บทความวิชาการ

การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในงานวิจัยทางด้านประสาทวิทยาการศึกษา

กานดา เลิศลดาลักษณ์*
ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมประสาทวิทยาศาสตร์ สถาบันการเรียนรู้ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 08 9615 3154 อีเมล: kanda.ler@mail.kmutt.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.02.001
รับเมื่อ 20 มิถุนายน 2568 แก้ไขเมื่อ 21 ตุลาคม 2568 ตอบรับเมื่อ 3 พฤศจิกายน 2568 เผยแพร่ออนไลน์ 11 กุมภาพันธ์ 2569
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมางานวิจัยด้านประสาทวิทยาการศึกษาได้เติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมุ่งทำความเข้าใจกลไกการทำงานของสมองที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเรียนรู้ของมนุษย์ เพื่อพัฒนาแนวทางการเรียนการสอนที่มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น หนึ่งในเทคนิคที่ได้รับความสนใจคือเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared Spectroscopy; NIRS) ซึ่งเป็นเครื่องมือถ่ายภาพสมองแบบไม่รุกรานที่สามารถตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของออกซีฮีโมโกลบินและดีออกซีฮีโมโกลบินในสมองได้แบบเรียลไทม์ บทความนี้นำเสนอแนวคิดในการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ในงานวิจัยด้านประสาทวิทยาการศึกษา ซึ่งเป็นสาขาที่บูรณาการระหว่างประสาทวิทยาศาสตร์ จิตวิทยาการศึกษา และการจัดการเรียนรู้ โดยอธิบายหลักการทำงานของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคนี้ ตลอดจนยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ในงานวิจัยด้านการเรียนรู้ การประเมินพัฒนาการ ทักษะการรู้คิด การเรียนรู้ร่วม และภาวะบกพร่องในการเรียนรู้ เพื่อนำเสนอแนวโน้มการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในฐานะเครื่องมือที่ช่วยเสริมสร้างความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับกระบวนการเรียนรู้ในช่วงวัยต่าง ๆ และสนับสนุนการออกแบบการจัดการเรียนรู้ที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ประสาทวิทยาการศึกษา กิจกรรมทางสมอง การเรียนรู้ การรู้คิด

การอ้างอิงบทความ: กานดา เลิศลดาลักษณ์, "การประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในงานวิจัยทางด้านประสาทวิทยาการศึกษา," *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 36, ฉบับที่ 2, หน้า 1–16, เม.ย.–มิ.ย. 2569, เลขที่บทความ 262-088078, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.02.001.

Academic Article

Application of the Near-Infrared Spectroscopy Technique in Neuroeducation Research

Kanda Lertladaluck*
Neuroscience Center for Research and Innovation, Learning Institute, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 08 9615 3154, E-mail: kanda.ler@mail.kmutt.ac.th
DOI: 10.14416/j.kmutnb.2026.02.001
Received 20 June 2025; Revised 21 October 2025; Accepted 3 November 2025; Published online: 11 February 2026
© 2026 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Over the past decade, research in neuroeducation has continuously expanded, aiming to understand the brain mechanisms underlying human learning processes and to develop more effective teaching and learning approaches. One of the techniques that has attracted increasing interest is Near-Infrared Spectroscopy (NIRS), a non-invasive neuroimaging tool capable of measuring real-time changes in oxyhemoglobin and deoxyhemoglobin concentrations in the brain. This article presents the concept of applying NIRS in neuroeducation research, an interdisciplinary field that integrates neuroscience, educational psychology, and instructional practices. It describes the fundamental principles of NIRS, its advantages and limitations, and provides examples of its applications in studies on learning processes, developmental assessment, cognitive skills, collaborative learning, and learning disabilities. This work also discusses the emerging trends in utilizing NIRS as a promising tool to deepen our understanding of learning processes across different developmental stages and to support the design of more effective and developmentally appropriate educational practices.

Keywords: Near-infrared Spectroscopy, Neuroeducation, Neural Activity, Learning, Cognition

Please cite this article as: K. Lertladaluck, "Application of the near-infrared spectroscopy technique in neuroeducation research," *The Journal of KMUTNB*, vol. 36, no. 2, pp. 1–16, Apr.–Jun. 2026 (in Thai), Art. no. 262-088078, doi: 10.14416/j.kmutnb.2026.02.001.

1. บทนำ

ในอดีตที่ผ่านมา ครู อาจารย์ และผู้สอนส่วนใหญ่อาศัยหลักการทางจิตวิทยาการศึกษาในการจัดกระบวนการเรียนรู้เพื่อพัฒนาผู้เรียนมาอย่างยาวนาน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากพฤติกรรมของมนุษย์มีความซับซ้อนทำให้การพึ่งพาเพียงหลักการทางจิตวิทยาในการจัดกระบวนการเรียนรู้อาจไม่เพียงพอที่จะอธิบายพฤติกรรมบางอย่างของผู้เรียนที่เกิดขึ้นจริงในห้องเรียนได้อย่างครบถ้วน ปัจจุบันงานวิจัยทางด้านประสาทวิทยาศาสตร์ (Neuroscience) ได้เติบโตมากขึ้นและเข้ามามีบทบาทในหลาย ๆ สาขาวิชา ไม่ว่าจะเป็นจิตวิทยา เศรษฐศาสตร์ รวมไปถึงงานทางด้านการศึกษา ทำให้เกิดเป็นสาขาวิชาใหม่ ๆ ประสาทวิทยาการศึกษา (Neuroeducation) เป็นแนวทางในการจัดการศึกษาที่บูรณาการระหว่างองค์ความรู้ทางด้านประสาทวิทยาศาสตร์ จิตวิทยาการศึกษา และวิธีการจัดการเรียนรู้ โดยมีเป้าหมายที่จะพัฒนาศักยภาพของมนุษย์ให้มีประสิทธิภาพ ซึ่งองค์ความรู้ทางด้านประสาทวิทยาศาสตร์จะช่วยให้ผู้สอนได้เข้าใจว่ากระบวนการทำงานของสมองนั้นสัมพันธ์กับการเรียนรู้ของมนุษย์อย่างไร อีกทั้งความเชื่อมโยงองค์ความรู้ทางด้านประสาทวิทยาศาสตร์เข้ากับหลักการทางจิตวิทยาช่วยให้เข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างการทำงานของสมองกับกระบวนการทางจิตและพฤติกรรมของผู้เรียนได้ดีขึ้น ซึ่งการบูรณาการร่วมกันนี้จะช่วยให้ผู้สอนสามารถวางแผนออกแบบการเรียนการสอน และสร้างกระบวนการจัดการการเรียนรู้ที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมกับผู้เรียนได้ดียิ่งขึ้น ในขณะเดียวกันแม้ว่าการศึกษาวิจัยทางด้านสมองที่เกี่ยวข้องกับการเรียนรู้มากขึ้น แต่ก็ยังไม่เพียงพอที่จะอธิบายพฤติกรรมมนุษย์ที่มีความหลากหลายและซับซ้อน ดังนั้นการสร้างองค์ความรู้ทางด้านประสาทวิทยาศาสตร์ในเชิงการศึกษาและการรู้คิด (Cognitive Functions) ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปเพื่อให้สามารถสร้างกรอบแนวคิดแบบสหสาขาวิชาที่บูรณาการด้านจิตใจ สมอง และการศึกษา (Mind, Brain, and Education; MBE) ได้อย่างมีระบบและลึกซึ้งมากขึ้น [1]–[3]

ในงานวิจัยด้านการเรียนรู้และพัฒนาการของผู้เรียนนั้นนิยมใช้แบบสอบถาม แบบประเมิน การสังเกตพฤติกรรม และการวัดผลสัมฤทธิ์ของผู้เรียน เนื่องจากเครื่องมือดังกล่าวใช้งานได้ง่าย มีความสะดวกและต้นทุนไม่สูงนัก และสามารถเก็บข้อมูลจากผู้เรียนจำนวนมากในระยะเวลาอันสั้นได้ อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องมือเหล่านี้อาจไม่สะท้อนพฤติกรรมจริงได้อย่างแม่นยำ เนื่องมาจากอคติในการตอบหรือสังเกต นอกจากนี้เครื่องมือที่พัฒนาในต่างประเทศอาจใช้ไม่ได้โดยตรงกับผู้เรียนในไทยหากไม่ผ่านการแปลและปรับบริบทให้เข้ากัน ในปัจจุบันเริ่มมีการนำเทคนิคการถ่ายภาพสมอง (Neuroimaging Techniques) เช่น เทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง (Electroencephalography; EEG) เทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Functional Magnetic Resonance Imaging; fMRI) และเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (Near-Infrared Spectroscopy; NIRS) เป็นต้น มาใช้ในงานวิจัยทางการศึกษาและการรู้คิดมากขึ้น [4]–[8] เทคนิคเหล่านี้ทำให้ทราบว่าสมองตอบสนองต่อการเรียนรู้แบบใดและมีกลไกการทำงานอย่างไร สามารถวัดผลได้ทันทีหลังจากได้รับสิ่งเร้า (Stimulus) และลดอคติของการวัดและประเมินผลลง เทคนิคเหล่านี้ช่วยให้นักวิจัยสามารถศึกษาและเข้าใจการทำงานและพัฒนาการของสมองที่เชื่อมโยงกับผลลัพธ์การเรียนรู้ได้ดีขึ้น ซึ่งส่งผลให้งานทางด้านประสาทวิทยาศาสตร์ในบริบทการศึกษาเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นด้วย [4], [5]

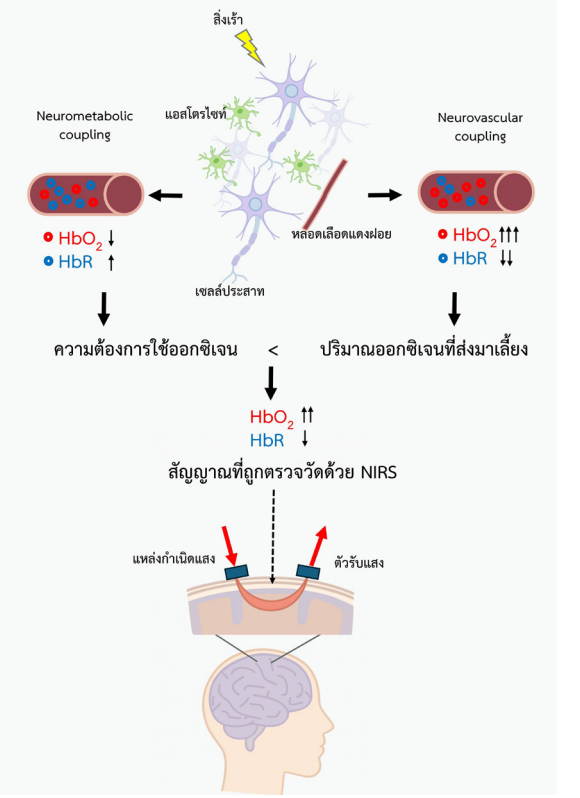
เทคโนโลยีการถ่ายภาพสมองในปัจจุบันมีความก้าวหน้าไปมากแต่ละวิธีมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ในประเทศไทยนั้น เทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง และเทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ค่อนข้างเป็นที่รู้จักในวงกว้างโดยเฉพาะในทางการแพทย์ [6], [7] แต่เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ยังไม่เป็นที่รู้จักหรือนำมาใช้กันมากนัก ซึ่งเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ มีค่าใช้จ่ายที่ไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ ติดตั้งและใช้งานได้ค่อนข้างง่าย มีรุ่นที่สามารถเคลื่อนย้ายไปใช้งานนอกสถานที่ได้ และในระหว่างการตรวจวัดอาสาสมัครไม่จำเป็นต้องควบคุมการเคลื่อนไหวของดวงตามากนัก เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ จึงอาจเป็น

เทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในงานวิจัยทางประสาทวิทยาการศึกษาได้ [9]–[11] ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากที่ประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เพื่อศึกษากระบวนการเรียนรู้ของสมองในหลายมิติอย่างต่อเนื่อง อาทิ การติดตามพัฒนาการการเรียนรู้ของผู้เรียนตามช่วงวัย [12]–[14] การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปี-อินฟราเรดย่านใกล้เป็นเครื่องมือประเมินผลของกิจกรรมการสอนต่อความสามารถการเรียนรู้และทักษะการรู้คิด [15], [16] การตรวจอิทธิพลของปัจจัยส่วนบุคคลและบริบทแวดล้อมต่อการเรียนรู้และความสามารถทางการรู้คิด [17], [18] การศึกษาการเรียนรู้ร่วมด้วยเทคนิคไฮเปอร์สแกนนิ่งเพื่อทำความเข้าใจการเชื่อมโยงกิจกรรมสมองระหว่างบุคคล [19] ตลอดจนการศึกษาภาวะบกพร่องในการเรียนรู้และภาวะที่ส่งผลกระทบต่อการเรียนรู้ [20], [21] บทความฉบับนี้จึงมุ่งทบทวนและสังเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในงานประสาทวิทยาการศึกษา โดยเน้นการอธิบายหลักการทำงาน ข้อดี–ข้อจำกัด และแนวทางการนำไปใช้ในบริบทการเรียนรู้ที่หลากหลาย เพื่อชี้ให้เห็นขอบเขตปัจจุบันและทิศทางการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

2. หลักการของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการตรวจวัดกิจกรรมทางสมอง

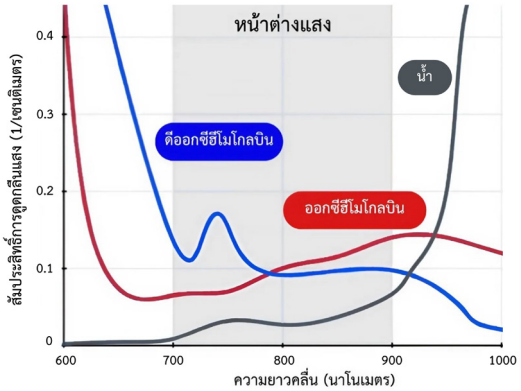
สมองประกอบด้วยเซลล์ประสาทจำนวนมาก เมื่อเซลล์ประสาทมีกิจกรรมหรือการทำงานเพิ่มขึ้นจะเกิดความต้องการใช้พลังงานและออกซิเจนเพิ่มขึ้น (Neurometabolic Coupling) ระบบประสาทจึงส่งสัญญาณไปยังหลอดเลือดแดงฝอยในบริเวณนั้นเพื่อเพิ่มการไหลเวียนของเลือด (Neurovascular Coupling) โดยมีการขนส่งออกซิเจนและสารอาหารให้เพียงพอแก่การทำงานของสมองในขณะนั้น (รูปที่ 1) [9], [22]–[24]

ในการขนส่งออกซิเจนในเลือดนั้นออกซิเจนที่เข้าสู่หลอดเลือดฝอยในปอดจะจับกับโปรตีนชนิดหนึ่งที่เรียกว่าฮีโมโกลบิน (Hemoglobin) ซึ่งอยู่ในเซลล์เม็ดเลือดแดง ฮีโมโกลบินที่มีออกซิเจน เรียกว่า ออกซีฮีโมโกลบิน

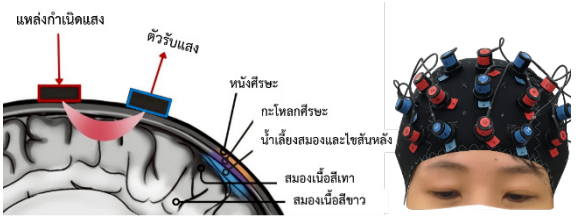


รูปที่ 1 การเชื่อมโยงระหว่างเซลล์ประสาทและหลอดเลือดที่สัมพันธ์กับสัญญาณเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ โดยสิ่งเร้าทำให้กิจกรรมของเซลล์ประสาทเพิ่มขึ้น นำไปสู่การใช้พลังงานและออกซิเจนสูงขึ้น ช่วงเริ่มต้นจึงมักมีออกซีฮีโมโกลบิน ลดลงเล็กน้อยและดีออกซีฮีโมโกลบินเพิ่มขึ้นชั่วครู่ (Initial Dip) จากนั้นสัญญาณจากเซลล์ประสาทและแอสโตรไซต์จะกระตุ้นให้หลอดเลือดแดงฝอยขยายตัวเพิ่มการไหลเวียนเลือดเฉพาะที่ เพื่อนำออกซิเจนและสารอาหารมาเลี้ยงบริเวณนั้นมากขึ้น ผลรวมคือออกซีฮีโมโกลบิน เพิ่มขึ้นชัดเจน และดีออกซีฮีโมโกลบินลดลง ซึ่งเป็นรูปแบบสัญญาณที่ NIRS ตรวจวัดได้

(Oxyhemoglobin; HbO_2) จะถูกลำเลียงผ่านระบบไหลเวียนเลือดไปยังส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เมื่อเลือดแดงที่มีออกซิเจนไหลไปยังบริเวณที่มีระดับออกซิเจนต่ำ เช่น เนื้อเยื่อและเซลล์ที่มีกิจกรรมสูง ออกซิเจนจะหลุดจากฮีโมโกลบินและแพร่เข้าสู่



รูปที่ 2 การดูดกลืนแสงของออกซีฮีโมโกลบิน ดีออกซีฮีโมโกลบิน และน้ำ ในช่วงคลื่นอินฟราเรดย่านใกล้ บริเวณแรเงาแสดงหน้าต่างแสง (Optical Window) ซึ่งเป็นช่วงคลื่นที่แสงสามารถทะลุผ่านเนื้อเยื่อได้ดี เหมาะสำหรับการวัดกิจกรรมสมองด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้



รูปที่ 3 หลักการทำงานของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสงในการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฮีโมโกลบินบริเวณเปลือกสมอง (ซ้าย) และตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ที่มีแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสงสำหรับวัดกิจกรรมทางสมองบริเวณกลีบหน้าบนศีรษะของอาสาสมัคร (ขวา)

เซลล์ต่าง ๆ เพื่อใช้ในการสร้างสารให้พลังงานสูงแก่เซลล์ หรืออะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (ATP) ซึ่งได้จากการหายใจระดับเซลล์ผ่านกระบวนการเมตาบอลิซึม ส่วนฮีโมโกลบินที่ออกซิเจนหลุดออกไปแล้วนั้น เรียกว่า ดีออกซีฮีโมโกลบิน (Deoxyhemoglobin; HbR) จะถูกลำเลียงกลับไปยังปอดผ่านหลอดเลือดดำเพื่อรับออกซิเจนอีกครั้งจากถุงลมในปอดและกลายเป็นออกซีฮีโมโกลบิน พร้อมที่จะถูกขนส่งไปยังเนื้อเยื่อที่ต้องการออกซิเจนต่อไป การเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซีฮีโมโกลบินและดีออกซีฮีโมโกลบิน ในเลือดบริเวณสมองส่วนที่สนใจจึงเป็นกลไกพื้นฐานสำคัญของเทคนิคการถ่ายภาพสมอง เช่น เทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณออกซีฮีโมโกลบินและดีออกซีฮีโมโกลบิน ในเนื้อเยื่อสมองหรือเนื้อเยื่ออื่น ๆ ที่สนใจ โดยไม่ได้วัดออกซิเจนโดยตรง แต่ใช้การเปลี่ยนแปลงของปริมาณฮีโมโกลบินทั้งสองรูปแบบนี้ เพื่อคำนวณข้อมูลเกี่ยวกับการใช้ออกซิเจนในเนื้อเยื่อ [9], [10], [22] ในการวัดกิจกรรมทางสมองโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้นี้ จะใช้แสงในช่วงอินฟาเรดย่านใกล้ที่มีความยาวคลื่นเฉพาะ ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 700–900 นาโนเมตร ส่องผ่านบริเวณหนังศีรษะ กะโหลกศีรษะ และทะลุผ่านเนื้อเยื่อไปถึงบริเวณเปลือกสมอง (Cerebral Cortex) ได้ ซึ่งชั้นโครงสร้างต่าง ๆ จะมีคุณสมบัติเชิงแสงที่แตกต่างกัน แสงที่ส่องผ่านไปนั้นบางส่วนจะถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลสารต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณนั้น เช่น น้ำ ไขมัน เอนไซม์ ไซโตโครม เป็นต้น อย่างไรก็ตามโมเลกุลของสารเหล่านี้จะมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นที่แตกต่างกัน และแม้ว่าน้ำจะเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่มากถึง 70% ก็ตาม แต่น้ำจะไม่ค่อยดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นอินฟาเรดย่านใกล้ แสงส่วนใหญ่จึงผ่านไปได้ ส่วนโมเลกุลสารที่ดูดกลืนแสงในช่วงนี้ได้ดีคือฮีโมโกลบิน (รูปที่ 2) ทั้งนี้ออกซีฮีโมโกลบินจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นมากกว่า 800 นาโนเมตร ในขณะที่ดีออกซีฮีโมโกลบินจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นน้อยกว่า 800 นาโนเมตร [10] แสงที่ไม่ได้ถูกดูดกลืนและสะท้อนกลับออกมานั้น จะถูกวัดและคำนวณการเปลี่ยนแปลงของออกซีฮีโมโกลบินและดีออกซีฮีโมโกลบิน ตามการดูดกลืนแสง และช่วยให้สามารถประเมินกิจกรรมทางสมองได้ โดยทั่วไปแล้วเมื่อบริเวณใดของสมองมีการทำงานมากขึ้น เซลล์ประสาทในบริเวณนั้นจะใช้ออกซิเจนมากขึ้น ทำให้มีการเพิ่มขึ้นของออกซีฮีโมโกลบิน และลดลงของดีออกซีฮีโมโกลบิน

สำหรับเครื่องมือวัดกิจกรรมทางสมองโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้นั้น จะมีองค์ประกอบหลัก 3 ส่วน [9], [25] (รูปที่ 3) ได้แก่

1) แหล่งกำเนิดแสง (Emitter) ทำหน้าที่ปล่อยแสงในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ที่มีความเข้มแสงในระดับที่ปลอดภัย และไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อ และแสงในช่วงนี้จะทะลุผ่านเนื้อเยื่อผิวหนัง กะโหลกศีรษะ และเข้าสู่บริเวณเปลือกสมอง โดยทั่วไปแล้วแหล่งกำเนิดแสงอาจใช้ เลเซอร์ไดโอด หรือ LED ซึ่งมีข้อดีในด้านความปลอดภัยและความสามารถในการทะลุผ่านเนื้อเยื่อ

2) ตัวรับแสง (Detector) ทำหน้าที่ตรวจจับแสงที่ไม่ได้ถูกดูดกลืนและสะท้อนผ่านเนื้อเยื่อกลับมา ตัวรับแสงจะวัดความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับ โดยเปรียบเทียบกับแสงที่ปล่อยออกไป มักใช้ตัวตรวจจับแสง (Photodetectors) เช่น โฟโตไดโอด (Photodiodes) หรือ อะวาลานช์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiodes) ซึ่งมีความไวสูงต่อแสงที่สะท้อนกลับมา

เส้นทางระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสงจะก่อให้เกิดช่องสัญญาณ โดยแต่ละช่องสัญญาณแจ้งข้อมูลเกี่ยวกับกิจกรรมทางสมองหรือการเปลี่ยนแปลงของฮีโมโกลบินในสมองบริเวณที่แสงเดินทางผ่าน ซึ่งแสงที่เดินทางจากแหล่งกำเนิด ผ่านเนื้อสมอง และกลับมาที่ตัวรับแสงจะไม่เดินทางในแนวเส้นตรง แต่จะเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งลักษณะคล้ายรูปกล้วย (Banana Shape) เนื่องจากเนื้อเยื่อต่าง ๆ ในร่างกาย เช่น หนังศีรษะ กะโหลก และเนื้อเยื่อสมอง มีคุณสมบัติในการกระเจิงแสงไปในหลายทิศทาง และโมเลกุลต่าง ๆ ภายในเนื้อเยื่อเหล่านี้ยังมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงคลื่นต่างกันได้ไม่เท่ากัน ส่งผลให้เมื่อแสงเดินทางผ่านเข้าไปในบริเวณดังกล่าวจะเกิดกระบวนการส่องผ่าน ดูดกลืน กระเจิง และสะท้อนของแสงในเนื้อเยื่อสมอง ซึ่งทำให้เส้นทางการเดินทางของแสงมีลักษณะดังกล่าว

นอกจากนี้ความลึกที่แสงสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อได้นั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับตัวรับแสง ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 2.5–3.5 เซนติเมตร ระยะห่างนี้ทำให้สามารถตรวจวัดความลึกของเนื้อเยื่อสมองได้ประมาณ 1.5–2.0 เซนติเมตร ส่งผลให้การวัดครอบคลุมเฉพาะบริเวณเปลือกสมอง และไม่สามารถเข้าถึงบริเวณสมองส่วนที่ลึกลงไปได้ อย่างไรก็ตามเปลือกสมองถือเป็นบริเวณสำคัญที่เกี่ยวข้องกับการทำงานด้านการรู้คิดขั้นสูง และมีบทบาทสำคัญต่อกระบวนการเรียนรู้ของมนุษย์

3) ระบบประมวลผลข้อมูล (Data Processing Unit) ทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณแสงที่ได้รับจากตัวรับแสง ใช้กฎของเบียร์-แลมเบิร์ตฉบับปรับปรุง (Modified Beer-Lambert Law) เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของฮีโมโกลบิน (ออกซีฮีโมโกลบิน ดีออกซีฮีโมโกลบิน และฮีโมโกลบินทั้งหมด) ในบริเวณที่ทำการตรวจวัด [10] ค่าที่ได้จะแสดงผลในรูปแบบกราฟหรือแผนภาพที่แสดงถึงการไหลเวียนของเลือดและการใช้ออกซิเจนในเนื้อเยื่อ (Hemodynamic Response)

กฎของเบียร์-แลมเบิร์ตฉบับปรับปรุง มีรูปแบบดังสมการที่ (1)

$$\Delta A = \varepsilon(\lambda) \cdot \Delta c \cdot d \cdot DPF(\lambda) \tag{1}$$

โดยที่ ΔA คือ การเปลี่ยนแปลงของการดูดกลืนแสงที่ตัวรับแสงวัดได้ $\varepsilon(\lambda)$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของออกซีฮีโมโกลบินและดีออกซีฮีโมโกลบิน ตามความยาวคลื่นของแสง Δc คือ การเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของออกซีฮีโมโกลบินและดีออกซีฮีโมโกลบิน ตัวแปร d คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดแสงและตัวรับแสง และ DPF (Differential Pathlength Factor) คือ ค่าปัจจัยที่ใช้ปรับความยาวเส้นทางแสงจริงในเนื้อเยื่อซึ่งคำนึงถึงการกระเจิงของแสง

ปัจจุบันมีผู้ผลิตเครื่องเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เชิงพาณิชย์หลายราย อาทิ Shimadzu (ญี่ปุ่น) NIRx (เยอรมนี/สหรัฐ) Artinis (เนเธอร์แลนด์) Hitachi (ญี่ปุ่น) และ TechEn/NIRSOptix (สหรัฐอเมริกา) [11] โดยเครื่องเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ แบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลัก คือ แบบตั้งสถานี (Stationary System) และแบบพกพา/สวมใส่ได้ (Portable/Wearable System) การเลือกใช้ขึ้นอยู่

กับบริบทการทดลอง คุณภาพสัญญาณที่ต้องการ จำนวนช่องสัญญาณเพื่อความละเอียดเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ของการวัดกิจกรรมสมองรวมถึงงบประมาณที่มี

เครื่องแบบตั้งสถานี ให้สัญญาณเสถียรและความละเอียดสูง เหมาะกับงานที่ต้องการศึกษาเปลือกสมองหลาย ๆ บริเวณได้อย่างครอบคลุม การใช้งานร่วมกับอุปกรณ์หลายชนิด หรือการซิงก์กับเทคนิคการถ่ายภาพสมองเทคนิคอื่นตลอดจนงานวิจัยเชิงคลินิก ตัวอย่างที่ใช้แพร่หลาย ได้แก่ LABNIRS ของ Shimadzu, ETG-series ของ Hitachi และ NIRScout ของ NIRx ทั้งนี้เครื่องประเภทนี้มักมีขนาดใหญ่และต้นทุนรวมสูงกว่า

เครื่องแบบพกพา/สวมใส่ได้ เหมาะกับบริบทห้องเรียนจริงและงานวิจัยที่เก็บข้อมูลภาคสนาม ช่วยลดข้อจำกัดการเคลื่อนไหวและเพิ่มความเป็นธรรมชาติของพฤติกรรมการเรียนรู้ อย่างไรก็ตามคุณภาพสัญญาณโดยทั่วไปจะต่ำกว่าระบบตั้งสถานี แต่ยังเพียงพอสำหรับงานวิจัยและต้นทุนรวมของเครื่องไม่สูง จึงมีแนวโน้มถูกนำมาใช้ในงานประสาทวิทยาการศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ตัวอย่างเช่น NIRSport2 ของ NIRx, LIGHTNIRS ของ Shimadzu และ OEG-16 ของ Spectratech เป็นต้น

3. ข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

ปัจจุบันเทคโนโลยีการถ่ายภาพสมอง ไม่ว่าจะเป็นเทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง เทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือแม้แต่เทคนิคสเปกโทรสโกปี-อินฟราเรดย่านใกล้มีความก้าวหน้าไปมาก แต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 1) สำหรับเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ นั้น มีข้อดีและข้อจำกัด [10], [22], [25] รายละเอียด ดังนี้

3.1 ข้อดีของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

3.1.1 เป็นเทคนิคที่ไม่รุกรานเนื้อเยื่อ (Non-invasive) เนื่องจากใช้แสงอินฟราเรดย่านใกล้ที่ปลอดภัย และไม่ก่อให้เกิดความเจ็บปวดหรืออันตรายต่อเนื้อเยื่อ ทำให้เทคนิคนี้สามารถใช้ในกลุ่มเปราะบาง เช่น ทารก เด็กเล็ก หรือผู้สูงอายุได้

3.1.2 การใช้งานไม่ค่อยยุ่งยากซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องเข้าไปในอุโมงค์แบบเครื่องถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งจะไม่ก่อให้เกิดความกังวลหรือความกลัวต่อที่แคบของอาสาสมัคร

3.1.3 อุปกรณ์ของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้บางรุ่นมีขนาดเล็กและพกพาได้ง่าย ทำให้สามารถใช้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย สามารถนำไปใช้งานภาคสนามได้ ไม่ได้จำกัดเพียงแต่ในห้องทดลอง เช่น ในห้องเรียน สถานที่จัดกิจกรรมอื่น ๆ เป็นต้น

3.1.4 เทคนิคนี้มีความทนทานต่อการเคลื่อนไหวได้ดีในระดับหนึ่ง สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพในระหว่างที่ผู้เข้าร่วมทำกิจกรรมต่าง ๆ เช่น การพูด การกรอกตา การกระพริบตา หรือการเคลื่อนไหวเล็กน้อยได้

3.1.5 ต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งในส่วนของค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง การใช้งาน และการบำรุงรักษา

3.1.6 เทคนิคนี้มีความละเอียดเชิงเวลา (Temporal Resolution) สูงกว่าเทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของการไหลเวียนของเลือดและการใช้ออกซิเจนในสมองได้แบบเรียลไทม์ในระดับมิลลิวินาทีถึงวินาที

3.1.7 เทคนิคนี้มีความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution) ในระดับ 2–3 เซนติเมตร ซึ่งละเอียดกว่าเทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง [26]

3.2 ข้อจำกัดของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

3.2.1 สามารถวัดการทำงานของสมองได้ในระดับความลึกที่จำกัด (ประมาณ 1.5–2 เซนติเมตร จากหนังศีรษะ) ซึ่งจำกัดการวัดให้อยู่เฉพาะบริเวณเปลือกสมองเท่านั้น ไม่สามารถตรวจวัดการทำงานของสมองในบริเวณที่ลึกลงไป เช่น ใต้ชั้นเปลือกสมอง อะมิกดาลา ฮิปโปแคมปัส และโครงสร้างสมองส่วนลึกอื่น ๆ ได้

3.2.2 เทคนิคนี้ไวต่อสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของศีรษะหรือกล้ามเนื้ออย่างรวดเร็ว อย่างไร

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบข้อดีและข้อจำกัดของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เมื่อเทียบกับเทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมองและเทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ประเด็น	เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้	เทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง	เทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
1. หลักการ	วัดกิจกรรมทางสมองทางอ้อม โดยวัดการตอบสนองของการไหลเวียนเลือดต่อกิจกรรมของสมอง	วัดกิจกรรมทางสมองโดยวัดสัญญาณไฟฟ้าจากเซลล์ประสาทโดยตรง	วัดกิจกรรมทางสมองทางอ้อม โดยวัดการตอบสนองของการไหลเวียนเลือดต่อกิจกรรมของสมอง
2. ความละเอียดเชิงเวลา (Temporal Resolution)	สูงถึง 10 เฮิรตซ์	มากกว่า 1,000 เฮิรตซ์	1–3 เฮิรตซ์
3. ความละเอียดเชิงพื้นที่ (Spatial Resolution)	2–3 เซนติเมตร	5–9 เซนติเมตร	1–3 มิลลิเมตร
4. การรุกรานเนื้อเยื่อ (Invasiveness)	ไม่รุกราน	ไม่รุกราน	ไม่รุกราน แต่ต้องอยู่ในเครื่องขนาดใหญ่
5. ระดับความลึกที่วัดได้	วัดได้เพียงชั้นเปลือกสมอง	วัดได้เพียงชั้นเปลือกสมอง	วัดได้ทั่วทั้งสมอง
6. ความสะดวกในการใช้งาน	ใช้งานง่าย บางรุ่นสามารถพกพาไปใช้งานภาคสนามได้	ใช้งานง่าย บางรุ่นสามารถพกพาไปใช้งานภาคสนามได้	ต้องอยู่ในห้องเฉพาะ มีเสียงดังและจำกัดการเคลื่อนไหว ไม่สามารถนำไปใช้งานภาคสนามได้
7. สัญญาณรบกวนจากการเคลื่อนไหว	มีผลบ้าง โดยเฉพาะการเคลื่อนไหวศีรษะรวดเร็ว	อ่อนไหวต่อการเคลื่อนดวงตา และการเคลื่อนไหวของร่างกาย	อ่อนไหวมากต่อการเคลื่อนไหวของร่างกาย
8. ต้นทุน/ค่าใช้จ่าย	ต่ำ	ต่ำ	สูง

ก็ตามในปัจจุบันมีการพัฒนาแนวทางและวิธีการต่าง ๆ เพื่อลดผลกระทบจากสัญญาณรบกวนเหล่านี้ ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำของข้อมูลที่ได้จากการวัด

3.2.3 เทคนิคนี้มีความละเอียดเชิงเวลาต่ำกว่าเทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมองและมีความละเอียดเชิงพื้นที่สูงกว่าเทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [22] อย่างไรก็ตามเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพสมองเทคนิคอื่นๆ ได้ เพื่อช่วยให้ได้ข้อมูลในมิติอื่น ๆ และลดข้อจำกัดเหล่านี้ลง

3.2.4 เทคนิคนี้ตรวจวัดการตอบสนองของการไหลเวียนเลือดต่อกิจกรรมของสมอง ซึ่งเป็นการวัดกิจกรรมทางสมองทางอ้อม ไม่สามารถให้ข้อมูลโดยตรงเกี่ยวกับกิจกรรมของเซลล์ประสาท เช่น สัญญาณไฟฟ้าจากเซลล์ประสาทที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง สำหรับการทดลองที่ต้องการข้อมูลเชิงลึกมากขึ้น อาจจำเป็นต้องใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับเทคนิคการถ่ายภาพสมองอื่น ๆ

โดยสรุปในการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ นอกจากต้องกำหนดข้อมูลเป้าหมายที่ต้องการให้ชัดเจนแล้ว ควรพิจารณาข้อจำกัดของเทคนิคและใช้งานเครื่องมืออย่างรอบคอบ อาจพิจารณาใช้ร่วมกับเทคนิคถ่ายภาพสมองอื่น เพื่อบรรเทาข้อจำกัด เพิ่มความแม่นยำและทำให้ผลการวิจัยน่าเชื่อถือยิ่งขึ้น

4. แนวทางและตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ในงานวิจัยทางด้านประสาทวิทยาการศึกษา

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมางานวิจัยด้านประสาทวิทยาการศึกษาที่ประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพิ่มจำนวนอย่างมีนัยสำคัญ ประสาทวิทยาการศึกษาเป็นศาสตร์บูรณาการระหว่างประสาทวิทยาศาสตร์ จิตวิทยาการศึกษา และการจัดการเรียนรู้ เมื่อกระบวนการทาง

ชีววิทยาที่ซ่อนอยู่ในสมองถูกทำให้มองเห็นได้ด้วยเทคโนโลยีถ่ายภาพสมอง นักวิจัยและผู้สอนจึงสามารถสังเกตและเชื่อมโยงกระบวนการเหล่านั้นเข้ากับผลลัพธ์ด้านการเรียนรู้และพัฒนาการได้ หลักฐานเชิงประจักษ์ที่ได้ไม่เพียงช่วยยกระดับการปฏิบัติที่มีประสิทธิผล แต่ยังต่อยอดองค์ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับวิถีการเรียนรู้และพัฒนาการของผู้เรียน

สำหรับหัวข้อแนวทางและตัวอย่างการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในงานวิจัยทางด้านประสาทวิทยาการศึกษา ในบทความนี้ มิได้เป็นการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Review) หากแต่มีจุดมุ่งหมายเพื่อนำเสนอแนวทางการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปี-อินฟราเรดย่านใกล้ไปใช้ในการวิจัยตามลักษณะการใช้งานจริง ใน 5 ลักษณะ ดังนี้

1) การประเมินพัฒนาการด้านการเรียนรู้ในแต่ละช่วงวัย

2) การศึกษาผลของกิจกรรมการเรียนการสอน และการแทรกแซง (Intervention) ต่อการเรียนรู้และความสามารถทางการรู้คิดของผู้เรียน

3) การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเรียนรู้และความสามารถทางการรู้คิดของบุคคล

4) การศึกษาการเรียนรู้ร่วมโดยใช้เทคนิคไฮเปอร์สแกนนิ่ง เพื่อให้เข้าใจการเชื่อมโยงกิจกรรมของสมองระหว่างบุคคล

5) การศึกษาภาวะบกพร่องในการเรียนรู้และภาวะที่ส่งผลกระทบต่อการเรียนรู้

งานวิจัยที่ผ่านมา Zhan และคณะ [11] รายงานว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในงานวิจัยด้านพุทธิพิสัย (Cognitive Domain) มีสัดส่วนมากที่สุดคือ 68.7% สอดคล้องกับข้อเท็จจริงที่ว่าการเรียนรู้ด้านพุทธิพิสัยส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเปลือกสมอง โดยเฉพาะสมองกลีบหน้า (Frontal Cortex) กลีบข้าง (Parietal Cortex) และกลีบขมับ (Temporal Cortex) ซึ่งสามารถตรวจวัดกิจกรรมได้ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี-อินฟราเรดย่านใกล้นอกจากนี้ เปลือกสมองยังคงมีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องตั้งแต่วัยเด็กถึงวัยผู้ใหญ่ตอนต้น ซึ่งสอดคล้องกับช่วงวัยของอาสาสมัครในงานวิจัยที่มีตั้งแต่ทารก 1.6 วัน ไปจนถึงอายุ 33 ปี โดยส่วนใหญ่เป็นช่วงอายุ 7–11 ปี ดังนั้นบทความจะมีการยกตัวอย่างงานวิจัยบางส่วนจากฐานข้อมูล Scopus ที่ประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในบริบทการเรียนรู้มาประกอบ โดยเน้นตัวอย่างด้านพุทธิพิสัยในเด็ก

4.1 การประเมินพัฒนาการด้านการเรียนรู้ในแต่ละช่วงวัย

ในการประเมินพัฒนาการด้านการเรียนรู้ของผู้เรียน การใช้ข้อมูลเชิงพฤติกรรมเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอ การพิจารณาระดับการทำงานของสมองช่วยให้เข้าใจพัฒนาการได้ลึกขึ้นและเชื่อมโยงกับผลลัพธ์ทางการศึกษาได้ชัดเจนยิ่งขึ้น การใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เพื่อติดตามพัฒนาการด้านพุทธิพิสัย เช่น ภาษา การอ่าน การคิดคำนวณ และทักษะการคิดเชิงบริหาร โดยดูความเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมสมองที่เกี่ยวข้องในแต่ละช่วงวัย จะช่วยให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างสมองและพฤติกรรม ซึ่งอธิบายกลไกพัฒนาการได้ลึกกว่าการสังเกตเชิงพฤติกรรมเพียงด้านเดียว

ตัวอย่างเช่น Dresler และคณะ [12] พบว่านักเรียนชั้น ม.2 แก้โจทย์คณิตศาสตร์ทั้งแบบตัวเลขและแบบข้อความได้เร็วกว่านักเรียนชั้น ป.4 สะท้อนพัฒนาการของทักษะคณิตศาสตร์และการอ่านตามอายุ ข้อมูลจากเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ชี้ว่า ทั้งสองกลุ่มใช้สมองบริเวณกลีบข้าง และกลีบหน้าเพิ่มขึ้นระหว่างการคำนวณ โดยกลีบหน้าซีกซ้าย–ขวาของนักเรียน ม.2 ทำงานสมดุลกว่ากลุ่ม ป.4 ที่มีซีกซ้ายเด่นกว่า บ่งชี้การพัฒนาสู่กระบวนการคำนวณที่เป็นระบบและอัตโนมัติมากขึ้นเมื่ออายุมากขึ้น

งานของ Tando และคณะ [13] รายงานว่าความคล่องแคล่วทางภาษา (จำนวนคำที่ผลิตได้) เพิ่มขึ้นตามอายุ โดยผู้ใหญ่มีความคล่องแคล่วมากกว่าวัยรุ่น และเด็กเล็กตามลำดับ สอดคล้องกับสัญญาณออกซีฮีโมโกลบินที่เพิ่มขึ้นในบริเวณสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้า (Prefrontal Cortex; PFC) ตามอายุ สะท้อนว่ากลไกการดึงข้อมูลทางภาษาจากความจำเริ่มเด่นชัดตั้งแต่วัยรุ่นตอนต้น และยังพัฒนาต่อเนื่องถึงวัยผู้ใหญ่

อีกตัวอย่าง Lertladaluck และ Moriguchi [14] ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างทักษะการคิดเชิงบริหารของสมอง (Executive Function; EF) กับทฤษฎีจิต (Theory of Mind; ToM) ซึ่งเป็นความสามารถในการเข้าใจความเชื่อ ความตั้งใจ และอารมณ์ของผู้อื่น ในเด็กปฐมวัย โดยวัดทั้งพฤติกรรมและการทำงานของสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้า ผลการศึกษาพบว่าแม้เด็กบางคนมีทักษะการคิดเชิงบริหารของสมองดี แต่ไม่พบความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างทักษะการคิดเชิงบริหารของสมองกับทฤษฎีจิต และไม่พบรูปแบบการกระตุ้นของสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าที่สอดคล้องกันในเงื่อนไขทฤษฎีจิตแบบต่าง ๆ ชี้ว่าพัฒนาการของทฤษฎีจิตมีความซับซ้อนเชิงประสาทและไม่ได้ขึ้นกับทักษะการคิดเชิงบริหารของสมองแบบตรงไปตรงมา

โดยสรุปการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อศึกษาพัฒนาการการเรียนรู้ช่วยเปิดเผยมิติกลไกระดับสมองที่สอดคล้องกับพัฒนาการที่แสดงออกทางพฤติกรรม และองค์ความรู้ที่ได้รับสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในทางการศึกษา เช่น การออกแบบกิจกรรม/หลักสูตรที่เหมาะกับช่วงวัย รวมถึงอาจใช้เป็นตัวชี้วัดเสริมเพื่อคัดกรองกลุ่มเสี่ยง เช่น ผู้เรียนที่มีพัฒนาการล่าช้า หรือมีความบกพร่องทางการเรียนรู้ เพื่อกำหนดแนวทางส่งเสริมที่เหมาะสมยิ่งขึ้นต่อไปได้ [27]

4.2 การศึกษาผลของกิจกรรมการเรียนการสอน และการแทรกแซง ต่อเรียนรู้และความสามารถทางการรู้คิด

แม้บริบทสังคมจะเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว แต่แนวคิดการจัดการเรียนรู้ที่ยึดผู้เรียนเป็นสำคัญยังคงเป็นแกนหลักการออกแบบเนื้อหา กิจกรรมการสอน และการแทรกแซง จึงควรสอดคล้องกับความสนใจและความถนัดของผู้เรียน โดยคำนึงถึงความแตกต่างระหว่างบุคคล เพื่อพัฒนาสมรรถนะได้อย่างเหมาะสม การวัดและประเมินผลของกิจกรรมการสอนและการแทรกแซงต่อทักษะการรู้คิด หรือพุทธิพิสัย จึงมีความสำคัญ เพื่อสนับสนุนว่ากิจกรรมและการแทรกแซงเหล่านี้เกิดผลกับผู้เรียนจริง ทั้งต่อผลลัพธ์การเรียนรู้และต่อการทำงานของสมอง รูปแบบวิจัยที่ใช้บ่อย ได้แก่ การเปรียบเทียบวิธีสอนต่างรูปแบบ และการประเมินก่อน–หลังโปรแกรมฝึก เป็นต้น การใช้เทคนิคถ่ายภาพสมอง เช่น เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ ช่วยประเมินผลได้อย่างเป็นปรวิสัย ลดอคติจากผู้ถูกวัด และเปิดเผยกลไกสมองระหว่างการเรียนรู้ เมื่อผสานกับมาตรวัดพฤติกรรมจะทำให้ตีความความเชื่อมโยงสมองและการเรียนรู้ได้ชัดเจนยิ่งขึ้น และช่วยคัดเลือกหรือปรับปรุงกิจกรรมและการแทรกแซงต่าง ๆ ให้เหมาะกับผู้เรียน

ตัวอย่างเช่น งานของ Takeuchi และคณะ [15] ศึกษากระบวนการเมตาคอกนิชันของครูและผู้เรียนระหว่างการแก้โจทย์ปัญหาแทนแกรม โดยวัดการทำงานของสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้า ของผู้เรียนก่อนและหลังได้รับคำใบ้จากครู พร้อมทั้งวัดการทำงานของสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าของครูในช่วงให้คำใบ้ ผลการศึกษาพบว่าสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าของครูทำงานเพิ่มขึ้นภายหลังการให้คำใบ้สะท้อนบทบาทในการเฝ้าติดตามและประเมินผลการสอน ขณะเดียวกันสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าของผู้เรียนทำงานเพิ่มขึ้นเมื่อสามารถแก้โจทย์สำเร็จหลังได้รับคำใบ้ สื่อถึงการสร้างความเข้าใจเชิงลึกและการประเมินตนเองระหว่างการเรียนรู้ อีกตัวอย่างหนึ่ง งานของ Zhang และคณะ [16] เปรียบเทียบวิธีการจัดการเรียนรู้ 3 รูปแบบ ได้แก่ การบรรยาย การโต้ตอบระหว่างครูกับผู้เรียน และการอภิปรายกลุ่ม ต่อการคิดเชิงวิพากษ์และกิจกรรมสมอง พบว่าผู้เรียนรายงานประสบการณ์เชิงบวกต่อการคิดเชิงวิพากษ์สูงสุดในชั้นเรียนที่มีการอภิปรายกลุ่ม ขณะที่ข้อมูลจากเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้แสดงการทำงานของสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าเพิ่มขึ้นทั้งในรูปแบบการโต้ตอบและการอภิปราย สะท้อนระดับการมีส่วนร่วมทางปัญญาที่สูงกว่าแนวการสอนแบบบรรยายล้วน และชี้ทิศทางว่าการจัดการเรียนรู้น่าจะได้ประโยชน์จากการส่งเสริมปฏิสัมพันธ์กับครูและเพื่อนร่วมชั้น

อย่างไรก็ตามในการดำเนินการวิจัยลักษณะนี้ควรพิจารณาความสอดคล้องของจังหวะการเก็บข้อมูลก่อน–หลังกับช่วงเวลาของกิจกรรมจริง ตลอดจนขนาด ความเข้ม และระยะเวลาของกิจกรรมและการแทรกแซงให้เพียงพอต่อการก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ตรวจวัดได้ทั้งในพฤติกรรมและ

กิจกรรมของสมอง นอกจากนี้ควรระบุให้ชัดว่าสมรรถนะหรือทักษะที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับสมองส่วนใด เพื่อกำหนดแผนผังการวัดและตีความผลได้อย่างเหมาะสมและน่าเชื่อถือ

4.3 การศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการเรียนรู้และความสามารถทางการรู้คิดของบุคคล

ภายใต้แนวคิดการจัดการเรียนรู้ที่ยึดผู้เรียนเป็นศูนย์กลาง การออกแบบเนื้อหา กิจกรรมการสอน และการแทรกแซงจำเป็นต้องคำนึงถึงความแตกต่างระหว่างบุคคล ขณะเดียวกัน ปัจจัยส่วนบุคคลและบริบทแวดล้อมก็มีอิทธิพลต่อการเรียนรู้อย่างมีนัยสำคัญ [28] งานวิจัยในหมวดนี้จึงมุ่งตรวจสอบผลของปัจจัยดังกล่าวต่อทั้งผลลัพธ์การเรียนรู้และการทำงานของสมอง เพื่อทำความเข้าใจลักษณะผู้เรียนอย่างจำเพาะ ระบุเงื่อนไขที่เอื้อหรือขัดขวางการเรียนรู้ และนำไปสู่แนวทางออกแบบการสอนและสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมยิ่งขึ้นสำหรับผู้เรียนแต่ละกลุ่ม

ตัวอย่างงานวิจัย เช่น Lertladaluck และคณะ [17] เปรียบเทียบผลของรางวัลทางสังคม เช่น การเห็นใบหน้าแม่ กับรางวัลที่เป็นสิ่งของ เช่น สติ๊กเกอร์ ต่อแรงจูงใจในการเรียนรู้ของเด็กปฐมวัย ผลด้านพฤติกรรมไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ แต่ข้อมูลจากเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้พบว่ารางวัลทางสังคมกระตุ้นการทำงานของสมองบริเวณสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าซีกขวา ซึ่งเกี่ยวข้องกับทักษะการคิดเชิงบริหารของสมองได้ชัดเจน แสดงให้เห็นว่าแม้พฤติกรรมจะไม่เปลี่ยน แต่ระดับสมองสามารถสะท้อนความแตกต่างที่ละเอียดกว่าได้ อีกตัวอย่างหนึ่ง Moriguchi และ Lertladaluck [18] รายงานว่าความสามารถสองภาษาเชื่อมโยงกับความยืดหยุ่นทางความคิดในระดับพฤติกรรม ทว่าไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับระดับการทำงานของสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าที่เกี่ยวข้องกับทักษะดังกล่าว ผลนี้อาจสะท้อนพัฒนาการทางสมองที่ยังไม่สมบูรณ์ในช่วงวัยที่ศึกษา หรือข้อจำกัดด้านความไวของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในการแยกแยะความแตกต่างที่ละเอียดมากในช่วงวัยดังกล่าว จากตัวอย่างงานวิจัยข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเชิงพฤติกรรมอาจเกิดขึ้นโดยไม่ปรากฏการเปลี่ยนแปลงของกิจกรรมทางสมอง และในทางกลับกันเป็นไปได้ เนื่องจากปัจจัยส่วนบุคคลและบริบทมีความหลากหลายและจำเพาะสูง จึงควรตีความผลอย่างระมัดระวังและพิจารณาข้อจำกัดของเครื่องมือควบคู่กันเสมอ

4.4 การศึกษาการเรียนรู้ร่วมโดยใช้เทคนิคไฮเปอร์สแกนนิ่งเพื่อให้เข้าใจการเชื่อมโยงกิจกรรมของสมองระหว่างบุคคล

ช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคนิคไฮเปอร์สแกนนิ่ง (Hyperscanning) เริ่มถูกประยุกต์ใช้ในงานประสาทวิทยาการศึกษามากขึ้น เทคนิคนี้วัดกิจกรรมสมองของมากกว่าหนึ่งคนพร้อมกัน เช่น ครูกับผู้เรียน หรือผู้เรียนกับผู้เรียน ระหว่างที่มีปฏิสัมพันธ์กันในบริบทจริงหรือสถานการณ์จำลอง ทั้งการสื่อสาร การร่วมมือ หรือการแข่งขัน [19], [29] ทำให้มองเห็นการประสานกันของสัญญาณสมองระหว่างบุคคลควบคู่กับพฤติกรรมการเรียนรู้ได้โดยตรง งานวิจัยนำร่องของ Brockington และคณะ [19] แสดงความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เพื่อติดตามครูและเด็กวัย 4 ปี ระหว่างการสอนแบบตัวต่อตัวด้วยเกมกระดานคณิตศาสตร์พบว่ากิจกรรมของสมองส่วนกลีบหน้าผากส่วนหน้าของเด็กซึ่งเกี่ยวข้องกับการนับและการคำนวณสอดประสานกับกิจกรรมของสมองบริเวณ Temporoparietal Junction ของครูซึ่งเกี่ยวข้องกับทักษะทางสังคมและความเข้าใจผู้อื่น อีกทั้งยังพบว่ากิจกรรมของสมองกลีบหน้าผากส่วนหน้าฝั่งครูและเด็กเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน สะท้อนการประสานกันของสมองระหว่างผู้สอนและผู้เรียนในบริบทการเรียนรู้ร่วมมือ ในการทดลองอีกชุด Brockington และคณะ [19] ติดตามระดับสมาธิของนักศึกษาปริญญาตรี 4 คน ขณะฟังบรรยายในชั้นเรียนพบว่ากิจกรรมสมองของผู้เรียนมีความสอดคล้องกันสูงในช่วงต้นคาบและค่อย ๆ ลดลงในเวลาถัดมา สอดคล้องกับแนวโน้มสมาธิที่ลดลงตามเวลา และชี้ให้เห็นว่าช่วงต้นของการสอนอาจเหมาะกับการถ่ายทอดเนื้อหาสำคัญมากที่สุด

อย่างไรก็ดีไฮเปอร์สแกนนิ่งยังเป็นเทคนิคที่ใหม่และมีข้อจำกัดด้านวิธีวิจัย การออกแบบภารกิจและการซิงค์

สัญญาณระหว่างบุคคลจึงต้องแม่นยำ มีการบันทึกเหตุการณ์ร่วมกันอย่างสอดคล้อง และควบคุมปัจจัยร่วมที่อาจก่อให้เกิดสัญญาณสอดคล้องแบบหลอก เช่น สิ่งเร้าร่วมและการเคลื่อนไหวพร้อมกัน เพื่อให้ผลที่ได้มีความน่าเชื่อถือและตีความได้ถูกต้องในบริบทการเรียนรู้

4.5 การศึกษาภาวะบกพร่องในการเรียนรู้และภาวะที่ส่งผลกระทบต่อการเรียนรู้

ความบกพร่องทางการเรียนรู้คือ ความผิดปกติของกระบวนการเรียนรู้ โดยเฉพาะทักษะพื้นฐาน เช่น การอ่าน (Dyslexia) การเขียนสะกดคำ (Dysgraphia) หรือการคิดคำนวณ (Dyscalculia) ทั้งที่ผู้เรียนมีสติปัญญาอยู่ในเกณฑ์ปกติ ได้รับโอกาสทางการเรียนรู้อย่างเหมาะสม และไม่มีปัญหาการได้ยินหรือการมองเห็นที่อธิบายอุปสรรคได้ทั้งหมด ภาวะดังกล่าวสะท้อนความแตกต่างด้านพัฒนาการของสมอง ส่วนภาวะที่ส่งผลกระทบต่อการเรียนรู้ในที่นี้ หมายถึงความผิดปกติหรือความแตกต่างด้านพัฒนาการของระบบประสาทและสุขภาพจิตที่ทำให้การรับรู้ จดจำ คิด สื่อสาร และลงมือปฏิบัติในโรงเรียนเป็นไปได้ยากขึ้น แม้สติปัญญาอาจปกติ เช่น สมาธิสั้น (ADHD) และออทิซึม (Autism)

การวิจัยกับผู้เรียนกลุ่มนี้โดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ซึ่งไม่รุกราน ใช้งานง่าย และเหมาะกับเด็กหรือกลุ่มเปราะบาง ช่วยวัดกิจกรรมสมองเพื่อทำความเข้าใจพัฒนาการเชิงกลไกสมอง–พฤติกรรม อีกทั้งยังเป็นฐานความรู้สำคัญสำหรับการจัดการศึกษาเฉพาะบุคคลและการออกแบบนโยบายที่ตอบโจทย์ผู้เรียนกลุ่มนี้ [30], [31]

ตัวอย่างงานวิจัย เช่น Song และคณะ [20] รายงานว่าเด็กที่มีภาวะ Dyslexia แสดงระดับออกซีฮีโมโกลบิน และฮีโมโกลบินรวมในสมองกลีบหน้าซีกซ้าย โดยเฉพาะเครือข่าย Left IFG/MFG ต่ำกว่าเด็กพัฒนาการปกติระหว่างการทำแบบทดสอบการประมวลผลหน่วยเสียง ข้อมูลดังกล่าวสอดคล้องกับทฤษฎีความบกพร่องทางสัทศาสตร์ (Phonological Deficit) ใน Dyslexia และชี้ว่าเครือข่ายสมองกลีบหน้าซ้ายอาจเป็นเป้าหมายสำหรับการประเมิน ติดตาม หรือออกแบบการบำบัดในอนาคต ในทำนองเดียวกัน Liu และคณะ [21] พบว่าเด็กที่มีภาวะสมาธิสั้นร่วมกับโรคบกพร่องในการเรียนรู้มีความสามารถในการยับยั้งพฤติกรรมต่ำกว่า ทั้งจากตัวชี้วัดพฤติกรรมและการกระตุ้นสมองบริเวณกลีบหน้าด้านขวา (Right MFG/IFG) เมื่อเทียบกับเด็กสมาธิสั้นเพียงอย่างเดียวและเด็กพัฒนาการปกติ ผลดังกล่าวชี้ว่าความบกพร่องทางการเรียนรู้มีบทบาทซ้ำเติมความบกพร่องของวงจรควบคุมการยับยั้งในกลุ่มที่มีภาวะสมาธิสั้น แม้เทคนิคถ่ายภาพสมองอย่างเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้จะเอื้อต่อการวิจัยลักษณะนี้ การทำงานกับกลุ่มเปราะบางจำเป็นต้องดำเนินการด้วยความระมัดระวัง ยึดตามมาตรฐานจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์อย่างเคร่งครัด และประสานความร่วมมือกับผู้เชี่ยวชาญหรือนักบำบัดเฉพาะทาง เพื่อช่วยตีความผลได้อย่างแม่นยำและออกแบบแผนช่วยเหลือที่เหมาะสมยิ่งขึ้น

5. สรุปผลการทดลอง

เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้เป็นเทคนิคการถ่ายภาพสมองที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในบริบทของประสาทวิทยาการศึกษาซึ่งบูรณาการองค์ความรู้ด้านประสาทวิทยาศาสตร์ จิตวิทยาการศึกษา และศาสตร์การเรียนรู้ หลักการทำงานของเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้อาศัยการวัดการเปลี่ยนแปลงของออกซีฮีโมโกลบินและดีออกซีฮีโมโกลบินที่สัมพันธ์กับกิจกรรมทางสมอง จุดเด่นของเทคนิคนี้คือ เป็นเทคนิคที่ไม่รุกราน สะดวกต่อการใช้งานเคลื่อนย้ายไปเก็บข้อมูลภาคสนามได้ และมีต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคอื่น เช่น เทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรือ เทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง แม้จะตรวจวัดได้จำกัดเฉพาะบริเวณเปลือกสมอง ไม่ครอบคลุมโครงสร้างสมองที่อยู่ลึกลงไป แต่ก็ยังเป็นเครื่องมือที่ทรงคุณค่าสำหรับการศึกษากระบวนการเรียนรู้และการทำงานของสมองในบริบทการศึกษา เช่น การประเมินพัฒนาการการเรียนรู้ และการศึกษาผลของกิจกรรมการสอนต่อพุทธิพิสัยของผู้เรียน เนื่องจากเปลือกสมองมีบทบาทสำคัญต่อการเรียนรู้และการรู้คิดขั้นสูง นอกจากนี้เมื่อใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ร่วมกับวิธีประเมินอื่นหลายมิติจะช่วยเพิ่มความแม่นยำใน

การวิเคราะห์ และเสริมความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างกิจกรรมสมอง พฤติกรรม และผลลัพธ์การเรียนรู้อย่างเป็นระบบ

บทความฉบับนี้มุ่งการประยุกต์ใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ในบริบทการวิจัยด้านประสาทวิทยาการศึกษา ซึ่งมีขอบเขตและขั้นตอนใช้งานต่างจากการประยุกต์ทางการแพทย์ จึงไม่ครอบคลุมประเด็นกำกับดูแลเชิงคลินิกโดยละเอียด อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องมือยังต้องปฏิบัติตามจริยธรรมการวิจัยกับมนุษย์ คำนึงถึงความปลอดภัยของอาสาสมัคร และเลือกใช้อุปกรณ์จากแหล่งที่ได้มาตรฐาน พร้อมการสอบเทียบและบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อความถูกต้องเชิงวิทยาศาสตร์ของข้อมูล ในอนาคตงานวิจัยด้านนี้ยังสามารถพัฒนาได้อีกหลายทิศทาง ได้แก่ การขยายการศึกษาไปยังช่วงวัยที่ยังมีงานวิจัยอยู่น้อย เช่น วัยรุ่นอายุ 12–17 ปี การผสานเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้กับเทคโนโลยีถ่ายภาพสมองอื่น เช่น เทคนิคการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง หรือ เทคนิคการถ่ายภาพสมองด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อยกระดับความละเอียดเชิงเวลาและเชิงพื้นที่ การนำไปใช้ในบริบทจริงของการเรียนรู้ เช่น ห้องเรียนหรือสภาพแวดล้อมดิจิทัล รวมถึงการศึกษาปฏิสัมพันธ์ผู้สอน–ผู้เรียนด้วยเทคนิคไฮเปอร์สแกนนิ่ง ตลอดจนการพิจารณาบทบาทของปัญญาประดิษฐ์ (AI) ที่เข้ามาเปลี่ยนแปลงรูปแบบการเรียนรู้และเพิ่มปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับระบบอัตโนมัติ เช่น แชตบอต ซึ่งนับเป็นหัวข้อสำคัญที่ประสาทวิทยาการศึกษาควรสำรวจต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณงบประมาณสนับสนุนงานมูลฐาน (Fundamental Fund) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ และกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 เลขที่ทุนวิจัย FRB660073/0164 และปีงบประมาณ 2567 เลขที่ทุนวิจัย FRB670016/0164 และขอขอบคุณทุนสนับสนุนหน่วยวิจัยขั้นแนวหน้า (Frontier Research Unit) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สำหรับศูนย์วิจัยและนวัตกรรมประสาทวิทยาศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] D. Ansari, B. D. Smedt, and R. H. Grabner, “Neuroeducation – a critical overview of an emerging field,” *Neuroethics*, vol. 5, no. 2, pp. 105–117, 2012, doi: 10.1007/s12152-011-9119-3.

[2] K. W. Fischer, D. B. Daniel, M. H. Immordino-Yang, E. Stern, A. Battro, and H. Koizumi, “Why mind, brain, and education? why now?,” *Mind, Brain, and Education*, vol. 1, no. 1, pp. 1–2, 2007, doi: 10.1111/j.1751-228X.2007.00006.x.

[3] B. M. Samuels, “Can the differences between education and neuroscience be overcome by mind, brain, and education?,” *Mind, Brain, and Education*, vol. 3, no. 1, pp. 45–55, 2009, doi: 10.1111/j.1751-228X.2008.01052.x.

[4] M. S. C. Thomas, D. Ansari, and V. C. P. Knowland, “Annual research review: Educational neuroscience: Progress and prospects,” 2019, *Blackwell Publishing Ltd*, doi: 10.1111/jcpp.12973.

[5] K. Pradeep, R. S. Anbalagan, A. P. Thangavelu, S. Aswathy, V. G. Jisha, and V. S. Vaisakhi, “Neuroeducation: Understanding neural dynamics in learning and teaching,” *Frontiers in Education*, vol. 9, 2024, Art. no. 1437418, doi: 10.3389/feduc.2024.1437418.

[6] C. Mulert, “EEG–fMRI integration for the study of human brain function,” *NeuroImage*, vol. 102, pp. 1–5, 2013.

[7] M. L. Seghier, M. A. Fahim, and C. Habak, “Educational fMRI: From the lab to the classroom,” *Frontiers in Psychology*, vol. 10, 2019, Art. no. 2769, doi: 10.3389/fpsyg.2019.02769.

[8] J. Xu and B. Zhong, “Review on portable

EEG technology in educational research," *Computers in Human Behavior*, vol. 81, pp. 340–349, 2018, doi: 10.1016/j.chb.2017.12.037.

[9] S. Cutini, S. B. Moro, and S. Bisconti, "Review: Functional near infrared optical imaging in cognitive neuroscience: An introductory review," *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, vol. 20, no. 1, pp. 75–92, 2012, doi: 10.1255/jnirs.969.

[10] P. Pinti, I. Tachtsidis, A. Hamilton, J. Hirsch, C. Aichelburg, S. Gilbert, and P. W. Burgess, "The present and future use of Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) for cognitive neuroscience," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1464, no. 1, pp. 5–29, 2020, doi: 10.1111/nyas.13948.

[11] Z. Zhan, Q. Yang, L. Luo, and X. Zhang, "Applying Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS) in educational research: A systematic review," *Current Psychology*, vol. 43, no. 11, pp. 9676–9691, 2024, doi: 10.1007/s12144-023-05094-y.

[12] T. Dresler, A. Obersteiner, M. Schecklmann, A. C. M. Vogel, A. C. Ehlis, M. M. Richter, M. M. Plichta, K. Reiss, R. Pekrun, and A. J. Fallgatter, "Arithmetic tasks in different formats and their Influence on behavior and brain oxygenation as assessed with Near-Infrared Spectroscopy (NIRS): A study involving primary and secondary school children," *Journal of Neural Transmission*, vol. 116, no. 12, pp. 1689–1700, 2009, doi: 10.1007/s00702-009-0307-9.

[13] T. Tando, Y Kaga, S. Ishii, K. Aoyagi, F. Sano, H. Kanemura, K. Sugita, and M. Aihara, "Developmental changes in frontal lobe function during a verbal fluency task: A multi-channel near-infrared spectroscopy study," *Brain and Development*, vol. 36, no. 10, pp. 844–852, 2014, doi: 10.1016/j.braindev.2014.01.002.

[14] K. Lertladaluck and Y. Moriguchi, "Executive functions and theory of mind development in preschoolers: Insights from NIRS data," *Neuropsychologia*, vol. 205, 2024, Art. no. 109031, doi: 10.1016/j.neuropsychologia.2024.109031.

[15] N. Takeuchi, T. Mori, Y. Suzukamo, and S. Izumi, "Activity of prefrontal cortex in teachers and students during teaching of an insight problem," *Mind, Brain, and Education*, vol. 13, no. 3, pp. 167–175, 2019, doi: 10.1111/mbe.12207.

[16] Y. Zhang, W. Guo, A. N. Tara, X. Cao, H. Wu, and H. Shi, "The effects of different instructional strategies on the college students' critical thinking learning experience and neural correlates using functional near-infrared spectroscopy," *Education and Information Technologies*, vol. 30, pp. 20467–20494, 2025, doi: 10.1007/s10639-025-13566-w.

[17] K. Lertladaluck, N. Chutabhakdikul, N. Chevalier, and Y. Moriguchi, "Effects of social and nonsocial reward on executive function in preschoolers," *Brain and Behavior*, vol. 10, no. 9, 2020, Art. no. e01763, doi: 10.1002/brb3.1763.

[18] Y. Moriguchi and K. Lertladaluck, "Bilingual effects on cognitive shifting and prefrontal activations in young children," *International Journal of Bilingualism*, vol. 24, no. 4, pp. 729–739, 2020, doi: 10.1177/1367006 91988027.

[19] G. Brockington, J. B. Balardin, G. A. Z. Morais, A. Malheiros, R. Lent, L. M. Moura, and J. R.

Sato, "From the laboratory to the classroom: The potential of functional near-infrared spectroscopy in educational neuroscience," *Frontiers in Psychology*, vol. 9, pp. 1–7, 2018, doi: 10.3389/fpsyg.2018.01840.

[20] R. Song, J. Zhang, B. Wang, H. Zhang, and H. Wu, "A near-infrared brain function study of chinese dyslexic children," *Neurocase*, vol. 19, no. 4, pp. 382–389, 2013, doi: 10.1080/13554794.2012.690422.

[21] F. Liu, X. Chi, and D. Yu, "Reduced inhibition control ability in children with ADHD due to coexisting learning disorders: An fNIRS study," *Frontiers in Psychiatry*, vol. 15, pp. 1–11, 2024, Art. no. 1326341, doi: 10.3389/fpsyt.2024.1326341.

[22] W. L. Chen, J. Wagner, N. Heugel, J. Sugar, Y. W. Lee, L. Conant, M. Malloy, J. Heffernan, B. Quirk, A. Zinos, S. A. Beardsley, R. Prost, and H. T. Whelan, "Functional near-infrared spectroscopy and Its clinical application in the field of neuroscience: Advances and future directions," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 14, 2020, doi: 10.3389/fnins.2020.00724.

[23] L. Kaplan, B. W. Chow, and C. Gu, "Neuronal regulation of the blood–brain barrier and neurovascular coupling," *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 21, no. 8, pp. 416–432, 2020, doi: 10.1038/s41583-020-0322-2.

[24] C. Huneau, H. Benali, and H. Chabriat, "Investigating human neurovascular coupling using functional neuroimaging: A critical review of dynamic models," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 9, pp. 467, 2015, doi: 10.3389/fnins.2015.00467.

[25] V. Quaresima and M. Ferrari, "A mini-review on Functional Near-Infrared Spectroscopy (fNIRS): Where do we stand, and where should we go?," *Photonics*, vol. 6, no. 3, pp. 87, 2019.

[26] B. Burle, L. Spieser, C. Roger, L. Casini, T. Hasbroucq, and F. Vidal, "Spatial and temporal resolutions of EEG: Is it really black and white? a scalp current density view," *International Journal of Psychophysiology*, vol. 97, no. 3, pp. 210–220, 2015 , doi: 10.1016/j.ijpsycho.2015.05.004.

[27] W. C. Su, R. Colacot, N. Ahmed, T. Nguyen, T. George, and A. Gandjbakhche, "The use of functional near-infrared spectroscopy in tracking neurodevelopmental trajectories in infants and children with or without developmental disorders: A systematic review," *Frontiers in Psychiatry*, vol. 14, pp. 1–15, 2023, Art. no. 1210000, doi: 10.3389/fpsyt.2023.1210000.

[28] J. Jirout, J. LoCasale-Crouch, K. Turnbull, Y. Gu, M. Cubides, S. Garzione, T. M. Evans, A. L. Weltman, and S. Kranz, "How lifestyle factors affect cognitive and executive function and the ability to learn in children," *Nutrients*, vol. 11, no. 8, pp. 1–29, 2019, doi: 10.3390/nu11081953.

[29] J. Zhang, Y. Wang, C. Leong, Y. Mao, and Z. Yuan, "Bridging stories and science: An fNIRS-Based hyperscanning investigation into child learning in STEM," *Neuroimage*, vol. 285, 2024, Art. no. 120486, doi: 10.1016/j.neuroimage.2023.120486.

[30] J. M. Black, C. A. Myers, and F. Hoeft, "The utility of neuroimaging studies for informing

educational practice and policy in reading disorders," *New Directions for Child and Adolescent Development*, vol. 2015, no. 147, pp. 49–56, 2015, doi: 10.1002/cad.20086.

[31] E. Conti, E. Scaffei, C. Bosetti, V. Marchi, V. Costanzo, V. Dell'Oste, R. Mazziotti, L. Dell'Osso, C. Carmassi, F. Muratori, L. Baroncelli, S. Calderoni, and R. Battini, "Looking for 'fNIRS signature' in autism spectrum: A systematic review starting from preschoolers," *Frontiers in Neuroscience*, vol. 16, pp. 1–13, 2022, doi: 10.3389/fnins.2022.785993.