NATIONAL ROADMAP 2020-2029

THAILAND QUANTUM TECHNOLOGY

แผนที่นำทางการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม ของประเทศไทย พ.ศ. 2563 - 2572

20 กุมภาพันธ์ 2563

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม

บทสรุปผู้บริหาร

เทคโนโลยีควอนตัมคือการนำหลักการของควอนตัมฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในการวัด (มาตรวิทยา) การคำนวณ การประมวลผล การเข้ารหัส การส่งผ่านและเก็บข้อมูลให้มีประสิทธิภาพและศักยภาพสูงกว่าวิธีการดั้งเดิม (classical method) เทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ หรือเทคโนโลยีควอนตัมรุ่นที่ 2 (quantum technology generation 2: QT2) ตั้งอยู่บนความสามารถในการควบคุมสภาวะทางควอนตัมได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นผลมาจากความก้าวล้ำของเทคโนโลยี ทำให้การดำเนินการข้างต้นมีความรวดเร็ว ปลอดภัย มั่นคง และแม่นยำสูงขึ้น เทคโนโลยีควอนตัมนี้สามารถแบ่งออกเป็น 4 สาขาหลักได้แก่ (1) การคำนวณเชิงควอนตัม (quantum computation) (2) การจำลองเชิงควอนตัม (quantum simulation) (3) การสื่อสารเชิงควอนตัม (quantum communication) และ (4) มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม (quantum metrology and sensing) ซึ่งทั้งหมดกำลังถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว กลายเป็นเทคโนโลยีใหม่ (emerging technology) ที่ส่งผลกระทบต่อการประกอบการและการดำรงชีวิตประจำวันโดยตรง เทคโนโลยีควอนตัมจึงมักถูกกล่าวถึงในฐานะเทคโนโลยีเปลี่ยนโลก (disruptive technology) ที่สามารถปฏิวัติการพัฒนาเชิงเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และสังคมอีกครั้งในอนาคตอันใกล้ หลายองค์กรและหลายประเทศจึงให้ความสำคัญกับการพัฒนาเทคโนโลยีนี้อย่างมาก ดังจะเห็นได้จากจำนวนเงินทุนวิจัยที่ทุ่มลงมาอย่างมหาศาล และการพัฒนากำลังคนทางด้านนี้อย่างต่อเนื่อง

ทุกประเทศจะได้รับอิทธิพลจากการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ ผลกระทบจะมีมากหรือน้อย ในทิศทางที่เกื้อหนุนหรือรั้งการพัฒนาของประเทศนั้น ขึ้นอยู่กับความพร้อมและศักยภาพของแต่ละประเทศ เทคโนโลยีควอนตัมอาจจะเรียกได้ว่าเป็นดาบสองคม ถ้าประเทศไหนมีความพร้อมและมีศักยภาพในการใช้งานมันได้ มันจะให้คุณมหาศาล ในขณะเดียวกัน ความไม่พร้อมหรือไม่สามารถใช้เทคโนโลยีควอนตัมนี้ได้ ก็จะทำให้ประเทศเสียเปรียบในการแข่งขันเชิงธุรกิจเป็นอย่างมาก และทำลายความมั่นคงของประเทศได้

ผลกระทบของเทคโนโลยีควอนตัมต่อประเทศไทย

เทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่อยู่ในช่วงเริ่มต้นของการพัฒนาแต่มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ประเทศไทยจึงจำเป็นต้องเตรียมพร้อมเพื่อความมั่นคงของประเทศ และสร้างโอกาสให้ตัวเองเป็นผู้ผลิตบางส่วนของเทคโนโลยีนี้เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันเชิงเศรษฐกิจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาอุตสาหกรรมใหม่ในประเทศ โดยสรุปแล้ว เทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่จะส่งผลกระทบต่อประเทศในด้านต่าง ๆ ดังนี้

1) ***ด้านความมั่นคง*** เทคโนโลยีควอนตัมเสริมสร้างความมั่นคงของประเทศในเชิงความปลอดภัยของข้อมูล ไม่ว่าจะเป็นข้อมูลทางการทหารหรือยุทธศาสตร์ชาติ และข้อมูลในเชิงธุรกิจ รวมไปถึงการยกระดับการรักษาข้อมูลส่วนบุคคล (privacy amplification) ทั้งในส่วนการสื่อสาร การเงินการธนาคาร และการทำธุรกรรมผ่านอินเตอร์เน็ต เพราะการสื่อสารเชิงควอนตัมสามารถปกป้องความลับของข้อมูลผ่านการเข้ารหัสเชิงควอนตัมที่ไม่สามารถโจรกรรมได้

ในทางกลับกัน การไม่มีหรือไม่ใช้เทคโนโลยีควอนตัม จะทำให้ประเทศตกอยู่ในสภาวะความเสี่ยงสูงต่อการโจรกรรมข้อมูล และอาจจะไม่สามารถเข้าร่วมโครงข่ายการสื่อสารกับองค์กรที่ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลได้ เพราะผู้ไม่มีเทคโนโลยีควอนตัมจะถือเป็นจุดอ่อนของความมั่นคงของโครงข่ายที่สามารถถูกใช้เป็นจุดขโมยข้อมูลได้ ถ้าไม่มีเทคโนโลยีควอนตัมในการรักษาข้อมูล การทำธุรกรรมในชีวิตประจำ เช่น การเข้าอินเตอร์เน็ต การโอนเงิน ก็จะไม่ปลอดภัย เพราะการเข้ารหัสในปัจจุบันนี้สามารถถูกแฮ็ก (hack) ได้ง่ายด้วยเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์

2) ด้านเศรษฐกิจ เทคโนโลยีควอนตัมจะเป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีราคาสูงมากเมื่อต้องซื้อมาใช้ ในขณะเดียวกันมันก็ยังเป็นเทคโนโลยีที่กำลังถูกพัฒนาขึ้นมา ซึ่งประเทศไทยสามารถเป็นผู้ผลิตบางส่วนของเทคโนโลยีควอนตัมได้ เนื่องจากเทคโนโลยีควอนตัมมีความหลากหลายทั้งใน 4 สาขาหลัก และการนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ ทำให้ประเทศไทยสามารถสร้างชิ้นงาน (product) หรือเทคโนโลยีของตัวเองในมิติใดมิติหนึ่งของเทคโนโลยีนี้ได้ ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมของประเทศในอนาคต ปัจจุบันนี้เทคโนโลยีควอนตัมยังอยู่ในระยะเริ่มต้น ทำให้ประเทศไทยมีโอกาสในการเป็นผู้ผลิตได้สูง จึงจะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันเชิงธุรกิจ และลดการเสียเปรียบดุลทางการค้าในอนาคต

การที่ประเทศไทยไม่พร้อม หรือไม่สามารถพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของตัวเอง นอกจากจะทำให้ต้องเป็นผู้ซื้อเทคโนโลยีนี้ในอนาคตแล้ว อาจจะเสียโอกาสในการลงทุนของบริษัทต่างชาติ เพราะความพร้อมทางด้านเทคโนโลยีควอนตัมจะเป็นปัจจัยสำคัญในการดึงดูดแหล่งทุน และทรัพยากรบุคคลเข้าประเทศ การไม่มีเทคโนโลยีควอนตัมน่าจะทำให้ประเทศไทยต้องเสียโอกาสทางธุรกิจ และทรัพยากรบุคคลให้กับประเทศอื่นที่มีความพร้อม และสนับสนุนการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม

3) ด้านสาธารณสุข การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในทางการแพทย์ จะทำให้คุณภาพชีวิตของประชาชนดีขึ้น เพราะเทคโนโลยีควอนตัมจะเป็นพื้นฐานในการประดิษฐ์เครื่องมือแพทย์ (medical diagnostics) ที่สามารถวัดและวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำและรวดเร็ว นอกจากนี้เทคโนโลยีการคำนวณเชิงควอนตัมจะช่วยประมวลผลข้อมูลทางการแพทย์อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยคิดค้นยาที่เหมาะสมกับโรคโดยใช้เวลาสั้นลงมาก ทำให้ต้นทุนการลดลง ซึ่งจะส่งผลให้ประชาชนเข้าถึงการรักษาพยาบาลได้ทันเวลาและไม่เสียค่ายาแพงมากนัก การที่เทคโนโลยีควอนตัมสามารถวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพันธุกรรมของผู้ป่วยได้เร็วขึ้น ทำให้ประชาชนจำนวนมากขึ้นเข้าถึงบริการนี้ได้ และได้รับการดูแลด้านสุขภาพที่เหมาะสมกับตัวเองเป็นรายบุคคล การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในทางการแพทย์เกิดขึ้นแล้วในหลายประเทศ รวมทั้งประเทศไทยในรูปแบบของเครื่องมือขั้นสูง เช่น เครื่องเอ็มอาร์ไอ (magnetic resonance imaging: MRI) แต่ก็ยังต้องการพัฒนาอีกมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการทำตัวตรวจวัด (sensors) ที่มีความละเอียดสูง

ถ้าประเทศไทยไม่พัฒนาเทคโนโลยีการวัดเชิงควอนตัมสำหรับการแพทย์เป็นของตัวเอง ก็จะเสียดุลการค้าไปเรื่อย ๆ และเสียโอกาสให้การสร้างเครื่องมือทางการแพทย์ที่สอดคล้องกับบริบทของประเทศไทยโดยตรง เช่นการคิดค้นยาหรือวิธีการรักษาโรคเขตร้อน

4) ด้านสังคม เทคโนโลยีควอนตัมจะเปลี่ยนวิถีชีวิตของประชาชน และลดความเหลื่อมล้ำในสังคม นอกเหนือจากการเพิ่มโอกาสในเชิงธุรกิจแล้ว การประยุกต์เทคโนโลยีควอนตัมในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ในบริบทของประเทศไทย เช่น ปัญหาการจราจร ปัญหาการจัดการน้ำ จะทำให้คุณภาพชีวิตของประชาชนดีขึ้น ถ้าประเทศไทยเป็นผู้ผลิตเทคโนโลยีนี้เอง ประชาชนก็จะสามารถเข้าถึงได้มากขึ้น เป็นการลดความเหลื่อมล้ำในสังคม เช่น เกษตรกรสามารถใช้เทคโนโลยีควอนตัมที่เหมาะสมในการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร หรือการได้รับบริการสาธารณสุขที่เหมาะสมกับตัวเอง นอกจากนี้เทคโนโลยีควอนตัมจะเปิดศาสตร์การเรียนรู้ในวิทยาการใหม่ ๆ และสร้างเส้นทางอาชีพ (career path) ที่คนรุ่นใหม่สามารถเข้าถึง และสร้างอาชีพหลากหลายได้ เช่น นักเขียนโปรแกรมภาษาควอนตัม หรือผู้ดูแลโครงข่ายควอนตัม (quantum network) เป็นที่คาดการณ์ว่าเมื่อเทคโนโลยีควอมตันถูกพัฒนาไปในระดับหนึ่ง การพัฒนาหุ่นยนต์ก็จะพัฒนาตามอย่างก้าวกระโดด ทำให้วิถีชีวิตเราเปลี่ยนไป ซึ่งอาจจะทำให้บางอาชีพหมดความสำคัญไป เช่น เจ้าหน้าที่ธนาคาร แต่ในขณะเดียวกันก็จะลดความเลื่อมล้ำในสังคม เช่น หุ่นยนต์สามารถเรียนรู้การขับรถและสื่อสารกับระบบจีพีเอส (GPS) ได้เร็วและแม่นยำสูง รวมทั้งมีระบบวัดที่พร้อมเพียงทำให้ผู้พิการ (แม้พิการทางสายตา) ก็สามารถขับรถได้เท่าเทียมกับคนปรกติ

5) ด้านการศึกษา เทคโนโลยีควอนตัมจะกระตุ้นการเรียนรู้วิทยาศาสตร์อย่างลึกซึ้ง ไม่งมงาย และพัฒนาทักษะกระบวนการคิดของผู้เรียนให้มีศักยภาพสูง ซึ่งจะส่งผลให้สังคมไทยเป็นสังคมที่มีเหตุผลมากขึ้น และใช้หลักการเหตุผลทางวิทยาศาสตร์ในการดำรงชีวิตมากขึ้น เทคโนโลยีควอนตัมทำให้พัฒนาการของการศึกษา ที่เชื่อมโยงกับมาตรฐานของประชาคมโลก ทำให้เกิดการกระตุ้นยกระดับการศึกษาของประเทศไทยให้มีคุณภาพสูงขึ้น ให้ผู้เรียนได้เห็นว่าเส้นทางอาชีพตามความสนใจของตัวเองเป็นอย่างไรได้บ้าง

6) ด้านสิ่งแวดล้อม การที่เทคโนโลยีควอนตัมทำให้การดำเนินการต่าง ๆ มีประสิทธิภาพมากขึ้น ทำให้เวลาในการประมวลผลน้อยลง ซึ่งจะส่งผลให้เป็นการอนุรักษ์พลังงานโดยตรง และส่งผลต่อการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมโดยทางอ้อม นอกจากนี้การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมมาแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อม เช่น เครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์สามารถใช้ทำนายผลกระทบของสารเคมีต่อปัญหาโลกร้อนได้รวดเร็วและแม่นยำขึ้นในเวลาสั้นลง ทำให้เกิดการวางแผนการใช้สารเคมี หรือทรัพยากรณ์ต่าง ๆ ได้มีเป้าหมายและประสิทธิภาพสูงขึ้น ปัญหาหนึ่งที่สำคัญในโลกตอนนี้ คือ กระบวนการสังเคราะห์ปุ๋ย ซึ่งใช้เวลาและพลังงานสูงมาก เทคโนโลยีการคำนวณหรือการจำลองเชิงควอนตัมจะมีประโยชน์อย่างมากในการปรับปรุงกระบวนการผลิตปุ๋ย เพื่อให้ประหยัดพลังงาน ลดของเสียและมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม

7) ด้านความร่วมมือกับประชาคมโลก เทคโนโลยีควอนตัมนอกเหนือจะให้ความมั่นคงในการสื่อสารแล้ว ยังจะใช้ความร่วมมือกันระหว่างองค์กรในระดับนานาชาติ เนื่องจากเทคโนโลยีควอนตัมมีความหลากหลายมาก จึงเป็นไปไม่ได้ที่ประเทศใดประเทศหนึ่งจะเป็นเจ้าของเทคโนโลยีควอนตัมทั้งหมดแต่เพียงผู้เดียว การร่วมมือกันในระดับนานาชาติจะยกระดับการศึกษาและเพิ่มโอกาสทางเศรษฐกิจด้วยเช่นกัน ยิ่งไปกว่านั้นเทคโนโลยีควอนตัมในส่วนที่เป็นมาตรวิทยาจำเป็นจะต้องได้รับการยอมรับในระดับนานาชาติ (international certification) ซึ่งประเทศไทยสามารถมีบทบาทสำคัญ (key player) นำในการกำหนดค่ามาตรฐานทางมาตรวิทยา (standards in metrology)

ซึ่งจะนำมาซึ่งความภาคภูมิใจ และการเห็นบทบาทของประเทศในระดับสากล (global visibility) นอกจากนี้ เทคโนโลยีควอนตัมยังให้มาตรวัดที่แม่นยำ และจำเป็นสำหรับการติดต่อระหว่างประเทศได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การสื่อสารในระบบ 5G และ 6G การใช้สัญญาณดาวเทียมนำทาง (global navigation satellite system: GNSS)

โดยสรุปแล้ว ประเทศไทยต้องเตรียมพร้อมในการรองรับการพัฒนาของประเทศในยุคเทคโนโลยีควอนตัมที่กำลังพัฒนาก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว และจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมบางอย่างเป็นของตัวเอง เพื่อการแก้ปัญหาเฉพาะบริบทของประเทศไทย เช่น การเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร การออกแบบเครือข่ายการจราจรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบและสังเคราะห์ยาสำหรับโรคในเขตร้อน ยิ่งไปกว่านั้น เทคโนโลยีควอนตัมกำลังอยู่ในขั้นพัฒนาแต่ยังไม่สมบูรณ์ ทำให้ประเทศไทยมีโอกาสในการสร้างเทคโนโลยีควอนตัมบางส่วนขึ้นมาเอง สร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทคโนโลยีของประเทศ เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทั้งในอุตสาหกรรม และวงจรห่วงโซ่อุปาทาน ประเทศไทยไม่ควรพลาดโอกาสให้การสร้างเทคโนโลยีของตัวเองครานี้เหมือนที่เคยพลาดโอกาสมาแล้วในอดีตเพราะความไม่พร้อม

เทคโนโลยีควอนตัมเป็นเทคโนโลยีเปลี่ยนโลกที่ราคาสูง และจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางในการดำเนินการ จึงจำเป็นต้องพัฒนากำลังคนให้เหมาะสมเพื่อรองรับเทคโนโลยีนี้ นอกจากนี้บางส่วนของเทคโนโลยีควอนตัม เช่น อุปกรณ์การเข้ารหัส จำเป็นต้องมีองค์กรที่รับรองมาตรฐานจึงจะสามารถซื้อขาย หรือถ่ายโอนได้ เพราะมันกระทบความมั่นคงของเครือข่าย ทำให้ประเทศไทยจำเป็นต้องมีศักยภาพและความพร้อมในการดำเนินงานทางด้านนี้ การพัฒนากำลังคน องค์กรที่เกี่ยวข้องโดยตรง และโครงสร้างพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีควอนตัมจึงเป็นเรื่องจำเป็นสำหรับประเทศที่ต้องทำควบคู่ไปกับการวิจัยเพื่อพัฒนาเทคโนโลยี

โอกาสและความท้าทายสำหรับประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมาตลอด และจะยังคงเป็นเช่นนี้ต่อไป แต่จะทำอย่างไรให้ภาคเกษตรกรรมของประเทศไทยตั้งอยู่บนเทคโนโลยีที่เพิ่มผลผลิตให้มีประสิทธิภาพสูง และให้มีคุณภาพชีวิตที่ดี นอกจากนี้ประเทศไทยยังจำเป็นจะต้องมีอุตสาหกรรมของตัวเองที่สามารถเป็นแหล่งรายได้ของประเทศนอกเหนือจากภาคเกษตรกรรม การบริการและการท่องเที่ยว การพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมสำหรับประเทศไทยเป็นเรื่องที่ท้ายทายมาก ทั้งความท้าทายเชิงเทคนิคในการคิดค้น ออกแบบ และผลิตชิ้นงานที่ใช้เทคโนโลยีควอนตัมได้ การสร้างเทคโนโลยีใหม่เป็นเรื่องที่ท้าทายอย่างยิ่ง เพราะในฐานะประเทศเราไม่เคยมีประสบการณ์ทางด้านนี้มาก่อน ความท้าทายเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณเมื่อพิจารณาถึงทัศนคติและความพร้อมของคนในชาติ ซึ่งประเทศไทยก็เคยพลาดโอกาสในการเป็นเจ้าของเทคโนโลยีมาแล้วหลายครั้งในอดีต

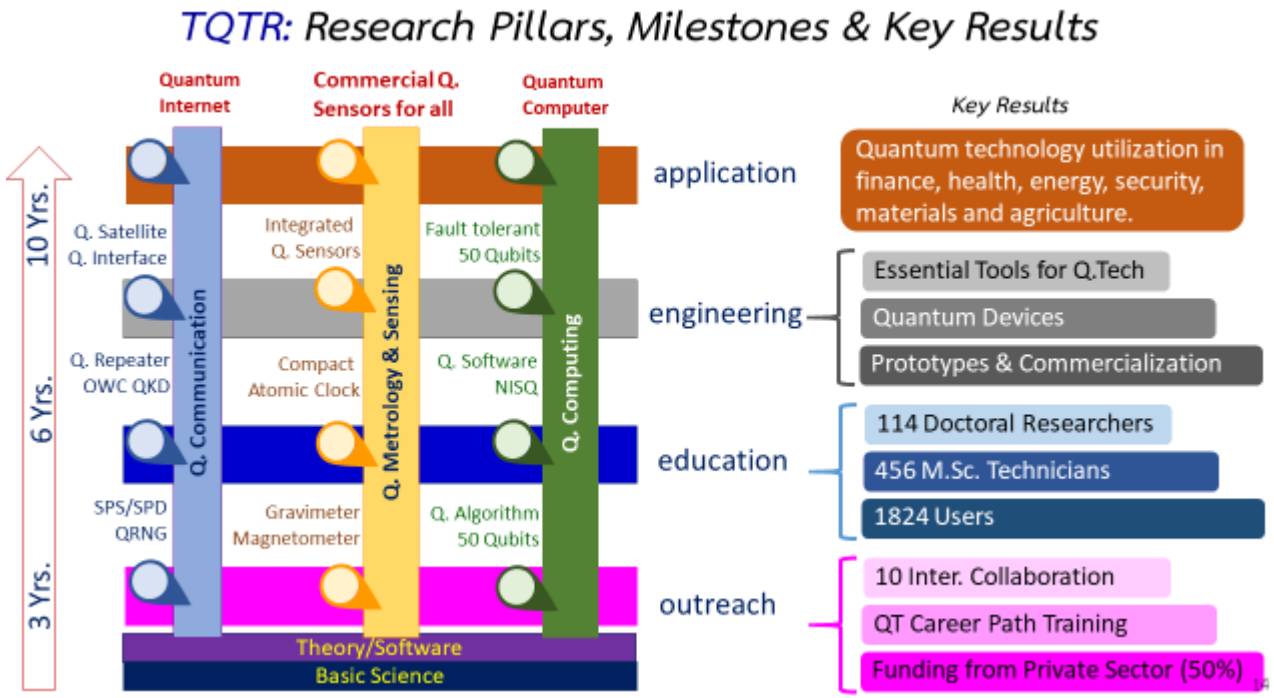
เนื่องด้วยเทคโนโลยีควอนตัมยังอยู่ในระยะเริ่มต้นของการพัฒนา และมีความหลากหลายในมิติความซับซ้อนและการประยุกต์ใช้ประโยชน์ ทำให้ประเทศไทยมีโอกาสเป็นเจ้าของเทคโนโลยีนี้ได้ (บางส่วนที่เหมาะสมกับประเทศไทย) ซึ่งจะมีผลกระทบในหลายมิติของการพัฒนาประเทศดังที่ได้วิเคราะห์ข้างต้น ดังนั้น จึงถือว่าเป็นวาระสำคัญ และเร่งด่วนในการที่ประเทศไทยจะได้วางแผนและดำเนินการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมอย่างเป็นระบบทั้งในส่วนการตรียมกำลังคน

เพื่อรองรับการพัฒนาของเทคโนโลยีนี้ การเตรียมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความมั่นคงของประเทศ และการคิดค้นวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบในเชิงอุตสาหกรรมและพาณิชย์

โอกาสที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม คือการสร้างเส้นทางอาชีพสำหรับชนรุ่นหลังเพื่อดึงให้ศักยภาพของคนในประเทศ และดึงดูดแหล่งทุน และนักวิจัยต่างชาติมาช่วยพัฒนาประเทศของเรา

แผนการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย พ.ศ. 2563 – 2572

กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (อว.) จึงเสนอแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย (Thailand Quantum Technology Roadmap: TQTR) ในช่วง 10 ปีข้างหน้า โดยสรุปแผนการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศได้ตามแผนภาพในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แผนภาพรวมแสดงเสาหลัก ตัวส่งเสริม และผลลัพธ์ที่คาดหวังสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยระหว่างปี พ.ศ. 2563 ถึง 2572

เทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยประกอบด้วย 3 เสาหลักคือ (1) การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม (2) การสื่อสารเชิงควอนตัม และ (3) มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม เมื่อเทียบกับแผนที่นำทางในระดับสากล ประเทศไทยรวมการคำนวณเชิงควอนตัมและการจำลองเชิงควอนตัมเข้าเป็นเสาหลักเดียวกัน เพราะจะพัฒนาไปด้วยกัน อีกทั้งประเทศไทยยังไม่มีกลุ่มวิจัยทางด้านนี้ที่ใหญ่หรือหลากหลายพอที่ควรจะแยกวิจัยในช่วงเวลา 10 ปีข้างหน้า

แต่ละเสาหลักจะมีเป้าหมาย และแผนที่นำทางของตัวเอง (technical roadmap) เช่น เป้าหมายหลักของการคำนวณเชิงควอนตัมคือการสร้างควอนตัมคอมพิวเตอร์ (รวมถึงอัลกอริทึม) และเป้าหมายหลักของการสื่อสารเชิงควอนตัมคือการสร้างควอนตัมอินเตอร์เน็ต ในระหว่างทางก็ต้องคิดค้นวิจัย หรือสร้างอุปกรณ์จำเป็นตามแขนงต่าง ๆ ซึ่งการพัฒนาเหล่านี้สามารถนำไปต่อยอดเชิงพาณิชย์ได้ (spin off) หรือการสร้างมาตรฐานทางมาตรวิทยาที่ทำให้ประเทศไทยอยู่ในแนวหน้าของประชาคมโลก

สำหรับปัจจัยเกื้อหนุน หรือตัวส่งเสริม ซึ่งประกอบด้วยการศึกษา (education) การเผยแพร่สู่สาธารณะ (outreach) การวิศวกรรมศาสตร์ และการนำเทคโนโลยีควอนตัมไปประยุกต์ใช้ เป็นการสร้างระบบนิเวศ (ecosystems) ของแผนพัฒนาเทคโนโลยีให้รัดกุม มีประสิทธิภาพ มั่นคง และยั่งยืน โดยแผนพัฒนาเทคโนโลยีนี้ได้คาดการณ์ผลลัพธ์ให้เห็นว่าจะเพิ่มศักยภาพ หรือจะช่วยขับเคลื่อนประเทศไทยไปข้างหน้าได้อย่างไร

เอกสารฉบับนี้เป็นการวบรวมรายละเอียดของแผนการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วยแผนที่นำทางของแต่ละเสาหลัก แผนที่นำทางของปัจจัยเกื้อหนุน และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม ผลที่คาดว่าจะได้รับ และงบประมาณโดยประมาณสำหรับใช้ในการดำเนินการตามแผนดังกล่าวเป็นเวลา 10 ปี ด้วยการดำเนินการตามแผนพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าว เราจะนำพาให้ประเทศไทยก้าวสู่ความมั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน ในยุคแห่งเทคโนโลยีควอนตัม

สารบัญ

บทสรุปผู้บริหาร 1

Thailand Quantum Technology Roadmap

1. **เทคโนโลยีควอนตัมคืออะไร ใครทำอะไรที่ไหน เทคโนโลยีควอนตัมจะเปลี่ยนโลกอย่างไร** 10

1.1 ความสัมพันธ์กับเทคโนโลยีอื่น 12

1.2 ภัยคุกคามและโอกาส (***threat and opportunity***) 13

2. **วิสัยทัศน์และทิศทางเชิงยุทธศาสตร์ (***Vision and Strategic Direction***)** 14

2.1 เป้าหมายสำหรับ ***10*** ปี สำหรับประเทศไทย 14

2.2 แนวทางการดำเนินการเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย 15

2.3 วัตถุประสงค์และผลลัพธ์ที่สำคัญ (***Objectives and Key Results***) 16

3. **เสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัม (***Pillars of Quantum Technology***)** 18

3.1 การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม (***Quantum Computing and Simulation)*** 19

3.2 การสื่อสารเชิงควอนตัม (***Quantum Communication)*** 19

3.3 มาตรวิทยาและการตรวจวัดเชิงควอนตัม (***Quantum Metrology and Sensing***) 20

3.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมเพื่อการพัฒนาประเทศ (***Application Quantum Technology for Prosperity of Thailand)*** 20

4. **การวางรากฐาน (***Building Foundation***)** 22

4.1 การศึกษาสาขาควอนตัม (***Education for Quantum Technology***) 22

4.2 การเผยแพร่สู่สาธารณะ (***Public Outreach***) 24

4.3 งานวิศวกรรมศาสตร์ (***Engineering***) 25

5. **แผนที่นำทางและเป้าหมายสำคัญของเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย (**Thailand Quantum Technology Roadmap & Milestones) 27

6. **สรุปแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยปี พ.ศ.** 2563 **ถึง** 2572 36

6.1 สรุปเป้าหมาย (***milestone***) ของแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย 36

6.2 สรุปงบประมาณสำหรับ *10* ปี 37
6.3 ความเชื่อมโยงกับการวิจัยขั้นแนวหน้า (***Frontier Research***) อื่น ๆ ของประเทศไทย 38
ภาคผนวก ก รายละเอียดของแต่ละเสาหลักเทคโนโลยีควอนตัม 40
ภาคผนวก ข อภิธานศัพท์ (*Glossary*) 77
ภาคผนวก ค หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง 78
ภาคผนวก ง เอกสารอ้างอิง 80

แผนที่นำทางการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย

Thailand Quantum Technology Roadmap

ประเทศกำลังพัฒนา หรือประเทศที่เศรษฐกิจและสังคมยังไม่มั่นคงมีความเชื่อว่าประเทศของตนยังไม่มีความพร้อมที่จะลงทุนเพื่อการวิจัยพื้นฐาน (basis research) และการวิจัยขั้นแนวหน้า (frontier research) เนื่องจากเป็นการลงทุนมูลค่าสูงและก่อให้เกิดผลลัพธ์ในระยะสั้น จึงมุ่งที่จะลงทุนซื้อเทคโนโลยีจากต่างประเทศมาเป็นเครื่องมือในการพัฒนาอุตสาหกรรมและการเกษตรโดยเชื่อว่าสามารถก่อให้เกิดผลตอบแทนอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตามรูปแบบการลงทุนเพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจดังกล่าวไม่สามารถสร้างความสามารถในการแข่งขันระยะยาวและอย่างยั่งยืนได้ กล่าวคือ ความได้เปรียบทางทรัพยากรธรรมชาติที่มีได้รับการนำไปใช้เป็นเพียงแหล่งวัตถุดิบ แต่ไม่สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มเองได้ ก่อให้เกิดการพึ่งพาการลงทุนจากต่างประเทศและการนำเข้าเทคโนโลยีในการทำให้ได้มาซึ่งเทคโนโลยีใหม่ การพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญและเทคโนโลยีจากภายนอกนี้มีแนวโน้มสูงขึ้นทั้งในด้านมูลค่าและความเชื่อมั่น นำไปสู่ความไม่มั่นคงและไม่ยั่งยืนในการพัฒนาประเทศดังที่ปรากฏอย่างเด่นชัดในปัจจุบัน ที่ประเทศขาดดุลทางเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่องด้วยมูลค่าที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ ตามระดับความซับซ้อนของเทคโนโลยี กลายเป็นภาระทางการคลังของประเทศ สุดท้ายเมื่อทรัพยากรร่อยหรอ หรือค่าจ้างแรงงานสูงขึ้น ก็จะไม่สามารถดึงดูดการลงทุนจากต่างชาติได้อีกต่อไปและการพึ่งพาเทคโนโลยีจากภายนอกจะสร้างภาระค่าใช้จ่ายยิ่งกว่าการลงทุนการวิจัยขั้นพื้นฐานและการวิจัยขั้นแนวหน้ามากนัก (ปัจจุบันประเทศไทยขาดดุลทางเทคโนโลยีปีละกว่าสองแสนล้านบาท) นอกจากนี้ ยังมีข้อเท็จจริงอีกว่าทุกประเทศที่สามารถก้าวข้ามกับดักรายได้ปานกลางไปเป็นประเทศพัฒนาแล้วคือประเทศที่มีเทคโนโลยีเป็นของตนเอง สามารถใช้เทคโนโลยีดังกล่าวเป็นฐานให้แก่การพัฒนาเศรษฐกิจ สังคมและความมั่นคงทั้งในระยะสั้นและระยะยาว

ปัจจุบันการจำแนกการวิจัยพื้นฐานและการวิจัยประยุกต์เริ่มไม่ชัดเจน เนื่องจากความรู้และเทคโนโลยีที่เกิดขึ้นใหม่ล้วนมีรากฐานจากการวิจัยที่ซ้อนทับกันมากขึ้น ดังนั้นการวิจัยขั้นแนวหน้า (frontier research) จึงมุ่งไปในทิศที่นำไปสู่ความเป็นพื้นฐานขั้นสูงที่เป็นองค์ความรู้ใหม่ (fundamental advancement beyond frontier of knowledge) โดยไม่ได้จำกัดว่าต้องเป็นงานวิจัยพื้นฐาน งานวิจัยประยุกต์ หรืองานวิจัยอุตสาหกรรม ดังนั้นการผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยขั้นแนวหน้าอาจจำแนกตามวัตถุประสงค์ข้างต้นได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้ (1) การนำไปสู่การค้นพบสิ่งใหม่ (new discovery) (2) การทำสำเร็จเป็นครั้งแรกในโลก (first in class) (3) การสร้างสิ่งที่ดีที่โลก (best in class) ซึ่งทั้งสามประเภทนี้ล้วนแต่ก้าวข้ามขอบเขตของความรู้ทั้งสิ้น อย่างไรก็ดี สิ่งที่อาจจะช่วยให้จำแนกงานวิจัยพื้นฐานและงานวิจัยขั้นแนวหน้าก็คือเป้าหมายในการตอบสนองความท้าทายที่จะเกิดขึ้นในอนาคต งานวิจัยพื้นฐานมุ่งสร้างความรู้ใหม่โดยละไม่กล่าวถึงเป้าหมายในการตอบสนองความท้าทายของอนาคต ในขณะที่งานวิจัยขั้นแนวหน้าคำนึงถึงเป้าหมายในการตอบสนองความท้าทายดังกล่าว ประวัติศาสตร์ที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการวิจัยทั้งสองแบบเกื้อกูลและพึ่งพาอาศัยกัน หากสามารถลงทุนการวิจัยทั้งสองกลุ่มอย่างสมดุล จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพทั้งในการสร้างความรู้ใหม่ สร้างเทคโนโลยีใหม่และสร้างความพร้อมในการรับมือความท้าทายในอนาคต

1. เทคโนโลยีควอนตัมคืออะไร ใครทำอะไรที่ไหน เทคโนโลยีควอนตัมจะเปลี่ยนโลกอย่างไร

หลังจากทฤษฎีควอนตัมได้ถูกพัฒนาขึ้นมาตั้งแต่ต้นศตวรรษที่ 20 มันก็มีบทบาทสำคัญในการปฏิวัติการพัฒนาเทคโนโลยี การประยุกต์ใช้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมฟิสิกส์ในระดับไมโครเมตร หรือนาโนเมตรทำให้เกิดการสร้างทรานซิสเตอร์ อันเป็นพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ และให้อุปกรณ์อำนวยความสะดวกมากมายในชีวิตของเรา เช่นเครื่องคอมพิวเตอร์ โทรศัพท์สมาร์ทโฟน เครื่องมือทางการแพทย์ เป็นต้น การพัฒนาดังกล่าวถือว่าเป็นเทคโนโลยีควอนตัมยุคแรก หรือเทคโนโลยีควอนตัมรุ่นที่ 1 (first generation quantum technology) ซึ่งยังคงใช้สมบัติกลุ่มของอนุภาคหลายตัว แต่ก็ทำให้เกิดประโยชน์มหาศาลดังที่เราเห็นได้จากเครื่องมืออุปกรณ์ต่าง ๆ รอบตัวเรา

ในช่วงสามทศวรรษที่ผ่านมา องค์ความรู้ทางฟิสิกส์และกระบวนการทางวิศวกรรมศาสตร์ได้ก้าวหน้าไปมาก ทำให้สามารถควบคุมและใช้สมบัติเชิงควอนตัมของแต่ละอนุภาค หรือแต่ละสถานะของอนุภาคมาสร้างเป็น เทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ หรือเทคโนโลยีควอนตัมรุ่นที่ 2 (second generation quantum technology) ที่มีศักยภาพในการวัด คำนวณ ประมวลผล ส่งผ่านและเก็บข้อมูลได้อย่างแม่นยำ รวดเร็ว และปลอดภัยมากขึ้น เทคโนโลยีนี้สามารถแบ่งออกเป็นสาขาหลักได้แก่ มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม (quantum metrology and sensing) การคำนวณเชิงควอนตัม (quantum computation) การจำลองเชิงควอนตัม (quantum simulation) และการสื่อสารเชิงควอนตัม (quantum communication) ซึ่งทั้งหมดเป็นเทคโนโลยีที่กำลังถูกพัฒนาอย่างรวดเร็ว และถูกคาดหวังว่าจะกลายเป็นเทคโนโลยีใหม่ (emerging technology) และเป็นเทคโนโลยีเปลี่ยนโลก (disruptive technology) ที่สามารถปฏิวัติการพัฒนาเชิงเศรษฐกิจ อุตสาหกรรม และสังคมอีกครั้งในอนาคตอันใกล้ หลายบริษัท หลายองค์กร และหลายประเทศจึงให้ความสำคัญกับการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ และติดตามเพื่อเตรียมความพร้อมให้เหมาะสม

ทุกประเทศจะได้รับอิทธิพลจากการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมโดยตรง ผลกระทบจะมีมากหรือน้อย หรือในทิศทางบวกหรือลบ ขึ้นอยู่กับความพร้อมและศักยภาพของแต่ละประเทศ ประเทศไทยจึงจำเป็นต้องเตรียมความพร้อมด้วยเหตุผลหลัก ดังนี้

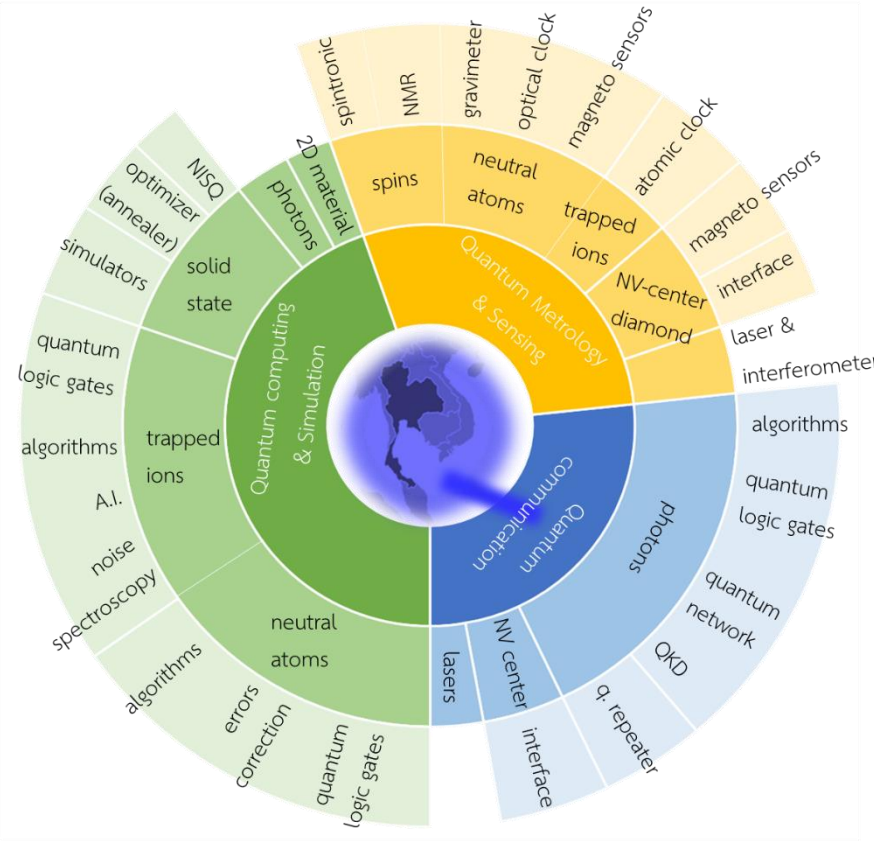
1) เทคโนโลยีควอนตัมให้ความมั่นคงของประเทศในเชิงความปลอดภัยของข้อมูล ทั้งในส่วนการสื่อสาร การเงินการธนาคาร และการทำธุรกรรมผ่านอินเตอร์เน็ต

2) เทคโนโลยีควอนตัมให้มาตรวัดที่แม่นยำ ที่จำเป็นในการพัฒนาเทคโนโลยีอื่น ๆ ของประเทศดำเนินการได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่นการสื่อสารในระบบ 5G และ 6G การใช้สัญญาณดาวเทียมนำทาง (GNSS) การกำหนดมาตรฐานของเวลาและหน่วยมาตรวิทยาอื่น ๆ

3) ประเทศไทยจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของตัวเอง เพื่อการแก้ปัญหาเฉพาะบริบทของประเทศเราเอง เช่น การเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร การออกแบบเครือข่ายการจราจรที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบและสังเคราะห์ยาสำหรับโรคในเขตร้อน

4) เทคโนโลยีควอนตัมกำลังอยู่ในขั้นพัฒนาอย่างรวดเร็ว แต่ยังไม่สมบูรณ์ ทำให้ประเทศไทยมีโอกาสในการสร้างเทคโนโลยีควอนตัมบางส่วนขึ้นมาเอง สร้างผลิตภัณฑ์ที่เป็นเทคโนโลยีของประเทศขึ้นมาเอง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถทั้ง

ในอุตสาหกรรม และวงจรห่วงโซ่อุปาทาน ประเทศไทยไม่ควรพลาดโอกาสให้การสร้างเทคโนโลยีของตัวเองครานี้เหมือนที่เคยพลาดโอกาสมาแล้วในอดีตเพราะความไม่พร้อม



รูปที่ 2 แผนภาพสรุปเทคโนโลยีควอนตัมในทั้ง 3 เสาหลักที่จะพัฒนาในประเทศไทย

5) เทคโนโลยีควอนตัมเป็นเทคโนโลยีเปลี่ยนโลก (disruptive technology) ที่ราคาสูง และจำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะทางในการดำเนินการ จึงจำเป็นต้องพัฒนากำลังคนให้เหมาะสมกับการรองรับเทคโนโลยีนี้ นอกจากนี้ บางส่วนของเทคโนโลยีควอนตัม เช่นอุปกรณ์การเข้ารหัส จำเป็นต้องมีองค์กรที่รับรองมาตรฐานจึงจะสามารถซื้อขายหรือถ่ายโอนได้ เพราะมันกระทบกับความมั่นคงของเครือข่าย ทำให้ประเทศไทยจำเป็นต้องมีศักยภาพและความพร้อมในการดำเนินงานทางด้านนี้ การพัฒนากำลังคน องค์กรที่เกี่ยวข้องโดยตรง และโครงสร้างพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีควอนตัมจึงเป็นเรื่องจำเป็นสำหรับประเทศ

1.1 ความสัมพันธ์กับเทคโนโลยีอื่น

ความสัมพันธ์ของเทคโนโลยีควอนตัมกับเทคโนโลยีอื่นอาจจะพิจารณาได้ใน 2 มุมมอง คือ (1) เทคโนโลยีที่ได้ผลจากเทคโนโลยีควอนตัม และ (2) เทคโนโลยีที่ช่วยการพัฒนาหรือประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมมีมูลค่าสูงขึ้น อาจจะพิจารณาผลกระทบจากแต่ละเสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัมได้ดังนี้

1) เทคโนโลยีที่ได้ผลจากเทคโนโลยีควอนตัม

- เทคโนโลยีการสื่อสาร เช่น 5G/6G หรือ GPS หรือ GNSS จะได้รับผลดีจากการพัฒนามาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม และการสื่อสารเชิงควอนตัม ทำการวัดแม่นยำขึ้น ในอนาคตเราจะมีโครงข่ายควอนตัมที่สามารถส่งข้อมูลได้ปลอดภัย และอัตราการถ่ายโอนข้อมูลสูงขึ้นมาก ให้เราจะสามารถประมวลของของ GPS ได้อย่างแม่นยำจนให้รถขับโดยอัตโนมัติได้
- การสำรวจทรัพยากร ในอนาคตเราอาจจะใช้นาฬิกาอะตอมในการวัดการเปลี่ยนแปลงของสนามโน้มถ่วงได้ทำให้ได้สภาพทางธรณีอย่างแม่นยำมากขึ้น ซึ่งสำหรับประเทศไทยแล้วน่าจะมีประโยชน์มากในการจัดการวางแผนเรื่องน้ำ ในทำนองเดียวผลของมาตรวิทยาเชิงควอนตัมอย่างอื่น เช่น gravimeter จะช่วยในการสำรวจทรัพยากรทางธรณี หรือ magnetometer ที่ใช้วัดสภาพความเป็นแม่เหล็ก หรือความแปรปรวนของสนามแม่เล็กที่มีความละเอียดสูง
- เทคโนโลยีการผลิตยา เมื่อควอนตัมคอมพิวเตอร์สามารถโปรแกรมได้ (programmable quantum computer) มันจะมีประโยชน์มากในหลายวงการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงการแพทย์และเภสัชศาสตร์ นักวิจัยจะไม่ต้องใช้เวลานานเพื่อลองผิดลองถูกในการหาโครงสร้างยาที่เหมัสมสำหรับโรคใดโรคหนึ่ง เครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ หรือเครื่องจำลองเชิงควอนตัมจะช่วยลดเวลาอย่างมาก และจะเปิดโอกาสให้ค้นหาโครงสร้างที่หลากหลายขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกครั้งมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถผลิตยาตามความต้องการจำเพาะของพันธุกรรม ทำให้ผู้ป่วยตอบสนองกับยาที่ได้รับอย่างเป็นผลดีเร็วขึ้น
- เทคโนโลยีวัสดุ (และวิศวกรรมศาสตร์) วัสดุที่สามารถทนเงื่อนไขสุดโต่ง เช่น ความดันสุดโต่ง (extreme pressure) หรือความร้อนสุดโต่ง (extreme heat load) ถูกทำนายและสังเคราะห์ได้ยากในปัจจุบัน เทคโนโลยีการคำนวณเชิงควอนตัมจะช่วยให้การศึกษาสมบัติของวัสดุรวดเร็วและแม่นยำขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์อย่างมากในการสร้างเตาปฏิกรณ์ปรมาณูฟิวชัน หรือหารสร้างสถานีวิจัยในอวกาศ
- เทคโนโลยีการเงิน การคำนวณและการสื่อสารเชิงควอนตัมจะช่วยให้การทำธุรกรรม (transaction) ทางด้านการเงินผ่านอินเตอร์เน็ตปลอดภัยขึ้นและสามารถแยกลำดับเวลา (time stamp) ในการทำธุรกรรมได้ละเอียดซึ่งจะมีผลต่อการลงทุนซื้อขายในตลาดหุ้นอย่างมาก นอกจากนี้การพัฒนาซอฟท์แวร์สำหรับการคำนวณเชิงควอนตัมก็จะทำให้เกิดโมเดลการทำนายที่หลากหลาย และมีความแม่นยำสูงขึ้นในการปรับบัญชีการลงทุน (portfolio optimization) ให้สอดคล้องกับสภาพของตลาดตามเวลาปัจจุบันมากขึ้น

- เทคโนโลยีการคำนวณ ซึ่งประกอบด้วยการเขียนอัลกอริทึม หรือการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence: AI) ทั้งสองจะได้รับอานิสงค์โดยตรงการจากพัฒนาอัลกอริทึมที่ใช้ควอนตัมเข้ามาช่วย (quantum-assisted algorithms) เทคโนโลยีควอนตัมจะทำให้อัลกอริทึม และปัญญาประดิษฐ์มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว และจะเป็นส่วนสำคัญในการใช้ชีวิตของเรา

2) เทคโนโลยีที่ช่วยการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม

เนื่องจากเทคโนโลยีควอนตัมยังอยู่ในช่วงแรกของการพัฒนา มันจึงจำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีอื่นมาช่วยให้มันสามารถพัฒนาได้เร็วขึ้น กล่าวโดยสรุปก็คือ การควบคุมสภาวะทางควอนตัมเป็นเรื่องที่ละเอียดอื่น ซึ่งอาจจะจำเป็นต้องใช้อิเล็กทรอนิกส์ งานวิศวกรรมศาสตร์ การผลิต (fabrication) และการควบคุม (control) อย่างละเอียดและแม่นยำอย่างที่ไม่เคยมีมาก่อน เทคโนโลยีเหล่านี่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อสร้างเทคโนโลยีควอนตัมให้ทำงานได้ เพื่อใช้ประโยชน์ของหลักการและสภาวะทางควอนตัม นอกจากนี้การใช้ปัญญาประดิษฐ์มาช่วยตัดสินใจในการเลือกแบบที่ดีที่สุด หรือทำนายพฤติกรรมของระบบทางควอนตัมล่วงหน้า

1.2 ภัยคุกคามและโอกาส (threat and opportunity)

การมีเทคโนโลยีควอนตัม หรือพัฒนาขึ้นมาเป็นของประเทศได้จะส่งผลดีต่อประเทศอย่างสูง ทำให้ประเทศมีโอกาสในการแข่งขันเชิงธุรกิจการลงทุน เป็นที่ดึงดูดอุตสาหกรรมใหม่เข้ามาลงทุนในประเทศไทย รวมทั้งจะช่วยเพิ่มผลผลิตหลักของประเทศจากการเกษตร และรวมถึงมิติอื่น ๆ ที่เทคโนโลยีควอนตัมส่งผลต่อประเทศไทย การที่เทคโนโลยีควอนตัมยังอยู่ในระยะเริ่มต้นของการพัฒนา และมีความหลากหลายในมิติความซับซ้อน และการประยุกต์ใช้ ทำให้ประเทศไทยมีโอกาสเป็นเจ้าของเทคโนโลยีนี้ได้ และสามารถวางแผนและดำเนินการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมอย่างเป็นระบบทั้งในส่วนการตรียมกำลังคนเพื่อรองรับการพัฒนาของเทคโนโลยีนี้ การเตรียมโครงสร้างพื้นฐานเพื่อความมั่นคงของประเทศ และการคิดค้นวิจัยเพื่อพัฒนาต้นแบบในเชิงอุตสาหกรรมและพาณิชย์ โอกาสที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม คือการสร้างเส้นทางอาชีพสำหรับชนรุ่นหลังเพื่อดึงให้ศักยภาพของคนอยู่ในประเทศ และดึงดูดแหล่งทุน และนักวิจัยมาช่วยพัฒนาประเทศของเรา

ถ้าประเทศไทยไม่มีเทคโนโลยีควอนตัม ก็จะทำให้ประเทศมีความเสี่ยงต่อภัยคุกคามทางการโจรกรรมข้อมูล ทั้งข้อมูลในระดับความมั่นคงของประเทศ และข้อมูลส่วนบุคคลของประชาชน การทำธุรกรรมทางอินเตอร์เน็ตก็จะมีความเสี่ยงสูงและลดความน่าเชื่อถือลงอย่างมาก ซึ่งจะมีผลต่อการเข้าร่วมโครงข่ายการสื่อสารกับนานาชาติอีกด้วย ทั้งหมดนี้ไม่นับถึงการที่ประเทศไทยจะเสียโอกาสในการพัฒนาประเทศด้วยคุณประโยชน์ของเทคโนโลยีควอนตัมที่กล่าวมาข้างต้น หรืออย่างน้อยก็ทำให้ประเทศไทยตามหลังประเทศอื่น ๆ ซึ่งทำให้เสียโอกาสในการดึงดูดนักลงทุน และอาจจะให้เกิดปัญหาการสูญเสียทรัพยากรบุคคลหรือศักยภาพให้กับประเทศอื่น (สมองไหลออก)

2. วิสัยทัศน์และทิศทางเชิงยุทธศาสตร์ (*Vision and Strategic Direction*)

2.1 เป้าหมายสำหรับ 10 ปี สำหรับประเทศไทย

1) ทำให้ประเทศไทยติดอยู่ใน Top 5 ของเอเชียในงานวิจัยด้านควอนตัม และเป็นผู้นำในภูมิภาคอาเซียนที่สามารถดึงดูดนักวิจัยและนักลงทุนเข้ามาในประเทศไทย

2) เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศ ด้วยการสร้างองค์ความรู้ ทรัพย์สินทางปัญญา และ นวัตกรรม ที่สามารถพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมใหม่ในประเทศได้ เพื่อความสามารถในการแข่งขันเชิงธุรกิจและการลงทุน และลดการขาดดุลการค้า

3) ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในการพัฒนาและแก้ปัญหาเฉพาะบริบทของประเทศไทย เช่น การพยากรณ์สภาพอากาศ การแก้ปัญหาการจัดการน้ำ การแก้ปัญหาการจราจรและระบบขนส่ง การลดระยะเวลาในการคิดค้นและผลิตยาสำหรับโรคในเขตร้อนรวมไปถึงวัสดุชนิดใหม่

4) สร้างโครงสร้างพื้นฐานสำหรับเตรียมความพร้อมของประเทศไทยเพื่อรองรับการเข้าสู่การพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมในยุคเทคโนโลยีควอนตัม โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความมั่นคงของข้อมูลและระบบสื่อสาร

หากมองในเชิงการสร้างโครงสร้างพื้นฐาน และการพัฒนาประเทศ เราอาจจะสรุปเป้าหมายของการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยได้เป็น 4 ระดับขั้น ดังนี้

รูปที่ 3 แผนภาพแสดงแผน 4 ขั้นสำหรับพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย

2.2 แนวทางการดำเนินการเพื่อให้บรรลุเป้าหมาย

การพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยจำเป็นต้องใช้เวลา และการวางแผนระยะยาวอย่างเป็นระบบ แต่ในขณะเดียวกันก็ต้องเริ่มทำทันที เพื่อประเทศไทยจะได้มีโอกาสในการสร้างเทคโนโลยีของตนเองในบางหัวข้อของเทคโนโลยีควอนตัม ที่สำคัญคือจะต้องวางรากฐานการพัฒนาอย่างมั่นคง ยั่งยืนในทุกมิติทั้งในด้านการพัฒนาการศึกษาและการสร้างกำลังคน ควบคู่ไปกับการเร่งผลิตผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ

1) สร้างเครือข่ายนักวิจัยเทคโนโลยีควอนตัมให้ทำงานแบบเชื่อมโยงกันและมีเป้าหมายร่วมกัน เพื่อขับเคลื่อนงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัมให้สามารถรองรับเทคโนโลยีควอนตัมที่กำลังถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว
2) สร้างหลักสูตร วางแผนและพัฒนากำลังคนที่มีความสามารถเฉพาะด้านและมีทักษะสูงสำหรับการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย
3) ให้ความรู้พื้นฐานและความตระหนักถึงความสำคัญของเทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่แก่เยาวชนรุ่นหลัง และประชาชนทั่วไป
4) ระดมทุนวิจัยอยางต่อเนื่องทั้งจากภาครัฐและภาคเอกชน
5) สร้าง international collaboration ที่เข้มแข็งและเอื้อต่อการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยให้มีศักยภาพในการแข่งขัน
6) เร่งผลิตผลงานวิจัยในระดับนานาชาติ ให้มีความเชี่ยวชาญสูงในบางมิติหรือหัวข้อวิจัยของเทคโนโลยีควอนตัม

สิ่งที่ต้องทำให้สำเร็จในช่วงริเริ่มระยะ 3 ปีแรก (Initiative Phase: 3 years)

1) โครงการวิจัยที่บ่งบอกถึงศักยภาพของทีมนักวิจัย และเป็นโครงการที่มีผลกระทบสูงต่อการพัฒนาวิทยาศาสตร์ และเศรษฐกิจของประเทศ (ประมาณ 10 โครงการ) ที่มีนักวิจัยทำงานร่วมกันเป็นทีมอย่างชัดเจน และสามารถประเมินผลและติดตามความคืบหน้าได้
2) การสร้างกลไกเพื่อผลักดันงานวิจัยเฉพาะทางหลังจาก initiative phase ที่มุ่งเป้าเพื่อการพัฒนาทางวิทยาศาสตร์ หรืออุตสาหกรรมของประเทศ
3) การวางแผนระยะยาวสำหรับสิ่งที่ประเทศต้องการเพื่อรองรับการพัฒนาของเทคโนโลยีควอนตัมถึงแม้ว่าจะไม่ใช่งานวิจัยมุ่งเป้า แต่เป็นปัจจัยพื้นฐานที่ประเทศต้องมี
4) นักวิจัยในเครือข่ายเป็นอย่างน้อย 100 คน
5) บัณฑิตระดับปริญญาโท หรือเอก ที่เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีควอนตัมจำนวน 30 คน
6) เครือข่ายทีมวิจัย นโยบาย และกลยุทธ์ในการขับเคลื่อนงานวิจัยด้านเทคโนโลยีควอนตัม

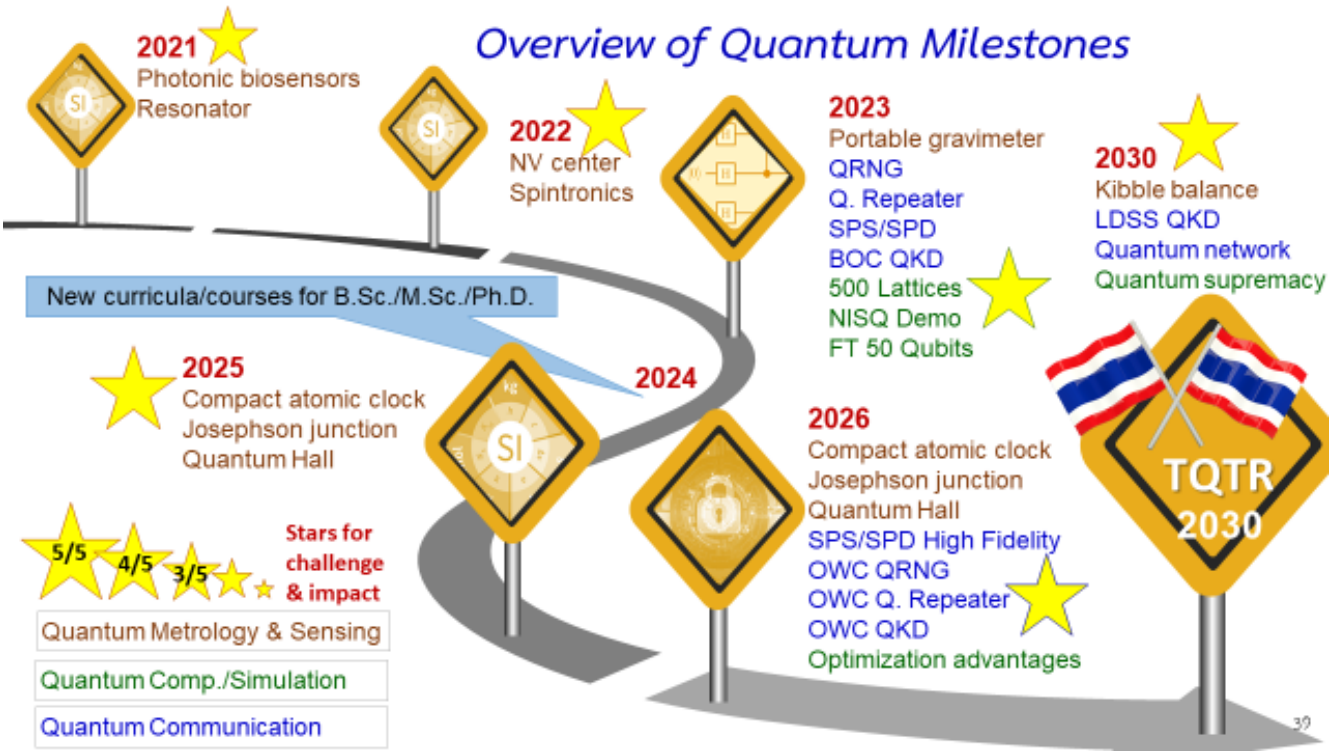
2.3 วัตถุประสงค์และผลลัพธ์ที่สำคัญ (Objectives and Key Results)

ตามแผน 4 ขั้น (รูปที่ 3) ในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย ซึ่งก็คือ (1) การเตรียมความพร้อม (2) การสาธิตการใช้ประโยชน์จริง (3) การพัฒนาองค์ความรู้ (4) การสร้างนวัตกรรมบางอย่างเพื่ออุตสาหกรรมของประเทศ เราสามารถเขียนวิเคราะห์เป็นวัตถุประสงค์ (objective) และผลดำเนินการที่สำคัญ (key results) ในระยะเวลา 10 ปี ได้ดังนี้

เป้าประสงค์ (objectives)	**ผลดำเนินการที่สำคัญ (key results)**
1. เตรียมพร้อมและพัฒนาขีดความสามารถของประเทศด้านเทคโนโลยีควอนตัมเพื่อรองรับเทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ที่กำลังเข้ามา	1.1 สร้างกิจกรรมการเรียนรู้อย่างเป็นระบบให้กับเยาวชนรุ่นหลัง และประชาชนทั่วไป 1.2 ฝึกผู้ใช้ให้มีความรู้ และทักษะที่จำเป็นสำหรับเทคโนโลยีควอนตัม 1.3 สร้างบุคลากรเพื่อรองรับเทคโนโลยีควอนตัมผ่านหลักสูตร และการอบรม 1.4 เป็นพันธมิตรในโครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมที่สำคัญของโลก
2. ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในการพัฒนาและแก้ปัญหาเฉพาะบริบทของประเทศไทย เช่น การเพิ่มผลิตผลการเกษตร การแก้ปัญหาทางโลจิสติกส์ การแก้ปัญหาการจัดการน้ำ การลดระยะเวลาในการคิดค้นและผลิตยาสำหรับโรคในเขตร้อน รวมไปถึงวัสดุชนิดใหม่	2.1 สาธิตการนำการนำเทคโนโลยีไปใช้ในการแก้ปัญหาเฉพาะบริบทของประเทศไทย 2.2 ได้กระบวนการที่แก้ไขปัญหาบางปัญหาของประเทศ
3. เพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันของประเทศด้วยการสร้างองค์ความรู้ ทรัพย์สินทางปัญญา และนวัตกรรม และเทคโนโลยีของประเทศเฉพาะทางที่สามารถพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมใหม่ในประเทศได้ เพื่อความสามารถในการแข่งขันเชิงธุรกิจและการลงทุน และลดการขาดดุลการค้า	3.1 โครงการวิจัยร่วมกับสถาบันวิจัยที่เชี่ยวชาญระดับโลกผ่านเครือข่ายความร่วมมือในระดับนานาชาติอย่างน้อย 3 โครงการ 3.2 บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการที่มีค่า impact factor ไม่น้อยกว่า 50 ฉบับ 3.3 ผลงานวิจัยที่นำไปต่อยอดเพื่อใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์และพัฒนาด้านมาตรฐาน ไม่น้อยกว่า 5 ผลงาน 3.4 เป็นผู้นำด้านเทคโนโลยีควอนตัมในกลุ่มประเทศอาเซียน และอยู่ใน Top 5 ของเอเชีย

เป้าประสงค์ (objectives)	ผลดำเนินการที่สำคัญ (key results)
4. สร้างโครงสร้างพื้นฐานสำหรับเตรียมความพร้อมของประเทศไทยเพื่อรองรับการเข้าสู่การพัฒนาเศรษฐกิจ และสังคมในยุคเทคโนโลยีควอนตัม โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านความมั่นคงของข้อมูลและระบบสื่อสาร	4.1 การงานวิจัยและทีมวิจัยที่มีความเป็นเลิศทางวิชาการ สามารถเป็นแหล่งกำเนิดและผู้พัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมได้ 4.2 โครงสร้างพื้นฐานสำหรับเทคโนโลยีควอนตัม

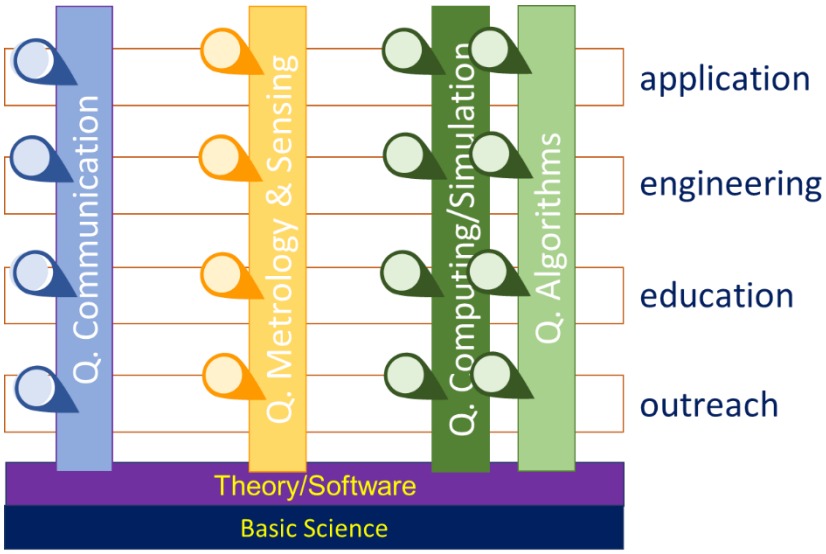
สำหรับผลลัพธ์ที่สำคัญในระหว่างทางเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์และได้ผลดำเนินการตามที่วางไว้ สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังนี้



รูปที่ 4 แผนภาพสรุปภาพรวมของ milestones ตลอด 10 ปี ของเทคโนโลยีควอนตัมที่จะพัฒนาในประเทศไทย แผนภาพไม่ได้แสดงจำนวนผลงานตีพิมพ์ (เฉลี่ยปีละ 5 ฉบับ) และจำนวนนักศึกษาที่ผลิต (เฉลี่ยปีละ 57 คน ระดับบัณฑิตศึกษา)

3. เสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัม (*Pillars of Quantum Technology*)

ประเทศไทยตามหลังนานาชาติอย่างมากด้านเทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ (QT2.0) ทั้งในด้านกำลังคน ทุนวิจัย และองค์ความรู้ ในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยนั้นจำเป็นต้องเตรียมความพร้อมให้ประเทศมีองค์ประกอบพื้นฐานที่จำเป็นในทั้ง 4 สาขาของเทคโนโลยีควอนตัม ได้แก่ การคำนวณเชิงควอนตัม การจำลองเชิงควอนตัม การสื่อสารเชิงควอนตัม และ มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม นอกจากนี้ประเทศไทยยังจำเป็นต้องสร้างความเชี่ยวชาญในหัวข้อวิจัยที่สามารถแข่งขันในระดับนานาชาติได้ เพื่อการพัฒนาต่อยอดสู่อุตสาหกรรมและการขับเคลื่อนเศรษฐกิจในอนาคต ในแต่ละสาขาของเทคโนโลยีควอนตัมจำเป็นต้องมีการวางแผนทั้งในด้านกำลังคน การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม ซึ่งอาจจะใช้ระยะเวลาที่แตกต่างกัน โดยต้องกำหนดเป้าหมายและสร้างแผนที่นำทางให้ชัดเจน



รูปที่ 5 เสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย ควอนตัมอัลกอริทึมเป็นส่วนหนึ่งของการคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม สามารถมี roadmap และ milestones ของมันเองเนื่องจากกรอบเวลาในการพัฒนาอาจจะแตกต่างจากเสาหลักอื่น ๆ การศึกษาเชิงทฤษฎีและซอฟท์แวร์ (theory/software) เป็นองค์ความรู้พื้นฐานขั้นสูงที่ใช้ในการดำเนินการ หรือควบคุมระบบควอนตัมสำหรับเทคโนโลยีควอนตัม

การพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยนั้น จะรวมสาขาการคำนวณเชิงควอนตัมและการจำลองเชิงควอนตัมไว้ด้วยกันเป็นเสาหลักเดียวกัน เพราะมีลักษณะการวิจัยที่ใกล้เคียงกัน ถึงแม้ว่าจะมีเป้าประสงค์ที่แตกต่างกัน แต่อาจจะแยกออกเป็นส่วนการพัฒนาฮาร์ดแวร์ (hardware) และการพัฒนาซอฟท์แวร์ (software) หรืออัลกอริทึม (algorithm) เพราะมีกรอบเวลาและความพร้อมที่แตกต่างกัน

ในแต่ละสาขาของเทคโนโลยีควอนตัมจำเป็นต้องวางแผนการพัฒนางานวิจัยควบคู่ไปกับการวางรากฐานด้านการศึกษา การสร้างกำลังคน และความรู้สาธารณะ และการนำไปใช้ประโยชน์ ดังรูปที่ 5

เนื้อหาในส่วนนี้ได้สรุปภาพรวม และความสำคัญของการวิจัยใน 4 สาขา กล่าวคือ เสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยทั้ง 3 สาขา และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมอีก 1 สาขา ในเนื้อหาส่วนถัดไป จะได้กล่าวถึงการวาง

รากด้านการศึกษา การเผยแพร่ความรู้สู่สาธารณชน และการเตรียมความพร้อมด้านวิศวกรรมศาสตร์ (รายละเอียดเชิงลึก (technical roadmap) และตัวอย่างหัวข้อวิจัย รวมทั้งการประมาณงบประมาณแยกย่อย ได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก)

สรุปเนื้อหา และความสำคัญของแต่ละเสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัม

3.1 การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม (Quantum Computing and Simulation)

ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา จีน สหราชอาณาจักร สิงคโปร์ และสหภาพยุโรป การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมถูกแยกออกเป็น 2 สาขาของเทคโนโลยีควอนตัมที่มีแผนที่นำทางแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะใช้ระบบทางฟิสิกส์เดียวกันได้ แต่การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมก็มีกลไก และเป้าหมายที่แตกต่างกัน กล่าวคือการคำนวณเชิงควอนตัมเป็นการเน้นการสร้างอัลกอริทึมเพื่อการคำนวณที่เร็วด้วย และฮาร์ดแวร์ (hardware) เพื่อสร้างควอนตัมคอมพิวเตอร์โดยใช้หลักการทางควอนตัม เช่น การทับซ้อน (superposition) และการพัวพัน (entanglement) แต่การจำลองเชิงควอนตัมเป็นการระบบทางควอนตัมระบบหนึ่งเพื่อศึกษาระบบทางควอนตัมอีกระบบหนึ่ง ซึ่งทำให้เข้าใจระบบที่สนใจได้แม่นยำ รวดเร็ว และถูกต้องมากขึ้น ระบบที่นำมาจำลองอาจจะทำหน้าที่เฉพาะอย่าง จึงไม่สามารถเขียนโปรแกรมอะไรก็ได้เหมือนกับในเครื่องคอมพิวเตอร์ แต่ก็จะมีประโยชน์มากพราะสามารถใช้ศึกษาระบบที่ซับซ้อนที่เครื่องคอมพิวเตอร์ปรกติอาจจะไม่สามารถทำวงานได้ หรือมีประสิทธิภาพต่ำ ความสำเร็จในการสร้างเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์จะเป็นก้าวสำคัญของเทคโนโลยีควอนตัม ซึ่งในปัจจุปันนี้มีการแข่งขันกันสูงในหลายบริษัทชั้นนำ เช่น Google, Intel, IBM, Microsoft เมื่อมีควอนตัมคอมพิวเตอร์ก็จำเป็นจะต้องมีการสื่อสารเชิงควอนตัม และมาตรวิทยาเชิงควอนตัม แต่งานวิจัยในปัจจุบันนี้คาดว่าเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์น่าจะใช้เวลาอีกอย่างน้อย 5 ปี

ประเทศไทยตามหลังนานาชาติในการทำวิจัยด้านการคำนวณเชิงควอนตัมอย่างมาก แต่ประเทศไทยควรส่งเสริมงานวิจัยทางด้านนี้ เช่นสร้างเครื่องคอมพิวเตอร์ควอนตัมขนาดเล็ก อาจจะในรูปแบบของการทำการจำลองเชิงควอนตัมที่แก้ปัญหาเฉพาะในบริบทของประเทศไทย หรือการพัฒนาซอฟต์แวร์ และอัลกอริทึมทางด้านควอนตัมเพื่อใช้งานเองในประเทศไทย ประเทศไทยควรเตรียมความพร้อม อาจจะในแบบการร่วมมือวิจัยกับต่างประเทศเพื่อให้ประเทศไทยมีผู้เชี่ยวชาญที่สามารถประเมินเทคโนโลยีทางด้านนี้ได้

3.2 การสื่อสารเชิงควอนตัม (Quantum Communication)

การสื่อสารเชิงควอนตัมคือการใช้หลักการทางควอนตัมในการสื่อสาร ประมวลข้อมูล และปกป้องความลับของข้อมูล ทำให้การสื่อสารมีความมั่นคงปลอดภัยสูง การสื่อสารดังกล่าวรวมถึงการทำธุรกรรมออนไลน์ที่อาศัยการเข้ารหัส และการทำธุรกรรมการเงินการธนาคาร หลักการสำคัญทางควอนตัมที่ทำให้การสื่อสารมีความปลอดภัยสูงคือการไม่สามารถทำซ้ำหรือคัดลอกสภาวะทางควอนตัมได้ (no cloning theorem) ทำให้ปลอดภัยจากการโจรกรรมข้อมูล อีกทั้งสภาวะพัวพันเชิงควอนตัม (quantum entanglement) จะช่วยให้การส่งข้อมูล (teleportation) มีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบทางควอนตัมที่สำคัญต่อการสื่อสารเชิงควอนตัมคืออนุภาคแสง (photons) งานวิจัยหลักที่สำคัญสำหรับการสื่อสารเชิง

ควอนตัมคือ การสร้างจำนวนสุ่มเชิงควอนตัม การผลิตโฟตอนเดี่ยว วิธีการส่งรหัสแบบควอนตัม (quantum key distribution protocol) การสร้างโครงข่ายควอนตัม (quantum network) ที่จำเป็นต้องอาศัยตัวต่อสัญญาณ (quantum repeaters) รวมทั้งการสื่อสารผ่านดาวเทียม การสื่อสารเชิงควอนตัมยังเชื่อมโยงกับการคำนวณเชิงควอนตัม และมาตรวิทยาเชิงควอนตัมเพราะจำเป็นใช้แสงเป็นตัวเชื่อม (interface) ระหว่างเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ หรือระหว่างอุปกรณ์วัด (sensing device)

สำหรับประเทศไทยงานวิจัยทางด้านนี้มีน้อยมาก และขาดผู้เชี่ยวชาญ ในอนาคตคาดการณ์ว่าแต่ละประเทศจำเป็นต้องมีหน่วยงานสำหรับรับรองมาตรฐานอุปกรณ์การสื่อสารเชิงควอนตัม (certifying agent) จึงจำเป็นต้องส่งเสริมงานวิจัยทางด้านนี้เพื่อความมั่นคงของประเทศ

3.3 มาตรวิทยาและการตรวจวัดเชิงควอนตัม (Quantum Metrology and Sensing)

มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัมคือการนำหลักการและสมบัติเชิงควอนตัมมาใช้ในการวัด เช่นการวัดเวลา การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก การวัดวิเคราะห์เชิงการแพทย์ (medical diagnostics) การวัดเชิงควอนตัมนี้โดยทฤษฎีแล้วจะให้ความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่นเทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบ 5G และ 6G หรือการใช้งานโครงข่ายพิกัดความละเอียดสูงด้วยดาวเทียม (Global Navigation Satellite Systems: GNSS) ซึ่งต้องอาศัยความแม่นยำของนาฬิกาในการประมวลผล และสื่อสาร มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัมเกิดขึ้นได้โดยใช้ระบบทางควอนตัมที่หลากหลาย เช่น การใช้สปินของอิเล็กตรอน การใช้อะตอมหรือไอออนที่ถูกกัก (trapped atoms / ions) การใช้ความไม่สมบูรณ์ในผลึกเพชร (NV center in diamond) การจัดเรียงโครงสร้างของควอนตัมดอท (quantum dot structures) และคาดว่าจะเป็นเทคโนโลยีควอนตัมที่ถูกนำไปใช้จริงก่อนเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ และการสื่อสารเชิงควอนตัม

ประเทศไทยมีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มที่ทำวิจัยทางด้านนี้ และมีนักวิจัยอยู่แล้วจำนวนหนึ่ง แต่ยังขาดการขับเคลื่อนอย่างเป็นระบบ หากได้รับการส่งเสริมอย่างจริงจัง คาดว่างานวิจัยเทคโนโลยีควอนตัมสาขานี้จะสามาถพัฒนาเป็นนวัตกรรมและชิ้นงานที่ส่งผลต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้

3.4 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมเพื่อการพัฒนาประเทศ (Application Quantum Technology for Prosperity of Thailand)

เทคโนโลยีควอนตัมจะมีผลกระทบอย่างมากต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม และการใช้ชีวิตประจำวัน การทำให้เทคโนโลยีควอนตัมเป็นประโยชน์ในเชิงประจักษ์ต่อสาธารณชน มิใช่เพียงแต่การสร้างองค์ความรู้ในงานวิจัย จึงเป็นเป้าหมายสำคัญอย่างหนึ่งของเครือข่ายวิจัยเทคโนโลยีควอนตัม ความชัดเจนของการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมจะถูกระบุในแต่ละสาขาหลักของงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยสรุปแล้วการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมที่มีผลกระทบสูงต่อการพัฒนาประเทศไทย และการเคลื่อนประเทศไทยให้มีความสามารถในการดึงดูดนักวิจัยและนักลงทุน อาทิ

- การพัฒนาเชิงวัสดุ เช่น วัสดุเก็บพลังงานที่มีประสิทธิภาพสูง วัสดุแม่เหล็กความเข้มสูงสำหรับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าหรือรถไฟฟ้าแม่เหล็ก ซึ่งจะเชื่อมโยงกับมาตรวิทยาและการวัดเชิงเชิงควอนตัม การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมทั้งในส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ และซอฟท์แวร์
- การพัฒนาเครื่องมือวัด และกระบวนทางเพิ่มผลผลิตทางการเกษตรโดยอาศัยองค์ความรู้ทางด้านควอนตัม เช่น การพัฒนาองค์ความรู้ หรือเครื่องมือเกี่ยวแสงที่ช่วยการเกษตรอาหาร (photonic for agriculture food) การใช้หลักการ องค์ความรู้ หรือเครื่องมือทางควอนตัมเพื่อเพิ่มความแม่นยำในทางการเกษตร (quantum-based for precision agriculture) การใช้เทคโนโลยีควอนตัมในการดูแลสุขภาพสัตว์ (quantum tech for animal health) หรือการปรับกระบวนการผลิตปุ๋ยที่ประหยัดพลังงาน การประยุกต์เหล่านี้จะเชื่อมโยงกับมาตรวิทยาและการวัดเชิงเชิงควอนตัม และการคำนวณเชิงควอนตัม
- การพัฒนาการตรวจวัดทางการแพทย์ เช่น การใช้หน่วยวัดเชิงควอนตัม (quantum sensing) ในการตรวจจับโรคมะเร็ง ซึ่งจะเชื่อมโยงกับมาตรวิทยาและการวัดเชิงเชิงควอนตัม การคำนวณลำดับดีเอ็นเอ (DNA sequencing) ซึ่งจะเชื่อมโยงกับการคำนวณเชิงควอนตัม
- การสื่อสารที่ปลอดภัยและปกป้องข้อมูลส่วนตัวสูง (privacy amplification) รวมทั้งการสร้างนาฬิกาที่แม่นยำเหมาะสำหรับระบบโครงข่ายพิกัดความละเอียดสูงด้วยดาวเทียม (GNSS) เช่น GPS และการส่งรหัสลับผ่านดาวเทียม รวมทั้งการทำธุรกรรมผ่านอินเตอร์เน็ตที่ต้องการความเร็ว ความแม่นยำ และความปลอดภัยสูง ซึ่งจะเชื่อมโยงกับมาตรวิทยาและการวัดเชิงเชิงควอนตัม และการสื่อสารเชิงควอนตัม
- การพัฒนาควอนตัมอัลกอริทึมสำหรับธุรกิจการเงินการธนาคาร เช่น การวิเคราะห์ความเสี่ยงในตลาดหุ้นและการลงทุน การจัดอันดับผู้กู้และโอกาสหนี้เสีย ซึ่งจะอาศัยการคำนวณเชิงควอนตัม
- การแก้ปัญหาโลจิสติกส์ที่สำคัญสำหรับประเทศไทย ไม่ว่าจะเป็นการจราจร หรือการจัดการน้ำ ซึ่งจะอาศัยการคำนวณเชิงควอนตัม และมาตรวิทยาเชิงควอนตัมในการวัดพิกัดที่ภูมิศาสตร์อย่างละเอียด
- การเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจหาทรัพยากรธรรมชาติ และแหล่งน้ำใต้ดิน หรือการเตือนภัยจากการเปลี่ยนแปลงใต้พิภพ เช่น การเตือนภัยแผ่นดินไหว ซึ่งจะเชื่อมโยงกับการคำนวณ และมาตรวิทยาเชิงควอนตัม
- การพัฒนาสูตรทางเคมีสำหรับผลิตยาที่ตอบสนองกับโรคสำคัญ โดยเฉพาะโรคในเขตร้อนที่สำคัญสำหรับประเทศไทย ซึ่งจะเชื่อมโยงกับการคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมทั้งในส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์ และซอฟท์แวร์ การค้นหาโครงสร้าง

การวิจัยเพื่อพัฒนาองค์ความรู้ใหม่ และการวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมจึงเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาประเทศไทย เพราะมันมีบทบาทในหลายมิติของการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม และการเพิ่มคุณภาพชีวิตของประชาชน และความมั่นคงของชาติ

4. การวางรากฐาน *(Building Foundation)*

การพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยมิอาจจะสำเร็จได้ถ้าขาดปัจจัยเกื้อหนุนที่เหมาะสม และมีประสิทธิภาพ ปัจจัยเกื้อหนุนที่สำคัญรวมถึงการศึกษา (education) การได้รับการสนับสนุนจากทุกภาคส่วนทั้งประชาชน และผู้ออกนโยบาย (outreach) การวิจัยพื้นฐาน (basic research) และงานวิศวกรรมศาสตร์ (engineering) ความสัมพันธ์ระหว่างเสาหลักของการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม และปัจจัยเกื้อหนุนและการประยุกต์ใช้สามารถแสดงให้เห็นชัดเจนในรูปที่ 5

สำหรับการวิจัยเทคโนโลยีควอนตัม รวมถึงงานวิจัยเพื่อประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม นักวิจัยในเครือข่ายจะเป็นผู้ขับเคลื่อนโดยตรง และเชื่อมโยงกับแผนงานในแต่ละเสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัมที่ต้องออกแบบแผนที่นำทางอย่างรัดกุม ซึ่งทั้งหมดเป็นการวางแผนเชิงเทคนิค จึงจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ในหัวข้อนี้ ปัจจัยเกื้อหนุนถูกแยกออกมาวางแผนอย่างเป็นระบบเพื่อวางรากฐานการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยอย่างมั่นคง ยั่งยืน ปัจจัยดังกล่าวประกอบด้วย การศึกษาและการสร้างกำลังคน การเผยแพร่สู่สาธารณะและการสร้างความดึงดูดการให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย และงานวิศวกรรมศาสตร์ที่ช่วยขับเคลื่อนงาวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม

4.1 การศึกษาสาขาควอนตัม (Education for Quantum Technology)

เทคโนโลยีควอนตัมเป็นเทคโนโลยีขั้นสูงที่เกิดจากองค์ความรู้เชิงลึกในหลายศาสตร์สาขา โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาการคอมพิวเตอร์ ความซับซ้อนของการคำนวณ หรือการสร้างเครื่องมือที่ละเอียดอ่อนจำเป็นต้องมีบุคคลากรที่เชี่ยวชาญ และมีทักษะสูง ซึ่งอาจจะเป็นทักษะเฉพาะด้าน หรือทักษะในหลายมิติ การจัดการศึกษาที่เป็นระบบจะช่วยให้บุคคลากร โดยเฉพาะเยาวชนในประเทศเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการแข่งขันของประเทศโดยตรง

โครงสร้างการศึกษาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีควอนตัมควรจะสอดคล้องกับงานวิจัย 3 สาขาหลักของแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย การศึกษาจึงจำเป็นต้องดำเนินงานให้สอดคล้องกัน เพื่อย่อยงานวิจัยให้เล็กลง อยู่ในรูปสื่อการสอนที่ทำความเข้าใจได้ง่าย สะดวกต่อการถ่ายทอด ซึ่งจะส่งผลให้ผู้เรียนสามารถพัฒนาเป็นต้นแบบในเชิงพาณิชย์ได้ และสามารถย้อนกลับมาเสริมศักยภาพในการทำวิจัยหลักได้

การศึกษาด้านเทคโนโลยีควอนตัมสำหรับประเทศไทยยังมีความสำคัญแบบทวีคูณเพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาว่าประเทศตามหลังนานาชาติในงานวิจัยทางด้านนี้ และจำเป็นต้องเตรียมความพร้อมเพื่อรองรับเทคโนโลยีนี้ ในขณะเดียวก็พยายามวางตำแหน่งให้ตัวเองมีความสามาถในการพัฒนาเทคโนโลยีของตัวเอง เพื่อขับเคลื่อนการพัฒนาอุตสาหกรรมในยุคควอนตัม และเพิ่มศักยภาพแข่งขันเชิงเศรษฐกิจกับนานาประเทศ แผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยจึงวางเป้าหมายและแผนที่นำทางสำหรับการศึกษาเทคโนโลยีควอนตัมไว้ดังนี้

- รายวิชาระดับปริญญาตรี โท และเอกที่ส่งเสริมทักษะเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีควอนตัม
- กิจกรรม หรือหัวข้อการเรียนสำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษา
- ออกแบบเนื้อหาการอบรมสัมมนาและเครดิตย่อย (micro credentials) สำหรับเทคโนโลยีควอนตัม

- การปรับเนื้อหาในหลักสูตรแกนกลางระดับมัธยมศึกษาให้เชื่อมโยงกับการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม
- การสร้างหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษาสำหรับนักวิจัย และผู้ใช้เทคโนโลยีควอนตัม

- สร้างเส้นทางอาชีพ (career path) สำหรับผู้เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีควอนตัม
- สร้างองค์กร และกิจกรรมสำหรับการพัฒนานักวิจัย และผู้ใช้อย่างต่อเนื่อง โดยจะเป็นการศึกษาในรูปแบบการศึกษาสหสาขา (multidisciplinary) หรือ การศึกษาข้ามสาขา (trans-disciplinary) ที่สอดคล้องกับการพัฒนานวัตกรรม และการขับเคลื่อนด้านอุตสาหกรรม

งบประมาณสำหรับการศึกษา

แผนงาน	**งบประมาณรายปี (ล้านบาท)**							
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7 - 10	**รวม**
งบกำลังคน	20.0	20.0	40.0	40.0	40.0	80.0	320.0	**560.0**
งบดำเนินการ	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	26.0	**54.5**

หมายเหตุ

1. งบประมาณ 6 ปีแรก มาจากผลรวมของงบประมาณที่คาดว่าจะใช้บนพื้นฐานของโครงการที่ระบุใน roadmap
2. งบประมาณในปีที่ 7 – 10 (ถ้าไม่ได้เสนอมา) จะคำนวณมาจากงบประมาณของปีที่ 4 – 6 (ค่าเฉลี่ยคูณด้วย 1.15-1.50)
3. เพื่อการเปรียบเทียบ ศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม สิงคโปร์ (Center for Quantum Technology: CQT) ใช้เงินประมาณ 15 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 450 ล้านบาทต่อปี ในเฉพาะส่วนกำลังคนด้านการศึกษา (Annual Report 2013, Center for Quantum Technologies, National University of Singapore, หน้า 56). ในปี พ.ศ. 2556 โปรแกรมเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาติ, สหราชอาณาจักร (UK National Quantum Technology Programme) ใช้งบประมาณ 50 ล้านยูโร ต่อห้าปี หรือประมาณ 500 ล้านบาทต่อปี สำหรับการ

ฝึกและพัฒนาทักษะด้านเทคโนโลยีควอนตัม และ ใช้งบ 16.5 ล้านยูโร ต่อห้าปี หรือประมาณ 165 ล้านบาทต่อปี สำหรับให้ทุนการศึกษาด้านเทคโนโลยีควอนตัม

กิจกรรมหลักในการพัฒนากำลังคน คือการผลิตนักศึกษาปริญญาเอก (หรือเทียบเท่านักศึกษาปริญญาโท 2 คน หรือปริญญาตรี 4 คน) ในแต่ละเสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัม โดยเฉลี่ยแล้วแต่ละเสาหลักจะผลิตนักศึกษาปริญญาเอก หรือเทียบเท่า 32 คน ต่อ 3 ปี

กิจกรรมหลักที่ต้องใช้งบดำเนินการคือ (1) การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (2) ประชุมวิชาการระดับชาติ และ (3) โครงสร้างสนับสนุนโครงข่ายการศึกษา เทคโนโลยีสารสนเทศ คลังข้อมูล และ การประมวลผล ซึ่งรวมทั้งงบบริหารจัดการ การประชุม การเดินทาง การจัดทำเอกสาร

4.2 การเผยแพร่สู่สาธารณะ (Public Outreach)

การพัฒนาเครือข่ายนักวิจัย นักศึกษา และประชาชนทั่วไป ที่เป็นทั้งผู้ใช้ และผู้ดำเนินการเทคโนโลยีควอนตัมเป็นสิ่งที่สำคัญยิ่ง การเผยแพร่ความรู้ด้านเทคโนโลยีควอนตัมเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาและส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย ประเทศไทยเป็นประเทศรายได้ปานกลาง และประชาชนทั่วไปมีความรู้ทางด้านเทคโนโลยีควอนตัมน้อย และมีความเข้าใจผิดสูง นอกจากศักยภาพการวิจัยที่เข้มแข็งแล้ว นักวิจัยจำเป็นต้องให้ความรู้กับประชาชนทั่วไป และชักจูงให้เกิดการมีส่วนร่วมในการใช้ และสนับสนุนเทคโนโลยีควอนตัมอย่างถูกต้อง ไม่ใช้ในทางที่ผิดหรืองมงาย นอกจากนี้นักวิจัยมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจปัญหาของภาคอุตสาหกรรมทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ เพื่อสามารถสร้าง และถ่ายทอดนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ความต้องการของประเทศในระยะสั้นและระยะกลางได้ รวมถึงสามารถสร้างความร่วมมือกับภาคเอกชน ทำให้เกิดการพัฒนาทั้งส่วนวิชาการและอุตสาหกรรมไปด้วยกันอย่างยั่งยืนได้

- สร้างความตระหนัก และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเทคโนโลยีควอนตัม
- สร้างแรงขับเคลื่อนจากสาธารณชนและฝ่ายการเมือง (public and political wills)
- สร้างระบบนิเวศการวิจัย (research ecosystem) สำหรับประชาคมนักวิจัย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง

- กิจกรรมส่งเสริมการลงทุนร่วมระหว่างภาครัฐ และเอกชนในการส่งเสริมและพัฒนางานวิจัย
- เงินร่วมทุนวิจัยจากภาคเอกชนจำนวน 25% ของงบประมาณสำหรับวิจัย

- ตัวเชื่อมโยงการนำผลงานวิจัยไปขยายผลในเชิงอุตสาหกรรม และการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศ
- เงินร่วมทุนวิจัยจากภาคเอกชนจำนวน 50% ของงบประมาณสำหรับวิจัย

งบประมาณสำหรับการเผยแพร่สู่สาธารณะ

แผนงาน	งบประมาณรายปี (ล้านบาท)							
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7 - 10	**รวม**
งบกำลังคน	2.0	2.0	3.0	3.0	5.0	5.0	20.0	**40.0**
งบดำเนินการ	12.0	12.0	14.0	14.0	15.0	16.0	70.0	**153.0**

หมายเหตุ

1. งบประมาณ 6 ปีแรก มาจากผลรวมของงบประมาณที่คาดว่าจะใช้บนพื้นฐานของโครงการที่ระบุใน roadmap
2. งบประมาณในปีที่ 7 – 10 (ถ้าไม่ได้เสนอมา) จะคำนวณมาจากงบประมาณของปีที่ 4 – 6 (ค่าเฉลี่ยคูณด้วย 1.15-1.50)

กิจกรรมหลักสำหรับการเผยแพร่เทคโนโลยีควอนตัมสู่สาธารณะ คือการสร้างความตระหนัก และให้ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเทคโนโลยีควอนตัม รวมทั้งสร้างแรงบันดาลและให้เห็นเส้นทางอาชีพสำหรับเยาวชนรุ่นหลังของประเทศไทย นอกจากนี้หน้าทีสำคัญของหน่วยเผยแพร่เทคโนโลยีควอนตัมสู่สาธารณะ คือ การสร้างสร้างแรงขับเคลื่อนจากสาธารณชนและฝ่ายการเมือง (public and political wills) สร้างระบบนิเวศการวิจัย (research ecosystem) สำหรับประชาคมนักวิจัย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง เพื่อส่งเสริมการลงทุนร่วมระหว่างภาครัฐ และเอกชนในการส่งเสริมและพัฒนางานวิจัย และเป็นตัวเชื่อมโยงการนำผลงานวิจัยไปขยายผลในเชิงอุตสาหกรรม และการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศ

4.3 งานวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering)

งานวิศกรรมศาสตร์นับว่ามีความสำคัญยิ่งในการพัฒนางานวิจัย และการนำงานวิจัยไปต่อยอดเป็นการผลิตชิ้นงานหรือสร้างกระบานการผลิตที่เหมาะสมในเชิงอุตสาหกรรม งานวิศวกรรมศาสตร์คือฟันเฟืองที่สำคัญในการผลิตงานวิจัยให้รวดเร็ว มีประสิทธิภาพ ก่อให้เกิดฐานเทคโนโลยีที่มั่นคง และสามารถนำไปสู่การพัฒนาเชิงอุตสาหกรรมได้อย่างยั่งยืน ดังนั้นเป้าประสงค์หลักสำหรับงานวิศวกรรมศาสตร์ คือการทำวิจัยร่วมเชิงกระบวนการ และการสร้างเครื่องมือ และกระบวนการที่พร้อมในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม

เนื่องจากจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมใน 3 สาขาหลักไปพร้อม ๆ กันในประเทศไทย ซึ่งสาขาเหล่านี้มีแผนที่นำทางเชิงเทคนิคเป็นของตัวเอง แต่สามารถใช้เครื่องมือร่วมกันได้ ทำให้การวางแผนงานด้านวิศกรรมศาสตร์สำหรับเทคโนโลยีควอนตัม รวมทั้งการวิจัยขั้นแนวหน้า (frontier research) สาขาอื่น ๆ ต้องรัดกุมและเหมาะสมกับเวลาและการใช้งานตามแผนที่นำทางของแต่ละสาขาวิจัย

เป้าหมายและกรอบเวลา

- สร้างเครื่องมือที่จำเป็นตามแผนที่นำทางของแต่ละสาขา
- สร้างระบบนิเวศการวิจัยสำหรับวิศวกรควอนตัม และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม

- ออกแบบ และสร้างเครื่องมือ เพื่อต่อยอดงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัมเป็นเทคโนโลยีที่สามารถใช้งานได้จริง หรือเป็นต้นแบบการผลิต (prototype)

- เชื่อมโยง และสร้างกระบวนการนำต้นแบบเทคโนโลยีควอนตัมที่เลือกแล้ว สู่การผลิตภาคอุตสาหกรรม

งบประมาณสำหรับงานวิศวกรรมศาสตร์

แผนงาน	งบประมาณรายปี (ล้านบาท)							
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7 - 10	**รวม**
กำลังคน	20.0	20.0	15.0	10.0	10.0	10.0	46.0	**131.0**
งบดำเนินการ	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	46.0	**106.0**

หมายเหตุ

1. งบประมาณ 6 ปีแรก มาจากผลรวมของงบประมาณที่คาดว่าจะใช้บนพื้นฐานของโครงการที่ระบุใน roadmap
2. งบประมาณในปีที่ 7 – 10 (ถ้าไม่ได้เสนอมา) จะคำนวณมาจากงบประมาณของปีที่ 4 – 6 (ค่าเฉลี่ยคูณด้วย 1.15-1.50)

3. ในส่วนงานวิศวกรรมศาสตร์ งบประมาณจะถูกตั้งผ่านหน่วยบริหารโครงการ (PMU) เพราะเป็นส่วนงานที่ทุกโครงการวิจัยได้ใช้ประโยชน์ และไม่ควรผลิตชิ้นงานหรือซื้อเครื่องมือซ้ำซ้อน งบประมาณในส่วนดังกล่าวจึงไม่ได้ถูกรวมไว้ที่นี้
4. งบประมาณในตารางข้างบนเป็นส่วนที่ทีมวิศวกรรมต้องใช้ ซึ่งได้ถูกประเมินออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นค่าวัตถุดิบ และส่วนค่าดำเนินการ

กิจกรรมหลักของงานวิศวกรรมศาสตร์ คือการสร้างเครื่องมือสนับสนุนการวิจัยทางด้านเทคโนโลยีควอนตัม รวมทั้งการนำผลการวิจัยมาสร้างต้นแบบก่อนนำเข้าสู่กระบวนการผลิตเชิงพานิชย์ ทั้งนี้ถ้าทีมวิศวกรจักทำโครงการวิจัยก็สามารถของบประมาณได้เช่นเดียวกันกับโครงการวิจัยอื่น ๆ

5. แผนที่นำทางและเป้าหมายสำคัญของเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย (Thailand Quantum Technology Roadmap & Milestones)

เนื้อหาในส่วนนี้เป็นการสรุปแผนที่นำทางและเป้าหมายสำคัญของการวิจัยเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยในช่วง 10 ปีข้างหน้า โดยจะสรุปเป็นเป้าหมายระยะสั้น (3 ปี) ระยะกลาง (6 ปี) และระยะยาว (10 ปี) ของการวิจัย การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมสำหรับประเทศไทย แต่ละหัวข้อวิจัยมีระยะเวลาการให้ผลผลิตที่แตกต่างกัน และใช้ทรัพยากรในการผลิตแตกต่างกัน เนื้อหาในส่วนนี้จึงเป็นเพียงภาพรวม และการประมาณงบประมาณรวมในแต่ละสาขาวิจัย รายละเอียดเฉพาะเกี่ยวกับหัวข้อวิจัย กรอบเวลา และผลลัพธ์ที่คาดหวังรวบรวมไว้ในภาคผนวก ก

1) การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม (Quantum Computing and Simulation)

ในหลายประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา จีน สหราชอาณาจักร สิงคโปร์ และสหภาพยุโรป การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมถูกแยกออกเป็น 2 สาขาของเทคโนโลยีควอนตัมที่มีแผนที่นำทางแตกต่างกัน ถึงแม้ว่าจะใช้ระบบทางฟิสิกส์เดียวกันได้ แต่การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมก็มีกลไกและเป้าหมายที่แตกต่างกัน กล่าวคือการคำนวณเชิงควอนตัมเน้นการสร้างอัลกอริทึมเพื่อการคำนวณที่เร็ว และฮาร์ดแวร์ (hardware) เพื่อสร้างควอนตัมคอมพิวเตอร์โดยใช้หลักการทางควอนตัม เช่น การทับซ้อน (superposition) และการพัวพัน (entanglement) แต่การจำลองเชิงควอนตัมเป็นการใช้ระบบทางควอนตัมระบบหนึ่ง (simulator) เพื่อศึกษาระบบทางควอนตัมอีกระบบหนึ่ง โดยระบบที่นำมาใช้จำลอง (simulator) จะมีความซับซ้อนน้อยลง แต่ยังสามารถจำลองพฤติกรรมหลักของระบบที่สนใจได้ การจำลองเชิงควอนตัมทำให้เข้าใจระบบที่สนใจได้แม่นยำ รวดเร็ว และถูกต้องมากขึ้น ระบบที่นำมาใช้จำลองอาจจะทำหน้าที่เฉพาะอย่าง จึงไม่สามารถเขียนโปรแกรมอะไรก็ได้เหมือนกับในเครื่องคอมพิวเตอร์ปรกติ แต่ก็จะมีประโยชน์มากพราะทำให้สามารถศึกษาระบบที่ซับซ้อนที่เครื่องคอมพิวเตอร์ปรกติอาจจะไม่สามารถทำได้หรือทำได้แต่มีประสิทธิภาพต่ำ

ความสำเร็จในการสร้างเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์จะเป็นก้าวสำคัญของเทคโนโลยีควอนตัม ซึ่งในปัจจุปันนี้มีการแข่งขันกันสูงในหลายบริษัทชั้นนำ เช่น กูเกิล (Google) อินเทล (Intel) ไอบีเอ็ม (IBM) ไมโครซอฟท์ (Microsoft) เมื่อมีควอนตัมคอมพิวเตอร์ก็จำเป็นจะต้องมีการสื่อสารเชิงควอนตัม และมาตรวิทยาเชิงควอนตัม แต่งานวิจัยในปัจจุบันนี้คาดว่าเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์น่าจะใช้เวลาอีกอย่างน้อย 5 ปี

ประเทศไทยตามหลังนานาชาติในการทำวิจัยด้านการคำนวณเชิงควอนตัมอย่างมาก แต่ประเทศไทยควรส่งเสริมงานวิจัยทางด้านนี้ เช่นสร้างเครื่องคอมพิวเตอร์ควอนตัมขนาดเล็ก อาจจะในรูปแบบของการทำการจำลองเชิงควอนตัมที่แก้ปัญหาเฉพาะในบริบทของประเทศไทย หรือการพัฒนาซอฟต์แวร์ และอัลกอริทึมทางด้านควอนตัมเพื่อใช้งานเองในประเทศไทย ประเทศไทยควรเตรียมความพร้อม อาจจะในแบบการร่วมมือวิจัยกับต่างประเทศเพื่อให้ประเทศไทยมีผู้เชี่ยวชาญที่สามารถประเมินเทคโนโลยีทางด้านนี้ได้

✓ **ระบบคำนวณ และจำลองเชิงควอนตัมพื้นฐาน**

- สาธิตประโยชน์ของการจำลองควอนตัม
- สาธิตประโยชน์ของการคำนวณควอนตัมด้วยระบบควอนตัมที่มีสัญญาณรบกวนขนาดกลาง (Noisy Intermediate Scale Quantum: NISQ)
- คิวบิทที่มีเวลาโคฮีเร็นท์ยาว จำนวน 50 คิวบิท
- สร้างกลุ่มต้นฉบับอัลกอริทึมควอนตัม

✓ **ระบบคำนวณ และจำลองเชิงควอนตัมที่สามารถโปรแกรมได้**

- ประยุกต์ใช้การจำลองควอนตัมเบื้องต้น เช่น ระบบการเข้ารหัสลับ การสอบบัญชีการเลือกตั้ง ลอตเตอรี่ การประกันส่วนแบ่งผลประโยชน์ในคริปโทเคอร์เรนซี (crypto-currency)
- คิวบิทตรรกะที่สามารถโปรแกรมได้
- กลุ่มต้นฉบับอัลกอริทึมควอนตัมที่ทำงานได้

✓ **ระบบคำนวณ และจำลองเชิงควอนตัมที่เหนือกว่าการคำนวณแบบเดิม**

- การจำลองเชิงควอนตัมเพื่อแก้ปัญหาทางเคมี วัสดุศาสตร์ และเภสัชศาสตร์
- ควอนตัมอัลกอริทึมใช้บนเครื่องคอมพิวเตอร์ควอนตัมแสดงศักยภาพที่เหนือกว่าการคำนวณแบบเดิม

งบประมาณสำหรับการคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม (Quantum Computer)

แผนงาน	งบประมาณรายปี (ล้านบาท)							
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7 - 10	**รวม**
งบกำลังคน	240.0	240.0	240.0	320.0	320.0	320.0	1,472.0	**3,152.0**
งบดำเนินการ	140.0	140.0	200.0	320.0	340.0	380.0	1,600.0	**3,120.0**

หมายเหตุ

1. งบประมาณ 6 ปีแรก มาจากผลรวมของงบประมาณที่คาดว่าจะใช้บนพื้นฐานของโครงการที่ระบุใน roadmap
2. งบประมาณในปีที่ 7 – 10 (ถ้าไม่ได้เสนอมา) จะคำนวณมาจากงบประมาณของปีที่ 4 – 6 (ค่าเฉลี่ยคูณด้วย 1.15-1.50)

2) การสื่อสารเชิงควอนตัม (Quantum Communication)

การสื่อสารเชิงควอนตัมคือการใช้หลักการทางควอนตัมในการสื่อสาร ประมวลข้อมูล และปกป้องความลับของข้อมูล ทำให้การสื่อสารมีความมั่นคงปลอดภัยสูง การสื่อสารดังกล่าวรวมถึงการทำธุรกรรมออนไลน์ที่อาศัยการเข้ารหัส และการทำธุรกรรมการเงินการธนาคาร หลักการสำคัญทางควอนตัมที่ทำให้การสื่อสารมีความปลอดภัยสูงคือการไม่สามารถทำซ้ำหรือคัดลอกสภาวะทางควอนตัมได้ (no cloning theorem) ทำให้ปลอดภัยจากการโจรกรรมข้อมูล อีกทั้งสภาวะพัวพันเชิงควอนตัม (quantum entanglement) จะช่วยให้การส่งข้อมูล (teleportation) มีประสิทธิภาพมากขึ้น ระบบทางควอนตัมที่สำคัญต่อการสื่อสารเชิงควอนตัมคืออนุภาคแสง (photons) งานวิจัยหลักที่สำคัญสำหรับการสื่อสารเชิงควอนตัมคือ การสร้างจำนวนสุ่มเชิงควอนตัม การผลิตโฟตอนเดี่ยว วิธีการส่งรหัสแบบควอนตัม (quantum key distribution protocol) การสร้างโครงข่ายควอนตัม (quantum network) ที่จำเป็นต้องอาศัยตัวต่อสัญญาณ (quantum repeaters) รวมทั้งการสื่อสารผ่านดาวเทียม การสื่อสารเชิงควอนตัมยังเชื่อมโยงกับการคำนวณเชิงควอนตัมและมาตรวิทยาเชิงควอนตัมเพราะจำเป็นใช้แสงเป็นตัวเชื่อม (interface) ระหว่างเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ หรือระหว่างอุปกรณ์วัด (sensing device)

สำหรับประเทศไทยงานวิจัยทางด้านนี้มีน้อยมาก และขาดผู้เชี่ยวชาญ ในอนาคตคาดการณ์ว่าแต่ละประเทศจำเป็นต้องมีหน่วยงานสำหรับรับรองมาตรฐานอุปกรณ์การสื่อสารเชิงควอนตัม)certifying agentจึงจำเป็นต้องส่งเสริม (งานวิจัยทางด้านนี้เพื่อความมั่นคงของประเทศ

✓ **รากฐานสำหรับการสื่อสารเชิงควอนตัม**

- แหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยว (single photon source: SPS) และเครื่องวัดโฟตอนเดี่ยว (single photon detector: SPD)
- วงจรแสงบนโต๊ะ (bulk optics) เพื่อสาธิตการใช้ประโยชน์อย่างง่าย เช่น เครื่องกำเนิดจำนวนสุ่มเชิงควอนตัม (quantum random number generator: QRNG)
- เครื่องขยายสัญญาเชิงควอนตัม (quantum repeater)

✓ **การสื่อสารเชิงควอนตัมที่มีประสิทธิภาพสูง**

- แหล่งกำเนิดโฟตอนเดี่ยวและเครื่องวัดโฟตอนเดี่ยวที่มีประสิทธิภาพสูง
- ถ่ายโอนการทดลองจากวงจรแสงบนโต๊ะ (bulk optics) สู่การทดลองวงจรแสงในท่อนำแสง (optical waveguide circuit)
- ภาครับและภาคส่งการส่งรหัสเชิงควอนตัม (quantum key distribution: QKD) ระยะทางไกล รวมถึงสถานีภาคพื้นสำหรับดาวเทียมเพื่อส่งรหัสเชิงควอนตัม
- หน่วยการเชื่อมอุปกรณ์ควอนตัม (quantum device interface)

✓ **ควอนตัมอินเตอร์เน็ต**

- ระบบโครงข่ายควอนตัม (quantum network)
- ระบบมาตรฐานและองค์กรรับรองส่งรหัสเชิงควอนตัม (QKD standards and certification)
- อุปกรณ์เชื่อมต่อหน่วยควอนตัม (quantum device interface)

งบประมาณสำหรับการสื่อสารเชิงควอนตัม (Quantum Internet)

แผนงาน	**งบประมาณรายปี (ล้านบาท)**							
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7 - 10	**รวม**
งบกำลังคน	40.0	10.0	10.0	50.0	10.0	10.0	400..0	**530.0**
งบดำเนินการ	90.0	30.0	20.0	170.0	50.0	40.0	100.0	**500.0**

หมายเหตุ

1. งบประมาณ 6 ปีแรก มาจากผลรวมของงบประมาณที่คาดว่าจะใช้บนพื้นฐานของโครงการที่ระบุใน roadmap
2. งบประมาณในปีที่ 7 – 10 (ถ้าไม่ได้เสนอมา) จะคำนวณมาจากงบประมาณของปีที่ 4 – 6 (ค่าเฉลี่ยคูณด้วย 1.15-1.50)

3) มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม (Quantum Metrology and Sensing)

มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัมคือการนำหลักการและสมบัติเชิงควอนตัมมาใช้ในการวัด เช่นการวัดเวลา การวัดความเข้มของสนามแม่เหล็ก การวัดวิเคราะห์เชิงการแพทย์ (medical diagnostics) การวัดเชิงควอนตัมนี้โดยทฤษฎีแล้วจะให้ความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้เป็นประโยชน์ต่อเทคโนโลยีต่าง ๆ เช่นเทคโนโลยีการสื่อสารรูปแบบ 5G และ 6G หรือการใช้งานโครงข่ายพิกัดความละเอียดสูงด้วยดาวเทียม (GNSS) ซึ่งต้องอาศัยความแม่นยำของนาฬิกาในการประมวลผล และสื่อสาร มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัมเกิดขึ้นได้โดยใช้ระบบทางควอนตัมที่หลากหลาย อาทิ การใช้สปินของอิเล็กตรอน การใช้อะตอมหรือไอออนที่ถูกกัก (trapped atoms/ions) การใช้ความไม่สมบูรณ์ในผลึกเพชร (NV center in diamond) การจัดเรียงโครงสร้างของควอนตัมดอท (quantum dot structure) และคาดว่าจะเป็นเทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ที่จะถูกนำไปใช้จริงก่อนเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ และการสื่อสารเชิงควอนตัม

ประเทศไทยมีกลุ่มวิจัยหลายกลุ่มที่ทำวิจัยทางด้านนี้ และมีนักวิจัยอยู่แล้วจำนวนหนึ่ง แต่ยังขาดการขับเคลื่อนอย่างเป็นระบบ หากได้รับการส่งเสริมอย่างจริงจัง คาดว่างานวิจัยเทคโนโลยีควอนตัมสาขานี้จะสามาถพัฒนาเป็นนวัตกรรมและชิ้นงานที่ส่งผลต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมในประเทศไทยได้

✓ **มาตรวิทยาเชิงควอนตัมมาตรฐานสากล**

- สร้างอุปกรณ์และผลงานวิจัยที่แสดงถึงความสามารถในการวัดเชิงควอนตัมที่เหนือกว่าการวัดแบบเดิม
- ประยุกต์ใช้งานความรู้ที่ได้จากการวัดเชิงควอนตัม
- สร้างความยอมรับเชิงวิชาการด้านการวัดเชิงควอนตัมในเวทีโลก

✓ **ต้นแบบการผลิตเซ็นเซอร์ควอนตัม**

- สร้างต้นแบบอุปกรณ์ควอนตัมต้นแบบเพื่อกำหนดค่ามาตรฐานทางมาตรวิทยา และต้นแบบเซ็นเซอร์สำหรับพาณิชย์
- การบ่มเพาะเชิงธุรกิจ รวมถึงแนวทางในการสร้างห่วงโซ่อุปทาน

✓ **มาตรวิทยาเชิงควอนตัมสู่ตลาด และประชาคมโลก**

- ใช้ประโยชน์จริงเชิงธุรกิจ (commercialization)
- โครงข่ายระบบมาตรวิทยา และเซ็นเซอร์ควอนตัมรวม

งบประมาณสำหรับมาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม (Quantum Sensors for All)

แผนงาน	งบประมาณรายปี (ล้านบาท)							
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7 - 10	**รวม**
งบกำลังคน	160.0	110.0	45.0	40.0	20.0	20.0	130.0	**525.0**
งบดำเนินการ	282.0	200.0	149.0	120.0	64.0	64.0	268.0	**1,147.0**

หมายเหตุ

1. งบประมาณ 6 ปีแรก มาจากผลรวมของงบประมาณที่คาดว่าจะใช้บนพื้นฐานของโครงการที่ระบุใน roadmap
2. งบประมาณในปีที่ 7 – 10 (ถ้าไม่ได้เสนอมา) จะคำนวณมาจากงบประมาณของปีที่ 4 – 6 (ค่าเฉลี่ยคูณด้วย 1.15-1.50)

4) การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในการพัฒนาประเทศไทย (Application of Quantum Technology for Prosperity of Thailand)

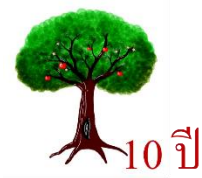
การนำเทคโนโลยีควอนตัมมาประยุกต์ใช้เป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างมากอย่างมากต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม และการขับเคลื่อนงานวิจัย เทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่มีประโยชน์ในหลายมิติดังได้ยกตัวอย่างมาแล้วในข้างต้น (หน้า 22) ไม่ว่าจะเป็นประโยชน์ของการคำนวณเชิงควอนตัมในการแก้ปัญหาทางโลจิสติกส์ การคำนวณค้นหาวัสดุ หรือยาใหม่ ๆ ที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการ หรือประโยชน์ของมาตรวิทยาเชิงควอนตัมในการสร้างเครื่องมือวัดทางการแพทย์ที่แม่นยำ รวดเร็ว เป็นต้น ด้วยคุณประโยชน์มหาศาลของเทคโนโลยีควอนตัม การวางแผนการวิจัยและพัฒนา (research and development: R & D) ในเชิงประยุกต์ก็มีความจำเป็นที่จะต้องวางแผนควบคู่ไปกับการวิจัยองค์ความรู้พื้นฐาน (fundamental research) ซึ่งสอดคล้องกับแผน 4 ขั้นในการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย คือ การเตรียมพร้อม การนำเทคโนโลยีควอนตัมมาใช้จริง การสร้างองค์ความรู้ และการสร้างเทคโนโลยีบางอย่างของตัวเอง

มีความเป็นไปได้สูงที่งานวิจัยเชิงประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมจะใช้ผลลัพธ์ที่ดี และเป็นประจักษ์ต่อสาธารณชนก่อนงานวิจัยเพื่อสร้างเทคโนโลยีขึ้นมาเอง ความสำเร็จในระยะเวลาอันสั้นของงานวิจัยประยุกต์ฯ นี้ จะทำให้แรงขับเคลื่อนที่สนับสนุนการวิจัยด้านเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยเข้มแข็งขึ้น กระตุ้นความตระหนักถึงความสำคัญของเทคโนโลยีเปลี่ยนโลกที่กำลังเข้ามา และสร้างแรงบันดาลใจในการศึกษา การวางแผน และกำหนดเป้าหมายในการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมจึงเป็นเรื่องสำคัญ

เนื่องจากการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมจะมีความหลากหลายมากในแต่ละเสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัม จึงไม่อาจระบุหัวข้อที่จะประยุกต์ใช้ได้หมด แต่การวางแผน และตั้งเป้าหมายไว้ในประเด็นสำคัญ จะทำให้ติดตามการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมได้ทัน ไม่ล้าสมัย เหมาะสำหรับการประเมินยุทธศาสตร์ของศาสตร์ในอนาคต

- สาธิตการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม
- สร้างระบบนิเวศวิจัยสำหรับประชาคมนักวิจัย ผู้ใช้เทคโนโลยีควอนตัม และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง

- ประดิษฐ์เครื่องมือสำหรับรวมระบบ (integrate) เพื่อสร้างอุปกรณ์ (device) สำหรับการประยุกต์ที่จำเพาะ
- สร้างองค์กรเพื่อส่งเสริมการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในภาคส่วนต่าง ๆ



- ขยายงานวิจัยที่มีการประยุกต์ใช้ชัดเจนเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมใหม่สำหรับประเทศไทย

งบประมาณสำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม (Quantum Deployment)

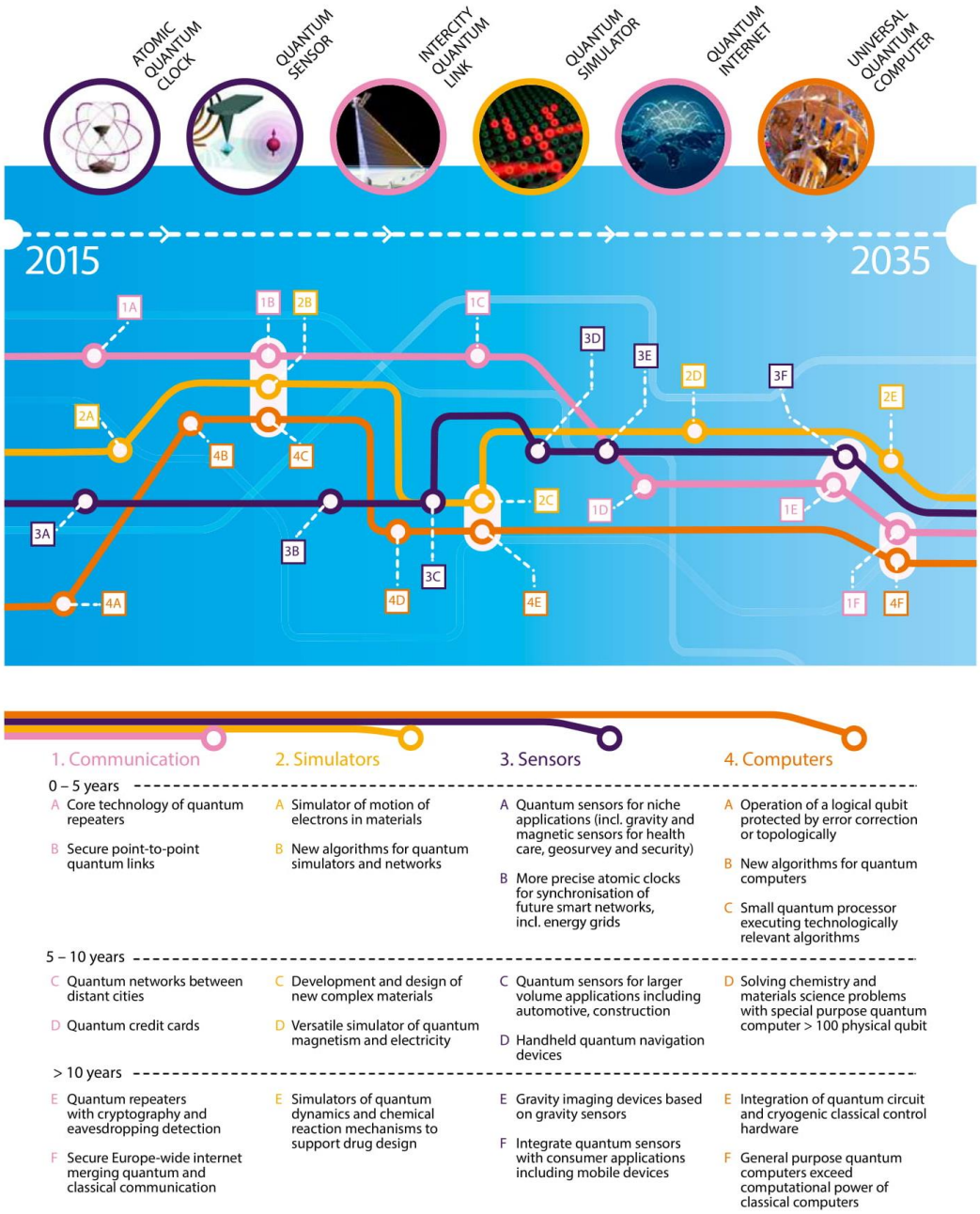
แผนงาน	**งบประมาณรายปี (ล้านบาท)**							
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	ปีที่ 7 - 10	**รวม**
งบกำลังคน	30.0	48.0	55.0	60.0	60.0	70.0	300.0	**623.0**
งบดำเนินการ	22.0	25.0	30.0	35.0	41.0	48.0	190.0	**391.0**

หมายเหตุ

1. งบประมาณ 6 ปีแรก มาจากผลรวมของงบประมาณที่คาดว่าจะใช้บนพื้นฐานของโครงการที่ระบุใน roadmap
2. งบประมาณในปีที่ 7 – 10 (ถ้าไม่ได้เสนอมา) จะคำนวณมาจากงบประมาณของปีที่ 4 – 6 (ค่าเฉลี่ยคูณด้วย 1.15-1.50)

แผนที่นำทางสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมทั้ง 3 สาขา และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ของประเทศไทยเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับแผนที่นำทางของหลายประเทศ โดยเฉพาะอย่างยิ่งของสหภาพยุโรปปี พ.ศ. 2558 ถึง 2578 (รูปที่ 6) ซึ่งเริ่มก่อนการร่างแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยฉบับนี้เป็นเวลา 5 ปี และมีระยะเวลายาวกว่า 10 ปี แต่การวางแผนแต่ละช่วงก็มีระยะเวลา 10 ปีเท่ากัน

เนื่องสหภาพยุโรป และประเทศที่พัฒนาแล้วมีกำลังทุนทรัพย์ในการสนับสนุนงานวิจัยทางด้านเทคโนโลยีใหม่ค่อนข้างสูง และมีนักวิจัยจำนวนมาก (เมื่อเทียบกับประเทศไทย) จึงมีการลงทุนทั้ง 4 เสาหลักของเทคโนโลยีควอนตัมขนานกันไป และมีการวางแผนระยะยาวต่อเนื่อง แต่สิ่งที่น่าสังเกตคือทิศทางของโครงการวิจัยจะคล้ายคลึงกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในส่วนของมาตรวิทยาเชิงควอนตัม และการสื่อสารเชิงควอนตัม ส่วนหนึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่เทคโนโลยีควอนตัมของมาตรวิทยาได้พัฒนาองค์ความรู้มาแล้วระดับหนึ่ง และต้นทุนในการทำวิจัยไม่สูงมาก (เมื่อเทียบกับการคำนวณเชิงควอนตัม) ทำให้นักวิทยาศาสตร์ทั่วโลกเข้าถึงได้ง่ายขึ้นในการสร้างงานวิจัย ส่วนการสื่อสารเชิงควอนตัมนั้นยังไม่ก้าวหน้าไปมาก แต่ก็มีเพียงระบบทางฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับโฟตอนเท่านั้นที่มีสมบัติเด่น และสามารถใช้เป็นพื้นฐานของการสื่อสารเชิงควอนตัมได้ องค์ความรู้เรื่องสมบัติทางควอนตัมฟิสิกส์ของแสงก็ได้ก้าวหน้าไปมาก ทำให้ทิศทางการวิจัยในด้านนี้ค่อนข้างจะสอดคล้องกัน ในทางกลับการการวิจัยด้านการคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมมีความหลากลาย และซับซ้อนกว่ามาก รวมทั้งต้องใช้หลายองค์ประกอบเพื่อให้ประสบความสำเร็จ ทั้งเงินทุน และงานวิศวกรรมขั้นสูงในการควบคุมระบบทางควอนตัมให้ทำการดำเนินการคำนวณได้ ซึ่งระบบทางควอนตัมก็มีหลากหลาย และแต่ละระบบก็มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน งานวิจัยในเสาหลักนี้จึงยังไม่ชัดเจนเท่าในเสาหลักที่เหลือ การพัฒนาเทคโนโลยีการคำนวณเชิงควอนตัมได้ก้าวหน้าอย่างรวดเร้วมาก ดังที่เห็นได้จากรายการการแสดงการคำนวณ หรือประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการดั้งเดิมอยู่ต่อเนื่อง ถึงแม้ประเทศไทยจะเริ่มงานวิจัยด้านนี้ช้า แต่ยังไม่ช้าเกินไปที่จะมีเทคโนโลยีบางส่วนเป็นของตนเอง



รูปที่ 6 สรุปแผนที่นำทางเทคโนโลยีควอนตัมของสหภาพยุโรประหว่างปี พ.ศ. 2558 ถึง 2578
ที่มา https://gilkalai.wordpress.com/2017/04/03/the-race-to-quantum-technologies-and-quantum-computers-useful-links/

โดยสรุปแผนการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยมีเป้าหมายที่สอดคล้องกับแผนของสหภาพภาพยุโรปและหลายประเทศ แต่มีกรอบการวิจัยที่แคบกว่า ใช้เวลาและต้นทุนที่น้อยกว่า ภายในปี ค.ศ. 2030 ทั้งประเทศไทยและ

สหภาพยุโรปต่างก็มีเป้าหมายที่จะผลิดหน่วยวัดควอนตัม (quantum sensors) ให้ดีพอสำหรับประโยชน์ทางการวิทยาศาสตร์และการประยุกต์ มีเป้าหมายที่จะสร้างควอนตัมอินเตอร์เน็ต และมีเป้าหมายที่จะสร้างเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่สามารถโปรแกรมได้ (แต่จำนวนคิวบิทของประเทศไทยอาจจะน้อยกว่า)

6. สรุปแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทยปี พ.ศ. 2563 ถึง 2572

6.1 สรุปเป้าหมาย (milestone) ของแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย

<table>
<tr><th>Education</th><th>Outreach/ Collaboration</th><th>Engineering</th><th>Highlighted Milestones</th><th>Applications</th></tr>
<tr><td>Selected topics/ activity to inspire young talent
✓New curriculum for B.Sc., M.Sc & Ph.D. in Q. tech.</td><td>✓ 10 International Collaboration (China, EU, US, UK, Canada, Australia, Japan, Germany, Singapore, Korea)</td><td>✓Essential tools for Q. tech research
• in-house engineering
• precision control & automation</td><td>✓50 qubits fault-tolerant quantum computer
✓ Quantum AI/ quantum machine learning</td><td>✓ Quantum-assist algorithms applications in finance, genomics, pharmaceuticals, logistics, metrology, etc</td></tr>
<tr><td>Micro credentials/ training modules/ researcher reskills</td><td>✓ Q. Tech Career Path Training Program</td><td>✓Necessary fab. lab./infrastructure</td><td rowspan="2">✓ Quantum Internet
• QRNG
• optical circuit on chips
• quantum interface
• global navigation satellite systems/satellite Q</td><td>✓ Quantum Materials/ Quantum Chemistry
✓ National security
✓ Fast and secured transactions/transmission</td></tr>
<tr><td>International workshops/ conferences</td><td>Ecosystems for quantum tech./ new industry</td><td>✓Prototypes for industrial use</td></tr>
<tr><td rowspan="2">✓Critical-mass Man Power Development
• 114 Doctoral Researchers
• 456 M.Sc. Technicians
• 1824 Users</td><td>✓ Funding (50%) from Private Sector</td><td>✓R & D on Quantum Devices</td><td>✓ Internationally verifiable unit standards</td><td>✓ National visibility/ international acceptance</td></tr>
<tr><td>Raise public awareness, public and political wills to prepare Thai society transition to quantum technology era</td><td>Transition assistance for commercializing products to investors/industry for large scale manufactoring</td><td>✓Commercializable quantum sensors for all
• Portable gravimeter
• Compact atomic clock
• Magnetometer
• Photonics biosensors
• Kibble balance</td><td>✓ Quantum sensors usage
• Q. sensors in agriculture/ food technology
• Q. sensors in medical diagnostics
• Q. sensors in natural resources detection</td></tr>
<tr><td colspan="3">Building Foundation</td><td>Deliverables</td><td>National Benefits</td></tr>
</table>

รูปที่ 7 สรุปเป้าหมายและหัวข้อวิจัยที่สำคัญสำหรับการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยในช่วงปี พ.ศ. 2563 – 2572 รายละเอียดของเป้าหมาย แผนที่นำทาง และการประมาณงบประมาณของแต่ละหัวข้อได้รวบรวมไว้ในภาคผนวก ก

6.2 สรุปงบประมาณสำหรับ 10 ปี

ตารางแสดงงบประมาณ 6 ปีแรก

แผนงาน		งบประมาณรายปี (ล้านบาท)							รวมต่อสาขา (ล้านบาท)
		ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5	ปีที่ 6	รวม	
Quantum Computing	งบกำลังคน	240.0	240.0	240	320.0	320.0	320.0	1,680.0	3,200.0
	งบดำเนินการ	140.0	140.0	200	320.0	340.0	380.0	1,520.0	
Quantum Communication	งบกำลังคน	40.0	10.0	10.0	50.0	10.0	10.0	130.0	530.0
	งบดำเนินการ	90.0	30.0	20.0	170.0	50.0	40.0	400.0	
Quantum Metrology & Sensing	งบกำลังคน	160.0	110.0	45.0	40.0	20.0	20.0	395.0	895.0
	งบดำเนินการ	130.0	100.0	110.0	80.0	40.0	40.0	500.0	
Education	งบกำลังคน	20.0	20.0	40.0	40.0	40.0	80.0	240.0	265.0
	งบดำเนินการ	3.5	3.5	4.5	4.0	4.0	5.5	25.0	
Outreach	งบกำลังคน	2.0	2.0	3.0	3.0	5.0	5.0	20.0	103.0
	งบดำเนินการ	12.0	12.0	14.0	14.0	15.0	16.0	83.0	
Engineering	งบกำลังคน	20.0	20.0	15.0	10.0	10.0	10.0	85.0	145.0
	งบดำเนินการ	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	60.0	
Application	งบกำลังคน	30.0	48.0	55.0	60.0	60.0	70.0	323.0	524.0
	งบดำเนินการ	22.0	25.0	30.0	35.0	41.0	48.0	201.0	
งบประมาณรวมในแต่ละปี (ล้านบาท)		919.5	770.5	796.5	1,156.0	965.0	1,054.5	5,662.0	

ตารางแสดงบประมาณตามช่วงเวลา (3 ปี หรือ 6 ปี หรือ 10 ปี)

แผนงาน		งบประมาณรายปี (ล้านบาท)				รวมต่อสาขา (ล้านบาท)
		ปีที่ 1-3	ปีที่ 4-6	ปีที่ 7-10	รวม	
Quantum Computing	งบกำลังคน	720.0	960.0	1,472.0	3,152.0	6,272.0
	งบดำเนินการ	480.0	1,040.0	1,600.0	3,120.0	
Quantum Communication	Infrastructure	60.0	70.0	130.0	260.0	1,260.0
	งบดำเนินการ	140.0	260.0	600	1,000.0	
Quantum Metrology & Sensing	งบกำลังคน	315.0	80.0	130.0	525.0	1,293.0
	งบดำเนินการ	340.0	160.0	268.0	768.0	
Education	กำลังคน	80.0	160.0	245.0	485.0	531.0
	งบดำเนินการ	11.5	13.5	21.0	46.0	
Outreach	Infrastructure	7.0	13.0	20.0	40.0	193.0
	งบดำเนินการ	38.0	45.0	70.0	153.0	
Engineering	Infrastructure	55.0	30.0	46.0	131.0	237.0
	งบดำเนินการ	30.0	30.0	46.0	106.0	
Application	Infrastructure	133.0	190.0	300.0	623.0	1,014.0
	งบดำเนินการ	77.0	124.0	190.0	391.0	
งบประมาณรวมในแต่ละปี (ล้านบาท)		2,486.5	3,175.5	5,138.0	10,800.0	

6.3 ความเชื่อมโยงกับการวิจัยขั้นแนวหน้า (Frontier Research) อื่น ๆ ของประเทศไทย

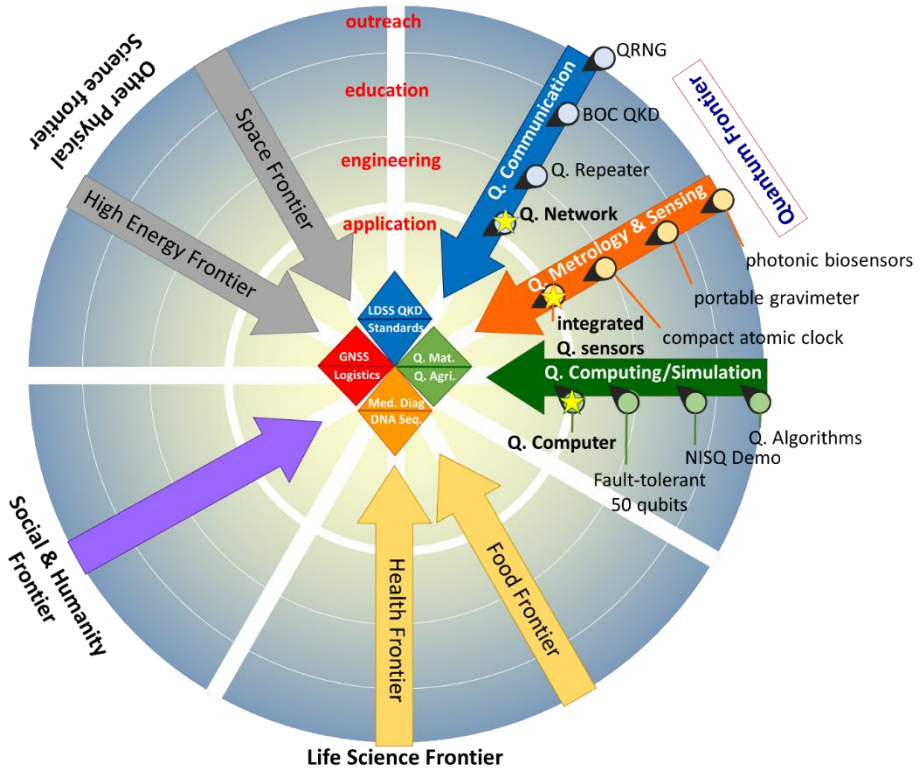
ประเทศไทยมีแผนพัฒนาการวิจัยขั้นแนวหน้าใน 3 สาขาหลักคือ

(1) Physical Science Frontier Research ซึ่งประกอบด้วย High Energy Physics, Space และ Quantum Technology

(2) Biological Science Frontier Research ซึ่งประกอบด้วย Health และ Food

(3) Social and Humanity Frontier Research

แต่ละสาขาของการวิจัยขั้นแนวหน้าจะมีการพัฒนาแผนที่นำทางของตัวเอง แผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมของประเทศไทย (Thailand Quantum Technology Roadmap) ฉบับนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์ของการวิจัยด้านเทคโนโลยีควอนตัมกับสาขาอื่นได้ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความเชื่อมโยงของเทคโนโลยีควอนตัมการวิจัยขั้นแนวหน้าสาขาอื่นของประเทศไทย

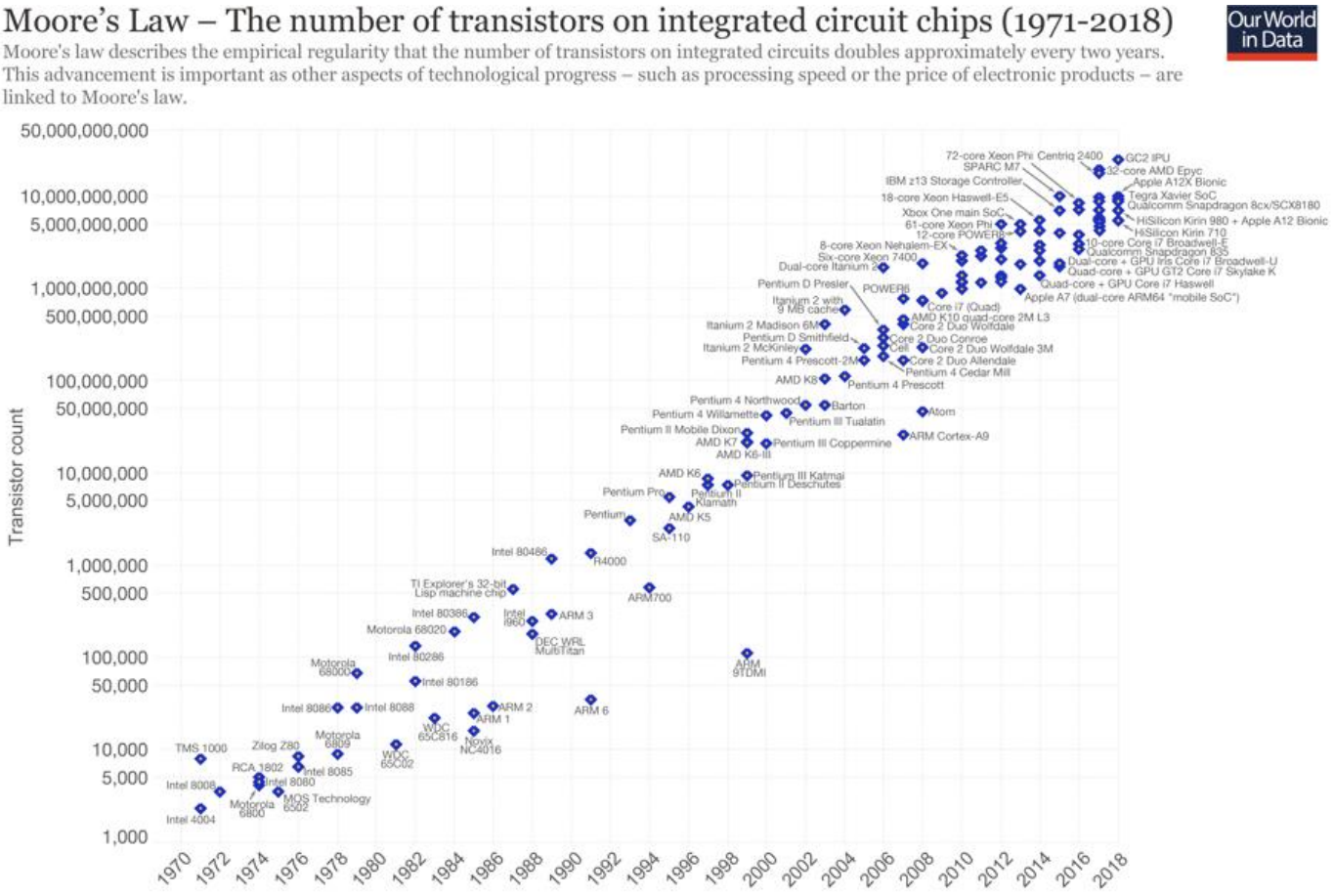
หมายเหตุ ความหมายของตัวอักษรย่อในรูปที่ 8 (นิยามและคำบรรยายในภาคผนวก ข)

Q. App = application quantum technology
Q. Repeater = quantum repeater
Q. Mat. = quantum materials
DNA seq. = DNA sequencing
Med. Diag. = medical diagnostics
QKD = quantum key distribution
BOC = bulk optics circuit
GNSS = global navigation satellite system
LDSS QKD = long distance super secure quantum key distribution

ภาคผนวก ก รายละเอียดของแต่ละเสาหลักเทคโนโลยีควอนตัม

1. การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม (Quantum Computing and Simulation)

เทคโนโลยีในปัจจุบันไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้า อุปกรณ์สื่อสาร หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นผลจากการประยุกต์ใช้องค์ความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ถูกค้นพบในช่วงต้นของศตวรรษที่ 20 ซึ่งก็คือการหลักการทางควอนตัมมาพัฒนาเป็นทรานซิสเตอร์ ในปี ค.ศ.1947 การพัฒนาด้านเทคโนโลยีเหล่านี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วจากการขับเคลื่อนของระบบเศรษฐกิจโลก และความต้องการเทคโนโลยีเพื่อตอบสนองต่อการที่เพิ่มขึ้นของประชากรโลก และข้อมูลที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดเทคโนโลยีใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าเดิมในทุก ๆ ปี อย่างจะเห็นได้จากจำนวนทรานซิสเตอร์ในวงจรของเครื่องคอมพิวเตอร์ที่เพิ่มขึ้นเท่าตัวทุก 2 ปี (รูปที่ 9)



รูปที่ 9 กฎของมัวร์ (Moore's law) คาดการณ์ว่าจำนวนมรายซิสเตอร์จะเพิ่มขึ้นเท่าตัวในทุก ๆ 2 ปี
รูปประกอบจาก https://ourworldindata.org/technological-progress

จากความต้องการที่จะประมวลผลให้เร็วขึ้น แม่นยำขึ้น และใช้ประโยชน์ได้รอบด้านมากขึ้น ทำให้เกิดความจำเป็นที่จะสร้างหน่วยประมวลผล (microprocessors) ที่มากขึ้นในพื้นที่จำกัด ทำให้ขนาดของไมโครชิป (microchip) เล็กลงจนเหลือขนาดเพียงไม่กี่อะตอม ทำให้พฤติกรรมของมันแตกต่างจากสมบัติของสสารทั่วไป และแสดงสมบัติทางควอนตัมมากขึ้น หลักการทางควอนตัมจึงเข้ามามีบทบาทให้กาพัฒนาเทคโนโลยีโดยหลีกเลี่ยงไม่ได้ เมื่อขนาดเล็กลงถึงระดับอะตอม ก็จำเป็นต้องมีความสามารถในการควบคุมอะตอมรายตัวมากขึ้น ในอนาคตอันใกล้ (ภายใน 10 ปี) เทคโนโลยีเหล่านี้จะพบกับขีดจำกัด เพราะการพัฒนาเกิดขึ้นข้าลง ศักยภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์แบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ก็จะเข้าสู่ขีดจำกัดพื้นฐาน (fundamental limit) เพราะพฤติกรรมของอะตอมรายตัวอาจจะควบคุมได้ยาก ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดการชะลอตัวของเศรษฐกิจ และจำกัดการพัฒนาทางด้านสังคม

การคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมคือการประยุกต์ใช้ทฤษฎีควอนตัมเป็นพื้นฐานในการสร้างวิธีการคำนวณหรืออัลกอริทึม (algorithm) ในรูปแบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าวิธีการคำนวณแบบปกติที่ใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์ทั่วไปในปัจจุบัน การคำนวณเชิงควอนตัมจะมีประโยชน์ในการพัฒนาวิทยาการและเทคโนโลยีอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องหลายอย่าง เช่น การศึกษาและออกแบบโครงสร้างทางเคมีของยารักษาโรค ปุ๋ยเคมี หรือวัสดุใหม่ ๆ หรือการพัฒนาปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence: AI) ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น เป็นต้น การคำนวณในรูปแบบใหม่นี้อาจเป็นรูปแบบการคำนวณเชิงควอนตัมอย่างแท้จริง (quantum algorithm) ซึ่งต้องอาศัยเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ (quantum computer) หรือระบบจำลองเชิงควอนตัม (quantum simulator) ในการประมวลผล หรืออาจเป็นรูปแบบการคำนวณวิธีใหม่ที่อาศัยหลักการเชิงควอนตัม แต่ยังประมวลผลโดยใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ธรรมดาก็ได้ อย่างหลังนี้จะรู้จักกันในชื่ออัลกอริทึมที่ได้แรงบันดาลใจจากควอนตัม (quantum-inspired algorithm) เพื่อให้เกิดความชัดเจน และจำแนกการคำนวณเชิงควอนตัมกับการจำลองควอนตัม เราสรุปคำจำกัดความของทั้งสองได้ดังนี้

การคำนวณเชิงควอนตัม (quantum computing): การศึกษาและพัฒนาเทคโนโลยีการคำนวณโดยอาศัยหลักการและทฤษฎีกลศาสตร์ควอนตัม ที่สำคัญ คือ สถานะซ้อนทับโคฮีเรนท์ (coherent superposition state) และความพัวพัน (entanglement) สถานะบีบอัด (squeezed state) และดีโคฮีเรนซ์ (decoherence) หรือความผิดพลาดของข้อมูลเชิงควอนตัม

การจำลองเชิงควอนตัม (quantum simulation): กระบวนการที่จำเพาะกับปัญหาเพื่อการศึกษาระบบควอนตัมที่ยากจะทำได้ในห้องทดลองและไม่สามารถจำลองได้โดยใช้ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ เนื่องจากมุ่งเน้นการเฝ้าสังเกตจลนวิสัยของระบบควอนตัม การจำลองเชิงควอนตัมจึงไม่จำเป็นต้องมีกระบวนการแก้ไขความผิดพลาดของควอนตัมบิท (quantum bit หรือ qubit)

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านการคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัม ทั้งในส่วนที่เป็นฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์นั้นเป็นสิ่งที่หลายประเทศรวมถึงบริษัทเอกชนหลายแห่งกำลังให้ความสนใจในการค้นคว้าและพัฒนา อย่างแข็งขัน ด้วยความเชื่อที่ว่าความสำเร็จในการพัฒนาเทคโนโลยีนี้ จะส่งผลให้เกิดการปฏิวัติอุตสาหกรรมอีกครั้งหนึ่ง ดังนั้น ผู้ที่สามารถเข้าถึงและเข้าใจในเทคโนโลยีนี้ย่อมจะสามารถชิงความได้เปรียบในเชิงวิทยาการและเศรษฐกิจ สำหรับประเทศไทยการพัฒนาทางด้านฮาร์ดแวร์จะไม่สามารถเข้าไปอยู่ในแนวหน้าของโลกได้ เพราะต้องใช้งบประมาณสูงมาก แต่ความพร้อมและความ

สามาถในการใช้เทคโนโลยีการคำนวณเชิงควอนตัม จะทำได้ไม่เสียโอกาสเชิงธุรกิจ และเพิ่มศักยภาพในการแข่งขั้น อีกทั้งการประยุกต์ใช้การคำนวณเชิงควอนตัมจะช่วยส่งเสริมคุณภาพชีวิตของประชากรให้ดีขึ้น ทิศทางการวิจัยและการพัฒนาเทคโนโลยีการคำนวณและการจำลองเชิงควอนตัมที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยอาจแบ่งเป็น 4 หัวข้อหลัก ได้แก่

(1) Quantum Computer Hardware and Quantum Blind Computing

(2) Quantum Simulator

(3) Platform-independent Quantum Algorithm and Quantum-inspired Algorithm

(4) Potential Problem Seeking and Quantum Solution

การหาโจทย์ที่น่าสนใจและมีประโยชน์ และใช้อัลกอริทึมที่มีอยู่แล้วมาสาธิตการแก้ปัญหาเหล่านั้นจะเป็นการแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเทคโนโลยีการคำนวณเชิงควอนตัม โดยควรเน้นปัญหาเฉพาะบริบทประเทศไทยเป็นพิเศษเพื่อให้สังคมเกิดความตระหนักถึงประโยชน์และโอกาสที่มากับเทคโนโลยีใหม่ ทิศทางการพัฒนาในแต่ละหัวข้อเป็นดังนี้

(1) Quantum Computer Hardware and Quantum Blind Computing

ด้วยข้อจำกัดด้านกำลังคนและปัจจัยพื้นฐานทางเศรษฐกิจและเทคโนโลยี การลงทุนวิจัยในฮาร์ดแวร์ของการคำนวณเชิงควอนตัมนั้น ประเทศไทยไม่ควรแข่งขันในเทคโนโลยีเดียวกับบริษัทยักษ์ใหญ่ เช่น กูเกิล (Google) หรือ ไอบีเอ็ม (IBM) ทางเลือกที่น่าสนใจมากกว่าคือการใช้ควอนตัมคอมพิวเตอร์ของต่างชาติที่เปิดให้บริการผ่านระบบคลาวน์ (cloud service) ซึ่งต้องมีการสนับสนุนเงินทุนที่จำเป็นต่อการเข้าถึงระบบที่มีจำนวนและประสิทธิภาพของคิวบิทมากเพียงพอที่จะใช้งานได้ ในมิตินี้ประเทศไทยยังจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาวิจัยอย่างจริงจังเกี่ยวกับ 1) การพัฒนาเครื่องคอมพิวเตอร์ควอนตัมขนาดเล็กด้วยเทคโนโลยีของเราเอง รวมไปถึงระบบสนับสนุนการใช้งาน 2) quantum blind computing ซึ่งเป็นระบบที่ช่วยปกป้องข้อมูลที่ถูกส่งไปคำนวณผ่านระบบคลาวน์ให้มีความปลอดภัย ไม่สามารถถูกเข้าถึงได้ทั้งโดยผู้ให้บริการควอนตัมคอมพิวเตอร์และผู้ไม่หวังดีอื่นในระบบโครงข่าย (network) การพัฒนางานวิจัยในทางนี้จะต้องทำอย่างสอดคล้องกับการพัฒนางานวิจัยในสาขาการสื่อสารเชิงควอนตัมด้วย

(2) Quantum Simulator

ประเทศไทยควรพัฒนาฮาร์ดแวร์สำหรับเทคโนโลยีควอนตัมด้วยเช่นกัน แต่ช่วงเวลา 10 ปีแรก ควรเป็นการพัฒนาฮาร์ดแวร์ของระบบจำลองเชิงควอนตัม ซึ่งมีความเป็นไปได้สูงที่จะสำเร็จ และควรได้รับการสนับสนุนเนื่องจากกระบวนการในการพัฒนาระบบดังกล่าวนั้นมีความซับซ้อนน้อยกว่าการสร้างควอนตัมคอมพิวเตอร์มาก นอกจากนี้กลุ่มวิจัยในประเทศหลายกลุ่มที่มีศักยภาพในการพัฒนาระบบจำลองเชิงควอนตัมขึ้นได้เอง เมื่อพัฒนาสำเร็จ (ถึงแม้ว่าจำนวนคิวบิทจะไม่เยอะ) จะสามารถสร้างองค์ความรู้ (knowledge contribution) ในระดับนานาชาติเพื่อช่วยศึกษาเรื่องการควบคุมความคลาดเคลื่อนของคิวบิท (qubit

control) ลดดีโคฮีเรนซ์ (decoherence suppression) หรือใช้ศึกษาการรบกวนของระบบได้ (noise spectroscopy) ซึ่งองค์ความรู้เหล่านี้ยังเป็นงานวิจัยในระดับแนวหน้า และเป็นที่ต้องการอย่างมากในการปรับปรุงเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่เขียนโปรแกรมได้ (programmable quantum computer) ยิ่งไปกว่านั้น ถ้าประเทศไทยสามารถสร้างฮาร์ดแวร์ของระบบจำลองเชิงควอนตัมได้ มันจะมีประโยชน์อย่างสูงในการใช้แก้ปัญหาเฉพาะบริบทของประเทศไทยโดยไม่ต้องเสียค่าบริการให้กับต่างชาติ และอาจเป็นผู้ให้บริการได้เอง

เนื่องจากมีระบบทางฟิสิกส์ (physical platform) หลายแบบที่สามารถนำมาพัฒนาเป็นระบบจำลองเชิงควอนตัมได้ เช่น ทัศนศาสตร์เชิงเส้น (linear optics) หรือ การกักอะตอมที่เป็นกลางหรือไอออน (trapped neutral atoms or trapped ions) หรือสปินของอิเล็กตรอนหรือนิวเคลียส (electron/nuclear spins) หรือความไม่สมบูรณ์ของเพชร (NV-center diamond) แต่ละระบบล้วนมีข้อดีที่สามารถนำมาประกอบเสริมกันให้กลายเป็นระบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงได้ การสนับสนุนในด้านนี้จึงควรมีให้กับทุกระบบ ซึ่งสอดคล้องกับแผนการพัฒนาฮาร์ดแวร์ของระบบจำลองเชิงควอนตัมของสหภาพยุโรป

การพัฒนาระบบจำลองเชิงควอนตัมในระยะสั้นถึงระยะกลางควรมุ่งเน้นไปที่ระบบควอนตัมที่มีสัญญาณรบกวนขนาดกลาง (Noisy Intermediate Scale Quantum: NISQ) ซึ่งเป็นระบบควอนตัมแบบที่ยังมีจำนวนคิวบิทไม่มากนักและยังไม่มีกระบวนการจัดการดีโคฮีเรนซ์ที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากระบบประเภทนี้เป็นระบบที่สามารถสร้างให้สำเร็จได้เร็วและมีศักยภาพเพียงพอที่จะแก้ไขปัญหาบางอย่างได้ดีกว่าเครื่องคอมพิวเตอร์แบบปกติได้ ในส่วนนี้ประเทศไทยจำเป็นต้องสร้างความพร้อมของบุคลากรทั้งที่เป็นนักวิจัย วิศวกรและผู้ใช้ เพื่อที่จะสามารถช่วยสร้างฮาร์ดแวร์ของแต่ละระบบได้ การพัฒนาบุคลากรดังกล่าวอาจเป็นการทำผ่านการอบรมเฉพาะด้าน (workshop) และในหลักสูตรการศึกษา ซึ่งต้องเชื่อมโยงกลมกลืนกับงานการศึกษา (education) และการเผยแพร่สู่สาธารณชน (outreach)

ในงานวิจัยด้านซอฟท์แวร์และอัลกอริทึม (software and algorithm) ที่เกี่ยวข้องกับเครื่องจำลองเชิงควอนตัม (quantum simulator) สามารถแบ่งย่อยออกได้เป็น 4 ส่วน คือ (1) อัลกอริทึมและซอฟท์แวร์สำหรับการเชื่อมต่อฮาร์ดแวร์ (algorithm and software for hardware interface) (2) ซอฟท์แวร์จัดการสัญญาณรบกวน (noise management software) โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการแก้ความคลาดเคลื่อน (AI-assisted quantum error correction) (3) ซอฟท์แวร์ที่รับรองการได้เปรียบเชิงควอนตัม (quantum advantage certification software) และ (4) อัลกอริทึมสำหรับการจำลองเชิงควอนตัม (quantum simulation algorithm) ซึ่งจำเป็นต้องร่วมมือกับการพัฒนาด้านควอนตัมอัลกอริทึม

ในระยะยาว เป้าหมายปลายทางของการพัฒนาระบบจำลองเชิงควอนตัม (quantum simulator) ในระยะ 10 ปี ควรมุ่งไปที่ความสามารถในการทำเคมีและวัสดุเชิงควอนตัม (quantum chemistry/materials) เพื่อศึกษาวิจัยเรื่องวัสดุสมบัติพิเศษ ปุ๋ย หรือยารักษาโรคใหม่ ๆ ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมถึงการแก้โจทย์ปัญหาอื่น ๆ ที่สำคัญของประเทศไทย อาทิ ปัญหาโลจิสติกส์ทั้งการจราจร และการจัดการน้ำ เป็นต้น

(3) Platform-independent Quantum Algorithm and Quantum-inspired Algorithm

งานวิจัยในส่วนนี้คือการพัฒนาอัลกอริทึมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการคำนวณแก้ปัญหาต่าง ๆ ทั้งที่เป็นควอนตัมอัลกอริทึม และ อัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากหลักการควอนตัม (quantum-inspired algorithm) ซึ่งไม่ขึ้นกับระบบทางกายภาพ ดังนั้น งานวิจัยทางด้านนี้จึงสามารถทำได้ทันทีอิสระจากการพัฒนาฮาร์ดแวร์ อย่างไรก็ตามทิศทางงานวิจัยในระยะยาวจะต้องมุ่งให้เกิดการนำอัลกอริทึมและซอฟท์แวร์ทั้งหลายเหล่านี้มาทดสอบ และใช้กับฮาร์ดแวร์ที่ได้รับการพัฒนาขึ้น

การพัฒนาอัลกอริทึมชั้นสูง (high-level algorithm) ในระยะแรกควรมุ่งทำทั้งส่วนที่ควอนตัมอัลกอริทึม และ อัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากหลักการควอนตัมไปพร้อม ๆ กัน โดยอาจเน้นที่อัลกอริทึมที่ได้รับแรงบันดาลใจจากหลักการควอนตัมมากกว่าในช่วงแรก เนื่องจากอัลกอริทึมประเภทนี้สามารถนำมาใช้ในเครื่องคอมพิวเตอร์แบบปรกติได้ทันที แล้วค่อยส่งเสริมควอนตัมอัลกอริทึมมากขึ้นในระยะกลางถึงระยะยาว

(4) Potential Problem Seeking and Quantum Solution

การหาโจทย์ที่เหมาะสมและวิธีการแก้โจทย์เหล่านั้นโดยใช้เทคโนโลยีควอนตัมก็เป็นเรื่องที่สำคัญ เพราะมันคือการแสดงศักยภาพของเทคโนโลยีควอนตัม ในขณะนี้โจทย์ที่นักวิจัยได้ใช้ในการแสดงศักยภาพดังกล่าวมักจะเป็นโจทย์ที่ไม่สมจริงในชีวิตจริง แต่ก็แสดงถึงพัฒนาการของเทคโนโลยีควอนตัมได้อย่างชัดเจน ทุกประเทศมีโจทย์ที่เหมาะสมกับบริบทของตัวเอง ประเทศไทยก็มีโจทย์เฉพาะบริบทของตัวเองที่อาจจะได้รับการพิจารณาและพยายามแก้ปัญหามาเป็นระยะเวลานานและอาจจะยังไม่ประสบความสำเร็จ การพัฒนาของเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทยโดยเฉพาะทางด้านการคำนวณเชิงควอนตัมจะเป็นความหวังที่เป็นไปได้ที่จะทำให้ปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ปัญหา หรืออย่างน้อยก็ยกระดับกระบวนการหาคำนวณที่ทำให้ความสามารถในการแก้ปัญหามีประสิทธิภาพมากขึ้น หรือปรับปรุงสถานการณ์ให้ดีขึ้น

โจทย์ที่เหมาะสมสำหรับประเทศไทยจำเป็นจะต้องได้รับการศึกษาอย่างจริงจัง และทำควบคู่ไปกับความพร้อมและศักยภาพของเทคโนโลยีควอนตัมที่ประเทศไทยเข้าถึง โจทย์เหล่านี้อาจจะรวมถึงการเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร การแก้ปัญหาโลจิสติกส์ เช่นการจราจร หรือการจัดการน้ำ การหาลดเวลาในการสังเคราะห์ยาที่เหมาะสำหรับโรคเขตร้อน และการหาวัสดุที่เหมาะสม ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะได้พูดถึงในรายละเอียดในส่วนที่หัวข้อการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม

ปัญหาที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งที่ต้องได้รับการพิจารณาในการคำนวณเชิงควอนตัม คือการเชื่อมต่อ (interface) ระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์ ในส่วนนี้ประเทศไทยจะต้องพิจารณาว่าจะสร้างเทคโนโลยีนี้ขึ้นมาเอง หรือจะเลือกใช้จากที่มีอยู่ในตลาดเทคโนโลยี

ประโยชน์ของการคำนวณเชิงควอนตัมและการจำลองเชิงควอนตัม

การออกแบบใหม่ ๆ ให้เร็วเท่าทันกับอัตราการกลายพันธุ์ของจุลชีพก่อโรค การเห็นและศึกษามะเร็งในระดับอะตอม การออกแบบและสังเคราะห์โปรตีนที่ไม่มีในธรรมชาติ การปรับเปลี่ยนโครงสร้างเซลล์ร่างกายมนุษย์เพื่อยืดอายุขัยหรือก่อให้เกิดความไม่เป็นโรค การออกแบบวัสดุที่มีสมบัติเฉพาะทาง หรือ อรรถประโยชน์สำหรับการใช้งานบนโลกและสภาวะรุนแรงในอวกาศ การคำนวณที่รวดเร็วจะทำกำไรมากกว่าในระยะเวลาอันสั้นกว่าซึ่งจะตัดสินผู้ชนะในตลาดหลักทรัพย์ ความสามารถในการจัดการกับข้อมูลขนาดใหญ่อย่างรวดเร็วที่จะทำให้เกิดการล่มสลายของเศรษฐศาสตร์แบบดั้งเดิมที่อาศัยแบบจำลองในการคาดเดาตลาด ผลกระทบแบบพลิกโฉมเหล่านี้และอีกมากมายที่เทคโนโลยีปัจจุบันไม่สามารถให้ได้ มีสาเหตุสำคัญมาจากพละกำลังของเครื่องคำนวณที่ไม่เพียงพอจะทำให้ข้อมูลและความรู้ได้รับการพัฒนาต่อไปเป็นความเข้าใจและการใช้งานในที่สุด

ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์ที่เร็วที่สุดในปัจจุบัน (1 ต.ค. 2562) คือ Summit – IBM Power System AC922 ที่มากับ 2.28 ล้านหน่วยประมวลผล ทำให้สามารถคำนวณได้ 1.87×10^{17} รอบต่อวินาที กินพลังงาน 8.81 ล้านวัตต์ ซึ่งเท่ากับกำลังไฟฟ้าที่ทำให้พัทยาสว่างไสวได้ทั้งเมือง อย่างไรก็ดี ซุปเปอร์คอมพิวเตอร์นี้สามารถจัดการกับงานคำนวณที่ระบบประกอบไปด้วย 50 หน่วยย่อย (ในที่นี้ คือ 50 อะตอม) เท่านั้น หากต้องการจัดการกับระบบ 51 อะตอม เราต้องใช้ Summit – IBM จำนวน 2 เครื่อง การเพิ่มขึ้นของทรัพยากรที่ต้องใช้แบบเชิงเส้น (2N) ไม่สามารถไล่ตามความต้องการทรัพยากรแบบเอกซ์โพเนนเชียล (2^N) ของระบบควอนตัมได้ อย่างเช่นเมื่อ จำนวนอะตอม N = 60 พลังงานที่ใช้สำหรับซุปเปอร์คอมพิวเตอร์จะสามารถขับหลอดไฟฟ้าทำให้ประเทศไทยสว่างไสวได้ทั้งประเทศ (ซึ่งมูลค่าการสร้างซุปเปอร์คอมพิวเตอร์สเกลนี้คงเหนือจินตนาการ) และเมื่อ N = 300 จำนวนข้อมูลเชิงบิตจะมากกว่าจำนวนอะตอมทั้งหมดในจักรวาลที่นักดาราศาสตร์จะเห็นได้ ที่น่าตกใจก็คือ ในความซับซ้อนของธรรมชาติที่ตัวเลข 300 นี้ ไม่ได้ใกล้เคียงกับจำนวนอะตอมใน 1 โมลของของแข็งที่สามารถหย่อนลงบนปลายนิ้วก้อยได้ และไม่มีทางเลยที่เราจะทำการคำนวณจีโนมิกส์ดีเอ็นเอ (gDNA) ของมนุษย์ซึ่งประกอบไปด้วยอะตอมประมาณ 204,000,000,000 อะตอม คำตอบเดียวที่มีของมนุษย์ในการก้าวข้ามเขตแดนของ 60 อะตอม หรือ 60 หน่วยย่อย ก็คือ คอมพิวเตอร์ควอนตัมและเครื่องจำลองควอนตัม เพราะการยกระดับเครื่องคำนวณควอนตัมขนาด 50 คิวบิท (บิทควอนตัม) ไปสู่ 300 คิวบิท ต้องการเพียงการเพิ่มจำนวนอะตอมลงไปในระบบคำนวณอีกเพียง 250 อะตอม

1.1 เป้าหมายสำคัญและแผนที่นำทาง (Milestones & Roadmap)

เป้าหมายสำคัญสำหรับการคำนวณเชิงควอนตัม และการจำลองเชิงควอนตัม คือการมีทั้งฮาร์ดแวร์ และซอฟท์แวร์ที่ทำงานส่งเสริมเกื้อกูลกัน ตัวชี้วัดในภาพรวมคือปัจจัยสำคัญสามอย่าง ได้แก่ จำนวนคิวบิท การเชื่อมต่อ และสัญญาณรบกวน สัคำย่อที่ใช้ในในการระบุเป้าหมายมีดังนี้

QSim หมายถึง ระบบจำลองเชิงควอนตัม ในภาพรวมคือมีเป้าหมายเพิ่มขีดความสามารถในการพัฒนา

NISQ หมายถึง ระบบควอนตัมที่มีสัญญาณรบกวนขนาดกลาง ในภาพรวมคือมีเป้าหมายเพื่อหาขอบเขตที่คอมพิวเตอร์ควอนตัมดีเกินกว่าคอมพิวเตอร์ปัจจุบัน และหาวิธีใหม่ในการใช้คิวบิท

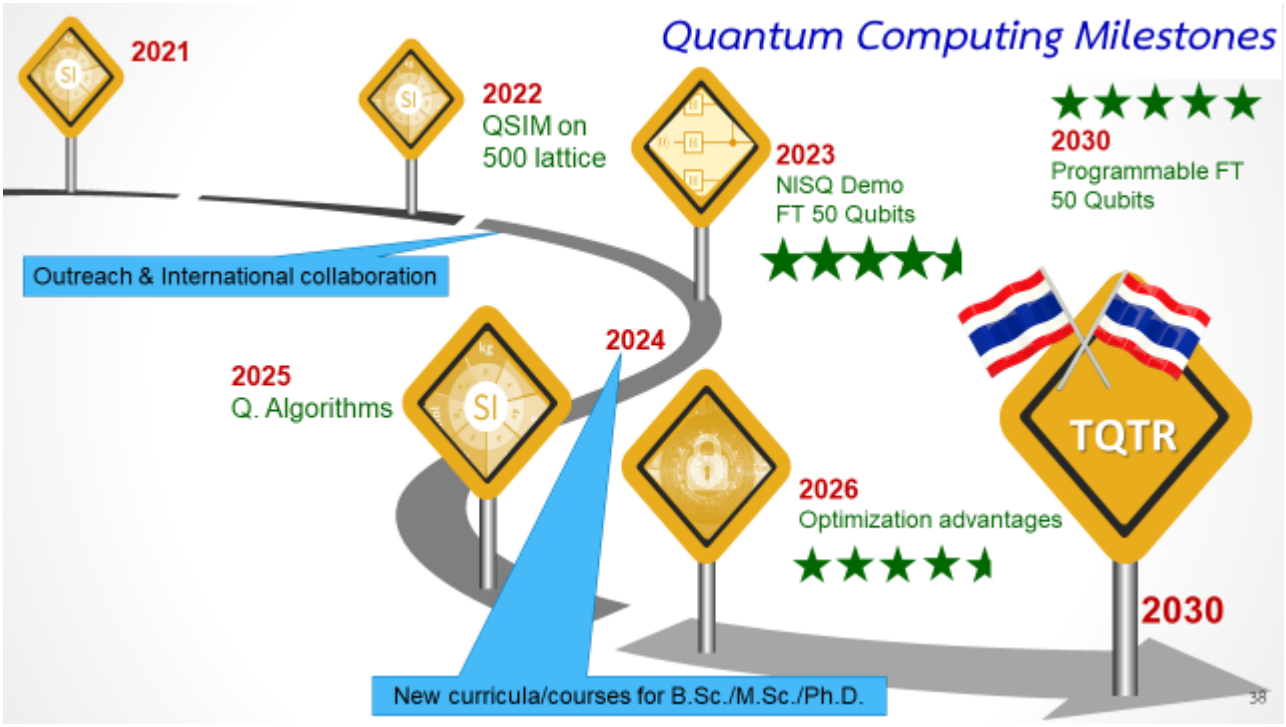
QCom หมายถึงการคำนวณเชิงควอนตัม ซึ่งมีเป้าหมายในการเพิ่มคุณภาพของคิวบิท ด้วยการสร้าง (construction) การจำแนก (characterization) การทดสอบ (validation) และการรับรอง (verification) ซึ่งใช้ตัวย่อของกระบวนการเป็น qCVV

QSoft หมายถึง ซอฟท์แวร์เชิงควอนตัม ซึ่งมีเป้าหมายพัฒนาเพื่อประยุกต์ใช้งานกับควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่จะสร้างขึ้น

เป้าหมายและกรอบเวลา

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
3 ปี	• (QSim) Quantum simulators with quantum advantage on the scale of 500 lattices. • (NISQ) Noisy intermediate-scale quantum (NISQ) computing demonstrates quantum advantages. • (QCom) Fault tolerant for few qubits proven with plausible routes toward 50 qubits. • (QSoft) Quantum-inspired algorithm • (QSoft) Quantum machine learning • (QSoft) ML-assisted quantum error correction	3/4/5 3/4/5 5/5/4 3/4/5 3/4/5 5/4/4 4.2
6 ปี	• (QSim) Quantum optimization and quantum advantage in solving important problems in science. • (NISQ) Noisy intermediate scale quantum system • (QCom) Robust logical qubits realized to make quantum processor (programmable). • (QSoft) Quantum blind computation (connect with quantum communication)	4/5/5 4/5/5 5/5/5 4/5/5 4.75
10 ปี	• (QSim) Quantum optimization and quantum advantage in problems beyond supercomputer capability, e.g. quantum chemistry, novel materials and drug designs. • (NIQS) • (QCom) • (QSoft) Quantum Chemistry/Materials	5/5/5 5/5/5 5/5/5 5/5/5 5.0

แผนที่นำทาง



รูปที่ 10 เป้าหมายและแผนที่นำทางของการคำนวณเชิงควอนตัม

1.2 เป้าหมายการใช้ประโยชน์ (Application Goals)

- ระยะ 3 ปี

  แสดงแก้ปัญหาโลจิสติกขนาดเล็ก และ ปัญหาพื้นฐานอื่น ๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ควอนตัม

- ระยะ 6 ปี

  แก้ปัญหาในบริบทของประเทศไทย เช่น ด้านเกษตร และการแสวงหาทรัพยากรธรรมชาติ

- ระยะ 10 ปี

  ใช้ควอนตัมคอมพิวเตอร์ แก้ปัญหาเฉพาะทางเช่นเคมี ปัญญาประดิษฐ์ ในระดับสากล แข่งขันกับนานาชาติ

1.3 ปัจจัยสนับสนุนที่จำเป็น (Enabling Tools)

1) technology to construct qubit, superconducting qubit, ion-trapped qubit and other candidates
2) computing facilities for large scale simulation to develop QSim
3) access to existing Quantum computers to develop software and testing the algorithm

1.4 งบประมาณ (Budget)

1.4.1 Infrastructure (ล้านบาท)

เป้าหมาย	ปีที่ 1 - 3	ปีที่ 4 - 6
facility to construct superconducting qubit	120.0	180.0
facility to construct neutral atom and ion-trapped qubit	120.0	180.0
equipment and material to assemble superconducting qubit	240.0	300.0
equipment and material to assemble qubit into a system	240.0	300.0
total	**720.0**	**960.0**

1.4.2 งบดำเนินการ (ล้านบาท)

เป้าหมาย	ปีที่ 1 - 3	ปีที่ 4 - 6
construct superconducting qubit	60.0	120.0
construct neutral atom qubit	60.0	120.0
construct ion-trapped qubit	60.0	120.0
testing other technology for qubit	48.0	48.0
assemble superconducting qubit into a system	48.0	120.0
assemble neutal atom qubit into a system	48.0	120.0
assemble ion-trapped qubit into a system	48.0	120.0
demonstrate computing on qubits	36.0	90.0
develop system software	30.0	72.0
develop application software	30.0	72.0
develop algorithms	12.0	38.0
total	**480.0**	**1,040.0**

2. การสื่อสารเชิงควอนตัม

เทคโนโลยีควอนตัมสามารถนำมาซึ่งประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับระบบสื่อสาร การสื่อสารแบบเดิมที่ใช้สัญญาณไฟฟ้าและระบบประมวลผลข้อมูลหรือเข้ารหัสข้อมูลโดยการประยุกต์ใช้ธรรมชาติและวิศวกรรมของทฤษฎีสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แผนแบบเก่าจะถูกแทนที่เสริมด้วยทฤษฎีควอนตัมและการควบคุมข้อมูล ซึ่งจะมีพฤติกรรมทางธรรมชาติต่างไปจากเดิม พฤติกรรมเชิงควอนตัมดังกล่าว อาทิ คุณสมบัติห้ามโคลน (no-cloning) สภาวะทับซ้อน (superposition) และสภาวะพัวพัน (entanglement) ซึ่งเป็นรากฐานของการนำมาซึ่งการสื่อสารที่มีความปลอดภัยสูงขึ้น และด้วยการสื่อสารจำเป็นต้องมีการถ่ายโอนข้อมูลระหว่างจุดต่าง ๆ การเข้ารหัสทางควอนตัมไว้ในสถานะของโฟตอน (อนุภาคควอนตัมของ

แสง) ซึ่งมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงมากและมีคุณสมบัติที่ดีคือข้อมูลจะไม่สามารถถูกรบกวนให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งแวดล้อมได้โดยง่ายจึงเป็นตัวเลือกที่ได้รับการประเมินว่าเหมาะสมที่สุด

โดยทั่วไปข้อมูลในระบบสื่อสารถูกปกป้องด้วยการเข้ารหัส (cryptography) เพื่อป้องกันการโจรกรรมข้อมูล การจะประเมินความปลอดภัยระบบการสื่อสารจะประเมินจากความยากง่ายในการถอดรหัสของผู้รุกราน โดยทั่วไประบบการเข้ารหัสเชิงควอนตัม (quantum cryptography) มีข้อจำกัดทางเทคโนโลยีที่น้อยกว่าเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ และระบบจำลองเชิงควอนตัม เพราะอาศัยจำนวนคิวบิทที่น้อยกว่าโดยมีเพียงอย่างน้อย 2 คิวบิทก็สามารถดำเนินการได้ ความท้าทายของการพัฒนาระบบเข้ารหัสเชิงควอนตัม คือการรับส่งข้อมูลความปลอดภัยสูงในระยะไกล โดยคาดว่าจะสามารถสร้างและเอามาใช้ได้จริงในกรอบเวลา 10 กว่าปีนับจากนี้

ระบบการเข้ารหัส แบ่งกว้าง ๆ ได้เป็น 2 แบบ คือการเข้ารหัสแบบไม่สมมาตร (asymmetric encryption: ASE) หรือการเข้ารหัสแบบพับบลิคคีย์ (public-key cryptography) ซึ่งผู้รับและผู้ส่งจะใช้คนละรหัสกัน และการเข้ารหัสแบบสมมาตร (symmetric encryption: SE) ซึ่งผู้รับและผู้ส่งจะใช้รหัสเดียวกัน โดยการเข้ารหัสแบบไม่สมมาตรเป็นองค์ประกอบสำคัญในระบบอินเตอร์เน็ตในปัจจุบัน ทั้งนี้เป็นที่ประจักษ์แล้วว่าระบบ ASE นั้นจะสามารถถูกทำการแฮ็ก (hack) ได้ทั้งสิ้นหากใช้เครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูง แต่ก็เป็นข้อดีประการหนึ่งในปัจจุบันว่าเครื่องควอนตัมคอมพิวเตอร์ดังกล่าวยังไม่สามารถพัฒนาได้ด้วยข้อจำกัดทางเทคโนโลยี ในทางกลับกัน การเข้ารหัสแบบสมมาตรมีข้อจำกัดทางเทคโนโลยีที่น้อยกว่าและเชื่อว่าจะสามารถสร้างและเอามาใช้ได้จริงในกรอบเวลา 10 กว่าปีนับจากนี้ โดยการเข้ารหัสแบบสมมาตรจะถูกพัฒนาในส่วนย่อยสำคัญ 5 ส่วน (5Q) คือ

(1) แหล่งกำเนิด และตัวอ่านกุญแจสำหรับการเข้ารหัสข้อมูลที่ถูกส่งในระยะไกล

(2) อุปกรณ์การทวนสัญญาณ (quantum repeater: QR) เพื่อการทวนสัญญาณและขยายสัญญาณสำหรับการส่งข้อมูลระยะไกล

(3) อุปกรณ์เครื่องกำเนินจำนวนสุ่มเชิงควอนตัม (quantum random number generators: QRNG) เพื่อสร้างจำนวนสุ่มสำหรับรหัสใช้ครั้งเดียว (one-time password: OTP)

(4) อุปกรณ์อำพรางข้อมูลควอนตัม (quantum steganography: QS) และการคำนวณแบบปกปิด (blind quantum computing: BQC) เพื่อสร้างระบบทางเลือกในการปกป้องข้อมูลในฝั่งของผู้ส่งสาสน์

(5) อุปกรณ์เชื่อมหน่วยคิวบิทของสสารกับคิวบิทของแสง (light-matter interface: LMI) ที่เชื่อมโยงระบบควอนตัมของโฟตอนกับระบบทางควอนตัมอื่น ๆ เช่น ผลึกที่ไม่สมบูรณ์ของเพชร (NV-center in diamond) คิวบิทจากสารกึ่งตัวนำ (semiconductor qubits) คิวบิทจากการกักไอออน (trapped ions) และหน่วยความจำบนพื้นฐานของไฟเบอร์ (fiber-based memory) เนื่องจากแสงมีคุณสมบัติที่ดีในการเป็นตัวกลางของข้อมูลของสาสน์แต่ไม่สามารถนำมาเก็บในหน่วยความจำได้จึงต้องอาศัยปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงกับคิวบิท หรือระบบควอนตัมอื่น ๆ

การสื่อสารเชิงควอนตัมจึงนำอุปกรณ์ หรือส่วนเหล่านี้มาประกอบรวมกันเป็นระบบโครงข่ายสื่อสารใน ซึ่งสามารถพิจารณาได้ใน 3 ระดับการพัฒนา

(1) การพัฒนาในระดับห้องปฏิบัติการ ซึ่งอุปกรณ์จะยังมีขนาดใหญ่และสามารถทำการสื่อสารความปลอดภัยสูงในระยะใกล้ได้

(2) การพัฒนาให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงและสามารถทำการสื่อสารความปลอดภัยสูงในระยะใกล้ได้

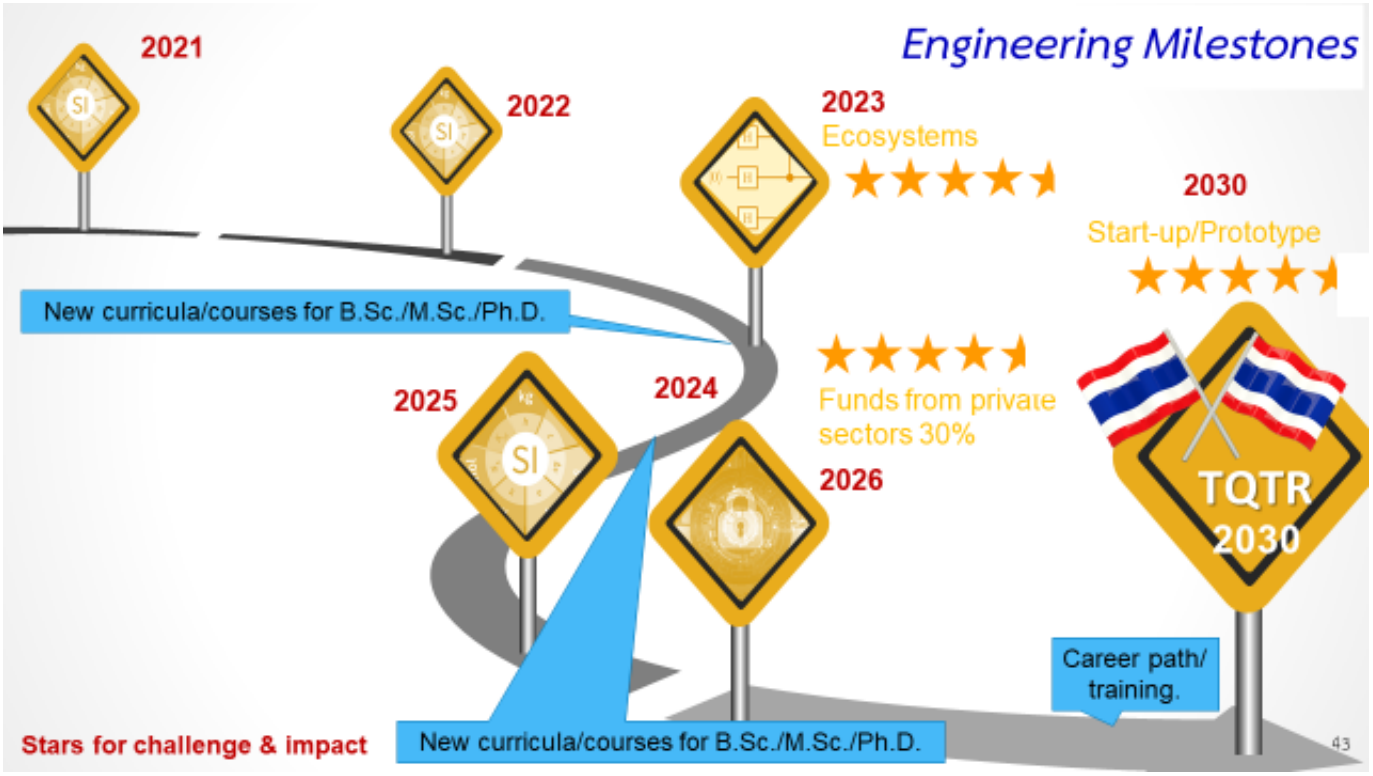
(3) การพัฒนาให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กและสามารถทำการสื่อสารความปลอดภัยสูงในระยะไกล ทั้งในระบบผ่านสายเคเบิลพื้นที่ว่างเปล่า (free space) และ ระบบดาวเทียมได้

2.1 เป้าหมายสำคัญและแผนที่นำทาง *(Milestones & Roadmap)*

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
3 ปี	**ในระยะแรก การสร้างองค์ประกอบ (5Q) ของการสื่อสารเชิงควอนตัมจะเป็นขั้นตอนแรก ซึ่งต้องจำเป็นต้องทำวิจัย และพัฒนาอุปกรณ์ในหัวข้อต่อไปนี้**	
	• โฟตอนคู่หรือมากกว่าที่มีคุณสมบัติพัวพัน (entangle single photon source: ESPS) เป็นภาคส่ง และ ระบบการตรวจวัดโฟตอนดังกล่าว (single photon detection: SPD) เป็นภาครับ	4/5/4
	• วงจรเชิงแสงเพื่อการประมวลผลข้อมูลขนาดระดับชุดทดลอง (bulk optical circuit: BOC)	4/2/5
	• เครื่องสร้างจำนวนสุ่มเชิงควอนตัม (QRNG) ระดับห้องปฏิบัติการ หรือ ทดสอบใช้ในภาคสนามจริง รวมไปถึงทรัพย์สินทางปัญญาที่เกี่ยวข้อง	5/3/5
	• ตัวขยายสัญญาณเชิงควอนตัม (quantum repeater, QR) ของโฟตอนเดี่ยว	5/5/3
	• QS หรือ BQC ระดับห้องปฏิบัติการ	5/5/3
	• พัฒนาวงจรแสงแบบรวม (Integrated Optical Circuit) สำหรับใช้งานกับแสงโพราไรซ์ (polarized light)	5/5/3
	• สร้างและทดสอบระบบ LMI	5/5/3 (average 4.2)
6 ปี	**เป้าหมายในระยะกลางคือการการนำอุปกรณ์จาก 5Q มารวมเข้าเป็นระบบการสื่อสารควอนตัมในระดับชุดทดสอบ (test bed) เพื่อเป็นกระบวนการขั้นพื้นฐาน การพัฒนาศักยภาพและความพร้อมนำไปใช้งานในระดับปฏิบัติการของอุปกรณ์แต่ละชนิดก็ต้องได้รับการพัฒนาควบคู่ไปด้วย**	5/5/3

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
	• ชุดทดสอบระบบเข้ารหัสโดยใช้แสง (Testbed bulk optic QKD system) จากอุปกรณ์ 5Q	5/5/3
	• OC บนระบบ waveguide (OWC) ในส่วนการ coupling, fabrication, loss-free, คุณสมบัติเชิงแสงที่ทำงานได้เหมือนอุปกรณ์บน BOC เช่น *polarizers,* wave plates, polarization beam splitters, เลนส์	5/5/3
	• SPS ที่มีประสิทธิภาพ (efficiency) สูงขึ้นให้ entanglement state ที่มีค่า fidelity สูงและสามารถ entangle จำนวน qubit ที่มากขึ้นได้เพื่อประโยชน์ในการ error correction, universal qubit processing ควบคู่กับการย่อส่วนเทคโนโลยีให้สามารถสร้างได้ในระบบ OWC	5/5/3
	• SPD ที่มีคุณภาพสูงมากขึ้น และ มีความพร้องในการย่อขยายให้สามารถฝังในระบบ OWC ได้ ประกอบร่วมกับ SPS ต้องพัฒนาให้ bitrate สูงขึ้น	5/5/3
	• การสร้าง QRNG ลงบนระบบ OWC มี bitrate ที่สูงขึ้น	5/5/3
	• QR ในระบบ OWC และ มีขีดสามารถในการเพิ่มระยะทางการสื่อสารให้สูงขึ้น	5/5/2
	• พัฒนาภาครับ-ส่งสัญญาณเป็น ground station และ payload เพื่อการสื่อสารผ่านดาวเทียม โดยจะต้องร่วมมือกับหน่วยงานต่างประเทศในส่วนของดาวเทียมและระบบ payload	5/5/3
	• ระบบการสื่อสารเชิงควอนตัมทั้งระบบใช้ OWC และ ในเคเบิล โดยมีการศึกษาความเป็นไปได้ของการรั่วไหล/โจรกรรมข้อมูลในทางปฏิบัติ พร้อมทั้งการป้องกันแก้ไข (privacy amplification)	5/5/4 (average 4.3)
	• QKD Certification	
10 ปี	• ระบบการสื่อสารเชิงควอนตัม และโครงข่ายควอนตัม (quantum network) ที่ระบบส่ง-รับข้อมูลพัฒนาบน OWC หรือ BOC สำหรับระบบสื่อสารใน free space หรือ ระบบดาวเทียม	5/5/2
	• Commercialized repeater/QKD	5/5/2 (average 4.2)

แผนที่นำทาง



รูปที่ 11 เป้าหมายและแผนที่นำทางของการสื่อสารเชิงควอนตัม

2.2 เป้าหมายการใช้ประโยชน์ (*Application Goals*)

- ระยะ 3 ปี

  เนื่องจากในช่วงแรกยังเป็นการสร้างอุปกรณ์พื้นฐานสำหรับระบบรวม ความเป็นประโยชน์โดยตรงด้านการสื่อสารจึงยังไม่เกิดจนกว่าจะได้นำอุปกรณ์เหล่านี้ไปพัฒนาเป็นที่สมบูรณ์ข้างต้น

  อย่างไรก็ดีเนื่องจากการพัฒนาอุปกรณ์เหล่านี้ล้วนเป็นการพัฒนาอุปกรณ์โดยใช้หลักการของสารสนเทศเชิงควอนตัม (quantum information) ในทางอ้อมจึงเป็นการพัฒนาอุปกรณ์ทาง quantum information โดยใช้แสง ซึ่งสามารถเป็นพื้นฐานในการพัฒนาของเทคโนโลยีควอนตัมสาขาอื่นได้ทั้งมาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัม การคำนวณเชิงควอนตัม และการจำลองเชิงควอนตัม ทั้งในส่วนที่ใช้แสงเป็นคิวบิทโดยตรง และการเป็นส่วนประกอบสำคัญของเทคโนโลยีทัศนศาสตร์ในทุกเทคโนโลยีเกี่ยวกับสารสนเทศเชิงควอนตัม อีกทั้งยังสามารถพัฒนาต่อไปสู่การใช้งานในระดับอุตสาหกรรมที่อาศัยกระบวนการทัศนศาสตร์ อาทิ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ให้มีขีดความสามารถที่สูงขึ้น

- ระยะ 6 ปี

เนื่องจากระยะกลางแบ่งการดำเนินการสองแนวทาง แนวทางแรกคือการพัฒนาอุปกรณ์ต่าง ๆ ให้มีศักยภาพสูงขึ้น ซึ่งย่อมส่งผลดีโดยตรงต่อระบบ quantum communication ในระยะต่อไป อีกทั้งยังพัฒนาขีดความสามารถของเทคโนโลยีทัศนาศาสตร์เพื่อรองรับการใช้ประโยชน์ในงานวิจัย quantum technology ด้วยกัน และ ภาคอุตสาหกรรมต่อไป

ในอีกแนวทางหนึ่งคือการสร้างอุปกรณ์ทัศนศาสตร์ลงบนนระบบ OWC ซึ่งจะช่วยพัฒนาให้อุปกรณ์มีขนาดเล็กลงและมีคุณภาพสูงขึ้นเนื่องจากจะถูกรบกวนได้ยากขึ้น สามารถต่อยอดไปสู่การพัฒนาอุปกรณ์ทางทัศนศาสตร์เช่นเดียวกับในระยะ 3 ปีแรก แต่จะมีคุณภาพและความแม่นยำที่สูงขึ้น และเนื่องด้วยช่วงท้ายของระยะ 6 ปี มีเป้าหมายที่จะสร้างระบบการสื่อสารควอนตัมตามสายเคเบิลเต็มระบบ จึงจะนำมาใช้งานในการสื่อสารที่ต้องการความปลอดภัยสูงที่สามารถกระทำผ่านสายได้เช่น การสื่อสารระหว่างหน่วยงานที่ไม่มีข้อจำกัดต่อการวางสายไฟ โดยจะมุ่งเป้าไปที่สถาบันการเงิน และหน่วยงานความมั่นคง

- ระยะ 10 ปี

เป้าหมายของระยะสุดท้ายจะเป็นการสร้างระบบโครงข่ายการสื่อสารความปลอดภัยสูงโดยใช้ระบบควอนตัมซึ่งพุ่งเป้าระยะยาวในการใช้งานในระบบสื่อสารในทุกระดับทั้งครัวเรือน หน่วยงาน และหน่วยงานที่ต้องอาศัยการสื่อสารที่ปลอดภัยสูงอย่างยิ่งเช่น หน่วยงานความมั่นคงและสถาบันการเงิน

2.3 ปัจจัยสนับสนุนที่จำเป็น (*Enabling Tools*)

1) หน่วย silicon waveguide และ ring resonator fabrication
2) semiconductor หรือระบบทางเลือกอื่น ๆ เพื่อสร้าง light-sources และ photons detector ฝังในระบบ waveguide
3) ระบบสนับสนุนการสื่อสารผ่านดาวเทียม มีโครงสร้างพื้นฐานสำหรับพัฒนา ground station และมีความร่วมมือเพื่อใช้ระบบ payload บนดาวเทียม (พัฒนาโดยความร่วมมือการวิจัยกับต่างชาติ เช่น จีน หรือ แคนาดา)

2.4 งบประมาณโดยประมาณ

ระยะเวลา	กิจกรรมวิจัย	งบประมาณรายปี (ล้านบาท)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3 ปี	1. การพัฒนา QRNG, QR, QS, BQC ในระบบ BOC	60	12	11							
	2. สร้างระบบ SPS และ SPD	20	6	3							
	3. สร้าง/ปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานห้องแลบ	35									

	4. พัฒนา Integrated Optical Circuit ใช้งานกับแสง Polarized	30	10	8							
	5. พัฒนา LMI	45	12	8							
6 ปี	1. พัฒนาขีดความสามารถ QRNG, QR, QS, BQC,LMI ในระบบ BOC				35	5	3				
	2. เพิ่มคิวบิทในระบบ SPS เป็น 18 คิวบิท				35	5	3				
	3. พัฒนา SPD ศักยภาพสูง				3	5	5				
	4. การสร้าง Optical Chips ระบบควบคุม และนำแสงเข้า OWC				35	5	11				
	5. SPS บน OWC				10	5	5				
	6. SPD บน OWC				25	5	3				
	7. พัฒนา LMI ขนาดเล็กหรือ OWC				42	5	3				
	8. การสร้างระบบสื่อสารทั้งระบบบน OWC และ privacy amplification					20	12	10			
	9. สร้าง/ปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานสำหรับ ground station/ห้องแลบ				11						
	10. ระบบอิเล็กทรอนิกส์/ทัศนศาสตร์สำหรับ ground station				24	5	5				
10 ปี	ระบบการสื่อสารเชิงควอนตัม และโครงข่ายควอนตัมใน free space หรือ ระบบดาวเทียม							300	70	60	60
รวมงบประมาณรายปี (ล้านบาท)		**190**	**40**	**30**	**220**	**60**	**50**	**310**	**70**	**60**	**60**

3. *Integrated Quantum Sensors for All*

มาตรวิทยาและการตรวจวัดเชิงควอนตัม (quantum metrology and sensing) อาศัยปรากฏการณ์ทางควอนตัม อาทิ สภาวะทับซ้อนทางควอนตัม (quantum superposition) การแยกระดับชั้นของพลังงาน (quantized energy levels) และ/หรือ สภาวะพัวพัน (entanglement) สำหรับวัดปริมาณที่สนใจ เช่น เวลา ความเข้มสนามแม่เหล็ก เป็นต้น มาตรวิทยาและการตรวจวัดเชิงควอนตัมสามารถเกิดขึ้นได้ในหลายวิธี

วิธีแรกคือการใช้อนุภาคในระดับควอนตัม ในการวัดปริมาณทางควอนตัม (quantum quantity) หรือปริมาณทางกายภาพแบบดั้งเดิม (classical quantity) โดยที่อนุภาคในระดับควอนตัมสามารถนิยามโดยสถานะชั้นพลังงานทางควอนตัมทั้งสถานะพลังงานชั้นแบบละเอียดและแบบสุดละเอียด (fine and hyperfine structures) รวมถึงสถานะการซ้อนทับทางควอนตัม และสปินต่าง ๆ

วิธีที่สองคือการใช้ความเป็นโคฮีเรนต์ในระบบควอนตัม (quantum coherence) หรือการควบคุมความโคฮีเรนต์ (decoherence) นั่นคือคุณสมบัติของคลื่นในการวัดปริมาณต่าง ๆ

วิธีที่สามคือการใช้สถานะพัวพันทางควอนตัม (quantum entanglement) เพื่อเพิ่มความไวหรือความละเอียดของการวัดได้

มาตรวิทยาและการตรวจวัดเชิงควอนตัมได้มีการนำมาใช้จริงแล้วในปัจจุบัน ตัวอย่างระบบทางควอนตัมที่สำคัญและได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในมาตรวิทยา เช่น อุปกรณ์สารตัวนำยิ่งยวดเชิงควอนตัม (superconducting quantum devices) ระบบอะตอมในสถานะแก๊ส (atomic vapors) อย่างอะตอมเย็น (cold atoms) หรืออะตอมเย็นยิ่งยวด (Bose-Einstein condensation) ระบบการกักไอออน (trapped ions) ซึ่งสามารถนำมาใช้งานจริง เช่น ในการทำนาฬิกาอะตอม (atomic clock) เครื่องตรวจวัดความเข้มสนามโน้มถ่วง (gravimeter) หรืออินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ของอะตอม (atom interferometer) เป็นต้น

ในการก้าวข้ามขีดจำกัดของการวัดในรูปแบบเดิมให้ได้ค่าที่มีความแม่นยำมากขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ดังเช่น นาฬิกาอะตอมที่สามารถบอกเวลาได้แม่นยำและมีความคลาดเคลื่อนเพียง 1 วินาที ในทุก ๆ หลายพันล้านปี ซึ่งเทียบกับนาฬิกาเชิงกลซึ่งคลาดเคลื่อน 1 วินาทีทุก ๆ 10 ปี ความแตกต่างที่มากนี้ทำให้เกิดประโยชน์และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบระบุตำแหน่งด้วยดาวเทียมนำทาง (global navigation satellite systems: GNSS) ที่สามารถระบุตำแหน่งได้แม่นยำในระดับเซนติเมตร และถ้าพัฒนาต่อไปให้ความแม่นยำอยู่ในระดับมิลลิเมตร ก็น่าจะทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ ๆ ออกมาอีกมากมาย เช่น การขับรถอัตโนมัติสำหรับคนตาบอด

การตรวจวัดเชิงควอนตัมยังมีศักยภาพสูงในการใช้ประโยชน์ในอีกหลายหัวข้อ เช่น การพบว่าหน่วยตรวจวัดเชิงควอนตัมแบบโซลิดสเตต (solid-state quantum sensor) ที่ใช้สมบัติของเพชรที่มีช่องว่างไนโตรเจน (nitrogen-vacancy center in diamond) สามารถวัดสภาพแม่เหล็กที่มีค่าน้อยมาก ๆ ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์เชิงการแพทย์ในการถ่ายภาพ และการวิเคราะห์เนื้อเยื่อที่มีความละเอียดสูง อาจทำให้เกิดนวัตกรรมเพื่อใช้ในการวัดคลื่นสมอง (brainwave) เพื่อเข้าใจการทำงานของสมอง ซึ่งจะนำไปสู่การแปลความคิดที่ซับซ้อนของคนได้อย่างแม่นยำมากขึ้น การใช้หลักการของโจเซฟสัน (Josephson) และปรากฏการณ์ควอนตัมฮอลล์ (quantum Hall effect) ซึ่งให้ค่าแรงดันไฟฟ้า และความต้านทานที่มีความเที่ยงตรงสูง ก่อให้เกิดวิธีการวัดปริมาณทางไฟฟ้าที่มีความละเอียดสูง อันเป็นรากฐานสำคัญทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหลาย การใช้การแทรกสอดทางควอนตัมในการวัดค่าความโน้มถ่วงของโลกที่จะเป็นประโยชน์ในการสำรวจทรัพยากร หรือการเตือนภัยจากการเปลี่ยนแปลงใต้พิภพ หรือการใช้สภาวะพัวพันทางควอนตัม (quantum entanglement) ของแสงในการถ่ายภาพที่ได้ข้อมูลเพิ่มจากแบบปกติถึงแม้ในส่วนที่ทึบแสงของวัตุ เป็นต้น และที่สำคัญค่ามาตรฐานทางมาตรวิทยาจะมีการปรับให้แม่นยำขึ้นอีกมากด้วยเทคนิคที่ใช้หลักการทางควอนตัม

3.1 เป้าหมายสำคัญและแผนที่นำทาง (Milestones & Roadmap)

- ระยะ 3 ปี
  - สร้างอุปกรณ์และผลงานวิจัยที่แสดงถึงความสามารถในการวัดเชิงควอนตัมที่เหนือกว่าการวัดแบบเดิมโดยวัดจากความละเอียด (resolution) และความสเถียร (stability) ที่สูงกว่า เช่น การวัดสภาพแม่เหล็กและอุณหภูมิด้วยผลึกเพชรที่มีช่องว่างไนโตรเจน (nitrogen vacancy center) อุปกรณ์สปินทรอนิกส์ วอลเลย์ทรอนิกส์

และเรโซเนเตอร์ (spintronics/valleytronics/resonator) ที่อาศัยคุณสมบัติทางควอนตัม, นาฬิกาอะตอมเชิงแสงที่มีเสถียรภาพสูง การวัดสภาพความโน้มถ่วงและสภาพแม่เหล็กจากการแทรกสอดเชิงอะตอม เครื่องวัดความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลกเพื่อใช้ในงานธรณีวิทยา (การหาน้ำมันใต้ดิน และก๊าซธรรมชาติ แผ่นดินไหว และการหาแหล่งน้ำใต้ดิน) และมาตรวิทยา ที่เป็นนวัตกรรมที่พัฒนาขึ้นเองภายในประเทศ (innovative Thailand) โดยอยู่บนพื้นฐานของปรากฏการณ์ทางควอนตัมของอินเตอร์เฟียรอมิเตอร์ของคลื่นสสาร

- เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีเฉพาะทาง ซึ่งนอกจากการประยุกต์ใช้ในทางควอนตัมแล้ว ยังสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหรือวิชาชีพอื่นได้ เช่น กล้องจุลทรรศน์สามมิติสำหรับวัดสภาพแม่เหล็กใน ผลึกเพชรที่มีช่องว่างไนโตรเจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการแพทย์และทางชีวเคมี และการสร้างอุปกรณ์สุญญากาศสำหรับนาฬิกาอะตอมสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตได้
- เกิดงานวิจัยที่มีการเชื่อมโยงความรู้ทางการวัดเชิงควอนตัมเพื่อการสร้างนวัตกรรมอื่น เช่น ระบบกักเก็บพลังงาน
- การสร้างความยอมรับเชิงวิชาการทางด้านการวัดเชิงควอนตัมในเวทีโลก (global visibility) จากงานวิจัยที่มีคุณภาพ

○ ระยะ 6 ปี

- สร้างต้นแบบของอุปกรณ์ควอนตัมที่เหมาะสมในเรื่องขนาดและฟังก์ชันการใช้งาน เช่น การทำเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีขนาดเล็กพอที่จะติดเข้ากับเครื่องวัดแรงระดับอะตอม (atomic force microscope) ที่ใช้ในการสแกนภาพ และการทำนาฬิกาอะตอมขนาดเล็กเพื่อใช้ในการสร้างโครงข่ายเวลาที่มีจังหวะเดียวกันทั้งประเทศไทย (ประเทศไทยเวลาเดียว) ต้นแบบระดับภาคสนามของเครื่องวัดความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก (portable gravimeter) ที่ได้ทดสอบการใช้งานกับบริษัทสำรวจและขุดเจาะน้ำมันใต้ดิน ก๊าซธรรมชาติหรือการหาแหล่งน้ำใต้ดิน สามารถพัฒนาต่อยอดไปสู่ธุรกิจการสำรวจและขุดเจาะน้ำมันหรือทรัพยากรอื่น ๆ ต่อไป
- ต้นแบบวัดค่ามาตรฐานทางมาตรวิทยาของไทยให้เป็นที่ยอมรับในระดับนานาชาติ
- การบ่มเพาะเชิงธุรกิจ ร่วมถึงมีแนวทางในการสร้างห่วงโซ่อุปทาน เช่น การจัดหาวัสดุ (materials supply) และการผลิตชิ้นส่วนพื้นฐาน

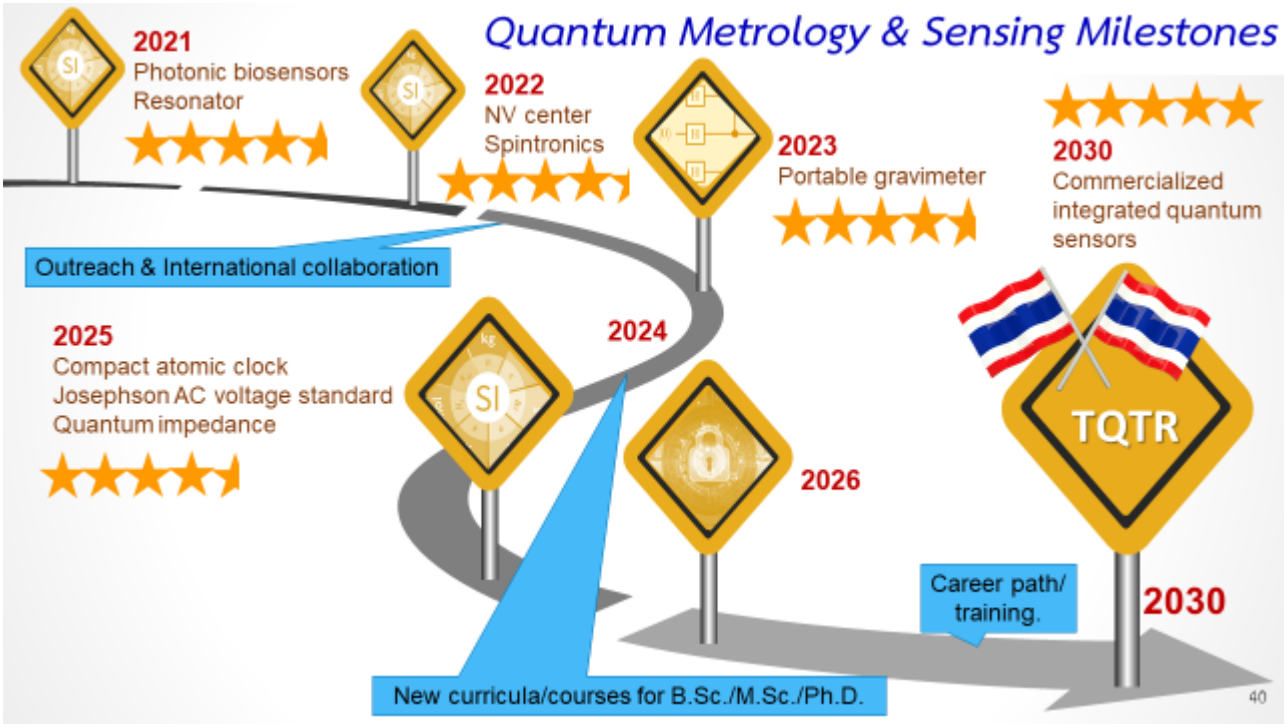
○ ระยะ 10 ปี

- การเปลี่ยนต้นแบบไปสู่การใช้ประโยชน์จริงเชิงธุรกิจเป็นอุปกรณ์ควอนตัมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย และประเทศไทยมี product champions ของตัวเอง หรืออย่างน้อยต้องเป็นหนึ่งในผู้ผลิตชิ้นส่วนหลักที่ใช้ในอุปกรณ์ควอนตัม

เป้าหมายและกรอบเวลา

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
3 ปี	• portable gravimeter • atomic magnetometer • atomic clock (uncertainty 10^{-15}) • resonator • NV center sensors • spintronic sensors • Silicon-photonic biosensors	4/5/5 4/4/5 5/5/5 5/2/5 5/3/5 5/3/5 5/5/3 (average 4.3)
6 ปี	• compact atomic clock • Josephson junction AC voltage standard • Quantum Impedance • atomic clock (uncertainty 10^{-18})	4/5/4 5/4/5 4/5/3 5/5/5 (average 4.6)
10 ปี	• Kibble balance (uncertainty 10^{-8}) • Commercializable integrated quantum sensors	5/5/5 5/5/5 (average 5.0)

แผนที่นำทาง



รูปที่ 12 เป้าหมายและแผนที่นำทางของมาตรวิทยาและการตรวจวัดเชิงควอนตัม

3.2 เป้าหมายการใช้ประโยชน์ (Application Goals)

- ระยะ 3 ปี

  ในช่วงแรก งานวิจัยที่ลงทุนจะเป็นการเพิ่มขีดความสามารถให้กับประเทศไทย และผลงานวิจัยที่เกิดขึ้นจะเป็นการช่วยให้ประเทศไทยได้รับความยอมรับในเวทีโลกมากขึ้น ที่จะนำไปสู่ความร่วมมือที่จะเกิดประสิทธิผลมากขึ้น ทั้งนี้ ความรู้ทางการวัดเชิงควอนตัมบางส่วนอาจจะไปช่วยเสริมการสร้างนวัตกรรมด้านอื่นที่มีความพร้อมในระดับหนึ่งอยู่แล้ว เช่น ระบบกักเก็บพลังงานและเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าแบบดั่งเดิม ระบบนาฬิกาอะตอมเชิงแสงเพื่อใช้งานเป็นเวลามาตรฐานประเทศไทย ไทย และเครื่องตรวจวัดสนามโน้มถ่วงของโลกเพื่อเป็นข้อมูลของงานด้านธรณีวิทยา

- ระยะ 6 ปี

  ต้นแบบของอุปกรณ์ควอนตัมที่เหมาะสมในเรื่องขนาดและฟังก์ชันการใช้งานจะใช้ในการประชาสัมพันธ์ให้มีผู้มาลงทุนและเกิดทางบ่มเพาะเชิงธุรกิจ เช่น การทำเซ็นเซอร์แม่เหล็กที่มีขนาดเล็กจะสามารถนำมาใช้เชิงการแพทย์ในการถ่ายภาพที่สูงกว่าเดิมรวมถึงการคาดว่าจะช่วยการแปลผลความคิดจากของคลื่นสมองที่ซับซ้อนขึ้นได้ การมีเครือข่ายของเวลาจะช่วยทางด้านความปลอดภัยของประเทศ และการบอกตำแหน่งในโครงข่ายพิกัดความละเอียดสูงด้วยดาวเทียม (GNSS) ที่ละเอียดถึงระดับมิลลิเมตรและสร้างนวัตกรรมใหม่ได้

แน่นอน แต่อาจจะยังคาดเดาไม่ได้ในตอนนี้ การวัดเชิงไฟฟ้าจะแม่นยำมากขึ้นในราคาต้นทุนที่ต่ำลงจนเกิดแผนธุรกิจแบบใหม่

- ระยะ 10 ปี

  การบ่มเพาะจะนำไปสู่การวัดเชิงควอนตัมและระบบเซ็นเซอร์ควอนตัมที่มีความสามารถเกินระบบที่ใช้ปัจจุบันอย่างมีนัยสำคัญและมีใช้กันอย่างแพร่หลายโดยเฉพาะในรูปแบบเครือข่าย โดยการเตรียมความพร้อมที่ดีของไทยจะช่วยให้เรามีผลิตภัณฑ์เป็นของเราเองหรืออย่างน้อยเป็นผู้ผลิตชิ้นส่วนสำหรับอุปกรณ์ควอนตัมระดับโลก การวัดค่ามาตรฐานทางมาตรวิทยาจะทำได้ในประเทศไทย

3.3 ปัจจัยสนับสนุนที่จำเป็น (Enabling Tools)

1) micro- and nano-fabrication capabilities
2) supply of robust and low-cost components (e.g. stable lasers, optics, optomechanics)
3) facility for making small-scale vacuum systems
4) supply of proper materials e.g. high purity diamond

3.4 งบประมาณสำหรับการวิจัย Quantum metrology and sensing

งบประมาณถูกประมาณโดยแบ่งรายการแบ่งเป็น 2 ส่วน

3.4.1 งบประมาณสำหรับ Infrastructure (ไม่รวมงบดำเนินการ)

Infrastructure สำหรับ quantum metrology & sensing	**งบประมาณเฉพาะ Infrastructure** (ล้านบาท)				
	ปีที่ 1	**ปีที่ 2**	**ปีที่ 3**	**ปีที่ 4**	**ปีที่ 5**
1) การบริหารงานแบบ virtual institute ของกลุ่ม quantum metrology & sensing เพื่อการประสานงานกลาง และการใช้เครื่องมือร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการ และการประสานพัฒนาเชิงธุรกิจ (startup/business incubator)	5.0	5.0	3.5	4.0	4.0
2) ห้องปฏิบัติการกลางสำหรับสร้างอุปกรณ์และเซ็นเซอร์ควอนตัมในระดับนาโนเมตร ประกอบไปด้วย: ห้อง cleanroom, ระบบทำ Lithography (laser writer, E-beam lithography, mask writer), metal/insulator deposition system	40.0	30.0	5.0	5.0	5.0

Infrastructure สำหรับ quantum metrology & sensing	งบประมาณเฉพาะ Infrastructure (ล้านบาท)				
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
3) เครื่องมือวิทยาศาสตร์พื้นฐานเชิงแสง และแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น ระบบการวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมของการเรืองแสง, วงจรอิเล็กทรอนิกส์ความเร็วสูง, เครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์, photodiode และระบบประมวลสัญญาณโฟตอน, ชุดควบคุมแสงแบบ confocal, ultrafast lasers, photon detector และอื่น ๆ	55.0	55.0	25.0	26.0	6.0
4) ระบบเตรียมวัสดุเฉพาะทาง เช่น reactive bias target ion beam deposition, RF sputtering	45.0	10.0	6.5	6.5	6.5
5) machine shop สำหรับระบบสุญญากาศและชิ้นงานเฉพาะทาง และ electronic shop สำหรับสนับสนุนการสร้างต้นแบบเซ็นเซอร์	15.0	10.0	5.0	5.0	5.0
รวมงบประมาณ infrastructure (ล้านบาท)	**160.0**	**110.0**	**45.0**	**46.5**	**26.5**

3.4.2 งบดำเนินการตามหัวข้อของงานวิจัย (quantum device) ที่จะสร้าง

หัวข้องานวิจัย หรือ ชื่อ Quantum device	งบประมาณ (ล้านบาท) (รวม Infrastructure แล้ว)				
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
นาฬิกาอะตอมเชิงแสงด้วยไอออนเย็นของธาตุ Ytterbium และ Rubidium	21.0	22.0	31.0	16.0	0.0
ระบบควอนตัมในของแข็งเพื่อการวัด และควอนตัมคอมพิวเตอร์	25.0	25.0	25.0	25.0	25.0
การพัฒนาและสถาปนาการสอบกลับได้ในการวิเคราะห์วัสดุขั้นสูง	20.0	5.0	0.0	0.0	0.0
ห้องปฏิบัติการกลางสำหรับสร้างอุปกรณ์และเซ็นเซอร์ควอนตัมในระดับนาโนเมตร	50.0	30.0	20.0	5.0	5.0
การวัดเชิงควอนตัมของปริมาณทางไฟฟ้ากระแสสลับ	15.0	29.0	6.0	25.0	5.0
การวิจัยด้าน spintronics และ quantum spectroscopy	60.0	20.0	20.0	20.0	0.0
วิจัยด้าน optical plane for cold quantum transport of neutral atoms in two dimensions	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
เครื่องวัดความโน้มถ่วงของโลก (Gravimeter) ที่ระดับความแม่นยำอย่างน้อย $\Delta g/g=10^{-7}$	15.0	15.0	10.0	0.0	0.0
ระบบวัดโฟตอนผ่านเส้นใยนำแสงแม่นยำสูง	12.0	5.0	3.0	0.0	0.0

หัวข้องานวิจัย หรือ ชื่อ Quantum device	งบประมาณ (ล้านบาท) (รวม Infrastructure แล้ว)				
	ปีที่ 1	ปีที่ 2	ปีที่ 3	ปีที่ 4	ปีที่ 5
เซ็นเซอร์ควอนตัมที่ใช้กับโฟตอน (photon-based quantum sensors), และระบบมาตรวิทยาควอนตัมเชิงแสง (optical quantum metrology)	25.0	15.0	5.0	0.0	0.0
การบริหารงานแบบ virtual institute ของกลุ่ม quantum metrology & sensing เพื่อการประสานงานกลาง และการใช้เครื่องมือร่วมกันระหว่างห้องปฏิบัติการ และการประสานพัฒนาเชิงธุรกิจ (startup/business incubator)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
machine shop สำหรับระบบสุญญากาศและชิ้นงานเฉพาะทาง และ electronic shop สำหรับสนับสนุนการสร้างต้นแบบเซ็นเซอร์	15.0	10.0	5.0	5.0	5.0
รวมงบดำเนินการรวมรายปี (ล้านบาท)	**282.0**	**200.0**	**149.0**	**120.0**	**64.0**

4. การศึกษาและการอบรมฝึกทักษะด้านเทคโนโลยีควอนตัม (Education and Training in Quantum Technology)

การสร้างเทคโนโลยีควอนตัมนั้นจำเป็นต้องใช้ศาสตร์มากมายในหลากหลายแขนง ความซับซ้อนของการคำนวณหรือการสร้างเครื่องมือที่ละเอียดอ่อนนั้นยืนพื้นอยู่บนความรู้ความเข้าใจในธรรมชาติอย่างลึกซึ้ง การสร้างโครงสร้างการศึกษาที่เป็นระบบจะช่วยให้บุคคลากรโดยเฉพาะเยาวชนในประเทศเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพและรวดเร็วซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการแข่งขันของประเทศโดยตรง

โครงสร้างการศึกษาพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีควอนตัมควรจะสอดคล้องกับงานวิจัยในสามเสาหลักโดยเครือข่ายเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาติ (Thailand Quantum Technology Consortium) เพื่อย่อยงานวิจัยให้เล็กลง อยู่ในรูปสื่อการสอนที่สามารถทำความเข้าใจได้ง่าย สามารถพัฒนาเป็นต้นแบบในเชิงพาณิชย์ได้ และสามารถย้อนกลับมาเสริมสร้างศักยภาพในการทำวิจัยหลักได้

เพื่อให้การดำเนินงานของเครือข่ายเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาติประสบผลสำเร็จ การพัฒนาเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และแนวคิดรวบยอดใหม่ นั้นเป็นสิ่งที่จะต้องทำให้มีชีวิตชีวาและดำเนินไปอย่างต่อเนื่องอยู่เสมอ อนึ่งในขณะที่เทคโนโลยีควอนตัมบางเทคโนโลยีมาถึงช่วงที่กำลังสุกงอม พร้อมที่จะนำเปลี่ยนผ่านไปสู่การประยุกต์ใช้ในเชิงอุตสาหกรรมนั้น คำถามปลายเปิดทางวิทยาศาสตร์เป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการเรียนรู้ทั้งในภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติสำหรับพัฒนาการประยุกต์ใช้ที่หลากหลายมากขึ้น และสำหรับสร้างความยืดหยุ่นในวิวัฒนาการของเครือข่ายเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาติด้วย ในการนี้ความสามารถรวมทั้งในด้านกลศาสตร์ควอนตัมและกลศาสตร์แบบฉบับยังเป็นสิ่งจำเป็นต่อการพัฒนาเครื่องมือ ส่วนประกอบ วัสดุ หรือแม้แต่กระบวนการที่ทำให้การดำเนินงานของเครือข่ายเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาติบรรลุประสงค์ โดยอาจกล่าวได้ว่า ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ใหม่จะก่อกำเนิดเทคโนโลยีควอนตัมใหม่ที่แตกต่าง

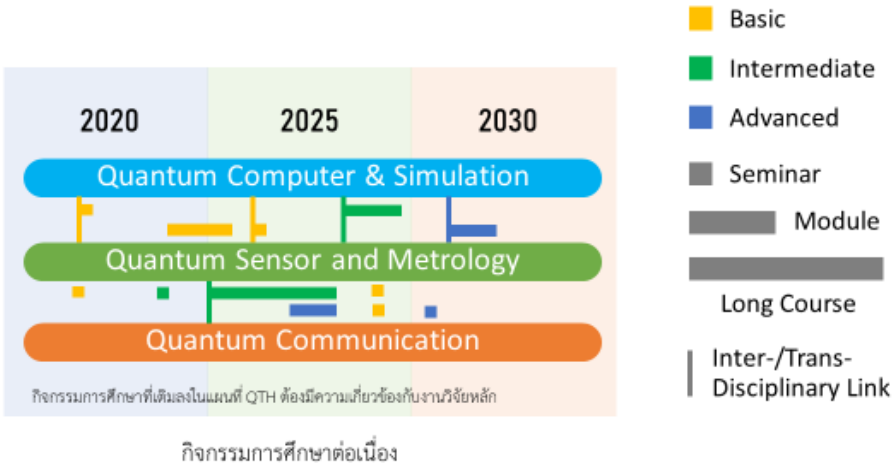
ออกไป โดยในมุมกลับกัน เทคโนลียีควอนตัมใหม่ก็กระตุ้นให้เกิดคำถามใหม่ ๆ ที่ต้องการคำตอบใหม่ ด้วยองค์ความรู้แบบใหม่ด้วย ความพยายามในการศึกษาเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมนั้นเต็มไปด้วยความมุ่งมั่นเพื่อมุ่งเข้าสู่จุดหมายที่ตั้งไว้ นอกจากนี้ยังเกี่ยวข้องกับองค์ความรู้แวดล้อมอื่น ๆ ในหลากหลายสาขาวิชาที่อาจเปลี่ยนแปลงได้ทุกเมื่อ ดังนั้นการเรียบเรียงรายชื่อหัวข้อที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในช่วงเวลาหนึ่งให้สมบูรณ์จึงแทบเป็นไปไม่ได้ และการเปิดหัวข้อคำถามไว้โดยไม่จำกัดสาขาวิชาที่จะใช้แก้ปัญหาจึงเป็นสิ่งสมควร ซึ่งจะรวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบทางสังคมและพื้นฐานทางจริยธรรมในการใช้เทคโนโลยีควอนตัมด้วย

เทคโนโลยีควอนตัมอยู่บนจุดตัดร่วมระหว่างฟิสิกส์ วิศวกรรม วิทยาศาสตร์คอมพิวเตอร์ และสาขาที่เกี่ยวข้องหลากหลายสาขา การฝึกทักษะวิศวกรควอนตัมที่ประสบความสำเร็จ หรือบุคลากรที่ตระหนักเกี่ยวกับเทคโนโลยีควอนตัมนั้นควรจะเป็นวัตถุประสงค์สำคัญสำหรับการเริ่มต้นเครือข่ายเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาตินี้ นอกจากนี้ควรเปิดโอกาสให้มีการเปิดรับบุคลากรด้านการถ่ายทอดการศึกษาสู่โรงเรียน หรือชุมชน เพื่อทำหน้าที่ประสานงานภายในกลุ่มเป้าหมายที่มีตัวแทนจากกลุ่มนักวิจัยหลักที่ได้รับทุนวิจัยและบุคคลทั่วไป

กลุ่มเป้าหมายนี้ควรพุ่งเป้าไปที่การมีผลกระทบต่อการปรับปรุงหลักสูตรการเรียนการสอนฟิสิกส์ วิศวกรรมศาสตร์และวิทยาศาสตร์ข้อมูลภายในสถาบันการศึกษาทั่วประเทศ รวมทั้งระดับมหาวิทยาลัย และระดับโรงเรียน กลุ่มเป้าหมายควรสนับสนุนการสร้างและการกระจายสื่อการสอนให้ครอบคลุมทั้งประเทศ และควรมีโปรแกรมฝึกทักษะนักเรียนมัธยมหรือนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ดุษฎีบัณฑิต หรือหลังจบปริญญา และมีการเชิญกวิทยาศาสตร์เยือนจากต่างประเทศมาให้ความรู้ หรือมาทำงานวิจัยร่วมกัน

4.1 เป้าหมายสำคัญและแผนที่นำทาง (Milestones & Roadmap)

แผนการดำเนินงานการศึกษาสำหรับเทคโนโลยีควอนตัมจะสอดคล้องกับแผนที่นำทางของแต่ละสาขาของเทคโนโลยีควอนตัม โดยพอจะสรุปเป็นแผนภาพได้ดังนี้



รูปที่ 13 ตัวอย่างกิจกรรมทางด้านการศึกษาของเครือข่ายเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาติ

ในส่วนของการพัฒนาบุคลากรที่เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีควอนตัม การออกแบบโครงสร้างการศึกษา หลักสูตร และรายวิชาที่สอนมีความสำคัญอย่างยิ่ง รวมทั้งแนวทางการส่งเสริมที่ให้เกิดการเรียนรู้อย่างต่อเนื่อง โดยรวมแล้วสามารถสรุปเป็นแผนงานระยะสั้น ระยะกลาง และระยะยาวได้ดังนี้

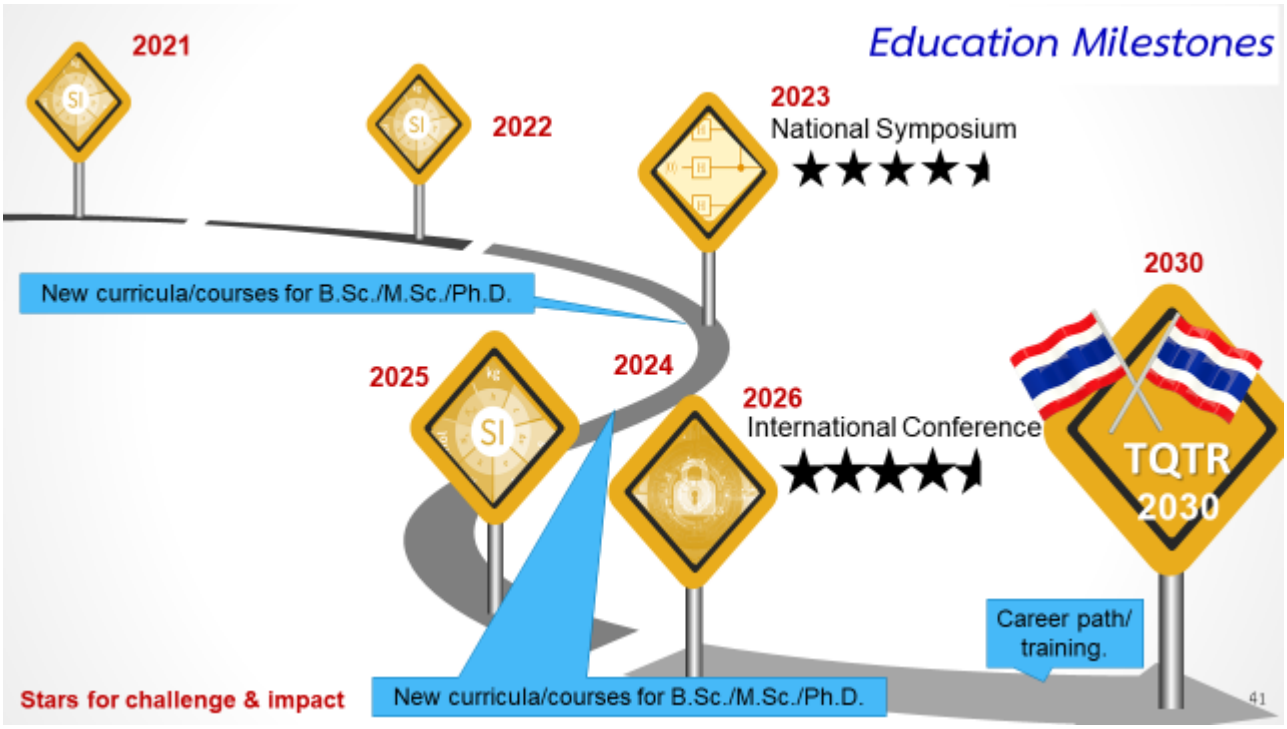
- ระยะ 3 ปี
  - รายวิชาการเรียนรู้ระดับปริญญาตรี โท และเอกที่ส่งเสริมทักษะเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีควอนตัม
  - กิจกรรม หรือหัวข้อการเรียนสำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษา
  - การจัดกิจกรรมสัมมนาระดับชาติ (national symposium) สำหรับเผยแพร่ความรู้ด้านเทคโนโลยีควอนตัม
  - ออกแบบเนื้อหาการอบรมสัมมนาสำหรับเครดิตย่อย (micro credentials) ด้านเทคโนโลยีควอนตัม
- ระยะ 6 ปี
  - การปรับเนื้อหาในหลักสูตรแกนกลางระดับมัธยมศึกษาให้เชื่อมโยงกับการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม
  - การสร้างหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษาสำหรับนักวิจัย และผู้ใช้เทคโนโลยีควอนตัม
- ระยะ 10 ปี
  - สร้างเส้นทางอาชีพ (career path) สำหรับผู้เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีควอนตัม
  - สร้างองค์กร และกิจกรรมสำหรับการพัฒนานักวิจัย และผู้ใช้อย่างต่อเนื่อง โดยจะเป็นการศึกษาในรูปแบบสหสาขา (multidisciplinary) หรือข้ามสาขา (trans-disciplinary) ที่สอดคล้องกับการพัฒนานวัตกรรมและการขับเคลื่อนด้านอุตสาหกรรม

เป้าหมายและแผนที่นำทาง

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
3 ปี	• รายวิชาการเรียนรู้ระดับปริญญาตรี โท และเอกที่ส่งเสริมทักษะเหมาะสมสำหรับเทคโนโลยีควอนตัม • กิจกรรม หรือหัวข้อการเรียนสำหรับนักเรียนระดับมัธยมศึกษา • การจัดกิจกรรมสัมมนาระดับชาติสำหรับเผยแพร่ความรู้ด้านเทคโนโลยีควอนตัม • ออกแบบเนื้อหาการอบรมสัมมนาสำหรับเครดิตย่อย (micro credentials) ด้านเทคโนโลยีควอนตัม	4/4/5 4/4/5 4/4/5 4/5/5
6 ปี	• การปรับเนื้อหาในหลักสูตรแกนกลางระดับมัธยมศึกษาให้เชื่อมโยงกับการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม	4/5/5

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
	• การสร้างหลักสูตรระดับบัณฑิตศึกษาสำหรับนักวิจัย และผู้ใช้เทคโนโลยีควอนตัม	4/5/5
10 ปี	• สร้างเส้นทางอาชีพสำหรับผู้เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีควอนตัม • สร้างองค์กร และกิจกรรมสำหรับการพัฒนานักวิจัย และผู้ใช้อย่างต่อเนื่อง โดยจะเป็นการศึกษาในรูปแบบสหสาขาหรือข้ามสาขาที่สอดคล้องกับการพัฒนานวัตกรรม และการขับเคลื่อนด้านอุตสาหกรรม	5/5/5 5/5/5

แผนที่นำทาง



รูปที่ 14 เป้าหมายและแผนที่นำทางของการพัฒนาการศึกษาด้านเทคโนโลยีควอนตัม

4.2 ปัจจัยสนับสนุนที่จำเป็น (Enabling Tools)

1) เครื่องเก็บข้อมูล (server) สำหรับสร้างฐานข้อมูล และเก็บข้อมูล

4.3 งบประมาณ

ในส่วนการศึกษาเทคโนโลยีควอนตัม งบประมาณได้ถูกประเมินไว้สำหรับ 2 ส่วน คือส่วนที่เกี่ยวข้องกับการสร้างกำลังคนโดยตรง ซึ่งอาจจะใช้ในรูปของทุนการศึกษา หรือค่าลงทะเบียน และส่วนที่เกี่ยวข้องกับการบริหารจัดการ เช่น การจัดประชุมในระดับชาติ/นานาชาติ หรือสร้างคลังข้อมูล

7.4.2.1 งบประมาณการศึกษาเทคโนโลยีควอนตัม (เฉพาะกำลังคน)

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
3 ปี	พัฒนากำลังคน: นักศึกษาปริญญาเอกหรือเทียบเท่า ในโครงการวิจัย รวม 32 คน	80.0
6 ปี	พัฒนากำลังคน: นักศึกษาปริญญาเอกหรือเทียบเท่า ในโครงการวิจัย รวม 64 คน	160.0
10 ปี	พัฒนากำลังคน: นักศึกษาปริญญาเอกหรือเทียบเท่า ในโครงการวิจัย รวม 128 คน	320.0
งบประมาณรวม (ล้านบาท)		**560.0**

หมายเหตุ:

1. นักศึกษาปริญญาเอก 1 คน อาจแทนได้ด้วย นักศึกษาปริญญาโท 2 คน หรือ นักศึกษาปริญญาตรี 4 คน
2. ศูนย์เทคโนโลยีควอนตัม สิงคโปร์ (CQT) ใช้เงินประมาณ 15 ล้านดอลลาร์สหรัฐ หรือประมาณ 450 ล้านบาทต่อปี ในเฉพาะส่วนกำลังคนด้านการศึกษา (Annual Report 2013, Center for Quantum Technologies, National University of Singapore, หน้า 56). ในปี พศ. 2556 โปรแกรมเทคโนโลยีควอนตัมแห่งชาติ, สหราชอาณาจักร (UK National Quantum Technology Programme) ใช้งบประมาณ 50 ล้านยูโรต่อห้าปี หรือประมาณ 500 ล้านบาทต่อปี สำหรับการฝึกและพัฒนาทักษะด้านเทคโนโลยีควอนตัม และ ใช้งบ 16.5 ล้านยูโร ต่อห้าปี หรือประมาณ 165 ล้านบาทต่อปี สำหรับให้ทุนการศึกษาด้านเทคโนโลยีควอนตัม

4.2.2 **งบประมาณการจัดการการศึกษาเทคโนโลยีควอนตัม**

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
3 ปี	1. ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 ครั้ง	3.0
	2. ประชุมวิชาการระดับชาติ 3 ครั้ง	3.0
	3. โครงสร้างสนับสนุนโครงข่ายการศึกษา เทคโนโลยีสารสนเทศ คลังข้อมูล และการประมวลผล	5.0
	4. งบบริหารจัดการ การประชุม การเดินทาง การจัดทำเอกสาร	1.0
6 ปี	1. ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 ครั้ง	4.0
	2. ประชุมวิชาการระดับชาติ 3 ครั้ง	4.0
		5.0

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
	3. โครงสร้างสนับสนุนโครงข่ายการศึกษา เทคโนโลยีสารสนเทศ คลังข้อมูล และการประมวลผล 4. งบบริหารจัดการ การประชุม การเดินทาง การจัดทำเอกสาร	1.0
10 ปี	1. ประชุมวิชาการระดับนานาชาติ 1 ครั้ง 2. ประชุมวิชาการระดับชาติ 3 ครั้ง 3. โครงสร้างสนับสนุนโครงข่ายการศึกษา เทคโนโลยีสารสนเทศ คลังข้อมูล และการประมวลผล 4. งบบริหารจัดการ การประชุม การเดินทาง การจัดทำเอกสาร	5.0 5.0 6.0 2.0
งบประมาณรวม (ล้านบาท)		**44.0**

5. การเผยแพร่สู่สาธารณะ (Quantum Public Outreach)

การพัฒนาบุคลากรนักวิจัยและเผยแพร่ความรู้ด้านเทคโนโลยีควอนตัมเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาและส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย อย่างไรก็ตามประเทศไทยเป็นประเทศรายได้ปานกลาง นอกจากศักยภาพการวิจัยที่เข้มแข็งแล้ว นักวิจัยมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องเข้าใจปัญหาของภาคอุตสาหกรรมทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ เพื่อสามารถสร้างนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ความต้องการของประเทศในระยะสั้นและระยะกลางได้ รวมถึงเพื่อสร้างความร่วมมือกับภาคเอกชน ทำให้เกิดการพัฒนาทั้งส่วนวิชาการและอุตสาหกรรมไปด้วยกันอย่างยั่งยืนได้ นอกจากนี้ การสร้างให้เกิดแรงขับเคลื่อนจากฝ่ายการเมือง (political will) ในการลงทุนวิจัยด้านเทคโนโลยีนี้จากภาครัฐก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน ฉะนั้นการสร้างความตระหนักของสาธารณชน (public awareness) จากกลุ่มผู้สร้างเทคโนโลยีจึงเป็นสิ่งที่ขาดไม่ได้

5.1 กลุ่มเป้าหมายและแผนการดำเนินงาน

- ประชาคมวิจัย ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรม

  ชุมชนของนักวิจัยที่มีความเข้าใจรอบด้านทั้งในด้านวิทยาศาสตร์ นวัตกรรม การลงทุนสังคมศาสตร์ และความต้องการด้านอุตสาหกรรมของประเทศไทย อาทิเช่น นักวิจัยที่เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างกฎหมายและควอนตัมคอมพิวเตอร์ หรือ ระหว่างรหัสลับเชิงควอนตัมและเทคโนโลยีบล็อกเชน เป็นต้น แผนการดำเนินการจะสนับสนุนวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้ ได้แก่ เชื่อมโยงบุคลากรจากหลายภาคส่วนในประเทศไทยเข้ามาร่วมผลักดันเทคโนโลยีควอนตัม ทั้งจากภาคอุตสาหกรรม นักฟิสิกส์ควอนตัม รวมถึงวิศวกรอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ และสาขาอื่นที่เกี่ยวข้อง โดยเน้นให้นักฟิสิกส์ควอนตัมในประเทศ ทั้งสายทฤษฎี และสายทดลองสามารถเชื่อมโยงงานบางส่วนของตนเองเข้ากับภาคอุตสาหกรรมได้

ผลงานที่จะเกิดขึ้นเพื่อนำไปสู่การเชื่อมโยงภาคส่วนข้างต้นได้แก่ การจัดสัมมนาออนไลน์สำหรับประชาชนทั่วไป สัมมนาออนไลน์สำหรับนักวิทยาศาสตร์และนักวิจัย งานประชุมเชิงปฏิบัติการ งานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ (เพื่อทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนองค์ความรู้ที่ทันสมัยและกระตุ้นให้เกิดความร่วมมือด้านการวิจัยระหว่างนักวิจัยไทยกับนักวิจัยต่างประเทศ) งานสร้างเครือข่ายระหว่างภาคการศึกษากับภาคอุตสาหกรรม ค่ายอบรมเพื่อการศึกษาเทคโนโลยีควอนตัม แหล่งการเรียนรู้ออนไลน์ รวมถึงการออกแบบซอฟท์แวร์แบบเปิด (open source software) สำหรับการใช้งานควอนตัมคอมพิวเตอร์ หรือการสร้างปัญญาประดิษฐ์ที่ได้แรงบันดาลใจมาจากกฎฟิสิกส์ควอนตัม เป็นต้น

- ภาครัฐ ผู้กำหนดนโยบาย และ ประชาชนทั่วไป

  การสร้างแรงขับเคลื่อนจากฝ่ายการเมือง (political will) ให้เกิดการลงทุนในทคโนโลยีควอนตัมจากภาครัฐอย่างต่อเนื่องจะทำให้เกิดการพัฒนาอย่างยั่งยืน ฉะนั้นการเผยแพร่ความรู้และสร้างกิจกรรมให้เห็นถึงความสำคัญของเทคโนโลยีควอนตัม สู่ภาครัฐ ภาคนโยบาย และ ประชาชนทั่วไปจึงมีความจำเป็น

  ผลงานที่จะเกิดขึ้นเพื่อนำไปสู่การมีส่วนร่วมและการมีความตระหนักจากภาคส่วนเหล่านี้ได้แก่ การเผยแพร่ความรู้ด้านเทคโนโลยีควอนตัมผ่านทางสื่อมวลชน ไม่ว่าจะเป็นการเขียนบทความเกี่ยวกับชุมชนควอนตัมในไทยหรือผลกระทบกับชีวิตประจำวันจากเทคโนโลยีควอนตัมในไทยผ่านทางสื่อออนไลน์หรือหนังสือพิมพ์ การที่นักวิจัยได้เข้าไปเผยแพร่ความรู้ด้านเทคโนโลยีควอนตัมในการประชุมด้านเทคโนโลยีในไทยต่าง ๆ เช่น Techsauce Global Summit, True Digital Park การสัมภาษณ์สดทางโทรทัศน์ต่าง ๆ นอกจากนี้ประชาชนทั่วไปสามารถมีส่วนร่วมได้มากขึ้นจากการจัดค่ายหรือกิจกรรมพบปะแลกเปลี่ยนเรียนรู้ (quantum meeting) ซึ่งสามารถจัดได้ในสถานที่ทำงานร่วม (co-working space) ต่าง ๆ เป็นต้น ทั้งหมดนี้จะทำให้ภาคส่วนเหล่านี้ได้เห็นความสำคัญของการลงทุนในเทคโนโลยีควอนตัม ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่จะเปลี่ยนแปลงสังคมมนุษย์ในอนาคต

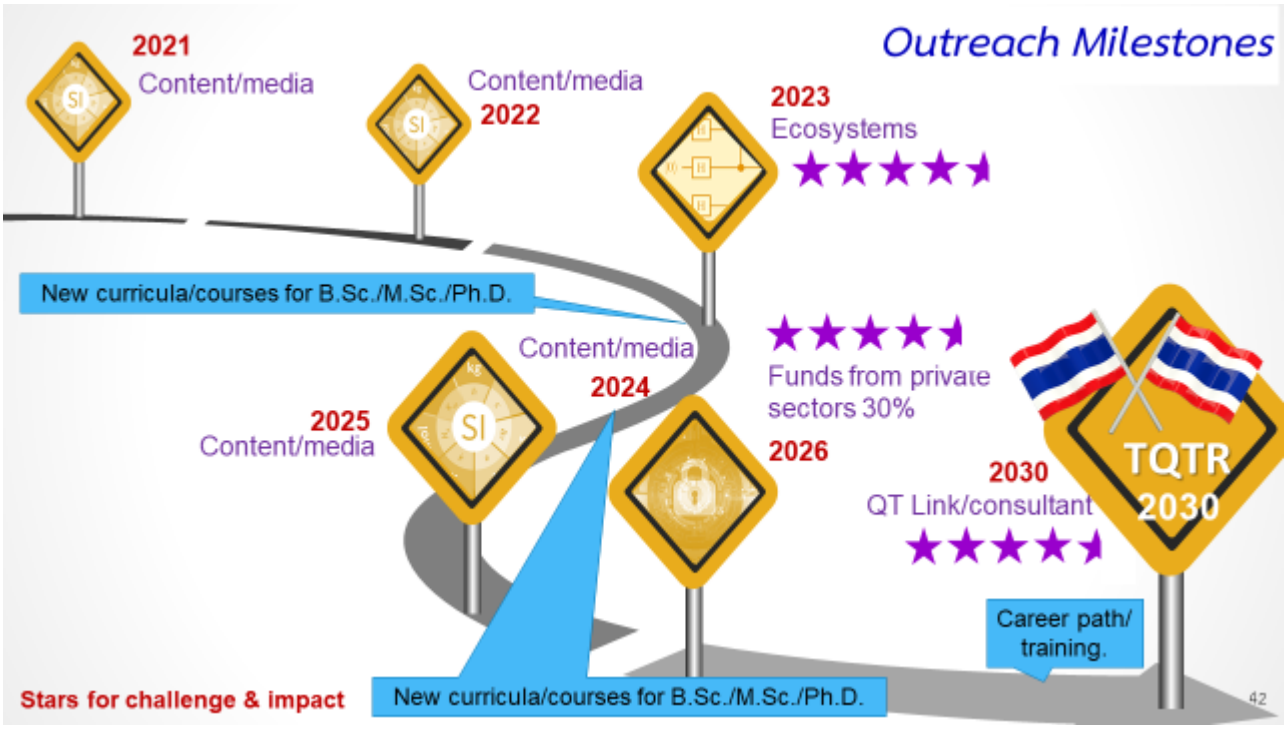
5.2 ปัจจัยสนับสนุนที่จำเป็น (Enabling Tools)

1) เงินทุนและทีมงานสำหรับการจัดกิจกรรม สัมมนา ภายในประเทศ
2) เงินทุนและทีมงานจากหลายภาคส่วนที่เป็นตัวแทนนักวิจัยควอนตัมเพื่อสื่อสารกับสื่อมวลชนได้อย่างถูกต้องแม่นยำ
3) เงินทุนและทีมงานสำหรับการเชื่อมโยงภาคส่วนอุตสาหกรรมเข้ากับภาคการศึกษา ชี้ให้เกิดปัญหาที่ทำร่วมกันและช่วยเหลือเกื้อกูลกันได้
4) เงินทุนและทีมงานสำหรับการผลักดันให้เกิดความร่วมมือการวิจัยระหว่างไทยและต่างประเทศ

เป้าหมายและแผนที่นำทาง

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
3 ปี	• สร้างความตระหนัก และความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับเทคโนโลยีควอนตัม • สร้างแรงขับเคลื่อนจากสาธารณชนและฝ่ายการเมือง (public and political wills) • สร้างระบบนิเวศวิจัยสำหรับประชาคมนักวิจัย และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง	5/5/4 5/5/4 5/4/5
6 ปี	• กิจกรรมส่งเสริมการลงทุนร่วมระหว่างภาครัฐ และเอกชนในการส่งเสริมและพัฒนางานวิจัย	4/4/5
10 ปี	• ตัวเชื่อมโยงการนำผลงานวิจัยไปขยายผลในเชิงอุตสาหกรรม และการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศ	5/4/5

แผนที่นำทาง



รูปที่ 15 เป้าหมายและแผนที่นำทางด้านการเผยแพร่สู่สาธารณะ

5.3 งบประมาณ

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
3 ปี	• ทำสื่อ และ content สำหรับเผยแผร่สาธารณชน • อบรมให้ความรู้แก่สาธารณชน • ทำ workshop ตามระดับ users 5 ครั้งต่อปี	45.0 (7.0 + 38.0)
6 ปี	• ทำสื่อ และ content สำหรับเผยแผร่สาธารณชน • อบรมให้ความรู้แก่สาธารณชน • ทำ workshop ตามระดับ users 5 ครั้งต่อปี	60.0 (15.0 + 45.0)
10 ปี	• ทำสื่อ และ content สำหรับเผยแผร่สาธารณชน • อบรมให้ความรู้แก่สาธารณชน • ทำ workshop ตามระดับ users 5 ครั้งต่อปี	90.0 (20 + 70)
งบประมาณรวม (ล้านบาท)		**195.0**

6 งานวิศวกรรมศาสตร์

เพื่อให้การพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมเป็นไปได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ นักวิทยาศาสตร์ควอนตัมจำเป็นต้องได้รับการสนับสนุนเชิงเทคนิคเชิงวิศวกรรมมากมายจากวิศวกรควอนตัม เช่น การขึ้นรูปชิ้นงาน การออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ การควบคุมการทดลอง รวมถึงการนำผลงานวิจัยไปสร้างต้นแบบ (prototype) เพื่อการผลิตเชิงพาณิชย์ หรือการใช้งานเชิงอุตสาหกรรม

นักฟิสิกส์วิศวกรรม (engineering physicist) นักวิทยาศาสตร์ซึ่งมีความรู้เชิงลึกเกี่ยวกับระบบเชิงปฏิบัติการทางควอนตัม สามารถทำการวิจัยและพัฒนาระบบเหล่านี้ได้ในเชิงวิทยาศาสตร์ เช่น การรักษาสถานะทางควอนตัม (quantum coherence) และการควบคุมเชิงควอนตัม (quantum control) และสามารถสื่อสารความต้องการทางเทคนิคกับวิศวกรควอนตัมเพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาทางการวิจัยร่วมกันได้

วิศวกรควอนตัม (quantum engineer) วิศวกรสายพันธุ์ใหม่ที่มีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับการทดลองเชิงควอนตัม โจทย์ปัญหางานวิจัยควอนตัมในเชิงวิศวกรรม และมีความรู้เชิงลึกในศาสตร์ที่มีความสำคัญต่อการแก้ปัญหางานวิจัยเหล่านั้น เช่น วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมวัสดุ รวมถึงวิศวกรรมนาโน เพื่อนำเทคโนโลยีวิศวกรรมที่ทันสมัยมาประยุกต์ใช้ ไม่ว่าจะเป็นในเชิงการออกแบบ การสร้างอุปกรณ์ หรือการควบคุมระบบปฏิบัติการเชิงควอนตัม

6.1 กลุ่มเป้าหมายและแผนการดำเนินงาน

พื้นฐานงานวิศวกรรมศาสตร์ควอนตัมจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัม โดยการสร้างรากฐานการผลิตและการพัฒนาอุปกรณ์เชิงวิศวกรรมขั้นสูง ส่งเสริมความสัมพันธ์ระหว่างนักวิทยาศาสตร์และวิศวกร และผลิตวิศวกรยุคใหม่ซึ่งสามารถนำองค์ความรู้ไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ไม่ว่าจะเป็นสาขาเทคโนโลยีควอนตัม หรือสาขาอื่น ๆ และสามารถต่อยอดไปสู่การสร้างต้นแบบผลิตภัณฑ์เชิงพาณิชย์ได้

เนื่องจากระบบปฏิบัติการเชิงควอนตัมมีหลายประเภท เช่นระบบอะตอม ระบบตัวนำยวดยิ่ง และระบบสปินในของแข็ง ดังนั้น เพื่อผลประโยชน์สูงสุดในการสนับสนุนงานวิจัยในทุกด้าน งานวิศวกรรมควอนตัมในระยะเริ่มต้นจะต้องเน้นในการวางรากฐานการวิจัยที่สำคัญในเทคโนโลยีที่ยังไม่มีในประเทศไทย โดยเฉพาะเทคโนโลยีที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบปฏิบัติการเชิงควอนตัมได้หลากหลาย เช่นการขึ้นรูปชิ้นงานในระดับนาโนเมตร การผลิตวงจรไฟฟ้าความถี่สูงในย่านคลื่นไมโครเวฟ การออกแบบระบบควบคุมการทดลองเชิงควอนตัม เป็นต้น

สำหรับระยะกลางและระยะยาว การพัฒนารากฐานการวิจัยที่แข็งแกร่ง ประกอบกับการพัฒนาระบบปฏิบัติการเชิงควอนตัมชนิดต่าง ๆ ควบคู่กัน พื้นฐานงานวิศวกรรมควอนตัมจะสามารถตอบโจทย์ปัญหาเฉพาะทางใหม่ ๆ ที่จะเกิดขึ้นในระบบควอนตัมที่จำเพาะเจาะจง และเป็นโอกาสสำหรับประเทศไทยที่จะเป็นเจ้าของเทคโนโลยีเฉพาะทางเหล่านี้ได้

6.2 เป้าหมายการใช้ประโยชน์ (*Application Goals*)

- ระยะ 3 ปี

  Education and scientific research

- ระยะ 6 ปี

  Optimization and quantum advantage in solving important problems in science, economics and in industries such as cryptosystems, election auditing, lotteries and ‘proof of stake’ cryptocurrencies

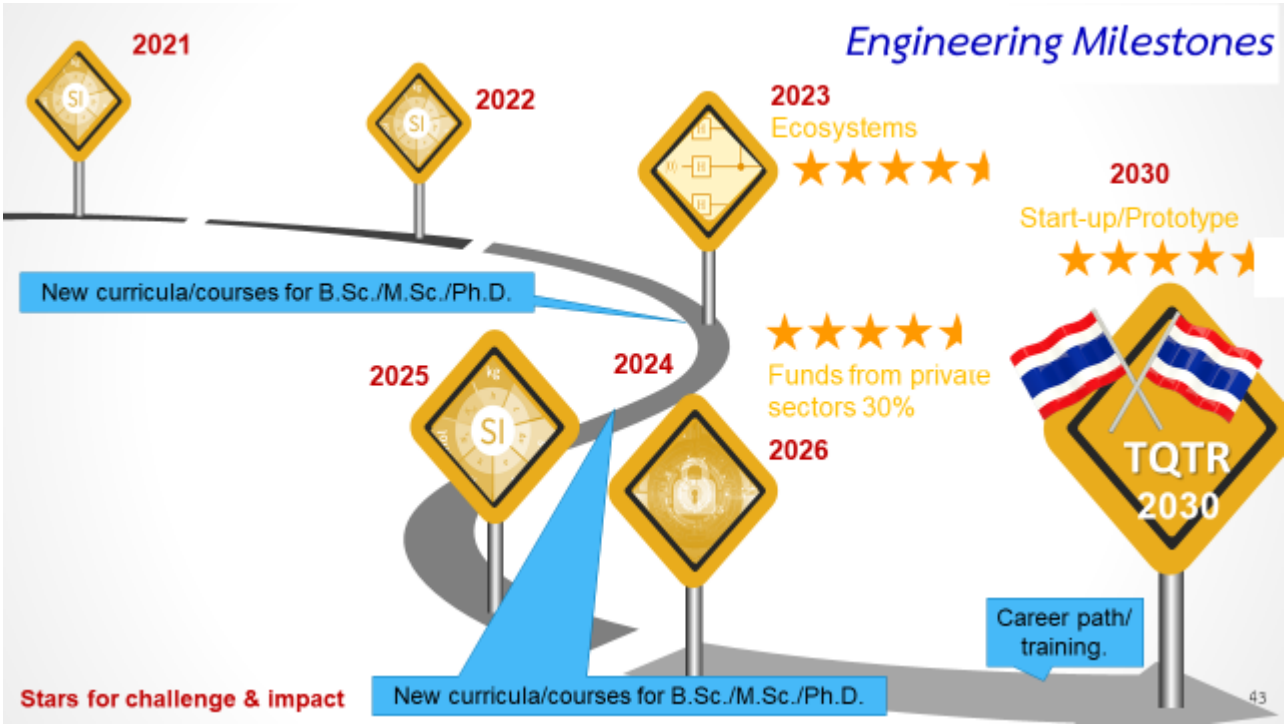
- ระยะ 10 ปี

  Solving problems in quantum chemistry, novel materials and drug designs and full engagement with clients in major target industries.

เป้าหมายและกรอบเวลา

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
3 ปี	• รากฐานการวิจัยที่สำคัญในเทคโนโลยีที่ยังไม่มีในประเทศไทย ที่สามารถสนับสนุนระบบปฏิบัติการเชิงควอนตัมได้หลากหลาย เช่น โครงสร้างพื้นฐาน/ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมนาโน สำหรับการสร้างชิ้นงานระดับนาโนเมตร โครงสร้างพื้นฐานสำหรับสร้าง	

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
	อุปกรณ์เชิงแสง โครงสร้างพื้นฐานสำหรับสร้างอุปกรณ์เชิงไฟฟ้าและไมโครเวฟ เป็นต้น • อุปกรณ์จำเป็นที่ไม่ซับซ้อนสำหรับทำการทดลองด้านเทคโนโลยีควอนตัม และสามารถสนับสนุนระบบปฏิบัติการเชิงควอนตัมได้หลากหลาย เช่น เลเซอร์ที่สามารถเปลี่ยนไดโอดได้ อุปกรณ์วัดความถี่แสงความละเอียดสูง • กลุ่มวิศวกรควอนตัม ซึ่งมีความรู้เฉพาะทาง	
6 ปี	• อุปกรณ์จำเป็นระดับซับซ้อน สำหรับสนับสนุนระบบปฏิบัติการเชิงควอนตัมอย่างจำเพาะ เช่น ระบบเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นจำเพาะ และมีเสถียรภาพสูง ระบบชิปโฟโตนิกส์ แผงวงจรควบคุมไมโครเวฟความเร็วสูง	
10 ปี	ต้นแบบนวัตกรรมเทคโนโลยีควอนตัมที่ประเทศไทยเป็นเจ้าของ • ต้นแบบอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ สำหรับงานวิจัยเชิงควอนตัม • ต้นแบบสำหรับอุตสาหกรรมเป้าหมาย สตาร์ทอัพ	



รูปที่ 16 เป้าหมายและแผนที่นำทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ที่สนับสนุนการวิจัยเทคโนโลยีควอนตัม

6.3 ปัจจัยสนับสนุนที่จำเป็น (*Enabling Tools*)

1) โครงสร้างพื้นฐาน/ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมนาโน สำหรับการสร้างชิ้นงานระดับนาโนเมตร

2) โครงสร้างพื้นฐานสำหรับสร้างอุปกรณ์เชิงแสง

3) โครงสร้างพื้นฐานสำหรับสร้างอุปกรณ์เชิงไฟฟ้า และไมโครเวฟ

4) เครือข่ายนักวิจัยที่ประกอบด้วยนักวิทยาศาสตร์ควอนตัม และวิศวกรควอนตัม

5) หลักสูตรการศึกษาอบรมที่สามารถนำไปสู่การผลิตวิศวกรควอนตัม

6.4 งบประมาณ

ในส่วนงานวิศวกรรมศาสตร์ งบประมาณจะถูกตั้งผ่านหน่วยบริหารโครงการ (PMU) งบประมาณในส่วนนี้เป็นส่วนที่โครงการวิจัยย่อยสามารถเข้าถึงได้ในรูปแบบของการขออุปกรณ์ ซึ่งทีมวิศวกรรมจะเป็นผู้สร้างให้ งบประมาณได้ถูกประเมินไว้สำหรับ 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นค่าวัตถุดิบ และส่วนค่าดำเนินการ

6.4.1 งบประมาณสำหรับงานวิศวกรรมศาสตร์ (วัตถุดิบ)

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
3 ปี	พัฒนาอุปกรณ์จำเป็นที่ไม่ซับซ้อนสำหรับทำการทดลองด้านเทคโนโลยีควอนตัม	55.0
6 ปี	พัฒนาอุปกรณ์จำเป็นระดับซับซ้อน และผลิตต้นแบบนวัตกรรมเทคโนโลยีควอนตัม	30.0
10 ปี	ผลิตต้นแบบนวัตกรรมเทคโนโลยีควอนตัมสำหรับอุตสาหกรรมเป้าหมาย สตาร์ทอัพ และนำอุปกรณ์เครื่องช่วยต่าง ๆ ที่ผลิตได้มาสร้างโครงข่ายระบบนิเวศเทคโนโลยีควอนตัม	46.0
งบประมาณรวม (ล้านบาท)		**131.0**

6.4.2 งบประมาณสำหรับงานวิศวกรรมศาสตร์ (ค่าดำเนินการ)

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
3 ปี	พัฒนาอุปกรณ์จำเป็นที่ไม่ซับซ้อนสำหรับทำการทดลองด้านเทคโนโลยีควอนตัม	30.0
6 ปี	พัฒนาอุปกรณ์จำเป็นระดับซับซ้อน และผลิตต้นแบบนวัตกรรมเทคโนโลยีควอนตัม	30.0
10 ปี	ผลิตต้นแบบนวัตกรรมเทคโนโลยีควอนตัมสำหรับอุตสาหกรรมเป้าหมาย สตาร์ทอัพ และนำอุปกรณ์เครื่องช่วยต่าง ๆ ที่ผลิตได้มาสร้างโครงข่ายระบบนิเวศเทคโนโลยีควอนตัม	46.0
งบประมาณรวม (ล้านบาท)		**106.0**

7 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมเพื่อการพัฒนาประเทศ (Application of Quantum Technology for Prosperity of Thailand)

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมเป็นหัวใจสำคัญในการพัฒนาและส่งเสริมให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมในประเทศไทย และเป็นองค์ประกอบสำคัญในแผนพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมฉบับนี้ เพราะนอกเหนือจากการพัฒนาคุณภาพชีวิต และเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานแล้ว มันเป็นการแสดงให้สาธารณชนเห็นเชิงประจักษ์ถึงประโยชน์ของเทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ ซึ่งจะสร้างความตระหนักในสังคม และกระตุ้นความร่วมมือในการวิจัยร่วมกับเอกชน และระหว่างหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง สำหรับประเทศไทยนอกจากการเพิ่มศักยภาพการวิจัยให้เข้มแข็งแล้ว นักวิจัยในเครือข่ายวิจัยเทคโนโลยีควอนตัมยังจำเป็นต้องเข้าใจปัญหาของภาคอุตสาหกรรมทั้งภายในประเทศและนอกประเทศ เพื่อให้สามารถสร้างนวัตกรรมที่ตอบโจทย์ความต้องการของประเทศในระยะสั้น และระยะยาวได้ ความร่วมมือระหว่างหลายองค์รวมทั้งภาคเอกชน ทำให้เกิดการพัฒนาทั้งส่วนวิชาการและอุตสาหกรรมไปด้วยกันอย่างยั่งยืนได้ การประยุคใช้เทคโนโลยีควอนตัมยุคใหม่ อาจจะตีความได้สองแนวทาง คือ

(1) การวิจัยขั้นพื้นฐาน (fundamental research) เพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมเฉพาะอย่างที่มีจุดประสงค์จะนำไปใช้งานจริง อาทิ การผลิตหน่วยตรวจวัดเชิงควอนตัม (quantum sensors) เพื่อตรวจวัดปริมาณสารพิษในเลือด หรือการสร้างอัลกอริทึมควอนตัมเพื่อแก้ปัญหาการจัดการน้ำ เป็นต้น

(2) การวิจัยเชิงพัฒนาชิ้นงาน (research and development: R&D) เพื่อนำเทคโนโลยีควอนตัมที่มีอยู่แล้วในเครือข่ายวิจัย หรือในท้องตลาด มาสร้างเป็นชิ้นงานที่ตอบโจทย์เฉพาะด้าน อาทิ การใช้หน่วยตรวจวัดจากมาตรวิทยาเชิงควอนตัม มาสร้างเป็นอุกรณ์เพื่อวัดสภาพมลพิษในอากาศ (เช่น PM2.5) ที่มีความแม่นยำสูง และประมวลผลได้รวดเร็ว

การวิจัยทั้งสองแนวทางมีความสำคัญในตัวของมันเอง จึงควรทำขนานไปพร้อมกับการวิจัยเทคโนโลยีควอนตัมในเสาหลักทั้ง 3 สาขา นอกจากนี้การวิจัยทั้ง 2 แนวทาง มีความท้าทาย และมีผลกระทบต่อการพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยในหลายมิติ ในเบื้องต้นนักวิจัยจักต้องระบุปัญหาที่จะประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมให้ชัดเจน และต้องเตรียมพร้อมเทคโนโลยีควอนตัมที่เกี่ยวข้องมาใช้ให้ทันเวลา และเกิดประโยชน์ชัดเจน ในอนาคตเมื่อเทคโนโลยีควอนตัมมีการพัฒนาแล้วอย่างแพร่หลาย จะทำให้ชิ้นส่วนอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยีควอนตัมมีราคาถูกลง การวิจัยประยุกต์ก็จะมีบทบาทมากขึ้นในเชิงพานิชย์ จึงจำเป็นต้องเตรียมพร้อมผู้ใช้งาน ผ่านการศึกษาและการพัฒนากำลังคนควบคู่ไปด้วยกัน

7.1 กลุ่มเป้าหมายและแผนการดำเนินงาน

- ประชาคมวิจัยชุมชนของนักวิจัยในหลากหลายสาขา เช่น การแพทย์ เภสัชกรรม วัสดุศาสตร์ เกษตรกรรม ฯลฯ ที่สนใจนำเทคโนโลยีควอนตัมมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยของตน
- ภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมที่สนใจประยุกต์ใช้ หรือสร้างต้นแบบของเทคโนโลยีควอนตัมจากผลการวิจัย และขยายสู่เชิงพานิชย์

แผนการดำเนินการจะสนับสนุนการเชื่อมโยงบุคลากรจากหลายภาคส่วน หลายกลุ่มสาขาวิจัย เข้ามาร่วมผลักดันเทคโนโลยีควอนตัม โดยเฉพาะภาคอุตสาหกรรม เกษตรกรรม การคมนาคม และสาธารณสุขที่เห็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมได้ชัดเจน

7.2 เป้าหมายการใช้ประโยชน์ (*Application Goals*)

○ ระยะ 3 ปี

การประยุกต์ใช้เทคโนโลโลยีควอนตัมในสาขาอื่น อาทิ เภสัชกรรม เกษตรกรรม ตัวอย่างโจทย์วิจัย เช่น

- การพัฒนาเทคโนโลยีโฟโตนิกส์สำหรับอุตสาหกรรมเกษตร และอาหาร
- การประยุกต์ใช้มาตรวิทยาและการวัดเชิงควอนตัมสำหรับความแม่นยำในทางเกษตรกรรม และความปลอดภัยในอาหาร
- การศึกษาปรากฏการณ์เชิงควอนตัมในระบบชีวภาพ
- การสร้างระบบสังเคราะห์แสงเทียมสำหรับพืชเศรษฐกิจของไทย

○ ระยะ 6 ปี

สาธิตการเพิ่มผลผลิต หรือประสิทธิภาพการผลิตโดยใช้เทคโนโลยีควอนตัม เช่น

- ผลผลิตทางการเกษตรและอาหารแบบใหม่โดยใช้เทคโนโลยีโฟโตนิกส์
- การลดต้นทุนการผลิตได้มากกว่า 30%
- เพิ่มคุณภาพของพืชมากกว่า 25%
- การสร้างความมั่นคงทางผลผลิต
- เทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม
- การสร้างระบบสังเคราะห์แสงแบบใหม่
- เทคโนโลยีใหม่สำหรับความปลอดภัยในอาหารที่เพิ่มความปลอดภัยในอาหารมากกว่า 80%
- เทคโนโลยีขั้นสูงสำหรับการตรวจจับสุขภาพในเวลาจริง

○ ระยะ 10 ปี

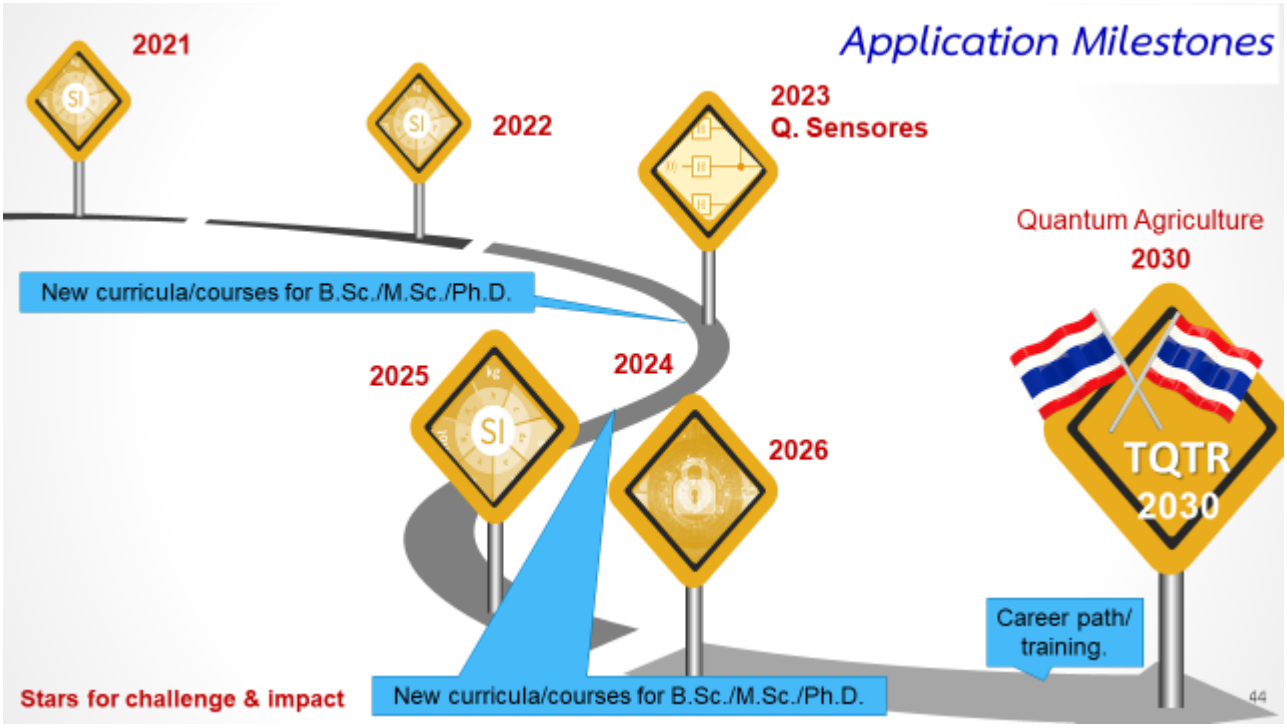
สร้างระบบทำการเกษตรไทย และการผลิตอาหาร การตลาด และการทำธุรกิจแบบใหม่

เป้าหมายและกรอบเวลา

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
3 ปี	• เลือกโจทย์ และสร้างกรอบวิจัยสำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในสาขาอื่น อาทิ เภสัชกรรม การแพทย์ เกษตรกรรม การธนาคาร	

ระยะเวลา	เป้าหมาย	Impact/challenge/confidence
	• ศึกษานำร่องความเป็นไปได้ (feasibility) ในการประยุกต์ใช้เทคโนโลโลยีควอนตัมนาในสาขาที่สนใจ • พัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมสำหรับประยุกต์ใช้ตามเป้าประสงค์ในสาขาที่สนใจ	
6 ปี	• สาธิตการใช้เทคโนโลยีควอนตัมเพิ่มผลผลิต หรือเพิ่มประสิทธิภาพ • พัฒนาการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมเป็นชิ้นงานหรือกระบวนการที่ชัดเจนสามารถขยายผลได้อย่างเป็นระบบ	
10 ปี	• สร้างระบบที่มีประสิทธิภาพสูงโดยใช้เทคโนโลยีควอนตัม เช่น การกำเกษตรกรรม การผลิตอาหาร การตลาด และการทำธุรกิจแบบใหม่	

แผนที่นำทาง



รูปที่ 17 เป้าหมายและแผนที่นำทางด้านการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม

7.3 ปัจจัยสนับสนุนที่จำเป็น (Enabling Tools)

1) หน่วยตรวจวัดเชิงควอนตัม (quantum sensors)
2) อัลกอริทึม หรือกระบวนการคำนวณเชิงควอนตัม
3) ซอฟท์แวร์สำหรับประมวลผลรวม (integration software)

7.4 งบประมาณ

ในส่วนการประยุกต์ใช้ งบประมาณจะเป็นค่าวัสดุ และค่าใช้สอย ซึ่งอาจจะมีหลายโครงการ

7.4.1 งบประมาณสำหรับสำหรับค่าวัสดุในการวิจัยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
3 ปี	• ค่าวัสดุทางด้านแสง ไฟฟ้า แม่เหล็ก และอิเล็กทรอนิกส์ ในพัฒนาเทคโนโลยีควอนตัมสำหรับประยุกต์ใช้ตามเป้าประสงค์ในสาขาที่สนใจ	130.0
6 ปี	• พัฒนาอุปกรณ์จำเป็นระดับซับซ้อน และผลิตต้นแบบนวัตกรรมเทคโนโลยีควอนตัมสำหรับประยุกต์ใช้ตามเป้าประสงค์	190.0
10 ปี	• การขยายผลระบบต้นแบบ หรือชุดสาธิตประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมในแต่สาขาตามเป้าประสงค์	300.0
งบประมาณรวม (ล้านบาท)		**620.0**

7.4.2 งบประมาณค่าดำเนินการในการวิจัยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัม

ระยะเวลา	กิจกรรม	งบประมาณ (ล้านบาท)
3 ปี	• ค่าเครื่องมือวิเคราะห์ การเก็บข้อมูล ค่าจ้างช่าง ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย	75.0
6 ปี	• ค่าเครื่องมือวิเคราะห์ การเก็บข้อมูล ค่าจ้างช่าง ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย • ค่าจัดประชุมวิชาการ และสร้างเครือข่ายขยายผล	75.0 50.0
10 ปี	• ค่าเครื่องมือวิเคราะห์ การเก็บข้อมูล ค่าจ้างช่าง ค่าจ้างผู้ช่วยวิจัย • ค่าจัดประชุมวิชาการ และสร้างเครือข่ายขยายผล • ค่าดำเนินการการขยายผลระบบต้นแบบ หรือชุดสาธิตประยุกต์ใช้เทคโนโลยีควอนตัมฯ	75.0 50.0 65.0
งบประมาณรวม (ล้านบาท)		**390.0**

ภาคผนวก ข อภิธานศัพท์ (*Glossary*)

1 คำย่อ และคำเต็ม

คำย่อ	***คำเต็ม***
AI	artificial intelligence
BOC	bulk optic circuit
DNA seq.	DNA sequencing
ESPS	entangled single photon source
FT	fault tolerant
GNSS	global navigation satellite systems
GPS	global positioning system
HWP	half wave plate
LDSS QKD	long distance super secure quantum key distribution
LMI	light-matter interface
Med. Diag.	medical diagnostics
MOT	magnetic optical trap
NISQ	noisy intermediate scale quantum device
NMR	nuclear magnetic resonance
NV	nitrogen vacancy
OWC	optical waveguide circuit
Q. [...]	quantum [...]
Q. App.	quantum technology application
Qcom	quantum computing
Qcomm	quantum communication
QKD	quantum key distribution
QRNG	quantum random numbers generator
Qsim	quantum simulation
Qsoft	quantum software
QT	quantum technology
qubit	quantum bit
QWP	quarter wave plate
SPD	single photon detector
SPS	single photon source
TQTC	Thailand quantum technology consortium
TQTR	Thailand quantum technology roadmap

ภาคผนวก ค หน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

1) สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)
2) สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ (สอวช.)
3) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.)
4) สำนักงานนวัตกรรมแห่งชาติ (องค์การมหาชน) (สนช.)
5) สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) (สวก.)
6) สถาบันวิจัยระบบสาธารณสุข (สวรส.)
7) หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการพัฒนากำลังคน และทุนด้านการพัฒนาสถาบันอุดมศึกษา การวิจัยและการสร้างนวัตกรรม (บพค.)
8) หน่วยบริหารและจัดการทุนด้านการเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของประทศ (บพข.)
9) สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ
10) สำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (องค์การมหาชน)
11) สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน)
12) สถาบันวิจัยดาราศาสตร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน)
13) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์ และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (เนคเทค) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
14) ศูนย์เทคโนโลยีเพื่อความมั่นคงของประเทศและการประยุกต์เชิงพาณิชย์ (NSD) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)
15) อุทยานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีภาคเหนือ (**SteP**)
16) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์
17) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
18) มหาวิทยาลัยมหิดล
19) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
20) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
21) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
22) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
23) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
24) มหาวิทยาลัยขอนแก่น
25) มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
26) มหาวิทยาลัยบูรพา
27) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

28) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า พระนครเหนือ
29) มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
30) มหาวิทยาลัยนเรศวร

ภาคผนวก ง เอกสารอ้างอิง

1 A. Acin et al, The Quantum Technology Roadmap: a European Community View. New J. Phys. (2018) 20, 080201

2 R. Dumke et al, Roadmap on quantum optical systems. Journal of Optics (2016) 18 (9), p.093001.

3 V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, Advances in quantum metrology, Nature Photonics (2011) 5, 222–229.

4 P. Zoller, T. Beth, D. Binosi et al, Quantum information processing and communication Strategic report on current status, visions and goals for research in Europe, Eur. Phys. J. D (2005) 36: 203. (preprint revised version 2016)

5 ARDA Report, A Quantum Information Science and Technology Roadmap, Part 1: Quantum Computing, http://qist.lanl.gov (Document LA-UR-04-1778)

6 ARDA Report, A Quantum Information Science and Technology Roadmap, Part 2: Quantum Cryptography, http://qist.lanl.gov (Document LA-UR-04-4085)

7 C. Caves, A Quantum Information Science and Technology Roadmap, eds. R. Hughes and T. Heinrichs, (Advanced Research and Development Activity, 2004).

8 Quantum Technologies Flagship Final Report, High-level steering committee (28 June 2017)

9 Frontier Research & Innovation: Quantum Technology (30 September 2019)