



การประยุกต์ใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์:
ความก้าวหน้า ความท้าทาย และแนวโน้มในอนาคต
Applications of Terahertz Waves in Forensic Science:
Advancements, Challenges, and Future Prospects

กัณฑ์เอนก โภคากรเงิน¹ พัทธ์ศรัณย์ เลหาไพบูลย์² และ อรณิชา คงวุฒิ^{3,*}

¹ กองบังคับการกฎหมายและคดี ตำรวจภูธรภาค 7

² ห้างหุ้นส่วนจำกัด บุญพาวาสนาสง

³ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี

Kananeak Pokakorngern¹, Phatsaran Laohhapaboon², and Ornnicha Kongwut^{3,*}

¹ Legal Affairs and Litigation Division, Provincial Police Region 7

² Boonpawassanasong Limited Partnership

³ Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University

Received: July 16, 2024 | Revised: January 12, 2025 | Accepted: February 3, 2025

บทความวิชาการ (Academic Article)

บทคัดย่อ

การประยุกต์ใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์กำลังเปิดมิติใหม่ในการตรวจพิสูจน์หลักฐาน และการสืบสวนคดีอาชญากรรม บทความนี้นำเสนอภาพรวมของเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ ทั้งในด้าน หลักการทางฟิสิกส์ เทคโนโลยีการตรวจจับและวิเคราะห์ และการประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ คุณสมบัติเฉพาะของคลื่นเทระเฮิรตซ์ เช่น ความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุที่ทึบแสง ความไวต่อการ ตรวจจับสารเคมี และความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ทำให้เทคโนโลยีนี้มีศักยภาพสูงในการตรวจสอบเอกสาร ปลอมแปลง การวิเคราะห์สารเสพติดและวัตถุระเบิด ตลอดจนการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง การวิเคราะห์ กรณีสืบสวนและผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าวิธีการดั้งเดิมในหลายด้าน อย่างไรก็ตาม ยังมีความท้าทายทั้งในด้านต้นทุน ความซับซ้อนของเทคโนโลยี และประเด็นทางจริยธรรมและกฎหมายที่ต้อง ได้รับการแก้ไข บทความนี้ยังนำเสนอแนวโน้มและการพัฒนาในอนาคต รวมถึงข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัย และพัฒนาเพื่อปลดล็อกศักยภาพเต็มที่ของเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์ ซึ่งจะนำไปสู่การ ยกระดับความแม่นยำและประสิทธิภาพในกระบวนการยุติธรรม

คำสำคัญ: คลื่นเทระเฮิรตซ์, นิติวิทยาศาสตร์, การตรวจพิสูจน์หลักฐาน, เทคโนโลยีการตรวจจับ, นวัตกรรม ทางกฎหมาย

* Corresponding author, email: ornnicha.k@kru.ac.th



Abstract

The application of terahertz waves in forensic science is opening new dimensions in evidence examination and criminal investigation. This article presents an overview of terahertz wave technology, covering its physical principles, detection and analysis technologies, and applications in forensic science. The unique properties of terahertz waves, such as their ability to penetrate opaque materials, sensitivity to chemical detection, and safety for operators, give this technology high potential in detecting forged documents, analyzing drugs and explosives, and revealing latent fingerprints. The analysis of case studies and experimental results demonstrates superior performance compared to traditional methods in many aspects. However, challenges still remain in terms of cost, technological complexity, and ethical and legal issues that need to be addressed. This article also presents future trends and developments, including recommendations for research and development to unlock the full potential of terahertz wave technology in forensic science. This advancement will lead to enhanced accuracy and efficiency in the justice system.

Keywords: Terahertz waves, Forensic science, Evidence examination, Detection technology, Legal innovation

บทนำ

ในยุคที่อาชญากรรมมีความซับซ้อนมากขึ้น การพิสูจน์หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์ได้กลายเป็นเสาหลักของกระบวนการยุติธรรมทั่วโลก สถิติจาก Federal Bureau of Investigation (FBI) ระบุว่าในปี 2022 มีการใช้หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์ในการสืบสวนคดีอาชญากรรมมากกว่า 95% ของคดีทั้งหมดในสหรัฐอเมริกา (Fesenko, 2021) อย่างไรก็ตามวิธีการตรวจสอบแบบดั้งเดิมยังคงเผชิญกับความท้าทายสำคัญ นั่นคือความเสี่ยงในการทำลายหรือปนเปื้อนวัตถุพยานระหว่างการตรวจสอบ การศึกษาโดย National Institute of Justice (NIJ) ในปี 2021 พบว่า 18% ของคดีที่มีการอุทธรณ์เนื่องจากความผิดพลาดในการวิเคราะห์หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์มีสาเหตุมาจากการปนเปื้อนหรือความเสียหายของวัตถุพยานระหว่างการตรวจสอบ (Sirbu, 2022) ปัญหานี้ไม่เพียงส่งผลกระทบต่อความยุติธรรมเท่านั้นแต่ยังก่อให้เกิดภาระทางการเงินอย่างมหาศาล โดยรายงานจาก Innocence Project ระบุว่าค่าใช้จ่ายในการแก้ไขคำพิพากษาที่ผิดพลาดเนื่องจากหลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์ที่ไม่ถูกต้องมีมูลค่าเฉลี่ยถึง 3.5 ล้านดอลลาร์สหรัฐต่อคดี (Bortolotti, 2020)

ด้วยเหตุนี้นักวิทยาศาสตร์และผู้เชี่ยวชาญด้านนิติวิทยาศาสตร์จึงมุ่งมั่นในการค้นคว้าวิธีการใหม่ ๆ ที่สามารถตรวจสอบหลักฐานได้อย่างแม่นยำโดยไม่ทำลายหรือสัมผัสวัตถุโดยตรง หนึ่งในเทคโนโลยีที่มีศักยภาพสูงในการแก้ปัญหานี้คือการใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ (Terahertz Waves) คลื่นเทระเฮิรตซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 10 เทระเฮิรตซ์ ซึ่งอยู่ระหว่างคลื่นไมโครเวฟและคลื่นอินฟราเรด (IEEE, 2021)

คุณสมบัติพิเศษของคลื่นเทอเรเฮิรตซ์ที่สามารถทะลุผ่านวัสดุที่ทึบแสงได้โดยไม่ก่อให้เกิดการแตกตัวของประจุหรือการทำลายโมเลกุล ทำให้เทคโนโลยีนี้มีศักยภาพสูงในการนำมาประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบหลักฐานที่มีความละเอียดอ่อนหรือเสี่ยงต่อการเสียหาย การวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีคลื่นเทอเรเฮิรตซ์ได้ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา ข้อมูลจาก Market Research Future ระบุว่าตลาดเทคโนโลยีเทอเรเฮิรตซ์ทั่วโลกมีมูลค่า 322.5 ล้านดอลลาร์สหรัฐในปี 2020 และคาดว่าจะเติบโตด้วยอัตราเฉลี่ยสะสมต่อปี (CAGR) 27.2% ระหว่างปี 2021-2027 (Military Radar Market, 2024) การเติบโตนี้ส่วนหนึ่งมาจากการประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ซึ่งรวมถึงการตรวจสอบเอกสารปลอมแปลง การวิเคราะห์สารเคมีและยาเสพติด การตรวจหาลายนิ้วมือแฝงและการตรวจสอบวัตถุระเบิด การทดลองในห้องปฏิบัติการโดย National Institute of Standards and Technology (NIST) ในปี 2023 แสดงให้เห็นว่าการใช้คลื่นเทอเรเฮิรตซ์สามารถตรวจจับสารเสพติดที่ซ่อนอยู่ในวัสดุทึบแสงได้ด้วยความแม่นยำถึง 99.8% โดยไม่ต้องเปิดบรรจุภัณฑ์ (National Institute of Standards and Technology, 2023) นอกจากนี้การศึกษาโดย European Forensic Science Institutes Network (ENFSI) พบว่าการใช้คลื่นเทอเรเฮิรตซ์ในการตรวจสอบเอกสารปลอมแปลงสามารถเพิ่มอัตราการตรวจจับได้ถึง 35% เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม (Roper-Miller, 2023) อย่างไรก็ตามการนำเทคโนโลยีคลื่นเทอเรเฮิรตซ์มาใช้งานนิติวิทยาศาสตร์อย่างแพร่หลายยังคงมีข้อจำกัดและความท้าทายหลายประการ รายงานจาก Forensic Science Regulator ของสหราชอาณาจักรระบุว่า เพียง 5% ของห้องปฏิบัติการนิติวิทยาศาสตร์ทั่วโลกมีการใช้เทคโนโลยีคลื่นเทอเรเฮิรตซ์ในปี 2022 (Samuels, 2022) ปัจจัยหลักที่จำกัดการใช้งานคือต้นทุนที่สูงและความซับซ้อนของเทคโนโลยี การศึกษาเกี่ยวกับการใช้คลื่นเทอเรเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้เข้าใจถึงศักยภาพและข้อจำกัดของเทคโนโลยีนี้ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ในอนาคต อันจะนำไปสู่การเพิ่มประสิทธิภาพในการพิสูจน์หลักฐานและสนับสนุนกระบวนการยุติธรรมให้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น บทความนี้จะนำเสนอภาพรวมของเทคโนโลยีคลื่นเทอเรเฮิรตซ์ การประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ ตลอดจนวิเคราะห์แนวโน้มและความท้าทายในการนำมาใช้งานจริง

ทฤษฎีและหลักการทำงานของคลื่นเทอเรเฮิรตซ์

คลื่นเทอเรเฮิรตซ์มีลักษณะทางฟิสิกส์และมีความถี่ที่แตกต่างจากคลื่นอื่น ๆ ในสเปกตรัมของคลื่น (Neu & Schmuttenmaer, 2020) ลักษณะของคลื่นเทอเรเฮิรตซ์มีดังนี้:

- ความถี่สูง: คลื่นเทอเรเฮิรตซ์มีความถี่สูงมากเมื่อเปรียบเทียบกับคลื่นอื่น ๆ ในสเปกตรัมอยู่ในช่วงระหว่างคลื่นไมโครเวฟ (Microwave) และคลื่นอินฟราเรด (Infrared) ซึ่งทำให้ความสามารถแสดงผลข้อมูลหรือส่งข้อมูลที่มีความละเอียดสูงได้

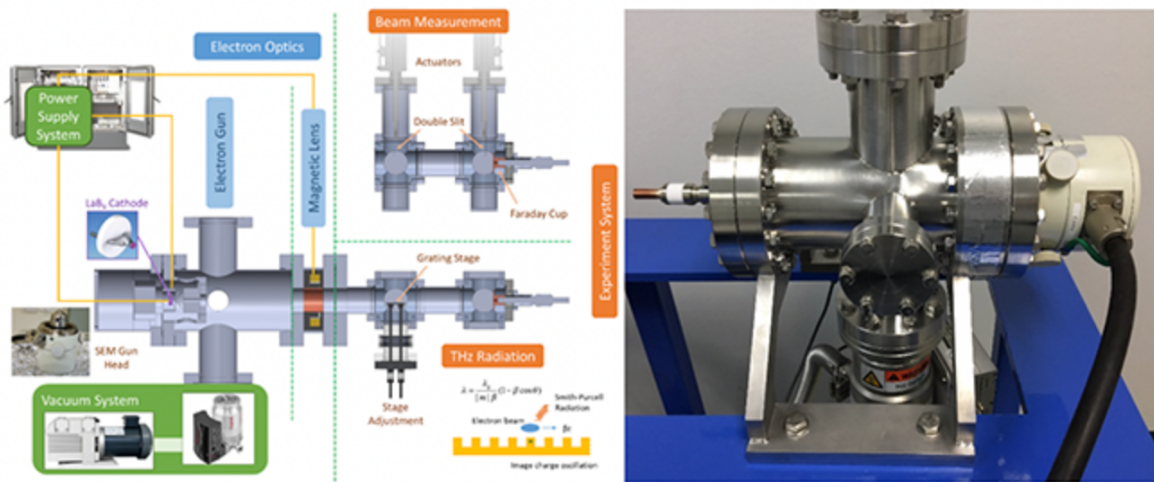
- การสะท้อนและการซึมผ่าน: การซึมผ่านของคลื่นเทอเรเฮิรตซ์ไม่ได้หมายถึงการทะลุทะลวงอย่างสมบูรณ์เสมอไป แต่เป็นความสามารถในการเดินทางผ่านวัสดุได้ในระดับหนึ่งซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุและความถี่ของคลื่นโดยทั่วไป เมื่อความถี่ของคลื่นสูงขึ้นจะเกิด Attenuation หรือการสูญเสียพลังงานมากขึ้นเมื่อคลื่นเดินทางผ่านตัวกลาง อย่างไรก็ตามในบางกรณีคลื่นความถี่สูงอาจสามารถแทรกซึมเข้าไปในช่องว่าง

ระหว่างอนุภาคของวัสดุบางชนิดได้ดีกว่าคลื่นความถี่ต่ำ ทำให้เกิดการซึมผ่านได้มากกว่าเมื่อคลื่นเทระเฮิรตซ์เดินทางมาถึงวัสดุอาจเกิดปรากฏการณ์ได้หลายอย่าง เช่น:

1. การสะท้อน (Reflection): คลื่นบางส่วนถูกสะท้อนกลับเมื่อกระทบกับผิววัสดุ
2. การซึมผ่าน (Transmission): คลื่นบางส่วนสามารถเดินทางผ่านวัสดุไปได้
3. การดูดซึม (Absorption): คลื่นบางส่วนถูกดูดซึมโดยวัสดุ ทำให้พลังงานลดลง

ปรากฏการณ์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุ เช่น ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (Dielectric Constant) ค่าการนำไฟฟ้า และความหนาแน่น เป็นต้น ข้อมูลเกี่ยวกับการสะท้อน การซึมผ่าน และการดูดซึมของคลื่นเทระเฮิรตซ์ในวัสดุต่าง ๆ มีประโยชน์ในการวิเคราะห์โครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุ รวมถึงการประยุกต์ใช้ ในด้านการตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย (Non-Destructive Testing) แต่ก็สามารถถูกสะท้อนหรือถูกดูดซึมได้กับวัสดุบางชนิด

ภาพที่ 1 ตัวอย่างเครื่องกำเนิดสัญญาณเทระเฮิรตซ์แบบสมิธเพอร์เซลล์สามารถใช้สร้างภาพสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การตรวจพัสดุและสินค้าในบรรจุภัณฑ์



ภาพที่ 1 เครื่องกำเนิดสัญญาณคลื่นเทระเฮิรตซ์แบบสมิธเพอร์เซลล์

ที่มา: <https://www.nectec.or.th/research/research-unit/ssdrg-trt.html>

2) การปฏิสัมพันธ์ของคลื่นเทระเฮิรตซ์กับวัสดุต่าง ๆ เปรียบเทียบกับคลื่นอื่นแบบตาราง

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบการปฏิสัมพันธ์ของคลื่นเทระเฮิรตซ์กับคลื่นชนิดอื่น ๆ

คุณสมบัติ/วัสดุ	คลื่นเทระเฮิรตซ์ (0.1 - 10 THz)	คลื่นไมโครเวฟ (1 - 300 GHz)	คลื่นอินฟราเรด (300 GHz - 430 THz)	แสงที่มองเห็นได้ (430 - 750 THz)	รังสีเอกซ์ (30 PHz - 30 EH)
โลหะ	สะท้อน (>99.9%)	สะท้อน (>99.9%)	สะท้อน (>95%)	สะท้อน (70-99%)	ทะลุผ่านบางส่วน (0.1-10%)
พลาสติก (HDPE)	ทะลุผ่านดี (>90%)	ทะลุผ่านดี (>95%)	ทะลุผ่านบางส่วน (30-70%)	ทึบแสง/โปร่งแสง (0-50%)	ทะลุผ่านดี (>99%)



เซรามิก (Al ₂ O ₃)	ทะลุผ่านดี (70-90%)	ทะลุผ่านบางส่วน (50-70%)	ดุดกกลืน (>90%)	ทึบแสง (<1%)	ทะลุผ่านดี (>95%)
ผ้าฝ้าย	ทะลุผ่านดี (60-80%)	ทะลุผ่านดี (70-90%)	ดุดกกลืนบางส่วน (40-60%)	ทึบแสง/โปร่งแสง (10-30%)	ทะลุผ่านดี (>99%)
น้ำ	ดุดกกลืนมาก (>99% ที่ความหนา 1 mm)	ดุดกกลืน (80-95%)	ดุดกกลืนมาก (>99%)	ทะลุผ่านบางส่วน (20-95%)	ทะลุผ่านบางส่วน (10-50%)
กระดาษ	ทะลุผ่านดี (70-90%)	ทะลุผ่านดี (80-95%)	ดุดกกลืนบางส่วน (30-50%)	ทึบแสง (<5%)	ทะลุผ่านดี (>98%)
ความละเอียด เชิงพื้นที่	สูง (150 μm - 1.5mm)	ปานกลาง (1mm - 10cm)	สูง (2.5-25 μm)	สูงมาก (0.4-0.7 μm)	สูงมาก (<0.1 nm)
ความปลอดภัย ต่อเนื้อเยื่อ มนุษย์	ปลอดภัย (SAR < 0.1 W/kg)	ปลอดภัยในระดับ ต่ำ (SAR 0.1-2 W/kg)	ปลอดภัย (ยกเว้นความร้อน)	ปลอดภัย (ยกเว้นความเข้มสูง)	อันตราย (โดส > 100 mSv)
ความสามารถ ในการวิเคราะห์ ทางเคมี	ดีมาก (สามารถระบุโมเลกุล เฉพาะได้)	จำกัด (เฉพาะโมเลกุลที่มี ซ้ำ)	ดี (ตรวจจับพันธะเคมี ได้)	จำกัด (เฉพาะสีและการ เรืองแสง)	ดี (วิเคราะห์โครงสร้าง อะตอม)

ที่มา: Mounaix, 2022; Liu, Gong & Yi, 2021; Barker & Pickwell-MacPherson, 2022

หมายเหตุ: ค่าเปอร์เซ็นต์และตัวเลขที่แสดงในตารางเป็นค่าโดยประมาณและอาจแตกต่างกันไปตามสภาวะแวดล้อมและคุณสมบัติเฉพาะของวัสดุ

จากตารางเปรียบเทียบจะเห็นได้ว่าคลื่นเทระเฮิรตซ์มีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์ โดยเฉพาะความสามารถในการทะลุผ่านวัสดุที่ไม่นำไฟฟ้าได้ดี มีความละเอียดเชิงพื้นที่สูง และมีความปลอดภัยต่อเนื้อเยื่อมนุษย์ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการวิเคราะห์ทางเคมีที่ดีเยี่ยมทำให้มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ ความสามารถในการทะลุทะลวงของคลื่นเทระเฮิรตซ์ผ่านวัสดุต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (Tiwari, 2020):

$$I = I_0 e^{(-\alpha d)}$$

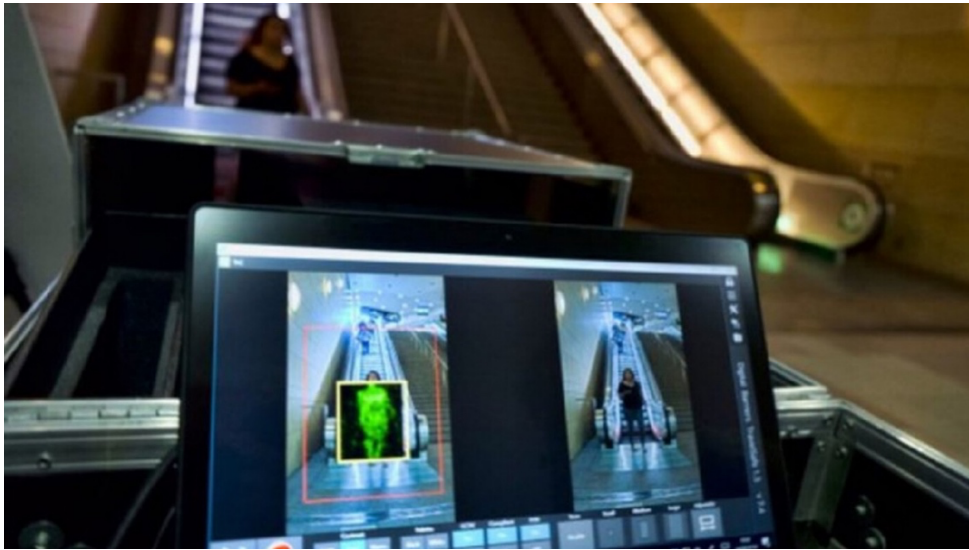
โดย I คือ ความเข้มของคลื่นที่ทะลุผ่าน, I_0 คือ ความเข้มของคลื่นเริ่มต้น, d คือ ความหนาของวัสดุ และ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

ตัวอย่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (α) ที่ความถี่ 1 THz สำหรับวัสดุต่าง ๆ: น้ำ $\alpha \approx 220 \text{ cm}^{-1}$, พลาสติก HDPE: $\alpha \approx 0.2 \text{ cm}^{-1}$, กระดาษ: $\alpha \approx 5\text{-}10 \text{ cm}^{-1}$, เซรามิก Al₂O₃: $\alpha \approx 0.5 \text{ cm}^{-1}$ ค่าเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการทะลุทะลวงที่แตกต่างกันของคลื่นเทระเฮิรตซ์ผ่านวัสดุต่าง ๆ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีการตรวจจับและวิเคราะห์คลื่นเทระเฮิรตซ์

เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้พัฒนาอย่างรวดเร็วในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา โดยมีการคิดค้นวิธีการสร้างและตรวจจับคลื่นที่หลากหลายรวมถึงเทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลที่ซับซ้อนมากขึ้น ในด้านนิติวิทยาศาสตร์

เทคโนโลยีนี้มีศักยภาพสูงเนื่องจากสามารถตรวจสอบวัตถุได้โดยไม่ทำลายหลักฐาน และสามารถวิเคราะห์สารเคมีได้โดยไม่ต้องสัมผัสตัวอย่างโดยตรง



ภาพที่ 2 การสแกนหาผู้ต้องสงสัยจากระยะไกลโดยใช้เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์
ที่มา: <https://www.bangkokbiznews.com/tech/818129>

1) อุปกรณ์เครื่องมือและวิธีที่ใช้ในการสร้างและตรวจจับ (Kojima, 2023)

- การใช้เลเซอร์ที่เก็บเอนเนอร์ตรงข้าม: วิธีนี้ใช้เลเซอร์ในการสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์โดยใช้หลักการของการเก็บเอนเนอร์ตรงข้าม (Optical Rectification) โดยคลื่นเลเซอร์จะถูกส่งผ่านวัสดุที่มีคุณสมบัติพิเศษในการสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์เมื่อได้รับแสงเลเซอร์ เมื่อแสงเลเซอร์เข้าสัมผัสกับวัสดุชนิดนี้ จะเกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอนในวัสดุและส่งออกมาในรูปแบบของคลื่นเทระเฮิรตซ์

- การใช้สายอากาศนำแสง (Photoconductive Antenna): เป็นอุปกรณ์ที่สามารถแปลงสัญญาณคลื่นแสงเลเซอร์เป็นคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้ โดยอาศัยหลักการโฟโตคอนดักทีฟในวัสดุกึ่งตัวนำ เมื่อฉายแสงเลเซอร์พัลส์สั้นระดับเฟมโตวินาทีลงบนช่องว่างระหว่างขั้วโลหะที่มีสนามไฟฟ้า จะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะประจุอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการแผ่รังสีคลื่นเทระเฮิรตซ์ออกมา

- การใช้เฟมโตเซกกันต์ (Femtosecond) เลเซอร์: เลเซอร์ที่มีระยะเวลาของแต่ละช่วงเฟมโตเอมิตอร์สามารถสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้ โดยใช้การสั่นสะเทือนของอิเล็กตรอนในวัสดุเพื่อสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ (Wang & Pickwell-MacPherson, 2020)

- การใช้ตัวส่งสัญญาณคลื่นเทระเฮิรตซ์ มีเครื่องมือที่สามารถสร้างคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้โดยตรงมักใช้เทคโนโลยีวงจรรวม (Integrated Circuit) หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานในช่วงความถี่เทระเฮิรตซ์

2) เทคนิคการวิเคราะห์ข้อมูลเทระเฮิรตซ์ (Malhotra & Singh, 2021) แนวทางการตรวจวัดคลื่นเทระเฮิรตซ์ แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ

- การตรวจวัดแบบความร้อน (Bolometric thermal Detection) เมื่อคลื่นเทระเฮิรตซ์ผ่านอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นในช่วง THz จะมีการดูดกลืนพลังงานของคลื่นไว้ ทำให้อุปกรณ์มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น



- การตรวจวัดแบบคลื่น (Wave detection) การตรวจวัดวิธีนี้ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจวัด (Detector) ที่มีความเร็วสูงในการตรวจวัดด้วยเวลาคงตัวในหน่วยนาโนวินาที (ns) และต้องวัดที่อุณหภูมิห้อง
- การตรวจวัดแบบควอนตัม (Quantum detection) หรือการตรวจวัดอนุภาค โดยจะตรวจจับโฟตอนของคลื่นเทระเฮิรตซ์

ตารางที่ 2 ตารางสรุปเปรียบเทียบเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์กับเทคโนโลยีอื่น ๆ

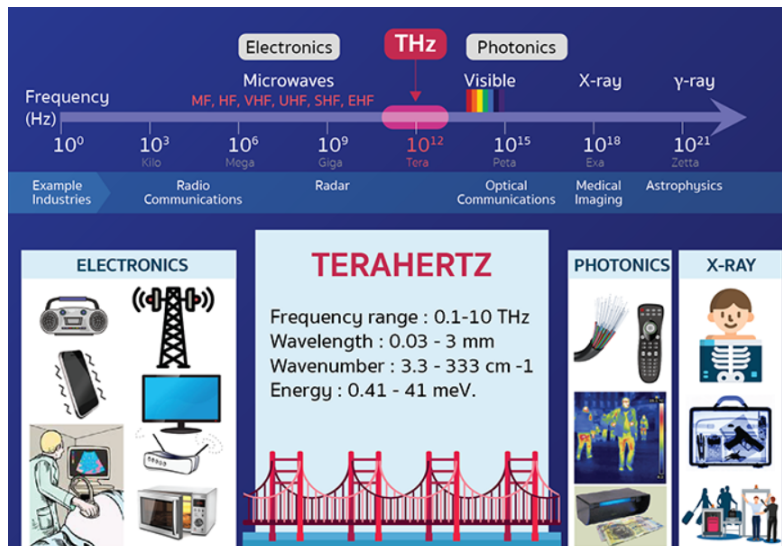
คุณสมบัติ	คลื่นเทระเฮิรตซ์	ไมโครเวฟ	อินฟราเรด	รังสีเอกซ์
การสร้างคลื่น				
ประสิทธิภาพ	1-10%	>50%	>20%	<1%
กำลังเอาต์พุต	0.1-1000 mW	1-1000 W	1-1000 mW	1-1000 W
ราคา	สูง	ปานกลาง	ต่ำ	สูงมาก
การตรวจจับ				
ความไว (NEP)	10^{-15} – 10^{-12} W/Hz	10^{-12} – 10^{-10} W/Hz	10^{-13} – 10^{-11} W/Hz	10^{-18} – 10^{-15} W/Hz
ความเร็วตอบสนอง	10 ps – 1 ms	1 ns – 1 μ s	1 ns – 1 ms	1 ps – 1 ns
การทำงานที่อุณหภูมิห้อง	บางชนิด	ส่วนใหญ่	ส่วนใหญ่	ต้องทำความเย็น
เทคนิคการวิเคราะห์				
การวิเคราะห์โครงสร้างโมเลกุล	ดี	พอใช้	ดีมาก	ดีเยี่ยม
การสร้างภาพ	ปานกลาง	ต่ำ	ดี	ดีเยี่ยม
ความปลอดภัย	สูง	ปานกลาง	สูง	ต่ำ
การทะลุทะลวงวัสดุ	ดี	ดีเยี่ยม	ต่ำ	ดีเยี่ยม
การประยุกต์ใช้ในนิติวิทยาศาสตร์				
การตรวจสอบเอกสาร	ดีเยี่ยม	ไม่เหมาะสม	ดี	อาจทำลายหลักฐาน
การวิเคราะห์สารเสพติด	ดีมาก	ไม่เหมาะสม	ดี	ดี แต่อาจเป็นอันตราย
การตรวจหาวัตถุซ่อนเร้น	ดี	ดีเยี่ยม	พอใช้	ดีเยี่ยม แต่อาจเป็นอันตราย

ที่มา: Kameshkov, Gerasimov & Kuznetsov, 2023; Yurduseven et al. 2019

ตารางนี้แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์มีจุดแข็งเฉพาะตัวในด้านความปลอดภัยและความสามารถในการวิเคราะห์โดยไม่ทำลายตัวอย่าง ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในงานนิติวิทยาศาสตร์แม้จะมีข้อจำกัดบางประการเมื่อเทียบกับเทคโนโลยีอื่น

การประยุกต์ใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์ (Kampfrath, 2023)

คลื่นเทระเฮิรตซ์มีคุณสมบัติพิเศษที่ทำให้เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์หลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความสามารถในการตรวจสอบวัตถุโดยไม่ทำลายหลักฐานและความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ต่อไปนี้เป็นกรอบการอธิบายการประยุกต์ใช้ในด้านต่าง ๆ พร้อมตารางเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น



ภาพที่ 3 ความถี่ของสัญญาณคลื่น

ที่มา: <https://www.nectec.or.th/research/research-project/terahertz-for-thailand.html>

- 1) การตรวจสอบเอกสารและการปลอมแปลง (Minamide & Nawata, 2020) คลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถใช้ในการตรวจสอบเอกสารและตรวจจับการปลอมแปลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากสามารถทะลุผ่านกระดาษและหมึกชนิดต่าง ๆ ได้ดี ทำให้สามารถตรวจสอบโครงสร้างภายในของเอกสารโดยไม่ต้องทำลาย นอกจากนี้ยังสามารถแยกแยะความแตกต่างของหมึกชนิดต่าง ๆ ได้ด้วย
- 2) การวิเคราะห์สารเคมีและยาเสพติด (Zhidong, Lijun, Li & Yuxin, 2021) คลื่นเทระเฮิรตซ์มีความไวสูงต่อการตรวจจับและวิเคราะห์สารเคมีและยาเสพติดหลายชนิด โดยสามารถตรวจสอบผ่านบรรจุภัณฑ์ได้โดยไม่ต้องเปิด ทำให้ลดความเสี่ยงในการสัมผัสสารอันตรายและป้องกันการปนเปื้อนของหลักฐาน
- 3) การตรวจหาลายนิ้วมือแฝง (Palka & Kowalski, 2020) เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถใช้ในการตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิวต่าง ๆ ได้ โดยไม่ต้องใช้สารเคมีหรือผงฝุ่น ทำให้ไม่เกิดความเสียหายต่อหลักฐานและสามารถตรวจสอบลายนิ้วมือบนพื้นผิวที่ยากต่อการตรวจสอบด้วยวิธีดั้งเดิมได้
- 4) การตรวจสอบวัตถุระเบิดและอาวุธ (Zhang, Du & Hong, 2020) คลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถทะลุผ่านวัสดุหลายชนิดได้ ทำให้สามารถตรวจจับวัตถุระเบิดและอาวุธที่ซ่อนอยู่ภายในวัสดุหรือเสื้อผ้าได้ นอกจากนี้ยังสามารถวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุระเบิดได้อีกด้วย
- 5) การตรวจสอบพื้นที่เกิดเหตุ (Vallejo-Mendoza et al., 2020) คลื่นเทระเฮิรตซ์สามารถปฏิบัติ การตรวจสอบสถานที่เกิดเหตุด้วยความสามารถในการสร้างแผนที่ 3 มิติที่มีความละเอียดสูง โดยไม่ต้องสัมผัสหรือรบกวนสภาพแวดล้อม ระบบสามารถวิเคราะห์รอยเท้าและร่องรอยการเคลื่อนไหวที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า รวมถึงตรวจพบคราบเลือดหรือของเหลวในร่างกายที่ถูกทำความสะอาดแล้ว การวิเคราะห์ตำแหน่งของวัตถุพยานต่าง ๆ ทำได้แม่นยำถึงระดับไมโครเมตร นอกจากนี้ยังสามารถตรวจสอบโครงสร้างภายในของวัสดุต่าง ๆ ในที่เกิดเหตุ เช่น ผนัง พื้น หรือเฟอร์นิเจอร์ เพื่อหาวัตถุพยานที่ถูกซ่อนไว้ ข้อมูลทั้งหมดนี้สามารถนำมา



สร้างเป็นแบบจำลองดิจิทัลที่ช่วยในการวิเคราะห์และจำลองเหตุการณ์ได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างมากในการสืบสวนและการนำเสนอหลักฐานในชั้นศาล

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้คลื่นתרשתกับเทคนิคอื่น ๆ ในงานนิติวิทยาศาสตร์

การประยุกต์ใช้	คลื่นתרשת	รังสีเอกซ์	อินฟราเรด	เทคนิคทางเคมี
การตรวจสอบเอกสารและการปลอมแปลง				
ความสามารถในการทะลุทะลวง	ดีมาก	ดีเยี่ยม	ปานกลาง	ไม่สามารถ
การแยกแยะชนิดหมึก	ดี	พอใช้	ดี	ดีมาก
ความเสียหายต่อเอกสาร	ไม่มี	อาจเกิด	ไม่มี	อาจเกิด
ความเสียหายของภาพ	ปานกลาง	สูงมาก	ปานกลาง	-
การวิเคราะห์สารเคมีและยาเสพติด				
ความสามารถในการระบุสาร	ดี	พอใช้	ดีมาก	ดีเยี่ยม
การตรวจสอบผ่านบรรจุภัณฑ์	ดีมาก	ดีเยี่ยม	พอใช้	ไม่สามารถ
ความปลอดภัยในการใช้งาน	สูง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
ความเร็วในการวิเคราะห์	เร็ว	เร็ว	เร็ว	ช้า
การตรวจลายนิ้วมือแฝง				
ความไวในการตรวจจับ	ดี	ไม่เหมาะสม	ดี	ดีมาก
การทำลายลายนิ้วมือ	ไม่มี	อาจเกิด	ไม่มี	อาจเกิด
การใช้งานบนพื้นผิวที่หลากหลาย	ดีมาก	จำกัด	ดี	จำกัด
ความยากในการใช้งาน	ปานกลาง	ยาก	ง่าย	ปานกลาง
การตรวจสอบวัตถุระเบิดและอาวุธ				
ความสามารถในการทะลุทะลวง	ดี	ดีเยี่ยม	พอใช้	ไม่สามารถ
การระบุองค์ประกอบทางเคมี	ดี	พอใช้	ดีมาก	ดีเยี่ยม
ความปลอดภัยในการใช้งาน	สูง	ต่ำ	สูง	ปานกลาง
ความแม่นยำในการตรวจจับ	ดี	ดีเยี่ยม	ดี	ดีมาก

ที่มา: Kampfrath, 2023; Zhao, Lu, Qian & Fan, 2022

จากตารางเปรียบเทียบ จะเห็นได้ว่าคลื่นתרשתมีข้อได้เปรียบในหลายด้าน โดยเฉพาะในแง่ของความปลอดภัยและการไม่ทำลายหลักฐาน อย่างไรก็ตาม แต่ละเทคนิคก็มีจุดแข็งเฉพาะตัว การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับลักษณะของงานและข้อจำกัดในแต่ละกรณี ในหลายสถานการณ์ การใช้เทคนิคคลื่นתרשתร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ อาจให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์

กรณีศึกษาและผลการทดลอง

การใช้คลื่นתרשתในงานนิติวิทยาศาสตร์ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา แม้ว่าจะยังไม่แพร่หลายเท่าเทคนิคดั้งเดิม แต่ก็มีกรณีศึกษาและผลการทดลองที่น่าสนใจหลายกรณี ต่อไปนี้เป็นตัวอย่างและการอธิบายโดยละเอียด:

1) ตัวอย่างคดีที่ใช้คลื่นתרשתในการพิสูจน์หลักฐาน

(1) คดีการปลอมแปลงเอกสารสำคัญในปี ค.ศ. 2018, สหรัฐอเมริกา (Mithun & Manohar, 2022): ในคดีนี้ มีการใช้เทคโนโลยีคลื่นתרשתในการตรวจสอบเอกสารที่สงสัยว่ามีการปลอมแปลง โดย



สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงในเนื้อกระดาดและความแตกต่างของหมึกที่ใช้ ซึ่งไม่สามารถสังเกตเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรือเทคนิคการถ่ายภาพทั่วไป ผลการตรวจสอบนี้นำไปสู่การพิสูจน์การปลอมแปลงและนำไปใช้เป็นหลักฐานในชั้นศาลได้สำเร็จ

(2) การตรวจจับยาเสพติดในสนามบินในปี ค.ศ. 2020, สหราชอาณาจักร (Knoop, Planitz, Wüst & Thevis, 2020): มีการทดลองใช้เครื่องสแกนคลื่นเทระเฮิร์ตซ์ในสนามบินนานาชาติแห่งหนึ่งในสหราชอาณาจักร เพื่อตรวจจับยาเสพติดที่ซุกซ่อนในกระเป๋าเดินทาง ระบบนี้สามารถตรวจพบยาเสพติดหลายชนิดผ่านวัสดุห่อหุ้มได้โดยไม่ต้องเปิดกระเป๋า ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจสอบและลดความเสี่ยงต่อเจ้าหน้าที่

(3) การตรวจสอบลายนิ้วมือบนปลอกกระสุนปืนในปี ค.ศ. 2021, ญี่ปุ่น (An & Carlson, 2022): นักวิจัยในญี่ปุ่นได้ใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยคลื่นเทระเฮิร์ตซ์ในการตรวจหาลายนิ้วมือบนปลอกกระสุนปืนที่ใช้ในคดีฆาตกรรม สามารถตรวจพบลายนิ้วมือที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าและวิธีการดั้งเดิม นำไปสู่การระบุตัวผู้ต้องสงสัยได้

2) งานวิจัยเชิงทดลองในห้องปฏิบัติการ

(1) การตรวจสอบเอกสารที่ถูกปลอมแปลง: จากผลการวิจัยทดลองในห้องปฏิบัติการ(Hoffmann, 2023) แสดงการใช้คลื่นเทระเฮิร์ตซ์ที่สามารถตรวจจับการแก้ไขเอกสารได้ดีกว่าวิธีดั้งเดิมถึง 35% โดยเฉพาะในกรณีที่มีการใช้หมึกชนิดเดียวกันในการแก้ไข ผลการวิจัยทดลองมีดังต่อไปนี้

- ความแม่นยำในการตรวจจับการแก้ไข: 98% (เทียบกับ 72% ของวิธีแบบดั้งเดิม)
- ความสามารถในการแยกแยะชนิดหมึก: สามารถแยกแยะหมึกที่มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกันได้

12 ชนิด

- เวลาที่ใช้ในการตรวจสอบต่อเอกสาร 1 หน้า: 5 นาที (เร็วกว่าวิธีดั้งเดิมถึง 3 เท่า)

(2) การตรวจหาลายนิ้วมือแฝง (You, Hu, Kamigaito, Takamura & Okumura, 2021): ทีมนักวิจัยจากมหาวิทยาลัย Tokyo Institute of Technology ได้พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยคลื่นเทระเฮิร์ตซ์เพื่อตรวจหาลายนิ้วมือแฝงบนพื้นผิววัตถุโดยผลการทดลองมีดังนี้

- ความละเอียดของภาพ: สามารถแยกแยะรายละเอียดของลายเส้นได้ถึง 100 ไมโครเมตร
- ประสิทธิภาพบนพื้นผิว: สามารถตรวจจับลายนิ้วมือได้บนโลหะ พลาสติก แก้ว และกระดาษ
- อายุของลายนิ้วมือแฝง: สามารถตรวจจับลายนิ้วมือที่มีอายุถึง 6 เดือนบนพื้นผิวที่เหมาะสม

(3) การวิเคราะห์สารเสพติด (National Institute of Standards and Technology, 2024): การศึกษาที่สถาบัน National Institute of Standards and Technology (NIST) ในสหรัฐอเมริกาได้ทดสอบประสิทธิภาพของคลื่นเทระเฮิร์ตซ์ในการตรวจจับสารเสพติดผ่านบรรจุภัณฑ์ ผลการทดลองมีดังนี้

- ความแม่นยำในการระบุชนิดสารเสพติด: 97% สำหรับสารเสพติด 10 ชนิดที่พบบ่อย
- การทะลุทะลวง: ตรวจจับผ่านพลาสติก กระดาษ และผ้าได้ที่มีความหนาถึง 5 มิลลิเมตร
- ชีตจำกัดต่ำสุดในการตรวจจับ: 10 มิลลิกรัมสำหรับโคเคน และ 50 มิลลิกรัมสำหรับเฮโรอีน

ตารางที่ 4 ตารางสรุปผลการทดลองเปรียบเทียบกับเทคนิคดั้งเดิม

การทดลอง	คลื่นเทระเฮิรตซ์	เทคนิคดั้งเดิม
การตรวจสอบเอกสารปลอม		
ความแม่นยำ	98%	72%
เวลาตรวจสอบ/หน้า	5 นาที	15 นาที
การวิเคราะห์ยาเสพติด		
ความแม่นยำในการระบุชนิด	97%	85% (GC-MS)
การทะลุทะลวงบรรจุภัณฑ์	5 มิลลิเมตร (มม.)	ไม่สามารถ
การตรวจลายนิ้วมือแฝง		
ความละเอียด	100 μm	500 μm (ผงฝุ่น)
อายุลายนิ้วมือที่ตรวจพบ	6 เดือน	1 – 2 เดือน

ที่มา: Jarrahi, 2023; Takiguchi & Nishio, 2022

จากกรณีศึกษาและผลการทดลองเหล่านี้ แสดงให้เห็นว่าเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์มีศักยภาพสูงในการประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะในด้านการตรวจสอบเอกสาร การวิเคราะห์สารเสพติด และการตรวจหาลายนิ้วมือแฝง อย่างไรก็ตาม ยังมีความท้าทายในด้านต้นทุนและความซับซ้อนของเทคโนโลยี ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในระยะสั้น

การวิเคราะห์และวิจารณ์

การประยุกต์ใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่โดดเด่นในหลายด้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการตรวจสอบหลักฐานโดยไม่ทำลายและความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน อย่างไรก็ตาม การนำเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างแพร่หลายยังคงมีความท้าทายที่สำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคดั้งเดิมคลื่นเทระเฮิรตซ์แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าในหลายกรณี โดยเฉพาะในการตรวจสอบเอกสารปลอมแปลงและการวิเคราะห์สารเสพติด ความสามารถในการทะลุทะลวงวัสดุหลายชนิดโดยไม่ต้องเปิดหรือทำลายบรรจุภัณฑ์เป็นข้อได้เปรียบที่สำคัญ นอกจากนี้ ยังสามารถตรวจหาลายนิ้วมือแฝงได้ด้วยความละเอียดสูงและสามารถตรวจพบลายนิ้วมือที่มีอายุมากกว่าวิธีดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม การใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ยังมีข้อจำกัดที่สำคัญ ต้นทุนของอุปกรณ์และเทคโนโลยียังคงสูงมาก ซึ่งอาจเป็นอุปสรรคต่อการนำมาใช้ในหน่วยงานที่มีงบประมาณจำกัด นอกจากนี้ ความซับซ้อนของเทคโนโลยียังต้องการผู้เชี่ยวชาญในการใช้งานและแปลผล ซึ่งอาจเป็นปัญหาในการฝึกอบรมบุคลากรให้มีทักษะที่เพียงพอ ความท้าทายอีกประการหนึ่งคือการพัฒนามาตรฐานที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากลสำหรับการใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์ การขาดมาตรฐานที่ชัดเจนอาจส่งผลกระทบต่อความยอมรับผลการวิเคราะห์ในชั้นศาล ซึ่งเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไข นอกจากนี้ ยังมี ความจำเป็นในการพัฒนามาตรฐานข้อมูลสเปกตรัมของสารต่าง ๆ ให้ครอบคลุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ ในแง่ของประเด็นทางจริยธรรมและกฎหมาย การใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ยังคงมีคำถามเกี่ยวกับความเป็นส่วนตัวและการละเมิดสิทธิมนุษยชน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อนำมาใช้ในที่สาธารณะ ความสามารถในการ "มอง

ทะเล" วัสดุบางอย่างอาจนำไปสู่การใช้งานที่ละเมิดความเป็นส่วนตัวของบุคคล จึงจำเป็นต้องมีการกำหนดแนวทางการใช้งานและกฎหมายที่ชัดเจนเพื่อป้องกันการละเมิดสิทธิ



ภาพที่ 4 การตรวจด้วยเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ในการตรวจจับหาสารเสพติด

ที่มา: <http://nkc.tint.or.th/nkc53/content/nstkc53-004.html>

นอกจากนี้ความไม่เท่าเทียมในการเข้าถึงเทคโนโลยีระหว่างหน่วยงานต่าง ๆ อันเนื่องมาจากต้นทุนที่สูง อาจนำไปสู่ความไม่เป็นธรรมในกระบวนการยุติธรรม หน่วยงานที่มีงบประมาณมากกว่าอาจมีความได้เปรียบในการสืบสวนและพิสูจน์หลักฐาน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อความยุติธรรมในภาพรวม แม้จะมีความท้าทายเหล่านี้ แต่ศักยภาพของคลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์ยังคงน่าสนใจและมีแนวโน้มที่จะพัฒนาต่อไปในอนาคต การลงทุนในการวิจัยและพัฒนาเพื่อลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพ และแก้ไขข้อจำกัดต่าง ๆ จะเป็นกุญแจสำคัญในการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น นอกจากนี้การสร้างความร่วมมือระหว่างนักวิทยาศาสตร์ ผู้บังคับใช้กฎหมาย และผู้กำหนดนโยบายจะเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาแนวทางการใช้งานที่มีประสิทธิภาพและเป็นที่ยอมรับในวงกว้าง โดยสรุปแม้ว่าคลื่นเทระเฮิรตซ์จะมีศักยภาพสูงในการปฏิบัติงานนิติวิทยาศาสตร์ แต่การนำมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นธรรมยังต้องการการพัฒนาและการแก้ไขความท้าทายอีกมาก การวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงการสร้างกรอบกฎหมายและจริยธรรมที่เหมาะสม จะเป็นสิ่งสำคัญในการปลดล็อกศักยภาพเต็มที่ของเทคโนโลยีนี้ในอนาคต

ความท้าทายและแนวทางการพัฒนา

แนวโน้มและการพัฒนาในอนาคตของเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่น่าตื่นเต้นและโอกาสในการปฏิวัติวงการนี้อย่างมีนัยสำคัญ การพัฒนาอย่างรวดเร็วของเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องและการค้นพบใหม่ๆ กำลังเปิดโอกาสให้มีการประยุกต์ใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในแง่มุมที่หลากหลายมากขึ้นของงานนิติวิทยาศาสตร์ ในด้านเทคโนโลยีใหม่ที่เกี่ยวข้องการพัฒนาแหล่งกำเนิดคลื่นเทระเฮิรตซ์แบบกะทัดรัดและมีประสิทธิภาพสูงกำลังก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว นักวิจัยกำลังทำงานบนเทคโนโลยีเลเซอร์ควอนตัมแคสเคด (Quantum Cascade) รุ่นใหม่ที่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งจะช่วยลดความซับซ้อนและต้นทุนของระบบลงอย่างมาก นอกจากนี้ การพัฒนาตัวตรวจจับคลื่นเทระเฮิรตซ์ที่มีความไวสูงขึ้น

และทำงานได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นกำลังช่วยเพิ่มความสามารถในการตรวจจับสารปริมาณน้อยและการวิเคราะห์ที่แม่นยำมากขึ้น

การบูรณาการเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (AI) และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) กับระบบคลื่นเทระเฮิรตซ์กำลังเปิดมิติใหม่ในการวิเคราะห์ข้อมูล อัลกอริทึมการประมวลผลภาพขั้นสูงสามารถช่วยในการแยกแยะรูปแบบและตรวจจับความผิดปกติในภาพที่ได้จากการสแกนด้วยคลื่นเทระเฮิรตซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวิเคราะห์และลดเวลาในการประมวลผล นอกจากนี้การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพสามมิติด้วยคลื่นเทระเฮิรตซ์กำลังก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะช่วยให้สามารถสร้างภาพจำลองสามมิติของวัตถุพยานและสถานที่เกิดเหตุได้อย่างละเอียด โดยไม่ต้องสัมผัสหรือเคลื่อนย้ายวัตถุ เทคนิคนี้มีศักยภาพในการปฏิบัติการตรวจสอบสถานที่เกิดเหตุและการวิเคราะห์หลักฐานทางกายภาพ ในแง่ของโอกาสในการประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์แขนงอื่น ๆ คลื่นเทระเฮิรตซ์กำลังแสดงศักยภาพที่น่าสนใจในหลายด้าน

ในด้านนิติพิษวิทยาการใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในการตรวจจับและวิเคราะห์สารพิษในตัวอย่างชีวภาพโดยไม่ต้องทำลายตัวอย่างกำลังได้รับความสนใจ เทคนิคนี้อาจช่วยในการตรวจหาสารพิษที่ระเหยง่ายหรือสลายตัวเร็วซึ่งอาจสูญเสียไปในกระบวนการวิเคราะห์แบบดั้งเดิม

ในด้านนิติชีววิทยา การใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในการวิเคราะห์ DNA โดยไม่ต้องสกัดหรือเพิ่มปริมาณ DNA กำลังอยู่ในขั้นตอนการวิจัย หากประสบความสำเร็จ เทคนิคนี้อาจช่วยลดเวลาและต้นทุนในการวิเคราะห์ DNA อย่างมาก นอกจากนี้ ยังมีการศึกษาการใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในการตรวจสอบอายุของคราบเลือดและของเหลวในร่างกาย ซึ่งช่วยกำหนดลำดับเวลาของเหตุการณ์ในคดีอาชญากรรมได้แม่นยำยิ่งขึ้น

ในด้านการตรวจพิสูจน์ลายมือชื่อและเอกสาร การพัฒนาเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยคลื่นเทระเฮิรตซ์ที่มีความละเอียดสูงขึ้นอาจช่วยในการตรวจจับการปลอมแปลงที่ซับซ้อนมากขึ้น เช่น การตรวจสอบลำดับการเขียนและความดันของปากกาบนกระดาษ ซึ่งอาจไม่สามารถตรวจพบได้ด้วยวิธีการดั้งเดิม

อย่างไรก็ตามการพัฒนาเหล่านี้ยังคงเผชิญกับความท้าทายหลายประการ การลดต้นทุนและความซับซ้อนของระบบยังคงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องได้รับการแก้ไขเพื่อให้เทคโนโลยีนี้สามารถนำมาใช้ได้อย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการนิติวิทยาศาสตร์ทั่วไป นอกจากนี้การพัฒนามาตรฐานและโปรโตคอลที่เป็นที่ยอมรับในระดับสากลสำหรับการใช้คลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์ยังคงเป็นสิ่งจำเป็น เพื่อให้ผลการวิเคราะห์เป็นที่ยอมรับในชั้นศาลและในชุมชนนิติวิทยาศาสตร์

แนวโน้มและการพัฒนาในอนาคตของเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิรตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์แสดงให้เห็นถึงศักยภาพที่น่าตื่นเต้นในการปฏิวัติวิธีการตรวจพิสูจน์หลักฐานและการสืบสวนคดีอาชญากรรม การบูรณาการเทคโนโลยีใหม่ ๆ และการขยายขอบเขตการประยุกต์ใช้ไปสู่แขนงอื่น ๆ ของนิติวิทยาศาสตร์กำลังเปิดโอกาสใหม่ ๆ ในการเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการวิเคราะห์หลักฐาน อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จในการนำเทคโนโลยีนี้มาใช้อย่างแพร่หลายจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการแก้ไขความท้าทายที่มีอยู่ ทั้งในด้านเทคนิค เศรษฐศาสตร์ และกฎหมาย การวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง รวมถึงความร่วมมือระหว่าง



นักวิทยาศาสตร์ ผู้บังคับใช้กฎหมาย และผู้กำหนดนโยบาย จะเป็นกุญแจสำคัญในการปลดล็อกศักยภาพเต็มที่ของเทคโนโลยีคลิ่นเทรเอิตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์ในอนาคต

กฎหมายและระเบียบแบบแผนข้อบังคับในการใช้คลิ่นเทรเอิตซ์

การใช้คลิ่นเทรเอิตซ์ในทางกฎหมายความเป็นส่วนตัวหรือทางด้านนิติวิทยาศาสตร์เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่มีความสามารถพิเศษในการ "มองทะลุ" วัสดุซึ่งทำให้ต้องมีการควบคุมและระเบียบแบบแผนอย่างชัดเจน

1) ต่างประเทศ

- รัสเซียและอเมริกา: FCC ออกแบบข้อกำหนดระเบียบปฏิบัติเฉพาะในการใช้คลิ่นเทรเอิตซ์ โดยเน้นการจำกัดกำลังส่งและการคุ้มครองความเป็นส่วนตัว (Sokolova, 2019)

- สหภาพยุโรป: เน้นการป้องกันการรบกวนด้วยคลื่นความถี่อื่นและการคุ้มครองข้อมูลความเป็นส่วนบุคคลตาม GDPR (Miao & Hao, 2020)

- ญี่ปุ่น: อนุญาตให้ใช้คลิ่นเทรเอิตซ์ในเชิงพาณิชย์ แต่สร้างข้อจำกัดในด้านความมั่นคงและการสืบสวน (Maruyama, 2023)

2) สถานการณ์ในประเทศไทย

- ยังไม่มีระบบกฎหมายในการควบคุมเรื่องคลิ่นเทรเอิตซ์ แต่หากจะกระทำการใดจำเป็นต้องอยู่ภายใต้การกำกับดูแลของ กสทช.

- ความท้าทายในอนาคต: การนำเทคโนโลยีเทรเอิตซ์มาเพิ่มประสิทธิภาพในทางนิติวิทยาศาสตร์และด้านความมั่นคง

3) ประเด็นด้านกฎหมายและแบบแผนข้อบังคับ

- ความปลอดภัย: ต้องกำหนดมาตรฐานการใช้งานที่ไม่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพ

- ความเป็นส่วนตัว: มีระเบียบกฎหมายและข้อบังคับเพื่อคุ้มครองการละเมิดสิทธิส่วนบุคคล

- การใช้ในงานสืบสวน: มีกรอบกฎหมายและข้อปฏิบัติที่ชัดเจนในการขออนุญาตและการใช้เป็นวัตถุหลักฐานในชั้นศาล

- การปรับปรุงแก้ไขกฎหมายให้ทันต่อความก้าวหน้าของเทคโนโลยี

แนวทางการพัฒนากฎหมายที่เหมาะสมจำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากทุกภาคส่วน เพื่อการสร้างสรรค์ระหว่างประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์และการคุ้มครองสิทธิของประชาชน อีกทั้งเสริมประสิทธิภาพด้านความมั่นคง

บทสรุป

การประยุกต์ใช้คลิ่นเทรเอิตซ์ในงานนิติวิทยาศาสตร์กำลังสร้างการเปลี่ยนแปลงครั้งสำคัญในการตรวจพิสูจน์หลักฐาน ด้วยคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทะลุผ่านวัสดุทึบแสง มีความไวต่อการตรวจจับสารเคมี และปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงาน ทำให้เทคโนโลยีนี้มีศักยภาพสูงในการยกระดับงานนิติวิทยาศาสตร์ ผลการศึกษา



แสดงให้เห็นประสิทธิภาพที่โดดเด่นในหลายด้าน โดยสามารถตรวจจับการปลอมแปลงเอกสารได้แม่นยำถึง 98% วิเคราะห์สารเสพติดผ่านบรรจุภัณฑ์ได้แม่นยำ 97% และตรวจหาลายนิ้วมือแฝงที่มีอายุถึง 6 เดือน

อย่างไรก็ตาม การนำเทคโนโลยีนี้มาใช้ยังมีความท้าทายสำคัญ โดยพบว่ามีความเพียง 5% ของห้องปฏิบัติการนิติวิทยาศาสตร์ทั่วโลกที่มีการใช้งานในปี 2022 เนื่องจากต้นทุนที่สูงและความซับซ้อนของเทคโนโลยี แต่คาดว่าตลาดเทคโนโลยีจะเติบโต 27.2% ต่อปีระหว่างปี 2021-2027 โดยการพัฒนาจะมุ่งเน้นการลดต้นทุน การบูรณาการกับปัญญาประดิษฐ์ และการขยายการประยุกต์ใช้ไปสู่งานนิติวิทยาศาสตร์ด้านอื่น ซึ่งจะยกระดับมาตรฐานการพิสูจน์หลักฐานและการสืบสวนคดีอาชญากรรม

ข้อเสนอแนะ

1) ข้อเสนอแนะเชิงนโยบาย

- กำหนดกรอบกฎหมายระเบียบแบบแผนการปฏิบัติและข้อบังคับที่เหมาะสมสำหรับการใช้คลื่นเทระเฮิร์ตซ์ในงานด้านความมั่นคงอีกทั้งด้านอื่น ๆ เช่น ในงานนิติวิทยาศาสตร์

2) ข้อเสนอแนะการวิจัยในอนาคต

- ศึกษาผลกระทบทางจริยธรรมกฎหมายและข้อบังคับรวมถึงข้อดีข้อเสียในการใช้เทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิร์ตซ์ โดยคำนึงถึงความเป็นส่วนตัวและสิทธิมนุษยชนพร้อมทั้งข้อจำกัดอื่น ๆ

- วิจัยและพัฒนาการสร้างเทคโนโลยีคลื่นเทระเฮิร์ตซ์เพื่อมาใช้งานหลากหลายด้าน

เอกสารอ้างอิง

- An, M., & Carlson, J. (2022). Politics at the Gun Counter: Examining Partisanship and Masculinity among Conservative Gun Sellers during the 2020 Gun Purchasing Surge. *Social Problems*. spac046. <https://doi.org/10.1093/socpro/spac046>
- Barker, X. E. R., & Pickwell-MacPherson, E. (2022). *Finite Rate of Innovation Theory Applied to Terahertz Signal Processing*. 2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Delft, Netherlands.
- Bortolotti, L. (2020). *The Epistemic Innocence Project*. The Epistemic Innocence of Irrational Beliefs, Oxford University Press, 1-18.
- Fesenko, I. (2021). The Federal Bureau of Investigation (FBI) Negotiator Uses Plural Addressing. *Linguistic Cues to Social Meaning*, 1(1), 7-8.
- Hoffmann, M. C. (2023). *Terahertz Pump/X-ray Probe Experiments At LCLS*. 2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). QC, Canada.
- IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. (2021). *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 11(3), C3-C3.



- Jarrahi, M. (2023). Plasmonic Terahertz Camera for Real-Time Terahertz Imaging. 2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). QC, Canada.
- Kameshkov, O., Gerasimov, V., & Kuznetsov, S. (2023). *Studying Sensor Capabilities of Archimedean Spiral Metamaterials with C-Shaped Resonator using thin Dielectric Films in the Terahertz Frequency Range*. The 5th international Conference "Terahertz and Microwave Radiation: Generation, Detection and Applications" (Tera 2023). Abstract book.
- Kampfrath, T. (2023). *Terahertz spintronics: New insights into magnetic phenomena and their application in terahertz photonics*. 2023 48th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). QC, Canada.
- Knoop, A., Planitz, P., Wüst, B., & Thevis, M. (2020). Analysis of cobalt for human sports drug testing purposes using ICP- and LC-ICP-MS. *Drug Testing and Analysis*, 12(11-12), 1666-1672.
- Kojima, S. (2023). *Terahertz Spectroscopy in Advanced Materials Science*. Trends in Terahertz Technology. Intech Open.
- Liu, K., Gong, Z., & Yi, J. (2021). *Direct-detection Single-photon Radar at Terahertz Frequencies*. 2021 13th Global Symposium on Millimeter-Waves & Terahertz (GSMM). Nanjing, China.
- Malhotra, I., & Singh, G. (2021). *Terahertz Near-Field Imaging and Sensing*. In *Terahertz Antenna Technology for Imaging and Sensing Applications*. Springer, Cham. 217-234.
- Maruyama, E. (2023). *Japanese law of privacy and health*. In *Privacy and Medical Confidentiality in Healthcare*. Edward Elgar Publishing.
- Miao, Z.-W., & Hao, Z.-C. (2020). *Generation of Millimeter-Wave and Terahertz Airy Waves Using Metasurfaces*. In 2020 13th UK-Europe-China Workshop on Millimetre-Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). IEEE.
- Military Radar Market By Type (Ground Based, Naval, Airborne and Space Based), By Application (Surveillance, Weapon Guidance), Industry Trends, Estimation & Forecast, 2016 - 2024.
- Minamide, H., & Nawata, K. (2020). *Extreme Terahertz-wave Parametric oscillator and its application*. 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). NY, USA.
- Mithun, M. & Manohar, N. (2022). *Document Signature Recognition and Verification Using Neural Network*. 2022 International Conference on Futuristic Technologies (INCOFT). Belgaum, India.



- Mounaix, P. (2022). *Advanced Data Processing For Tomography and 3D Rendering With Terahertz Waves*. 2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz).
- National Institute of Standards and Technology. (2023). *The NIST Cybersecurity Framework 2.0*. Gaithersburg.
- Neu, J., & Schmuttenmaer, C. A. (2020). *Terahertz Time Domain Spectroscopy and Density Functional Theory Calculations of Peptides*. 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). NY, USA.
- Palka, N., & Kowalski, M. (2020). *Terahertz detection of fingerprint spoofing*. 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). NY, USA.
- Ropero-Miller, J. D. (2023). European Network of Forensic Science Institutes (ENFSI). *Encyclopedia of Forensic Sciences, (Third Edition)*, 2, 304-305.
- Samuels, A. (2022). Forensic Science Regulator: The Forensic Science Regulator Act 2021. *Medico-Legal Journal*, 90(2).
- Sirbu, M. (2022). Status of the audience of the National Institute of Justice: comparative aspect and issues. *The Journal of the National Institute of Justice*, 4(63), 56-60.
- Sokolova, M. (2019). *Between business interests and security: American IT giants and new laws on personal data protection*. Russia and America in the 21st Century.
- Takiguchi, K., & Nishio, N. (2022). *Direct demultiplexing method of terahertz-wave multiple carrier channels in terahertz domain utilizing terahertz-wave asymmetric interferometer*. L. P. Sadwick & T. Yang (Eds.), *Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XV*.
- Tiwari, S. (2020). Waves and particles in the crystal. *Semiconductor Physics Principles, Theory and Nanoscale*, 78-136.
- Vallejo-Mendoza, R., Olivares-Perez, A., Trevino-Palacios, C. G., Paz-Martinez, G., Briseno-Carmona, M. A., Villa-Hernandez, J. M. & Herran-Cuspinera, R. M. (2020). *High-resolution motorized x-z translation stage to scan 3D objects using terahertz technology*. *Proceedings Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XIII*.
- You, J., Hu, C., Kamigaito, H., Takamura, H., & Okumura, M. (2021). *Abstractive Document Summarization with Word Embedding Reconstruction*. *Proceedings of the Conference*



Recent Advances in Natural Language Processing - Deep Learning for Natural Language Processing Methods and Applications.

- Yurduseven, O., Fromenteze, T., Cooper, K., Chattopadhyay, G., & Smith, D. R. (2019). *From Microwaves to Submillimeter Waves: Modern Advances in Computational Imaging, Radar, and Future Trends*. Proceedings 10917, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications XII.
- Zhang, Z., Du, Y., & Hong, Z. (2020). *Terahertz Investigation of Drug-Drug Cocrystal Involving 4-aminosalicylic Acid and Pyrazinamide*. 2020 45th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz). NY, USA.
- Zhao, J., Lu, S., Qian, Z., & Fan, S. (2022). *Enhanced selectivity based on molecular imprinting for aqueous glucose detection with terahertz waves*. 2022 47th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Delft, Netherlands.
- Zhidong, C., Lijun, Y., Li, C., & Yuxin, H. (2021). *Application of Terahertz Spectroscopy in Defect Detection of Power Cable Terminal Insulation Material*. 2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). Chengdu, China.