

## ๓.๒ โครงการความร่วมมือไทย – KATRIN และ KIT ตามพระราชดำริฯ

(ผู้ถวายรายงาน : นายไพรัช รัชพงษ์)

### ๑. ความเป็นมา

KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino experiment) เป็นการปฏิบัติการทดลองเพื่อวัดมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน (electron antineutrino) ที่ปลดปล่อยออกมาจากการสลายตัวแบบบีตาของทริเทียมด้วยความแม่นยำที่ระดับต่ำกว่าอิเล็กตรอนโวลต์ (sub-eV) ตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู (Karlsruhe Institute of Technology) เมืองคาร์ลสรู สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี มีนักวิทยาศาสตร์ วิศวกร ช่างเทคนิค และนักศึกษามากกว่า ๑๕๐ คนจาก ๑๒ สถาบันใน ๕ ประเทศ ได้แก่ สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี สหราชอาณาจักรรัสเซีย สาธารณรัฐเช็ก สาธารณรัฐฝรั่งเศส และ สหรัฐอเมริกา อุปกรณ์สำคัญคือ สเปกโตรมิเตอร์ หนัก ๒๐๐ ตัน ติดตั้งและผ่านการทดสอบจนสมบูรณ์เมื่อ ค.ศ. ๒๐๑๕ การทดลองเริ่มเมื่อปลายปี ค.ศ. ๒๐๑๖ และเปิดตัวอย่างเป็นทางการราวกลางปี ค.ศ. ๒๐๑๘ ด้วยการสลายตัวของทริเทียมเป็นครั้งแรกและมีการวัดผลทางวิทยาศาสตร์ครั้งแรกเมื่อเดือนเมษายน ๒๐๑๙ คาดว่าจะทดลองต่อไปอีก ๕ ปี (อ้างอิงจาก wikipedia)

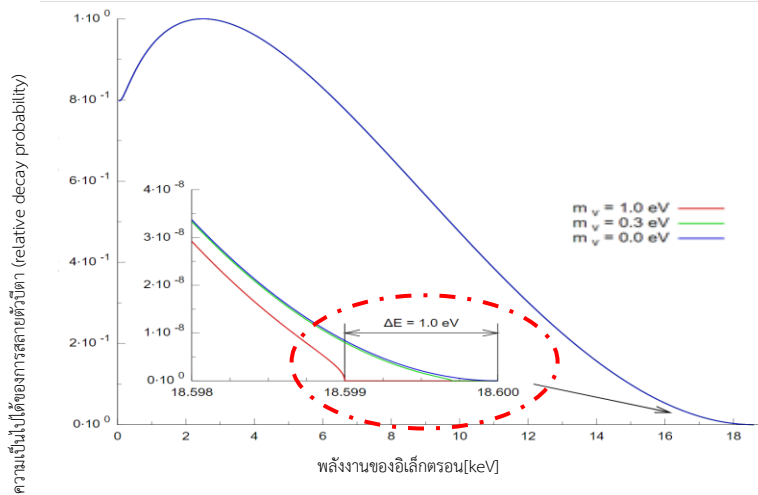
### ๒. มวลนิวทริโน

นิวทริโนมีมากมายในเอกภพนี้ ที่มีมากกว่าก็เพียงโฟตอนของแสงเท่านั้น หากเรามีแว่นตาพิเศษมองเห็นนิวทริโนได้ เราก็จะเห็นนิวทริโนเหมือนเห็นแสงเต็มไปหมด นิวทริโนจากนอกโลกมาจากดวงอาทิตย์ซูเปอร์โนวา และจากแหล่งอื่นที่ยังไม่ทราบอีก บนโลกเรามาจากโรงไฟฟ้าปรมาณูเป็นสำคัญ เดิมนักวิทยาศาสตร์เชื่อว่านิวทริโนไร้มวลเหมือนโฟตอน จึงทำให้เราพบนิวทริโนมากมาย นิวทริโนคล้ายแสงเพราะความไร้มวลจึงเคลื่อนเร็วเท่าแสงไปทั่วเอกภพแต่ ใน ค.ศ. ๒๐๑๕ มีผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ที่พบว่า นิวทริโนในขณะเดินทาง เช่น จากดวงอาทิตย์มายังโลกเราเป็นต้นนั้น สามารถเปลี่ยนชนิดไปมาได้ (นิวทริโนมี ๓ ชนิด คือ อิเล็กตรอนนิวทริโน มิวออนนิวทริโน และทาวนิวทริโน) ปรากฏการณ์นี้แสดงว่านิวทริโนมีได้ไร้มวล มวลของนิวทริโนนั้นน้อยมาก ต่ำกว่าอิเล็กตรอนราว ๕๐๐,๐๐๐ เท่า (electron mass  $0.511 \text{ MeV}/c^2$ ) วัดได้ยากและยังไม่ทราบค่าที่แท้จริงการทดลองก่อนหน้านี้ที่ Mainz (เยอรมนี) และ Troitsk (รัสเซีย) พบเขตแดนของมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนว่าไม่เกิน  $2.3 \text{ eV}/c^2$

การทดลอง KATRIN จะใช้วิธีการวัดที่คล้ายกันเพื่อจะค้นหา (๑) เขตแดนมวลที่ต่ำลงไปอีก ๑๐ เท่า กล่าวคือที่  $0.2 \text{ eV}/c^2$  (90% CL) หรือ (๒) พบค่าที่แท้จริงหากมวลมากกว่า  $0.35 \text{ eV}/c^2$  อุปกรณ์การทดลองที่ KATRIN จึงต้องสร้างให้มีสมรรถนะสูงกว่าอดีตขึ้นไป ๒๐ เท่าจึงจะทำได้

### ๓. หลักการคิดในการหามวลของนิวทริโน

ทริเทียมสลายตัวได้ ฮีเลียม อิเล็กตรอน และอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน พลังงานส่วนใหญ่จากการสลายตัวของทริเทียมรวม 18.6 keV จะอยู่ในรูปพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนกับอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน (ส่วนฮีเลียมได้รับน้อยมาก) เมื่อเกิดการสลายตัว อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนจะหายไปจากสเปกโตรมิเตอร์ทันที จนเราไม่อาจวัดมวลโดยตรงของมันได้ จึงเหลือแต่อิเล็กตรอนที่เราจะวัดพลังงานแล้วนำไปประเมินมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน



จากการการสลายตัวจำนวนมากหลาย ๆ ครั้ง นักวิทยาศาสตร์สามารถบันทึกเป็นสถิติของการสลายตัว (แกนตั้ง) และพลังงานของอิเล็กตรอน (แกนนอน) ที่เกิดขึ้นแสดงออกมาได้ดังในรูป เราจะเห็นจากรูปว่า อิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ๆ นั้นมีโอกาสเกิดสูง แต่อิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงใกล้ค่า 18.6 keV นั้นมีโอกาสเกิดน้อย (ราว ๑ ในล้านล้านของการสลายตัว) และจะเป็นบริเวณที่เราสนใจเป็นพิเศษเพราะว่าเป็นบริเวณที่อิเล็กตรอนเอาพลังงานไปเกือบหมด จนแทบไม่เหลือให้อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนเลย หากอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนไร้มวลมันก็ไร้พลังงาน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะได้พลังงานทั้งหมดไปจนถึง 18.6 keV หรือนั่นคือเส้นสเปกตรัมของอิเล็กตรอนจะไปชนแกนนอนที่ 18.6 keV แต่หากมันมีมวล มันก็จะมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับพลังงานมวลหนึ่งของมัน (ตามสูตร  $E = mc^2$ ) ส่งผลให้เส้นสเปกตรัมไปชนแกนนอนที่จุดต่ำกว่า 18.6 keV เช่นที่ 18.599 keV ต่ำลงไป 1 eV เป็นต้น แสดงว่าอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนมีมวล 1 eV (หรืออีกตัวอย่างหนึ่งคือ 0.3 eV บริเวณตรงนี้นักวิทยาศาสตร์จะทำการวัดหลาย ๆ ครั้งแล้วไปสร้างสถิติหามวลที่แน่นอนของนิวทริโน

อุปกรณ์ของ KATRIN จะมีสเปกโทรมิเตอร์ทำหน้าที่กรอง (ด้วยศักย์ไฟฟ้า) อิเล็กตรอนพลังงานต่ำ ๆ ออกไปให้มากที่สุด เหลือเพียงอิเล็กตรอนจากกรณีพิเศษที่พลังงานสูงพอ (ใกล้ 18.6 keV) เท่านั้นที่จะข้ามศักย์ไฟฟ้านี้ไปถึงหน่วยตรวจวัดได้ นักวิทยาศาสตร์ของ KATRIN จะใช้วิธีทางสถิติให้หน่วยตรวจวัดนับหลาย ๆ ครั้ง (ที่บริเวณใกล้ 18.6 keV) เรียกว่า การรณรงค์เพื่อหาค่ามวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน ผลจากการรณรงค์ครั้งแรก (๑๐ เมษายน - ๑๓ พฤษภาคม ค.ศ. ๒๐๑๙) เผยแพร่เมื่อ ๑๓ กันยายน ๒๐๑๙ พบว่า เพดานมวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนอยู่ที่ 1.1 eV

การศึกษาเครื่องตรวจวัดพลังงานของรังสี ๒ ชนิด คือ นิวตรอน และรังสีเอ็กซ์ หรือ รังสีแกมมา เครื่องตรวจวัดชนิดแรกคือ เครื่องตรวจวัดพลังงานนิวตรอนรูปทรงกลมของโบเนนเนอร์ ซึ่งสามารถตอบสนองต่อนิวตรอนที่มีพลังงานตั้งแต่ ๐.๐๐๑ eV จนถึง ๑๐๐ GeV ทำให้เครื่องชนิดนี้มีประโยชน์ในงานป้องกันรังสีนิวตรอนที่มาจากเครื่องเร่งอนุภาค ส่วนเครื่องตรวจวัดชนิดที่สองคือ เครื่องตรวจวัดพลังงานรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาชนิดแคดเมียมเทลลูไรด์ ในการศึกษาเครื่องตรวจวัดทั้ง ๒ ชนิดนี้ จะใช้โปรแกรมการจำลองแบบมอนติคาโลที่ชื่อ FLUKA มาใช้ในการจำลองการฉายรังสีและเก็บข้อมูลจากการตอบสนองของเครื่องตรวจวัด ซึ่งโปรแกรมการจำลองนี้จะมีประโยชน์ต่อการใช้ออกแบบและพัฒนาเครื่องตรวจวัด และระบบป้องกันรังสีที่เป็นอันตราย

#### ๔. การทำงานของอุปกรณ์

- [๑] การสลายตัวของทริเทียมจะปลดปล่อยอิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน อิเล็กตรอนแอนตินิวทริโนหายตัวไปจากสเปกโทรมิเตอร์อย่างรวดเร็ว ตรวจวัดไม่ได้ อิเล็กตรอนเริ่มเดินทางไปสู่หน่วยตรวจวัด

[๒] อิเล็กตรอนจะเดินทางต่อไปยังสเปกโตรมิเตอร์โดยมีสนามแม่เหล็กนำไป ทริเทียมจะถูกสูบออกไปเพื่อไม่ให้เดินทางเข้าไปในสเปกโตรมิเตอร์

[๓] กำแพงศักย์ไฟฟ้าสถิตจะกรองไม่ให้อิเล็กตรอนพลังงานจลน์ต่ำผ่านไปได้ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานจลน์สูงมากพอเท่านั้นจึงจะสามารถผ่านสเปกโตรมิเตอร์ไปยังหน่วยตรวจวัดที่อีกปลายหนึ่งของสเปกโตรมิเตอร์ได้

[๔] อิเล็กตรอนมาถึงปลายทางและถูกนับจำนวนด้วยเครื่องตรวจวัด จำนวนที่นับได้ต่อวินาทีขึ้นอยู่กับศักย์ไฟฟ้าสเปกโตรมิเตอร์หนัก ๒๐๐ ตันผลิตภัณฑ์โรงงานในเมืองเด็กเก็นดอร์ฟ (Deggen Dorf) ซึ่งห่างจากคาร์ลสรูเพียง ๔๐๐ กิโลเมตร (กม.) แต่ความใหญ่โตทำให้ขนส่งทางถนนไม่ได้ต้องใช้ทางน้ำ เริ่มจากแม่น้ำดานูบไปยังทะเลดำผ่านทะเลเมดิเตอร์เรเนียนออกสู่มหาสมุทรแอตแลนติกเพื่อไปยังท่าเมืองแอนทเวิร์ป จากนั้นจึงไปทางแม่น้ำไรน์ไปยังเมืองคาร์ลสรู การขนส่งอ้อมระยะทางเกือบ ๙,๐๐๐ กม. ทำให้เหลือทางบกช่วงสุดท้ายเพียง ๗ กม. จากอูเรอิลีโอโพลด์ชาเฟ (Leopoldshafen) ไปยังสถานีทดลองที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู ใช้เวลาทั้งสิ้น ๖๓ วัน

## ๕. ความร่วมมือวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้รวมตัวกันเป็นภาคีไทย-แคทริน (Thai-KATRIN Consortium) ที่จะเข้าร่วมทำงานวิจัยกับ KATRIN เบื้องต้นคาดว่าจะเป็นการศึกษาและตรวจวัด สนามแม่เหล็ก (เนื่องจากมีความเชี่ยวชาญมาแล้วจาก JUNO) ตัวอย่างหัวข้อความร่วมมือ อาทิ

- ศึกษาการจำลองสนามแม่เหล็ก (magnetic field modeling)
- การประเมินค่าสนามแม่เหล็ก (evaluation of B field)
- เซนเซอร์วัดสนามแม่เหล็กแบบเคลื่อนที่และแบบอยู่ประจำที่ (mobile/stationary sensors)
- การวิเคราะห์ข้อมูล (data analysis)
- แผนระยะยาวในการเฝ้าติดตามค่าสนามแม่เหล็ก (long term monitoring)

ขณะนี้ยังไม่มีประเด็นด้านการเงินในการเป็นสมาชิก การเข้าร่วมเก็บผลการทดลอง (คิดสัดส่วนตามจำนวนสมาชิกในแต่ละปีจะทำการทดลอง ๓ ครั้ง ๆ ละ ๖๐ วัน) และการเข้าร่วมการประชุมความร่วมมือ (collaboration meeting) ปีละ ๒ ครั้ง (ช่วงฤดูใบไม้ผลิ และ ช่วงฤดูใบไม้ร่วง) ที่ผ่านมามีการประชุมร่วมกัน ๒ ครั้ง ในปี พ.ศ. ๒๕๖๒ คือเมื่อเดือนพฤษภาคม พ.ศ. ๒๕๖๒ และ กันยายน พ.ศ. ๒๕๖๒ ที่ KIT

ภาคีไทย-แคทริน รับผิดชอบการวัดและคำนวณค่าสนามแม่เหล็กใน Main Spectrometer (MS) เป็นการรับช่วงต่อจาก Prof. Alexander Osipowicz ในอนาคตคาดว่าจะส่งนักวิจัยและ/หรือนักศึกษาเข้าร่วมศึกษาและเรียนรู้การทดลอง Run III ที่จะเริ่มในมีนาคม พ.ศ. ๒๕๖๓ พร้อมทั้งศึกษาการทำงานของระบบวัดสนามแม่เหล็กแบบอัตโนมัติของ Mobile sensor unit

ด้านการพัฒนากำลังคน KIT มีโปรแกรมบรรยายการประชุมเชิงปฏิบัติการและการฝึกอบรมสำหรับนักศึกษา ป.โท เอก เป็นหลักสูตรระยะสั้น ๒-๓ สัปดาห์ รับจำนวน ๒๐-๓๐ คนต่อหลักสูตร (ไม่มีทุนให้) โดยทาง KATRIN สามารถแนะนำให้นักศึกษาไทยเข้าร่วมได้ ในแต่ละปีจะมีหัวข้อที่แตกต่างกันไป <https://www.kseta.kit.edu/trainingprogram.php> สำหรับการฝึกงานวิจัย (internship) ของนักศึกษา ป.โท และ เอก จะให้ติดต่อผ่านอาจารย์ที่เป็นผู้ร่วมวิจัยด้วยกัน

## ๖. สถาบันฟิสิกส์และเทคโนโลยีลำอนุภาค (Institute for Beam Physics and Technology : IBPT) สังกัดสถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู (Karlsruhe Institute of Technology : KIT)

IBPT บริหารระบบลำอนุภาคและเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์เพื่อให้สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูซึ่งเป็นมหาวิทยาลัยชั้นนำด้านเครื่องเร่งอนุภาคและเทคโนโลยีตรวจวัดอนุภาค

ระบบที่สำคัญมี ๓ ระบบ คือ KARA, FLUTE และ MCF

[๑] KARA (จาก Karlsruhe Research Accelerator) เป็นวงแหวนกักเก็บอิเล็กตรอนยาว ๑๑๐ เมตร พลังงาน ๒.๕ GeV ใช้เป็นแพลตฟอร์มสำหรับพัฒนาและทดสอบเทคโนโลยีของลำอนุภาคและเครื่องเร่งอนุภาคใหม่ๆ วิจัยค้นหาแนวคิดใหม่ทางเครื่องเร่งอนุภาคและหน่วยตรวจวัดอนุภาคแนวใหม่

[๒] FLUTE (จาก Far-infrared Linac and Und Test Experiment) สำหรับทดสอบอุปกรณ์ที่ใช้ในเครื่องเร่งอนุภาคด้านฟิสิกส์ต่างๆตลอดจนให้รังสีที่ในเฟสเดียวกัน (เช่น เลเซอร์ เป็นต้น) เป็นห้วงสั้นและเข้มข้นของแสงในย่านที่รวม terahertz และ far-infrared

[๓] MCF (จาก Magnet Characterization Facilities) มีอุปกรณ์ทดสอบแม่เหล็กที่เกิดจากตัวนำยิ่งยวดและตัวนำปกติที่อุณหภูมิห้อง อุณหภูมิต่ำกว่าห้องและอุณหภูมิของฮีเลียม ทดสอบแม่เหล็กถาวร ขดลวดต้นแบบการพันขดลวด การปรับสนามแม่เหล็กและอันดูลเตอร์

## ๗. การพัฒนาความสามารถเทคโนโลยี Terahertz เพื่อการใช้ประโยชน์ (เนคเทค ร่วมกับ KIT)

### วัตถุประสงค์

- พัฒนาองค์ความรู้ ความสามารถด้านเทคโนโลยีเทราเฮิร์ตซ์ (terahertz) เพื่อให้สามารถสร้างต้นแบบที่เป็นตัวส่งและตัวรับสัญญาณคลื่นเทราเฮิร์ตซ์ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในย่านคลื่นเทราเฮิร์ตซ์
- พัฒนาให้เกิดเป็นเครื่องสเปกโตรสโกปีเทราเฮิร์ตซ์ (terahertz spectroscopy) และระบบสร้างภาพเทราเฮิร์ตซ์ (terahertz imaging) เพื่อประโยชน์เชิงอุตสาหกรรมในประเทศ

### ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- ต้นแบบเครื่องตรวจวัด (detector) ในการตรวจวัดสัญญาณเทราเฮิร์ตซ์
- สร้างเสาอากาศแบบตัวนำเชิงแสง (photoconductive antenna) เพื่อพัฒนาเครื่องสเปกโตรสโกปีเทราเฮิร์ตซ์ และระบบสร้างภาพเทราเฮิร์ตซ์

งบประมาณ : ระยะเวลา ๑ (๑-๒ เดือน) งบประมาณไม่เกิน ๕๐๐,๐๐๐ บาท

นักวิจัย : ดร. เกียรติวุฒิ ประเสริฐสุข ดร. ชยุตม์ ถานะภิรมย์ ดร. รุ่งโรจน์ จินตเมธาสวัสดิ์

### แผนงานวิจัยระยะ ๑:

เดือนที่ ๑ : ทีมวิจัยเนคเทค สวทช. นำต้นแบบที่กำลังพัฒนา ไปทดสอบกับแหล่งผลิตคลื่นเทราเฮิร์ตซ์ที่ KIT

วิเคราะห์ประสิทธิภาพของต้นแบบเครื่องตรวจวัด และเสาอากาศแบบตัวนำเชิงแสง

เดือนที่ ๒ : พัฒนาข้อเสนอโครงการร่วมกับ KIT

สำหรับความร่วมมือในเฟสที่ ๒ เพื่อพัฒนาต่อยอดให้เป็นเครื่องสเปกโตรสโกปีเทราเฮิร์ตซ์และระบบสร้างภาพเทราเฮิร์ตซ์ เพื่อการอุตสาหกรรม

## ๘. สรุป

- การทดลอง KATRIN (KARlsruhe TRItium Neutrino experiment) ตั้งอยู่ที่สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู (Karlsruhe Institute of Technology) เมืองคาร์ลสรู สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี เริ่มเก็บผลการทดลองทางวิทยาศาสตร์เมื่อเดือนเมษายน พ.ศ.๒๕๖๒ วัตถุประสงค์หลัก เพื่อหาค่ามวลของอิเล็กตรอนแอนตินิวทริโน ที่ได้จากการสลายแบบบีตาของทริเทียม (ไอโซโทปหนึ่งของไฮโดรเจน)
- นิวทริโนเป็นอนุภาคที่มีอยู่มากเป็นอันดับสองในเอกภพรองจากโฟตอน ไม่มีประจุไฟฟ้ามีอยู่ด้วยกัน ๓ ชนิด โดยสามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาจากชนิดหนึ่งไปเป็นอีกสองชนิดได้ขึ้นอยู่กับพลังงานและระยะทางที่มันเคลื่อนที่ (เป็นพฤติกรรมที่ไม่ปรากฏในอนุภาคชนิดอื่น) จากพฤติกรรมนี้ทำให้ทราบว่านิวทริโนมีมวลที่น้อยมาก (น้อยกว่ามวลอิเล็กตรอนราว ๕ แสนเท่า) แต่ยังไม่ทราบว่ามีความเท่าไรแน่
- การทราบมวลของนิวทริโนจะทำให้เราเข้าใจว่า เหตุใดนิวทริโนจึงมีมวลที่น้อยและมีที่มาอย่างไร นอกจากนี้ยังอาจช่วยไขปริศนาเกี่ยวกับสสารมืดและพลังงานมืดที่เป็นองค์ประกอบหลักของเอกภพด้วยก็ได้
- นักวิจัยจากจุฬาฯ มทส. และ มช. มีความสนใจที่จะเข้าร่วมการทดลอง KATRIN โดยในเบื้องต้นจะร่วมศึกษาเกี่ยวกับการประเมินค่าสนามแม่เหล็กในสเปกโทรมิเตอร์และการป้องกันการรบกวนจากสนามแม่เหล็กโลก (ทั้งสามสถาบันมีประสบการณ์จากการทดลองอื่น เช่น JUNO และ PITZ เป็นต้น)
- นักศึกษาระดับ ป.โท และเอก สามารถเข้าร่วมรับฟังการบรรยาย การประชุมเชิงปฏิบัติการ และการฝึกงานวิจัยที่ KIT ได้ ซึ่งมีลักษณะเป็นหลักสูตระยะสั้น ๒ - ๓ สัปดาห์
- สถาบันฟิสิกส์และเทคโนโลยีลำอนุภาค (Institute for Beam Physics and Technology : IBPT) เป็นอีกหน่วยงานหนึ่งในสังกัดสถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรู IBPT บริหารระบบลำอนุภาคและเครื่องเร่งอนุภาคเพื่อใช้ในการทดลองทางฟิสิกส์เพื่อให้สถาบันเทคโนโลยีคาร์ลสรูเป็นผู้นำด้านเครื่องเร่งอนุภาคและเทคโนโลยีตรวจวัดอนุภาค ระบบที่สำคัญมี ๓ ระบบ คือ KARA, FLUTE และ MCF
- คณะนักวิจัยของเนคเทค สวทช. จะร่วมมือวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีในย่านคลื่นเทราเฮิรตซ์กับ IBPT/ KIT

## ๙. ประเด็นเสนอต่อที่ประชุม

เพื่อรับทราบผลการดำเนินงาน ปี ๒๕๖๒