

ภาพรวมของระบบการเก็บข้อมูลและควบคุมพลาสมาของ เครื่องโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย An Overview of Data Acquisition and Plasma Control System of Thailand Tokamak I

พลิชฐ์ วงษ์หาบาศย์*, สมศักดิ์ แดงต๊ับ, นพพร พูลยรัตน์, กำธร สายดาราสมุทร, จิราภรณ์ พรหมพิงค์,
อาทลี ตำหมั่น, เกวลี นิลกำแหง และ สืบศักดิ์ สุขแสงพนมรุ่ง

Pasit Wonghabut*, Somsak Dangtip, Nopporn Poolyarat, Kamtorn Saidarasamoot,
Jiraporn Promping, Arlee Tamman, Kewalee Nilgumhang and Suebsak Suksaengpanomrung
สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120
Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization)
Ongkharak District, Nakhon Nayok Province 26120

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

วันที่รับบทความ: 28 พฤษภาคม 2564, วันแก้ไขบทความ: 10 สิงหาคม 2564, วันตอบรับบทความ: 19 สิงหาคม 2564

Received: 28th May 2021, Revised: 10th August 2021, Accepted: 19th August 2021

บทคัดย่อ

Thailand Tokamak 1 (TT-1) หรือเครื่องโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย ได้รับการติดตั้งโดยสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ณ อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก ในระยะเริ่มต้นของการเดินเครื่องโทคาแมค คาดว่าจะสามารถผลิตกระแสพลาสมา ขนาด 50 kA โดยมีความหนาแน่น 10^{18} m^{-3} ภายใต้สนามแม่เหล็กขนาด 1.5 T การปล่อยพลาสมาโดยปกติในการทดลอง จะคงอยู่ได้นานประมาณ 100 ms สำหรับการยิงแต่ละครั้ง และยิงจำนวนไม่กี่ร้อยนัดต่อวัน การเตรียมความพร้อมของเครื่อง การตรวจสอบก่อนการทดลอง ระหว่างการทดลอง และหลังการปล่อยพลาสมาจึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ในระหว่างการปล่อยพลาสมาจะมีการเปิดใช้งานระบบวินิจฉัยพลาสมา (Diagnostics) บางส่วน สัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่แตกต่างกัน ไม่ว่าจะเป็นรูปแบบการเตรียมการตรวจสอบ การควบคุม หรือการวินิจฉัยชุดข้อมูลจำนวนมากที่มีอัตราการทำซ้ำในระดับปานกลาง และได้มาจากระบบควบคุมพลาสมา (Plasma control system: PCS) บทความนี้กล่าวถึงรายละเอียดของการเก็บข้อมูล (Data acquisition: DAQ) การออกแบบในปัจจุบัน DAQ การเก็บข้อมูลสามารถรับสัญญาณมากกว่า 356 ช่องสัญญาณ ประกอบด้วยช่องรับสัญญาณพื้นฐานของ TT-1 กว่า 192 ช่องสัญญาณ ในช่วงความถี่ 10-250 kHz สำหรับข้อมูลการวินิจฉัยพลาสมา รับข้อมูลมากกว่า 5 GB สำหรับการจัดเก็บในหนึ่งวัน รวมพื้นที่เก็บข้อมูลมากกว่า 500 GB สำหรับการใช้งานหนึ่งปี

(ประมาณ 100 วัน) และต้องรับสัญญาณจากระบบวิเคราะห์คุณสมบัติของพลาสมาด้วยหัววัดแสงเมียร์ อีกกว่า 164 ช่องสัญญาณ ซึ่งจะให้เกิดข้อมูลรวมทั้งสองระบบมากกว่า 10 GB ในหนึ่งวัน และมากกว่า 1000 GB ในหนึ่งปี

คำสำคัญ: เครื่องโทคาแมค, ระบบการเก็บข้อมูล, การควบคุมพลาสมา, โทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย

Abstract

The first Tokamak in Thailand is being setup by Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT) at the Ongkharak site, Nakorn Nayok. In the initial phase of Thailand Tokamak, plasma current of 50 kA, with density of 10^{18} m^{-3} under the magnetic field of 1.5 Tesla is expected. Plasma discharge of typically 100 ms is foreseen for each shot and a few hundred shots daily. Machine preparation and monitoring prior to, during and after plasma discharge are thus very important. Also, during plasma discharge, a few plasma diagnostic systems (DAQ) are activated. Signals from different equipment either for preparation, monitoring, control or diagnostic form a considerably large set of data at a moderate repetition rate can be acquired by a plasma control system (PCS). In this contribution, details of DAQ, will be discussed. The current design of DAQ can accommodate more than 356 data signals, including 192 channels with 10-250 kHz for diagnostic, which may lead acquiring 5 GB data on daily basis and over 500 GB storage for one hundred days per year operation. An additional of 164 channels is expected from Langmuir probe (LP) of the diagnostic system. The two signal paths will generate data of more than 10 GB per day or 1000 GB storage for one-year operation.

Keywords: Tokamak, Data Acquisition, Plasma Control, Thailand Tokamak 1

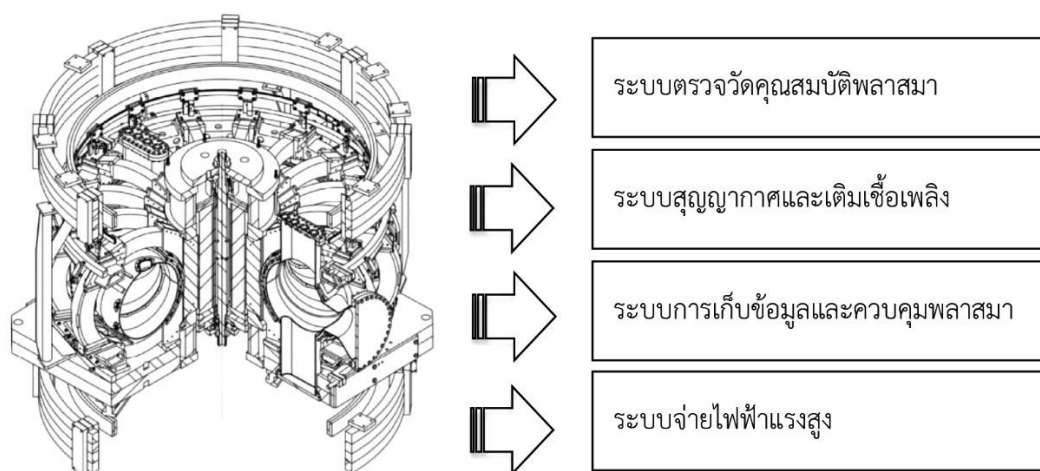
บทนำ

การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีด้านฟิวชัน นั้นถูกจัดลำดับความสำคัญให้อยู่ระดับแนวหน้า (Frontier research) โดยได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางจากประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก เช่น สหรัฐอเมริกา เยอรมัน ฝรั่งเศส ญี่ปุ่น จีน และอื่น ๆ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยนั้น สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) หรือ สทน. ได้ศึกษาความรู้พื้นฐานด้านฟิวชันจากเครื่องโทคาแมคที่ได้รับมอบอุปกรณ์บางส่วนของเครื่องโทคาแมค HT-6M จากสาธารณรัฐประชาชนจีน ด้วยเป้าหมายที่จะเป็นศูนย์พัฒนาการเรียนรู้ให้กับนักวิจัยของไทย และเป็นก้าวแรกสู่การทำวิจัยเกี่ยวกับพลาสมาและฟิวชันในเชิงวิศวกรรม

ระบบต่าง ๆ ของเครื่องโทคาแมค ได้รับการศึกษาวิจัยและออกแบบเพื่อกำหนดคุณลักษณะของเครื่อง ภายใต้คำแนะนำของนักวิจัยจากสถาบันฟิสิกส์พลาสมาแห่งสาธารณรัฐประชาชนจีน (Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences: ASIPP) โดยเครื่อง Thailand Tokamak 1 หรือ TT-1 จะประกอบด้วย 4 ระบบหลัก ได้แก่ ระบบตรวจวัดคุณสมบัติของพลาสมา ระบบสุญญากาศและเติมเชื้อเพลิง ระบบ

การเก็บข้อมูลและควบคุมพลาสมา (Data acquisition and plasma control system: DAQ & PCS) และระบบจ่ายไฟฟ้าแรงสูง [1,2] ดังแสดงในรูปที่ 1

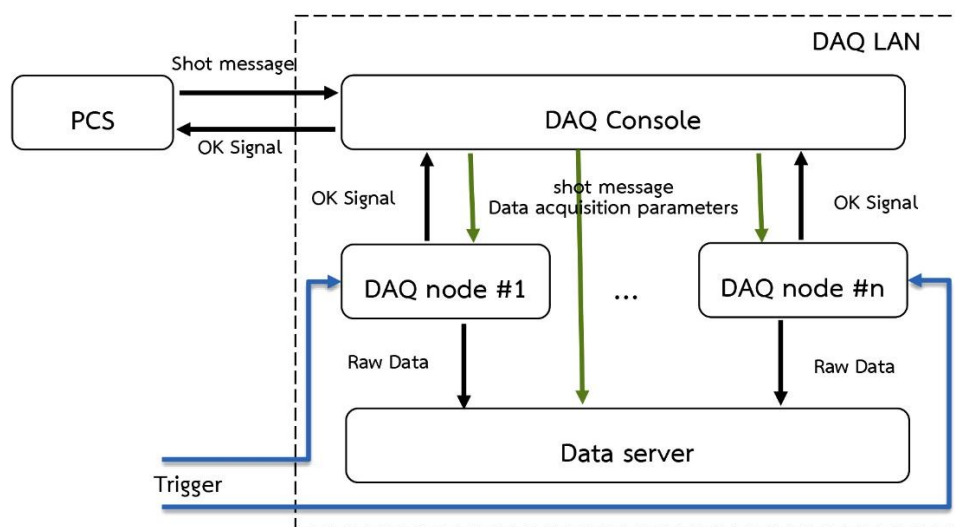
ระบบที่สำคัญระบบหนึ่งที่จะต้องเรียนรู้และพัฒนาขึ้นมาใหม่ เพื่อให้เครื่องโทคาแมค มีความสามารถเพียงพอที่จะทำการทดลอง คือ ระบบการเก็บข้อมูลและควบคุมพลาสมา ทั้งนี้ องค์ประกอบที่สำคัญของระบบการเก็บข้อมูลและควบคุมพลาสมาสำหรับเครื่องโทคาแมค โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วย Interlock system, Data server and network, DAQ system, Triggering and timing system และ Vacuum and power supply interface โดยในแต่ละระบบจะมีการทำงานที่แตกต่างกัน มีความซับซ้อนและประกอบด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงมากมายหลายด้าน บทความนี้ จะกล่าวถึงภาพรวมของการเก็บข้อมูลและควบคุมพลาสมาของเครื่องโทคาแมค ที่ออกแบบและพัฒนา ร่วมกับสถาบัน ASIPP เพื่อให้สามารถเดินเครื่องและทำให้เกิดพลาสมาครั้งแรกในไทยได้



รูปที่ 1 เครื่อง TT-1 ประกอบด้วยระบบหลัก 4 ระบบ

การเก็บข้อมูลของเครื่องโทคาแมค

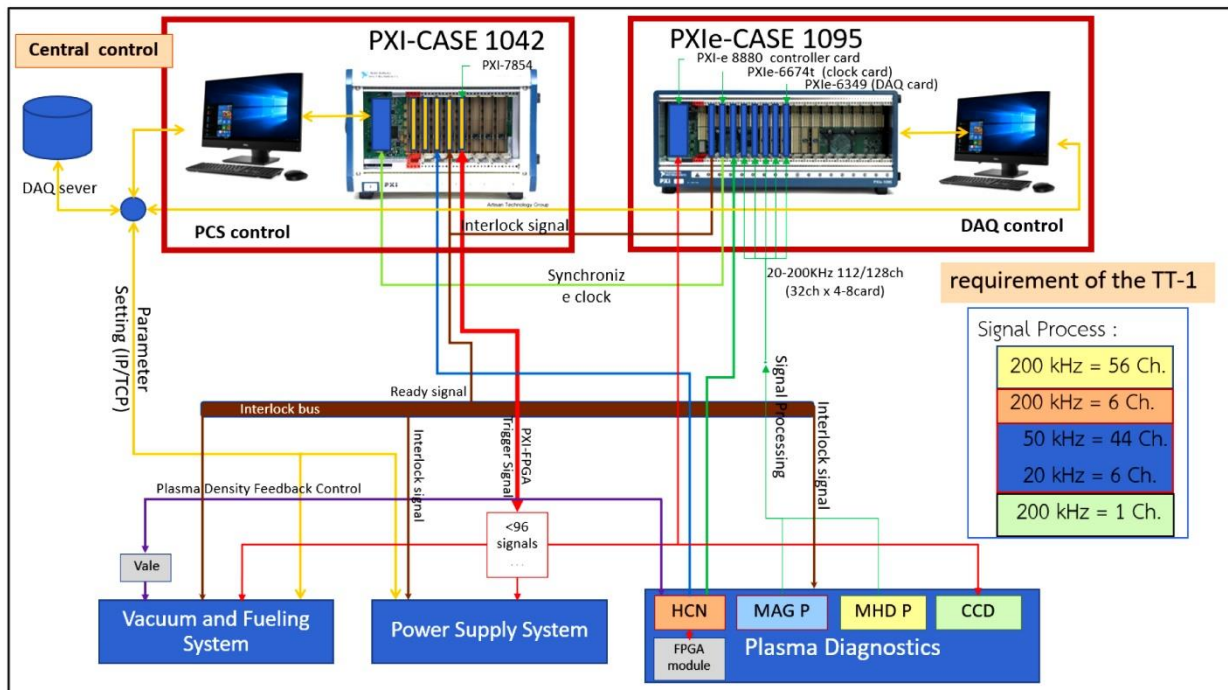
ระบบ DAQ เป็นระบบกระจาย (Distributed system) มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ DAQ console, DAQ nodes, และ Data server เป็นต้น ซึ่งในแต่ละส่วนนั้นจะมีการเชื่อมโยงของข้อมูล และลำดับการทำงานของแต่ละส่วนดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ไดอะแกรมของ TT-1 Data acquisition system

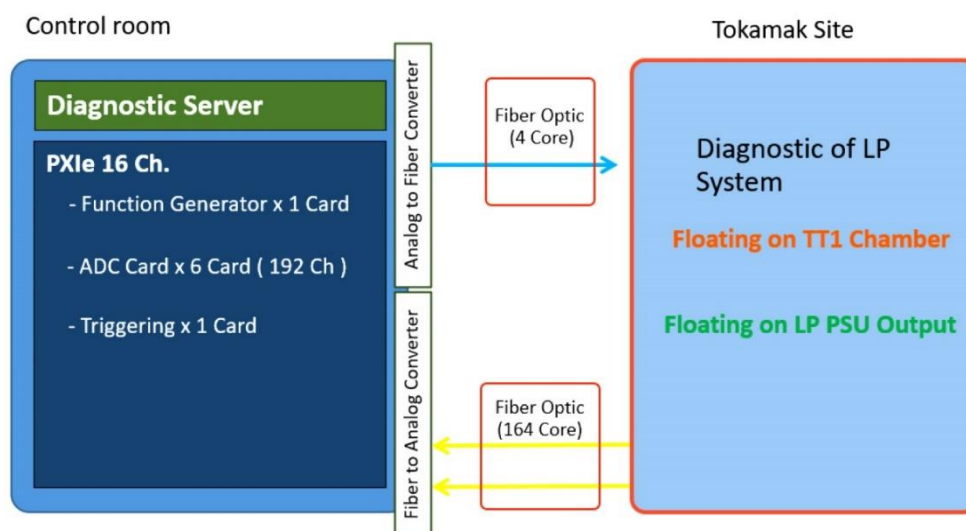
DAQ console ใช้เพื่อสื่อสารกับระบบควบคุมกลาง TT-1 หรือ (Central control system: CCS) ทำหน้าที่ตั้งค่าพารามิเตอร์ทั้งหมดของระบบเก็บข้อมูลและรับ Shot message จาก CCS โดยพารามิเตอร์และข้อมูล Shot message จะประกอบด้วย Shot number, Discharge pulse length, Sample frequency, Trigger type และ Signal parameters ฯลฯ และ DAQ console จะส่งข้อมูลทั้งหมดไปยัง DAQ node และ Data server และควบคุมการถ่ายโอนข้อมูล

DAQ node ใช้เพื่อรับข้อมูลจากระบบวินิจฉัยต่าง ๆ ซึ่งมีประเภทข้อมูลที่แตกต่างกัน โดย DAQ node แต่ละโหนดจะทำงานอย่างเป็นอิสระ กระจายไปทำงานในสถานที่ต่าง ๆ และเตรียมพร้อมรอสัญญาณ Trigger จาก CCS เพื่อเริ่มกระบวนการเก็บข้อมูล และในขณะเดียวกัน ข้อมูลดิบ (Raw Data) จะถูกโอนไปยัง Data server โดย DAQ node ได้ออกแบบให้มีช่องสัญญาณรองรับการรับข้อมูลทั้งหมดมากกว่า 356 ช่องสัญญาณ ประกอบด้วยช่องรับสัญญาณพื้นฐานจาก TT-1 กว่า 192 ช่องสัญญาณ [3] แต่ละช่องสัญญาณมีความสามารถในการรับสัญญาณแบบสุ่มด้วยความถี่ในช่วง 10-250 kHz และได้ออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ PCI Extensions for Instrumentation (PXI) เป็นอุปกรณ์หลักในการควบคุมการทำงาน มีการเชื่อมประสานกันระหว่างอุปกรณ์จากระบบต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 การออกแบบระบบการเก็บข้อมูลและควบคุมพลาสมา ของเครื่อง TT-1 ให้สามารถรองรับสัญญาณได้มากกว่า 192 ช่องสัญญาณ

นอกจากนี้ได้ออกแบบให้รับสัญญาณจากหัววัดแลงเมียร์ (Langmuir probe (LP) system) ซึ่งประกอบด้วย สัญญาณจาก Floating on TT-1 chamber และสัญญาณจาก Floating on LP PSU output อีกกว่า 164 ช่องสัญญาณ ดังแสดงการออกแบบในรูปที่ 4



รูปที่ 4 การออกแบบการรับสัญญาณข้อมูลของเครื่อง TT-1 ให้สามารถรองรับสัญญาณ สำหรับ Diagnostic of LP System ได้มากกว่า 164 ช่อง

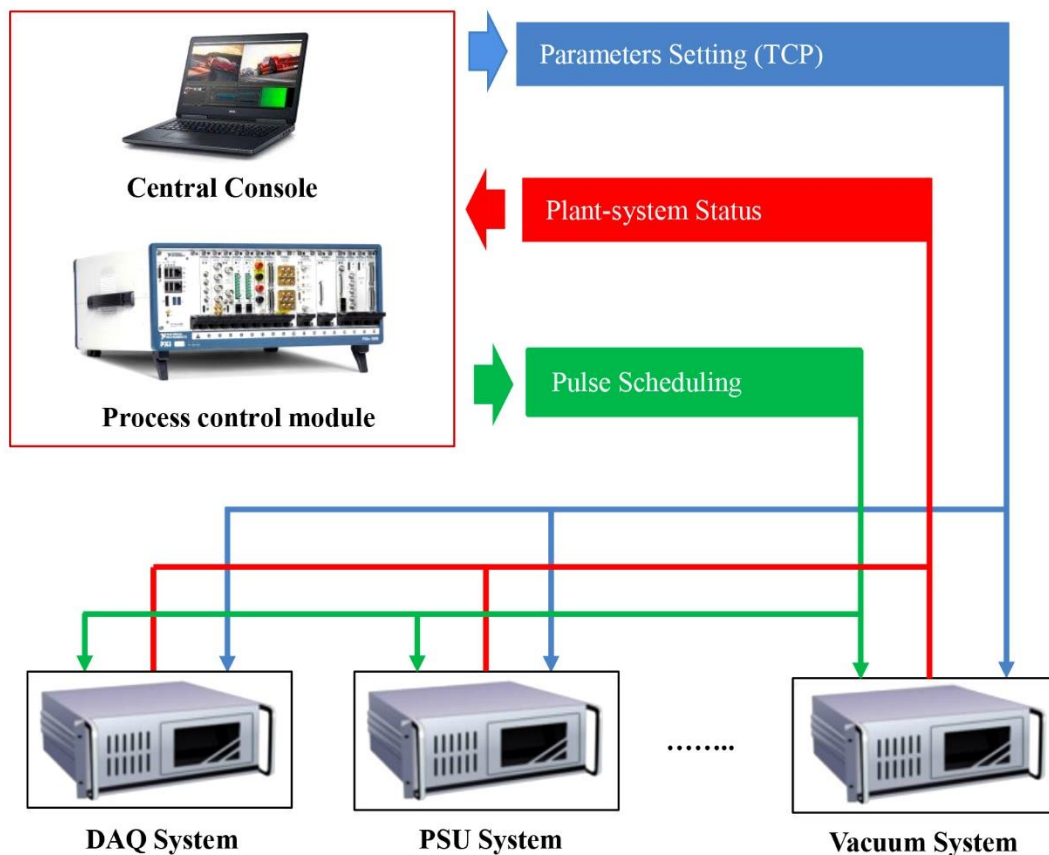
Data server ใช้เพื่อเก็บข้อมูลดิบทั้งหมดจากโหนดทุกตัว โดยผู้ใช้สามารถเข้าถึงข้อมูลการทดลองผ่าน Data server ได้

ในการเข้าถึงข้อมูลดิบที่บันทึกลงใน Data sever สามารถเข้าถึงภายในด้วย Format แบบพิเศษ โดยสามารถใช้ MDSPLUS ในการเข้าถึงได้ [4] และผู้ทดลอง สามารถใช้เครื่องมือต่าง ๆ เช่น MATLAB เพื่อเข้าถึงและทำการวิเคราะห์ข้อมูลได้

การควบคุมพลาสมาของเครื่องโทคาแมค

สำหรับระบบควบคุมของเครื่องโทคาแมค TT-1 นั้น [5] ได้พัฒนามาจากระบบควบคุมเครื่อง (Experimental advanced superconducting Tokamak: EAST) ระบบการควบคุมการทำงานของเครื่องโทคาแมค และการควบคุมพลาสมาถูกควบคุมกันเป็นระบบเดียวกันในระบบควบคุมพลาสมา (Plasma control system: PCS) เนื่องจากระบบของเครื่องโทคาแมค TT-1 มีความซับซ้อนไม่มาก ระบบ PCS สำหรับ TT-1 ได้รับการพัฒนาขึ้นสำหรับควบคุมระบบย่อยต่าง ๆ ให้ทำงานกันได้อย่างสอดคล้องในการควบคุม Plasma discharge ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมของเครื่อง TT-1 จึงมีการเชื่อมโยง และโครงสร้างระบบควบคุมในภาพรวมดังแสดงในรูปที่ 5

ระบบควบคุมจะมีฟังก์ชันหลัก ๆ ดังนี้ 1) Human machine interface ดำเนินการในการตั้งค่าพารามิเตอร์สำหรับการทดลองจากห้องควบคุม 2) การตั้งค่าลอจิกการควบคุมกระบวนการของพาวเวอร์ซัพพลายเพื่อควบคุม Plasma discharge 3) การส่ง Trigger signal ไปยังระบบย่อยเช่น ระบบสุญญากาศ, DAQ 4) การตรวจสอบสถานะ Discharge และการตรวจสอบสัญญาณความปลอดภัย (Safety signal) 5) การให้สัญญาณกับวาล์วสำหรับการฉีดก๊าซ 6) Feedback control plasma การควบคุมตำแหน่งในแนวระนาบ (Horizontal position) และความหนาแน่น โดยฟังก์ชันทั้ง 6 นี้อยู่ภายใต้ระบบย่อย 3 ระบบ ได้แก่ ระบบคอนโซลกลาง (Central console), โมดูลควบคุมกระบวนการ (Process control module) และระบบเครือข่าย (Network)



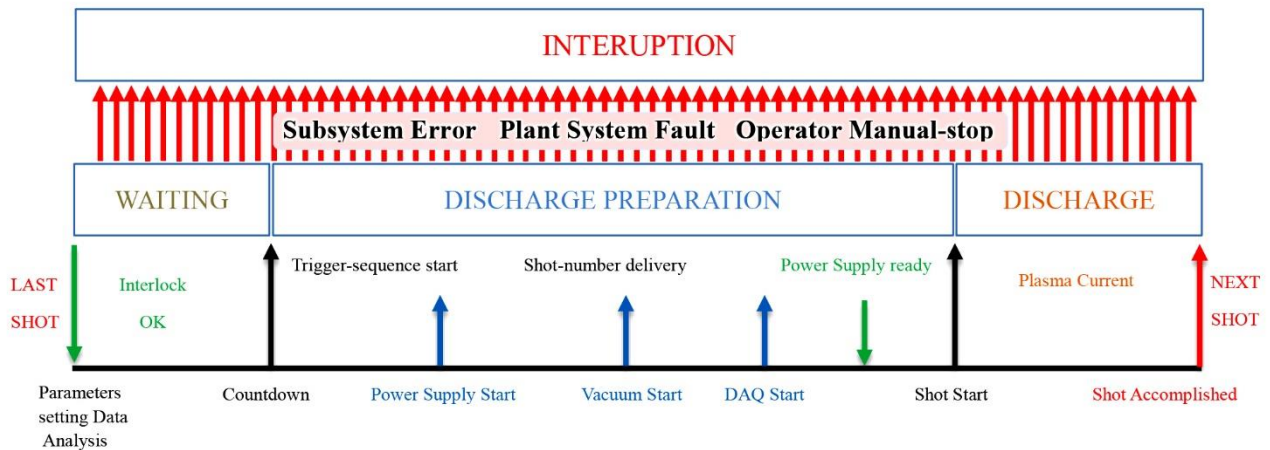
รูปที่ 5 โครงสร้างระบบควบคุมพลาสมาของเครื่อง TT-1

คอนโซลกลาง (Central console) เป็นส่วนต่อประสานระหว่างเครื่องจักรกับมนุษย์ (Human machine interface: HMI) สำหรับผู้ปฏิบัติงาน (Operator) ในห้องควบคุมการทดลอง HMI ของคอนโซลกลางของเครื่องโทคาแมค TT-1 มีความเป็นมิตรสำหรับผู้ใช้งานในการควบคุมระบบย่อยจากระยะไกลในช่วง Discharge campaign ทั้งหมด

ข้อมูลเกี่ยวกับช็อต (Shot) ซึ่งรวมถึง Shot number, Current shot number, ระบบย่อยที่สำคัญต่าง ๆ และการนับถอยหลังจะถูกแสดงในอินเทอร์เฟซหลัก ด้วยคอนโซลกลาง ผู้ปฏิบัติงานจะสามารถตั้งค่าคำสั่งควบคุมและค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ล่วงหน้าได้ในแฟ้มเมนูพารามิเตอร์ทั้งหมด ตัวอย่างของพารามิเตอร์ที่สามารถตั้งค่าได้ ได้แก่ การตั้งค่าพารามิเตอร์ระบบย่อย การตั้งค่าเวลา ฯลฯ โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ จะถูกถ่ายโอนผ่านเครือข่ายไปสู่ระบบย่อยต่าง ๆ

โมดูลควบคุมกระบวนการ (Process control module) เป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่ระบบหนึ่งในระบบควบคุมพลาสมาของเครื่อง TT-1 โดยโมดูลควบคุมกระบวนการมีฟังก์ชันการควบคุมหลักได้แก่ [6] การตั้งคาลอจิกการควบคุมกระบวนการ การตรวจสอบสถานะการ Discharge การส่งออกลำดับตารางเวลาของสัญญาณ Pulse ที่กำหนดไว้ล่วงหน้า การตรวจสอบสัญญาณความปลอดภัย การตอบกลับของฟิลด์ในแนวตั้ง และการควบคุมความหนาแน่น เป็นต้น

ฟังก์ชันทั้งหมดใช้งานในอุปกรณ์เกรดอุตสาหกรรม PXI และ Field programmable gate array (FPGA) เนื่องจากตั้งอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอย่างรุนแรงและต้องการการควบคุมระบบย่อยที่มีความแม่นยำสูง



รูปที่ 6 โมดูลควบคุมกระบวนการตลอดช่วงกระบวนการ Discharge

สำหรับการควบคุมกระบวนการจะทำงานตามลำดับเวลาที่ได้ออกแบบไว้ดังแสดงในรูปที่ 6 และมีการทำงาน แบ่งเป็น 4 State ดังนี้

Waiting: หลังจากการสิ้นสุด Shot ครั้งล่าสุด ระบบควบคุมกระบวนการจะทำการรอสัญญาณ OK จากระบบย่อยทั้งหมด

Discharge preparation: หลังจากระบบควบคุมกระบวนการได้สัญญาณ OK จากทุกระบบย่อยแล้ว โมดูลควบคุมกระบวนการจะทำการนับถอยหลัง และระบบค่าต่าง ๆ ของกระบวนการ Discharge จะถูก Setup ขึ้นตามลำดับ

Discharge: เกิดการปล่อยประจุจากตัวเก็บประจุ ซึ่งทำให้เกิดกระแสพลาสมา (Plasma current)

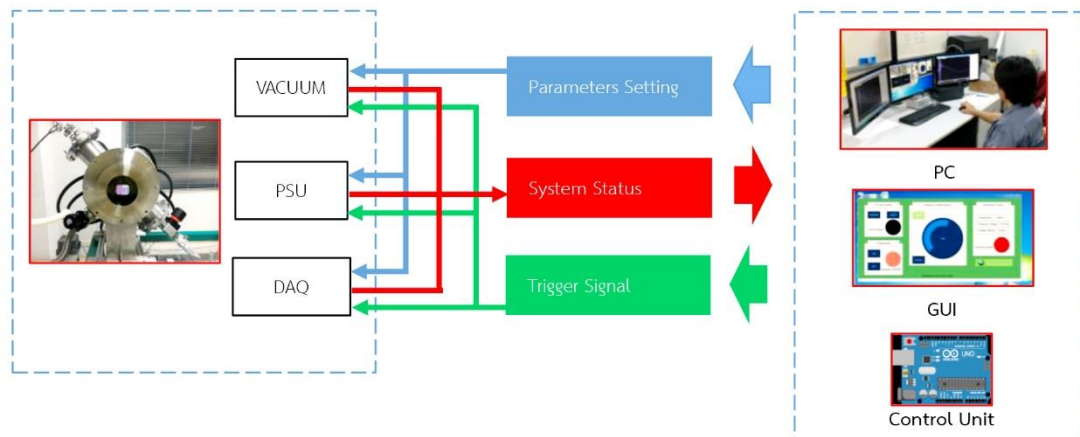
Interruption: ในระหว่างการ Discharge ระบบย่อยต่าง ๆ จะทำการตรวจสอบตัวเอง เมื่อเกิดการตรวจพบความผิดพลาด (Error) ระบบจะหยุดระบบย่อยต่าง ๆ ของการ Discharge

ระบบเครือข่าย (Network) การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ต่าง ๆ จะใช้ระบบเครือข่ายท้องถิ่น LAN (Local Area Network) และจะใช้การสื่อสารแบบใยแก้วนำแสง (Fiber optic) ในการส่งสัญญาณที่มีความเสถียรและต้องการความเร็วสูง เช่น สัญญาณ Trigger เป็นต้น

การพัฒนาระบบควบคุมของเครื่องพลาสมาฟอกส์ Thailand plasma focus 1 (TPF-1) เพื่อเตรียมความพร้อมสำหรับเครื่องโทคาแมค TT-1

ในขณะที่การพัฒนาระบบย่อยต่าง ๆ ของเครื่องโทคาแมคกำลังดำเนินการตามแผนนั้น นักวิจัยของ สทท. ได้พัฒนาระบบควบคุมของเครื่องพลาสมาฟอกส์ควบคู่กันไปด้วย การออกแบบและพัฒนาระบบนั้น ต้องการให้ผู้ใช้งานสามารถสื่อสารกับเครื่องคอมพิวเตอร์โดยภาพ หรือ Graphical user interface (GUI) และเขียนโปรแกรม

โดยใช้ภาษาจาวา (JAVA) ใช้หน่วยประมวลผลไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เรียกว่า Arduino และโมดูลสำเร็จรูปต่าง ๆ เป็นส่วนประสานระหว่างเครื่องคอมพิวเตอร์กับระบบย่อยต่าง ๆ ของเครื่องพลาสมาไฟกัส การออกแบบระบบควบคุมเครื่องพลาสมาไฟกัส ดังแสดงในรูปที่ 7 ได้ร่วมพัฒนากับนักศึกษาฝึกงานจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และได้ร่วมทดสอบการทำงานโดยนักศึกษาจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์



รูปที่ 7 โครงสร้างระบบควบคุมเครื่องพลาสมาไฟกัส

เครื่องพลาสมาไฟกัส ใช้ศึกษาคุณสมบัติเบื้องต้นของพลาสมา และสามารถนำไปสู่องค์ความรู้ด้านฟิวชันในอนาคตได้ ดังนั้น จึงมีนิสิต นักศึกษา จากหลาย ๆ สถาบันการศึกษา ที่สนใจด้านพลาสมาเข้ามาร่วมศึกษา และทำงานวิจัยอย่างไม่ขาดสาย อีกทั้งยังได้รับความไว้วางใจจากมหาวิทยาลัยวาเซดะ (Waseda university) ประเทศญี่ปุ่น ได้ส่งนักศึกษามาฝึกงาน ณ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีนิวเคลียร์ สทท. จึงได้มีการสาธิตการทำงานของเครื่องพลาสมาไฟกัสโดยนักศึกษาฝึกงาน ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การนำเสนอหลักการทำงานของเครื่องพลาสมาไฟกัส ของนักศึกษาฝึกงานจากมหาวิทยาลัยวาเซดะ

บทสรุป

ในปัจจุบัน เทคโนโลยีฟิวชันกำลังเป็นที่สนใจในหลาย ๆ ประเทศทั่วโลก ดังนั้นประเทศไทยจึงต้องสร้างองค์ความรู้เริ่มต้น การพัฒนานักวิจัยและบุคลากรให้มีความรู้เท่าทันกับอารยประเทศ การศึกษาคุณสมบัติจากเครื่องโทคาแมค TT-1 นั้น สามารถศึกษาได้หลายกลุ่ม อาทิเช่น การวัดทางแม่เหล็กไฟฟ้า การวัดความหนาแน่นของพลาสมา การถ่ายภาพความเร็วสูงเพื่อตรวจสอบอุปกรณ์การจำกัดขนาดพลาสมา เป็นต้น หรือการทดลองอื่น ๆ ที่จะเพิ่มเข้ามา จำเป็นต้องมีการออกแบบระบบการเก็บข้อมูลและการควบคุมพลาสมา ให้สามารถใช้งานได้ตรงตามวัตถุประสงค์ มีการระบบตรวจสอบของอุปกรณ์ในระบบย่อยต่าง ๆ การเชื่อมต่อและการสื่อสารข้อมูลระหว่างระบบย่อย ทั้ง 4 ระบบ ทั้งนี้ นักวิจัยสามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อให้รองรับเทคโนโลยีที่จะเข้ามาในอนาคตได้

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษา วิจัย และพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลาสมาและฟิวชัน ได้รับการสนับสนุนงบประมาณในการพัฒนาเครื่องโทคาแมค TT-1 และระบบย่อยต่าง ๆ จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ส่วนงบประมาณการวิจัยประจำปีของภาครัฐรวมทั้งสถานที่ ผ่านสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (องค์การมหาชน) และ ขอขอบคุณนักวิจัย เจ้าหน้าที่เทคนิคของสถาบัน ASIPP สำหรับการถ่ายทอดความรู้ด้านพลาสมาและฟิวชัน ประสพการณ์และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีโทคาแมคในประเทศไทย

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Guan, "China and Thailand HT-6 M design and reconstruction project magnet power supply system design requirement", CT_HT-6M-PS-DO1, Version V1.0 (2018).
- [2] R. Guan, "China and Thailand HT-6 M design and reconstruction project magnet power supply system equipment selection", CT_HT-6M-PS-DO3, Version V2.0 (2018).
- [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] F. Yang and B. J. Xiao, "A web based mdsplus data analysis and visualization system for east", Proceedings of the 8th IAEA Technical Meeting on Control, Data Acquisition, and Remote Participation for Fusion Research, Fusion Engineering and Design, 87, 2161-2165 (2012).
- [5] Z. C. Zhang, Z. S. Ji, B. J. Xiao, F. Yang, Y. Wang, Z. H. Xu and J. Liu. "The upgrade of east central control system in pxi platforms", Proceedings of the 9th IAEA Technical Meeting on Control, Data Acquisition, and Remote Participation for Fusion Research, Fusion Engineering and Design, 89, 582-587 (2014).
- [6] Y. Wang, Z. S. Ji, G. J. Xu, F. Wang, S. Li, X. Y. Sun and Z. C. Zhang, "A digital long pulse integrator for east Tokamak", Fusion Engineering and Design, 89, 618-622 (2014).