



## การจัดลำดับเทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์สำหรับประเทศไทย TECHNOLOGY RANKING OF SMALL MODULAR NUCLEAR REACTORS FOR THAILAND

สมบูรณ์ รัศมี<sup>1</sup>, พงษ์แพทย์ เฟ่งวานิชย์<sup>1</sup>, กัมปนาท ซิลวา<sup>2</sup>, สุพิชชา จันทโรยา<sup>1</sup>, และ ธวัชชัย อ่อนจันทร์<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

โทร. 0-22186781

<sup>2</sup>สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ต. ทราয়มูล อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

โทร. 037-392943

<sup>3</sup>ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและระบบการผลิต สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ต.คลองหนึ่ง อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12121 โทร. 0-2986-9009

### บทคัดย่อ

เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ (Small Modular Nuclear Reactor, SMR) ซึ่งมีขนาดกำลังผลิตไฟฟ้าขนาดไม่เกิน 300 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า กำลังได้รับความสนใจเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ทั้งจากประเทศที่มีประสบการณ์การใช้โรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์มาเป็นระยะเวลายาวนาน และจากประเทศที่เพิ่งอยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาโครงการโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์รวมทั้งประเทศไทย ความสนใจนี้ได้รับอิทธิพลมาจากจุดเด่นหลายประการของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ เช่น ทางวิศวกรรมความปลอดภัย ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งแตกต่างไปจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดใหญ่ เนื่องจากเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ที่มีอยู่ในปัจจุบันมีมากกว่า 45 ประเภทเทคโนโลยีในประเทศผู้ผลิต 13 ประเทศ โดยส่วนใหญ่อยู่ในระหว่างการพัฒนาและออกแบบและคาดว่าจะเริ่มมีการใช้งานเชิงพาณิชย์ได้ในช่วงอีกประมาณ 10 ปี ข้างหน้า ดังนั้นเพื่อเป็นการเตรียมพร้อมสำหรับการเลือกใช้งานเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยในอนาคต การศึกษาครั้งนี้ คณะผู้วิจัยจึงได้ออกแบบหลักเกณฑ์และวิธีการเบื้องต้นในการจัดลำดับเทคโนโลยี โดยพิจารณาถึงความต้องการของประเทศไทย และข้อมูลประกอบที่เกี่ยวข้องจากผู้เชี่ยวชาญของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ ซึ่งวิธีการและหลักเกณฑ์ที่พัฒนาขึ้นนี้ได้นำไปทดสอบกับข้อมูลที่มีอยู่ของเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์จำนวน 6 ชนิดเทคโนโลยีที่คาดว่าจะมีการใช้งานในระยะเวลาย้อนไกล ซึ่งพบว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นสามารถทำการจัดลำดับเทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ได้อย่างสมเหตุสมผลและได้ลำดับเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย

คำสำคัญ : เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์, การจัดลำดับ, เทคโนโลยี, ประเทศไทย

Somboon Rassame<sup>1</sup>, Phongphaeth Pengvanich<sup>1</sup>, Kampanart Silva<sup>2</sup>, Supitcha Chanyotha<sup>1</sup>, and Thawatchai Onjun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, Wangmai, Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand,

<sup>2</sup> Thailand Institute of Nuclear Technology (TINT), Tambol Saimoon, Amphur Ongkharak, Nakornnayok 26120, Thailand,

<sup>3</sup> School of Manufacturing Systems and Mechanical Engineering, Sirindhorn International Institute of Technology, Thammasat University, Rangsit Campus, Pathumthani 12121, Thailand,

---

**ABSTRACT**

The Small Modular Nuclear Reactor (SMR) which has an electricity output less than 300 MWe becomes an interesting option for several countries, both of nuclear power countries and emerging nuclear energy countries including Thailand. This is due to several advantages of the SMR over the conventional large nuclear power plant such as safety engineering safety design, economics. It is estimated that >45 SMR technologies have been researched and developed in 13 technology holder countries. The commercial deployment of SMR is expected in the next decade. In order to be ready for the selection process of SMR technology in Thailand, this study developed the methodology for the ranking SMR technologies with the consideration of Thailand needs and suggestions of the nuclear expert from International Atomic Energy Agency (IAEA). The developed methodology is tested with the 6 SMR technologies which expected to become available for the near-term deployment. The results reveal that the methodology performs reasonably the ranking process of SMR technologies and ranking of SMR technologies for Thailand are gained.

**KEYWORDS:** Nuclear Reactor, Ranking, Technology, Thailand

## 1. บทนำ

ตามคำนิยามล่าสุดของทบวงการปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency, IAEA) Small Modular Nuclear Reactors หรือคำย่อ SMR [1] S หมายถึง เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กที่เป็นเครื่องปฏิกรณ์ที่สามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้ในระดับที่ต่ำกว่า 300 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า ที่มีการใช้งานแล้วหรือที่อยู่ระหว่างกำลังพัฒนา ส่วน M คือ Modular หรือโมดูล ซึ่งมีความหมายถึง เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีลักษณะเป็นโมดูลที่ทำการผลิตและประกอบเบ็ดเสร็จจากโรงงานที่ทำการผลิต (Factory Fabrication) สามารถทำการขนย้ายโดยรถบรรทุก หรือรถไฟเพื่อนำไปติดตั้งในที่ที่ต้องการได้ หรือมีการใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กหลายโมดูลประกอบกัน (Multi-Module Deployment) และให้รวมถึงลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบน้ำอัดความดันสูง (Pressurized Water Reactor, PWR) ที่มีส่วนประกอบที่สำคัญ เช่น เครื่องผลิตไอน้ำ (steam generator) ประกอบอยู่ในถังปฏิกรณ์ และ R คือเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

จากรายงานของสถาบันนโยบายพลังงานของประเทศสหรัฐอเมริกา (Energy Policy Institute, EPI) ได้กล่าวถึงข้อได้เปรียบหลักของเครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดใหญ่แบบดั้งเดิมไว้ ซึ่งระบุว่า “เครื่องปฏิกรณ์ขนาดเล็กที่ทันสมัยเพื่อการผลิตไฟฟ้าถูกคาดหวังว่าจะมีความเรียบง่ายมากขึ้นในด้านการออกแบบ มีค่าใช้จ่ายต่อหน่วยการผลิตไฟฟ้าต่ำ มุ่งเน้นเพื่อความหลากหลายของการใช้งาน มีขนาดของพื้นที่ตั้งน้อย รวมทั้งได้รับการออกแบบให้มีความปลอดภัยระดับสูงในกรณีที่เกิดความผิดปกติ” [2]

สำหรับประเทศไทย กระทรวงพลังงานได้บรรจุการใช้พลังงานนิวเคลียร์ไว้ในแผนพัฒนากำลังผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศไทย ตั้งแต่ หรือ Power Development Plan 2007 (PDP 2007) โดยมีนโยบายเรื่องโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ที่จะใช้เป็นประเภทโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ขนาดใหญ่ที่เป็นนิยามใช้กันในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันขนาดประมาณ 1000 เมกกะวัตต์ไฟฟ้า แต่หลังจากเกิดเหตุการณ์อุบัติเหตุที่โรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ฟูกูชิมะ ประเทศญี่ปุ่น แผนพัฒนากำลังผลิตกระแสไฟฟ้าของประเทศไทยฉบับปรับปรุง 3 พ.ศ. 2553 (PDP 2010 v3) ได้เลื่อนการเริ่มใช้งานการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานนิวเคลียร์ จากปี พ.ศ. 2566 เป็น พ.ศ. 2569 [3] ทั้งนี้ เพื่อขยายเวลาการเตรียมโครงสร้างพื้นฐาน การเตรียมความพร้อมด้านความปลอดภัย กฎหมาย กฎระเบียบ การเตรียมพร้อมฉุกเฉิน และการสร้างความเข้าใจกับภาคประชาชน อย่างไรก็ตาม ประเทศไทยยังไม่มีแผนในการบรรจุการใช้เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ในแผน PDP ฉบับล่าสุด

ประเทศไทยได้มีการศึกษาเบื้องต้นถึงความเป็นไปได้ในการใช้เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์พบว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์น่าจะเป็นทางเลือกที่เหมาะสมทางเลือกหนึ่งสำหรับการใช้พลังงานนิวเคลียร์สำหรับประเทศไทยต่อไปในอนาคตด้วยความเหมาะสมด้านการลงทุน ระบบสายส่งและตอบโต้ภัยเรื่องความปลอดภัย นอกจากนี้ยังมีความยืดหยุ่นในการปรับขนาดกำลังการผลิตไฟฟ้า [4]

ดังนั้นการศึกษาในเรื่องที่เกี่ยวข้องกับการเลือกใช้เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์จะเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการใช้งานหากมีการตัดสินใจใช้งานในอนาคต เนื่องจากเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กยังเป็นเรื่องใหม่แม้ในต่างประเทศเนื่องจากส่วนใหญ่ยังอยู่ในขั้นตอนการพัฒนา ออกแบบหรือการขอใบอนุญาตออกแบบ วิธีการและหลักเกณฑ์ในการจัดลำดับเทคโนโลยีนั้นอาจไม่สามารถนำหลักเกณฑ์และวิธีการเดิมที่ใช้เพื่อจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์ขนาดใหญ่มาใช้ได้ทั้งหมด เนื่องจากหลายปัจจัย อาทิ เช่น ความแตกต่างของเรื่องขนาดของเครื่องปฏิกรณ์ เทคโนโลยี ความจำกัดในการเข้าถึงข้อมูลของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ ดังนั้นการพัฒนาหลักเกณฑ์และวิธีการเบื้องต้นในการจัดลำดับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์สำหรับประเทศไทยจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อเป็นการเตรียมความพร้อมในการเลือกใช้เทคโนโลยีดังกล่าวของประเทศไทยในอนาคต

## 2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้เคยมีการทำโครงการร่วมกับบริษัทที่ปรึกษาในการจัดทำโครงการ การศึกษาการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นสำหรับการเตรียมการใช้งานโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ในประเทศไทยตามแผน PDP 2010 Rev.3 ในครั้งนั้นได้มีการจัดทำหัวข้อการประเมินจำนวน 3 หัวข้อหลักและ 12 หัวข้อย่อย และระบบการประเมินและการตัดสินใจที่เกี่ยวข้อง เพื่อใช้

ในการตัดสินใจเลือกประเภทของเทคโนโลยีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับประเทศไทยจากจำนวน 5 ประเภทเทคโนโลยีโรงไฟฟ้าในขณะนั้น [5] อย่างไรก็ตาม เนื่องจากผลการประเมินในการศึกษาครั้งนั้นไม่ได้มีการเผยแพร่ออกมาเนื่องจากถือเป็นข้อมูลชั้นสำคัญ (Propriety Information) ทำให้ไม่ทราบถึงรายละเอียดของวิธีการประเมิน

สำหรับในต่างประเทศ วิธีการประเมินเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Reactor Technology Assessment, RTA) ที่พัฒนาขึ้นโดย Division of Nuclear Power ทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ [6] โดยเทคนิคที่ IAEA พัฒนาขึ้นนี้ มุ่งหวังให้เป็นเครื่องมือในการตัดสินใจในการประเมินเทคโนโลยีนิวเคลียร์สำหรับการใช้เลือกเทคโนโลยีและการทำงานสำหรับประเทศที่จะมีการใช้งานโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ในระยะเวลาอันใกล้ ประเทศที่ไม่เคยมีการใช้งานมาก่อนและประเทศที่กำลังจะมีการใช้งานโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์เพิ่มเติม โดยมีกำหนดหัวข้อหลักที่ใช้ในการประเมินทั้งหมด 14 หัวข้อหลัก อย่างไรก็ตามกำหนดหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินในวิธีดังกล่าวไม่ได้มีการกล่าวในรายละเอียดถึงหลักเกณฑ์การประเมินในแต่ละหัวข้อ เพียงแต่มีการแนะนำในเรื่องคำถามที่ควรใช้ประกอบในแต่ละหัวข้อของการประเมิน

นอกจากนั้นหน่วยงาน Institute for Energy and Transport SET-Plan Information System (SETIS) สังกัด DIRECTORATE-GENERAL JOINT RESEARCH CENTRE, EUROPEAN COMMISSION ได้ทำการกำหนดหัวข้อ Key Performance Indicators for the European Sustainable Nuclear Industrial Initiative รวมทั้งหลักเกณฑ์การประเมินในด้านต่างๆ ของความคิดเครื่องนิวเคลียร์แบบใหม่จำนวน 3 ประเภทที่อยู่ระหว่างการพัฒนา อันได้แก่ เทคโนโลยีแบบ Sodium-cooled Fast Reactor (SFR), Lead-cooled Fast Reactor (LFR), และ Gas-cooled Fast Reactor (GFR) จะเห็นได้ว่าการศึกษามุ่งเน้นเฉพาะเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบใหม่ ผลลัพธ์ของการประเมินได้มีการแสดงในรายละเอียด [7]

หน่วยงาน International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO) สังกัดทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศได้พัฒนาระเบียบวิธีการแบบ INPRO [8] เพื่อใช้ในการประเมินเทคโนโลยีของระบบพลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear Energy System) บางครั้งเรียกวิธีการนี้ว่า Nuclear Energy System Assessment (NESA) โดยมุ่งหวังให้วิธีการนี้จะเป็นเครื่องมือสำหรับประเทศต่างๆ ในการที่จะสร้างความตระหนักในเรื่องความยั่งยืนในการใช้ระบบพลังงานนิวเคลียร์ในระยะยาว การแยกแยะให้เห็นช่องว่างในการพัฒนาในด้านต่างๆ สำหรับการเตรียมความพร้อมด้านพลังงานนิวเคลียร์ การช่วยในการออกแบบแผนงานหรือในการตัดสินใจในการเริ่มใช้หรือเพิ่มการใช้พลังงานนิวเคลียร์ในประเทศต่างๆ โดยหัวข้อหลักในการประเมินจำนวน 8 หัวข้อหลักและหัวข้อย่อยที่เกี่ยวข้อง ทั้งนี้ระบบการประเมินแบบ NESA ได้ถูกใช้ในการประเมินระบบพลังงานนิวเคลียร์ในประเทศผู้ถือเทคโนโลยีนิวเคลียร์ อาทิเช่น ประเทศ อาร์เจนตินา บราซิล อินเดีย เกาหลีใต้ และยูเครน [6] อย่างไรก็ตาม ระบบการประเมินแบบ NESA ได้แก่ หัวข้อหลักและหัวข้อย่อยที่ใช้ในการประเมิน รวมถึงเกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินนั้นถูกออกแบบโดยความเห็นของประเทศผู้ผลิตเทคโนโลยีพลังงานนิวเคลียร์เป็นหลัก การนำวิธีการดังกล่าวมาใช้โดยตรงสำหรับประเทศที่ไม่ได้เป็นผู้ผลิตหรือไม่มีประสบการณ์ในการใช้ระบบนิวเคลียร์อาจจะไม่เหมาะสมนัก

### 3. วิธีการจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่พัฒนาโดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ

ในการศึกษาครั้งนี้ เทคนิคหรือวิธีการที่ใช้ในการประเมินเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เทคนิคที่พัฒนาขึ้นโดยทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ หรือ เทคนิคการประเมินเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Reactor Technology Assessment, RTA) [6] ซึ่งจัดทำขึ้นเพื่อใช้งานสำหรับประเทศที่จะมีการใช้งานในระยะเวลาอันใกล้ ถูกเลือกใช้เพื่อต้นแบบในการพัฒนาหลักเกณฑ์และวิธีการเบื้องต้นในการจัดลำดับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์สำหรับประเทศไทยเนื่องจากเป็นเครื่องมือมาตรฐานที่ประเทศต่างๆ ใช้ในการประเมินเทคโนโลยีโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่เพื่อเลือกเทคโนโลยีในการใช้งานสำหรับประเทศที่จะมีการใช้งานโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ในระยะเวลาอันใกล้ ประเทศที่ไม่เคยมีการใช้งานมาก่อนและประเทศที่กำลังจะมีการใช้งานโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์เพิ่มเติม

กระบวนการทำ RTA นั้นมีรายละเอียดหลายขั้นตอนตั้งแต่ การคัดเลือกหัวข้อในการพิจารณาซึ่งมีพื้นฐานเกี่ยวกับแนวนโยบายหรือเป้าหมายของโครงการพลังงานนิวเคลียร์ระดับชาติ การระบุถึงเทคโนโลยีที่มีความพร้อมใช้งานและมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำมาประเมิน การระบุและประเมินลักษณะที่สำคัญทางเทคนิคและความต้องการทางเทคนิคของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์

การพัฒนาคำถามสำหรับผู้ผลิตเทคโนโลยีเพื่อจะนำข้อมูลที่ได้มาใช้ในการประเมิน การกำหนดปัจจัยหรือค่าถ่วงน้ำหนักที่จะนำมาใช้ในการสำหรับแต่ละหัวข้อที่จะทำการประเมิน การประเมินค่าความคลาดเคลื่อนหรือปัจจัยที่มีผลต่อการประเมิน การทำการประเมิน และการจัดลำดับด้วยวิธีที่เหมาะสม รวมทั้งการรวบรวมผลและทดสอบความน่าเชื่อถือของผลที่ได้จากการประเมิน ตารางที่ 1 แสดงหัวข้อที่ใช้ในการประเมินในวิธี RTA และระดับคะแนน

ซึ่งโดยความเป็นจริง RTA ที่พัฒนาโดย IAEA แบบเต็มรูปแบบนั้นน่าจะเหมาะสมกับการทำการประเมินเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีการใช้งานแพร่หลายและมีความพร้อมในเรื่องของการได้มาซึ่งข้อมูล รวมทั้งทีมงานที่จะประเมินจะต้องมีความพร้อมในหลายด้าน ๆ ทั้งในด้านเงินทุน บุคลากร และเวลา

อีกทั้งการจัดลำดับเทคโนโลยีแบบ RTA นี้ถูกออกแบบมาให้ใช้ประเมินเทคโนโลยีของโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดใหญ่ การนำมาใช้เพื่อใช้ในการประเมินโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์นั้นจำเป็นต้องมีการปรับแต่ง เพื่อให้มีความเหมาะสม และเลือกเฉพาะส่วนที่สำคัญสำหรับความต้องการของประเทศไทยและส่วนที่สามารถหาข้อมูลประกอบของแต่ละเทคโนโลยีของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กมาใช้ในการประเมินได้ ตารางที่ 1 แสดงหัวข้อหลักที่ใช้ในการประเมินในวิธี RTA และระดับคะแนน [6] เครื่องหมายถูกแสดงถึงหัวข้อดังกล่าวได้นำมาพิจารณาในการประเมินและจัดลำดับเทคโนโลยีในการศึกษาครั้งนี้และเครื่องหมายผิดแสดงถึงหัวข้อหลักในวิธี RTA ไม่ได้ถูกนำมาพิจารณาเนื่องจาก ณ ปัจจุบันยังขาดซึ่งข้อมูลของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ที่จะนำมาใช้ในการประเมิน

ตารางที่ 1 หัวข้อหลักที่ใช้ในการประเมินในวิธี RTA, ระดับคะแนน [6] และการนำมาปรับใช้ในการศึกษาครั้งนี้

	ชื่อหัวข้อหลัก (Key Element)	คะแนน	ถูกใช้
1	การพิจารณาสถานที่ตั้ง	10	x
2	ลักษณะโครงข่ายทางไฟฟ้า	8	x
3	ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์	20	✓
4	ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ	16	✓
5	รูปแบบของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และรอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิง	10	✓
6	การป้องกันอันตรายจากรังสี	2	x
7	ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม	2	x
8	การพิทักษ์วัสดุนิวเคลียร์	2	x
9	ความมั่นคงปลอดภัยของโรงไฟฟ้า	2	✓
10	ขอบเขตการดำเนินงานของเจ้าของ/ผู้ประกอบการ	2	x
11	ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนและก่อสร้างของบริษัทผู้ผลิต	2	✓
12	ความสามารถในการกำหนด บริหารโครงการ	2	x
13	การถ่ายทอดและการสนับสนุนเทคโนโลยี	2	x
14	เศรษฐศาสตร์	20	x
	คะแนนรวม	100	

#### 4. การพัฒนาวิธีการประเมินและจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์

สำหรับการดำเนินโครงการวิจัยนี้มีจุดประสงค์หลักเพื่อพัฒนาเทคนิคเพื่อใช้ในการจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทย แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น เทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์มีเพียงบางเทคโนโลยีที่กำลังจะเริ่มต้นใช้งานและมีหลายเทคโนโลยียังอยู่ในช่วงพัฒนาและออกแบบ ดังนั้นในการจัดลำดับเทคโนโลยีในการวิจัยครั้งนี้จึงได้มุ่งหมายเพื่อที่จะทำ RTA แบบเต็มรูปแบบ หากแต่ว่าจะนำเทคนิคบางส่วนของ RTA ที่พัฒนาขึ้นแล้วโดย IAEA มาปรับใช้ให้เหมาะสมในการจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ที่เป็นไปได้เบื้องต้นสำหรับประเทศไทยเท่านั้น ดังนั้นในบทนี้ ส่วนแรกจะเป็นการระบุหัวข้อหลัก และหัวข้อรอง ซึ่งแสดงถึงลักษณะสำคัญทางเทคนิคของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่จะใช้ในการประเมินและส่วนที่สองจะเป็นการกำหนดสัดส่วนคะแนนหรือคะแนนถ่วงน้ำหนัก และเกณฑ์การให้คะแนนของหัวข้อหลัก (Key Element) และ หัวข้อย่อย (Key Feature)

#### 4.1 การระบุหัวข้อหลัก และหัวข้อรอง ของลักษณะสำคัญทางเทคนิคของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ที่จะใช้ในการประเมิน

หัวข้อหลักของลักษณะที่ใช้ในการประเมินตามตัวอย่างที่ปรากฏในเอกสาร IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.10 [6] ได้แบ่งหัวข้อหลักที่ใช้ในการประเมิน และสัดส่วนการให้คะแนนดังแสดงในตารางที่ 3.1 อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาจากประเด็นต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ทำให้มีความจำเป็นต้องปรับลดหัวข้อที่ใช้ในการประเมินตามที่ได้แสดงผลในตารางที่ 1 ตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้

1. ความเหมาะสมในเรื่องของข้อมูลที่มี เช่น ในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินการช่วงการก่อสร้าง ระหว่างติดตั้งก่อสร้างโรงไฟฟ้า หรือภายหลังการเดินเครื่อง เช่น ความสามารถในการกำหนด บริหารโครงการ ผู้จำหน่าย/ข้อกำหนดของเจ้าของเทคโนโลยี การถ่ายทอดและการสนับสนุนเทคโนโลยี

2. เนื่องจากเทคโนโลยี SMR ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในช่วงการวิจัยพัฒนาจึงทำให้ยังไม่มีข้อมูลในส่วนนี้ครบถ้วนในทุกด้านของแต่ละชนิด ได้แก่ การพิจารณาสถานที่ตั้ง และลักษณะโครงข่ายทางไฟฟ้า (Grid Integration) การป้องกันอันตรายจากรังสี ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อม การพิทักษ์วัสดุนิวเคลียร์ เป็นต้น

ดังนั้นโดยสรุป จึงเหลือหัวข้อหลักที่สามารถนำไปปรับใช้ในการประเมินจัดลำดับเทคโนโลยีได้แก่ ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ การทำงานของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และวัฏจักรเชื้อเพลิง และความมั่นคงปลอดภัยของโรงไฟฟ้า ซึ่งได้แก่หัวข้อที่ 3, 4, 5, 9 และ 11 ตามตารางที่ 1 เพื่อให้การประเมินเทคโนโลยี SMR นั้น เข้าใจง่ายและเหมาะสมสัมพันธ์กับเนื้อหา ปริมาณข้อมูลที่มีอยู่ จึงได้กำหนดหัวข้อหลักและหัวข้อย่อยในแต่ละหัวข้อหลักต่าง ๆ ขึ้นใหม่เพื่อใช้ในการทำประเมิน จากหัวข้อ A ถึง E ดังนี้

##### A. ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ

###### A.1 การลดความซับซ้อน

###### A.2 รูปแบบของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และรอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิง

###### A.3 ความสามารถโรงไฟฟ้าได้แก่ ประสิทธิภาพรวม (Gross Efficiency) และอายุการใช้งานของโรงไฟฟ้า

###### A.4 การเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพิสูจน์แล้ว

##### B. ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์

###### B.1 ระบบความปลอดภัยในระบบการระบายความร้อนคงเหลือ

###### B.2 ระบบความปลอดภัยในระบบการระบายความร้อนแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์

###### B.3 การใช้หลักการ ความหลากหลายและการมีซ้ำกัน

###### B.4 การมีระบบจัดการอุบัติเหตุในกรณีเกิดการรั่วไหลของเชื้อเพลิงหลอมเหลวออกจากถังเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

##### C. สถานะของการขออนุญาตและการใช้งาน

###### C.1 สถานภาพใช้งานหรือการออกแบบ

###### C.2 การขออนุญาตการออกแบบ

##### D. ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนและก่อสร้างของบริษัทผู้ผลิต

###### D.1 ความสามารถในการก่อสร้างโรงไฟฟ้า)

###### D.2 ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วน

##### F. ความมั่นคงปลอดภัยของโรงไฟฟ้าและที่ตั้ง

F.1 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ใต้พื้นดิน

4.2 การกำหนดสัดส่วนคะแนนหรือคะแนนถ่วงน้ำหนักของหัวข้อหลักและหัวข้อรอง

คณะวิจัยได้ทำการกำหนดระดับคะแนนในแต่ละหัวข้อที่ใช้ในการประเมิน โดยอาศัยข้อมูลจาก ผลการให้คะแนนน้ำหนักในหัวข้อที่สอดคล้องกับหัวข้อที่กำหนดขึ้นในการประชุมในระดับนานาชาติที่ทาง IAEA ได้ทำการสำรวจความต้องการของประเทศไทย และประเทศในกลุ่มที่กำลังจะเริ่มมีการใช้งานโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ [9] โดยใช้แบบสอบถามจากแบบสอบถามที่ IAEA ได้กำหนดขึ้นและคำแนะนำจากผู้เชี่ยวชาญด้านการประเมินเทคโนโลยี SMR จาก IAEA คะแนนในแต่ละหัวข้อหลักได้ถูกกำหนดขึ้นดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 หัวข้อหลัก และเกณฑ์การให้คะแนนที่ใช้ในการประเมิน

	ชื่อหัวข้อหลัก(Key Element)	คะแนน
A	ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ	40
B	ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์	20
C	สถานะของการขออนุญาตและการใช้งาน	10
D	ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนและก่อสร้างของบริษัทผู้ผลิต	10
E	ความมั่นคงปลอดภัยของโรงไฟฟ้า	5
	คะแนนรวม	85

ซึ่งรายละเอียดของเกณฑ์การให้คะแนนในทุกหัวข้อหลักแสดงในเอกสารอ้างอิง [10] ในบทความนี้ เพื่อให้เห็นภาพจะเลือกแสดงเพียงตัวอย่างของรายละเอียดของเกณฑ์การให้คะแนนในส่วนข้อ 2 หัวข้อรองแรกในหัวข้อหลัก A ได้แก่หัวข้อ ด้านลักษณะเทคนิคและความสามารถดังต่อไปนี้

4.2.1 ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ

ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถเป็นคุณลักษณะที่สำคัญที่ใช้ในการเปรียบเทียบกับต้นสมรรถนะ ประสิทธิภาพ ลักษณะการเดินเครื่อง ลักษณะของเชื้อเพลิง และการได้รับการพิสูจน์มาแล้วของเทคโนโลยี ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถจะส่งผลกระทบต่อการบริหารจัดการการเดินเครื่อง ต้นทุนต่อหน่วยการผลิตกระแสไฟฟ้า และความเสถียรของระบบในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยในหัวข้อนี้ ได้มีการแบ่งหัวข้อรอง ในการพิจารณาและระดับคะแนนที่จะใช้ในแต่ละหัวข้อรองดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 หัวข้อรองในการพิจารณาและระดับคะแนนในการประเมินหัวข้อหลักเรื่องลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ

	หัวข้อรอง (Key Features)	คะแนน
1	การทำให้เกิดความเรียบง่าย (Simplification)	5
2	รูปแบบของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และรอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิง	15
3	ความสามารถของโรงไฟฟ้า	10
4	เทคโนโลยีที่ได้รับการพิสูจน์และยอมรับ	10

โดยมีรายละเอียดในการพิจารณาการให้คะแนนในแต่ละหัวข้อรองดังต่อไปนี้

4.2.1.1 การทำให้เกิดความเรียบง่าย (Simplification)

ในส่วนนี้จะมีคะแนนเต็ม 5 คะแนน โดยจะแบ่งเกณฑ์การให้คะแนนเป็นสองส่วนในแต่ละหัวข้อย่อย (Sub Features) ดังนี้

- หากเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ประเภทใดมีลักษณะการออกแบบที่ช่วยให้เกิดความเรียบง่ายหรือลดความซับซ้อนของระบบเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ได้แก่ ข้อที่หนึ่ง เป็นเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ integral ซึ่งรวมอุปกรณ์เช่น ปัม หรือ เครื่องกำเนิดไอน้ำไว้ในถังเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ข้อที่สองมีการลดจำนวนอุปกรณ์ที่เดิมมีความสำคัญต่อการเดินเครื่องโดยเปลี่ยนไปใช้ระบบอื่นที่มีจำนวนอุปกรณ์ขนาดใกล้เคียงกันในจำนวนที่ลดลง ข้อที่สาม การมีอุปกรณ์เดิมในขนาดที่เล็กลงอย่างมีนัยสำคัญและไม่ส่งผลกระทบต่อรูปแบบการทำงาน (Performance) เมื่อเทียบกับอุปกรณ์เดิม หากมีลักษณะสำคัญเหล่านี้ 1 ข้อ 2 ข้อ และ 3 ข้อ จะได้คะแนน 0.5 คะแนน 1.5 คะแนน และ 2.5 คะแนนตามลำดับ หรือหากไม่มีจะได้คะแนน 0 คะแนน

- หากเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ประเภทใดมีลักษณะการออกแบบที่มีแนวโน้มที่จะเพิ่มความซับซ้อนในการเดินเครื่องหรือการบำรุงรักษาเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เช่น การนำเอาระบบหมุนเวียนตามธรรมชาติ (Natural Circulation) มาใช้ในการเดินเครื่องปกติ (Normal Operation) อาจทำให้การควบคุมปริมาณการไหลของสารหล่อเย็นให้สม่ำเสมอทำได้ยากมากยิ่งขึ้น ดังนั้นหากมีการเพิ่มระบบที่อาจจะก่อให้เกิดความซับซ้อนในการเดินเครื่องหรือบำรุงรักษาจะได้คะแนน 0 คะแนน หากไม่มีระบบดังกล่าว จะได้ 2.5 คะแนน

**4.2.1.2 รูปแบบของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์และรอบของการเปลี่ยนเชื้อเพลิง (Nuclear Fuel and Fuel Cycle Performance)**

ในส่วนนี้มีคะแนนเต็ม 15 คะแนน โดยจะแบ่งเกณฑ์การให้คะแนนเป็นสามส่วน ในแต่ละหัวข้อย่อยดังนี้

- ระยะเวลาหรือรอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิง (Nuclear Fuel Cycle) โดยทั่วไปเทคโนโลยีที่มีรอบการเปลี่ยนเชื้อเพลิงที่นานกว่าจะมีข้อได้เปรียบเรื่องเปอร์เซ็นต์เดินเครื่องที่สูงกว่า (Capacity Factor) เกณฑ์ให้คะแนนในส่วนนี้แสดงในตารางที่ 4 ดังนี้

**ตารางที่ 4** เกณฑ์การให้คะแนนในเรื่องรอบของการเปลี่ยนเชื้อเพลิง

	ระยะเวลาของรอบของการเปลี่ยนเชื้อเพลิง, T	คะแนน
1	$T < 2$	1
2	$2 < T < 3$	2
3	$3 < T < 4$	3
4	$T > 4$	4
5	ไม่มีการเปลี่ยนเชื้อเพลิง	5

- ประสิทธิภาพของผู้ผลิตและการใช้งานด้านเทคโนโลยีด้านเชื้อเพลิง ซึ่งหากผู้ผลิตเทคโนโลยีประเภทใดมีประสิทธิภาพการผลิตและใช้งานด้านเทคโนโลยีด้านเชื้อเพลิงในเชิงพาณิชย์ จะได้คะแนนเต็ม 5 คะแนน หรือหากไม่มี จะได้ 0 คะแนน

- ลักษณะการออกแบบที่เป็นมาตรฐานของเชื้อเพลิงมาตรฐานของ PWR ทั่วไป ได้แก่ มีการจัดวางของแท่งเชื้อเพลิงแบบสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือแบบหกเหลี่ยม เปอร์เซ็นต์การเสริมสมรรถนะแร่ยูเรเนียม 235 (U-235 enrichment) อยู่ระหว่าง 4-5 เปอร์เซ็นต์ และความยาวแท่งเชื้อเพลิงอยู่ระหว่าง 4-4.2 เมตร ซึ่งได้กำหนดเกณฑ์การให้คะแนนในส่วนนี้แสดงไว้ในตารางที่ 5

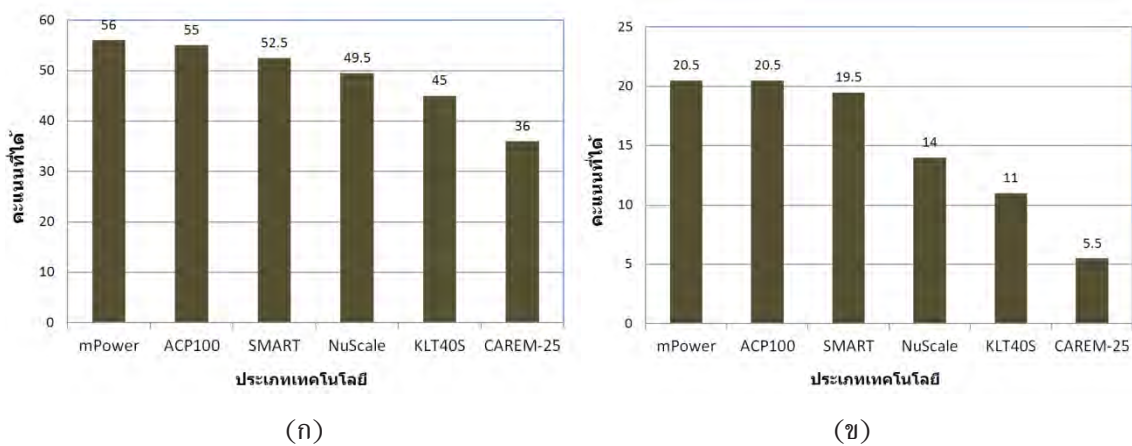
**ตารางที่ 5** เกณฑ์การให้คะแนนในเรื่องการออกแบบและการจัดวางของแท่งเชื้อเพลิงและเปอร์เซ็นต์การเสริมสมรรถนะแร่ยูเรเนียม 235

	ลักษณะการออกแบบเชื้อเพลิง	คะแนน
1	ไม่มีลักษณะเป็นเชื้อเพลิงมาตรฐานของ PWR ทั่วไป	1
2	มีลักษณะเป็นเชื้อเพลิงมาตรฐานของ PWR ทั่วไป 1 ข้อ	3
3	มีลักษณะเป็นเชื้อเพลิงมาตรฐานของ PWR ทั่วไป	5

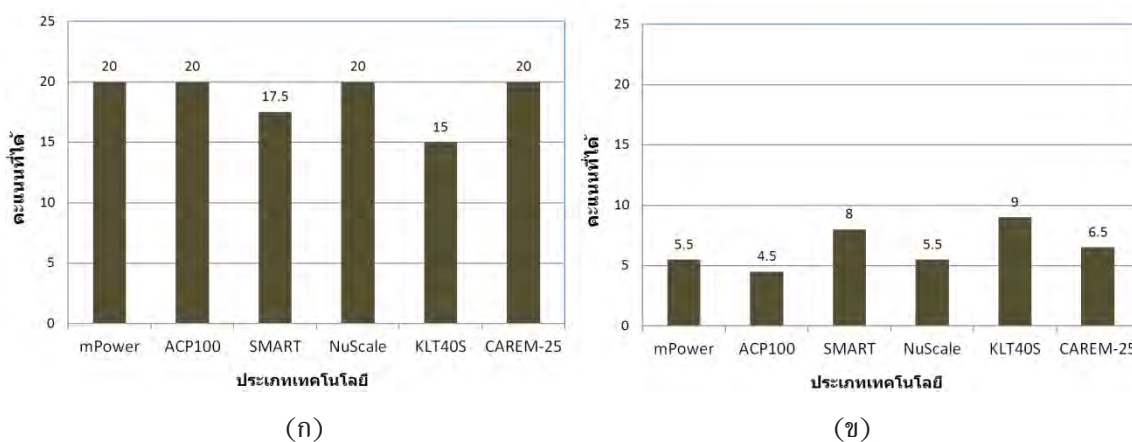


5. การทดสอบวิธีการจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่พัฒนาขึ้นกับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์จำนวน 6 ประเภท

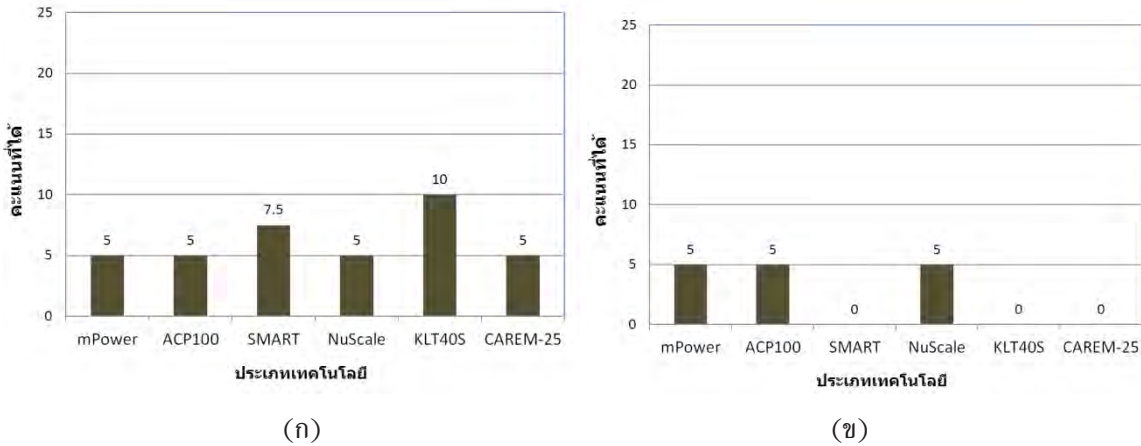
คณะผู้วิจัยได้ทำการทดสอบวิธีการจัดลำดับที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์จำนวน 6 ประเภท เทคโนโลยีที่คาดว่าจะมีความพร้อมทางเทคโนโลยีสำหรับการใช้งานในอนาคตไม่เกิน 10 ปีข้างหน้า [10, 11] อันได้แก่ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ แบบ mPower ซึ่งออกแบบโดย บริษัท Babcock and Wilcox จากประเทศสหรัฐอเมริกา, แบบ NuScale ซึ่งออกแบบโดย บริษัท NuScale Power จากประเทศสหรัฐอเมริกา, SMART ออกแบบโดย หน่วยงาน KAERI ของประเทศเกาหลีใต้, แบบ ACP-100 ที่ออกแบบโดย CNNC ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน, CAREM-25 ที่ออกแบบโดย หน่วยงาน CNEA ประเทศอาร์เจนตินาและแบบ KLT40S ออกแบบโดย หน่วยงาน OKBM Afrikantov ประเทศรัสเซีย ซึ่งผลการประเมินในภาพรวมหรือคะแนนรวมทั้ง 5 ด้านแสดงในรูปที่ 1(ก) ส่วนคะแนนในแต่ละหัวข้อย่อยแสดงในรูปที่ 1(ข), 2(ก), 2(ข), 3(ก) และ 3(ข) ตามลำดับ



รูปที่ 1 การเปรียบเทียบคะแนน (ก) รวมทุกหัวข้อ (ข) หัวข้อลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ



รูปที่ 2 การเปรียบเทียบคะแนนในหัวข้อ (ก) ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ (ข) สถานะของการขออนุญาตและการทำงาน



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบคะแนนในหัวข้อ (ก) ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนและก่อสร้างของบริษัทผู้ผลิต (ข)ความมั่นคงปลอดภัยของโรงไฟฟ้า

ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) พบว่า เมื่อพิจารณาผลรวมคะแนนของแต่ละเทคโนโลยีอาจจะกล่าวได้ว่าผลการจัดลำดับเทคโนโลยีแบ่งได้เป็น สามกลุ่มหลัก ๆ คือ กลุ่มเทคโนโลยีที่ได้คะแนนสูงมากกว่าร้อยละ 60 ได้แก่ เทคโนโลยี mPower, SMART และ ACP 100 กลุ่มเทคโนโลยีที่มีคะแนนในระดับกลาง ระหว่างร้อยละ 50 ถึง 60 ได้แก่ เทคโนโลยี NuScale และ KLT40S กลุ่มเทคโนโลยีที่มีคะแนนต่ำกว่า 50 ได้แก่ เทคโนโลยี CAREM-25 และหากพิจารณาในเรื่องลักษณะทางเทคนิคและความสามารถเทคโนโลยีส่วนใหญ่ค่อนข้างจะมีคะแนนใกล้เคียงกัน ยกเว้น เทคโนโลยี CAREM-25 และ KLT40S ซึ่งได้คะแนนน้อยกว่าเนื่องจาก การออกแบบเชื้อเพลิงที่ไม่เป็นมาตรฐาน และค่าประเมินของประสิทธิภาพการผลิตไฟฟ้าของโรงไฟฟ้าที่มีค่าค่อนข้างต่ำกว่า เมื่อเทียบกับเทคโนโลยีประเภทอื่น ดังแสดงในรูปที่ 1(ข)

นอกจากนั้น ในหัวข้อหลักการประเมินเรื่องความปลอดภัยในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ เทคโนโลยีส่วนใหญ่ค่อนข้างจะมีคะแนนใกล้เคียงกัน เนื่องจากได้มีการนำเทคโนโลยีปลอดภัยในโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์แบบสมัยใหม่ อาทิเช่น ระบบความปลอดภัยระบบ Passive Safety System เข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบ รวมถึงหลักการออกแบบระบบพื้นฐานด้านความปลอดภัยเช่น การออกแบบระบบโดยใช้หลักการความหลากหลายและซ้ำซ้อน และระบบในการจัดการการตอบสนองต่ออุบัติเหตุร้ายแรงเช่น ระบบ Core Catcher ดังแสดงข้อมูลในรูปที่ 2(ก)

ส่วนผลการประเมินในหัวข้อหลักการประเมินเรื่องสถานะของการขออนุญาตและการทำงานทุกเทคโนโลยีมีคะแนนใกล้เคียงกันเนื่องจากส่วนใหญ่อยู่ระหว่างการออกแบบและพัฒนาในรายละเอียดขั้นสุดท้าย ยกเว้นเทคโนโลยี CAREM-25 และ KLT40S ที่เตรียมได้เริ่มการก่อสร้างบางส่วนแล้ว และ เทคโนโลยี SMART และ KLT40S ที่ได้รับใบอนุญาตแล้ว ดังแสดงข้อมูลในรูปที่ 2 (ข)

สำหรับการประเมินในหัวข้อหลักการประเมินเรื่อง ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนและการก่อสร้างนั้น เทคโนโลยี KLT-40S ได้คะแนนเต็ม เนื่องจากบริษัทผู้ผลิต (บริษัท OKBM Afrikantov ประเทศรัสเซีย) เคยผลิตโรงไฟฟ้าที่มีอุปกรณ์สำคัญคล้ายกัน มาแล้วเป็นจำนวนมาก ทั้งยังไม่มีอุปกรณ์สำคัญแบบใหม่ซึ่งอาจก่อให้เกิดอุปสรรคในการผลิตอีกด้วย ส่วนเทคโนโลยี SMART ได้คะแนนรองลงมา เนื่องจากมีอุปกรณ์สำคัญแบบใหม่ 1 อย่างคือ เครื่องกำเนิดไอน้ำ ส่วนเทคโนโลยีอื่นๆ มีคะแนนใกล้เคียงกัน เนื่องจากผู้ผลิตมีประสบการณ์ในการผลิตเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ค่อนข้างแตกต่างจากเทคโนโลยีที่นำมาประเมิน และยังมีอุปกรณ์สำคัญใหม่อีกด้วย ดังแสดงข้อมูลในรูปที่ 3(ก)และสุดท้ายในเรื่องความมั่นคงปลอดภัยของโรงไฟฟ้าและที่ตั้ง ซึ่งพิจารณาประเด็นเรื่องการติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ใต้พื้นดิน เฉพาะเทคโนโลยี mPower, NuScale และ ACP100 เท่านั้นที่ได้รับคะแนนในส่วนนี้ ดังแสดงผลการประเมินในรูปที่ 3 (ข)

## 6. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้พัฒนาเทคนิคในการประเมินและจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยอ้างอิงจากเทคนิคที่พัฒนาสำหรับการประเมินเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดใหญ่ของทบวงการพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (IAEA) โดยได้มีการปรับลดหัวข้อการประเมินให้มีความเหมาะสมและสอดคล้องกับข้อมูลของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ที่มีการเปิดเผยอยู่ในปัจจุบัน การประเมินแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อหลักอันได้แก่ ลักษณะทางเทคนิคและความสามารถ ความปลอดภัยของโรงไฟฟ้าพลังนิวเคลียร์ สถานะของการขออนุญาตและการใช้งาน ความสามารถในการผลิตชิ้นส่วนและก่อสร้างของบริษัทผู้ผลิต และ ความมั่นคงปลอดภัยของโรงไฟฟ้า โดยระดับคะแนนในหัวข้อย่อยกำหนดจากความเห็นของคณะวิจัยและจากผลการหารือของคณะวิจัยกับผู้เชี่ยวชาญด้านการประเมินเทคโนโลยี จาก IAEA

เทคนิคในการประเมินที่พัฒนาขึ้นได้นำไปทดสอบกับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ จำนวน 6 เทคโนโลยีได้แก่เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์แบบ mPower, NuScale, SMART CAREM-25M, ACP-100 และ KLT40S ซึ่งทั้งหมดคาดว่าจะจะเป็นเทคโนโลยีที่มีความพร้อมในการใช้งานในช่วง 10 ปีข้างหน้า ซึ่งจากการศึกษาพบว่าเทคนิคที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ในการจัดลำดับได้อย่างสมเหตุสมผล โดยสามารถจัดลำดับเทคโนโลยี ออกเป็นสามกลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่มีคะแนนในระดับสูง กลาง และต่ำ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม การประเมินและการจัดลำดับเทคโนโลยีเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ในการศึกษานี้ ทำภายใต้ข้อจำกัดของข้อมูลที่สามารถเข้าถึงได้ในปัจจุบัน เมื่อมีการประเมินเทคโนโลยีอีกในอนาคตผลการประเมินหรือลำดับของเทคโนโลยีที่ได้จากการประเมินอาจเปลี่ยนไป

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยชุดนี้ได้รับการสนับสนุนทุนการทำวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย (กฟผ.) คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณมา ณ โอกาสนี้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] H. Subki, Advanced SMR Designs and Technologies for Near-Term and Future Deployments [Presentation Material]. 2013. Source: Presentation Materials on Workshop on “Small and Medium-sized Nuclear Reactors (SMRs) Technology Development, Assessment and Selection” 24 – 28 February, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2014.
- [2] Energy Policy Institute. Economic and employment impacts of small modular nuclear reactors, USA, 2010.
- [3] สำนักงานนโยบายและแผน กระทรวงพลังงาน, การปรับปรุงแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2553-2573 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 (PDP 2010 ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3), See <http://www.eppo.go.th/power/PDP2010/PDP2010-rev3.pdf>. for further details. Accessed 02/01/2014.
- [4] พันธมนาวิน และคณะ, การศึกษาศักยภาพของเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์ (SMR) เพื่อการพัฒนา: กรณีศึกษาประเทศไทย, วารสารพัฒนาสังคม ปีที่ 15 ฉบับที่ 1/2556 หน้า 67-88.
- [5] Kiangchaiporn, N., Reactor Technology Study and Technical Requirement of NPP [Presentation Material]. 2013. Source: Meeting on Small and Medium-sized Nuclear Reactors (SMRs) Technology Development, Assessment and Selection”, Chulalongkorn University, Thailand, 24-25 February 2013.
- [6] International Atomic Energy Agency. Nuclear Reactor Technology Assessment for Near Term Deployment. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.10, IAEA, Vienna, 2013.
- [7] EUROPEAN COMMISSION, Key Performance Indicators for the European Sustainable Nuclear Industrial Initiative, See [http://setis.ec.europa.eu/system/files/Key\\_Performance\\_Indicators\\_Nuclear.pdf](http://setis.ec.europa.eu/system/files/Key_Performance_Indicators_Nuclear.pdf) for further details. Accessed 03/01/2014.
- [8] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO Manual, IAEA-TECDOC-1575, Rev. 1, IAEA, Vienna, 2008.
- [9] H. Subki. Workshop Outline. [Presentation Material], Source: Workshop on Technology Assessment of Small and Medium-sized Reactors (SMRs) for Near Term Deployment IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 5 – 9 December 2011.

- 
- [10] สุพิชชาและคณะ, รายงานฉบับสมบูรณ์ โครงการการศึกษาสถานภาพเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ขนาดเล็กแบบโมดูลาร์, สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย, 2014.
- [11] H. Subki, IAEA Programme on Common Technology and Issues for SMRs. [Presentation Materials], Source: Workshop on Technology Assessment of Small and Medium-sized Reactors (SMRs) for Near Term Deployment IAEA Headquarters, Vienna, Austria, 5 – 9 December 2011.