



ประเมินระดับความพร้อม ของเทคโนโลยีอย่างไร เมื่อต้องยื่นขอทุนวิจัย

How to Evaluate Technology
Readiness Level (TRL)
in Submitting Research Grants

❏ วรางคณา ปัญญากรวงศ์¹
Warangkana Punyakornwong

❏ สุพัตรา ละออรัตนศักดิ์²
Supattra Laorattanasak

❏ สударัตน์ ลือพงศ์พัฒนะ³
Sudarat Luepongpatana

รับบทความ 4 มีนาคม 2564 แก้ไขบทความ 30 พฤษภาคม 2564 ตอรับบทความ 4 มิถุนายน 2564

-
- 1 ดร.,นักวิจัยนโยบาย ฝ่ายบริหารกลยุทธ์และนโยบายองค์กร สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
 - 2 นักวิเคราะห์ ฝ่ายพัฒนาคุณภาพการวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
 - 3 นักวิเคราะห์ ฝ่ายพัฒนาคุณภาพการวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ
Corresponding author e-mail: warangkana@nstda.or.th

บทคัดย่อ

ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (The National Aeronautics and Space Administration: NASA) เป็นเครื่องมือหนึ่งในการบริหารจัดการวิจัยที่ใช้ในการประเมินและสื่อสารระดับการพัฒนาของเทคโนโลยีของผลงานวิจัย ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการเตรียมความพร้อมของงานวิจัยในแต่ละขั้นตอน ตั้งแต่การกำหนดวัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย แผนการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนผลผลิตที่จะส่งมอบ และสามารถใช้ในการประเมินและยืนยันคุณภาพของผลงานวิจัยที่จะส่งมอบ นอกจากนี้ การประเมิน TRL ยังช่วยให้เกิดการสื่อสารระหว่างนักวิจัยกับผู้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยี เพื่อเป็นการผลักดันให้ผลงานวิจัยถูกนำไปสู่การใช้ประโยชน์มากยิ่งขึ้น และเพื่อสร้างความเชื่อมั่นว่างานวิจัยได้ดำเนินการตามมาตรฐานและแนวปฏิบัติที่ดีที่เกี่ยวข้องแล้ว ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา หน่วยบริหารและจัดการทุนวิจัยหลายแห่งในประเทศไทย ได้กำหนดให้การประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) เป็นเกณฑ์ข้อหนึ่งสำหรับการพิจารณาจัดสรรทุนวิจัย ด้วยเหตุนี้ บทความนี้จะนำเสนอภาพรวมของการศึกษาในปัจจุบันเกี่ยวกับความเป็นมาของ TRL การประยุกต์ใช้ TRL ของหน่วยงานในต่างประเทศและประเทศไทย คำจำกัดความ

ของ TRL ทั้ง 9 ระดับ ตลอดจนหลักฐานเพื่อยืนยันระดับ TRL ณ ปัจจุบัน และระดับ TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น เพราะเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งสำหรับผู้ขอรับทุนสนับสนุนการวิจัยในการทำความเข้าใจเกี่ยวกับวิธีการประเมินระดับ TRL

คำสำคัญ:

ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี ทุนวิจัย คุณภาพของผลงาน
วิจัย TRL ณ ปัจจุบัน TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น

Abstract

Technology Readiness Level (TRL) originally developed by The National Aeronautics and Space Administration (NASA) is one of the research management tools which can be used to assess and communicate the technology maturity level of research outputs. It is useful in preparing each step of the research process such as identification of research objectives, formulation of a research plan, determination of research outputs and evaluation the quality of research. In addition, TRL assessment is to facilitate the dialogue between researchers and adopters of new technologies/products to commercialize technologies and products and ensure that research will comply with related regulations/standards/good practices. Over recent years, TRL has been required as a new criterion for allocating research grants by several research funding agencies in Thailand. Therefore, this article aims to present an overview of the findings in the current literature focusing on the origin of TRL, the application of TRL and the definitions of nine TRLs along with the evidence based on specifying the current TRL

and the expected TRL in the research proposal because it is necessary for grant applicants to gain a clear understanding of how to evaluate TRL in submitting research grants.

Keywords:

Technology Readiness Level (TRL), research grants, the quality of research, the current TRL, the expected TRL

● บทนำ

ในการดำเนินงานวิจัยตามแนวทางปฏิบัติที่ดีนั้น สามารถเริ่มได้ตั้งแต่การวางแผนงานวิจัยที่ครอบคลุมหลักการและเหตุผล เพื่อให้ได้ผลงานที่ตอบโจทย์กับเป้าหมายที่ตั้งไว้ มีการศึกษาข้อมูลทางด้านกฎหมาย ข้อกำหนดหรือข้อบังคับที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการมีจริยธรรมในการวิจัย เช่น การดำเนินการทดลองกับสัตว์ทดลอง การวิจัยในมนุษย์ การชี้แจงครอบครองทรัพย์สิน เชื้อโรคที่มีการควบคุมโดยกฎหมาย ซึ่งจะทำให้ผลงานที่เกิดจากการวิจัยมีความน่าเชื่อถือ รวมถึงการใช้อุปกรณ์การวิจัยที่มีมาตรฐาน และการตรวจสอบความพร้อมใช้งานของเครื่องมือวิจัย ก็จะช่วยทำให้ผลการทดลองมีความแม่นยำ นอกจากนี้ ในระหว่างการดำเนินการวิจัยควรมีการบันทึกข้อมูลงานวิจัยตามแนวทางที่ดี เพื่อสร้างความน่าเชื่อถือให้กับข้อมูล กระบวนการยืนยันผลผลิตของงานวิจัยควรเป็นไปตามคุณลักษณะที่ระบุไว้ รวมถึงมีคุณภาพที่เป็นไปตามความต้องการ โดยมีหลักฐานเชิงประจักษ์ ขณะเดียวกัน งานวิจัยก็ควรมีความสามารถในการทำซ้ำได้ (Reproducibility) ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงงานวิจัยที่มีคุณภาพ

ปัจจุบัน มีหลายองค์กรในต่างประเทศใช้การประเมินระดับความพร้อมด้านต่าง ๆ เพื่อผลักดันให้ผลงานวิจัยมีคุณภาพ และพร้อมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในเชิงพาณิชย์ (Doussineau, Arregui-Pabollet, Harrap and Merida, 2018; Schildorfer, Walter and Hasenauer, 2017; Blank, 2014) เช่น การประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) ระดับความพร้อมของนวัตกรรม (Innovation Readiness Level: IRL) ระดับความพร้อมของทรัพย์สินทางปัญญา (Intellectual Property Readiness Level: IPRL) ระดับความพร้อมของการตลาด (Market Readiness Level: MRL) ระดับความพร้อมของธุรกิจ (Business Readiness Level: BRL)

ระดับความพร้อมของการผลิต (Manufacturing Readiness Level: MRL) หรือ ระดับความพร้อมของสังคม (Societal Readiness Level: SRL) ฯลฯ ทั้งนี้ การประเมินระดับความพร้อมต่าง ๆ ก็ล้วนมีวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน และมีข้อจำกัด ดังนั้น หน่วยงานควรเลือกใช้ให้เหมาะสมกับบริบทของแต่ละหน่วยงาน (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการประเมินระดับความพร้อมด้านต่างๆ

ตัวอย่างวิธีการ ประเมินระดับความ พร้อมด้านต่างๆ	คำอธิบาย	ข้อจำกัด
1. ระดับความพร้อม ของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL)	ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) คือ การบ่งชี้ระดับความพร้อมและเสถียรภาพของเทคโนโลยีตามบริบทการใช้งาน ตั้งแต่เป็นวัตถุดิบ องค์กรประกอบสำคัญ กระบวนการทำงาน และอุปกรณ์ ก่อนที่จะมีการบูรณาการเทคโนโลยีเป็นระบบ	การประเมินเน้นที่เทคโนโลยีใดเทคโนโลยีหนึ่ง และเน้นไปที่การพัฒนาผลิตภัณฑ์มากกว่าความสามารถในการผลิต

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการประเมินระดับความพร้อมด้านต่าง ๆ (ต่อ)

ตัวอย่างวิธีการ ประเมินระดับความ พร้อมด้านต่างๆ	คำอธิบาย	ข้อจำกัด
2. ระดับความพร้อม ของทรัพย์สินทาง ปัญญา (Intellectual Property Readiness Level: IPRL)	การพิจารณาระดับความพร้อมของ ทรัพย์สินทางปัญญา ประกอบด้วย 9 ระดับ ตั้งแต่การจัดทำสมมติฐาน เกี่ยวกับสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถจด เป็นสิทธิบัตรได้ ระบุสิ่งประดิษฐ์ หรือทรัพย์สินทางปัญญาประเภท อื่น ๆ ที่มีลักษณะเฉพาะเจาะจง และมีศักยภาพที่จะจดเป็นสิทธิ บัตรได้ จนถึงระดับที่ได้รับการจด สิทธิบัตรในประเทศนั้น ๆ และใน ประเทศอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ ได้รับความคุ้มครองในการจัดทำ ธุรกิจ	การประเมินเฉพาะด้าน ทรัพย์สินทางปัญญาเท่านั้น ซึ่งการประเมินจะเกิดขึ้น ได้ เมื่อทราบก่อนว่า จะ วิจัยเพื่อสร้างเทคโนโลยี ด้านใด
3. ระดับความพร้อม ของนวัตกรรม (Innovation Readiness Level: IRL)	การประเมินระดับความพร้อมตาม ระดับขั้นของวัฏจักรชีวิตของ นวัตกรรม ประกอบด้วย 6 ระดับ	แนวคิดนี้เน้นการประเมิน ผลงานที่เป็นนวัตกรรม

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการประเมินระดับความพร้อมด้านต่าง ๆ (ต่อ)

ตัวอย่างวิธีการ ประเมินระดับความ พร้อมด้านต่างๆ	คำอธิบาย	ข้อจำกัด
4. ระดับความพร้อม ของการผลิต (Manufacturing Readiness Level: MRL)	การประเมินระดับความพร้อมของ การผลิต ประกอบด้วย 10 ระดับ ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรม และ เป็นการพิจารณาความสามารถ ในกระบวนการผลิตของบริษัท ที่จะผลิตสินค้าให้กับหน่วยงาน (Supplier)	การประเมินระดับความ พร้อมที่มีลักษณะเฉพาะ เจาะจงและเหมาะสมกับ ภาคอุตสาหกรรม
5. ระดับความพร้อม ของการตลาด (Market Readiness Level: MRL)	ระดับความพร้อมของตลาด ประกอบด้วย 10 ระดับ เริ่มต้นจาก ระบุโอกาสทางธุรกิจ วิเคราะห์ ตลาด/อุตสาหกรรมและคู่แข่ง จนถึงระดับการสร้างแบบจำลอง ทางธุรกิจ	การประเมินระดับความ พร้อมที่เน้นด้านการ วิเคราะห์ตลาดและสร้าง แบบจำลองทางธุรกิจ มี ความเหมาะสมกับบริษัท มากกว่าหน่วยงานของ รัฐ เพราะมีบุคลากร และหน่วยงานที่มีความ เชี่ยวชาญ สนับสนุนด้าน การตลาด

ตารางที่ 1 ตัวอย่างการประเมินระดับความพร้อมด้านต่าง ๆ (ต่อ)

ตัวอย่างวิธีการ ประเมินระดับความ พร้อมด้านต่างๆ	คำอธิบาย	ข้อจำกัด
6. ระดับความพร้อม ของสังคม (Societal Readiness Level: SRL)	เมื่อมีโครงการทางสังคม เทคโนโลยี ผลิตภัณฑ์ กระบวนการ หรือ นวัตกรรมถูกบูรณาการเข้ามาใน สังคม จะมีการประเมินระดับการ ปรับตัวของสังคม ซึ่งประกอบด้วย 9 ระดับ	แนวคิดนี้ยังไม่ได้รับการ ยอมรับในวงกว้าง และ เป็นเรื่องยากที่ผู้ให้ สัมภาษณ์จะประเมิน โครงการตาม 9 ระดับ
7. ระดับความพร้อม ของการลงทุน (Investment Readiness Level: IRL)	การพิจารณาระดับความพร้อมของ การลงทุนของวิสาหกิจเริ่มต้น หรือ การลงทุนของบริษัทขนาดใหญ่ใน ผลิตภัณฑ์ใหม่ ๆ ประกอบด้วย 9 ระดับ ซึ่งประยุกต์มาจากแนวคิด แบบจำลองทางธุรกิจของ Canvas	การประเมินที่เน้นการ พิจารณาความเป็นไปได้ ในการลงทุน และจัดตั้ง เป็นวิสาหกิจที่ประสบ ความสำเร็จ ซึ่งเหมาะสม กับบริษัท
8. ระดับความพร้อม ของธุรกิจ (Business Readiness Level: BRL)	การพิจารณาสถานภาพปัจจุบัน ของธุรกิจ ประกอบด้วย 9 ระดับ ตั้งแต่สร้างแนวคิดในการทำธุรกิจ แนวทางแก้ปัญหา สร้างทีม วางแผน กำหนดกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย จนถึงระดับที่ผลิตสินค้า นำร่อง ขยายขนาด และเป็นธุรกิจ ที่มีความมั่นคง	การประเมินที่เหมาะสม กับการสร้างวิสาหกิจเริ่ม ต้นใหม่ ๆ

เมื่อพิจารณาตัวอย่างการประเมินระดับความพร้อมด้านต่าง ๆ ตามตารางที่ 1 พบว่า ระดับความพร้อมหลายด้านเหมาะสมกับบริษัท และเกี่ยวข้องกับการเตรียมความพร้อมเพื่อให้สามารถลงทุนในธุรกิจและจัดตั้งเป็นวิสาหกิจที่ประสบความสำเร็จ เช่น ระดับความพร้อมของการลงทุน (Investment Readiness Level: IRL) และระดับความพร้อมของธุรกิจ (Business Readiness Level: BRL) ส่วนการประเมินระดับความพร้อมของทรัพย์สินทางปัญญา (IPRL) มีความเกี่ยวข้องกับการเตรียมความพร้อมด้านการวิจัยและพัฒนา แต่จำเป็นต้องมีการประเมินร่วมกับการประเมิน TRL จึงจะได้ประโยชน์ เพราะการประเมินเฉพาะด้านทรัพย์สินทางปัญญาจะเกิดขึ้นได้ เมื่อทราบก่อนว่า จะวิจัยเพื่อสร้างเทคโนโลยีด้านใดก่อน ขณะที่การประเมินระดับความพร้อมของนวัตกรรม (Innovation Readiness Level: IRL) นั้นเหมาะสมกับผลงานที่เป็นนวัตกรรมเป็นสำคัญ ซึ่งผลงานส่วนใหญ่จะเป็นผลงานที่ไม่ใช่นวัตกรรมมากกว่า ผลงานที่มีลักษณะเป็นนวัตกรรม

แม้ว่าการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) จะมีข้อจำกัดที่เน้นการประเมินเทคโนโลยีใดเทคโนโลยีหนึ่ง และเน้นไปที่การพัฒนาผลิตภัณฑ์มากกว่าความสามารถในการผลิต แต่ระดับ TRL ก็ถูกพิสูจน์และได้รับการยอมรับในการใช้ประโยชน์ทั้งในองค์กรวิจัยและพัฒนาและหน่วยงานให้ทุนต่าง ๆ หลายประเทศในโลกโดยหน่วยงานต่าง ๆ ได้นำไปประยุกต์ใช้และปรับนิยามให้เหมาะสมกับบริบทและวัตถุประสงค์การใช้งานของตนเอง เช่น องค์กรด้านการวิจัยและเทคโนโลยีของยุโรป (European Association of Research and Technology Organizations: EARTO) ได้พัฒนาคำจำกัดความ TRL ให้รวมเรื่องความสามารถในการผลิต (Manufacturability) และ กระทรวงสุขภาพและบริการมนุษย์สหรัฐ (The United States Department of Health and Human Services) ได้ปรับนิยาม TRL ให้มีขั้นตอนที่สามารถ

ประเมินสถานภาพของการพัฒนายาได้ อาทิ การผลิตระดับโรงงานต้นแบบที่ได้รับ Good Manufacturing Practice (GMP) การยื่นขออนุญาตการวิจัยยาใหม่ และการทดสอบทางคลินิก (EARTO, 2014) ด้วยเหตุนี้ ในปัจจุบันแหล่งทุนเพื่อสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและนวัตกรรมในประเทศไทย ซึ่งส่วนใหญ่มีผู้ขอรับทุนเป็นนักวิจัยในมหาวิทยาลัยหรือในสถาบันวิจัยและพัฒนา จึงได้กำหนดให้การประเมิน TRL เป็นข้อกำหนดข้อหนึ่งในการยื่นข้อเสนอโครงการ เพราะแต่ละระดับของ TRL สามารถบ่งบอกได้ถึงขั้นตอนการวิจัย ผลการทดสอบ และหลักฐานยืนยันการทดสอบจริงในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เมื่อผลงานมีความพร้อมในแต่ละระดับ TRL ก็จะนำไปสู่การใช้ประโยชน์จากการประเมินระดับความพร้อมด้านอื่น ๆ ต่อไป เพราะระดับความพร้อมหลายด้านก็ต่อยอดและประยุกต์มาจากระดับ TRL รวมถึงต้องใช้ประโยชน์ร่วมกับผลการทดสอบหรือความพร้อมในแต่ละระดับ TRL

ในบทความฉบับนี้ เน้นการอธิบายเรื่องการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) เป็นหลัก เนื่องด้วยคณะผู้เขียนเห็นว่า การอธิบายและเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับ TRL ตั้งแต่เรื่องคำจำกัดความ TRL การประยุกต์ใช้ TRL ของหน่วยงานในต่างประเทศและประเทศไทย และการเขียนอธิบายเพื่อยืนยันระดับ TRL รวมถึงการแนบเอกสารของ TRL ในแต่ละระดับ จะเป็นประโยชน์กับผู้เตรียมขอทุนวิจัย นักวิชาการ และบุคลากรทั่วไปที่สนใจ

● ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) ขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) จาก 7 ระดับสู่ 9 ระดับที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย

แนวคิดเรื่องระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) คิดค้นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1974 โดย Stan Sadin นักวิจัยขององค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (National Aeronautics and Space Administration-NASA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและใช้เป็นเครื่องมือในการสื่อสารระดับความพร้อมของเทคโนโลยี ซึ่งต่อมาได้มีการกำหนดนิยามและแบ่งระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) 7 ระดับอย่างเป็นทางการครั้งแรกในปี ค.ศ. 1989 หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1995 องค์การ NASA ได้จัดทำสมุดปกขาวอธิบายการปรับรายละเอียดของ TRL เป็น 9 ระดับนี้มาเป็นทางการ (รายละเอียดตามตารางที่ 2) ซึ่งก็เป็นระดับ TRL ที่ใช้แพร่หลายมาจนถึงปัจจุบัน

TRL คือ การบ่งชี้ระดับความพร้อมและเสถียรภาพของเทคโนโลยีตามบริบทการใช้งาน ตั้งแต่องค์ประกอบสำคัญ อุปกรณ์ และกระบวนการทำงานทั้งระบบก่อนที่จะมีการบูรณาการเทคโนโลยีเป็นระบบ โดยเริ่มตั้งแต่ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีขั้นพื้นฐาน (TRL 1) จนกระทั่งพัฒนาเป็นเทคโนโลยีที่มีความพร้อมใช้ในสภาวะแวดล้อมจริงอย่างสมบูรณ์ (TRL 9)

ตารางที่ 2 คำจำกัดความของระดับ TRL ขององค์การบริหารการบิน และอวกาศแห่งชาติ (NASA)

ระดับ TRL	TRL 7 ระดับ ที่เผยแพร่ในปี ค. ศ.1989	TRL 9 ระดับ ที่เผยแพร่ในปี ค.ศ. 1995 จนถึงปัจจุบัน
TRL 1	Basic principles observed and reported	Basic principles observed and reported (หลักการพื้นฐานได้รับการพิจารณาและมีการรายงาน)
TRL 2	Potential application validated	Technology concept and/or application formulated (มีการสร้างแนวคิดด้านเทคโนโลยี และ/หรือ การประยุกต์ใช้)
TRL 3	Proof-of-Concept demonstrated analytically and/or experimentally	Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of-concept (มีการทดลองและวิเคราะห์หน้าที่หลัก และ/หรือ มีการพิสูจน์ความเป็นไปได้ของแนวคิด)
TRL 4	Component and/or breadboard laboratory validated	Component and/or breadboard validation in laboratory environment (การทดสอบองค์ประกอบ และ/หรือ บอร์ดทดลองอิเล็กทรอนิกส์ จำลอง (Breadboard) ในสภาวะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ)

ตารางที่ 2 คำจำกัดความของระดับ TRL ขององค์การบริหารการบิน และอวกาศแห่งชาติ (NASA) (ต่อ)

ระดับ TRL	TRL 7 ระดับ ที่เผยแพร่ในปี ค. ศ.1989	TRL 9 ระดับ ที่เผยแพร่ในปี ค.ศ. 1995 จนถึงปัจจุบัน
TRL 5	Component and/or breadboard validated in simulated or real-space environment	Component and/or breadboard validation in relevant environment (การทดสอบองค์ประกอบ และ/หรือ บอร์ดทดลองอิเล็กทรอนิกส์จำลอง (Breadboard) ในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง)
TRL 6	System adequacy validated in simulated environment	System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space (การทดสอบแบบจำลองของระบบหรือระบบย่อย หรือต้นแบบในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจเป็นภาคพื้นดินหรืออวกาศ)
TRL 7	System adequacy validated in space	System prototype demonstration in a space environment (การทดสอบต้นแบบระบบในสภาวะแวดล้อมอวกาศ)
TRL 8	ไม่มี	Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or flight (ระบบจริงเสร็จสมบูรณ์และมีคุณสมบัติผ่านการทดสอบและสาธิตบนภาคพื้นดินหรือในอวกาศ)

ตารางที่ 2 คำจำกัดความของระดับ TRL ขององค์การบริหารการบิน และอวกาศแห่งชาติ (NASA) (ต่อ)

ระดับ TRL	TRL 7 ระดับ ที่เผยแพร่ในปี ค. ศ.1989	TRL 9 ระดับ ที่เผยแพร่ในปี ค.ศ. 1995 จนถึงปัจจุบัน
TRL 9	ไม่มี	Actual system “flight proven” through successful mission operations (ระบบจริงได้รับการพิสูจน์ทางการบิน โดยภารกิจสำเร็จ)

ที่มา: Héder, M. (2017) และประยุกต์จากคู่มือการประเมิน
ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช.

● การประยุกต์ใช้ TRL ของหน่วยงานในต่างประเทศ

ปัจจุบันมีหน่วยงานภาครัฐหลายหน่วยงานในต่างประเทศที่ประยุกต์ใช้ TRL เพื่อการบริหารงานวิจัย และเป็นเครื่องมือหนึ่งในการให้ทุนวิจัยและสื่อสารความพร้อมของงานวิจัยในแต่ละระดับ เช่น กระทรวงกลาโหมของสหรัฐอเมริกาและสหราชอาณาจักร (U.S. Department of Defense/ Ministry of Defence, United Kingdom) กระทรวงพลังงานของสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Energy) กระทรวงความมั่นคงแห่งมาตุภูมิของสหรัฐอเมริกา (U.S. Department of Homeland Security: DHS), องค์การสนธิสัญญาแอตแลนติกเหนือ (NATO) ศูนย์ทดลองแห่งชาติซานเดีย (U.S. Sandia National Laboratories) องค์การอวกาศยุโรป (European Space Agency: ESA) องค์การด้านการวิจัยและเทคโนโลยีของยุโรป (European Association of Research and Technology Organizations: EARTO) สภาการวิจัยด้านสิ่งแวดล้อมทางธรรมชาติแห่งสหราชอาณาจักร (Natural Environment Research Council, United Kingdom) องค์กรต่าง ๆ ในแคนาดา ยุโรป ญี่ปุ่น ออสเตรเลีย มาเลเซีย รวมทั้งไทย (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการการประยุกต์ใช้ TRL
ของหน่วยงานในต่างประเทศ

ในส่วนของคำจำกัดความของ TRL ขององค์การนาซ่า (NASA) นั้น หลายหน่วยงานในต่างประเทศได้นำไปประยุกต์ใช้ในหลากหลายสาขาวิจัย แต่ยังคงยึดถือคำจำกัดความ TRL หลักทั้ง 9 ระดับขององค์การนาซ่า (NASA) เพียงแต่ปรับเปลี่ยนรายละเอียดบางคำในบางระดับ เพื่อขยายความให้ชัดเจน และครอบคลุมเทคโนโลยีต่าง ๆ หรือบริบทที่หน่วยงานตนเองใช้ประโยชน์มากขึ้น สังเกตได้จาก ตัวอย่างคำนิยาม TRL จาก 6 หน่วยงานตามภาพที่ 2-3

NASA,USA.	US Department of Health and Human services	Office of Environmental Management, U.S. Department of Energy
TRL 1 Basic principles observed and reported	TRL 1 Review Scientific knowledge base	TRL 1 Basic principles observed and reported
TRL 2 Technology concept and/or application formulated	TRL 2 Deveopement of hypotheses and experimental designs	TRL 2 Technology concept and/or application formulated
TRL 3 Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of concept	TRL 3 Target/Candidate identification and characterization of preliminary candidate(s)	TRL 3 Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof of concept
TRL 4 Component and/or breadboard validation in laboratory environment	TRL 4 Candidate optimization and non-GLP in vivo demonstration of activity and efficacy	TRL 4 Component and/or system validation in laboratory environment
TRL 5 Component and/or breadboard validation in a relevant environment	TRL 5 Advanced characterization of candidate and initiation of GMP process development	TRL 5 Laboratory scale, similar system validation in relevant environment
TRL 6 System/subsystem model or prototype demonstration in a a relevant environment	TRL 6 GMP Pilot Lot Production, IND Submission, and Phase 1 Clinical Trial (s)	TRL 6 Engineering/pilot-scale, similar (prototypical) system validation in relevant environment
TRL 7 System prototype demonstration in a space environment	TRL 7 Scale-up, Initiation of GMP Process Validation and Phase 2 Clinical Trial(s)	TRL 7 Full-scale, similar (prototypical) system demonstrated in relevant Environment
TRL 8 Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground of flight)	TRL 8 GMP Validation Consistency Lot Manufacturing, Efficacy studies, Clinical Trials 3 and FDA Approved	TRL 8 Actual system completed and qualified through test and demonstration.
TRL 9 Actual system “flight proven” through successful mission operations	TRL 9 Post-Licensure and Post-Approval Activities	TRL 9 Actual system operated over the full range of expected conditions.

ภาพที่ 2 ตัวอย่างคำจำกัดความ TRL ของหน่วยงานในต่างประเทศ (1)

ที่มา: NASA, (2012); EARTO, (2014); U.S. Department of Energy, (2010)

EARTO, Europe	Horizon 2020, Europe	Sandia National Lab, USA.
TRL 1 Basic principles observed	TRL 1 Basic principles observed	TRL 1: Basic principles observed and reported
TRL 2 Technology concept formulated	TRL 2 Technology concept formulated	TRL 2: Concept and/or application formulated
TRL 3 First assessment feasibility concept & technologies	TRL 3 Experimental proof of concept	TRL 3: Concepts demonstrated analytically or experimentally
TRL 4 Validation integrated prototype in lab environment	TRL 4 Technology validated in lab	TRL 4: Key elements demonstrated in laboratory environment
TRL 5 Testion prototype in user environment	TRL 5 Technology validated in relevant environment (industrially revant environment in the case of key enabling technologies)	TRL 5: Key elements demonstrated in relevant environments
TRL 6 Pre-production product	TRL 6 Technology demonstrated in relevant environment (industrially relevant environment in the case of key enabling technologies)	TRL 6: Representative of the deliverabel demonstrated in relevant environment
TRL 7 Low scale production demonstrated	TRL 7 System prototype demonstration in operational environment	TRL 7: Final development version of the deliverable demonstrated in operational environment
TRL 8 Manufacturing fully tested, validated and qualified	TRL 8 System complete and qualified	TRL 8: Actual deliverable qualified through test and demonstration
TRL 9 Production & Product fully operated	TRL 9 Actual system proven in operational environment (competitive manufacturing in the case of key enabling technologies; or in space)	TRL 9: Operational use of deliverable

ภาพที่ 3 ตัวอย่างคำจำกัดความ TRL ของหน่วยงานในต่างประเทศ (2)

ที่มา: EARTO, (2014); European Commission, (2014), Mitchell, J.A., (2007).

● การประยุกต์ใช้ TRL ของหน่วยงานในประเทศไทย

เมื่อศึกษาบทวนจากเอกสารต่าง ๆ พบว่า การประยุกต์ใช้ TRL ของหน่วยงานในประเทศไทย ส่วนใหญ่เป็นหน่วยงานของภาครัฐและนำไปใช้ในวัตถุประสงค์ที่แตกต่างกัน เช่น หน่วยงานบริหารและจัดการทุนวิจัยของประเทศไทย นำ TRL มาประยุกต์ใช้เป็นเกณฑ์หนึ่งในการพิจารณากลับกรองเพื่อจัดสรรทุนตามวัตถุประสงค์ของแต่ละหน่วยงาน ขณะที่สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ประยุกต์ใช้ TRL เพื่อบริหารโครงการวิจัยและพัฒนาภายในหน่วยงาน และกองทัพอากาศ นำ TRL มากำหนดเป็นมาตรฐานของระดับการถ่ายทอดเทคโนโลยีจากเทคโนโลยีอาวุธยุทโธปกรณ์ที่จัดหาจากต่างประเทศ อย่างไรก็ตาม มีตัวอย่างของ 4 หน่วยงานที่มีการศึกษาการกำหนดระดับ TRL ของหน่วยงานในต่างประเทศ แล้วได้เขียนระดับ TRL ทั้ง 9 ระดับเป็นภาษาไทย ได้แก่ 1) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) 2) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) 3) กองทัพอากาศ และ 4) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) รายละเอียดตามตารางที่ 3-4 ทั้งนี้ คำนิยามภาษาไทยของ TRL ทั้ง 9 ระดับ ของทั้ง 4 หน่วยงานก็จะมี ความแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับว่า คำนิยามของหน่วยงานต่างประเทศที่แต่ละหน่วยงานศึกษา และวัตถุประสงค์ในการนำ TRL มาใช้

ตารางที่ 3 การประยุกต์ใช้ TRL
ของ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์
วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) และ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

สำนักงาน คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.)	สำนักงาน การวิจัยแห่งชาติ (วช.)
TRL 1 หลักการพื้นฐานได้รับการพิจารณา และมีการรายงาน (Basic principles observed and reported)	TRL 1 ระดับงานวิจัยพื้นฐาน (Scientific Research)
TRL 2 มีการสร้างแนวคิดด้านเทคโนโลยีและ/หรือการประยุกต์ใช้ (Technology concept and/or application formulated)	TRL 2 ระดับงานวิจัยประยุกต์ (Applied Research)
TRL 3 มีการทดลองและวิเคราะห์หน้าที่หลักและ/หรือ มีการพิสูจน์ความเป็นไปได้ของแนวคิด (Analytical and experimental critical function and/or characteristic proof-of concept)	TRL 3 ระดับการพิสูจน์แนวคิดของเทคโนโลยี (Proof of Concept)
	TRL 4 ระดับเทคโนโลยีมีความเที่ยงตรง (Validation)
	TRL 5 ระดับเทคโนโลยีเพื่อการใช้งาน (Application)

ตารางที่ 3 การประยุกต์ใช้ TRL
ของ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์
วิจัยและนวัตกรรม (สกว.) และ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (ต่อ)

สำนักงาน คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกว.)	สำนักงาน การวิจัยแห่งชาติ (วช.)
TRL 4 การทดสอบองค์ประกอบ และ/หรือ บอร์ดทดลองอิเล็กทรอนิกส์จำลอง (Breadboard) ในสภาวะแวดล้อมในห้องปฏิบัติการ (Component and/or breadboard validation in laboratory environment) TRL 5 การทดสอบองค์ประกอบ และ/หรือ บอร์ดทดลองอิเล็กทรอนิกส์จำลอง (Breadboard) ในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง (Component and/or breadboard validation in relevant environment) TRL 6 การทดสอบแบบจำลองของระบบ หรือระบบย่อย หรือต้นแบบในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง ซึ่งอาจเป็นภาคพื้นดินหรืออวกาศ (System/subsystem model or prototype demonstration in a relevant environment (ground or space)) TRL 7 การทดสอบต้นแบบระบบในสภาวะแวดล้อมอวกาศ (System prototype demonstration in a space environment)	TRL 5 ระดับเทคโนโลยีเพื่อการใช้งาน (Application) TRL 6 ระดับต้นแบบห้องปฏิบัติการ (Lab Test Prototype) TRL 7 ระดับทดสอบกับ Lead User (Lead User Test) TRL 8 ระดับการผลิตต้นแบบ (Pilot Production) TRL 9 ระดับการผลิตเชิงอุตสาหกรรม (Mass Production)

**ตารางที่ 3 การประยุกต์ใช้ TRL
ของ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์
วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) (ต่อ)**

สำนักงาน คณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)	สำนักงาน การวิจัยแห่งชาติ (วช.)
TRL 8 ระบบจริงเสร็จสมบูรณ์และมีคุณสมบัติ ผ่านการทดสอบและสาธิตบนภาคพื้นดิน หรือในอวกาศ (Actual system completed and “flight qualified” through test and demonstration (ground or space)) TRL 9 ระบบจริงได้รับการพิสูจน์ทางการบินโดย ภารกิจสำเร็จ (Actual system “flight proven” through successful mission opera- tions)	

ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (2563)
และสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (2562)

**ตารางที่ 4 การประยุกต์ใช้ TRL ของกองทัพอากาศ และ
สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)**

กองทัพอากาศ	สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
TRL 1 การถ่ายทอดเทคโนโลยีในองค์ ความรู้ระดับพื้นฐาน	TRL 1 หลักการพื้นฐานได้รับการพิจารณา และมีการรายงาน
TRL 2 การถ่ายทอดเทคโนโลยีในความ รู้ขั้นประยุกต์	(Basic principles observed and reported
TRL 3 การถ่ายทอดเทคโนโลยีในความ รู้ขั้นประยุกต์เพื่อการพัฒนา ต่อยอดขั้นต้น	TRL 2 มีการสร้างแนวคิดด้านเทคโนโลยี และ/หรือ การประยุกต์ใช้
TRL 4 การถ่ายทอดเทคโนโลยีในความ รู้ขั้นประยุกต์เพื่อการพัฒนา ต่อยอดขั้นสูง	(Concept and/or application formulated)
TRL 5 การถ่ายทอดเทคโนโลยีในความ รู้ขั้นประยุกต์เพื่อการพัฒนาบน พื้นฐานของการพึ่งพาตนเอง ระดับต้น	TRL 3 แนวคิดได้ถูกสาธิตด้วยการวิเคราะห์ จำลอง หรือทดลอง
TRL 6 การถ่ายทอดเทคโนโลยีในความ รู้ขั้นประยุกต์เพื่อการพัฒนาบน พื้นฐานของการพึ่งพาตนเอง ระดับระดับกลาง	(Concepts demonstrated analytically or experimentally)
	TRL 4 องค์ประกอบที่สำคัญหรือบอร์ดทดลอง อิเล็กทรอนิกส์จำลอง (Breadboard) ได้ ถูกสาธิตและพิสูจน์ในระดับห้องปฏิบัติ การแล้ว (Key elements and/or breadboard demonstrated in laboratory environment)

ตารางที่ 4 การประยุกต์ใช้ TRL ของกองทัพอากาศ และ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) (ต่อ)

กองทัพอากาศ	สำนักงาน พัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
TRL 7 การถ่ายทอดเทคโนโลยีเชิงลึกเพื่อการพัฒนาบนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเองระดับสูง	TRL 5 องค์ประกอบที่สำคัญหรือบอร์ดทดลองอิเล็กทรอนิกส์จำลอง (Breadboard) ได้ถูกสาธิตและพิสูจน์ในสภาวะเลียนแบบที่ใกล้เคียงสภาวะแวดล้อมจริง
TRL 8 การถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ครอบคลุมการทดสอบคุณภาพขั้นสุดท้ายเพื่อการพัฒนาบนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเองอย่างสมบูรณ์	(Key elements and/or breadboard demonstrated in relevant environments)
TRL 9 การถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ครบถ้วนสมบูรณ์เพื่อการพัฒนาบนพื้นฐานของการพึ่งพาตนเองอย่างสมบูรณ์	TRL 6 ต้นแบบของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่พร้อมเป็นสิ่งส่งมอบ ได้ผ่านการสาธิตและพิสูจน์การใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการทำงานจริง (Representative of the deliverable demonstrated in relevant environments)
	TRL 7 ต้นแบบของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการขั้นสุดท้าย ได้ผ่านการสาธิตและพิสูจน์การใช้งานในสภาวะทำงานจริง (Final development version of the deliverable demonstrated in operational environment)
	TRL 8 เทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการที่ส่งมอบจริง ได้ผ่านการทดสอบและสาธิต (Actual deliverable qualified through test and demonstration)
	TRL 9 การใช้งานเทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการอย่างต่อเนื่อง (Operational use of deliverable)

ที่มา: กองทัพอากาศ. (2563)

และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2563)

● การกำหนดเกณฑ์เรื่อง TRL ของหน่วยงานบริหาร และจัดการทุนวิจัยของประเทศไทย

ในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยได้มีการปฏิรูปโครงสร้างของระบบการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อววน.) ของประเทศ โดยรวมเป็นหน่วยงานที่อยู่ภายใต้สังกัดกระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (อว.) ซึ่งเป็นกระทรวงใหม่ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงต่อระบบการบริหารและจัดการทุนวิจัยของประเทศไทย จากเดิมมีหน่วยงานบริหารและจัดการทุน 4 หน่วยงาน คือ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (สนช.) สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (สวก.) และสถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข (สวรส.) ซึ่งแต่ละหน่วยงานจะมีนโยบายในการจัดสรรทุนตามพันธกิจของหน่วยงานตนเองเป็นสำคัญ ด้วยเหตุนี้ จึงได้มีการจัดตั้งหน่วยบริหารและจัดการทุนเพิ่มเติม 3 หน่วยงาน ได้แก่ 1) หน่วยบริหารและจัดการทุนวิจัยและนวัตกรรมด้านการพัฒนาระดับพื้นที่ (บพท.) หรือ PMU “A” มาจาก Area-based 2) หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัย และการสร้างนวัตกรรม (บพค.) PMU “B” มาจาก Brain Power, manpower และ 3) หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประเทศ (บพข.) PMU “C” มาจาก Competitiveness

ในภาพรวมทั้ง 7 หน่วยบริหารและจัดการทุน (Program Management Unit: PMU) ที่กล่าวมา ถือเป็นกลไกสำคัญในการบริหารงบประมาณวิจัยภายใต้กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ของประเทศไทย โดยแต่ละหน่วยงานมีหน้าที่รับผิดชอบในการจัดทำนโยบายและหลักเกณฑ์การจัดสรรทุนในด้านต่าง ๆ ให้สอดคล้องตามวัตถุประสงค์ รวมถึงการติดตามและประเมินผลงานวิจัย อย่างไรก็ตาม เพื่อให้การจัดสรรทุนวิจัยของทั้ง 7 หน่วย

ครอบคลุมตลอด Value Chain ตั้งแต่การดำเนินงานวิจัยพื้นฐาน การนำเอาองค์ความรู้งานวิจัยไปต่อยอดเพื่อสร้างเป็นผลิตภัณฑ์นวัตกรรม การผลักดันให้เกิดการพัฒนาไปสู่การใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์ รวมถึงการเร่งให้เกิดการเติบโตทางการตลาด หน่วยบริหารและจัดการทุนหลายหน่วยงานจึงมีการนำเรื่องการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) มาใช้เป็นเกณฑ์ในการพิจารณากลับกรองเพื่อจัดสรรทุนตามวัตถุประสงค์ของแต่ละหน่วยงาน รวมถึงพิจารณาแผนการนำผลงานไปใช้ประโยชน์ โดยในการเปิดรับข้อเสนอโครงการ กำหนดให้ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของผลงานที่ส่งมอบของแต่ละโครงการไว้ด้วย ได้แก่ 1) หน่วยงานที่จัดสรรงบประมาณในระดับงานวิจัยทางด้านพื้นฐานและการประยุกต์ (TRL1-3) คือ วช. บพค. และ 2) หน่วยงานที่จัดสรรงบประมาณให้กับงานวิจัยที่มุ่งเน้นการขยายผลสู่นวัตกรรม และ การใช้ประโยชน์ แบ่งเป็น 2.1) การจัดสรรงบประมาณให้กับงานวิจัยระดับ TRL 4-6 คือ สวก. (ทางด้านเกษตร) 2.2) การจัดสรรงบประมาณให้กับงานวิจัยระดับ TRL4-7 คือ บพท. (ทางด้านชุมชน) บพข. (เชิงอุตสาหกรรม) และ 2.3) การจัดสรรงบประมาณให้กับงานวิจัยระดับ TRL 5 ขึ้นไป คือ สนช. (ภาพที่ 4)

ทั้งนี้ ในช่วงแรก ๆ หน่วยบริหารและจัดการทุนต่าง ๆ ได้อ้างอิงนิยาม TRL ฉบับภาษาไทยและข้อมูลสนับสนุน TRL ทั้ง 9 ระดับจาก สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ซึ่งจะได้กล่าวรายละเอียดในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 4 การกำหนด TRL เป็นเงื่อนไขของแหล่งทุนต่าง ๆ

● การประเมิน TRL ของ สวทช.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) เป็นหน่วยงานแรก ๆ ในประเทศไทยที่มีการศึกษาและประยุกต์ใช้การประเมิน TRL เป็นเครื่องมือในการสื่อสารระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของผลงานวิจัย ตั้งแต่การกำหนดเป้าหมายของโครงการวิจัยและประเมินความพร้อมของ ผลผลิตของโครงการวิจัยที่จะส่งมอบเมื่อปิดโครงการ

ในสมัยที่ ดร. ทวีศักดิ์ กออนันตกูล ดำรงตำแหน่งเป็นผู้อำนวยการ สวทช. ได้แต่งตั้ง “คณะทำงานพัฒนาแนวทางการประเมินระดับความพร้อมของ เทคโนโลยี” ในปี พ.ศ. 2555 โดยมอบหมายให้คณะทำงานศึกษาแนวทางการ ประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) ขององค์การนาซ่า (NASA) ศูนย์ทดลองแห่งชาติซานเดีย (Sandia National Laboratories และหน่วยงานอื่น ๆ รวมทั้งพัฒนาคู่มือการประยุกต์ ใช้ Technology Readiness Level: TRL ของ สวทช. ตลอดจนร่วมผลักดัน ให้เกิดการขยายผลการประยุกต์ใช้แนวทางดังกล่าว เพื่อการสร้างผลงานวิจัย และพัฒนาบนฐานนวัตกรรมแบบเปิด (Open Innovation) ทั้งนี้ คู่มือการ ประยุกต์ใช้ Technology Readiness Level: TRL ของ สวทช. ได้มีการพัฒนา และปรับปรุงอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ เวอร์ชัน 1 (ปี พ.ศ. 2556) เวอร์ชัน 2 (ปี พ.ศ.

2557) เวอร์ชัน 2.1 (ปี พ.ศ. 2558) และเวอร์ชัน 2.2 (ปี พ.ศ. 2563) เพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการประเมินระดับความพร้อมของผลงานวิจัยของ สวทช.

คำจำกัดความ TRL 9 ระดับของ สวทช. ประยุกต์ใช้คำจำกัดความ TRL ของศูนย์ทดลองแห่งชาติซานเดีย (Sandia National Laboratories) สหรัฐอเมริกาเป็นหลัก เพราะคำจำกัดความดังกล่าวสามารถประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีที่หลากหลายและใกล้เคียงกับภารกิจของ สวทช. มากที่สุด คู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช. เวอร์ชัน 2.2 ซึ่งเป็นฉบับล่าสุดของ สวทช. ได้เพิ่มเติมการอธิบายหลักฐานเชิงคุณภาพในแต่ละระดับให้ชัดเจนมากขึ้น โดยแบ่งเป็นข้อมูลที่มีในข้อเสนอโครงการ รายงานผลการทดสอบ และเอกสารรูปแบบอื่น ๆ (รายละเอียดตามตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 นิยามและหลักฐานเชิงคุณภาพของระดับ TRL 1-9 ตามคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช. เวอร์ชัน 2.2

TRL	นิยามและคำอธิบายระดับ TRL	หลักฐานเชิงคุณภาพ
TRL 1	นิยาม หลักการพื้นฐานได้รับการพิจารณาและมีการรายงาน คำอธิบาย มีการพิจารณาหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่สนับสนุนหลักการสำคัญของเทคโนโลยีโดยมีการทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	✓ สรุปลงสรุปผลการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (literature & IP review)

**ตารางที่ 5 นิยามและหลักฐานเชิงคุณภาพของระดับ TRL 1-9
ตามคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช.**

เวอร์ชัน 2.2 (ต่อ)

TRL	นิยามและคำอธิบายระดับ TRL	หลักฐานเชิงคุณภาพ
TRL 2	นิยาม มีการสร้างแนวคิดด้านเทคโนโลยีและ/หรือการประยุกต์ใช้ คำอธิบาย เริ่มทำการศึกษาวิเคราะห์เบื้องต้นเพื่อยืนยันหลักการพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ โดยยังไม่มี การพิสูจน์หรือวิเคราะห์ในรายละเอียด เพื่อสนับสนุนสมมติฐาน	✓ ผลสรุปความเป็นไปได้ทางวิทยาศาสตร์ของแนวคิด/การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี โดยมีการระบุ Technical challenge ✓ กำหนดโจทย์วิจัย, ขอบเขตของงานวิจัย และวิธีการดำเนินงานวิจัย ✓ ระบุ Specification และวิธีทดสอบที่น่าเชื่อถือ
TRL 3	นิยาม แนวคิดได้ถูกสาธิตด้วยการวิเคราะห์ จำลอง หรือทดลอง คำอธิบาย ผลการศึกษาวิจัย จำลอง ทดลอง หรือ วิเคราะห์ เพื่อพิสูจน์ว่า หลักการนั้นเป็นไปได้ (Proof-of-concept) โดยอาจเป็นการวิเคราะห์ จำลอง หรือ ด้วยการทดลอง วิเคราะห์ ผลการทดลอง	✓ ผลการวิเคราะห์ จำลอง หรือทดลอง ที่แสดง proof-of-concept ✓ ผลการศึกษาวามมาตรฐาน/กฎหมายอะไรที่เกี่ยวข้องกับผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่กำลังศึกษาวิจัย

**ตารางที่ 5 นิยามและหลักฐานเชิงคุณภาพของระดับ TRL 1-9
ตามคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช.**

เวอร์ชัน 2.2 (ต่อ)

TRL	นิยามและคำอธิบายระดับ TRL	หลักฐานเชิงคุณภาพ
TRL 4	นิยาม องค์ประกอบที่สำคัญ ได้ถูก สาธิตในระดับห้องปฏิบัติการแล้ว คำอธิบาย องค์ประกอบที่สำคัญ ได้ถูก ประกอบเข้าด้วยกันเพื่อให้ชิ้นส่วน ทำงานด้วยกันได้ และต้นแบบผ่านการ สาธิตในระดับห้องปฏิบัติการ และ สามารถแก้ไขปัญหาเฉพาะเรื่อง รวมทั้ง แสดงให้เห็นมุมมองของการทำงาน หลัก ๆ ของต้นแบบว่าสามารถทำงาน ได้ตามที่คาดหวัง	✓ วิธีการทดสอบที่มีแหล่งอ้างอิง น่าเชื่อถือ ✓ ผลการทดสอบตาม Specification ในระดับห้องปฏิบัติการที่ยอมรับได้ ทางสถิติ และทำซ้ำได้ (Repro- ducibility)

ตารางที่ 5 นิยามและหลักฐานเชิงคุณภาพของระดับ TRL 1-9 ตามคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช.

เวอร์ชัน 2.2 (ต่อ)

TRL	นิยามและคำอธิบายระดับ TRL	หลักฐานเชิงคุณภาพ
TRL 5	นิยาม องค์ประกอบที่สำคัญ ได้ถูก สาธิตในสภาวะเลียนแบบที่ใกล้เคียง สภาวะแวดล้อมจริง คำอธิบาย องค์ประกอบที่สำคัญได้ถูก ประกอบเข้าด้วยกันกับองค์ประกอบ สนับสนุนของต้นแบบจริง* และผ่าน การทดสอบและสาธิตพิสูจน์การใช้งาน ในสภาวะแวดล้อมจริง (Simulated environments)	✓ วิธีการทดสอบที่มีแหล่งอ้างอิง น่าเชื่อถือ ✓ ผลการทดสอบตาม Specification ในห้องปฏิบัติการในสถานการณ์ จำลอง/ในสภาวะเลียนแบบที่ ใกล้เคียงสภาวะแวดล้อมจริง* สอดคล้องตามความต้องการที่จะ ประยุกต์ใช้งานของกลุ่มเป้าหมาย** รวมทั้งมีการเปรียบเทียบผลการ ทดสอบกับสมมติฐาน/ข้อกำหนด ทางเทคนิค (Specification) ที่ตั้ง ไว้ พร้อมปัญหาที่พบ และทำซ้ำได้ (Reproducibility) * สภาวะแวดล้อมเลียนแบบที่ใกล้เคียง สภาวะแวดล้อมจริงของแต่ละเทคโนโลยี จะแตกต่างกัน เช่น ซอฟต์แวร์จะมีการ ทดสอบในระดับ Alpha versions เทคโนโลยีด้านพันธุ์พืชหรือสัตว์ จะหมาย ถึง การคัดเลือกประชากรที่มีลักษณะตาม เป้าหมาย โดยการปลูกหรือเลี้ยงทดสอบใน ระดับสถานีทดลอง (แปลงที่มีการดูแล/ ควบคุม) เป็นต้น ** กลุ่มเป้าหมาย เช่น Adopter ที่สนใจ ทดสอบต้นแบบ หรือ ผู้ที่คาดว่าจะเป็นผู้รับ ถ่ายทอดเทคโนโลยี โดยผู้รับการถ่ายทอด เทคโนโลยีควรเป็นผู้กำหนด Requirement

ตารางที่ 5 นิยามและหลักฐานเชิงคุณภาพของระดับ TRL 1-8 ตามคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช.

เวอร์ชัน 2.2 (ต่อ)

TRL	นิยามและคำอธิบายระดับ TRL	หลักฐานเชิงคุณภาพ
TRL 6	นิยาม ต้นแบบของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่พร้อมเป็นสิ่งที่ส่งมอบได้ ผ่านการสาธิตและพิสูจน์การใช้งานในสถานะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการทำงานจริง คำอธิบาย ต้นแบบของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการที่พร้อมเป็นสิ่งที่ส่งมอบได้ ผ่านการสาธิตและพิสูจน์การใช้งานในสถานะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการทำงานจริง (Relevant environment) ซึ่งหมายถึง ปัจจัยของสิ่งแวดล้อมที่มีผลเกี่ยวข้องต่อความสำเร็จ/ล้มเหลวในการทำงานของระบบต้นแบบ ได้ถูกควบคุมให้เหมือนกับสถานะทำงานจริง	✓ วิธีการทดสอบที่มีแหล่งอ้างอิง น่าเชื่อถือ ✓ ผลการทดสอบต้นแบบสามารถ พิสูจน์ การใช้งานในสถานะแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการทำงานจริง (Relevant environment) เปรียบเทียบกับ (Specification) ที่ตั้งไว้ และสอดคล้องกับความต้องการประยุกต์ใช้งานของกลุ่มเป้าหมาย* รวมทั้งสามารถทำซ้ำได้ (Reproducibility) ✓ หลักฐานแสดงการยอมรับของกลุ่มเป้าหมาย ที่มีต่อต้นแบบระดับ TRL 6

ตารางที่ 5 นิยามและหลักฐานเชิงคุณภาพของระดับ TRL 1-9
ตามคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช.
เวอร์ชัน 2.2 (ต่อ)

TRL	นิยามและคำอธิบายระดับ TRL	หลักฐานเชิงคุณภาพ
TRL 7	นิยาม ต้นแบบของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการขั้นสุดท้าย ได้ผ่านการสาธิตและพิสูจน์การใช้งานในสภาวะทำงานจริง คำอธิบาย ต้นแบบของผลิตภัณฑ์หรือกระบวนการขั้นสุดท้ายได้ผ่านการสาธิตและพิสูจน์การใช้งานในสภาวะทำงานจริง (Operational environment) ซึ่งหมายถึง สภาพแวดล้อมจริงในการทำงานของระบบ (ต้นแบบ) ที่ไม่สามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องต่อความสำเร็จ/ล้มเหลวในการทำงานของระบบได้	✓ วิธีการทดสอบที่มีแหล่งอ้างอิงที่น่าเชื่อถือ ✓ ผลการทดสอบที่แสดงให้เห็นว่าต้นแบบสามารถทำงานได้ในสภาวะแวดล้อมสภาวะทำงานจริง (Operational environment) เปรียบเทียบกับสมมติฐาน/ข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ที่ตั้งไว้ และสอดคล้องกับความต้องการประยุกต์ใช้งานของกลุ่มเป้าหมาย* รวมทั้งสามารถทำซ้ำได้ (Reproducibility) ในสภาวะทำงานจริง (Operational environment) ✓ หลักฐานแสดงการยอมรับของกลุ่มเป้าหมาย ที่มีต่อต้นแบบระดับ TRL 7

**ตารางที่ 5 นิยามและหลักฐานเชิงคุณภาพของระดับ TRL 1-9
ตามคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช.
เวอร์ชัน 2.2 (ต่อ)**

TRL	นิยามและคำอธิบายระดับ TRL	หลักฐานเชิงคุณภาพ
TRL 8	นิยาม เทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการที่ส่งมอบจริง ได้ผ่านการทดสอบและสาธิต คำอธิบาย เทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการที่ส่งมอบจริง ผ่านการทดสอบคุณภาพการใช้งานตามมาตรฐานของผู้ใช้/มาตรฐานคุณภาพที่เกี่ยวข้อง (ถ้ามี)/กฎหมายที่เกี่ยวข้อง (ถ้ามี) หรือถูกบูรณาการเข้ากับระบบของลูกค้า/ผู้ใช้งานแล้ว	✓ ผลทดสอบการใช้งานในสภาวะแวดล้อมการทำงานจริงอย่างต่อเนื่องจนลูกค้ามั่นใจในคุณภาพ ✓ คู่มือสำหรับการผลิต/คู่มือสำหรับการใช้งาน ✓ ผลการรับรองมาตรฐานหรือข้อกำหนดทางกฎหมายที่จำเป็นสำหรับสิ่งส่งมอบ ✓ รายงานผลการทดสอบ พร้อมปัจจัยสำหรับทดสอบเสถียรภาพของผลิตภัณฑ์ (Shelf life) และบริการในสภาพจริง อยู่ในเกณฑ์ดี
TRL 9	นิยาม การใช้งานเทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการอย่างต่อเนื่อง คำอธิบาย เทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการถูกนำไปใช้งานจริง และติดตามผลการใช้งานอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่เหมาะสม โดยหากมีข้อบกพร่อง ต้องดำเนินการแก้ไขให้เรียบร้อย	✓ ผลิตภัณฑ์มีจำหน่ายในท้องตลาดหรือหลักฐานการนำไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์หรือในเชิงสาธารณประโยชน์ เช่น จดหมายยืนยันจากผู้รับถ่ายทอดเทคโนโลยี ข้อมูลแสดงยอดขาย หรือจำนวนลูกค้าของผลิตภัณฑ์ Brochure/Catalog รางวัลต่าง ๆ ที่ผลิตภัณฑ์ของลูกค้าได้รับ (ถ้ามี) ข้อมูลแสดงการยอมรับของผู้บริโภคภายหลังการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้อย่างต่อเนื่อง (ถ้ามี)

ที่มา: คู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช. เวอร์ชัน 2.2

อย่างไรก็ตามการประยุกต์ใช้ TRL เป็นเครื่องมือในการพิจารณา
ระดับความพร้อมของเทคโนโลยี มีข้อสังเกตที่สำคัญดังนี้

- ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีไม่ใช่ระดับความยากของเทคโนโลยี
- ถ้าจะนำเทคโนโลยีที่มีการประเมิน TRL ระดับหนึ่งแล้ว มาใช้กับ
บริบทใหม่ ต้องมีการประเมิน TRL ใหม่อีกครั้งให้เข้ากับบริบทใหม่
- การถ่ายทอดเทคโนโลยีสามารถเกิดขึ้นได้ทุกระดับ TRL ขึ้นอยู่กับ
ความพร้อม/ศักยภาพของ Adopter ในการรับถ่ายทอดเทคโนโลยี
ถ้านักวิจัยจะถ่ายทอดเทคโนโลยีให้ผู้รับเทคโนโลยีที่มีความสามารถ
สูง ก็สามารถเลือกเสนอ ผลงานที่มี TRL ต่ำได้ แต่หากจะถ่ายทอด
เทคโนโลยีให้กับผู้รับเทคโนโลยีที่มีศักยภาพไม่สูงนัก นักวิจัยก็ต้อง
ลงทุนพัฒนางานวิจัยจนไปถึงระดับ TRL ที่สูงพอให้ผู้รับเทคโนโลยีนั้น
จะสามารถรับเทคโนโลยีได้
- การประเมินระดับ TRL ส่งมอบของเทคโนโลยี ควรประเมิน ณ เวลา
ที่ส่งมอบงาน

● ตัวอย่างการประเมิน TRL

ในการประเมิน TRL นักวิจัยจำเป็นต้องพิจารณาข้อกำหนดทาง
เทคนิคของผลงานวิจัย/เทคโนโลยี (Specification) วิธีการทดสอบที่น่าเชื่อถือ
บริบทของสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในการทดสอบในแต่ละระดับ TRL รวมถึง
มีหลักฐานในการยืนยันระดับ TRL ควบคู่ไปกับการประเมินว่าผู้รับเทคโนโลยีมี
ความพร้อมในการรับถ่ายทอดเทคโนโลยีที่ระดับ TRL ไດ ซึ่งในการเขียนภาพ
ของโครงการวิจัยตั้งแต่ระดับ TRL1-9 (ตัวอย่างตามตารางที่ 6) จะช่วยให้ นัก
วิจัยมองเห็นภาพตั้งแต่เริ่มทำวิจัยจนถึงงานวิจัยนำไปสู่การใช้ประโยชน์ แต่ไม่

จำเป็นว่าแต่ละโครงการวิจัยต้องส่งมอบในระดับ TRL9 ส่วนใหญ่ผลงานจะถูกส่งมอบในระดับ TRL7 กล่าวคือ ต้นแบบของผลงานผ่านการทดสอบในสภาวะแวดล้อมจริงของโรงงานจริงที่จะผลิตผลิตภัณฑ์หรือเทคโนโลยี และได้รับการยอมรับจากลูกค้าที่สามารถนำไปผลิตในระดับ Mass production ได้ ในกรณีที่บริษัทเอกชนไม่มีบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญเพียงพอหรือขาดอุปกรณ์/เครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการพัฒนาเทคโนโลยี อาจจะร่วมมือกับนักวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยีให้เป็นระดับ TRL ที่สูงขึ้น เช่น นักวิจัยให้คำแนะนำในเรื่องการขอรับรองมาตรฐานหรือกฎระเบียบที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้ผ่านระดับ TRL8 นอกจากนี้ ผลงานที่ระบุว่าส่งมอบระดับ TRL9 จะถูกตั้งคำถามมากขึ้น โดยเฉพาะถ้าไม่มีผู้ผลิตหรือผู้รับเทคโนโลยีร่วมในโครงการเลย

ตารางที่ 6 ตัวอย่าง TRL 1-9 ของงานวิจัยด้านพันธุพืช/พันธุ์สัตว์ ซอฟต์แวร์ อุปกรณ์ทางการแพทย์ และ ยาวัคซีน เซลล์

TRL	TRL พันธุพืช/ พันธุ์สัตว์	TRL ซอฟต์แวร์	TRL อุปกรณ์ ทางการแพทย์	TRL ยา วัคซีน เซลล์
TRL 1	หลักการพื้นฐานได้ รับการพิจารณาและ มีการรายงาน	หลักการพื้นฐานได้ รับการพิจารณาและ มีการรายงาน	หลักการพื้นฐานได้ รับการพิจารณาและ มีการรายงาน	ทบทวนวรรณกรรม
TRL 2	มีการสร้างแนวคิด ด้านเทคโนโลยี และ/ หรือ การประยุกต์ใช้	มีการสร้างแนวคิด ด้านการพัฒนา ซอฟต์แวร์	มีการสร้างแนวคิด ด้านเทคโนโลยี และ/ หรือ การประยุกต์ใช้	การตั้งสมมติฐานและ ออกแบบการทดลอง

ตารางที่ 6 ตัวอย่าง TRL 1-9
ของงานวิจัยด้านพันธุ์พืช/พันธุ์สัตว์ ซอฟต์แวร์
อุปกรณ์ทางการแพทย์ และ ยาวัคซีน เซลล์เม็ดเลือด (ต่อ)

TRL	TRL พันธุ์พืช/ พันธุ์สัตว์	TRL ซอฟต์แวร์	TRL อุปกรณ์ ทางการแพทย์	TRL ยา วัคซีน เซลล์เม็ดเลือด
TRL 3	สร้างประชากร หรือ คู่ผสมพันธุ์พืชหรือ สัตว์ได้สำเร็จแล้ว	แนวคิดได้ถูกสาธิต ด้วยการวิเคราะห์ หรือด้วยการทดลอง	แนวคิดได้ถูกสาธิต ด้วยการวิเคราะห์ หรือด้วยการทดลอง	การจำแนกและ ศึกษาคุณลักษณะ เบื้องต้นของโมเลกุล เป้าหมาย/โมเลกุล ตัวเลือก
TRL 4	พันธุ์พืชหรือสัตว์ ผ่านการคัดเลือก ประชากรที่มีลักษณะ ตามเป้าหมาย โดย การปลูกหรือเลี้ยง ทดสอบในระดับ ห้องปฏิบัติการ/ โรงเรือน (Green house)/ฟาร์มปิด	องค์ประกอบของ เทคโนโลยีหรือระบบ ย่อยของเทคโนโลยี พื้นฐานได้ผ่านการ ทดสอบในสภาพ แวดล้อมห้องปฏิบัติ การ	การพัฒนาต้นแบบ ระดับห้องปฏิบัติการ	การปรับปรุงโมเลกุล เป้าหมาย/โมเลกุล ตัวเลือก และการ ทดสอบในสัตว์ ทดลอง
TRL 5	พันธุ์พืชหรือสัตว์ ผ่านการคัดเลือก ประชากรที่มีลักษณะ ตามเป้าหมาย โดย การปลูกหรือเลี้ยง ทดสอบในระดับสถานี ทดลอง (แปลงที่มี การดูแล/ควบคุม)	องค์ประกอบของ เทคโนโลยีหรือระบบ ย่อยของเทคโนโลยี พื้นฐานได้ผ่านการ ทดสอบในสภาวะ แวดล้อมที่เกี่ยวข้อง	การทดสอบความ ถูกต้องของต้นแบบ (Validation test) และการทดสอบ ความปลอดภัย	การทดสอบ ประสิทธิผล (Efficacy) ของ โมเลกุลเป้าหมาย และเริ่มกระบวนการ พัฒนาตาม หลักเกณฑ์และวิธีที่ ดีในการผลิต (Good manufacturing practice: GMP)

ตารางที่ 6 ตัวอย่าง TRL 1-9
ของงานวิจัยด้านพันธุ์พืช/พันธุ์สัตว์ ซอฟต์แวร์
อุปกรณ์ทางการแพทย์ และ ยาวักซีน เสตีเมเซลล์ (ต่อ)

TRL	TRL พันธุ์พืช/ พันธุ์สัตว์	TRL ซอฟต์แวร์	TRL อุปกรณ์ ทางการแพทย์	TRL ยา วัคซีน เสตีเมเซลล์
TRL 6	พันธุ์พืชหรือสัตว์ ผ่านการคัดเลือก ประชากรที่มีลักษณะ ตามเป้าหมาย โดย การปลูกหรือเลี้ยง ทดสอบในระดับ สถานที่ที่มีการ chal- lenge ด้วยลักษณะ ที่ต้องการ จำนวน หลายพื้นที่ (Multi- location)	ระบบเทคโนโลยี หรือต้นแบบได้ผ่าน การทดสอบในสภาวะ แวดล้อมที่เกี่ยวข้อง	การทดสอบในสัตว์ ทดลอง	การผลิตระดับโรงงาน ต้นแบบที่ได้รับ GMP การยื่นขอ อนุญาตการวิจัย ยาใหม่ และการ ทดสอบทางคลินิก ระยะที่ 1
TRL 7	พันธุ์พืชหรือสัตว์ ผ่านการคัดเลือก ประชากรที่มีลักษณะ ตามเป้าหมาย โดย การปลูกทดสอบ หรือเลี้ยงในระดับ แปลงเกษตรกร	ระบบต้นแบบได้ ผ่านการทดสอบใน สภาวะการทำงาน จริง	การทดสอบทาง คลินิก	การผลิตในระดับ ขยายขนาดในโรงงาน ที่ได้มาตรฐาน GMP และการทดสอบทาง คลินิกระยะที่ 2

ตารางที่ 6 ตัวอย่าง TRL 1-9
ของงานวิจัยด้านพันธุ์พืช/พันธุ์สัตว์ ซอฟต์แวร์
อุปกรณ์ทางการแพทย์ และ ยาวัคซีน เซลล์เม็ดเลือด (ต่อ)

TRL	TRL พันธุ์พืช/ พันธุ์สัตว์	TRL ซอฟต์แวร์	TRL อุปกรณ์ ทางการแพทย์	TRL ยา วัคซีน เซลล์เม็ดเลือด
TRL 8	พันธุ์พืชหรือสัตว์ผ่านการทดสอบและรับรองมาตรฐานคุณภาพที่เกี่ยวข้องตามที่ลูกค้า/ผู้ซื้อคาดหวัง พร้อมส่งมอบให้ลูกค้า หรือถูกบูรณาการเข้ากับระบบของลูกค้า/ผู้รับประโยชน์แล้ว	ซอฟต์แวร์ถูกพิสูจน์ว่าสามารถทำงานได้ในรูปแบบสุดท้ายภายใต้เงื่อนไขที่คาดหวัง ผ่านมาตรฐานคุณภาพของซอฟต์แวร์ตามที่ลูกค้า/ผู้ใช้งานกำหนด การผ่านระดับ TRL 8 หมายถึงได้มีการแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ให้ระบบสามารถรองรับข้อมูลและมีเสถียรภาพ และ/หรือได้รับการประเมินความพึงพอใจที่ดีจากกลุ่มเป้าหมายหรือผู้ใช้	ทดลองผลิตผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐานระดับประเทศหรือมาตรฐานสากล อาทิ GMP ISO 13485 CE Mark	การผลิตในโรงงานที่ได้มาตรฐาน GMP ผ่านการทดสอบทางคลินิกระยะที่ 3 และได้รับการขึ้นทะเบียนยาใหม่
TRL 9	พันธุ์พืช/สัตว์ถูกนำไปขยายผลจริงในแปลงเกษตรกร	ระบบเทคโนโลยีได้รับการพิสูจน์ผ่านการใช้งานที่ประสบความสำเร็จ	ผลิตผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตที่ได้มาตรฐานสากล	การติดตามและเฝ้าระวังความปลอดภัยและประสิทธิผลของผลิตภัณฑ์หลังจำหน่ายในตลาดแล้ว

ที่มา: ประยุกต์จากคู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยีของ สวทช. เวอร์ชัน 2.2

● แนวทางการเขียนระดับ TRL เมื่อยื่นขอรับทุนวิจัย

เนื่องจากหลายหน่วยงานมีการกำหนดระดับ TRL เป็นเงื่อนไขในการพิจารณาสนับสนุนทุนวิจัย นักวิจัยควรศึกษาข้อกำหนด/เงื่อนไขของหน่วยงานที่ให้ทุนแต่ละแห่ง จากนั้นนักวิจัยจะต้องพิจารณาว่าผลงานวิจัย/เทคโนโลยีมีความพร้อมตามเกณฑ์ที่แหล่งทุนระบุหรือไม่ เช่น แหล่งทุนเปิดรับข้อเสนอโครงการที่มีระดับ TRL 3 แสดงว่า ผลงานวิจัย/เทคโนโลยีนั้น ๆ จะต้องผ่านทดลองหรือวิเคราะห์หรือจำลองเบื้องต้นเพื่อพิสูจน์ความเป็นไปได้ (proof-of concept) ของผลงานวิจัย/เทคโนโลยี

ในการเขียนระดับ TRL ในข้อเสนอโครงการเพื่อยื่นขอรับทุนวิจัย จะมีช่องสำหรับกรอกระดับ TRL ณ ปัจจุบัน และ TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น ซึ่งนักวิจัยควรพิจารณาว่า ณ เวลาที่นักวิจัยขอทุนนั้น ผลงานหรือผลการทดสอบที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยที่ท่านต้องการยื่นขอทุนนั้นอยู่ที่ระดับ TRL ณ ปัจจุบัน ระดับเท่าใด ส่วน TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น หมายถึง TRL ของผลงานด้านการวิจัยและพัฒนาที่มีการประเมินระดับ TRL ณ เวลาส่งมอบผลงานให้กับแหล่งทุนตามระยะเวลาที่กำหนด ทั้งนี้ การประเมินระดับ TRL ณ ปัจจุบัน และ TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น จำเป็นต้องอธิบายรายละเอียดโดยย่อ และแนบหลักฐานเพื่อสนับสนุนระดับ TRL ที่ระบุด้วย

นอกจากนี้ การประเมิน TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น ควรมีการเปรียบเทียบให้แหล่งทุนเห็นว่า นักวิจัยสามารถส่งมอบผลงานด้านการวิจัยได้ตามที่ระบุไว้ตอนยื่นข้อเสนอโครงการหรือไม่ เช่น ในข้อเสนอโครงการที่ได้รับการอนุมัติทุนวิจัย ระบุว่าส่งมอบผลงานวิจัยเสร็จสิ้นที่ระดับ TRL 4 แต่ในทางปฏิบัติ นักวิจัยสามารถส่งมอบได้เพียงระดับ TRL 3 นักวิจัยจำเป็นต้องอธิบายข้อจำกัดและเหตุผลที่ทำให้ไม่สามารถบรรลุเป้าหมายไว้ด้วย

ตัวอย่างการระบุระดับความพร้อมทางเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) ในข้อเสนอ โครงการวิจัย

TRL ณ ปัจจุบัน คือ TRL1

รายละเอียด สรุปผลการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ท่านกำลังสนใจวิจัย โดยระบุอ้างอิงว่ามีใคร ทำการศึกษาเรื่องอะไร ได้ผลอย่างไร ที่ใด และเมื่อใด รวมถึงช่องว่างงานวิจัย (Research gap) คืออะไร

แนบเอกสาร ไฟล์สรุปผลการศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเรื่องที่ท่านกำลังสนใจวิจัย ตามรายละเอียดข้างต้น

TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น คือ TRL4

รายละเอียด 1) *โปรต๊อบุสภาพแวดล้อมในการทดสอบ* เช่น สภาพแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการที่ใดและมีสภาพแวดล้อมทางกายภาพอย่างไรบ้าง อาทิ เครื่องจักร อุปกรณ์ ช่วงของอุณหภูมิ ความชื้น การสิ้นเปลืองพลังงาน ความสิ้นสະเทือน

2) *โปรต๊อบุข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification)* ที่คาดหวังของระดับ TRL 4 ที่กำหนดไว้ตั้งแต่ยื่นข้อเสนอโครงการ

3) *โปรต๊อบุผลการทดสอบ* ที่แสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบที่สำคัญของต้นแบบผลิตภัณฑ์/กระบวนการถูกประกอบเข้าด้วยกันและทำงานร่วมกันได้ในสภาพแวดล้อมระดับห้องปฏิบัติการ สอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) และทำซ้ำได้ (Reproducibility) *กรณีทีผลการทดสอบไม่เป็นไปตาม Specification ทั้งหมด ให้ถือว่า ไม่ผ่านระดับ TRL 4 และตกลงมาที่ระดับ TRL 3*

แบบเอกสาร ไฟล์รายละเอียดที่แสดงให้เห็นถึงผลการทดสอบ ที่ความสอดคล้องกับข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ที่ระบุไว้ว่าต้นแบบที่ทดสอบในสภาพแวดล้อมห้องปฏิบัติการต้องผ่านการทดสอบคุณสมบัติอะไรบ้าง มีการระบุจำนวนครั้งในการทดสอบ และจำนวนตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ ซึ่งยอมรับได้ในทางสถิติ (รายละเอียดตามภาพที่ 6)

ทั้งนี้ ตัวอย่างข้อมูลที่ควรเขียนเพื่อยืนยัน TRL ณ ปัจจุบัน หรือ TRL เมื่องานวิจัยเสร็จสิ้น ในระดับ TRL4-9 ตามภาพที่ 4-8

Environment/Test Conditions + Sample size & Test method				
	Sample size	จำนวนครั้งของการทดสอบ	ความเชื่อมั่นทางสถิติของผลการทดสอบ (ทดสอบที่ครั้งก็ได้ performance ของ Spec เหมือนเดิม)	
TRL 4: Lab Environment (Key elements)				
ตัวอย่าง	20 	30 ครั้ง 	Spec คือ ทนความร้อนได้ 40 องศา ผลการทดสอบแต่ละชิ้น 20 ครั้ง สามารถทนความร้อนได้ 40 องศา	
TRL 5: Simulated Environment (Key elements)				
ตัวอย่าง	20 	35 ครั้ง 	Spec คือ ทนความร้อนได้ 50 องศา ผลการทดสอบแต่ละชิ้น 20 ครั้ง สามารถทนความร้อนได้ 50 องศา	

หมายเหตุ: จำนวนครั้งและจำนวนตัวอย่าง ขึ้นอยู่กับลักษณะของผลิตภัณฑ์และกระบวนการ ที่จะมีระดับความเชื่อมั่นแตกต่างกัน

ภาพที่ 4 ตัวอย่างการระบุเอกสารยืนยันคุณภาพระดับ TRL 4 และ TRL5

TRL 6

ระบุสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง

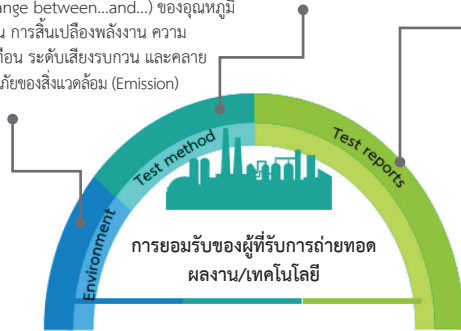
สภาพแวดล้อมทางกายภาพที่ควบคุมให้เหมือนสภาพแวดล้อมจริง (Operational Environment) อาทิ เครื่องจักร อุปกรณ์ ช่วง (Range between...and...) ของอุณหภูมิ ความชื้น การเปลี่ยนแปลงพลังงาน ความสั่นสะเทือน ระดับเสียงรบกวน และคล้ายสิ่งที่เป็นภัยของสิ่งแวดล้อม (Emission)

วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบตาม Specification ที่กำหนด

รายงานผลการทดสอบ

แสดงหลักฐานให้เห็นว่าต้นแบบฯ ผ่านการพิสูจน์การใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง โดยเปรียบเทียบกับข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ที่ตั้งไว้ แสดงหลักฐานว่าสามารถทำซ้ำได้ (Reproducibility)



จำนวนครั้งของการทดสอบ

Reproducibility

ความเชื่อมั่นทางสถิติ

ตัวอย่าง

40 ครั้ง

กรรมวิธีเหมือนกัน

100% ในการผลิต

Spec คือ ทนความร้อนได้ 60 องศา ผลการทดสอบแต่ละชิ้นทนความร้อนได้ 60 องศา

ภาพที่ 5 ตัวอย่างการระบุเอกสารยืนยันคุณภาพระดับ TRL 6

TRL 7

ระบุสภาวะแวดล้อมจริง

(Operational Environment)

สภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องต่อความสำเร็จ/ล้มเหลวในการทำงานของระบบได้

วิธีการทดสอบ

วิธีการทดสอบ เพื่อให้ได้ผลการทดสอบตาม

Specification ที่กำหนด

มีจำนวนการทดสอบและระยะเวลาที่เพียงพอที่สามารถยอมรับได้ทางสถิติ (Statistical Confidence) ทั้งนี้ หากเป็นการลงทุนที่มีความเสี่ยงสูง ระยะเวลาการทดสอบอยู่ที่ประมาณ 12 เดือน

รายงานผลการทดสอบ

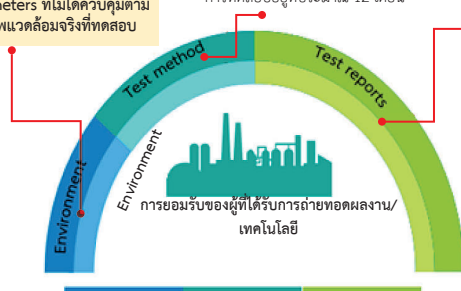
- แสดงหลักฐานให้เห็นว่าต้นแบบฯ ผ่านการพิสูจน์การใช้งานในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง โดยเปรียบเทียบกับข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ที่ตั้งไว้
- แสดงหลักฐานว่าสามารถทำซ้ำได้ (Reproducibility)
- Flowsheets; heat, material, and energy balances; detailed engineering and design; cost analyses; etc.

จำนวนครั้งของการทดสอบ

Reproducibility

ความเชื่อมั่นทางสถิติ

TRL7=TRL6+หลาย parameters ที่ไม่ได้ควบคุมตามสภาพแวดล้อมจริงที่ทดสอบ



ตัวอย่าง 80 ครั้ง

กรรมวิธีเหมือนกัน

100% ในการผลิต

Spec คือ ทนความร้อนได้ 60 องศา ผลการ

ภาพที่ 6 ตัวอย่างการระบุเอกสารยืนยันคุณภาพระดับ TRL

Pre-commercial Demonstration

เทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการที่ส่งมอบ
ถูกบูรณาการเข้ากับระบบของลูกค้า/ผู้ใช้งาน
แล้ว

*ควรมีเอกชน เป็นผู้ร่วมอย่างชัดเจน
เพื่อให้เกิดการทดสอบตลาด และยื่น
เอกสารต่อหน่วยรับรองมาตรฐานที่
เกี่ยวข้อง ให้ผลิตภัณฑ์สามารถผลิตใน
ระดับ Mass Production ได้

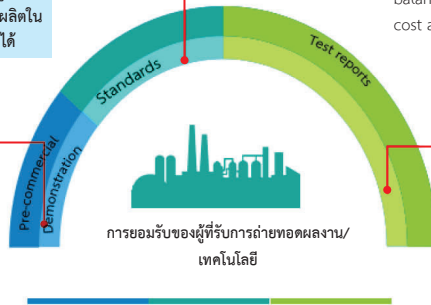
มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง

ผลการรับรองมาตรฐานหรือข้อกำหนดทาง
กฎหมายที่จะเป็นสำหรับสิ่งส่งมอบ พร้อมแนบ
มาตรฐานกำกับกระบวนการผลิต (หรือมีข้อ
พิสูจน์ว่ากระบวนการผลิต ได้ผลผลิตเหมือนเดิม)

TRL 8

รายงานผลการทดสอบ

- แสดงหลักฐานให้เห็นว่าต้นแบบฯ ผ่านการพิสูจน์การใช้
งานในสภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง โดยเปรียบเทียบกับ
ข้อกำหนดทางเทคนิค (Specification) ที่ตั้งไว้
- แสดงหลักฐานว่าสามารถทำซ้ำได้ (Reproducibility)
- Flowsheets: heat, material, and energy
balances; detailed engineering and design;
cost analyses; etc.



ภาพที่ 7 ตัวอย่างการระบุเอกสารยืนยันคุณภาพระดับ TRL 8

TRL 9

Production operated over the full
range of expected conditions in
industrial scale

ผลิตภัณฑ์มีจำหน่ายในท้องตลาด/มี
หลักฐานการนำไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์
หรือในเชิงสาธารณประโยชน์

เอกสารประกอบเช่น

- ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตรงตามความต้องการของตลาด
- เทคโนโลยี/ผลิตภัณฑ์/กระบวนการถูกนำไปใช้งานจริง
และติดตามผลการใช้งานอย่างต่อเนื่องตามระยะเวลา
ที่เหมาะสม โดยหากมีข้อบกพร่อง ต้องดำเนินการ
แก้ไขให้เรียบร้อย
- จัดหมาย/เอกสารยืนยันจากผู้ถ่ายทอดเทคโนโลยีว่าผลิตภัณฑ์/กระบวนการมีการขายแล้วอย่าง
ต่อเนื่องในตลาดหรือมีการใช้งานในเชิงสาธารณประโยชน์ อย่างต่อเนื่องตามระยะเวลาที่เหมาะสม
ในแต่ละผลิตภัณฑ์
- ข้อมูลแสดงความต้องการของตลาดหรือปริมาณขายหรือจำนวนลูกค้า
- ข้อมูลแสดงการยอมรับของผู้บริโภคภายหลังจากการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้อย่างต่อเนื่อง/การประเมิน
negative fish หรือ ข้อร้องเรียนจากลูกค้าเกี่ยวกับ performance หรือความปลอดภัยของ
ผลิตภัณฑ์/กระบวนการ
- Brochure/Catalog หรือรายการโฆษณา ผลิตภัณฑ์ (ถ้ามี)
- รางวัลต่าง ๆ ที่ผลิตภัณฑ์ของลูกค้าได้รับ (ถ้ามี)

ภาพที่ 8 ตัวอย่างการระบุเอกสารยืนยันคุณภาพระดับ TRL 9

TRL กับการเตรียมความพร้อมของงานวิจัย

ระดับความพร้อมของเทคโนโลยีจะแสดงให้เห็นถึงลำดับขั้นตอนของการพัฒนางานวิจัย สรุปได้ดังนี้

- 1) TRL 1-3 เป็นงานวิจัยที่เป็นการพัฒนาองค์ความรู้และการวิจัยพื้นฐาน
- 2) TRL 4-8 เป็นการพัฒนา สาธิตและทดสอบต้นแบบในระดับสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ ตามความเข้มข้นของแต่ละเทคโนโลยี เช่น สภาวะแวดล้อมในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Environment) สภาวะแวดล้อมที่เกี่ยวข้อง (Relevant Environment) และสภาวะแวดล้อมจริง (Operational Environment)

- 3) TRL 9 เทคโนโลยีหรือผลิตภัณฑ์ถูกนำไปใช้งานจริงอย่างต่อเนื่อง โดยลูกค้า และมีการติดตามผลการใช้งานตามระยะเวลาที่เหมาะสม โดยมีหลักฐานแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์มีจำหน่ายในท้องตลาด หรือหลักฐานการนำไปใช้จริงในเชิงพาณิชย์หรือในเชิงสาธารณประโยชน์

อย่างไรก็ตาม สิ่งที่จะสะท้อนให้เห็นว่างานวิจัยแต่ละระดับ TRL มีคุณภาพ คือ เอกสารสรุปผลการทดสอบว่า ผ่านการทดสอบในแต่ละระดับ TRL และมีผลการทดสอบว่าสอดคล้องกับ Specification ที่กำหนด โดยมีการระบุผลการทดสอบแต่ละครั้ง วิธีการทดสอบที่เชื่อถือได้ จำนวนครั้งของการทดสอบ และจำนวนตัวอย่างในการทดสอบ โดยอ้างอิงตามหลักสถิติ

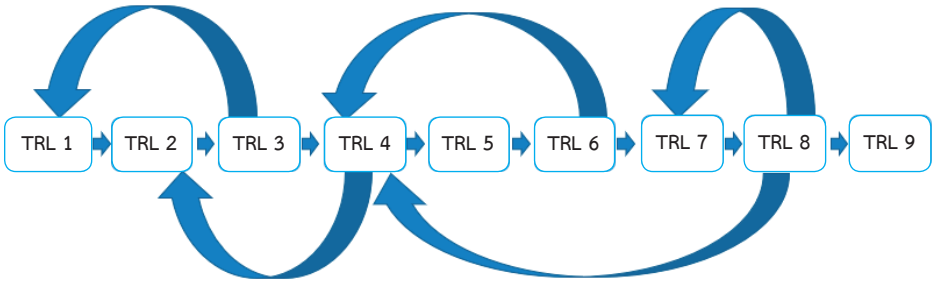
หากพบว่างานวิจัยอยู่ในระดับความพร้อมของเทคโนโลยีที่สูงแล้ว แต่ไม่ได้ทำการศึกษามาก่อนว่าในการพัฒนาองค์ประกอบย่อยในระดับ TRL 4-5 นั้น จำเป็นต้องผ่านการทดสอบมาตรฐานที่เกี่ยวข้องก่อนที่จะมีการบูรณาการขึ้นส่วนต่าง ๆ เข้าด้วยกันแล้ว เมื่อเกิดการตกลงถ่ายทอดเทคโนโลยีให้ลูกค้า ไปต่อยอดผลงานวิจัย ลูกค้าอาจจะร้องขอให้นักวิจัยย้อนกลับมาแก้ไขที่ระดับความพร้อมก่อนหน้านี้ เพื่อให้ขึ้นส่วนต่าง ๆ ผ่านทดสอบตามมาตรฐานในระดับ TRL4-5 ก่อนส่งมอบให้กับลูกค้า ซึ่งจะทำให้เสียเวลาและอาจเสียโอกาสในการ

ถ่ายทอดเทคโนโลยีให้กับลูกค้าได้ เช่น การวิจัยพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์ เมื่อมีการพิสูจน์แนวคิดของงานวิจัย และมีการกำหนดว่ากลุ่มเป้าหมายที่จะใช้ผลิตภัณฑ์นวัตกรรมตัวนี้เป็นบริษัทผลิตเครื่องมือแพทย์ในประเทศไทย การวางแผนการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ตัวนี้ จำเป็นต้องศึกษากฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการผลิตเครื่องมือแพทย์ของประเทศไทย ซึ่งมีการกำกับดูแลโดยกองควบคุมเครื่องมือแพทย์ สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา หากเป็นเครื่องมือแพทย์ทั่วไป ผู้ผลิตสามารถดำเนินการยื่นขอจดทะเบียนสถานประกอบการเครื่องมือแพทย์ เพื่อให้สามารถผลิตได้ ซึ่งจะไม่ต้องยื่นข้อมูลสนับสนุนที่ต้องผ่านมาตรฐานการทดสอบที่เกี่ยวข้อง (พระราชบัญญัติเครื่องมือแพทย์ พ.ศ. 2551 และ พ.ศ. 2562) แต่หากพบว่ามีความเป็นไปได้ด้วยที่บริษัทในสหภาพยุโรปจะสนใจนำเข้าผลิตภัณฑ์เครื่องมือแพทย์แบบเดียวกัน ซึ่งจะเป็นการเพิ่มศักยภาพในการแข่งขัน ดังนั้นการปฏิบัติตามข้อบังคับที่เกี่ยวข้องกับการนำเข้าเครื่องมือแพทย์ในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรปนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการจัดประเภทเครื่องมือแพทย์ตามความเสี่ยงและผ่านการรับรองมาตรฐานความปลอดภัย ที่เรียกว่า CE Mark (CE Mark for Medical Devices) ซึ่งจะต้องมีรายงานการทดสอบ (Test Report) ในการสนับสนุน เช่น การทดสอบระดับ in vitro และ in vivo เป็นต้น

● บทสรุป

การศึกษาและทำความเข้าใจเรื่องการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (TRL) เป็นเรื่องที่มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการวิจัยในทุกระดับควรให้ความสำคัญ ทั้งนักวิจัยที่ร่วมโครงการ ผู้บริหารโครงการ ผู้สนับสนุนงานวิจัย เพราะนอกจาก TRL จะเป็นข้อกำหนด/เงื่อนไขของหลายแหล่งทุนวิจัยที่ใช้ในการพิจารณาสนับสนุนโครงการวิจัยแล้วนั้น ยังมีความสำคัญต่อการวางแผนกระบวนการดำเนินงานวิจัยและพัฒนา

สิ่งหนึ่งที่คณะผู้เขียนมีข้อสังเกตคือ โมเดลดั้งเดิม การประเมิน TRL มีลักษณะเป็น Linear model แต่ในทางปฏิบัติพบว่า การประเมิน TRL มีลักษณะเป็น Non-linear model กล่าวคือ หากมีข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) เกิดขึ้นและระบุได้ว่ามีผลต่อองค์ประกอบหลักหรือผลการทดสอบในสภาพแวดล้อม นักวิจัยจะต้องกลับไปทดสอบในระดับ TRL ที่ต่ำกว่าก่อน เพื่อให้มั่นใจว่าแนวคิดเทคโนโลยีหรือสูตรหรือการบูรณาการขององค์ประกอบต่าง ๆ ถูกต้อง และทดสอบซ้ำได้ โดยมีผลการดำเนินงานที่มีเสถียรภาพทุกครั้ง เมื่อเทียบกับ Specification ที่กำหนดไว้ เช่น หากนักวิจัยทดสอบองค์ประกอบหลักในระดับห้องปฏิบัติการในระดับ TRL 4 แล้วพบว่า แนวคิดทางด้านเทคโนโลยีที่สร้างขึ้นมามีปัญหา นักวิจัยก็ต้องกลับไปทบทวนในระดับ TRL 2 เพื่อสร้างแนวคิดเทคโนโลยีใหม่ที่ปิดช่องว่างที่เป็นปัญหานั้น หรือ มีการทดสอบผลงานวิจัยในระดับ TRL 6 หรือ TRL 8 แล้วพบว่า การทดสอบชิ้นส่วน/องค์ประกอบบางอย่างต้องทดสอบตามมาตรฐานทางด้านไฟฟ้าในระดับ TRL 4 ให้ผ่านก่อน จึงจะนำชิ้นส่วนนั้นมาบูรณาการกับชิ้นส่วนอื่น นักวิจัยก็ต้องกลับไปทดสอบในระดับ TRL 4 ใหม่ให้ผ่านก่อน (ภาพที่ 9)



โมเดลดั้งเดิม การประเมิน TRL มีลักษณะเป็น Linear model แต่ในทางปฏิบัติพบว่า การประเมิน TRL มีลักษณะเป็น Non-linear model กล่าวคือ หากมีข้อมูลย้อนกลับ (Feedback) เกิดขึ้น และระบุได้ว่ามีผลต่อองค์ประกอบหลักหรือผลการทดสอบในสภาพแวดล้อม นักวิจัยจะต้องกลับไปทดสอบในระดับ TRL ที่ต่ำกว่าก่อน เพื่อให้มั่นใจว่าแนวคิดเทคโนโลยีหรือสูตรหรือการบูรณาการขององค์ประกอบต่าง ๆ ถูกต้อง และทดสอบซ้ำได้ โดยมีผลการดำเนินงานที่มีเสถียรภาพทุกครั้งเมื่อเทียบกับ Specification ที่กำหนดไว้

ภาพที่ 9 การประเมิน TRL มีลักษณะเป็น Non-linear model

อย่างไรก็ตาม การถ่ายทอดเทคโนโลยีเกิดขึ้นได้ทุกระดับ TRL ขึ้นอยู่กับความพร้อมของผู้รับถ่ายทอดเทคโนโลยี ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยควรมีการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะพัฒนาผลงานวิจัย/เทคโนโลยี วิเคราะห์ความต้องการกลุ่มเป้าหมายของผู้ใช้ผลงาน/อุตสาหกรรมให้ได้เร็วที่สุด เพื่อให้สามารถออกแบบและดำเนินงานวิจัยที่สอดคล้องกับข้อกำหนด หรือข้อบังคับ/มาตรฐานที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเตรียมความพร้อมเพื่อสร้างโอกาสให้เกิดการถ่ายทอดเทคโนโลยีทั้งสู่เชิงพาณิชย์และสาธารณประโยชน์

เอกสารอ้างอิง

พระราชบัญญัติเครื่องมือแพทย์ พ.ศ.2551. ราชกิจจานุเบกษา. 125 (ตอนที่ 43ก), 25-64.

พระราชบัญญัติเครื่องมือแพทย์ (ฉบับที่ 2) พ.ศ.2562. ราชกิจจานุเบกษา. 136 (ตอนที่ 56ก), 185-212.

สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (2562). แบบเสนอโครงการวิจัยเชิงหลักการ (Concept Proposal) ทุนวิจัยและนวัตกรรมในประเด็นสำคัญของประเทศการส่งเสริมอุตสาหกรรมสำคัญของประเทศ.

สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (2563). คู่มือจัดสำหรับหน่วยรับงบประมาณ จากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม ปีงบประมาณ 2563-2565.

สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ. (2558). คู่มือขอรับมาตรฐาน CE สำหรับเครื่องมือแพทย์.

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (2563). คู่มือการประเมินระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (Technology Readiness Level: TRL) ของ สวทช. เวอร์ชัน 2.2.

Blank, S. (2014). *How Investors Make Better Decisions: The Investment Readiness Level*. Retrieved March 19, 2021, from <https://steveblank.com/2014/07/01/how-investors-make-better-decisions-the-investment-readiness-level/>

European Association of Research and Technology Organisations (2014). *The TRL Scale as a Research & Innovation Policy Tool, EARTO Recommendations*, Rue Joseph II 36-38, 1000 Brussels, Belgium.

- European Commission, (2015). *Horizon 2020 Work Programme 2014 – 2015 (General Annexes Revised)*. Retrieved December 9, 2020, from https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-ga_en.pdf
- Evans, C.J. (2018). *Federal Funding Opportunities for Each of the Nine Technology Readiness Levels (TRLs) Part 2: TRLs 4-9*. Retrieved August 20, 2020, from <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2018/10/22/federal-funding-opportunities-for-each-of-the-nine-technology-readiness-levels-trl-part-2-trl-4-9/>
- Chamaki, F. (2014). *Assessing early stage startups and the Investment Readiness Level*. Retrieved March 18, 2021, from <http://www.frankichamaki.com/category/lean-startup/investment-readiness-level/>
- European Commission. (2014). *HORIZON 2020-WORK PROGRAMME 2014-2015: General Annexes, Technology readiness levels (TRL)*. Retrieved December 2, 2020, from https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2014_2015/annexes/h2020-wp1415-annex-g-trl_en.pdf
- Héder, M. (2017). *From NASA to EU: The evolution of the TRL scale in Public Sector Innovation*, The Innovation Journal, 22:2, 1-23.
- Innovation Fund Denmark. (2020). *Societal Readiness Level (SRL)*. Retrieved March 12, 2021, from <https://www.doa.go.th/plprotect/wp-content/uploads/2020/08/4.9-Societal-Readiness-Levels-SRL-and-Techology-Readiness-Levels-TRL.pdf>

- Doussineau M., Arregui-Pabollet, E., Harrap N and Merida F. (2018). *“Drawing funding and financing scenarios for effective implementation of Smart Specialisation Strategies,”* JRC Working Papers JRC112708, Joint Research Centre (Seville site).
- Mankins, J.C. (1995). *Technology Readiness Levels: A White Paper*. NASA, *Office of Space · Access and Technology*.
- Mitchell, J.A. (2007). *Measuring the Maturity of a Technology: Guidance on Assigning a TRL*, 1090 SAND2007-6733, October.
- NASA (2008). *Technology Module: Technology Readiness Levels (TRLs)* Space Systems Engineering, version 1.0. Retrieved March 15, 2021, from <https://www.slideserve.com/ursa/module-purpose-technology-readiness>.
- Office of Environmental Management U.S. Department of Energy (2010). *Technology Readiness Assessment Report*, Washington D. C. 20585. Retrieved December 9, 2020, from https://www.energy.gov/sites/prod/files/em/Volume_I/O_SRP.pdf.
- Olechowski A., Eppinger S.D. and Joglekar., D. (2015). *Technology Readiness Levels at 40: A Study of State-of-the-Art Use, Challenges, and Opportunities*. Proceedings of PICMET ‘15: Management of the Technology Age.
- Ramsden, R and Chowdhury, M. (2019). *Business Readiness Levels*. Independently published.

- Schildorfer, W, Walter, A., and Hasenauer R (2017). *TRL and MRL of C-ITS as lessons learnt from the Austrian C-ITS Corridor ECo-AT*, accepted Paper at the 12th ITS European Congress, Strasbourg, France, 19-22 June 2017.
- Setiawan, AAR., Sulaswatty, A., Meliana, Y. and Haryono, A. (2018). *Innovation Readiness Assessment toward Research Commercialization: Case of Surfactants for Food Processing*. International Journal of Innovation 6 (2), 180-193.
- U.S. Department of Energy (2010). “*Standard Review Plan (SRP) Technology Readiness Assessment Report*,” Washington D. C., Available Online, no. March, 2010.

