บทที่ 2
สัญญาณกล้ามเนื้อ และอิเล็กโทรด

เนื่องจากสัญญาณกล้ามเนื้อเป็นสัญญาณไฟฟ้าชนิดหนึ่ง และเราจะเอาสัญญาณนี้ไปใช้งาน ดังนั้นในบทนี้จะเริ่มจากการกล่าวถึงการเกิดสัญญาณไฟฟ้าของเซลล์ การทำงานของกล้ามเนื้อ และการเกิดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ รวมถึงลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของสัญญาณกล้ามเนื้อ และอิเล็กโทรดที่ใช้วัดสัญญาณกล้ามเนื้อ เพื่อเป็นพื้นฐานในการออกแบบและประดิษฐ์ระบบวัดต่อไป

2.1 ศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์

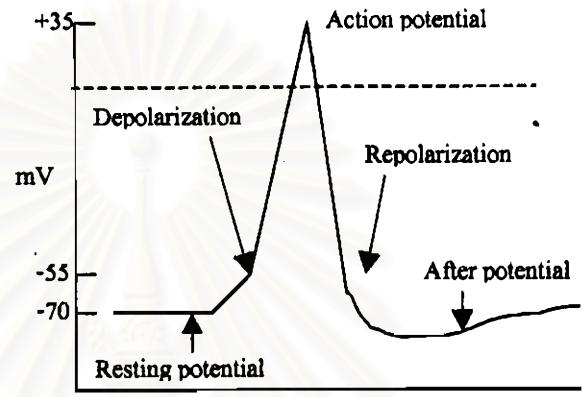
สัญญาณไฟฟ้าจากร่างกายเกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีของแต่ละเซลล์โดยมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.1 สัญญาณไฟฟ้าเหล่านี้จะถูกส่งไปตามเซลล์ประสาท(neuron) ในสภาวะที่สมดุล จะมีการแพร่(diffusion)และการปั๊มของโปแตสเซียมอิออน โซเดียมอิออน และคลอไรด์อิออนระหว่างภายนอกเซลล์และภายในเซลล์ อันเนื่องมาจากความแตกต่างของความเข้มข้นของอิออนทั้งสองระหว่างภายในและภายนอกเซลล์ และการทำงานของอิออนปั๊ม ที่จุดสมดุลนี้จะเกิดความต่างศักย์ตกคร่อมผนังเซลล์ราว –80 mV เมื่อเทียบกับนอกเซลล์ ในสภาพเช่นนี้เราเรียกว่าการเกิดโพลาไรซ์(polarization)ขึ้นที่เซลล์ และเรียกศักย์ไฟฟ้าที่จุดสมดุลนี้ว่า ศักย์ไฟฟ้าสงบ(resting potential) ค่าของศักย์ไฟฟ้านี้จะขึ้นกับชนิดของเซลล์ และขึ้นกับความเข้มข้นของอิออนภายในและภายนอกเซลล์

เมื่อเซลล์ถูกกระตุ้นจากภายนอกไม่ว่าจะเป็นการกระตุ้นเชิงกล หรือการกระตุ้นด้วยสารทางชีวเคมี ผนังเซลล์จะมีการเปลี่ยนสภาพไปชั่วครู่ ซึ่งทำให้เกิดการแพร่ของโซเดียมอิออนที่มีอยู่มากทางภายนอกเซลล์ แพร่เข้าไปในเซลล์อย่างรวดเร็ว โดยจะมีปริมาณของโปแตสเซียมอิออนไหลแพร่ออกมาเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ด้วยเหตุนี้เอง จึงทำให้ภายในเซลล์มีประจุบวกมากขึ้น และมีศักย์ไฟฟ้าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับภายนอกเซลล์ ศักย์ไฟฟ้านี้เรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าไวงาน(action potential) และเรียกสภาพการเปลี่ยนแปลงของศักย์ไฟฟ้าเช่นนี้ว่า เซลล์ถูกดีโพลาไรซ์(depolarized) หรือเกิดการดีโพลาไรซ์(depolarization) ขึ้น ศักย์ไฟฟ้าไวงานนี้จะมีค่าราว +30 mV เมื่อเทียบกับภายนอกเซลล์(รูปที่ 2.1)

เมื่อเวลาผ่านไปการแพร่ของโซเดียมอิออน และอิออนชนิดอื่นจะเข้าสู่ที่จุดสมดุลใหม่ หลังจากนั้นผนังเซลล์จะค่อยๆ กลับคืนตัวสู่สภาวะเดิมในตอนแรก โดยจะมีการปั๊มโซเดียมอิออน ออก

ไปโดยกลุ่มของโปรตีนที่เรียกว่า อิออนปั้ม(ion pump) ลักษณะของการเปลี่ยนสภาวะที่มีศักย์ไฟฟ้าไวงาน เพื่อกลับไปอยู่ในสภาวะเริ่มแรกนี้เรียกว่า รีโพลาไรเซชั่น(repolarization)

ขนาดของศักย์ไฟฟ้าไวงานที่เกิดขึ้นจะแตกต่างไปตามชนิดของแต่ละเซลล์ และการกระตุ้นจะต้องมีความแรงเกินจุดจำกัดอันหนึ่งที่เรียกว่า จุดเริ่มเปลี่ยน(threshold)



รูปที่ 2.1 ศักย์ไฟฟ้าไวงาน(Action Potential)

2.2 สัญญาณกล้ามเนื้อ

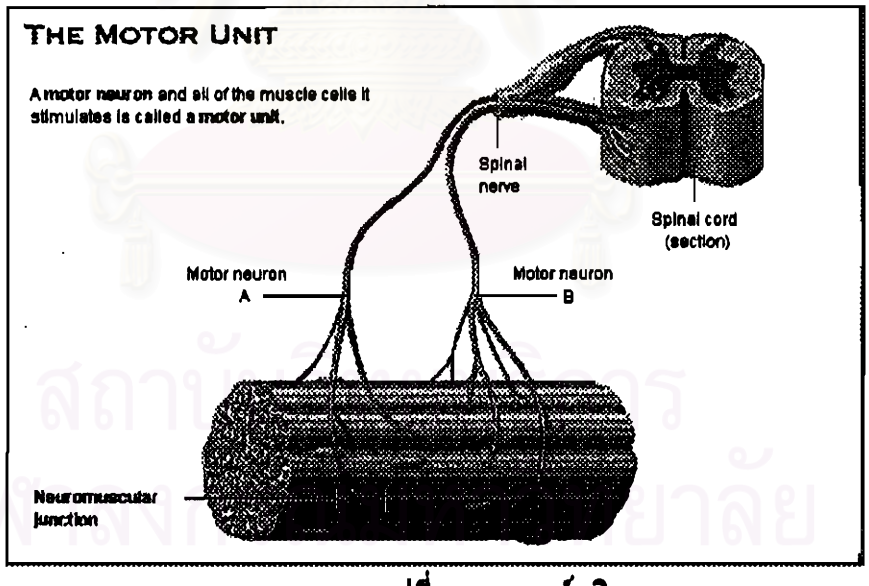
กล้ามเนื้อเป็นเซลล์ที่ถูกพัฒนาไปเพื่อทำหน้าที่เด่นด้านการเคลื่อนที่ โดยมีการหดตัวและคลายตัว เพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนไหวของร่างกายและอวัยวะต่างๆ กล้ามเนื้อแบ่งตามการควบคุมการทำงานได้ 2 ชนิด[17] คือ

1. กล้ามเนื้อทำงานใต้อำนาจจิตใจ(Voluntary muscle) ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยสมองส่วนสั่งการ (motor area) ส่งคำสั่งลงมาควบคุม ส่วนมากเป็นการทำงานของกล้ามเนื้อลาย ตัวอย่างเช่น กล้ามเนื้อตำแหน่งไบเซ็ปส์(Biceps) ที่ต้นแขนเป็นต้น
2. กล้ามเนื้อทำงานนอกอำนาจจิตใจ(involuntary muscle) ซึ่งไม่สามารถควบคุมได้ ได้แก่การทำงานของกล้ามเนื้อเรียบและกล้ามเนื้อหัวใจ ซึ่งควบคุมการทำงานโดยระบบประสาทออโตโนมิก (autonomic nervous system) การทำงานของกล้ามเนื้อลายบางครั้งก็อยู่นอกอำนาจจิตใจ เช่น การตอบสนองแบบรีเฟล็กซ์(reflex)

เส้นประสาทของกล้ามเนื้อที่ส่งสัญญาณมาควบคุมกล้ามเนื้อจัดอยู่ในระบบประสาทส่วนกลาง (central nervous system) ซึ่งประกอบด้วยสมอง ไขสันหลัง (spinal cord) และเส้นใย

ประสาทรอบนอก (peripheral nerves fiber) โดยจะทำหน้าที่ส่งประสาทความรู้สึก (sensory information) ไปยังสมอง หรือ ไขสันหลัง และเส้นใยประสาทที่ส่งข้อมูลจากสมองหรือ กระดูกสันหลังไปยังกล้ามเนื้อ[18]

กล้ามเนื้อมัดหนึ่งประกอบด้วยมอเตอร์ยูนิต(motor unit) จำนวนมาก รูปที่ 2.2 แสดงมอเตอร์ยูนิต ซึ่งประกอบด้วยเซลล์กล้ามเนื้อ และประสาทสั่งการ(motor neuron) จากรูปจะเห็นว่ามีเส้นประสาทสั่งการ 2 เส้น ซึ่งแต่ละเส้นก็จะต่ออยู่กับเซลล์กล้ามเนื้อคนละชุดที่ทำงานอิสระต่อกัน และจะทำงานพร้อมกันเมื่อต้องการการหดตัวของกล้ามเนื้อสูง ในกล้ามเนื้อมัดหนึ่งๆจะมีจำนวนของประสาทสั่งการมากน้อยขึ้นอยู่กับชนิดหรือประเภทการใช้งานของกล้ามเนื้อนั้นๆ จุดเชื่อมต่อระหว่างเซลล์กล้ามเนื้อแต่ละเซลล์กับเส้นประสาทสั่งการ เรียกว่า neuromuscular junction (รูปที่ 2.3) ส่วนปลายสุดของ Axon(motor neuron) เรียกว่า Axon terminal ประกอบไปด้วย Synaptic vesicles ภายใน Synaptic vesicles ก็จะมี acetylcholine อยู่ ส่วนของ Axon กับเซลล์กล้ามเนื้อนั้นไม่ได้สัมผัสกันโดยตรง แต่ถูกขั้นด้วย Synaptic Cleft ส่วนประกอบที่สำคัญอื่นได้แก่ Sarcolemma เป็นเซลล์เมมเบรนของเซลล์กล้ามเนื้อ และส่วนของ Sarcolemma ที่เชื่อมต่อกับ Axon เรียกว่า Motor end plate T-tubule คือส่วนของ Sarcolemma ที่ยื่นเป็นช่องเล็กๆฝังเข้าไปในเซลล์กล้ามเนื้อ



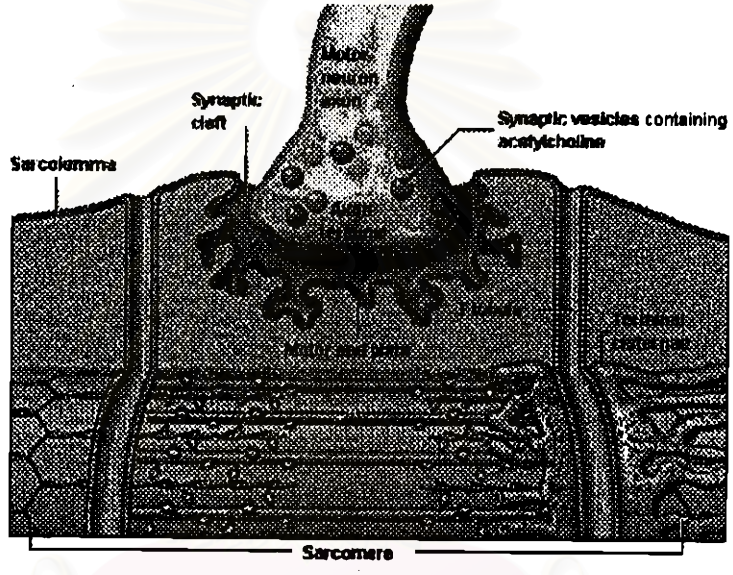
รูปที่ 2.2 มอเตอร์ยูนิต

กลไกการทำงานของกล้ามเนื้อสามารถอธิบายได้ดังนี้

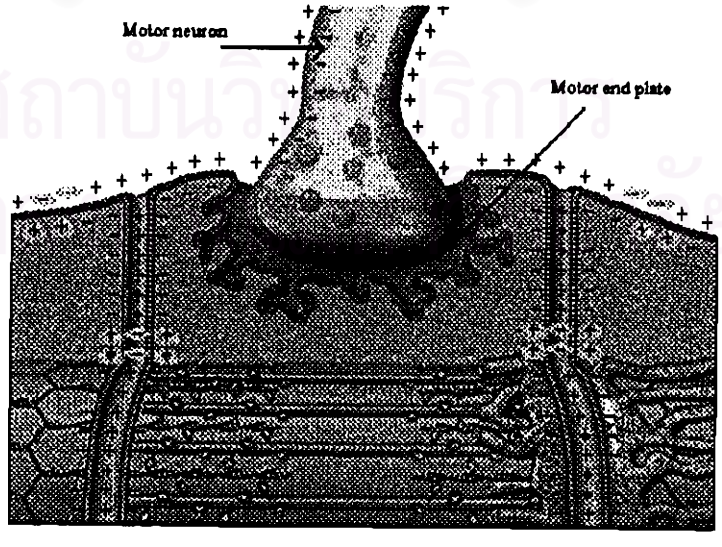
เมื่อศักย์ไฟฟ้าไวงานเดินทางมาถึง Axon terminal จะทำให้ Voltage-regulated calcium channel เปิด ทำให้แคลเซียมอิออน(Ca^{2+}) ผ่านเข้าไปใน Axon terminal ได้ ซึ่งแคลเซียมอิออนก็จะไปทำให้ Synaptic vesicle ไปเกาะที่เมมเบรนของ Axon terminal ปล่อย neurotransmitter อันได้

แก่ acetylcholine ที่อยู่ใน vesicle เพื่อส่งเข้าไปใน Synaptic Cleft โดยแคลเซียมอิออนจะถูกปั๊มออกนอก Axon terminal ตัว Acetylcholine ก็จะไปทำให้ ion channel เปิด เป็นผลให้โซเดียมอิออนไหลเข้ามาด้วยอัตราที่มากกว่าโปแตสเซียมอิออนที่ไหลออก การแลกเปลี่ยนอิออนนี้ทำให้เกิดการดีโพลาไรซ์ ของ motor end plate หลังจากนั้นไม่นาน ion channel ก็จะถูกปิดลง

การเกิดดีโพลาไรซ์ ที่ motor end plate ทำให้เกิดศักย์ไฟฟ้าไวงาน ซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านไปตาม Sarcolemma และผ่าน T-tubules ไปตลอดเซลล์กล้ามเนื้อ(รูปที่ 2.4) ทำให้กล้ามเนื้อเกิดการหดตัว



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบต่างๆของ Neuromuscular junction



รูปที่ 2.4 การเคลื่อนที่ของศักย์ไฟฟ้าไวงาน

กล่าวคือในการสั่งงานประสาทมาที่กล้ามเนื้อจะเกิดกระแสไฟฟ้าไหล(การเคลื่อนที่ของศักย์ไฟฟ้าไวงาน) ซึ่งอาจจะมาจาก spinal cord หรือ สมอง ผ่านเส้นประสาทสั่งการ มากระตุ้นที่ motor end plate ถ้าค่าศักย์ไฟฟ้าที่เข้ามีค่ามากกว่าค่า threshold ก็จะเกิดการนำกระแสไฟฟ้าขึ้นไปตลอดเซลล์กล้ามเนื้อทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ รูปที่ 2.4 แสดงส่วน neuromuscular junction ที่กระแสไฟฟ้ากำลังเคลื่อนที่ไปตามเซลล์กล้ามเนื้อ ซึ่งแต่ละเซลล์กล้ามเนื้อก็จะตอบสนองกับกระแสไฟฟ้าไม่เหมือนกัน ดังนั้นในการเกร็งแขนหนึ่งครั้งจะให้ผลของศักย์ไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละเซลล์แตกต่างกันไป

โดยทั่วไปขนาดของสัญญาณกล้ามเนื้อจะมีขนาดต่ำประมาณ 0.1mV-0.5mV โดยมีความถี่อยู่ในช่วง 5-2000 Hz ดังนั้นในการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อจึงจำเป็นจะต้องออกแบบวงจรขยายสัญญาณให้มีอัตราขยายสูงพอที่จะนำเอาไปใช้งานได้ นอกจากนี้จำเป็นจะต้องออกแบบวงจรกรองเพื่อตัดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่ต่ำกว่า 5 Hz และสูงกว่า 2000 Hz ออกไป

2.3 อิเล็กโทรด

ในการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อสามารถทำได้โดยใช้อิเล็กโทรด อิเล็กโทรดที่ใช้เป็นแบบผิวสัมผัสชนิดที่ติดลงบนผิวหนัง สัญญาณที่วัดได้จึงเป็นสัญญาณของกลุ่มของเซลล์กล้ามเนื้อบริเวณที่สัมผัสกับอิเล็กโทรด หรือกล่าวคือเป็นผลรวมของสัญญาณไฟฟ้าในบริเวณนั้น

การวัดสัญญาณนั้นสามารถทำได้โดยการใช้ขั้วอิเล็กโทรด ดังมีหลักการวัดดังต่อไปนี้

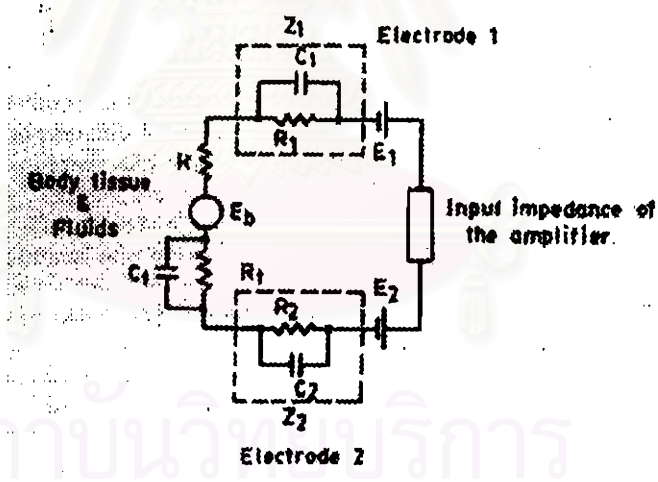
ถ้าเกิดเราใส่แรงดันต่ำๆเข้าที่ขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้วในสารละลาย จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในชั้น electrical double layers และอาจเกิดการไหลของกระแสขึ้นหรือไม่เกิดก็เป็นได้ขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรด การที่เกิดกระแสไหลน้อยๆในช่วงแรกที่ใส่สนามไฟฟ้าเข้ามาและเกิดการเปลี่ยนแปลงของ electrical double layer ชั่วครู่ แสดงถึงความต้านทานที่สูงซึ่งอิเล็กโทรดแบบนี้จะเป็นอิเล็กโทรดแบบโพลาไรซ์ ไม่สามารถนำมาใช้วัดศักย์ไฟฟ้าคงตัวหรือศักย์ไฟฟ้าที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยๆได้ ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องใช้อิเล็กโทรดที่ยอมให้เกิดการไหลของประจุไฟฟ้า เมื่อมีการใส่สนามไฟฟ้าเข้ามาที่ขั้วของอิเล็กโทรด เราเรียกอิเล็กโทรดแบบนี้ว่า อิเล็กโทรดแบบไม่โพลาไรซ์(nonpolarizable) ซึ่งจะมีความต้านทานต่ำ

ดังนั้นลักษณะสำคัญที่จำเป็นของอิเล็กโทรดในการวัดสัญญาณทางชีวภาพ ก็คือคุณสมบัติการไม่โพลาไรซ์ หมายความว่าศักย์ไฟฟ้าอิเล็กโทรดต้องไม่เปลี่ยนแปลงแม้ว่าจะมีกระแสไหลผ่านซึ่งอิเล็กโทรดที่มีคุณสมบัติที่ใช้วัดสัญญาณทางด้านชีวภาพ หรือในที่นี้ก็คือสัญญาณกล้ามเนื้อ ที่นิยมใช้ได้แก่ ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag-AgCl) ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นอิเล็กโทรดที่ไม่ทำให้เกิดความเป็นพิษ หรือระคายเคืองต่อผิวหนัง และเป็นอิเล็กโทรดมาตรฐานทั่วไปในการวัด

ซึ่งแตกต่างกับอิเล็กโทรดแบบ Zn-$ZnSO_4$ ที่ถึงแม้จะมีคุณสมบัติการมี offset ต่ำ แต่มีความเป็นพิษต่อผิวหนังสูง ซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์จึงเป็นอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในทางการแพทย์ ด้วยข้อได้เปรียบทางด้านเสถียรภาพของอิเล็กโทรดเมื่อใช้งานไปนานๆ [19]

อิเล็กโทรดที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอิเล็กโทรดแบบผิวสัมผัส คือใช้ติดกับผิวหนังของกล้ามเนื้อส่วนที่ต้องการจะวัด โดยการประมาณให้ผิวหนังทำหน้าที่เป็นไดอะแฟรมกั้นระหว่างสารละลาย 2 อันที่มีความเข้มข้นของไอออนที่ต่างกัน ทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นไปตามสมการของ Nernst โดยจะได้วงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.5 คือมีแหล่งกำเนิดแรงดันต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกันอยู่ ตัวเก็บประจุจะแทนประจุที่เกิดขึ้นที่รอยต่อ ขณะที่ตัวต้านทานแสดงการแพร่ซึมของไอออนข้ามรอยต่อ[19]

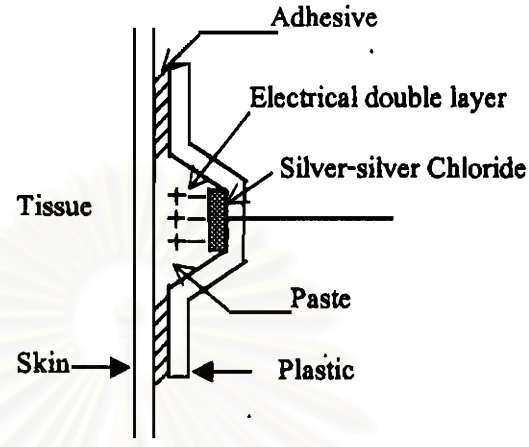
จากรูปที่ 2.5 จะเห็นได้ว่าแรงดันที่เราวัดได้แบ่งเป็น 2 ส่วนใหญ่ๆ ด้วยกัน หนึ่ง คือ ศักย์ไฟฟ้าสัมผัส (contact potential)ซึ่งก็คือ E_1 และE_2 กับสัญญาณไฟฟ้าจากร่างกายที่เราสนใจ(E_b) ซึ่งถ้าเกิดศักย์ไฟฟ้าสัมผัสมากเกินไปก็จะไม่ดี ศักย์ไฟฟ้าสัมผัสนี้จะขึ้นกับชนิดของผิวหนัง การเตรียมผิวหนัง และ ชนิดของอิเล็กโตรไลท์



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลย์ของอิเล็กโทรดในการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อ

ในงานวิจัยนี้จะใช้อิเล็กโทรดชนิด Ag-AgCl เนื่องจากเป็นแบบไม่โพลาไรซ์(non-polarized) ซึ่งจะมีอิมพีแดนซ์ที่ต่ำกว่าแบบโพลาไรซ์ และให้เสถียรภาพที่ดีกว่า ลักษณะของอิเล็กโทรดที่ใช้เป็นอิเล็กโทรดแบบผิวสัมผัสเพื่อง่ายต่อการวัด และเหมาะในการนำไปใช้งานจริง ซึ่งในการใช้งานจะใช้เจลช่วยลดความต้านทาน(R_1 และR_2 ในรูปที่ 2.5) ระหว่างผิวหนังกับอิเล็กโทรด

ด้วย นอกจากนี้ก่อนที่จะทำการติดอิเล็กโทรดต้องทำความสะอาดด้วยการขูดผิวเบาๆ และเช็ดด้วยแอลกอฮอล์ล้างแผล รูปที่ 2.6 แสดงอิเล็กโทรดแบบ Ag-AgCl ที่ใช้ในการวัดสัญญาณกล้ามเนื้อ



รูปที่ 2.6 อิเล็กโทรดแบบ Ag-AgCl [18]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย