

บทที่ 2

ทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงสรีรวิทยาของกล้ามเนื้อเรียบ สรีรวิทยาของกระเพาะอาหาร สัญญาณ EGG และเทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์ห่าพารามิเตอร์ของสัญญาณไฟฟ้า

2.1 สรีรวิทยาของกล้ามเนื้อเรียบ (Smooth Muscle) [ราตรี สุดทรวง, 2539]

กล้ามเนื้อเรียบเป็นโครงสร้างที่เป็นส่วนประกอบของอวัยวะภายใน เช่น ระบบไหลเวียนเลือด ระบบทางเดินอาหาร ระบบทางเดินปัสสาวะ ระบบทางเดินหายใจ และระบบสืบพันธุ์ นอกจากนี้ยังพบกล้ามเนื้อเรียบที่ตา ได้แก่ กล้ามเนื้อขนตา (Ciliary Muscle) และ ม่านตา (Iris) ที่ผิวหนัง เช่น กล้ามเนื้อขนลุก (Piloerector Muscle) และตามข้อต่อต่างๆ

2.1.1 ลักษณะทางกายวิภาค

กล้ามเนื้อเรียบต่างจากกล้ามเนื้อลายโดยที่ไม่มีลายให้เห็น เซลล์มีรูปร่างคล้ายกระสวย (Spindle) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-10 ไมครอน ยาวประมาณ 20-60 ไมครอน เซลล์ที่มีขนาดเล็กที่สุดพบที่เส้นเลือดแดง ขนาดใหญ่ที่สุดพบที่มดลูกของหญิงมีครรภ์ เซลล์กล้ามเนื้อเรียบจะมีรูปร่างแตกต่างกันไป ยึดติดต่อกันเป็นกลุ่มด้วยอินเทอร์มีดิเอท (Intermediate Junction) ซึ่งเป็นบริเวณที่เชื่อมเซลล์หน้าขึ้นและแยกระหว่างเซลล์ข้างเคียงด้วยช่องว่างประมาณ 60 นาโนเมตร นอกจากนี้ยังพบว่ามีส่วนของเยื่อหุ้มเซลล์ของเซลล์ข้างเคียงมาอยู่ชิดกันมากจนเหลือช่องว่างระหว่างเซลล์เพียง 2-3 นาโนเมตร บริเวณนี้เรียกว่า เนซซัส (Nexus) ซึ่งเป็นบริเวณที่ความต้านทานต่อการไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าลดต่ำลง ทำให้สารโมเลกุลเล็กๆ และไอออนสามารถแพร่ผ่านได้ จึงเชื่อว่าบริเวณที่ศักย์ทำงาน (Action Potential) จะกระจายจากเซลล์หนึ่งไปอีกเซลล์หนึ่งได้รวดเร็ว ทำให้มีการหดตัวพร้อมกันเหมือนเซลล์เดียว (Functional Syncytium)

2.1.2 ชนิดของกล้ามเนื้อเรียบ

กล้ามเนื้อเรียบในร่างกายแบ่งได้ 2 ชนิดคือ

2.1.2.1 กล้ามเนื้อเรียบภายใน (Visceral Smooth Muscle หรือ Unitary Smooth Muscle หรือ Single-Unit Smooth Muscle)

พบในผนังทางเดินอาหาร หลอดไต (Ureter) ผนังมดลูก (Uterus) และหลอดเลือดหลายแห่ง เซลล์ที่อยู่รวมกันเป็นกลุ่มนั้นสามารถหดตัวได้เองเป็นจังหวะติดต่อกันเนื่องจากแต่ละเซลล์สามารถเกิดศักย์ทำงานได้ด้วยตนเองเรียกว่าเป็นเพซเมคเกอร์เซลล์ เพราะว่ามีเยื่อหุ้มให้ซึม

ผ่านต่อไซโตพลาสซึมก่อนข้างสูง ศักย์ทำงานที่เกิดที่เพชเมคเกอร์เซลล์จะกระจายออกไปสู่เซลล์อื่นๆ ทางเนสซัส ทำให้หดตัวได้บริเวณกว้างในเวลาเดียวกัน (Functional Syncytium)

กล้ามเนื้อเรียบชนิดนี้ มีเส้นประสาทมาเลี้ยงน้อย เส้นประสาทที่มาเลี้ยง เป็นระบบประสาทออโตโนมิก ซึ่งทำหน้าที่ประสานงานและควบคุมการทำงาน แต่การจะหดตัวหรือไม่หดตัวนั้นเกิดจากเพชเมคเกอร์เซลล์เองโดยที่ไม่ขึ้นกับกระแสประสาท

2.1.2.2 กล้ามเนื้อเรียบชนิดมัลติยูนิท (Multiunit Smooth Muscle)

พบที่กล้ามเนื้อเรียบที่ม่านตา กล้ามเนื้อขนตา และกล้ามเนื้อขลุ่ย (Piloerector Muscle) ลักษณะของเซลล์จะกระจายตัวอยู่โดด ๆ ไม่มีการติดต่อกันระหว่างเซลล์ การทำงานของแต่ละเซลล์ก็ไม่ขึ้นแก่กัน นอกจากนี้เซลล์นั้นๆ จะถูกเลี้ยงด้วยเส้นประสาทเดียวกันหรืออยู่ในมอเตอร์ยูนิท (Motor Unit) เดียวกันการหดตัวจะเกิดได้ต้องมีการกระตุ้นผ่านทางระบบประสาทออโตโนมิก ซึ่งส่วนใหญ่เป็นซิมพาเทติก (Sympathetic Nerve) ไม่สามารถหดตัวได้ด้วยตนเอง

2.1.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อเรียบ

2.1.3.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อเรียบภายใน

ศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ขณะพัก (Resting Membrane Potential) จะแตกต่างกันตามชนิดและสภาวะของกล้ามเนื้อเรียบ เยื่อหุ้มเซลล์มีความสามารถในการซึมผ่านของไซโตพลาสซึมก่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับเซลล์อื่นๆ ทำให้ไซโตพลาสซึมเข้าไปในเซลล์ได้ง่าย ในขณะที่ปกติไม่มีการหดตัวมีค่าประมาณ -30 ถึง -70 มิลลิโวลต์ (เฉลี่ย -50 มิลลิโวลต์) ค่าจะสูงหรือต่ำขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารสื่อประสาทที่อยู่นอกเซลล์

2.1.3.1.1 ลักษณะของศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ขณะพัก การเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าของเยื่อหุ้มเซลล์ขณะพัก ทำให้เกิดคลื่นไฟฟ้าอย่างน้อย 2 ชนิดคือ

- คลื่นความถี่ต่ำ เป็นคุณสมบัติของกล้ามเนื้อเรียบที่เกิดขึ้นเองโดยอัตโนมัติ มีลักษณะเป็นคลื่นเล็กๆ ที่เกิดอย่างช้าๆ เป็นจังหวะและติดต่อกันไป ระดับแรงดันประมาณ 2-3 มิลลิโวลต์

- เพชเมคเกอร์โพเทนเชียล เป็นดิโพลาไรเซชันเฉพาะที่ของเซลล์กล้ามเนื้อที่เป็นเพชเมคเกอร์ อาจเรียกโพเทนเชียลเหมือนในกล้ามเนื้อหัวใจ ถ้าแรงดันเพชเมคเกอร์สูงพอที่จะเกิดศักย์ทำงาน แต่กล้ามเนื้อเรียบมีเพชเมคเกอร์อยู่ทั่วไปไม่จำกัดเฉพาะที่เหมือนในกล้ามเนื้อหัวใจ

2.1.3.1.2 ลักษณะศักย์ทำงาน รูปร่างของศักย์ทำงานเปลี่ยนแปลงตามหน้าที่ของกล้ามเนื้อชนิดนี้

- ในกล้ามเนื้อที่มีความตึง (Tension) เกิดขึ้นและคงตัวอยู่เป็นเวลานาน ศักย์ทำงานจะเป็นยอดแหลมเรียกว่า ความต่างศักย์สไปร์ (Spike Potential)

- ในกล้ามเนื้อที่มีการหดตัวและคลายตัวเป็นจังหวะแบบการกระตุ้นของกล้ามเนื้อลาย ศักย์ทำงานจะเริ่มต้นขึ้นที่เซลล์เพชเมคเกอร์ และจะกระจายไปทั่วกล้ามเนื้อ ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นผ่านเส้นประสาท สารเคมีหรือมีแรงที่ไปยืด (Stretch) ซึ่งการยืดกล้ามเนื้อจะเป็นการกระตุ้นที่สำคัญ เช่น เมื่อมีอาหารตกลงไปถึงกระเพาะอาหารและลำไส้ ผนังทางเดินอาหารถูกยืดออกก็จะเกิดศักย์ทำงานในกล้ามเนื้อตามมาด้วยการหดตัว และคลายตัวเป็นจังหวะ เพื่อคลุกเคล้าอาหารและขับอาหารให้เคลื่อนต่อไปตามทางเดินอาหารได้

2.1.3.2 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อเรียบมัดคดียุติ

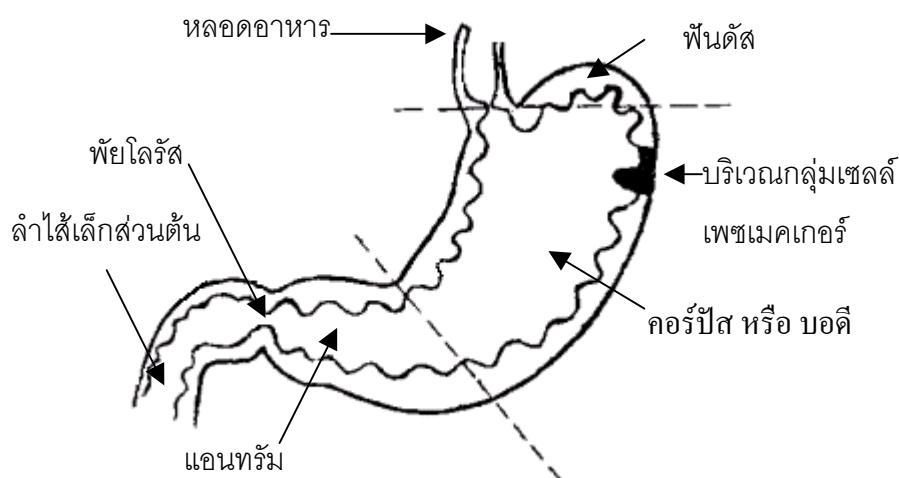
กล้ามเนื้อเรียบชนิดนี้จะได้รับเส้นประสาทจากระบบประสาทอัตโนมัติมาก บริเวณเอนเพลตจะมีดีโพลาไรเซชันที่ไม่ถึงค่าที่กำหนดไว้ (Threshold) ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนเอนเพลตโพเทนเชียล (End Plate Potential) ของกล้ามเนื้อลาย เกิดขึ้นและสลายไปอยู่ตลอดเวลา ถ้าถูกกระตุ้นดีโพลาไรเซชันที่ไม่ถึงค่าที่กำหนดไว้ สัญญาณไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะสะสมจนถึงค่าที่กำหนดจนเกิดเป็นศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานขึ้น ทำให้กล้ามเนื้อมีการหดตัว

2.2 สรีรวิทยาของกระเพาะอาหาร (Stomach) [รวิญาน พรเทพเกษมสันต์, 2538]

กระเพาะอาหารเป็นอวัยวะตั้งอยู่ในช่องท้องใต้กล้ามเนื้อทรวงอก ทางชายโครงด้านซ้ายมีรูปร่างคล้ายตัว J ด้านบนติดต่อกับหลอดอาหารด้านล่างติดต่อกับลำไส้เล็กส่วนต้น (Duodenum) รูปร่างและขนาดของกระเพาะอาหาร เปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับจำนวนอาหารที่รับประทานและอวัยวะอื่นๆ ที่อยู่รอบข้าง ซึ่งกระเพาะอาหารแบ่งออกเป็นส่วนต่างๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-1 ได้แก่

- ฟันดัส (Fundus) คือ ส่วนบนที่ติดกับหลอดอาหาร
- คอร์ปัส (Corpus) หรือ บอดี้ (Body) คือ ส่วนกลางของกระเพาะอาหาร
- พัยโลรัส (Pylorus) คือ ส่วนปลายล่างของกระเพาะอาหารต่อกับลำไส้เล็กส่วนต้น

ช่องเปิดของกระเพาะอาหารจะมี 2 ช่องคือ ตรงส่วนบนที่กระเพาะอาหารติดกับหลอดอาหาร เรียกว่า ช่องเปิดคาร์ดิค (Cardiac Opening) และช่องเปิดส่วนล่างตรงที่กระเพาะอาหารติดกับส่วนของลำไส้เล็กส่วนต้น (Duodenum) เรียกว่า ช่องเปิดพัยโลริก (Pyloric Opening) ช่องเปิดทั้งส่วนบนและส่วนล่างนี้จะมีกล้ามเนื้อรูปวงแหวนอยู่โดยรอบ เรียกว่า กล้ามเนื้อหูรูด (Sphincter) ซึ่งจะทำให้ช่องปิดเมื่อกำลังหดตัวอาหารจึงถูกเก็บไว้ในกระเพาะอาหารได้



ภาพประกอบ 2-1 สรีรวิทยาของกระเพาะอาหาร

2.2.1 โครงสร้างของผนังกระเพาะอาหาร

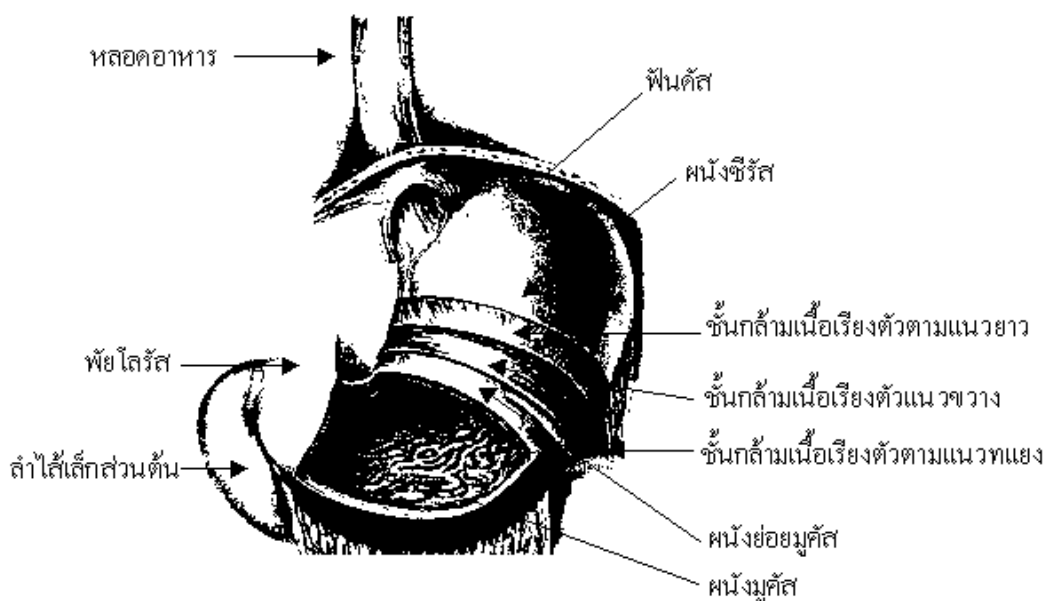
ผนังของกระเพาะอาหารประกอบด้วย เนื้อเยื่อ 4 ชั้นดังแสดงในภาพประกอบ 2-2 ซึ่งมีโครงสร้างเช่นเดียวกับส่วนอื่นๆ ของท่อทางเดินอาหารได้แก่

2.2.1.1 ชั้นนอกสุด เรียกว่า ผนังซีรัส (Serous Coat)

2.2.1.2 ชั้นที่ 2 เป็นชั้นของกล้ามเนื้อ (Muscular Coat) จะอยู่เรียงกัน 3 ชั้น คือ ชั้นกล้ามเนื้อเรียงตัวตามแนวยาว (Longitudinal Layer) , ชั้นกล้ามเนื้อเรียงตัวแนวขวาง (Circular Layer) และชั้นกล้ามเนื้อเรียงตัวตามแนวทแยง (Oblique Layer) ซึ่งช่วยในการหดตัวของกระเพาะอาหาร

2.2.1.3 ผนังย่อยมุกัส (Submucous Coat) ในชั้นนี้มีหลอดเลือด

2.2.1.4 ผนังมุกัส (Mucous Coat) ชั้นนี้หนาที่สุดเป็นเนื้อเยื่อเยื่อมุกัส (Mucous Membrane) ปกคลุมด้วยเยื่อบุผิว (Surface Epithelium) ซึ่งเป็นเซลล์รูปแท่งเรียงตัวชั้นเดียว (Simple Columnar Epithelium) อยู่ชั้นในมีลักษณะเป็นรอยย่น (Folds) เพื่อที่จะขยายได้เมื่ออาหารเต็มกระเพาะ และในชั้นนี้มีต่อมขับน้ำย่อย (Gastric Glands) เป็นจำนวนมากอยู่ทั่วไป มีรูเล็ก ๆ เป็นท่อมาเปิดที่พื้นของเนื้อเยื่อเยื่อมุกัส



ภาพประกอบ 2-2 โครงสร้างผนังของกระเพาะอาหาร

2.2.2 หน้าที่ของกระเพาะอาหาร

2.2.2.1 เป็นที่เก็บอาหารไว้ ก่อนที่จะผ่านเข้าสู่ลำไส้ อาหารจะถูกเปลี่ยนแปลงโดยกลวิธีต่างๆ จนกลายเป็นของเหลวเล็กน้อย (Chyme)

2.2.2.2 เคลื่อนไหว (Gastric Motility) เพื่อคลุกเคล้าอาหารให้สัมผัสกับน้ำย่อย และส่งอาหารที่อยู่ในสภาพของเหลวไปสู่อำไส้เล็กเป็นระยะๆ ในอัตราความเร็วที่พอเหมาะทั้งนี้เพื่อให้ลำไส้มีโอกาสย่อยอาหารและดูดซึมอาหารได้ดี

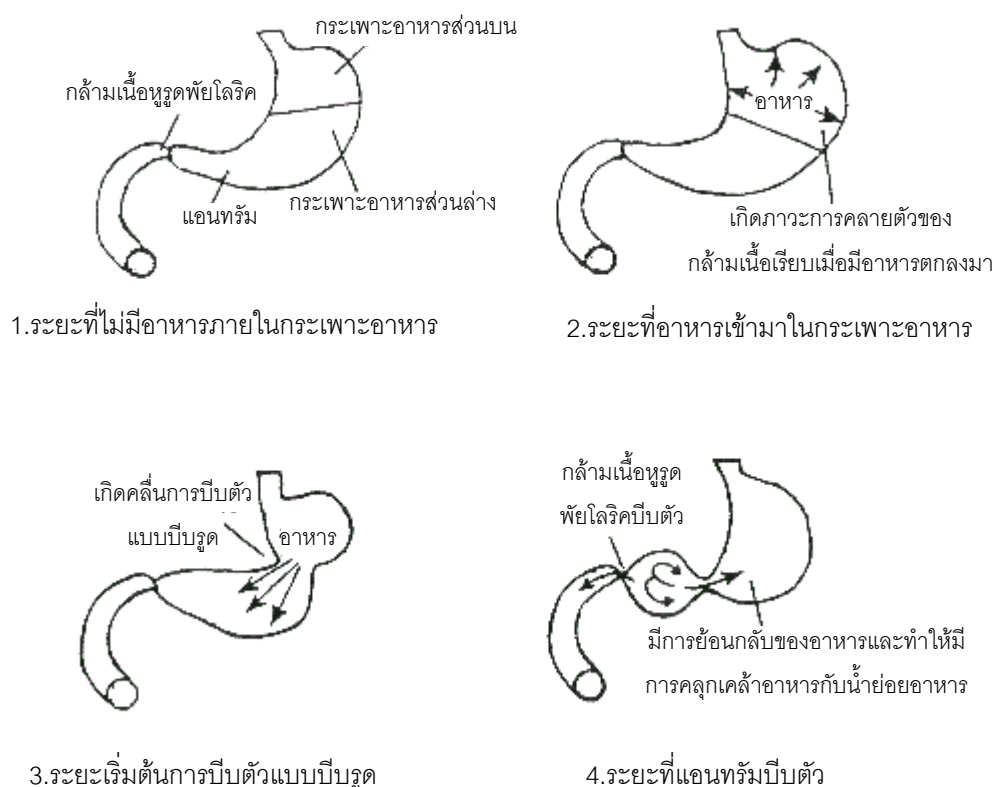
2.2.2.3 ขับน้ำย่อยในกระเพาะ (Gastric Juice) ซึ่งเป็นน้ำใสๆ มีคุณสมบัติเป็นกรดและความถ่วงจำเพาะในช่วง 1.002 - 1.003

2.2.3 การเคลื่อนไหวของกระเพาะอาหาร (Stomach Movement) [ประวิทย์ สุนทรสีมะ, 2526]

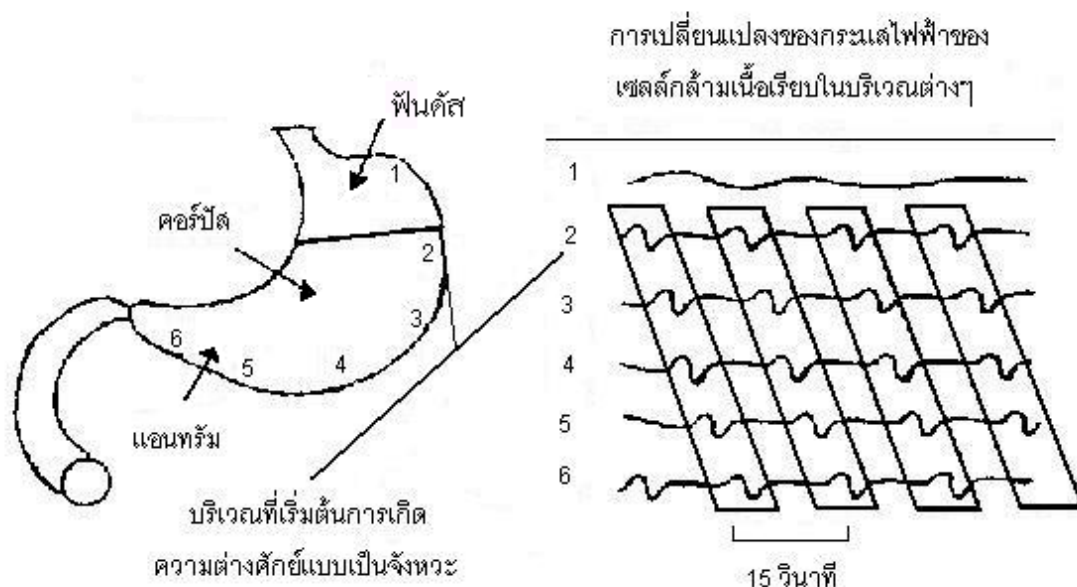
การเคลื่อนไหวของกระเพาะอาหารจะทำหน้าที่อยู่สองประการคือ คลุกเคล้าอาหารให้ผสมกับน้ำย่อยของกระเพาะอาหาร และขับเคลื่อนให้อาหารผ่านเข้าสู่ลำไส้เล็ก การเคลื่อนไหวของกระเพาะอาหารเพื่อให้เกิดการคลุกเคล้าอาหารให้ผสมกับน้ำย่อยที่เราเรียกว่า ปั่น ซึ่งจะแตกต่างจากการเคลื่อนไหวเพื่อขับเคลื่อนอาหารให้ผสมกับน้ำย่อยที่เราเรียกว่า การบีบตัวแบบบีบรูด (Peristalsis) ซึ่งการเคลื่อนไหวของกระเพาะอาหารแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

2.2.3.1 การเคลื่อนไหวของกระเพาะอาหารส่วนบน [ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว, 2541]

การเคลื่อนไหวของกระเพาะอาหารส่วนบนหรือการตอบสนองของกระเพาะอาหารเมื่อมีอาหารตกลงมาถึงกระเพาะอาหาร โดยพบว่าในขณะที่คลื่นของการบีบตัวแบบบีบรัดในบริเวณหลอดอาหารมาถึงบริเวณกล้ามเนื้อหูรูดหลอดอาหารส่วนล่าง (Lower Esophageal Sphincter หรือ LES) กล้ามเนื้อหูรูดหลอดอาหารส่วนล่าง จะคลายตัวโดยปฏิกิริยาการตอบสนองแบบอัตโนมัติ (Reflex) ซึ่งส่งผลทำให้มีการคลายตัวของกระเพาะอาหารส่วนพื้นดัดและคอร์ปัสตามมาดังแสดงในภาพประกอบ 2-3 ดังนั้นจึงทำให้กระเพาะอาหารสามารถรองรับอาหารที่รับประทานเข้าไปได้ในปริมาณมากโดยที่ความดันภายในกระเพาะอาหารมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก ปรากฏการณ์เช่นนี้เรียกว่าภาวะการคลายตัวของกล้ามเนื้อเรียบของกระเพาะอาหาร (Receptive Relaxation)



ภาพประกอบ 2-3 การบีบตัวแบบบีบรัดของกระเพาะอาหาร



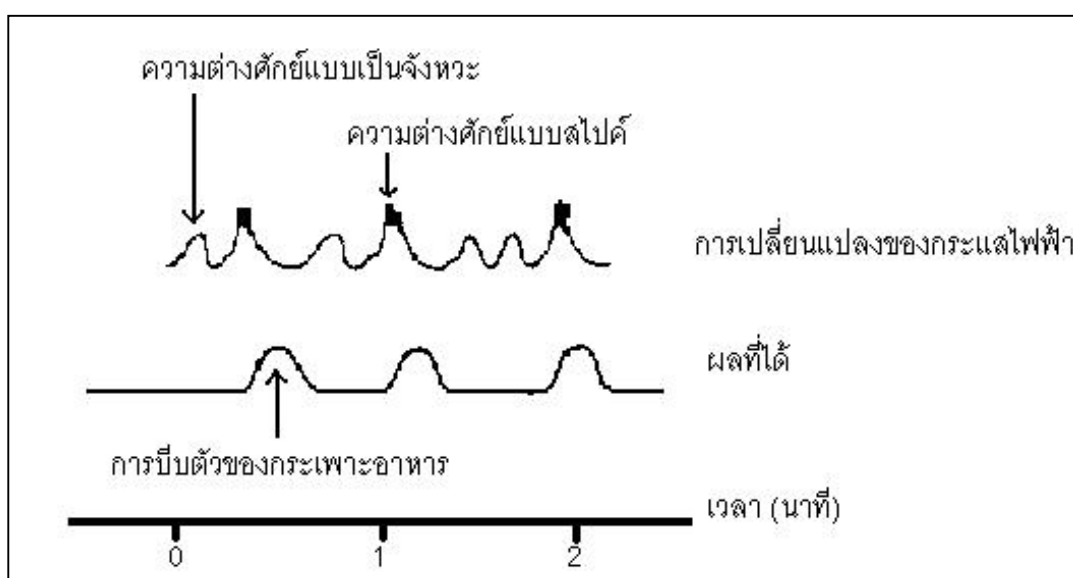
ภาพประกอบ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของกลุ่มเพซเมคเกอร์ของกระเพาะอาหารกับความต่างศักย์แบบเป็นจังหวะ

2.2.3.2 การเคลื่อนไหวของกระเพาะอาหารส่วนล่าง

ในช่วงระหว่างมื้ออาหารหรือในขณะอดอาหาร (Fasted State) พบว่ากระเพาะอาหารจะไม่มีอาการเคลื่อนไหว (Quiescent) หรือมีอาการเคลื่อนไหวน้อยมาก แต่จะพบว่ามีอาการบีบตัวเกิดขึ้นที่เรียกว่าการบีบตัวของทางเดินอาหารในช่วงระหว่างมื้ออาหาร (Migrating Myoelectric Complex) โดยพบว่าจะมีการบีบตัวเริ่มแรกเกิดขึ้นในบริเวณส่วนบนของกระเพาะอาหารส่วนล่าง ทุกๆ 90 นาทีแล้วการบีบตัวจะไล่ลงมาทางด้านล่างลงไปจนถึงส่วนปลายสุดของลำไส้เล็กส่วนปลาย จุดประสงค์เพื่อที่จะทำการบีบไล่เศษอาหารที่ค้างค้ำอยู่ในบริเวณกระเพาะอาหารหรือบริเวณลำไส้เล็กส่วนล่างและการบีบตัวนี้จะหยุดลงเมื่อมีการรับประทานอาหารเข้าไป

กระเพาะอาหารส่วนล่างจะทำหน้าที่คลุกอาหารกับน้ำย่อยอาหารของกระเพาะอาหารและจะมีการบีบตัวเพื่อบดอาหาร (Grind) ให้อาหารมีขนาดเล็กลงหลังจากนั้นก็จะมีอาการบีบไล่อาหารลงสู่ลำไส้เล็กเพื่อทำการย่อยและดูดซึมอาหารต่อไป การบีบตัวของกระเพาะอาหารส่วนนี้จะเป็นการบีบตัวแบบบีบรัดเป็นส่วนใหญ่ โดยปกติแล้วที่ตรงบริเวณส่วนบนของกระเพาะอาหาร

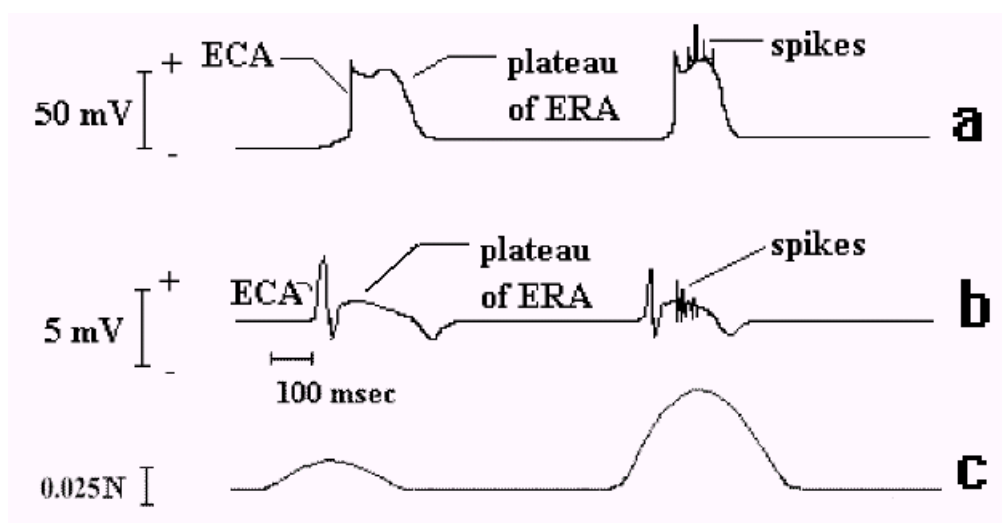
ส่วนล่างทางด้านส่วนโค้งของกระเพาะอาหารจะมีกลุ่มเซลล์ที่เรียกว่ากลุ่มเพซเมคเกอร์เซลล์ของกระเพาะอาหาร (Gastric Pacemaker) ดังแสดงในภาพประกอบ 2-4 ซึ่งกลุ่มเซลล์เหล่านี้สามารถที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าภายในเซลล์ได้เองโดยจะเกิดความต่างศักย์ระหว่างเซลล์ภายนอกเซลล์และภายในเซลล์ตลอดเวลา ซึ่งสามารถแพร่กระจายไปยังเซลล์กล้ามเนื้อเรียบในกระเพาะอาหารได้อย่างรวดเร็ว โดยสามารถพบอัตราการเกิดความต่างศักย์ได้ในเซลล์กล้ามเนื้อเรียบของกระเพาะอาหาร ซึ่งความถี่ของการเกิดความต่างศักย์นี้จะพบประมาณ 3 - 6 ครั้งต่อนาที ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นในเซลล์กล้ามเนื้อเรียบนี้เรียกว่า ความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นแบบเป็นจังหวะ (Basic Electric Rhythm; BER) เมื่อเกิดความต่างศักย์แบบเป็นจังหวะของเซลล์กล้ามเนื้อเรียบพบว่า จะไม่มีการหดตัวของเซลล์กล้ามเนื้อเรียบ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-5 การหดตัวของเซลล์กล้ามเนื้อเรียบจะเกิดขึ้นเมื่อเกิดความต่างศักย์ที่เรียกว่าความต่างศักย์แบบสไปค์ (Spike Potential) โดยพบว่าความต่างศักย์แบบสไปค์เกิดขึ้นอยู่ช่วงระหว่างการเกิดดีโพลาไรเซชันแบบเป็นจังหวะ เมื่อมีการเกิดความต่างศักย์แบบสไปค์ขึ้นพบว่าจะมีการบีบตัวแบบบีบรัด (Peristalsis) ของกล้ามเนื้อเรียบกระเพาะอาหาร การควบคุมอัตราการบีบตัวแบบบีบรัดในกระเพาะอาหารขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างซึ่งอัตราการบีบรัดที่เกิดขึ้นในกระเพาะอาหารบางครั้งจะเท่ากับอัตราการเกิดความต่างศักย์แบบเป็นจังหวะ (3-6 ครั้งต่อนาที) เนื่องจากมีการเกิดความต่างศักย์แบบสไปค์เกิดขึ้นบนความต่างศักย์แบบเป็นจังหวะทุกครั้ง



ภาพประกอบ 2-5 ความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์แบบสไปค์กับการบีบตัวของกระเพาะอาหาร

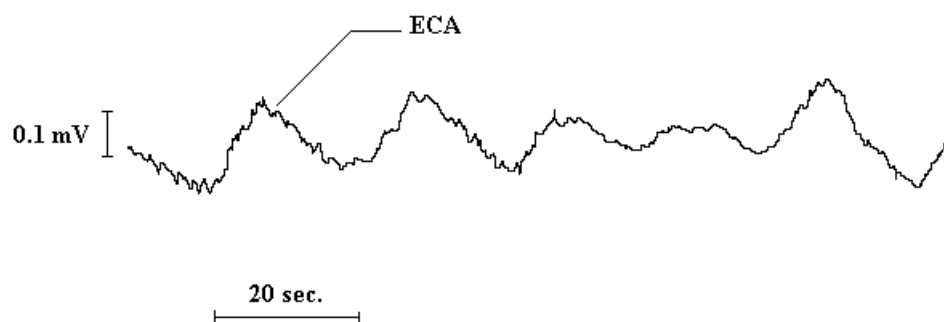
2.3 สัญญาณอิเล็กโทรกาสโตรแกรม (Electrogastrogram; EGG) [A. J. P. M. Smount, E. J. Van Der Schee and J.L. Grashuis., 1980]

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อกระเพาะอาหารสามารถบ่งบอกถึงการทำงานภายในท้องโดยจะวัดสัญญาณนั้นบริเวณผิวหนังเรียกว่า อิเล็กโทรกาสโตรแกรม (Electrogastrogram; EGG) สัญญาณ EGG มีความน่าเชื่อถือในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อของกระเพาะอาหารและสามารถบ่งบอกถึงการทำงานของกระเพาะอาหาร ซึ่งสัญญาณ EGG ถูกนำไปใช้งานในการจำแนกสภาวะปกติและสภาวะที่ไม่ปกติได้ ความถี่ปกติของสัญญาณคลื่นของกระเพาะอาหารของคนในช่วงความถี่ต่ำคือ 3 cpm ซึ่งสัญญาณ EGG ประกอบด้วยสัญญาณหลัก 2 ส่วน คือ สัญญาณ Electrical Control Activity (ECA) และ สัญญาณ Electrical Response Activity (ERA) โดยสามารถวัดสัญญาณทั้งสองของกระเพาะอาหารภายในและภายนอกมนุษย์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-6 แต่การวัดสัญญาณจากภายนอกอาจจะทำให้มีสัญญาณ EGG บางส่วนถูกลดทอนไปซึ่งเกิดจากความหนาของไขมันและความต้านทานผิวหนังหน้าท้องเหนือกระเพาะอาหาร สัญญาณรบกวนจากการเคลื่อนไหวของอาสาสมัคร เช่น การไอ จาม เป็นต้น



ภาพประกอบ 2-6 (a) สัญญาณ EGG ที่วัดจากภายใน (b) สัญญาณ EGG ที่วัดจากภายนอก และ (c) แรงบีบตัวของกระเพาะอาหาร

- สัญญาณ ECA เป็นสัญญาณที่มีความสำคัญและจำเป็นเพื่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าแบบเป็นคาบเกิดขึ้นทุกๆ 20 วินาที ดังแสดงในภาพประกอบ 2-7 แต่ไม่เป็นเงื่อนไขสำคัญเพียงพอที่จะทำให้เกิดการบีบตัว สัญญาณ ECA เป็นสัญญาณที่มีความถี่ประมาณ 3 cpm



ภาพประกอบ 2-7 สัญญาณ EGG ที่วัดจากภายนอกแบบไบโพลาร์ (Bipolar)

- สัญญาณ ERA เป็นสัญญาณที่บ่งชี้ถึงการบีบตัว ซึ่งสัญญาณ ERA ประกอบด้วยสัญญาณ 2 ช่วง คือ ช่วงเพลสโท (plateau) และช่วงสไปค์ (spikes) โดยช่วงทั้งสองจะมีความสัมพันธ์กันกล่าวคือ ช่วงสไปค์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ถ้าไม่เกิดช่วงเพลสโท ในขณะที่หากเกิดช่วงเพลสโทอาจจะไม่มีช่วงสไปค์เกิดตามมาก็ได้ ได้มีการศึกษาพบว่าจะต้องมีแรงบีบตัวของกระเพาะอาหารมากกว่า 0.025 นิวตัน จึงจะเกิดช่วงสไปค์ ดังแสดงในภาพประกอบ 2-6 ด้วยเหตุนี้การวิเคราะห์ช่วงสไปค์ของสัญญาณ EGG ทั้งจากการวัดภายในและภายนอกมนุษย์ได้นั้นก็ต่อเมื่อกระเพาะอาหารมีระดับแรงบีบตัวมากกว่าค่า threshold ซึ่งค่า threshold นี้ยังคงต้องศึกษาเพื่อให้ได้ค่าเหมาะสมและแม่นยำต่อไป

สัญญาณ ECA จะเกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลาในกระเพาะอาหาร ในขณะที่สัญญาณ ERA จะเกิดขึ้นเมื่อมีการบีบตัว ได้มีการศึกษาพบว่า แอมพลิจูดของสัญญาณ EGG ที่สูงขึ้นนั้นจะบ่งชี้ถึงการบีบตัวของกระเพาะอาหาร โดยค่าแอมพลิจูดที่สูงขึ้นนี้จะเกิดขึ้นหลังจากอาสาสมัครรับประทานอาหาร กล่าวคือกระเพาะอาหารหลังรับประทานอาหารมีแรงบีบตัวมากกว่ากระเพาะอาหารก่อนรับประทานอาหารเพื่อจะให้น้ำย่อยผสมกับอาหารและผลักดันอาหารไปสู่ลำไส้เล็ก จึงทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณ EGG หลังรับประทานอาหารมีค่าสูงกว่าแอมพลิจูดของสัญญาณ EGG ก่อนรับประทานอาหาร ดังนั้น แอมพลิจูดของสัญญาณ EGG จะสัมพันธ์กับการบีบตัวของกระเพาะอาหาร

2.4 เทคนิคทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของสัญญาณไฟฟ้า

การคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับวิเคราะห์สัญญาณไฟฟ้ามียู้อยู่ด้วยกันหลายวิธี ซึ่งสามารถแบ่งกลุ่มได้ดังนี้

2.4.1 การวิเคราะห์ห้บนโดเมนเวลา(Time Domain)

2.4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยสัมประสิทธิ์ออโตรีเกรซซีฟ (Autoregressive : AR)

[Hayes, M. H., 1996]

การวิเคราะห์ระบบหรือการทำงานทางไฟฟ้าสามารถทำได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น

- สมการอนุพันธ์ (Difference Equation)
- ผลรวมของคอนโวลูชัน (Convolution Summation)
- สมการถ่ายโอน (Transfer Function) เช่นใช้ Z transform
- ความถี่ตอบสนอง (Frequency Response)
- การใช้สเตต-สเปซ (State-space Representation)

ในขณะที่วิธี Z transform นั้นเป็นวิธีที่เหมาะสมแก่การใช้งานในระบบการทำงานที่สัญญาณไม่เป็นเชิงเส้นและไม่ต่อเนื่อง คุณสมบัติของ Z - transform แสดงดังตาราง 2-1

ตาราง 2-1 แสดงคุณสมบัติของ Z - transform

Property	Sequence $x(n)$	Transform $X(z)$
Delay	$x(n - n_0)$	$z^{-n_0} X(z)$
Multiplication by α^n	$\alpha^n x(n)$	$X(z / \alpha)$
Conjugation	$x^*(n)$	$X^*(z^*)$
Time reversal	$x(-n)$	$X(z^{-1})$
Convolution	$x(n) * h(n)$	$X(z)H(z)$
Multiplication by n	$nx(n)$	$-z \frac{d}{dz} X(z)$

วิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีอตรีเกรซซีฟ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือรูปแบบของ All Pole Modeling เนื่องจากวิธีนี้จะใช้เฉพาะสัมประสิทธิ์ของโพลมาพิจารณาและเหมาะที่จะใช้วิเคราะห์ในแง่ของรูปแบบทางคณิตศาสตร์ของสัญญาณที่เป็นชนิดแรนดอม

รูปแบบสมการถ่ายโอน (Transfer Function : $H(z)$) ของสมการอตรีเกรซซีฟ จะพยายามปรับสัมประสิทธิ์ของสมการเพื่อให้ได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ต้องการให้มากที่สุด ($\bar{x}(n)$) โดยมีสัญญาณเข้าเป็นสัญญาณแบบสุ่ม ($v(n)$)

$$(v(n)) \longrightarrow \boxed{H(z) = \frac{B_q(z)}{A_p(z)}} \longrightarrow (\bar{x}(n))$$

ภาพประกอบ 2-8 รูปแบบสมการอตรีเกรซซีฟจะปรับสัมประสิทธิ์เพื่อให้ได้สัญญาณที่ใกล้เคียงกับสัญญาณที่ต้องการมากที่สุด

โดยมีสมการถ่ายโอน รูปแบบของ Z-transform คือ

$$H(z) = \frac{\sqrt{e}}{A(z)} = \frac{\sqrt{e}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_p z^{-k}} \quad (2-1)$$

สมการอตรีเกรซซีฟจะมีเฉพาะส่วนของโพลดังสมการ (2-1) โดยที่ $a_1, a_2, a_3, \dots, a_p$ คือสัมประสิทธิ์ของอตรีเกรซซีฟอันดับที่ 1, 2, 3, ..., p ตามลำดับ

โดยทั่วไปวิธีการหาผลลัพท์ของวิธีอตรีเกรซซีฟ มักจะใช้สมการของ Yule-Walker (Simon Godsill, 2003) ซึ่งมีสมการในรูปเมตริกซ์คือ

$$\begin{bmatrix} R_{XX}[0] & R_{XX}[-1] & \dots & R_{XX}[-P] \\ R_{XX}[1] & R_{XX}[0] & \dots & R_{XX}[1-P] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{XX}[P] & R_{XX}[P-1] & \dots & R_{XX}[0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0^2 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

เมื่อ $R_{XX}[\bullet] =$ Autocorrelation Sequence

$a_p[\bullet] =$ สัมประสิทธิ์อตรีเกรซซีฟ

$b(0) =$ ค่าคงที่

การวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีออตโตกรัฟ ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์โมเดล ออตโตกรัฟอันดับ 10 ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์ทั้งหมด 10 ค่า โดยที่ a_1 เป็นสัญลักษณ์แทนค่า สัมประสิทธิ์ตัวที่ 1 ส่วน a_2, a_3, \dots, a_9 และ a_{10} จะเป็นสัญลักษณ์แทนค่าสัมประสิทธิ์ตัวที่ 2, 3, ..., 9 และ 10 ตามลำดับ ซึ่งเป็นสัญลักษณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ดังนั้นในการวิเคราะห์วิธีนี้ได้ พารามิเตอร์ 10 ค่าคือ a_1 ถึง a_{10}

2.4.2 การวิเคราะห์บนโดเมนความถี่ (Frequency Domain)

2.4.2.1 การวิเคราะห์ด้วยกำลังของสเปกตรัม (Power Spectrum)

เทคนิคการหาค่ากำลังของสเปกตรัมโดยใช้การแปลงของฟูเรียร์และอินเวอร์สฟูเรียร์ สามารถแปลงสัญญาณได้ทั้งในโดเมนความถี่และโดเมนเวลา จากสมการ

$$X(f) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2-3)$$

เมื่อ $x(t)$ คือสัญญาณในโดเมนเวลา

$X(f)$ คือฟูเรียร์ทรานฟอร์มของสัญญาณ $x(t)$

ส่วนการอินเวอร์สฟูเรียร์ของสัญญาณ $X(f)$ คือ

$$x(t) = F^{-1}\{X(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} X(f)e^{j2\pi ft} dt \quad (2-4)$$

ซึ่งค่ากำลังสองของแอมพลิจูดของสเปกตรัม ก็คือ กำลังของสเปกตรัม (Power Spectrum) โดยมีความสัมพันธ์กับสมการดังนี้

$$S_{xx}(f) = X^*(f)X(f) = |X(f)|^2 \quad (2-5)$$

เมื่อ $S_{xx}(f)$ คือ กำลังของสเปกตรัมของสัญญาณ $x(t)$

$X(f) = F\{x(t)\}$

$X^*(f) =$ ลังยุคเชิงซ้อนของ $X(f)$

2.4.2.2 การวิเคราะห์ด้วยความถี่โดมิแนนท์ (Dominant Frequency)

การวิเคราะห์ด้วยความถี่โดมิแนนท์ โดยแปลงสัญญาณจากโดเมนเวลาให้อยู่ในโดเมนความถี่ ซึ่งจะได้เป็นกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณ จากนั้นพิจารณาค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสเปกตรัมในช่วงความถี่ 1 – 12 cpm หากค่าความถี่โดมิแนนท์ค่าแอมพลิจูดสูงสุด ความถี่นั้นก็จะมีความถี่โดมิแนนท์ ด้วยการวิเคราะห์ในวิธีนี้จะได้พารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความถี่โดมิแนนท์ และแอมพลิจูดที่ความถี่โดมิแนนท์ หรือ ค่าแอมพลิจูดสูงสุดของสเปกตรัมในช่วงความถี่ 1–12 cpm นั้นเอง

2.4.2.3 การวิเคราะห์ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของความถี่สัญญาณปกติ [D. Levanon and J. Z. Chen., 1998]

การวิเคราะห์ด้วยค่าเปอร์เซ็นต์ของความถี่ปกติ โดยกำหนดช่วงความถี่ปกติคือ ช่วง 2.0 - 4.0 cpm โดยแบ่งสัญญาณ EGG บนโดเมนเวลาเป็นวินโดว์ (Windows) ซึ่งแต่ละวินโดว์มีขนาด 1 นาที จากนั้นนำแต่ละวินโดว์ไปคำนวณหาความถี่โดมิแนนท์ ในช่วงความถี่ 1 – 12 cpm แล้วคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์ของจำนวนวินโดว์ที่มีความถี่โดมิแนนท์ในช่วงปกติต่อจำนวนวินโดว์ทั้งหมดของสัญญาณ จากงานวิจัยนี้พบว่าพารามิเตอร์ค่าเปอร์เซ็นต์ของความถี่ปกติของสัญญาณ EGG ก่อนรับประทานอาหารเช้าและหลังรับประทานอาหารเช้า มีค่ามากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์

2.4.2.4 การวิเคราะห์ด้วยความถี่มีเดียน(Median Frequency : F median)

จากงานวิจัยของสตูลเลนและลูการ์ [Stulen, F. B. and Lucar, C. J., 1982] พบว่าค่า Fmedian ของสัญญาณไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อจะลดลงเมื่อกกล้ามเนื้อเกิดความอ่อนล้าขึ้น โดยที่ค่า Fmedian คือ ความถี่ที่ทำให้ผลรวมของกำลังของสัญญาณมีค่าเป็นครึ่งหนึ่งของกำลังทั้งหมด ด้วยการวิเคราะห์ในวิธีนี้จะได้พารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความถี่มีเดียนและแอมพลิจูดที่ความถี่มีเดียน ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ [ประทีศน์ จิระภาค., 2543] ได้ดังนี้

$$\int_0^{F_{\text{median}}} S(f)df = \int_{F_{\text{median}}}^{\infty} S(f)df = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} S(f)df \quad (2-6)$$

$$S(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|X(f)|^2}{T} \quad (2-7)$$

เมื่อ $X(f)$ คือ การแปลงฟูเรียร์ของ $x(t)$ โดยที่ $x(t)$ คือสัญญาณใดๆ

$S(f)$ คือ ความหนาแน่นกำลังของสเปกตรัม ในช่วงความถี่ที่เป็นบวกของสัญญาณใดๆ

2.4.2.5 การวิเคราะห์ด้วยความถี่ 25 เปอร์เซ็นต์ของกำลังของสเปกตรัม

ความถี่ 25 เปอร์เซ็นต์ของกำลังของสเปกตรัม คือ ความถี่ที่ทำให้ผลรวมของกำลังของสัญญาณมีค่าเป็นหนึ่งในสี่ของกำลังทั้งหมด โดยเริ่มคำนวณจากผลรวมจากความถี่ต่ำสุดไปเรื่อยๆจนผลรวมนั้นมีค่าเป็นหนึ่งในสี่ของกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณ ในงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย F25 % การวิเคราะห์ในวิธีนี้จะได้พารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความถี่ F25 % และแอมพลิจูดที่ความถี่ F25 % ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ [ประทีป จีระภาค., 2543] ได้ดังนี้

$$\int_0^{F_{25\%}} S(f) df = \frac{1}{4} \int_0^{\infty} S(f) df \quad (2-8)$$

เมื่อ $S(f)$ คือ ความหนาแน่นกำลังของสเปกตรัม ในช่วงความถี่ที่เป็นบวกของสัญญาณใดๆ

2.4.2.6 การวิเคราะห์ด้วยความถี่ 75 เปอร์เซ็นต์ของกำลังของสเปกตรัม

ความถี่ 75 เปอร์เซ็นต์ของกำลังของสเปกตรัม คือ ความถี่ที่ทำให้ผลรวมของกำลังของสัญญาณมีค่าเป็นสามในสี่ของกำลังทั้งหมด โดยเริ่มคำนวณจากผลรวมจากความถี่ต่ำสุดไปเรื่อยๆจนผลรวมนั้นมีค่าเป็นสามในสี่ของกำลังของสเปกตรัมของสัญญาณ ในงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์แทนด้วย F75 % การวิเคราะห์ในวิธีนี้จะได้พารามิเตอร์ 2 ค่า คือ ความถี่ F75 % และแอมพลิจูดที่ความถี่ F75 % ซึ่งสามารถเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ [ประทีป จีระภาค., 2543] ได้ดังนี้

$$\int_0^{F_{75\%}} S(f) df = \frac{3}{4} \int_0^{\infty} S(f) df \quad (2-9)$$

เมื่อ $S(f)$ คือ ความหนาแน่นกำลังของสเปกตรัม ในช่วงความถี่ที่เป็นบวกของสัญญาณใดๆ