

Article

การศึกษาและออกแบบระบบเติมเชื้อเพลิงในเครื่องโทคาแมค เครื่องแรกของประเทศไทย โดยการยิงลำอนุภาค ด้วยความเร็วเหนือเสียง

Preliminary Study and Design of Fuelling Systems of Thailand Tokamak I with Supersonic Molecular Beam Injection

จิราภรณ์ พรหมพิงค์^{1*}, อภิวัฒน์ วิศิษฐ์สรศักดิ์², บุญญฤทธิ์ ฉัตรทอง³, เกวลี นิลกำแหง¹,
อาทลี ตำหมั่น¹, พสิษฐ์ วงษ์หาบศย์¹, วุฒิชัย แสงวัง¹, กำธร สายดาราสมูท¹,
นพพร พูลยรัตน์¹, และ สมศักดิ์ แดงดี¹

Jiraporn Promping^{1*}, Apiwat Wisitsorasak², Boonyarit Chatthong³, Kewalee Nilgumhang¹,
Arlee Tamman¹, Pasit Wonghabot¹, Wutthichok Sangwang¹, Kamtorn Saidarasamoot¹,
Nopporn Poolyarat¹ and Somsak Dangtip¹

¹สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอบางกรวย จังหวัดนครนายก 26120

²ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
แขวงทุ่งครุ กรุงเทพมหานคร 10140

³สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา 90110

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

²Division of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's University of
Technology Thonburi, Thungkru District, Bangkok Province 10140

³Division of Physical Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University,
Hat Yai District, Songkhla Province 90110

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

วันที่รับบทความ: 28 พฤษภาคม 2564, วันแก้ไขบทความ: 13 กันยายน 2564, วันตอบรับบทความ: 14 กันยายน 2564

Received: 28th May 2021, Revised: 13th September 2021, Accepted: 14th September 2021

บทคัดย่อ

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) หรือ สทท. มีแผนที่จะติดตั้งและพัฒนาเครื่องโทคาแมคขึ้นเองในประเทศไทย ภายใต้ชื่อโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย (TT-1) ณ จังหวัดนครนายก องค์ประกอบหลักของเครื่อง TT-1 ใช้ตามแบบเครื่องก่อนหน้านี้คือเครื่อง HT-6M ซึ่งได้รับบริจาคจากสถาบันพลาสมาฟิสิกส์ (ASIPP) สาธารณรัฐประชาชนจีน ส่วนประกอบหลักนี้จะพัฒนาระบบ

ย่อยชิ้นใหม่สี่ระบบ ระบบเติมเชื้อเพลิงคือหนึ่งในสี่ระบบที่มีความสำคัญในการกักเก็บความหนาแน่นของพลาสมาและเพิ่มศักยภาพของพลาสมาให้มีประสิทธิภาพ การเติมเชื้อเพลิงของเครื่องโทคาแมคมีสามวิธีหลักๆ คือ การพ่นก๊าซ (GP) การฉีดลำอนุภาคด้วยความเร็วเหนือเสียง (SMBI) และการยิงเม็ดเชื้อเพลิงแช่แข็ง (PI) บทความนี้จะรายงานการศึกษาเบื้องต้นสำหรับการออกแบบระบบการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI และแบบ PI ของเครื่องโทคาแมค TT-1 ซึ่งจะใช้เป็นระบบเติมเชื้อเพลิงในเฟสถัดไป ในบทความนี้ได้นำเสนอการออกแบบและวางแผนติดตั้งระบบ SMBI ของเครื่องโทคาแมค TT-1 ด้วยความหนาแน่นของอนุภาคพลาสมาที่ 10^{19} m^{-3} ซึ่งในที่นี้คำนวณมาจาก จำนวนอนุภาคพลาสมาต่อปริมาตร ที่กระแสพลาสมา 100 kA ช่วงเวลาการเกิดพลาสมา 100 ms พบว่าเชื้อเพลิงก็มีความสามารถพอที่จะทะลุผ่านเข้าไปยังแกนกลางของพลาสมาได้ เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่องโทคาแมคอื่นๆ ที่มีขนาดและประสิทธิภาพใกล้เคียงกันก็ให้ผลที่สอดคล้องกับการศึกษานี้

คำสำคัญ: เครื่องโทคาแมค, ระบบเติมเชื้อเพลิงพลาสมา, การยิงลำอนุภาคด้วยความเร็วเหนือเสียง, โทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย

Abstract

Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT) is setting up the first tokamak in Thailand, dubbed as Thailand Tokamak 1 (TT-1), at Nakorn Nayok site. Main components of TT-1 are taken partially from the previously known HT-6M tokamak, donated by Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences (ASIPP), China. These components are then furnished with four up-to-date sub-systems. Fueling system is one of the four sub-systems and is important to maintain plasma density and improve plasma performance for high efficiency. Among three methods for fueling in a tokamak, namely, gas puffing (GP), supersonic molecular beam injection (SMBI), and pellet injection (PI), the SMBI is chosen for TT-1. In this contribution, we present a design and planning of SMBI for TT-1 to achieve plasma density of 10^{19} m^{-3} , 100 kA of plasma current and for 100 ms pulse length. We have found that the SMBI should be sufficiently penetrating into the plasma core. A comparison with other tokamaks of similar size and performance is also made in this contribution.

Keywords: Tokamak, Plasma fueling system, Supersonic molecular beam injection, Thailand Tokamak 1

บทนำ

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) มีการพัฒนาเครื่องโทคาแมค (Tokamak) เพื่อใช้ในการศึกษาและวิจัยการควบคุมพลาสมาเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาฟิวชัน ภายใต้ชื่อเครื่องโทคาแมคเครื่องแรกของประเทศไทย (Thailand Tokamak I) หรือ TT-1 จากการพัฒนาเครื่องโทคาแมค HT-6M [1] ร่วมกับสถาบันพลาสมาและฟิวชัน สาธารณรัฐประชาชนจีน (ASIPP) ซึ่งจะดำเนินการติดตั้ง ณ สทท. สำนักงานใหญ่ อ. อองครักษ์ จ. นครนายก ระบบสนับสนุนที่จะทำให้สามารถเดินเครื่องได้ ประกอบด้วย ระบบให้พลังงานความร้อน ระบบสุญญากาศ ระบบควบคุมและจัดเก็บข้อมูล และระบบตรวจวัดคุณสมบัติพลาสมาจะมีการพัฒนาและติดตั้งให้กับเครื่องโทคาแมค TT1 โดยมีขนาดพารามิเตอร์ของตัวเครื่องแสดงในตารางที่ 1 นอกจากนี้ในเฟสถัดไปยังต้องมีการพัฒนาระบบต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของพลาสมาให้มีเสถียรภาพและมีพลังงานมากยิ่งขึ้น

อาทิเช่น ระบบให้พลังงาน ระบบตรวจวัดคุณสมบัติพลาสมา และระบบเติมเชื้อเพลิง ซึ่งโดยทั่วไประบบเติมเชื้อเพลิงของเครื่องโทคาแมคจะมีอยู่ด้วยกันสามแบบคือ แบบฉีดพ่นก๊าซ (Gas puff; GP) [2,3] แบบฉีดลำอนุภาคด้วยความเร็วเหนือเสียง (Supersonic Molecular Beam Injection; SMBI) [4] และแบบยิงเม็ดเชื้อเพลิงแข็ง (Pellet Injection; PI) [5–7]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์พลาสมาของ TT-1

พารามิเตอร์	คำอธิบาย	ปริมาณ
R (m)	รัศมีหลัก	0.65
a (m)	รัศมีรอง	0.20
I_p (kA)	กระแสพลาสมา	100
B_T (T)	สนามแม่เหล็กหลักในแนวทอไรด์ล (TF on axis)	1.5
n_e (cm ⁻³)	ความหนาแน่นของอิเล็กตรอน	10^{14}
τ_e (s)	เวลาในการกักเก็บพลังงาน (Energy Confinement Time)	0.01
κ	ค่าความยาว (Elongation)	1.0
δ	ค่าความเป็นสามเหลี่ยม(Triangularity)	1.0

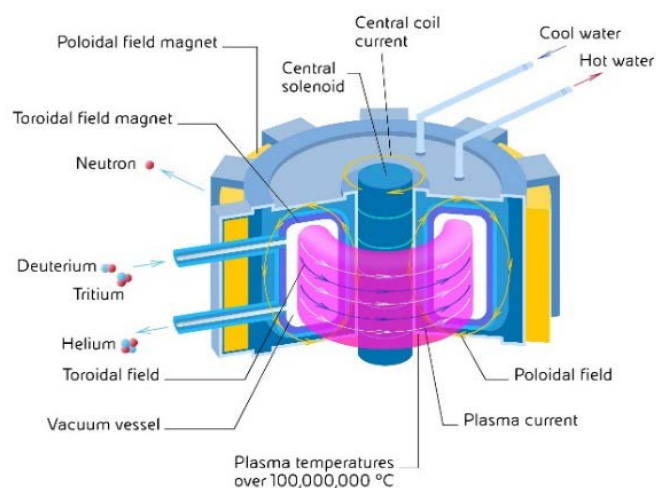
หากเปรียบเทียบระบบเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมเชื้อเพลิงได้มากกว่าแบบ GP ประมาณ 30% - 70% สำหรับเครื่อง Tore Supra, HL-2A และ EAST [4,8,9] และแบบ PI เป็นแบบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดเนื่องจากสามารถเติมเชื้อเพลิงให้เข้าไปได้ถึงแกนกลางของพลาสมาได้ [10,11] และรักษาเสถียรภาพของพลาสมาให้คงอยู่ได้นานจากการรายงานผลการทดสอบในเครื่องโทคาแมค ASDEX และ JET [12–14] แต่แบบ PI จะมีลักษณะการทำงานและระบบการติดตั้งที่ซับซ้อนมากกว่าและราคาค่อนข้างสูงกว่าแบบ SMBI แม้ว่าการใช้เทคนิคการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ในตอนแรกจะมีจุดประสงค์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเติมเชื้อเพลิงและการส่งเชื้อเพลิงให้เข้าไปได้ถึงที่สุดเท่านั้น แต่หลังจากมีการพัฒนาเทคโนโลยีนี้มาอย่างต่อเนื่องมากกว่าสิบปีทำให้ระบบเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI กลายเป็นวิธีเติมเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบ GP นอกจากนี้เมื่อมีการเพิ่มความถี่และความดันสูงในการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI พบว่าสามารถเติมเชื้อเพลิงให้ทะลุผ่านความหนาแน่นของพลาสมาได้ถึงยิ่งขึ้น เนื่องจากมีความเร็วสูงและมีความแตกต่างต่ำหรือก๊าซที่ฉีดพ่นเป็นลำอนุภาคไม่กระจายออก ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพเทียบเคียงได้กับการเติมเชื้อเพลิงแบบ PI ขนาดเล็กนั่นเอง ดังนั้นการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI จึงเป็นทางเลือกหนึ่งในการเติมเชื้อเพลิงให้กับพลาสมา โดยเฉพาะเครื่องโทคาแมคขนาดกลางและขนาดเล็ก เนื่องจากให้ประสิทธิภาพเพียงพอสำหรับการเติมเชื้อเพลิงให้กับพลาสมา และยังสามารถรักษาเสถียรภาพของพลาสมาให้คงอยู่ได้นานขึ้น

อย่างไรก็ดียังมีความจำเป็นที่จะต้องศึกษาการเพิ่มความดันก๊าซของแหล่งกำเนิดลำอนุภาคให้มีความต่อเนื่องและลดอุณหภูมิของก๊าซลงเพื่อไม่ให้ลำอนุภาคเกิดการขยายใหญ่ขึ้น และการศึกษาถึงตำแหน่งในการฉีดลำอนุภาคด้านที่มีความเข้มของสนามแม่เหล็กต่ำไปยังสนามแม่เหล็กสูงก็มีความน่าสนใจที่จะต้องศึกษาเพิ่มเติม ปัจจุบันระบบเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI มีการติดตั้งใช้งานกับเครื่องโทคาแมคทั่วโลกแล้วจำนวนมาก เช่น HL-2A [4,15,16], EAST [9,17], Tore-Supra หรือ WEST [18], KSTAR [19], W7-AS [20], JT-60U [21], และ SST-1 [22] เป็นต้น

เครื่องโทคาแมค

เครื่องโทคาแมค คือการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ฟิวชันที่ใช้สนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมและกักเก็บพลาสมาให้หลอมรวมกัน จนกระทั่งเกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมา จากนั้นจึงนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปผลิตกระแสไฟฟ้า แต่การที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิวชันได้นั้น ต้องทำให้

พลาสมามีอุณหภูมิสูงมากถึงระดับร้อยล้านองศาเซลเซียส และต้องมีความหนาแน่นเพียงพอที่จะทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาฟิวชันได้อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งต้องมีเวลาในการกักเก็บระดับพลังงานให้ได้มากกว่าพลังงานที่ให้แก่พลาสมา องค์ประกอบหลักของเครื่องโทคาแมค คือห้องสุญญากาศรูปทรงโดนัท ภายในห้องสุญญากาศนี้จะมีเชื้อเพลิงเป็นก๊าซไฮโดรเจนที่หลอมรวมกันโดยการให้ความร้อนและมีความดันสูงจนมีสถานะกลายเป็นพลาสมาซึ่งก็คือก๊าซที่ร้อนและมีประจุไฟฟ้า อนุภาคที่มีประจุของพลาสมาสามารถควบคุมได้โดยสนามแม่เหล็กขนาดใหญ่ ที่เกิดจากการรวมกันของสนามแม่เหล็กที่สร้างมาจากขดลวดสองชุดคือขดลวดสนามโทรอยดอล (Toroidal) และขดลวดสนามโพลอยดอล (Poloidal) โดยสนามแม่เหล็กนี้จะเป็นตัวควบคุมและกำหนดทิศทางของพลาสมาทั้งในแนวนอนและแนวตั้งได้ สิ่งสำคัญคือต้องทำให้พลาสมาถูกจำกัดและมีเสถียรภาพและเพื่อป้องกันไม่ให้พลาสมาชนผนังภายในเครื่องโทคาแมค เพราะจะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน สูญเสียการควบคุม หรือเรียกได้ว่าการหยุดชะงัก (Disruption) ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงให้เกิดเพราะโอกาสที่จะสร้างความเสียหายให้กับผนังโทคาแมครวมถึงการทำให้ต้องเริ่มจุดพลาสมาใหม่ ดังนั้นการควบคุมพลาสมาเป็นสิ่งจำเป็นพื้นฐานเพื่อให้พลาสมาอยู่ห่างจากผนังของห้องสุญญากาศ แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องโทคาแมคเบื้องต้นแสดงในรูปที่ 1

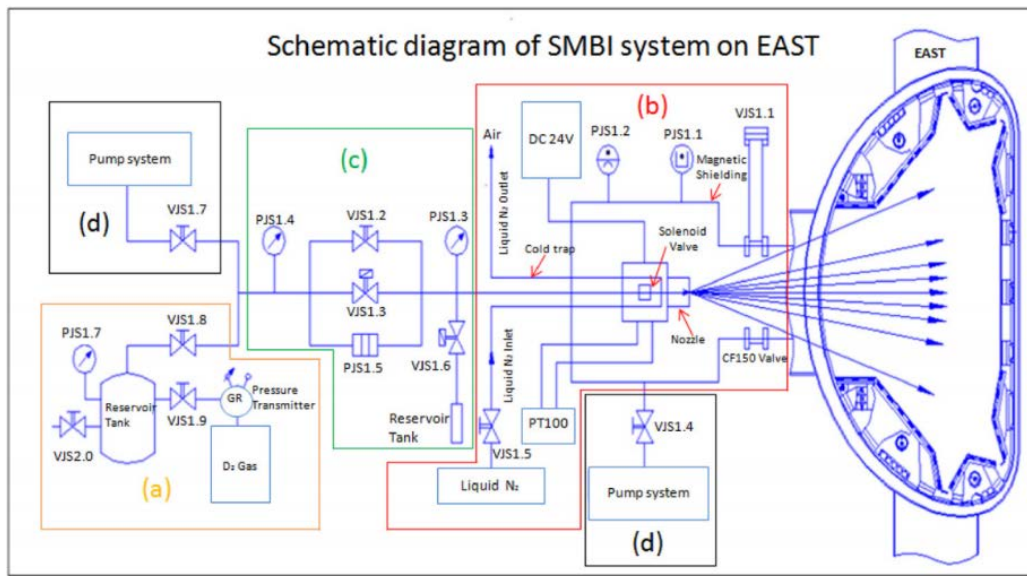


รูปที่ 1 แผนภาพแสดงองค์ประกอบของเครื่องโทคาแมค [23]

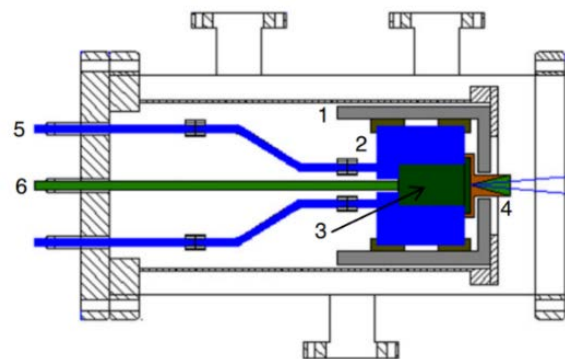
ระบบเดิมเชื้อเพลิงแบบฉีดลำอนุภาคด้วยความเร็วเหนือเสียง

ตัวอย่างรายละเอียดโครงสร้างของระบบเดิมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ที่ได้มีการติดตั้งแล้วกับเครื่องโทคาแมค EAST ของสถาบัน ASIPP สาธารณรัฐประชาชนจีน แสดงดังในรูปที่ 2 ประกอบด้วยระบบพื้นฐานสี่ระบบคือ ระบบจ่ายก๊าซ ระบบฉีดลำอนุภาค ระบบวัดความดัน ระบบปั๊ม โดยส่วนประกอบของหัวฉีดลำอนุภาคของระบบ SMBI นี้ประกอบด้วย 1) ส่วนกำบังสนามแม่เหล็ก 2) cold trap 3) โซลินอยด์วาล์ว 4) หัวฉีดลาवाल (Laval nozzle) 5) LN2 pipeline และ 6) แหล่งจ่ายก๊าซความดันสูง (1-2 MPa) แสดงในรูปที่ 3 โดยที่หัวฉีดลาवालจะติดตั้งไว้ด้านหน้าโซลินอยด์วาล์วมีระยะห่างจากพลาสมาประมาณ 2 เมตร ประสิทธิภาพในการเดิมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ที่วิเคราะห์ผลจากการฉีดเชื้อเพลิงหลายๆ ครั้ง ในช่วง ohmic อยู่ที่ประมาณ 15%-30% เมื่อเทียบกับแบบ GP แสดงในรูปที่ 4 [17] แหล่งกำเนิดลำอนุภาคเป็นห้องเล็ก ๆ ที่สามารถเก็บก๊าซตั้งต้นหรือก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้งาน (Working gas) ไว้ในความดันและอุณหภูมิที่แน่นอน หลักการทำงานของระบบ SMBI คือลำอนุภาคความเร็วเหนือเสียงจะเกิดขึ้นเมื่อมีการฉีดก๊าซขับโซนิคเข้าไปในโซนสุญญากาศผ่านหัวฉีดลาवाल ลักษณะสำคัญคือลำอนุภาคที่ถูกฉีดเข้าไปนั้นจะถูกขับออกได้อย่างอิสระไปยังห้องโซนสุญญากาศโดยไม่มีท่อนำทางใด ๆ

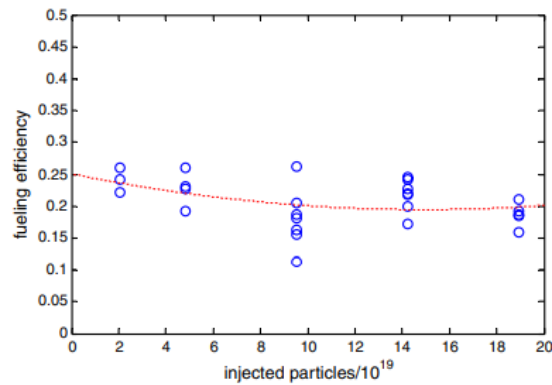
เมื่อเทียบกับ GP แล้ว SMBI มีความเร็วในการฉีดที่สูงกว่าและสามารถโฟกัสลำของอนุภาคได้มากกว่า ทั้งนี้ต้องมีการปรับปรุงให้มีความเหมาะสมในการทำงานร่วมกับระบบควบคุมที่มีค่าตอบสนองไวมาก ซึ่งจะทำให้ได้ผลลัพธ์ของความสัมพันธ์เชิงเส้นที่ดีระหว่างค่าอินพุตก๊าซและความยาวพัลส์ ส่งผลให้ระบบนี้ทำงานได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น



รูปที่ 2 แผนภาพระบบเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ของเครื่องโทคาแมค EAST



รูปที่ 3 โครงร่างหัวฉีดลำอนุภาคของระบบ SMBI ของเครื่องโทคาแมค EAST [17]

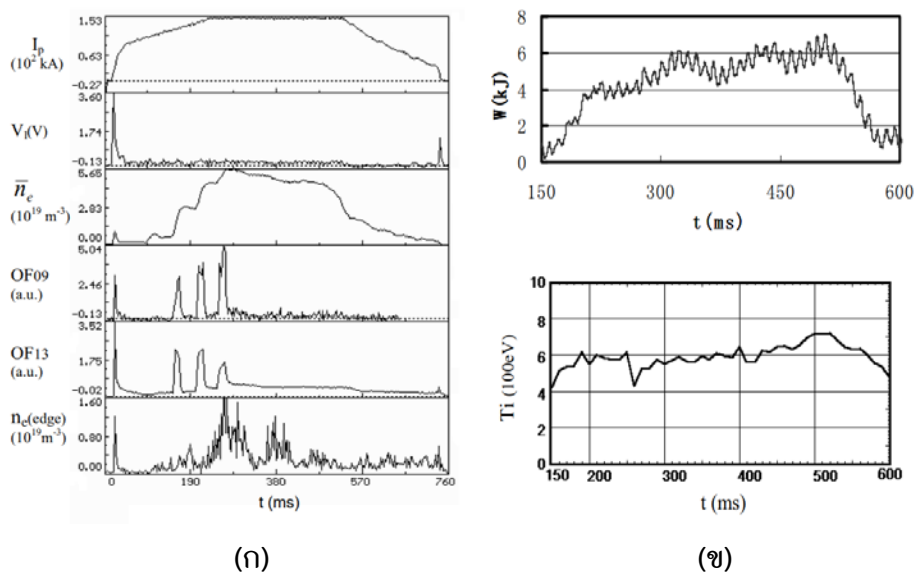


รูปที่ 4 ประสิทธิภาพในการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI เป็นฟังก์ชันของจำนวนอนุภาคที่ฉีดของเครื่องโทคาแมค EAST [17]

การศึกษาประสิทธิภาพของการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI กับเครื่องโทคาแมค HL-1M [24] มีดังนี้

- ความมีประสิทธิภาพสูงของ SMBI แบบมัลติพัลส์ที่ความดันสูง (High Performance of High-Pressure Multi-Pulse SMBI)

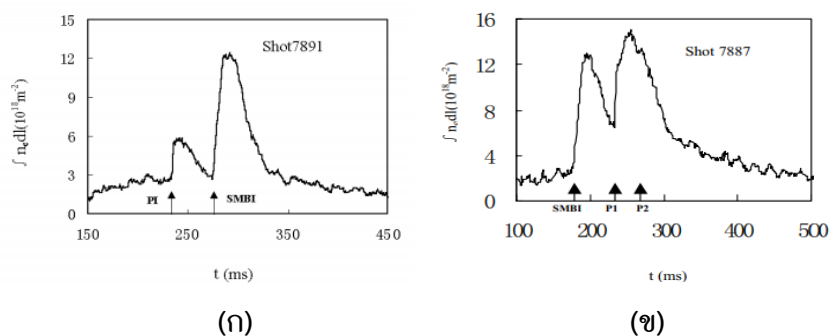
จากการศึกษาระบบ SMBI ที่ความดันสูงทำการฉีดแบบมัลติพัลส์ทดสอบกับเครื่องโทคาแมค HL-1M พบว่าเมื่อความดันของแหล่งก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 0.5 MPa เป็น 1.0 MPa หรือมากกว่า จะทำให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นรูปบันไดจาก $0.77 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ เป็น $5.67 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ดังแสดงในรูปที่ 5(ก) ช่วงการให้ SMBI สามพัลส์ ใช้แรงดันก๊าซที่ 1.05 MPa ในช่วงระยะเวลาของการฉีดลำอนุภาคในสองพัลส์แรกพลาสมาสามารถเก็บพลังงานไว้ได้และมีการสะสมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นก็รักษาสภาวะให้คงที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5(ข) นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าอุณหภูมิไอออนจะเพิ่มขึ้นเป็น 0.6 keV หลังจากการฉีดลำอนุภาคครั้งแรกแล้วยังสามารถคงอุณหภูมินี้ได้นาน โดยใช้เวลาในการกักเก็บพลังงานนี้ประมาณ 30 ms ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของ SMBI นับเป็นระบบเติมเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มในการกักเก็บและควบคุมพลังงานให้มีเสถียรภาพได้ [24]



รูปที่ 5 (ก) การฉีดลำอนุภาคแบบมัลติพัลส์ และ (ข) การคงอยู่ของพลังงานและอุณหภูมิไอออน

● การเปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นระหว่าง SMBI และ PI

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบเดิมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ความดันสูงและแบบ PI ขนาดเล็ก เมื่อทำการทดสอบที่ Ohmic โหมดเดียวกัน และกระแสพลาสมาอยู่ในช่วงพลาโต ความแตกต่างเพียงอย่างเดียวในเงื่อนไขคือลำดับการฉีด พบว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (dn/dt) สำหรับ SMBI แรงดันสูงนั้นมีค่าสูงกว่าหรือต่ำกว่าแบบ PI ขนาดเล็กเพียงเล็กน้อยดังที่แสดงในภาพที่ 6 การทดลองเลขที่ 7891 (SMBI ที่ความดัน 11.5 MPa) และ 7887 (SMBI ที่ความดัน 0.5 MPa) ขนาดเม็ดเชื้อเพลิงแช่แข็งทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm และความสูง 1.5 mm และความเร็วเฉลี่ยของ PI ก่อนที่จะเข้าสู่พลาสมาประมาณ 1,000 m/s และค่า dn/dt ของ SMBI ความดันสูงและ PI ขนาดเล็กสำหรับการทดลองเลขที่ 7891 คือ $1.5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}/\text{s}$ และ $1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}/\text{s}$ ตามลำดับ สำหรับการทดลองเลขที่ 7887 ค่า dn/dt ของ SMBI จะลดลงเหลือ $8.7 \times 10^{20} \text{ m}^{-2}/\text{s}$ ในขณะที่ค่าของ dn/dt สำหรับ PI ทั้งสองจะเท่ากับการทดลองเลขที่ 7891 ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความดันก๊าซของ SMBI สำหรับการทดลองเลขที่ 7887 น้อยกว่าการทดลองเลขที่ 7891 ดังนั้นความดันของการเดิมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ต้องมีค่าที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดประสิทธิภาพเทียบเคียงได้กับแบบ PI



รูปที่ 6 เปรียบเทียบอัตราการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นแบบ (ก) SMBI และ (ข) PI ที่ความดันต่างกัน

การศึกษาระบบเดิมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ของเครื่องโทคาแมค TT-1

เครื่อง TT-1 หรือก่อนหน้านี้เรียกว่าเครื่อง HT-6M เป็นเครื่องโทคาแมคขนาดเล็กที่มีรัศมีหลัก 0.65 m และรัศมี 0.20 m ซึ่งมีสนามแม่เหล็กหลักในแนวโพรอยดอลเป็นตัวกักเก็บพลาสมาจึงทำให้รูปร่างของพลาสมาเกือบจะเป็นวงกลม มีระบบเดิมเชื้อเพลิงสองแบบคือแบบ GP และแบบ PI โดยที่ระบบเดิมเชื้อเพลิงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 m ยาว 0.8 m ความเร็วของก๊าซเชื้อเพลิงก่อนฉีด 1 km/s เมื่อเข้าสู่พลาสมาแล้วความเร็วลดลงเหลือ 800 m/s ความดันมากกว่า 3 Pa สามารถส่งก๊าซเชื้อเพลิงเข้าไปได้ลึกประมาณ 7-8 cm อุณหภูมิของอิเล็กตรอนประมาณ 500 eV สทน. จึงทำการศึกษาลองระบบการเดิมเชื้อเพลิงพลาสมาของเครื่องโทคาแมค TT-1 แบบ SMBI [25] กับเครื่องโทคาแมค TT-1 ซึ่งในระยะแรกของการเดินเครื่องจะใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิง ซึ่งความหนาแน่นเฉลี่ยประมาณ 10^{18} m^{-3} โดยได้ทำการจำลองว่าระบบ SMBI จะถูกฉีดเข้าไปยังพลาสมา จากด้านนอกเครื่องโทคาแมคหรือข้างที่มีสนามแม่เหล็กความเข้มต่ำ (LFS) ดังนั้นจึงทำการศึกษาทดสอบการเปลี่ยนความเร็วในการฉีด และศึกษาเปรียบเทียบผลของความหนาแน่นที่แตกต่างกัน เพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาเบื้องต้น จึงสมมุติว่าปริมาณของก๊าซเจือปน (impurity) อื่น ๆ นั้นเกิดขึ้นน้อยมากและจะไม่นำมาพิจารณาในการศึกษานี้

(1) แบบจำลอง SMBI

การฉีดลำอนุภาคด้วยความเร็วเหนือเสียงให้ก๊าซเชื้อเพลิง เช่น ไฮโดรเจนหรือดิวเทอเรียม ในเครื่องโทคาแมคจะฉีดเข้าจากบริเวณขอบ เมื่ออนุภาคเหล่านี้เคลื่อนที่เข้าไปพลาสมาจะทำให้ได้รับความร้อนและเกิดการชนกันจำนวนมากและเกิดกระบวนการแยกตัวกลายเป็นอะตอมและเกิดการไอออไนซ์ในที่สุด จึงทำให้ความหนาแน่นของพลาสมาเพิ่มขึ้น ในการศึกษาเป็นการใช้แบบจำลองการเติมเชื้อเพลิงอย่างง่ายที่พิจารณาเฉพาะอิทธิพลของกระบวนการของอะตอม ซึ่งพิจารณาถึงการถ่ายเทพลังงานของอนุภาคสี่ชนิด คือ โมเลกุลไฮโดรเจน อะตอมไฮโดรเจน ไอออน และ อิเล็กตรอน โดยสมมุติว่าแนวโปรยดัลและโทรยดัลสมมาตร สมการการถ่ายเทพลังงานลดลงในหนึ่งมิติตามทิศทางแนวรัศมี สมมุติให้พลาสมาในเครื่องโทคาแมคมีความเป็นกลาง สมการการถ่ายเทพลังงานของพลาสมาในแนวรัศมีของความหนาแน่นอิเล็กตรอน (n_e) อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) และอุณหภูมิของไอออน (T_i) สามารถเขียนได้ดังนี้ [26]

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} - D_{\perp e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial n_e}{\partial r} + \frac{\partial^2 n_e}{\partial r^2} \right) = S_I^p, \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_e}{\partial t} - \frac{2}{3} \chi_{\perp e} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_e}{\partial r^2} \right) = -v_I \left(T_e + \frac{2}{3} W_I \right) - \frac{2}{3} v_{diss} W_{diss} - \frac{2m_e}{M_i} \frac{T_e - T_i}{\tau_e} \quad (2)$$

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} - \frac{2}{3} \chi_{\perp i} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_i}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} \right) = -v_I T_i - \frac{2m_e}{M_i} \frac{T_e - T_i}{\tau_e}, \quad (3)$$

เมื่อ $D_{\perp e}$, $\chi_{\perp e}$, $\chi_{\perp i}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านพลังงานในแนวรัศมีของความหนาแน่นอิเล็กตรอน (n_e), อุณหภูมิอิเล็กตรอน (T_e) และอุณหภูมิของไอออน (T_i) ตามลำดับ และ (S_I^p) คือแหล่งกำเนิดอนุภาคจากอะตอมที่ไอออไนซ์ สมการการถ่ายเทของลำอนุภาคหรือโมเลกุลของก๊าซเชื้อเพลิงที่ฉีดเข้าสู่พลาสมา (n_m) คือสมการการถ่ายเทพลังงานความร้อนในช่วงที่ฉีดลำอนุภาคตามทิศในแนวรัศมี สามารถเขียนได้เป็น

$$\frac{\partial n_m}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_{rm} n_m) = -S_{diss}^p, \quad (4)$$

$$\frac{\partial V_{rm}}{\partial t} + V_{rm} \frac{\partial V_{rm}}{\partial r} = -\frac{1}{n_m M_m} \frac{\partial P_m}{\partial r}, \quad (5)$$

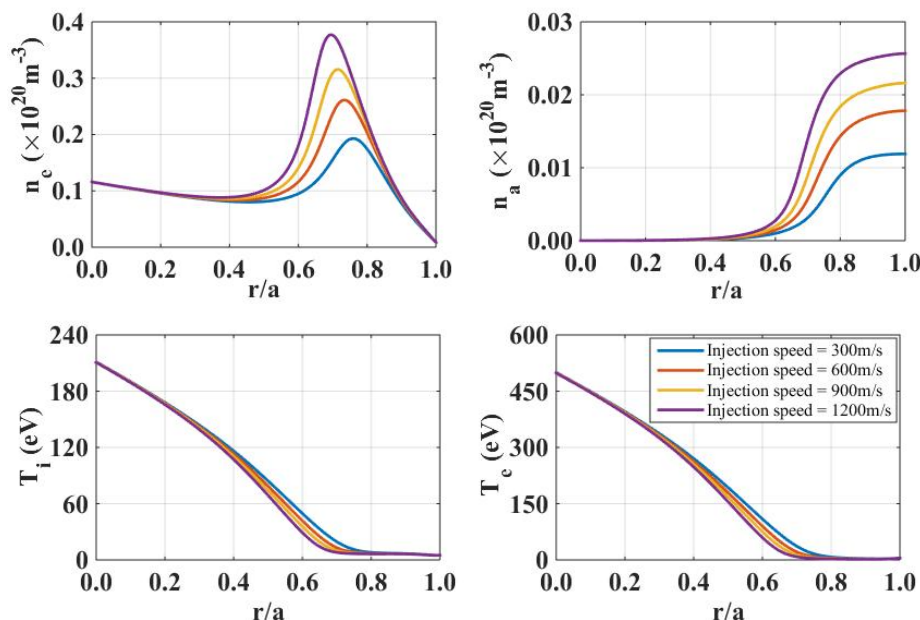
เมื่อ V_{rm} คือความเร็วในแนวรัศมีของลำอนุภาค S_{diss}^p คือ sink การสลายตัวของอนุภาคโดยกระบวนการ dissociation และ $P_m = k_B n_m T_m$ คือความดันของอนุภาค ในที่นี้สมมุติให้อนุภาคมีอุณหภูมิคงที่ที่อุณหภูมิห้อง 300 เคลวิน หลังจากการแยกตัว โมเลกุลจะกลายเป็นอะตอมและการส่งผ่านของอะตอมเหล่านี้เขียนได้เป็น

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} - D_{\perp a} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial n_a}{\partial r} + \frac{\partial^2 n_a}{\partial r^2} \right) = S_I^p + 2S_{diss}^p, \quad (6)$$

เมื่อ $D_{\perp a}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวรัศมีของอะตอม (radial diffusion coefficient of atoms) และ S_{diss}^p คือแหล่งกำเนิดอะตอมจากกระบวนการแยกตัว

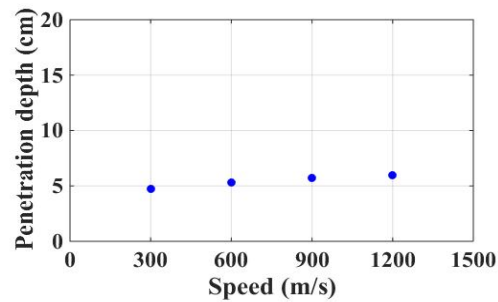
(2) ผลของความเร็วในการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI

ความเร็วในการฉีดลำอนุภาคเป็นหนึ่งในปริมาณที่สำคัญต่อการกำหนดความลึกในการทะลุผ่านเข้าไปบริเวณตรงกลางพลาสมาและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเติมเชื้อเพลิง จากการศึกษาผลของความเร็วในการฉีดลำอนุภาคความเร็วเหนือเสียงไปยังพลาสมาในเครื่องโทคาแมคที่ความเร็วค่าต่างๆ ด้วยความหนาแน่นเฉลี่ยของพลาสมาไฮโดรเจนเป็น $6.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ เมื่อทำการฉีดลำอนุภาคด้วยความเร็ว 300 m/s – 1,200 m/s จะเห็นว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอน (n_e) และความหนาแน่นของอะตอมไฮโดรเจน (n_a) มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 7 (แถวบน) ซึ่งความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นจากการเพิ่มความเร็วในแนวรัศมีของโมเลกุลที่ฉีด (V_{rm}) ที่ $t = 100 \text{ } \mu\text{s}$ จะส่งผลต่ออุณหภูมิของอิเล็กตรอน (T_e) และอุณหภูมิไอออน (T_i) แคบริเวณที่ขอบเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 7 (แถวล่าง)



รูปที่ 7 โปรไฟล์ลักษณะต่างๆ ของพลาสมาที่ฟังก์ชันรัศมีปกติ

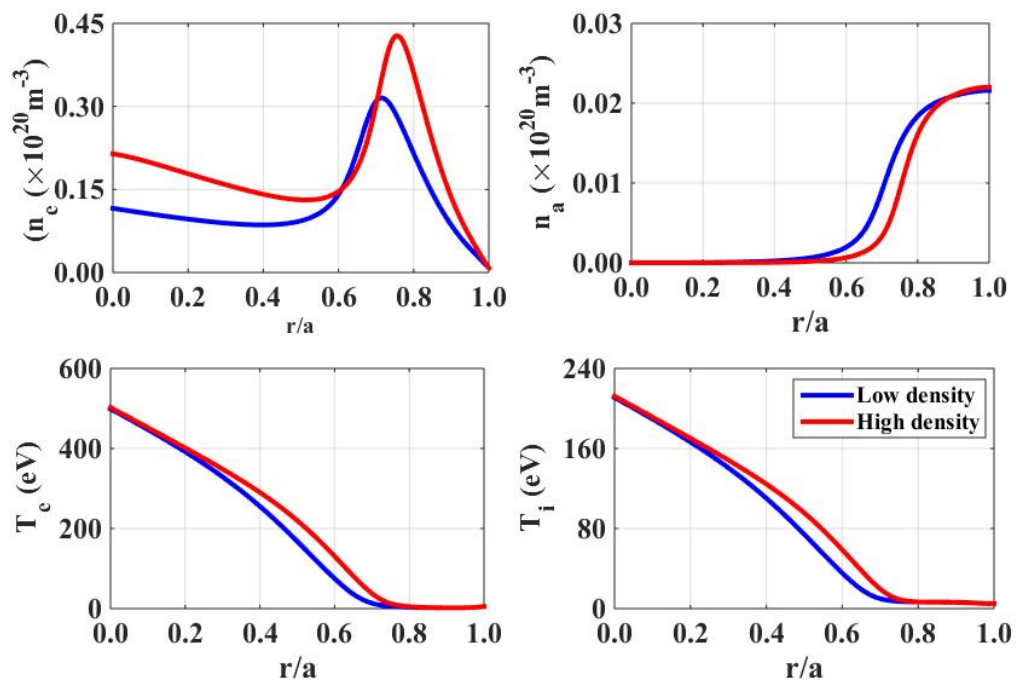
ภายในแกนกลางของพลาสมาหรือบริเวณที่รัศมีปกติน้อยกว่า 0.6 ($r/a < 0.6$) นั้น ความหนาแน่นของอนุภาคมีค่าเท่ากับศูนย์ ดังนั้นความเร็วแนวรัศมีช่วยเพิ่มค่าความหนาแน่นที่ขอบของพลาสมา นอกจากนี้เราจะเห็นว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและไอออนมียอดใกล้กับขอบของพลาสมาหรือที่รัศมีปกติประมาณ 0.7 ถึง 0.8 ซึ่งพีคความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ความเร็วในการฉีดแต่ละค่าถูกเลื่อนเข้าหาศูนย์กลางเมื่อความเร็วในการฉีดเพิ่มขึ้น เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของความเร็วในการฉีดกับระยะความลึกในการเติมเชื้อเพลิงเข้าสู่ใจกลางพลาสมา เรากำหนดให้ระยะความลึกเป็นระยะทางที่อนุภาคพลาสมาเคลื่อนที่จากขอบของจุดพีคความหนาแน่นของพลาสมาหลังจากทำการฉีดไปแล้วที่เวลา $100 \text{ } \mu\text{s}$ ดังในรูปที่ 8 กราฟระยะความลึกเมื่อเทียบกับความเร็วในการฉีด กราฟนี้แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าความเร็วในการฉีดที่เร็วขึ้นจะให้ความลึกมีระยะเพิ่มขึ้น



รูปที่ 8 ความลึกของการทะลุเข้าไปในพลาสมาเทียบกับความเร็ว

(3) ผลของความหนาแน่นในการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI

การเปรียบเทียบผลของการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI ระหว่างพลาสมาที่มีความหนาแน่นต่ำ ($n_e = 6.3 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$) และความหนาแน่นสูง ($n_e = 1.4 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$) ด้วยความเร็ววงที่ 900 m/s พบว่าพิกัดของความหนาแน่นเพิ่มสูงสุดที่ระยะรัศมีปกติประมาณ 0.7-0.8 ดังแสดงในรูปที่ 9 แต่อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าจุดสูงสุดของความหนาแน่นจะถูกเลื่อนออกด้านนอกสำหรับพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูงกว่า ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าสำหรับพลาสมาความหนาแน่นที่สูง การฉีดได้เร็วขึ้นนั้นจำเป็นยิ่งต่อการเพิ่มความลึกให้อนุภาคเพื่อให้เข้าไปยังใจกลางพลาสมาได้



รูปที่ 9 โปรไฟล์รัศมีของอุณหภูมิ ความหนาแน่น และความเร็วในการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

ระบบเติมเชื้อเพลิงเป็นปัจจัยสำคัญของพลาสมาในเครื่องโทคาแมค เพื่อให้การเกิดพลาสมาเป็นไปได้อย่างต่อเนื่อง ผลการศึกษาการจำลองพฤติกรรมพลาสมาในการเติมเชื้อเพลิงแบบ SMBI เบื้องต้นแสดงให้เห็นว่าเมื่อลำอนุภาคของไฮโดรเจนถูกฉีดเข้าสู่พลาสมาจากบริเวณขอบพบว่าความหนาแน่นของอนุภาคจะเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากโมเมนตัมของก๊าซเชื้อเพลิงเกิดการแยกตัวกลายเป็นอะตอม เมื่ออะตอมเกิดการไอออไนซ์จึงทำให้จำนวนไอออนและอิเล็กตรอนมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และในขณะเดียวกันอุณหภูมิของไอออนและอิเล็กตรอนก็มีการลดลงอย่างต่อเนื่อง ณ จุดสูงสุดของความหนาแน่นที่ขอบอนุภาคจะค่อยๆ กระจายเข้าไปยังแกนกลางของพลาสมา ซึ่งความเร็วในการฉีดที่สูงจะทำให้อนุภาคเจาะเข้าไปในพลาสมาได้ลึกมากขึ้น ทั้งนี้เครื่องโทคาแมค HT-6M ใช้ระบบเติมเชื้อเพลิงแบบ PI สามารถส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในพลาสมาได้ลึกประมาณ 7-8 cm ด้วยความเร็วในการฉีด 1 km/s หากเราต้องการความลึกในการส่งเชื้อเพลิงพลาสมาให้กับเครื่องโทคาแมค TT-1 ที่ประมาณ 7 cm จึงจำเป็นต้องใช้ความเร็วในการฉีด 1,200 m/s ไปยังพลาสมาที่มีความหนาแน่นเฉลี่ย 10^{19} m^{-3} อย่างไรก็ตามความเร็วในการฉีดขั้นต่ำ 300 m/s ก็สามารถเติมเชื้อเพลิงพลาสมาให้เข้าไปได้ที่ความลึก 5 cm ดังนั้นต้องใช้ความเร็วในการฉีดที่เร็วขึ้นหากเครื่องโทคาแมคเดินเครื่องด้วยความหนาแน่นของพลาสมาที่สูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] HT-6M Team, "Engineering Aspects of The HT-6M Tokamak", Fusion Technology 9, 476-480 (1986).
- [2] S. Sajjad, X. Gao, B. Ling, et. al., "Effect of gas puffing on current ramp-down ohmic discharges in HT-7 Tokamak", Physics Letters A 373, 1133-1139 (2009).
- [3] S. J. Zweben, D. P. Stotler, R. E. Bell, et. al., "Effect of a deuterium gas puff on the edge plasma in NSTX", Plasma Physics and Controlled Fusion 56, 095010 (2014).
- [4] D. L. Yu, C. Y. Chen, L. H. Yao, et. al., "Penetration characteristics of supersonic molecular beam injection on HL-2A Tokamak", Nuclear Fusion 50, 035009 (2010).
- [5] W. A. Houlberg, S. E. Attenberger, L. R. Baylor, et. al., "Pellet penetration experiments on JET", Nuclear Fusion 32, 1951 (1992).
- [6] L.R. Baylor, G.L. Schmidt, W.A. Houlberg, et. al., "Pellet fuelling deposition measurements on Jet and TFTR", Nuclear Fusion 32, 2177 (1992).
- [7] L. R. Baylor, T. C. Jernigan, C. J. Lasnier, et. al., "Fueling efficiency of pellet injection on DIII-D", Journal of Nuclear Materials 266-269, 457 (1999).
- [8] J. H. L. Bucalossi, E. Tsitrone, and G. Martin, "Fuelling for long pulse with standard gas puff, pulsed supersonic gas and pellet injection", in IAEA-CN-94, p. EX/P4-04. (2003)
- [9] Xing-Wei Z., Jian-Gang L., Jian-Sheng H., et. al., "Investigation of gas puffing and supersonic molecular beam injection density feedback experiments on EAST", Acta Physica Sinica 62(15): 155202 (2013)
- [11] G. Vlasov, O. Gruber, M. Kaufmann, et. al., "Quasi-stationary pellet fuelled Ohmic discharges with medium density in ASDEX", Nuclear Fusion 27, 351-362 (1987).
- [12] M. Kaufmann, K. Büchl, G. Fussmann, et. al., "Pellet injection with improved confinement in ASDEX", Nuclear Fusion 28, 827-848 (1988).
- [13] B. J. D. Tubbing, B. Balet, D. V. Bartlett, et. al., "H-mode confinement in JET with enhanced performance by pellet peaked density profiles", Nuclear Fusion 31, 839-850 (1991).

- [14] M. Hugon, B. P. van Milligen, P. Smeulders, et. al., "Shear reversal and MHD activity during pellet enhanced performance pulses in JET", *Nuclear Fusion* 32, 33-43 (1992).
- [15] L. Yao, B. Feng, C. Chen, et. al., "Plasma behaviour with hydrogen supersonic molecular beam and cluster jet injection in the HL-2A Tokamak", *Nuclear Fusion* 47, 1399-1410 (2007).
- [16] S. Hong-Juan, D. Xuan-Tong, Y. Liang-Hua, et. al., "Experiment of non-local effect with SMBI on HL-2A", *Plasma Physics and Controlled Fusion* 52, 045003 (2010).
- [17] X. Zheng, J. Li, J. Hu, et. al., "Comparison between gas puffing and supersonic molecular beam injection in plasma density feedback experiments in EAST", *Plasma Physics and Controlled Fusion* 55, 115010 (2013).
- [18] B. Pégourié, E. Tsiatroni, R. Dejarnac, et. al., "Supersonic gas injection on Tore Supra", *Journal of Nuclear Materials* 313-316, 539-542 (2003).
- [19] W. W. Xiao, P. H. Diamond, W. C. Kim, et. al., "ELM mitigation by supersonic molecular beam injection: KSTAR and HL-2A experiments and theory", *Nuclear Fusion* 54, 023003 (2014).
- [20] Y. Lianghua and J. Baldzuhn, "Experiments on Gas Jet in the Wendelstein 7-AS Stellarator", *Plasma Science and Technology* 5, 1933-1938 (2003).
- [21] H. Takenaga, Y. Miyo, J. Bucalossi, et al., "Fuelling characteristics of supersonic molecular beam injection in JT-60U", *Nuclear Fusion* 50, 115003 (2010).
- [22] S. George, Y. Paravastu, M. S. Khan, et al., "Design and integration of SMBI system for SST-1 Tokamak", *Journal Physics: Conference Series* 823, 012063 (2017).
- [23] A. Poornima, "Tokamak, the promise of magnetic fusion", from <https://www.eni.com/en-IT/Scientific-Research.html> (2020).
- [24] L. Yao, J. Dong, Y. Zhou, et al., "High performance experiments on high pressure supersonic molecular beam injection in the HL-1M Tokamak", *Nuclear Fusion* 44, 420-426 (2004).
- [25] J. Prompting, A. Wisitsorasak, B. Chatthong, "Numerical study of supersonic molecular beam injection system in Thailand Tokamak I", *Plasma Fusion Research* 15, 2403033 (2020).
- [26] Y.-H. Wang, W.-F. Guo, Z.-H. Wang, et al., "Radial transport dynamics studies of SMBI with a newly developed TPSMBI code", *Chinese Physics B* 25, 106601 (2016).