีตั้งแต่ 3,000, 5,000 และ 7,000 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.4 กราฟแสดงให้เห็นว่าการเริ่มต้นทำงานของปั๊มสปัตเตอร์ไอออนเริ่มจากค่าความดันสุญญากาศต่ำ ๆ ที่ประมาณ 1×10^{-5} มิลลิบาร์ ทางด้านขวาของกราฟแรงดันไฟฟ้า 7,000 โวลต์ ให้ประสิทธิภาพปั๊มสูงสุด ในขณะที่แรงดันไฟฟ้า 5,000 โวลต์ให้ประสิทธิภาพการปั๊มที่เหมาะสมที่สุด เมื่อความดันเป็นสุญญากาศเพิ่มขึ้นที่ประมาณ 1×10^{-7} มิลลิบาร์ เมื่อระบบมีค่าความดันสุญญากาศที่ 5×10^{-9} มิลลิบาร์ แรงดันจ่ายสำหรับปั๊มสปัตเตอร์ไอออนที่ 3000 โวลต์จะให้ประสิทธิภาพความเร็วในการสูบที่เหมาะสมที่สุด อธิบายเพิ่มเติมได้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของความเร็วในการสูบของปั๊มที่แรงดันไฟฟ้า 3000, 5000 และ 7000 โวลต์

แรงดัน	สมการความสัมพันธ์ (มิลลิบาร์)	R ²	ความเร็วการสูบ		ความดัน	
			เปอร์เซ็นต์	ลิตร/วินาที	มิลลิบาร์	ทอร์
3000	$y = 5.525\ln(x) + 179.91$	0.9733	48-72	240-360	$6 \times 10^{-11} - 5 \times 10^{-9}$	$4.5 \times 10^{-11} - 3.75 \times 10^{-9}$
5000	$y = 4 \times 10^{22}x^3 - 9 \times 10^{15}x^2 + 5 \times 10^8x + 71.053$	0.9044	72-76	360-380	$5 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-7}$	$3.75 \times 10^{-9} - 7.5 \times 10^{-8}$
7000	$y = 10.52\ln(x) + 246.07$	0.9816	76-99	380-495	$1 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-6}$	$7.5 \times 10^{-8} - 7.5 \times 10^{-7}$

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปั๊มไอออนขนาด 500 ลิตร/วินาที จึงคิดเปอร์เซ็นต์การทำงานของปั๊มจากร้อยละของความการสูบที่ 500 ลิตร/วินาที เป้าหมายของงานวิจัยนี้ คือ การพัฒนาความสามารถในการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มสปีดเตอร์ไอออนให้มีความละเอียดและแม่นยำในความเหมาะสมยิ่งขึ้น จึงออกแบบจากขีดความสามารถของแหล่งจ่ายที่มีความละเอียดสูงสุดพบว่าสามารถปรับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้ขึ้นละ 1,000 โวลต์ นั่นคือที่ 3,000, 4,000, 5,000, 6,000 และ 7000 โวลต์ ผู้วิจัยทำการออกแบบค่าประมาณเทียบเคียงที่ได้จากข้อมูลจำเพาะของปั๊ม เพื่อออกแบบตัวควบคุมให้สามารถปรับแหล่งจ่ายแรงดันของปั๊มให้มีความเร็วในการสูบเหมาะสมที่สุดในแต่ละช่วงความดันสุญญากาศ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของความเร็วในการสูบของปั๊มที่แรงดันไฟฟ้า 3000, 4000, 5000, 6000 และ 7000 โวลต์

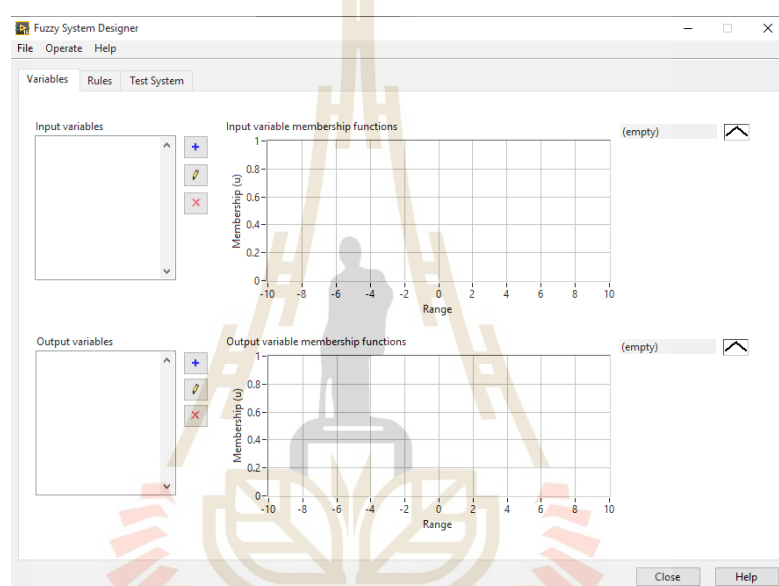
แรงดัน	สมการความสัมพันธ์ (มิลลิบาร์)	R ²	ความเร็วการ สูบ (เปอร์เซ็นต์)	ความดัน	
				มิลลิบาร์	ทอร์
3000	$y = 4.3486\ln(x) + 156.73$	0.9732	64-72	$6.2 \times 10^{-10} - 5 \times 10^{-9}$	$4.65 \times 10^{-10} - 3.75 \times 10^{-9}$
4000	$y = 8 \times 10^8 x + 68.048$	0.9973	72-76	$5 \times 10^{-9} - 1 \times 10^{-8}$	$3.75 \times 10^{-9} - 7.5 \times 10^{-9}$
5000	$y = 2.1615\ln(x) + 115.97$	0.9709	76-79	$1 \times 10^{-8} - 4 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-8}$
6000	$y = 4.5108\ln(x) + 155.92$	0.9784	79-83.5	$4 \times 10^{-8} - 2 \times 10^{-7}$	$3 \times 10^{-8} - 1.5 \times 10^{-7}$
7000	$y = 10.52\ln(x) + 246.07$	0.9816	83.5-99	$2 \times 10^{-7} - 1 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^{-7} - 7.5 \times 10^{-7}$

ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสุญญากาศกับประสิทธิภาพความเร็วการสูบของปั๊มสปีดเตอร์ไอออนที่สร้างขึ้นในตารางที่ 4.2 แสดงช่วงการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ทำให้ได้ประสิทธิภาพความเร็วการสูบของปั๊มที่เหมาะสมสำหรับช่วงค่าความดันสุญญากาศแต่ละช่วง สามารถอธิบายได้ว่าช่วงความดันสุญญากาศต่ำ เช่น $1.5 \times 10^{-7} - 7.5 \times 10^{-7}$ ทอร์ เหมาะสำหรับการจ่ายแรงดันที่ 7000 โวลต์ ซึ่งจะได้ความเร็วการสูบของปั๊มที่ 83.5-99 เปอร์เซ็นต์ของประสิทธิภาพการทำงานของปั๊ม 500 ลิตร/วินาที เป็นต้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างกลุ่มเครื่องมือสำหรับควบคุมกลไกการทำงานหรือการปรับแรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายของปั๊มไอออนตามความสัมพันธ์ในตารางที่ 4.2 เพื่อบรรลุสถานะความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษอย่างมีประสิทธิภาพ

4.4 การออกแบบตัวควบคุมพีชซีในระบบสุญญากาศบนโปรแกรม LabVIEW

พีชซีลอจิกเป็นวิธีการให้เหตุผลที่คล้ายกับการให้เหตุผลของมนุษย์ แนวคิดพื้นฐานที่สุดในพีชซีลอจิกคือเซตพีชซี เซตพีชซีคือเซตที่มีระดับสมาชิกระหว่าง 0 ถึง 1 แทนที่จะเป็นสมาชิกไบนารีแบบดั้งเดิมของเซตมาตรฐานที่มีแค่ “จริง” และ “เท็จ” เท่านั้น ระดับของการเป็นสมาชิกนี้ซึ่งถึงขอบเขตที่มีองค์ประกอบอยู่ในชุดเซตพีชซี ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในสถานการณ์ที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่มีความแม่นยำมากพอหรือยากต่อการหาแบบจำลอง สามารถนำมาใช้ในการตัดสินใจและควบคุมกระบวนการต่าง ๆ การประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบพีชซีลอจิกในระบบ UHV นั้นใช้เพื่อรักษาระดับค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ตลอดการลำเลียงแสงในท่อลำเลียง การออกแบบ

ตัวควบคุมฟัซซีในระบบสัญญาณผู้วิจัยขออธิบายในส่วนของการควบคุมค่าความดันในระบบทดลองสัญญาณที่ 2 เท่านั้น เพื่อลดความสับสนของผู้อ่าน เนื่องจากมีขั้นตอนการออกแบบเช่นเดียวกับระบบทดลองสัญญาณที่ 1 แต่มีความซับซ้อนแต่จำนวนตัวแปรมากกว่านั่นเอง โดยทำการออกแบบและใช้งานตัวควบคุมฟัซซีบนโปรแกรม LabVIEW (LabVIEW 2016 ใบอนุญาตเลขที่ M76X33883 สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน, ประเทศไทย) ผ่านฟังก์ชัน Fuzzy Logic Toolbox โดยผู้ใช้งานสามารถทำการติดตั้งส่วนเสริม คือ LabVIEW Control Design and Simulation Module ซึ่งมีลักษณะของหน้าต่างโปรแกรมสำหรับใช้งาน ดังแสดงในรูปที่ 4.5



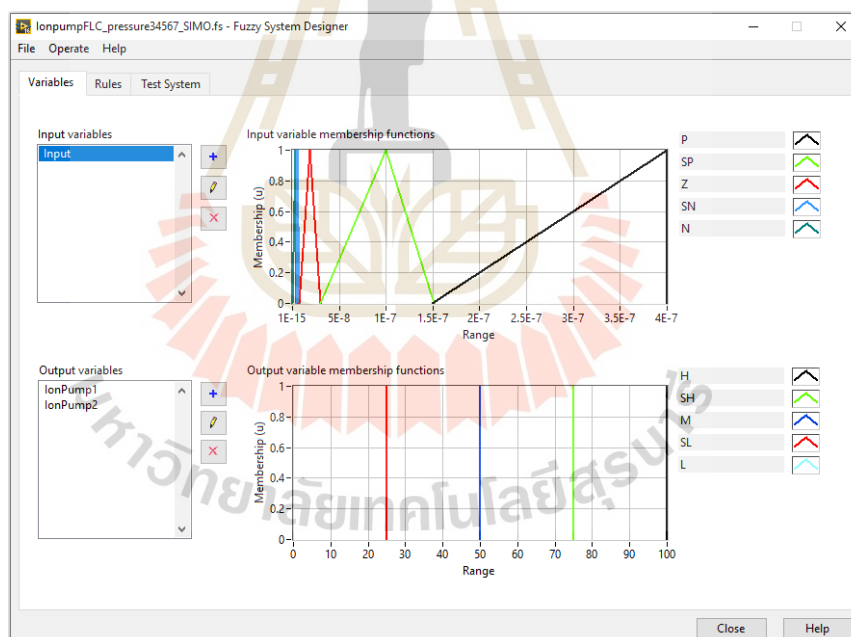
รูปที่ 4.5 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW สำหรับใช้งานฟัซซี

4.4.1 การทำฟัซซีฟิเคชัน (Fuzzification)

การทำฟัซซีฟิเคชันคือกระบวนการรับอินพุตของผู้ใช้ เช่น ค่าจากการวัดของเซ็นเซอร์ และแปลงให้เป็นตัวแปรฟัซซีโดยใช้ฟังก์ชันการเป็นสมาชิก ซึ่งฟังก์ชันความเป็นสมาชิกกำหนดระดับอินพุตเป็นคำศัพท์ทางภาษาศาสตร์หรือชุดคลุมเครือ ฟังก์ชันสมาชิกในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยตัวแปรภาษาห้าชุดกล่าวคือค่าความดัน ณ ตำแหน่งที่ต้องการควบคุมวัดได้จากเกจวัดในตำแหน่ง B กำหนดให้เป็นตัวแปรอินพุตประกอบด้วยฟังก์ชันสมาชิกห้าชุดคือ $\{N, SN, Z, SP, P\}$ และตัวแปรเอาต์พุตคือแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนไปยังปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่หนึ่งและตัวที่สองซึ่งประกอบด้วยตัวแปรภาษา $\{L, SL, M, SH, H\}$ และ $\{L2, SL2, M2, SH2, H2\}$ ตามลำดับ กำหนดอินพุตเป็นฟังก์ชันสมาชิกอุปสามเหลี่ยม เหตุที่ผู้วิจัยเลือกใช้ฟังก์ชันรูปแบบนี้เนื่องจากแสดงความไม่แน่นอนที่มี

โอกาสเท่า ๆ กันที่ได้ก็ได้อยู่ในช่วงที่กำหนด โดยมีพารามิเตอร์สามตัว a , b และ c แทนจุดทางซ้าย จุดสูงสุดหรือจุดกึ่งกลาง และจุดทางขวาของรูปสามเหลี่ยม ตามลำดับ หรืออาจกล่าวได้ว่าจุดสูงสุดหรือกึ่งกลางคือจุดที่ค่าสมาชิกสูงสุด นิพจน์ทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันสมาชิกรูปสามเหลี่ยมถูกกำหนดโดย ถ้า $x \leq a$ หรือ $x \geq c$ แล้ว $\mu(x) = 0$, ถ้า $a < x \leq b$ แล้ว $\mu(x) = (x-a)/(b-a)$, ถ้า $b < x < c$ แล้ว $\mu(x) = (c-x)/(c-b)$ โดยที่ x คือค่าอินพุตของฟังก์ชันความเป็นสมาชิก

และเอาต์พุตเป็นฟังก์ชันสมาชิกภาพเดี่ยว (singleton membership function) เป็นสมาชิกแบบไม่ต่อเนื่องที่กำหนดให้ค่าความเป็นสมาชิกเป็น 1 ให้กับจุดเดียวและ 0 ให้กับจุดอื่น ๆ ทั้งหมด เพื่อแสดงค่าที่ชัดเจน แน่นนอนหรือจุดที่แม่นยำในระบบลอจิกแบบคลุมเครือ นิพจน์ทางคณิตศาสตร์ของฟังก์ชันการเป็นสมาชิกภาพเดี่ยวกำหนดโดย: ถ้า $x = c$ แล้ว $\mu(x) = 1$ มิฉะนั้น $\mu(x) = 0$ โดยที่ c คือจุดที่ค่าความเป็นสมาชิกคือ 1 และ x คือค่าที่ป้อนเข้าสู่ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกนั่นเอง สามารถแสดงการทำฟัซซีฟิเคชันของระบบทดลองสัญญาณที่ 2 บนโปรแกรม LabVIEW ได้ ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ฟังก์ชันสมาชิกของระบบทดลองสัญญาณที่ 2

4.4.2 การกำหนดกฎของฟัซซี (Rules Base)

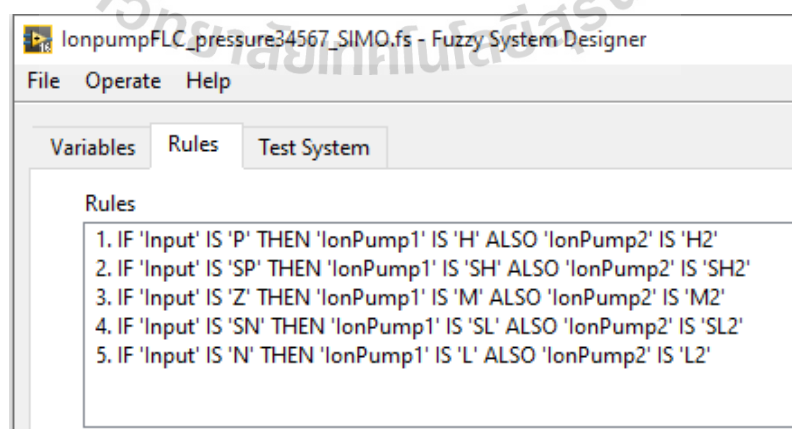
การกำหนดกฎคลุมเครือคือการอธิบายว่าตัวแปรอินพุตมีความสัมพันธ์กับตัวแปรเอาต์พุตอย่างไร กฎเหล่านี้มักจะเขียนในรูปแบบของคำสั่ง "ถ้า-แล้ว" โดยที่ "ถ้า" อธิบายเงื่อนไข

อินพุต และส่วน "แล้ว" อธิบายถึงการดำเนินการเอาต์พุต การออกแบบกฎสามารถกำหนดค่าอินพุต และเอาต์พุตให้มีสัญญาณเข้า-ออกได้ทั้งแบบทางเดียว (Single-Input and Single-Output) หรือหลายทาง (Multiple-Input and Multiple-Output) ซึ่งในงานวิจัยเลือกใช้ระบบที่มี 1 อินพุต และ 2 เอาต์พุต (Single-Input and Multiple-Output, SIMO) โดยที่อินพุตคือค่าความดันที่อ่านได้จากเซ็นเซอร์ B ที่ติดตั้งในตำแหน่งกลางของท่อสุญญากาศที่เชื่อมระหว่างห้องสุญญากาศทั้งสอง และเอาต์พุตคือการควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันทั้งสองของปั๊มอย่างอิสระต่อกัน แสดงการกำหนดกฎฟuzzyที่ได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 การออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 2

No.	Pressure Input (Torr)	Input Variable	Output Variable 1	Output Variable 2	Percent Variable	Voltage Supply 1	Voltage Supply 2
1	$\leq 3.75 \times 10^{-9}$	N	L	L2	0	3000	3000
2	$3.751 \times 10^{-9} - 7.5 \times 10^{-9}$	SN	SL	SL2	25	4000	4000
3	$7.51 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-8}$	Z	M	M2	50	5000	5000
4	$3.01 \times 10^{-8} - 1.506 \times 10^{-7}$	SP	SH	SH2	75	6000	6000
5	$\geq 1.507 \times 10^{-7}$	P	H	H2	100	7000	7000

กฎที่ถูกสร้างจากตารางที่ 4.3 สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโปรแกรม LabVIEW ในส่วนของ Fuzzy System Designer ฟังก์ชัน Rules แสดงดังรูปที่ 4.7



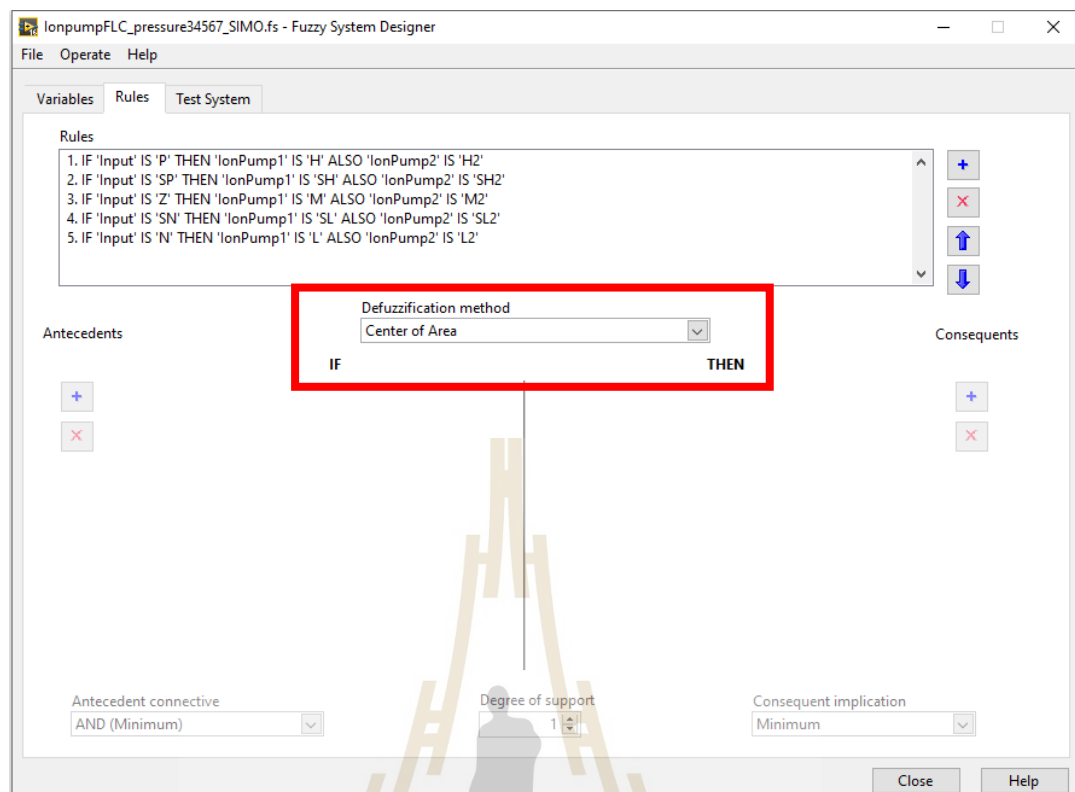
รูปที่ 4.7 กฎฟuzzyที่ออกแบบของระบบทดลองสุญญากาศที่ 2

4.4.3 การอนุมาน (Inference) หรือการรวมกฎฟัซซี (Aggregation)

การอนุมานเป็นกระบวนการของการใช้กฎในฐานกฎเพื่อกำหนดค่าเอาต์พุตหรือชุดคลุมเครือที่เหมาะสม เป็นขั้นตอนสำคัญในระบบฟัซซีลอจิก และเกี่ยวข้องกับการรวมชุดฟัซซีที่สร้างขึ้นระหว่างกระบวนการฟัซซีฟิเคชันกับกฎในฐานกฎเพื่อสร้างค่าเอาต์พุตที่ชัดเจน มีสองวิธีหลักสำหรับการอนุมานในระบบฟัซซีลอจิกคือ Mamdani และ Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

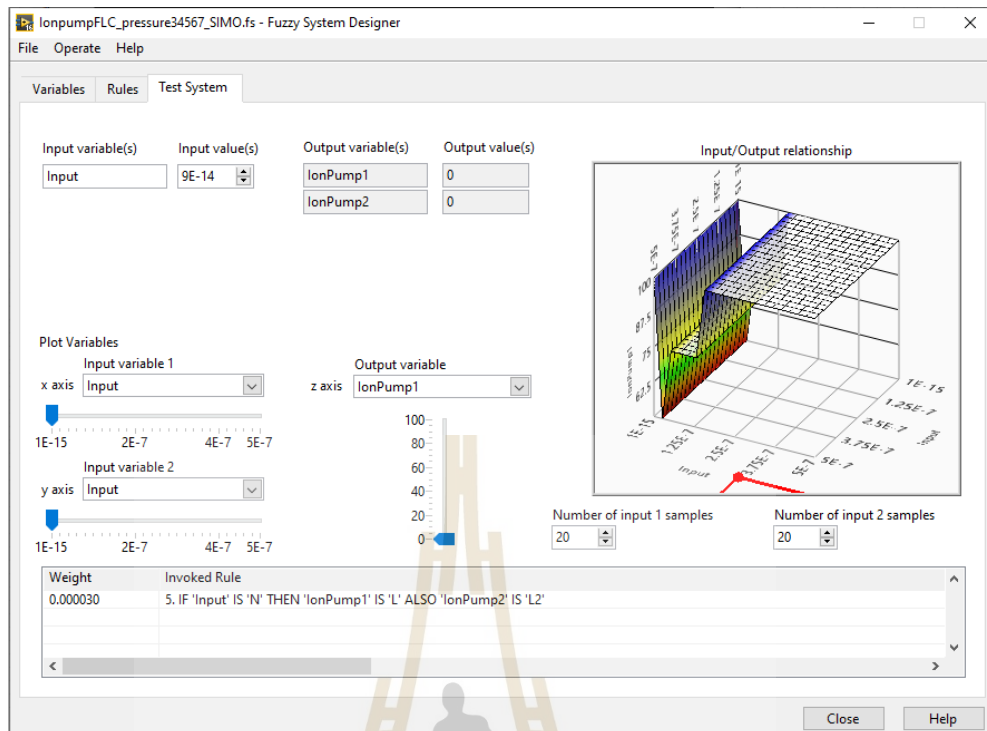
4.4.4 การทำดีฟัซซีฟิเคชัน (Defuzzification)

การทำดีฟัซซีฟิเคชันคือการนำเอาต์พุตที่ได้จากการอนุมานซึ่งโดยปกติจะเป็นชุดคลุมเครือ และแปลงกลับเป็นค่าเอาต์พุตที่ใช้ในการดำเนินการซึ่งสามารถใช้ควบคุมระบบหรืออุปกรณ์ได้ ทำได้โดยการคำนวณค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของชุดเอาต์พุตฟัซซี (centroid method, center of area method, or center of gravity, COG) เป็นต้น วิธี COG มักใช้ในระบอบอนุมานแบบคลุมเครือประเภท Mamdani ซึ่งใช้กฎแบบคลุมเครือและฟังก์ชันสมาชิกแบบคลุมเครือเพื่อแมปตัวแปรอินพุตกับตัวแปรเอาต์พุต โดยอธิบายได้ว่าพื้นที่ใต้กราฟของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุต จะถูกคำนวณและหารด้วยพื้นที่ทั้งหมดของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุต ค่าผลลัพธ์แสดงถึงจุดศูนย์กลางถ่วงหรือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนักของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเอาต์พุต สมการทางคณิตศาสตร์ของวิธี COG คือ $COG = \int y * \mu(y) dy / \int \mu(y) dy$ โดยที่ COG คือจุดศูนย์กลางถ่วง, y คือตัวแปรเอาต์พุต, $\mu(y)$ คือฟังก์ชันการเป็นสมาชิกของตัวแปรเอาต์พุต และอินทิกรัลจะครอบคลุมช่วงทั้งหมดของตัวแปรเอาต์พุต วิธี COG เป็นวิธีดีฟัซซีฟิเคชันยอดนิยมในระบบฟัซซีลอจิก เนื่องจากความเรียบง่ายและมีประสิทธิภาพในการแปลงเอาต์พุตฟัซซีเป็นค่าที่ชัดเจน ซึ่งสามารถเลือกกำหนดวิธีการทำดีฟัซซีฟิเคชันบนโปรแกรม LabVIEW ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.8

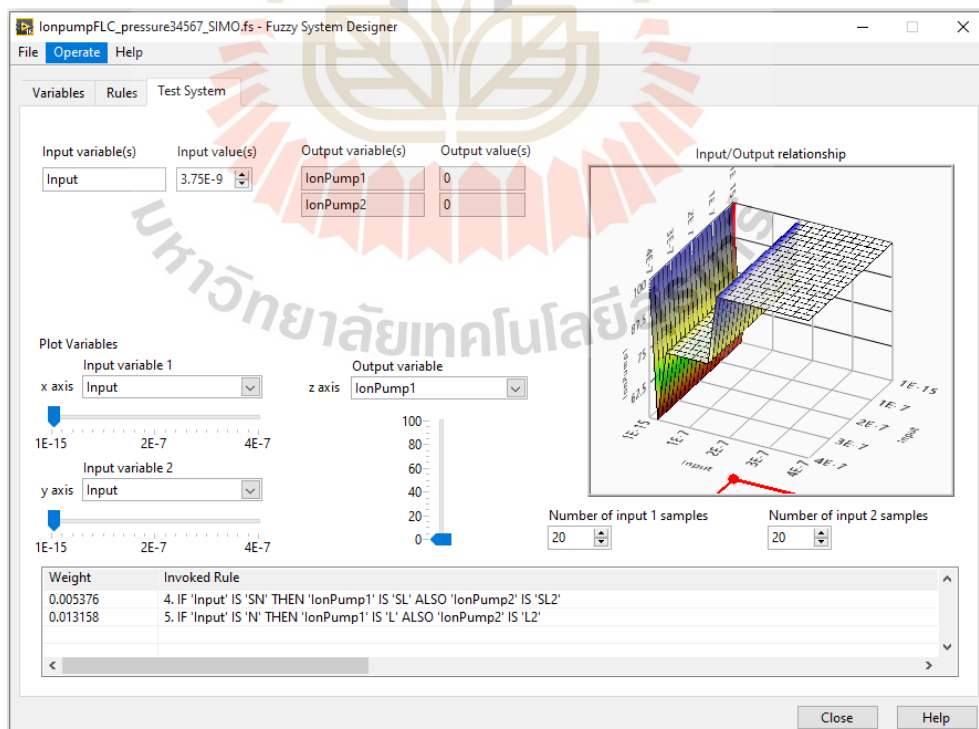


รูปที่ 4.8 การกำหนดวิธีการทำดีฟัซซิฟิเคชันบนโปรแกรม LabVIEW

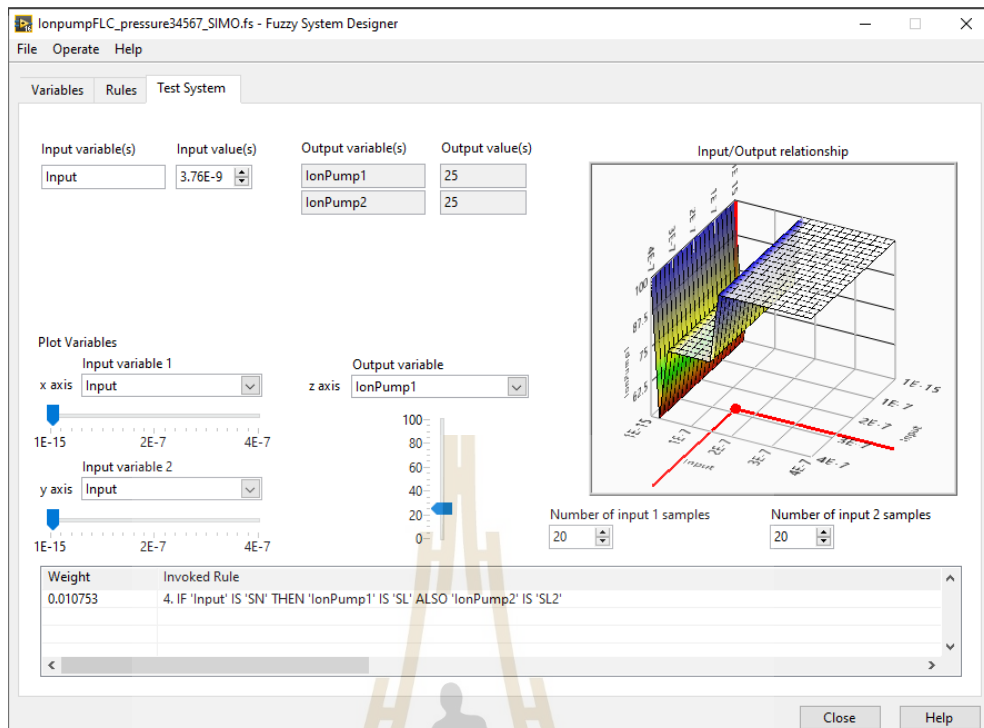
จากการออกแบบตัวควบคุมฟัซซีสำหรับควบคุมค่าความดันสูญญากาศในระบบทดลองที่ 2 ที่กล่าวในข้างต้น ผู้วิจัยจะดำเนินการจำลองกฎคลุมเครือที่สร้างขึ้นก่อนนำไปทดสอบจริงกับฮาร์ดแวร์ โดยการถอดรหัสจะแปลงภาษาที่ได้รับในรูปแบบของการอนุมานแบบคลุมเครือเป็นค่าเอาต์พุตจริง ด้วยฟังก์ชันสมาชิกภาพเดี่ยวที่มีชุดฟัซซีจำนวนห้าสมาชิกได้แก่ {0, 25, 50, 75, 100} เปอร์เซ็นต์ แทนการจ่ายแรงดันที่ {3000, 4000, 5000, 6000, 7000} โวลต์ ตามลำดับ แสดงผลการจำลองกฎคลุมเครือที่ออกแบบไว้ดังรูปที่ 4.9



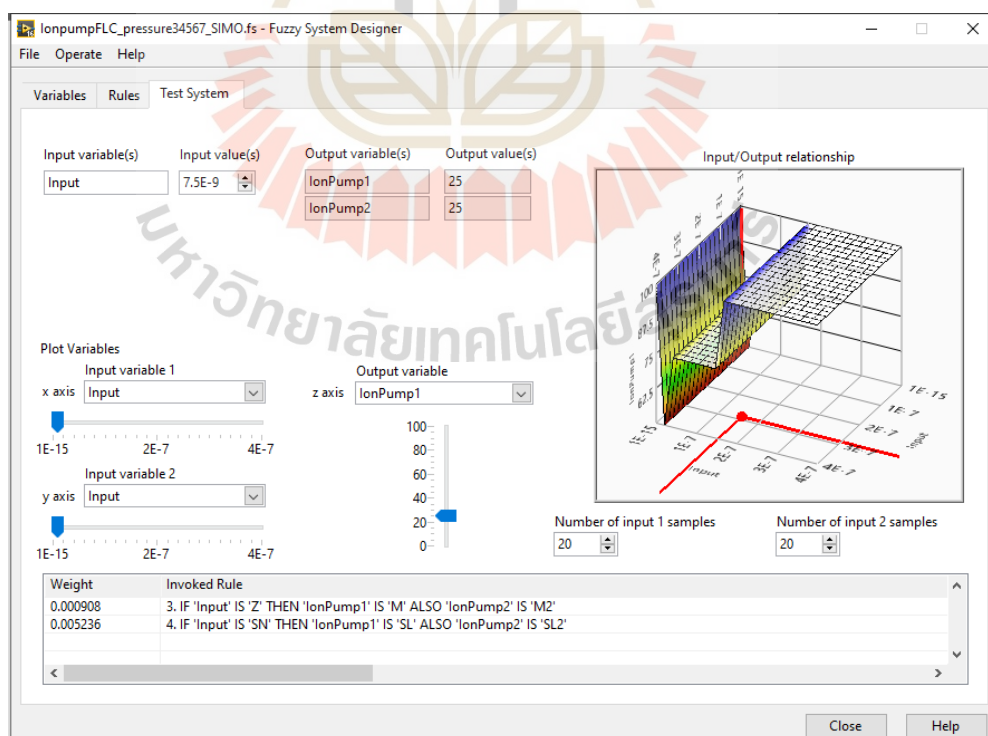
รูปที่ 4.9 (ก) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 9×10^{-14} เอาต์พุตมีค่าเป็น 0



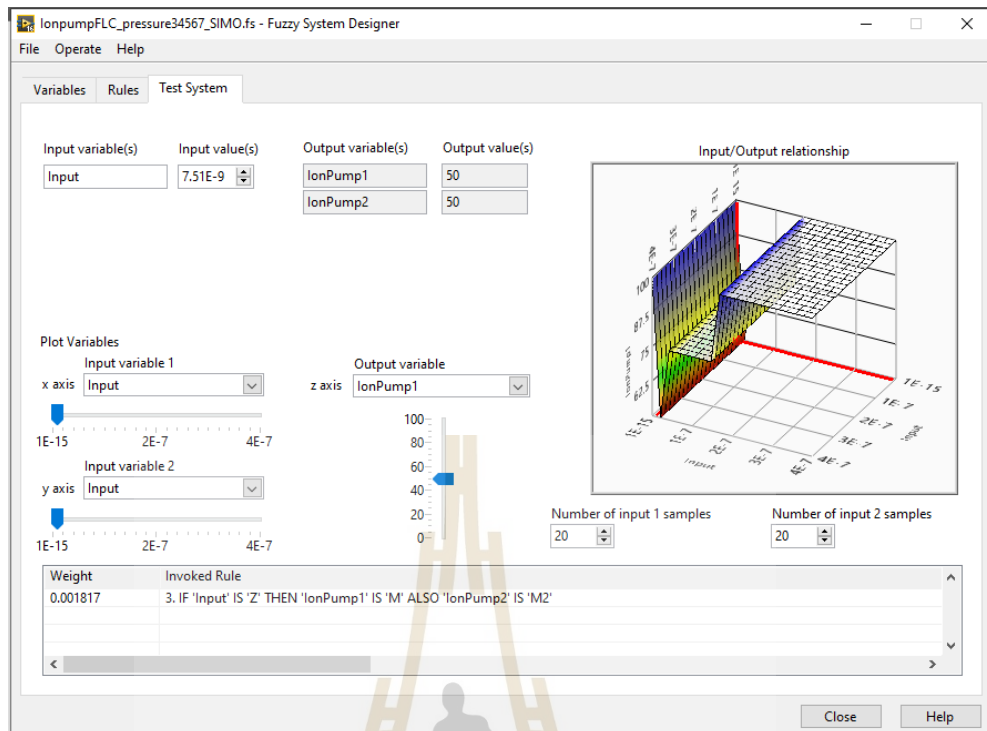
รูปที่ 4.9 (ข) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3.75×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 0



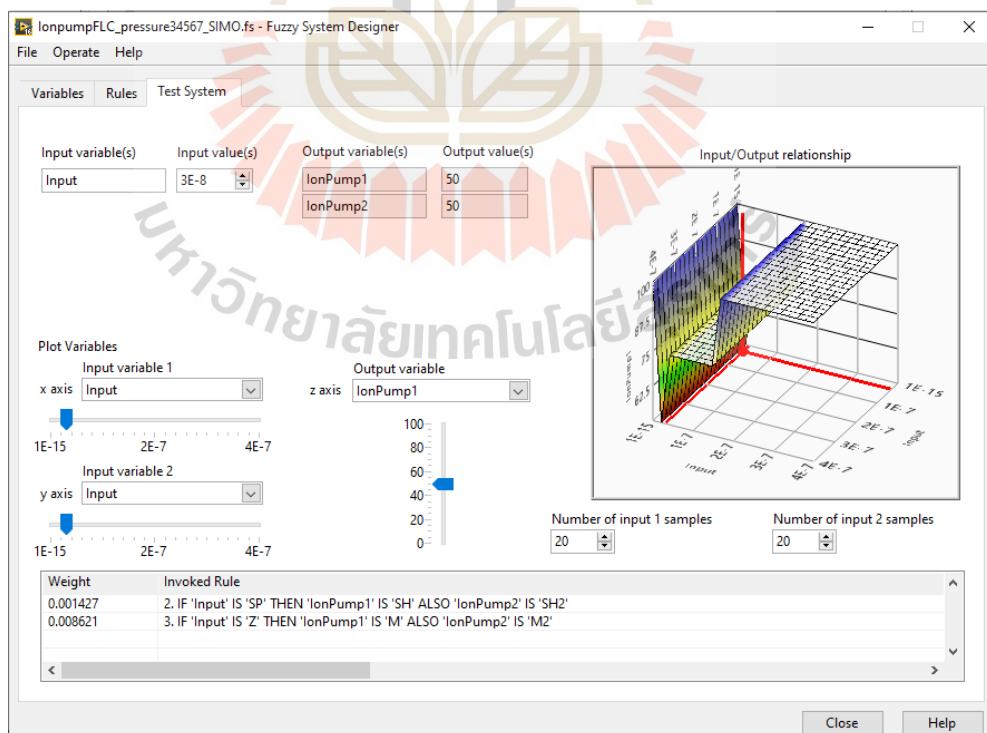
รูปที่ 4.9 (ค) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3.76×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 25



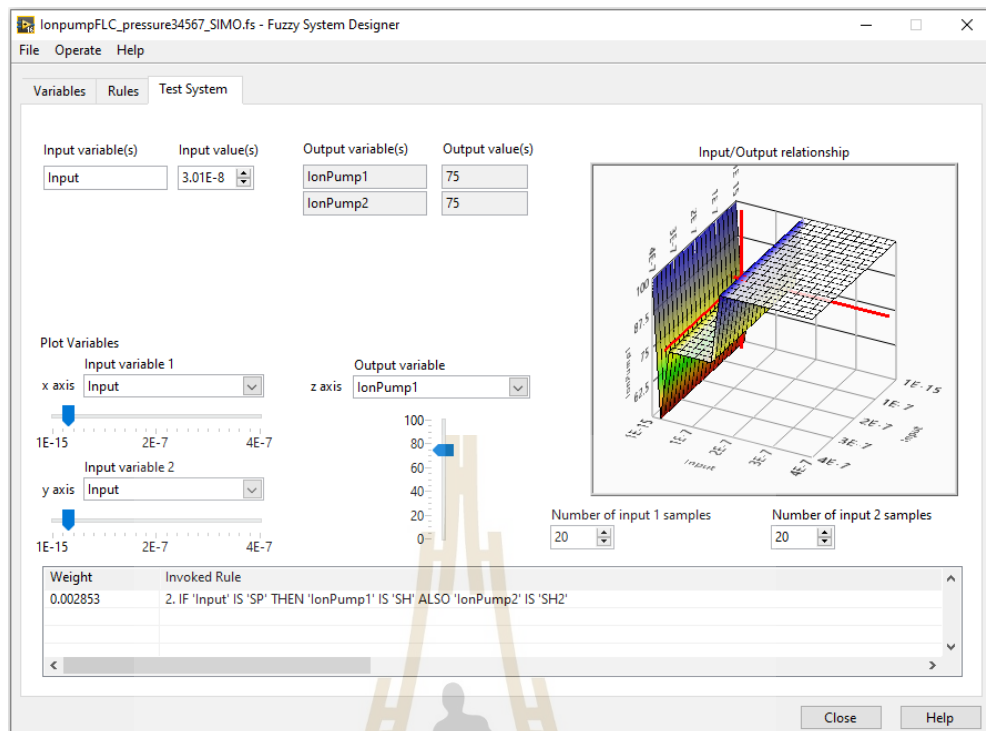
รูปที่ 4.9 (ง) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 7.5×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 25



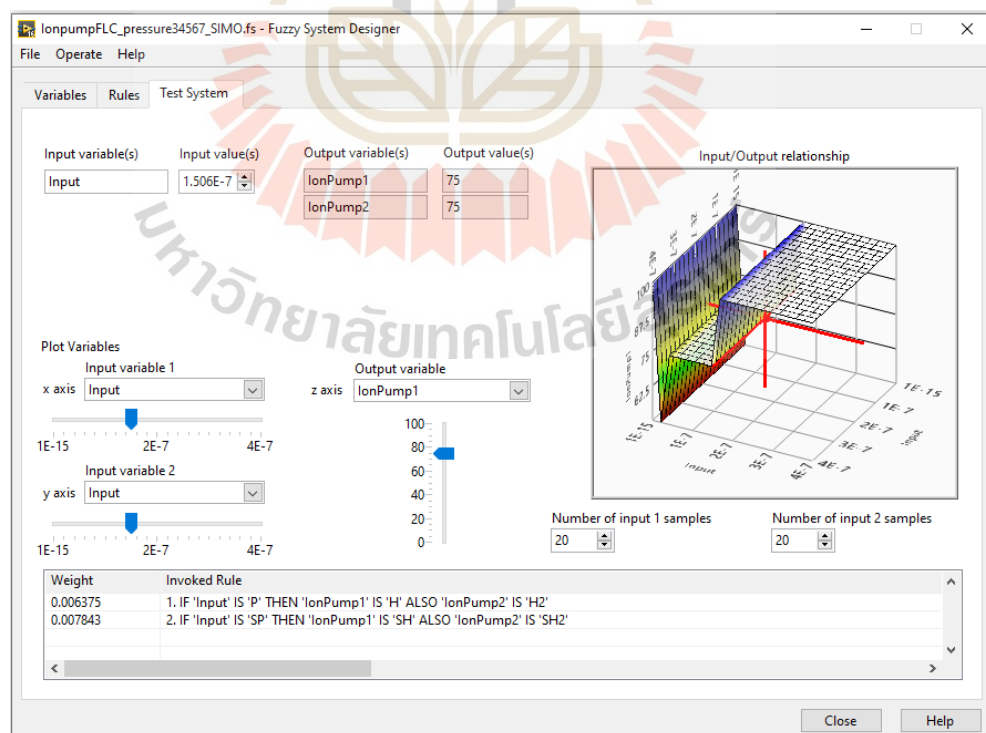
รูปที่ 4.9 (จ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 7.51×10^{-9} เอาต์พุตมีค่าเป็น 50



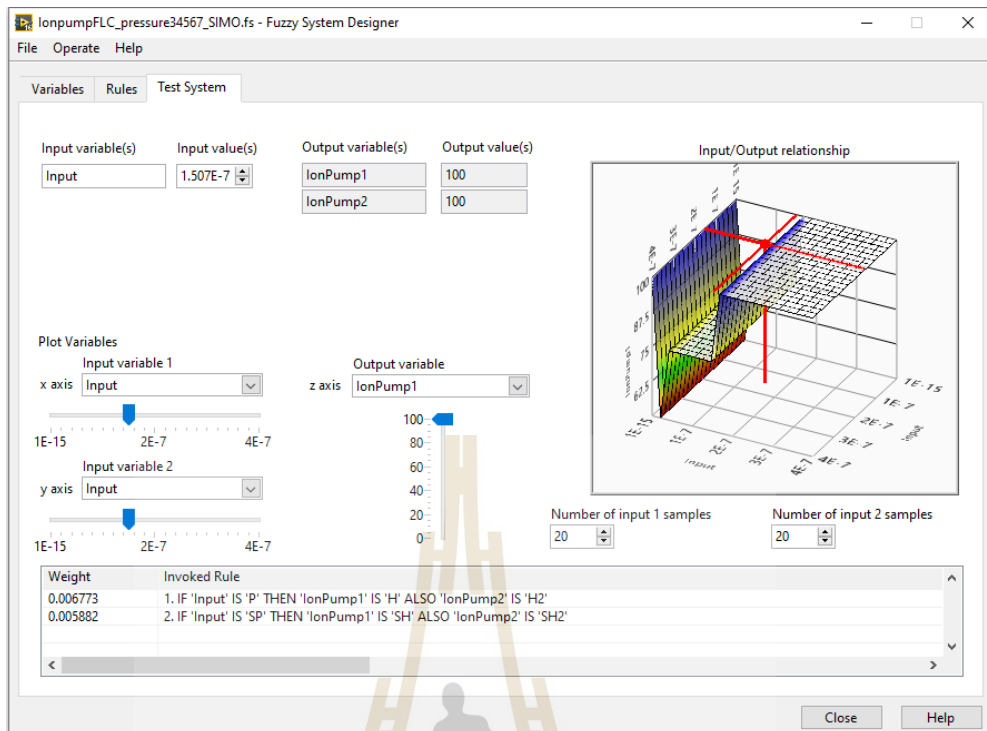
รูปที่ 4.9 (ฉ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3×10^{-8} เอาต์พุตมีค่าเป็น 50



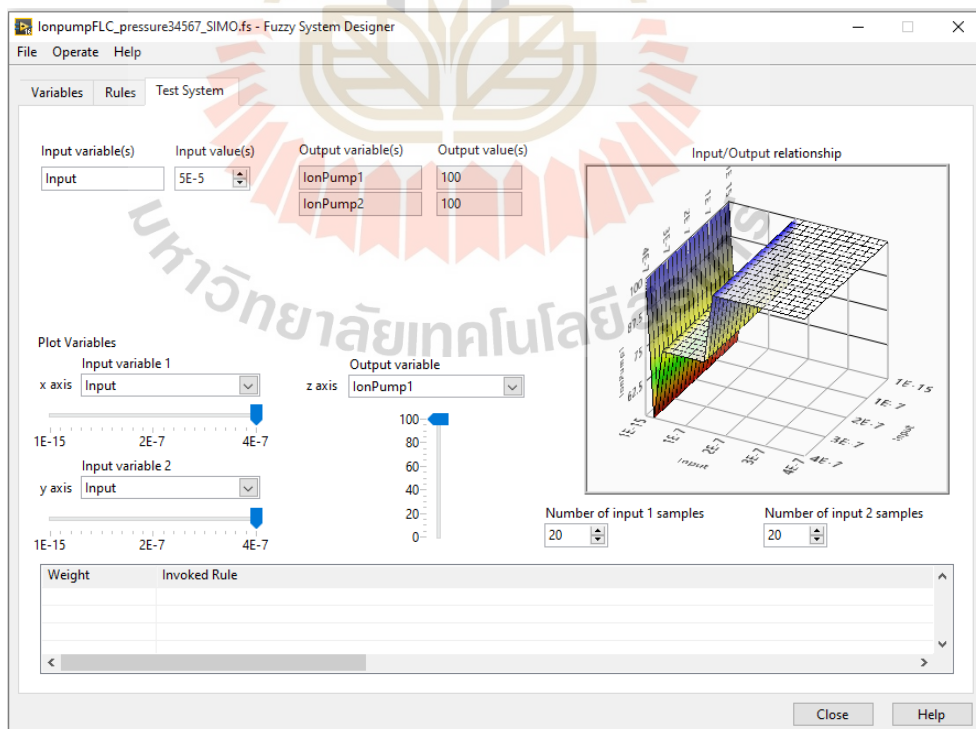
รูปที่ 4.9 (ข) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 3.01×10^{-8} เอาต์พุตมีค่าเป็น 75



รูปที่ 4.9 (ข) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 1.506×10^{-7} เอาต์พุตมีค่าเป็น 75



รูปที่ 4.9 (ฉ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 1.507×10^{-7} เอาต์พุตมีค่าเป็น 100



รูปที่ 4.9 (ญ) การจำลองกฎเมื่ออินพุตเท่ากับ 5×10^{-5} เอาต์พุตมีค่าเป็น 100

โดยรูปที่ 4.9 (ก) และ (ข) แสดงการจำลองเมื่อความดันอินพุตเท่ากับ 9×10^{-14} ทอร์ และ 3.75×10^{-9} ทอร์ ตามลำดับ อธิบายได้ว่าเมื่อตัวแปรอินพุตคือค่าความดันสุญญากาศ ณ ตำแหน่งที่ต้องการควบคุมมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.75×10^{-9} ทอร์ จะถูกกำหนดด้วยค่าภาษาศาสตร์อินพุตคือ N ซึ่งจะเข้าสู่กฎข้อแรกที่จะได้เอาต์พุตเพื่อควบคุมการจ่ายแรงดันของปั๊มตัวแรก และตัวที่สอง โดยมีค่าตัวแปรทางภาษาของเอาต์พุตของปั๊มทั้งสองเป็น L และ L2 ตามลำดับ นั่นคือ 0 เปอร์เซ็นต์ โดยที่แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายคือ 3000 โวลต์นั่นเอง ในขณะที่รูปที่ 4.9 (ค) และ (ง) แสดงความดันอินพุตคือ 3.76×10^{-9} ทอร์ และ 7.5×10^{-9} ทอร์ ตามลำดับ ซึ่งเข้ากฎข้อที่สองว่าด้วยตัวแปรทางภาษาของอินพุตคือ SN เอาต์พุตของปั๊มตัวแรกและปั๊มตัวที่สองที่มีตัวแปรทางภาษาคือ SL และ SL2 ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายคือ 4000 โวลต์ ในทำนองเดียวกัน รูปที่ 4.9 (จ) และ (ฉ) แสดงค่าความดันอินพุตเป็น 7.51×10^{-9} ทอร์ และ 3×10^{-8} ทอร์ ตามลำดับ ซึ่งเข้ากฎข้อ 3 ว่าด้วยตัวแปรทางภาษาของอินพุตคือ Z เอาต์พุตของปั๊มตัวแรกและปั๊มตัวที่สองมีตัวแปรทางภาษาเป็น M และ M2 ตามลำดับ นั่นคือเอาต์พุต 50 เปอร์เซ็นต์ แรงดันไฟฟ้าของแหล่งจ่ายคือ 5000 โวลต์ ในขณะที่ถ้าค่าความดันสุญญากาศอินพุตมีค่าเป็น 3.01×10^{-8} ทอร์ และ 1.506×10^{-7} ทอร์ การจำลองจะแสดงให้เห็นว่าเข้าสู่เงื่อนไขของกฎข้อที่ 4 ที่มีตัวแปรทางภาษาของอินพุตเป็น SP โดยที่เอาต์พุตของปั๊มตัวที่หนึ่งและปั๊มตัวที่สองมีค่าตัวแปรทางภาษาเป็น SH, SH2 ตามลำดับ คิดเป็นเอาต์พุต 75 เปอร์เซ็นต์ ต้องจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ 6,000 โวลต์ ดังแสดงในรูปที่ 4.9 (ซ) และ (ซ) และการจำลองกฎในรูปที่ 4.9 (ณ) และ (ญ) แสดงให้เห็นว่าค่าความดันอินพุตที่ 1.507×10^{-7} ทอร์ และ 5×10^{-5} ทอร์ ตามลำดับ จะเข้าสู่กฎข้อที่ 5 ตัวแปรทางภาษาของอินพุตเป็น P เอาต์พุตของปั๊มทั้งสองมีค่าตัวแปรทางภาษาเป็น H, H2 ตามลำดับ คิดเป็นเอาต์พุต 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะจ่ายแรงดันที่ระดับ 7000 โวลต์

4.5 การทดสอบและเก็บข้อมูลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมแบบฟuzzy logic ร่วมกับการอนุมานวิธีของ Mamdani เพื่อควบคุมรักษาความดันสุญญากาศในระดับ UHV สำหรับในท่อลำเลียงแสงของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน โดยออกแบบระบบการทดลองออกเป็นสองระบบคือ ระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 และ 2 ดังที่ได้ อธิบายไว้ก่อนในข้างต้น ทำการติดตั้งเกจวัดค่าความดันในตำแหน่งที่ต้องการควบคุมเพื่อใช้เป็นสัญญาณอินพุตให้กับตัวควบคุมฟuzzy ที่ผ่านการออกแบบมาอย่างเหมาะสม โดยสั่งการบนโปรแกรม LabVIEW ที่เชื่อมต่อกับตัวควบคุมปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออน (4UHV-controller) สำหรับตัวควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายพลังงานให้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนผ่านสายเคเบิล RS232 และ โมดูล MOXA สิ่งนี้ทำให้ระบบสามารถดำเนินการได้แบบเรียลไทม์โดยคอมพิวเตอร์ การเก็บข้อมูลจะ

บันทึกค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของปั๊ม ค่าความดันที่ตัวปั๊ม และกระแสที่จ่ายให้ปั๊มจาก 4UHV-controller บันทึกค่าความดันสุญญากาศที่ติดตั้งเกจวัดผ่านโมดูล TPG 300 ดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 ตัวควบคุมปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออน (4UHV-controller)

4.6 ผลการทดลอง

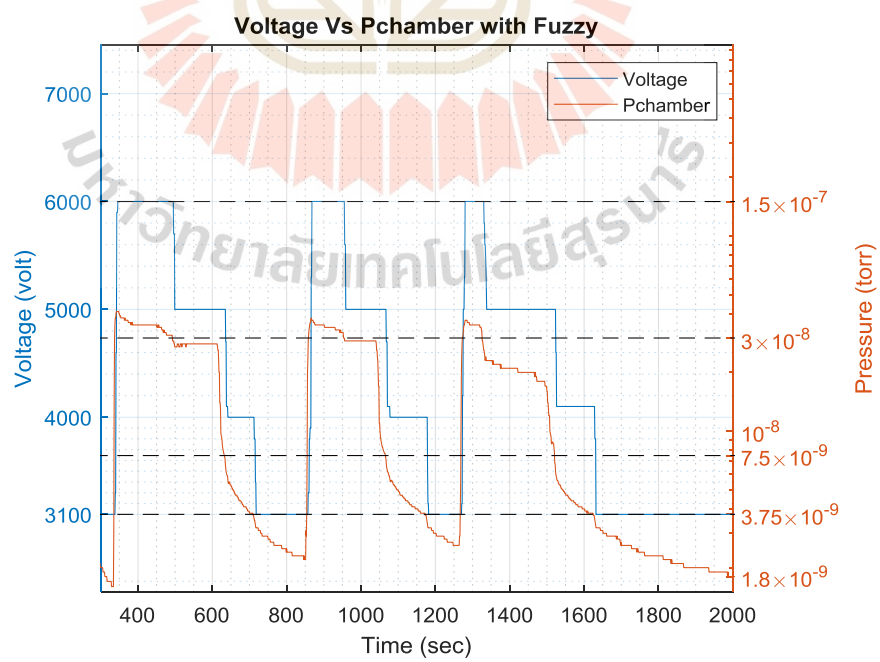
ผลการควบคุมค่าความดันสุญญากาศจากกฎพีซีซีที่ออกแบบไว้จะแสดงให้เห็นถึงการปรับเปลี่ยนค่าแรงดันแหล่งจ่ายของปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออนเมื่อค่าความดันสุญญากาศในตำแหน่งที่ต้องการควบคุมเป็นไปตามกฎทั้ง 5 ข้อ ดังที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ สำหรับผลการควบคุมในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 และ 2 ได้แสดงโดยละเอียดในหัวข้อที่ 4.6.1 และ 4.6.2 ตามลำดับ

4.6.1 ผลการควบคุมในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1

ระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 เป็นห้องสุญญากาศที่เชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศโดยตรง แสดงฮาร์ดแวร์ที่ใช้สำหรับการทดสอบได้ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งแสดงตำแหน่งของเกจวัดค่าความดันในห้องสุญญากาศดังที่ปรากฏ ผลการทดลองแสดงให้เห็นการควบคุมค่าแรงดันแหล่งจ่ายของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตามกฎพีซีซีที่ได้ออกแบบไว้อย่างถูกต้องและแม่นยำ



รูปที่ 4.11 ระบบทดลองสุญญากาศที่ 1

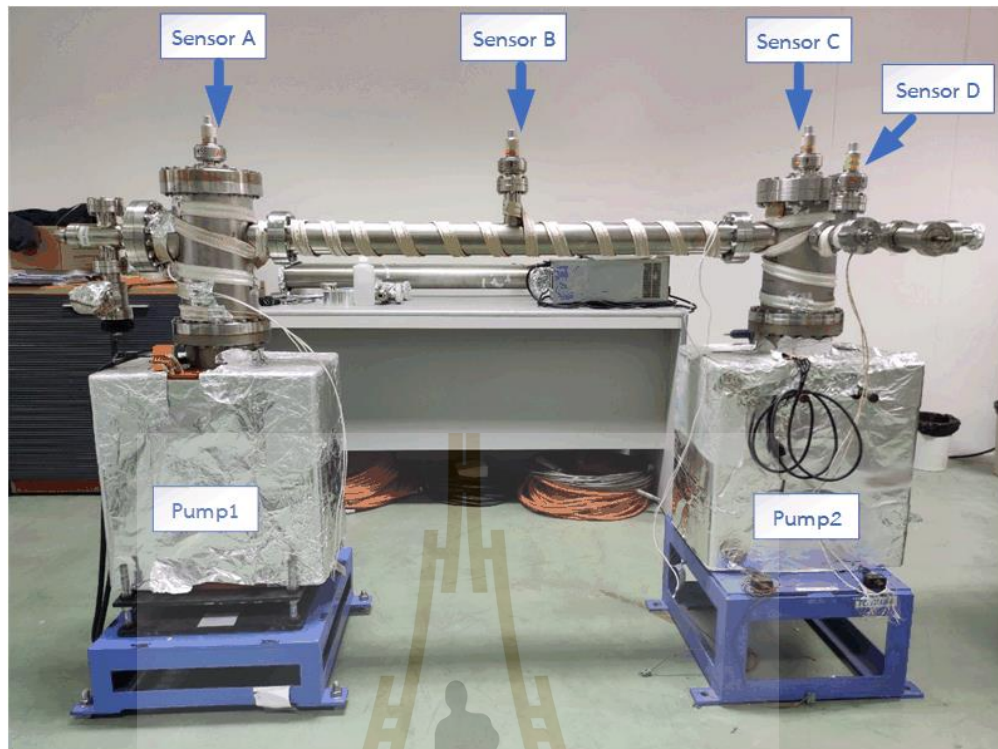


รูปที่ 4.12 ผลการควบคุมฟัซซีสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 1

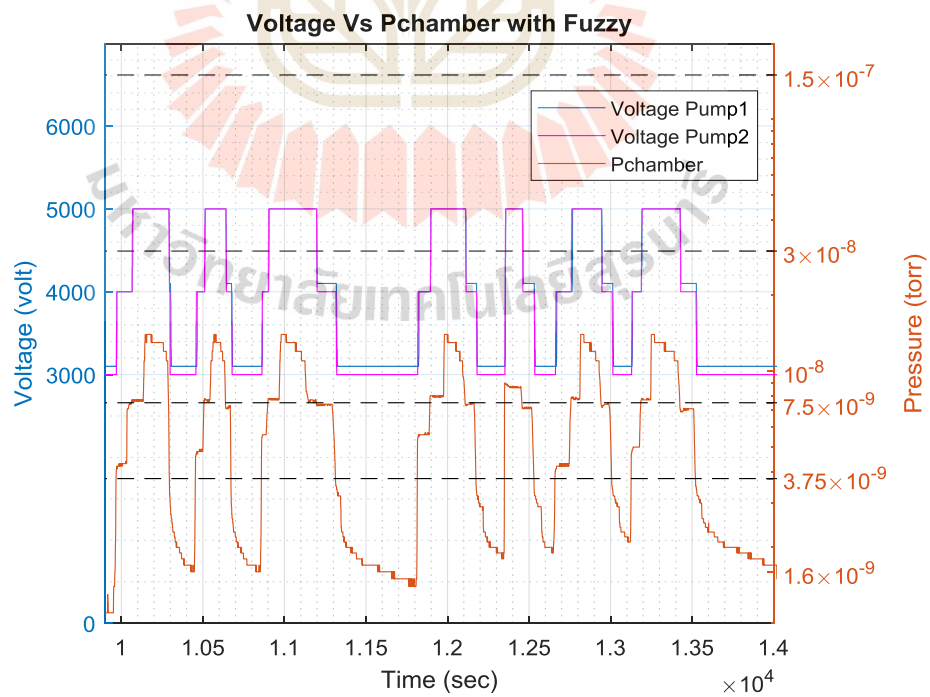
จากตารางที่ 4.3 การกำหนดกฎคลุมเครือที่ใช้ทดสอบในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 สามารถแสดงผลการทดลองให้เห็นว่ากฎฟuzzyควบคุมแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนเพื่อรักษาค่าความดันในห้องสุญญากาศ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดได้เป็นอย่างดี ถูกต้องและแม่นยำ รูปที่ 4.12 อธิบายได้อย่างชัดเจนว่าการปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มสุญญากาศสปีดเตอร์ไอออนที่แรงดัน 3000, 4000, 5000, 6000 และ 7000 โวลต์ ตามลำดับ (แสดงในแกน y ด้านซ้าย) มีความสัมพันธ์กับค่าความดันในห้องสุญญากาศ ณ ตำแหน่งที่ต้องการควบคุม แบ่งเงื่อนไขการเข้าสู่กฎแต่ละข้อของฟuzzyอย่างชัดเจนด้วยช่วงของค่าความดันที่ออกแบบโดยกฎคลุมเครือด้วยเส้นประ (แสดงในแกน y ขวา) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความดันเป็นไปตามกฎฟuzzyที่ออกแบบอย่างเหมาะสม นั่นคือเมื่อความดันห้องสุญญากาศต่ำกว่า 3.75×10^{-9} ทอร์ แรงดันแหล่งจ่ายของปั๊มคือ 3000 โวลต์ และจ่ายแรงดันที่ 4000 โวลต์ หากค่าความดันห้องสุญญากาศเท่ากับ 3.75×10^{-9} ทอร์ หรือค่าความดันห้องสุญญากาศอยู่ในช่วง 3.751×10^{-9} ถึง 7.5×10^{-9} ทอร์ แต่เมื่อค่าความดันห้องสุญญากาศเพิ่มขึ้นจนอยู่ในช่วง 7.51×10^{-9} ถึง 3×10^{-8} ทอร์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนคือ 5,000 โวลต์ และเมื่อค่าความดันห้องสุญญากาศเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 3.01×10^{-8} ถึง 1.506×10^{-7} ทอร์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนมีค่าเป็น 6000 โวลต์ และถ้าค่าความดันห้องสุญญากาศเพิ่มขึ้นมากกว่า 1.506×10^{-7} ทอร์ แหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนมีค่าเท่ากับ 7000 โวลต์

4.6.2 ผลการควบคุมในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2

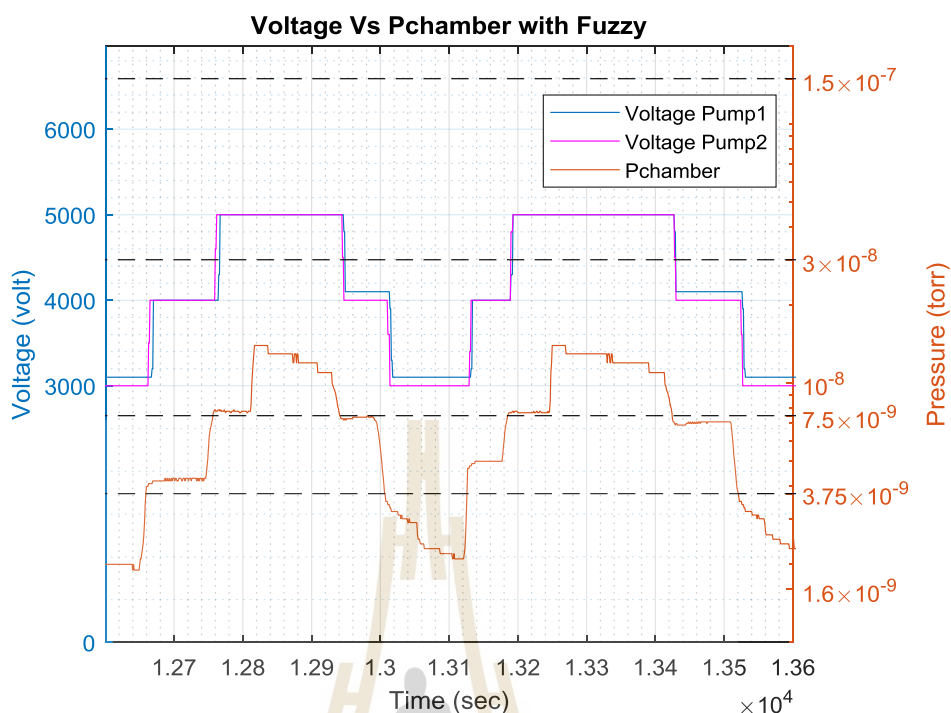
เมื่อทราบลักษณะการควบคุมความดันของระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 แล้วสามารถนำไปใช้กับระบบทดลองสุญญากาศที่ 2 ได้โดยใช้กฎฟuzzyเดียวกันกับที่กำหนดไว้ในตารางที่ 4.2 ลักษณะการทำงานคือกำหนดให้ค่าความดันสุญญากาศจากเกจวัด B ที่ตำแหน่งตรงกลางของท่อที่เชื่อมต่อระหว่างห้องสุญญากาศทั้งสองเป็นค่าความดันในการควบคุม เนื่องจากค่าความดันที่ตำแหน่งนี้มีค่าสูงสุดในระบบ หากค่าความดันที่ตำแหน่งนี้อยู่ในการควบคุมจะกล่าวได้ว่าค่าความดันที่ตำแหน่งอื่นๆ จะอยู่ในช่วงของค่าความดัน UHV อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบระบบนี้แสดงในรูปที่ 4.13 ผลการควบคุมแสดงดังรูปที่ 4.14 และได้ขยายความให้ชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความดันสุญญากาศที่ศูนย์กลางของท่อซึ่งเป็นตำแหน่งของความดันสูงสุดสามารถควบคุมให้ต่ำกว่า 3.75×10^{-9} ทอร์



รูปที่ 4.13 ระบบทดลองสุญญากาศที่ 2



รูปที่ 4.14 ผลการควบคุมฟัซซีสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 2



รูปที่ 4.15 ภาพขยายผลการควบคุมฟัซซีสำหรับระบบทดลองสุญญากาศที่ 2

ผลการทดสอบจริงเผยให้เห็นถึงประสิทธิภาพของการควบคุมความดันแบบฟัซซีในการเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของระบบ Fuzzy Logic ใช้เพื่อควบคุมแรงดันการจ่ายของปั๊มสปีดเตอร์ไอออนเพื่อให้ได้ความเร็วการสูบที่แตกต่างกัน ณ ค่าความดันเดียวกันสำหรับระดับแรงดันต่าง ๆ ซึ่งช่วยให้สามารถควบคุมกระบวนการสูบได้ดีขึ้น และรับประกันว่าความเร็วการสูบที่เหมาะสมจะคงไว้สำหรับสภาวะความดันที่กำหนด

การออกแบบตัวควบคุมฟัซซีในงานวิจัยนี้เลือกใช้วิธีการทำงานแบบหนึ่งอินพุตหลายเอาต์พุต โดยกำหนดให้อินพุตสำหรับการควบคุมคือค่าความดันสุญญากาศในตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดซึ่งเป็นจุดให้ค่าความดันอากาศสูงสุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าเป็นตำแหน่งที่มีความดันเป็นสุญญากาศต่ำสุดของระบบ เป็นค่าความดันสำหรับควบคุม เพื่อเป็นการยืนยันได้ว่าหากตำแหน่งที่มีความดันสุญญากาศต่ำสุดของระบบแล้ว ยังสามารถควบคุมให้อยู่ในย่านความดันสุญญากาศระดับ UHV ได้ ดังนั้นค่าความดันในตำแหน่งใด ๆ ของระบบ ย่อมมีค่าความดันเป็นสุญญากาศได้ดีกว่าตำแหน่งที่ใช้ในการควบคุม และเอาต์พุตของการควบคุมด้วยฟัซซีในงานวิจัยนี้กำหนดเป็นการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่ 3000, 4000, 5000, 6000 และ 7000 โวลต์ ตามลำดับ โดยการออกแบบตัวควบคุมจะพิจารณาจากการคำนวณหาประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสูงสุด อย่างเหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของตัวปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่มีความสัมพันธ์ของ

ความเร็วในการสุ่มร่วมกันระหว่างค่าความดันสุญญากาศและค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน การนำตัวควบคุมฟัซซีมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้มีข้อดีหลายด้าน ทั้งในเรื่องของการบรรลุค่าความดันสุญญากาศ UHV ในตำแหน่งที่ต้องการของระบบ ซึ่งผู้ใช้สามารถเข้าใจโครงสร้างระบบได้อย่างไม่ยุ่งยากซับซ้อนเกินไป ช่วยในการตัดสินใจจากกฎ ถ้า “เหตุ” แล้ว “ผล” สามารถกำหนดรูปแบบการประมวลผลหาค่าคำตอบของเอาต์พุตตัวควบคุมได้อย่างอิสระให้มีความเหมาะสมสำหรับระบบควบคุมตามที่ต้องการ อีกทั้งยังเป็นลดการใช้ประสบการณ์จากผู้เชี่ยวชาญเพียงอย่างเดียวในกระบวนการสั่งงานปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

4.7 สรุป

ฟัซซีหรือตรรกะคลุมเครือเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ในการจัดการกับความไม่แน่นอนในกระบวนการตัดสินใจ มักใช้ในระบบควบคุมเพื่อจัดการกับสถานการณ์ที่อินพุตไม่ชัดเจน ในกรณีของระบบ UHV สามารถใช้ตรรกะแบบคลุมเครือเพื่อควบคุมความดันภายในห้อง ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรักษาภาวะสุญญากาศที่ต้องการ ฟัซซีลอจิกมีประโยชน์สำหรับการควบคุมกระบวนการต่าง ๆ ในระบบ UHV สิ่งสำคัญคือต้องรักษาสภาพแวดล้อมที่มีความดันต่ำมากเพื่อป้องกันการปนเปื้อนหรือรบกวนการทดลอง การใช้ Fuzzy Logic เพื่อควบคุมพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อความดันภายในระบบ UHV เช่น อัตราการไหลของก๊าซ อุณหภูมิของระบบ หรือความเร็วของปั๊มสุญญากาศ การปรับพารามิเตอร์เหล่านี้โดยใช้ฟัซซีลอจิก ทำให้สามารถบรรลุสภาวะความดันที่ต้องการได้ในขณะที่ลดการใช้พลังงานและรักษาเสถียรภาพ แต่ในระบบที่ไม่มีฟัซซีลอจิก การควบคุมพารามิเตอร์และส่วนประกอบต่างๆ ของระบบ UHV อาจเป็นเรื่องที่ทำหายมากขึ้น ระบบอาจพึ่งพาวิธีการควบคุมแบบเดิม เช่น การควบคุมแบบ PID (proportion-al-integral-derivative) หรือการควบคุมแบบเปิด-ปิด วิธีการควบคุมแบบธรรมดาสามารถรักษาค่าที่กำหนดไว้สำหรับพารามิเตอร์ที่กำหนด เช่น ความดันหรืออุณหภูมิ แต่อาจไม่สามารถจัดการกับความซับซ้อนของระบบ UHV ซึ่งมักจะเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์หลายตัวและการโต้ตอบระหว่างส่วนประกอบต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น ในระบบ UHV ที่มีปั๊มสุญญากาศหลายตัว วิธีการควบคุมแบบเดิมอาจไม่สามารถปรับความเร็วการสูบของปั๊มแต่ละตัวให้เหมาะสมเพื่อให้ได้สภาวะแรงดันที่ต้องการ ซึ่งอาจนำไปสู่การดำเนินการที่ไม่มีประสิทธิภาพ ใช้ระยะเวลาดำเนินการนานขึ้น หรือคุณภาพของแสงลดลง นอกจากนี้ วิธีการควบคุมแบบเดิมอาจไม่สามารถปรับให้เข้ากับสภาวะที่เปลี่ยนแปลงหรือลักษณะการทำงานที่ไม่เชิงเส้นในระบบได้ สิ่งนี้สามารถทำให้เกิดความไม่เสถียรในระบบได้ โดยรวมแล้วการใช้ฟัซซีลอจิกในระบบ UHV มอวิธีการควบคุมที่ยืดหยุ่นและปรับเปลี่ยนได้มากกว่า ทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อสภาวะที่เปลี่ยนแปลงและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานแบบเรียลไทม์ ฟัซซีลอจิกยังสามารถจัดการกับระบบที่มีพารามิเตอร์และส่วนประกอบหลายตัว ทำให้เป็นวิธีการควบคุมที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นสำหรับระบบ UHV และ

จากการทดลองข้างต้น ทำให้ทราบถึงค่าความดันสุญญากาศ ณ ตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือวัด รวมถึงค่าแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน แต่ไม่อาจทราบค่าอัตราการไหลของก๊าซในระบบได้ และที่สำคัญไม่ทราบถึงประสิทธิภาพในการสูบของปั๊ม และเนื่องจากปั๊มมีอายุการใช้งานยาวนานผ่านการใช้งานหนัก อาจมีปัจจัยบางอย่างที่ทำให้ประสิทธิภาพการสูบลดลง ส่งผลให้ความเร็วในการสูบลดลง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาพฤติกรรมของโปรไฟล์ความดันสุญญากาศในระบบการทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์แอปพลิเคชัน Molflow+ โดยเริ่มจากระบบการทดลองสุญญากาศที่ 1 ซึ่งจะช่วยให้เข้าใจลักษณะและพฤติกรรมของความดันสุญญากาศได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งจะกล่าวถึงในบทถัดไป



บทที่ 5

การประเมินประสิทธิภาพความเร็วการสูบของปั๊มสุญญากาศ แบบสปีดเตอร์ไอออน

5.1 บทนำ

การได้มาซึ่งค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ต้องพึ่งการใช้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนทำงานในระบบที่มีความพร้อมต่อการดำเนินการสุญญากาศระดับ UHV ไม่ว่าจะเป็นวัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบจะต้องมีความเหมาะสมกับการทำสุญญากาศ ขนาดของห้องสุญญากาศจะต้องมีขนาดและรูปทรงที่เอื้อต่อการสูบได้อย่างเหมาะสม แม้กระทั่งขนาดของปั๊มซึ่งสอดคล้องกับความเร็วในการสูบ ยิ่งปั๊มมีความเร็วในการสูบสูงยิ่งทำให้ค่าความดันเข้าใกล้ความเป็นสุญญากาศได้ดียิ่งขึ้น จึงอาจกล่าวได้ว่าประสิทธิภาพความเร็วการสูบเป็นตัวบ่งชี้สำหรับการประเมินความสามารถของระบบความดันสุญญากาศ หากปั๊มมีประสิทธิภาพต่ำ จะส่งผลเสียต่อผลลัพธ์ของค่าความดันในห้องสุญญากาศ ดังนั้นการทำความเข้าใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการวางแผนเพื่อให้ได้ค่าความดันที่ต้องการ เนื้อหาในบทนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอการประยุกต์ใช้โปรแกรม Molflow+ ในการจำลองสถานการณ์ความดันสุญญากาศของระบบทดสอบรวมทั้งการใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network, ANN) ในการสร้างแบบจำลองของระบบทดสอบเพื่อทำนายประสิทธิภาพความเร็วของปั๊ม การได้มาซึ่งค่าประสิทธิภาพการสูบของปั๊มจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผน ปรับปรุง แก้ไขระบบสุญญากาศให้ได้มาซึ่งค่าความดันสุญญากาศที่ต้องการ

5.2 ความเร็วการสูบของปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออน

ปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออนเป็นปั๊มสุญญากาศประเภทหนึ่งที่ไม่มีส่วนเคลื่อนที่จึงไม่เกิดการสั่นสะเทือนเหมาะสำหรับระบบที่ต้องการความดันสุญญากาศระดับสูง สามารถสูบได้โดยใช้อนุภาคก๊าซไอออนที่เกิดจากสนามไฟฟ้า ความเร็วในการสูบของปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออนเป็นตัวชี้วัดที่สามารถลดความดันภายในระบบสุญญากาศได้เร็วเพียงใด ความเร็วในการสูบของปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออนขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ รวมถึงรูปร่างทรงเรขาคณิตของปั๊มและห้องสุญญากาศ แรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊ม ชนิดของก๊าซและความดันในระบบสุญญากาศ โดยทั่วไป ยิ่งแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสูงเท่าใด ความเร็วในการสูบของปั๊มก็จะยิ่งสูงขึ้น เนื่องจากไอออนจำนวนมากจะถูกสร้างขึ้นและถูกเร่งไปยังพื้นผิวเป้าหมาย ความเร็วในการสูบของปั๊มแบบสปีดเตอร์ไอออนมีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบ UHV ซึ่งจะช่วยให้สามารถบรรลุค่าความดันสุญญากาศในระบบได้อย่างที่คาดหวังและ

ยังคงรักษาความดันสุญญากาศในระดับ UHV นั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญ และด้วยการให้ความเร็วในการสูบสูง บีมแบบสปัตเตอร์ไอออนจะมีความสามารถในการกำจัดโมเลกุลของก๊าซได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ และยังรักษาภาวะสุญญากาศที่ต้องการในระบบได้เป็นอย่างดี จากหัวข้อที่ 4.3 ในบทที่ 4 ได้กล่าวถึงความเร็วในการสูบของบีมจากข้อจำกัดเฉพาะของตัวบีมแล้วนั้น หากแต่บีมมีอายุการใช้งานที่ยาวนานและผ่านการใช้งานมาอย่างเต็มรูปแบบ เราจะทราบได้อย่างไรว่าบีมที่ใช้งานอยู่ในขณะนั้นมีประสิทธิภาพในการสูบเป็นอย่างไร ลดลงจากเดิมมากน้อยเพียงใด ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงศึกษาการหาประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของบีม พบว่า ค่าความดันสุญญากาศสามารถจำลองผ่านโปรแกรม Molflow+ ได้โดยแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของความดัน ณ ตำแหน่งใด ๆ ในระบบทดลองได้อย่างชัดเจน

5.3 การจำลองสถานการณ์สุญญากาศด้วยโปรแกรม Molflow+

Molflow+ เป็นโปรแกรมซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบสุญญากาศระดับสูงพิเศษ (UHV) สำหรับจำลองพฤติกรรมของก๊าซในระบบสุญญากาศ ออกแบบมาเพื่อคำนวณการไหลของโมเลกุลก๊าซ การกระจายความดัน คำนวณคุณสมบัติต่าง ๆ ของก๊าซเช่นเส้นทางเฉลี่ยของการเคลื่อนที่เสรีของโมเลกุลแก๊สในสถานะแก๊สหรือระยะทางเฉลี่ยที่โมเลกุลแก๊สเคลื่อนที่ได้ก่อนจะมีการชนกับโมเลกุลอื่น ๆ ความเร็วในการสูบ และพารามิเตอร์อื่น ๆ ในระบบสุญญากาศโดยใช้เทคนิคการจำลองแบบมอนติคาร์โล ในการจำลองการเคลื่อนที่แบบสุ่มของโมเลกุลของก๊าซและการชนกับพื้นผิวของห้องสุญญากาศ โปรแกรม Molflow+ มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์พฤติกรรมโมเลกุลของก๊าซในห้องสุญญากาศรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อน และสำหรับการทำนายอัตราการไหลของก๊าซในระบบสุญญากาศต่าง ๆ ซอฟต์แวร์นี้สามารถจำลองได้ทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน และสามารถรองรับประเภทก๊าซและความดันได้หลากหลาย โปรแกรม Molflow+ สามารถใช้ในการออกแบบและเพิ่มประสิทธิภาพระบบ UHV โดยทำนายพฤติกรรมของโมเลกุลก๊าซและการระบุปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเช่นการรั่วไหลหรือความเร็วในการสูบที่ไม่เพียงพอ โปรแกรม Molflow+ ได้รับการพัฒนาโดยกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ที่ Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences และเป็นชุดซอฟต์แวร์ฟรี ผู้ใช้สามารถดาวน์โหลดที่ [MolFlow downloads | Molflow+ \(cern.ch\)](https://molflow.cern.ch/) ซึ่งมีลิขสิทธิ์โดย CERN และ E.S.R.F. เครื่องมือนี้ได้กลายเป็นเครื่องมือยอดนิยมในสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุญญากาศ และถูกใช้โดยนักวิจัยและวิศวกรในอุตสาหกรรมที่ทำงานกับระบบ UHV ในสาขาต่าง ๆ เช่นวิทยาศาสตร์วัสดุฟิสิกส์พื้นผิวและเทคโนโลยีสุญญากาศรัฐบาล และสถาบันการศึกษาทั่วโลก โดยทั่วไปกระบวนการจำลองจะเกี่ยวข้องกับสี่ขั้นตอนหลักดังนี้ 1. การนำเข้าหรือสร้างรูปร่างทรงเรขาคณิตของระบบสุญญากาศ 2. การตั้งค่าพารามิเตอร์การจำลองเช่นอุณหภูมิและคุณสมบัติการผ่านได้ของโมเลกุลในตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบที่สร้างขึ้น การสร้างระนาบ

พฤติกรรมของก๊าซในระบบสุญญากาศ 3.การกำหนดอัตราการ outgassing ของห้องสุญญากาศ รวมถึงการกำหนดตำแหน่งและขนาดของปั๊ม และ 4. คือการวิเคราะห์ผลการจำลองพฤติกรรมของ ก๊าซในระบบสุญญากาศ

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรม Molflow+ ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของความดันสุญญากาศในระบบการทดลองที่ 1 และ 2 โดยจะเริ่มจากการเก็บข้อมูลค่าความดันในสภาวะคงตัวของเกจวัดค่าความดันทุกตำแหน่งในระบบทดลอง รวมถึงค่าความดันและแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มเพื่อนำมาเป็นข้อมูลเริ่มต้นและตรวจสอบความถูกต้องในการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ จากนั้นทำการสร้างรูปร่างทรงเรขาคณิตของระบบทดลองสุญญากาศในโปรแกรม Molflow+ กำหนดตำแหน่งและความเร็วในการสูบของปั๊มที่ติดตั้งทุกตัวในระบบทดลอง ในส่วนนี้จะอธิบายจากชุดข้อมูลที่นำเสนอแสดงในตารางที่ 5.1 กล่าวคือเป็นชุดข้อมูลจากการเก็บข้อมูลสำหรับระบบทดลองห้องสุญญากาศ 1 ชุดข้อมูลการทดลองนี้ให้ค่าความดันที่ปั๊ม (Pressure of Ion Pump, Pi) มีค่าเป็น 2.32×10^{-10} มิลลิบาร์ โดยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มมีค่าเท่ากับ 3000 โวลต์ เมื่อนำค่าที่ได้นี้แทนลงในสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันและแรงดันของปั๊ม พบว่าความเร็วในการสูบของปั๊มมีค่าเท่ากับ 288 ลิตร/วินาที จากนั้นจึงกำหนดค่าความเร็วในการสูบที่คำนวณได้ลงในโปรแกรม Molflow+ และทำการปรับค่าพารามิเตอร์อัตราการ outgassing (Q) ของระบบที่สภาวะปกติ นั่นคือกรณีที่ค่าความดันจากการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ ตรงกับค่าความดันที่วัดได้จากเกจวัดในทุกตำแหน่งในระบบทดลองห้องสุญญากาศ 1 ผู้วิจัยติดตั้งเกจวัดในตำแหน่งของห้องสุญญากาศ (Pressure of Chamber, Pch) และทำการศึกษาผลลัพธ์ของความดันสุญญากาศในระบบต่ออัตราการ outgassing โดยการทดสอบต่อด้วยกระบวนการเพิ่มขึ้นและลดลงคิดเป็น 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ของอัตราการ outgassing ผลการศึกษาแสดงดังในตารางที่ 5.1

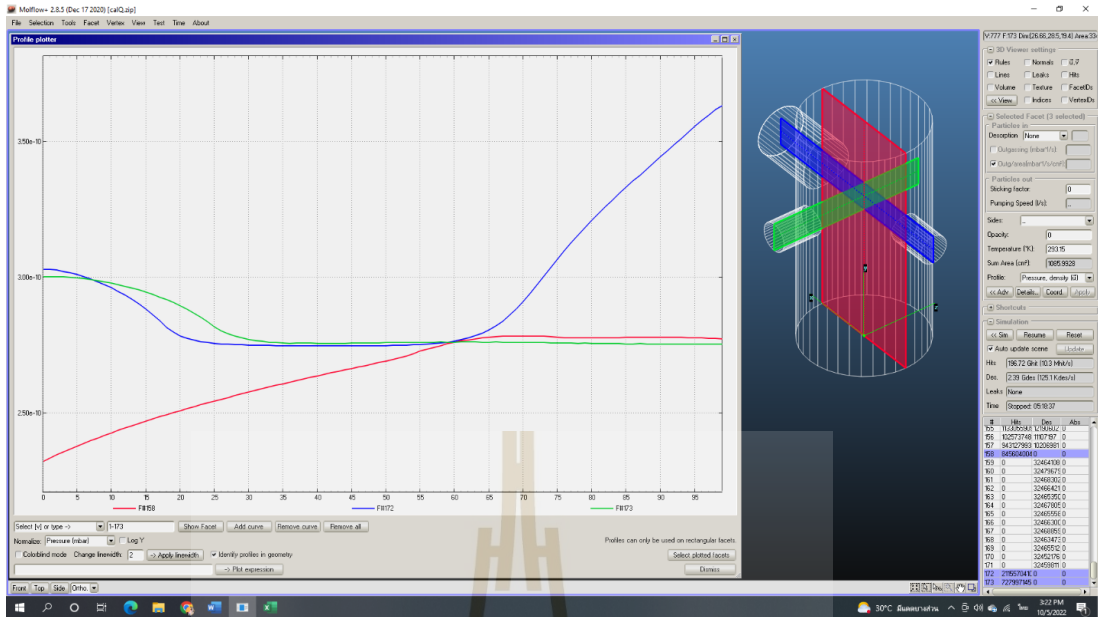
ตารางที่ 5.1 ประสิทธิภาพการสูบที่ความเร็ว 288 ลิตร/วินาที สำหรับระบบทดลองห้องสุญญากาศ 1

%Outgassing Rate	Q (mbar. L/s)	Pch (mbar)	Pi (mbar)
-15%	2.975×10^{-11}	2.55×10^{-10}	1.97×10^{-10}
-10%	3.150×10^{-11}	2.70×10^{-10}	2.09×10^{-10}
-5%	3.325×10^{-11}	2.86×10^{-10}	2.21×10^{-10}
normal	3.500×10^{-11}	3.00×10^{-10}	2.32×10^{-10}
5%	3.675×10^{-11}	3.15×10^{-10}	2.44×10^{-10}
10%	3.850×10^{-11}	3.31×10^{-10}	2.56×10^{-10}
15%	4.025×10^{-11}	3.45×10^{-10}	2.67×10^{-10}

จากผลการจำลองโดยโปรแกรม Molflow+ ดังแสดงในตารางที่ 5.1 อธิบายได้ว่าเมื่อ กำหนดให้ค่าความเร็วในการสูบของปั๊มคงที่ (288 ลิตร/วินาที) การเพิ่มขึ้นและลดลงของอัตราการ outgassing มีผลต่อพฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบอย่างเห็นได้ชัด โดยการเพิ่มขึ้นของอัตราการ outgassing จะนำไปสู่การได้มาซึ่งค่าความดันที่สูงขึ้นทั้งในส่วนของภายในห้องสุญญากาศ (Pch) และแม้แต่ที่ปั๊มสูบเองก็ตาม (Pi) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีที่ว่า Outgassing คือกระบวนการที่วัสดุ ระเหยโมเลกุลของก๊าซออกมาจากผิวหรือพื้นผิวของวัตถุเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีความดันต่ำหรือมีความดันสุญญากาศสูง โดยอัตราการระเหยของก๊าซต่าง ๆ ที่ออกมาจากวัตถุ มักใช้หน่วยวัดเป็นปริมาณของ ก๊าซที่ระเหยออกมาต่อหน่วยพื้นที่หรือปริมาณก๊าซต่อหน่วยเวลา ยิ่งมีอนุภาคของก๊าซระเหยออกมา มากเท่าไรความดันอากาศภายในก็จะสูงขึ้นเท่านั้น ในทางกลับกันเมื่อกำหนดความเร็วในการสูบ คงที่ การลดลงของอัตราการ outgassing จะนำไปสู่ค่าความดันที่ต่ำกว่าหรืออาจกล่าวได้ว่ามีสภาวะ ความเป็นสุญญากาศมากขึ้น ซึ่งการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนทั้งค่า ความดัน ณ ตำแหน่งของปั๊มและภายในห้องสุญญากาศ ในสภาวะความดันสุญญากาศระดับ UHV ที่มีความดันอากาศต่ำมาก การ outgassing เป็นปัญหาที่สำคัญเนื่องจากอัตราการระเหยของก๊าซจาก วัตถุจะสูงขึ้นอย่างมาก นั่นจะทำให้ความดันภายในห้องสุญญากาศมีค่าสูงขึ้น หนึ่งในวิธีที่สามารถบรรล ุการลดอัตราการ outgassing ได้คือการทำความสะอาดชิ้นงานทุกชิ้นในระบบสุญญากาศอย่างถูกต้อง และเหมาะสมอย่างมากหรือตั้งแต่ขั้นตอนการเลือกวัสดุของห้องสุญญากาศ อุปกรณ์ทุกชิ้นที่ใช้ใน ระบบให้มีอัตราการ outgassing น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ก็เป็นส่วนหนึ่งของการได้มาซึ่งค่าความดัน สุญญากาศที่ต้องการ

5.3.1 ผลการจำลองสถานการณ์ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1

โปรแกรม Molflow+ ถูกนำมาใช้เพื่อแสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมของความดัน สุญญากาศในระบบการทดลอง การใช้งานซอฟต์แวร์ผู้ใช้จำเป็นต้องสร้างระนาบแสดงค่าความดัน สุญญากาศตามแนวแกนที่ผู้ใช้สนใจและต้องการพิจารณา ซึ่งในส่วนนี้ผู้วิจัยจะนำเสนอแนวแกนความ ดันที่สนใจ 3 แนวแกนในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 ด้วยโปรแกรม Molflow+ กล่าวคือ แนวแกน ความดันจากตำแหน่งของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนไปยังฝาครอบของหน้าแปลนด้านบนของ ห้องสุญญากาศ โดยมีความยาวเท่ากับความสูงของห้องสุญญากาศมีค่าเท่ากับ 285 มิลลิเมตร (จากล่าง ขึ้นบนของแนวแกนสีแดง แสดงเป็น 0-100 เปอร์เซ็นต์ของระยะความยาวของระนาบที่ 285 มิลลิเมตร) แนวแกนที่สองสร้างจากตำแหน่งหน้าแปลน CF 70 ไปจนถึงขอบผิวของห้องสุญญากาศมี ความยาวทั้งสิ้น 194 มิลลิเมตร แสดงด้วยแนวแกนสีเขียว และแนวแกนที่สามที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นคือจาก ตำแหน่งหน้าแปลน CF 70 ถึง CF 114 มีความยาว 273 มิลลิเมตร แสดงด้วยแนวแกนสีน้ำเงิน โดย ทุกระนาบสี่แต่ละอันที่สร้างขึ้นภายในระบบจะถูกประมวลผลและนำเสนอเป็น 0-100 เปอร์เซ็นต์ ของระยะทางตามแนวแกนแต่ละระนาบ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 พฤติกรรมค่าความดันสูญญากาศในระบบทดลองสูญญากาศที่ 1 ด้วยโปรแกรม Molflow+

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลค่าความดันสูญญากาศแต่ละแนวแกนโดยโปรแกรม Molflow+ ในระบบทดลองสูญญากาศที่ 1

%x	Red Line		Green Line		Blue Line	
	x (mm)	P (10^{-10} mbar)	x (mm)	P (10^{-10} mbar)	x (mm)	P (10^{-10} mbar)
0	0	2.32	0.00	3	0.00	3.03
0.05	14.25	2.38	9.70	3	13.65	3.01
0.10	28.50	2.43	19.40	2.98	27.30	2.96
0.15	42.75	2.47	29.10	2.95	40.95	2.89
0.20	57.00	2.51	38.80	2.9	54.60	2.79
0.25	71.25	2.55	48.50	2.82	68.25	2.76
0.30	85.50	2.58	58.20	2.77	81.90	2.75
0.35	99.75	2.61	67.90	2.76	95.55	2.75
0.40	114.00	2.64	77.60	2.76	109.20	2.75
0.45	128.25	2.67	87.30	2.76	122.85	2.75
0.50	142.50	2.69	97.00	2.76	136.50	2.75

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลค่าความดันสุญญากาศแต่ละแนวแกนโดยโปรแกรม Molflow+ ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 (ต่อ)

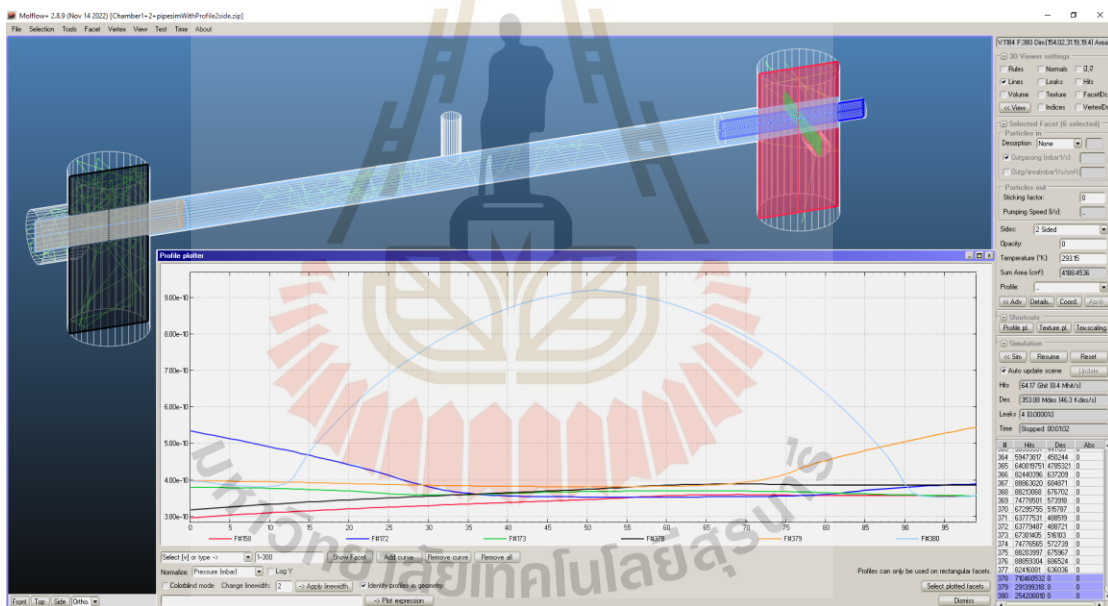
%x	Red Line		Green Line		Blue Line	
	Axial		Axial		Axial	
	Pressure	Pressure	Pressure	Pressure	Pressure	Pressure
x (mm)	P (10 ⁻¹⁰ mbar)	x (mm)	P (10 ⁻¹⁰ mbar)	x (mm)	P (10 ⁻¹⁰ mbar)	
0.55	156.75	2.73	106.70	2.76	150.15	2.75
0.60	171.00	2.76	116.40	2.76	163.80	2.77
0.65	185.25	2.78	126.10	2.76	177.45	2.81
0.70	199.50	2.78	135.80	2.76	191.10	2.91
0.75	213.75	2.78	145.50	2.76	204.75	3.07
0.80	228.00	2.78	155.20	2.76	218.40	3.21
0.85	242.25	2.78	164.90	2.76	232.05	3.33
0.90	256.50	2.78	174.60	2.76	245.70	3.45
0.95	270.75	2.78	184.30	2.76	259.35	3.56
1.00	285.00	2.78	194.00	2.76	273.00	3.63

ตามตารางที่ 5.2 แสดงข้อมูลค่าความดันสุญญากาศแต่ละแนวแกนโดยโปรแกรม Molflow+ นำเสนอในรูปแบบเป็น 0–100 เปอร์เซ็นต์ของระยะความยาวของแต่ละระนาบ ระนาบแนวแกนเส้นสีแดงแสดงถึงความสูงจากปั๊มถึงฝาครอบด้านบนสุดของห้องสุญญากาศ ซึ่งมีระยะ 285 มิลลิเมตร ระนาบแนวแกนเส้นสีเขียวแสดงถึงระยะทางความยาวจากหน้าแปลน CF 70 ไปจนถึงขอบผิวของห้องสุญญากาศซึ่งมีความยาวทั้งสิ้น 194 มิลลิเมตร และระนาบแนวแกนเส้นสีน้ำเงินแสดงถึงระยะทางของเส้นผ่านศูนย์กลางจากตำแหน่งหน้าแปลน CF 70 ถึง CF 114 มีความยาว 273 มิลลิเมตร จุดตัดของเส้นทั้งสามมีค่าความดันสุญญากาศเท่ากันมีค่าเท่ากับ 2.76×10^{-10} มิลลิบาร์ ตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัดความดันของห้องสุญญากาศสามารถพิจารณาได้จากข้อมูลการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ ในระนาบแนวแกนเส้นสีเขียว ณ ตำแหน่ง $x = 0$ มิลลิเมตร ในขณะที่ตัวบ่งชี้ค่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนสีแดงพิจารณาได้จากข้อมูลการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ ในระนาบแนวแกนเส้นสีแดง ณ ตำแหน่ง $x = 0$ มิลลิเมตร ข้อมูลที่เก็บได้จากการทดลองจริงทำหน้าที่เป็นค่าอ้างอิงในการจำลองอัตราการปล่อยก๊าซทั่วพื้นผิวทั้งหมดของห้องสุญญากาศก๊าซในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 พบว่า อัตราการ outgassing มีค่าอยู่ที่ 3.5×10^{-11} มิลลิบาร์ลิตรต่อวินาที (mbar.l/s) เมื่อกำหนดความเร็วในการสูบของปั๊มมีค่าเท่ากับ 288 ลิตร/วินาที

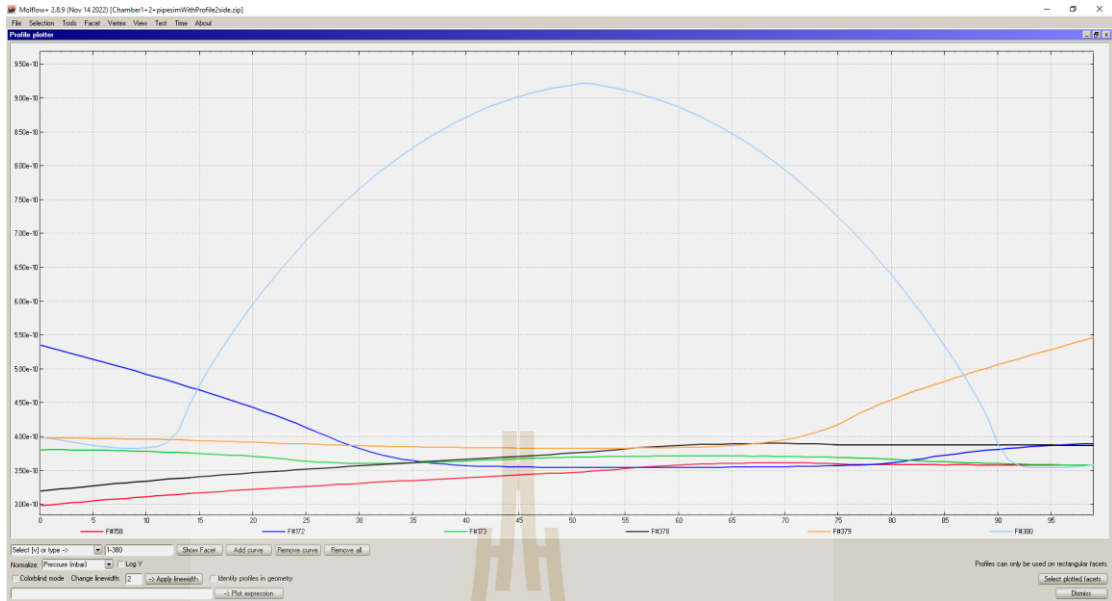
ค่านี้สอดคล้องกับสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสูญเสียอากาศเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มมีค่าเป็น 3000 V ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4.1

5.3.2 ผลการจำลองสถานการณ์ในระบบทดลองสูญเสียอากาศที่ 2

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองสร้างระบบสูญเสียอากาศที่ 2 ซึ่งประกอบด้วยห้องสูญเสียอากาศจำนวน 2 ห้อง เชื่อมต่อกันด้วยท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 65 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 60.3 มิลลิเมตร และมีความยาว 1,000 มิลลิเมตร โดยขนาดของห้องสูญเสียอากาศที่ 1 คือ ระบบในการทดลองสูญเสียอากาศที่ 1 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 146 มิลลิเมตร สูง 285 มิลลิเมตร ปริมาตรหน้าแปลนรวม 4,498,615.15 ลูกบาศก์มิลลิเมตร และขนาดของห้องที่ 2 มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 146 มิลลิเมตร สูง 310 มิลลิเมตร และปริมาตรหน้าแปลนรวม 5,248,639.03 ลูกบาศก์มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และขยายให้เห็นถึงพฤติกรรมค่าความดันสูญเสียอากาศในระบบทดลองสูญเสียอากาศที่ 2 ด้วยโปรแกรม Molflow+ อย่างชัดเจนขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.2 พฤติกรรมค่าความดันสูญเสียอากาศในระบบทดลองสูญเสียอากาศที่ 2 ด้วยโปรแกรม Molflow+



รูปที่ 5.3 ภาพขยายพฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลค่าความดันสุญญากาศแต่ละแนวแกนโดยโปรแกรม Molflow+ ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2

%x	เส้นสีแดง		เส้นสีน้ำเงิน		เส้นสีเขียว		เส้นสีดำ		เส้นสีส้ม		เส้นสีฟ้า	
	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P
0	0	2.99	0.00	5.37	0.00	3.82	0.0	3.2	0	3.99	0	3.99
0.05	14.25	3.06	13.65	5.16	9.70	3.82	15.5	3.28	14	3.99	74.93	3.88
0.10	28.50	3.12	27.30	4.93	19.40	3.8	31.0	3.36	28	3.98	149.86	3.84
0.15	42.75	3.18	40.95	4.7	29.10	3.77	46.5	3.42	42	3.95	224.79	4.78
0.20	57.00	3.23	54.60	4.44	38.80	3.72	62.0	3.48	56	3.93	299.72	5.97
0.25	71.25	3.28	68.25	4.15	48.50	3.64	77.5	3.53	70	3.9	374.65	6.91
0.30	85.50	3.32	81.90	3.84	58.20	3.59	93.0	3.58	84	3.88	449.58	7.67
0.35	99.75	3.36	95.55	3.65	67.90	3.58	108.5	3.63	98	3.86	524.51	8.28
0.40	114.00	3.41	109.20	3.59	77.60	3.58	124.0	3.67	112	3.85	599.44	8.73
0.45	128.25	3.44	122.85	3.57	87.30	3.58	139.5	3.72	126	3.84	674.37	9.04
0.50	142.50	3.48	136.50	3.56	97.00	3.58	155.0	3.77	140	3.84	749.3	9.21
0.55	156.75	3.54	150.15	3.56	106.70	3.59	170.5	3.83	154	3.84	824.23	9.13
0.60	171.00	3.59	163.80	3.56	116.40	3.59	186.0	3.88	168	3.85	899.16	8.88
0.65	185.25	3.62	177.45	3.56	126.10	3.59	201.5	3.91	182	3.88	974.09	8.49
0.70	199.50	3.62	191.10	3.57	135.80	3.59	217.0	3.91	196	3.97	1049.02	7.95

ตารางที่ 5.3 ข้อมูลค่าความดันสุญญากาศแต่ละแนวแกนโดยโปรแกรม Molflow+ ในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2 (ต่อ)

%x	เส้นสีแดง		เส้นสีน้ำเงิน		เส้นสีเขียว		เส้นสีดำ		เส้นสีส้ม		เส้นสีฟ้า	
	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P	x(mm)	P
0.75	213.75	3.61	204.75	3.58	145.50	3.58	232.5	3.89	210	4.19	1123.95	7.25
0.80	228.00	3.6	218.40	3.62	155.20	3.58	248.0	3.89	224	4.56	1198.88	6.4
0.85	242.25	3.6	232.05	3.74	164.90	3.58	263.5	3.89	238	4.83	1273.81	5.35
0.90	256.50	3.59	245.70	3.83	174.60	3.58	279.0	3.89	252	5.07	1348.74	3.9
0.95	270.75	3.59	259.35	3.89	184.30	3.57	294.5	3.89	266	5.3	1423.67	3.56
1.00	285.00	3.59	273.00	3.91	194.00	3.57	310.0	3.88	280	5.47	1498.6	3.6

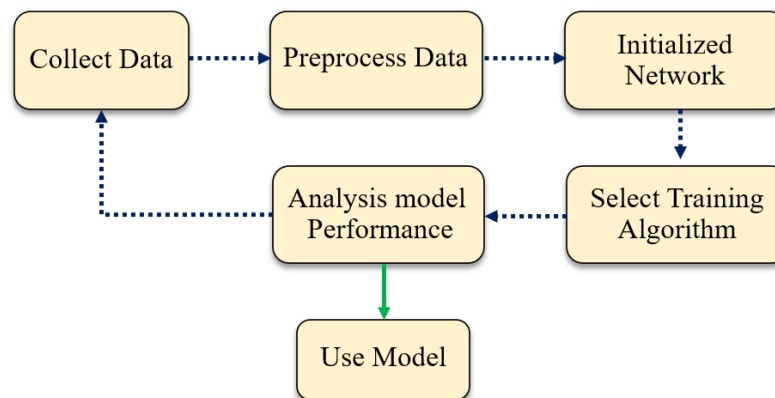
จากตารางที่ 5.3 แสดงพฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2 ด้วยโปรแกรม Molflow+ โดยค่าความดันสุญญากาศในแต่ละระนาบแนวแกนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดันสุญญากาศที่วัดได้จากตำแหน่งติดตั้งเกจวัด A, B, C และ D แสดงด้วยระนาบแนวแกนเส้นสีดำ ณ ตำแหน่ง $x = 310$ มิลลิเมตร ระนาบแนวแกนเส้นสีฟ้า ณ ตำแหน่ง $x = 749.3$ มิลลิเมตร ระนาบแนวแกนเส้นสีแดง ณ ตำแหน่ง $x = 285$ มิลลิเมตร และระนาบแนวแกนเส้นสีเขียว ณ ตำแหน่ง $x = 165$ มิลลิเมตร ตามลำดับ ในขณะที่ตัวบ่งชี้ค่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 พิจารณาได้จากข้อมูลการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ ในระนาบแนวแกนเส้นสีดำและสีแดง ณ ตำแหน่ง $x = 0$ มิลลิเมตร การกำหนดค่าความเร็วสุบของปั๊มแต่ละตัวเพื่อจำลองพฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบทดลองสุญญากาศที่ 2 ด้วยโปรแกรม Molflow+ ถูกกำหนดโดยการแทนที่ค่าความดันสุญญากาศเก็บข้อมูลจากปั๊มสุบแต่ละตัวเข้าไปในสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศและแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งในกรณีที่อยู่อธิบายนี้ปั๊มได้รับแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3,000 โวลต์ ค่าความดันที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 3.2×10^{-10} มิลลิบาร์ และ 2.99×10^{-10} มิลลิบาร์ ตามลำดับ สิ่งนี้ทำให้สามารถกำหนดอัตราการ outgassing ได้จากการเปรียบเทียบข้อมูลผลการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ กับข้อมูลการวัดจากเครื่องมือวัดแรงดันสุญญากาศทุกตำแหน่งที่ติดตั้งในระบบทดลองสุญญากาศ จากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าจุดเริ่มต้นในระนาบแนวแกนเส้นสีดำและสีแดง ณ ตำแหน่ง $x = 0$ มิลลิเมตร คือตำแหน่งที่ติดตั้งปั๊มจะให้ค่าความดันสุญญากาศที่ดีที่สุด ความดันอากาศต่ำสุด และความดันจะเพิ่มขึ้นตามแนวแกนไปยังฝากรอบด้านบนของห้องสุญญากาศที่ 1 และ 2 ซึ่งเป็นตำแหน่งติดตั้งเกจวัด A และ B ตามดับพิจารณาความถูกต้องจากการเปรียบเทียบข้อมูลผลการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ ในระนาบแนวแกนเส้นสีดำและสีแดง ณ ตำแหน่ง $x = 310$ มิลลิเมตร และตำแหน่ง $x = 285$ มิลลิเมตร

ตามลำดับ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความดันสูงสุด และในขณะเดียวกันที่ระนาบแนวแกนเส้นสีฟ้าแสดงพฤติกรรมความดันตามแนวความยาวของท่อที่เชื่อมต่อระหว่างห้องสุญญากาศทั้งสอง เกจวัด B ถูกติดตั้งในตำแหน่งศูนย์กลางของท่อ ซึ่งจะเทียบข้อมูลผลการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ ณ ตำแหน่ง $x = 750$ มิลลิเมตร จะเห็นว่าเป็นตำแหน่งที่มีความดันสูงสุด ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงใช้ค่าความดันในตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัด B เป็นจุดที่ใช้ในการควบคุมความดันสุญญากาศในระบบให้บรรลุค่าความดันสุญญากาศระดับ UHV สิ่งนี้ทำให้มั่นใจได้ว่าค่าความดันในตำแหน่งอื่น ๆ อยู่ในระดับ UHV

จากที่กล่าวมาข้างต้นทำให้ทราบถึงพฤติกรรมค่าความดันสุญญากาศในระบบทดลองสุญญากาศที่ 1 และ 2 จากการจำลองด้วยโปรแกรม Molflow+ ซึ่งจะต้องมีการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกักระบบทดลองให้กับโปรแกรม ซึ่งข้อมูลพารามิเตอร์เหล่านี้ผู้ใช้จะต้องผ่านการวัดและคำนวณจากความสัมพันธ์ข้อมูลจำเพาะของตัวปั๊มอย่างยุ่งยากและซับซ้อน ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดสร้างแบบจำลองของระบบทดลองสุญญากาศด้วยโครงข่ายประสาทเทียมให้ทำนายค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ โดยทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองในการทำนายข้อมูลการวัดจริงจากเครื่องมือวัดด้วย ส่วนนี้จะช่วยให้สามารถทราบประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มแบบสปัตเตอร์ไอออนได้อีกด้วย ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

5.4 การประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบด้วยโครงข่ายประสาทเทียมบนโปรแกรม MATLAB

โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network : ANN) เป็นหนึ่งในอัลกอริทึมที่ทรงประสิทธิภาพเป็นอย่างมากในการสร้างแบบจำลอง (Model) ที่ใช้ในการทำนายผลตามที่ได้รับการฝึกสอน (Training) ข้อมูลไว้โดยทำการป้อนข้อมูลอินพุต (Input data) และข้อมูลผลค่าตอบที่ถูกต้อง (Output data) ซึ่งโครงข่ายประสาทเทียมจะทำการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพในการทำนายคำตอบที่มีความถูกต้องใกล้เคียงที่สุดตามข้อมูลที่ได้อีกสอนแบบจำลองเอาไว้ ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อใช้ทำนายผลของความเร็วในการสูบบั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 รวมถึงอัตราการ outgassing ของระบบทดลองสุญญากาศ UHV โดยจะใช้ข้อมูลสำหรับฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมความดันสุญญากาศของระบบทดลองสุญญากาศ UHV ด้วยโปรแกรม Molflow+ โดยมีกระบวนการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมดังแสดงในรูป 5.4

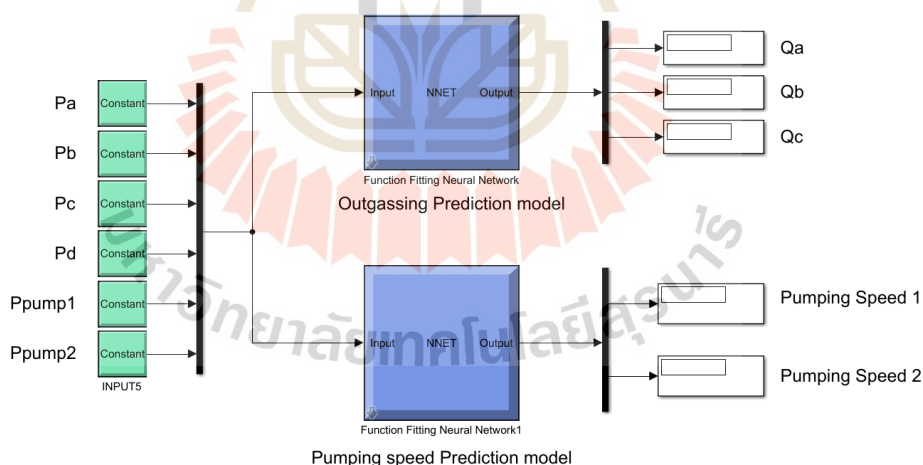


รูปที่ 5.4 กระบวนการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

5.4.1 การรวบรวมข้อมูลและการประมวลผลล่วงหน้า

การเตรียมข้อมูลที่ถูกต้องสำหรับการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่นั่นจะต้องเป็นข้อมูลที่มีความถูกต้องและมีปริมาณที่เพียงพอ โดยในงานวิจัยนี้จะทำการทดลองจากระบบจริงเพื่อดูแนวทางของข้อมูลที่จะใช้ในการจำลองพฤติกรรมความดันสุญญากาศด้วยโปรแกรม Molflow+ ซึ่งการจำลองพฤติกรรมความดันสุญญากาศ UHV ด้วยโปรแกรม Molflow+ ผู้ใช้จะต้องกำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบสุญญากาศด้วยตนเอง การกำหนดค่าเหล่านี้ผู้วิจัยจะคำนึงถึงพฤติกรรมความดันสุญญากาศ UHV ในระบบทดลองที่เป็นไปได้ตามหลักทฤษฎีมากที่สุดโดยจะตรวจสอบความถูกต้องจากค่าความดันสุญญากาศที่ได้จากเครื่องมือวัดที่ติดตั้งในระบบทุกจุดทุกตำแหน่ง อาทิเช่น กำหนดขนาดและการเชื่อมต่อระหว่างห้องสุญญากาศของระบบทดลองจะต้องมีความถูกต้องแม่นยำ การกำหนดความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนแต่ละตัวจะคำนึงถึงสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มและความดันสุญญากาศเสมอ เพื่อกำหนดความเร็วในการสูบให้ถูกต้องใกล้เคียงความเป็นจริงที่สุด หรือกระทั่งการกำหนดค่าอัตราการ outgassing ของระบบจะไม่กำหนดให้เป็นค่าใดค่าหนึ่งที่เหมาะสมทั้งระบบ เนื่องจากอัตราการ outgassing คือปริมาณการปล่อยก๊าซจากผิวของวัตถุภายในห้องสุญญากาศของระบบ ซึ่งห้องสุญญากาศในระบบมีปริมาตร พื้นที่ผิว และการเชื่อมต่อกับส่วนอื่นแตกต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงแบ่งอัตราการ outgassing ออกเป็นสามส่วนตามพื้นที่ดังนี้ ส่วนแรกคือส่วนของพื้นที่ห้องสุญญากาศที่ 1 ทั้งหมด ให้นิยามเป็น outgassing zone a (Qa) ส่วนถัดมาเป็นส่วนของท่อเชื่อมต่อระหว่างห้องสุญญากาศที่ 1 และ 2 ให้นิยามเป็น outgassing zone b (Qb) และส่วนสุดท้ายคือส่วนของพื้นที่ห้องสุญญากาศที่ 2 ทั้งหมด ให้นิยามเป็น outgassing zone c (Qc) เป็นต้น ข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนแบบจำลองของโครงข่ายประสาทเทียมได้รวบรวมข้อมูลทั้งหมดในช่วงสภาวะคงที่ (steady state) เพื่อทดสอบการเปลี่ยนแปลงของความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนแต่ละตัวและอัตรา

outgassing แต่ละโซน โดยตรวจสอบและจำลองด้วยโปรแกรม molflow+ อินพุตที่ใช้ในการทำนายของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคือค่าความดันสุญญากาศในตำแหน่งต่าง ๆ ของเครื่องมีวัดในระบบการทดลองได้แก่ ค่าความดันในตำแหน่งที่ติดตั้งเกจวัด A, B, C และ D (P_a , P_b , P_c , P_d) และค่าความดันสุญญากาศที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 (P_{pump1} และ P_{pump2}) โดยเอาต์พุตจากการทำนายของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมคือความเร็วของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 (S_{pump1} และ S_{pump2}) และอัตรา Outgassing ของแต่ละโซน (Q_a , Q_b และ Q_c) ในการเตรียมข้อมูลสำหรับฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมนั้นจะต้องเตรียมข้อมูลในแต่ละกรณีให้อยู่ในรูปของข้อมูลเมทริกซ์ทั้งข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนนั้นจะมีอยู่ทั้งหมด 90 ชุดข้อมูล สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในระหว่างกระบวนการเรียนรู้ของแบบจำลองจำเป็นจะต้องแบ่งข้อมูลออกเป็นสามส่วน ได้แก่ 1. สำหรับการฝึกสอน (Training) 2. สำหรับการตรวจสอบความถูกต้อง (Validation) และ 3. สำหรับทดสอบแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Testing) ซึ่งคิดเป็น 70%, 15% และ 15% ของข้อมูลตามลำดับสำหรับการจัดการความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตจำเป็นจะต้องแบ่งข้อมูลสำหรับการฝึกสอนออกเป็นสองส่วนโดยมีข้อมูลอินพุตเดียวกันได้แก่ 1. สำหรับทำนายผลของความเร็วปั๊ม 2. สำหรับการทำนายผลอัตรา outgassing ดังแสดงในรูปที่ 5.5

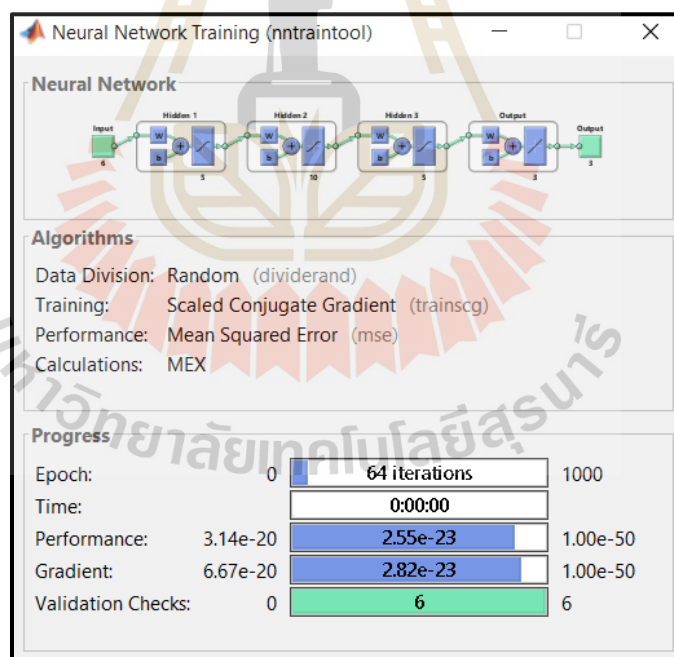


รูปที่ 5.5 แบบจำลองการทำนายผลของโครงข่ายประสาทเทียมโดยแบ่งการทำนายออกเป็นสองแบบจำลอง 1.อัตรา outgassing 2.ความเร็วปั๊ม

5.4.2 การเลือกสถาปัตยกรรมและการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้งานในปัจจุบันสามารถแบ่งประเภทตามการใช้งานได้เป็นสามประเภท ได้แก่ 1. แบบจำลองการแยกประเภท (Classification model) 2. แบบจำลอง

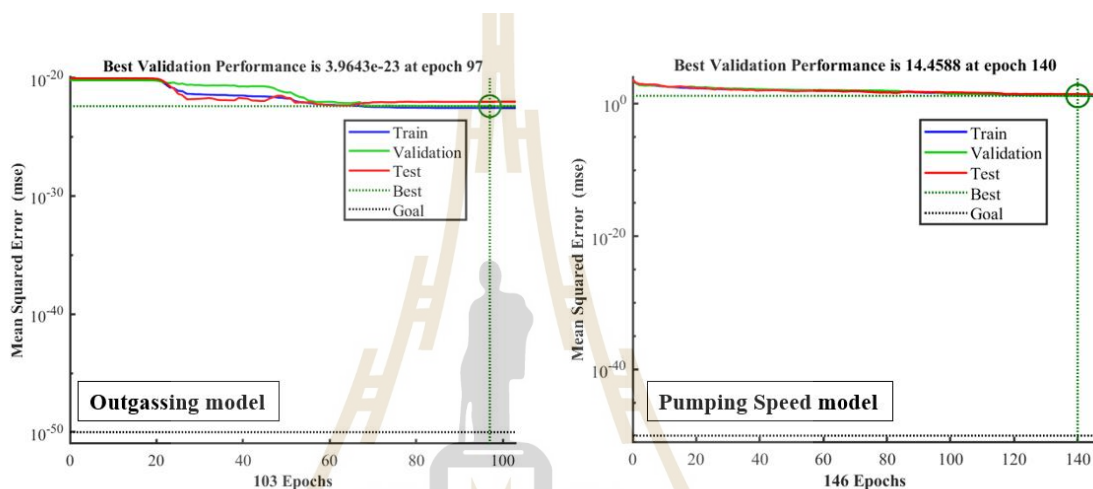
ทำนายผล (Prediction model) และ 3. แบบจำลองการถดถอย (Regression model) สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แบบจำลองการถดถอยและต้องมีเครือข่ายของโครงข่ายประสาทเทียมหลายชั้น (Multilayer network) เพื่อใช้ในการประมาณฟังก์ชันของอินพุตที่สอดคล้องกับเอาต์พุตต่อเนื่อง (Continuous output) จากแบบจำลอง หลักการในการพิจารณาโครงข่ายประสาทเทียมที่ดีนั้นจะขึ้นอยู่กับเตรียมข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต นอกจากนี้ยังต้องใช้เทคนิคในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงขนาดเลเยอร์และจำนวนนิวรอนในแต่ละเลเยอร์เพื่อให้การฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้การเลือกอัลกอริทึมในการเรียนรู้ของแบบจำลองก็เป็นอีกส่วนที่สำคัญเพื่อใช้สำหรับการปรับน้ำหนัก (Weight) และ ไบแอส (Bias) ของโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสมที่สุด โดยในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้อัลกอริทึม Scale Conjugate Gradient (Trainscg) ซึ่งเป็นอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับแบบจำลองการถดถอยโดยจะใช้งานร่วมกับฟังก์ชัน Linear Transfer (purelin) ในแต่ละโหนด สำหรับการกำหนดค่าการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมของงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรม MATLAB (MATLAB 2020b ใบอนุญาตเลขที่ 199467 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี) ดังแสดงในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 โปรแกรม MATLAB สำหรับการตั้งค่าการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม

ในส่วนของการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมระบบจะทำการประมาณ Weight และ bias ที่สอดคล้องกับข้อผิดพลาดระหว่างผลลัพธ์ที่ประมาณการได้เปรียบเทียบกับ

เป้าหมายในการฝึกสอนแบบจำลองระบบจะสุ่มค่า weight และ bias ขึ้นมาและเปรียบเทียบความแตกต่างของผลลัพธ์ในการฝึกสอนระบบจึงมีการฝึกสอนใหม่ซ้ำไปมาหรือเรียกว่ารอบการฝึกสอน (Epoch) เพื่อให้แบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมมีประสิทธิภาพมากที่สุดจากผลลัพธ์แสดงในรูปที่ 5.7 เป็นการระบุเส้นกราฟประสิทธิภาพตามฟังก์ชัน Mean Square Error (MSE) ของแบบจำลองการทำนายอัตรา outgassing และความเร็วของปั๊ม (Pumping speed) ซึ่งค่า MSE นี้แสดงถึงค่าเฉลี่ยกำลังสองของความต่างกันระหว่างค่าเอาต์พุตกับค่าเป้าหมาย ยิ่งมีค่าน้อย ๆ ยิ่งดี แต่หากไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสอง ผลของค่า MSE จะมีค่าเป็นศูนย์

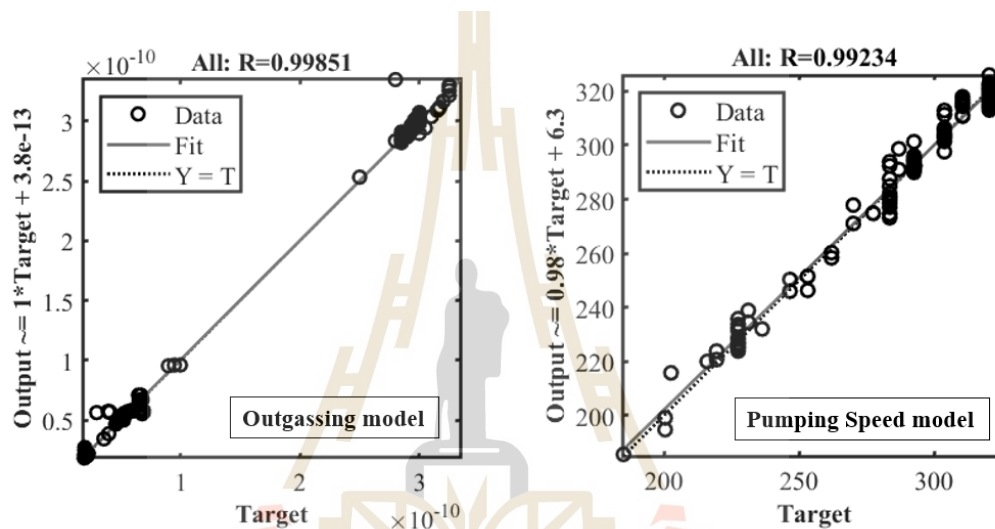


รูปที่ 5.7 MSE ของแบบจำลองการทำนายอัตรา outgassing และความเร็วของปั๊ม

รูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นถึงการพยายามลดขนาดของ MSE ให้เหลือน้อยที่สุดในช่วงการฝึกสอนซ้ำโดยที่ค่าต่ำสุดของ MSE จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพโครงข่ายประสาทเทียมที่ได้และในขณะเดียวกันการฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมก็ต้องระวังรอบการฝึกสอนแบบจำลองที่มากเกินไปจะทำให้เกิด Overfitting ของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมได้ การฝึกสอนแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดของแบบจำลองในการทำนายอัตรา outgassing และความเร็วการสูบของปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออน โดยมีค่าประสิทธิภาพ MSE อยู่ที่ 3.9643e-23 รอบการฝึกสอน 97 epoch และ 14.4588 รอบการฝึกสอน 140 epoch ตามลำดับ

ในการประเมินประสิทธิภาพการทำนายของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอยนั้นจะต้องใช้การประเมินแบบ R^2 หรือ R-squared โดยที่ค่า R-squared ที่ดีที่สุดจะต้องเป็น 1 อย่างไรก็ตามมีความไม่แน่นอนหลายอย่างที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ที่ได้ โดยในรูปที่ 5.8 จะแสดงผลลัพธ์การถดถอยใน R-squared ที่จุดตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองโครงข่าย

ประสาทเทียมที่ดีที่สุดซึ่งแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอยทำนายอัตรา outgassing, R-squared = 0.99851 และสำหรับความเร็วการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน R-squared = 0.99234 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการทำนายของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอยได้ดีภายใต้ข้อจำกัดข้อมูลที่ได้รับการฝึกสอน โดยผลการทำนายจากแบบจำลองนี้จะถูกตรวจสอบโดยการใช้ข้อมูลการทดลองจริง ดังนั้น โครงข่ายประสาทเทียมแบบถดถอยนี้สามารถนำไปใช้กับระบบควบคุม UHV ได้และเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมและทำนายอัตรา outgassing และความเร็วการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน



รูปที่ 5.8 R-squared ของแบบจำลองอัตรา outgassing และความเร็วปั๊ม

ตารางที่ 5.4 การทำนายอัตรา outgassing โดยแบบจำลอง ANN

Data Measuring from an Instrument of the Experimental						Prediction from ANN				
Pressure (mbar)						Outgassing (mabr./s)			Pumping Speed (l/s)	
Pa	Pb	Pc	Pd	Ppump 1	Ppump 2	Qa	Qb	Qc	Spump1	Spump2
$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-09}$	$\times 10^{-09}$	$\times 10^{-09}$	$\times 10^{-10}$	$\times 10^{-09}$	$\times 10^{-11}$	$\times 10^{-11}$	$\times 10^{-10}$		
9.0659	1.8665	2.2665	2.5331	5.8662	1.7332	5.89	2.63	3.13	253.33	266.00
8.3993	1.7332	2.2665	2.3998	6.1328	1.7332	5.83	2.24	3.11	242.81	272.79
10.399	1.8665	2.3998	2.5331	5.0662	1.8665	5.88	2.43	3.05	249.88	268.52
9.1992	1.8665	2.2665	2.5331	6.5328	1.7332	5.97	2.84	3.11	239.84	273.63

ตารางที่ 5.4 แสดงให้เห็นถึงค่าความดันในสภาวะคงตัวที่ได้รับจากเครื่องมือวัดของการทดลองระบบจริงสี่ครั้ง และผลการทำนายค่าความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนทั้งสองตัว รวมถึงค่าอัตรา outgassing แต่ละโซนที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม ซึ่งเป็นค่าที่ไม่สามารถทราบได้ในการทดลอง โดยค่าที่ได้จากการทำนายเหล่านี้จะถูกนำกลับไปตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำในการทำนายด้วยการจำลองพฤติกรรมความดันสุญญากาศจากโปรแกรม Molflow+ อีกครั้ง โดยการป้อนค่าพารามิเตอร์จากการทำนายเหล่านี้และเทียบผลการจำลองความดันสุญญากาศในตำแหน่งต่าง ๆ กับข้อมูลจากการทดสอบจริงทั้งสี่ครั้ง ผลการดำเนินงานสามารถแสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสองของผลการทดลอง

Root Mean Square Error of Experimental Results						
Pa	Pb	Pc	Pd	Ppump1	Ppump2	RMSE
3.08×10^{-20}	4.03×10^{-21}	1.60×10^{-20}	5.43×10^{-20}	9.85×10^{-22}	7.54×10^{-21}	1.376×10^{-10}
1.19×10^{-20}	9.37×10^{-21}	4.26×10^{-20}	2.88×10^{-20}	5.96×10^{-23}	2.83×10^{-22}	1.245×10^{-10}
9.85×10^{-20}	2.73×10^{-22}	1.15×10^{-19}	9.80×10^{-20}	1.15×10^{-20}	1.36×10^{-20}	2.371×10^{-10}
2.01×10^{-20}	6.97×10^{-21}	3.48×10^{-20}	8.02×10^{-20}	5.96×10^{-23}	1.35×10^{-21}	1.546×10^{-10}

จากตารางที่ 5.9 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Square Error, RMSE) ของค่าความดันสุญญากาศในทุก ๆ ตำแหน่งระหว่างข้อมูลที่ได้จากเครื่องมือวัดในการทดสอบจริง 4 ครั้งและข้อมูลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมความดันสุญญากาศด้วยโปรแกรม Molflow+ ด้วยค่าทำนายอัตราการ outgassing ทั้ง 3 โซน และความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนทั้ง 2 ตัว จากแบบจำลองที่สร้างโดยโครงข่ายประสาทเทียม ค่า RMSE เป็นดัชนีชี้วัดความถูกต้องของแบบจำลองที่ทำนายโดยโครงข่ายประสาทเทียมเทียบกับค่าจริงที่ได้จากเครื่องมือวัด ยังมีค่าต่ำยิ่งดี นั่นคือค่าจริงกับค่าทำนายมีค่าใกล้เคียงกัน จะเห็นได้ว่าผลการทดลองมีค่า RMSE น้อยมาก ๆ นั้นหมายความว่าแบบจำลองที่สร้างโดยโครงข่ายประสาทเทียมสามารถทำนายเอาต์พุตได้อย่างมีความถูกต้องแม่นยำนั่นเอง

5.5 สรุป

งานวิจัยที่ได้ดำเนินการในส่วนนี้สามารถสร้างวิธีการประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนได้โดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับ

โปรแกรม Molflow+ ทำให้ได้มาซึ่งแบบจำลองของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบสุญญากาศ และทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงหรือพฤติกรรมความดันสุญญากาศในระบบที่ต้องการพิจารณาได้



บทที่ 6

ระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ที่มีความคงทน

ต่อความเสียหาย

6.1 บทนำ

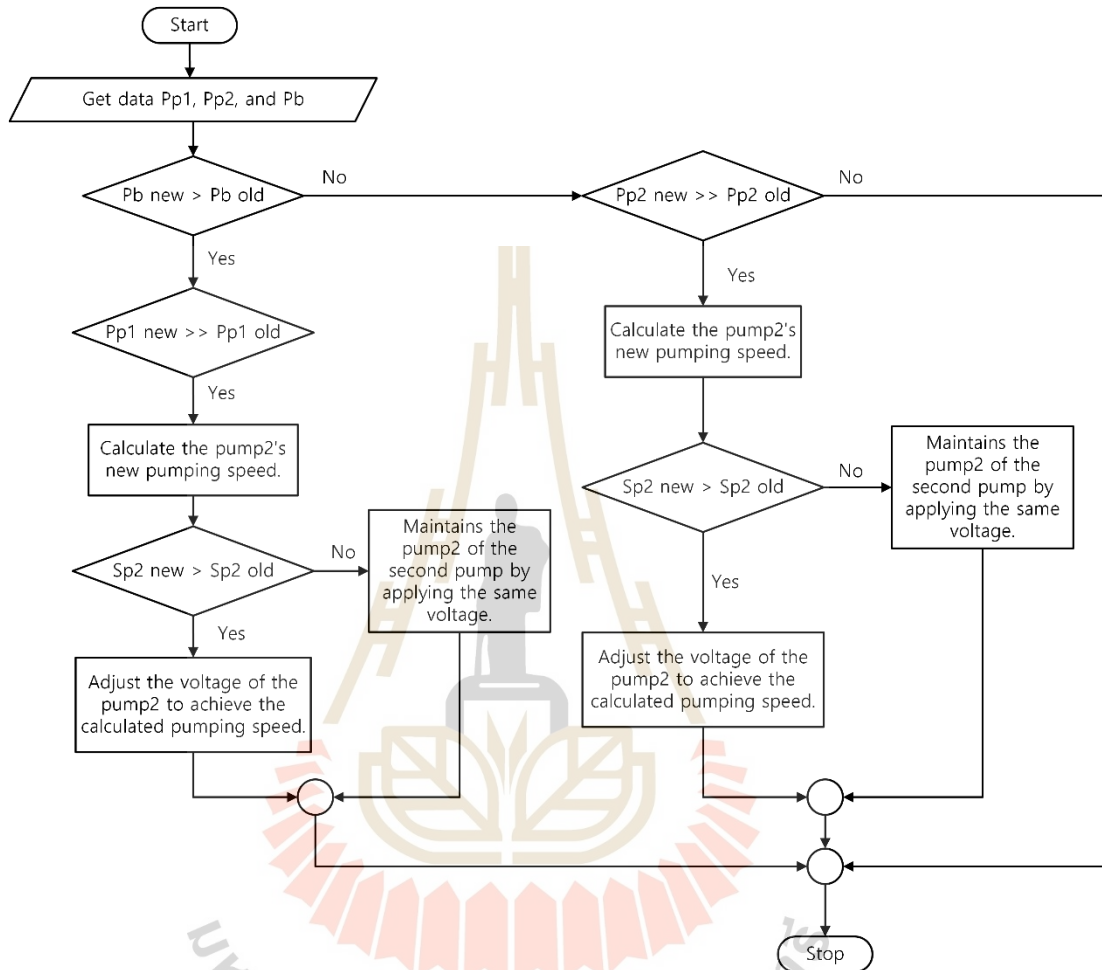
การออกแบบให้ระบบควบคุมมีความทนทานต่อความเสียหายหรือความผิดพลาดบางประการ หมายถึงการออกแบบระบบควบคุมที่มีลักษณะการทำงานที่มีความสามารถยังคงทำงานต่อไปได้แม้ว่าจะมีข้อผิดพลาดหรือความเสียหายเกิดขึ้นในส่วนใด ส่วนหนึ่งหรือหลายส่วนของระบบ จุดประสงค์ของระบบควบคุมที่มีความทนทานต่อความผิดพลาดหรือความเสียหายนั้นคือเพื่อต้องการรักษาเสถียรภาพของระบบให้ยังคงอยู่ รักษาประสิทธิภาพของผลผลิตจากระบบ และที่สำคัญคือต้องการให้เกิดความปลอดภัยแก่ระบบ หากเกิดข้อผิดพลาดหรือความเสียหายขึ้นขณะใช้งาน นับเป็นการเพิ่มความเชื่อมั่นในการใช้งานระบบได้เป็นอย่างดี ในระบบ UHV ความผิดพลาดอาจเกิดจากหลายปัจจัย เช่น การรั่วไหลจากความดันบรรยากาศเข้าสู่ระบบหรือการปนเปื้อนภายในระบบ การอ่านค่าผิดพลาดของเครื่องมือวัด และแม้กระทั่งอาจเกิดจากการทำงานที่ล้มเหลวของปั๊ม ข้อผิดพลาดบางอย่างเหล่านี้อาจส่งผลให้คุณภาพของแสงภายในท่อลำเลียงลดลงและหากยังใช้งานระบบที่มีความผิดพลาดอยู่ ระบบควบคุมแบบเดิมจะทำหน้าที่ชดเชยระบบอยู่อย่างต่อเนื่อง วันใดวันหนึ่งความเสียหายที่ปรากฏอาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานของระบบลดลงและเกิดความล้มเหลวของระบบในที่สุด เนื้อหาในบทนี้ผู้วิจัยจึงกล่าวถึงการออกแบบระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศระดับ UHV ที่มีความสามารถคงทนต่อความเสียหายอันเนื่องมาจากการทำงานที่ผิดพลาดของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนในรูปแบบการจำลองสถานการณ์ด้วยอัลกอริทึม Fault Tolerance Control (FTC) พร้อมแสดงให้เห็นถึงผลของการควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ผ่านโปรแกรม MATLAB

6.2 การออกแบบระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ที่มีความสามารถคงทนต่อความเสียหาย

การออกแบบให้ระบบควบคุมมีความทนทานต่อความเสียหายหรือความผิดพลาด มีรูปแบบและเทคนิคมากมายที่สามารถใช้ในการควบคุมความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบ ส่วนใหญ่ในทางปฏิบัติที่นิยมใช้มากที่สุดคือการสำรองระบบการทำงานที่มีลักษณะการทำงานซ้ำเดิมกับระบบทำงานปกติ

ทุกประการ กล่าวคือเพื่อรองรับการทำงานในลักษณะเดิมสามารถเข้ามาแทนที่การใช้งานได้ทันทีหากระบบเดิมเกิดความเสียหายนั่นเอง หรือการออกแบบให้ระบบควบคุมมีความสามารถในการตรวจจับและวินิจฉัยข้อบกพร่อง และการแก้ไขข้อผิดพลาด ซึ่งจะประกอบด้วยขั้นตอนการตรวจสอบความผิดปกติที่เกิดขึ้นของระบบเพื่อหาข้อผิดพลาดและสามารถระบุสาเหตุของปัญหาได้ เมื่อตรวจสอบพบความผิดปกติแล้ว ทราบสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นแล้วจึงมีการปรับเปลี่ยนกลยุทธ์การควบคุมหรือแก้ไขระบบด้วยการกำหนดค่าตัวควบคุมใหม่เพื่อดำเนินการแก้ไขข้อบกพร่องหรือความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาและออกแบบ พัฒนาระบบควบคุมค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ให้มีความสามารถคงทนต่อความเสียหาย จากการใช้เทคนิคการตรวจจับและวินิจฉัยข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในระบบ เพื่อหาข้อผิดพลาดและระบุสาเหตุของปัญหา โดยวิธีการตรวจสอบจากพารามิเตอร์ต่างๆ ที่สำคัญในระบบสุญญากาศ อาทิเช่น ค่าความดันจากเกจวัดที่ตำแหน่งศูนย์กลางของท่อเชื่อมระหว่างห้องสุญญากาศทั้งสอง ซึ่งแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันของห้องสุญญากาศทั้งสองในระบบ ค่าความดันจากปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนทั้งสองตัว ซึ่งแสดงถึงความผิดปกติอันเนื่องมาจากการทำงานของปั๊มลมเหลว กล่าวคือการทำงานที่ผิดพลาดไปย่อมทำให้เกิดค่าความดันที่ตัวปั๊มเพิ่มสูงขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ นั่นหมายความว่า หากค่าความดัน ณ ตำแหน่งศูนย์กลางของท่อเพิ่มขึ้น เราสามารถระบุได้ว่าเกิดจากการทำงานผิดพลาดไปของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวใด ตัวนั้นจะมีค่าความดันเพิ่มขึ้นอย่างสังเกตได้ นอกจากการตรวจพบและวินิจฉัยข้อบกพร่องของความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบแล้วนั้น ผู้วิจัยดำเนินการใช้เทคนิคการแก้ไขข้อบกพร่องโดยปรับเปลี่ยนกลยุทธ์การควบคุมหรือทำการกำหนดค่าในระบบใหม่ด้วยการ หากพบความผิดพลาดอันเนื่องมาจากปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 1 เป็นเหตุให้ค่าความดันเพิ่มสูงขึ้น ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 จะเข้าสู่กระบวนการชดเชยลดค่าความดันให้กับระบบ จากการรับอิทธิพลความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ทำให้ค่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 อาจเพิ่มขึ้นไม่มากนักน้อย ค่าความดันใหม่ของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 จะถูกคำนวณหาความเร็วในการสูบใหม่ หากความเร็วในการสูบที่คำนวณมีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ระบบจะทำการชดเชยด้วยการปรับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 เพื่อให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ทำงานที่ความเร็วในการสูบใหม่ แต่หากความเร็วในการสูบใหม่ที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าเดิม ระบบจะสั่งการให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 คงค่าความเร็วในการสูบไว้เท่าเดิม เพื่อรักษาค่าความดันสุญญากาศเท่าที่จะเป็นไปได้ นับเป็นแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นในระบบวิธีหนึ่ง การออกแบบระบบควบคุมที่มีความทนทานต่อความผิดพลาดเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่งในระบบ UHV เพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นในถึงการทำงานที่เชื่อถือได้ มีความปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ สามารถลดผลกระทบของ

ข้อผิดพลาดและรักษาภาวะสูญญากาศคุณภาพสูงได้ กลไกการทำงานของระบบควบคุมที่ออกแบบนั้นแสดงได้ดังรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แผนภูมิการควบคุมด้วย FTC สำหรับระบบสูญญากาศ

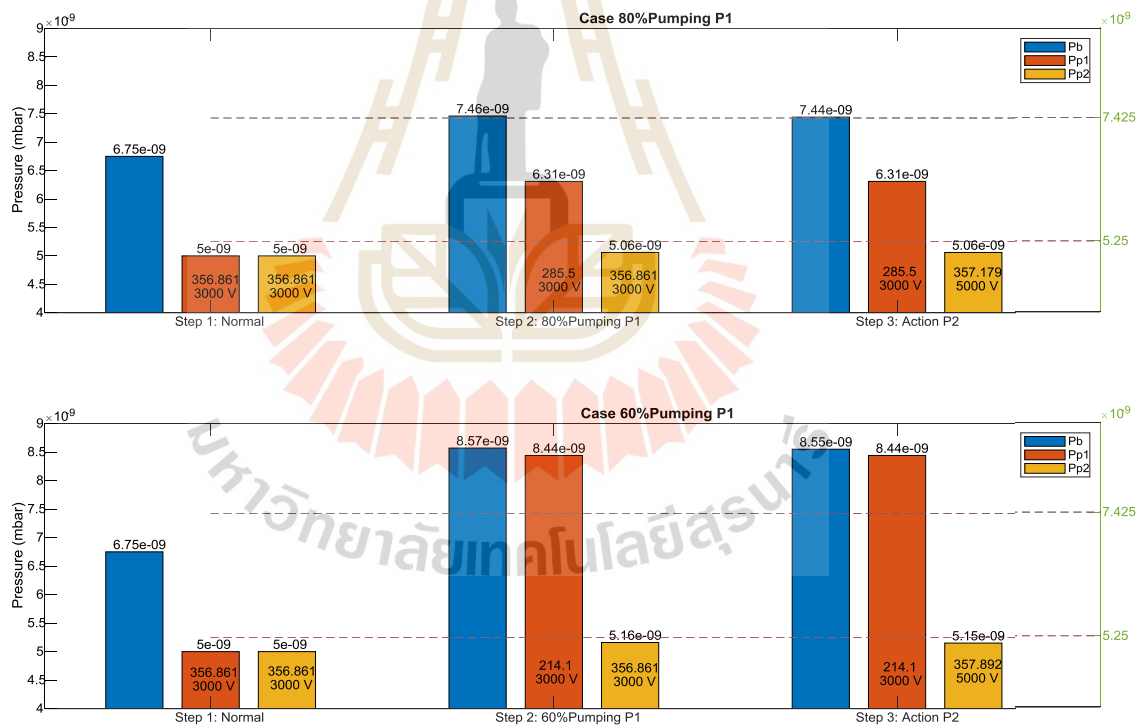
6.3 ผลการควบคุมแบบ Fault Tolerance Control ในระบบทดลองสูญญากาศ UHV

การดำเนินงานวิจัยในส่วนนี้จะนำเสนอในรูปแบบของการจำลองสถานการณ์ด้วยอัลกอริทึม FTC ที่เขียนเงื่อนไขกลไกการทำงานของระบบควบคุมเพื่อควบคุมการส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสูญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนที่มีปฏิกริยาต่อกันในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน การจำลองสถานการณ์นี้อนุมานมาจากระบบทดลองสูญญากาศที่ 2 ซึ่งมีปั๊มสูญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน 2 ตัว เชื่อมต่อกันผ่านห้องสูญญากาศด้วยท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 มิลลิเมตร ยาว 1000 มิลลิเมตร

กลไกการทำงานจะเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 6.1 โดยจะแสดงการพิจารณาความผิดพลาดที่จะก่อให้เกิดความเสียหายของระบบได้จากกรณีอื่นเนื่องจากประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนเปลี่ยนแปลงไป ผลการควบคุมแบบ Fault Tolerance Control ในระบบทดลองสุญญากาศ UHV จะแสดงให้เห็นลักษณะการทำงานของระบบควบคุมดังนี้

6.3.1 กรณีใช้เงื่อนไขลักษณะเฉพาะเดิมของปั๊ม

กลไกการทำงานของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม Fault Tolerance Control (FTC) จะมีการคำนวณความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนจากความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศและความเร็วในการสูบตามเงื่อนไขลักษณะเฉพาะเดิมของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน ซึ่งได้นำเสนอไว้ในบทที่ 4 รูปที่ 4.4 และตารางที่ 4.1 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนเปลี่ยนแปลงไป โดยกำหนดให้มีค่าลดลงเป็น 80% และ 60% ของสภาพการทำงานปกติ จะแสดงอัลกอริทึมการทำงานของระบบควบคุมดังนี้



รูปที่ 6.2 ผลการควบคุมด้วย FTC ในกรณีชดเชยได้

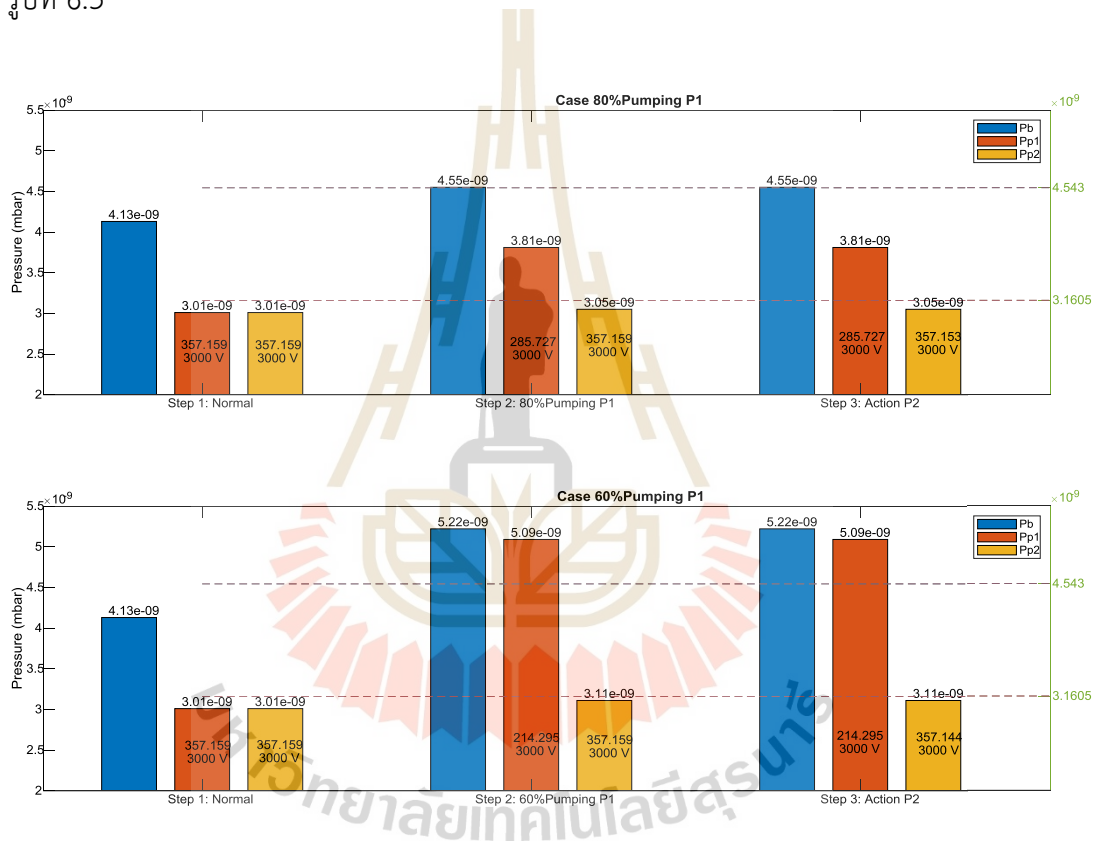
ตารางที่ 6.1 พารามิเตอร์ในการควบคุมด้วย FTC ในกรณีชดเชยได้

Parameter	Spump ₁	Spump ₂	Qa	Qb	Qc	Pb	Pp ₁	Pp ₂	Vp ₁	Vp ₂	Sp ₁	Sp ₂
Unit	l/s		x 10 ⁻⁹ mbar.l/s			x 10 ⁻⁹ mbar		x 1000 v		l/s		
100%	356.8613	356.8613	1.04	0.01	1.17	6.75	5.00	5.00	3	3	356.8613	356.8613
80%	285.489	356.8613	1.04	0.01	1.17	7.46	6.31	5.06	5	5	365.2244	357.179
action P ₂	285.489	357.1790	1.04	0.01	1.17	7.44	6.31	5.06	5	5	365.2244	357.179
60%	214.1168	356.8613	1.04	0.01	1.17	8.57	8.44	5.16	5	5	375.8236	357.8922
action P ₂	214.1168	357.8922	1.04	0.01	1.17	8.55	8.44	5.15	5	5	375.8236	357.8215

รูปที่ 6.2 แสดงผลการชดเชยระบบด้วยกลไกการทำงานของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม FTC ได้ว่าเริ่มต้นสภาพการทำงานปกติ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $V_{P1} = V_{P2} = 3000$ โวลต์ ค่าความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $S_{P1} = S_{P2} = 356.8613$ ลิตรต่อวินาที ทำให้ค่าความดันสุญญากาศที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $P_{P1} = P_{P2} = 5 \times 10^{-9}$ มิลลิบาร์ ค่าความดันสุญญากาศในตำแหน่งตรงกลางของระบบ P_b มีค่าเท่ากับ 6.75×10^{-9} มิลลิบาร์ เมื่อมีการลดประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดลง 80% จะได้ว่า $S_{P1} = 285.489$, $S_{P2} = 356.8613$ ลิตรต่อวินาที การที่ความเร็วในการสูบลดลงย่อมทำให้เกิดสภาวะค่าความดันเป็นสุญญากาศแย่ง สังเกตได้จากค่า P_b ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 7.46×10^{-9} มิลลิบาร์ การวินิจฉัยของระบบควบคุมจะตรวจสอบจากค่าความดันที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 ตัวใดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากตารางที่ 6.1 แสดงให้เห็นเชิงประจักษ์ว่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 จะมีค่าสูงขึ้นจากเดิมอย่างชัดเจน มีค่าเท่ากับ 6.31×10^{-9} มิลลิบาร์ ในขณะที่ความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 มีค่าสูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 5.06×10^{-9} มิลลิบาร์ จะทำให้ทราบว่าปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดกำลังในการสูบลงจากเดิม กลไกการทำงานของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม FTC จะทำสั่งการให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ชดเชยเพิ่มความเร็วในการสูบมากขึ้น เพื่อพยายามรักษาระดับความดันสุญญากาศ UHV ในระบบต่อไป โดยดำเนินการคำนวณค่าความเร็วการสูบใหม่จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศและความเร็วในการสูบตามเงื่อนไขลักษณะเฉพาะเดิมของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนพบว่าค่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 5.06×10^{-9} มิลลิบาร์ จะให้ความเร็วในการสูบเหมาะสมสูงสุดที่ 357.179 ลิตรต่อวินาที เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5000 โวลต์ การชดเชยของระบบควบคุมจะสั่งการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 เป็น 5000 โวลต์ ทันที เช่นเดียวกันกับกรณีที่มีการลดประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดลง 60% ค่าพารามิเตอร์ที่

เกี่ยวข้องในระบบสัญญาณในกลไกการทำงานของระบบควบคุมที่ชดเชยด้วยอัลกอริทึม FTC อธิบายได้ดังตารางที่ 6.1

การชดเชยของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม FTC ในกรณีที่คำนวณค่าความเร็วการสูบใหม่จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันสัญญาณและความเร็วในการสูบตามเงื่อนไขลักษณะเฉพาะเดิมของปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออนแล้วความเร็วในการสูบใหม่ลดลงหรือเท่าเดิม การชดเชยของระบบควบคุมจะคงที่ความเร็วการสูบของปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออนไว้เท่าเดิม เพื่อความพยายามรักษาค่าความดันสัญญาณในระบบไม่ให้แย่ไปกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 6.3



รูปที่ 6.3 ผลการควบคุมด้วย FTC ในกรณีคงค่าเดิม

ตารางที่ 6.2 พารามิเตอร์ในการควบคุมด้วย FTC ในกรณีคงค่าเดิม

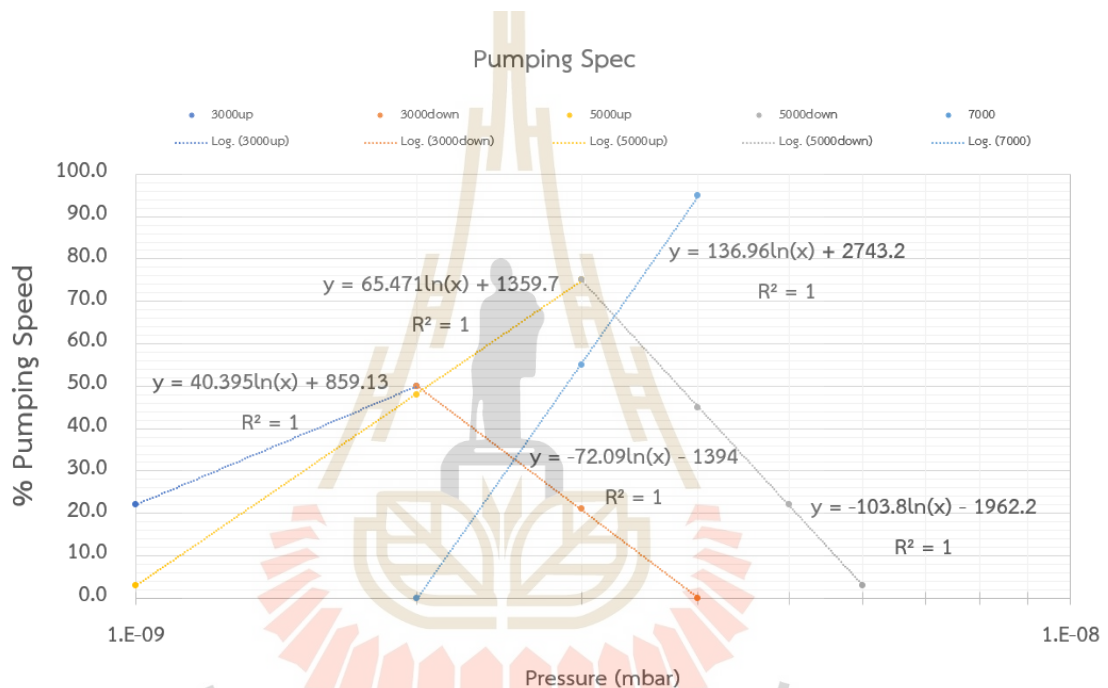
Paramater	Spump ₁	Spump ₂	Qa	Qb	Qc	Pb	Pp ₁	Pp ₂	Vp ₁	Vp ₂	Sp ₁	Sp ₂
Unit	l/s		x 10 ⁻¹⁰ mbar.l/s			x 10 ⁻⁹ mbar			x 1000 v		l/s	
100%	362.7748	362.7748	6.37	0.1	7.16	4.13	3.01	3.01	3	3	357.159	357.159
80%	290.2198	362.7748	6.37	0.1	7.16	4.55	3.81	3.05	3	3	357.0392	357.153
60%	217.6649	362.7748	6.37	0.1	7.16	5.22	5.09	3.11	5	3	357.3945	357.144

จากรูปที่ 6.3 และข้อมูลพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบสุญญากาศที่แสดงในตารางที่ 6.2 อธิบายถึงการชดเชยของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม FTC ได้ว่าสภาพการทำงานปกติ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $V_{P1} = V_{P2} = 3000$ โวลต์ ค่าความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $S_{P1} = S_{P2} = 362.7748$ ลิตรต่อวินาทีที่ทำให้ค่าความดันสุญญากาศที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $P_{P1} = P_{P2} = 3.01 \times 10^{-9}$ มิลลิบาร์ ค่าความดันสุญญากาศในตำแหน่งตรงกลางของระบบ P_b มีค่าเท่ากับ 4.13×10^{-9} มิลลิบาร์ เมื่อมีการลดประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดลง 80% จะได้ว่า $S_{P1} = 290.2198$, $S_{P2} = 362.7748$ ลิตรต่อวินาที การที่ความเร็วในการสูบลดลงย่อมทำให้เกิดสภาวะค่าความดันเป็นสุญญากาศแย่ง สังเกตได้จากค่า P_b ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.55×10^{-9} มิลลิบาร์ การวินิจฉัยของระบบควบคุมจะตรวจสอบจากค่าความดันที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 ตัวใดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากตารางที่ 6.2 แสดงให้เห็นเชิงประจักษ์ว่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 จะมีค่าสูงขึ้นจากเดิมอย่างชัดเจน มีค่าเท่ากับ 3.81×10^{-9} มิลลิบาร์ ในขณะที่ความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 มีค่าสูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 3.05×10^{-9} มิลลิบาร์ จะทำให้ทราบว่าปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดกำลังในการสูบลงจากเดิม กลไกการทำงานของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม FTC จะทำการสั่งการให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ชดเชยเพิ่มความเร็วในการสูบมากขึ้น เพื่อพยายามรักษาระดับความดันสุญญากาศ UHV ในระบบต่อไป โดยดำเนินการคำนวณค่าความเร็วการสูบใหม่จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศและความเร็วในการสูบตามเงื่อนไขลักษณะเฉพาะเดิมของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนพบว่าค่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.05×10^{-9} มิลลิบาร์ จะให้ความเร็วในการสูบเหมาะสมสูงสุดที่ 357.153 ลิตรต่อวินาที เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 3000 โวลต์ การชดเชยของระบบควบคุมจะสั่งการให้รักษาความเร็วในการสูบไว้เท่าเดิม ด้วยการไม่ปรับเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ยังคงเป็น 3000 โวลต์ เท่าเดิม และแสดงให้เห็นว่า ค่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.05×10^{-9} มิลลิบาร์ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ให้ความเร็วการสูบสูงสุดอย่างเหมาะสมแล้วตามลักษณะเฉพาะเดิมของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน และอธิบายได้เช่นเดียวกันกับกรณีลดประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดลง 60% ดังแสดงในรูปที่ 6.3 และตารางที่ 6.2

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงนำเสนอลักษณะเฉพาะของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนใหม่ เพื่อให้เห็นรายละเอียดและภาพการชดเชยของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม FTC ได้อย่างชัดเจนขึ้น ดังแสดงในหัวข้อที่ 6.3.2

6.3.2 กรณีใช้เงื่อนไขลักษณะเฉพาะใหม่ของปั๊ม

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นความตั้งใจให้ผู้อ่านเห็นภาพการชดเชยของระบบควบคุมความดันสุญญากาศ UHV ที่มีอัลกอริทึม FTC ได้อย่างเข้าใจมากขึ้น โดยกำหนดให้ลักษณะเฉพาะของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนเป็นดังแสดงในรูปที่ 6.4



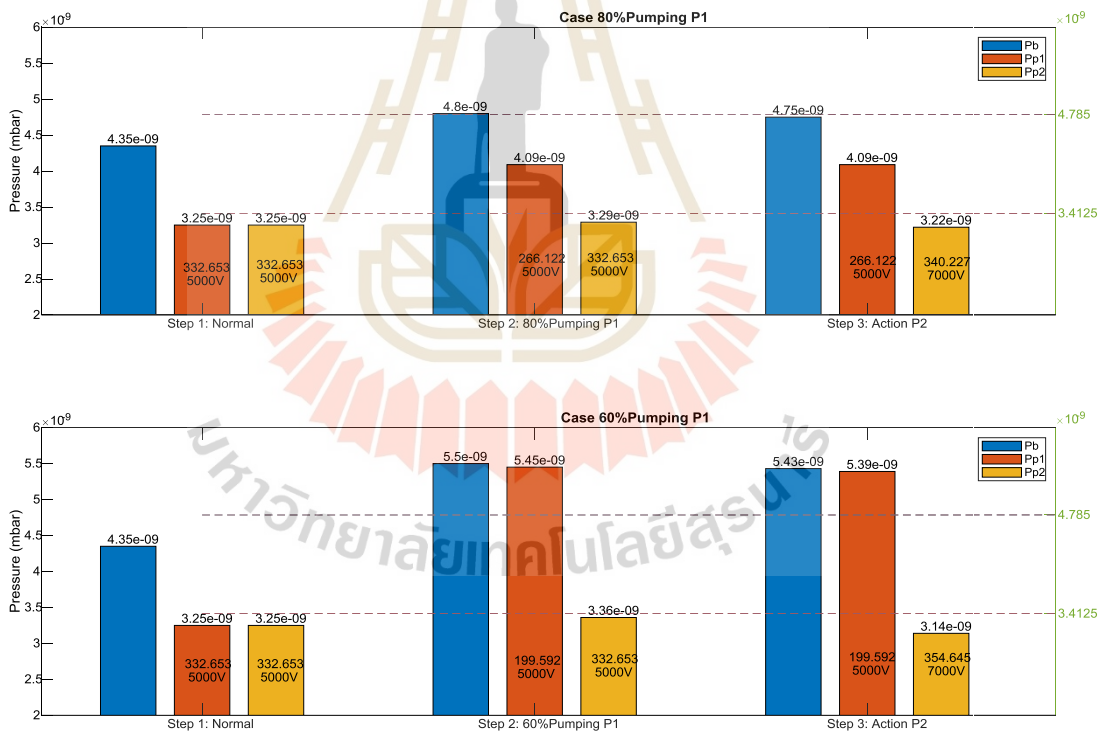
รูปที่ 6.4 เส้นสมการการความเร็วในการสูบของปั๊มที่สมมติขึ้น

ความสัมพันธ์ในรูปที่ 6.4 แสดงการทำงานของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่มีความเร็วในการสูบแสดงประสิทธิภาพในแกน y สัมพันธ์กับค่าความดันสุญญากาศในช่วง 1×10^{-9} มิลลิบาร์ ถึง 1×10^{-8} มิลลิบาร์ เมื่อมีการจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนด้วยค่า 3000, 5000 และ 7000 โวลต์ โดยมีสมการแสดงลักษณะเฉพาะไว้ประกอบแต่ละเส้นกราฟสามารถอธิบายเพิ่มเติมได้ดังตารางที่ 6.3

ตารางที่ 6.3 ความสัมพันธ์ของความเร็วในการสูบของปั๊มที่แรงดันไฟฟ้า 3000, 5000 และ 7000 โวลต์

แรงดัน	สมการความสัมพันธ์ (มิลลิบาร์)	R ²	ความเร็วการสูบ		ความดัน
			เปอร์เซ็นต์	ลิตร/วินาที	มิลลิบาร์
3000	$y = 40.395\ln(x) + 859.13$	1	22-50	110-250	1×10^{-9} - 2.03×10^{-9}
5000	$y = 65.471\ln(x) + 1359.7$	1	50-75	250-375	2.03×10^{-9} - 3.25×10^{-9}
7000	$y = 136.96\ln(x) + 2743.2$	1	75-95	375-475	3.25×10^{-9} - 4×10^{-9}

จากสมการความสัมพันธ์ลักษณะเฉพาะของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนใหม่ แสดงผลการชดเชยของระบบควบคุมความดันสุญญากาศในระดับ UHV ที่มีอัลกอริทึม FTC ในกรณีที่ระบบมีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดลง 80% และ 60% ตามลำดับ ดังในรูปที่ 6.5



รูปที่ 6.5 ผลการควบคุมด้วย FTC ในกรณีเส้นสมการสมมติขึ้น

ตารางที่ 6.4 พารามิเตอร์ในการควบคุมด้วย FTC ในกรณีเส้นสมการสมมติขึ้น

Parameter	Spump ₁	Spump ₂	Qa	Qb	Qc	Pb	Pp ₁	Pp ₂	Vp ₁	Vp ₂	Sp ₁	sp ₂
Unit	l/s		x 10 ⁻¹⁰ mbar.l/s			x 10 ⁻⁹ mbar			x 1000 v		l/s	
100%	332.653	332.653	6.23	0.1	7.02	4.35	3.25	3.25	5	5	332.653	332.653
80%	266.1224	332.653	6.23	0.1	7.02	4.80	4.09	3.29	7	7	489.2792	340.2274
action P ₂	266.1224	340.2274	6.23	0.1	7.02	4.75	4.09	3.22	7	5	489.2792	337.466
60%	199.5918	332.653	6.23	0.1	7.02	5.50	5.45	3.36	7	7	685.8651	354.6447
action P ₂	199.591	354.6447	6.23	0.1	7.02	5.39	5.43	3.14	7	5	683.3475	350.5233

ผลการทดลองในตารางที่ 6.4 แสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมความดันสุญญากาศในระดับ UHV ที่มีอัลกอริทึม FTC สำหรับลักษณะเฉพาะของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนใหม่ที่สร้างขึ้นให้ความชัดเจนของผลตอบสนองได้ดียิ่งขึ้น กล่าวคือเมื่อสภาพการทำงานปกติ การจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $V_{p1} = V_{p2} = 5000$ โวลต์ ค่าความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $S_{p1} = S_{p2} = 332.653$ ลิตรต่อวินาที ทำให้ค่าความดันสุญญากาศที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากันที่ $P_{p1} = P_{p2} = 3.25 \times 10^{-9}$ มิลลิบาร์ ค่าความดันสุญญากาศในตำแหน่งตรงกลางของระบบ P_b มีค่าเท่ากับ 4.35×10^{-9} มิลลิบาร์ เมื่อมีการลดประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดลง 80% จะได้ว่า $S_{p1} = 266.1224$, $S_{p2} = 332.653$ ลิตรต่อวินาที การที่ความเร็วในการสูบลดลงย่อมทำให้เกิดสภาวะค่าความดันเป็นสุญญากาศแย่งลง สังเกตได้จากค่า P_b ที่มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 4.80×10^{-9} มิลลิบาร์ การวินิจฉัยของระบบควบคุมจะตรวจสอบจากค่าความดันที่ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 และ 2 ตัวใดมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญและเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน จากตารางที่ 6.4 แสดงให้เห็นเชิงประจักษ์ว่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 จะมีค่าสูงขึ้นจากเดิมอย่างชัดเจน มีค่าเท่ากับ 4.09×10^{-9} มิลลิบาร์ ในขณะที่ความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 มีค่าสูงขึ้นจากเดิมเพียงเล็กน้อย มีค่าเท่ากับ 3.29×10^{-9} มิลลิบาร์ จะทำให้ทราบว่าปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดกำลังในการสูบลงจากเดิม กลไกการทำงานของระบบควบคุมที่มีอัลกอริทึม FTC จะทำสั่งการให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ชดเชยเพิ่มความเร็วในการสูบมากขึ้น เพื่อพยายามรักษาระดับความดันสุญญากาศ UHV ในระบบต่อไป โดยดำเนินการคำนวณค่าความเร็วการสูบใหม่จากสมการความสัมพันธ์ระหว่างความดันสุญญากาศและความเร็วในการสูบตามเงื่อนไขเฉพาะใหม่ของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนพบว่าค่าความดันของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.29×10^{-9} มิลลิบาร์ จะให้ความเร็วในการสูบเหมาะสมสูงสุดที่ 340.2274 ลิตรต่อวินาที เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 7000 โวลต์ การชดเชยของระบบควบคุมความดัน

สุญญากาศ UHV ที่มีอัลกอริทึม FTC จะสั่งการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 เป็น 7000 โวลต์ ทันที และอธิบายได้เช่นเดียวกันกับกรณีลดประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลดลง 60% ดังแสดงในรูปที่ 6.5 และตารางที่ 6.4

6.4 สรุป

ผู้วิจัยได้ออกแบบระบบควบคุมความดันสุญญากาศระดับสูงพิเศษด้วยตัวควบคุมพีซีซีที่สามารถทนต่อข้อผิดพลาดสำหรับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนที่มีปฏิริยาต่อกันในวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนจากการจำลองของระบบทดลองสุญญากาศที่ 2 โดยดำเนินการทดสอบลดประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 1 ลงประมาณ 80 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เป็นเหตุให้ค่าความดันสุญญากาศในระบบแย่งลง ระบบที่ถูกออกแบบมาจะตรวจพบค่าความดันสุญญากาศแย่งลงแล้วจะดำเนินการให้ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ขดเซยระบบทันที ด้วยการคำนวณความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ใหม่ ที่ย่านการจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่าง ๆ ให้กับปั๊ม และจะเลือกปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ให้มีความเร็วในการสูบสูงสุดจากการคำนวณ แต่กระบวนการยังไม่สิ้นสุดแต่เพียงเท่านั้น ยังมีฟังก์ชันการตัดสินใจในการชดเชยเพิ่มขึ้นดังนี้ หากค่าความดันสุญญากาศแย่งที่ตรวจพบนั้นคำนวณแล้วให้ความเร็วในการสูบเพิ่มขึ้นปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 จะเพิ่มความเร็วในการสูบโดยปรับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 ทันที เพื่อพยายามรักษาค่าความดันสุญญากาศในระบบให้ดีขึ้น แต่ในทางกลับกันหากค่าความดันสุญญากาศแย่งที่ตรวจพบนั้นคำนวณแล้วให้ความเร็วในการสูบลดลง ปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนตัวที่ 2 จะคงค่าความเร็วในการสูบไว้เท่าเดิมด้วยการคงค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มค่าเดิม การทำเช่นนี้จะส่งผลให้ได้ค่าความดันสุญญากาศในระบบดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ภายใต้การชดเชยอย่างมีขอบเขตความสามารถชดเชยได้ หากเกิดความผิดพลาดอันเนื่องมาจากประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนลดลงจนปั๊มอีกตัวที่มีปฏิริยาต่อกันไม่สามารถชดเชยได้ ระบบจะตรวจพบค่าความดันสุญญากาศแย่งแต่ความเร็วในการสูบของปั๊มตัวชดเชยไม่เพิ่มขึ้นนั่นเอง ผลจากการวิจัยในส่วนนี้แสดงให้เห็นว่าหากประสิทธิภาพการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนลดลง ระบบควบคุมที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถตรวจพบ วินิจฉัยและระบุได้ว่าปั๊มตัวใดมีปัญหา ปั๊มตัวใดต้องชดเชย และที่สำคัญสามารถรักษาค่าความดันสุญญากาศในระบบให้ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้จากเงื่อนไขการตัดสินใจจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนซึ่งข้อมูลจากการชดเชยของระบบควบคุมที่ได้นั้นจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับผู้ใช้งาน นั่นคือจะทำให้ทราบถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบนั่นเอง

งานวิจัยในส่วนนี้ได้กล่าวถึงการพัฒนาาระบบควบคุมแบบเดิมโดยเพิ่มฟังก์ชันการควบคุมแบบ Fault Tolerance Control สำหรับรักษาความดันสัญญาณทำให้อยู่ในย่านระดับสูงพิเศษ อันเนื่องจากประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสัญญาณแบบสปีดเตอร์ไอออนเปลี่ยนแปลงไปในกรณีศึกษา ลดลง 80% และ 60% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงอัลกอริทึม กลไกในการชดเชยระบบให้มีความสามารถทนต่อความผิดพลาดในขอบเขตการชดเชยได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการวางแผนปรับปรุงแก้ไขระบบก่อนที่ระบบจะได้รับความเสียหายในวงกว้าง



บทที่ 7

สรุปและข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

การผลิตแสงซินโครตรอนได้อย่างมีประสิทธิภาพจำเป็นต้องให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่อยู่ในท่อลำเลียงที่มีสภาวะความดันเป็นสุญญากาศในระดับสูงพิเศษ (Ultra-High Vacuum pressure, UHV) เพื่อหลีกเลี่ยงและป้องกันการชนกันของลำอิเล็กตรอนกับมวลอากาศ โมเลกุล หรืออะตอมใด ๆ ในท่อลำเลียง ซึ่งจะทำให้เกิดการหักเหของลำอิเล็กตรอน การชนกับผนังของท่อ ส่งผลให้คุณภาพของแสงซินโครตรอนลดลง จึงกล่าวได้ว่าการควบคุมความดันสุญญากาศเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญและหลีกเลี่ยงไม่ได้ เพื่อรักษาสภาวะความดันเป็นสุญญากาศระดับสูงพิเศษตลอดการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอนในท่อลำเลียงของวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอน ดังนั้นในการศึกษาและวิจัยนี้ สามารถสรุปผลงานวิจัยแบ่งเป็น 3 ส่วนพอสังเขปดังนี้

- พัฒนาระบบควบคุมความดันสุญญากาศให้อยู่ในย่านระดับสูงพิเศษ ด้วยตัวควบคุมพีซีซี สำหรับปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน สามารถการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ละเอียดขึ้น ทำให้ประหยัดพลังงานและมีความรวดเร็วต่อกระบวนการเตรียมอุปกรณ์ที่มีความดันสุญญากาศในย่านระดับสูงพิเศษ

- สร้างวิธีการประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออน โดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+ ทำให้ได้มาซึ่งแบบจำลองของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบสุญญากาศ และทำให้ทราบถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความดันสุญญากาศในระบบที่ต้องการพิจารณาได้

- พัฒนาระบบควบคุมแบบ Fault Tolerance Control สำหรับรักษาความดันสุญญากาศให้อยู่ในย่านระดับสูงพิเศษ อันเนื่องจากประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนเปลี่ยนแปลงไป

โดยมีรายละเอียดเพิ่มเติม ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้

7.1.1 การควบคุมความดันสุญญากาศในระดับสูงพิเศษ ด้วยตัวควบคุมพีซีซี

งานวิจัยนี้นำเสนอผลการควบคุมค่าความดันสุญญากาศ UHV ที่มีตัวควบคุมพีซีซี โดยระบบกฎพีซีซีในการอนุมานรูปแบบ Mamdani บนโปรแกรม LabVIEW เชื่อมต่อกับตัวควบคุมของปั๊มสุญญากาศแบบสปัตเตอร์ไอออนที่มีการใช้งานอยู่ในปัจจุบัน ผ่านโมดูล MOXA และ RS232

รับส่งสัญญาณแบบเรียลไทม์ ให้มีความสามารถปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่ละเอียดมากขึ้นเป็น 3000, 4000, 5000, 6000 และ 7000 โวลต์ โดยทดสอบผลการควบคุมใน 2 กรณี

กรณีที่ 1 ระบบประกอบด้วยห้องสุญญากาศ 1 ห้องเชื่อมต่อกับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน 1 ตัว

กรณีที่ 2 ระบบประกอบด้วยห้องสุญญากาศ 2 ห้องกับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน 2 ตัว เชื่อมต่อกับท่อสุญญากาศความยาว 1000 มิลลิเมตร

ผลการควบคุมที่ได้ทั้ง 2 กรณีสามารถควบคุมความดันสุญญากาศ UHV ตั้งแต่ความดันสุญญากาศเท่ากับ 1.5×10^{-7} ทอร์ จนถึงความดันสุญญากาศน้อยกว่าเท่ากับ 3.75×10^{-9} ทอร์ ได้ และทำให้การได้มาซึ่งความดันสุญญากาศ UHV เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นการประหยัดพลังงานสำหรับการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนได้มากขึ้น

7.1.2 การประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มด้วยโครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+

ในปัจจุบันปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่ใช้อยู่มีอายุการใช้งานเป็นระยะเวลาหลายปี และด้วยข้อจำกัดของตัวปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่เหมาะสมกับการสูบในพื้นที่ที่มีปริมาณก๊าซเหลืออยู่ต่ำมาก ๆ เท่านั้น บางครั้งการใช้งานในย่านความดันที่ไม่เหมาะสมจะส่งผลต่อความเสียหายให้กับตัวปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน งานวิจัยนี้เล็งเห็นความสำคัญของปัญหานี้จึงนำเสนอการประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน เพื่อเป็นข้อมูลในการควบคุมระบบให้มีผลสัมฤทธิ์ที่ถูกต้องแม่นยำ โดยการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาเชิงวิศวกรรมได้เป็นอย่างดี ในการประเมินประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน โดยใช้ข้อมูลจากโปรแกรม Molflow+ ที่ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องเปรียบเทียบกับข้อมูลการทดลองในกรณีที่ 2 ในการฝึกฝน ตรวจสอบและทดสอบแบบจำลองที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียม ผลที่ได้จากการวิจัยในส่วนนี้ทำให้ประมาณประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบัน และทราบถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความดันสุญญากาศในระบบที่ต้องการพิจารณาได้ เช่น อัตราการ outgassing เป็นต้น

7.1.3 การควบคุมค่าความดันสุญญากาศในระดับสูงพิเศษ ที่มีความสามารถคงทนต่อความเสียหาย

การออกแบบระบบควบคุมเพื่อรักษาค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV ให้มีความสามารถคงทนต่อความเสียหาย คือการออกแบบและพัฒนาตัวควบคุมให้มีความสามารถในการตรวจรู้ และแก้ไขปัญหาเมื่อระบบเกิดความผิดพลาดบางประการ เช่น ปั๊มทำงานได้ไม่เต็ม

ประสิทธิภาพ เกจวัดเกิดความผิดพลาดในการอ่านค่าความดัน หรือแม้กระทั่งในกรณีที่มีสิ่งรบกวนจากภายนอก เป็นต้น เป็นเหตุให้ระบบทำการชดเชยไปเรื่อย ๆ จนในที่สุดระบบอาจขาดเสถียรภาพได้ ซึ่งทฤษฎีระบบควบคุมแบบเดิม ๆ จะไม่สามารถรับมือได้กับเหตุการณ์แบบนี้ได้ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอผลการศึกษารณีความผิดพลาดอันเนื่องมาจากประสิทธิภาพความเร็วในการสุบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนลดลงประมาณ 80 และ 60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยนิยามว่าค่าความดันจากเครื่องมือวัดทุกตำแหน่งมีความถูกต้องแม่นยำและกระทำภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งสิ่งรบกวนจากภายนอก ผลการศึกษาเป็นรูปแบบการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับ Molflow+ ซอฟต์แวร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากประสิทธิภาพการสุบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนลดลง ระบบควบคุมที่ได้ออกแบบและพัฒนาขึ้นสามารถตรวจพบ วินิจฉัยและระบุได้ว่าปั๊มตัวใดมีปัญหา ปั๊มตัวใดต้องชดเชย กลไกในการชดเชยจะพิจารณาการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนให้ได้ความเร็วการสุบสูงสุด ทำให้สามารถรักษาค่าความดันสุญญากาศในระบบให้ดีที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้จากเงื่อนไขการตัดสินใจจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน ข้อมูลการชดเชยทำให้ทราบถึงความผิดปกติที่เกิดขึ้นในระบบ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ใช้งานในการวางแผนปรับปรุง แก้ไขระบบได้ทันท่วงทีก่อนเกิดความเสียหายในวงกว้างของระบบสุญญากาศ UHV

7.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาการควบคุมรักษาค่าความดันสุญญากาศระดับ UHV ซึ่งเป็นเรื่องที่ต้องใช้ทรัพยากรจำนวนมาก ราคาสูง รวมถึงองค์ความรู้และเทคนิคสุญญากาศขั้นสูงหลายประการ กระบวนการตลอดการสร้างระบบสุญญากาศต้องทำอย่างระมัดระวัง และต้องป้องกันการปนเปื้อนเข้าสู่ระบบสุญญากาศอย่างเต็มความสามารถ แต่นั่นเป็นเพียงส่วนหนึ่งที่จะทำให้บรรลุค่าความดันสุญญากาศระดับ UHV เท่านั้น ข้อเสนอแนะจากผลการวิจัยนี้ขอแบ่งออกเป็น 3 ส่วนสำคัญ ดังนี้

7.2.1 ข้อเสนอแนะจากการวิจัยในส่วนการควบคุมความดันสุญญากาศในระดับ UHV ด้วยพีซี

การออกแบบตัวควบคุมค่าความดันสุญญากาศระดับ UHV สำหรับการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ใช้กับปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน ผู้วิจัยใช้การสั่งการฮาร์ดแวร์ตัวควบคุมของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนที่ใช้อยู่เดิมในปัจจุบัน ชัดความสามารถในการออกแบบการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าอยู่ที่ขั้นละ 1000 โวลต์ ซึ่งเป็นความต้องการที่จะใช้ทรัพยากรที่มีอยู่เดิมอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด หากต้องการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าให้ละเอียดมากขึ้นอาจจะต้องปรับเปลี่ยนหรือผลิตฮาร์ดแวร์ตัวควบคุมของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออนใหม่ให้มีความเหมาะสมในการทำงานมากขึ้น

7.2.2 ข้อเสนอแนะจากการวิจัยในส่วนการประมาณประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน

งานวิจัยนี้เสนอการประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทเทียมร่วมกับโปรแกรม Molflow+ ในการสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายประสิทธิภาพความเร็วในการสูบของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน การได้มาซึ่งแบบจำลองที่มีความถูกต้องแม่นยำต้องพึ่งพาชุดข้อมูลในการเรียนรู้ที่มีจำนวนมากพอและเหมาะสมต่อการทำนายภายใต้การใช้งานจริงของการทดลองระบบสุญญากาศ อีกทั้งยังใช้ความรู้ความสามารถ ประสบการณ์ของผู้ใช้งานในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องอย่างมาก เช่น การปรับค่าน้ำหนัก (Weight, Bias) เพื่อลดค่าความแตกต่าง (Error) ของข้อมูลเอาต์พุต การเลือกใช้ประเภทของฟังก์ชันกระตุ้นอย่างเหมาะสมกับแต่ละลักษณะงาน เนื่องจากประเภทของฟังก์ชันกระตุ้นมีให้เลือกใช้อย่างหลากหลายซึ่งให้ค่าของคำตอบเอาต์พุตที่แตกต่างกัน ข้อเสนอแนะอีกอย่างที่สำคัญจากการวิจัยในส่วนนี้คือเรื่องของการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบจากใช้โครงข่ายประสาทเทียมยังเป็นเรื่องที่ได้รับการยอมรับเป็นส่วนน้อย ผู้ที่สนใจวิเคราะห์เสถียรภาพในระบบอาจดำเนินการต่อด้วยการหาช่วงของค่าความถี่เสถียรภาพของระบบจากทฤษฎีการควบคุมแบบคลาสสิกเช่น วิธีการตรวจสอบวิเคราะห์ตำแหน่งรากของระบบ หรือการหาเสถียรภาพของระบบพลวัตในทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟเพิ่มเติม เป็นต้น

7.2.3 ข้อเสนอแนะจากการวิจัยในส่วนการควบคุมค่าความดันสุญญากาศ UHV ที่มีความสามารถคงทนต่อความเสียหาย

งานวิจัยนี้เสนอความเสียหายอันเนื่องมาจากความผิดพลาดของปั๊มสุญญากาศแบบสปีดเตอร์ไอออน ถือเป็นกรณีพิจารณาความผิดพลาดของตัวกระตุ้นในระบบ (actuator fault) เพียงเท่านั้น โดยนิยามว่าค่าความดันสุญญากาศที่อ่านได้จากเครื่องมือวัดทุกตำแหน่งมีความถูกต้องแม่นยำ ข้อเสนอแนะจากการวิจัยนี้เสนอให้พิจารณาในกรณีความผิดพลาดของเครื่องมือวัด (sensor fault) ซึ่งอาจพบได้เช่นกัน จากปัจจัยบางประการที่ส่งผลต่อความผิดพลาดในการอ่านค่าผิดพลาดไปจากค่าความจริง เช่น สิ่งรบกวนจากภายนอก อาจมาในรูปแบบของอุณหภูมิที่ไม่อยู่ในย่านการทำงานที่เหมาะสม เป็นต้น

รายการอ้างอิง

- [1] Akram, H. M. (2014). Selection of Precise vacuum Pumps for the Systems with Diverse Vacuum Ranges. *Global Journal of Researches in Engineering*, Vol.14, No.2, 2014, pp. 645–651.
- [2] Ansari, A. R., Cerqueira, A. S., Lopes, L. F., & Rufino, J. L. (2019). Modeling and simulation of the CMS vacuum system. *Journal of Physics: Conference Series*, 1342(1), 012077.
- [3] Blanke, M., Staroswiecki, M., and Wu, N. E. (2001). Concepts and Methods in Fault-tolerant Control. *Proceedings of the American Control Conference Arlington*, June, 2001, pp. 2606-2620.
- [4] Calcatelli, A., Bergoglio, M., Mohan, P., Spagnol, M., and Simon, M. D. (1996). Study of outgassing of sputter-ion pump materials treated with three different cleaning procedures. Elsevier Ltd., Vol.47, No.6–8, 1996, pp. 723–726.
- [5] Carter, J. (2015). Design and Analysis of Accelerator Vacuum Systems with SynRad and MolFlow+. Mechanical Engineer, AES-MED Group, 2015.
- [6] Choi, J. H., & Park, K. S. (2011). Fuzzy control of ultra-high vacuum systems in space technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 225(3), 295-305. doi: 10.1177/0954410010382887
- [7] Choi, J. W., Lee, H. J., Kim, D. J., & Kim, H. J. (2007). Fuzzy logic control of a vacuum system for wafer processing. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 25(2), 360-366.
- [8] Chen, K. C., & Lee, C. K. (2015). Application of fuzzy logic control for ultra-high vacuum systems. *Vacuum*, 111, 1-6. doi: 10.1016/j.vacuum.2014.11.005
- [9] Cieslak, J., Henry, D., and Zolghadri, A. (2006). A Methodology for the Design of Active Fault Tolerant Control Systems. *IFAC*, 2006, pp. 813–818

- [10] Cui, H., Li, Y., Wang, X., Liu, G., & Xie, J. (2020). Numerical simulation of the vacuum system for the vacuum induction melting furnace using Molflow+. *Vacuum*, 183, 109772.
- [11] Davies, M., Srinivasa, N., Lin, T. H., China, G., Cao, Y., Choday, S. H., Dimou, G., Joshi, P., Imam, N., Jain, S., Liao, Y., Lin, C. W., Lines, A., Liu, P. L., Mathewson, K. E., McCoy, A. J., Paul, S., Tse, J. Y., ... Modha, D. S. (2018). Loihi: A Neuromorphic Manycore Processor with On-Chip Learning. *IEEE Micro*, 38(1), 82-99.
- [12] Detian, L., and Yongjun, C. (2011). Applications of non-evaporable getter pump in vacuum metrology. Elsevier Ltd., Vol.85, No.7, 2011, pp. 739–743.
- [13] Dmitry Yu. Tsipenyuk. (2009). *Vacuum Technology. Physical Methods, Instruments And Measurements Russian Academy of Sciences*, ISBN: 978-1-905839-56-8, Vol.3, 2009. pp. 305-326.
- [14] Dolcino, L., Mura, M., and Paolini, C. (2010). “50 Years of Varian sputter ion pumps and new technologies”. Elsevier Ltd., Vol.84, No.5, 2010, pp. 677–684.
- [15] Dong, C., Mehrotrat, P., and Myneni, G. R. (2002). Several Technical Measures to Improve Ultra- High and Extreme-High Vacuum. UNT Libraries Government Documents Department, 2002, pp. 1–6.
- [16] Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
- [17] Goodfellow, I. J., Shlens, J., & Szegedy, C. (2014). Explaining and Harnessing Adversarial Examples. *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*.
- [18] Grabski, M. (2016). *Vacuum Technology for Particle Accelerators*. CERN Accelerator School: Introduction to Accelerator Physics, 2016.
- [19] Hsu, C. F., Chen, Y. H., Lee, C. S., & Wu, S. M. (2002). Fuzzy control of a vacuum robot for wafer handling. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 15(4), 539-548.
- [20] Hsu, H. T., & Wu, C. W. (2007). Fuzzy control of a vacuum gripper for an industrial robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54(2), 1119-1127.
- [21] Hwang, S., & Lee, S. (2020). Stock Price Prediction Using Deep Learning Techniques. *Expert Systems with Applications*, 141, 112990.

- [22] Jha, S. C., & Gupta, S. K. (2009). Fuzzy logic control of a vacuum system for a particle accelerator. *Vacuum*, 83(2), 398-407.
- [23] Jiang, J. (2005). Fault-Tolerant Control Systems. *Acta Automatica Sinica*, Vol.31, No.1, 2005. pp. 161–174.
- [24] Jurafsky, D., & Martin, J. H. (2020). *Speech and Language Processing* (3rd ed.). Pearson.
- [25] Kikuchi, D., Nishimura, H., Matsuo, K., & Miyahara, N. (2018). Molflow+ simulation for optimization of a vacuum system for a linear accelerator. *Journal of Physics: Conference Series*, 1067(1), 012023.
- [26] Kim, M. J., & Lee, J. S. (2008). Fuzzy-logic-based control of ultra-high vacuum systems for advanced research. *Vacuum*, 83(2), 255-261. doi: 10.1016/j.vacuum.2008.04.004
- [27] Kim, T. Y., & Kim, S. H. (2013). Fuzzy logic control of ultra-high vacuum systems for semiconductor manufacturing. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 31(1), 011203. doi: 10.1116/1.4773412
- [28] Klinkhieo, S., Sudmuang, P., Krainara, S., Suradet, N., Boonsuya, S., Klysubun, P., Rujirawat, S., and Songsiriritthigul, P. (2012). Commissioning Results Of Slow Orbit Feedback Using PID Controller Method For Siam Photon Source. *Proceedings of IPAC2012*, ISBN 978-3-95450-115-1, 2012, pp. 2861–2863.
- [29] Lan, J., Patton, R. J., and Zhu, X. (2016). Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation. *Renewable Energy*, ISSN : 0960-1481, Vol.116, 2018, pp. 219–231.
- [30] LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep Learning. *Nature*, 521(7553), 436-444.
- [31] Lee, H., & Lee, C. (1999). Fuzzy logic control of vacuum pumps for semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 12(3), 270-276.
- [32] Li, Y., and Liu, X. (2015). *Vacuum Systems Engineering*. *Vacuum Science and Technology for Accelerator Vacuum Systems*, Cornell University, 2015.
- [33] Lipton, Z. C. (2018). The Mythos of Model Interpretability. *Communications of the ACM*, 61(10), 36-43.

- [34] Liu, Y. C., Wu, S. C., Chen, J. R., and Tzeng, H. S. (1985). The Outgassing and Pumping Effect of an Ultrahigh Vacuum System. *Chinese Journal of Physics*, Vol.23, No.4, 1985. pp. 273–283.
- [35] Mandry, P., Jones, R. M., Jones, A. M., Pasini, M., & Voulot, D. (2016). Simulation of gas flow in the HIE-ISOLDE RFQ using Molflow+. *Journal of Physics: Conference Series*, 700(1), 012010.
- [36] Martinez, J. C., Baccaro, S., Chiggiato, P., & D'Antone, I. (2018). Application of Molflow+ simulation to predict helium diffusion through materials. *Journal of Physics: Conference Series*, 1079(1), 012010.
- [37] Merolla, P. A., Arthur, J. V., Alvarez-Icaza, R., Cassidy, A. S., Sawada, J., Akopyan, F., Jackson, B. L., Imam, N., Guo, C., Nakamura, Y., Brezzo, B., Vo, I., Esser, S. K., Appuswamy, R., Taba, B., Amir, A., Flickner, M. D., Risk, W. P., ... Modha, D. S. (2014). A Million Spiking-Neuron Integrated Circuit with a Scalable Communication Network and Interface. *Science*, 345(6197), 668-673.
- [38] Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silver, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., Graves, A., Riedmiller, M., Fidjeland, A. K., Ostrovski, G., Petersen, S., Beattie, C., Sadik, A., Antonoglou, I., King, H., Kumaran, D., Wierstra, D., Legg, S., & Hassabis, D. (2015). Human-level Control through Deep Reinforcement Learning. *Nature*, 518(7540), 529-533.
- [39] Molnar, C. (2021). *Interpretable Machine Learning: A Guide for Making Black Box Models Explainable*. <https://christophm.github.io/interpretable-ml-book/>
- [40] Nabil, E., Sobaih, A. A., and Abou-Zalam, B. (2010). Active Fault-Tolerant Control System. *ICCES'2010 - 2010 International Conference on Computer Engineering and Systems*, 2010, pp. 274–279.
- [41] Nie, C., and Patton, R. J. (2011). Fault estimation and MRC-based active FTC. *Proceedings of the 18th IFAC World Congress*, 2011, pp.14808–14813.
- [42] Noura, H., Sauter, D., Hamelin, F., and Theilliol, D. (2000). Fault Tolerant Control in Dynamic Systems: Application to Winding Machine. *IEEE control system magazine*, Vol.20, No.1, 2000, pp. 33–49.
- [43] Pan, S. J., & Yang, Q. (2010). A Survey on Transfer Learning. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 22(10), 1345-1359.

- [44] Papernot, N., McDaniel, P., & Goodfellow, I. (2018). Transferability in Machine Learning: from Phenomena to Black-Box Attacks using Adversarial Samples. ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security.
- [45] Patton, R. J. (1997). Fault-Tolerant Control Systems. The 1997 Situation, 1997, pp.1033–1054.
- [46] Patton, R. J., Chen, L., and Klinkhieo, S., (2012). An LPV Pole–Placement Approach to Friction Compensation as an FTC Problem. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, Vol.22, No.1, 2012, pp.149–160.
- [47] Sá da Costa, J., Santos, B. M. S., Mendes, M. J. G. C. (2007). A Design Approach to FDI/FTC of Complex Networked Control Systems. Control Engineering and Applied Informatics, Vol.9, No.3, 2007. pp. 3–11.
- [48] Schmidhuber, J. (2015). Deep Learning in Neural Networks: An Overview. Neural Networks, 61, 85-117.
- [49] Shen, S., Tung, L., Kishiyama, K., and Nederbragt, W. (2001). Design and Analysis of Vacuum Pumping Systems for Spallation Neutron Source Drift-Tube Linac and Coupled-Cavity Linac. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, 2001. pp. 2198–2200.
- [50] Stipcich, S., Comunian, M., & Ferianis, M. (2016). Simulation and optimization of the vacuum system for the ESS linac. Journal of Physics: Conference Series, 732(1), 012045.
- [51] Suetsugu, Y. (1995). Numerical calculation of an ion pump's pumping speed. Elsevier Ltd., Vol.46, No.2, 1995, pp. 105–111.
- [52] Wang, J., Ge, W., Zhou, J., Wu, H., and Jin, Q. (2016). Fault isolation based on residual evaluation and contribution analysis. Journal of the Franklin Institute, Vol.354, 2016, pp.2591–2612.
- [53] Xia, C., and Zhu, J. (2013). Vacuum Systems. The Department of Physics, Chemistry and Biology, Linköping University, 2013, pp.1-23.
- [54] Yosinski, J., Clune, J., Bengio, Y., & Lipson, H. (2014). How Transferable are Features in Deep Neural Networks? Advances in Neural Information Processing Systems, 27, 3320-3328.

- [55] Yu, X., and Jiang, J. (2015). A survey of fault-tolerant controllers based on safety-related issues. *Annual Reviews in Control*, Vol.39, 2015, pp.46–57.
- [56] Zhang, K., Jiang, B., and Cocquempot, V. (2008). Adaptive Observer-based Fast Fault Estimation. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, Vol.6, No.3, 2008. pp. 320–326.
- [57] Zhang, Y., Gu, M., Wang, H., Zhang, L., & Zhang, Y. (2021). Simulation and optimization of the gas flow in the storage ring of the Shanghai Synchrotron Radiation Facility using Molflow+. *Journal of Physics: Conference Series*, 1796(1), 012063.
- [58] Zhao, X., & Wang, Y. (2005). Fuzzy control of a vacuum system for a glass melting furnace. *Vacuum*, 78(1), 89-98.
- [59] ณัฐวัฒน์ ยะชุ่ม (2016). การพัฒนาระบบควบคุมความดันสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศ. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- [60] สรพงษ์ นรสิงห์, สมยศ เด่นจิตเจริญ และ พิเชษฐ ลิ้มสุวรรณ (2013). Study of a small vacuum coating system for thermal evaporation. *RMUTP Research Journal Special Issue. The 5th Rajamangala University of Technology National Conference, July 15-16, 2013.* pp. 345–356.
- [61] สอนง กลิ่นเกสร (2010). ระบบสุญญากาศขนาดเล็กสำหรับการสปัตเตอร์และการระเหยสาร. การประชุมวิชาการเพื่อนำเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่ 6, กันยายน, 2010.



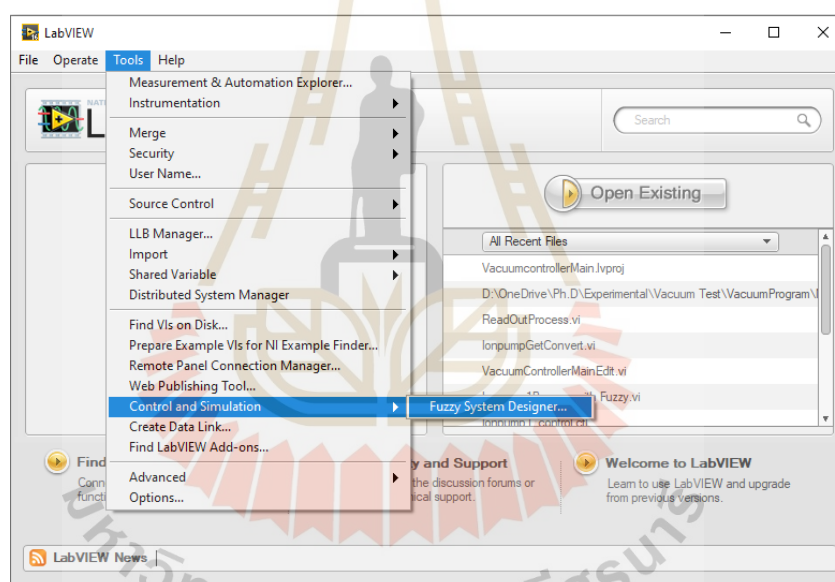
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

การใช้งานพีซีลอจิกบนโปรแกรม LabVIEW

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อมูลการใช้งานฟuzzyโปรแกรม LabVIEW

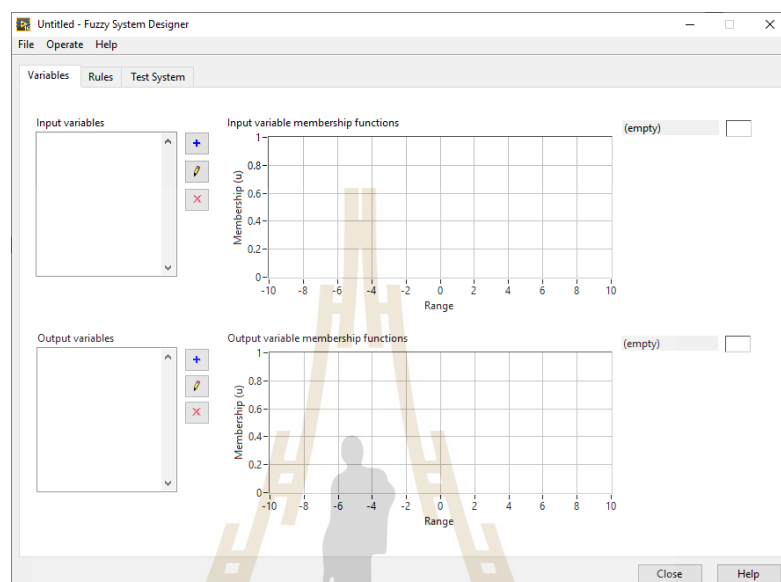
LabVIEW เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการติดต่อสื่อสารกับเครื่องมือต่าง ๆ สามารถสร้างระบบการทำงาน เครื่องมือวัด นิยมใช้ประโยชน์ในการสร้างสำหรับประมวลผลหรือควบคุมการทำงานต่าง ๆ และเช่นเดียวกันกับในงานวิจัยนี้ที่สังเกตเห็นการใช้ประโยชน์จากโปรแกรม LabVIEW ในการออกแบบตัวควบคุมฟuzzyสำหรับควบคุมรักษาค่าความดันสุญญากาศในระดับ UHV โดยการเชื่อมต่อรับส่งสัญญาณกันแบบเรียลไทม์ผ่านโมดูล MOXA และสาย RS232 เข้ากับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล โดยการจะใช้งานฟuzzyบนโปรแกรม LabVIEW ผู้ใช้จะต้องดำเนินการติดตั้งเครื่องมือส่วนเสริมที่ช่วยออกแบบตัวควบคุมอัลกอริทึมฟuzzyหรือฟังก์ชัน Fuzzy System Designer ที่ชื่อว่า LabVIEW Control Design and Simulation Module ให้เรียบร้อยเสียก่อน หลังจากติดตั้งแล้วเสร็จสามารถเข้าใช้งานเครื่องมือ ดังแสดงในรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 หน้าต่างโปรแกรม LabVIEW และการเข้าใช้งานส่วนเสริม Fuzzy System Designer

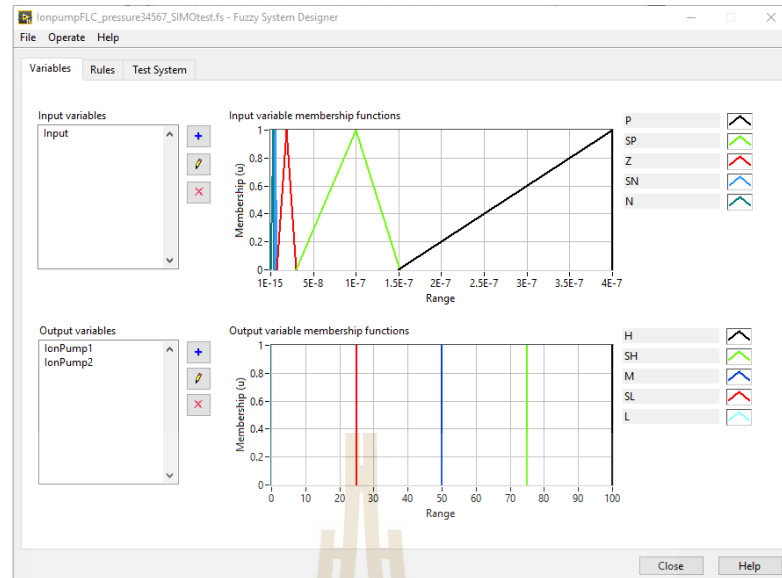
การสร้างฟัซซีลอจิกอย่างง่ายบนโปรแกรม LabVIEW มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เลือก Fuzzy System Designer ให้ปรากฏหน้าต่าง ดังแสดงในรูป ก.2



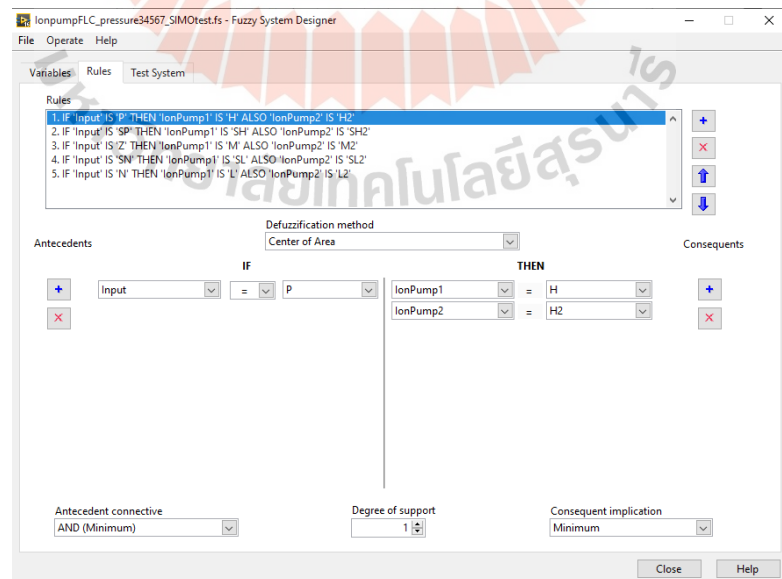
รูปที่ ก.2 หน้าต่างการออกแบบฟัซซีบนโปรแกรม LabVIEW

2. สร้างตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต โดยคลิกปุ่ม Add Input Variable จากนั้นกำหนดชื่อตัวแปร พร้อมทั้งกำหนดรูปแบบและขอบเขตสำหรับพารามิเตอร์ Membership functions เช่น กำหนด Membership functions ของตัวแปรอินพุตเป็นรูปแบบสามเหลี่ยม ตัวแปรเอาต์พุตเป็นรูปแบบสมาชิกภาพเดี่ยวหรือ Singleton กำหนดขอบเขตของ Membership functions กำหนดชื่อตัวแปร ดังแสดงในรูป ก.3



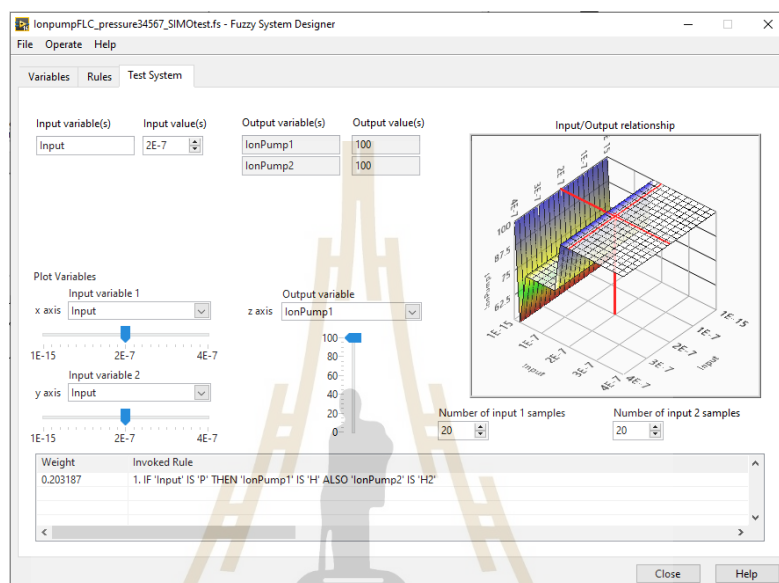
รูปที่ ก.3 การกำหนดตัวแปรอินพุตและเอาต์พุต

3. กำหนดกฎของการควบคุมฟัซซี โดยเลือกที่แถบของ Rules จากนั้นกำหนดวิธีดีฟัซซี (Defuzzification Method) เป็นรูปแบบของ Center of Area และกำหนดให้ Antecedent connective เป็น AND (minimum) จะได้ผลการกำหนดกฎการควบคุมฟัซซีแต่ละเงื่อนไขตามที่ออกแบบไว้ ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 ผลการสร้างกฎการควบคุมฟัซซี

4. จำลองกฎการควบคุมฟuzzyก่อนนำไปใช้งานจริงด้วยการเลือกแถบ Test System วิธีการทดสอบกฎคือผู้ใช้สามารถป้อนค่าอินพุตลงในช่อง input value จากนั้นโปรแกรมจะทำการประมวลผลจากการอนุมานตามกฎฟuzzyที่ได้ออกแบบไว้แล้วทำการตีฟuzzyข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการใช้งานระบบจริงตามที่ตั้งค่าไว้ แสดงดังรูปที่ ก.5



รูปที่ ก.5 การทดสอบกฎการควบคุมฟuzzy

5. บันทึกข้อมูล โดยไปที่ เมนู File เลือก Save As โดยข้อมูลที่บันทึกไว้จะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ Fuzzy system (*. fs)



ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

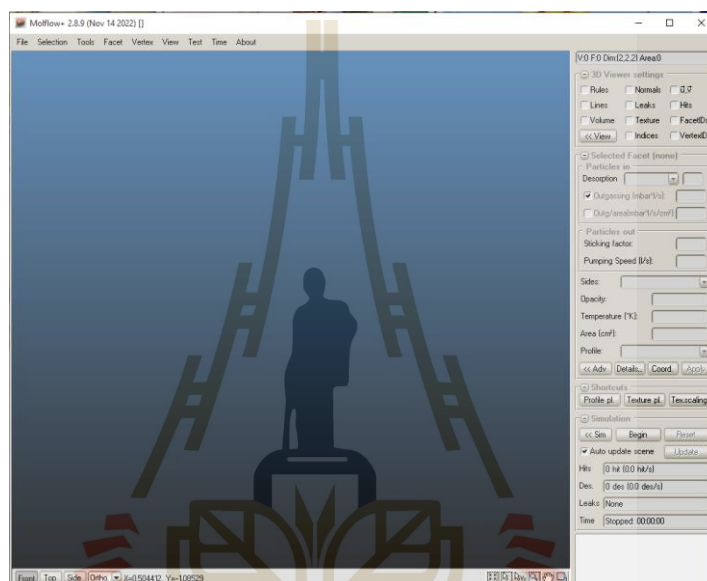
การใช้งานโปรแกรม Molflow+

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ข้อมูลการใช้งานศึกษาพฤติกรรมความดันสุญญากาศโปรแกรม Molflow+

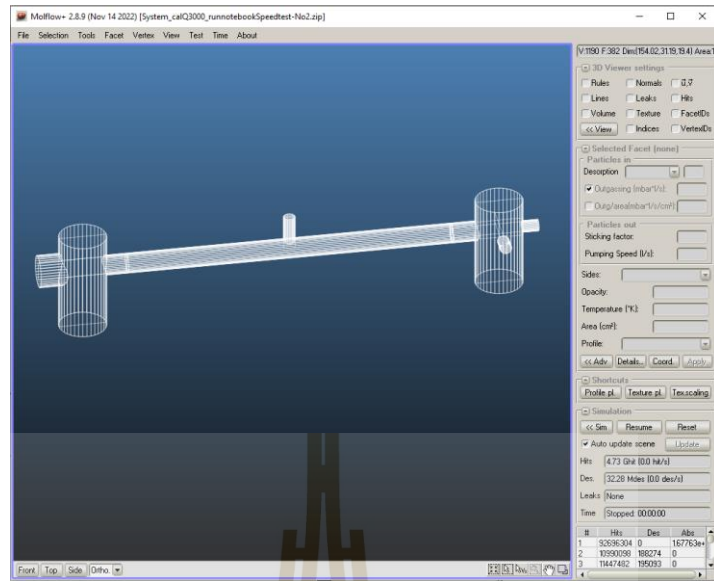
Molflow+ เป็นโปรแกรมฟรีซอฟต์แวร์ เป็นลิขสิทธิ์ของ CERN มีความสามารถคำนวณความดันในห้องสุญญากาศรูปทรงเรขาคณิตที่ซับซ้อนได้อย่างอิสระ เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมความดัน การเคลื่อนที่ของอนุภาคด้วยวิธีแบบมอนติคาร์โล ขั้นตอนการใช้งานมีดังต่อไปนี้

1. การทำการดาวน์โหลดและติดตั้งโปรแกรม Molflow+ จากแหล่งที่มาของ CERN ได้ที่ <https://molflow.web.cern.ch/node/106> จะปรากฏหน้าต่างของโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ ข.1



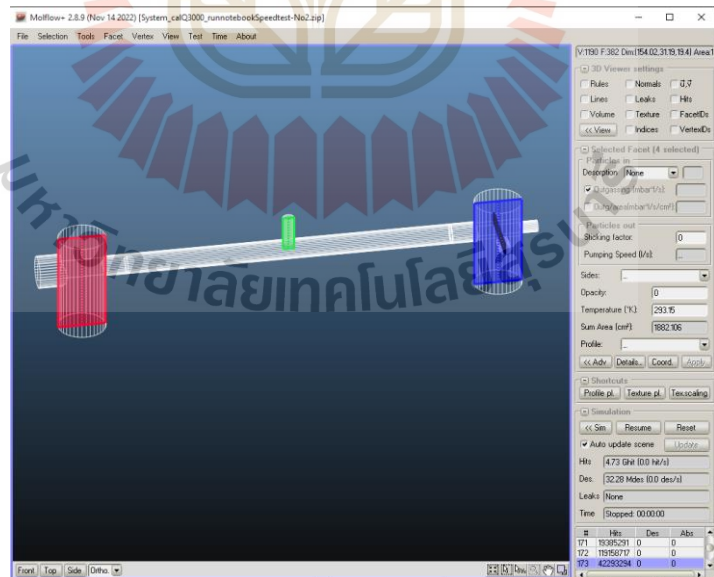
ข.1 หน้าต่างโปรแกรม Molflow+

2. สร้างรูปทรงเรขาคณิตของระบบสุญญากาศที่ต้องการพิจารณา ดังตัวอย่างในรูปที่ ข.2



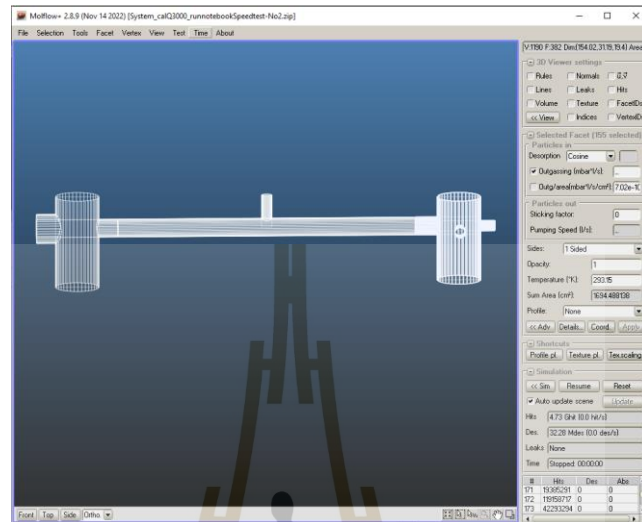
ข.2 รูปทรงเรขาคณิตของระบบสุญญากาศ

3. สร้างระนาบความดันในทิศทางที่ต้องการพิจารณา เช่น ความดันที่สนใจในแนวแกน x หรือ แกน y จากตำแหน่งเริ่มต้นจุดใดไปสิ้นสุดที่จุดไหน ดังแสดงรูปที่ ข.3



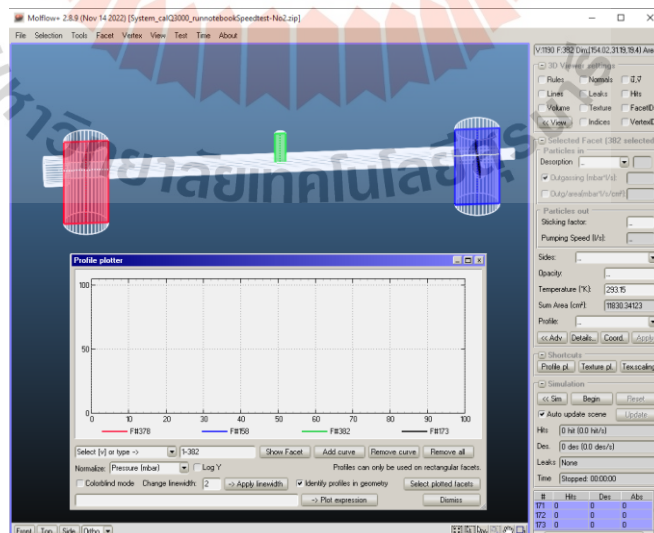
ข.3 ระนาบของความดันที่พิจารณา

4. กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบสุญญากาศ เช่น ตำแหน่งปั๊มอยู่ที่ใดมีขนาด ความเร็วการสูบเท่ากับเท่าไร กำหนดอัตราการ outgassing เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ ข.4



ข.4 กำหนดพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในระบบสุญญากาศ

5. กด Begin และ Profile pl. เพื่อทำการรันโปรแกรม แล้วพฤติกรรมความดันสุญญากาศ จะปรากฏตามแนวระนาบที่ผู้ใช้ตั้งค่าไว้



ข.5 พล็อตพฤติกรรมความดันสุญญากาศในระบบ

ภาคผนวก ค

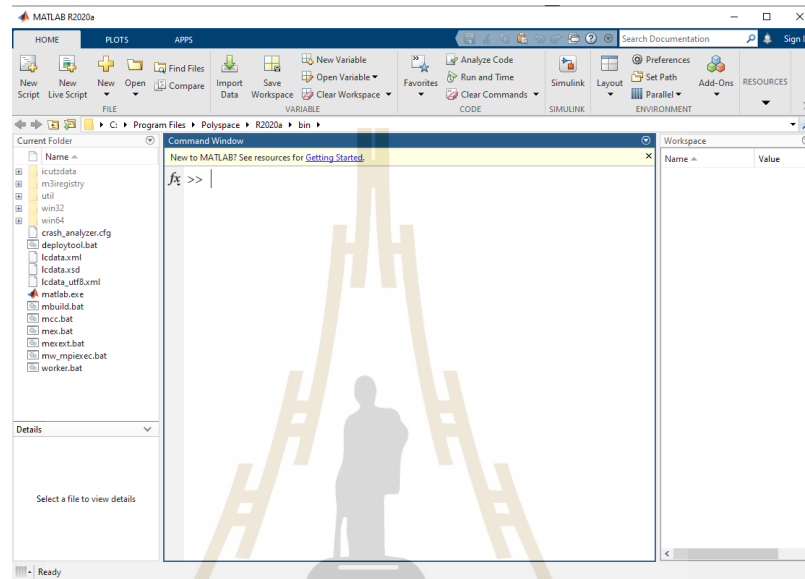
การใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมบนโปรแกรม MATLAB

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การใช้งานโครงข่ายประสาทเทียมบนโปรแกรม MATLAB

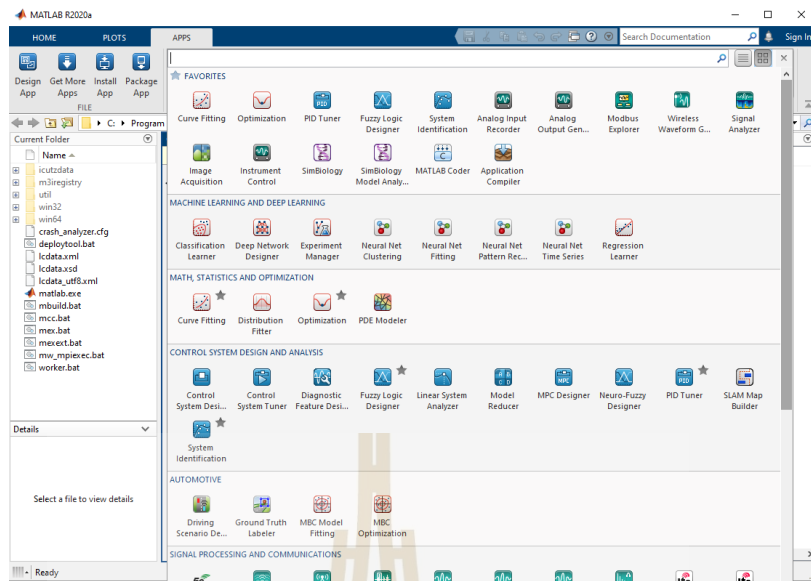
Neural Networks เป็นแอปพลิเคชันหนึ่งในโปรแกรม MATLAB ผู้ใช้สามารถเข้าใช้งานได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. ติดตั้งและเปิดโปรแกรม MATLAB จะปรากฏหน้าต่างโปรแกรมดังแสดงในรูปที่ ค.1



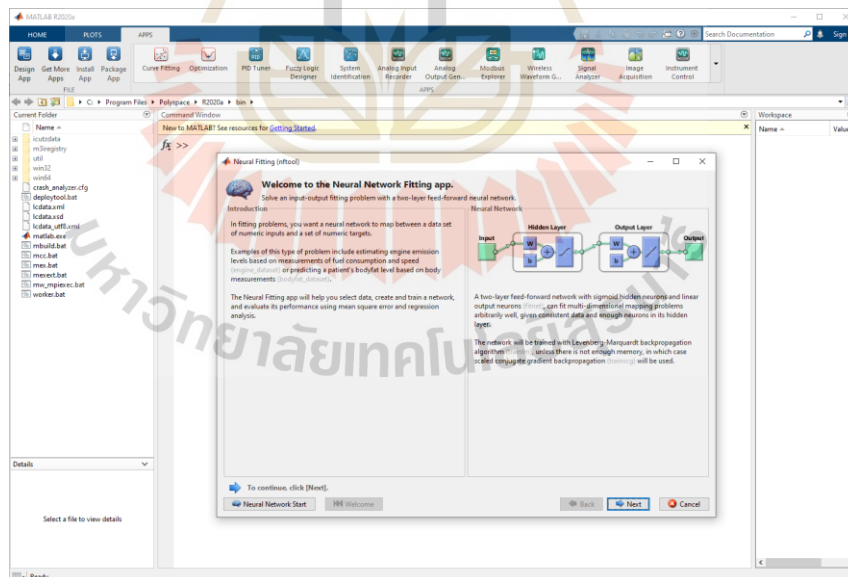
รูปที่ ค.1 หน้าต่างโปรแกรม MATLAB

2. เลือกแถบเมนู APPS แล้วเลือกการใช้งาน Neural Net Fitting แสดงดังรูปที่ ค.2



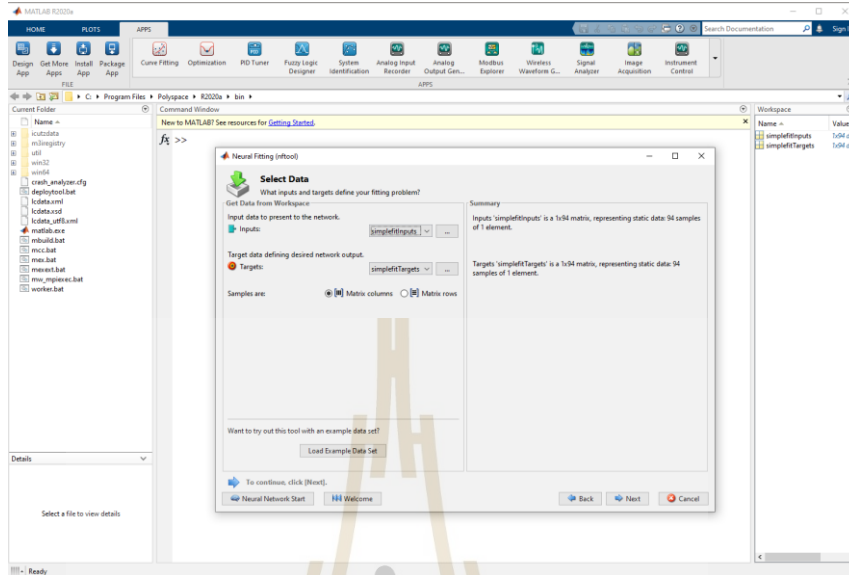
รูปที่ ค.2 การเข้าใช้ Neural Networks บนโปรแกรม MATLAB

3. คลิก Next เพื่อเริ่มต้นใช้งาน Neural Networks แสดงดังรูปที่ ค.3



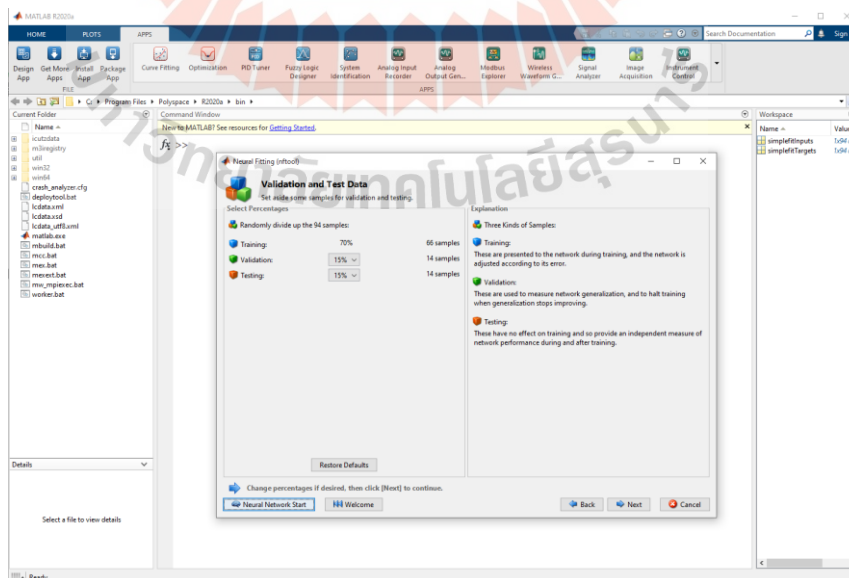
รูปที่ ค.3 หน้าต่างการเข้าสู่การใช้งาน Neural Networks

4. Import ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุต แล้วคลิก Next ดังรูปที่ ค.4



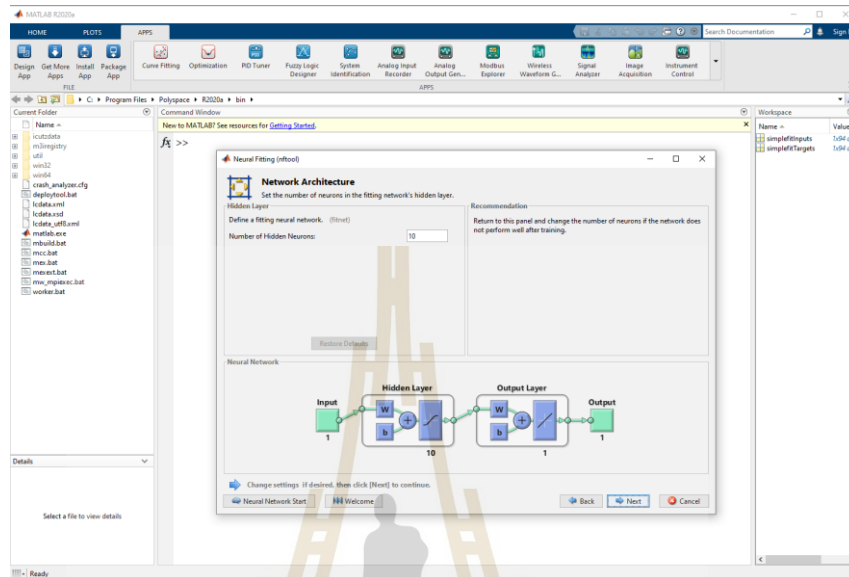
รูปที่ ค.4 การให้ข้อมูลอินพุตและเอาต์พุตกับ Neural Networks

5. แบ่งข้อมูลออกเป็น 3 กลุ่ม เพื่อการ Training, Validation และ Testing คิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนข้อมูลที่มี แล้วคลิก Next แสดงผลดังรูปที่ ค.5



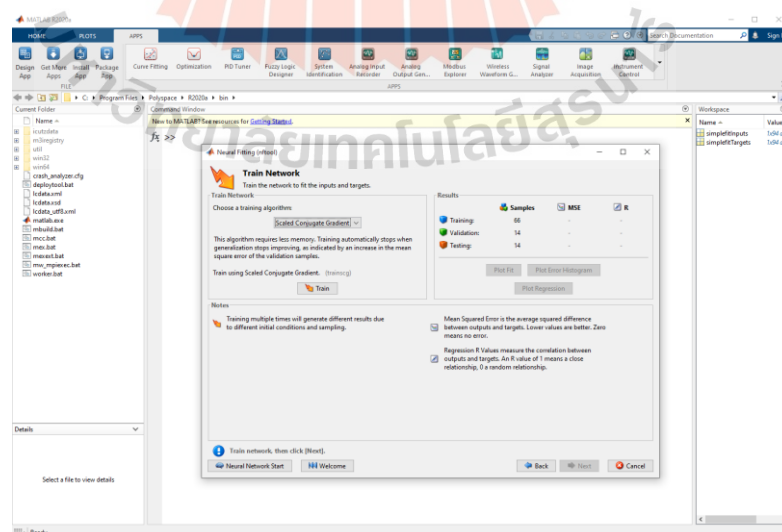
รูปที่ ค.5 การแบ่งข้อมูลออกเป็นเพื่อการ Training, Validation และ Testing

6. กำหนดจำนวน Hidden Layer ของ Neural Networks จากนั้นคลิก Next เพื่อเข้าสู่ กระบวนการถัดไป ดังรูปที่ ค.6



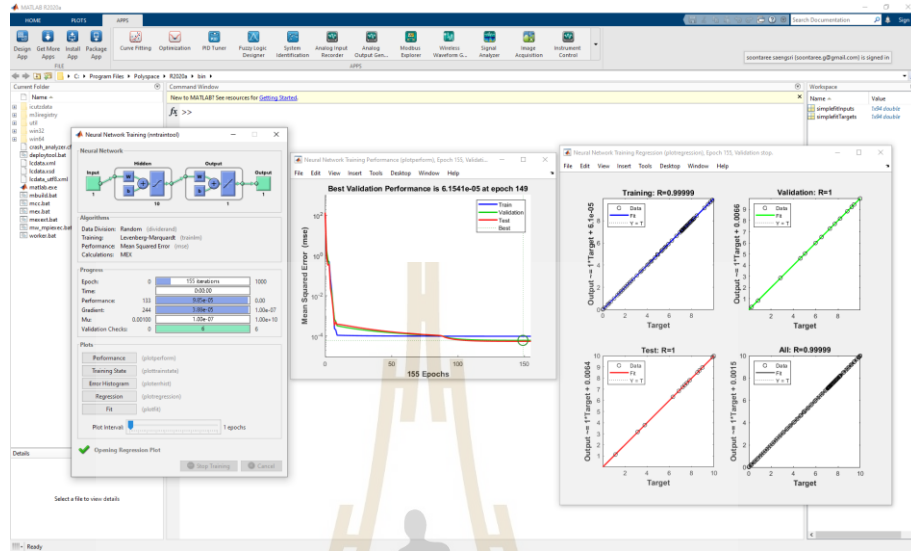
รูปที่ ค.6 กำหนดจำนวน Hidden Layer ของ Neural Networks

7. กำหนดอัลกอริทึมในการฝึกฝนเรียนรู้ของ Neural Networks จากนั้นคลิกที่ Train เพื่อ รันโปรแกรม ดังแสดงในรูปที่ ค.7



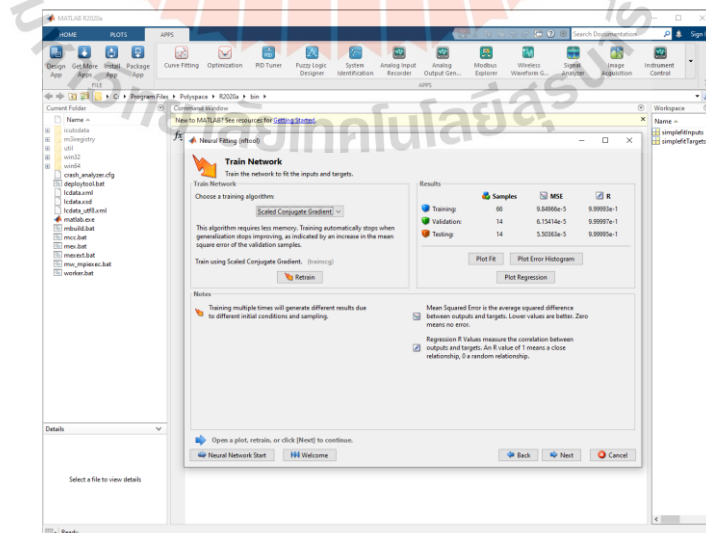
รูปที่ ค.7 เลือกอัลกอริทึมในการ Training ของ Neural Networks

8. ตรวจสอบประสิทธิภาพการ Training ที่ Performance และ Regression ดังแสดงในรูปที่ ค.8



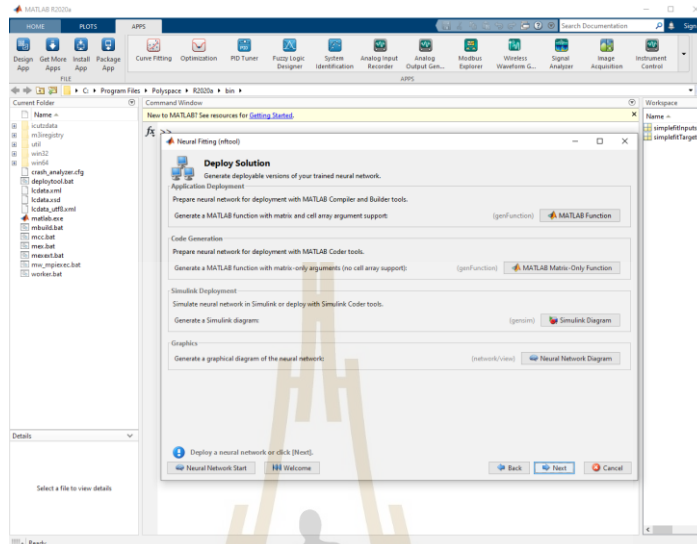
รูปที่ ค.8 ประสิทธิภาพการ Training ของ Neural Networks

9. หากผลการ Training ยังไม่เป็นที่พึงพอใจ ผู้ใช้สามารถคลิกที่ Retrain เพื่อให้ Neural Networks เริ่มต้นการ Training ใหม่ได้จนกว่าผู้ใช้งานพอใจในประสิทธิภาพการ Training แล้วจึงคลิกที่ Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ ค.9



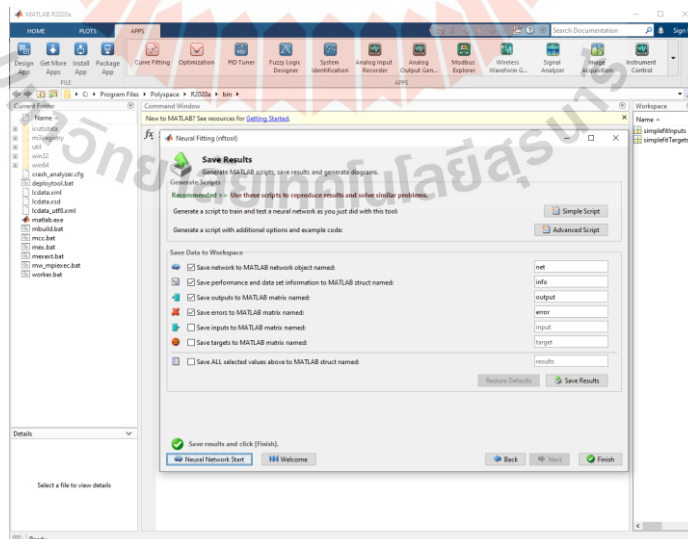
รูปที่ ค.9 ขั้นตอนการ Retraining ของ Neural Networks

10. คลิกที่ Simulink Diagram เพื่อนำแบบจำลองไปใช้งานบนหน้าต่าง Simulink แล้วจึงคลิก Next เพื่อเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป ดังแสดงในรูปที่ ค.10



รูปที่ ค.10 การรับแบบจำลองของ Neural Networks ไปใช้งาน

11. หากผู้ใช้ต้องการเก็บข้อมูลการ Training ไว้ สามารถคลิกที่ Save Results แล้วจึงคลิก Finish เมื่อสิ้นสุดกระบวนการ ดังแสดงในรูปที่ ค.11



รูปที่ ค.11 การบันทึกแบบจำลองที่ได้จาก Neural Networks



ภาคผนวก ง

บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในขณะศึกษา

Soontaree Seangsri, Thanasak Wanglomklang, Nopparut Khaewnak, Nattawat Yachum and Jiraphon Srisertpol (2023) “Optimizing Ultra-High Vacuum Control in Electron Storage Rings using Fuzzy Control and Estimation of Pumping Speed by Neural Networks with Molflow+” **Systems** 2023, 11(3), 116; <https://doi.org/10.3390/systems11030116>.

สมบูรณ์ทรัพย์ รอดพร, วริทธิ์ อรุณสุขมาก, สุนทรี แสงศรี, เร็งรุจ รุจนะไกรกานต์, และจิระพล ศรีเสริฐผล(2022) “Design Control System for X-Ray Irradiation by Energy and Manufacturing Time Optimization” การประชุมวิชาการระดับชาติ “ราชวมงคลสุรินทร์ ครั้งที่ 13”, Surin, Thailand, 17-18 November 2022, pp. B480-B496.

สุนทรี แสงศรี, ณัฐวัฒน์ ยะช่อม, สมบูรณ์ทรัพย์ รอดพร, ศุภชัย ประวันตา, โศรฎา แข็งการ, และจิระพล ศรีเสริฐผล (2021) “Fuzzy Logic based Pressure Control of a UHV Vacuum System” **The 44th Electrical Engineering Conference (EECON44)**, Nan, Thailand, 17-19 November 2021, pp. 525-528.

กรินทร์ โกสิยานุรักษ์, ธนาภรณ์ ธรรมเจริญ, สุนทรี แสงศรี, และจิระพล ศรีเสริฐผล (2020) “Vibration Classification using Artificial Neural Network for Blower Controlled with PI Servo and Observer” **The 43rd Electrical Engineering Conference (EECON43)**, Phitsanulok, Thailand, 28-30 October 2020, pp. 354-357.


Natthawut Prasoetkarn, Nitisak Numanoy, Soontaree Saengsri and Jiraphon Srisertpol (2019) “Identification and Control of Counter-traction Mechanism to Finger Traps for Fracture Reduction” **The 6th International Conference On Mechatronics And Mechanical Engineering**, Wuhan, China, 9–11 November 2019, pp. 1-6.

ฐานุตต์ จิตสุภาบุญกิจ, สุนทรี แสงศรี, และจิระพล ศรีเสริฐผล (2017) “Control System Design of Vacuum Pump for Wound Therapy” การประชุมวิชาการระดับชาติ “นวัตกรรมและเทคโนโลยีวิชาการ 2017”, Surin, Thailand, 25-26 December 2017, pp. B614-B618.

Soontaree Saengsri, Supachai Prawanta, Soontorn Odngam, Jiraphon Srisertpol (2017) “PI-servo with state-D feedback and observer for magnetic stirrer machine” **2017 International Conference on Circuits, Devices and Systems (ICCDs)**, Chengdu, China, 05-08 September 2017, pp. 6-10.

Article

Optimizing Ultra-High Vacuum Control in Electron Storage Rings Using Fuzzy Control and Estimation of Pumping Speed by Neural Networks with Molflow+

Soontaree Seangsri ¹, Thanasak Wanglomklang ², Nopparut Khaewnak ³, Nattawat Yachum ⁴ and Jiraphon Srisertpol ^{2,*} 

¹ Mechatronics Engineering Program, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

² School of Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

³ School of Mechatronics Engineering, Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi 20110, Thailand

⁴ Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima 30000, Thailand

* Correspondence: jiraphon@sut.ac.th; Tel.: +66-4422-4412

Abstract: This paper presents the design of a fuzzy-controller-based ultra-high vacuum pressure control system and its performance evaluation for a sputter-ion vacuum pump used in the electron storage ring at the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) in Thailand. The production of synchrotron light requires advanced vacuum technology to maintain stability and prevent interference of electrons in an ultra-high vacuum pressure environment of about 10^{-9} Torr. The presence of heat and gas rupture from the pipe wall can affect the quality of the light in that area. The institute currently uses a sputter-ion vacuum pump which is costly and requires significant effort to quickly reduce pressure increases in the area. Maintaining stable vacuum pressure throughout electron motion is essential in order to ensure the quality of the light. This research demonstrates a procedure for evaluating the performance of a sputter-ion vacuum pump using a mathematical model generated by a neural network and Molflow+ software. The model is used to estimate the pumping speed of the vacuum pump and to design a fuzzy control system for the ultra-high vacuum system. The study also includes a leakage rate check for the vacuum system.

Keywords: ultra-high vacuum; sputter-ion vacuum pump; pumping speed; fuzzy; artificial neural network; Molflow+



Citation: Seangsri, S.; Wanglomklang, T.; Khaewnak, N.; Yachum, N.; Srisertpol, J. Optimizing Ultra-High Vacuum Control in Electron Storage Rings Using Fuzzy Control and Estimation of Pumping Speed by Neural Networks with Molflow+. *Systems* **2023**, *11*, 116. <https://doi.org/10.3390/systems11030116>

Academic Editors: Uli Pohl and Eric Specking

Received: 18 January 2023

Revised: 18 February 2023

Accepted: 21 February 2023

Published: 23 February 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The Synchrotron Light Research Institute (Public Organization) is an institute that has a laboratory that provides services for the utilization of synchrotron light. Synchrotron light is generated by causing electrons to move at nearly the speed of light and forcing them to arc with a magnetic field, which causes the electrons to lose some energy and release energy in the form of electromagnetic waves. Synchrotron light has a high intensity and continuous energy value that covers four wavelengths, ranging from infrared to visible light, ultraviolet light, and X-rays, as shown in Figure 1.

The process of producing synchrotron light at the Siam Light Research Institute involves six main components: 1. an electron gun, 2. a linear accelerator (Linac), 3. a booster synchrotron, 4. a storage ring, 5. beamlines, and 6. an experimental station. The electron gun produces a large number of electrons, which are then divided into groups called electron bunches and accelerated in a straight line by microwave waves in the Linac. The booster synchrotron increases the energy of these electrons in a circle using radio waves, and the storage ring further accelerates the electrons to an energy of up to 1.2 GeV [1]. The beamlines bring the produced synchrotron light to the experimental station, where it

collides with a sample, and various scientific reactions occur. The data is then processed by scientists using a detector and a computer to analyze the atomic or molecular structure of the sample, as shown in Figure 2.

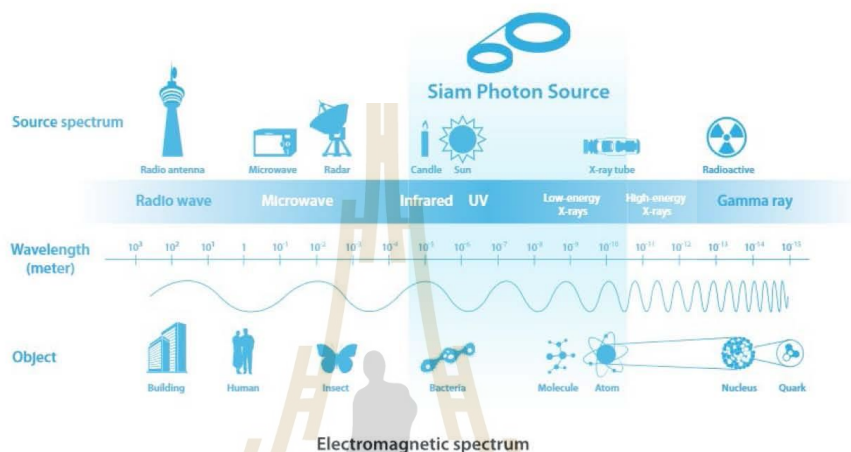


Figure 1. Properties of synchrotron light. Reference Source; https://www.slri.or.th/en_web/what-is-synchrotron-light.html (accessed on 1 January 2023).



Figure 2. Synchrotron light generator. Reference Source; <http://www.slri.or.th/th/index.php/what-is-synchrotron-light/for-research.html> (accessed on 1 January 2023).

The production of synchrotron light requires advanced vacuum technology at a pressure of approximately 10^{-8} to 10^{-11} Torr in the beam in order to prevent interference, refraction, and collisions with air masses. Maintaining a constant ultra-high vacuum (UHV) pressure is essential to ensure the quality of the synchrotron light. Sputter-ion vacuum pumps are commonly used to maintain this pressure, but they are expensive and require a lot of work. Vacuum, created by vacuum pumps, refers to a space with low matter and pressure and is used in various applications such as research and industry. This paper

discusses the mathematical models of vacuum systems, pumps, measurement techniques, equipment installation, and testing processes. It also provides a guideline for selecting the right vacuum pump and briefly discusses support for optimum vacuum production [2–4]. The sputter pump, also known as an ion pump, was selected, and its characteristics were described [5]. This experiment used synchrotron light and required a UHV in the tube environment with gas loading analysis for the vacuum system chamber of the synchrotron radiation source 6 GeV (SR) [6]. Additionally, research on water absorption measurements at ultra-high and extreme-high vacuum was conducted [7]. A direct method for numerically calculating the pumping velocity of the sputter-ion pump was proposed [8], and the vacuum kinetic process of gas was also described. This paper also covers physical principles and modes of operation of vacuum pumps and vacuum meters, piping calculations, basics of gas composition measurement, leaks, and leak detection techniques [9–12]. The sputtered ion pump remains the unmatched pump for UHV, and research using Molflow+-based Monte Carlo particle test methods is performed to simulate UHV and synchrotron radiation calculations [13,14]. This paper also presents detailed designs and mechanical simulations of vacuum pump systems [15] to guide the design of this research. A number of research papers have proposed methods to improve optical quality in fields, such as physics and engineering, such as the measurement and analysis of high-resolution four-pole magnetic fields that focus on the electron beam [16]. In one study, the design and construction of an automatic control system for a 3-degree-of-freedom magnetic support for a synchrotron light generator, which aims to solve the problem of adjusting the magnet and electron transporter in the confinement ring to the correct level and position [17], was discussed. Another study described a linear electron acceleration system at an energy of 6 MeV that was developed to produce continuous and efficient X-rays, with the aim of maintaining stability in operation and tolerance to environmental changes by using a fuzzy algorithm and the Takagi–Sugeno inference method [18]. This research has proposed methods and approaches to improve the quality of synchrotron light, such as using a fuzzy algorithm in control systems. Fuzzy logic is a method of reasoning that allows for flexibility and complexity in problem-solving by using linguistic variables instead of numerical values. It is used in the area of fuzzy control, which formulates algorithms for control laws using logical rules [19]. This can be applied in a wide range of fields, such as control systems, artificial intelligence, and decision-making. Fuzzy logic, first introduced by Lotfi Zadeh in 1965, is widely used in embedded applications, particularly in small systems, robots, and machines [20]. It has various applications, such as fuzzy control, fuzzy signal processing, and fuzzy image processing [21]. Fuzzy logic is also widely used in PID control systems as a control algorithm and has been observed to perform better than traditional PID controllers in providing satisfactory control characteristics [22]. It can also be used in the process of liquid mixing in industries [23], as well as in creating a self-diagnostic system for a DC motor [24] and in optimizing a type-1 fuzzy controller for the Fault-Tolerant Control. Additionally [25], it can be applied in Negative Pressure Wound Therapy to improve the performance and safety of the treatment [26]. The goal of this research is to examine the application of fuzzy logic in controlling UHV conditions. Molflow+ is a Monte Carlo simulation software used to simulate pressure in particle accelerators [27]. It calculates theoretical pressure values using standard methods and can be used to design and analyze UHV systems [28]. The software can predict outgassing volume and pressure, estimate effective pumping speed [29], and determine the time needed to reach target pressure based on gas volume change. Molflow+ is mainly used for detailed 3D vacuum characterization in molecular flow systems [30]. Artificial neural networks (ANNs) have been widely applied in many fields for prediction purposes, including wind speed prediction, where the objective function is regression [31]. Feed-forward deep neural networks are also capable of achieving strong classification performance and have been shown to outperform shallow methods across diverse activity classes when optimized [32]. In the field of robot programming, the training results of neural network controllers have been presented, and the dynamic errors of different types of controllers have been analyzed [33]. Machine learn-

ing (ML), particularly deep learning techniques, have demonstrated efficacy in training, learning, analyzing, and modeling large complex structured and unstructured datasets [34]. However, when ML techniques are used for project duration prediction, the challenge is greater as each organization has a different dataset structure, features, and quality of data. To address this, a new dynamic ML tool based on an artificial neural network (ANN), which is automatically adapted and optimized to different types of prediction methods and different datasets, has been proposed [35]. The proposed decision-making system for leak detection is based on multiple generalized linear models and clustering techniques, which produces better recognition rates in comparison to a single model approach. Additionally [36], a physics-informed deep learning approach has been proposed for bearing fault detection, which consists of a simple threshold model and a deep convolutional neural network (CNN) model [37], which can reliably detect and classify four different bearing fault conditions [38]. All of these methods consider the design considerations, such as network architecture, performance, and implementation [39]. The objective of this article is to present a design for a UHV control system for a storage ring vacuum pipe using fuzzy control theory, and pumping speed estimation was estimated by Molflow+ in conjunction with ANN. The system aims to maintain a UHV level during electron beam movement. The results show that the UHV pressure can be controlled effectively. Additionally, using a method that estimates the pumping speed efficiency of the pump can aid in planning and making improvements, preventing damage, and ensuring efficient operation. The article is divided into five clear sections: Section 2: research methodology, experimental equipment, and system; Section 3: fuzzy control result and design for UHV, including the procedure for UHV pressure system and leak detection; Section 4: estimation of pump efficiency using a mathematical model generated from a neural network and Molflow+ software; and finally, Section 5: conclusions, where the findings are summarized.

2. Materials and Methods

2.1. Research Methodology

This research focuses readers on two main areas: controlling UHV pressure through fuzzy controller design and estimating the efficiency of pumping speed using an artificial neural network in conjunction with the Molflow+ program. The author will begin by describing the process of creating a vacuum pressure system [2,3], including procedures for leak detection in the experimental system. The design of the fuzzy controller will include the results of controlling pressure in the UHV system, which identifies the problem and determines the input and output variables that are involved. In this case, the input variable is the pressure reading from a sensor located at the center of the vacuum tube, and the output variables are the voltage supply to two independent ion vacuum pumps. For the input variables, triangle shape membership functions can be used. The output variables are defined by the singleton shape membership functions. We use the Mandani method to apply the membership functions. The center of the area can be used for the inference engine of the membership function output variables. Pressure data from the instrument at a steady state will be collected to simulate the outgassing rate of the experimental system with Molflow+ and then inputted into the learning process of the artificial neural network to create a model of the UHV system. The second part of this research will explain how this model is used to predict the pumping speed efficiency of the sputter-ion pump, as shown in Figure 3.

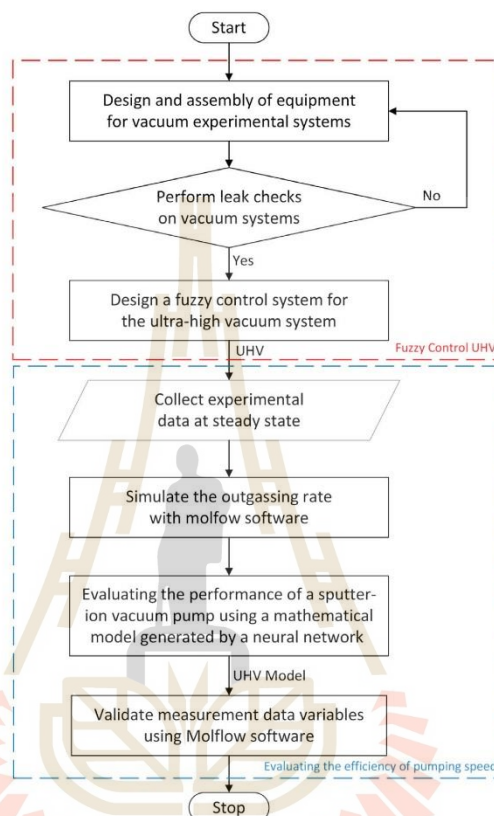


Figure 3. The Research Methodology.

A UHV pressure must be created in the pipeline using multiple vacuum pumps with different pressure ranges. A dry scroll pump, which has a spiral design and uses the twisting of the threads to create a pressure difference and move the air from the inside of the closed room to the outside atmosphere, can achieve a pressure of 10^{-2} Torr. A high molecular attractant pump can then be used to achieve a pressure of up to 10^{-8} Torr, and a sputter-ion pump, which captures gas molecules and sticks them in a confined area using a specific technique, can achieve a pressure of up to 10^{-12} Torr. Figure 4 illustrates the design of a standard pump. The system's equations are based on the assumption that the vacuum model conforms to Equations (1)–(5) [2–4]. The pressure P at an equilibrium state is expressed by Equation (1):

$$P = \frac{Q}{S}, \quad (1)$$

where Q is the net outgassing rate of the chamber under high vacuum. The net pumping speed of the pump varies with the pressure. The net outgassing rate of chamber Q also varies with the pressure.

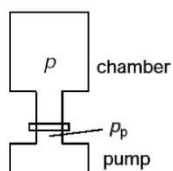


Figure 4. General Pump Structure. Reference Source; <http://www.most.go.th/main/th/109-knowledge/technology-integration/other-technologies/1366-vacuum-technology> (accessed on 1 October 2018).

The gas flow, including conductivity components within a vacuum (Conductance, C), and the pressure difference between vacuum volume joints can be represented by Equation (2):

$$Q = C(p - p_p) \quad (2)$$

Each flow in the vacuum pipeline is expressed by the continuity Equation (3):

$$Q = P_1 S_1 = P_2 S_2 \quad (3)$$

The relation between the pumping speed at the inlet of the pipeline (Chamber), at the outlet (S_{pump}), and the impedance (W) or conductance $C = 12 \frac{D^3}{L}$, diameter D (in cm), length L (in cm) of the pipeline has described the Equation (4):

$$S_{\text{chamber}} = \frac{1}{\frac{1}{S_{\text{pump}}} + W} = \frac{1}{\frac{1}{S_{\text{pump}}} + \frac{1}{C}} \quad (4)$$

The corresponding throughput Q (in torr. L/s), pressure P (in torr), pumping speed S (in L/s), and conductance C (L/s) are consequently given via Equation (5):

$$Q = C(P_{\text{chamber}} - P_{\text{pump}}) = S_{\text{pump}} P_{\text{pump}} = S_{\text{chamber}} P_{\text{chamber}} \quad (5)$$

2.2. Equipment

The vacuum experiment in this research was built using real-world materials supported by the Synchrotron Light Research Institute (Public Organization). The equipment includes a vacuum pressure system, a workpiece cleaning device, a control device, a leak detection device, and processing equipment. Further information regarding the numerical data is available in Figure 5 and Table 1, which provide detailed explanations of the experimental equipment.

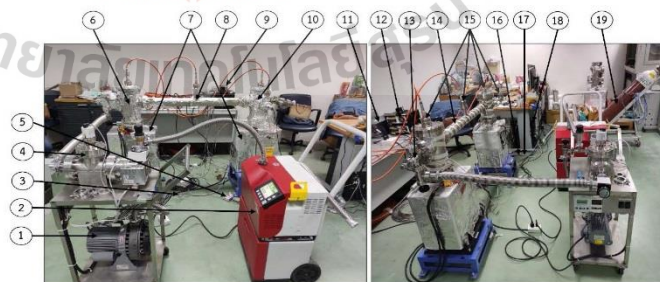


Figure 5. Ultra-high vacuum pressure system experimental equipment.

Table 1. Experimental equipment details.

No.	Name	Specification	Quantity
1	Scroll Vacuum Pump	- 0.4 kW, 50 Hz - 250 L/min (4.2 L/s), 1.2 ⁻² torr - 2.5 L/s helium pumping speed	1
2	Helium Leak Detector	- Minimum detectable leakage rate for helium 10 ⁻¹³ Pa m ³ /s	1
3	Thermocouple	- Type K	5
4	Turbo-Molecular Pump	- 1000 RPM, 0.4 A, 220 V	1
5	NI USB-TC01	- Type J, K, R, S, T, N, E and B thermocouple	5
6	Vacuum Chamber 1	- D = 146 mm, H = 310 mm	1
7	Sputter-Ion Pump	- Star cell, 500 L/s, typically 3–7 kV - pressures as low as 10 ⁻¹¹ mbar	2
8	Vacuum Pipe	- L = 1000 mm, D = 65 mm	1
9	Pfeiffer Vacuum TPG 300 Pressure Gauge	- Measures Pressure from Atmospheric Range, down to 10 ⁻¹¹ mbar - Pirani gauges/ Cold cathode gauges	2
10	Vacuum Chamber 2	- D = 146 mm, H = 285 mm	1
11	Sputter-Ion Pump Controller	- 2 Channels - Output 3000 V–7000 V	1
12	Baking Controller	- Max 10 A, 220 V - 304 stainless steel	2
13	All Metal Angle Valves	- Leak rate < 5–10 mbar.L/s - Temperature operating range from 450° C to –250° C	4
14	Heater	- V = 240 V, p = 170 W, L = 1.5 m - Bakeout temp ≤ 250 °C	5
15	Ionization Gauge	- Measuring range 5 × 10 ⁻³ to 1 × 10 ⁻¹¹ mbar	4
16	MOXA	- UPort 1110 V1.4.1, 5 VDC	3
17	RS-232		3
18	Computer	- Intel® Core™ i9-9900 CPU @3.1 GHz - RAM 32 GB, 64 bit	1
19	Helium Gas		1

2.3. Experimental System

The vacuum experimental system was designed to study UHV pressure and vacuum pressure control. It is divided into two systems: System 1, a vacuum chamber equipped with a sputter-ion pump with a pumping speed of 500 L/s and a pressure gauge installed in the position shown in Figure 6; and System 2, which consists of two vacuum chambers connected by a tube with a diameter of 65 mm and a length of 1000 mm. Both of these chambers are equipped with a sputter-ion pump with a pumping speed of 500 L/s and pressure gauges installed in 4 positions, as shown in Figure 7.

Figure 7 illustrates an experimental setup for a system consisting of two interconnected vacuum chambers. The chambers are connected by a 65 mm diameter tube that is 1000 mm in length. Sensor B is located at the center of the tube and measures the vacuum pressure at the highest point in the system. The first chamber has a diameter of 146 mm and a height of 310 mm, and sensor A is placed on the lid to measure the maximum pressure in that chamber. The second chamber has a diameter of 146 mm and a height of 285 mm; sensor C is located on top of its lid, measuring the maximum pressure in this chamber. Both chambers are equipped with sputter-ion pumps that have a pumping speed of 500 L/s and are located underneath each chamber. Additionally, sensor D is placed in the second chamber at the location indicated. The experimental system is exposed to a UHV pressure process, and the leakage rate of the system is monitored. Then, the system is sealed and ready to test the vacuum pressure control system and evaluate the performance of the sputter-ion pumps.

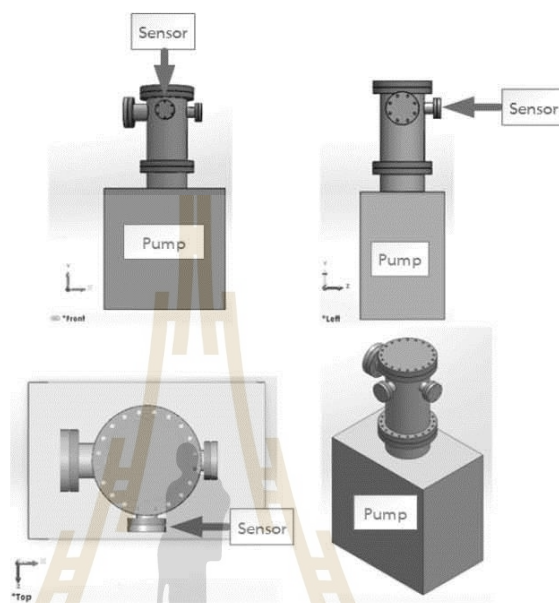


Figure 6. Illustrates the vacuum chamber for experimental system 1.

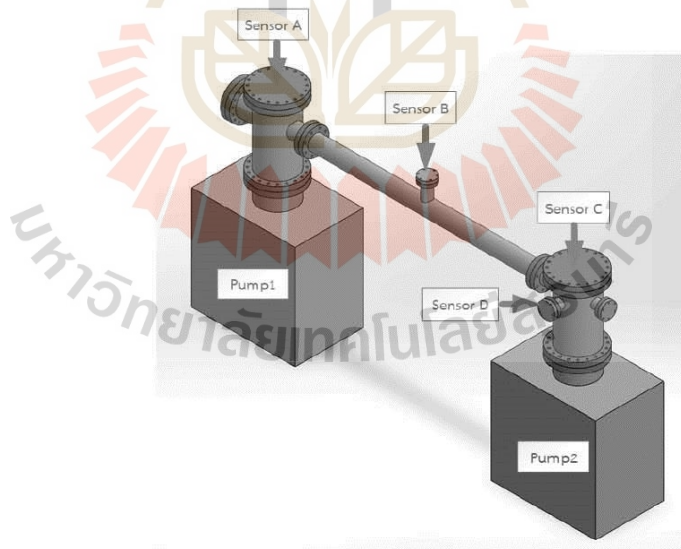


Figure 7. Illustrates the vacuum chamber for experimental system 2.

3. Ultra-High Vacuum by Fuzzy Control

Ultra-high vacuum (UHV) refers to a vacuum with a pressure level below 10^{-9} Torr. Fuzzy control is a method of controlling systems using fuzzy logic, which is a mathematical tool for representing and manipulating uncertain or imprecise information. In a fuzzy control system, the inputs and outputs are mapped to fuzzy sets, and a set of fuzzy rules are used to determine the control actions. Using fuzzy control for UHV systems allows for the system to adapt to changing conditions and make decisions based on imprecise or uncertain information. This can improve the stability and efficiency of the system and also increase its robustness against disturbances and uncertainties. This section discusses the process of designing and constructing the UHV systems. It covers implementing leak detection and a fuzzy controller design for UHV, including the results of the fuzzy pressure control.

3.1. Procedure for Ultra-High Vacuum Pressure System

Figure 8 illustrates the process for creating a UHV pressure system for this research. The process begins by cleaning the workpiece (vacuum chamber) with ethanol to prepare it for the UHV pressure process. To achieve UHV pressure, the pressure must be gradually increased from atmospheric pressure to a value of 10^{-1} to 10^{-2} Torr using dry scroll vacuum pumps and then to a pressure of 10^{-2} to 10^{-7} Torr using a turbo pump and a molecular pump. The workpiece is then outgassed at a temperature of about 120 degrees Celsius for at least 3 days. Before and after heating, a leak test is performed on the workpiece by spraying helium gas outside the workpiece at suspected leakage points, such as along flange joints in vacuum chamber connections and pipes. The CF (Con Flat) flange uses a copper gasket with high thermal conductivity and metal circumferential prongs. The soft properties of the copper gasket allow for a very tight seal between the two metal flanges by distorting the gasket. CF flanges can operate at a pressure of about 10^{-13} Torr. If a leak is detected, helium gas will seep through the leak and into the workpiece, where it will be detected by the helium leak detector. If no leak is found, the process continues by using a sputter-ion pump until the vacuum pressure reaches a level of 10^{-8} Torr and can no longer be increased. The valve between the vacuum chamber, the dry scroll pump, and the high molecular attractant pump operating system is then closed, allowing the system to be evacuated using only a sputter-ion pump. Later, we designed a fuzzy controller to command the sputter-ion pump controller to maintain the vacuum pressure through a LabVIEW program connected to a computer via RS-232 and a MOXA module. The definition of each pressure range is described in Table 2.

Table 2. Shows the Range of Vacuum Pressure [40].

Range of Vacuum Pressure	Minimum Pressure (Torr)	Maximum Pressure (Torr)
Low Vacuum (LV)	2.5×10	7.5×10^2
Medium Vacuum (MV)	7.5×10^{-4}	2.5×10
High Vacuum (HV)	7.5×10^{-7}	7.5×10^{-4}
Very High Vacuum (VHV)	7.5×10^{-10}	7.5×10^{-7}
Ultra-High Vacuum (UHV)	7.5×10^{-13}	7.5×10^{-10}
Extreme-High Vacuum (XHV)		$\leq 7.5 \times 10^{-13}$

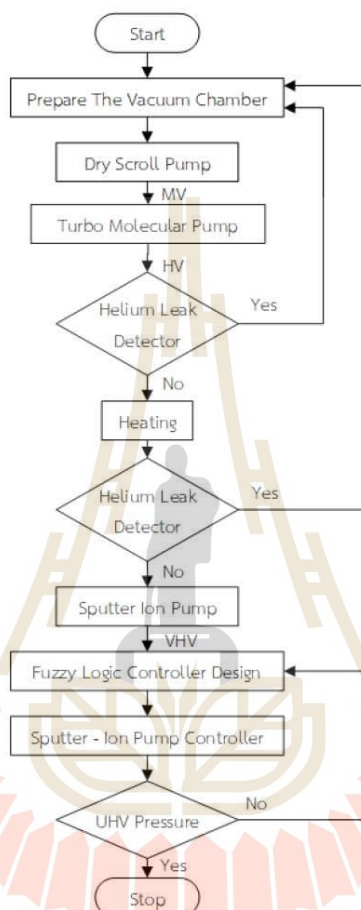


Figure 8. Ultra-high vacuum pressure process.

3.2. Procedure for Checking for Leaks in the Vacuum System

Vacuum leak testing is an essential step in the vacuum-making process. The process involves achieving a system vacuum of 10^{-6} Torr using dry scroll vacuum pumps in combination with a Turbo Molecular pump and then bringing in helium gas to spray outside the workpiece at suspected leak points. If a leak is detected, the helium gas will seep through the leak and into the workpiece, where it will be detected by the helium leak detector [11]. The leak inspection is performed from top to bottom as the helium gas rises to higher altitudes (as shown in Figure 9). After the inspection, if no leakage points are found, a sputter-ion pump is used to maintain the vacuum pressure at 10^{-8} Torr. In this method, a known amount of helium gas is introduced into the system, and the presence of helium is used to identify any leaks that may be present. Finally, leak testing is important to ensure the integrity and performance of UHV systems.



Figure 9. Checking for leaks in the vacuum system.

3.3. Sputter-Ion Pump

The working of a sputter-ion pump is based on the supply voltage provided to it. The supply voltage ranges from 3000, 5000, and 7000 volts and is related to the vacuum pressure value, as shown in Figure 10. The graph shows that the start of the sputter-ion pump starts from the low vacuum pressure value on the right side of the sputter-ion pump. A supply voltage of 7000 volts provides maximum pump efficiency, while a supply voltage of 5000 volts provides optimal pumping efficiency when the vacuum pressure is increased to a pressure of 1×10^{-7} mbar. When the system has a vacuum pressure of 5×10^{-9} mbar, the supply voltage for the sputter-ion pump at 3000 volts provides optimal pumping efficiency. This can be explained in Table 3.

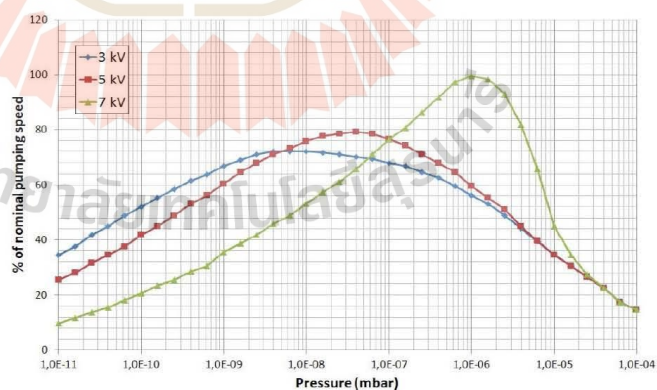


Figure 10. Shows the relationship between the % of nominal pumping speed and the pressure values of 3000, 5000, and 7000 Volt at different vacuum pressures of the Controller of Ion Pump. Reference Source; ION Pumps for UHV Systems; Synchrotrons and Particle Accelerators.

Table 3. The pumping speed relationship equation at 3000 V, 5000 V, and 7000 V supply voltages.

V	Equation (Mbar)	R ²	Pumping Speed		Pchamber	
			(%)	L/s	P (Mbar)	P (Torr)
3000	$y = 5.525\ln(x) + 179.91$	0.9733	48–72	240–360	6×10^{-11} – 5×10^{-9}	4.5×10^{-11} – 3.75×10^{-9}
5000	$y = 4 \times 10^{22}x^3 - 9 \times 10^{15}x^2 + 5 \times 10^8x + 71.053$	0.9044	72–76	360–380	5×10^{-9} – 1×10^{-7}	3.75×10^{-9} – 7.5×10^{-8}
7000	$y = 10.52\ln(x) + 246.07$	0.9816	76–99	380–495	1×10^{-7} – 1×10^{-6}	7.5×10^{-8} – 7.5×10^{-7}

In this research, an ion pump of 500 L/s was selected. The goal of this research is to develop the ability to adjust the voltage supplied to the sputter-ion pump to be more precise. The voltage will be supplied at 3000, 4000, 5000, 6000, and 7000 volts to optimize the pumping speed of the pump at each vacuum pressure range, where the 4000 and 6000 volts are comparable estimates from the pump specification, as shown in Table 4.

Table 4. The relationship equation between pumping speed at 3000, 4000, 5000, 6000, and 7000 volts to the vacuum pressure.

V	Equation (Mbar)	R ²	Pumping Speed (%)	Controller	
				P (Mbar)	P (Torr)
3000	$y = 4.3486\ln(x) + 156.73$	0.9732	64–72	6.2×10^{-10} – 5×10^{-9}	4.65×10^{-10} – 3.75×10^{-9}
4000	$y = 8 \times 10^8x + 68.048$	0.9973	72–76	5×10^{-9} – 1×10^{-8}	3.75×10^{-9} – 7.5×10^{-9}
5000	$y = 2.1615\ln(x) + 115.97$	0.9709	76–79	1×10^{-8} – 4×10^{-8}	7.5×10^{-9} – 3×10^{-8}
6000	$y = 4.5108\ln(x) + 155.92$	0.9784	79–83.5	4×10^{-8} – 2×10^{-7}	3×10^{-8} – 1.5×10^{-7}
7000	$y = 10.52\ln(x) + 246.07$	0.9816	83.5–99	2×10^{-7} – 1×10^{-6}	1.5×10^{-7} – 7.5×10^{-7}

The relationship between the vacuum pressure value and the pumping speed efficiency of the sputter-ion pump generated in Table 4 shows the voltage supply range that achieves the pumping speed efficiency of the pump suitable for each vacuum pressure value range. The low vacuum pressure range, such as 1.5×10^{-7} – 7.5×10^{-7} Torr, is suitable for supplying voltage at 7000 volts, which will get the pumping speed of the pump at 83.5–99 percent of the pump performance of 500 L/s. This research aims to establish a fuzzy law for controlling the action mechanism or the change of supply voltage of the ion pump based on the relations in Table 4.

3.4. Fuzzy Design

Fuzzy logic is a method of reasoning that resembles human reasoning. The most basic concept in fuzzy logic is the fuzzy set. A fuzzy set is a set that has a degree of membership between 0 and 1 rather than the traditional binary (true/false) membership of a standard set. This degree of membership indicates the extent to which an element belongs to the set. It is particularly useful in situations where precise mathematical models are unavailable or impractical and can be used to make decisions and control processes.

The application of fuzzy logic control in UHV systems is used to maintain a desired vacuum pressure of less than 3.75×10^{-9} torr. The control system employs a Single-Input-Multiple-Output (SIMO) fuzzy controller, where the input is the pressure reading from a sensor located at the center of the vacuum tube, and the outputs control the voltage supply to two independent ion vacuum pumps. The fuzzy input variable is the pressure reading from sensor B, and the member function consists of a fuzzy set of five language variables {N, SN, Z, SP, P}. The output variables are the voltages fed to the first and second ion vacuum pumps, consisting of language variables {L, SL, M, SH, H} and {L2, SL2, M2, SH2, H2}, respectively, as defined in Table 5.

Table 5. Fuzzy control design to maintain vacuum pressure.

No.	Pressure Input (Torr)	Input Variable	Output Variable 1	Output Variable 2	Percent Variable	Voltage Supply 1	Voltage Supply 2
1	$\leq 3.75 \times 10^{-9}$	N	L	L2	0	3000	3000
2	$3.751 \times 10^{-9} - 7.5 \times 10^{-9}$	SN	SL	SL2	25	4000	4000
3	$7.51 \times 10^{-9} - 3 \times 10^{-8}$	Z	M	M2	50	5000	5000
4	$3.01 \times 10^{-8} - 1.506 \times 10^{-7}$	SP	SH	SH2	75	6000	6000
5	$\geq 1.507 \times 10^{-7}$	P	H	H2	100	7000	7000

The input and output parameters of the Fuzzy Rules in Table 5 can be generated and applied using a LabVIEW program connected to a 4UHV ion pump controller for a voltage regulator that powers an ion vacuum pump via an RS232 cable and a MOXA module. This allows the system to be operated in real time by a computer. Figure 11 demonstrates the input and output variable assignments of fuzzy rules for fuzzification using LabVIEW software (LabVIEW 2016, License No. M76X33883, Synchrotron Light Research Institute, Thailand), and Figure 12 shows the calculation of fuzzy inference using a fuzzy rule whose principle is “if input, then output” in the diagnostic process, which is analyzed and processed according to specified conditions with the LabVIEW software. These rules are used to map input variables to output variables by using fuzzy membership functions. These functions are used to assign a degree of membership to each input value, which is then used to generate the output value.

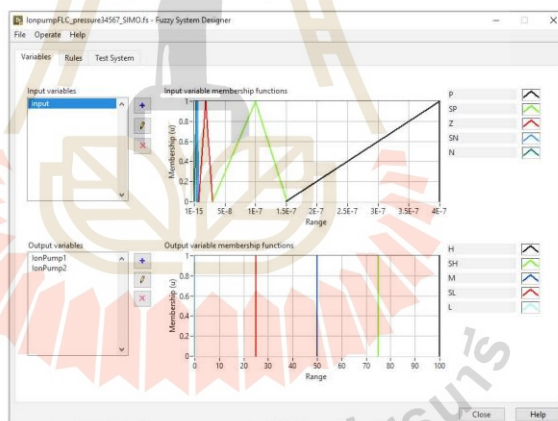


Figure 11. Configure inputs and outputs of the fuzzy rule.

Figure 13 shows the simulation of the generated fuzzy rule. The defuzzification converts the language obtained in the form of fuzzy inference into a single true output value from a five-member fuzzy set {0, 25, 50, 75, 100} percent instead of supplying pressure at {3000, 4000, 5000, 6000, 7000} volts, respectively, by Figure 13a,b when the input pressures are 9×10^{-14} Torr and 3.75×10^{-9} Torr, respectively. That is to say that when the input pressure value is less than or equal to 3.75×10^{-9} Torr, with the input linguistic value N, it will enter the first rule to get the output of the first pump, and the second has a linguistic variable value of L and L2, respectively, representing 0 percent output where the supply voltage is 3000 Volt.

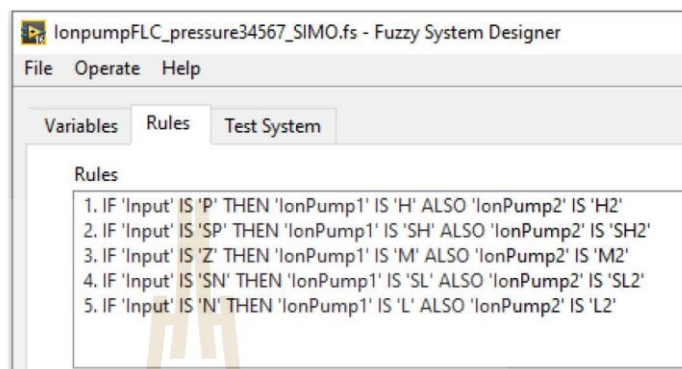


Figure 12. Fuzzy rules to control pressure values via LabVIEW software.

While Figure 13c,d shows the input pressure is 3.76×10^{-9} Torr and 7.5×10^{-9} Torr, respectively, which enters the second rule, with the linguistic variable of the input SN, the output of the first pump and the second pump with the linguistic variable is SL and SL2, respectively, representing 25 percent of the output where the supply voltage is 4000 Volt. Similarly, Figure 13e,f shows the input pressure values of 7.51×10^{-9} Torr and 3×10^{-8} Torr, respectively, which enter Rule 3, with the linguistic variable of the input Z, the output of the first pump and the second pump with the linguistic variable of M and M2, respectively, representing 50 percent of the output. The input pressure is 3.01×10^{-8} Torr and 1.506×10^{-7} Torr, respectively. Rule 4 with the linguistic variable of the input SP, the output of the first pump, and the second pump with the linguistic variable of SH, SH2, respectively, representing 75 percent output, as shown in Figure 13g,h, where the voltage is supplied at 6000 Volt, and Figure 13i,j shows the input pressure values of 1.507×10^{-7} Torr and 5×10^{-5} Torr, respectively, which enters the law of 5 with the input linguistic variable P; the output of pump 1 and 2 is linguistic variable H, H2 respectively, representing 100 percent output, which will supply voltage at level 7000 Volt.

Fuzzy Pressure Control Improves Test System Performance

Table 5 establishes fuzzy rules that were tested on System 1, which is a vacuum chamber connected to a vacuum pump. Figure 14 illustrates the hardware used for testing and demonstrates how the fuzzy rule controls the voltage power supply to maintain pressure in the vacuum chamber. Figure 15 shows the supply voltage to the sputter-ion vacuum pump with 3000, 4000, 5000, 6000, and 7000 volts, respectively, (left y-axis) in relation to the vacuum chamber pressure at the location where the pressure value is to be controlled. It is clearly divided by the fuzzy rule range with a dotted line (right y-axis). It can be seen that the pressure change follows the properly designed fuzzy rule. That is when the vacuum chamber pressure is lower than 3.75×10^{-9} Torr, the pump supply voltage is 3000 volts, and 4000 volts is supplied if the vacuum chamber pressure is 3.75×10^{-9} Torr and is in the range of 3.751×10^{-9} – 7.5×10^{-9} Torr. When the vacuum chamber pressure increases in the range of 7.51×10^{-9} – 3×10^{-8} Torr, the pump supply voltage is 5000 volts. When the vacuum chamber pressure increases in the range of 3.01×10^{-8} – 1.506×10^{-7} Torr, the pump supply voltage is 6000 volts. If the pressure is greater, the pump supply voltage is 7000 volts.

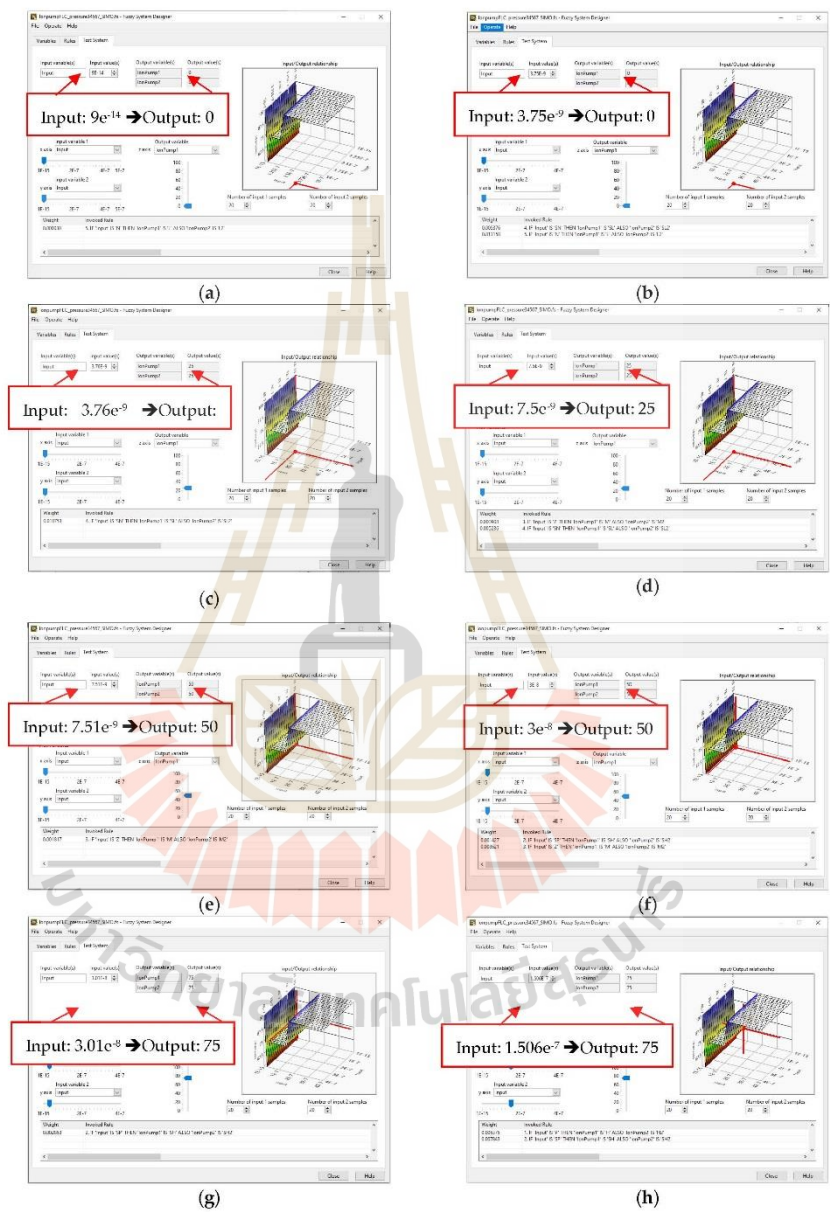


Figure 13. Cont.

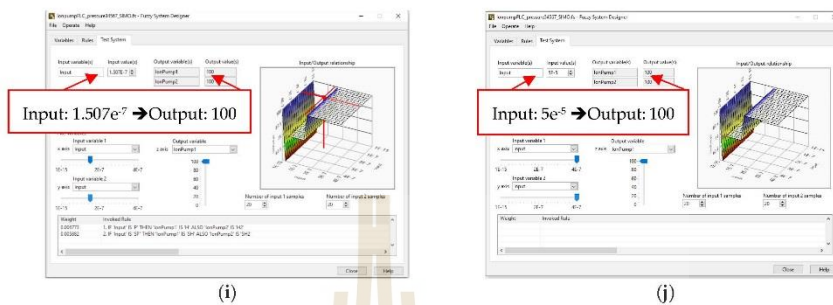


Figure 13. The simulation of the generated fuzzy rule. (a) minimum rule 1; (b) maximum rule 1; (c) minimum rule 2; (d) maximum rule 2; (e) minimum rule 3; (f) maximum rule 3; (g) minimum rule 4; (h) maximum rule 4; (i) minimum rule 5; and (j) maximum rule 5.



Figure 14. Hardware installed for system 1.

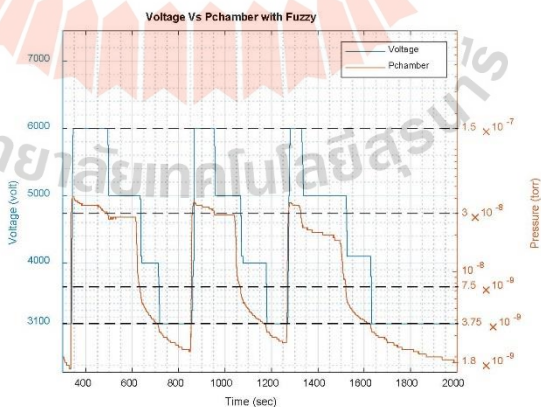


Figure 15. Show how fuzzy rules work for system 1.

When the pressure control characteristics of the vacuum chamber 1 system are known, they can be applied to a two-chamber system using the same fuzzy rules established in Table 5. The behavior is that the vacuum pressure value at the middle position of the pipe connecting the vacuum chambers is used as the pressure value for the control. This is because the pressure value at this position is the highest in the system. If the pressure value at this position is in control, the pressure value at any other location will be within the range of the UHV pressure value. The regulating pressure is achieved when the two sputter-ion vacuum pumps operate according to the established fuzzy rules. The equipment used to test this system is shown in Figure 16. The control results can be seen in Figure 17 and expanded for clarity in Figure 18. These figures demonstrate that the vacuum pressure at the center of the pipe, which is the position of the maximum pressure, can be controlled to be below 3.75×10^{-9} torr.

The real test results revealed the efficacy of fuzzy pressure control in optimizing the performance of the system. Fuzzy logic is used to regulate the supply voltage of the sputter-ion pump to achieve different pumping speeds at the same pressure for various voltage levels. This allows for better control over the pumping process and ensures that the optimal pumping speed is maintained for the given pressure conditions. Fuzzy logic can be useful for controlling various processes in UHV systems. In UHV systems, it is important to maintain a very low-pressure environment to prevent contamination or interference with the experiment or process being performed. Fuzzy logic can be used to control the parameters that affect the pressure inside the UHV system, such as the flow rates of gases, the temperature of the system, or the speed of vacuum pumps. By adjusting these parameters using fuzzy logic, it is possible to achieve the desired pressure conditions while minimizing energy consumption and maintaining stability. In a system that does not have fuzzy logic, controlling the various parameters and components of a UHV system can be more challenging. Without a fuzzy logic controller, the system may rely on conventional control methods, such as PID (proportional-integral-derivative) control or on-off control. Conventional control methods can be effective in maintaining a set point for a given parameter, such as pressure or temperature, but they may not be able to handle the complexity of UHV systems, which often involve multiple parameters and interactions between components. For example, in a UHV system with multiple vacuum pumps, conventional control methods may not be able to optimize the pumping speed of each pump to achieve the desired pressure conditions. This can lead to inefficient operation, longer process times, or decreased product quality. In addition, conventional control methods may not be able to adapt to changing conditions or non-linear behavior in the system. This can even cause instability in the system. Overall, the use of fuzzy logic in UHV systems provides a more flexible and adaptive approach to control, allowing the system to respond to changing conditions and optimize performance in real time. Fuzzy logic can also handle complex systems with multiple parameters and components, making it a more effective control method for UHV systems. From the above experiments, the vacuum pressure at the location where the measuring instrument is installed is known, as well as the voltage supplied to the sputter-ion vacuum pump. However, the outgassing rate of the system is unknown, and more importantly, the efficiency of the pump in pumping is unknown. This is because the pump has a long service life, and through heavy use, there may be some factors that reduce the pumping efficiency, resulting in a decrease in pumping speed. Therefore, this research has studied the behavior of the vacuum pressure profile in the experimental system using the Molflow+ software application, starting with the experimental system 1 vacuum chamber. This will allow for a better understanding of the characteristics and behavior of the vacuum pressure, which will be discussed in the next section.

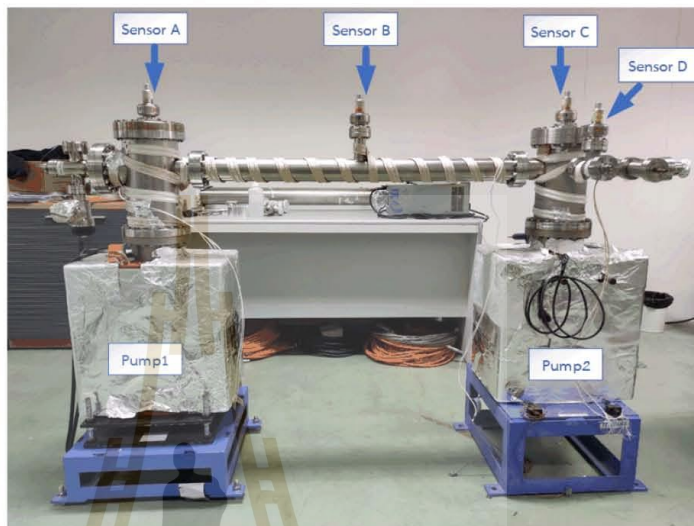


Figure 16. The equipment used to test this system 2.

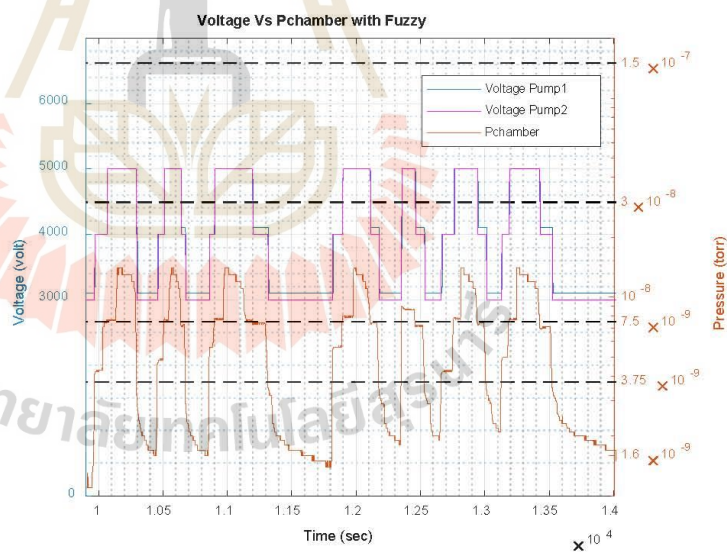


Figure 17. The control results for system 2.

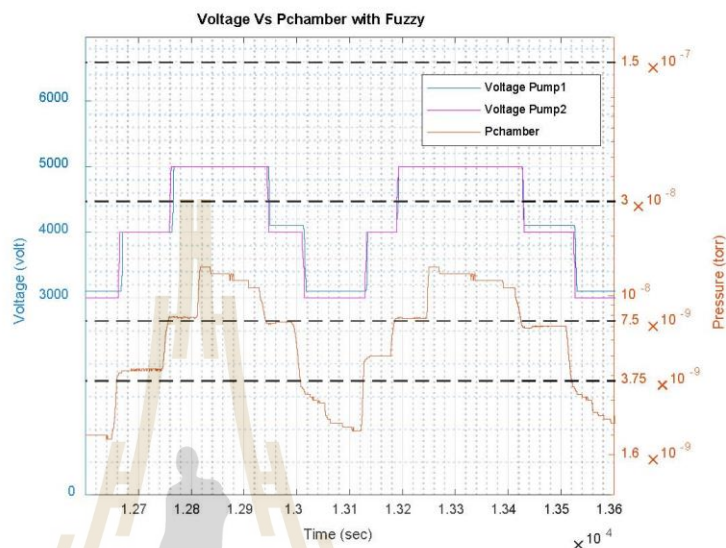


Figure 18. The control results expanded for clarity of the system 2.

4. Pumping Speed Efficiency Estimation

The pumping speed efficiency is an indicator for assessing the capacity of a vacuum pressure system. If the pump has poor performance, it will negatively impact the results of the vacuum chamber pressure. Therefore, understanding the performance of the pump is essential for planning to achieve the desired pressure. In this section, we will apply the use of Molflow+ and artificial neural network (ANN) to predict pump speed efficiency.

4.1. MolFlow+

Molflow+ is free software copyrighted by CERN and E.S.R.F., and it is a Windows program that calculates the steady-state pressure in complex geometries under UHV conditions. The simulation process typically involves four steps: importing the geometry; setting simulation parameters, such as temperature and reflective properties; defining outgassing and pump locations; and viewing pressure profiles [41]. It is gaining attention from the scientific community for its ability to perform detailed 3D calculations of vacuum in the molecular flow regime. The software is discussed in relation to vacuum calculation methods, and examples of its application in the design and analysis of vacuum systems at CERN and elsewhere are presented [42]. The steady-state and time-dependent algorithms behind the program are also discussed, along with strategies for addressing common issues that arise when simulating large systems. The results are compared to the theory and validated through experiments.

In this study, the Molflow+ software was utilized to analyze the behavior of vacuum pressure in an experimental system. The process involved determining the outgassing rate by setting a pumping speed of 288 l/s and measuring pressure values in millibars. The results were then compared with pump efficiency at different percentages of outgassing rate, as shown in Table 6.

Table 6. Pumping performance at a speed of 288 L/s for a vacuum chamber experimental system 1.

%Outgassing Rate	Q (mbar. L/s)	Pc (mbar)	Pi (mbar)
-15%	2.975×10^{-11}	2.55×10^{-10}	1.97×10^{-10}
-10%	3.15×10^{-11}	2.70×10^{-10}	2.09×10^{-10}
-5%	3.325×10^{-11}	2.86×10^{-10}	2.21×10^{-10}
normal	3.5×10^{-11}	3×10^{-10}	2.32×10^{-10}
5%	3.675×10^{-11}	3.15×10^{-10}	2.44×10^{-10}
10%	3.85×10^{-11}	3.31×10^{-10}	2.56×10^{-10}
15%	4.025×10^{-11}	3.45×10^{-10}	2.67×10^{-10}

The results from Table 6 indicate that when the pumping speed is held constant, an increase in the outgassing rate leads to higher pressure in the vacuum pump (Pi) and the measuring device (Pc) attached to it. This aligns with the theory that the outgassing rate is the rate at which gas is removed from the system, thereby reducing the pressure. Factors, such as the permeability of the material surface, also play a role in this process. The more gas particles are removed, the higher the pressure will be. On the other hand, when the pumping speed is constant, a decrease in the outgassing rate leads to a lower pressure in the system, creating a higher vacuum at both the vacuum pump and the measuring instrument's positions.

Molflow+ software is utilized to visualize the behavior of vacuum pressure in an experimental system. The software displays the vacuum pressure values along individual color axes generated within the system, with the distance being represented as 0–100% of the axis of each plane. The simulation results of pressure values are separated into two experimental systems: vacuum chamber system 1; and the system connected between vacuum chamber 1 and vacuum chamber 2 by pipes. These systems have an inner diameter of 60.3 mm and a length of 1000 mm.

The vacuum chamber 1 has a diameter of 152.4 mm and a height of 285 mm, with a total volume, including the flange, of $4,498,615.15 \text{ mm}^3$. The red axial pressure value is measured from the position of the sputter-ion vacuum pump to the cover of the top flange, with a length equal to the height of 285 mm. The green axis, from the CF 70 flange position to the edge of the vacuum chamber, is 194 mm long. The blue axis, from the flange position CF 70 to CF 114, is 273 mm long. These values are shown in Figure 19, and the vacuum pressure values at each position of each axis are shown in Table 7.

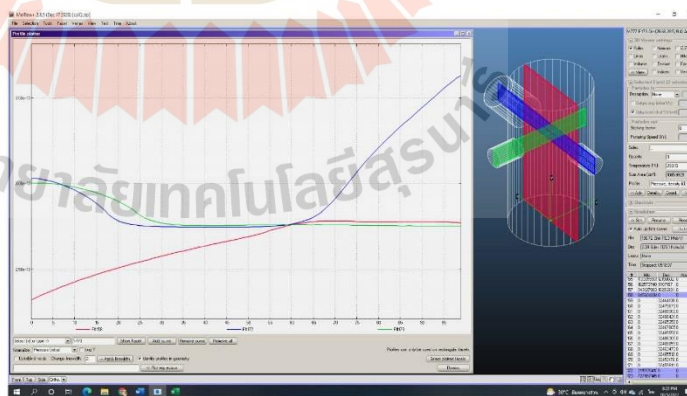


Figure 19. The axial pressure in vacuum chamber 1 with the Molflow+ software.

Table 7. The vacuum pressure in the vacuum chamber 1 from Molflow+ software.

%x	Red Line Axial Pressure		Green Line Axial Pressure		Blue Line Axial Pressure	
	x (mm)	P (10 ⁻¹⁰ Mbar)	x (mm)	P (10 ⁻¹⁰ Mbar)	x (mm)	P (10 ⁻¹⁰ Mbar)
0	0	2.32	0.00	3	0.00	3.03
0.05	14.25	2.38	9.70	3	13.65	3.01
0.10	28.50	2.43	19.40	2.98	27.30	2.96
0.15	42.75	2.47	29.10	2.95	40.95	2.89
0.20	57.00	2.51	38.80	2.9	54.60	2.79
0.25	71.25	2.55	48.50	2.82	68.25	2.76
0.30	85.50	2.58	58.20	2.77	81.90	2.75
0.35	99.75	2.61	67.90	2.76	95.55	2.75
0.40	114.00	2.64	77.60	2.76	109.20	2.75
0.45	128.25	2.67	87.30	2.76	122.85	2.75
0.50	142.50	2.69	97.00	2.76	136.50	2.75
0.55	156.75	2.73	106.70	2.76	150.15	2.75
0.60	171.00	2.76	116.40	2.76	163.80	2.77
0.65	185.25	2.78	126.10	2.76	177.45	2.81
0.70	199.50	2.78	135.80	2.76	191.10	2.91
0.75	213.75	2.78	145.50	2.76	204.75	3.07
0.80	228.00	2.78	155.20	2.76	218.40	3.21
0.85	242.25	2.78	164.90	2.76	232.05	3.33
0.90	256.50	2.78	174.60	2.76	245.70	3.45
0.95	270.75	2.78	184.30	2.76	259.35	3.56
1.00	285.00	2.78	194.00	2.76	273.00	3.63

According to Table 7, the red line represents the height of the chamber, the green line represents the diameter distance, and the blue line represents another diameter distance. The intersection of the three colored lines represents a vacuum pressure of 2.76×10^{-10} mbar at the position indicated in the red frame. The data from the simulation, which uses values measured by sensors in the $x = 0$ mm position of the green and red lines from the experiment, serves as reference values to simulate the outgassing rate over the entire surface of the gas vacuum chamber 1. This outgassing rate was found to be 3.5×10^{-11} mbar.L/s when the pumping rate was set to 288 L/s. This value aligns with the equation that displays the relationship between vacuum pressure values at 3000 V, as shown in Table 3.

In this research, an experimental vacuum system was constructed, consisting of two vacuum chambers (1 and 2) connected by a tube. The dimensions of chamber 2 are 152.4 mm in diameter, 310 mm in height, and a total flange volume of 5,248,639.03 mm³. The tube connecting the chambers has an outer diameter of 65 mm, an inner diameter of 60.3 mm, and a length of 1000 mm (as shown in Figure 20). The vacuum pressure values in each axis show the relationship between the values measured from the position of the instrument. Measurements A, B, C, and D are represented by the blue, green, red, and black lines, respectively. The pumping speed of each pump was determined by substituting the pressure pumped by the pump into the pressure source equation (shown in Table 2). This allowed for the determination of the outgassing rate of each system. By comparing the simulation data with the measurement data from the combined vacuum pressure instrument, it was determined that the starting point in the blue and red axis is the location of the pump, which has the best vacuum pressure value. The pressure continues to increase axially to the upper cover of vacuum chambers 1 and 2. The black line axis shows the pressure at the location where sensor D is installed, while the green line axis shows the pressure along the length of the pipe connecting the two vacuum chambers. The center of the pipe at sensor B has the highest pressure in the system, at which point the researchers used to control the pressure to a UHV to confirm pressure values in other locations. This ensured that there was also a UHV pressure value.

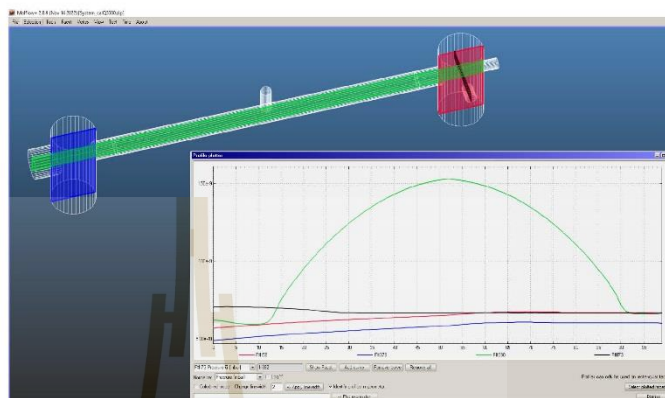


Figure 20. The profile pressure in vacuum system with the Molflow+ software.

The next step is to apply the information obtained from the vacuum pressure simulation in the Molflow+ program using an artificial neural network to find the model of the vacuum system that has been created. The process begins by using fuzzy control to adjust the voltage supply to the sputter-ion pump in order to optimize the pumping speed within a specific pressure range. Data on pressure at various locations is collected using a measuring device, and the pumping speed is calculated from the actual measured pressure. The situation is then simulated using the Molflow+ program to obtain data on the outgassing rate of the system. The process is iterated until a sufficient data set is obtained for learning through the neural network to model the vacuum experimental system. This step will also allow for the determination of the pumping speed efficiency of the pump, which will be discussed in the next section.

4.2. Artificial Neural Network (ANN)

Machine learning is a powerful technique that is used to solve several problems in the engineering field. Computational technology is rapidly growing in both hardware and software architectures which allows machine learning to be applied to complicated works. An artificial neural network is an efficient algorithm of machine learning that is utilized for outgassing prediction in the UHV pressure control system. Supervise learning neural network based on a multivariable regression approach was utilized to tackle prediction model training. Moreover, this research has been focusing on the effect of various network structures that need to be optimized to achieve the desired performance of the prediction model. To develop the purpose neural network model, it would be addressed at each step, as shown in Figure 21.

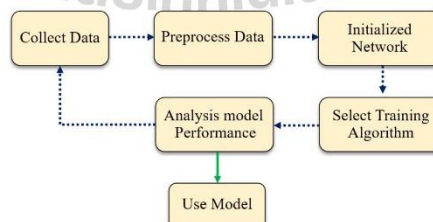


Figure 21. Neural Network Training Process Flow.

4.2.1. Data Collection and Preprocessing

To investigate outgassing and pumping speed prediction, the training data set was collected based on simulation software. The process to generate the training data set was performed by using the data from a Molflow+ simulation to train a neural network that predicts the pumping speed of ion pumps and outgassing rates in different parts of a system. The system is divided into three sections: the first vacuum chamber (Qa); the conduit between two vacuum chambers (Qb); and the second vacuum chamber (Qc). The neural network is trained using data collected at steady-state intervals to test for changes in pumping speed and outgassing rates and verified by the Molflow+ program. The inputs used for the prediction are pressure values from different parts of the measuring instrument in the experimental system (Pa, Pb, Pc, Pd, Ppump1, and Ppump2), and the outputs are the pumping speed (Spump 1, Spump 2) and outgassing rates (Qa, Qb, and Qc). Data preprocesses. All cases have been arranged into a matrix of input and output which overall have 90 samples. To evaluate model performance during the network learning process, it needs to divide the data into three sections for training, validation, and testing, accounting for 70%, 15%, and 15%, respectively. To handle the complicated relation of input and output data, the model would be separated into the independent model for outgassing and pumping speed prediction, as shown in Figure 22.

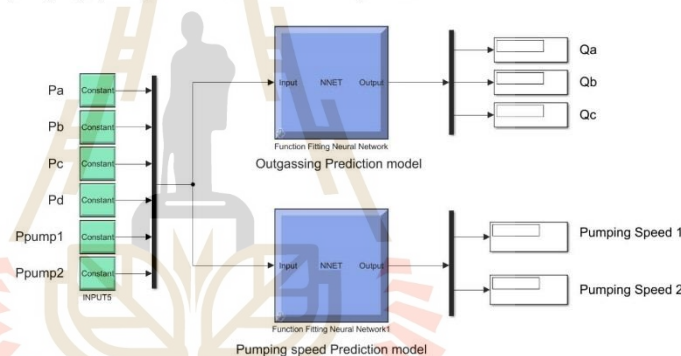


Figure 22. Independent model for Outgassing and pumping speed prediction.

4.2.2. Select Architecture and Training the Network

The development of the neural network could be addressed in varying implementations, which can consider three major categories, including classification, prediction, and regression model. In this work, we provided the multilayer network architecture that was performed in a regression task used to approximate a function of input corresponding to the continuous output from the model. In general, there are various factors to take into consideration for a good network depending on the complex relation of data and area of application. One of the most common techniques that are possible to examine network performance is changing of hidden layer size and neural number in each layer. Moreover, the learning algorithms are the crucial points that need to be regarded to optimize the weight and bias of the network. The Scale Conjugate Gradient (Trainscg) is a potential algorithm for regression that corporate to the Linear Transfer function (purelin) in each neural node of the model. The configuration of the network on the MATLAB program (MATLAB 2020b License No. 199467, Suranaree University of Technology) was displayed in Figure 23.

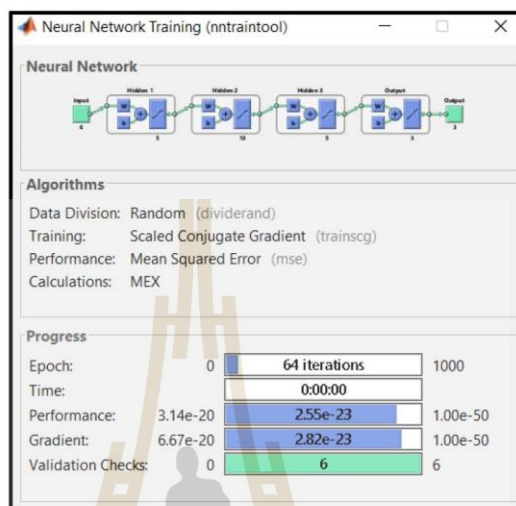


Figure 23. MATLAB program pretraining configuration.

The training part is performed to allow the network to adjust its weight and bias parameter corresponding to the error between the estimated output and the target. The random initializing of weight and bias caused the difference of result in training; by this reason it needed to be retrained beneficial to capture the best network model. As the result, Figure 24 indicated the performance curve based on Mean Square Error (MSE) cost function of the outgassing and pumping speed prediction model.

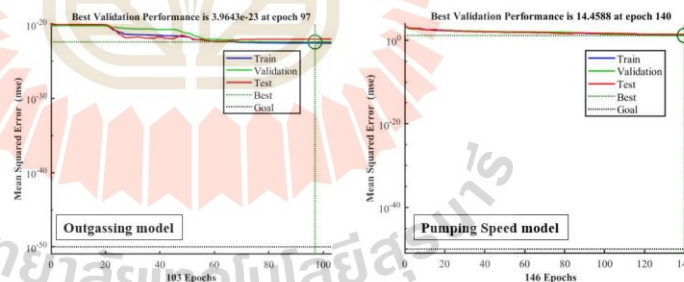


Figure 24. MSE of Outgassing and Pumping speed model.

The two performance graphs displayed the minimizing of MSE over the training iteration (Epochs). The minimum value of MSE would be the best network model; meanwhile, it needs the validation check in each epoch to manipulate an overfitting phenomenon. The experiment revealed that the optimal network of outgassing and pumping speed model is verified MSE representing 3.9643×10^{-23} at 97 epochs and a 14.4588 at 140 epochs. Implementation of the regression network model must be evaluated using the R^2 . For perfect function approximation are given $R^2 = 1$; however, there are many uncertainties that affect this value, for instance, outlier, missing value, and amount of data point. Figure 25 illustrates the recession result in R^2 at the best validation point, which is displayed as 0.99851 for

outgassing and 0.99234 for the pumping speed model. It is implied that the network model can be used to predict the output in a limitation of supervising data set. The analysis result will be validated with actual experiment data. Consequently, the appropriated network can apply to the control system, which leads to increased reliability of the UHV process.

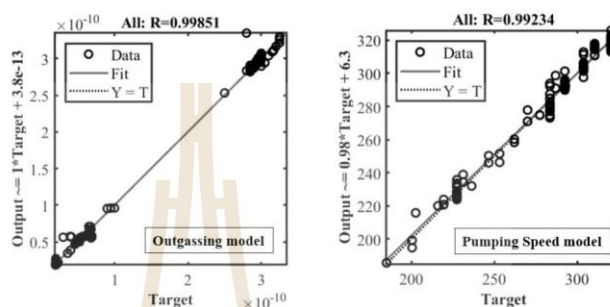


Figure 25. R² of Outgassing and Pumping speed model.

4.2.3. Analysis of Estimation Model Performance

Table 8 displays the steady-state pressure values for the measuring instruments from four experiments, along with the predicted outgassing results from the neural network. These predicted values are further validated by Molflow+ simulation. The correlation between the obtained values and the measurement data can be seen in Table 9.

Table 8. The prediction of outgassing by an ANN from the pressure measurement experiment.

Data Measuring from an Instrument of the Experimental					Outgassing Prediction from ANN				
Pa	Pb	Pc	Pd	Ppump1	Ppump2	Qa	Qb	Qc	
9.0659×10^{-10}	1.8665×10^{-9}	2.2665×10^{-9}	2.5331×10^{-9}	5.8662×10^{-10}	1.7332×10^{-9}	5.89×10^{-11}	2.63×10^{-11}	3.13×10^{-10}	
8.3993×10^{-10}	1.7332×10^{-9}	2.2665×10^{-9}	2.3998×10^{-9}	6.1328×10^{-10}	1.7332×10^{-9}	5.83×10^{-11}	2.24×10^{-11}	3.11×10^{-10}	
1.0399×10^{-9}	1.8665×10^{-9}	2.3998×10^{-9}	2.5331×10^{-9}	5.0662×10^{-10}	1.8665×10^{-9}	5.88×10^{-11}	2.43×10^{-11}	3.05×10^{-10}	
9.1992×10^{-10}	1.8665×10^{-9}	2.2665×10^{-9}	2.5331×10^{-9}	6.5328×10^{-10}	1.7332×10^{-9}	5.97×10^{-11}	2.84×10^{-11}	3.11×10^{-10}	

Table 9. The comparison result between prediction and experiment.

Experimental Results for Determining the Pumping Speed and Root Mean Square Error					
Calculation		ANN		RMSE	
Spump1	Spump2	Spump1	Spump2	Ppump1	Ppump2
312.34	342.26	253.33	266.00	9.84804×10^{-22}	7.53585×10^{-21}
313.56	342.26	242.81	272.79	5.95539×10^{-23}	2.82551×10^{-22}
308.29	344.31	249.88	268.52	1.15294×10^{-20}	1.35753×10^{-20}
315.31	342.26	239.84	273.63	5.96047×10^{-23}	1.35492×10^{-21}

From experimental Table 9, data from four measurements were collected and used to calculate the pumping speed. The table on the left displays the results calculated from the equation, the middle shows the results obtained from the neural network method, and the right displays the calculation of the root mean square error for each data. During the experiment, there were two sputter-ion pumps. Firstly, the values of pumping speed 1 and pumping speed 2 calculated via the equation were 312.34 and 342.26, respectively, while the values obtained via the artificial neural network method were 253.33 and 266.00. The corresponding root mean square errors were 9.84804×10^{-22} and 7.53585×10^{-21} , respectively. Secondly, the values for pumping speed 1 and pumping speed 2 calculated via the equation were 313.56 and 342.26, respectively, while the values obtained via the neural

network method were 242.81 and 272.79. The corresponding root mean square errors were 5.95539×10^{-23} and 2.82551×10^{-22} , respectively. Thirdly, the values of pumping speed 1 and pumping speed 2 calculated via the equation were 308.29 and 344.31, respectively, while the values obtained via the neural network method were 249.88 and 268.52. The corresponding root mean square errors were 1.15294×10^{-20} and 1.35753×10^{-20} , respectively. Lastly, the values for pumping speed 1 and pumping speed 2 calculated via the equation were 315.31 and 342.26, respectively, while the values obtained via the neural network method were 239.84 and 273.63. The corresponding root mean square errors were 5.96047×10^{-23} and 1.35492×10^{-21} , respectively. Upon considering the root mean square error, it was found that the values were very small. Furthermore, when considering the increase and decrease of the pumping speed, it tends to go in the same trend.

5. Conclusions

Synchrotron light production requires advanced vacuum technology to stabilize and prevent electron interference in a UHV pressure environment of about 10^{-9} Torr, which may affect the quality of light. To achieve this, a vacuum pressure system is created, and leak detection is performed. A fuzzy controller design is used in UHV systems to measure pressure from the instrument in a steady state. The Molflow+ program is used to simulate the outgassing rate of the system and feed it into the learning process of a neural network to create a model of the UHV system. Since current mathematical models are insufficient and complicated for estimation in all situations, an artificial neural network is used to simulate a mathematical model that aligns with experimental results.

The experimental results revealed the steady state pressure at the location where the measuring instrument was installed. The pressure obtained from the test corresponds to the pumping speed equation, but it cannot determine the outgassing rate of the system. To determine the outgassing rate, Molflow+ simulations are used. The simulation results are then used in neural network learning to model the vacuum system and predict pumping speed performance. The resulting model is validated by comparing the results of the reverse simulation with the Molflow+ program and the actual measurement data. It was found that the obtained values were similar, with RMSE values ranging from 1.3575×10^{-20} to 5.9554×10^{-23} . In this research, the efficiency of the pump was evaluated by utilizing the Molflow+ program in combination with an Artificial Neural Network (ANN). This method enabled suitable UHV control as an alternative to complex mathematical models. The findings can be applied to predict the pump's service life and maintenance planning.

In addition, there are several industries that use UHV systems in their manufacturing or research processes, such as the semiconductor industry; UHV systems are used in the production of semiconductor wafers to create highly precise, defect-free electronic components. The UHV environment helps to prevent contamination and ensure consistent quality throughout the manufacturing process. In the thin film deposition industry, UHV systems are also used in the production of thin films for various applications, such as optical coatings, electronic devices, and solar cells. The UHV environment is necessary to achieve high-quality, uniform deposition of the thin films. In surface science research, UHV systems are used extensively to study the properties of surfaces and interfaces. UHV systems allow researchers to investigate these surfaces without interference from atmospheric gases or contaminants. In all of these industries, the use of fuzzy logic can help to optimize the performance of the UHV system and improve the quality and consistency of the products or research results. By using fuzzy logic to control the various parameters and components of the UHV system, it is possible to achieve highly precise and efficient operation, leading to better results and reduced costs, as well as reducing the risk of human error.

Author Contributions: Conceptualization, S.S. and J.S.; methodology and validation, S.S., N.K. and J.S.; software and formal analysis, S.S., N.Y., T.W. and J.S.; experimental setup and data collection, S.S. and J.S.; investigation, J.S.; writing—original draft preparation, S.S.; writing—review and editing, S.S., T.W., N.K. and J.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research was funded by Synchrotron Light Research Institute (Public Organization). It offers a scholarship for Students at the Suranaree University of Technology (SUT) agency through grant number PHD5940301.

Data Availability Statement: Not applicable.

Acknowledgments: The authors are indebted to Suranaree University of Technology (SUT) and Synchrotron Light Research Institute (Thailand) for their generosity, budgets, equipment, locations, and valuable comments.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Sujitjorn, S. Thai Synchrotron Facility: It's Past and Present. *Suranaree J. Sci. Technol.* **2015**, *22*, 227–230.
2. Grabski, M. *Vacuum Technology for Particle Accelerators*; Introduction to Accelerator Physics; CERN Accelerator School: Budapest, Hungary, 2016.
3. Li, Y.; Liu, X. *Vacuum Systems Engineering*; Vacuum Science and Technology for Accelerator Vacuum Systems; Cornell University: Ithaca, NY, USA, 2015.
4. Akram, H.M. Selection of Precise Vacuum Pumps for Systems with Diverse Vacuum Ranges. *Glob. J. Res. Eng.* **2014**, *14*, 645–651.
5. Bertolini, L. Ion Pumps. Presented at The U.S. Particle Accelerator School, Lawrence Livermore National Laboratory, 10–14 June 2002. Available online: https://uspas.fnal.gov/materials/02Yale/05_IonPumps.pdf (accessed on 1 January 2023).
6. Polozov, S.; Dyubkov, V.; Panishev, A.; Shatokhin, V. Vacuum Condition Simulations for Vacuum Chambers of Synchrotron Radiation Source. In Proceedings of the 27th Russian Particle Accelerator Conference, Alushta, Russia, 27 September–1 October 2021. [CrossRef]
7. Dong, C.; Mehrotraj, P.; Myneni, G.R. *Several Technical Measures to Improve Ultra-High and Extreme-High Vacuum*; UNT Libraries Government Documents Department: Denton, TX, USA, 2002; pp. 1–6.
8. Suetsugu, Y. *Numerical Calculation of an Ion Pump's Pumping Speed*; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 1995; Volume 46, pp. 105–111.
9. Geng, J.; Wang, X.; Guo, M.; Zhang, S.; Cheng, Y.; Li, Y.; Li, H.; Ren, Z. Research on Measuring Method of Pumping Speed for Miniature Sputter Ion Pump. *Measurement* **2022**, *190*, 110736. [CrossRef]
10. Dolcino, L.; Mura, M.; Paolini, C. *50 Years of Varian Sputter Ion Pumps and New Technologies*; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 2010; Volume 84, pp. 677–684.
11. Tsipenyuk, D.Y. *Vacuum Technology. Physical Methods, Instruments, and Measurements*; Russian Academy of Sciences: Moscow, Russia, 2009; Volume 3, pp. 305–326. ISBN 978-1-905839-56-8.
12. Calcatelli, A.; Bergoglio, M.; Mohan, P.; Spagnol, M.; Simon, M.D. *Study of Outgassing of Sputter-Ion Pump Materials Treated with Three Different Cleaning Procedures*; Elsevier Ltd.: Amsterdam, The Netherlands, 1996; Volume 47, pp. 723–726.
13. Ady, M. Monte Carlo Simulations of Ultra High Vacuum and Synchrotron Radiation for Particle Accelerators. Ph.D. Thesis, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 2016.
14. Wang, G.; Zhang, S.; Chen, C.; Tang, N.; Lang, J.; Xie, Y. Vacuum System Optimization for EAST Neutral Beam Injector. *Energies* **2022**, *15*, 264. [CrossRef]
15. Shen, S.; Tung, L.; Kishiyama, K.; Nederbragt, W. Design and Analysis of Vacuum Pumping Systems for Spallation Neutron Source Drift-Tube Linac and Coupled-Cavity Linac. In Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, IL, USA, 18–22 June 2001.
16. Ongnam, S.; Preecha, C.; Sanwong, P.; Thongtan, W.; Srisertpol, J. Precision Analysis and Design of Rotating Coil Magnetic Measurements System. *Appl. Sci.* **2020**, *10*, 8454. [CrossRef]
17. Prawanta, S.; Srisertpol, J. Plane Stabilization of the Electron Storage Ring Using Automatic 3-DOF Girder System. *Int. J. Mech. Mechatron. Eng.* **2018**, *18*, 35–44.
18. Yachum, N.; Chunjarean, S.; Russamee, N.; Srisertpol, J. Parameter Optimization of Hole-Slot-Type Magnetron for Controlling Resonant Frequency of Linear Accelerator 6 MeV by Reverse Engineering Technique. *Appl. Sci.* **2021**, *11*, 2384. [CrossRef]
19. Nguyen, H.T.; Prasad, N.R.; Walker, C.L.; Walker, E.A. *A First Course in Fuzzy and Neural Control*, 1st ed.; Chapman and Hall/CRC: Boca Raton, FL, USA, 2002. [CrossRef]
20. Ibrahim, A.M. *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*. In *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*, 1st ed.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2003; ISBN 9780080469904.
21. Wu, H.N.; Reliable, L.Q. Fuzzy Control for Continuous-Time Nonlinear Systems with Actuator Faults. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part B Cybern.* **2004**, *34*, 1743–1752. [CrossRef] [PubMed]

22. Somwanshi, D.; Bundeale, M.; Kumar, G.; Parashar, G. Comparison of Fuzzy-PID and PID Controller for Speed Control of DC Motor Using LabVIEW. *Procedia Comput. Sci.* **2019**, *152*, 252–260. [CrossRef]
23. Ma, F. An Improved Fuzzy PID Control Algorithm Applied in Liquid Mixing System. In Proceedings of the 2014 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), IEEE, Hailar, China, 28–30 July 2014; pp. 587–591. [CrossRef]
24. Srisertpol, J.; Numanoy, N.; Pewmaikam, C. PI Controller plus Adaptive Fuzzy Logic Compensator for Torque Controlled System of DC Motor. In Proceedings of the 3rd International Conference on Engineering and Applied Science (2013 ICEAS), Osaka, Japan, 7–9 November 2013.
25. Patel, H.R.; Shah, V.A. Fuzzy Logic Based Metaheuristic Algorithm for Optimization of Type-1 Fuzzy Controller: Fault-Tolerant Control for Nonlinear System with Actuator Fault. *IFAC-PapersOnLine* **2022**, *55*, 715–721. [CrossRef]
26. Tan, J.H.; Tan, T.S.; Chia Hiik, K.L.; Mat Saad, A.Z.; Malik, S.A. Two-N Input Output Mapping Relationship Fuzziness Adaptation Approach for Fuzzy Based Negative Pressure Wound Therapy System. *Expert Syst. Appl.* **2022**, *208*, 118206.
27. Bähr, P.R.; Lang, B.; Ueberholz, P.; Ady, M.; Kersevan, R. Development of a Hardware-Accelerated Simulation Kernel for Ultra-High Vacuum with Nvidia RTX GPUs. *Int. J. High Perform. Comput. Appl.* **2022**, *36*, 141–152. [CrossRef]
28. Ahmed, S.; Sunil, S.; Mukherjee, S. *A Study on Benchmarking of Molflow for Ultra High Vacuum (UHV) System*; Institute for Plasma Research: Gandhinagar, India, 2020.
29. Carter, J. Design and Analysis of Accelerator Vacuum Systems with SynRad and MolFlow+. Mechanical Engineer, AES-MED Group, Argonne National Laboratory, 2015. Available online: <https://www.aps.anl.gov/files/APS-Uploads/ASDSeminars/2015/2015-09-02-Carter.pdf> (accessed on 1 January 2023).
30. Ady, M.; Kersevan, R. Introduction to the Latest Version of the Test-Particle Monte Carlo Code Molflow. In Proceedings of the IPAC2014: 5th International Particle Accelerator Conference, Beijing, China, 15–20 June 2014; pp. 2348–2350.
31. Rachmatullah, M.I.C.; Santoso, J.; Surendro, K. Determining the number of hidden layer and hidden neuron of neural network for wind speed prediction. *PeerJ Comput. Sci.* **2021**, *7*, e724. [CrossRef] [PubMed]
32. Koutsoukas, A.; Monaghan, K.J.; Li, X.; Huan, J. Deep-learning: Investigating deep neural networks hyper-parameters and comparison of performance to shallow methods for modeling bioactivity data. *J. Cheminform.* **2017**, *9*, 42. [CrossRef] [PubMed]
33. Yan, Z.; Klochkov, Y.; Xi, L. Improving the Accuracy of a Robot by Using Neural Networks (Neural Compensators and Nonlinear Dynamics). *Robotics* **2022**, *11*, 83. [CrossRef]
34. Macaulay, M.O.; Shafiee, M. Machine learning techniques for robotic and autonomous inspection of mechanical systems and civil infrastructure. *Auton. Intell. Syst.* **2022**, *2*, 8. [CrossRef]
35. Lishner, I.; Shtub, A. Using an Artificial Neural Network for Improving the Prediction of Project Duration. *Mathematics* **2022**, *10*, 4189. [CrossRef]
36. Abdulla, M.B.; Herzallah, R.O.; Hammad, M.A. Pipeline Leak Detection Using Artificial Neural Network: Experimental Study. In Proceedings of the 2013 International Conference on Modelling, Identification and Control, ICMIC, Cairo, Egypt, 31 August–2 September 2013; pp. 328–332.
37. Shen, S.; Lu, H.; Sadoughi, M.; Hu, C.; Nemani, V.; Thelen, A.; Webster, K.; Darr, M.; Sidon, J.; Kenny, S. A physics-informed deep learning approach for bearing fault detection. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **2021**, *103*, 104295. [CrossRef]
38. Castro, O.; Castejón, C.; Garcia-Prada, J.C. Bearing Fault Diagnosis Based on Neural Network Classification and Wavelet Transform. In Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Wavelet Analysis & Multirate Systems, Bucharest, Romania, 16–18 October 2006; Volume 2, pp. 16–18.
39. Zhao, W.; Egusquiza Estévez, E.; Valero Ferrando, M.d.C.; Egusquiza Montagut, M.; Valentín Ruiz, D.; Presas Batlló, A. A Novel Condition Monitoring Methodology Based on Neural Network of Pump-Turbines with Extended Operating Range. In Proceedings of the 16th IMEKO TC10 Conference on Testing, Diagnostics & Inspection as a Comprehensive Value Chain for Quality & Safety, Berlin, Germany, 3–4 September 2019; IMEKO: Barcelona, Spain, 2019; pp. 154–159. ISBN 9299008418.
40. Berman, A. *Vacuum Engineering Calculations, Formulas, and Solved Exercises*; Academic Press, Inc.: Cambridge, MA, USA, 1992; ISBN 0120924552.
41. Kersevan, R.; Ady, M. TE-VSC-SCC Training Using Molflow for Sputtering Simulations. CERN, 2020. Available online: https://molflow.web.cern.ch/sites/default/files/scc_training_2020/molflow_for_sputtering.pdf (accessed on 1 January 2023).
42. Ady, M.; Kersevan, R. MolFlow+ User Guide for Version 2.4. CERN. (2014). Available online: https://molflow.web.cern.ch/sites/default/files/molflow_user_guide.pdf (accessed on 1 January 2023).

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

ประวัติผู้เขียน

นางสาวสุนทรี แสงศรี เกิดเมื่อวันที่ 30 มกราคม พ.ศ. 2532 ณ อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา จากโรงเรียนอนุบาลกาญจนบุรี สำเร็จการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาตอนต้นและมัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนกาญจนาอนุเคราะห์ จังหวัดกาญจนบุรี ในปี พ.ศ. 2550 และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อปีการศึกษา 2554 ผู้วิจัยได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท ในกลุ่มวิจัยอิเล็กทรอนิกส์กำลัง พลังงาน เครื่องจักรกล และการควบคุม สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยในระหว่างการศึกษาได้ทำวิจัยเกี่ยวกับแนวทางการออกแบบตัวควบคุมพีไอดีด้วยวิธีจัดวางตำแหน่งโพลเด่นที่แม่นยำ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของผลตอบสนองในระบบวงปิด โดยสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ในหัวข้อ “การปรับจูนตัวควบคุมพีไอดีตามข้อกำหนดในโดเมนเวลาและดัชนีสมรรถนะไอเอสอี (PID CONTROLLER TUNING BASED-ON TIME-DOMAIN SPECIFICATIONS AND ISE PERFORMANCE INDEX)” และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตในปีการศึกษา 2556 เมื่อปีการศึกษา 2557 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาโท ผู้วิจัยได้เข้าทำงานในตำแหน่งอาจารย์ ประจำหลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์และหุ่นยนต์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ และนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตบางพระ จังหวัดชลบุรี เป็นระยะเวลา 2 ปี ซึ่งเป็นสายงานทางวิชาการที่เกี่ยวข้องด้านการเรียนและการสอน ทำให้เกิดแรงจูงใจในการศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกด้านระบบควบคุม ศาสตร์แห่งการประยุกต์ และสหวิทยาการ

เมื่อปี พ.ศ. 2559 ได้รับทุนการศึกษาจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ภายใต้โครงการพัฒนาคณาจารย์ ด้านเทคโนโลยีวิศวกรรมของเครื่องเร่งอนุภาคและเครื่องกำเนิดแสงซินโครตรอน เพื่อศึกษาต่อในระดับปริญญาเอกในสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล หลักสูตรวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และทำงานวิจัยทางด้านการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมค่าความดันสัญญาณในระบับสูงพิเศษ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของปั๊มแบบสปันเตอร์ไอออน และลดการพึ่งพาเทคโนโลยีจากต่างประเทศ การดำเนินงานวิจัยได้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ในระหว่างการศึกษาผู้วิจัยได้วิจัยร่วมกับคณาจารย์มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ทั้งในระดับชาติและนานาชาติ จำนวน 7 ฉบับ ดังแสดงในภาคผนวก ค ทั้งนี้ยังได้มีโอกาสเป็นผู้ช่วยสอนในรายวิชาทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งประกอบด้วยรายวิชา การจำลองและระบบควบคุม วิศวกรรมระบบและควบคุม วิศวกรรมความแม่นยำ ระเบียบวิธีวิจัย ปฏิบัติการระบบควบคุมและอัตโนมัติ ปฏิบัติการทางพลศาสตร์และระบบควบคุมในยานยนต์ ปฏิบัติการการวัดละเอียดและการควบคุม ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล 3 และปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 4 ทั้งนี้ ผู้วิจัยมีความสนใจในด้านระบบควบคุมอัตโนมัติ การออกแบบตัวควบคุม และการประยุกต์ใช้ระบบควบคุม