



เทคนิคการแปลผลคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และการประยุกต์ใช้ในการพยาบาล



พรสวรรค์ คัดคำ
คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

เทคนิคการแปลผลคลื่นไฟฟ้าหัวใจ และการประยุกต์ใช้ในการพยาบาล



พรสวรรค์ คิตคำ

คณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา

คำนำ

คลื่นไฟฟ้าหัวใจ (electrocardiogram) เป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าของกล้ามเนื้อหัวใจเป็นผลการตรวจที่ช่วยประเมินภาวะสุขภาพ เฝ้าระวังและติดตามการเปลี่ยนแปลงความผิดปกติในระบบหัวใจและหลอดเลือด ซึ่งให้ข้อมูลทั้งอัตราเร็ว จังหวะการเต้นของหัวใจ และลักษณะคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ผิดปกติ ที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เพื่อการดูแลรักษาผู้ป่วยได้ หากพยาบาลซึ่งเป็นบุคลากรทางการแพทย์ที่อยู่ใกล้ชิดผู้ป่วยสามารถแปลผลคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ผิดปกติได้ จะสามารถเฝ้าระวังความผิดปกติที่อาจเกิดขึ้น และช่วยเหลือผู้ป่วยได้ทันเวลา

จากประสบการณ์ในการสอนและการปฏิบัติการพยาบาลผู้ป่วยภาวะวิกฤตพบว่าพยาบาลที่เริ่มปฏิบัติงานใหม่ ตลอดจนนิสิตพยาบาลยังขาดความเข้าใจและแนวทางการตัดสินใจในการให้การพยาบาลผู้ป่วยที่มีคลื่นไฟฟ้าหัวใจผิดปกติ ดังนั้นผู้เขียนจึงได้ถ่ายทอดความรู้และประสบการณ์ รวมทั้งได้วาดตัวอย่างคลื่นไฟฟ้าหัวใจที่ได้จากการค้นคว้าและจากประสบการณ์การดูแลผู้ป่วยรวบรวมไว้ในหนังสือเล่มนี้ โดยแสดงขั้นตอนการแปลผลคลื่นไฟฟ้าหัวใจแต่ละชนิดและการพยาบาลที่สำคัญ นอกจากนั้นยังมีตัวอย่างกรณีศึกษาผู้ป่วยหัวใจขาดเลือดเฉียบพลันที่มีภาวะหัวใจหยุดเต้น แปลผลคลื่นไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้ในการพยาบาลโดยมุ่งหวังให้เป็นแนวทางในการประเมินผู้ป่วยที่มีภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะและให้การพยาบาลผู้ป่วยต่อไป

พรสวรรค์ คิดคำ

กรกฎาคม 2567



สารบัญ

	หน้า
คำนิยม	III
คำนำ	V
กิตติกรรมประกาศ	VI
สารบัญ	VII
สารบัญภาพ	IX
สารบัญตาราง	XIII
บทที่ 1 ระบบการนำไฟฟ้าของหัวใจ	1
องค์ประกอบของระบบการนำไฟฟ้าในหัวใจ	1
กระบวนการเกิดศักย์ทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ	4
ลำดับการสร้างและนำไฟฟ้าของหัวใจ	6
ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของหัวใจ	9
แบบฝึกหัด บทที่ 1 ระบบการนำไฟฟ้าของหัวใจ	12
บทที่ 2 คลื่นไฟฟ้าหัวใจ	15
การเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	15
การตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	16
องค์ประกอบของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	19
ระบบขั้วบันทึกของคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	27
แบบฝึกหัด บทที่ 2 คลื่นไฟฟ้าหัวใจ	31
บทที่ 3 การแปลผลคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	33
ขั้นตอนที่ 1 อัตราการเต้นของหัวใจ	33
ขั้นตอนที่ 2 จังหวะการเต้นของหัวใจ	35
ขั้นตอนที่ 3 แกนไฟฟ้าของหัวใจ	41
ขั้นตอนที่ 4 ภาวะกล้ามเนื้อหัวใจโต	44
ขั้นตอนที่ 5 ภาวะหัวใจขาดเลือดเฉียบพลัน	46
แบบฝึกหัด บทที่ 3 การแปลผลคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	50
บทที่ 4 คลื่นไฟฟ้าหัวใจผิดปกติและการประยุกต์ใช้ในการพยาบาล	59
Sinus tachycardia	59
Sinus bradycardia	61



Sinus paused	64
Atrioventricular nodal reentrant tachycardia	65
Atrioventricular reentrant tachycardia	70
Atrial tachycardia	71
Atrial fibrillation	73
Atrial flutter	77
Premature ventricular contraction	78
Ventricular tachycardia	82
Idioventricular rhythm	84
Ventricular fibrillation	86
Torsade de pointes	91
Asystole	92
Pulseless electrical activity	94
Atrioventricular block	95
Bundle branch block	99
Acute coronary syndrome	102
ECG in electrolyte imbalance	113
Pacemaker rhythms	118
วิธีการแยกคลื่นไฟฟ้าหัวใจผิดปกติ	120
แบบฝึกหัด บทที่ 4 ภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ	123
บทที่ 5 กรณีศึกษา	139
กรณีศึกษาผู้ป่วยภาวะหัวใจขาดเลือดเฉียบพลัน	139
แผนการรักษา	140
วิเคราะห์กรณีศึกษา	143
การพยาบาล	144
เอกสารอ้างอิง	152
ภาคผนวก 1 เฉลยแบบฝึกหัด บทที่ 1 ระบบการนำไฟฟ้าของหัวใจ	156
ภาคผนวก 2 เฉลยแบบฝึกหัด บทที่ 2 คลื่นไฟฟ้าหัวใจ	157
ภาคผนวก 3 เฉลยแบบฝึกหัด บทที่ 3 การแปลผลคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	158
ภาคผนวก 4 เฉลยแบบฝึกหัด บทที่ 4 ภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะ	165
ดัชนี	180



สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 Cell membrane potential	3
ภาพที่ 2 การเกิดศักย์ทำงานและการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	6
ภาพที่ 3 conduction system of the heart	8
ภาพที่ 4 กระดาษกราฟบันทึกคลื่นไฟฟ้าหัวใจ	17
ภาพที่ 5 การวางขั้วไฟฟ้าแบบ 3-electrode system และ 5-electrode system	18
ภาพที่ 6 short PR interval	19
ภาพที่ 7 prolonged PR interval	20
ภาพที่ 8 Q wave	21
ภาพที่ 9 R wave progression	21
ภาพที่ 10 รูปแบบของ QRS complex	22
ภาพที่ 11 J point	22
ภาพที่ 12 ST segment elevation และ ST segment depression	23
ภาพที่ 13 T wave inversion	23
ภาพที่ 14 tall peak T wave	24
ภาพที่ 15 hyperacute T wave	24
ภาพที่ 16 prolonged QT interval	25
ภาพที่ 17 U wave	25
ภาพที่ 18 RR interval	26
ภาพที่ 19 ลักษณะคลื่นไฟฟ้าหัวใจปกติ	26
ภาพที่ 20 limb leads	28
ภาพที่ 21 ตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้า chest leads	30
ภาพที่ 22 คลื่นไฟฟ้าหัวใจที่มีจังหวะสม่ำเสมอ	34
ภาพที่ 23 คลื่นไฟฟ้าหัวใจที่มีจังหวะไม่สม่ำเสมอ	34
ภาพที่ 24 แสดงลำดับการนำไฟฟ้าหัวใจที่มีจุดกำเนิดไฟฟ้าจาก SA node	36
ภาพที่ 25 Junctional rhythm ที่ไม่มี P wave	36
ภาพที่ 26 แสดงลำดับการนำไฟฟ้าหัวใจที่มีจุดกำเนิดไฟฟ้า จากตำแหน่งตรงกลาง AV node	37
ภาพที่ 27 Junctional rhythm ที่มี Inverted P wave	37



ภาพที่ 28 แสดงลำดับการนำไฟฟ้าหัวใจที่มีจุดกำเนิดไฟฟ้า ที่อยู่ก่อนไปทางด้านบนของ AV node	38
ภาพที่ 29 Junctional rhythm ที่มี P wave ตามหลัง QRS complex	38
ภาพที่ 30 แสดงลำดับการนำไฟฟ้าหัวใจที่มีจุดกำเนิดไฟฟ้า ที่อยู่ก่อนไปทางด้านล่างของ AV node	39
ภาพที่ 31 ventricular rhythm; monomorphic VT	39
ภาพที่ 32 แสดงจุดกำเนิดไฟฟ้าจากตำแหน่งหัวใจห้องล่าง	40
ภาพที่ 33 ventricular rhythm; polymorphic VT	40
ภาพที่ 34 แสดงจุดกำเนิดไฟฟ้าจากหัวใจห้องล่างที่มีหลายตำแหน่ง	40
ภาพที่ 35 ventricular depolarization vector	41
ภาพที่ 36 axis of ECG	42
ภาพที่ 37 P mitrale	44
ภาพที่ 38 P pulmonale	45
ภาพที่ 39 left ventricular hypertrophy	45
ภาพที่ 40 right ventricular hypertrophy	46
ภาพที่ 41 ST segment elevation	47
ภาพที่ 42 ST-segment depression	47
ภาพที่ 43 sinus tachycardia	60
ภาพที่ 44 sinus bradycardia	61
ภาพที่ 45 sinus paused	64
ภาพที่ 46 atrioventricular nodal reentrant tachycardia (AVNRT)	65
ภาพที่ 47 แสดงการนำสัญญาณไฟฟ้าหมุนวนรอบ AV node	66
ภาพที่ 48 atrioventricular reentrant tachycardia (AVRT)	70
ภาพที่ 49 แสดงการส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านทาง accessory pathway	70
ภาพที่ 50 atrial tachycardia	72
ภาพที่ 51 จุดกำเนิดไฟฟ้าที่หัวใจห้องบน	72
ภาพที่ 52 atrial fibrillation	74
ภาพที่ 53 จุดกำเนิดไฟฟ้าหลายตำแหน่งที่หัวใจห้องบน	75
ภาพที่ 54 atrial flutter	77
ภาพที่ 55 sinus rhythm และ ventricular rhythm	79



ภาพที่ 56 bigeminy PVC	80
ภาพที่ 57 trigeminy PVC	80
ภาพที่ 58 couplet PVC	80
ภาพที่ 59 short run PVC (short run VT)	80
ภาพที่ 60 R on T phenomenon	80
ภาพที่ 61 ventricular tachycardia	82
ภาพที่ 62 Idioventricular rhythm	84
ภาพที่ 63 fine VF	86
ภาพที่ 64 coarse VF	86
ภาพที่ 65 Torsade de pointes	91
ภาพที่ 66 asystole	92
ภาพที่ 67 first degree AV block	95
ภาพที่ 68 second degree AV block mobitz type I	96
ภาพที่ 69 second degree AV block mobitz type II	97
ภาพที่ 70 third degree AV block	98
ภาพที่ 71 left bundle branch block	100
ภาพที่ 72 right bundle branch block	101
ภาพที่ 73 การดูคลื่นไฟฟ้าหัวใจกลับด้าน (mirror image)	103
ภาพที่ 74 แสดง groups of leads	104
ภาพที่ 75 ST segment elevation ใน Lead II, III, aVF	106
ภาพที่ 76 ST segment depression ใน lead V3, V4, V5	107
ภาพที่ 77 tall peak T wave	113
ภาพที่ 78 sine wave	113
ภาพที่ 79 flattening T wave	115
ภาพที่ 80 short ST segment และ prolonged ST segment	116
ภาพที่ 81 atrial paced rhythm	118
ภาพที่ 82 ventricular paced rhythm	118
ภาพที่ 83 atrioventricular sequential pacers	118
ภาพที่ 84 คลื่นไฟฟ้าหัวใจ 12 leads ครั้งที่ 1	140
ภาพที่ 85 คลื่นไฟฟ้าหัวใจ 12 leads ครั้งที่ 2	141



ภาพที่ 86 ECG monitor 1	141
ภาพที่ 87 ECG monitor 2	141
ภาพที่ 88 ECG monitor 3	142
ภาพที่ 89 ECG monitor 4	142

ตัวอย่าง

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 สรุปลำดับการสร้างและนำสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจ	8
ตารางที่ 2 ตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้า limb leads	28
ตารางที่ 3 ตำแหน่งการวางขั้วไฟฟ้า chest leads	29
ตารางที่ 4 Groups of leads	104
ตารางที่ 5 ECG criteria for the diagnosis of ST-elevation myocardial infarction	106

ตัวอย่าง





ระบบการนำไฟฟ้าของหัวใจ

หัวใจเป็นอวัยวะที่ประกอบไปด้วยกลุ่มเซลล์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ สามารถเป็นจุดกำเนิดไฟฟ้า (impulse formation) ได้ด้วยตนเอง สามารถกระตุ้นให้เกิดศักย์ทำงาน (action potential) และส่งต่อสัญญาณไฟฟ้าไปยังกลุ่มเซลล์นำไฟฟ้าและเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจได้ เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเรียงตัวประสานกันโดยมีเส้นใยเป็นโครงร่าง ทำให้เซลล์ที่อยู่ติดกันติดต่อกันถึงกันผ่านทางช่องว่างระหว่างเซลล์ (low-resistance junction หรือ gap junction) การเรียงตัวในลักษณะนี้ทำให้สามารถส่งต่อสัญญาณไฟฟ้าต่อกันเป็นทอดๆ อย่างรวดเร็ว จึงกระตุ้นให้กล้ามเนื้อหัวใจหดตัวเป็นจังหวะพร้อมๆ กัน⁽¹⁾

องค์ประกอบของระบบการนำไฟฟ้าในหัวใจ

องค์ประกอบสำคัญในระบบการนำไฟฟ้าของหัวใจ (cardiac conduction system) ประกอบด้วย sinoatrial node, atrioventricular node, conducting fiber และ ion โดยมีรายละเอียดดังนี้

Sinoatrial node

Sinoatrial node (SA node) เป็นกลุ่มเซลล์อยู่ในหัวใจห้องบนขวา ใกล้กับทางเข้าของหลอดเลือดดำเวนาคาวา (vena cava) ทำหน้าที่เป็นเซลล์คุมจังหวะ หรือ pacemaker cell ซึ่งเป็นจุดกำเนิดไฟฟ้าของหัวใจที่ทำให้เกิดศักย์ทำงาน (action potential) ขึ้นก่อน จากนั้นจึงเหนี่ยวนำให้เซลล์ที่อยู่ใกล้เคียงเกิดศักย์ไฟฟ้าต่อๆ กันไป จากเซลล์ที่มีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าไปยังเซลล์โดยรอบ เคลื่อนผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์โดยเริ่มจากหัวใจห้องบนขวาส่งไปห้องบนซ้าย

ส่งไป atrioventricular node (AV node) และหัวใจห้องล่างตามลำดับ เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจแต่ละตำแหน่งทำให้เกิดศักย์ทำงานด้วยความถี่ที่ต่างกัน เป็นคุณสมบัติเฉพาะของเซลล์ในตำแหน่งนั้นๆ เรียกว่า intrinsic pacemaker rate ซึ่งกลุ่มเซลล์ของ SA node มีความถี่สูงที่สุดในภาวะปกติ SA node จึงเป็นตำแหน่งที่กำหนดอัตราการเต้นของหัวใจ ค่าปกติ คือ 60 - 100 ครั้ง/นาที ^(1,2)

Atrioventricular node

Atrioventricular node (AV node) เป็นกลุ่มเซลล์ที่อยู่บริเวณรอยต่อระหว่างผนังกันหัวใจห้องบนและล่างขวา ในภาวะปกติการส่งสัญญาณไฟฟ้าจากหัวใจห้องบนลงไปห้องล่างจำเป็นต้องผ่าน AV node เสมอ เนื่องจากเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจห้องบนและห้องล่างนั้นไม่ได้เชื่อมต่อกันโดยตรง มีเพียงเส้นใยโครงร่างที่ประสานกันไว้ AV node จึงเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการบีบตัวของหัวใจห้องล่างและเป็นเสมือนตัวกรองสัญญาณไฟฟ้าจากหัวใจห้องบนที่มีอัตราการเต้นเร็วเกินไปไม่ให้ผ่านลงไปยังหัวใจห้องล่างได้ทุกครั้งที่มีการกระตุ้น ⁽¹⁾

AV node เป็นกลุ่มเซลล์ที่สามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าได้เองแต่มีอัตราเร็วเพียง 40-60 ครั้งต่อนาที ดังนั้นในภาวะปกติจึงรับสัญญาณไฟฟ้าต่อจาก SA node ซึ่งสร้างสัญญาณไฟฟ้าได้เร็วกว่า แต่ถ้า SA node ไม่สามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าได้ตามปกติ AV node อาจทำหน้าที่แทน เรียกคลื่นไฟฟ้าที่มีจุดกำเนิดไฟฟ้าจาก AV node ว่า junctional rhythm ⁽²⁾ กลุ่มเซลล์ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งในหัวใจที่ทำหน้าที่เป็นจุดกำเนิดไฟฟ้าที่อยู่นอก SA node เรียกกลุ่มเซลล์นี้ว่า ectopic pacemaker พบได้ในหัวใจห้องบน หัวใจห้องล่างและในพื้นที่รอยต่อระหว่างห้องบนและห้องล่าง (junctional pacemakers) การทำงานของกลุ่มเซลล์เหล่านี้อาจมีตำแหน่งเดียวหรือหลายตำแหน่งในช่วงเวลาเดียวกันก็ได้ หากจุดกำเนิดไฟฟ้ามีตำแหน่งเดียวทำให้ลักษณะของคลื่นไฟฟ้าหัวใจมีรูปแบบเดียวกัน แต่หากมีหลายตำแหน่งทำให้คลื่นไฟฟ้าหัวใจมีหลายรูปแบบ ⁽¹⁾

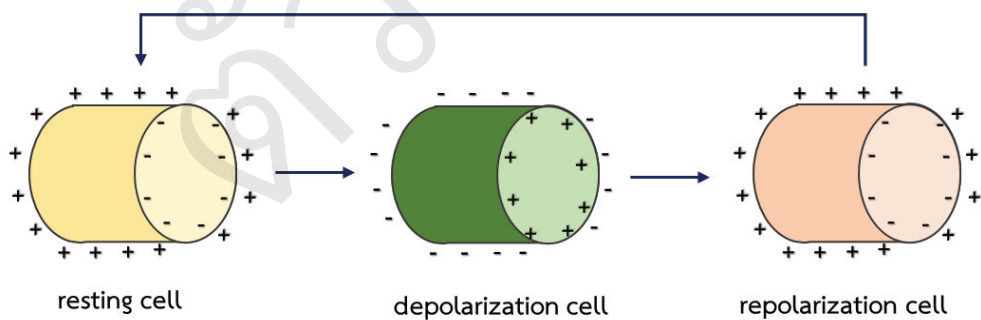
Conducting fiber

Conducting fiber เป็นเส้นใยนำสัญญาณไฟฟ้าในหัวใจ ทำหน้าที่ส่งสัญญาณไฟฟ้าจากจุดกำเนิดไฟฟ้าไปยังส่วนต่างๆ ของหัวใจ จึงเป็นเหมือนสายไฟที่นำไฟฟ้าจากเซลล์ต้นทางไปยังเซลล์ที่อยู่ปลายทาง นอกจากนั้นยังสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าได้เองแต่มีอัตราเร็วเพียง 25-40 ครั้งต่อนาที ⁽³⁾ ประกอบด้วย บันเดิลออฟฮิส (bundle of his) บันเดิลบริอันซ์ (bundle branches) และเพอร์คินเจไฟเบอร์ (purkinje fibers)



Ion

กระบวนการที่ทำให้เกิดศักย์ทำงาน จนทำให้เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจหดตัวและคลายตัว เกี่ยวข้องกับไอออน (ion) สำคัญ 3 ชนิด ได้แก่ โพแทสเซียม (potassium [K^+]) โซเดียม (sodium [Na^+]) และแคลเซียม (calcium [Ca^{2+}]) เซลล์ที่อยู่ในระยะพัก (resting state) เป็นระยะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้า โพแทสเซียมส่วนใหญ่อยู่ในเซลล์ โซเดียมส่วนใหญ่อยู่นอกเซลล์และแคลเซียมส่วนใหญ่อยู่ในเยื่อหุ้มท่อภายในเส้นใยกล้ามเนื้อ (sarcoplasmic reticulum) ในระยะนี้บริเวณนอกเซลล์มีประจุบวกมากกว่าในเซลล์ เรียกภาวะโพลาไรเซชัน (polarization) เมื่อ SA node สร้างสัญญาณไฟฟ้า ชักนำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าบนเยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้โซเดียมแชนแนล (sodium channel) เปิด โซเดียมจากนอกเซลล์จึงเข้าสู่เซลล์ ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เปลี่ยนจากลบกลายเป็นบวก เซลล์จึงเกิดการดีโพลาไรเซชัน (depolarization cell) และมีผลทำให้แคลเซียมในระบบเยื่อหุ้มท่อภายในเส้นใยกล้ามเนื้อ เข้าสู่เซลล์ทำให้เส้นใยแอกทิน (actin) และไมโอซิน (myosin) กล้ามเนื้อหัวใจหดตัว หลังจากนั้นโซเดียมแชนแนลปิด ส่วนโพแทสเซียมแชนแนล (potassium channel) เปิด ทำให้โพแทสเซียมในเซลล์เคลื่อนออกนอกเซลล์ทำให้ประจุบวกในเซลล์ลดลง เซลล์จึงเกิดรีโพลาไรเซชัน (repolarization cell) กล้ามเนื้อหัวใจคลายตัว ^(1,2)



ภาพที่ 1 Cell membrane potential

กระบวนการเกิดศักย์ทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจ

กระบวนการเกิดศักย์ทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจเริ่มจากระยะพักของเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งเป็นระยะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงประจุไฟฟ้าเกิดขึ้น จนเมื่อมีการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า มีการเปิดและปิดของช่องไอออนบนเยื่อหุ้มเซลล์ จึงมีการเคลื่อนที่ของไอออนเข้าและออกเซลล์ ชักนำให้เกิดบัพและคลายตัวของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ แบ่งเป็น phase 4, 0, 1, 2 และ 3 ตามลำดับดังนี้^(1,4)

Phase 4: Resting membrane potential (baseline)

เป็นระยะพักของเยื่อหุ้มเซลล์ ในระยะนี้ภายในเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ เป็นระยะก่อนที่จะมีการกระตุ้นทางไฟฟ้า เป็นช่วงที่กล้ามเนื้อหัวใจคลายตัว (diastole) ภายในเซลล์มีโพแทสเซียมมาก ในขณะที่ภายนอกเซลล์มีโซเดียมและแคลเซียมมาก ระยะนี้มีประจุบวกภายนอกเซลล์มากกว่าภายในเซลล์ ค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเซลล์ในระยะนี้จึงมีค่าติดลบประมาณ -90 มิลลิโวลต์ (millivolts; mV)

Phase 0: Rapid depolarization

เป็นระยะที่มีการกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้า มีการเปิดของโซเดียมแชนแนล (sodium channel) ทำให้โซเดียมจากนอกเซลล์เข้าเซลล์อย่างรวดเร็ว โซเดียมซึ่งเป็นไอออนบวกเมื่อเข้าเซลล์มาก ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เปลี่ยนจาก -90 มิลลิโวลต์ไปเป็น +10 มิลลิโวลต์ ภาวะที่ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์มีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะเวลาอันสั้น หรือเรียกศักย์ทำงาน (action potential) ทำให้เกิดกระบวนการดีโพลาไรเซชัน (depolarization) ซึ่งทำให้กล้ามเนื้อหัวใจหดตัว ความสูงของศักย์ไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของโซเดียมที่อยู่นอกเซลล์ เมื่อโซเดียมเข้าเซลล์ปริมาณมากทำให้ความเข้มข้นของโซเดียมที่อยู่นอกเซลล์ลดลงเรื่อยๆ จนเหลือเพียง 20 mEq/L (ค่าปกติประมาณ 140 mEq/L) จึงทำให้เซลล์ไม่สามารถถูกกระตุ้นให้เกิดศักย์ทำงานใหม่ได้ จึงเรียกระยะนี้ว่า effective refractory period (ERP) ในคลื่นไฟฟ้าหัวใจตรงกับกราฟช่วงขาขึ้น (upstroke) ช่วงของ QRS complex



Phase 1: Rapid repolarization (notch)

เป็นระยะที่โซเดียมแชนแนลปิด จึงไม่มีโซเดียมเข้าเซลล์ ในขณะที่โพแทสเซียมแชนแนล (potassium channel) เปิด ทำให้โพแทสเซียมในเซลล์เคลื่อนออกจากเซลล์อย่างรวดเร็ว (K^+ efflux) ทำให้กราฟช่วงนี้เป็นเส้นที่ลดต่ำกว่าเดิมเมื่อเทียบกับจุดสูงสุด มีลักษณะเป็น notch จึงเป็นระยะที่เริ่มมีการคลายตัวของหัวใจ หรือรีโพลาริเซชัน (repolarization) ที่เกิดขึ้นในช่วงสั้นๆ ระยะนี้ตรงกับกราฟช่วงขาลงในคลื่นไฟฟ้าหัวใจช่วงของ QRS complex ก่อนเป็น ST-segment

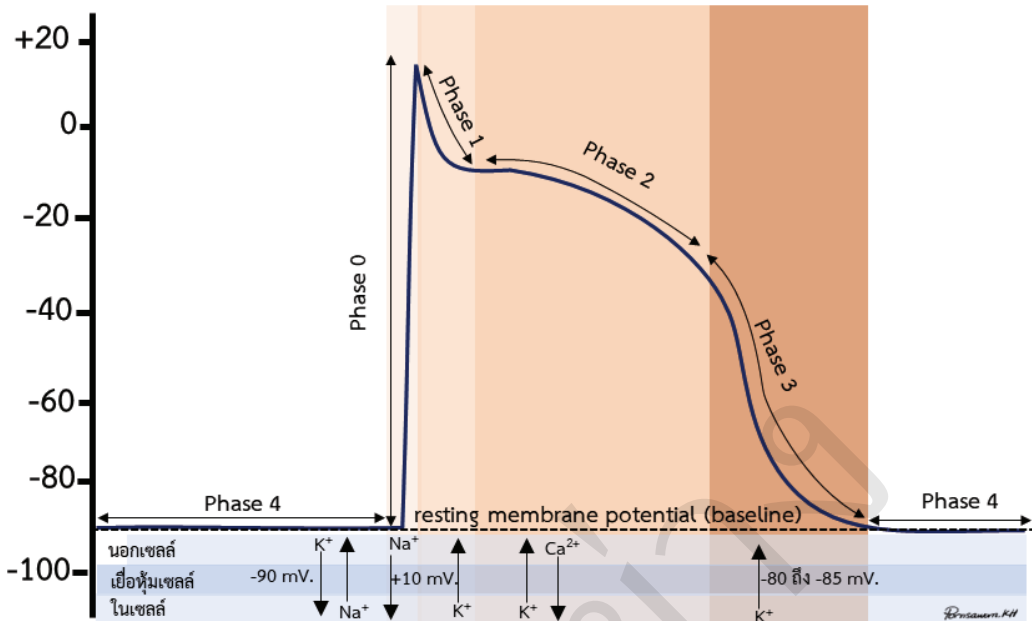
Phase 2: Plateau phase

เป็นระยะที่เกิดรีโพลาริเซชันต่อเนื่องจาก phase 1 ระยะนี้ โพแทสเซียมแชนแนลและแคลเซียมแชนแนล (calcium channel) เปิด ทำให้โพแทสเซียมในเซลล์เคลื่อนออกนอกเซลล์ ส่วนแคลเซียมจากนอกเซลล์เคลื่อนเข้าเซลล์ (Ca^{2+} influx) การที่เส้นกราฟราบแสดงให้เห็นว่าโพแทสเซียมซึ่งเคลื่อนออกนอกเซลล์สมดุลกับแคลเซียมซึ่งเคลื่อนเข้าเซลล์ ระยะนี้ตรงกับคลื่นไฟฟ้าหัวใจในช่วงของ ST segment

Phase 3: Repolarization

เป็นระยะที่เกิดรีโพลาริเซชันช่วงสุดท้าย ระยะนี้แคลเซียมแชนแนลปิด ในขณะที่โพแทสเซียมแชนแนลยังคงเปิด ทำให้โพแทสเซียมเคลื่อนออกนอกเซลล์เรื่อยๆ ศักย์ไฟฟ้าในเซลล์จึงลดต่ำลงเรื่อยๆ จนเมื่อศักย์ไฟฟ้ากลับมาอยู่ที่ประมาณ -80 ถึง -85 มิลลิโวลต์ จึงทำให้โพแทสเซียมแชนแนลปิด เป็นผลให้กล้ามเนื้อหัวใจคลายตัว ระยะนี้ตรงกับคลื่นไฟฟ้าหัวใจในช่วงของ T wave

จากกระบวนการเกิดศักย์ทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจที่กล่าวมาข้างต้น แสดงการเกิดศักย์ทำงานและการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจได้ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเกิดศักย์ทำงานและการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

ลำดับการสร้างและนำไฟฟ้าของหัวใจ

ระบบการนำไฟฟ้าของหัวใจ (cardiac conduction system) มีลำดับการสร้างสัญญาณไฟฟ้า (electrical impulse) และเหนี่ยวนำให้มีการส่งสัญญาณไฟฟ้าโดยมีทิศทางจากหัวใจห้องบนขวาไปหัวใจห้องล่างซ้าย เรียงลำดับดังนี้ ^(1,5)

SA node สร้างสัญญาณไฟฟ้า

คลื่นไฟฟ้าหัวใจปกติมีจุดกำเนิดไฟฟ้าที่ SA node เมื่อสร้างสัญญาณไฟฟ้าแล้วแผ่ไปยังกลุ่มเซลล์บริเวณรอยต่อกับหัวใจห้องบนขวา (crista terminalis) แล้วแผ่ไปยังเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจห้องบนส่วนอื่นๆ โดยมีทิศทางการแผ่จากข้างขวาไปข้างซ้าย และแผ่จากผนังหัวใจด้านในไปด้านนอก เรียกกระบวนการช่วงนี้ว่า atrial depolarization ซึ่งทำให้หัวใจห้องบนบีบตัว แสดงให้เห็นเป็น P wave ในคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

สัญญาณไฟฟ้าถูกส่งไป AV node

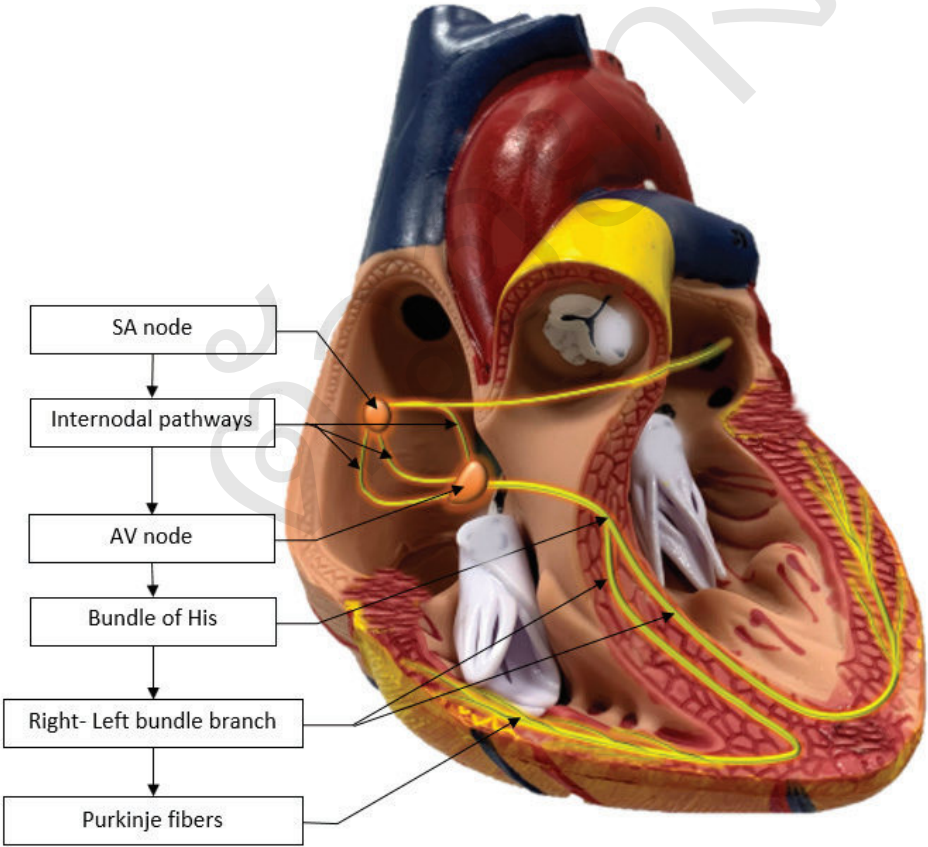
สัญญาณไฟฟ้าจาก SA node ส่งผ่านเส้นทางการนำสัญญาณไฟฟ้า (Internodal pathway) ไปยัง AV node ใช้เวลาบริเวณนี้ประมาณ 0.04 ถึง 0.12 วินาที ซึ่งนับว่าสัญญาณไฟฟ้าผ่านได้ช้าเมื่อเทียบกับตำแหน่งอื่น เนื่องจาก AV node มีขนาดเล็ก มีช่องระหว่างเซลล์ (gap junction) ไม่มาก จึงปรากฏบนคลื่นไฟฟ้าหัวใจเป็นเส้นตรง อยู่ในระดับเส้นพื้นฐาน (isoelectric line) ระหว่าง P wave และ QRS complex แสดงให้เห็นเป็น PR interval ในคลื่นไฟฟ้าหัวใจ

สัญญาณไฟฟ้าถูกส่งไป conducting fiber

สัญญาณไฟฟ้าจาก AV node ส่งต่อไปยัง conducting fiber โดยส่งไปที่บันเดิลออฟฮิส (bundle of his) จากนั้นจึงส่งต่อไปยังบันเดิลบริ้นช์ข้างขวา (right bundle branch) และบันเดิลบริ้นช์ซ้าย (left bundle branch) โดยสัญญาณไฟฟ้าแพร่ไปทางด้านซ้ายมากกว่าทางด้านขวา ทำให้ผนังหัวใจด้านซ้ายเกิดศักย์ไฟฟ้าก่อนผนังด้านขวาเล็กน้อย จากนั้นแพร่ต่อไปยังเพอร์คินเจไฟเบอร์ (purkinje fibers) และกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่าง โดยแพร่จากด้านในไปด้านนอก กระบวนการนี้เรียก major ventricular depolarization ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างบีบตัว ตรงกับกราฟช่วงขาขึ้นในคลื่นไฟฟ้าหัวใจช่วงของ QRS complex หลังจากหัวใจห้องล่างบีบตัวแล้ว ศักย์ไฟฟ้าในเซลล์เริ่มลดต่ำลงเรื่อยๆ เป็นผลให้กล้ามเนื้อหัวใจคลายตัว ตรงกับกราฟช่วงขาลงในคลื่นไฟฟ้าหัวใจช่วงของ QRS complex, ST-segment และ T wave ลำดับการสร้างและนำสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจสรุปได้ดังแสดงในตารางที่ 1 และภาพที่ 3

ตารางที่ 1 สรุปลำดับการสร้างและนำสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจ⁽²⁾

ลำดับที่	โครงสร้างของหัวใจ	ความเร็วในการนำไฟฟ้า (m/sec.)	อัตราเร็วในการสร้างสัญญาณไฟฟ้า (beat/min.)
1	SA node	<0.01	60-100
2	atrial myocardium	1.0-1.2	None
3	AV node	0.02-0.05	40-55
4	bundle of his	1.2-2.0	25-40
5	bundle branches	2.0-4.0	25-40
6	purkinje network	2.0-4.0	25-40
7	ventricular myocardium	0.3-1.0	None



ภาพที่ 3 conduction system of the heart

(พรสวรรค์ คิตคำ, 2563)⁽⁶⁾

ปัจจัยที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของหัวใจ

การนำสัญญาณไฟฟ้าจากจุดกำเนิดไฟฟ้าหัวใจไปยังกล้ามเนื้อหัวใจส่วนต่าง ๆ เป็นการส่งผ่านสัญญาณไฟฟ้าจากเซลล์ที่เกิดดีโพลาไรเซชันขึ้นก่อนแล้วเคลื่อนผ่านช่องว่างระหว่างเซลล์ไปยังเซลล์ข้างเคียง กระบวนการนี้ถูกควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงได้ด้วยหลายปัจจัยดังนี้^(1,7)

ระบบประสาทอัตโนมัติและฮอร์โมน

การกระตุ้นประสาทซิมพาเทติก (sympathetic nervous system) ทำให้ปลายประสาทหลังนอร์อีพิเนพริน (norepinephrine) ไปจับกับตัวรับเบต้า (beta receptor) บน AV node ทำให้เกิดศักย์ทำงานเร็วขึ้นจึงมี phase 0 (rapid depolarization phase) ที่ชันและมีแอมพลิจูด (amplitude) สูง หัวใจบีบตัวเร็วและแรงขึ้น แต่ถ้ากระตุ้นประสาทพาราซิมพาเทติก (parasympathetic nervous system) โดยกระตุ้นเส้นประสาทเวกัส (vagus nerve) ปลายประสาทจะหลั่งอะเซทิลโคลีน (acetylcholine) ไปจับกับตัวรับมัสคารินิก (muscarinic receptors) บนเยื่อหุ้มเซลล์ของ AV node ทำให้เกิดศักย์ทำงานได้ยากและการนำไฟฟ้าลดลง มีผลทำให้หัวใจเต้นช้าลง ส่วนฮอร์โมนที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าหัวใจ คือ แคทีโคลามีน (catecholamine) มีฤทธิ์คล้ายการกระตุ้นเส้นประสาทซิมพาเทติก ส่วนอะเซทิลโคลีน (acetylcholine) มีฤทธิ์คล้ายการกระตุ้นประสาทพาราซิมพาเทติก

อิเล็กโทรไลต์

เกลือแร่ที่มีบทบาทสำคัญต่อการทำงานต่อกล้ามเนื้อหัวใจ ได้แก่ โพแทสเซียม (potassium) แมกนีเซียม (magnesium) โซเดียม (sodium) และแคลเซียม (calcium) การเคลื่อนที่ของไอออน (ion) ของอิเล็กโทรไลต์ส่งผลต่อการเกิดศักย์ไฟฟ้าของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ โพแทสเซียมเป็นไอออนสำคัญที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าหัวใจได้มาก เนื่องจากเยื่อหุ้มเซลล์ของกล้ามเนื้อหัวใจยอมให้โพแทสเซียมผ่านสูงกว่าไอออนชนิดอื่น ๆ การเปลี่ยนแปลงระดับของโพแทสเซียมในเลือดจึงมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงศักย์ไฟฟ้าหัวใจอย่างมาก

ภาวะโพแทสเซียมในเลือดสูง (hyperkalemia) ทำให้การคลายตัวของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจนานกว่าปกติ คลื่นไฟฟ้าหัวใจมี T wave สูงกว่าปกติ นอกจากนั้นโพแทสเซียมยังกดการทำงานของ SA node, AV node และระบบการนำสัญญาณไฟฟ้าของหัวใจห้องล่างทำให้หัวใจ

จึงเต้นช้าลง⁽⁸⁾ ส่วนภาวะโพแทสเซียมในเลือดต่ำ (hypokalemia) ทำให้ลดความไวในการถูกกระตุ้นของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ (slowed conduction) คลื่นไฟฟ้าหัวใจมี T wave ต่ำกว่าปกติ (flattening T wave)⁽⁹⁾

ภาวะแคลเซียมในเลือดสูง (hypercalcemia) ทำให้ศักย์ไฟฟ้าช่วง phase 2 (plateau phase) เป็นบวกมากขึ้น เพราะแคลเซียมแพร่เข้าเซลล์ได้มากและใช้เวลาสั้นลง ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจหดตัวมากกว่าปกติ จึงมีระยะการคลายตัวของกล้ามเนื้อหัวใจสั้นลง หัวใจจึงบีบตัวแรงและเร็วขึ้น ส่วนภาวะแคลเซียมในเลือดต่ำ (hypocalcemia) ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจคลายตัวนาน การบีบตัวของหัวใจไม่มีประสิทธิภาพ⁽¹⁰⁾

ภาวะโซเดียมในเลือดต่ำ (hyponatremia) ทำให้กระบวนการดีโพลาไรเซชันที่ทำให้เกิดศักย์ทำงานของกล้ามเนื้อหัวใจสั้นลง ทำให้ phase 0 (rapid depolarization phase) มีแอมพลิจูด (amplitude) ต่ำลง อาจทำให้ SA node หยุดสร้างสัญญาณไฟฟ้ากะทันหัน เกิดภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะชนิด sinus arrest ได้⁽¹¹⁾

ภาวะแมกนีเซียมในเลือดต่ำ (hypomagnesemia) แมกนีเซียมมีบทบาทสำคัญในการรักษาสมดุลการทำงานของเซลล์และการเกิดศักย์ทำงาน หากระดับแมกนีเซียมในเลือดต่ำทำให้กระบวนการโซเดียมโพแทสเซียมปั๊ม (sodium - potassium pump) ทำงานผิดปกติ และทำให้ศักย์ทำงานในระยะพักของเยื่อหุ้มเซลล์และระยะการเกิดรีโพลาไรเซชันของเซลล์ผิดปกติ เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิดภาวะหัวใจเต้นผิดจังหวะรุนแรงชนิด Torsade de points⁽¹²⁾

พลังงาน

สารให้พลังงานหลักในเซลล์ คือ อะดีโนซีนไตรฟอสเฟต (adenosine triphosphate: ATP) มีความจำเป็นในการเปิดแคลเซียมแชนแนล (calcium channel) หากเซลล์มีพลังงานลดลงทำให้แคลเซียมแชนแนลตอบสนองต่อการกระตุ้นลดลง เซลล์จึงเกิดศักย์ทำงานได้ช้า และถ้าขาดพลังงานเป็นเวลานาน ทำให้ช่องว่างระหว่างเซลล์ ปิดตัว การนำสัญญาณไฟฟ้าลดลง ทำให้เซลล์เสียคุณสมบัติทางไฟฟ้า⁽¹⁾

ชนิดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ

ความเร็วในการนำไฟฟ้าจึงขึ้นอยู่กับ การเปิดของโซเดียมแชนแนลใน phase 0 (rapid depolarization phase) เซลล์ที่มีโซเดียมแชนแนลมาก ทำให้เกิดศักย์ทำงานสูง ทำให้มีความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเซลล์ที่อยู่ข้างเคียงมากจึงนำไฟฟ้าได้เร็ว



ความต้านทานไฟฟ้า

เซลล์ที่มีความต้านทานไฟฟ้าสูงทำให้นำสัญญาณไฟฟ้าได้ช้า เช่น AV node เป็นเซลล์ขนาดเล็ก มีจำนวนช่องว่างระหว่างเซลล์ และโซเดียมแชนแนลน้อยกว่าเซลล์อื่นๆ ในหัวใจ มีความต้านทานไฟฟ้าสูงจึงนำสัญญาณไฟฟ้าได้ช้า

สรุป

หัวใจเป็นอวัยวะที่มีคุณสมบัติพิเศษ สามารถเป็นจุดกำเนิดไฟฟ้า ชักนำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้ากับเซลล์ข้างเคียง และส่งต่อสัญญาณไฟฟ้าเป็นทอดๆ โดยมีจุดเริ่มต้นที่ SA node ส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยัง AV node, conducting fiber และกล้ามเนื้อหัวใจตามลำดับ กระบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเสี้ยววินาที ทำให้เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจทั้งห้องบนและล่างมีการหดตัวเกือบพร้อมกันเสมือนเป็นเซลล์เดียวกัน จนสามารถบีบเลือดออกจากหัวใจได้ หลังจากหัวใจบีบตัว ศักย์ไฟฟ้าของเซลล์จึงลดลงทำให้กล้ามเนื้อหัวใจคลายตัว กระบวนการทางไฟฟ้าของหัวใจจะเริ่มต้นเป็นวงจรใหม่อีกครั้งเมื่อ SA node สร้างสัญญาณไฟฟ้า กระบวนการที่เกิดขึ้นเป็นวงจรนี้ทำให้หัวใจเต้นเป็นจังหวะโดยมีการบีบและคลายตัวสลับกันไป มีการเพิ่มขึ้นและลดลงของศักย์ไฟฟ้าทำให้เกิดเป็นคลื่น (waveform) ที่สามารถบันทึกเป็นกราฟคลื่นไฟฟ้าหัวใจ (electrocardiography)

แบบฝึกหัด บทที่ 1 ระบบการนำไฟฟ้าของหัวใจ

1. ข้อใดเป็นจุดเริ่มต้นที่ทำให้เกิดศักย์ทำงาน ในคลื่นไฟฟ้าหัวใจปกติ
 - ก. AV node
 - ข. SA node
 - ค. right atrium
 - ง. left ventricle
2. ข้อใดกล่าวถูกต้องเกี่ยวกับการสร้างและนำไฟฟ้าของหัวใจ
 - ก. เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจไม่สามารถนำไฟฟ้าได้
 - ข. การกระตุ้น vagus nerve ทำให้หัวใจเต้นเร็วขึ้น
 - ค. SA node สร้างสัญญาณไฟฟ้าได้เร็วกว่าเซลล์ชนิดอื่น
 - ง. AV node ช่วยเพิ่มอัตราเร็วในการนำไฟฟ้าไปสู่หัวใจห้องล่าง
3. ข้อใดทำหน้าที่กรองหรือหน่วงสัญญาณไฟฟ้าจากหัวใจห้องบนผ่านลงไปยังหัวใจห้องล่าง
 - ก. AV node
 - ข. purkinje fiber
 - ค. bundle of his
 - ง. Interventricular septum
4. ไอออนข้อใดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงคลื่นไฟฟ้าหัวใจมากที่สุด
 - ก. sodium
 - ข. chloride
 - ค. calcium
 - ง. potassium
5. การกระตุ้นให้เกิดดีโพลาไรเซชัน (depolarization) ในข้อใดเป็นสาเหตุสำคัญของการเกิดคลื่นไฟฟ้าหัวใจผิดปกติรุนแรง
 - ก. P wave
 - ข. T wave
 - ค. ST segment
 - ง. QRS complex

