

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

การศึกษาผลของคุณสมบัติทางรีโอโลยีของอาหารที่มีต่อสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและคอมีทฤษฎีและหลักการที่ใช้ในการศึกษาหลาย ๆ แขนงด้วยกัน ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ กลไกการกลืน คุณสมบัติทางรีโอโลยีของอาหาร และแอลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและคอ ซึ่งรายละเอียดของทฤษฎีและหลักการเป็นดังนี้

#### 2.1 กลไกการกลืน

การกลืนอาหาร (swallowing) เป็นการเคลื่อนที่ของอาหารจากปากไปยังหลอดอาหารและการเคลื่อนไหวยของอาหารในบริเวณหลอดอาหารเพื่อที่จะเคลื่อนอาหารจากหลอดอาหารลงสู่กระเพาะอาหาร ซึ่งในการกลืนแต่ละครั้ง ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายหลาย ๆ ส่วนต้องทำงานร่วมกันและพร้อมเพียงเป็นจังหวะ นั่นคือ ประสาทสมอง 6 คู่ และประสาทสันหลัง C1-3 ถูกใช้ในการควบคุม การทำงานของกล้ามเนื้อ 50 มัดขณะกลืน (วิฑูร ลิลามานิตย์, 2543) จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำความเข้าใจกลไกการทำงานของร่างกายส่วนนี้ เพื่อใช้แก้ปัญหาในงานวิจัยชิ้นนี้ โดยการกลืนสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วงคือ

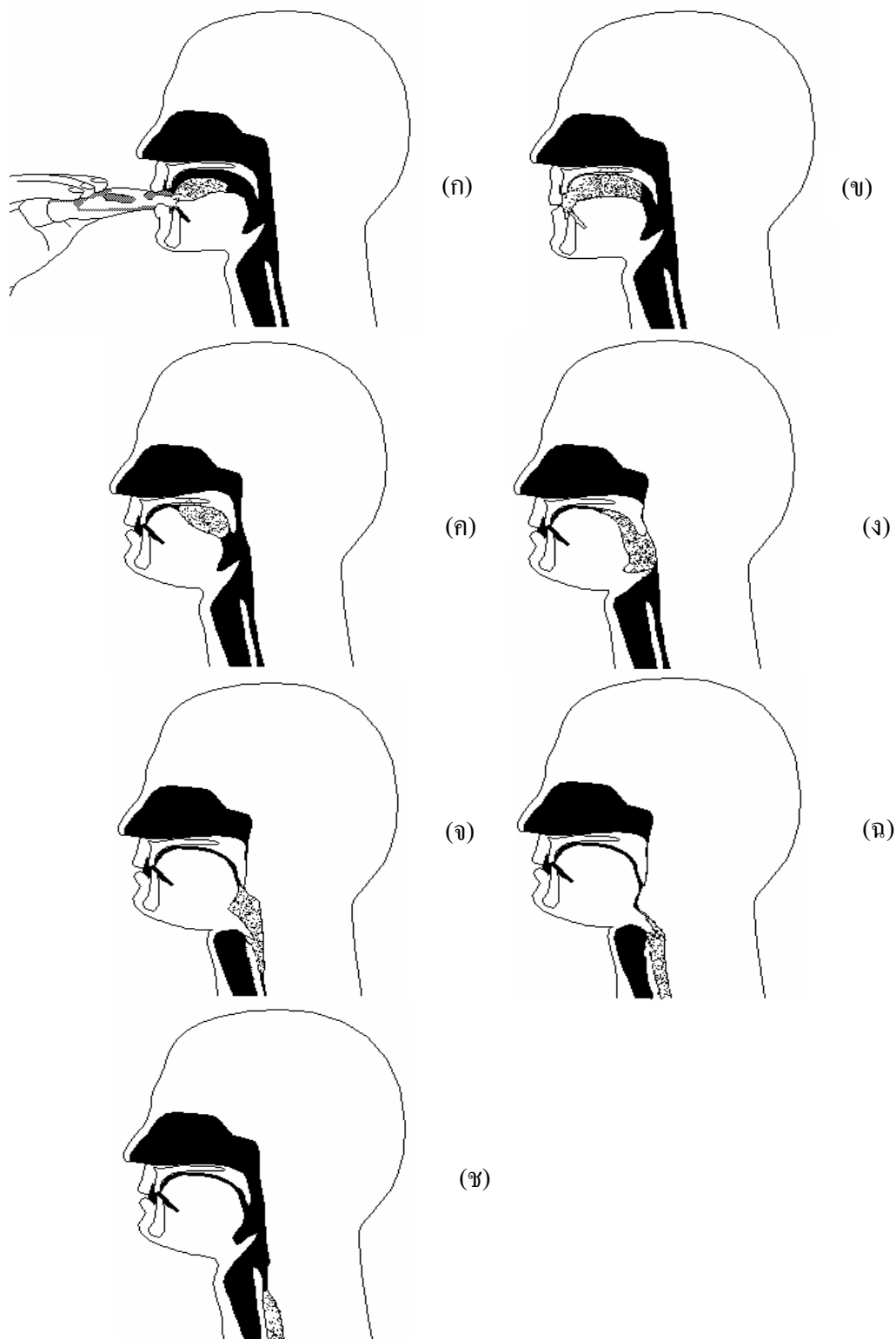
ช่วงที่ 1 คือช่วงที่อาหารอยู่ในปาก (oral phase) การควบคุมจะอยู่ภายใต้อำนาจจิตใจ (voluntary) โดยระยะนี้สามารถที่จะสั่งให้มีการกลืนอาหารหรือไม่กลืนอาหารก็ได้ เมื่ออาหารได้ผ่านการเคี้ยวและคลุกเคล้ากับน้ำลายจนกลายเป็นก้อนอาหารขนาดเล็ก (bolus) โดยกล้ามเนื้อใบหน้า (facial muscles) กล้ามเนื้อที่ทำหน้าที่บดเคี้ยว (muscle of mastication) และกล้ามเนื้อลิ้น ก็จะมีผลไปกระตุ้นตัวรับรู้ต่าง ๆ ภายในบริเวณปากของเส้นประสาทไตรเจมินัล (trigeminal) ให้ส่งสัญญาณประสาทไปที่ศูนย์กลางการควบคุมการกลืน (swallowing center) คือกลุ่มเซลล์ประสาทแตรคทัสโซลิทเทเรียส (tractus solitarius nucleus) และแอมบิกัส (ambiguous nucleus) ในบริเวณก้านสมองส่วนท้าย (medulla) และพอนส์ (pons) จากนั้นก็ส่งสัญญาณประสาทต่าง ๆ กลับมาทางเส้นประสาทไตรเจมินัลและเส้นประสาทใบหน้า เพื่อควบคุมการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ ภายในบริเวณปาก โดยพบว่าปากจะปิดและมีการยกขึ้นของโคนลิ้น เพดานอ่อน (soft palate) ยกตัวขึ้นสูงและไปชนผนังคอด้านหลังเพื่อปิดช่องต่อระหว่างจมูกกับคอหอยไม่ให้อาหารเข้าไปในโพรงจมูกได้ ดังรูปที่ 2.1ก – 2.1ค

ช่วงที่ 2 คือช่วงที่อาหารอยู่ในบริเวณคอหอย (pharyngeal phase) ซึ่งประกอบด้วยการทำงานของกล้ามเนื้อ 26 มัด และใช้เวลาในการทำงานประสานกันเพียง 1-2 วินาที เป็นระยะที่วิกฤตของร่างกายเนื่องจากขณะกลืนต้องหยุดหายใจและปิดกล่องเสียงเพื่อให้อาหารผ่านช่องคอลงสู่

หลอดอาหาร โดยไม่ไหลเข้าสู่กล่องเสียงและหลอดลม ขณะเดียวกันก็ต้องป้องกันไม่ให้อาหารไหลย้อนขึ้นสู่ช่องจมูก โดยการกลืนระยะนี้ต้องอาศัยกล้ามเนื้อเพดาน (palatal muscle) กล้ามเนื้อลิ้น กล้ามเนื้อที่อยู่เหนือ และใต้ต่อกระดูกไฮออยด์ กล้ามเนื้อช่องคอและกล้ามเนื้อกล่องเสียง (pharyngeal and laryngeal muscles) เป็นต้น การควบคุมการกลืนในระยะคอหอย ระยะเริ่มกลืนอยู่ใต้อำนาจจิตใจ (voluntary) แต่เมื่อเริ่มต้นกลืนแล้วจะอยู่นอกอำนาจจิตใจ (involuntary) โดยเมื่ออาหารตกลงมาถึงบริเวณคอหอย (pharynx) แล้วไม่สามารถที่จะสั่งให้มีการคายอาหารบริเวณนี้ออกไปทางปากได้ อาหารที่ตกลงมาถึงบริเวณนี้จะไปกระตุ้นตัวรับรู้ทางกล (mechanoreceptors) รอบ ๆ คอหอยของเส้นประสาทกลอสโซฟารินเจียล (glossopharyngeal) และเวกัส (vagus) ส่งสัญญาณประสาทไปที่ศูนย์กลางการควบคุมการกลืนในบริเวณก้านสมองส่วนท้ายและพอนส์ จากนั้นก็จะส่งสัญญาณประสาทต่าง ๆ กลับมาทางเส้นประสาทไตรจีมินัล กลอสโซฟารินเจียล เวกัส และฮัยโปกลอสซัล (hypoglossal) มาควบคุมการทำงานของอวัยวะต่าง ๆ บริเวณคอหอย เมื่อเริ่มกลืนโคนลิ้นจะเคลื่อนตัวต่ำลงเพื่อปล่อยให้อาหารหรือน้ำไหลลงสู่ช่องคอ หลังจากนั้นกล้ามเนื้อโคนลิ้นจะถูกยกสูงขึ้นและเคลื่อนที่ไปข้างหลังเพื่อผลัก ส่งอาหารสู่ช่องคอ ขณะที่ช่องคอจะเปิดกว้าง และหูรูดหลอดอาหารส่วนต้น (upper esophageal sphincter) จะคลายตัว (relaxation) และถูกถ่างให้กว้างออกโดยการยกตัวของ กล่องเสียง ซึ่งเกิดจากการดึงของกล้ามเนื้อคอ (thyrohyoid) ฝาปิดกล่องเสียง (epiglottis) จะพับลงเพื่อปิดทางเข้ากล่องเสียง อาหารและน้ำจะถูกกล้ามเนื้อโคนลิ้นผลักส่งเข้าสู่ช่องคอและหลอดอาหารส่วนต้นที่เปิดกว้างรออยู่หลังจากนั้นส่วนเพดานอ่อนจะยกตัวต่ำลงชิดกับโคนลิ้นขณะที่กล้ามเนื้อช่องคอ (superior, middle and inferior constrictor muscles) จะทำการบีบรัดช่องคอไล่เรียงลงมาจากบนลงล่างอย่างเป็นลำดับเพื่อบีบไล่อาหารและน้ำให้ไหลผ่านลงสู่หลอดอาหารจนหมด เมื่ออาหารและน้ำไหลผ่านลงสู่หลอดอาหารหมดแล้ว หูรูดหลอดอาหารส่วนบนจะปิดลงพร้อม ๆ กับกล่องเสียงจะเคลื่อนตัวต่ำลง กลับเข้าสู่ตำแหน่งเดิมก่อนการกลืน การเคลื่อนต่ำลงของกล่องเสียงอาศัยกล้ามเนื้อคอ (strap muscles of neck) พร้อมกับฝาปิดกล่องเสียงจะติดตัวกลับ เพื่อเปิดทางเข้ากล่องเสียงขณะที่สายเสียงจะเปิดออกกล้ามเนื้อช่องคอกคลายตัวและเริ่มต้นหายใจใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.1ง – 2.1จ

ช่วงที่ 3 คือช่วงที่อาหารอยู่ในหลอดอาหาร (esophageal phase) การควบคุมจะอยู่นอกอำนาจจิตใจ (involuntary) การบีบตัวของกล้ามเนื้อแบบบีบรัดในบริเวณหลอดอาหารจะดำเนินต่อไปจากการบีบตัวของกล้ามเนื้อในบริเวณคอหอย ทำให้อาหารผ่านจากส่วนต้นของหลอดอาหารลงไปถึงบริเวณกล้ามเนื้อหูรูดหลอดอาหารส่วนล่าง (lower esophageal sphincter หรือ LES) ทำให้กล้ามเนื้อหูรูด LES คลายตัว อาหารสามารถผ่านจากหลอดอาหารลงไปสู่กระเพาะอาหาร จากนั้น

กล้ามเนื้อหูรูด LES จะบีบตัวเพื่อไม่ให้เกิดการย้อนกลับของอาหารเข้าสู่หลอดอาหารอีก (ชัยวัฒน์ ต่อสกุลแก้ว, 2541) ดังรูปที่ 2.1ข



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการกลืนอาหาร

ลักษณะการทำงานของกล้ามเนื้อต่าง ๆ ในรูปที่ 2.1 ขึ้นอยู่กับลักษณะของอาหาร อายุ และเพศ เช่น อาหารแข็ง (solid food) จะมีการบดเคี้ยว คลุกเคล้าแรงและนานกว่าอาหารอ่อน (soft food) ดังนั้นการศึกษาคุณสมบัติทางรีโอโลยีของอาหารและเลือกอาหารให้ตรงต่อความสามารถในการกลืนจึงเป็นสิ่งสำคัญ ในการรักษาผู้ป่วยกลืนลำบากด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางรีโอโลยีของอาหาร

## 2.2 คุณสมบัติทางรีโอโลยีของอาหาร (Rheological Properties of Food)

เนื่องจากความหนืด (viscosity) เป็นตัวแปรสำคัญในการศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอาหารในงานวิจัยชิ้นนี้ นั่นคืออาหารที่มีความหนืดสูง ในขณะที่กลืนพบว่าต้องใช้แรงในการกลืนสูงตามไปด้วย (Reimer-Neils, Logemann and Larson, 1994; Miller and Watkin, 1996) ซึ่งไม่เหมาะที่จะให้ผู้ป่วยกลืนลำบากรับประทาน ดังนั้นจึงกำหนดให้ความหนืดเป็นตัวแปรหลักในขั้นตอนการเลือกอาหารสำหรับการทดลองของงานวิจัยนี้ นอกจากนี้ในการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอาหารได้ศึกษาถึงค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ผิวของอาหาร (friction coefficient) และความสามารถในการไหลของอาหาร (flowability) ควบคู่ไปด้วย ซึ่งในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของอาหารทำโดยวัดค่าความหนืด ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน ค่าความสามารถในการไหลและความหนาแน่น (density) ของน้ำลาย เยลลี่ ขนมหิงขดละเอียด ฟักทองปั่นละเอียด เผือกปั่น ฯลฯ ซึ่งเป็นอาหารตั้งต้น รวมทั้งจัดทำอาหารผสม เช่น โจ๊กปั่น ซุปบะหมี่หยุก นมถั่วเหลือง แยมสตรอเบอร์รี่ เป็นต้น และวัดค่าต่าง ๆ เช่นเดียวกับอาหารตั้งต้น และเลือกอาหารผสมซึ่งมีช่วงความหนืดต่าง ๆ กันหลายค่า เพื่อใช้ในการกลืนขณะตรวจจับสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและคอของอาสาสมัครต่อไป

ความหนืด (Viscosity) เป็นปริมาณที่ใช้วัดความเสียดทานในของไหลต่อแรงเฉือนที่เกิดขึ้น นิยามของความหนืด คืออัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือน (shear stress) ที่กระทำต่อของไหล ต่ออัตราเฉือน (shear rate) หรือ (White, 1999)

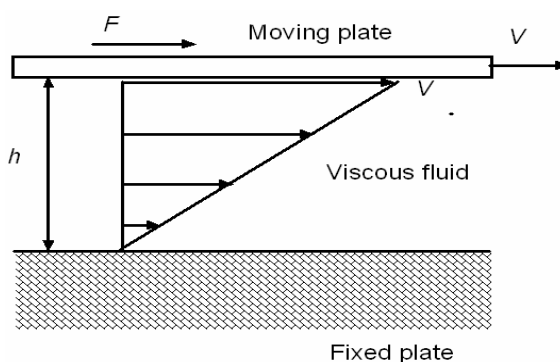
$$\mu = \frac{\tau}{S} \quad (2.1)$$

โดยที่  $\mu$  คือค่าความหนืด  $\tau$  คือความเค้นเฉือน และ  $S$  คืออัตราเฉือน

พิจารณาการไหลใน 1 มิติระหว่างแผ่นราบ 2 แผ่นซึ่งอยู่ห่างกันเป็นระยะทาง  $h$  ดังแสดงในรูปที่ 1 แผ่นราบบนถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่  $V$  โดยที่แรงที่ทำให้แผ่นราบเคลื่อนที่คือแรงเฉือน  $F$  ส่วนแผ่นราบล่างอยู่กับที่ ค่าของความเร็วของชั้นของไหลระหว่างแผ่นราบจะเริ่มจากศูนย์ ณ แผ่นราบล่าง จนมีค่าเท่ากับ  $V$  ณ แผ่นราบบน ทั้งนี้เกิดจากแรงเสียดทานในของไหล เนื่องจากความหนืดนั่นเอง ในกรณีนี้ความเค้นเฉือนมีค่าเท่ากับแรงเฉือน  $F$  หารด้วยพื้นที่ของ

แผ่นราบล่าง  $A$  ส่วนอัตราเฉือน มีค่าเท่ากับความเร็ว  $V$ หารด้วยระยะระหว่างแผ่นราบ  $h$  ดังนั้น

$$\mu = \frac{F/A}{V/h} \quad (2.2)$$



รูปที่ 2.2 การไหลระหว่างแผ่นราบ 2 แผ่นเพื่อศึกษานิยามของความหนืด

ในกรณีที่ความหนืดมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือน เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าเป็นของไหลชนิดนิวโตเนียน (Newtonian) เช่นของไหลในรูปที่ 2.2 ซึ่งอัตราเฉือน มีค่าคงที่ ส่วนในกรณีที่ความหนืดมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอัตราเฉือน เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าเป็นของไหลชนิดนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) ของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) มีอยู่หลายชนิด หากความหนืดมีค่าลดลงเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าเชียร์-ทินนิง (shear-thinning) หรือซูโดพลาสติก (pseudoplastic) และถ้าของไหลชนิดนี้มีค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น (yield stress) เราจะเรียกว่าพลาสติก (plastic) ส่วนของไหลที่ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอัตราเฉือน เราเรียกของไหลชนิดนี้ว่าเชียร์-ทิกเคนนิง (shear-thickening) หรือ ดิลาแทนต์ (dilatant) นอกจากนี้ยังมีของไหลที่มีลักษณะคล้ายของไหลนิวโตเนียน (Newtonian) แต่จะต้องมีค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น (yield stress) เรียกว่าบิงแฮมพลาสติก (Bingham plastic) ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (Fox and McDonald, 1994)

ของไหลนอนนิวโตเนียน ชนิดซูโดพลาสติกและดิลาแทนต์ สามารถอธิบายด้วยสมการยกกำลังดังนี้

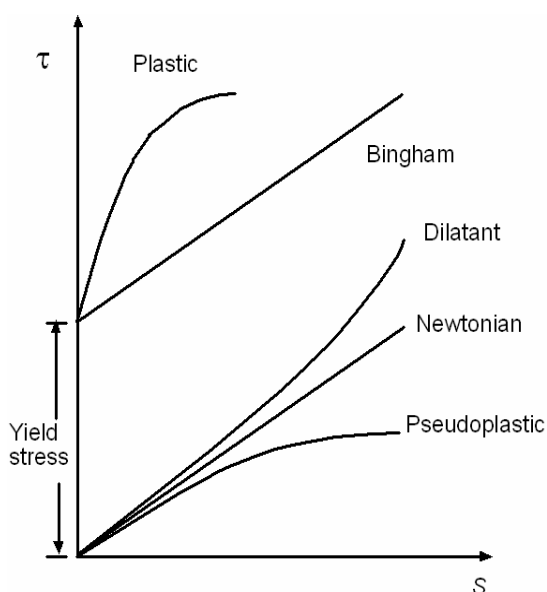
$$\tau = k_1 S^n \quad (2.3)$$

โดยที่  $\tau$  คือความเค้นเฉือน  $S$  คืออัตราเฉือน  $k_1$  และ  $n$  เป็นค่าคงที่ สำหรับของไหลนอนนิวโตเนียน ชนิดซูโดพลาสติกจะมีค่า  $n$  น้อยกว่า 1 ในขณะที่ชนิดดิลาแทนต์มีค่า  $n$  มากกว่า 1

ของไหลนอนนิวโตเนียน ชนิดบิงแฮมพลาสติก สามารถอธิบายด้วยสมการคณิตศาสตร์ ดังนี้

$$\tau = k_2 S + \tau_0 \quad (2.4)$$

โดยที่  $\tau_0$  เป็นค่าความเค้นเฉือนเริ่มต้น และ  $k_2$  เป็นค่าความชันของเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ ซึ่งพบว่าสมการที่ (2.3) และ (2.4) สามารถอธิบายของไหลชนิดนิวโตเนียนได้ เมื่อ  $n=1$  หรือ  $\tau_0=0$  ตามลำดับ



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือน และอัตราเฉือนของไหลชนิดต่าง ๆ

อาหารตั้งต้นโดยส่วนมากมีลักษณะเป็นแบบนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) (ต่างจากน้ำซึ่งเป็นของไหลแบบนิวโตเนียน) ส่วนจะเป็นของไหลนอนนิวโตเนียน (Non-Newtonian) ชนิดใดสามารถหาได้จากการวัดค่าความหนืด โดยใช้เครื่องวัดความหนืดชนิดแกนหมุน (rotational viscometer) ซึ่งสามารถควบคุมการหมุนของแกนหมุน (spindle) ในของไหลที่ต้องการวัดค่าความหนืด ให้มีอัตราเฉือนตามต้องการ โดยการปรับรอบการหมุน อัตราเฉือนขึ้นอยู่กับความเร็วเชิงมุม (หรือความเร็วรอบ) ของแกนหมุนซึ่งมีลักษณะเป็นรูปทรงต่าง ๆ เช่น ทรงกระบอก ทรงกรวย เป็นต้น เมื่อแกนหมุนถูกทำให้หมุนในของไหล ความหนืดของของไหลจะทำให้เกิดการต้านการหมุน ทอร์กหรือแรงบิดที่ต้องการให้แกนหมุนหมุนด้วยความเร็วคงที่ สามารถวัดได้จากการยืดตัวของสปริงที่ติดอยู่กับแกนหมุน ค่าของทอร์กจะมีความสัมพันธ์กับความเค้นเฉือนสำหรับแกนหมุนทรงกระบอกดังสมการ

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L} \quad (2.5)$$

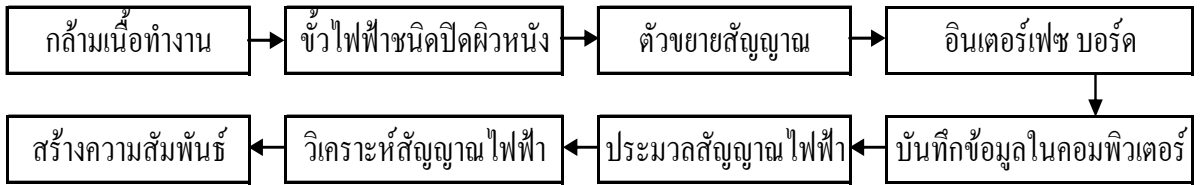
โดยที่  $\tau$  คือความเค้นเฉือน  $M$  คือทอร์คที่เกิดขึ้น  $L$  คือความยาวของแกนหมุนที่มีผล และ  $R_b$  คือ รัศมีของแกนหมุน และอัตราเฉือนสำหรับแกนหมุนทรงกระบอกหาได้จากสมการ

$$S = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)} \quad (2.6)$$

โดยที่  $S$  คืออัตราเฉือน  $\omega$  คือความเร็วเชิงมุม (rad/sec)  $R_c$  คือ รัศมีของภาชนะที่ใช้ใส่อาหารมีหน่วยเป็นเมตร (m)  $R_b$  คือ รัศมีของเข็มวัดมีหน่วยเป็นเมตร (m)  $x$  รัศมีที่ต้องการวัดอัตราเฉือนมีหน่วยเป็นเมตร (m) ดังนั้นถ้าแทนค่าความเค้นเฉือนจากสมการ (2.5) และค่าอัตราเฉือนจากสมการ (2.6) ลงในสมการ (2.1) ก็จะสามารถหาค่าความหนืดได้

### 3. แอลกอริทึมที่ใช้ในการประมวลสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและคอ

อาหารที่เตรียมไว้จะนำมาทดสอบกับอาสาสมัคร โดยให้อาสาสมัครกลืนและทำการตรวจจับสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและคอ โดยการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดปิดผิวหนัง เริ่มต้นด้วยการให้ขั้วไฟฟ้าจับสัญญาณการทำงานของกล้ามเนื้อและคอ และส่งสัญญาณไปยังตัวขยายสัญญาณ (preamplifier) ซึ่งตัวขยายสัญญาณได้ส่งสัญญาณต่อไปยังคอมพิวเตอร์โดยผ่านการแปลงข้อมูลเพื่อจัดเก็บในรูปแบบของข้อมูลเลขฐานสอง (รูปที่ 2.4) ซึ่งอุปสรรคที่เกิดขึ้นกับการตรวจจับสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและคอโดยการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าชนิดปิดผิวหนังคือ การกำจัดสัญญาณรบกวน (noise) และการวิเคราะห์สัญญาณ โดยวิธีในการกำจัดสัญญาณรบกวนมีหลายวิธีเช่น เทคนิคการใช้ตัวกรองสัญญาณชนิดต่าง ๆ การใช้ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (moving average) เป็นต้น การวิเคราะห์สัญญาณมีหลายวิธีเช่น การวิเคราะห์สัญญาณในแกนของเวลาหรือในแกนของความถี่ การใช้สมการถดถอย (autoregressive) ซึ่งพบว่าวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้มีข้อจำกัดในการประมวลและวิเคราะห์สัญญาณนั้นคือ ทำให้สัญญาณจริงถูกรองออกไปพร้อมสัญญาณรบกวน ลักษณะเด่นของสัญญาณจริงลดลง เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้แอลกอริทึมฟรีควอนซ์ เวท ไทม์ ซีรีส์ (Frequency Weight Time Series; FWTS) (วิฑูร ลีตามานิตย์, อลัน กีเตอร์ และ จุมพฏ ชูสิงห์, 2541) มาวิเคราะห์และประมวลสัญญาณ เนื่องจากแอลกอริทึมฟรีควอนซ์ เวท ไทม์ ซีรีส์ มีคุณสมบัติลดทอนสัญญาณรบกวนและเร่งสัญญาณจริง



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนการทำงานขณะบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากลั่นและคอในอาสาสมัครตลอดการ นำข้อมูลไปสร้างความสัมพันธ์

แอลกอริทึมฟรีควอนซี เวท ไทม์ ซีรีส์ ที่ใช้ประกอบด้วยสองสมการ ดังนี้

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \text{abs} \left[ \frac{1}{2dt} (x_{i-1}^4 - x_{i+1}^4) \right] \quad (2.7)$$

โดยที่  $d$  คือผลที่ได้ (output) มีหน่วยเป็น โวลต์<sup>4</sup>/วินาที (volt<sup>4</sup>/seconds)  $N$  คือจำนวนตัวป้อน และ  $x$  คือตัวป้อน (input)

$$w = \sum_{j=15}^{350} \frac{1}{N^2} |FFT\{x_j\}|^2 \quad (2.8)$$

โดยที่  $w$  คือผลที่ได้มีหน่วยเป็น โวลต์<sup>2</sup> (volt<sup>2</sup>)  $N$  คือจำนวนตัวป้อน  $x_j$  คือตัวป้อน  $FFT$  คือการเปลี่ยนแปลงฟาสต์ ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform) ของข้อมูล

เมื่อเอาสมการ (2.7) คูณกับสมการ (2.8) จะได้แอลกอริทึมฟรีควอนซี เวท ไทม์ ซีรีส์ ซึ่งใช้ในการประมวลผล ดังนี้

$$p = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-1} \text{abs} \left[ \frac{1}{2dt} (x_{i-1}^4 - x_{i+1}^4) \right] \right] \left[ \sum_{j=15}^{350} \frac{1}{N^2} |FFT\{x_j\}|^2 \right] \quad (2.9)$$

โดยที่  $p$  คือผลลัพธ์ (final output) และมีหน่วยเป็น โวลต์<sup>6</sup>/วินาที (volt<sup>6</sup>/seconds)

ส่วนการประมวลผลด้วยวิธีรากเฉลี่ยกำลังสอง (rms) ที่ใช้กันทั่วไปสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$r = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-i} x_i^2} \quad (2.10)$$

โดยที่  $r$  คือผลที่ได้  $x$  คือตัวป้อน  $N$  คือจำนวนตัวป้อน

แอลกอริทึมฟรีควอนซี เวท ไทม์ ซีรีส์ มีคุณสมบัติในการลดทอนสัญญาณรบกวนชนิดต่าง ๆ เช่น สัญญาณอิมพัลส์ (impulse) คลื่นรบกวนชนิดอ่อน (white noise) คลื่นรบกวนรูปไซน์ (sinusoid) คลื่นรบกวนชนิดสุ่มและเป็นคาบ (periodic random noise) ได้ดีกว่าการประมวลผลสัญญาณด้วยวิธีมาตรฐานอื่น ๆ เช่น วิธีรากเฉลี่ยกำลังสอง (rms) หรือวิธีความถี่เฉลี่ย (mean frequency) แอลกอริทึมฟรีควอนซี เวท ไทม์ ซีรีส์ มีคุณสมบัติตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาด



ของสัญญาณ (amplitude) ที่มีขนาดสูงปานกลาง แต่ไม่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณ (amplitude) ที่มีขนาดต่ำ สมการแอลลกอริทึมนี้จึงมีคุณสมบัติพิเศษในการลดทอนสัญญาณรบกวน และเร่งขนาดสัญญาณจริง (signal enhancing) ประสิทธิภาพของแอลลกอริทึมในการแยกสัญญาณรบกวนออกจากสัญญาณจริง ทดสอบโดยการป้อนสัญญาณรบกวนชนิดต่าง ๆ ผสมกับสัญญาณจริงแล้ววิเคราะห์สัญญาณด้วย แอลลกอริทึมที่ใช้ เพื่อดูขนาดและลักษณะสัญญาณที่แปรเปลี่ยนไป พบว่าแอลลกอริทึมที่ใช้ให้อัตราส่วนของสัญญาณต่อคลื่นรบกวน (signal to noise ratio; S/N) ของสัญญาณสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับการประมวลผลด้วยวิธีรากเฉลี่ยกำลังสอง (rms) และวิธีความถี่เฉลี่ย (mean frequency)

ความสามารถของแอลลกอริทึมในการแยกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Basic EMG) ที่บันทึกด้วยอิเล็กโทรดชนิดปิดผิวหนังออกจากสัญญาณรบกวนขนาดสูงชนิดต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับ การประมวลผลด้วยวิธีรากเฉลี่ยกำลังสอง (rms) แสดงให้เห็นในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 เปอร์เซ็นต์ของอัตราส่วนสัญญาณต่อคลื่นรบกวนของแอลลกอริทึมฟรีควอนซี เวท ไทม์ ซีรีส์ เทียบกับวิธีรากเฉลี่ยกำลังสอง

ชนิดของคลื่นรบกวน \ แอลลกอริทึม	ฟรีควอนซี เวท ไทม์ ซีรีส์	รากเฉลี่ยกำลังสอง
คลื่นรบกวนชนิดอ่อน (White noise)	150%	31%
คลื่นรบกวนรูปไซน์ (Sinusoid)	375%	46%
คลื่นรบกวนชนิดสุ่มและเป็นคาบ (Periodic random noise)	225%	36%