บทที่ 2
ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ทบทวนทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานซ้ำซากและโรค RSI

Ortengren และ คณะ (1991) รายงานว่า "งานยิงสกรู โดยอาศัยแรงลมช่วยเพิ่มผลผลิตได้ แต่ก็เพิ่มความบาดเจ็บอันเนื่องมาจากการทำงานเร็วมาก แรงที่ใช้มาก น้ำหนักของเครื่องมือ และการออกแบบเครื่องมือที่ไม่ดีพอ อุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วน ส่วนมากต้องใช้ powered screw drivers ซึ่งมีความเสี่ยงสูงที่จะทำให้เกิดการเจ็บปวดที่คอ ไหล่ แขนส่วนล่าง และข้อมือ และเชื่อว่าการออกแรงตามแนวแกนของเครื่องยิงสกรูมากและบ่อย ๆ ครั้งเพื่อกดและต้านกับสกรูและชิ้นงานนั้น บางครั้งเราต้องใช้แขนทั้ง 2 ข้าง และน้ำหนักตัวด้วย

Hertzberg (1955) สรุปว่า "การใส่ถุงมือจะช่วยลดความแรง ของแรงลมที่ขับออกมาได้ถึง 20 - 30% และเพื่อลดความแรงให้น้อยที่สุดต้องใช้ถุงมือที่เหมาะพอดีกับผู้ใช้

งานซ้ำซาก (repetitive work) คือ งานที่มีรอบเวลาการทำงานที่น้อยกว่าหรือเท่ากับสองนาทีและทำซ้ำ ๆ กันตลอดช่วงเวลาการทำงาน และถ้าหากงานนั้นมีรอบเวลาการทำงานน้อยกว่าหรือเท่ากับ 30 วินาที จะถือว่าเป็นงานซ้ำซากที่มีความเร็วสูง (highly repetitive work)ซึ่งมีรอบเวลาการทำงานที่เหมาะสมที่สุดในการทำงานคือ 1.5 นาที การทำงานของพนักงานที่มีลักษณะเป็นงานซ้ำซากมักใช้กล้ามเนื้อของร่างกายบริเวณเดิมซ้ำ ๆ กันตลอดช่วงเวลาการทำงาน เช่น นิ้วมือ แขน ไหล่ หรือเท้า (Rodgers และ คณะ, 1986)

การทำงานซ้ำซากใช้พลังงานค่อนข้างต่ำ แต่การใช้กลุ่มกล้ามเนื้อเล็ก ๆ รวมทั้งการหมุนของข้อมือ ข้อศอก และหัวไหล่บ่อย ๆ อาจเป็นสาเหตุของการเกิดอาการอักเสบและระบม ซึ่งอาการเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มของ repetitive strain injury (RSI) กลุ่ม

ของโรคที่จัดเป็น RSI มีตั้งแต่การอักเสบของข้อต่อจนถึงการระบมบวมของกล้ามเนื้อตลอดจนอาการชาของเส้นประสาท (Chatterjee, 1978)

Mathews และ Calabrese (1982) ได้ให้คำจำกัดความของ RSI ไว้ว่าเป็นชื่อที่ใช้เรียกรวมกลุ่มของอาการผิดปกติของกล้ามเนื้อและเอ็นต่าง ๆ โดยปกติมักจะเกิดจากสาเหตุแห่งการเคลื่อนไหวของมือและร่างกายอย่างต่อเนื่อง ซึ่งพบได้ในงานที่มีลักษณะเป็นงานซ้ำซาก RSI จะประกอบไปด้วย Tenosynovitis, Carpal tunnel syndrome, Tendinitis, Epicondylitis และอาการผิดปกติหรือความล้าอื่น ๆ ที่อยู่ในบริเวณกล้ามเนื้อคอและไหล่ ซึ่งมีผลทำให้บั่นทอนประสิทธิภาพการทำงาน คุณภาพและสุขภาพของพนักงานลดลง สามารถอธิบายลักษณะของแต่ละโรคได้ดังนี้

- Tenosynovitis คือ การอักเสบของปลอกเอ็น

- Tendinitis คือ การอักเสบของเนื้อเยื่อเอ็นที่เกิดจากการหนาขึ้นของเส้นเอ็นจนทำให้เกิดความผิดปกติ ปวดเมื่อย และเคลื่อนไหวไม่สบาย มักพบบริเวณมือ ข้อมือ และไหล่

- Peritendinitis คือ การอักเสบของเนื้อเยื่อที่ต่อเชื่อมกับกล้ามเนื้อ-เอ็น

ความเจ็บปวดบริเวณหัวไหล่ มักจะเกิดจากการทำงานหนักของเอ็นสองเส้นบริเวณไหล่ โดยที่เอ็นเส้นหนึ่งจะทำหน้าที่ยกแขนขึ้นด้านข้าง ส่วนเอ็นอีกเส้นหนึ่งจะทำหน้าที่ในการช่วยให้แขนเคลื่อนที่ไปด้านหน้าหรือด้านหลัง

Armstrong (1986) ยอมรับว่า ยังไม่สามารถที่จะกำหนดค่ามาตรฐานเพื่อลดความเสี่ยงของการบาดเจ็บจากปัจจัยเหล่านี้ได้ จึงได้แนะนำวิธีลองผิดลองถูกกับทางเลือกในเครื่องมือ การออกแบบสถานีงาน และ/หรือวิธีดำเนินการ มีหลายกรณีที่ความเครียดจะเกิดขึ้นจากการที่มีการเปลี่ยนการทำงานเพียงเล็กน้อย เช่น แก้ไขตำแหน่งการทำงานหรือการเปลี่ยนแปลงเครื่องมือ การควบคุม RSI จะพิจารณาจากข้อมูลของจำนวนคำร้องทุกข์ของพนักงาน ผลการตรวจทางการแพทย์ และคำร้องขอค่าชดเชย

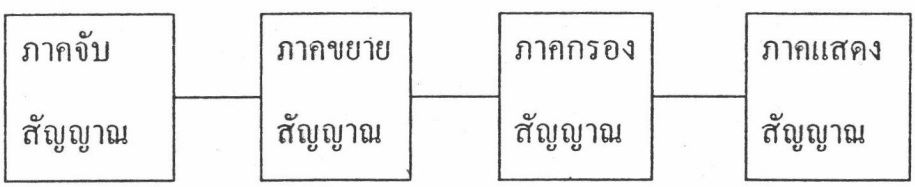
พนักงานที่ทำงานซ้ำซากนอกจากประสบกับโรคทางกล้ามเนื้อและกระดูกแล้วยังพบได้อีกว่าเมื่อพนักงานทำงานไประยะเวลาหนึ่งพนักงานจะมีความรู้สึก

เบื่อหน่าย อ่อนเพลีย ไม่มีความประสงค์ที่จะทำงานทั้งทางร่างกายและจิตใจ, เชื่องช้าและเซื่องซึม ทั้ง ๆ ที่งานซ้ำซากนั้นเป็นงานเบา ทั้งนี้เป็นเพราะพนักงานเกิดความล้าทางจิตใจ (mental fatigue)

ทบทวนทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวกับคลื่นไฟฟ้าและกล้ามเนื้อ

นิวัติ เทพาวราพฤกษ์ (1994) กล่าวถึง การตรวจการทำงานของกล้ามเนื้อทางไฟฟ้าและการควบคุมทางระบบประสาท กล้ามเนื้อ ไว้ดังนี้

- การตรวจการทำงานของกล้ามเนื้อทางไฟฟ้าเมื่อกล้ามเนื้อทำงานจะเกิดคลื่นไฟฟ้าบนกล้ามเนื้อ ผลรวมของคลื่นไฟฟ้าซึ่งสามารถตรวจได้จากเครื่องบันทึกคลื่นไฟฟ้าจากกล้ามเนื้อ EMG (electromyograph) ซึ่งแสดงขั้นตอนการตรวจวัดได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการตรวจวัดค่า electromyogram (EMG)

ขั้นตอนการตรวจวัดค่า EMG

1. ภาคจับสัญญาณ โดยใช้อิเล็กโทรดแบบแผ่น (disc electrode) ติดไว้ที่ผิวหนังตรงกับกล้ามเนื้อที่วัดการทำงาน

2. ภาคขยายสัญญาณ โดยใช้ amplifier เป็นตัวขยายสัญญาณที่อิเล็กโทรดรับมาจากการทำงานของกล้ามเนื้อ ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น

3. ภาคกรองสัญญาณ โดยใช้ filter เป็นตัวตัดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการออกไป

4. ภาคแสดงผล โดยใช้คอมพิวเตอร์แสดงค่าผลของการตรวจวัดออกมาเป็นกราฟและตัวเลข

- การควบคุมทางระบบประสาท เมื่อมีสิ่งกระตุ้นจากภายนอก กระแสประสาทจะวิ่งไปตามใยประสาทปิรามิด ผ่านก้านสมอง มายังเซลล์ประสาทอัลฟ่ามอเตอร์ที่ไขสันหลังไปยังกล้ามเนื้อลายโดยใช้สารเคมีเป็นสารสื่อประสาท จากนั้นจะเกิดคลื่นไฟฟ้าบนเยื่อหุ้มกล้ามเนื้อเกิดการหลั่งแคลเซียมจากถุงเก็บ sarcoplasmic reticulum ทำให้กล้ามเนื้อหดตัวได้โดยใช้สารพลังงาน ATP จากไมโตคอนเดรีย

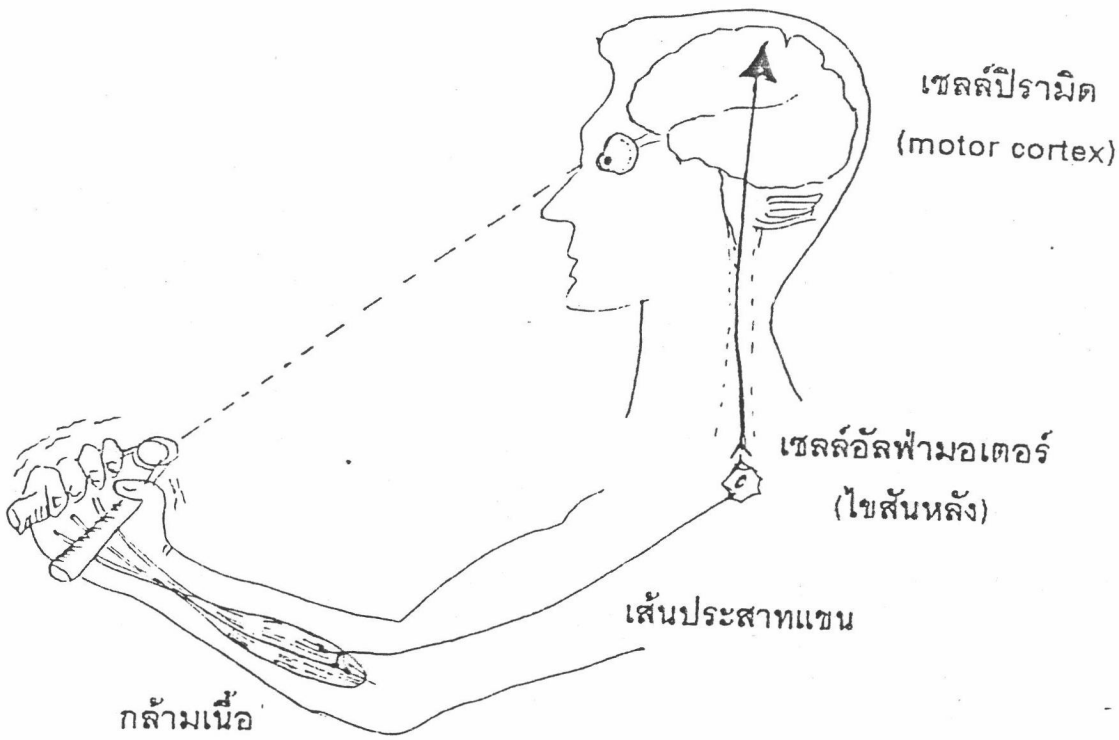
- แหล่งพลังงานของกล้ามเนื้อได้มาจากสารพลังงาน ATP ที่สร้างจากไมโตครอนเดรียของเส้นใยกล้ามเนื้อ (muscle fiber) ได้มาจากการสันดาปสารอาหาร 2 แบบ ซึ่งแตกต่างกันดังนี้

1. แบบ Aerobic Metabolism

เกิดการสันดาปอย่างสมบูรณ์เพราะใช้ O_2 จากกระแสโลหิตจะได้ ATP จำนวนมากมาย เกิดขึ้นในลักษณะงานที่เบา ทำต่อเนื่องช้า มีจังหวะที่เหมาะสมเพราะจะทำให้โลหิตสามารถหล่อเลี้ยงกล้ามเนื้อได้ทันตลอดเวลากล้ามเนื้อสามารถรับสารอาหารได้อย่างต่อเนื่อง แลกเปลี่ยนกับการระบายของเสียจากการสันดาป (metabolites) เช่น CO_2

2. แบบ Anaerobic Metabolism

เกิดการสันดาปไม่สมบูรณ์ของกล้ามเนื้อเพราะเกิดขึ้นในขณะที่กล้ามเนื้ออยู่ในภาวะขาดเลือด สารอาหารที่ใช้คือกลัยโคเจนจะได้ ATP จำนวนน้อย เกิดขึ้นในงานหนัก เช่น ยกน้ำหนัก (ของหนัก) ในช่วงเวลานานๆการเคลื่อนไหวที่รวดเร็วในช่วงเวลาอันสั้นทำให้เกิดกรดแลคติค ซึ่งเป็นของเสียที่เซลล์กล้ามเนื้อต้องขจัดออกไปทางระบบไหลเวียนโลหิต



รูปที่ 2.2 ทางเดินของกระแสประสาท (action potential) จากสมองถึงกล้ามเนื้อ

ชูศักดิ์ เวชแพศย์ (2523) รายงานว่า ประสาทจะมีการกระจายไฟฟ้าโดยส่งสัญญาณไปตามใยประสาท แต่สำหรับกล้ามเนื้อจะมีการกระจายไฟฟ้าโดยส่งสัญญาณไปตามเยื่อหุ้มเซลล์ของกล้ามเนื้อลายเพื่อนำคำสั่งที่ได้รับจากประสาทให้กระจายไปตามกล้ามเนื้อโดยเร็วและกว้างขวาง ทำให้กล้ามเนื้อหดตัวโดยพร้อม เพรียง

ทบทวนทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวกับความล้าของกล้ามเนื้อ

พยนต์ โอภาษี (2524) รายงานว่า ความล้านั้นยากที่จะให้คำนิยามที่แน่นอนได้ อาจหมายถึงการสูญเสียพลังทางร่างกายและทางจิตใจไป หรือหมายถึงการหมดกำลังใจ

ใน การทำงานอย่างใดอย่างหนึ่งต่อไปหรือว่าหมายถึงการหมดเรี่ยวแรงทั้งทางกายและจิตใจที่สามารถทำงานต่อไปได้ ดังนั้นพอสรุปความหมายของความล้าได้ดังนี้

- ความสามารถในการทำงานทั้งทางร่างกาย และทางจิตใจลดน้อยลง

- ความพอใจในการทำงานลดน้อยลง

- ความเต็มใจในการทำงานลดน้อยลงเมื่อหมดเวลาการทำงานแล้ว

Grandjean (1979) ได้แบ่งประเภทของความล้าเป็น 2 ประเภท คือ ความล้าทางกายภาพ (physical fatigue) และความล้าทางจิตใจ (mental fatigue)

- ความล้าทางกายภาพ ทำให้เกิดความเมื่อยล้าเจ็บปวด เนื่องจากการใช้กำลังกล้ามเนื้อมากเกินไป

- ความล้าทางจิตใจ ทำให้รู้สึกตาพร่า อ่อนเพลีย และก่อให้เกิดความเกียจคร้านทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานลดลง เขาได้กล่าวถึงเครื่องมือที่สามารถใช้ในการวัดระดับความล้าทางจิตใจ ได้แก่ เครื่องมือวัดความล้าทางสายตา และเครื่อง มือวัดระยะเวลาตอบสนอง เป็นต้น

Rosa and Colligan (1988) ให้ความเห็นเกี่ยวกับระยะเวลาตอบสนอง (reaction time) ว่าเป็นการวัดค่าความล้าของบุคคลอย่างหนึ่ง โดยการวัดเวลาปฏิกิริยาที่บุคคลมีต่อสิ่งกระตุ้น เช่น แสง เสียง กลิ่น สิ่งกระตุ้นรส และการสัมผัส เป็นต้น สำหรับการตอบสนองนั้น อาจเป็นการแสดงอาการในลักษณะจำเพาะ ที่สามารถจับเวลาได้แน่นอน เช่น การกดปุ่มเครื่องมือเพื่อแสดงสัญญาณ เป็นต้น การวัดระยะเวลาตอบสนองนั้นอาจเป็นแบบการทดสอบมีสิ่งกระตุ้นสิ่งเดียวเพื่อการตอบสนองอย่างเดียว (simple reaction time test) หรือการทดสอบแบบมีสิ่งกระตุ้นหลายสิ่งเพื่อการตอบสนองหลายอย่าง (choice reaction time test) ก็ได้

W. Wallinga และคณะ (1988) รายงานว่า ความสัมพันธ์ของเวลาที่เพิ่มขึ้นกับค่า สูงสุดของ EMG ที่เพิ่มขึ้นทั้งๆที่ยังคงทำงานเท่าเดิมตลอดเวลา แสดงว่าได้เกิดความล้าขึ้นในกล้ามเนื้อ ค่าร้อยละของอัตราการเพิ่มขึ้นของคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อสามารถที่จะนำมาใช้กำหนดช่วงเวลาการทำงานที่สูงที่สุดที่คนงานจะทำได้ทำ

ให้สามารถวางแผนและออกแบบการทำงานได้ให้ถูกต้องตามการยศาสตร์

Knowlton และคณะ (1951) รายงานว่า การเพิ่มขึ้นของค่าคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Electrical Activity (EA)) ของกลุ่มกล้ามเนื้อที่วัดเพียงกลุ่มเดียวจากการวัดกล้ามเนื้อหลายกลุ่มในขณะที่ยังคงทำงานเหมือนเดิมก็แสดงว่ามีความล้าเกิดขึ้นในงานนั้น

Cook (1989) ได้กล่าวถึงการวินิจฉัยในการประเมินความล้าไว้สองทางคือ การประเมินความล้าทางอ้อมและทางตรง ไว้ดังนี้

1. การประเมินความล้าทางอ้อม โดยใช้หลักการว่า เมื่อระดับการทำงานของกล้ามเนื้อเพิ่มขึ้นโอกาสที่จะเกิดความล้าของกล้ามเนื้อก็จะเพิ่มขึ้น เช่นในงานที่ทำซ้ำๆ ถ้าค่า EMG ที่วัดได้เพิ่มขึ้น แสดงว่ากล้ามเนื้อทำงานมากขึ้น ซึ่งสามารถวัดค่า EMG โดยใช้ electrode แบบแผ่นติดไว้บริเวณจุดมอเตอร์ของกล้ามเนื้อนั้น และสรุปปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่า EMG ที่จะก่อให้เกิดความล้ามีดังนี้

- ลักษณะการทำงานของกล้ามเนื้อ เช่นการหดตัวแบบ concentric, isometric หรือ eccentric (Komi, 1973)

- อุณหภูมิ เช่นอุณหภูมิของกล้ามเนื้อและอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม (Petrofsky JS, 1980)

- ท่าทางการทำงาน เช่นการปรับเก้าอี้นั่งทำงานให้เอียง จะลดการทำงานของกล้ามเนื้อส่วนหลังได้ (Soderberg และคณะ, 1980)

2. การประเมินความล้าทางตรง ซึ่งทำได้โดยการวัดค่า EMG ตลอดการทำงานที่จะเกิดความล้าไม่ว่าจะเป็นลักษณะการทำงานของกล้ามเนื้อแบบ isometric contraction หรือ intermittance contraction (ซึ่งเป็นการทำงานที่มีการหยุดพักในแต่ละวัฏจักรการทำงาน) ในการทำงานโดยทั่วไปจะเป็นแบบ intermittance contraction และเป็นการทำงานที่ระดับการหดตัว (การทำงาน) ของกล้ามเนื้อต่ำ ซึ่งทำให้คนงานสามารถทำงานได้ต่อเนื่องเป็นเวลานาน ทำให้เป็นการยากที่จะทำการทดลองจนถึงระดับที่ผู้ถูกทดสอบจะไม่สามารถทำงานได้ต่อไป ดังนั้น Rohmert

และคณะ (1973) จึงได้ทำการทดสอบและเสนอแนะว่า การทำงานที่ 15% ของค่า Maximum Voluntory Contraction (MVC) หรือต่ำกว่าเป็นจุดที่ปลอดภัยสำหรับงานที่ทำต่อเนื่องเป็นเวลานาน และพบว่าโดยวิธีนี้สามารถกำหนดระดับความปลอดภัยของการทำงานที่เหมาะสมได้

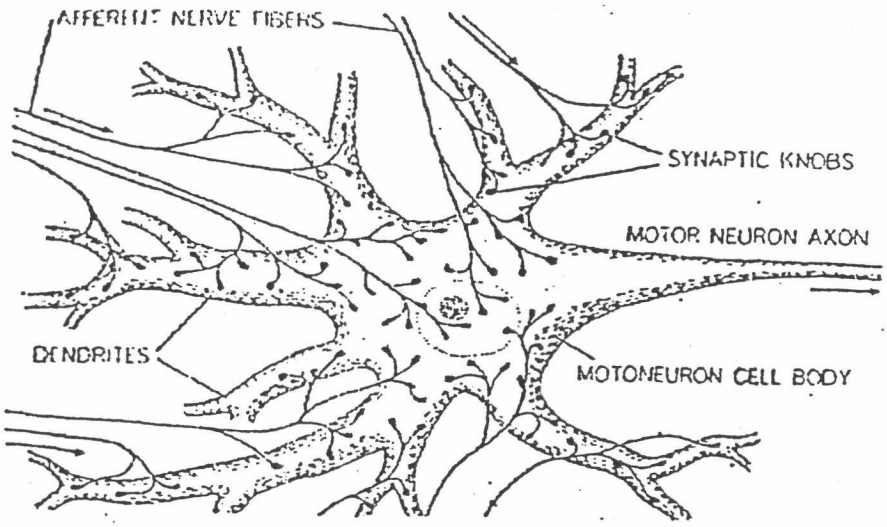
ราตรี สุดทรวง (2531) ได้กล่าวถึงระบบประสาทและกล้ามเนื้อไว้ดังนี้

1. ระบบประสาท

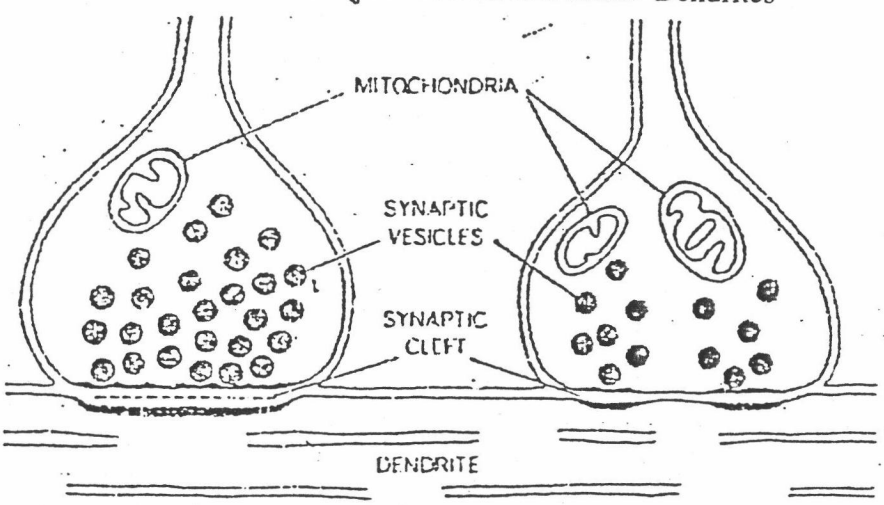
- คุณสมบัติของ cell ทั่วไปคือมีความสามารถตอบสนองต่อสิ่งกระตุ้นทั้งภายใน-นอกร่างกายโดยขบวนการเปลี่ยนแปลงสมดุลย์ของไอออนบริเวณตัวรับของนังเซลล์เมื่อถึงจุด threshold ก็จะทำงาน เช่น เซลล์กล้ามเนื้อหดตัวเซลล์ต่อมหลั่งสารที่สร้างขึ้น เซลล์ประสาทส่งสัญญาณที่เป็นข้อมูลในรูปของกระแสประสาท (สัญญาณประสาท) ซึ่งเรียกคุณสมบัตินี้ว่า "conductivity"

- สัญญาณประสาทคือสัญญาณที่เกิดจากการกระจายของศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน (action potential) ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นที่ผนังเซลล์ประสาทและกระจายไปจุดอื่นๆ

- ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานคือการที่เกิดมีความต่างศักย์เปลี่ยนแปลงชั่วคราว โดยมีปัจจัยการเพิ่มขึ้นของความสามารถในการซึมผ่านของผนังเซลล์ (permeability) ของ Na^+ ทำให้Na^+ซึ่งในภาวะปกติจะอยู่ภายนอกเซลล์แพร่เข้ามาในเซลล์ทำให้เกิดการลดลงของความต่างศักย์ของผนังเซลล์อย่างรวดเร็วภายในเวลาอันสั้นและกลับคืนสู่ปกติ ทำให้สามารถวัดศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานโดยการวางขั้วไฟฟ้าไว้บนผิวของเส้นประสาทที่จะวัดการทำงาน (active) ส่วนอีกขั้วหนึ่งวางที่ อวัยวะที่ "inactive" เช่นกระดูก ผิวหนัง



รูปที่ 2.3 Meteneuron ซึ่งมี Synaptic Knobs มาเกาะอยู่ที่ตัวเซลล์ประสาทและ Dendrites



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของ Synapse

- การเคลื่อนที่ของกระแสประสาทเกิดจากศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานที่เกิดต่อไปเรื่อย ๆ ทำให้กระแสประสาทถูกส่งต่อไปได้ สำหรับในประสาทเส้นใหญ่กระแสประสาทจะเคลื่อนที่เร็วกว่าในประสาทเส้นเล็กเพราะ axon ของประสาทเส้นใหญ่มีพื้นที่หน้าตัดมากกว่าประสาทเส้นเล็ก จึงเกิดความต้านทานน้อย

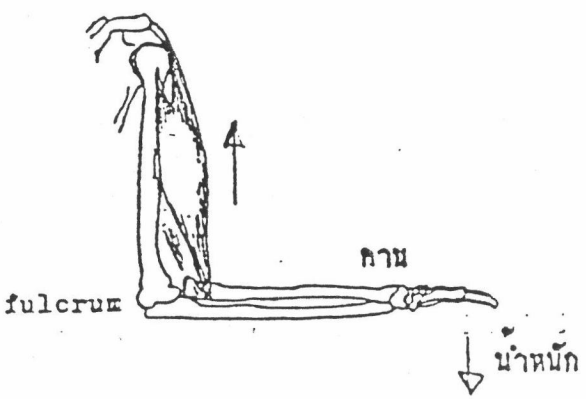
ข้อมูลหรือข่าวสารจะผ่านระบบประสาทส่วนกลางไปตามเซลล์ประสาท จากตัวหนึ่งไปอีกตัวหนึ่ง บริเวณรอยต่อของเซลล์ประสาทแต่ละตัวนี้เรียกว่า "synapses" (ดูรูปที่ 2.3 และ 2.4) ส่วนปลายสุดของประสาทจะมีปุ่มเล็ก ๆ รวมตัวกันเรียกว่า "synaptic knobs" หรือ "presynaptic terminal"

presynaptic terminal ประกอบด้วย synaptic vesicles (ภายในจะมีสารสื่อประสาท) และไมโตรครอนเดรีย (จะให้ ATP เพื่อใช้สร้างสารสื่อประสาท)

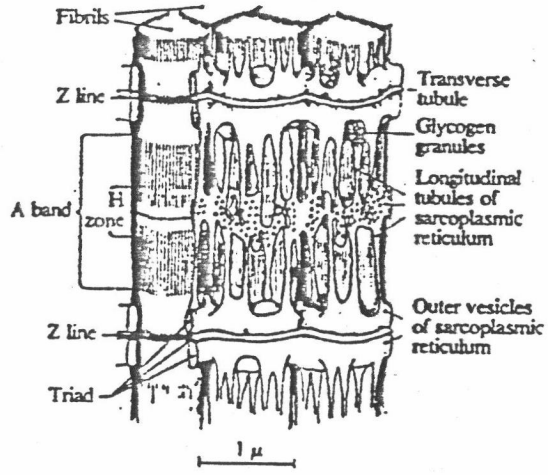
เมื่อศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานแผ่มาทั่ว presynaptic terminal จะทำให้เกิด depolarization ของผนังเซลล์บริเวณนั้นทำให้มีการหลั่งสารสื่อประสาทจาก vesicles เข้าสู่ cleft สารสื่อประสาทจะไปรวมกับตัวรับที่ผนังเซลล์ postsynaptic area เกิดมีการเปลี่ยนแปลง Permeability ของผนังเซลล์ซึ่งอาจเกิดการกระตุ้นหรือยับยั้งการทำงานของเซลล์ขึ้นอยู่กับชนิดของสารสื่อประสาทนั้น

2. <u>กล้ามเนื้อลาย</u>

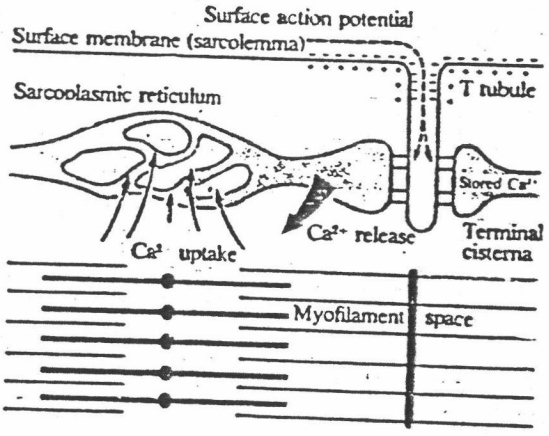
กล้ามเนื้อลายทำงานภายใต้อำนาจจิตใจโดยจะทำงานร่วมกับกระดูกเพื่อให้เกิดการเคลื่อนไหว(โดยที่กระดูกเป็นคาน) การหดตัวของกล้ามเนื้อลายจะทำให้เกิดแรงสู้กับน้ำหนักเพื่อให้เกิดสมดุล (ดูรูป 2.5)



รูปที่ 2.5 การทำงานของกล้ามเนื้อ Biceps ร่วมกับกระดูก



รูปที่ 2.6 โครงสร้าง longitudinal tubule (LT) และ transverse tubule (TT) ที่ต่อเป็น triad กับ Z line



รูปที่ 2.7 แผนผังแสดง excitation-contraction coupling

ภายในเซลล์ 1 เซลล์ของกล้ามเนื้อลายประกอบด้วย (ดูรูปที่ 2.6)

1. Nucleus (ไมโตรคอนเดรีย นิวเคลียส)อยู่ที่ผนังเซลล์ซึ่งทำให้กล้ามเนื้อลายหดตัวได้เร็วกว่ากล้ามเนื้อชนิดอื่นและให้สาร ATP

2. Sarcolemma (ผนังเซลล์กล้ามเนื้อ) ได้ยื่นลงไปในmyofibrilsส่วนของผนังเซลล์ที่ยื่นเข้าไปในเซลล์เรียกว่า transverse tubular system (T system หรือ T tubule ดูรูปที่ 2.7) ซึ่งทำหน้าที่กระจาย "ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน" จากผนังเซลล์ไปยัง myofibrils ที่อยู่กลางเซลล์ทำให้ myofibril แต่ละส่วนได้รับ "ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน" อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นถ้าให้สารเคมีไปทำลาย "T system" แม้จะมี"ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงาน" เกิดขึ้น แต่ก็จะไม่มีการหดตัวเกิดขึ้น

3. Sacroplasmic reticulum จะหุ้ม myofilaments ไว้ตลอดความยาวของมัน ทำให้ myofilaments รวมตัวกันเป็น myofibrils และ sacroplasmic reticulum จำเป็นต้องได้รับศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานจึงจะทำกล้ามเนื้อหดตัวได้ดังนั้นบริเวณปลายสุดของมันจึงขยายออกเรียกชื่อว่า terminal cisterna และจะประกอบกันเป็น triad กับ T system

4. Myofibrils แต่ละปล้องของ Myofibril เรียกว่า "sacromere" ภายใน sacromere ประกอบด้วย "myofilament" ซึ่งมี 2 ชนิด คือ actin และ myosin

5. Cross bridges รอยต่อระหว่าง myosin และ actin โดยที่ส่วนหัวของ myosin จะจับสาวใย actin ทั้ง 2 ข้าง ทำให้ความยาวของ "sacromere" ลดลง นั่นคือกล้ามเนื้อหดตัว

3. ลำดับการทำงานของกล้ามเนื้อ

เมื่อมีสิ่งกระตุ้นทำให้มีกระแสประสาทเกิดขึ้นที่รอยต่อของเซลล์ประสาทจะมีการหลั่งสารสื่อประสาทเพื่อไปรวมตัวกับตัวรับที่ผนังเซลล์กล้ามเนื้อทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง permeability ของผนังเซลล์กล้ามเนื้อต่อไอออนต่าง ๆ (K^+, Na^+) เกิดการ depolarization (ลดความต่างศักย์) ที่ผนังเซลล์กล้ามเนื้อ ถ้าเกิด depolarization ไม่มากพอก็จะอยู่เฉพาะที่ end plate แต่ถ้าเกิดมากพอถึงจุด threshold ก็จะเกิด"ศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานของกล้ามเนื้อ (muscleimpulse) กระจายไปทั่วผนังเซลล์กล้ามเนื้อไปสู่ T ystemทำให้กล้ามเนื้อหดตัวกล้ามเนื้อจะหดตัวหรือทำงานได้ต้องมีการกระจายของศักย์ไฟฟ้าขณะทำงานที่ผนังเซลล์ด้วย ดังนั้นจึงสามารถวัดค่าความต่างศักย์ (volt) ที่เกิดขึ้นได้เพื่อวัดการทำงานของกล้ามเนื้อ เมื่อกล้ามเนื้อหดตัวก็จะมีการคลายตัวเพื่อ

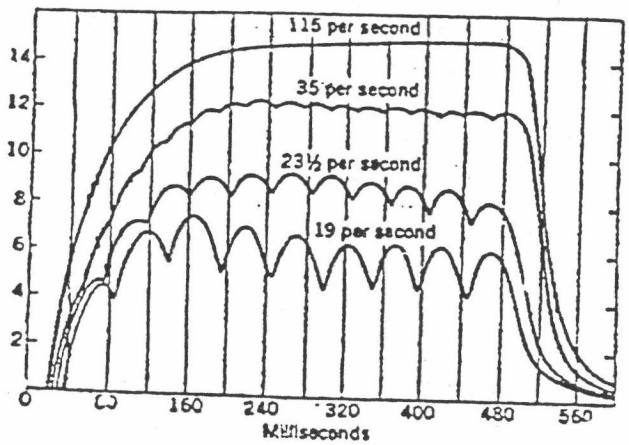
เข้าสู่สภาวะ ปกติโดยหลังจากการกระตุ้นหยุดลง Ca^{++} จะกลับเข้าสู่ Sarcoplasmic reticulumและในขบวนการ Ca^{++} ปั๊มนี้ Ca^{++} จะหลุดจาก myofibrils ไปเกาะผนังของ sarcoplasmic reticulum แล้วจะมีเอนซัยม์ ATPase มาย่อย ATP ทำให้เกิดพลังงานปั๊มเอา Ca^{++} เข้ามาอยู่ใน lumen ของ Sarcoplasmic reticulum กลับเข้าสู่ terminal isternae ดังนั้นเมื่อไม่มี Ca^{++} ก็จะทำให้ actin และ myosinแยกตัวออกจากกันทำให้กล้ามเนื้อคลายตัวกลับสู่สภาวะปกติ

4. <u>การตอบสนองการกระตุ้นหลายครั้ง</u>

เมื่อใช้กระแสไฟขนาดสูงสุดกระตุ้นกล้ามเนื้อมากกว่า 1 ครั้งที่มีความแรงเท่ากัน กล้ามเนื้อจะตอบสนองหรือไม่นั้นขึ้นอยู่กับระยะห่างของเวลาที่กระตุ้น

ระยะดื้อสมบูรณ์ คือระยะที่กล้ามเนื้อจะไม่ตอบสนองเลย (ระยะเวลานี้จะแตกต่างกันในแต่ละกล้ามเนื้อ)

ระยะดื้อสัมพัทธ์ คือระยะที่กล้ามเนื้อตอบสนองได้แต่ต้องกระตุ้นแรงขึ้น



รูป 2.8 การเกิด tetanus จากการเพิ่มความถี่ของการกระตุ้น

กราฟบนสุดแสดง complete tetanus

Tetanus คือการกระตุ้นกล้ามเนื้อหลายๆครั้งด้วยความถี่พอเหมาะโดยให้มีการกระตุ้นครั้งต่อไปมาถึงก่อนที่การกระตุ้นครั้งแรกๆจะคลายตัว (ดูรูปที่2.8) การกระตุ้นครั้งต่อไปจะเชื่อมติดกันกับการกระตุ้นครั้งแรกทำให้เห็นคลื่น (partialtetanus) หรือเส้นตรง (complete tetanus) จากรูปที่ 2.8 พบว่าความสูงของการหดตัวสูง

มากกว่าการหดตัวครั้งเดียว เพราะมี summation และไม่ต้องเสียพลังงานในการดึง elastic element ให้ตึงใหม่ ความถี่ของการเกิด complete tetanus จะแตกต่างกันตามชนิดของกล้ามเนื้อ เช่นกล้ามเนื้อที่หดตัวเร็วจะมีความถี่ของการเกิด complete teanus 350 ครั้ง/วินาที กล้ามเนื้อที่หดตัวช้าจะมีความถี่ของการเกิด complete teanus 30 ครั้ง/วินาที กล้ามเนื้อที่หดตัวปานกลางจะมีความถี่ของการเกิด complete teanus 60 ครั้ง/วินาที แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและสภาวะของกล้ามเนื้อ โดยกล้ามเนื้อที่ล้าจะทำการหดตัวยาวขึ้น

กล่าวโดยสรุปการศึกษาครั้งนี้จะใช้ค่าเฉลี่ยร้อยละของการเปลี่ยนแปลงคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อต่อวินาที มาเป็นค่าของตัวแปรตอบสนอง (Response) ตามวิธีการของ Wallinga (1988) โดยค่าคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Electrical Activity หรือ EA) แต่ละค่าที่นำมาพิจารณาได้มาจากค่า EA ที่สูงสุดในแต่ละวัฏจักรการทำงานตลอดช่วงเวลา 2 ชั่วโมงที่ทำการทดลองแต่ละครั้ง ดังรายละเอียดในบทที่ 4