

ภาพที่ 37 การขยายออก

3.4.2.5. ความเคลื่อนไหวของรูปร่าง (Motion in Shapes) รูปร่างบางรูปจะดูสงบ แต่บางรูปจะดูเคลื่อนไหวไม่หยุดนิ่ง ภาพเช่นนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะความสมดุลในตัวเองของรูปร่าง นั้น ๆ ตลอดจนตำแหน่งการจัดวางเป็นสำคัญ ดังนี้

1) รูปร่างให้ความรู้สึกสงบนิ่ง (Formal Shape) ได้แก่ รูปร่างที่มีความสมดุล ในตัวเอง และสมดุลกับสภาพแวดล้อม เช่น รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า รูปสี่เหลี่ยมด้านเท่า รูปวงกลม

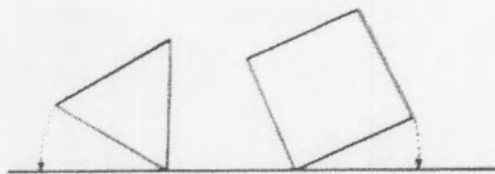


ภาพที่ 38 รูปร่างที่สงบนิ่ง

2) รูปร่าง มุมของสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมวางบนเส้นระนาบ ความรู้สึก เคลื่อนไหวจะเกิดขึ้น เช่นเดียวกับรูปวงกลมหากวางเหนือเส้นระนาบเล็กน้อย จะมีความเคลื่อนไหว เกิดขึ้นเช่นกัน หากนำรูปร่างสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมจัดวางใหม่ โดยให้มุมยังคงวางบนเส้นระนาบ แต่รูปเอียงไปทางด้านใดด้านหนึ่ง การวางรูปร่างในลักษณะเอียงกับเส้นระนาบ ทำให้รูปร่างมี ความเคลื่อนไหวมากขึ้น เกิดแรงดึงดูดพื้นฐาน รูปทรงทั้งสองจึงดูไม่มั่นคง

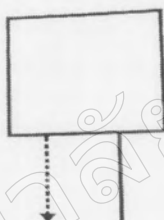


ภาพที่ 39 การวางมุมของรูปร่างที่สมดุลบนเส้นระนาบ



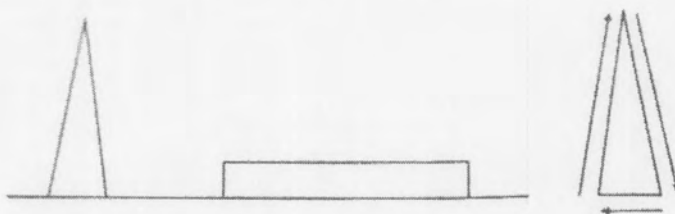
ภาพที่ 40 รูปร่างสงบที่วางเอียงบนเส้นระนาบ

3) รูปร่างสี่เหลี่ยมเมื่อวางบนเส้นตั้ง โดยวางเอียงไปทางใดทางหนึ่ง จะมีความรู้สึกเคลื่อนไหว ซึ่งดูเหมือนจะมีแรงดึงดูดทางด้านซ้ายมือทำให้ดูไม่สงบนิ่ง



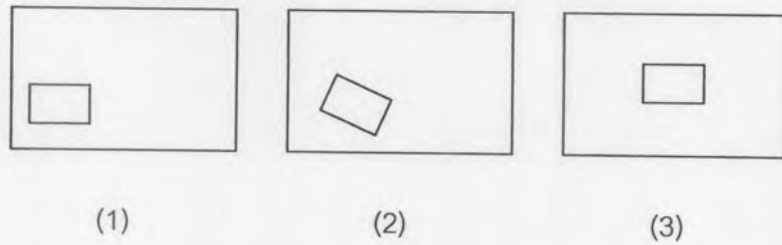
ภาพที่ 41 รูปร่างสี่เหลี่ยมวางบนเส้นตั้ง

4) รูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่ากัน มีความเคลื่อนไหวมากกว่ารูปที่มีด้านเท่ากัน ทั้งนี้ เพราะว่าเมื่อสายตามองรูปสามเหลี่ยมมุมแหลม สายตาจะติดตามความยาวของด้านทั้งสามจากด้านฐาน ซึ่งมีความยาวน้อยกว่าด้านข้าง สายตาจะถูกดึงขึ้นสู่ยอดสามเหลี่ยมก่อนที่จะเลื่อนมายังด้านฐานทางขวามือ การรับรู้เรื่องความสั้น-ยาว ไม่เท่ากันนี้ ทำให้รู้สึกเคลื่อนไหวไม่สม่ำเสมอ ไม่คงที่ รูปสี่เหลี่ยมด้านขนานทำให้เกิดความรู้สึกเช่นเดียวกับสามเหลี่ยมด้านไม่เท่ากัน ทั้งสองรูปหากเปรียบเทียบเรื่องการทรงตัวแล้วรูปสี่เหลี่ยมที่วางด้านยาวบนเส้นระนาบ จะมีความทรงตัวมั่นคงกว่ารูปสามเหลี่ยมทำให้ไม่รู้สึกว่าจะล้ม



ภาพที่ 42 ความเคลื่อนไหวของรูปเหลี่ยมด้านไม่เท่า

5) รูปร่างที่มีความสมดุลจะดูสงบ แต่เมื่อนำไปจัดวางในลักษณะขัดแย้งกับบรรยากาศภายนอกหรือขัดแย้งกับรูปร่างของพื้น จะเกิดความรู้สึกเคลื่อนไหวเสียสมดุลได้



ภาพที่ 43 การวางรูปร่างสมดุลกับบรรยากาศโดยรวม

3.4.3 โปรแกรม The Geometer's Sketchpad (GSP)

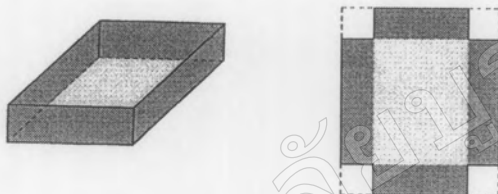
การพัฒนาความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ นอกจากการใช้ทักษะด้วยการวาดภาพแล้วยังสามารถใช้เทคโนโลยีในการออกแบบรูปทรงเรขาคณิตได้ด้วยโปรแกรม The Geometer's Sketchpad ดังมีรายละเอียดต่อไปนี้

โปรแกรม The Geometer's Sketchpad เป็นเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้นครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1991 โดยนิโคลัส แจคควิ (Nicholas Jachiw) ในโครงการพัฒนาอุปกรณ์ที่ช่วยในการมองรูปเรขาคณิต (Visual Geometry Project) ของมูลนิธิวิทยาศาสตร์แห่งชาติ (National Science Foundation: NSF) และ ดร. ดอริส ซาทซ์ไนเดอร์ (Dr. Doris Schatschneider) จากวิทยาลัยมอราเวียน (Moravian College) ของมหาวิทยาลัยเพนซิลเวเนียสเตต (Pennsylvania State University) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา พัฒนาเทคโนโลยีนี้ และพัฒนาให้สามารถใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์พีซีที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ (Windows) ในปี ค.ศ.1993

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (2548) เห็นความสำคัญจึงนำเทคโนโลยีมาช่วยในการจัดการเรียนการสอนวิชาคณิตศาสตร์ เพื่อให้นักเรียนมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนสูงขึ้นและเรียนรู้อย่างมีความหมาย ตลอดจนมีความคิดริเริ่มสร้างสรรค์ มีทักษะการจินตนาการ เกิดทักษะกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งเป็นสื่อเทคโนโลยีที่ช่วยให้ผู้เรียนมีโอกาสสร้างองค์ความรู้ได้ด้วยตนเอง (Constructivist Approach) รวมทั้งช่วยให้ผู้เรียนพัฒนาทักษะของการนึกภาพเชิงพื้นที่ (Visualization) ทักษะของกระบวนการแก้ปัญหา (Problem Solving Skills) นอกจากนี้ยังสามารถบูรณาการเชื่อมโยงให้ผู้เรียนมีโอกาสพัฒนาพหุปัญญา ได้แก่ ปัญญาทางด้านภาษา ด้านตรรกศาสตร์ ด้านมิติสัมพันธ์ และด้านศิลปะได้อีกด้วย โดยมีคุณลักษณะสำคัญต่อการเรียนรู้ในเนื้อหาต่าง ๆ ดังนี้ (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2548)

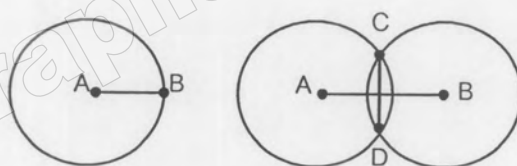
1) ด้านศิลปะ และการเคลื่อนไหว (Art / Animation) Geometer's Sketchpad สามารถที่จะนำเครื่องมือมาสร้างรูปต่าง ๆ และการใช้คำสั่งเพื่อให้เกิดรูปทรงที่เคลื่อนไหวได้ตามต้องการ

2) วิชาแคลคูลัส (Calculus) ในวิชาแคลคูลัส ใช้ Geometer's Sketchpad คำนวณหาปริมาตรของกล่องที่เกิดจากการตัดมุมทั้งสี่ของกระดาษ ซึ่งเราจะเห็นการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของกล่องดังกล่าวเมื่อมีการเคลื่อนไหว และนอกจากนี้ยังสามารถสร้างกราฟจากสมการต่าง ๆ ได้ เช่น $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ หรือรูปสมการอื่น ๆ ที่ต้องการได้



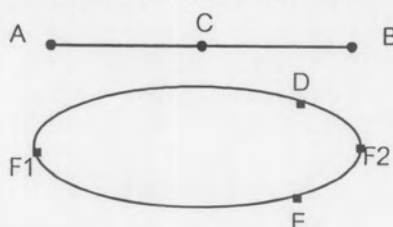
ภาพที่ 44 ปริมาตรของกล่องที่เกิดจากการตัดมุมทั้งสี่ของกระดาษ

3) วงกลม (Circles) สามารถวาดวงกลมที่ต้องการและวัดเพื่อหาความยาวของรัศมี เส้นรอบวง และคำนวณหาพื้นที่ได้



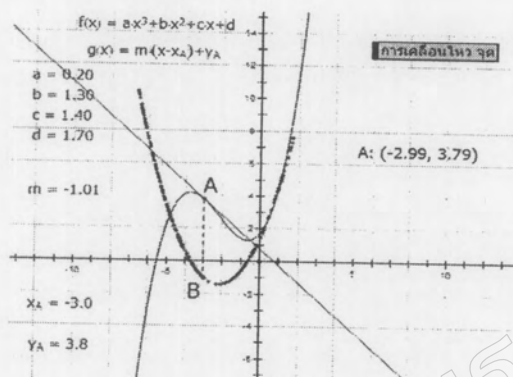
ภาพที่ 45 การวาดวงกลม

4) ภาคตัดกรวย (Conic Section) สามารถวาดวงกลม (Circle) วงรี (Ellipse) พาราโบลา (Parabola) และ ไฮเพอร์โบลา (Hyperbola) โดยการเคลื่อนที่ที่จะทำให้เห็นรอยรอย (Trace) ของกราฟ ซึ่งจะให้เห็นรูปต่าง ๆ ได้ตามความต้องการ



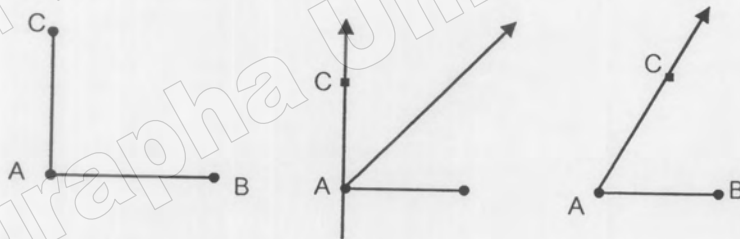
ภาพที่ 46 การวาดวงรีในภาคตัดกรวย

5) การเขียนกราฟและการหาจุดโคออร์ดิเนตในเรขาคณิต (Graphing/Coordinate Geometry) ในการเขียนกราฟจากรูปสมการต่าง ๆ



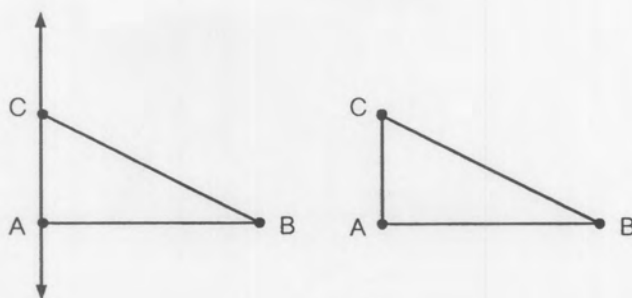
ภาพที่ 47 การวาดกราฟ

6) เส้นตรงและมุม (Line and Angles) สามารถวาดเส้นตรงและมุมได้โดยง่าย รวมถึงการวัดขนาดส่วนของเส้นตรงและมุมดังกล่าวได้ด้วย



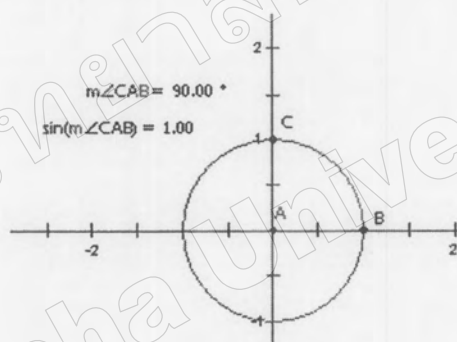
ภาพที่ 48 การวาดเส้นตรงและมุม

7) รูปสามเหลี่ยม (Triangles) เมื่อสร้างรูปสามเหลี่ยมสามารถใช้คำสั่งเพื่อคำนวณหาความยาวของด้านแต่ละด้าน มุมแต่ละมุม และคำนวณหาพื้นที่ของรูปสามเหลี่ยมย่อมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเมื่อโยกจุดยอดของสามเหลี่ยมไปอยู่ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ โดยที่ความสูงเท่าเดิม พื้นที่ของสามเหลี่ยมย่อมคงที่เสมอ นอกจากนั้นยังสามารถหาจุดออร์โทเซนเตอร์ (Orthocenter) ของสามเหลี่ยมได้อีก



ภาพที่ 49 การวาดรูปสามเหลี่ยม

8) ตรีโกณมิติ (Trigonometry) ในการหาฟังก์ชันตรีโกณมิติ ทำได้โดยการสร้างวงกลมหนึ่งหน่วย (Unit Circle) เมื่อกำหนดมุม A ก็สามารถหาค่าของฟังก์ชันตรีโกณมิติของมุม A ได้ตามต้องการ



ภาพที่ 50 การหาฟังก์ชันตรีโกณมิติ

การใช้เมนูคำสั่ง The Geometer's Sketchpad เกี่ยวกับการแปลงทางเรขาคณิต ดังนี้

1. การเลื่อนขนาน (Translation) เป็นการแปลงแบบหนึ่งจุดทุกจุดของรูปต้นแบบเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันเป็นระยะทางเท่า ๆ กัน ซึ่งคุณสมบัติของการเลื่อนขนานมีดังนี้

1.1 ส่วนของเส้นตรงบนรูปต้นแบบ และส่วนของเส้นตรงของภาพที่ได้จากการเลื่อนขนานจะขนานกัน

1.2 ระยะห่างของจุดใด ๆ ที่สมนัยกัน บนรูปต้นแบบกับจุดที่อยู่บนภาพที่ได้จากการเลื่อนขนานของจุดนั้น ๆ ย่อมเท่ากัน

1.3 สามารถเลือกรูปต้นแบบทับภาพที่ได้จากการเลื่อนขนานได้สนิทพอดี โดยไม่ต้องพลิกรูปหรือกล่าวว่า รูปต้นแบบและภาพที่ได้จากการเลื่อนขนานจะเท่ากันทุกประการ

2. การสะท้อน (Reflection) เป็นการแปลงรูปเรขาคณิตที่จุดทุกจุดของรูปต้นแบบเคลื่อนที่ข้ามเส้นตรงเส้นหนึ่ง ซึ่งเปรียบเสมือนกระจกหรือเรียกว่า เส้นสะท้อน โดยที่เส้นนี้จะแบ่งครึ่งและตั้งฉากกับส่วนของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดบนรูปต้นแบบกับจุดแต่ละจุดบนรูปสะท้อนที่สมนัยกัน ซึ่งคุณสมบัติของการสะท้อนมีดังนี้

2.1 รูปต้นแบบกับภาพที่ได้จากการสะท้อนรูปต้นแบบนั้นเท่ากันทุกประการ

2.2 เส้นสะท้อนจะแบ่งครึ่งและตั้งฉากกับส่วนของเส้นตรงที่เชื่อมระหว่างจุดแต่ละจุดบนรูปต้นแบบกับจุดบนภาพที่สมนัยกัน นั่นคือ ระยะห่างระหว่างจุดบนรูปต้นแบบกับเส้นสะท้อนจะเท่ากับระยะห่างระหว่างจุดที่เกิดจากการสะท้อนกับเส้นสะท้อน

2.3 ส่วนของเส้นตรงที่เชื่อมจุดบนรูปต้นแบบกับจุดที่สมนัยกันบนภาพที่ได้จากการสะท้อนจะขนานกัน แต่ไม่จำเป็นต้องยาวเท่ากัน

2.4 ด้านที่สมนัยกันระหว่างรูปต้นแบบกับภาพที่ได้จากการสะท้อนไม่จำเป็นต้องขนานกันทุกคู่

3. การหมุน (Rotation) เป็นการแปลงรูปเรขาคณิตที่จุดทุกจุดของรูปต้นแบบเคลื่อนที่ไปเป็นมุมเดียวกันรอบจุดคงที่ที่กำหนดซึ่งเรียกว่า จุดหมุน รูปที่เกิดจากการแปลงดังกล่าวจะเท่ากันทุกประการ

4. การย่อ/ขยาย (Zoom) เป็นการแปลงรูปเรขาคณิตให้มีการเพิ่มลดขนาดตามอัตราส่วนของเส้นตรง พื้นที่ และรูปที่มีปริมาตร

การวาดรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน โดยใช้เทคโนโลยีในการวาดรูปทรงเรขาคณิตและการแปลงทางเรขาคณิตด้วยโปรแกรม The Geometer's Sketchpad สามารถตรวจสอบร่องรอยการวาดของนักเรียนได้จากคำสั่งในเมนูแสดงผล และการวาดรูปทรงเรขาคณิตต้องอาศัยความรู้เรื่องการสร้างพื้นฐาน 6 แบบ ดังนี้

1. การสร้างส่วนของเส้นตรงที่ยาวเท่ากับความยาวของส่วนของเส้นตรงที่กำหนดให้
2. การแบ่งครึ่งส่วนของเส้นตรงที่กำหนดให้
3. การสร้างมุมให้มีขนาดเท่ากับขนาดของมุมที่กำหนดให้
4. การแบ่งครึ่งมุมที่กำหนดให้
5. การสร้างเส้นตั้งฉากจากจุดภายนอกมายังเส้นตรงที่กำหนดให้
6. การสร้างเส้นตั้งฉากที่จุดจุดหนึ่งบนเส้นตรงที่กำหนดให้

3.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.5.1 งานวิจัยที่เกี่ยวกับคณิตศาสตร์กับความสามารถด้านมิติสัมพันธ์

นิมมอนส์ (Nimmons, 1997) ศึกษาผลการใช้เครื่องคำนวณกราฟิกที่มีต่อความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ ระดับความเข้าใจและความสนใจในการเรียนคณิตศาสตร์ระหว่างนักศึกษาชายกับนักศึกษาหญิง กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาที่เรียนพีชคณิต จำนวน 4 กลุ่ม แบ่งออกเป็นกลุ่มทดลอง 3 กลุ่ม และกลุ่มควบคุม 1 กลุ่ม โดยกลุ่มทดลองกลุ่มที่ 1 เรียนโดยใช้เครื่องคำนวณกราฟิกประกอบการเรียน และใช้กิจกรรมกระตุ้นความสนใจในการเรียน กลุ่มทดลองกลุ่มที่ 2 เรียนโดยใช้เครื่องคำนวณกราฟิกประกอบการเรียนอย่างเดียว กลุ่มทดลองกลุ่มที่ 3 เรียนโดยไม่ได้ใช้เครื่องคำนวณกราฟิกประกอบการเรียนอย่างเดียว ส่วนกลุ่มควบคุม เรียนโดยไม่ได้ใช้เครื่องคำนวณกราฟิก และไม่ได้ใช้กิจกรรมกระตุ้นความสนใจในการเรียน ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มนักศึกษาชายและนักศึกษาหญิงที่เรียนโดยใช้เครื่องคำนวณกราฟิกประกอบการเรียนมีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูงกว่ากลุ่มนักศึกษาที่เรียนโดยไม่ได้ใช้เครื่องคำนวณกราฟิก และยังพบว่านักศึกษาหญิงที่ใช้เครื่องคำนวณกราฟิกประกอบการเรียนมีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์และมีระดับความเข้าใจในวิชาคณิตศาสตร์สูงกว่านักศึกษาชาย

เดอเลียโลกู (Delialioglu, 1999) ได้ศึกษาทักษะทางคณิตศาสตร์ร่วมกับความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ที่มีต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนของนักเรียนมัธยมศึกษาตอนปลายเอกฟิสิกส์ จำนวน 68 คน โดยใช้แบบทดสอบวัดทักษะทางคณิตศาสตร์ แบบทดสอบวัดความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ และแบบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาฟิสิกส์ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ สำหรับทักษะทางคณิตศาสตร์ กับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาฟิสิกส์มีความสัมพันธ์กันทางบวกคือ 0.46 ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05 และความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ กับผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนวิชาฟิสิกส์ มีความสัมพันธ์กันทางบวกคือ 0.45 ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .05 แสดงให้เห็นว่า ทักษะทางคณิตศาสตร์ และความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สามารถพยากรณ์ความแปรปรวนคะแนนการทดสอบวิชาฟิสิกส์ได้ถึงร้อยละ 31

พิททาลิส และคริสเตา (Pittalis & Christou, 2010) ศึกษาชนิดของการใช้เหตุผลในการคิดเรขาคณิต 3 มิติและความสัมพันธ์กับความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ เพื่ออธิบายและวิเคราะห์โครงสร้างของการคิดเชิงเรขาคณิต 3 มิติ โดยการระบุชนิดของการใช้เหตุผลที่แตกต่างกันและการตรวจสอบความสัมพันธ์กับความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ ทดสอบกับนักเรียนในระดับ 5-9 ผลการวิจัยพบว่า การคิดเชิงเรขาคณิต 3 มิติ สามารถอธิบายชนิดของการใช้เหตุผลที่แตกต่างกันได้แก่ โครงสร้างเชิงพื้นที่ ความคิดรวบยอดของคุณสมบัติทางคณิตศาสตร์ และการวัดผล ได้อย่างชัดเจน นั่นหมายถึงการเป็นตัวแทนของวัตถุ 3 มิติ สรุปได้ว่า ความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ของ

นักเรียน ในการพยากรณ์การใช้เหตุผลในการคิดเรขาคณิต 3 มิติ ได้เป็นอย่างดี คือ Spatial Visualization, Spatial Orientation, และ Spatial Relations

สรุปได้ว่ากิจกรรมทางคณิตศาสตร์ และการใช้เทคโนโลยีในการเรียนรู้สามารถกระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดกระบวนการคิดอย่างมีเหตุผลที่เชื่อมโยงไปสู่การพัฒนาความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ และมีความสัมพันธ์กับการพัฒนาผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนให้สูงขึ้นด้วย

3.5.2 งานวิจัยที่เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม The Geometer's Sketchpad (GSP)

เยาวภา ผูกสมัคร (2554) ได้ศึกษาผลการใช้ชุดการสอนโดยใช้ GSP ที่มีต่อผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน เรื่อง การแปลงทางเรขาคณิต เมื่อปรับอิทธิพลของสมรรถภาพทางสมองด้านมิติสัมพันธ์ โดยใช้แบบแผนการทดลองแบบ Non-randomized Pretest Posttest Control Group Design กลุ่มตัวอย่างเป็นนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 2 จำนวน 2 ห้องเรียนเป็นกลุ่มทดลอง 1 ห้องเรียน สอนด้วยชุดการสอนโดยใช้ GSP กลุ่มควบคุม 1 ห้องเรียน สอนแบบปกติ เครื่องมือ ได้แก่ แบบทดสอบวัดผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่อง การแปลงทางเรขาคณิต แบบทดสอบวัดความสามารถทางสมองด้านมิติสัมพันธ์ซึ่งใช้วัดตัวแปรร่วม และแบบสอบถามวัดเจตคติต่อวิชาคณิตศาสตร์ ผลการวิจัยปรากฏว่า กลุ่มทดลองมีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่อง การแปลงทางเรขาคณิตของสูงกว่ากลุ่มควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 โดยมีคะแนนเฉลี่ยที่ปรับแล้วของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่อง การแปลงทางเรขาคณิตของกลุ่มทดลอง มีค่าเฉลี่ย $(\bar{X}_{adj.E}) = 24.44$ ซึ่งสูงกว่าคะแนนเฉลี่ยที่ปรับแล้วของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่อง การแปลงทางเรขาคณิต ของกลุ่มควบคุม $(\bar{X}_{adj.C}) = 21.36$ เมื่อประมาณค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.563 แสดงว่าผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนเรื่อง การแปลงทางเรขาคณิตกับสมรรถภาพทางสมองด้านมิติสัมพันธ์ มีความสัมพันธ์กันเท่ากับ $\sqrt{0.563}$ ได้ค่าเป็น 0.75 ซึ่งมีความสัมพันธ์กันสูง

โฟเลตตา (Foletta, 1994) ศึกษาเรื่องการใช้เทคโนโลยีและแนวทางการตรวจสอบความเข้าใจเกี่ยวกับการคิดของนักเรียนเมื่อใช้ GSP ในการเรียนวิชาเรขาคณิต มีจุดมุ่งหมายเพื่อวาดรูปทรงเรขาคณิตของนักเรียนเกรด 9 และเกรด 10 จำนวน 4 คน เก็บข้อมูลจากการสังเกตการใช้ GSP การปฏิบัติในกลุ่มย่อยในชั้น และการสัมภาษณ์ โดยให้นักเรียนออกไปวาดรูปบนกระดาษ และวาดรูปด้วยคอมพิวเตอร์ พบว่า 1) การวาดรูปนักเรียนจะได้รับคำแนะนำจากครู 2) การใช้ GSP เป็นเครื่องมือการเรียนรู้ทางเรขาคณิตเพิ่มเติมจากการวาดรูปด้วยกระดาษและปากกา และพบว่า 3) การใช้โปรแกรม GSP ในนักเรียนที่มีผลสัมฤทธิ์ทางการเรียนต่ำ สามารถทำได้ดีเพราะมีขั้นตอนให้คิดคาดการณ์คำตอบได้มากกว่าการวาดด้วยกระดาษ 4) นักเรียนสามารถคาดการณ์ตั้งแต่เริ่มใช้โปรแกรม ในค้นหาประเด็นสำคัญเพื่อให้ได้ข้อสรุป

จูลี (July, 2001) ได้ศึกษาการคิดในสามมิติเกี่ยวกับการสำรวจความคิดทางเรขาคณิตและความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ของนักเรียน ด้วยโปรแกรม GSP ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์แบบไดนามิกและการโต้ตอบที่ช่วยให้ผู้ใช้ตรวจสอบและสำรวจแนวความคิดทางเรขาคณิตและการจัดการโครงสร้างทางเรขาคณิต การวิจัยโดยใช้ GSP เป็นเครื่องมือในการเรียนการสอนการคิดเชิงเรขาคณิต และความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ 3 มิติ กับนักเรียนเกรด 10 จำนวน 18 คน ใน 10 สัปดาห์ โดยใช้ GSP ในการวาดภาพวัตถุ 2 มิติ เป็นตัวแทนวิเคราะห์ อภิปราย การคาดคะเนและการยืนยันวัตถุ 3 มิติ เก็บรวบรวมข้อมูลเชิงคุณภาพด้วยการสังเกต และการสัมภาษณ์ รวมทั้งทดสอบก่อนเรียนและหลังเรียนของความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ 3 มิติ ด้วย t-test ผลการวิเคราะห์พบว่า GSP เป็นตัวบ่งชี้ว่าเป็นเครื่องมือการสอนเกี่ยวกับรูปทรงเรขาคณิต 3 มิติ โดยหลังเรียนนักเรียนสามารถพัฒนาความคิดเชิงเรขาคณิตเพิ่มขึ้น และพบว่าความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ของนักเรียนสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

เคอร์ทูลูส (Kurtuluş, 2011) ได้ศึกษาผลของการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวาดภาพแบบทัศนียภาพที่มีต่อความสามารถเชิงมิติสัมพันธ์และการวาดภาพแบบทัศนียภาพ โดยศึกษากับนักเรียนเกรด 8 จำนวน 30 คน กลุ่มควบคุม 15 คน และกลุ่มทดลอง 15 คน ในปีการศึกษา 2009-2010 ประเทศตุรกี โดยกลุ่มควบคุมปฏิบัติการวาดภาพบนกระดานและกระดาน เป็นเวลา 2 สัปดาห์ (8 ชั่วโมง) กลุ่มทดลองดำเนินการสอนโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (GSP) ช่วยสอนการวาดภาพแบบทัศนียภาพ (Perspective Drawing) เป็นเวลา 2.5 สัปดาห์ (10 ชั่วโมง) การวัดผลสัมฤทธิ์เชิงมิติสัมพันธ์ และการวาดภาพแบบทัศนียภาพของนักเรียน ผลการทดลองปรากฏว่า ทั้งสองกลุ่มมีความสามารถเชิงมิติสัมพันธ์ และการวาดภาพแบบทัศนียภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญสรุปในประเด็นการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ (GSP) ในการวาดภาพช่วยเพิ่มความสามารถเชิงมิติสัมพันธ์และการวาดภาพแบบทัศนียภาพ

จากการศึกษาแนวคิดและงานวิจัยเกี่ยวกับเทคโนโลยีกับการพัฒนาความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ และการใช้โปรแกรม GSP เป็นเครื่องมือการเรียนรู้ทางเรขาคณิตเพิ่มเติมจากการวาดภาพด้วยกระดาษและปากกา สามารถเชื่อมโยงการใช้เส้นในลักษณะต่าง ๆ ได้สอดคล้องกับกระบวนการวาดภาพของวิลลิสต์ ซึ่งเป็นกระบวนการวาดภาพแสดงมิติสัมพันธ์ ให้ภาพมีความลึก เริ่มจากการวาดภาพที่ไม่มีมิติ ไปสู่การวาดภาพที่มีมิติติดต่อกันเป็นภาพที่สมบูรณ์เสมือนจริง ส่งผลต่อการพัฒนาความสามารถด้านมิติสัมพันธ์

ตอนที่ 4 แนวคิดเกี่ยวกับคลื่นไฟฟ้าสมอง

ความสามารถด้านมิติสัมพันธ์เป็นการเชื่อมโยงสิ่งต่าง ๆ ผ่านการรับรู้ทางการมองเห็นที่ต้องใช้กระบวนการรับรู้ (Perception) และกระบวนการทางความคิดความเข้าใจ (Cognition) ซึ่งเป็นความสามารถทางสมองในการแปลความหมายสิ่งที่มองเห็นร่วมกับประสบการณ์ที่เคยได้รับมาก่อน สุรชัย ลิขสิทธิ์วัฒนกุล (2549) ได้กล่าวถึง การตรวจวัดกระบวนการทำงานทางสมองเกี่ยวกับการรับรู้ทางการมองเห็นว่า ต้องอาศัยการบันทึกด้วยคลื่นไฟฟ้าสมอง (Electroencephalographic Recording) ตรวจการทำงานของสมองในส่วน Cerebral Cortex คลื่นที่บันทึกได้เกิดจากความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดในสมอง ส่วนทนายท ดิสดิจิต (2549) ได้กล่าวถึงแหล่งที่มาของคลื่นไฟฟ้าสมองไว้ว่า ในทางการแพทย์จะทำการวัดที่หนังศีรษะ คลื่นไฟฟ้าสมองที่วัดได้เกิดจากการรวมกันของประจุที่บริเวณ Dendrite ซึ่งก่อให้เกิดการกระตุ้นหรือการยับยั้งของเซลล์ประสาท (EPSP & IPSP) ที่อยู่ติดผิวนอกของสมอง (Cortex) ในคลื่นไฟฟ้าสมองปกติจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ (Rhythmic) เกิดจากประจุที่บริเวณ Dendrite ได้รับสัญญาณจากตัวกำเนิดจังหวะที่อยู่ใน Thalamus ผ่าน Projecting Fiber เข้ามาก่อนให้เกิดการกระตุ้นหรือการยับยั้งของเซลล์ประสาทที่ Dendrite ของเซลล์ประสาทบริเวณผิวสมองเป็นบริเวณกว้าง ดังนั้นการวัดคลื่นไฟฟ้าสมองจึงเป็นการวัดการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาที่สัมพันธ์กับการทำหน้าที่ของกลุ่มเซลล์ในระบบประสาท ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

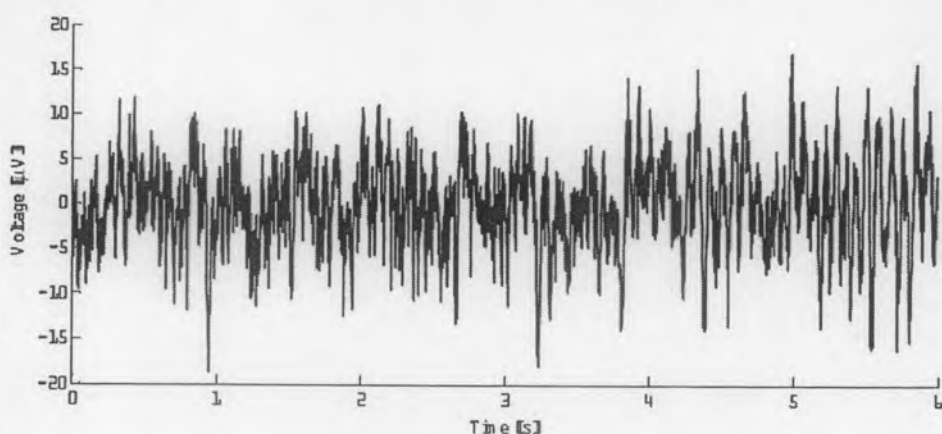
4.1 พื้นฐานการวัดคลื่นไฟฟ้าสมอง

นิวรอนใน Cerebral Cortex มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ (Membrane) ตลอดเวลา เพราะกลุ่มนิวรอนมีการทำงานตอบโต้ตามการกระตุ้นจากเส้นประสาทนำเข้าและเส้นประสาทที่เชื่อมระหว่างสมองบริเวณต่าง ๆ ตลอดเวลา ปกติกลุ่มนิวรอนที่อยู่ติดกันมีการเปลี่ยนแปลงการทำงานพร้อมกัน ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้านอกเซลล์ขนาดมากพอที่จะบันทึกเห็นได้โดยใช้ Macroelectrode วางบนหนังศีรษะเรียกภาพที่บันทึกได้ว่า Electroencephalogram หรือถ้าบันทึกโดยตรงที่บนเนื้อสมองเรียกว่า Electrocorticogram

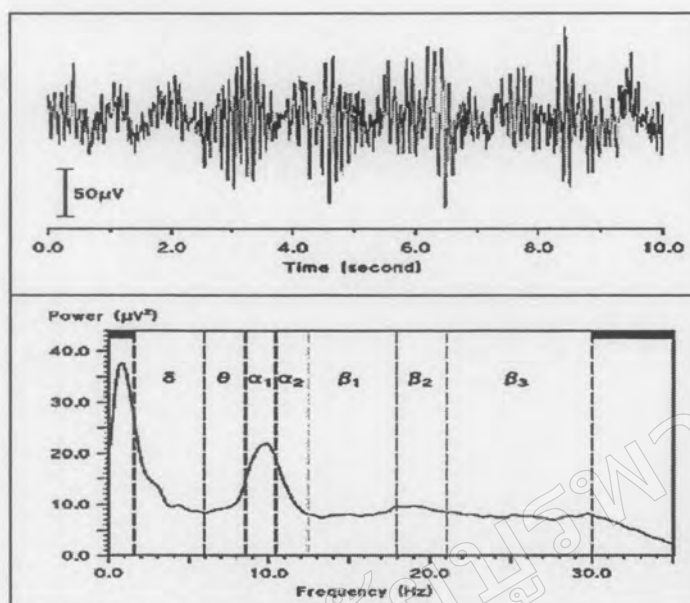
คลื่นไฟฟ้าสมอง (Electroencephalogram) มักเรียกย่อว่า คลื่นสมอง หรือ EEG คือ การบันทึกผลรวมของศักย์ไฟฟ้านอกเซลล์ของกลุ่มนิวรอนในสมองที่อยู่ใต้บริเวณอิเล็กโทรด (ขั้วไฟฟ้า) บันทึกสัญญาณที่บันทึกได้คือสัญญาณเดียวกับของ Electrocorticogram (ECoG) เพียงแต่ EEG มีขนาดเล็กกว่า และมีความถี่ต่ำกว่าเพราะเป็นการบันทึกที่ไกลออกจากแหล่งกำเนิดและเป็นการบันทึกผ่านชั้นกะโหลกศีรษะและหนังศีรษะ เป็นผลรวมการทำงานของกลุ่มนิวรอนปกติจะวางขั้วไฟฟ้าเป็นคู่ที่บริเวณ Frontal, Parietal, Occipital และ Temporal lobe ทั้งสองซีกสมอง ความถี่ที่บันทึกได้จะเปลี่ยนแปลงในช่วง 1-50 Hz (ปกติ 1-30 Hz) มีความสูงคลื่นขนาด 10-100 μV ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 10-50 μV แม้ว่าความถี่ค่อนข้างซับซ้อนและขนาดเปลี่ยนแปลงมากในเวลาช่วงสั้น ๆ (สุพรพิมพ์ เจียสกุล และคณะ, 2548)

คลื่นไฟฟ้าสมองเกิดจากการส่งถ่ายสารเคมี (โกลูตาเมตและโพแทสเซียม) ระหว่างเซลล์ประสาทขณะที่สมองทำงาน เครือข่ายเซลล์ประสาทในสมองมีมากกว่าพันล้านเซลล์ก่อให้เกิดการสร้างพลังงานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นคลื่นไฟฟ้าสมองที่วัดได้เกิดจากศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน (Action Potential) ของเยื่อหุ้มเซลล์ การที่ผิวหนังด้านในของเซลล์และด้านนอกของเยื่อหุ้มเซลล์มีความเป็นประจุบวก (Cations) และประจุลบ (Anions) ไม่เท่ากันทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า โดยผิวหนังด้านในจะมีประจุลบอยู่มากกว่าผิวหนังนอกเซลล์เสมอ เมื่อเซลล์อยู่ในภาวะปกติความต่างศักย์ของเยื่อหุ้มเซลล์ เกิดจากคุณสมบัติของเยื่อหุ้มเซลล์ที่มีคุณสมบัติของการเลือกผ่าน (Permeability) ทำให้สารชนิดหนึ่งชนิดใดสามารถแพร่ผ่าน (Diffusion) เข้าไปในเซลล์ได้ดีกว่าอีกชนิดหนึ่ง ก่อให้เกิดการกระตุ้นหรือการยับยั้งของเซลล์ประสาทที่อยู่บริเวณผิวหนังของสมอง การวัดคลื่นไฟฟ้าสมองจะนิยมวัดแบบ Noninvasive ซึ่งเป็นการวัดแบบไม่ต้องผ่าตัด ระดับของประจุไฟฟ้าที่ได้จะน้อยกว่าแบบผ่าตัดหรือการวัดแบบ Invasive ที่ใช้เข็มขนาดเล็กวัดโดยตรงบริเวณภายในของเนื้อสมอง อย่างไรก็ตามการวัดแบบ Noninvasive ให้ความปลอดภัยและลดความเสี่ยงที่จะเกิดการบาดเจ็บจากการผ่าตัดแก่ผู้ทดสอบได้มากกว่า คลื่นไฟฟ้าสมองที่สามารถวัดได้จากบริเวณผิวหนังของสมองผ่านขั้วไฟฟ้าจะมีระดับประจุไฟฟ้าที่ไม่โครแอมแปร์ (μA)

การบันทึกคลื่นไฟฟ้าสมองสามารถทำได้โดยใช้เครื่องมือทางไฟฟ้า (EEG Signal Recorder) ซึ่งมีหน้าที่ขยายและแปลงสัญญาณไฟฟ้าสมองเป็นสัญญาณดิจิทัลและบันทึกสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปตัวเลขดิจิทัลที่ได้จากการสุ่มด้วยความถี่ที่คงที่ (Sampling Frequency) ข้อมูลที่ได้จะอยู่ในรูปของอนุกรมเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time-Series Data) โดยทั่วไปจะใช้เวลาในการสุ่มมากกว่า 250 Hz เพื่อให้ได้ความละเอียดของคลื่นไฟฟ้าสมองเพียงพอต่อการนำไปแปลผล ดังภาพคลื่นไฟฟ้าสมองที่ได้จากการบันทึก โดยที่แกนนอน คือเวลา (มีหน่วยเป็นวินาที) และแกนตั้งคือระดับศักย์ไฟฟ้า (มีหน่วยเป็นไมโครโวลต์) ดังภาพที่ 51-52



ภาพที่ 51 กราฟคลื่นไฟฟ้าสมองด้วยเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า

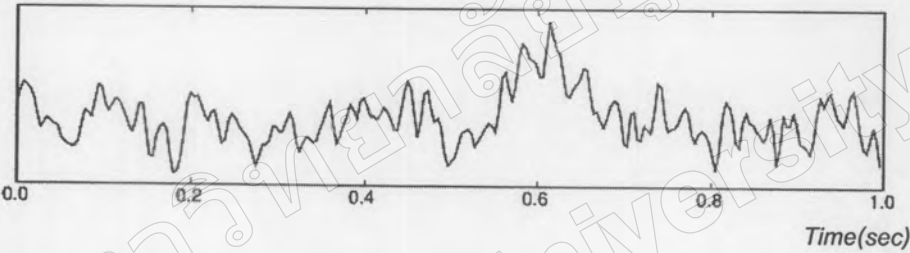


ภาพที่ 52 การวิเคราะห์คลื่นความถี่ของคลื่นไฟฟ้าสมอง (Frequency Analysis of EEG)

4.2 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (Brain wave Signal)

สัญญาณคลื่นสมองเป็นรูปแบบหนึ่งของสัญญาณแบบต่าง ๆ ที่วัดได้จากร่างกายมนุษย์ ซึ่งเรียกรวมกันว่าสัญญาณทางชีวภาพการแพทย์ (Biomedical Signal) โดยรูปแบบของสัญญาณนี้อาจอยู่ในลักษณะของสัญญาณไฟฟ้า (เช่นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง) สัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า หรืออยู่ในลักษณะของรูปภาพและภาพเคลื่อนไหวเช่น ภาพอัลตราซาวนด์ (Ultrasound) ภาพซีทีสแกน (CT Scan) ภาพการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในร่างกาย (Positron Emission Tomography) เป็นต้น (Christen & Junker, 2004) โดยปกติร่างกายมนุษย์จะเคลื่อนไหวหรือทำกิจกรรมใด ๆ จะต้องมีการสั่งการมาจากสมอง โดยสมองจะส่งสัญญาณไฟฟ้าอ่อน ๆ ผ่านทางเซลล์ประสาทเพื่อมากระตุ้นหรือสั่งการกล้ามเนื้อให้เคลื่อนไหวตามที่ต้องการ ซึ่งสัญญาณที่สมองส่งออกมานี้สามารถใช้เครื่องมือบางอย่างในการตรวจจับและแปลงออกมาในรูปของสัญญาณไฟฟ้าได้ และสัญญาณไฟฟ้าที่ตรวจจับได้นี้ในด้านเทคโนโลยีการสื่อสารระหว่างสมองและคอมพิวเตอร์ (BCI) จะเรียกว่าสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (Brain Wave Signal) นอกจากนี้สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ (Muscle) ก็สามารถที่จะตรวจวัดได้เหมือนกันและถือว่าเป็นสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองอีกแบบหนึ่งที่น่าสนใจในด้านเทคนิคการสื่อสารระหว่างสมองและคอมพิวเตอร์ (BCI) สัญญาณไฟฟ้าที่สามารถตรวจวัดได้จากคลื่นสมองยังแบ่งเป็นประเภทต่าง ๆ ตามลักษณะและวิธีการบันทึกสัญญาณได้อีกหลายชนิดดังนี้

4.2.1 อิเล็กโทรเอนเซฟาโลแกรม (Electroencephalogram) หรือเรียกว่าอีอีจี (EEG) สัญญาณไฟฟ้านี้ได้จากการวัดด้วยวิธีที่เรียกว่า อิเล็กโทรเอนเซฟาโลกราฟี (Electroencephalography) วิธีนี้จะเป็นการวัดสัญญาณไฟฟ้าจากบริเวณหนังศีรษะหรือจากผิวสมองภายในกะโหลกศีรษะแล้วแต่กรณี สัญญาณอีอีจีที่ตรวจวัดได้จะมีความสัมพันธ์เกี่ยวโยงกับสมองหรือเส้นประสาทในบริเวณที่ตรวจวัด โดยสัญญาณไฟฟ้าในบางช่วงความถี่จะสะท้อนความนึกคิดและการกระทำของคนสมองได้ดีเท่ากับสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากการวัดที่บริเวณกล้ามเนื้อบนใบหน้า สัญญาณไฟฟ้าจะครอบคลุมความถี่ในย่านประมาณ 5–30 Hz เนื่องจากย่านความถี่นี้ตอบสนองต่อทั้งความนึกคิดของสมองและการเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ จึงถูกเรียกว่าสัญญาณไฟฟ้าสมองและร่างกาย (Brain Body Signal) และสัญญาณไฟฟ้าที่วัดมาจากหนังศีรษะนี้จะมีขนาดแรงดันต่ำอยู่ในระดับมิลลิโวลต์ (Millivolt; μV) เท่านั้น

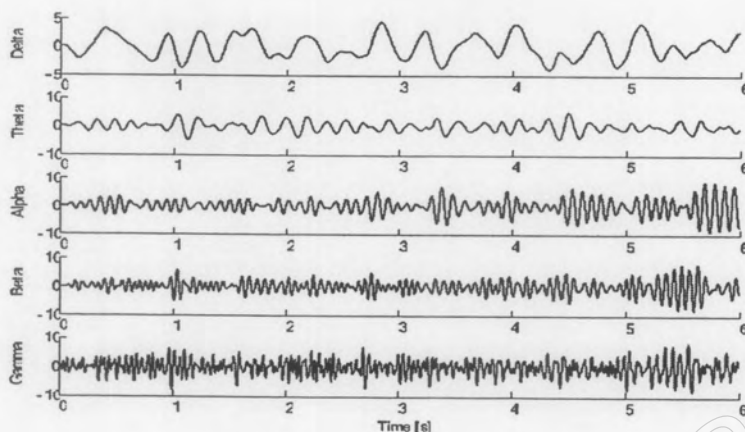


ภาพที่ 53 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง

คลื่นไฟฟ้าสมองจะมีการเปลี่ยนแปลงเป็นจังหวะ (Rhythmic EEG activity) ที่แตกต่างกัน เช่น ขณะตื่น หลับตา หรือกำลังพักผ่อน เป็นต้น ซึ่งสามารถกำหนดเป็นช่วงความถี่ได้ โดยแต่ละช่วงของความถี่คลื่นไฟฟ้าสมองจะให้ผลของระดับประจุไฟฟ้าของคลื่น และมีช่วงการเกิดคลื่นที่แตกต่างกัน ดังภาพที่ 54

แซไน และแชมเบอร์ (Sanei & Chambers, 2007) ได้กำหนดระดับช่วงความถี่ของคลื่นไฟฟ้าสมอง

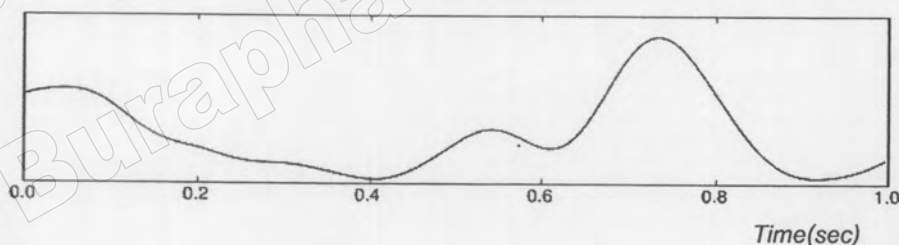
ระดับช่วงความถี่ของคลื่นไฟฟ้าสมอง	
คลื่นไฟฟ้าสมอง	ช่วงความถี่ (Hz)
Delta (δ)	0.5-4
Theta (θ)	4-8
Alpha (α)	8-13
Beta (β)	13-30
Gamma (γ)	> 30



ภาพที่ 54 คลื่นไฟฟ้าสมองในแต่ละช่วงความถี่

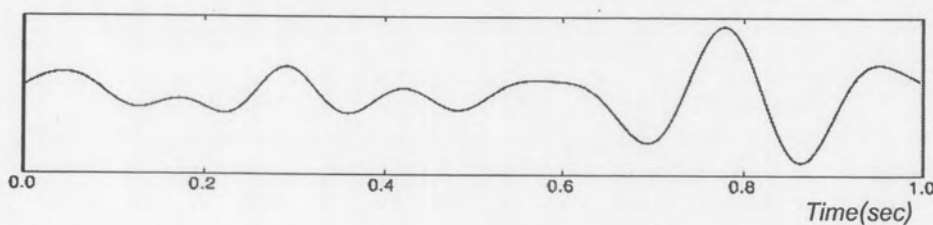
สุพรพิมพ์ เจียสกุล และคณะ (2548) ได้แบ่งชนิดของคลื่นไฟฟ้าสมองตามความถี่ที่เด่น และลักษณะเฉพาะของความถี่ได้เป็น 4 ชนิด คือ Alpha, Beta, Theta และ Delta บางครั้ง อาจแยกชนิดคลื่นไฟฟ้าสมองด้วยตาไม่ได้ ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์ความถี่อัตโนมัติ เพื่อตรวจวัด EEG Spectrum ดังนี้

- 1) คลื่นไฟฟ้าสมองเดลต้า (Delta Brain Waves) มีความถี่ในช่วง 0.1-3.5 รอบต่อวินาที (Hz) เป็นคลื่นสมองที่ช้าที่สุด เป็นดัชนีบอกการหลับหรือหลับลึก



ภาพที่ 55 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองเดลต้า

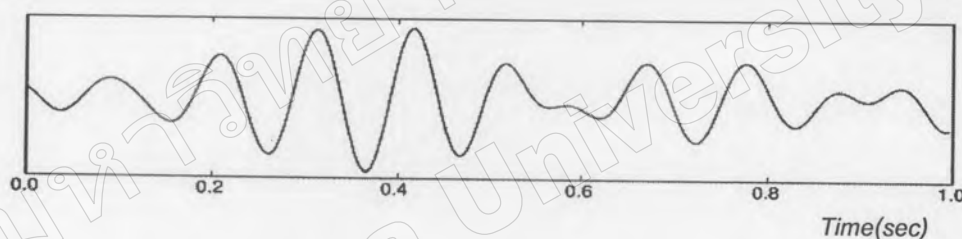
- 2) คลื่นไฟฟ้าสมองเธต้า (Theta Brain Waves) ความถี่ประมาณ 4-7.5 รอบต่อวินาที (Hz) จะสัมพันธ์กับร่างกายขณะหลับไม่ลึก หรือขณะสับสนงุนงง ซึ่งเป็นช่วงที่สมองทำงานช้าลงมาก



ภาพที่ 56 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองเธต้า

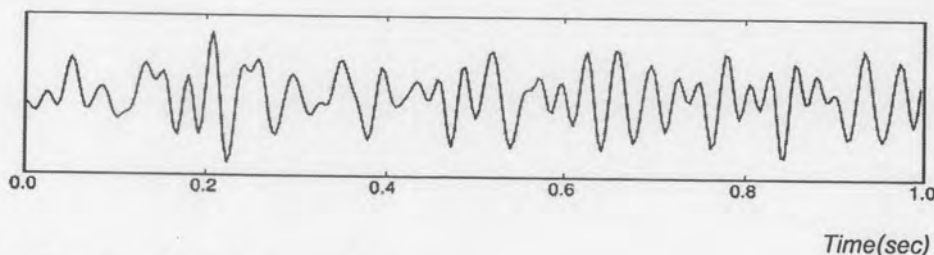
3) คลื่นไฟฟ้าสมองแอลฟา (Alpha Brain Waves) คือ EEG ที่บันทึกได้ขณะตื่น สมองกำลังพักและหลับตา มีความถี่ ประมาณ 8-13 รอบต่อวินาที (Hz) เรียกลักษณะโดยรวมว่า Alpha Rhythm ซึ่งบริเวณสมองของแต่ละคนมีลักษณะเฉพาะต่างกัน ปกติพบคลื่นใหญ่ที่สุดที่บริเวณ Occipital Cortex ที่เป็น Visual Cortex ขณะหลับตาและไม่คิดอะไร ถ้าเริ่มตั้งใจรับรู้สิ่งเร้าจากภายนอก หรือภายในหรือนึกถึงภาพที่เคยเห็น จะทำให้ Alpha Rhythm เปลี่ยนไปเป็นคลื่นความถี่เร็วและมีขนาดเล็กกว่าที่เรียกว่า Beta Wave ซึ่งเป็น EEG ที่เกี่ยวข้องกับความตั้งใจต่อตัวกระตุ้นมากกว่า เป็นการรับรู้ตัวกระตุ้น ถ้าถามคนขณะมี Alpha Rhythm จะบอกว่ากำลังพักและมีความสุข ซึ่งพบว่า มีคลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha มากในคนที่นั่งวิปัสสนา แสดงว่ามีการผ่อนคลาย หรือ ลดความกังวล

คลื่นไฟฟ้าสมองแอลฟา ส่วนใหญ่จะเกิดบริเวณสมองส่วนขม่อม (Parietal Lobe) และ ส่วนท้ายทอย (Occipital lobe) จากการศึกษาความแตกต่างระหว่างความสูงหรือความต่ำของ แอลฟานั้น แสดงให้เห็นถึงความวิตกกังวล หรือการนอนไม่หลับ (Plotkin & Rice, 1981)



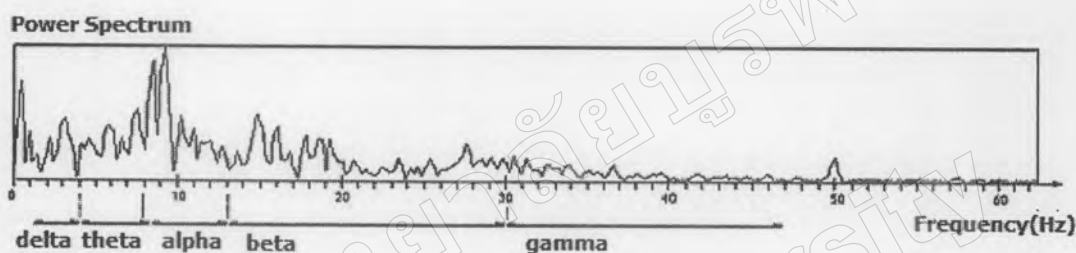
ภาพที่ 57 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองแอลฟา

4) คลื่นไฟฟ้าสมองเบต้า (Beta Brain Waves) คือ คลื่นไฟฟ้าสมองที่มีความถี่มากกว่า 13 รอบต่อวินาที (Hz) แต่ไม่เกิน 35 รอบต่อวินาที (Hz) ขนาดเล็ก 5-10 μV ไม่เกิน 30 μV เกิดขึ้น ในขณะที่สมองตื่นตัว รู้ตัว ขณะวุ่นวายกับความคิดต่าง ๆ ความถี่ที่พบบริเวณ Occipital, Central, Frontal มีความถี่แตกต่างกัน ดังนี้ (1) Frontal Beta พบบ่อยมาก อาจเร็วมากถึง 35-40 Hz (2) Central Beta โดยทั่วไปมีความถี่ 20-30 Hz (3) Occipital Beta Wave Posterior มักเทียบได้ กับ Fast Alpha Wave มีความถี่ 14-19 Hz (4) Beta Wave จะพบกระจายทั่วไป



ภาพที่ 58 สัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมองเบต้า

ในการวิจัยนี้ได้สรุปความหมาย คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta ว่าเป็นคลื่นที่เกิดขึ้นในขณะที่สมองตื่นตัว รู้ตัว ขณะวุ่นวายกับความคิดต่าง ๆ ถ้าเริ่มตั้งใจรับรู้สิ่งเร้าจากภายนอกหรือภายในหรือนึกถึงภาพที่เคยเห็น จะทำให้ Alpha Rhythm เปลี่ยนไปเป็นคลื่นความถี่เร็วและมีขนาดเล็กลงที่เรียกว่า Beta Wave จำแนกออกเป็น 2 ช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง ได้แก่ Beta 1 เท่ากับ 12.62–17.42 Hz แสดงถึงมีความรับผิดชอบเกี่ยวกับการคิด ความมีสมาธิ และการจัดการสมาธิ ถ้าคลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 1 ลดลง หมายถึง ผลการขาดสมาธิ ขาดความคิดตรึกตรอง และ Beta 2 เท่ากับ 17.62–25.04 Hz ถ้า Beta 2 เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้เป็นผู้ที่มีความกระวนกระวาย และมีความวิตกกังวลสูง



ภาพที่ 59 สเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณ EEG ในแต่ละช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง

จากภาพที่ 59 แสดงสเปกตรัม (Spectrum) ของสัญญาณอีอีจีในย่านความถี่ต่าง ๆ ตามที่กล่าวมาข้างต้น โดยย่านความถี่ 0-20 Hz เป็นช่วงที่มีกำลัง (Power) มากที่สุด

4.2.2 อิเล็กทรอออกคูโลแกรม (Electrooculogram) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าอีโอจี (EOG) สัญญาณนี้ได้จากการวัดด้วยวิธีที่เรียกว่าอิเล็กทรอออกคูโลกราฟี (Electrooculography) วิธีนี้เป็นวิธีตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าย่านความถี่ต่ำจากบริเวณหน้าผากหรือรอบ ๆ ดวงตา สัญญาณชนิดนี้จะตอบสนองต่อการเคลื่อนไหวของดวงตาเป็นอันดับแรก สัญญาณอีโอจีจะถูกใช้สำหรับตรวจสอบการเคลื่อนไหวของตาซ้ายและขวา จึงถูกใช้สำหรับทดสอบการควบคุมการเคลื่อนไหวของตัวชี้ (Cursor) และการปิดเปิดสวิตช์ นอกจากนี้ในทางการแพทย์สามารถใช้บ่งชี้ถึงสมรรถภาพของเรตินา (Retina) ได้ด้วย

4.2.3 อิเล็กทรมิโอแกรม (Electromyogram) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าอีเอ็มจี (EMG) สัญญาณนี้ได้จากการวัดด้วยวิธีที่เรียกว่า อิเล็กทรมิโอกราฟี (Electromyography) วิธีนี้เป็นวิธีตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของกล้ามเนื้อ และเนื่องจากเป็นสัญญาณชนิดนี้เป็นสิ่งแรกที่จะสะท้อนการทำงาน (Activity) ของกล้ามเนื้อ จึงถูกนำไปใช้สำหรับการควบคุมเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวต่าง ๆ เช่นการปิดเปิดสวิตช์ การควบคุมการกดคีย์บอร์ด และการกดปุ่มซ้ายขวาของเมาส์ เป็นต้น นอกจากนี้ในทางการแพทย์ยังใช้ในการตรวจวินิจฉัยโรคหรือปัญหาที่เกี่ยวข้องกับกล้ามเนื้ออีกด้วย

4.2.4 สัญญาณแมกเนโทเอนเซฟาโลแกรม (Magnetoencephalogram) หรือเรียกย่อ ๆ ว่าเอ็มอีจี (MEG) เป็นสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่ออกมาจากร่างกายมนุษย์ โดยมากจะถูกวัดจากบริเวณศีรษะ ซึ่งจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการทำงานของสมองตามแต่ละตำแหน่งที่ตรวจวัดสัญญาณเอ็มอีจีมีคุณลักษณะเหมือนกับสัญญาณอีอีจีมาก เพียงแต่สัญญาณเอ็มอีจีเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคลื่นแม่เหล็กขณะที่สัญญาณอีอีจี เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของคลื่นไฟฟ้าสมอง นอกจากการแบ่งประเภทตามวิธีการตรวจวัดที่ใช้ในงานด้านการสื่อสารระหว่างสมองและคอมพิวเตอร์ (BCI) แล้ว ทางด้านประสาทวิทยาจะศึกษาค้นสมองในแง่ของย่านความถี่ที่สัมพันธ์กับกิจกรรมของร่างกายมนุษย์

4.3 การตรวจจับและจัดเก็บสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG)

การจัดเก็บสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง (อีอีจี) มีขั้นตอนดังนี้ (Anderson, 2004)

4.3.1 ขั้นตอนการจัดเก็บสัญญาณอีอีจีขั้นตอนแรกคือใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า ขั้วไฟฟ้า (Electrode) ตรวจจับสัญญาณไฟฟ้าจากบริเวณหนังศีรษะของผู้ใช้ทดลอง ขั้ววัดดังกล่าวจะมีหลายแบบทั้งแบบที่เป็นแผ่นแปะ (Plate) และแบบหมวกครอบศีรษะ (Cap) จะเป็นแบบหมวก ซึ่งมีขั้ววัดหลาย ๆ ขั้ว อยู่ภายในหมวกทำให้วัดสัญญาณได้พร้อมกันหลายจุดสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จากขั้ววัดจะมีขนาดแรงดันต่ำมากในระดับมิลลิโวลต์ จึงต้องขยายสัญญาณก่อนด้วยเครื่องขยายเฉพาะที่เรียกว่า ไบโอมแอมพลิฟายเออร์ (Bio Amplifier) ซึ่งจะมีคุณสมบัติในการป้องกันและกำจัดสัญญาณรบกวนที่ดีและขยายสัญญาณในย่านความถี่ต่ำ ๆ เช่นคลื่นสมองได้ดี จากนั้นจะแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลด้วยเครื่องดิจิไทเซอร์ (Digitizer) และสัญญาณดิจิทัลจะถูกบันทึกไว้โดยคอมพิวเตอร์เพื่อนำไปใช้งานต่อไป การส่งสัญญาณดิจิทัลระหว่างดิจิไทเซอร์และคอมพิวเตอร์จะต้องมีวงจรไฟฟ้าแยกจากกันเพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าจากคอมพิวเตอร์ไหลย้อนกลับมายังขั้ววัดซึ่งจะเป็นอันตรายต่อผู้ใช้งานได้ ซึ่งการแยกวงจรไฟฟ้าออกจากกันอาจทำได้โดยใช้ลื่อนำแสงแทนลื่อนำไฟฟ้า โดยทำการแปลงสัญญาณไฟฟ้าเป็นแสงก่อนส่งและแสงจะถูกแปลงกลับเป็นสัญญาณไฟฟ้าทางด้านตัวรับ

4.3.2 รูปแบบของการวัดด้วยขั้วไฟฟ้า (Electrode) โดยทั่วไปแล้วการใช้ขั้วไฟฟ้าวัด (Electrode Plate) เพื่อตรวจจับสัญญาณอีอีจี (EEG) จะแบ่งได้สองวิธีคือ

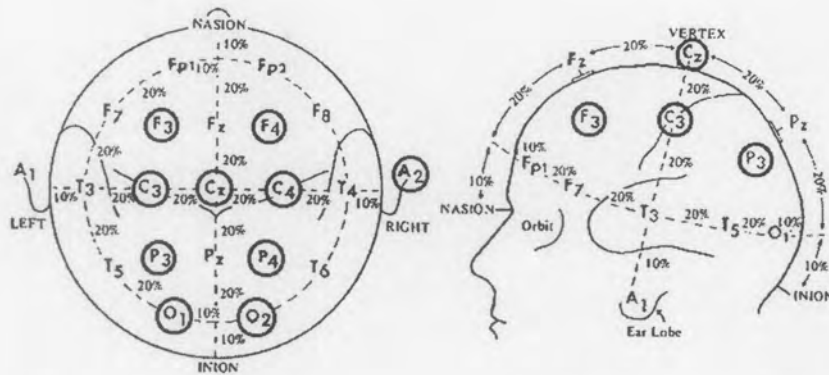
4.3.2.1 แบบฝังภายใน (Invasive) ที่ต้องผ่าตัดเพื่อฝังขั้วไฟฟ้าไว้ที่ผิวสมองภายในกะโหลกศีรษะซึ่งต้องทำโดยศัลยแพทย์เท่านั้น โดยวิธีนี้จะใช้ในทางการแพทย์เป็นหลักเพื่อใช้ตรวจสอบอาการผิดปกติต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการทำงานของสมอง

4.3.2.2 แบบแปะภายนอก (Non Invasive) วิธีนี้มักใช้กับงานทดลองทางด้านบีซีไอ (BCI) เป็นส่วนมากเนื่องจากสามารถใช้ขั้วไฟฟ้าแปะไว้ที่หนังศีรษะได้เลย ซึ่งสามารถทำได้ง่ายและไม่อันตราย อีกทั้งในปัจจุบันขั้วไฟฟ้ายังมีแบบที่เป็นหมวกครอบศีรษะซึ่งใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

4.4 วิธีการบันทึกคลื่นไฟฟ้าสมอง

เครื่องบันทึกคลื่นไฟฟ้าสมองมีหน่วยขยายสัญญาณแยกจากกันต่างหาก เพื่อให้สามารถบันทึกจากหนังศีรษะหลาย ๆ จุดได้พร้อม ๆ กัน ขั้วไฟฟ้าที่ใช้มักเป็น Silver-Silver Chloride Disks ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 เซนติเมตร วางติดกับหนังศีรษะโดยไม่ต้องโกนผม หรือใช้หมวกสำเร็จรูป โดยทั่วไปมักใช้ขั้วไฟฟ้า จำนวน 16 อันหรือ 8 คู่ วางในรูปแบบซึ่งสามารถสัมผัสอย่างสัญญาณไฟฟ้ารอบความโค้งของสมองได้ ตามมาตรฐานสากลใช้ระบบวางขั้วไฟฟ้าเรียกว่า 10-20 Electrode Placement System (ภาพที่ 60) โดยแบ่งศีรษะออกเป็น 8 ส่วน คือ Frontal Pole (FP), Frontal (F), Central (C), Parietal (P), Temporal (T) และ Occipital (O) การบันทึกที่นิยมทำกันเป็นประจำมักบันทึกจากส่วนต่างๆ เหล่านี้ ระยะจากดั้งจมูกถึงปุ่มท้ายทอย (Inion) ถูกแบ่งออกเป็น ส่วน ๆ ละ 10% และ 20% ของระยะทั้งหมด แล้ววางขั้วไฟฟ้าบนศีรษะส่วนที่เส้นแบ่งนั้นมาตัดกัน แต่ปัจจุบันมีหมวกที่วางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าสำเร็จรูปซึ่งนำไปใช้ในการศึกษาวิจัยคลื่นไฟฟ้าสมองมากขึ้น ขั้วไฟฟ้าคู่หนึ่ง ๆ เรียกว่า Lead โดยมีสัญลักษณ์ที่บ่งบอกว่า เป็นขั้วซ้ายหรือขั้วขวา Lead ทางซ้ายมือจะมีชื่อเป็นเลขคู่ ส่วน Lead ทางขวามือจะมีชื่อเป็นเลขคู่ การเรียกชื่อ Lead ในส่วนใดส่วนหนึ่งจะไม่เรียงกัน ทั้งนี้เพราะต้องการเพิ่ม Lead ที่ต้องการจะบันทึกมากขึ้นกว่าเดิมจะได้เรียกชื่อ Lead ใหม่ตามตัวเลขที่กระโดดข้ามไปนั้นได้

การบันทึกคลื่นไฟฟ้าสมองทำได้ 2 วิธี คือ บันทึกแบบสองขั้วไฟฟ้า (Bipolar Recording) และแบบขั้วไฟฟ้าเดี่ยว (Monopolar หรือ Unipolar Recording) การบันทึกแบบสองขั้วไฟฟ้าเป็นการบันทึกความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้า 2 อันบนหนังศีรษะ ส่วนการบันทึกแบบขั้วเดี่ยวเป็นการบันทึกความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าอันหนึ่งบนหนังศีรษะกับขั้วไฟฟ้าอ้างอิง (Reference Electrode) ที่วางอยู่ไกลออกไป ปกตินิยมวางขั้วไฟฟ้าอ้างอิงที่ดั้งหู (A_1 และ A_2) และกลางขม่อมของกะโหลกศีรษะ (Cz) การประเมินผลคลื่นไฟฟ้าสมองทำได้โดยพิจารณาเกี่ยวกับความถี่ (Frequency) แอมพลิจูด (Amplitude) ระยะตั้งแต่เริ่มกระตุ้นจนเริ่มตอบสนองหรือระยะแฝง (Latency) การกระจายของคลื่น การประเมินในปัจจุบันมักใช้คอมพิวเตอร์เพื่อการวิเคราะห์



ก. ด้านบนของศีรษะ

ข. ด้านซ้ายของศีรษะ

ภาพที่ 60 ตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล ระบบ 10-20

4.5 หลักการแปลผลคลื่นไฟฟ้าสมอง

หลังจากทำการบันทึกคลื่นไฟฟ้าสมองแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการนำข้อมูลมาแปลผล คลื่นไฟฟ้าสมองจะอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ครอบคลุมตั้งแต่ระดับเบื้องต้นจนถึงระดับสูง และรวมถึงการวิเคราะห์เชิงสถิติเพื่อสรุปประเด็นของงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มดังนี้

4.5.1 การวิเคราะห์ทางแกนเวลา (Time Domain Analysis) เป็นการศึกษาที่เน้นการเปลี่ยนแปลงของช่วงเวลาเป็นสำคัญ กล่าวคือ คลื่นไฟฟ้าสมองจะมีการตอบสนองที่เร็วระดับ มิลลิวินาที (หนึ่งส่วนพัน) วิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าสัมพันธ์กับเหตุการณ์ (Event-Related Potential) หรือวิธี ERP จากผลการวิจัยพบว่า มีปรากฏการณ์การเปลี่ยนระดับศักย์ไฟฟ้าหลังจากเกิดเหตุการณ์ (หรือกิจกรรม) ประมาณ 300 มิลลิวินาที และตั้งชื่อคลื่นนี้ว่า P300 ซึ่งเป็นระดับศักย์ไฟฟ้าของคลื่นไฟฟ้าสมองที่ตอบสนองต่อสิ่งเร้า

4.5.2 การวิเคราะห์ทางแกนความถี่ (Frequency Domain Analysis) เป็นวิธีการที่เน้นศึกษาการเปลี่ยนแปลงช่วงความถี่ที่เปลี่ยนแปลงเป็นสำคัญ โดยทั่วไปแล้วข้อมูลคลื่นไฟฟ้าสมองที่บันทึกได้จะอยู่ในรูปของแกนเวลาหรือข้อมูลอนุกรมเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time Series) โดยแกนตั้งแทนระดับของคลื่นไฟฟ้าสมองและแกนนอนแทนค่าเวลา เทคนิควิธีการเปลี่ยนข้อมูลจากรูปของแกนเวลาสู่รูปของแกนความถี่สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการแปลงฟูริเยร์ (Fourier Transform) ซึ่งเป็นเทคนิควิธีที่มีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงและซับซ้อน เนื่องจากการแปลงข้อมูลแกนเวลาเป็นแกนความถี่นั้น จะต้องใช้ข้อมูลจำนวนมากและใช้เวลาประมวลผลนาน อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติจะนิยมใช้เทคนิควิธีการแปลงฟูริเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform) หรือวิธี FFT ซึ่งให้ผลการคำนวณที่แม่นยำและรวดเร็ว

4.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อุษณี โสติวัฒน์ (2551) ได้ศึกษาและเปรียบเทียบความสามารถในการสร้างจินตภาพเชิงมิติสัมพันธ์สามมิติระหว่างระหว่างกลุ่มอาสาสมัครชายไทยถนัดมือขวาที่เป็นนักดนตรีกับผู้ไม่ได้รับการฝึกฝนดนตรีชาวไทย จำนวน 28 คน โดยที่ 14 คน เป็นนักดนตรีและ 14 คน เป็นผู้ที่ไม่ได้รับการฝึกฝนดนตรี ทำการจินตภาพตามคำบอกจำนวน 100 งานอย่างสุ่มและตัดสินใจว่าภาพในจินตนาการกับภาพที่แสดงบนจอภาพเหมือนหรือแตกต่างกันด้วยการกดปุ่ม เลือกค่าเฉลี่ยแอมปริจูดของคลื่นไฟฟ้าสมอง ERPs จะถูกวิเคราะห์เป็น Early Components และ Late Positive Component (LPC) และแผนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าสมองแบบสองมิติ ผลการทดลอง ปรากฏว่ากลุ่มนักดนตรีมีความสามารถในการจินตภาพได้เร็วกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการฝึกฝนดนตรีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และกลุ่มนักดนตรีมีเปอร์เซ็นต์ของคำตอบที่เป็นคำตอบที่ถูกต้องไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ไม่ได้รับการฝึกฝนดนตรี นอกจากนี้กลุ่มนักดนตรีมีค่าเฉลี่ยแอมปริจูดของ LPC สูงกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการฝึกฝนดนตรี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและจากภาพแผนที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าสมองแบบสองมิติของนักดนตรี พบว่า มีการกระจายตัวของความต่างศักย์ไฟฟ้าสมองแตกต่างจากกลุ่มที่ไม่ได้รับการฝึกฝนดนตรี สรุปได้ว่านักดนตรีมีกระบวนการทางสมองในการทำการจินตภาพเชิงมิติสัมพันธ์สามมิติบริเวณกว้างและประมวลผลได้เร็วกว่าผู้ที่ไม่ได้รับการฝึกฝนดนตรี

อาคซ์ และคณะ (Arce et al., 1995) ได้ศึกษาผลของความสามารถด้านมิติสัมพันธ์และเพศของนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษา ศึกษาด้วยคลื่นไฟฟ้าสมอง (EEG) โดยศึกษากับอาสาสมัครเพศชายและเพศหญิงศึกษาในระดับชั้นมัธยมศึกษาที่มีสุขภาพดี ไม่มีความผิดปกติทางระบบประสาทส่วนกลางหรือไม่เป็นผู้ใช้ยาเสพติดซึ่งจะมีผลต่อคลื่นสมองโดยรวมมีความถนัดมือขวาอายุระหว่างวันที่ 17-21 ปี จำแนกออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ (Low SA) เป็นผู้ที่มีคะแนนต่ำกว่า 30 เปอร์เซนต์ไทล์ ชาย 10 คน (คะแนนเฉลี่ย = 8.7, $SD = 6.3$) หญิง 10 คน (คะแนนเฉลี่ย = 10.4, $SD = 7.6$) และกลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูง (High SA) เป็นผู้ที่มีคะแนนสูงกว่าเปอร์เซนต์ไทล์ 80 ชาย 10 คน (คะแนนเฉลี่ย = 85.5, $SD = 6.0$) หญิง 10 คน (คะแนนเฉลี่ย = 84.5, $SD = 5.0$) บันทึกคลื่นไฟฟ้าสมอง ที่ปราศจากคลื่นรบกวน (Artifact) โดยตั้งค่าที่ 4,096 มิลลิวินาที (ms) ในแต่ละ Epochs กำหนดอัตราการสุ่มที่ 125 Hz (Sampling Rate of 125 Hz) วิเคราะห์คลื่นความถี่ 5 คลื่น ประกอบด้วย Theta (3.66-7.32 Hz), Alpha 1 (7.57-9.52 Hz), Alpha 2 (9.77-12.45 Hz) Beta 1 (12.70-17.58 Hz) และ Beta 2 (17.83-25.15 Hz) และได้แปลงค่าสถิติ $\ln(x)$ สำหรับ Absolute Power (AP) และ $\ln(x/1-x)$ สำหรับ Relative Power (RP) (John et al., 1980; Gasser et al., 1982) สถิติวิเคราะห์องค์ประกอบหลักด้วย Two Way ANOVAs โดยให้อาสาสมัครทำการทดสอบทางจิตวิทยา 4 ช่วง ใน 2-3 สัปดาห์ ด้วยแบบทดสอบย่อย

ความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ DAT (Differential Aptitude Test) ได้แก่ เหตุผลเชิงภาษา ความสามารถทางตัวเลข เหตุผลเชิงนามธรรม และเหตุผลเชิงกล (Bennett et al., 1959) การทดสอบภาพที่ฝังตัว (Ottman et al., 1971) แบบทดสอบวัดเชาว์ปัญญาของ Raven (1956) และแบบทดสอบของ Anstey (1948) EEG Monopolarly บันทึกคลื่นไฟฟ้าสมองในช่วงลิ้มตา และหลับตา ด้วยขั้วไฟฟ้า E5GH ที่อ้างอิงระบบมาตรฐานสากล 10-20 (10-20 System) และบันทึกในตำแหน่ง F3, F4, C3, C4, T3, T4, P3, P4, O1 และ O2 สำหรับตำแหน่งอ้างอิงอยู่ที่ตึงหู เพื่อเป็นข้อมูลใช้เปรียบเทียบผล (Corsi-Cabrera et al., 1989, 1993) ช่องสัญญาณ EOG จะบันทึกการกระพริบตา โดยกำหนดความต้านทานต่ำกว่า $10\text{ K}\Omega$ รูปแบบโพลีกราฟ 8-16E ตั้งค่าตัวกรองที่ความถี่ 1 และ 35 Hz ก่อนบันทึกคลื่นไฟฟ้าสมอง กลุ่มทดลองจะได้รับอนุญาต 10 นาที เพื่อสร้างความคุ้นเคยกับเสียงในห้อง ผลการวิจัย พบว่า กลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูงกับการลิ้มตาและหลับตา Absolute Power (AP) ลดลงในทุกคลื่น และกลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูงกับการลิ้มตา พบว่า ค่าเฉลี่ยพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Power) ของช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha 1 ต่ำกว่า กลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ ความแตกต่างของแหล่งกำเนิด (Derivations) ทั้ง 2 กลุ่มถูกอธิบายด้วยคลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha AP คือ Derivations สูงทั้งหมด ส่วนคลื่นไฟฟ้าสมอง Theta AP พบว่า Derivations สูงที่บริเวณด้านขวาและบริเวณตรงกลางซ้ายและท้ายทอยซ้าย สำหรับช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 1 และ Beta 2 AP พบว่า Derivations สูงขึ้นทั้งหมดในเพศหญิง ยกเว้นที่บริเวณขมับ (Temporal Regions) โดยไม่คำนึงถึงคะแนนความสามารถด้านมิติสัมพันธ์

คอร์ซี-คาเบรรา และคณะ (Corsi-Cabrera et al., 1997) ได้เปรียบเทียบผลของความสามารถด้านมิติสัมพันธ์กับเพศ กับความสัมพันธ์ระหว่างสมองสองซีกและระหว่างสมองแต่ละซีกวัดด้วยกิจกรรมคลื่นไฟฟ้าสมอง ศึกษาทั้งเพศชาย จำนวน 10 คน และเพศหญิง จำนวน 10 คน อายุระหว่าง 17-20 ปี ที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูง (มีคะแนนเปอร์เซ็นต์ไทล์มากกว่า 80) ความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ (มีคะแนนเปอร์เซ็นต์ไทล์ต่ำกว่า 30) โดยวางตำแหน่งขั้วไฟฟ้าด้านขวาและซ้าย บริเวณสมองส่วนหน้า (F3, F4) บริเวณสมองส่วนกลาง (C3, C4) บริเวณสมองด้านข้าง (T3, T4) บริเวณสมองส่วนขมับ (P3, P4) และบริเวณสมองส่วนท้ายทอย (O1, O2) การศึกษาความสัมพันธ์ค่าเฉลี่ยระหว่างสมองสองซีกกับสมองแต่ละซีก ด้วยสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Product Moment Coefficients) ใน 5 ช่วงความถี่คลื่น หลังจากกรองสัญญาณด้วย FFT ประกอบด้วย Theta (3.66-7.32 Hz), Alpha 1 (7.57-9.52 Hz), Alpha 2 (9.77-12.45 Hz) Beta 1 (12.70-17.58 Hz) และ Beta 2 (17.83-25.15 Hz) ผลการวิเคราะห์ความแตกต่างของช่วงความถี่คลื่นระหว่างเพศชายกับเพศหญิง และระหว่างกลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูงกับกลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ เปรียบเทียบด้วย Two-Way ANOVAs พบว่า แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01 ผลความแตกต่างระหว่างเพศ พบว่า คลื่นไฟฟ้าสมอง

Alpha 1 ในขณะที่หลับตา เปรียบเทียบตำแหน่งขั้วไฟฟ้าระหว่าง C3 กับ C4 พบว่า เพศหญิงสูงกว่าเพศชายอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ในขณะที่เพศชายมีคลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 1 และ Beta 2 ตำแหน่งขั้วไฟฟ้าระหว่าง F3 กับ C4 ขณะลืมตาเพศชายมีคลื่นไฟฟ้าสมองสูงทุกคลื่น สำหรับผลความแตกต่างระหว่างความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ พบว่า กลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ คลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha 1 บริเวณสมองส่วนหน้าทั้งซีกซ้ายและซีกขวากับการลืมตาและการหลับตา สูงกว่ากลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ .01

วิทัทช์ และคณะ (Vitouch et al., 1997) ได้ศึกษาการทำงานของสมองของผู้ที่มีความสามารถทางด้านมิติสัมพันธ์สูงและความสามารถทางด้านมิติสัมพันธ์ต่ำขณะทำกิจกรรมด้านมิติสัมพันธ์กับกิจกรรมด้านภาษาด้วย Slow Potential Topography ศึกษาด้วย DC-recoded ซึ่งการศึกษาก่อนหน้านี้ พบว่า กระบวนการจัดการด้านมิติสัมพันธ์จะเป็นการทำงานของสมองทั้ง 2 ข้างที่ไม่เท่ากัน จึงต้องการทดสอบเพื่อยืนยันให้แน่ใจว่าตัวกระตุ้นประเภทเดียวกันจะมีความตรงเพียงใด โดยเลือกกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 26 คน อายุระหว่าง 20-30 ปี เปรียบเทียบระหว่างกลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูง และกลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ ศึกษาด้วย DC-recoded การจัดกระทำด้านมิติสัมพันธ์เป็นการทำงานของสมองซีกใดซีกหนึ่งที่ไม่เท่ากันในสมองของมนุษย์ที่ยังมีการถกเถียงกันอยู่ ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทฤษฎีการตอบสนองข้อสอบ (แบบทดสอบวัดเรื่องและมีความตรงเชิงเนื้อหาเดียวกัน) กลุ่มตัวอย่างจำแนกตามกลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูง และกลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ ผลการสร้างภาพความต่างศักย์ไฟฟ้า พบว่า ภาพสามารถแสดงความแตกต่างได้อย่างชัดเจนทั้งในการวัดด้วยเครื่องมือที่เป็นด้านมิติสัมพันธ์และด้านภาษา และพบว่ามีศักย์ไฟฟ้าทางลบสูงสุดในสมองส่วนบริเวณตรงกลางทางด้านหน้าซีกซ้าย ในแบบวัดเงื่อนไขด้านภาษา (Left Fronto-central Region) ส่วนแบบวัดเงื่อนไขทางด้านมิติสัมพันธ์ พบว่าการทำงานของสมองบริเวณท้ายทอยและบริเวณขม่อม Occipito-parietal Region ในกรณีของกลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำจะพบว่ามี Amplitude สูง ในสมองซีกขวาบริเวณ Occipito-parietal Region ขณะที่กลุ่มที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูง พบว่าการทำงานของสมองค่อนข้างสมมาตรในบริเวณ Occipito และ Occipito-parietal Region การค้นพบแสดงถึงความสำคัญของสมองบริเวณท้ายทอย

พัทชยา และเพตส์เช (Bhattacharya & Petsche, 2002) ได้ศึกษาค้นคว้าคลื่นไฟฟ้าสมองระหว่างการรับรู้ด้วยการมองรูปวาด กับ การจินตนาการรูปวาด โดยเปรียบเทียบความแตกต่างในการทำหน้าที่และพื้นที่บริเวณการกระตุ้นของสมองระหว่างอาสาสมัครเพศหญิง จำนวน 20 คน กลุ่มที่เป็นศิลปินจำนวน 10 คน อายุเฉลี่ย 44.3 ปี กำลังศึกษาระดับปริญญาโทจากสถาบันวิจิตรศิลป์ กรุงเทพมหานคร และกลุ่มที่ไม่ใช่ศิลปิน จำนวน 10 คน อายุเฉลี่ย 37.5 ปี โดยไม่ได้รับการฝึกอบรมในศิลปกรรมใด ๆ

บันทึกสัญญาณคลื่นไฟฟ้าสมอง โดยใช้ตำแหน่งขั้วไฟฟ้า 19 มาตรฐานระดับสากล ด้วยความถี่ที่ 128 Hz และ 12 bit A/D; สัญญาณเฉลี่ยของ Earlobes ทั้งสองถูกนำมาใช้เป็นข้อมูลอ้างอิง อาสาสมัครปฏิบัติกิจกรรมหลัก 2 กิจกรรม คือ มองรูปวาดที่เป็นภาพนิ่งที่ฉายลงบนผนังสีขาว และการจินตนาการรูปวาดแต่ละภาพ ในแต่ละกิจกรรมใช้เวลา 2 นาที และทำซ้ำกับอีก 4 รูปวาดที่แตกต่างกัน 4 ลักษณะที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์ทางจิตศิลป์ (เทศกาล Bean โดย Jordaens, การแกะสลัก โดย Rembrandt, จิตรกรรมนามธรรมโดย Kandinsky และภาพที่วาดโดย Holbein; ทั้ง 4 รูปวาดสามารถพบได้ในเว็บไซต์ Sigproc.html <http://www.viskom.oew.ac.at/viscom/>) เวลาพัก 1 นาที และเวลาในการอ่านข้อความเนื้อหาทั่ว ๆ ไป เพื่อเบี่ยงเบนความสนใจ 2 นาที รูปวาดทั้ง 4 มีความแตกต่างกันในรายละเอียดของการใช้สี ชุดรูปแบบ ความสมบูรณ์ของข้อมูล รูปร่าง ฯลฯ ซึ่งจะถูกจัดกลุ่มเข้าด้วยกัน ในการศึกษาครั้งนี้สนใจศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของรูปวาดกับการศึกษาผลของการฝึกอบรมอย่างมืออาชีพในงานศิลปะ โดยในแต่ละกิจกรรมเป็นการให้มองรูปวาด และการจินตนาการรูปวาด พร้อมกับบันทึก EEG ใช้เวลารวม 8 นาที ทำการวิเคราะห์เป็นรายบุคคล ผลการวิจัย ปรากฏว่า ศิลปะเป็นความถนัดทางสมองซีกขวา บทบาทที่โดดเด่นใช้ความคิดสร้างสรรค์และจินตนาการซึ่งเป็นกิจกรรมทางด้านศิลปะ ในขณะที่มองรูปวาดเกิดการกระตุ้นของระบบประสาทของคลื่นไฟฟ้าสมองในช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta และ Gamma ซึ่งเป็นช่วงคลื่นความถี่สูง และขณะจินตนาการรูปวาดเกิดการกระตุ้นของระบบประสาทของคลื่นไฟฟ้าสมองในช่วงคลื่นความถี่ต่ำ (ช่วงคลื่นความถี่ไฟฟ้าสมอง Delta) ส่วนช่วงคลื่นความถี่ไฟฟ้าสมอง Alpha จะลดลงอย่างมาก และพบว่ามีการกระตุ้นของคลื่นไฟฟ้าสมองในสมองซีกขวาสูงกว่าในสมองซีกซ้าย ทั้งนี้คลื่นไฟฟ้าสมองเกิดจากการกระตุ้นในช่วงความถี่สูงซึ่งเป็นความสามารถในการเชื่อมโยงของเซลล์ประสาทบริเวณที่ทำหน้าที่รับภาพ

โมเรดี และคณะ (Moradi et al., 2011) ได้ศึกษาการรักษาผู้ป่วยที่มีความวิตกกังวลด้วย Neurofeedback: กรณีศึกษา ในผู้ป่วย 2 คน คนแรกเป็นชาย อายุ 28 ปี ทำงานในโรงกลั่นน้ำมัน ปัจจุบันเขามีความวิตกกังวล พฤติกรรมก้าวร้าว หวาดกลัว มีความมั่นใจในตนเองต่ำ โดยผู้ป่วยที่รายงานว่ามีอาการวิตกกังวลในลักษณะเช่นนี้มาเป็นเวลา 10 ปีแล้ว คนที่สองเป็นหญิง อายุ 20 ปี มีสภาพทางเศรษฐกิจสูง เป็นผู้ที่มีความวิตกกังวล ก้าวร้าว หงุดหงิด มีความตึงเครียด มีความรู้สึกไวต่อคำพูดของผู้อื่น ก่อนการรักษาได้รับการแนะนำเพื่อสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับ EEG Feedback Training ก่อนการฝึกได้มีการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า ในบริเวณสมองส่วนกลางใช้ตำแหน่ง Cz, C3 และ C4 บริเวณสมองส่วนหน้าใช้ตำแหน่ง Fz, F3 และ F4 บริเวณสมองส่วนกลางขม่อมใช้ตำแหน่ง Pz และขั้วไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับ Ear Lobes โดย EEG ศึกษาใน 6 คลื่นดังนี้ ช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Delta (1-4 Hz), Theta (4-8 Hz), Alpha 1 (8-12 Hz), Alpha 2 หรือ SMR (12-15 Hz), Beta 1 (15-18 Hz) และ Beta 2 (20-33 Hz) ผลการศึกษาก่อนการฝึกอบรม ปรากฏว่า ช่วงคลื่น

ความถี่ไฟฟ้าสมอง Alpha บริเวณสมองส่วนกลางขม่อม (Pz) และช่วงคลื่นความถี่ไฟฟ้าสมอง Beta 1 บริเวณสมองส่วนหน้า (Fz) ลดลงเมื่อเทียบกับคนปกติ หลังจากได้รับการฝึกอบรม ผลการวิจัยปรากฏว่า การฝึกอบรมทำให้ช่วงคลื่นความถี่ไฟฟ้าสมอง Alpha และ Beta 1 เพิ่มขึ้น โดยช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 1 แสดงถึงความตั้งใจ สมาธิในการคิด และความสามารถในการจัดการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเกิดการกระตุ้นบริเวณสมองส่วนหน้า ถ้าช่วงคลื่นความถี่ไฟฟ้าสมอง Beta 1 ลดลง หมายถึง การขาดสมาธิ ขาดความคิดตรึงตรอง และขาดความสามารถในการจัดการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในทางตรงกันข้ามถ้าคลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 2 (20-33 Hz) เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีภาวะเครียด ขาดสมาธิ และมีความวิตกกังวลสูง จากผลการรายงานตนเองของผู้ป่วยแสดงให้เห็นว่า เมื่อช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 2 ลดลง ผู้ป่วยมีความตั้งใจ มีสมาธิในการคิด และสามารถจัดการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้

จากงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นสรุปได้ว่า ความสามารถด้านมิติสัมพันธ์เป็นกระบวนการทำงานของสมองบริเวณ Occipito-parietal Region เมื่อวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าสมองสัมพันธ์กับเหตุการณ์ (ERPs) ซึ่งให้เห็นว่า ผู้ที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำจะมี Amplitude สูงบริเวณสมองซีกขวา ส่วนผู้ที่มีความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูงการทำงานของสมองค่อนข้างสมมาตรในบริเวณ Occipital และ Occipito-parietal Region เมื่อวิเคราะห์ทางแกนความถี่ (Frequency Domain Analysis) เกี่ยวกับงานศิลปะที่มีความโดดเด่นในการใช้ความคิดสร้างสรรค์และจินตนาการเป็นความถนัดทางสมองซีกขวา ซึ่งให้เห็นว่า ในขณะที่มองรูปภาพจะเกิดการกระตุ้นระบบประสาทของคลื่นไฟฟ้าสมองในช่วงคลื่นความถี่สูง ทั้งนี้เป็นความสามารถในการเชื่อมโยงของเซลล์ประสาทบริเวณที่ทำหน้าที่รับภาพ ส่วนขณะจินตนาการรูปภาพเกิดการกระตุ้นในช่วงคลื่นความถี่ต่ำโดยคลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha จะลดลง

สำหรับการศึกษาที่วิเคราะห์ด้วยพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Power, RP) ขณะลืมนตา ผลการวิจัยของอาคซ์ และคณะ (Arce et al., 1995) และผลการวิจัยของคอร์ซี-คาเบรรา และคณะ (Corsi-Cabrera et al., 1997) ซึ่งให้เห็นว่า กลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์สูง ช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha 1 ต่ำกว่ากลุ่มความสามารถด้านมิติสัมพันธ์ต่ำ แต่จากผลการศึกษาของโมเรดี และคณะ (Moradi et al., 2011) ที่ได้บันทึกคลื่นไฟฟ้าสมองก่อนการฝึกอบรมกับหลังการฝึกอบรม ข้อค้นพบแตกต่างจากผลการวิจัยของอาคซ์ และคณะ (Arce et al., 1995) และผลการวิจัยของคอร์ซี-คาเบรรา และคณะ (Corsi-Cabrera et al., 1997) โมเรดี และคณะ ได้นำเสนอผลก่อนการฝึกอบรมว่า ผู้ป่วยที่มีความเครียด หรือมีความวิตกกังวลสูง ช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha กระตุ้นสมองบริเวณขม่อมส่วนกลาง (Pz) และช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta บริเวณสมองส่วนหน้า (Fz) ลดลงเมื่อเทียบกับคนปกติ แต่หลังจากได้รับการฝึกอบรม ผลการวิจัยซึ่งให้เห็นว่า ช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha และ Beta 1 เพิ่มขึ้น แสดงถึงการมีสมาธิในการคิด มีความคิดตรึงตรอง และสามารถ

จัดการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะเกิดการกระตุ้นบริเวณสมองส่วนหน้า ถ้าคลื่น Beta 1 ลดลง หมายถึง การขาดสมาธิ ขาดความคิดตรึงตรอง และขาดความสามารถจัดการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 2 เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้มีภาวะเครียด ขาดสมาธิ และมีความวิตกกังวลสูง จากผลการรายงานตนเองของผู้ป่วยแสดงให้เห็นว่า เมื่อช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta 2 ลดลง ผู้ป่วยมีความตั้งใจ มีสมาธิในการคิด และสามารถจัดการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นได้

ในการวิจัยนี้ต้องการค้นหาข้อสรุปเกี่ยวกับการกระตุ้นระบบประสาทของคลื่นไฟฟ้าสมองในช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมองจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ โดยวิเคราะห์ช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง 4 คลื่น ได้แก่ Alpha 1, Alpha 2, Beta 1 และ Beta 2 โดยใช้ EEG Lab ในการบันทึกและใช้โปรแกรมสำเร็จรูปวิเคราะห์ เปรียบเทียบพลังงานสัมพัทธ์ (Relative Power, RP) ตามตำแหน่งขั้วไฟฟ้า จากผลงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นชี้ให้เห็นว่า ช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Alpha และช่วงความถี่คลื่นไฟฟ้าสมอง Beta เป็นช่วงคลื่นความถี่ที่มีบทบาทสำคัญต่อการเชื่อมโยงระบบประสาทของคลื่นไฟฟ้าสมองในการเปลี่ยนแปลงของแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ขณะลึ้มตาที่ได้รับตัวกระตุ้นด้วยการทำแบบทดสอบความสามารถด้านมิติสัมพันธ์