

Article

แผนการพัฒนาระบบวัดคุณสมบัติของพลาสมาสำหรับเครื่อง โทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย

Development Planning of Plasma Diagnostic for

Thailand Tokamak I

อาห์ลี ตำหมั่น^{1*}, พีระ พงษ์กิตติวนิชกุล², กันตชาติ ตั้งจิตนอม², พลิชฐ์ วงษ์หาบุศย์¹,
นพพร พูลยรัตน์¹ และสมศักดิ์ แดงดี¹

Arlee Tamman^{1*}, Peera Pongkitiwanichakul², Kantachat Tangjittanom², Pasit Wonghabut¹,
Nopporn Poolyarat¹ and Somsak Dangtip¹

¹สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

¹Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)
Ongkharak District, Nakhon Nayok Province 26120

²Department of Physics, Faculty of Science, Kasetsart University
Ngamwongwan Road, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900

*Corresponding author E-mail: arleet@tint.or.th

วันที่รับบทความ: 16 มิถุนายน 2564, วันที่แก้ไขบทความ: 7 กันยายน 2564, วันที่ตอบรับบทความ: 21 กันยายน 2564

Received: 16th June 2021, Revised: 7th September 2021, Accepted: 21st September 2021

บทคัดย่อ

Thailand Tokamak 1 (TT-1) ถือเป็นโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย ซึ่งได้รับการบริจาคจากสถาบัน ASIPP ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน การพัฒนาระบบต่างๆ ของเครื่องนั้นจำเป็นต้องมีการปรับปรุง เพิ่มเติมเพื่อรองรับการทำงานวิจัยและการพัฒนาบุคลากรทางด้านพลาสมาและเทคโนโลยีฟิวชันเพื่อขยายขีดความสามารถในการร่วมทำงานวิจัยด้านฟิวชันร่วมกับโครงการวิจัยระดับโลกต่อไป ระบบวัดต่างๆของเครื่อง TT-1 เป็นอุปกรณ์สำคัญที่ทำให้เราสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นภายในพลาสมาได้ เพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุม วิเคราะห์ผลและเฝ้าระวังสิ่งผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับเครื่องเตาปฏิกรณ์โทคาแมค อุปกรณ์วัดสำหรับเครื่องโทคาแมค TT-1 ที่พัฒนาร่วมกับสถาบัน ASIPP เป็นอุปกรณ์วัดพื้นฐานที่จำเป็นต่อการเดินเครื่องฯ ในเบื้องต้น อุปกรณ์ในกลุ่มนี้ประกอบด้วย Magnetic Probe, HCN Interferometer และระบบถ่ายภาพความเร็วสูง ส่วนอุปกรณ์วัดอื่นๆ จะมีการพัฒนาขึ้นเองภายในประเทศ โดยความร่วมมือระหว่างหน่วยงานต่างๆ ภายใต้ความร่วมมือ CPaF ดังนั้นการพัฒนา

อุปกรณ์วัดภายในประเทศจะเป็นการยกระดับการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตและองค์ความรู้ต่างๆ ด้านนิวเคลียร์ฟิวชันภายในประเทศไปพร้อมกัน อุปกรณ์วัดในกลุ่มนี้จะมีการพัฒนาให้สอดคล้องกับแนวทางเดินเครื่อง ที่จะเกิดขึ้นเพื่อยกระดับขีดความสามารถของเครื่องให้สูงขึ้น และตอบโจทย์แนวทางการวิจัยของบุคลากรที่ทำงานด้านพลาสมาและฟิวชันในประเทศ รวมไปถึงการติดตามความก้าวหน้าเทคโนโลยีฟิวชันในต่างประเทศควบคู่กันไป และจะเป็นเครื่องมือพื้นฐานให้กับกลุ่มประเทศอาเซียนตามกรอบความร่วมมือต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: โทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย, ระบบวัดพลาสมา, ระบบถ่ายภาพความเร็วสูง, ขดลวดวัดค่าฟลักซ์แม่เหล็ก, ห่วงวัดค่าฟลักซ์แม่เหล็ก

Abstract

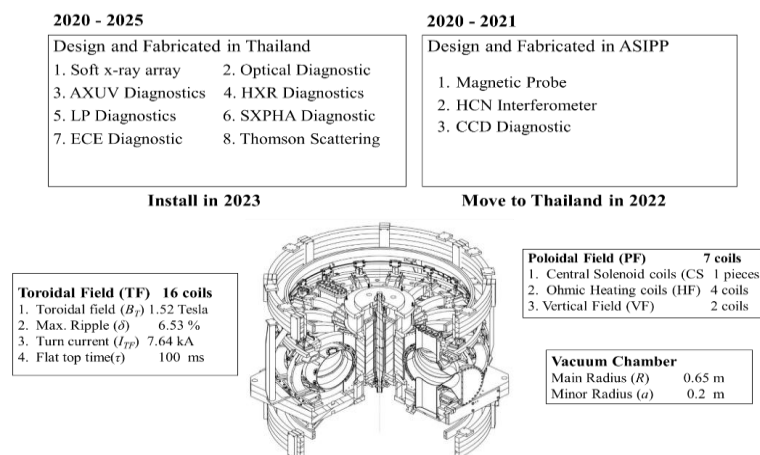
Thailand Tokamak 1 (TT-1) is Thailand's first Tokamak machine donated by the Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences (ASIPP), China. The device serves as a strong starting point for research, skill development, and future global collaboration in fusion development. Diagnostics for TT-1 are essential. It allows us to track changes in plasma, control and analyze the results, and look for any abnormalities in the Tokamak during the operation. The basic diagnostic devices are developed by the collaboration between ASIPP and Thai researchers. They are magnetic probes, an HCN Interferometer, and a high-speed imaging system. Other diagnostic devices will be developed domestically by institutes cooperating under the CPaF (Center for Plasma and Nuclear Fusion Technology). Domestic works prospectively enhance technology production and knowledge in nuclear fusion in Thailand. The diagnostic system developed domestically will follow operating guidelines to raise the device's capability, build technical skills, and support frontier research. The device should also be a standard tool for ASEAN countries in the framework of cooperation in the future.

Keywords: Thailand Tokamak 1, Plasma diagnostic system, High-speed imaging system, Magnetic flux measuring coil, Magnetic flux measuring loop

บทนำ

การค้นคว้าวิจัยเพื่อขยายขีดความสามารถด้านแหล่งพลังงานของโลกมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นทุกๆ ปี การวิจัยและพัฒนาด้านเทคโนโลยีฟิวชันเป็นอีกหนึ่งสาขาวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาแหล่งพลังงานทางเลือก เพื่อทดแทนแหล่งพลังงานหลักจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ก่อให้เกิดปัญหาภาวะโลกร้อนในปัจจุบัน โดยทั้งนี้อาศัยหลักการการปลดปล่อยพลังงานจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันของพลาสมาผสมจากดิวเทอเรียมและทริเทียม [1,2] เครื่องโทคาแมคเป็นหนึ่งในเครื่องมือวิจัยที่ใช้ในการสร้างพลาสมาที่มีอุณหภูมิและความหนาแน่นสูงพอที่จะก่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันได้ [1,2] แต่เครื่องโทคาแมคนั้นมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนและต้องการความแม่นยำในการออกแบบ สำหรับประเทศไทยนั้น การศึกษาและทำความเข้าใจถึงกลไกและ

พฤติกรรมของพลาสมาภายในเครื่องโทคาแมครวมถึงการพัฒนาเทคโนโลยีฟิวชั่นในด้านอื่นๆ จะช่วยส่งเสริมการมีส่วนร่วมของนักวิจัยในประเทศและในภูมิภาคเอเชียเพื่อร่วมกันค้นคว้าวิจัย เรียนรู้ และสร้างประสบการณ์ในการวางแผนและทดลองกับระบบต่างๆ ของเครื่อง TT-1 รูปที่ 1 แสดงพารามิเตอร์หลัก แผนการสร้างและประกอบเครื่อง TT-1 ซึ่งประกอบด้วยระบบย่อย 4 ระบบ คือ ระบบตรวจวัดคุณสมบัติพลาสมา ระบบสุญญากาศและเติมเชื้อเพลิง ระบบควบคุมพลาสมาและเก็บข้อมูลและระบบจ่ายพลังงานไฟฟ้าสำหรับขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ระบบต่างๆ ของเครื่อง TT-1 นี้ได้รับการศึกษาและออกแบบเพื่อกำหนดลักษณะเฉพาะของเครื่องภายใต้คำแนะนำของนักวิจัยจากสถาบัน ASIPP สาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งมีความร่วมมือกันมาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2018 เป็นต้นมา โดยมีการส่งทีมนักวิจัยชุดต่างๆ ไปยังมณฑลหูเป่ย์ สาธารณรัฐประชาชนจีน ที่ตั้งของเครื่องโทคาแมค EAST ซึ่งเป็นเครื่องโทคาแมครุ่นที่ใช้ทำการทดลองวิจัยอยู่ในปัจจุบัน



รูปที่ 1 โครงสร้างหลักและแนวทางการพัฒนาระบบวัดคุณสมบัติพลาสมาภายในเครื่องโทคาแมค TT-1 [3]

สำหรับการติดตามการทำงานของเครื่องโทคาแมคเพื่อรวบรวมข้อมูลในการวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของเครื่องรวมถึงสมบัติเฉพาะของพลาสมาที่เกิดขึ้น นั้นจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์วัดที่มีความแม่นยำสูง มีเสถียรภาพและมีความเชื่อถือในเชิงฟิสิกส์ ดังนั้นเครื่องโทคาแมค TT-1 ที่พัฒนาและปรับปรุงขึ้นใหม่นี้ จำเป็นที่จะต้องมีการติดตั้งระบบวัดเพื่อตรวจวัดคุณสมบัติพื้นฐานพลาสมาภายในเครื่องโทคาแมค สมบัติเฉพาะที่วัดได้นั้นจะถูกนำมาใช้ในการควบคุมประสิทธิภาพเพื่อให้ได้คุณภาพที่เหมาะสมในการเดินเครื่องฯ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากการวัดจะถูกใช้อ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในแต่ละครั้งของการเดินเครื่อง ซึ่งหากการเดินเครื่องด้วยคุณลักษณะเดิมแล้วนั้นเกิดผลที่วัดได้มีค่าแตกต่างไปจากเดิม แสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางประการของเครื่องเกิดขึ้นที่ระบบวัดในปัจจุบันไม่สามารถตรวจวัดได้ จะนำผลที่ได้มาวิเคราะห์และอาจจำเป็นต้องมีการออกแบบและติดตั้งอุปกรณ์วัดเพิ่มเติม เพื่อให้ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงสมบัติเฉพาะของเครื่องโทคาแมค TT-1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพต่อไป อุปกรณ์ตรวจวัดอีกกลุ่ม คืออุปกรณ์วัดที่มีความจำเพาะต่อการทดลองของนักวิจัยของสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และทีมคณะวิจัยจากมหาวิทยาลัยต่างๆ ที่มีการทำข้อตกลงความร่วมมือกับสถาบันฯ เพื่อทดสอบสมมติฐานต่างๆ อันจะนำไปสู่การปรับปรุง เพิ่มเติมประสิทธิภาพของระบบต่างๆ ของเครื่องต่อไปในอนาคต

การเปลี่ยนแปลงสมบัติเฉพาะต่างๆ ของพลาสมาในเครื่องโทคาแมคนั้น จำเป็นต้องมีการเพิ่มพลังงานให้พลาสมา หรือสร้างอุปกรณ์ที่มีลักษณะเฉพาะซึ่งใช้ในการควบคุมพลาสมา (Confinement) ซึ่งส่งผลต่อพลาสมา การเพิ่มพลังงานในรูปแบบต่างๆ ให้แก่พลาสมานั้น ส่งผลให้มีการเพิ่มอุณหภูมิและความหนาแน่นของอนุภาคในพลาสมาจนเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่อง (ดังเช่นปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชั่นที่เกิดขึ้นในดวงอาทิตย์ ที่คงสภาพมากกว่า

4,500 ล้านปี) การที่พลาสมาสามารถรับพลังงานดังกล่าวแต่ไม่สามารถคงลักษณะเฉพาะดังกล่าว เพื่อที่จะสร้างพลาสมาที่มีความเสถียร (Equilibrium Plasma) ไว้ได้เป็นเรื่องที่น่าสนใจซึ่งในปัจจุบัน โครงการวิจัยเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันต่างๆ ที่มีการลงทุนมหาศาล และมีความร่วมมือระดับนานาชาติ ก็ยังประสบปัญหาในเรื่องความพยายามที่จะรักษาเสถียรภาพของพลาสมาในเครื่องปฏิกรณ์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันให้นานที่สุด ในการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของพลาสมาในรูปแบบต่างๆ นั้น มีความซับซ้อนและขึ้นกับปัจจัยสภาพแวดล้อมต่างๆ ในเครื่อง ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ส่งผลให้เกิดความไม่เสถียรของพลาสมา และนำไปสู่การสูญเสียพลังงานของพลาสมาและในที่สุดอาจจะส่งผลให้พลาสมาเกิดการดับลงอย่างกะทันหันได้ พลังงานของพลาสมาจะถูกถ่ายเทไปยังพื้นที่รอบข้างของเครื่อง นั่นคือผนังสุญญากาศและอุปกรณ์วัดต่างๆ ที่ติดตั้งอยู่ภายในและเกิดความเสียหายต่อเครื่องและอุปกรณ์เหล่านี้ได้ ยังไม่รวมถึงกัมมันตภาพรังสีที่เกิดจากอนุภาคที่พุ่งเข้าชนและถ่ายเทพลังงานให้กับผนัง ดังนั้นการตรวจวัดความไม่เสถียรของพลาสมาและคาดการณ์การดับของพลาสมาได้นั้น เป็นสิ่งที่จำเป็นมากที่จะส่งผลให้สามารถควบคุมพลาสมาและดับพลาสมาได้อย่างปลอดภัย โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายของอุปกรณ์ต่างๆ

ระบบตรวจวัดคุณสมบัติพลาสมาภายในเครื่องโทคาแมค TT-1 ซึ่งสร้างและประกอบขึ้นที่สถาบัน ASIPP ประกอบด้วยระบบ Magnetic probe ระบบ HCN interferometer และ CCD diagnostic ระบบวัดดังกล่าวนี้ใช้สำหรับวัดค่าพารามิเตอร์การทำงานของเครื่องโทคาแมค เพื่อทดสอบการทำงานขั้นต้นของเครื่อง เช่น กระแสพลาสมาภายในเครื่องโทคาแมค ตำแหน่งของแกนพลาสมาภายในห้องสุญญากาศ (คือพื้นที่ภายในเครื่องเตาปฏิกรณ์) ความหนาแน่นของพลาสมาและภาพของพลาสมาที่เกิดขึ้น ระบบวัดอื่นๆ จะถูกออกแบบและสร้างขึ้นในประเทศไทยโดยความร่วมมือของนักวิจัยจากสถาบันและมหาวิทยาลัยภายในประเทศ เพื่อตอบโจทย์ความต้องการในการทดลอง ศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของเครื่องต่อไป ซึ่งจะรับคำปรึกษาจากนักวิจัยที่มีความรู้ ความเชี่ยวชาญ และประสบการณ์ในการออกแบบและสร้างระบบนั้นๆ จากต่างประเทศ เพื่อสร้างความร่วมมือทางการวิจัยและก่อให้เกิดการถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ให้แก่นักวิจัยของไทยต่อไปในอนาคตตามแผนงานที่สถาบันฯ วางไว้สำหรับบทความฉบับนี้จะกล่าวถึงเฉพาะระบบวัดที่พัฒนาร่วมกับสถาบัน ASIPP เพื่อการเดินเครื่องในช่วงแรกเท่านั้น

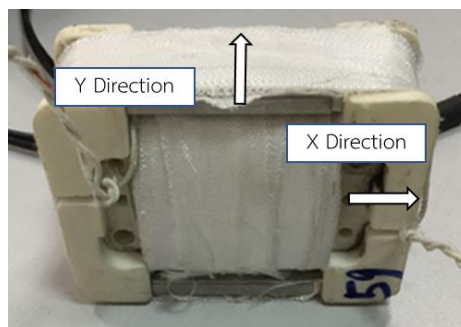
การได้มาซึ่งข้อมูลจากระบบวัดและการวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ของเครื่องโทคาแมค TT-1 คณะนักวิจัยของไทยได้ร่วมออกแบบและพัฒนาร่วมกับสถาบัน ASIPP ของประเทศจีน ข้อมูลที่เกิดจากการวิเคราะห์คุณสมบัติจะถูกรวบรวมด้วยระบบการเก็บข้อมูล Data Acquisition System (DAQ) ในการทดลองแต่ละครั้ง จะใช้เวลาตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนเสร็จสิ้น เพียง 100 ms เท่านั้น ในหนึ่งวันจะสามารถทดลองซ้ำได้ไม่น้อยกว่า 100 ครั้ง ในการออกแบบระบบ DAQ จะมีการเก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 192 ช่องสัญญาณ รับสัญญาณวินิจฉัยต่าง ๆ ที่อยู่ในช่วง 20-250 kHz ข้อมูลที่ได้จัดเก็บในการทดลองในแต่ละวัน มีขนาดข้อมูลไม่น้อยกว่า 5 GB และรวมพื้นที่เก็บข้อมูลไม่น้อยกว่า 500 GB สำหรับการใช้งานหนึ่งปี (ประมาณ 100 วัน)

ระบบวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้า

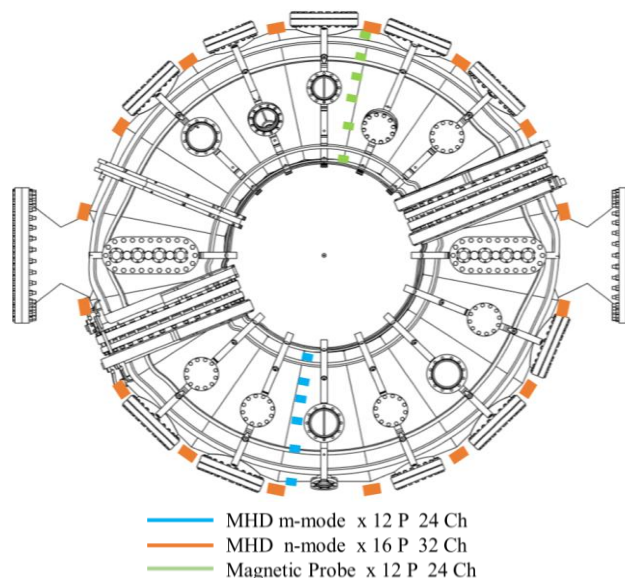
ระบบวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นระบบวัดพื้นฐานเครื่องโทคาแมค ซึ่งจะแสดงค่าคุณสมบัติต่างๆ ของเครื่องที่จำเป็นต่อการควบคุมและติดตามการทำงานของเครื่องฯ เช่น การตรวจวัดตำแหน่งของพลาสมาภายในห้องสุญญากาศ อันจะนำไปสู่การออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งของพลาสมาต่อไป การตรวจวัดค่าพลังงานร่วมที่ถูกกักเก็บไว้ด้วยสนามแม่เหล็กของเครื่อง การวัดความไม่เสถียรของพลาสมาและนำไปสู่การดับของพลาสมาอย่างฉับพลัน (Plasma Disruption) ซึ่งจะสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์ต่างๆ ภายในเครื่องโทคาแมคเนื่องจาก

พลังงานทั้งหมดจะตกกระทบบนผนังภายใน (plasma facing surfaces) และอุปกรณ์ที่ติดตั้งภายในเครื่องระบบวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้าของเครื่องโทคาแมค TT-1 แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มตามลักษณะเฉพาะของขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนี้

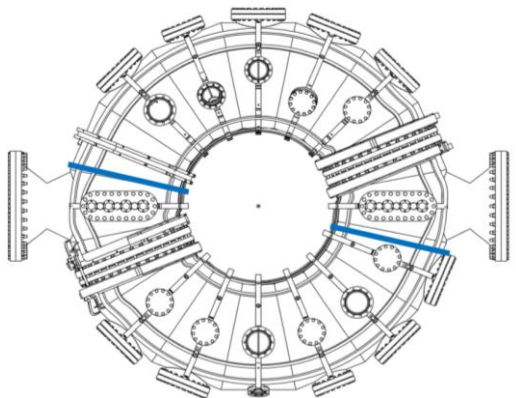
ขดลวด Mirnov ถูกออกแบบมาเพื่อวัดตัวแปรของสนามแม่เหล็กที่สร้างขึ้นโดยกระแสพลาสมาภายในห้องสุญญากาศ [4,5] ขดลวด Mirnov 1 ตัวสามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของ สนามแม่เหล็กได้ใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกันแสดงดังรูปที่ 2 ดังนั้นขดลวด Mirnov หนึ่งตัวจึงให้สัญญาณเอาต์พุตสองสัญญาณ ขดลวดนี้มีการติดตั้งในตำแหน่งที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการติดตั้ง โดยสามารถแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) หัววัด Magneto-hydrodynamic (MHD) โหมด m จำนวน 12 ตัว 2) หัววัด MHD โหมด n จำนวน 16 ตัว และ 3) หัววัดสนามแม่เหล็กภายในเครื่องโทคาแมคจำนวน 12 ตัว ลักษณะการติดตั้งแสดงดังรูปที่ 3 ขดลวดถูกติดตั้งในหัววัดทั้ง 3 กลุ่มนี้ใช้ในการวัดคุณสมบัติของเครื่องฯ ที่แตกต่างกันออกไป ส่งผลให้ความถี่ของสัญญาณที่ส่งออกมาอยู่ในช่วงที่แตกต่างเช่นเดียวกัน โดยหัววัด MHD ทั้ง 2 โหมด จะทำงานในช่วงความถี่สูงสุดไม่เกิน 200 kHz โดยมีสัญญาณขาออกทั้งหมด 56 ช่องสัญญาณ หัววัดสนามแม่เหล็กจะทำงานที่ความถี่สูงสุดไม่เกิน 50 kHz และมีช่องสัญญาณขาออกจำนวน 24 ช่องสัญญาณ



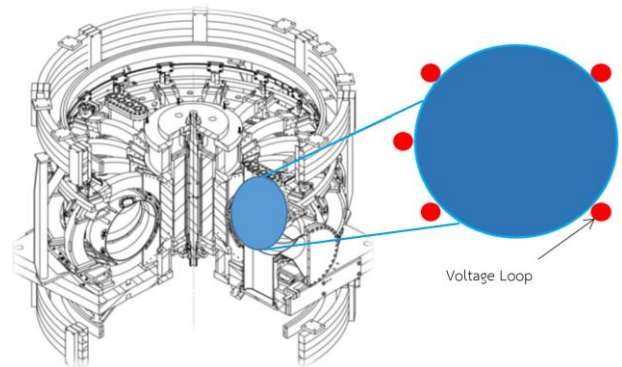
รูปที่ 2 ลักษณะของขดลวด Mirnov ซึ่งออกแบบให้สามารถตรวจจับค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้ใน 2 ทิศทางที่ตั้งฉากกัน [3]



รูปที่ 3 ตำแหน่งการติดตั้งขดลวด Mirnov[3]



รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งขดลวด Rogowski [3]



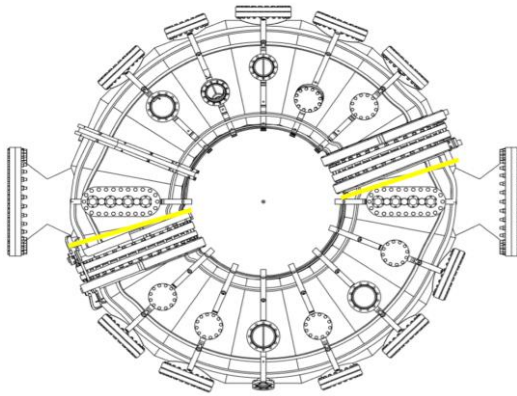
รูปที่ 5 ตำแหน่งการติดตั้งของห่วง Voltage [3]

ขดลวด Rogowski ใช้ในการวัดกระแสของพลาสมาซึ่งเกิดขึ้นภายในห้องสุญญากาศของเครื่องโทคาแมค [6] ขดลวดดังกล่าวถูกออกแบบเพื่อรองรับกระแสไฟฟ้าได้สูงสุดถึง 150 kA ที่ความถี่ได้สูงสุดไม่เกิน 20 kHz ซึ่งถูกติดตั้งใน 2 ตำแหน่งที่อยู่ตรงกันข้ามกัน แสดงดังรูปที่ 4 โดยจะมีสัญญาณขาออกจำนวน 2 ช่องสัญญาณเพื่อส่งสัญญาณเข้าสู่ระบบเก็บข้อมูลต่อไป

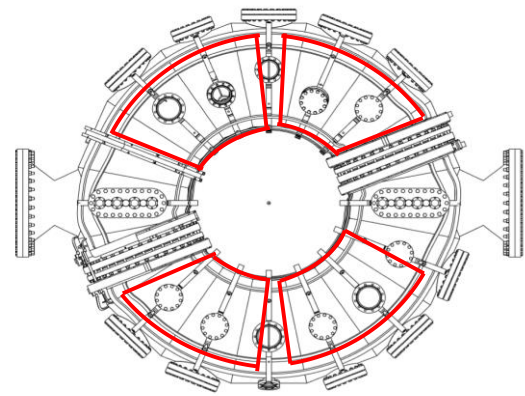
ห่วง Magnetic Flux ใช้สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นภายในเครื่องโทคาแมค [7-11] โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของการติดตั้ง เป้าหมายและสมบัติเฉพาะของพลาสมาที่ต้องการวัด ซึ่งประกอบด้วย 1) ห่วง Voltage 2) ห่วง Diamagnetic 3) Compensation และ 4) ห่วง Saddle

ห่วง Voltage จะถูกติดตั้งคู่ขนานไปกับห้องสุญญากาศของเครื่องโทคาแมคในลักษณะของห่วงวงกลม โดยติดตั้งใน 5 ตำแหน่งที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 5 โดยอยู่ฝั่งด้านใน (High field side) จำนวน 3 ห่วง และอยู่ด้านนอกอีกจำนวน 2 ห่วง โดยแต่ละตำแหน่งจะมีการติดตั้งจำนวน 2 ห่วง ส่งผลให้สามารถวัดสัญญาณได้ทั้งหมดจำนวน 10 ช่องสัญญาณ โดยรองรับความถี่ได้สูงสุดไม่เกิน 50 kHz ห่วงดังกล่าวทำหน้าที่วัดการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสพลาสมาที่ไหลภายในห้องสุญญากาศ สัญญาณที่ได้แสดงถึงการเกิดพลาสมาภายในห้องสุญญากาศ

ห่วง Diamagnetic ทำหน้าที่วัดค่าฟลักซ์ของสนามแม่เหล็ก diamagnetic ที่เกิดจากการเกิดพลาสมาดีสชาร์จภายในห้องสุญญากาศ ห่วง Diamagnetic จะติดตั้งในแนวโพลอยดอล เพื่อวัดค่าสนามแม่เหล็กที่มีการเพิ่มขึ้นในแนวโทรอยดอล ข้อมูลที่วัดได้จะมีความเกี่ยวข้องกับค่าแรงดันจลน์ (kinetic pressure) ซึ่งสอดคล้องกับค่า Poloidal beta (β_p) อีกทั้งยังเกี่ยวข้องกับค่าพลังงานรวมที่ถูกกักเก็บไว้ด้วยสนามแม่เหล็ก (Total stored energy, W_{dia}) และค่าเวลาของการกักขังพลังงาน (Energy confinement time, τ_e) [6] การติดตั้งห่วงดังกล่าวสำหรับเครื่อง TT-1 นั้นจะติดตั้งใน 2 ตำแหน่งที่อยู่ตรงกันข้ามกันแสดงดังรูปที่ 6 สัญญาณที่ได้จะมีจำนวน 2 ช่องสัญญาณจากแต่ละตำแหน่ง โดยมีค่าความถี่สูงสุดไม่เกิน 50 kHz



รูปที่ 6 ตำแหน่งการติดตั้งของห่วง Diamagnetic และห่วง Compensation [3]

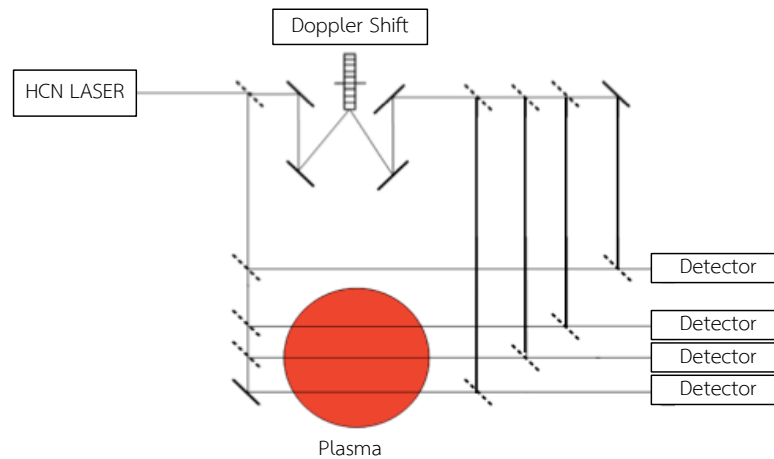


รูปที่ 7 ตำแหน่งของการติดตั้งห่วง Saddle โดยการติดตั้งจำนวน 4 ห่วงครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 1 ใน 4 ของผนังห้องสุญญากาศ [3]

ห่วง Compensation ติดตั้งเพื่อวัดค่าฟลักซ์ของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าภายในขดลวดแม่เหล็กโทรอยดอลและกระแสไฟฟ้าที่ไหลในผนังของห้องสุญญากาศ ข้อมูลที่วัดได้นำมาใช้ในการปรับแก้ไขที่วัดได้จาก ห่วง Diamagnetic ซึ่งห่วงทั้งสองจะติดตั้งในตำแหน่งโทรอยดอลเดียวกัน สำหรับเครื่องโทคาแมค TT-1 มีการติดตั้งห่วงดังกล่าวใน 2 ตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 6 สัญญาณที่ได้จะมีจำนวน 2 ช่องสัญญาณจากแต่ละตำแหน่ง โดยมีค่าความถี่สูงสุดไม่เกิน 50 กิโลเฮิร์ตซ์

ห่วง Saddle เป็นอุปกรณ์วัดที่ติดตั้งครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 1 ใน 4 ของพื้นที่ผนังของห้องสุญญากาศของเครื่องโทคาแมค ทำหน้าที่ในการตรวจจับค่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีทิศทางไม่ขนานกับผนังของเครื่องโทคาแมค โดยค่าสัญญาณจะมีค่าสูงสุดเมื่อมีความไม่เสถียรของพลาสมาเกิดขึ้นก่อให้เกิดการสูญเสียอนุภาคพลังงานสูงจากใจกลางของพลาสมา ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวจะมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้นในทิศทางที่ตั้งฉากกับผนังห้องสุญญากาศ เครื่องโทคาแมค TT-1 นั้นมีการติดตั้งห่วงดังกล่าว 4 ตำแหน่งในทิศทางโทรอยดอลที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 7 สัญญาณที่ได้จะมีจำนวน 4 ช่องสัญญาณ โดยมีค่าความถี่สูงสุดไม่เกิน 50 kHz

HCN Laser Interferometer เครื่อง Far-infrared Hydrogen Cyanide (HCN) Laser Interferometer ประกอบด้วยเลเซอร์รังสีใต้แดงระยะไกลที่มีความยาวคลื่น 0.337 mm โดยลำเลเซอร์ถูกส่งผ่านพลาสมาในเครื่องเพื่อวัดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา [12,13] สาเหตุที่เลือกใช้เลเซอร์รังสีใต้แดงอยู่ในย่านความถี่สูงมากพอนี้เพราะรังสีใต้แดงระยะไกลจะไม่ถูกดูดกลืนในพลาสมาและมีความยาวคลื่นมากพอสำหรับการวัดการเปลี่ยนเฟส แนวการติดตั้งเครื่อง Interferometer นี้วางลำเลเซอร์มีโพลาไรเซชันขนานกับสนามแม่เหล็กในเครื่องโทคาแมค เลเซอร์มีรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่วิถีและเฟสเปลี่ยนไปเมื่อเคลื่อนผ่านความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในพลาสมา โดยความยาวคลื่นของเลเซอร์ในพลาสมาจะยาวกว่าความยาวคลื่นในสุญญากาศหรืออากาศโดยรอบ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนสามารถถูกคำนวณได้จากความต่างเฟสระหว่างคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านพลาสมากับคลื่นที่ไม่ผ่านพลาสมาที่วัดได้จาก Detector ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 8

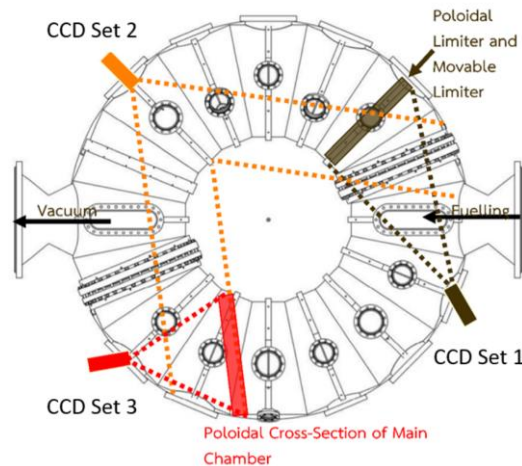


รูปที่ 8 ตำแหน่งของการติดตั้งหัว Saddle โดยการติดตั้งจำนวน 4 หัวครอบคลุมพื้นที่มากกว่า 1 ใน 4 ของผนังห้องสุญญากาศ [3]

ในการวิเคราะห์นี้เนื่องจาก Plasma beta มีค่าน้อยในเครื่องโทคาแมค ดังนั้นฟิสิกส์ของพลาสมาในโทคาแมคกับฟิสิกส์ของ Cold plasma หรือพลาสมาที่มีอุณหภูมิศูนย์เคลวินจึงใกล้เคียงกัน และเลเซอร์ที่ผ่านเข้าไปในพลาสมาจะกลายเป็น Ordinary wave ที่มีความยาวคลื่นเป็นไปตามสมการ $\left(\frac{c}{2\pi\omega\lambda}\right)^2 = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$ โดย c คือความเร็วแสง λ คือความยาวคลื่น ω คือความถี่เชิงมุมของคลื่น และ ω_{pe} คือความถี่ของการสั่นในพลาสมา ซึ่งแปรผันตามรากที่สองของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน จากสมการพบว่าความถี่ของคลื่นเลเซอร์จะต้องมากกว่าความถี่ของการสั่นอิเล็กตรอนในพลาสมาเพื่อให้คลื่นนั้นไม่ถูกดูดกลืนในพลาสมา ในกรณีของ HCN เลเซอร์นั้นความถี่ที่ได้มีค่าสูงกว่าความถี่ของการสั่นในพลาสมาพอสมควรสำหรับเครื่อง TT-1 อย่างไรก็ตามหากเป็นเครื่องโทคาแมคที่ใหญ่กว่าเครื่องนี้ และมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนมากขึ้น เลเซอร์ที่เลือกใช้ในการศึกษา Interference ก็จะมีค่าที่สูงขึ้นด้วย และจากข้อมูลเกี่ยวกับความยาวคลื่นในพลาสมาจะสามารถใช้เพื่อคำนวณหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนได้ [7,8]

การวัดเฟสที่เปลี่ยนไป (Phase difference) เพื่อหาความหนาแน่นของอิเล็กตรอนภายในเครื่องโทคาแมคทำได้โดยใช้วิธีแบบ Mach-Zehnder interferometer โดยส่งลำแสงเลเซอร์สองลำ ลำเลเซอร์อ้างอิงนั้นผ่านอากาศที่มีดัชนีหักเหเป็นหนึ่ง และอีกลำผ่านพลาสมา ลำเลเซอร์ที่ผ่านพลาสมาจะถูกนำมาซ้อนทับกับลำแสงเลเซอร์อ้างอิงเพื่อให้เกิดการแทรกสอดกันของเลเซอร์เพื่อแสดงผลจากความต่างเฟสกันของเลเซอร์ทั้ง 2 ลำ การวัดเฟสที่เปลี่ยนไปโดยตรงทำได้ยากเพราะความถี่ของเลเซอร์สูงมาก เพราะหากเครื่องมือวัดมีความละเอียดไม่สูงพอจะทำให้สัญญาณที่อยู่ในย่านความถี่ของเลเซอร์ไม่สามารถถูกตรวจจับได้ เราจึงใช้วิธี Heterodyne Interferometer โดยเราจะปรับให้ความถี่ของเลเซอร์ทั้งสองส่วนไม่เท่ากันเป็น f_1 และ f_2 โดยมีผลต่างเป็น Δf ซึ่งมีขนาดน้อยกว่าทั้ง f_1 และ f_2 มาก ๆ หากเราให้ลำอ้างอิงมีความถี่ f_1 และลำที่สองผ่านพลาสมามีความถี่ f_2 ความเข้มแสงที่วัดได้จากการแทรกสอดระหว่างลำเลเซอร์อ้างอิงกับลำเลเซอร์ที่ผ่านพลาสมาจะให้ค่าความต่างเฟสซึ่งเครื่องมือวัดสามารถวัดได้ หากมีลำเลเซอร์ที่สามที่มีความถี่ f_2 โดยให้ลำเลเซอร์นี้ผ่านอากาศและแทรกสอดกับลำเลเซอร์อ้างอิงด้วย เราจะได้ค่าความเข้มแสงกรณีที่ไม่เปลี่ยนไว้ใช้เปรียบเทียบ เราจึงสามารถวิเคราะห์เฟสที่เปลี่ยนไปจากการเปรียบเทียบการแทรกสอดระหว่างลำที่หนึ่งและสองกับการแทรกสอดระหว่างลำเลเซอร์ที่หนึ่งและลำเลเซอร์ที่สามได้

ความต่างเฟสที่ได้นั้นเกิดจากผลรวมของพลาสมาทุกบริเวณที่เลเซอร์วิ่งผ่าน ดังนั้นความหนาแน่นที่ได้จะเป็นความหนาแน่นเฉลี่ยตลอดเส้นทางที่เลเซอร์ผ่าน หากต้องการทราบว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแนวรัศมีของพลาสมา สามารถใช้ Abel Transform เพื่อแปลงค่าการอินทิเกรตของความหนาแน่นกับระยะทางตามแนวเลเซอร์เพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในแนวรัศมี [12,13]



รูปที่ 9 ตำแหน่งการติดตั้งกล้องถ่ายภาพความเร็วสูง [3]

การออกแบบระบบวัด HCN Laser Interferometer นั้นสามารถใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนในตำแหน่งที่แตกต่างกันตามแนวรัศมี โดยการเพิ่มจำนวนของเลเซอร์ที่เคลื่อนที่ผ่านพลาสมาให้มากขึ้นเพื่อความแม่นยำในการทำ Abel transform สำหรับเครื่องโทคาแมค TT1 นั้นใช้เลเซอร์จำนวน 3 ลำเคลื่อนที่ผ่านพลาสมาแสดงดังภาพที่ 8 โดยมี Doppler shift ซึ่งประกอบด้วยมอเตอร์และจานหมุนที่มีร่อง มอเตอร์จะทำหน้าที่ให้จานหมุนไปด้วยความเร็วที่เราต้องการ เมื่อลำแสงซึ่งออกจากแหล่งกำเนิดตกกระทบร่องเหล่านี้ หากร่องกับแสงทำมุมได้พอดีแสงจะถูกส่งผ่านไปยังเครื่องวัด ดังนั้นจะได้สัญญาณเข้าเครื่องวัด (Detector) เพื่อใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของพลาสมา หัววัดสำหรับวัดความเข้มแสงจากการแทรกสอดนั้นผลิตจาก AlGaIn/GaN-HEMT ซึ่งเป็นวัสดุที่ไวต่อเลเซอร์ในย่านความยาวคลื่น 0.337 mm [14]

การวัดความหนาแน่นของอิเล็กตรอนนั้นจำเป็นต้องการควบคุมการทำงานของเครื่องโทคาแมค เพราะความหนาแน่นของอิเล็กตรอนบ่งบอกว่าพลาสมาเกิดหรือไม่ เฟสแรกของการเดินเครื่อง TT-1 จะมีการควบคุมค่าความหนาแน่นให้อยู่ในช่วง $0.1 - 2.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ซึ่งควบคุมโดยการส่งค่าความหนาแน่นที่ได้จากระบบวัดนี้ไปยังระบบเดิมเพื่อเพิ่มเพื่อควบคุมการเดินเครื่องให้กับเครื่อง TT-1 ส่งผลให้สามารถควบคุมความหนาแน่นของพลาสมาได้

ระบบถ่ายภาพความเร็วสูง

กล้องถ่ายภาพความเร็วสูงเป็นระบบวัดที่ใช้การตรวจจับการปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านตามองเห็นจากพลาสมาภายในห้องสุญญากาศ โดยแผนการติดตั้งกล้องถ่ายภาพจะแบ่งออกเป็น 3 ชุด ซึ่งมีตำแหน่งในการติดตั้งที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 9 การเดินเครื่องในเฟสที่ 1 ของเครื่องโทคาแมค TT-1 จะติดตั้งชุดที่ 1 ซึ่งใช้สำหรับการถ่ายภาพพฤติกรรมของพลาสมาบริเวณที่มีการติดตั้งอุปกรณ์จำกัดขนาดพลาสมาในแนวโพลอยดอล (Poloidal Limiter) ภาพที่ได้จะแสดงให้เห็นตำแหน่งและขนาดของพลาสมาที่เกิดขึ้นภายในห้องสุญญากาศ

ในขณะเดียวกันยังจะช่วยในการสังเกตการปลดปล่อยสารไม่บริสุทธิ์ (Impurities) และฝุ่น (Dust) จากอุปกรณ์จำกัดขนาดพลาสมาในแนวโพลอยดอล เพื่อประเมินปริมาณสารไม่บริสุทธิ์ที่รับได้ในการดำเนินการเครื่องโทคาแมค ซึ่งสามารถนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากหัววัดสนามแม่เหล็ก ข้อมูลตำแหน่งและขนาดของพลาสมาที่ได้จากการเดินเครื่องนั้น ก็จะถูกนำมาใช้ในการออกแบบขดลวดบ่อนกลับเพื่อใช้ในการควบคุมพลาสมาให้มีความเสถียรมากขึ้น

การวิเคราะห์ผลข้อมูลจากการทดลอง

ปัจจุบันการทดลองที่เกี่ยวข้องกับระบบของเครื่องโทคาแมคจะทำการเดินเครื่องในลักษณะของพัลส์ ซึ่งมีความยาวของแต่ละครั้งในการเดินเครื่อง จะมีความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับเครื่องโทคาแมคแต่ละเครื่องและวัตถุประสงค์ในการเดินเครื่องแต่ละครั้ง การวิเคราะห์ผลข้อมูลของเครื่องโทคาแมคจึงมีความแตกต่างกันตามวัตถุประสงค์ของการเดินเครื่อง โดยเครื่องโทคาแมคขนาดใหญ่จะมีการวัดและวิเคราะห์ผลข้อมูลจำนวนมากเพื่อใช้ในการควบคุมเครื่องฯ แบบ Real-Time ข้อมูลทั้งหมดจะมีการจัดเก็บไว้เพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงลึกเพื่อทำความเข้าใจและวางแผนการทดลองในครั้งต่อไป สำหรับเครื่อง TT-1 จะมีการวัดและวิเคราะห์ข้อมูลความหนาแน่นของพลาสมาแบบ Real-Time เพื่อนำข้อมูลดังกล่าวมาปรับเปลี่ยนปริมาณของก๊าซที่จ่ายเข้าสู่ระบบสุญญากาศซึ่งจะเป็นตัวแปรหลักในการควบคุมความหนาแน่นของพลาสมา ข้อมูลอื่นๆ เช่น ข้อมูลจากระบบวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีการเก็บบันทึกเพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ผลการเดินเครื่อง เช่น การวิเคราะห์ผลเพื่อหาตำแหน่งของพลาสมา กระแสของพลาสมา และความไม่เสถียรของพลาสมา เป็นต้น ข้อมูลที่ได้จะใช้ในการวางแผนเพื่อการปรับค่าของระบบต่างๆ เพื่อใช้สำหรับการเดินเครื่องโทคาแมคในรอบต่อไป

การสร้างความร่วมมือและโอกาสในการร่วมวิจัยกับเครื่องโทคาแมคของไทย

การศึกษาวิจัยและพัฒนาที่เกี่ยวข้องกับเครื่องโทคาแมคนั้นมีความซับซ้อนและต้องอาศัยเทคโนโลยีเฉพาะทางซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาเรียนรู้และสร้างประสบการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ ประกอบ และติดตั้งระบบต่างๆ รวมถึงการเดินเครื่องโทคาแมค ระบบต่างๆ ของเครื่องโคคาแมค TT-1 ก็เช่นเดียวกันซึ่งจำเป็นต้องมีผู้เชี่ยวชาญที่คอยวิเคราะห์ข้อมูล ติดตามการเปลี่ยนแปลงรวมถึงการซ่อมบำรุงเพื่อให้สามารถทำงานได้อย่างปกติ การมีส่วนร่วมของอาจารย์ นักวิจัย และนักศึกษาจากภาคส่วนต่างๆ เพื่อร่วมศึกษาและเรียนรู้ สร้างความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ อันจะนำไปสู่ความร่วมมือในการพัฒนาระบบต่างๆ เพื่อขยายขีดความสามารถของเครื่องโทคาแมค TT-1 และร่วมกันออกแบบ พัฒนาเครื่องโทคาแมคเครื่องต่อไปของไทย

บทสรุป

ระบบวัดสำหรับเครื่องโทคาแมคนั้นประกอบด้วยอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการเดินเครื่องและการออกแบบการทดลองของเครื่องโทคาแมคแต่ละเครื่อง สำหรับเครื่องโทคาแมค TT-1 ที่พัฒนาขึ้นในประเทศไทยนี้ มีการติดตั้งระบบวัดจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มนั้นคือ 1) ระบบวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้า เน้นการตรวจวัดสมบัติเฉพาะของพลาสมาที่ส่งผลให้เกิดการปลดปล่อย หรือการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กของเครื่อง 2) ระบบวัด HCN Laser Interferometer สำหรับวัดความหนาแน่นของพลาสมาที่เกิดขึ้นเพื่อนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้สำหรับการควบคุมความหนาแน่นของพลาสมาในเครื่องฯ แบบ Real-time ผ่านระบบการจ่ายเชื้อเพลิงของเครื่อง 3) ระบบถ่ายภาพความเร็วสูงมุ่งเน้นการตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์จำกัดขนาดพลาสมาในแนวโพลอยดอล เพื่อควบคุมพลาสมาภายในเครื่องฯ ไม่ให้มีการสัมผัสหรือมีการสัมผัสน้อยที่สุดกับผนังของห้องสุญญากาศโดยตรง ลดความเสียหายต่อระบบควบคุมสุญญากาศของเครื่องได้

กิตติกรรมประกาศ

การพัฒนางานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับพลาสมาจำเป็นต้องใช้งบประมาณจำนวนมาก เนื่องจากเป็นองค์ความรู้ใหม่ยังมีการศึกษาวิจัยและอุปกรณ์ส่วนใหญ่จะถูกออกแบบมาเฉพาะต่อระบบของเครื่องโทคาแมคแต่ละเครื่อง งบประมาณสำหรับการพัฒนาเครื่องโทคาแมค TT-1 ได้รับการสนับสนุนจากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) และงบประมาณการวิจัยประจำปีของรัฐบาลผ่านสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (องค์การมหาชน) และขอขอบคุณสำหรับการบริจาคเครื่อง HT-6M จากสถาบัน ASIPP สาธารณรัฐประชาชนจีน ขอขอบคุณนักวิจัย เจ้าหน้าที่เทคนิคของสถาบัน ASIPP สำหรับการถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีโทคาแมคในประเทศไทย อนึ่งบทความนี้ได้รับการตีพิมพ์สืบเนื่องจากการนำเสนอในงาน SPC2021 เพื่อประชาสัมพันธ์และเผยแพร่ความคืบหน้าของการดำเนินงานด้านโทคาแมคในประเทศไทย โดยเนื้อหาของบทความส่วนหนึ่งได้มีการเผยแพร่ในวารสาร Plasma and Fusion Research [3] ที่ได้รับการตีพิมพ์ และได้รับการยินยอมให้แปล ดัดแปลงและตีพิมพ์ซ้ำจากสำนักพิมพ์แล้ว

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Chen, J. Xie, Y. Huo, L. Li, Q. Zhao, G. Zhang, M. Wang, D. Guo, Q. Guo, P. Qin, G. Li, H. Fan, C. Deng, X. Tong and R. Huang, "Global structure of MHD modes in tokamaks", Nuclear Fusion, 30(11), 2271-2284 (1990).
- [2] B. Doshi and D.C. Reddy, "Safety and environment aspects of Tokamak-type fusion power reactor: An overview", Journal of Physics: Conference Series, 823(1), 012044 (2017).
- [3] A. Tamman and N. Somboonkittichai, "The plan of diagnostic systems for the first phase of Thailand Tokamak 1", Plasma and Fusion Research, 15, 2402067 (2020).
- [4] HT-6M TEAM, "Engineering aspects of the Ht-6M Tokamak", Fusion Technology, 9(3), 476-480 (1986).
- [5] L. Giannone, R.C. Cross and I.H. Hutchinson, "Internal magnetic probe measurements of MHD activity and current profiles in a Tokamak", Nuclear Fusion 27, 2085-2099 (1987).
- [6] A. Eydan, B. Shirani, Y. Sadeghi, M.A. Asgarian and E. Noori, "Design and fabrication of an optimized Rogowski coil for plasma current sensing and the operation confidence of Alvand Tokamak", Nuclear Engineering and Technology, 52(11), 2535-2542 (2020).
- [7] J.G. Bak, S. G. Lee and H.S. Kim, "Diamagnetic loop measurement in Korea Superconducting Tokamak Advanced Research machine", Review of Scientific Instruments, 82(6), 063504 (2011).
- [8] B. Shen, B.N. Wan and X.Q. Zhang, "Diamagnetic measurement on HT-7 superconducting Tokamak", Fusion Engineering and Design, 70(4), 311-318 (2004).
- [9] S.K. Saha, R. Kumar and A.K. Hui, "Measurement of plasma diamagnetism in the SINP Tokamak by a flux loop system inside the vacuum vessel", Review of Scientific Instruments, 72(11), 4289-4291 (2001).
- [10] D. Trembach, C. Xiao, M. Dreval and A. Hirose, "Diamagnetic measurements in the STOR-M Tokamak by a flux loop system exterior to the vacuum vessel", Review of Scientific Instruments, 80(5), 053502 (2009).

- [11] S. Kumar, R. Jha, P. Lal, C. Hansaliya, M.V. Gopalkrishna, S. Kulkarni, S. Kumar, R. Jha, P. Lal, C. Hansaliya, and M.V. Gopalkrishna, “Diamagnetic flux measurement in Aditya Tokamak”, Review of Scientific Instruments, 81, 123505 (2010).
- [12] Q. Xu, X. Gao, Y. Jie, H. Liu, N. Shi, Y. Cheng, and X. Tong, “HCN laser interferometer on the EAST superconducting Tokamak”, Plasma Science and Technology, 10(4), 519-521 (2008).
- [13] L. Gao, G. Zhuang, Z.J. Wang, W. Chen, J. Chen, Q. Li, and Y. Liu, “Recent progress of the HCN interferometer on J-TEXT Tokamaka”, Review of Scientific Instruments, 83(10), 10E303 (2012).
- [14] I. Mahaboob, S.W. Novak, E. Rocco, K. Hogan and F. Shahedipour-Sandvik, “Investigation of the electrical behavior of AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors grown with underlying Ga_N:Mg layer”, Journal of Vacuum Science and Technology B, 38(6), 062204 (2020).