*Article*

# ฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการให้ความร้อนในเครื่องโทคาแมค
# Physics and Technology of Plasma Heating in Tokamak

**นพพร พูลยรัตน์[1,*], บุญญฤทธิ์ ฉัตรทอง[2], สืบศักดิ์ สุขแสงพนมรุ้ง[1], สมศักดิ์ แดงติ๊บ[1], จิราภรณ์ พรหมพิงค์[1], อาหลี ตำหมัน[1], กำธร สายดาราสมุทร[1], พสิษฐ์ วงษ์หาบุศย์[1], เกวลี นิลกำแหง[1] และ ธวัชชัย อ่อนจันทร์[1]**

Nopporn Poolyarat[1,*], Boonyarit Chatthong[2], Suebsak Suksangpanomrung[1], Somsak Dangtip[1], Jiraporn Promping[1], Arlee Tamman[1], Kamtorn Saidarasamoot[1], Pasit Wonghabut[1], Kewalee Nilgumhang[1] and Thawatchai Onjun[1]

[1]สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

[2]สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90112

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

[2]Division of Physical Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Hat Yai District, Songkhla Province 90112

[*]Corresponding author E-mail: nopporn@tint.or.th

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

Received: 28th May 2021, Revised: 29th August 2021, Accepted: 1st September 2021

## บทคัดย่อ

การพัฒนาเทคโนโลยีด้านฟิวชันสำหรับการผลิตไฟฟ้าเป็นเรื่องที่ได้รับความสนใจและกำลังวิจัยพัฒนากันอยู่ในวงการวิทยาศาสตร์ สำหรับประเทศไทยนั้น สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กำลังพัฒนาเครื่องโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทยซึ่งมีชื่อว่า Thailand Tokamak 1 หรือ TT-1 ซึ่งจะเป็นเครื่องมือพื้นฐานหลักที่เป็นก้าวแรกในการศึกษาเทคโนโลยีฟิวชัน บทความนี้จะกล่าวถึงฟิสิกส์และเทคโนโลยีของการให้ความร้อนในเครื่องโทคาแมค ซึ่งเป็นระบบที่สำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยาฟิวชัน ตลอดจนแนวทางในการวิจัยและพัฒนาระบบให้ความร้อนแก่พลาสมาสำหรับเครื่องโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย

**คำสำคัญ:** เครื่องโทคาแมค, พลาสมาฟิวชัน, ระบบให้ความร้อน, โทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย

## Abstract

A development of fusion technology for electricity generation is one of key issues in science community. Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization) is constructing the first tokamak for Thailand, namely Thailand Tokamak 1 or TT-1. This TT-1 will be a key device for first step of Thailand on fusion technology. This article is about a plasma heating system, which is one of important supporting system for reaching fusion. Also, the direction for development of plasma heating system and its related research topics are also discussed.

**Keywords:** Tokamak, Plasma fusion, Heating system, Thailand Tokamak 1

### บทนำ

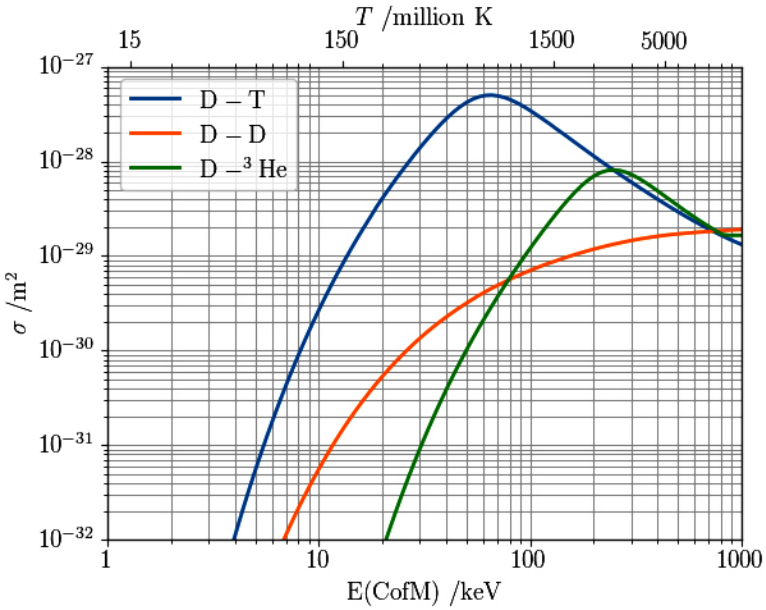
ในธรรมชาติ สถานะของสสารมีอยู่ด้วยกัน 4 สถานะคือ ของแข็ง ของเหลว ก๊าซ และพลาสมา การเปลี่ยนสถานะของสสารเกิดขึ้นเมื่อสสารได้รับหรือคายความร้อน เมื่อให้ความร้อนที่มากเพียงพอแก่ก๊าซก็จะให้เกิดการแตกตัว (Ionization) ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมากลายเป็นกลุ่มประจุบวกและประจุลบ ส่งผลให้ก๊าซจะเปลี่ยนเป็นพลาสมาในที่สุด การที่พลาสมาประกอบไปด้วยกลุ่มอนุภาคที่มีประจุบวกและประจุลบนี้เอง ทำให้สมบัติของพลาสมาในด้านไฟฟ้าและแม่เหล็กแตกต่างจากก๊าซ

### พลาสมาและปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชัน

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันนั้น เป็นปฏิกิริยาที่นิวไคลด์ของธาตุเบาสองนิวไคลด์มีอันตรกิริยากันและกลายเป็นนิวไคลด์ของธาตุที่มวลมากขึ้น พร้อมปล่อยพลังงานออกมาจากมวลพร่อง ตัวอย่างปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันที่เป็นที่สนใจ เช่น

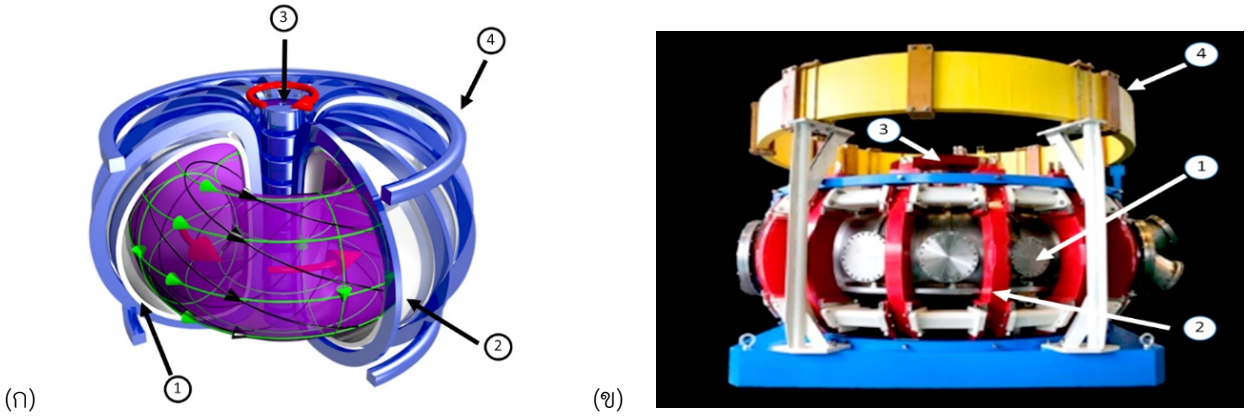
$$ {}^{2}_{1}D + {}^{3}_{1}T \rightarrow {}^{4}_{2}He + n + 17.6\,MeV \qquad (1) $$

ปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันนี้เป็นที่น่าสนใจ เนื่องจากพลังงานที่ปล่อยออกมาต่อปฏิกิริยามีค่ามากกว่าพลังงานที่ปล่อยออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันของยูเรเนียมซึ่งอยู่ประมาณ 3-4 MeV อย่างไรก็ตามปฏิกริยานิวเคลียร์ฟิวชันนี้จะเกิดขึ้นได้ ตัวนิวไคลด์ทั้งสองจะต้องมีพลังงานจลน์ที่มากพอเพื่อเอาชนะแรงคูลอมบ์ โดยโอกาสในการเกิดปฏิกิริยา (Cross section) ของปฏิกิริยาฟิวชันบางปฏิกิริยาที่เป็นที่สนใจเป็นไปดังรูปที่ 1




***รูปที่ 1*** *Cross section ของปฏิกิริยาฟิวชันระหว่าง D-T, D-D, และ D-$^3$He [ภาพจาก https://scipython.com/blog/plotting-nuclear-fusion-cross-sections]*

สำหรับปฏิกิริยาฟิวชันระหว่าง D-T นั้นโอกาสในการเกิดปฏิกิริยานั้นมีค่าสูงเมื่ออุณหภูมิของนิวไคลด์อยู่ในระดับร้อยล้านเคลวิน สสารต่างๆที่มีอุณหภูมิในระดับนั้นจะอยู่ในสภาวะของพลาสมา ทั้งนี้จำเป็นต้องมีการกักพลาสมา (Confinement) เพื่อทำให้นิวไคลด์มีโอกาสในการเข้าใกล้และทำปฏิกิริยากัน โดยเครื่องมือที่ใช้ในการกักพลาสมาโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก (Magnetic confinement plasma) นั้นมีหลายรูปแบบ แต่แบบที่ประสบความสำเร็จและมีความก้าวหน้ามากที่สุดคือ เครื่องโทคาแมค (Tokamak) ซึ่งมีองค์ประกอบหลักดังในรูปที่ 2




***รูปที่ 2*** *(ก) ภาพแสดงองค์ประกอบหลัก ๆ ของเครื่องโทคาแมค [ภาพจาก https://www.iaea.org/fusion-energy/magnetic-fusion-confinement-with-tokamaks-and-stellarators] (ข) ภาพถ่ายแสดงเครื่องโทคาแมค TT-1 และขดลวดชุดต่างๆดังนี้ (1) ห้องสุญญากาศ (2) ขดลวด Toroidal field (3) ขดลวด Heating field และ (4) ขดลวด Vertical field*

**ฟิสิกส์ของการให้ความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของพลาสมา**

สำหรับการให้ความร้อนแก่พลาสมาในเครื่องโทคาแมคนั้น แบ่งเป็นสองส่วนหลักๆ คือการให้ความร้อนเบื้องต้นแก่พลาสมาด้วยกระบวนการ Ohmic heating และการให้ความร้อนเสริมแก่พลาสมา (Auxiliary heating)

**1. การให้ความร้อนแก่พลาสมาด้วยกระบวนการ Ohmic heating**

กระบวนการ Ohmic heating เกิดจากการให้กระแสที่ไหลผ่านขดลวด Heating field ซึ่งอยู่ตรงกลางของเครื่องโทคาแมค (หมายเลข 3 ในรูปที่ 2) และมีการเปลี่ยนแปลงของกระแสซึ่งจะสร้างฟลักซ์แม่เหล็กเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสพลาสมาในเครื่องโทคาแมค ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 3 ซึ่งตัวพลาสมานั้นจะเกิดมีความต้านทานกระแส เมื่อประจุในพลาสมาเคลื่อนที่จะเกิดการชนกันด้วยแรงคูลอมบ์ ระหว่างไอออนกับอิเล็กตรอน มีพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นเป็นไปดังสมการ

$$P_\Omega = \eta \cdot j^2 \tag{2}$$

เมื่อ $P_\Omega$ เป็นพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้น หน่วย $Wm^{-3}$

$\eta$ เป็นความต้านทานกระแสของพลาสมา (Plasma resistivity) หน่วย $\Omega m$

และ $j$ เป็นความหนาแน่นกระแสพลาสมา หน่วย $Am^{-2}$

ทั้งนี้ความต้านทานกระแสของพลาสมาจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของพลาสมาสูงขึ้น $\left(\eta \propto T_e^{-3/2}\right)$ [1] ดังนั้นวิธีการให้ความร้อนแบบ Ohmic heating นั้นมีประสิทธิภาพในช่วงแรกของการเกิดพลาสมาเท่านั้น ทั้งนี้ประมาณการอุณหภูมิของพลาสมาจากกระบวนการนี้เป็นไปดังนี้

$$\hat{T} \cong 2.1\left(\frac{Z_{eff}}{q_a q_0}\right)^{2/5}\left(\frac{a}{R}B_0\right)^{4/5}\ keV \tag{3}$$

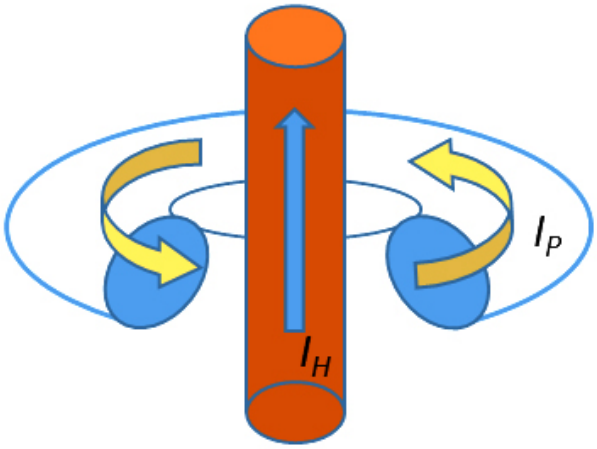
เมื่อ $\hat{T}$ เป็นอุณหภูมิพลาสมา ณ ใจกลางของพลาสมา มีหน่วยเป็น $keV$

$Z_{eff}$ เป็นประจุสมมูล (Effective charge)

$q_0$ เป็น Safety factor ที่ใจกลางพลาสมา

$q_a$ เป็น Safety factor ที่ผิวของพลาสมา

สำหรับเครื่องโทคาแมค TT-1 นั้น เมื่อให้ $Z_{eff} \equiv 1$ และ $q_a q_0 \cong 1.5$ จะได้ $\hat{T} \cong 0.96\ keV$ ทั้งนี้เครื่องโทคาแมค HT-6M (ซึ่งเป็นเครื่องเดิมของเครื่อง TT-1) การให้ความร้อนด้วยวิธีนี้พบว่าสามารถทำให้อุณหภูมิไอออนมีค่า $T_i \approx 200\ eV$ และอุณหภูมิอิเล็กตรอนมีค่า $T_e \approx 500\ eV$ [2]




***รูปที่ 3*** *กระบวนการ Ohmic heating เกิดจากกระแสไฟฟ้า ($I_H$) ที่ไหลในขดลวด HF เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดกระแสพลาสมา ($I_P$) ไหลในแนวโทรอยดัล*

**2. การให้ความร้อนเสริมแก่พลาสมา (Auxiliary heating)**

เนื่องจากประสิทธิภาพการให้ความร้อนแบบ Ohmic Heating แก่พลาสมานั้นจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นการให้ความร้อนเสริมแก่พลาสมาในเครื่องโทคาแมค (Auxiliary heating) จึงมีความจำเป็น ในปัจจุบันระบบให้ความร้อนเสริมหลักมีอยู่ 3 วิธีคือ

**2.1) การให้ความร้อนด้วยการยิงลำอนุภาคที่เป็นกลาง (Neutral beam injection, NBI)**

การให้ความร้อนด้วยวิธียิงลำอนุภาคที่เป็นกลางทำได้โดยมีระบบทำให้ก๊าซชนิดเดียวกันกับพลาสมากลายเป็นไอออน และทำการเร่งไอออนด้วยวิธีการเร่งแบบเชิงเส้นด้วยสนามไฟฟ้าเพื่อให้มีพลังงานจลน์ที่มากขึ้น และทำการให้ไอออนเหล่านั้นกลายเป็นกลางโดยการใช้ก๊าซเพื่อให้มีการแลกเปลี่ยนประจุ ทั้งนี้ระบบจะมีส่วนคัดแยกอนุภาคที่ยังคงสภาพเป็นไอออนแยกทิ้งไป ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องโทคาแมคมีสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการกักพลาสมาซึ่งจะส่งผลกั้นไม่ให้ไอออนเข้าไปภายในพลาสมาของเครื่องโทคาแมคได้ ในส่วนที่เป็นกลางทางไฟฟ้าแล้วจะถูกส่งผ่านเข้าไปในเครื่องโทคาแมคและจะถ่ายเทพลังงานและความร้อนโดยการชน

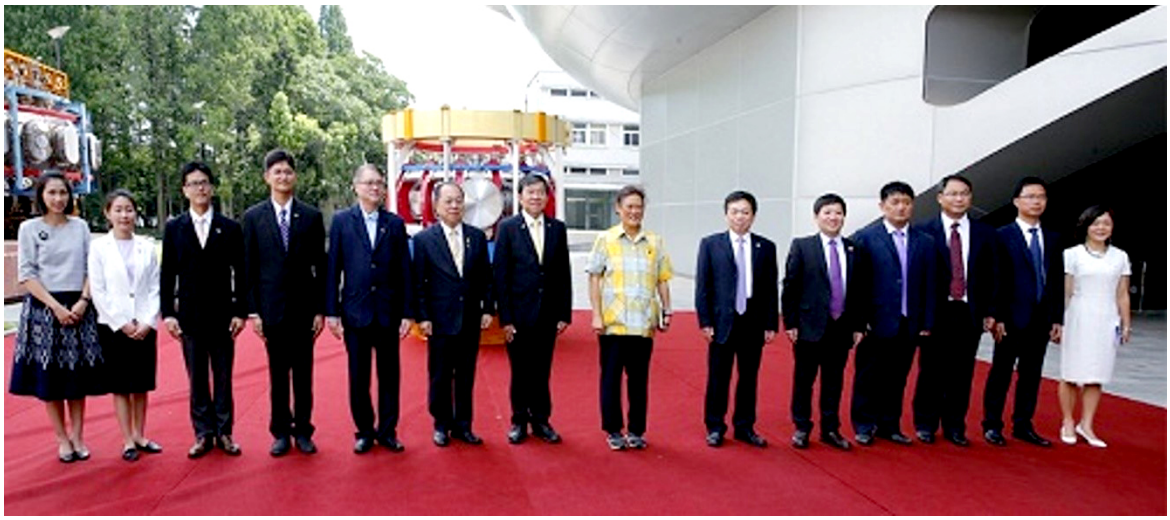
สำหรับวิธีการที่ 2 และ 3 นั้น เป็นการให้ความร้อนแก่พลาสมาโดยการใช้คลื่นความถี่วิทยุ (Radio frequency, RF) ในการส่งผ่านพลังงาน แต่จะต่างกันตรงความถี่ของคลื่นที่ใช้ ดังนี้

**2.2) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่ไซโคลตรอนของไอออน (Ion cyclotron resonant heating, ICRH)** การให้ความร้อนด้วยคลื่นวิธีนี้ จะใช้ความถี่ไซโคลตรอนของไอออนเพื่อที่จะให้พลังงานแก่ไอออนโดยตรง โดยความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วง 30-120 MHz

**2.3) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่ไซโคลตรอนของอิเลกตรอน (Electron cyclotron resonant heating, ECRH)** สำหรับการให้ความร้อนแก่คลื่นวิธีนี้ จะใช้ความถี่ไซโคลตรอนของอิเล็กตรอนในช่วงความถี่ 100-200 GHz โดยจะเป็นการให้พลังงานแก่อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนจะทำการถ่ายเทความร้อนแก่ไอออนในภายหลัง

**เครื่องโทคาแมค TT-1 และการวิจัยนิวเคลียร์ฟิวชันในประเทศไทย**

เครื่องโทคาแมค Thailand Tokamak 1 (TT-1) ที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สทน.) กำลังดำเนินการพัฒนาขึ้นมานั้น ในส่วนของห้องสุญญากาศและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้านั้นเดิมเป็นของเครื่องโทคาแมค HT-6M ของศูนย์วิจัยฟิสิกส์ของพลาสมา (Institute of Plasma Physics) สถาบัน Academic Sinica (ASIPP) ประเทศจีน หรือ ASIPP โดยทางสถาบัน ASIPP ได้บริจาคชิ้นส่วนดังกล่าวให้กับทาง สทน. และได้ประกอบพิธีส่งมอบชิ้นส่วนเมื่อวันที่ 15 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 ณ สถาบัน ASIPP ประเทศจีน โดยสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารีเสด็จร่วมพิธีเป็นองค์สักขีพยานดังภาพในรูปที่ 4



*รูปที่ 4 พิธีรับมอบห้องสุญญากาศและขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถาบัน ASIPP เมื่อ 15 กรกฎาคม 2561 [ภาพจาก http://english.ipp.cas.cn/syxw/201807/t20180719_195314.html]*

ต่อมา สทน. มีแผนการพัฒนาเทคโนโลยีฟิวชันสำหรับประเทศไทย โดยจะพัฒนาระบบสนับสนุนเครื่องโทคาแมคสี่ระบบคือ ระบบจ่ายไฟฟ้ากำลังสูง ระบบสุญญากาศ ระบบควบคุมและเก็บข้อมูล และระบบวัดพื้นฐาน เพื่อประกอบกับชิ้นส่วนที่รับบริจาคมาเพื่อเป็นเครื่องโทคาแมคที่สมบูรณ์และเดินเครื่องได้อีกครั้ง และทางการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) ได้เล็งเห็นถึงความสำคัญของแผนงานดังกล่าวและได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยในการพัฒนาระบบสนับสนุนทั้งสี่ระบบซึ่งได้มีพิธีลงนามในบันทึกความเข้าใจระหว่างกันในวันที่ 24 เมษายน พ.ศ. 2562 ดังในรูปที่ 5 โดย สทน. ร่วมกับทีมนักวิจัยจากเครือข่ายศูนย์วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฟิวชัน (Center for Plasma and Fusion Technology, CPaF) และ กฟผ. จะเดินทางไปร่วมพัฒนาระบบสนับสนุนทั้งสี่ระบบ ณ. สถาบัน ASIPP เมื่อแล้วเสร็จจะทำการถอดประกอบและขนย้ายมาติดตั้ง ณ อาคารปฏิบัติการโทคาแมคที่ สทน. องครักษ์ โดยอาคารดังกล่าวที่ได้รับการสนับสนุนงบประมาณแผ่นดินในการก่อสร้าง

***รูปที่ 5*** *พิธีลงนามบันทึกข้อตกลงความร่วมมือด้านการพัฒนาเทคโนโลยีพลาสมาและฟิวชันระหว่าง สทน. และ กฟผ. [ภาพจาก https://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=article&id=2996:20190424-pre01&catid=31&Itemid=208]*

**ลักษณะทางกายภาพและความสามารถของเครื่อง TT-1**

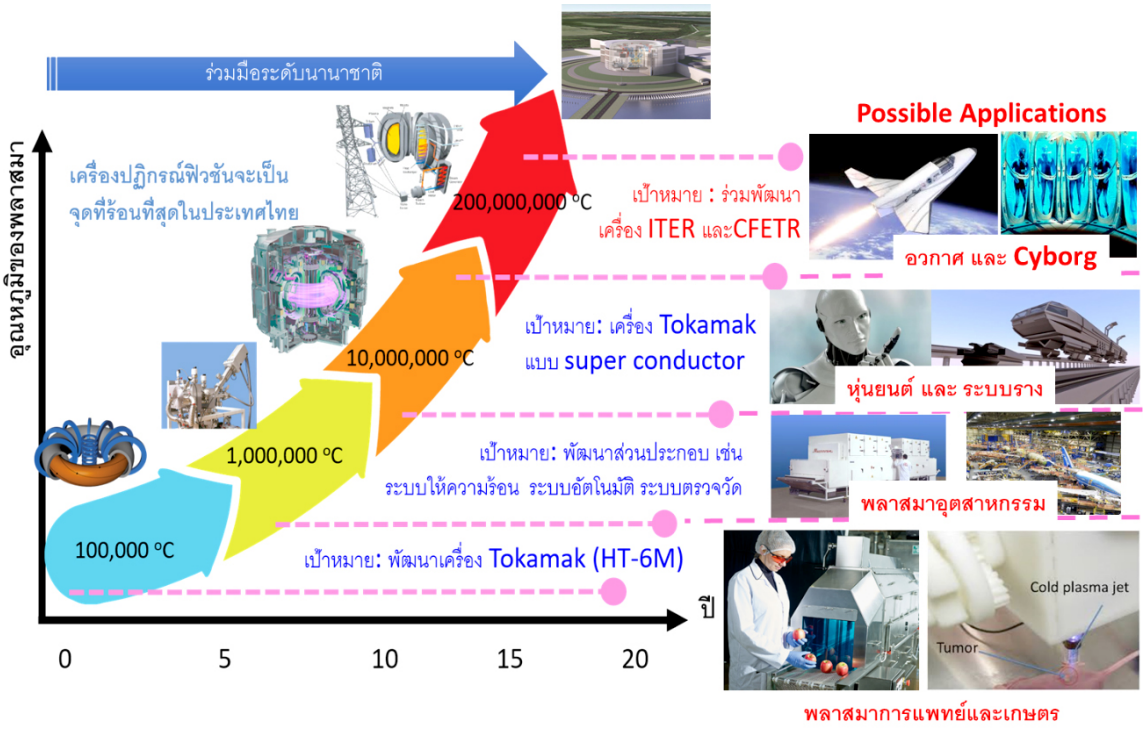
เครื่องโทคาแมค TT-1 ประกอบไปด้วยห้องสุญญากาศทรงคล้ายโดนัท (Toroidal vacuum chamber) ที่มีรัศมีหลัก 0.65 เมตร และรัศมีรอง 0.20 เมตร มีขดลวดแม่เหล็กไฟฟ้าจำนวน 3 ชุด ได้แก่ 1) ชุดขดลวด Toroidal heating field (HF) 2) ชุดขดลวด Toroidal field (TF) และ 3) ชุดขดลวด Vertical field (ดังแสดงในรูปที่ 2(ข) ทั้งนี้ในการพัฒนาระบบจ่ายไฟฟ้ากระแสสูงได้มีการออกแบบวงจรไฟฟ้าสำหรับขดลวดทั้งสามชุด [3] เพื่อทำหน้าที่ในการจ่ายกระแสไฟฟ้าแก่ขดลวดทั้งสามชุด โดยกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด TF จะสร้างสนามแม่เหล็กในแนวโทรอยดัลสำหรับกักพลาสมา ซึ่งที่ใจกลางของพลาสมามีค่าสูงสุดเป็น 1.5 T (B0) และมีเวลาในช่วง Flattop (ช่วงเวลา 95% ของกระแสสูงสุด) เป็น 100 ms ชุดขดลวด VF ทำหน้าที่ในการปรับและควบคุมตำแหน่งของพลาสมาในห้องสุญญากาศ และกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวด HF ทำหน้าที่สร้างกระแสพลาสมาและให้ความร้อนแก่พลาสมาเบื้องต้นโดยวิธี Ohmic heating และคาดว่าจะสามารถสร้างกระแสพลาสมาได้ในระดับ 50 kA โดยตารางที่ 1 แสดงถึงค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องโทคาแมค TT-1

**ตารางที่ 1** ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องโทคาแมค TT-1

| พารามิเตอร์ | ค่า |
|---|---|
| รัศมีหลัก (R) | 0.65 m |
| รัศมีรอง (a) | 0.20 m |
| สนามแม่เหล็กสูงสุด ($B_0$) | 1.5 T |
| กระแสพลาสมา ($I_p$) | 50 kA |

**การวิจัยและพัฒนาระบบการให้ความร้อนในเครื่องโทคาแมค TT-1**

การวิจัยและพัฒนาระบบการให้ความร้อนในเครื่องโทคาแมค TT-1 นั้นเป็นเรื่องที่สำคัญและอยู่ในแผนการพัฒนาเทคโนโลยีฟิวชันของ สทน. ดังในรูปที่ 6




***รูปที่ 6*** *เป้าหมายในการสร้างอุณหภูมิของพลาสมาภายใต้โครงการพัฒนาเทคโนโลยีฟิวชัน*

แผนการพัฒนาเทคโนโลยีฟิวชันแบ่งออกเป็นสี่ระยะ กล่าวคือ ในระยะแรกนั้น สทน. มีเป้าหมายที่จะมีความสามารถในการสร้างพลาสมาที่มีอุณหภูมิในระดับ 100,000 °C โดยการพัฒนาเครื่องโทคาแมค TT-1 จากชิ้นส่วนเครื่องโทคาแมค HT-6M ที่ได้รับบริจาคมา ในระยะที่สองนั้นมีเป้าหมายที่จะยกระดับความสามารถในการสร้างอุณหภูมิพลาสมาที่ระดับ 1,000,000 °C โดยการพัฒนาส่วนประกอบเพิ่มเติมสำหรับเครื่องโทคาแมค TT-1 เช่น ระบบให้ความร้อน ระบบควบคุมอัตโนมัติ และระบบตรวจวัด ในระยะที่สามนั้นมีเป้าหมายที่จะมีความสามารถในการสร้างพลาสมาที่ระดับอุณหภูมิ 10,000,000 °C ซึ่ง สทน. มีเป้าหมายที่จะพัฒนาเครื่องโทคาแมคเครื่องใหม่ซึ่งจะใช้ขวดลวดตัวนำยิ่งยวดในการสร้างสนามแม่เหล็กและมีระบบให้ความร้อนเสริม และในระยะสุดท้ายเมื่อ สทน. และเครือข่ายนักวิจัยสั่งสมประสบการณ์มากเพียงพอ ก็พร้อมที่จะเข้าร่วมพัฒนาในโครงการฟิวชันในระดับนานาชาติ เช่น โครงการ ITER หรือ CFETR

ความสามารถในการสร้างพลาสมาอุณหภูมิสูงนั้นเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำหรับของ Lawson criterion ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำหรับการเกิดปฏิกิริยาฟิวชันอย่างต่อเนื่อง (Ignition condition) ดังสมการ

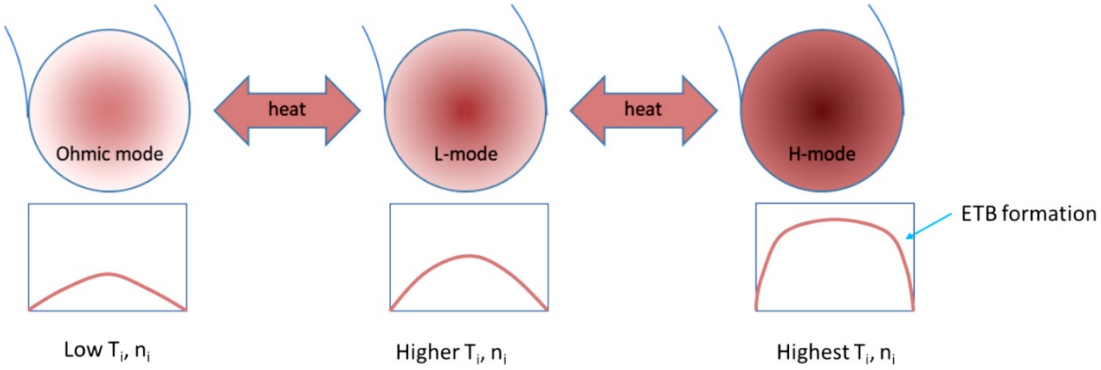
$$n \cdot T \cdot \tau_E \geq 3 \times 10^{21}\ keV \cdot s \cdot m^{-3} \qquad (4)$$

โดยที่ $n$ เป็นความหนาแน่นของพลาสมา หน่วย $m^{-3}$

$T$ เป็นอุณหภูมิของพลาสมา หน่วย $keV$

และ $\tau_E$ เป็นระยะเวลาในการกักพลาสมา (Confinement time) หน่วย $s$

นอกจากนี้การให้ความร้อนแก่พลาสมาในเครื่องโทคาแมค จะทำให้สามารถศึกษาปรากฏการณ์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องและจำเป็นต่อการพัฒนาโครงการไฟฟ้าฟิวชันในอนาคต ซึ่งประเด็นหนึ่งที่สำคัญคือการเปลี่ยนโหมดของพลาสมา โดยทั่วไปพลาสมาในเครื่องโทคาแมคนั้นจะแบ่งเป็น 3 โหมดคือ 1) Ohmic mode 2) Low-confinement mode หรือ L-mode และ 3) High confinement mode หรือ H-mode โดยลักษณะอุณหภูมิและความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้นตามลำดับดังในรูปที่ 7




***รูปที่*** *7 สถานะของพลาสมาในเครื่องโทคาแมค*

ใน Ohmic mode นั้นพลาสมาจะมีอุณหภูมิและความหนาแน่นไม่มาก พลังงานและความร้อนที่ได้จะมาจากการให้ความร้อนแบบ Ohmic heating เมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มเติมพลาสมาจะมีอุณหภูมิและความหนาแน่นที่มากขึ้นและเริ่มมีระยะเวลาในการกักพลาสมา (Confinement time) เมื่อให้พลังงานและความร้อนเพิ่มแก่พลาสมา จะเกิดปรากฏการณ์การสร้างกำแพงกั้นการส่งผ่านพลังงานและอนุภาคของพลาสมาที่ขอบ (Edge transport barrier, ETB) ซึ่งจะยกดับทั้งอุณหภูมิและความหนาแน่นของพลาสมา ซึ่งพลาสมาในโหมดนี้เป็นสิ่งที่พึงประสงค์สำหรับปฏิกิริยาฟิวชัน

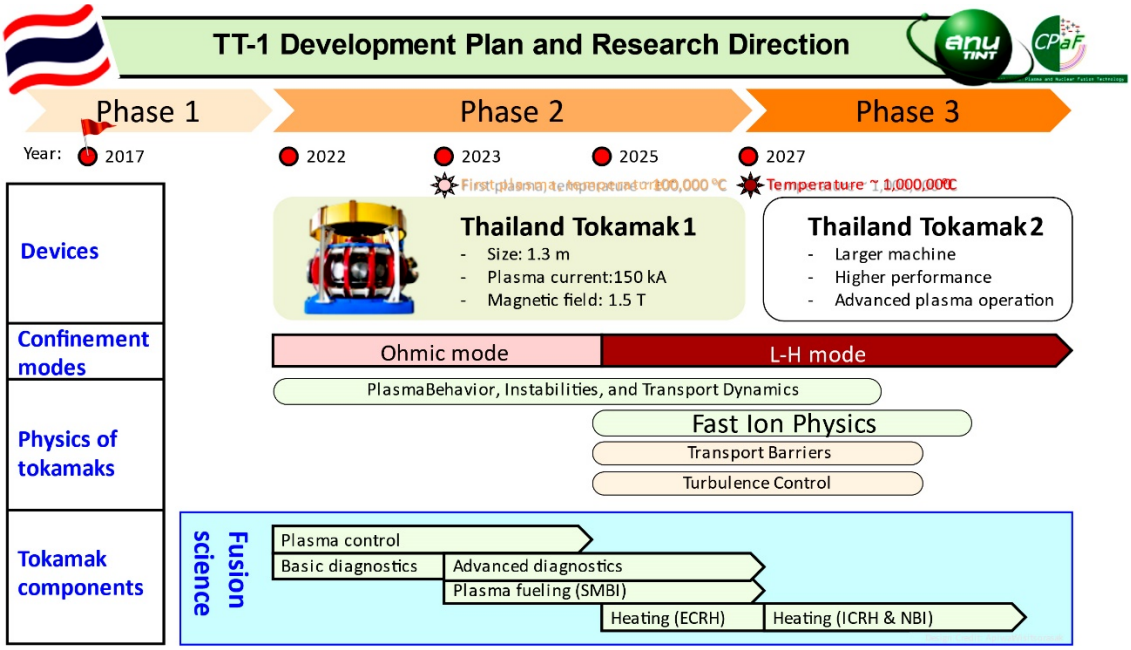
**ตารางที่** 2 ข้อมูลเครื่องโทคาแมคและระบบให้ความร้อนแบบต่าง ๆ

| Parameter | STOR-M[4,5] | TT-1[3] | ST-40[6] | ADITYA-U[7] | TCV[8,9] | ITER[10] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Size | Small | Small | Small | Medium | Medium | Large |
| Major/Minor radius (m/m) | 0.46/0.125 | 0.65/0.20 | 0.40/0.26 | 0.75/0.25 | 0.88/0.25 | 6.20/2.60 |
| Plasma volume ($m^3$) | 0.14 | 0.51 | 0.53 | 0.93 | 1.09 | 840 |
| Toroidal magnetic field (T) | 1 | 1.5 | 3 | 1.5 | 1.43 | 5.3 |
| Heating methods | | | | | | |
| Ohmic heating | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| Current drive (MW) | ✗ | ✗ | ✗ | 0.1 | ECCD/4.5 | |
| Neutral beam injection (NBI) | ✗ | ✗ | 3 | ✗ | 1.3 | 33 |
| Electron cyclotron resonant heating (ECRH) | ✗ | ✗ | 2 | 0.5 | 4.5 | 7 |
| Ion cyclotron resonant heating (ICRH) | ✗ | ✗ | ✗ | 0.2 | ✗ | 10 |
| Temperature | | | | | | |
| Ion (keV) | 0.1 | ~0.2 | | | | 15 |
| Electron (keV) | 0.22 | ~0.5 | 1 | 0.3-1 | 1 (Ohmic)/ 15 (ECH) | ~15 |

ตารางที่ 2 แสดงเครื่องโทคาแมคต่าง ๆ พร้อมทั้งพารามิเตอร์ที่สำคัญของเครื่องเหล่านั้น เมื่อพิจารณาเครื่องโทคาแมคที่มีขนาดใกล้เคียงกับเครื่อง TT-1 เช่นเครื่องโทคาแมค STOR-M ของ University of Saskatchewan, Canada จะพบว่าจะมีกระแสและอุณหภูมิของพลาสมาที่ใกล้เคียงกัน การเพิ่มกระแสพลาสมานั้นทำได้โดยอาศัยระบบ Current Drive ดังเช่นในเครื่องโทคาแมค ADITYA-U ของ Institute for Plasma Research, India และเครื่องโทคาแมค TCV, EPFL, Switzerland ส่วนการเพิ่มอุณหภูมิของพลาสมานั้นสามารถทำได้โดยการให้พลังงานจากระบบให้ความร้อนเสริมซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากเครื่องโทคาแมค TCV เมื่อให้ความร้อนเสริมร่วมแบบ NBI 1.3 MW และ ECRH 4.5 MW จะทำให้อุณหภูมิ $T_e$ เพิ่มขึ้นจาก 1 keV เป็น 15 keV

ในส่วนของเครื่องโทคาแมค TT-1 นั้น ได้มีการศึกษาจำลองการให้ความร้อนแก่พลาสมาด้วยโปรแกรมการคำนวณทางคณิตศาสตร์ [11] พบว่าเมื่อให้ความร้อนเสริมแก่พลาสมาในเครื่องโทคาแมค TT-1 ประมาณ 0.2 MW จะทำให้พลาสมาในเครื่องโทคาแมค TT-1 เปลี่ยนสถานะจาก L-mode ไปสู่ H-mode ดังในรูปที่ 8 ทั้งนี้เมื่อพลาสมามีการเปลี่ยนสถานะเข้า H-mode แล้วนั้นจะทำให้สามารถศึกษาฟิสิกส์ของพลาสมาเพิ่มเติมในส่วนที่ประชาคมฟิวชันยังคงสนใจและต้องการคำตอบเช่น การเกิด External transport barrier (ETB) และ Internal transport barrier (ITB) หรือการศึกษา Impurity transport ใน H-mode รวมไปถึงการพัฒนาและยืนยันผลการทำนายผลทดลองด้วยโปรแกรมจำลองทางคณิตศาสตร์

ทั้งนี้ในการพัฒนาระบบเสริมต่างๆของเครื่องโทคาแมค TT-1 นั้น การพัฒนาระบบให้ความร้อนเสริมเป็นหนึ่งในเรื่องจำเป็น โดย สทน. มีแผนการที่จะพัฒนาระบบให้ความร้อนแบบ ECRH ก่อนในระยะแรก และพัฒนาระบบ ICRH และ NBI หลังจากนั้น (ดังแสดงในรูปที่ 8) เพื่อที่จะสนับสนุนประเด็นวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเรื่องของ Plasma behaviors, Instabilities, Fast ion physics, Transport barrier และ Turbulence control




*รูปที่ 8 แผนการพัฒนาระบบเสริมต่าง ๆ ของเครื่องโทคาแมค TT-1 และทิศทางงานวิจัย*

## บทสรุป

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กำลังพัฒนาเครื่องโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย สำหรับระบบให้ความร้อนแก่พลาสมานั้นในระยะแรกของการเดินเครื่องจะมีเพียงระบบ Ohmic heating ให้ความร้อนแก่พลาสมาซึ่งทำให้พลาสมาอยู่ใน Ohmic mode ทั้งนี้ในระยะถัดจะมีการพัฒนาระบบให้ความร้อนเสริมแบบ ECRH และอื่น ๆ เพื่อยกระดับอุณหภูมิของพลาสมาให้เข้าสู่ H-mode ซึ่งจะทำให้สามารถศึกษาปรากฏการณ์และฟิสิกส์ที่สำคัญได้ในอนาคต

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพัฒนาเครื่องโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทยจะไม่สามารถเกิดขึ้นได้หากไม่ได้รับการสนับสนุนจากหลาย ๆ ฝ่ายโดยเฉพาะการสนับสนุนของ ASIPP และ กฟผ. อีกทั้งความร่วมมือร่วมแรงกันของเครือข่าย CPaF จึงขอแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

## เอกสารอ้างอิง

[1] J. Wesson, “Ohmic heating”, Tokamaks, 3rd edition, Oxford University Press (2004).
[2] L. Jian-gang, B. Yi, L. Jia-rong, W. Bao-nian, L. Yue-xiu, G. Xian-zu, C. Jun-ling and L. Yun-feng, “Edge plasma behavior during improved confinement by lower hybrid wave heating in HT-6M tokamak”, Plasma Science and Technology, 4, 1435-1444 (2002).
[3] N. Poolyarat, S. Suksaengpanomrung and W. Sangwang, “Design of power supply for magnet systems of Thailand Tokamak-1”, Plasma and Fusion Research, 15, 2405070 (2020).
[4] A. Sarkissian, A. Hirose, O. Mitarai, S. Wolfe and H. M. Skarsgard, “Turbulent heating experiment in the STOR-1M tokamak”, Canadian Journal of Physics, 67, 884-892 (1989).

[5] O. Mitarai, C. Xiao, D. McColl, M. Dreval, A. Hirose and M. Peng, "Plasma current start-up by the outer ohmic heating coils in the Saskatchewan TORus Modified (STOR-M) iron core Tokamak", Review of Scientific Instruments, 86, 033508 (2015).
[6] M Gryaznevich and Tokamak Energy team, "Faster fusion: ST40, engineering, commissioning, first results", AIP Conference Proceedings, 2179, 020008 (2019).
[7] D. Sharma, R. Srinivasan, J. Ghosh, P. Chattopadhyay and Aditya team, "Aditya upgradation – equilibrium study", Fusion Engineering and Design, 160, 111933 (2020).
[8] S. Coda and the EUROfusion MST1 team, "Physics research on the TCV Tokamak facility: From conventional to alternative scenarios and beyond", Nuclear Fusion, 59, 112023 (2019).
[9] "Fusion plasmas – TCV", from https://www.epfl.ch/research/domains/swiss-plasma-center/research/tcv.
[10] "The ITER tokamak", from https://www.iter.org.
[11] S. Buaruk, T. Makmool, J. Promping, T. Onjun, S. Sangaroon, A. Wisitsorasak, J. Garcia and B. Chatthong, "Comparisons of the plasma performance of future Thailand Tokamak using various external heating schemes", Plasma and Fusion Research, 14, 3403153 (2019).