บทที่ 2

ทฤษฎีคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ในบทนี้เป็นการศึกษาความเป็นมาของคลื่นไฟฟ้าหัวใจและความผิดปกติของจังหวะการเต้นของหัวใจ โดยส่วนของคลื่นไฟฟ้าหัวใจจะกล่าวถึงการทำงานของหัวใจ การนำไฟฟ้าภายในและลักษณะของคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่บันทึกได้ ตลอดจนแนวทางในการพิจารณาและวิเคราะห์คลื่นไฟฟ้าหัวใจ

2.1 การกำเนิดกระแสไฟฟ้าในกระบวนการทางชีวภาพ (Bioelectric Generation)

ระบบการทำงานต่างๆ ของมนุษย์นั้นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นจากระบบประสาทโดยส่งไปตามเส้นประสาทต่างๆ และไปสู่เซลล์กล้ามเนื้อเหล่านั้น ภายในเซลล์ร่างกายประกอบด้วย Na, Ka และCI" ความเข้มข้นของอิออนภายในเซลล์โดยทฤษฎีของไอออนิกกล่าวว่า "ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างบริเวณสองบริเวณที่มีความเข้มข้นไม่เท่ากัน" โดยที่ผนังเซลล์เมมเบรนจะมีคุณสมบัติที่ยอมให้อิออนบางตัวผ่านได้เท่านั้น ในขณะที่บางตัวผ่านไม่ได้เรียกคุณสมบัตินี้ว่า "Semi permeable membrane" โดยปกติ Ka และ CI" ผ่านผนังเซลล์ได้แต่ Na ผ่านไม่ได้ [8]

กระแสอิออนนิกซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ของประจุผ่าน Semi permeable membrane ขึ้นกับค่า permeability ของเนื้อเยื่อและกราเดียนท์ เมื่อความเข้มข้นของไอออนบริเวณด้านใดด้านหนึ่งของผนังเซลล์มีมากกว่าอีกด้านหนึ่ง ก็จะมีการแพร่ของไอออนจากด้านที่มีความเข้มข้นมากไปยังด้านที่มีความเข้มข้นน้อยจึงทำให้เกิดความไม่สมดุลของประจุไฟฟ้า เป็นผลเกิดสนามไฟฟ้าต้านการแพร่ของไอออนทำให้เกิดการแพร่ลดลงจนเกิดสมดุล

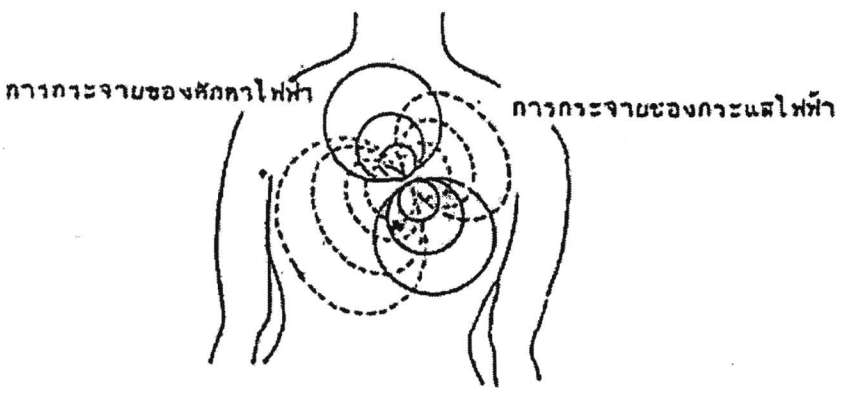
จากการทดลองของการแพทย์พบว่าความเข้มข้นของ Ka ภายในเซลล์มีค่ามากกว่า 30 เท่าของความเข้มข้น Ka ภายนอกและความเข้มข้นของ Na ภายนอกมีค่ามากกว่าประมาณ 10 เท่าของความเข้มข้นภายในเซลล์ จากการแพร่ของKa ทำให้เกิดการสูญเสียประจุไฟฟ้าบวกขึ้นภายในเซลล์ เป็นผลทำให้ภายในเซลล์มีศักดาไฟฟ้าลบ เมื่อเทียบกับภายนอกในสภาวะสมดุล ความต่างศักย์ระหว่างภายในกับภายนอกเซลล์ประมาณ -50 mV ถึง -100 mV ค่านี้เรียกว่า rest potential เซลล์ที่อยู่ในสภาวะนี้เรียกว่า polarized

ในสภาวะ polarized สามารถถูกกระตุ้นได้หลายประเภท เช่น ความร้อน, แสง, ความชื้น, อุณหภูมิ และอื่นๆ ขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์ ค่าแรงดันเริ่มต้น (threshold value) คือค่าแรงดันน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเซลล์ จะเกิดการที่ Ka เข้าไปภายในเซลล์อย่างรวดเร็วทำให้ความต่างศักย์ของภายในและภายนอกเซลล์เพิ่มขึ้นจนถึงค่าหนึ่งเรียกว่า action potential มีค่าประมาณ +20 mV และจะกลับคืนสู่สภาวะปกติจนกว่าจะได้รับการกระตุ้นใหม่

ขณะที่เกิด action potential เซลล์จะอยู่ในสภาพ depolarized หลังจากที่เซลล์กลับสู่สภาพเดิมคือ ยอมให้ Ka ผ่านผนังเซลล์ไปได้ ส่วน Na จะเกิดกระบวนการ sodium pump นำออกจากเซลล์อย่างช้าๆกระบวนการนี้จะใช้พลังงานจากการสันดาปภายในเซลล์ เรียกกระบวนการนี้ว่า repolarization
action potential ของเซลล์ที่ถูกกระตุ้นทำให้เกิด potential gradient เป็นผลให้เกิดกระแสไหลไปกระตุ้นเซลล์อื่นๆ ลักษณะเป็นการนำไฟฟ้าของ action potential ถ้ามีการนำไฟฟ้าที่เซลล์ประสาท action potential ของระบบประสาทก็คือคำสังของระบบประสาทที่มีต่อเซลล์กล้ามเนื้อที่ถูกกระตุ้นจากภายนอกไปยังระบบประสาท

2.2 การทำงานของหัวใจ

หัวใจเป็นอวัยวะที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งของร่างกาย ทำหน้าที่สูบฉีดโลหิตให้หมุนเวียนไปทั่วร่างกาย โดยที่การหดตัวและพองตัวอย่างสม่ำเสมอของหัวใจเพื่อส่งโลหิตไปทั่วๆ ร่างกายนั้นจะถูกควบคุมการทำงานด้วยกล้ามเนื้อพิเศษที่เรียกว่า กล้ามเนื้อหัวใจ (myocardium) ซึ่งในการหดตัวและพองตัวดังกล่าวไปแล้วนี้ทำให้เกิดศักดาไฟฟ้า (electric potential) กระจายไปสู่ส่วนต่างๆ ของร่างกาย ดังแสดงในรูปที่ 2.1



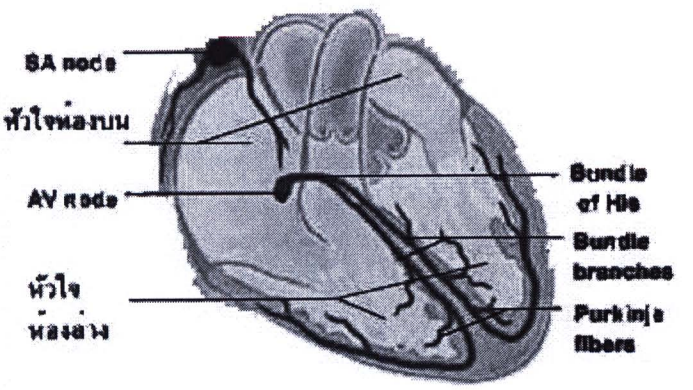
รูปที่ 2.1 การกระจายกระแสไฟฟ้าและศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากการทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ

2.3 คุณสมบัติของกล้ามเนื้อหัวใจ

2.3.1 คุณสมบัติของหัวใจซึ่งเป็นลักษณะพิเศษ

- กล้ามเนื้อหัวใจสามารถทำงานได้ด้วยตนเองเนื่องจากมีศักดาไฟฟ้าทำงาน (action potential)

- การทำงานมีความต่อเนื่อง(contractility) คุณสมบัติเช่นนี้เป็นลักษณะธรรมดาของกล้ามเนื้อหัวใจ การบีบตัวของหัวใจเรียกว่า ซิสโตล (systole) และการคลายตัวเรียกว่า ไดแอสโตล (diastole) แล้วตามด้วยระยะพัก การทำงานครบวงจรเช่นนี้เรียกว่า วงจรการทำงานของหัวใจ (cardiac cycle) มีระบบสื่อนำ(conductivity) ซึ่งเป็นเนื้อเยื่อที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างคุณสมบัติของกล้ามเนื้อและประสาท ทำหน้าที่นำคำสั่งไปยังส่วนต่างๆ ของหัวใจเพื่อให้การทำงานเป็นจังหวะและพร้อมเพรียงกัน ถึงแม้ว่ากล้ามเนื้อหัวใจจะทำงานได้เองแต่ในร่างกายจะต้องมีระบบสื่อนำเป็นตัวเริ่มทำให้เกิดพลังประสาทดังแสดงในรูปที่ 2.2

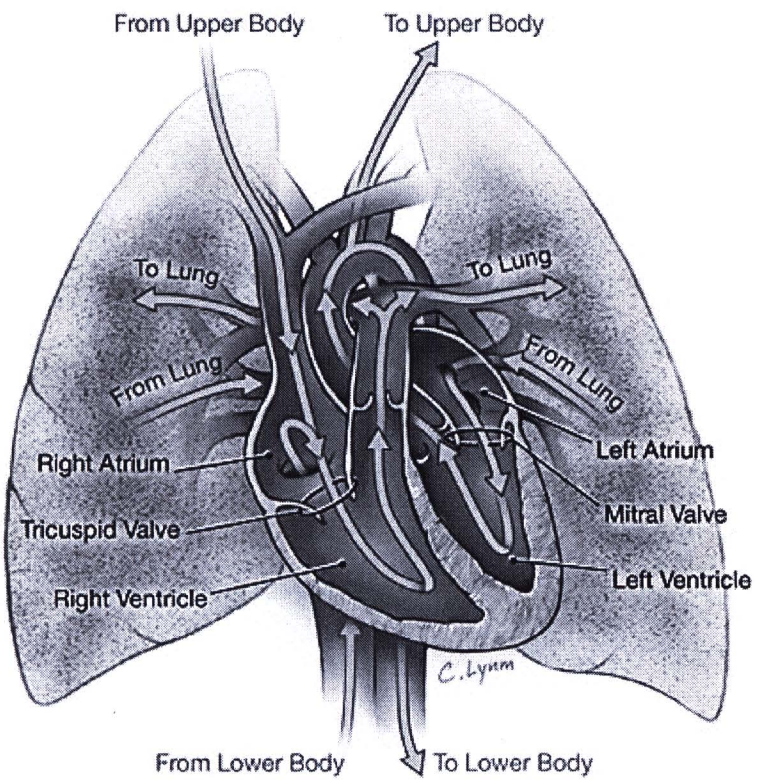


รูปที่ 2.2 ระบบสื่อนำคลื่นไฟฟ้าของหัวใจ

ระบบสื่อนำดังกล่าวนี้ประกอบด้วยกลุ่มเซลล์ที่อยู่บริเวณหัวใจห้องบนขวา (right atrium) ใกล้กับรูเปิดของหลอดเลือดซุปพีเรียร์เวนาคาวา (superior vena cava) เรียกว่าไซโน-เอเตรียลโหนด (Sino-Artial node : SA node) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณไฟฟ้ากระตุ้นเพื่อให้เกิดการบีบตัวของหัวใจห้องบนและนำคลื่นไฟฟ้าส่งต่อไปยังกลุ่มเซลล์ที่บริเวณส่วนบนของหัวใจห้องล่างขวา (right ventricle) เรียกว่า เอตริโอเวนตริคูล่าร์โหนด (Atrioventricular node :AV node) โดยที่กลุ่มเซลล์นี้มีส่วนของเนื้อเยื่อที่เรียกว่าบันเดิลออฟฮิส (bundle of his) และส่วนของเส้นใยพิเศษเรียกว่า เพอร์คินจ์ (purkinje fibers) ทำหน้าที่เป็นสื่อนำสัญญาณจากกลุ่มเซลล์ที่

บริเวณส่วนบนของหัวใจห้องล่างขวาผ่านไปยังกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่าง ระบบสื่อนำตั้งแต่กลุ่มเซลล์ที่บริเวณส่วนบนของหัวใจห้องล่างขวาลงมาเรียกว่า ระบบเพอร์คินจ์ (purkinje's system)

กล้ามเนื้อหัวใจมีระยะดื้อนาน ในระยะบีบตัว กล้ามเนื้อยังอยู่ในภาวะดีโพลาร์ไรซ์ (depolarization) ซึ่งเป็นระยะแรกที่เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจถูกกระตุ้น ระยะนี้เรียกว่า ระยะแอปโซลูทระแฟรคทอรี (absolute refractory period) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 0.25 s แต่ต่อมาในระยะต้นของการคลายตัวนั้นกล้ามเนื้อหัวใจมีการสนองตอบต่อการกระตุ่น (excitability) มากขึ้น แต่ก็ยังดื้ออยู่ต้องทำการกระตุ้นด้วยตัวกระตุ้นที่แรงมากพอจึงสามารถตอบสนองได้ เรียกระยะนี้ว่า ระยะรีเลทีฟรี แฟรคทอรี (relative refactory period) ซึ่งใช้เวลาประมาณ 0.05 s



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางแสดงส่วนต่างๆของหัวใจ

2.3.2 การทำงานของหัวใจในหนึ่งรอบ

หัวใจมีหน้าที่ในการสูบฉีดโลหิตไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกาย ภายในหัวใจแบ่งออกเป็น 4 ห้อง โดยแบ่งเป็น 2 ซีกด้านซ้ายและด้านขวามีผนังกั้นระหว่างกันเรียกว่า septum ในแต่ละด้านจะมีการกั้นระหว่างด้านบนกับด้านล่าง

- สองห้องบนเรียกว่า receiving chamber or atrium
- สองห้องล่างเรียกว่า pumping chamber or ventricle

ซึ่งในหนึ่งรอบจะมีการทำงานดังนี้

1. หัวใจห้องบนขวา right atrium นำโลหิตดำจากเส้นโลหิตดำใหญ่สองเส้น คือ supetior venacava (เส้นบน) และ inferior venacava (เส้นล่าง) เข้ามาสู่หัวใจแล้วให้โลหิตไหลผ่านตรงสู่หัวใจห้องล่างขวา right ventricle โดยมีลิ้นหัวใจ tricuspid value
2. หัวใจห้องล่างขวาจะทำหน้าที่สูบฉีดโลหิตดำเพื่อนำไปฟอกที่ปอดโดยผ่านเส้นโลหิตดำใหญ่ Pulmonary artery
3. โลหิตที่ฟอกได้แล้วจะไหลจากปอดและไหลกลับเข้ามาที่หัวใจห้องบนซ้าย left atrium ทางหลอดโลหิตแดงบน polmonary veinus แล้วไหลลงสู่หัวใจห้องล่างซ้าย left ventricleโดยผ่านเส้นหัวใจ mitral value
4. จากนั้นหัวใจห้องล่างซ้ายจะเป็นตัวทำหน้าที่สูบฉีดโลหิตแดงไปเลี้ยงส่วนต่างๆของร่างกาย โดยผ่านทางหลอดโลหิตแดงใหญ่ Aorta ตามปกติหัวใจจะทำงานประมาณ 1-1.3 Hz หรือประมาณ 60-80 ครั้งต่อนาที อัตราการเต้นของหัวใจเกิดจากการบีบตัวของหัวใจห้องล่างทั้งซ้ายและขวาพร้อมกัน

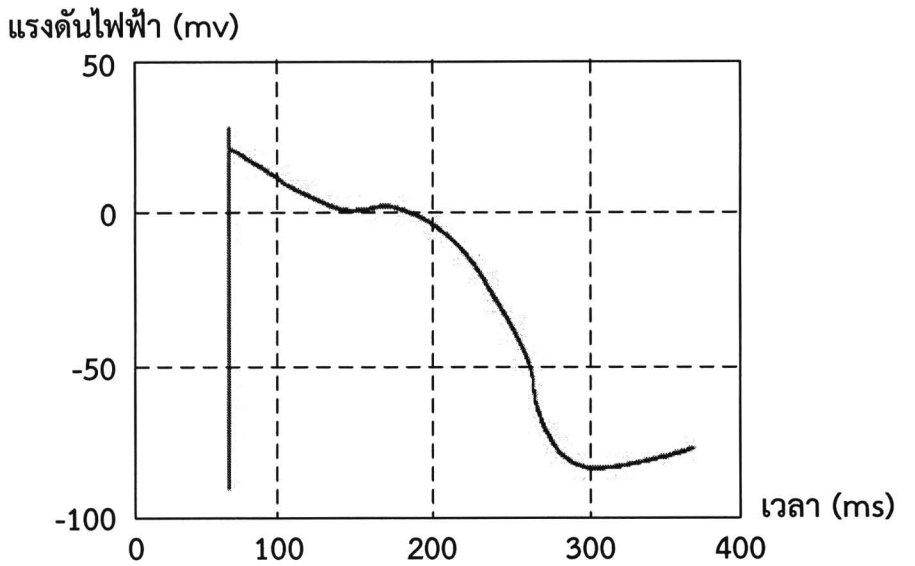
2.4 สัญญาณไฟจากหัวใจ

ตามปกติเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจจะมีแรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์มีค่าเป็นลบมากกว่าแรงดันไฟฟ้าภายนอกเซลล์ประมาณ 90 mV แสดงตามรูปที่ 2.4 แรงดันไฟฟ้าดังกล่าวเรียกว่า ศักย์ไฟฟ้าขณะอยู่นิ่ง (resting potential) ถ้าศักย์ไฟฟ้าขณะอยู่นิ่งนี้มีค่าสูงกว่าขีดจำกัดค่าหนึ่ง จะมีการแตกตัวของอนุภาคและให้ประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นเมื่อมีการแตกตัวให้ประจุไฟฟ้าเกิดขึ้นศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์มีค่าประมาณ 30 mV และเซลล์กล้ามเนื้อจะมีการหด

ตัวทำให้เซลล์มีขนาดเล็กลงหลังจากนั้นประมาณ 200 ms ศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์จะกลับไปมีค่าเท่ากับศักย์ไฟฟ้าขณะหยุดนิ่งและเซลล์จะอยู่ลักษณะคลายตัว จนกว่าวัฏจักรจะเริ่มซ้ำ (เมื่อศักดิ์ไฟฟ้าหยุดนิ่งเพิ่มขึ้นอีก)

เซลล์หัวใจส่วนบนมีการเกี่ยวพันทางไฟฟ้ากับเซลล์ข้างเคียง ดังนั้นเมื่อเซลล์หนึ่งเกิดแตกตัวให้ประจุเซลล์ใกล้เคียงจะได้รับการกระตุ้นให้ปลดปล่อยประจุด้วยคลื่น ของการปลดปล่อย ประจุจะกระจายไปทั่วหัวใจส่วนบนในที่สุดเซลล์ทุกเซลล์ในหัวใจส่วนบนจะมีการแตกตัวทำให้ประจุหัวใจส่วนบนจะหดตัวคลื่นของการปลดปล่อยประจุเกิดจากเซลล์จำนวนมากทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้ามากพอที่จะวัดได้โดยใช้ขั้วไฟฟ้าวางบนผิวหนังค่าแรงดันที่วัดได้ด้วยวิธีนี้เรียกว่า อิเล็กโตรคาร์ดิโอแกรม (electrocardiogram ECG)

ในทำนองเดียวกันกับเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในหัวใจห้องส่วนบน เซลล์ทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบของกล้ามเนื้อหัวใจห้องส่วนล่างทั้งสองจะมีความสัมพันธ์ทางไฟฟ้ากับเซลล์ข้างเคียงดังนั้นเซลล์ใดเซลล์หนึ่งในหัวใจส่วนล่างมีการแตกตัวของอนุภาคและให้ประจุออกมา และการหดตัวในทุกๆเซลล์ของหัวใจส่วนล่าง



รูปที่ 2.4 แรงดันไฟฟ้าภายในเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเมื่อเกิดการปล่อยประจุ ความต่างศักย์ไฟฟ้าจะเปลี่ยนมามีค่าเป็นบวก จากนั้นจึงตกลงเป็นศูนย์อยู่ประมาณ 200 ms แล้วจึงมีค่าเป็นลบ

อย่างไรก็ตาม หัวใจส่วนบนและหัวใจส่วนล่างไม่ได้เชื่อมต่อกันโดยตรงบริเวณแนวเชื่อมของทางไฟฟ้าของหัวใจส่วนบนและหัวใจส่วนล่างเรียกว่า AV node or Ventricular node การส่งผ่านสัญญาณช้ากว่ากัน0.04 s การช้านี้ทำให้หัวใจส่วนบนมีเวลาฉีดเลือดให้หัวใจส่วนล่าง การล่าช้าดังกล่าวยังเป็นตัวจำกัดจำนวนครั้งต่อนาทีที่หัวใจบีบตลอดจากหัวใจส่วนบนจนถึงหัวใจส่วนล่าง ในกรณีที่หัวใจส่วนบนมีการบีบรัดตัวเร็วเกินไป การจำกัดอัตราการบีบรัดตัวของหัวใจส่วนล่างเป็นการทำให้ชีวิตปลอดภัย ทั้งนี้เพราะว่าการสูบฉีดเลือดของหัวใจในส่วนล่างนี้เองที่ทำให้เลือดไหลไปสู่สมองและอวัยวะต่างๆได้มากที่สุด ถ้าการบีบตัวดังกล่าวเกิดขึ้นเร็วไปการไหลของเลือดจะลดลงไปเนื่องจากไม่มีเวลามากพอที่จะใช้สูบฉีดเลือดเข้าสู่หัวใจส่วนล่างซึ่งเวลาดังกล่าวคือช่วงเวลาการหด

2.5 อิเล็คโตรคาร์ดิโอแกรม

หัวใจจะถูกกระตุ้นโดย action potential แต่การกระตุ้นไม่ได้มาจากระบบส่วนกลางหรือสมอง แต่เป็นการกระตุ้นโดยตัวเอง โดยมีเซลล์กลุ่มหนึ่งผลิตสัญญาณไฟฟ้า ออกมากระตุ้นกล้ามเนื้อหัวใจและหัวใจมีระบบนำไฟฟ้า (conduction system) ทำหน้าที่คล้ายเส้นประสาทโดยจะนำสัญญาณไฟฟ้า ไปกระตุ้นเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ

การเกิด depolarization และ repolarization ทำให้มีแรงคลื่นไฟฟ้าเกิดขึ้นสามารถวัดได้ที่ผิวร่างกาย ศักย์ดาไฟฟ้านี้เรียกว่า ECG [9]

คลื่นไฟฟ้าหัวใจเริ่มจาก polarization ที่ SA Node ทำให้กล้ามเนื้อรอบ atria หดตัวรูปคลื่นตอนนี้เรียกว่า p wave จากนั้นเกิด repolarization ตามมาทันที เกิดรูปคลื่น TA ในทางปฏิบัติมักจะไม่ได้คลื่นนี้ ในขณะที่แรงกระตุ้นสงจาก SA Node ไป AV Node ต้องใช้เวลาระยะหนึ่งคือประมาณ 120-220 ms และเมื่อส่งแรงกระตุ้นถึง AV Node ทำให้เกิด depolarization ที่ Node นี้และส่งผ่าน Bundle ที่ His ไปยัง

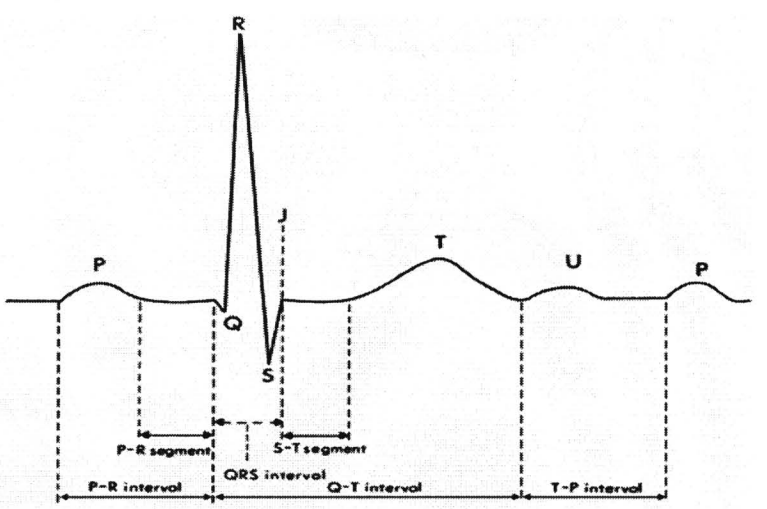
กล้ามเนื้อ myocardium เกิด depolarization ที่ Ventricles ได้คลื่น QRS ต่อจากนั้นเกิด repolarization ได้คลื่น T และจะเวียนมาเริ่มต้น ตามเดิมโดยที่มีรายละเอียดแต่ละรูปสัญญาณนี้

1. P wave : สัญญาณ P เกิดจากการทำงานของหัวใจบน มีคาบเวลาประมาณ 80-120 ms

2. QRS complex : สัญญาณรวม QRS เกิดจากการทำงานของหัวใจห้องล่าง จะมีคาบเวลาประมาณ 80-100 ms และสัญญาณ R จะมีขนาดสูงที่สุด เนื่องจากหัวใจห้องล่างจะบีบโลหิตส่งไปยังทุกส่วนของร่างกาย ผ่านผนังของหัวใจห้องล่างจึงมีความหนามากกว่าส่วนอื่นๆ ถ้าทำการนำขั้วไฟไปติดที่แขนขวาและแขนซ้าย หรือที่เรียกว่า Lead1 การที่สัญญาณ R มีขนาดสูงสุดเป็นเพราะผลรวมของศักดาไฟฟ้าทำงานของเซลล์จำนวนมาก
3. T wave : สัญญาณ T เกิดการคลายตัวของกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างมีคาบเวลาประมาณ 200 ms และมีขนาดประมาณ 30% ของสัญญาณ R

ตารางที่ 2.1 ช่วงเวลาต่างๆ ของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ช่วงเวลาต่างๆของ คลื่นไฟฟ้าหัวใจ	ช่วงเวลาปกติ (s)	
	ค่าเฉลี่ย	ช่วงเวลา
ช่วงเวลาของ PR	0.18	0.12 - 0.20
ช่วงเวลาของ QR	0.08	ถึง 0.10
ช่วงเวลาของ QT	0.4	ถึง 0.43
ช่วงเวลาของ ST (คือ TQ-QRS)	0.32	ถึง 0.35



รูปที่ 2.5 ผลจากการทำอิเล็คโตรคาร์ดิโอแกรมของคนปกติ

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าคลื่นดานบนประกอบไปดวย P Wave และ T Wave โดยสามาถอธิบายไดดังนี้คือ P Wave จะเปนชวงจังหวะ Depolarization ของหัวใจหองบน และ QRS Wave เปนชวง Depolarization ของหัวใจหองลาง และในขณะเดียวกัน หัวใจหองบนก็จะทำการ Repolarization พรอมกันแตการ Depolarization ของหัวใจหองลางจะทับคลื่นของการ Repolarization ของหัวใจหองบน สวน T Wave เกิดจากการที่หัวใจห้องลางทำการ Repolarization โดยทั้งหมดสามารถอธิบายไดดังนี้ จากการที่หัวใจจะเริ่มการหดตัวที่สภาวะปกติภายในเซลลของหัวใจจะมีประจุเปนลบมากกวาภายนอกเซลลอยูประมาณ -90 mV

แตพอเกิดปรากฏการณที่ Na+ เกิดการแพรกระจายเขามาภายในเซลลจะทำใหเกิดการใหประจุภายในเซลลบวกดังที่ไดกลาวมาแลวโดยมีคาประมาณ + 30 mV ตอจากนั้นก็จะเกิดการแตกประจุของภายในเซลล์เป็นผลทำใหเกิดการหดตัวของหัวใจรียกปรากฏการณ Depolarization ตอจากนั้นเยื่อหุมเซลลจะทำการปดกั้น Na+ เปนผลทำใหประจุกลับเขาสูสภาวะปกติ หรือจากการที่หัวใจเกิดการหดตัว จะทำใหเกิดการลดลงของประจุไฟฟาในเซลลกลับมาตามปกติเราเรียกวาการ Repolarization ซึ่งจะเปนชวงที่หัวใจจะเกิดการคลายตัว และก็จะทำใหเกิดการกระทำเปนรอบๆไป และจากสภาวะการถายเทประจุของเซลลหัวใจจะมีการแพรขยายออกไปทั่วห้องหัวใจ ทำใหเกิดความตางศักยมากพอที่จะทำใหเกิดการวัดคลื่นไฟฟาจากหัวใจได สัญญาณที่วัดเปนไฟฟ้าหัวใจ มีลักษณะที่สำคัญ คือ มีขนาดอยูระหวาง 100 μV ถึง 5,000 μV ชวงความถี่ 0.2 Hz ถึง 100 Hz และอิมพิแดนซ 0.1 MΩ ถึง 0.8 MΩ