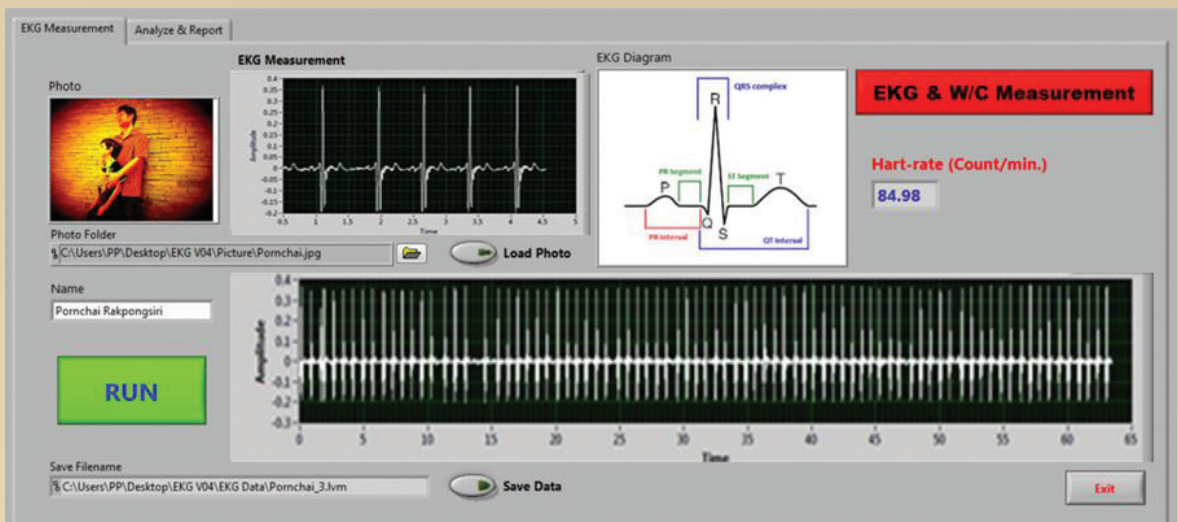




สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

เครื่องมือวัดสัญญาณทางสรีรวิทยาของหัวใจ: คู่มือการสร้างสำหรับงานวิจัย



ดร. เกษรา รักษ์พงษ์ศิริ

เครื่องมือวัดทัศนคติทางจริยวิทยาของหัวใจ: คู่มือการสร้างสำหรับงานวิจัย

โครงการหนังสือวิชาการที่นำพิมพ์ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ให้จัดพิมพ์และจำหน่ายในราคาเย่อเยา



ถ่ายเอกสารแทนการใช้หนังสือ
คือการทำลายภูมิปัญญาสร้างสรรค์

เครื่องมือวัดทัศนญาณทางสรีรวิทยาของหัวใจ: คู่มือการสร้างสำหรับงานวิจัย

ดร.เกษรา รัชพงษ์ศิริ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

ภาควิชากายภาพบำบัด คณะสหเวชศาสตร์

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

2559

หนังสือที่ได้รับทุนสนับสนุนการเขียนตำราจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2557

เกษรา รัชพงษ์ศิริ.

เครื่องมือวัดสัญญาณทางสรีรวิทยาของหัวใจ: คู่มือการสร้างสำหรับงานวิจัย.

1. การบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจ--เครื่องมือและอุปกรณ์.

WG102

ISBN 978-616-314-211-5

ISBN (ebook) 978-616-314-333-4

ลิขสิทธิ์ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษรา รัชพงษ์ศิริ

สงวนลิขสิทธิ์

ฉบับพิมพ์ครั้งที่ 1 เดือนมกราคม 2559

จำนวน 200 เล่ม

ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ (e-book) สิงหาคม 2560

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดยสำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อาคารธรรมศาสตร์ 60 ปี ชั้น U1 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ถนนพระจันทร์ กรุงเทพฯ 10200

โทร. 0-2223-9232, 0-2613-3801-2

โทรสาร 0-2226-2083

(สำนักงานศูนย์รังสิต โทร. 0-2564-2859-60)

e-mail address: unipress@tu.ac.th

พิมพ์ที่ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็มแอนด์เอ็มเลเซอร์พรีนต์

นายสมชาย คำขำ ผู้พิมพ์ผู้โฆษณา

แบบปกโดยนางสาวชนิสรา นานอม

ราคาเล่มละ 180.-บาท

สารบัญ

	หน้า
คำนำ	(9)
กิตติกรรมประกาศ	(11)
บทคัดย่อ	(13)
บทที่ 1 สรีรวิทยาของหัวใจและหลอดเลือด	1
โครงสร้างและการทำงานของหัวใจและหลอดเลือด	2
หน้าที่ของหัวใจและหลอดเลือด	3
รูปแบบสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจ	4
คุณสมบัติทางไฟฟ้า	4
การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าและกลไกการหดตัวของหัวใจ	8
การนำสัญญาณไฟฟ้าไปใช้ในการสร้างเครื่องมือ	16
อัตราการเต้นของหัวใจ	16
คลื่นไฟฟ้าหัวใจ	18
บทที่ 2 หลักการของเครื่องมือวัดสัญญาณทั่วไป	23
ความหมายและกระบวนการวัด	24
ความสำคัญของเครื่องวัด	25
มาตรฐานของการวัด	25
วิธีการวัด	26
ความถูกต้อง	26
ความผิดพลาด	27
ความไม่แน่นอน	28
ความเที่ยงตรง	28
ระบบเครื่องมือวัดทางอิเล็กทรอนิกส์	30

บทที่ 3 การพัฒนาเครื่องมือวัดสัญญาณทางสรีรวิทยาของหัวใจ I	33
เครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจ (Heart Beat Detector)	34
ความสำคัญและที่มา	34
แนวคิดและสมมุติฐาน	35
วัตถุประสงค์	35
หลักการออกแบบ	36
ขั้นตอนการสร้าง	37
ลักษณะเครื่องมือ	45
การทำงานของเครื่องมือ	46
วิธีใช้เครื่องมือ	46
ทดสอบประสิทธิภาพ	59
สรุปและอภิปราย	60
 บทที่ 4 การพัฒนาเครื่องมือวัดสัญญาณทางสรีรวิทยาของหัวใจ II	 61
เครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบไร้สายและบันทึกในคลาวด์	62
(Wireless and Cloud Electrocardiography)	
ความสำคัญและที่มา	62
แนวคิดและสมมุติฐาน	62
วัตถุประสงค์	63
หลักการออกแบบ	63
ขั้นตอนการสร้าง	66
ลักษณะเครื่องมือ	75
การทำงานของเครื่องมือ	77
วิธีใช้เครื่องมือ	78
ทดสอบประสิทธิภาพ	84
สรุปและอภิปราย	92

	หน้า
บทที่ 5 ประโยชน์และการนำไปใช้	95
เครื่องวัดอัตราการเต้นหัวใจ	96
ประโยชน์	96
การนำไปใช้ในงานวิจัย	96
เครื่องวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบไร้สายและบันทึกในคลาวด์	99
ประโยชน์	99
การนำไปใช้ในงานวิจัย	99
 บทที่ 6 ปัญหาและแนวทางแก้ไขสัญญาณรบกวน	 103
ปัญหาและแนวทางแก้ไข	104
สัญญาณรบกวน	104
วิธีลดสัญญาณรบกวน	105
สัญญาณรบกวนในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	106
ข้อเสนอแนะสำหรับการสร้างเครื่องมือ	108
ด้านฮาร์ดแวร์	108
ด้านซอฟต์แวร์	108
 บรรณานุกรม	 109
ดัชนี	111



ปัจจุบันความเจริญด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมีความก้าวหน้าอย่างมาก การสร้างเครื่องมือต่างๆ ได้รับการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ให้สามารถวัดได้อย่างถูกต้อง แม่นยำ และมีความเที่ยงตรงมากที่สุด การวัดสัญญาณทางสรีรวิทยาเป็นตัวแปรสำคัญที่แสดงการทำงานของระบบต่างๆ ของร่างกายและเป็นดัชนีชี้วัดเกี่ยวกับภาวะสุขภาพของร่างกายเบื้องต้น แม้ว่าหลายคนที่มีความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ด้านสรีรวิทยาของระบบหัวใจและหลอดเลือด แต่การออกแบบสร้างและพัฒนาเครื่องมือเพื่อแสดงหรือวิเคราะห์สัญญาณดังกล่าวไม่ใช่เรื่องง่าย เนื่องจากเป็น การวัดค่าสัญญาณชีพที่มาจากคน จะต้องมีการออกแบบเครื่องมือให้มีความไวต่อการรับสัญญาณ มีความสัมพันธ์กับค่าจริง สามารถเป็นตัวแทนได้อย่างแท้จริงและต้องมีความปลอดภัย

การสร้างและพัฒนาเครื่องมือที่วัดสัญญาณโดยตรงจากคน มีการค้นคว้าและวิจัยไม่มากนัก ผู้เขียนพยายามสอดแทรกความสัมพันธ์ระหว่างความรู้ทางสัญญาณทางสรีรวิทยา กับหลัก ในการออกแบบสร้างเครื่องมือทางวิศวกรรม และตัวอย่างการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อเป็นต้นแบบในการค้นคว้าสำหรับนักประดิษฐ์รุ่นใหม่ที่สนใจในการสร้างและพัฒนาเครื่องมือวัดสัญญาณทางสรีรวิทยาของหัวใจ เพื่อนำไปสู่ผลสำเร็จของเครื่องมือที่สมบูรณ์ และสามารถนำไปใช้ เป็นคู่มือสำหรับงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ดร.เกษรา รักษ์พงษ์ศิริ

กิตติกรรมประกาศ

คุณประโยชน์และคุณความดีของตำราเล่มนี้ ผู้เขียนขอมอบให้บุคคลต่างๆ เหล่านี้ ซึ่งมี ส่วนสนับสนุน ส่งเสริม ให้ผู้เขียนสามารถเขียนตำราเรื่องนี้ได้สำเร็จ

ขอกราบขอบพระคุณ ศ.ดร.ภาวิณี ปิยะจตุรวัฒน์ ภาควิชาสรีรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล และ ผศ. นส.พ. ดร.สุวรรณเกียรติ สว่างคุณ ภาควิชาสรีรวิทยา คณะสัตวแพทย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ซึ่งทั้งสองท่านเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา เป็นผู้คอยฝึกฝน ประสิทธิ์ประสาทวิชาอบรมสั่งสอน ทั้งทางด้านวิชาการ และแนวคิดต่างๆ ตลอดจนเป็นแบบอย่างที่ดีทั้งในด้านการวิจัยและคนดีในสังคม

ขอขอบพระคุณ คุณจิรศักดิ์ โพธิ์ธรรม และคุณพรชัย รัชพงษ์ศิริ ที่ให้คำปรึกษาด้านวิศวกรรม การออกแบบสำหรับการสร้างเครื่องมือ

ด้วยความรักและความอาลัยต่อการจากไปของคุณพ่อสง่า และคุณแม่เอ็นดู พงศ์ลัมพันธ์ ผู้เป็นแรงบันดาลใจในการเขียนตำราเล่มนี้ ทั้งความห่วงใย และเป็นผู้อยู่เบื้องหลังความสำเร็จในทุกด้านของผู้เขียน

ขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากกองทุนมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ภายใต้ “ทุนวิจัยเพื่อพัฒนาสิ่งประดิษฐ์” ตามสัญญาฉบับที่ สป 1/7/2552 และฉบับที่ สป 1/7/2555

ท้ายที่สุด ขอขอบพระคุณพระเจ้า ผู้ประทานชีวิตและให้สติปัญญากับผู้เขียน และเป็นกำลังใจสำคัญที่สุดให้ “สามารถผลบุญทุกสิ่งได้ โดยพระองค์ผู้ทรงเสริมกำลังใจ” และให้ตำราเล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี



บทคัดย่อ

สัญญาณทางสรีรวิทยาเป็นตัวแปรสำคัญที่บอกระบบการทำงานของระบบต่างๆ ทั้งร่างกาย การสร้างและพัฒนาเครื่องมือวัดสัญญาณดังกล่าว สามารถใช้เป็นดัชนีชี้วัดเกี่ยวกับภาวะสุขภาพของร่างกายเบื้องต้น อีกทั้งสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัย ซึ่งทำได้โดยใช้ความรู้พื้นฐานทางวิทยาศาสตร์สุขภาพร่วมกับการออกแบบทางวิศวกรรม สำหรับเครื่องตรวจวัดสัญญาณทางสรีรวิทยาของหัวใจ ใช้หลักการที่เม็ดเลือดแดงสามารถดูดกลืนรังสีอินฟราเรด (Infrared) ได้ ซึ่งการไหลของเลือดบริเวณผิวหนังเป็นจังหวะและสัมพันธ์กับการทำงานหรือจังหวะการเต้นของหัวใจ นำมาใช้ในการพัฒนาเครื่องมือวัดอัตราการเต้นของหัวใจในมนุษย์ (Heart Rate) แบบดิจิทัล ส่งสัญญาณผ่านทางพอร์ต USB เข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์เพื่อประมวลผล แสดงผลเป็นค่าอัตราการเต้นของหัวใจ และรูปคลื่นการเปลี่ยนแปลงจังหวะการเต้นของหัวใจ ทั้งในขณะพัก ก่อน หรือหลังจากทำกิจกรรมรูปแบบต่างๆ ในชีวิตประจำวัน เพื่อใช้ในการวางแผนหรือเพิ่มความก้าวหน้าเกี่ยวกับสมรรถภาพทางกายสำหรับตนเองได้ นอกจากนั้นได้ออกแบบพัฒนาเครื่องมือวัดในขั้นสูง โดยเป็นการวัดคลื่นไฟฟ้าหัวใจแบบสองขั้วไฟฟ้า และส่งสัญญาณสู่หน่วยประมวลผลแบบไร้สาย แสดงผลเป็นคลื่นไฟฟ้าหัวใจสามารถวิเคราะห์และบันทึกผลลงบนสื่อบันทึกกลางคลาวด์ (Cloud) ที่เข้าถึงได้โดยผ่านเครือข่ายคอมพิวเตอร์ออนไลน์ระบบอินเทอร์เน็ตทั่วโลก สามารถรายงานผลให้ทราบทางอุปกรณ์สื่อสารต่างๆ เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล คอมพิวเตอร์ Notebook โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์แท็บเล็ต



สรีรวิทยาของหัวใจและหลอดเลือด (Heart and Circulatory Physiology)



โครงสร้างและการทำงาน

หน้าที่ของหัวใจและหลอดเลือด

รูปแบบสัญญาณไฟฟ้า

- คุณสมบัติทางไฟฟ้า
- การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าและกลไกการหดตัว

การนำสัญญาณไฟฟ้าไปใช้ในการพัฒนาเครื่องมือ

- อัตราการเต้นของหัวใจ
- คลื่นไฟฟ้าหัวใจ

โครงสร้างและการทำงานของหัวใจและหลอดเลือด

ระบบหัวใจและหลอดเลือด ประกอบไปกับการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ และระบบไหลเวียนเลือดของหลอดเลือด ซึ่งทำงานประสานกันเพื่อทำหน้าที่ขนส่งออกซิเจน และนำของเสียที่เกิดขึ้นจากการทำงานของกล้ามเนื้อกลับเข้าสู่ระบบไหลเวียน โดยระบบนี้ทำหน้าที่เป็นสื่อกลางติดต่อกันระหว่างเซลล์ทั่วร่างกายกับภายนอก รวมถึงปรับการไหลเวียนเลือดให้เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย

หัวใจ

หัวใจเป็นอวัยวะสำคัญ ประกอบด้วยกล้ามเนื้อหัวใจที่มีลักษณะพิเศษ ตั้งอยู่ระหว่างปอดทั้ง 2 ข้าง และวางอยู่เหนือกระบังลม มีลักษณะเป็นรูปกรวยสั้น ถูกหุ้มด้วยเยื่อหุ้มหัวใจ (pericardial sac) โดยส่วนของหัวใจที่มีลักษณะแหลมทู่ (apex) จะยื่นออกไปทางด้านซ้าย หัวใจแบ่งออกเป็น 4 ห้อง (cardiac chamber) คือ หัวใจห้องบนเอเดรียม (atrium) ซ้าย ขวา และหัวใจห้องล่างเวนตริเคิล (ventricle) ซ้าย ขวา หัวใจห้องบนขวามีขนาดโตกว่าหัวใจห้องบนซ้ายทำหน้าที่รับเลือดจากส่วนต่างๆ ของร่างกาย โดยรับเลือดผ่านมาทางเส้นเลือดดำใหญ่คือ ซุปรีเรียเวนาคาวา (superior vena cava) ซึ่งรับเลือดมาจากส่วนบนของร่างกาย เช่น ศีรษะ แขน ทรวงอกเข้าสู่หัวใจห้องบนขวา และอินฟีเรียเวนาคาวา (inferior vena cava) ซึ่งรับเลือดมาจากส่วนล่างของร่างกาย เช่น ขา ช่องท้อง เทเข้าสู่หัวใจห้องล่างขวา โดยผ่านลิ้นหัวใจไตรคัลปิด (tricuspid) แล้วผ่านหลอดเลือดแดงใหญ่ปัลโมนารี (pulmonary trunk) เพื่อไปที่ปอด แยกเป็นหลอดเลือดแดงปัลโมนารีซ้ายและขวา (left and right pulmonary artery) ไปยังปอดขวาและปอดซ้าย หลังจากนั้น หัวใจห้องบนซ้าย (left atrium) ทำหน้าที่รับเลือดจากปอดขวาและปอดซ้าย ผ่านทางหลอดเลือดดำปัลโมนารีขวาและซ้าย (right and left pulmonary vein) ส่งไปยังหัวใจห้องบนซ้าย ผ่านลิ้นหัวใจไบคัลปิด (bicuspid) เทเข้าสู่หัวใจห้องล่างซ้าย (left ventricle) ซึ่งมีผนังหนาที่สุด เพราะต้องทำหน้าที่บีบตัวส่งเลือดจำนวนมาก ผ่านทางหลอดเลือดแดงใหญ่ เอออร์ตา (aorta) เพื่อไปเลี้ยงอวัยวะต่างๆ ทั่วร่างกาย

ลิ้นหัวใจ (cardiac valve)

ทำหน้าที่บังคับเลือดให้ไหลไปทางเดียวและป้องกันไม่ให้เลือดไหลย้อนกลับ โดยอาศัยความแตกต่างระหว่างความดันของทั้งสองด้านที่ลิ้นหัวใจนั้นกันอยู่ ลิ้นหัวใจมี 4 ตำแหน่ง ได้แก่ ลิ้นหัวใจที่อยู่ระหว่างเอเทรียม และเวนทริเคิล เรียกว่า ลิ้นเอตริโอเวนทริคูลาร์ (atrioventricular, A-V valve) ประกอบด้วยลิ้นไตรคัสปิด และลิ้นไมตรัล (mitral valve) สำหรับหัวใจขวาและซ้ายตามลำดับ ลิ้นหัวใจที่อยู่ตรงทางออกของเลือดจากเวนทริเคิลทั้งสอง เรียกว่า ลิ้นเซมิลูนาร์เอออร์ติก (semilunar aortic valve)

หลอดเลือด (blood vessels)

หลอดเลือดเป็นส่วนที่จะต้องส่งเลือดจากหัวใจไปยังอวัยวะเป้าหมาย ได้แก่ หลอดเลือดแดงและหลอดเลือดดำ หลอดเลือดแดงสามารถแบ่งย่อยได้ตามขนาดเป็น หลอดเลือดแดงเอออร์ตา (aorta) มีขนาดใหญ่ มีผนังหนาและแข็งแรง หลอดเลือดแดงอาร์เทอร์รี่ (artery) หลอดเลือดแดงขนาดเล็กอาร์เทอร์รียอล (arteriole) และหลอดเลือดแดงฝอยแคปิลลารี (capillary)

หลอดเลือดดำสามารถแบ่งย่อยได้ตามขนาดเป็น หลอดเลือดดำใหญ่เอออร์ตา (vena cava) มีขนาดใหญ่ มีผนังหนาและแข็งแรง หลอดเลือดดำเวน (vein) หลอดเลือดดำขนาดเล็กเวนูล (venule)

หน้าที่ของหัวใจและหลอดเลือด

อวัยวะที่สำคัญของระบบนี้คือ หัวใจ ซึ่งทำหน้าที่เปรียบเหมือนเป็นเครื่องสูบ สูบฉีดให้เลือดไหลเวียนไปตามหลอดเลือดเข้าสู่อวัยวะเป้าหมายคือ เซลล์ต่างๆ ทั่วร่างกาย ซึ่งเลือดในระบบไหลเวียนประกอบด้วย เม็ดเลือดแดง (red blood cell) และน้ำเลือด (plasma) ในเม็ดเลือดแดงมีฮีโมโกลบินซึ่งประกอบด้วย เหล็กและโปรตีน ทำหน้าที่รับออกซิเจนไปยังเซลล์ โดยมีหน้าที่ดังต่อไปนี้

- ขนส่ง (transport): ทำหน้าที่นำอาหาร น้ำ ไหลผ่านเนื้อเยื่อต่างๆ ทั่วร่างกาย
- นำส่ง (supply): ทำหน้าที่แจกจ่ายออกซิเจนให้กับเซลล์กล้ามเนื้อ
- ขับถ่ายของเสีย (metabolic wastes): ทำหน้าที่ขนส่ง หรือขับถ่ายของเสีย เพื่อให้

สิ่งแวดล้อมภายในและภายนอกเซลล์อยู่ในระดับปกติ

ตารางที่ 1.1 การไหลเวียนของระบบหัวใจและหลอดเลือด

	รับเลือดมาจาก	ส่งเลือดไปยัง
ตำแหน่งของหัวใจ		
ห้องบนขวา	หลอดเลือดดำ (vena cava)	ห้องล่างขวา
ห้องล่างขวา	ห้องบนขวา	ปอดซ้ายและขวา
ห้องบนซ้าย	หลอดเลือดดำ (pulmonary veins)	ห้องล่างซ้าย
ห้องล่างซ้าย	ห้องบนซ้าย	ส่วนต่างๆ ของร่างกาย ยกเว้นปอด
หลอดเลือด		
หลอดเลือดดำ (vena cava)	หลอดเลือดดำซิสทีมิก (systemic veins)	ห้องบนขวา
หลอดเลือดแดงจากปอด (pulmonary trunk, artery)	ห้องล่างขวา	ปอด ซ้าย ขวา
หลอดเลือดดำจากปอด (pulmonary vein)	หลอดเลือดดำจากปอดซ้าย ขวา	ห้องบนซ้าย
หลอดเลือดแดงใหญ่ (aorta)	ห้องล่างซ้าย	หลอดเลือดแดงซิสทีมิก (systemic arteries)

รูปแบบสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจ

เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ ทำงานโดยการหดตัว เริ่มจากกลุ่มเนื้อเยื่อที่สามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าได้เองในหัวใจ ส่งสัญญาณกระตุ้นให้เซลล์ของเอเทรียมหดตัวพร้อมกัน เพื่อส่งเลือดให้เข้าไปในเวนทริเคิล จากนั้นเซลล์ของเวนทริเคิล จะมีการหดตัวพร้อมกันอีกครั้ง เพื่อส่งเลือดออกจากหัวใจ ไปสู่ส่วนอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย

คุณสมบัติทางไฟฟ้า

กลุ่มเซลล์ที่มีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าของหัวใจประกอบด้วย sinoatrial node (SA node), atrioventricular node (AV node), common AV bundle (bundle of His), right และ left

bundle branch และ peripheral หรือ Purkinje fiber นอกจากนี้ยังมีทางติดต่อระหว่าง node และระหว่างเอเทรียม (internodal และ interatrial pathway) ด้วย

Sinoatrial node (SA node)

SA node อยู่บริเวณแนวต่อของหลอดเลือดซูพีเรียเวนาคาวา กับเอเทรียมขวา โดยมีหลอดเลือดแดง SA node (SA node artery) มาเลี้ยง ลักษณะเป็นกลุ่มเนื้อเยื่อที่มีลักษณะพิเศษโดยเฉพาะคือเป็น pacemaker ของหัวใจ ที่สามารถสร้างไฟฟ้าด้วยความถี่สูงกว่าเซลล์อื่น ส่งผลกระตุ้นให้เซลล์อื่นหดตัว โดยสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าได้ประมาณ 80 ถึง 90 ครั้ง/นาที และกระจายไปยังเซลล์อื่นๆ ได้ทั่วทั้งหัวใจได้อย่างรวดเร็วมาก

Atrioventricular node (AV node)

AV node อยู่ภายในผนังของเอเทรียมขวา เหนือ septal leaflet ของลิ้นหัวใจไตรคัลปิด มีหลอดเลือดแดงโคโรนารี (coronary artery) มาเลี้ยง คลื่นไฟฟ้าจาก SA node เมื่อมาถึง AV node จะใช้เวลาบริเวณนี้ประมาณ 0.04 ถึง 0.12 วินาที ซึ่งในช่วงนี้เวนทริเคิลยังไม่ถูกกระตุ้น จนกว่าเลือดจากเอเทรียมจะถูกบีบเข้าสู่เวนทริเคิล หลังจากนั้นจะส่งจาก AV node เข้าในส่วนของผนังกันระหว่างเวนทริเคิล แล้วแยกเป็น 2 แขนงคือ right และ left bundle branch แต่ละแขนงผ่านซิดผิวแต่ละด้านของผนังกันระหว่างเวนทริเคิล

1. Right bundle branch แยกจาก bundle of His แล้วผ่านซิดผิวด้านขวาของผนังกันระหว่างเวนทริเคิล เป็นแขนงที่ยาว และอยู่ผิว (superficial) กว่า left bundle branch
2. Left bundle branch แยกออกเป็น
 - ก. Antero-superior division ซึ่งยาวและอยู่ผิว
 - ข. Postero-inferior division สั้นและใหญ่

Purkinje system

เป็นเส้นใยที่แยกออกจาก bundle branch ทั้งสองข้าง พบในชั้นใต้เยื่อบุหัวใจของเวนทริเคิล ทำหน้าที่นำคลื่นไฟฟ้าเข้าสู่ผนังกล้ามเนื้อหัวใจ

ขณะที่กล้ามเนื้อหัวใจอยู่ในระยะพัก ศักย์ไฟฟ้าภายนอกเซลล์จะเท่ากันหมดโดยเป็นบวก เทียบกับภายในเซลล์ซึ่งเป็นลบ ถ้าวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างจุดสองจุดบนผนังด้านนอกเซลล์ จะพบว่า ความต่างศักย์นั้นเป็นศูนย์ จึงไม่มีคลื่นไฟฟ้าเกิดขึ้นในขณะนั้น แต่เมื่อกล้ามเนื้อถูกเร้าหรือ กระตุ้น ศักย์ไฟฟ้าที่เยื่อเซลล์จะเปลี่ยนไป ทำให้ภายนอกเซลล์มีศักย์เป็นลบและข้างในเซลล์เป็นบวก เรียกว่า เกิด depolarization การเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าเริ่มต้นจาก primary pacemaker ของหัวใจในเอเตรียมขวาเหนี่ยวนำทำให้เกิดคลื่นไฟฟ้าแผ่ไปทั่วเอเตรียมและเวนทริเคิลทั้งสองข้าง จากสภาพ polarization เป็น depolarization แล้วกลับเป็น polarization หรือ repolarization โดยภายนอกเซลล์มีศักย์เป็นบวกและข้างในเซลล์เป็นลบใหม่ เราจึงสามารถบันทึกคลื่นไฟฟ้าได้ โดยใช้เครื่องมือทางไฟฟ้าที่มีความไวและกำลังขยายที่เหมาะสม เนื่องจากร่างกายมีส่วนประกอบของน้ำ เป็นส่วนใหญ่ ทำให้คุณสมบัตินำไฟฟ้าที่ดี คลื่นไฟฟ้าจากหัวใจจึงแผ่ไปทุกทิศทางทั่วร่างกาย และออกสู่บริเวณผิวหนังได้ ภาพการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าที่บันทึกได้ เรียกว่า คลื่นไฟฟ้าหัวใจ (electrocardiogram, ECG หรือ electrokardiogram, EKG)

ภาพคลื่นไฟฟ้าที่บันทึกได้จะเริ่มตั้งแต่ก่อนการบีบตัวไปจนมีการคลายตัวของหัวใจแต่ละครั้ง ดังนั้นจึงเกิดขึ้นเป็นจังหวะมีความถี่เท่าอัตราเต้นของหัวใจ เรียกว่า normal sinus rhythm ตามปกติ จะมีค่าประมาณ 60-100 ครั้ง/นาที รูปแบบของคลื่นแต่ละคลื่นมีมาตรฐานกำหนดไว้ทั้งขนาด รูปร่างและระยะทางระหว่างคลื่น ภาพคลื่นไฟฟ้าในแต่ละจังหวะประกอบด้วยคลื่นไฟฟ้าย่อย และ ส่วนประกอบของแต่ละคลื่น ดังนี้

1. P wave

- เป็นผลรวมของ depolarization ของเอเตรียม
- รูปร่างกลมเรียบ กว้างไม่เกิน 0.12 วินาที ความสูงไม่เกิน 2.5 มิลลิเมตร
- มี P wave 1 คลื่น ต่อ QRS complex 1 คลื่น

2. P-R Interval

- เป็นช่วงเวลาที่มิคลื่นไฟฟ้าหรือ depolarization จาก SA node ผ่านทั่วเอเตรียม ไปยัง AV node จนถึงจุดเริ่มของเวนทริเคิล ความยาวปกติเท่ากับ 0.12 - 0.20 วินาที
- นับจากจุดเริ่มของ P wave ไปยังจุดเริ่มของ QRS complex

3. QRS complex หรือ QRS interval

- เกิดจากการ depolarize ของเวนทริเคิล

- ลักษณะคลื่นสูงแคบ 0.06 - 0.10 วินาที ถ้ากว้างกว่า 0.12 วินาที แสดงว่าอาจมีการผิดปกติของการนำไฟฟ้าในเวนทริเคิล

4. ST segment

- เป็นช่วงแนวราบ (isoelectric line) เริ่มจากจุดสิ้นสุดของ QRS complex ไปยังจุดเริ่มต้นของ T wave

- เป็นระยะ depolarization สิ้นสุดก่อนที่จะมีการ depolarization ใหม่ของเวนทริเคิล
- ความยาวปกติ 0.08 - 0.12 วินาที

5. T wave

- เป็น deflection จาก baseline เกิดจาก repolarization ของเวนทริเคิล และมีทิศไปในทางเดียวกับ QRS complex

- หัวตั้ง กลมเรียบ ใหญ่กว่า P Wave

6. QT interval

- เป็นระยะตั้งแต่จุดเริ่มต้นของ QRS complex จนถึงสิ้นสุดของ T Wave
- ความยาวปกติ 0.40 - 0.43 วินาที

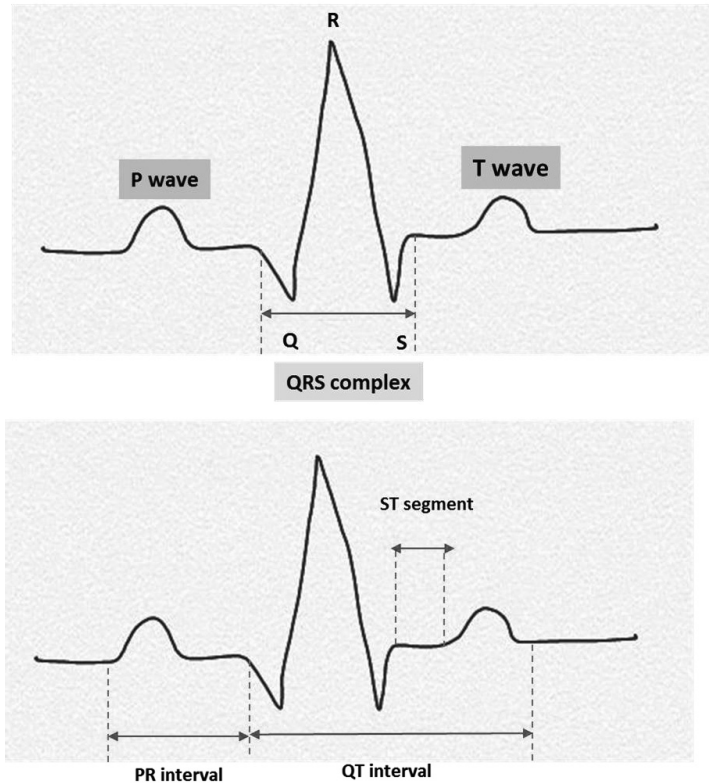
7. U Wave

- เป็น deflection เล็กๆ เกิดตามหลัง T wave โดยทั่วไปมักไม่พบความสูงไม่เกิน

1 มิลลิเมตร

- พบ U Wave ได้ในกรณีภาวะโพแทสเซียมต่ำ (Hypokalaemia)

8. RR interval - ระยะเวลาระหว่าง QRS complex ถึง QRS complex ถัดไป



รูปที่ 1.1 ส่วนประกอบที่สำคัญของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ดัดแปลงจาก: Bray, et al., 2005.

การเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าและกลไกการหดตัวของหัวใจ

(Excitation-Contraction Coupling)

เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ จะมีการเรียงตัวของมายโอไฟลาเมนต์ (myofilament) เช่นเดียวกับกล้ามเนื้อลาย และกลไกในการหดตัวเป็นแบบ sliding theory เช่นเดียวกัน มีข้อแตกต่างทางโครงสร้างเล็กน้อยคือ ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม (sarcoplasmic reticulum, SR) ของกล้ามเนื้อหัวใจไม่ได้พัฒนาเป็นกระเปาะใหญ่เหมือนกล้ามเนื้อลาย จึงมีการเก็บสะสมแคลเซียมไว้ได้น้อย แคลเซียมที่มากกระตุ้นให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อหัวใจ จะมาจากหลอดเลือดนอกเซลล์กล้ามเนื้อ เมื่อมีศักย์ไฟฟ้าที่มีขนาดใหญ่ หรือ action potential มาถึงเซลล์ของกล้ามเนื้อหัวใจ ก็จะแพร่กระจายไปตาม T-tubule มีผลกระตุ้นให้มีการหลั่งแคลเซียมจากซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม และกระตุ้นให้แคลเซียมจากเลือดเข้าสู่เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจมากขึ้น เมื่อมีแคลเซียมในเซลล์มาก แคลเซียมจะไปจับกับโทรโปนินซี

(troponin C) ทำให้เกิดการบิดตัวของโทรโปไมโอซิน (tropomyosin) เปิดช่องให้หัวของไมโอซิน (myosin head) เลื่อนเข้าจับกับแอกติน (actin) เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อหัวใจ ทำให้ใยกล้ามเนื้อหดสั้นลง หลังจากนั้น แคลเซียมจะถูกเก็บกลับเข้าสู่ซาร์โคพลาสมิกเรติคิวลัม และเลือดส่งผลทำให้มีการคลายตัวของแอกตินออกจากมายโอซิน เกิดการคลายตัวของกล้ามเนื้อตามมา ทำให้เกิดการหดตัวและคลายตัวของกล้ามเนื้อหัวใจเป็นจังหวะสลับกันไป (cardiac systole และ diastole)

เนื่องจากโครงสร้างของหัวใจแบ่งเป็น 4 ห้อง โดยหัวใจสองห้องบนหรือเอเทรียมจะมีการหดตัวก่อน และตามด้วยการหดตัวของห้องล่างหรือเวนทริเคิลสองห้อง ในช่วงที่เอเทรียมหดตัวเวนทริเคิลจะคลายตัว และช่วงเวนทริเคิลหดตัว เอเทรียมก็จะคลายตัว เนื่องจากศักย์ไฟฟ้าของหัวใจ มีการแพร่กระจายกันเป็นจังหวะ ตามลำดับและโครงสร้าง สามารถเขียนเป็นขั้นตอนได้ดังต่อไปนี้

1. เริ่มจาก action potential ของ SA node แผ่ออกสู่เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจห้องบนโดยตรง และมีบางส่วนผ่านมาทาง interatrial tract มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าของเอเทรียม เรียกว่า atrial depolarization
2. กล้ามเนื้อหัวใจห้องบนจะหดตัวทันที เรียกว่า atrial systole เพื่อบีบเลือดเข้าสู่เวนทริเคิลที่กำลังอยู่ในระยะพัก มีการคลายตัวเต็มที่เพื่อรับเลือด
3. หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าของเอเทรียมอีกครั้ง เรียกว่า atrial repolarization ในขณะเดียวกัน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าของเวนทริเคิล เรียกว่า ventricular depolarization
4. จะเกิดการคลายตัวของเอเทรียม (atrial diastole) ในขณะที่เวนทริเคิลหดตัว (ventricular systole)
5. เวนทริเคิลจะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าอีกครั้ง เรียกว่า ventricular repolarization เกิดการคลายตัวของหัวใจห้องล่าง (ventricular diastole)
6. กล้ามเนื้อหัวใจจะเข้าสู่ระยะพัก (cardiac pause) และจะเข้าสู่การเปลี่ยนแปลงไฟฟ้าของเอเทรียม atrial depolarization รอบใหม่ต่อเนื่องกันไป ตราบเท่าที่มีการแผ่ของ action potential ของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ