

**สรีรวิทยา-พยาธิสรีรวิทยา
ระบบกล้ามเนื้อและกระดูก**

สรีรวิทยา-พยาธิสรีรวิทยา ระบบกล้ามเนื้อและกระดูก

ภนารี บุษราคัมตระกูล



สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2554

220.-

ภณาริ บุษราคัมตระกูล

สรีรวิทยา-พยาธิสรีรวิทยาแบบกล้ำเนื้อและกระดูก

1. ระบบกล้ำเนื้อและโครงกระดูก. 2. ระบบกล้ำเนื้อและโครงกระดูก -- โรค.

612.7

ISBN. 978-974-03-2749-3

สพจ. 1497/2



สรรคุดคำวิชาการ ผู้สังคม
www.ChulaPress.com
Knowledge to All

ลิขสิทธิ์ของสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ครั้งที่ 1 จำนวน 1,000 เล่ม พ.ศ. 2553

พิมพ์ครั้งที่ 2 จำนวน 1,000 เล่ม พ.ศ. 2554

การผลิตและการลอกเลียนหนังสือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น

ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้จัดทำน่าย ศูนย์หนังสือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

สาขา ศาลาพระเกี้ยว โทร. 0-2218-7000-3 โทรสาร 0-2255-4441
สยามสแควร์ โทร. 0-2218-9881-2 โทรสาร 0-2254-9495
ม.นเรศวร จ.พิษณุโลก โทร. 0-5526-0162-4 โทรสาร 0-5526-0165
ม.เทคโนโลยีสุรนารี จ.นครราชสีมา โทร. 0-4421-6131-4 โทรสาร 0-4421-6135
ม.บูรพา จ.ชลบุรี โทร. 0-3839-4855-9 โทรสาร 0-3839-3239
โรงเรียนนายร้อย จปร. จ.นครนายก โทร. 0-3739-3023 โทรสาร 0-3739-3023
จัตุรัสจามจุรี (CHAMCHURI SQUARE) ชั้น 4 โทร. 0-2160-5301-2 โทรสาร 0-2160-5304
รัตนานิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9 โทรสาร 0-2950-5405
Call Center (จัดส่งทั่วประเทศ) โทร. 0-2255-4433 <http://www.chulabook.com>

เครือข่าย ศูนย์หนังสือ ม.แม่ฟ้าหลวง จ.เชียงราย โทร. 0-5391-7020-4 โทรสาร 0-5391-7025
ศูนย์หนังสือ ม.วลัยลักษณ์ จ.นครศรีธรรมราช โทร. 0-7567-3648-51 โทรสาร 0-7567-3652
ร้านหนังสือบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) รามคำแหง 43/1 โทร. 0-2538-2573
โทรสาร 0-2539-7091
ศูนย์หนังสือ ม.ราชภัฏเชียงราย จ.เชียงราย โทร. 0-5377-6000
ศูนย์หนังสือ ม.อุบลราชธานี จ.อุบลราชธานี โทร. 0-4535-3140, 0-4528-8400-3
ต่อ 1803 โทรสาร 0-4535-3145
ศูนย์หนังสือ ม.ราชภัฏสุราษฎร์ธานี จ.สุราษฎร์ธานี โทร. 0-7735-5466, 0-7791-3333
โทรสาร 0-7735-5468
ศูนย์หนังสือโรงเรียนเทคโนโลยีไออาร์พีซี จ.ระยอง โทร. 0-3889-9130-2 ต่อ 331
โทรสาร 0-3889-9130 ต่อ 301

**ร้านค้า, หนังสือเข้าชั้นเรียน ติดต่อแผนกขายส่ง สาขารัตนาธิเบศร์ (แยกแคราย) โทร. 0-2950-5408-9
โทรสาร 0-2950-5405**

กองบรรณาธิการ : ทิพวรรณ ไหละสุต

พิสูจน์อักษร : รวิวรรณ จันทรมั่น

ออกแบบปกและรูปเล่ม : I Can Do

พิมพ์ที่ : บริษัท วี. พรินท์ (1991) จำกัด โทร. 0-2451-3010 โทรสาร 0-2451-3016

คำนำพิมพ์ครั้งที่ 2

เนื่องจากหนังสือสรีรวิทยา-พยาธิสรีรวิทยาระบบกล้ามเนื้อและกระดูกที่ได้จัดพิมพ์ครั้งที่ 1 เมื่อเดือนพฤษภาคม 2553 ได้รับความสนใจและการตอบรับจากนิสิตนักศึกษา รวมทั้งผู้สนใจและประชาชนทั่วไปเป็นอย่างดี ดิฉันรู้สึกยินดีและขอขอบคุณผู้มีอุปการคุณทุกท่านที่มอบความไว้วางใจแก่ดิฉัน ทางสำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยจึงมีความประสงค์ที่จะจัดพิมพ์หนังสือเล่มดังกล่าวเป็นครั้งที่ 2 ดิฉันหวังว่าหนังสือเล่มนี้จะมีประโยชน์ต่อท่านทั้งหลายไม่มากนักน้อย ดิฉันขอขอบพระคุณบุพการี ครูบาอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ดิฉันตั้งแต่ระดับประถมศึกษาจนถึงระดับปริญญาเอก ทำนี้ขอขอบคุณสามีและบุตรสาวทั้ง 2 ที่เป็นกำลังใจให้กับดิฉันตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภนารี บุษราคัมตระกูล

ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พฤศจิกายน 2554

คำนำพิมพ์ครั้งที่ 1

หนังสือสรีรวิทยา-พยาธิสรีรวิทยาระบบกล้ามเนื้อและกระดูกเล่มนี้ ดิฉันเขียนขึ้นโดยรวบรวมและเรียบเรียงความรู้ทางด้านสรีรวิทยาและพยาธิสรีรวิทยาจากตำราต่างประเทศ ประสบการณ์การทำงานทางด้านคลินิกกายภาพบำบัดในโรงพยาบาลชลบุรีที่ได้สัมผัสและคลุกคลีกับผู้ป่วยที่หลากหลาย และประสบการณ์ด้านการเรียนการสอนรายวิชาสรีรวิทยาทางการแพทย์ สรีรวิทยาสำหรับทันตแพทย์ สรีรวิทยาสำหรับพยาบาล พยาธิสรีรวิทยาสำหรับพยาบาล และประสาทสรีรวิทยาแก่นิสิตแพทย์ทันตแพทย์ พยาบาล ชั้นปีที่ 2 และนิสิตระดับบัณฑิตศึกษาด้านสัตวศาสตร์ สาขาวิชาสัตวศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นแหล่งศึกษาค้นคว้าหาความรู้เพิ่มเติมด้วยตนเองสำหรับนิสิตแพทย์ และนิสิตสาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพอื่น ๆ รวมทั้งผู้สนใจและประชาชนทั่วไป เนื้อหาของหนังสือสรีรวิทยาและพยาธิสรีรวิทยาของระบบกล้ามเนื้อและกระดูกเล่มนี้ประกอบด้วย 4 บท บทที่ 1 และ 3 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับสรีรวิทยาของกล้ามเนื้อลายและสรีรวิทยาของกระดูก ซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานทางสรีรวิทยาของกล้ามเนื้อลายและกระดูกตามลำดับ ส่วนบทที่ 2 และ 4 เป็นเนื้อหาเกี่ยวกับพยาธิสรีรวิทยาของกล้ามเนื้อลายและกระดูก ซึ่งเป็นความรู้เกี่ยวกับสาเหตุ ปัจจัยที่ทำให้เกิดโรค อาการของโรคและพยาธิสภาพของโรคในระบบกล้ามเนื้อลายและกระดูก ดิฉันหวังว่าหนังสือเล่มนี้คงจะมีประโยชน์ต่อท่านทั้งหลายไม่มากนักน้อย ดิฉันขอขอบพระคุณบุพการี ครูบาอาจารย์ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทความรู้แก่ดิฉันตั้งแต่เล็กจนเติบโตใหญ่ ท้ายนี้ ขอขอบคุณสามีและลูกสาวทั้งสองที่เป็นกำลังใจให้กับดิฉันตลอดมา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภนารี บุษราคัมตระกูล

ภาควิชาสรีรวิทยา คณะแพทยศาสตร์

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

พฤษภาคม 2553

สารบัญ

หน้า

บทที่ 1 สรีรวิทยาของกล้ามเนื้อ	1
โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของกล้ามเนื้อลาย.....	2
ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อลาย	3
Thin filament.....	4
Thick filament (myosin filament).....	6
การกระตุ้นกล้ามเนื้อ (Excitation of Skeletal Muscle)	6
Excitation Contraction Coupling (ECC).....	6
การถ่ายทอดสัญญาณประสาท (Neuromuscular transmission)	8
คุณสมบัติทางไฟฟ้าของกล้ามเนื้อลาย	10
คุณสมบัติทางกลของกล้ามเนื้อลาย	
(Mechanical events of skeletal muscle)	12
Single Muscle Twitch	12
Motor unit summation	13
องค์ประกอบเชิงกลของกล้ามเนื้อลาย	16
กลไกการหดตัวของกล้ามเนื้อลาย	17
ชนิดของการหดตัวของกล้ามเนื้อ	18
เมแทบอลิซึมของกล้ามเนื้อลาย	20
กล้ามเนื้อล้า (Muscle fatigue).....	22
ชนิดของกล้ามเนื้อลาย.....	24
การวินิจฉัยโรค	26
หนังสืออ้างอิง	28

บทที่ 2 พยาธิสรีรวิทยาของกล้ามเนื้อ	29
โรคกล้ามเนื้ออ่อนแรง (Muscular dystrophy)	30
โรคกล้ามเนื้ออ่อนแรงชนิดร้าย (Myasthenia gravis: MG)	34
โรค Lambert Eaton Myasthenic Syndrome (LEMS)	37
การปรับเปลี่ยนขนาดของกล้ามเนื้อ	38
กล้ามเนื้อโตเกิน (Muscle Hypertrophy)	38
กล้ามเนื้อลีบ (Muscle Atrophy)	39
โรค Myotonic syndromes.....	40
ตะคริวกล้ามเนื้อ (Muscle cramps).....	42
กล้ามเนื้อฉีกขาด (Muscle strains).....	42
เอ็นฉีกขาด (Sprains and strains of tendons and ligaments).....	43
โรคปวดกล้ามเนื้อ กระตุกและข้อ (Fibromyalgia).....	44
พยาธิสรีรวิทยา	46
อาการแสดงทางคลินิก	46
โรคไมโอโกลบินูเรีย (Myoglobinuria or rhabdomyolysis).....	47
โรค Amyotrophic Lateral Sclerosis (ALS)	48
โรค Guillain-Barre' Syndrome	49
โรคโปลิโอ (Poliomyelitis)	50
โรคเมแทบอลิซึมของกล้ามเนื้อผิดปกติ (Metabolic disease of muscles)	50
McArdle disease.....	51
โรคขาดไขมัน (Lipid deficiencies)	51
โรคกล้ามเนื้ออักเสบ (Inflammatory muscle disease).....	52
Myositis	52
โรคกล้ามเนื้อจากพิษสุรา (Toxic myopathies).....	53

เนื้องอกกล้ามเนื้อ (Muscular tumors).....	54
Rhabdomyoma.....	54
Rhabdomyosarcoma.....	54
หนังสืออ้างอิง	55
บทที่ 3 สรีรวิทยาของกระดูกและข้อต่อ	57
การควบคุมความเข้มข้นของแคลเซียมและฟอสเฟต	
ภายนอกเซลล์และในเลือด	58
ความเข้มข้นของฟอสเฟตภายนอกเซลล์.....	59
การดูดซึมและการกำจัดแคลเซียมและฟอสฟอรัส	60
การกำจัดแคลเซียมและฟอสเฟต.....	61
ความสัมพันธ์ระหว่างกระดูก แคลเซียม และฟอสเฟต	61
ออร์แกนิกเมทริกซ์ของกระดูก (Organic matrix of bone).....	62
Bone salts	62
ความแข็งแรงของกระดูก	63
กลไกการเกิด bone calcification.....	63
การแลกเปลี่ยนแคลเซียมระหว่างกระดูกและของเหลวภายนอกเซลล์.....	64
Bone remodeling (Bone deposition และ Bone resorption).....	65
การสร้างกระดูก (Bone deposition)	65
การสลายกระดูก (Bone resorption).....	65
สมดุลระหว่างการสร้างกระดูกและการสลายกระดูก	66
การควบคุมการสร้างกระดูก.....	67
การซ่อมแซมกระดูกหักกระตุ้นการทำงานของเซลล์สร้างกระดูก.....	68
วิตามินดี (Vitamin D).....	68
ผลของวิตามินดีต่อกระดูกและพาราไทรอยด์ฮอร์โมน.....	70
พาราไทรอยด์ฮอร์โมน (Parathyroid hormone, PTH)	70
กายวิภาคและสรีรวิทยาของต่อมพาราไทรอยด์.....	70
พาราไทรอยด์ฮอร์โมนเพิ่มการดูดกลับแคลเซียมฟอสเฟตจากกระดูก.....	71

การสลายกระดูก (Osteolysis)	72
กระตุ้นการทำงานของเซลล์สลายกระดูก	73
พาราไทรอยด์ฮอร์โมนลดการขับแคลเซียมและเพิ่มการขับฟอสเฟตที่ไต	74
พาราไทรอยด์ฮอร์โมนเพิ่มการดูดกลับแคลเซียมและฟอสเฟตที่ลำไส้.....	74
การควบคุมการหลั่งพาราไทรอยด์ฮอร์โมนโดยความเข้มข้น ของแคลเซียมไอออน.....	75
แคลซิโทนิน	76
ความเข้มข้นแคลเซียมในเลือดที่เพิ่มขึ้นกระตุ้นการหลั่งแคลซิโทนิน.....	76
ผลของแคลซิโทนินต่อความเข้มข้นของแคลเซียมในเลือด	76
การประยุกต์ความรู้ทางสรีรวิทยาของกระดูกและข้อต่อ มาใช้ในชีวิตประจำวัน.....	77
กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน (Newton's laws of motion).....	78
คาน (Levers)	78
การได้เปรียบเชิงกล (Mechanical advantage).....	78
หนังสืออ้างอิง	82
บทที่ 4 พยาธิสรีรวิทยาของกระดูกและข้อต่อ	83
การบาดเจ็บของกระดูก (Skeletal Trauma).....	84
การจำแนกชนิดของกระดูกหัก (Classification of fracture)	85
ข้อหลุด (Dislocation) และข้อเคลื่อน (Subluxation)	89
การแพลงของเอ็นกล้ามเนื้อและเอ็น (Sprains and strains ของ tendons and ligaments).....	91
เอ็นอักเสบ (Tendonitis และ Epicondylitis).....	94
ถุงลั่นเยื่ออักเสบ (Bursitis).....	95
ความผิดปกติของกระดูก (Disorders of bones).....	96
กลุ่มโรคกระดูกที่เกิดจากเมแทบอลิซึมผิดปกติ (Metabolic bone diseases)	96
โรคกระดูกพรุน (Osteoporosis).....	97
โรคกระดูกนุ่ม (Osteomalacia)	102

กลุ่มโรคติดเชื้อของกระดูก (Infectious bone disease)	104
โรคกระดูกอักเสบ (Osteomyelitis).....	104
กลุ่มโรคข้อที่ไม่มีการอักเสบ (Noninflammatory joint disease).....	109
ชนิดของโรคข้อเสื่อม (Types of osteoarthritis)	110
กลุ่มโรคข้อที่มีการอักเสบ (Inflammatory joint disease).....	113
โรคข้ออักเสบรูมาตอยด์ (Rheumatoid arthritis: RA).....	114
โรคข้อยึดติด (Ankylosing spondylitis: AS).....	117
เกาต์ (Gout)	120
กระดูกสันหลังคด (Scoliosis)	124
ชนิดของกระดูกสันหลังคด	124
เนื้องอกกระดูก (Bone tumors)	127
มะเร็งกระดูก (Osteogenic tumors: osteosarcoma)	127
เนื้องอกกระดูกอ่อน (Chondrogenic tumors: chondrosarcoma)	129
มะเร็งเส้นใย (Collagenic tumor: fibrosarcoma)	129
เนื้องอกไขกระดูก (Myelogenic tumor)	130
เนื้องอกชนิด Giant cell tumor	130
เนื้องอกไขกระดูก (Myeloma).....	131
หนังสืออ้างอิง	133
บรรณานุกรม	135
ดัชนี	137



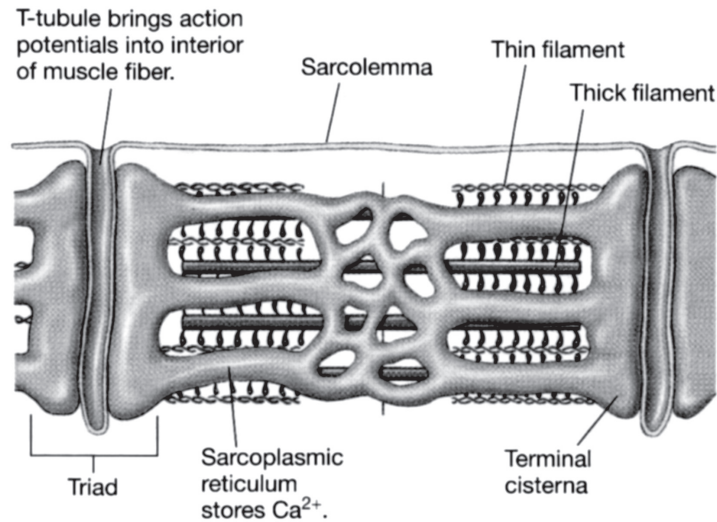
1

สรีรวิทยาของกล้ามเนื้อ (Physiology of muscles)

กล้ามเนื้อลายเป็นเนื้อเยื่อที่ห่อหุ้มกระดูกและอวัยวะภายในของร่างกาย ร่างกายประกอบ ด้วยส่วนที่เป็นกล้ามเนื้อลายประมาณ 40% ของน้ำหนักร่างกาย แต่ถ้ารวมกล้ามเนื้อหัวใจและกล้ามเนื้อเรียบด้วย ร่างกายประกอบด้วยส่วนที่เป็นกล้ามเนื้อทั้งหมด 50% ของน้ำหนักร่างกาย

โครงสร้างและการจัดเรียงตัวของกล้ามเนื้อลาย

เซลล์ตั้งต้นของกล้ามเนื้อกำเนิดจากเนื้อเยื่อชั้นเมโซเดิร์ม (mesoderm) ของตัวอ่อน เซลล์กล้ามเนื้อแต่ละเซลล์ประกอบด้วยนิวเคลียสจำนวนมาก และมีรูปร่างเป็นทรงกระบอก มีเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 10-100 ไมครอน เส้นใยกล้ามเนื้อมีความยาวเท่ากับความยาวของมัดกล้ามเนื้อซึ่งสามารถยาวได้มากถึง 20 เซนติเมตร เส้นใยกล้ามเนื้อแต่ละเส้นประกอบด้วยหน่วยย่อย ๆ เรียกว่าเส้นใยฝอยกล้ามเนื้อ (myofibril) หรือเส้นใยฝอย (fibril) ในกล้ามเนื้อ มีฟิลาเมนต์ (filament) ที่สำคัญอยู่ 2 ชนิดที่จัดเรียงขนานกันตามแนวยาวของกล้ามเนื้อ คือ thick และ thin filament การจัดเรียงตัวของ thick และ thin filament สลับกันทำให้เห็นเป็นแถบทึบและจางของกล้ามเนื้อลาย บริเวณแถบทึบเรียกว่า Anisotropic band (A-band) บริเวณแถบจางเรียกว่า Isotropic band (I-band) A-band มีความยาว 1.6 ไมครอนซึ่งเท่ากับความยาวของ thick filament ส่วน I band มีความยาวไม่คงที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เนื่องจากการประสานกันระหว่าง thick และ thin filament บริเวณกึ่งกลางของ I band จะพบแถบเล็ก ๆ สีเข้มเรียกว่า Z-line ระยะจาก Z-line หนึ่งไปยังอีก Z-line หนึ่งเรียกว่า ซาร์โคเมอร์ซึ่งเป็นหน่วยย่อยที่สุดที่ทำหน้าที่หดตัวได้ ในสภาวะพักของกล้ามเนื้อหนึ่ง ซาร์โคเมอร์มีความยาว 2.2 ไมครอน



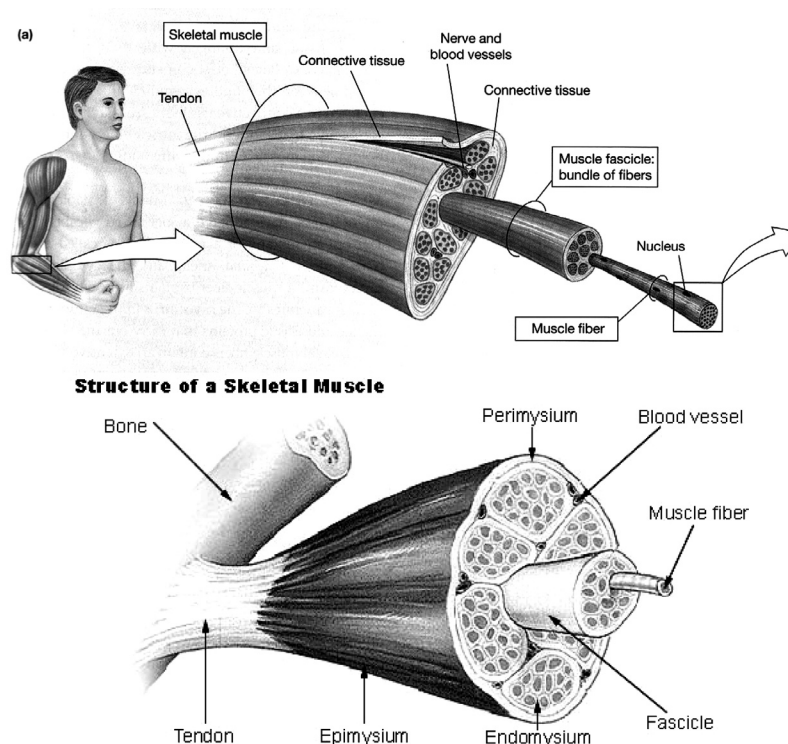
รูปที่ 1.1 แสดงที่-ทิวบูลและซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม
(ดัดแปลงจาก Silverthorn และคณะ, 2004)

เยื่อหุ้มเส้นใยกล้ามเนื้อเรียกว่าซาร์โคเลมมา (sarcolemma) หรือพลาสมาเมมเบรน (plasma membrane) ของเหลวที่อยู่ภายในเซลล์กล้ามเนื้อเรียกว่า ซาร์โคพลาซึม (sarcoplasm) หรือไมโอพลาซึม (myoplasm) ซึ่งมีเส้นใยฝอยกล้ามเนื้อ (myofibril) ลอยอยู่มากมาย และช่องว่างระหว่างเส้นใยฝอยจะมีไมโทคอนเดรียและซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมแทรกตัวอยู่ ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมของกล้ามเนื้อมีลักษณะเป็นท่อยาวที่วิ่งขนานไปตามเส้นใยฝอยและแผ่ออกโอบล้อมเส้นใยฝอยแต่ละเส้นไว้โดยรอบ ที่บริเวณส่วนปลายของซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัมแต่ละอันที่วางตัวประกบ Transverse tubule (T-tubule) มีการขยายขนาดออกเป็นกระเปาะเรียกว่า lateral sac ซึ่งบรรจุแคลเซียมไว้ภายใน (รูปที่ 1)

ส่วนประกอบของกล้ามเนื้อลาย

ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเซลล์ 85% และส่วนที่เป็นน้ำ 15% ส่วนที่เป็นเซลล์แบ่งออกเป็น น้ำ 75% และส่วนที่เป็นของแข็ง 25% ส่วนที่เป็นของแข็งประกอบด้วยส่วนที่เป็นโปรตีนประมาณ 80% และสารอื่น ๆ 20% ส่วนที่เป็นโปรตีนนี้ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นใยกล้ามเนื้อ 65% และซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม 35% โปรตีนซึ่งเป็นส่วนประกอบของเส้นใยกล้ามเนื้อ ได้แก่ แอกทิน (actin) และไมโอซิน (myosin) โปรตีนเหล่านี้เป็นส่วนประกอบของ thick และ thin filament





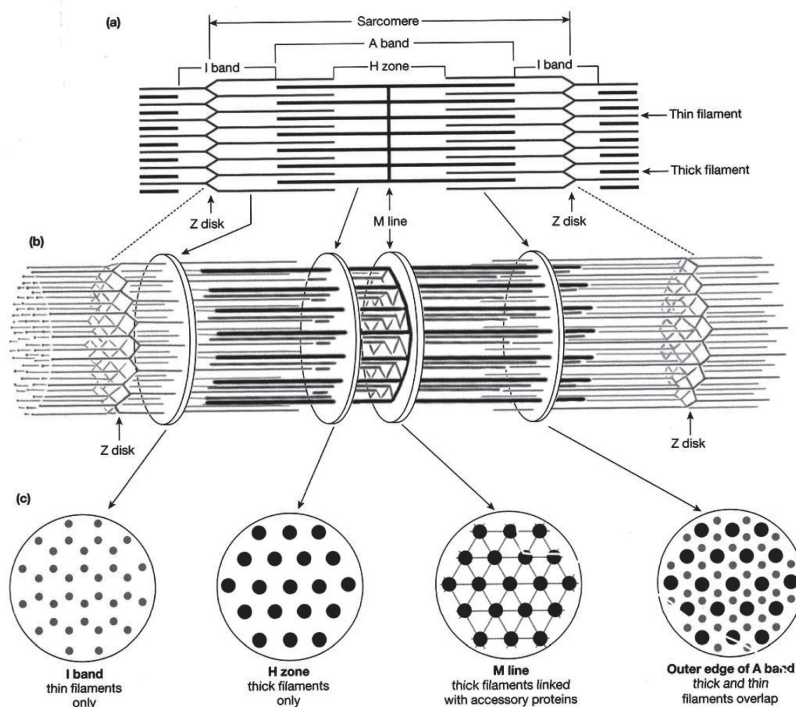
รูปที่ 1.2 แสดงโครงสร้างและองค์ประกอบของกล้ามเนื้อลาย
(ดัดแปลงจาก Silverthorn และคณะ, 2004)

Thin filament

Thin filament เป็นโครงสร้างของเซลล์กล้ามเนื้อที่พบทั่วไปประกอบด้วยแอกทิน โทรโพนินและโทรโปไมโอซินในสัดส่วน 7 ต่อ 1 ต่อ 1 ตามลำดับ

แอกทิน ได้แก่ จี-แอกทิน (Globular-actin: G-actin) มีน้ำหนักโมเลกุล 43,000 มีประมาณ 25 % ของโปรตีนทั้งหมดในเส้นใยฝอยกล้ามเนื้อ ในสภาพทางสรีรวิทยาจี-แอกทิน เชื่อมต่อกันเป็นสายยาวเรียกว่า เอฟ-แอกทิน (Fibrous-actin: F-actin) ซึ่งในกล้ามเนื้อลายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจะพบแต่เอฟ-แอกทินเท่านั้น เอฟ-แอกทินจำนวน 2 สายพันกันเป็นเกลียวเป็นโครงสร้างพื้นฐานของ thin filament ในแต่ละโมเลกุลของแอกทินประกอบด้วยตำแหน่งซึ่งเป็นที่เกาะสำหรับแอกทินโมเลกุลอื่น สำหรับไมโอซิน โทรโปไมโอซิน และโทรโพนินไอ

โทรโปไมโอซิน เป็นโปรตีนสายยาวประกอบด้วยสายเกลียวแอลฟาจำนวน 2 สายพันกัน แต่ละสายมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 35,000 พบว่ากล้ามเนื้อขณะพักโทรโปไมโอซินวางตัวอยู่ในร่องของแอฟ-แอกทินโดยจะปิด active site ของแอกทินที่เรียกว่า myosin binding site ไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ครอสบริดจ์ (crossbridge) ของไมโอซินจับกับแอกทิน โทรโปไมโอซินพบในเซลล์กล้ามเนื้อทุกชนิด ขณะที่มีการหดตัวของกล้ามเนื้อ โทรโปไมโอซินจะเบนออกจากร่องของแอฟ-แอกทินเพื่อเปิด active site ของแอกทินทำให้ครอสบริดจ์ของไมโอซินสามารถจับกับแอกทินได้จึงเกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อขึ้น



รูปที่ 1.3 แสดงการจัดเรียงตัวของซาร์โคเมอร์ของเส้นใยกล้ามเนื้อลาย
(ดัดแปลงจาก Silverthorn แลคเคอร์, 2004)

โทรโปนิน เป็นโปรตีนที่มีลักษณะกลมเหมือนแอกทิน มี 3 หน่วยย่อย คือ โทรโปนินซี (Troponin C, Tn-C) โทรโปนินที (Troponin T, Tn-T) และโทรโปนินไอ (Troponin I, Tn-I) โทรโปนินแต่ละโมเลกุลจับกับโทรโปไมโอซินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนโทรโปนิน-โทรโปไมโอซิน โทรโปนินมีน้ำหนักโมเลกุล 30,000 โทรโปนินไอทำหน้าที่คอยป้องกัน



การจับกันระหว่างครอสบริดจ์ของไมโอซินกับแอกทิน โดยโทรโปนินไอจะจับกับแอกทินอย่างเหนียวแน่น โทรโปนินซีมีมวลโมเลกุล 18,000 เมื่อจับกับแคลเซียมมีหน้าที่การทำงานคล้ายแคลโมดูลิน (calmodulin) หนึ่งโมเลกุลของโทรโปนินซีมีตำแหน่งที่สามารถจับกับแคลเซียมได้ 4 ตำแหน่ง ดังนั้น โทรโปนินซี 1 โมเลกุลจึงสามารถจับกับแคลเซียม 4 โมเลกุล เมื่อโทรโปนินซีจับกับแคลเซียมครบทุกตำแหน่งจะทำให้โทรโปนินไอไม่สามารถทำงานได้ทำให้ครอสบริดจ์ของไมโอซินสามารถจับกับแอกทิน

Thick filament (myosin filament)

ไมโอซินเป็นโปรตีนหลักซึ่งเป็นส่วนประกอบของ thick filament มีประมาณ 60% ของโปรตีนทั้งหมด ไมโอซินมีน้ำหนักโมเลกุล 480,000 thick filament แต่ละเส้นของไมโอซินประกอบด้วยไมโอซินจำนวน 200 โมเลกุลหรือมากกว่านั้น โมเลกุลของไมโอซินประกอบด้วยโปรตีน 2 สายพันกันเป็นเกลียว (double helix) ไมโอซินมีลักษณะเป็นรูปหอกเหลี่ยม โมเลกุลของไมโอซินประกอบด้วยเส้นใยโปรตีนจำนวน 6 เส้น คือเส้นใยโปรตีนชนิดหนัก (heavy chain) 2 เส้น (น้ำหนักโมเลกุล 200,000) และเส้นใยโปรตีนชนิดเบา (light chain) 4 เส้น (น้ำหนักโมเลกุล 20,000) เส้นใยโปรตีนชนิดเบาและส่วน N-terminal ของเส้นใยโปรตีนชนิดหนักจะขดรวมกันเป็นส่วนหัว (globular head) ของไมโอซิน ซึ่งแต่ละโมเลกุลของไมโอซินจะมี 2 หัว แต่ละหัวประกอบด้วยเส้นใยโปรตีนชนิดเบา 2 เส้น ส่วนหัวของไมโอซินเรียกว่าครอสบริดจ์ ซึ่งประกอบด้วย 2 ตำแหน่ง ตำแหน่งหนึ่งสำหรับให้โปรตีนแอกทินมาเกาะเรียกว่า actin binding site อีกตำแหน่งสำหรับให้เอนไซม์ adenosine triphosphatase (ATPase) มาเกาะเรียกว่า ATPase binding site ทั้ง 2 ตำแหน่งบนครอสบริดจ์มีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเปลี่ยนแปลงพลังงานจากพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานกล

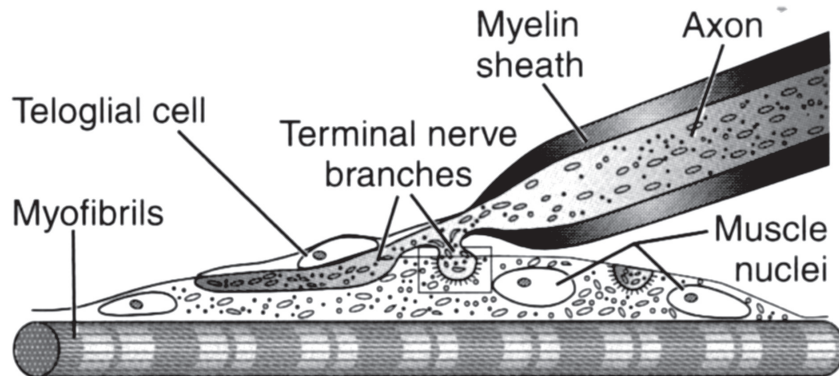
การกระตุ้นกล้ามเนื้อ (Excitation of Skeletal Muscle)

A. Excitation Contraction Coupling (ECC)

B. Neuromuscular transmission

Excitation Contraction Coupling (ECC)

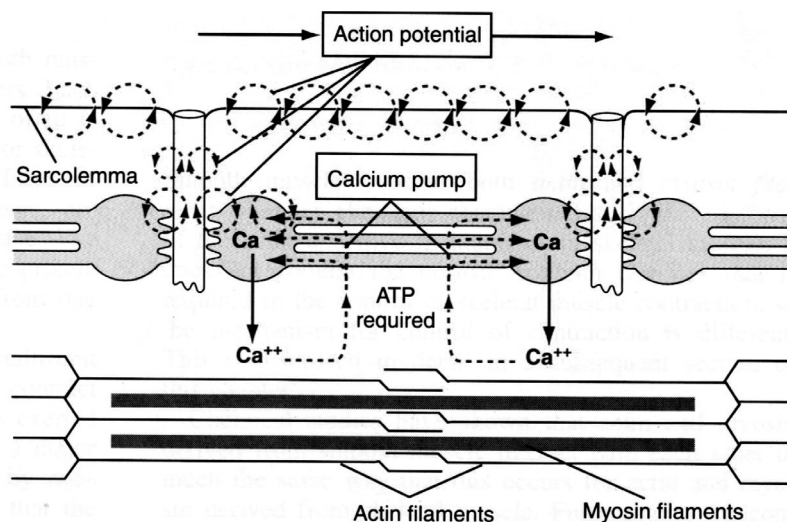
ECC เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องตั้งแต่กล้ามเนื้อถูกกระตุ้นไปจนถึงกล้ามเนื้อเกิดการตอบสนองด้วยการหดตัว ประกอบด้วยเหตุการณ์ต่อไปนี้



รูปที่ 1.4 แสดงแอกซอนของเซลล์ประสาทสั่งการที่ไปเลี้ยงกล้ามเนื้อลาย
(ดัดแปลงจาก Guyton AC และ Hall JE, 2001)

การหดตัวของกล้ามเนื้อลายถูกควบคุมโดยระบบประสาทส่วนกลาง ได้แก่ เซรีบรัลคอร์เทกซ์ การหดตัวของกล้ามเนื้อลายจึงอยู่ภายใต้การควบคุมของอำนาจจิตใจ การกระตุ้นเซลล์ประสาทที่ไปเลี้ยงกล้ามเนื้อลายเป็นวิธีเดียวที่ทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อ เซลล์ประสาทซึ่งให้แขนงของเส้นประสาทออกไปเลี้ยงกล้ามเนื้อลายเรียกว่า เซลล์ประสาทสั่งการ (α motor neurons หรือ somatic efferent neurons) และตัวเซลล์ประสาทเหล่านี้วางตัวอยู่ในส่วนของ anterior horn cell ของไขสันหลังหรือที่มอเตอร์นิวเคลียสของเส้นประสาทมอเตอร์ของเส้นประสาทสมองบางเส้น (เช่น เส้นประสาทสมองคู่ที่ 3, 4, 6, 7 ฯลฯ) เซลล์ประสาทสั่งการหนึ่งเซลล์จะแตกแขนงไปเลี้ยงเส้นใยกล้ามเนื้อจำนวนมากมาย กล้ามเนื้อแต่ละมัดมีเส้นประสาทมาเลี้ยงมากมาย เซลล์ประสาทสั่งการหนึ่งเซลล์และจำนวนเซลล์กล้ามเนื้อทั้งหมดที่ถูกเลี้ยงโดยเส้นประสาทที่แตกแขนงมาจากเซลล์ประสาทสั่งการตัวเดียวกันนั้น เรียกว่า มอเตอร์ยูนิต (motor unit) ขนาดของมอเตอร์ยูนิตจะใหญ่หรือเล็กขึ้นอยู่กับจำนวนเซลล์กล้ามเนื้อที่ถูกเลี้ยงด้วยเซลล์ประสาทสั่งการนั้น ๆ กล้ามเนื้อที่ทำงานโดยไม่ต้องอาศัยความละเอียดและแม่นยำมาก เช่น กล้ามเนื้อก้นกบ (gluteus maximus) ซึ่งเป็นกล้ามเนื้อมัดใหญ่ทำหน้าที่ช่วยในการทรงตัวขณะเดิน กล้ามเนื้อมัดนี้ประกอบด้วยเซลล์กล้ามเนื้อจำนวน 1,000 กว่าเซลล์ต่อหนึ่งมอเตอร์ยูนิต ส่วนกล้ามเนื้อที่ทำงานโดยต้องการความละเอียดและแม่นยำมาก เช่น กล้ามเนื้อลูกตา (orbicularis oculi) ประกอบด้วยเซลล์กล้ามเนื้อ 3-6 เซลล์ต่อหนึ่งมอเตอร์ยูนิต หรือกล้ามเนื้อมัดเล็ก ๆ ในมือ (intrinsic muscles) ประกอบด้วยเซลล์กล้ามเนื้อ 120-150 เซลล์ต่อหนึ่งมอเตอร์ยูนิต





รูปที่ 1.5 แสดงกลไกการเกิด Excitation Contraction Coupling ของกล้ามเนื้อลาย
(ดัดแปลงจาก Guyton AC และ Hall JE, 2001)

การถ่ายทอดสัญญาณประสาท (Neuromuscular transmission)

เมื่อแอกซอนของเซลล์ประสาทส่งการเดินทางมาถึงกล้ามเนื้อ แอกซอนจะแตกแขนงมากมายโดยแต่ละแขนงของปลายประสาทที่ไปเลี้ยงกล้ามเนื้อจะไม่สัมผัสกันโดยตรงจะเกิดเป็นรอยต่อระหว่างกล้ามเนื้อกับปลายประสาท (Neuromuscular Junction, NMJ) เยื่อไมอีลิน (myelin sheath) ที่หุ้มรอบแอกซอนของเซลล์ประสาทส่งการตัวหนึ่งจะสิ้นสุดตรงบริเวณที่ใกล้กับเยื่อหุ้มเซลล์กล้ามเนื้อ และแอกซอนจะแตกแขนงจำนวนมากโดยฝังตัวอยู่ในร่องบนเยื่อหุ้มเส้นใยกล้ามเนื้อ เยื่อหุ้มเส้นใยกล้ามเนื้อที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างปลายประสาทกับเซลล์กล้ามเนื้อเรียกว่า motor end plate เยื่อหุ้มเส้นใยกล้ามเนื้อบริเวณ motor end plate จะมีลักษณะโค้งเว้าเข้าไปภายในเยื่อหุ้มเส้นใยกล้ามเนื้อเรียกว่า junction fold บริเวณ junction fold นี้มีอะเซทิลโคลีนรีเซปเตอร์กระจายอยู่ การที่มี junction fold ตรงบริเวณ motor end plate มีประโยชน์คือ ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของการจับตัวกันระหว่างอะเซทิลโคลีน (Acetylcholine, ACh) ซึ่งเป็นสารสื่อประสาทที่หลั่งออกมาจากปลายประสาทตัวแรก (presynaptic terminal) กับอะเซทิลโคลีนรีเซปเตอร์ที่อยู่บน motor end plate บริเวณ neuromuscular junction นี้ presynaptic terminal จะโป่งออกเป็นกระเปาะภายในมีซิแนแนปติกเวสิเคิล (synaptic vesicle) จำนวนมากซึ่งบรรจุสารสื่อประสาทอะเซทิลโคลีนอยู่ เมื่อเส้นประสาทที่มาเลี้ยงกล้ามเนื้อถูก