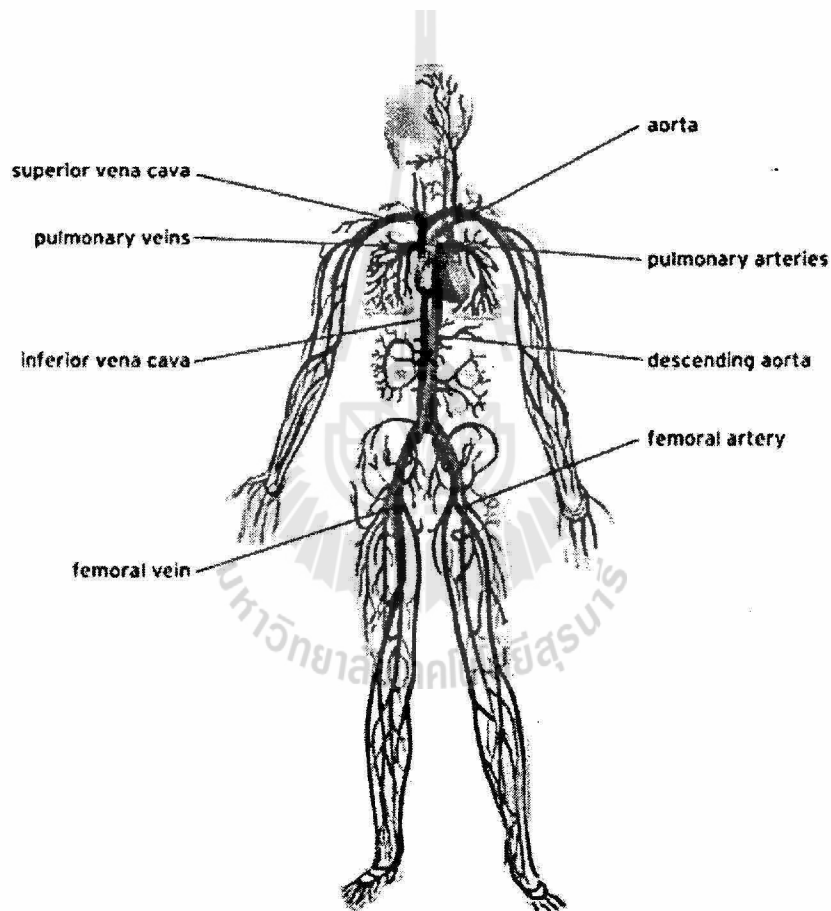




Cardiovascular System และ Lymphatic System



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พาณี วรรณนิธิกุล
สาขาวิชาชีววิทยา สำนักวิชาวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

คำนำ

เอกสารนี้เรียบเรียงขึ้นโดยมีจุดประสงค์หลักคือ เพื่อใช้ประกอบการสอนวิชากายวิภาคศาสตร์และสรีรวิทยาเบื้องต้น (Basic Anatomy and Physiology) สำหรับนักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์การกีฬา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จุดประสงค์รองคือเพื่อให้เป็นเอกสารภาษาไทยที่นักเรียน นักศึกษาและผู้สนใจในเรื่องของกายวิภาคศาสตร์และสรีรวิทยาของระบบหัวใจร่วมหลอดเลือดและระบบน้ำเหลืองของมนุษย์ แต่ไม่ได้เรียนด้านนี้โดยตรง สามารถอ่านและเข้าใจได้ง่าย

หวังว่าเอกสารเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทุกท่านไม่มากก็น้อย หากมีข้อผิดพลาดประการใดผู้เรียบเรียงยินดีรับไว้และจะทำการแก้ไขในการจัดทำครั้งต่อไป

พาณี วรรณนิธิกุล

เมษายน 2554



สารบัญ

หน้า

คำนำ

บทที่ 1 Cardiovascular system: Heart (หัวใจ)

1

บทที่ 2 Cardiovascular system: Blood vessels (หลอดเลือด)

17

บทที่ 3 Cardiovascular system: Blood (เลือด)

39

บทที่ 4 Lymphatic system (ระบบน้ำเหลือง)

52

บรรณานุกรม

61



บทที่ 1

The Cardiovascular system (ระบบหัวใจร่วมหลอดเลือด): Heart (หัวใจ)

Cardiovascular system หรือ **Circulatory system** ประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่

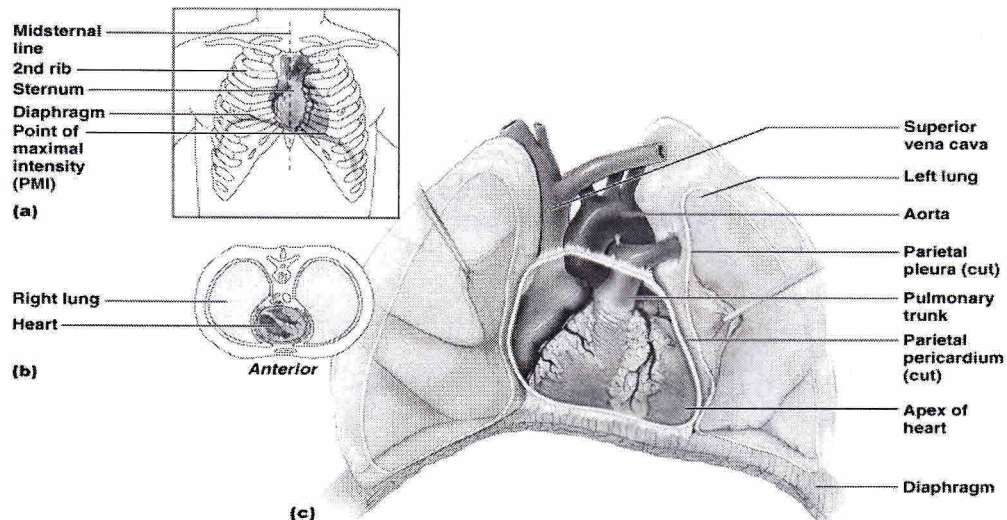
1. หัวใจ (heart)
2. หลอดเลือด (blood vessels) นำเลือดไปทั่วร่างกาย
3. เลือด (blood) เป็น connective tissue ที่เป็นของเหลว

หน้าที่ของ Cardiovascular system

1. ขนส่ง O_2 จากปอดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ และนำ CO_2 จากเนื้อเยื่อต่างๆไปยังปอด
2. ขนส่งสารอาหารจากระบบย่อยอาหารไปให้เซลล์ทั่วร่างกาย
3. ขนส่งของเสียและสารพิษจากเซลล์ต่างๆไปยังตับเพื่อทำลายความเป็นพิษ แล้วส่งต่อไปยังไตเพื่อขับออกจากร่างกาย
4. ขนส่งฮอร์โมนจากอวัยวะที่สร้างไปยังเนื้อเยื่อที่เป็นเป้าหมาย
5. ควบคุมอุณหภูมิร่างกาย โดยปรับการไหลของเลือด
6. ป้องกันการเสียเลือดโดยกลไกการ clot
7. ป้องกันร่างกายจากแบคทีเรียและไวรัส

หัวใจ

หัวใจเป็นศูนย์กลางของ cardiovascular system วิชาที่ศึกษาเกี่ยวกับหัวใจและโรคที่เกี่ยวข้องกับหัวใจเรียกว่า **cardiology** หัวใจมีขนาดเท่ากับกำปั้นของผู้เป็นเจ้าของ หัวใจของคนโตเต็มวัยจะมีขนาดกว้างประมาณ 10 เซนติเมตร ยาว 12.5 เซนติเมตรและหนา 5 เซนติเมตร มีน้ำหนักประมาณ 300 กรัม รูปร่างคล้ายกรวย ส่วนปลายแหลมด้านล่างเป็นห้องล่างของหัวใจอยู่ติดกับกะบังลม (diaphragm) หัวใจอยู่ในช่องทรวงอกใน mediastinum ระหว่างปอดสองข้าง อยู่ค่อนข้างทางด้านซ้ายมากกว่าด้านขวา ส่วนฐาน (base) อยู่ข้างบน ส่วนยอด (apex) อยู่ด้านล่าง (รูปที่ 1.1) จุดที่สามารถตรวจจับการเต้นของหัวใจจากภายนอกร่างกายได้ชัดเจนมากที่สุดคือจุดที่มีความเข้มของเสียงการเต้นของหัวใจสูงสุดเรียกว่า point of maximal intensity (PMI) (รูปที่ 1.1) หัวใจอยู่ภายในเยื่อหุ้มหัวใจที่เรียกว่า pericardium (เยื่อเพอริคาร์เดียม) (รูปที่ 1.2)



รูปที่ 1.1 ตำแหน่งของหัวใจ (Marieb และ Hoehn, 2008)

Pericardium

หัวใจอยู่ในถุงหุ้มที่เรียกว่า pericardium ซึ่งแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ (รูปที่ 1.2)

1. **Fibrous pericardium** เป็นชั้นนอก ประกอบด้วย dense connective tissue ช่วยยึดหัวใจติดกับ mediastinum ป้องกันไม่ให้หัวใจยืดตัวมากเกินไป

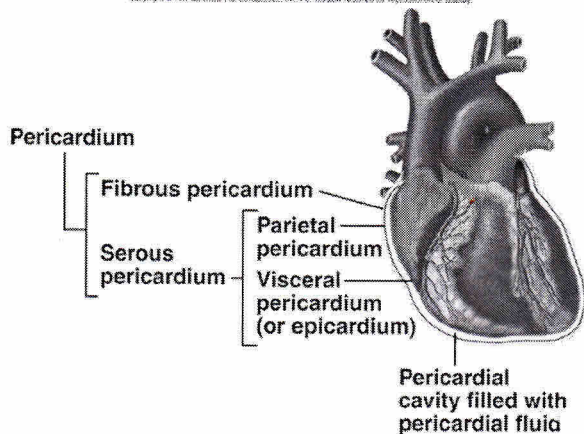
2. **Serous pericardium** เป็นชั้นใน เป็นเยื่อบางที่หุ้มรอบๆหัวใจแบ่งออกเป็น 2 ชั้นคือ

2.1 Parietal layer เป็นชั้นนอกอยู่ติดกับ fibrous pericardium

2.2 Visceral layer เป็นชั้นใน เรียกว่า **epicardium** อยู่ติดกับชั้นกล้ามเนื้อของหัวใจ (myocardium)

ระหว่าง parietal และ visceral layer เป็นช่องว่าง เรียกว่า **pericardial cavity** ซึ่งมีของเหลวที่เรียกว่า **pericardial fluid** บรรจุเต็ม ของเหลวนี้นี้ช่วยป้องกันการเสียดสีกันระหว่างเยื่อทั้งสองชั้นในขณะที่หัวใจเคลื่อนไหว หาก pericardium มีการอักเสบ (pericarditis) ปริมาณของ pericardial fluid จะลดลง ทำให้ parietal และ visceral layer ยึดติดกัน และเมื่อหัวใจเคลื่อนไหวจะเกิดอาการเจ็บปวดขึ้น

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission is granted for reproduction or display.



รูปที่ 1.2 Pericardium

(Seeley และคณะ, 2008)

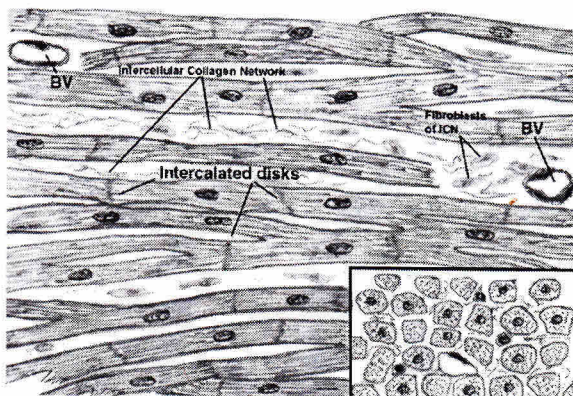
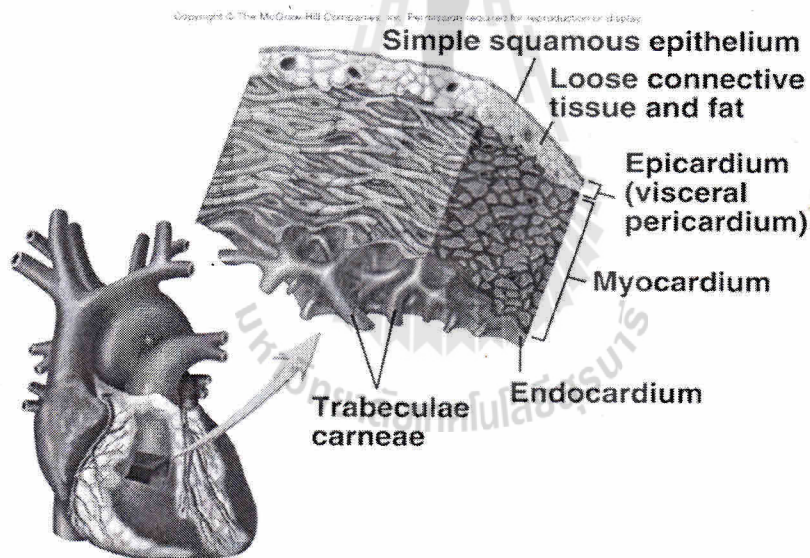
ผนังของหัวใจ (Heart wall)

ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น ได้แก่ (รูปที่ 1.2 และ 1.3)

1. **Epicardium** (ชั้นนอก) คือ visceral layer ของ serous pericardium เป็นเยื่อบางใส ประกอบด้วย mesothelium และ connective tissue

2. **Myocardium** (ชั้นกลาง) ทำหน้าที่บีบหัวใจ ประกอบด้วยกล้ามเนื้อหัวใจ (cardiac muscle) ซึ่งพบเฉพาะในหัวใจและมีลักษณะและหน้าที่เฉพาะตัว เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจไม่อยู่ในอำนาจใจ (voluntary muscle) มีลายเล็ก ๆ และแตกแขนง (รูปที่ 1.3) แต่ละเซลล์มีหนึ่งนิวเคลียส และมีแขนงหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งแขนง ส่วนปลายของเซลล์และแขนงจะติดต่อกับส่วนปลายของอีกเซลล์ในบริเวณที่เรียกว่า **intercalated disc** (รูปที่ 1.3) ซึ่งจะเห็นเป็นเส้นหนาสีคล้ำ อันเป็นลักษณะเฉพาะตัวของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ ส่วน apex ของหัวใจจะมี myocardium หนาที่สุดและส่วน base มี myocardium บาง

3. **Endocardium** (ชั้นใน) เป็นชั้นบางๆของ endothelium (simple squamous epithelium) บ่อยูด้านในของชั้น myocardium และปกคลุมลิ้นหัวใจและ tendon (เอ็น) ที่ยึดลิ้นติดต่อกับเยื่อบุผนังในของเส้นเลือดขนาดใหญ่

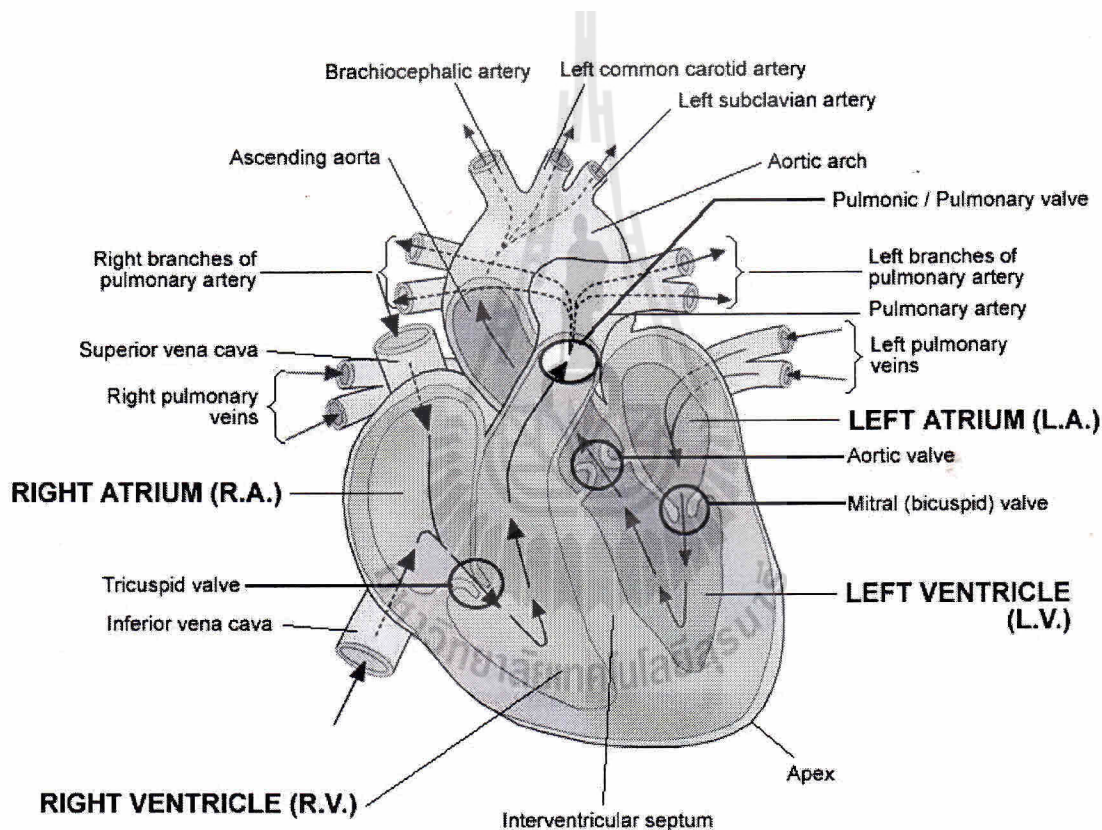


รูปที่ 1.3 ผนังของหัวใจ แสดง epicardium, pericardium และ endocardium (บน) (Seeley และคณะ, 2008) และลักษณะเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อหัวใจ (ล่าง) (<http://education.vetmed.vt.edu>)

ห้องของหัวใจ

ภายในหัวใจแบ่งออกเป็น 4 ห้อง เป็นตัวรับเลือดเข้าและปั๊มออกไป (รูปที่ 1.4) ห้องบนแบ่งเป็น 2 ห้องคือ **right atrium** และ **left atrium** ซึ่งแยกกันโดยเยื่อที่เรียกว่า **interatrial septum** ส่วนห้องล่าง 2 ห้องคือ **right ventricle** และ **left ventricle** แยกกันโดย **interventricular septum**

ผนังของ atria จะบางกว่า ventricles เพราะ atria ใช้ cardiac muscle ในการส่งเลือดไปยัง ventricles (รูปที่ 1.4) สำหรับ right ventricle จะปั๊มเลือดเข้าสู่ปอดเท่านั้น (pulmonary circulation) และ left ventricle จะปั๊มเลือดไปยังส่วนต่างๆของร่างกาย (systemic circulation) ดังนั้น left ventricle จึงทำงานหนักกว่า right ventricle เพื่อรักษาอัตราเร็วในการไหลของเลือด ทำให้ผนังชั้นกล้ามเนื้อของ left ventricle หนากว่าผนังของ right ventricle



รูปที่ 1.4 หัวใจผ่าตามแนวยาว แสดงส่วนประกอบหลักของหัวใจ ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของเลือดภายในหัวใจ (http://www.ivy-rose.co.uk/Topics/Heart_Structure.htm)

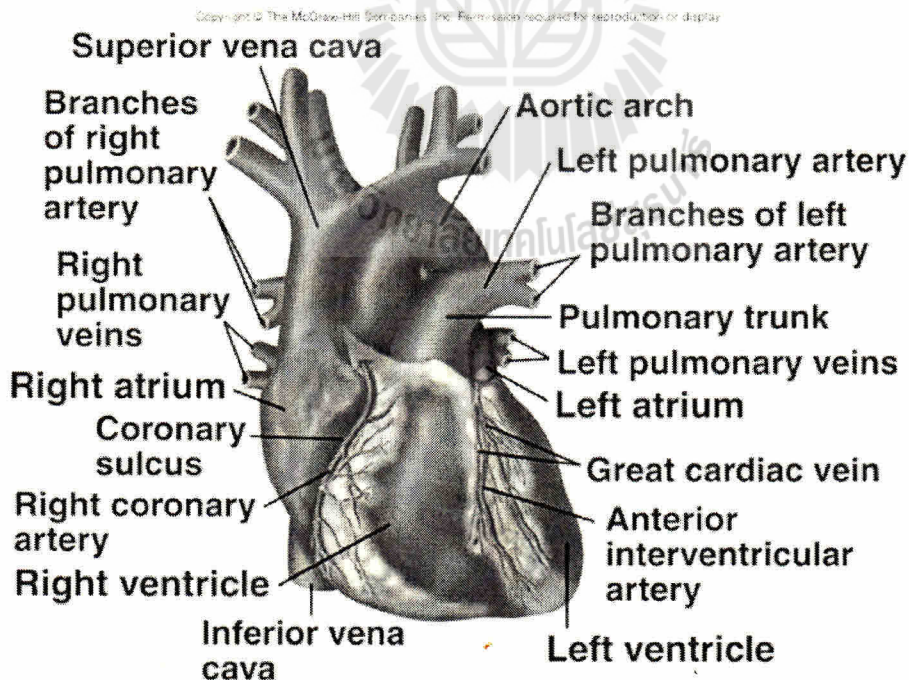
การไหลของเลือดผ่านห้องหัวใจ

หัวใจห้อง right atrium รับ **deoxygenated blood** (เลือดที่มีออกซิเจนน้อย) ผ่าน veins หลัก 3 เส้น (รูปที่ 1.5 และ 1.6) ได้แก่

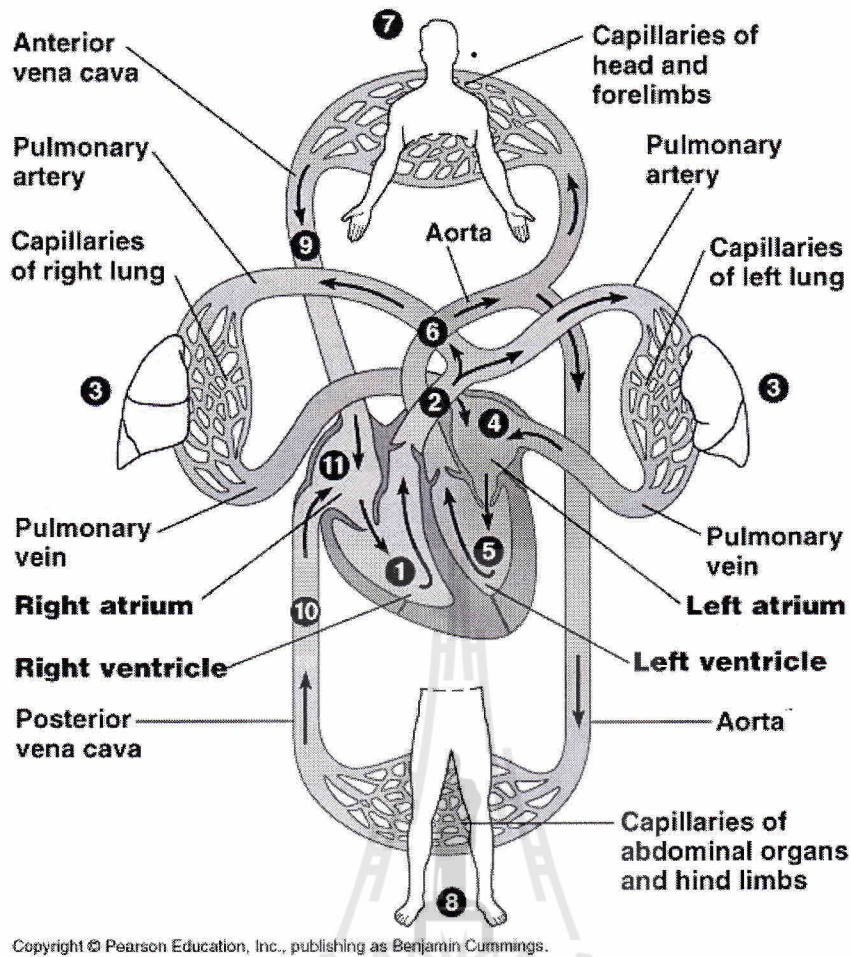
1. **Superior vena cava (Anterior vena cava)** รับเลือดจากส่วนต่างๆของร่างกายที่อยู่เหนือกะบังลม
2. **Inferior vena cava (Posterior vena cava)** รับเลือดจากส่วนต่างๆของร่างกายที่อยู่ใต้กะบังลม
3. **Coronary sinus** รับเลือดจากหลอดเลือดที่ผนังของหัวใจ

จากนั้น right atrium (เลข 11) จะส่ง deoxygenated blood เข้าสู่ right ventricle (เลข 1) ซึ่งจะ pump เลือดเข้าสู่ pulmonary trunk (เลข 2) (รูปที่ 1.6)

Pulmonary trunk แยกออกเป็น right และ left pulmonary artery นำเลือดเข้าสู่ปอดข้างขวาและข้างซ้ายตามลำดับ (รูปที่ 1.5) เมื่ออยู่ในปอด deoxygenated blood จะปล่อย CO₂ และจับ O₂ กลายเป็น **oxygenated blood** (เลือดที่มีออกซิเจนมาก) oxygenated blood ถูกส่งไปเข้า left atrium (เลข 4) โดยทาง **pulmonary veins** ทั้ง 4 เส้น (ขวา 2 และซ้าย 2) จากนั้นเลือดจะไหลเข้า left ventricle (เลข 5) และถูกบีบเข้า **aorta** (เลข 6) (รูปที่ 1.6) จากจุดนี้เลือดจะไหลเข้าสู่ coronary arteries, arch of aorta (aortic arch), thoracic aorta และ abdominal aorta ซึ่งจะนำเลือดไปสู่ส่วนต่างๆ ของร่างกาย



รูปที่ 1.5 เส้นเลือดใหญ่ ด้าน anterior ของหัวใจ (Seeley และคณะ, 2008)



รูปที่ 1.6 เส้นทางการไหลของเลือด (Campbell และ Reece, 2002)

ลิ้น (valves) ของหัวใจ

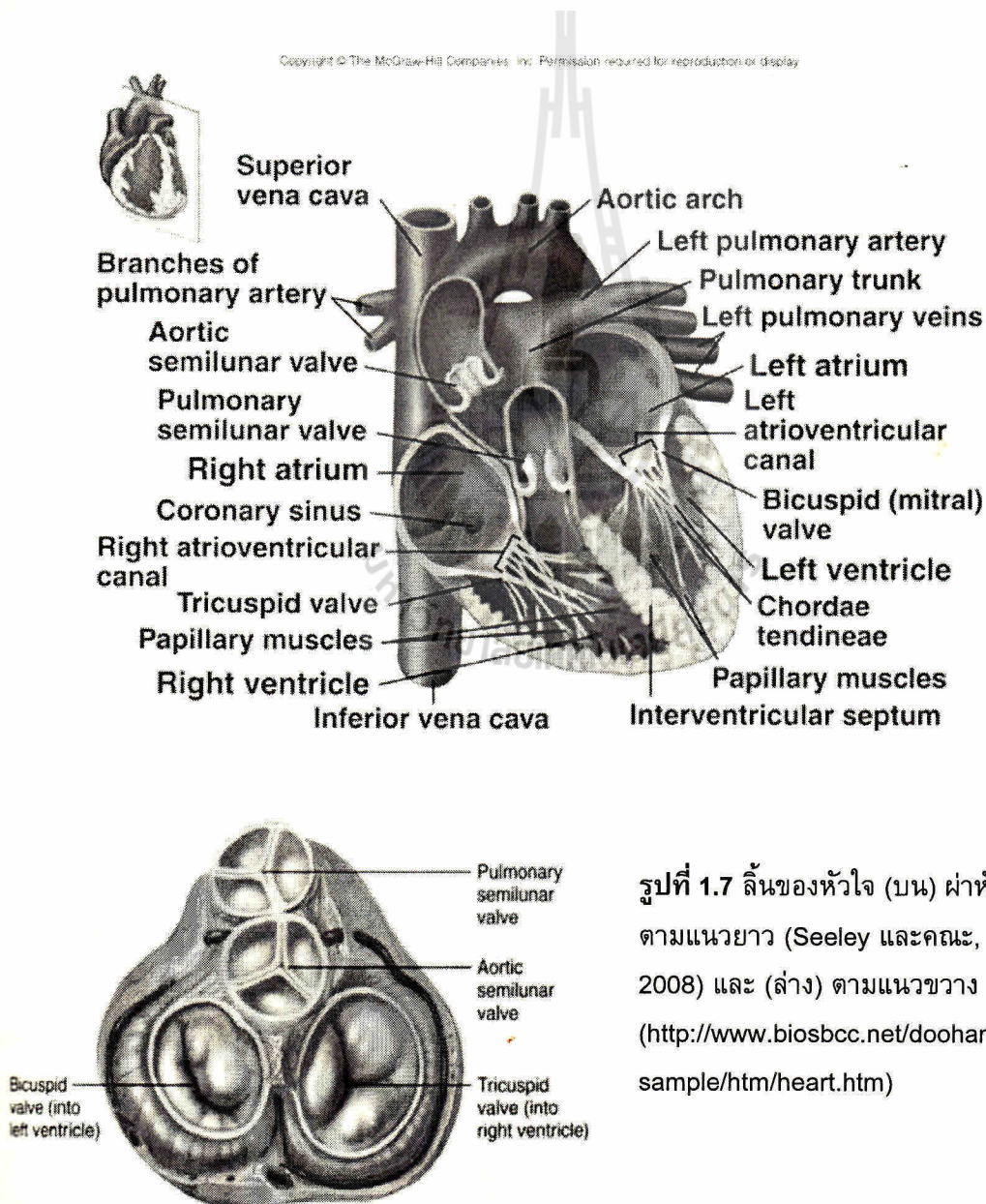
ในขณะที่หัวใจแต่ละห้องบีบตัว เลือดจะไหลเข้า ventricle หรือไหลออกจากหัวใจทาง aorta หรือ pulmonary trunk ในการป้องกันไม่ให้เลือดไหลย้อนกลับหัวใจจะมีลิ้น 4 ลิ้นที่ประกอบด้วย dense connective tissue ลิ้นเหล่านี้เปิดและปิดตามการเปลี่ยนแปลงของความดันเลือดในขณะที่หัวใจหดและคลายตัว

1. Atrioventricular (AV) valves อยู่ระหว่าง atria และ ventricles (รูปที่ 1.7) ลิ้นที่อยู่ระหว่าง right atrium และ right ventricle เรียกว่า **tricuspid valve** หรือ **right AV valve** (ประกอบด้วยลิ้นเล็กๆ 3 ลิ้น) มีเส้นเอ็น **chordae tendineae** ยึดโยงให้ติดกับ **papillary muscle** ซึ่งเป็นส่วนยื่นของ cardiac muscle ที่ผิวของ ventricle เอ็น chordae tendineae ป้องกันลิ้นไม่ให้ถูกผลักเข้าไปใน atria ในขณะที่ ventricles หดตัว

ส่วนลิ้นที่อยู่ระหว่าง left atrium และ left ventricle เรียกว่า **bicuspid (mitral) valve** หรือ **left AV valve** (ประกอบด้วยลิ้นเล็กๆ 2 ลิ้น) ซึ่งทำงานในลักษณะเดียวกับของ tricuspid valve. AV valves จะต้องเปิดให้เลือดที่จะผ่านจาก atria ไปยัง ventricles เมื่อเลือดไหลจาก

atria เข้าสู่ ventricles ลิ้นจะถูกผลักให้เปิด papillary muscles คลายตัวและ chordae tendineae หย่อน (รูปที่ 1.7) เมื่อ ventricles หดตัวความดันของเลือดใน ventricles จะดันลิ้นเล็กๆขึ้น ด้านบนจนกระทั่งส่วนปลายของลิ้นเล็กๆไปปิดช่องเปิด ในขณะที่เดียวกันการหดตัวของ papillary muscles และความตึงของ chordae tendineae เป็นตัวป้องกันไม่ให้ลิ้นแกว่งไปมาใน atria

2. Semilunar valves ในบริเวณใกล้กับจุดเริ่มต้นของ pulmonary trunk และ aorta มีลิ้นที่ช่วยป้องกันการไหลย้อนกลับเข้าหัวใจของเลือด ลิ้นเหล่านี้เรียกว่า **semilunar valves** (รูปที่ 1.7) โดยที่ **pulmonary semilunar valve** อยู่ที่ช่องเปิดที่ pulmonary trunk จะออกจาก right ventricle ส่วน **aortic semilunar valve** อยู่ที่ช่องเปิดระหว่าง left ventricle และ aorta ลิ้นแต่ละลิ้นประกอบด้วยลิ้นเล็กๆ รูปพระจันทร์เสี้ยว 3 ลิ้น (semilunar cusps) แต่ละลิ้นเล็กๆยึดติดกับผนังของ artery



รูปที่ 1.7 ลิ้นของหัวใจ (บน) ฝ่าหัวใจ ตามแนวยาว (Seeley และคณะ, 2008) และ (ล่าง) ตามแนวขวาง (<http://www.biosbcc.net/doohan/sample/html/heart.htm>)

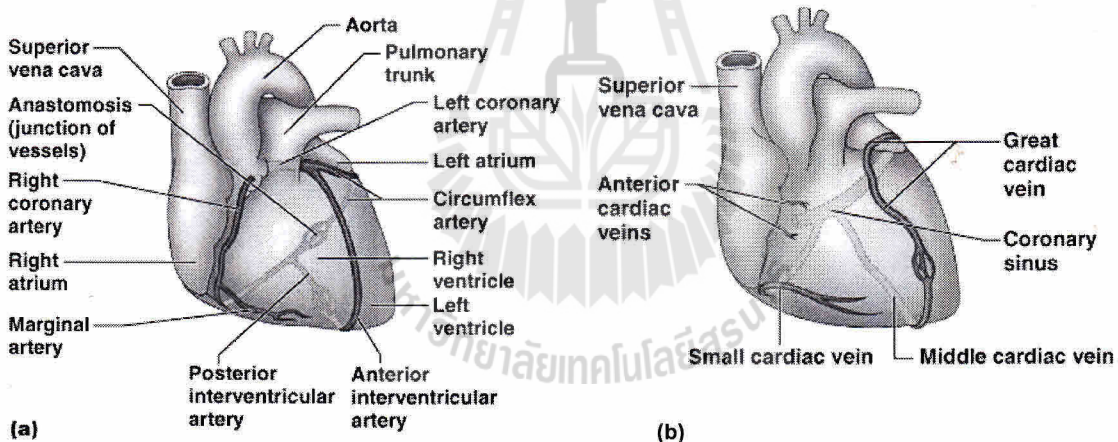
การไหลของเลือดผ่านกล้ามเนื้อหัวใจ (Coronary circulation)

กล้ามเนื้อหัวใจ (myocardium) ได้รับเลือดทาง coronary circulation (รูปที่ 1.8) ในขณะที่พักหลอดเลือดเหล่านี้จะให้เลือดแก่กล้ามเนื้อหัวใจประมาณ 250 มิลลิลิตรต่อนาที

การไหลเวียนใน arteries (arterial circulation) เลือดมาเลี้ยงหัวใจทาง right และ left coronary arteries ซึ่งแตกแขนงมาจาก aorta ที่ส่วนปลายของ aortic valve (รูปที่ 1.8 a) coronary arteries รับเลือดจากหัวใจประมาณ 5% coronary arteries จะพาดขวางหัวใจและแตกเป็นตาข่าย capillaries

Left coronary artery ผ่านลงมาทาง left atrium และแยกเป็นสองกิ่งคือ anterior interventricular artery และ circumflex artery ส่วน right coronary artery มาเลี้ยง right atrium แยกเป็นสองกิ่งคือ marginal artery และ posterior interventricular artery

การไหลเวียนใน veins (venous drainage) เลือดที่ถูกใช้แล้วส่วนมากจะไหลเข้าสู่เส้น vein ขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งจะไหลเข้าสู่ great cardiac vein, middle cardiac vein และ small cardiac vein จากนั้นจะไหลไปรวมกันใน coronary sinus (รูปที่ 1.8b) และเปิดเข้าสู่ right atrium นอกจากนี้ยังมี anterior cardiac veins จำนวนมากที่นำเลือดส่งเข้าสู่ right atrium โดยตรง



รูปที่ 1.8 Coronary circulation (Marieb และ Hoehn, 2008)

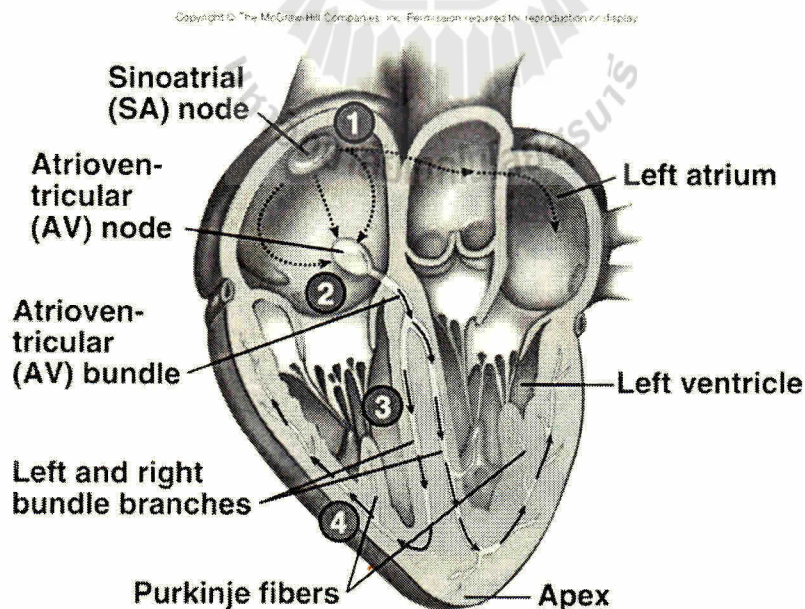
การควบคุมจังหวะการเต้นของหัวใจ (Conducting System of the Heart)

หัวใจถูกควบคุมโดยระบบประสาทอัตโนมัติ (autonomic nervous system, ANS) ซึ่งจะเพิ่มหรือลดอัตราการเต้นของหัวใจ แต่ไม่ได้เป็นตัวกระตุ้นการหดตัวของหัวใจ หัวใจสามารถเต้นเป็นจังหวะได้โดยไม่ต้องรับการกระตุ้นโดยตรงจากระบบประสาท เพราะว่าหัวใจมีระบบควบคุมภายในที่เรียกว่า **conducting system** ซึ่งประกอบด้วยเนื้อเยื่อกล้ามเนื้อพิเศษที่สร้างและส่ง action potentials (nerve impulses) ไปสั่งให้ cardiac muscle fibers หดตัว

ใน myocardium มีกลุ่มของ neuromuscular cells พิเศษที่ช่วยกระตุ้นให้เกิด impulses และนำ impulses ทำให้กล้ามเนื้อหัวใจทำงานร่วมกันและหดตัวพร้อมกัน

Conducting system ประกอบด้วย (รูปที่ 1.9)

1. **Sinoatrial node (SA node)** เป็นกลุ่มเซลล์พิเศษที่อยู่ในผนังของ right atrium ใกล้กับช่องเปิดของ superior vena cava มักถูกเรียกว่า **pacemaker** ของหัวใจ SA node สามารถเริ่มต้นสร้าง impulse ได้เอง ทำให้หัวใจเต้นเป็นจังหวะ SA node สร้าง impulse เร็วกว่าส่วนอื่นของ conducting system และ impulse จาก SA node จะกระจายไปยังบริเวณอื่นๆ และกระตุ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้
2. **Atrioventricular node (AV node)** เป็นกลุ่มของ neuromuscular tissue ที่อยู่ในผนังของ atrial septum เมื่อ impulses จาก SA node กระจายไปทั่ว atria จะทำให้ atria หดตัวและ depolarizing AV node ที่ AV node นี้การกระจายของ impulse จะช้าลง เพื่อให้ atria ส่งเลือดเข้าสู่ ventricles และสิ้นสุดการหดตัวของ atria ก่อนที่ ventricle จะเริ่มหดตัว
3. **Atrioventricular bundle (AV bundle หรือ bundle of His)** ประกอบด้วย conducting fibers ที่เริ่มจาก AV node โดย AV bundle จะแยกออกเป็น 2 แขนง คือ right และ left bundle branches ภายใน myocardium ของ ventricle แขนงเหล่านี้จะแตกย่อยออกเป็น fibers ขนาดเล็ก เรียกว่า **Purkinje fibers** (เลข 4) จากนั้น AV bundle, bundle branches และ Purkinje fibers จะนำ impulse ของการหดตัวของ AV node ไปยังส่วน apex ของ myocardium ที่ซึ่งคลื่นการหดตัวของ ventricle จะเริ่มขึ้นและแพร่กระจายไปทั้งข้างบนและข้างนอกปัมเลือดเข้าสู่ pulmonary trunk และ aorta



รูปที่ 1.9 Conducting system ของหัวใจ ลูกศรแสดงการกระจายของ impulse ผ่าน atria ไปยังส่วนอื่นๆ ของหัวใจ (Seeley และคณะ, 2008)

Electrocardiogram (EKG หรือ ECG)

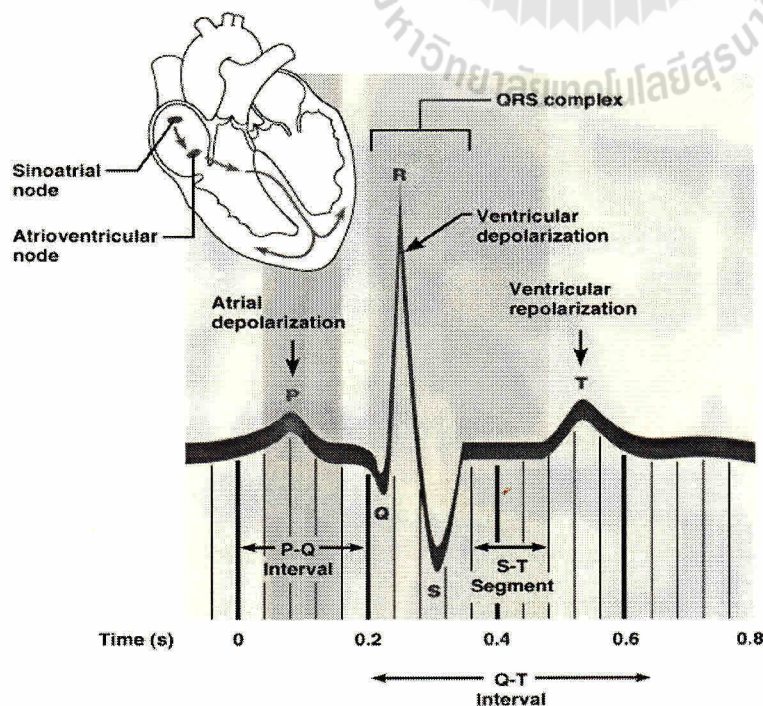
การส่ง nerve impulse ผ่าน conducting system ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถตรวจจับได้บนผิวหนังกาย การบันทึกการเปลี่ยนแปลงของกระแสไฟฟ้าที่เกิดพร้อมกับการเต้นของหัวใจ เรียกว่า **Electrocardiogram (EKG หรือ ECG)** เครื่องมือที่ใช้ในการบันทึกเรียกว่า **Electrocardiograph**

การเต้นของหัวใจแต่ละส่วนสร้าง impulse ที่แตกต่างกัน impulse เหล่านี้จะถูกบันทึกเป็นกราฟในรูปอนุกรมของคลื่นขึ้นและลง ระหว่าง EKG มีคลื่นที่เห็นได้ชัดเจน 3 ลูกในแต่ละ cardiac cycle เรียกว่า **deflection waves** (รูปที่ 1.10) ได้แก่

1. **P wave** เป็นคลื่นลูกแรกเกิดจาก atrial depolarization คือ การแพร่ของ impulse จาก SA node กระจายไปทั่ว atria กินเวลานาน~0.08 วินาที หลังการเริ่มต้น P wave ในเสี้ยววินาที atria จะหดตัว
2. **QRS complex** เกิดจาก ventricular depolarization คือ impulse แพร่กระจายทั่ว ventricle ทำให้ ventricle หดตัวกินเวลานาน~0.08 วินาที
3. **T wave** เกิดจาก ventricular repolarization คือ ventricle กลับสู่สภาพเดิม กินเวลา ~0.16 วินาที

ไม่มี wave ที่แสดง atrial repolarization เพราะว่า QRS wave มีความแรงมากกว่าและปิดบังไว้หมด

ความแปรปรวนในขนาดและช่วงของการเบี่ยงเบนของคลื่นใน EKG เป็นประโยชน์ในการวินิจฉัยความผิดปกติของจังหวะการเต้นของหัวใจและรูปแบบ conduction และการติดตามผลของการฟื้นตัวจากโรคหัวใจ



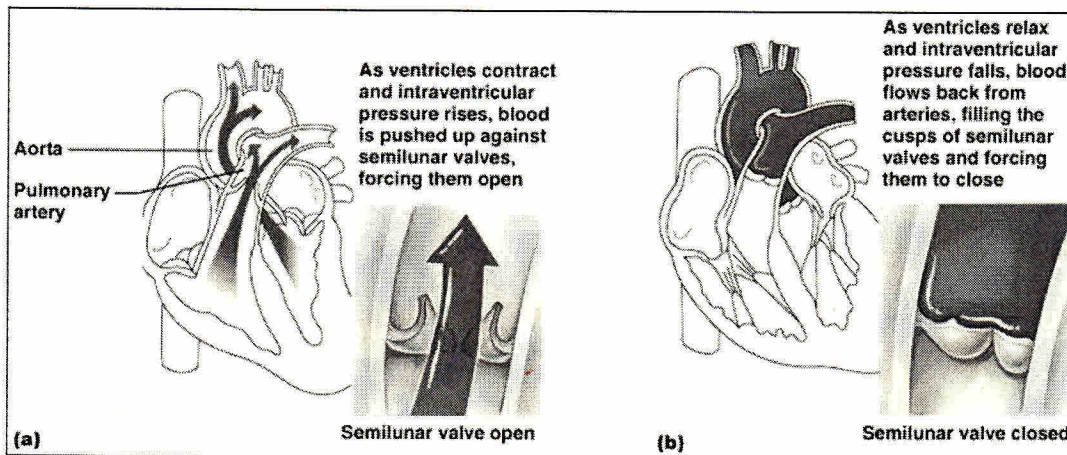
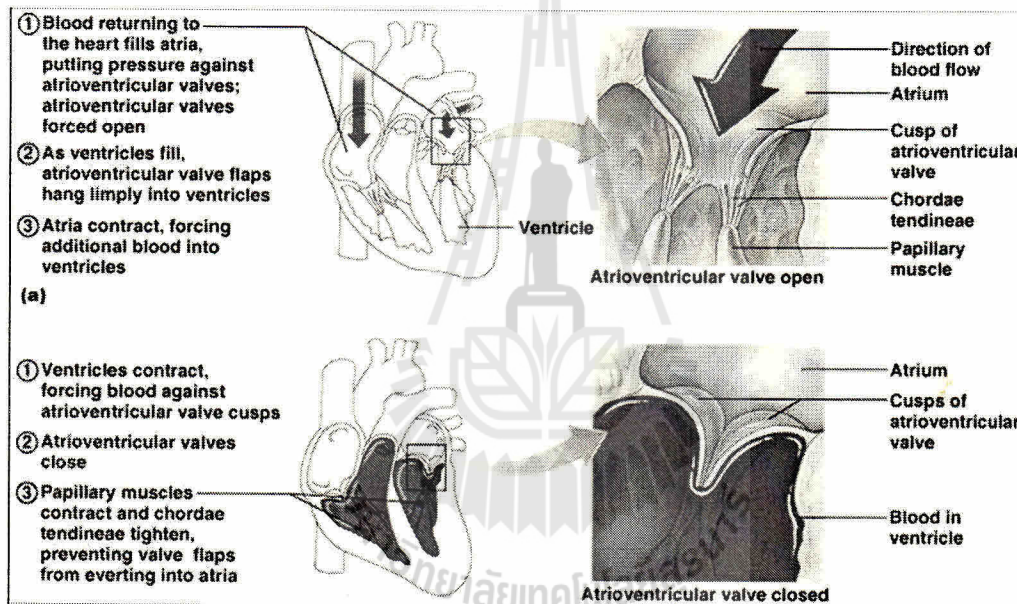
รูปที่ 1.10

Electrocardiogram ของหนึ่ง cardiac cycle (Marieb และ Hoehn, 2008)

การไหลของเลือดภายในหัวใจ

การไหลของเลือดภายในหัวใจเกี่ยวข้องโดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงความดันเลือด ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนขนาดของห้องหัวใจและการเปิดและปิดของลิ้นหัวใจ เลือดไหลจากบริเวณที่มีความดันเลือดสูงไปยังบริเวณที่มีความดันเลือดต่ำ เมื่อผนังของ atria ถูกกระตุ้นโดย SA node ให้หดตัว ขนาดของ atria จะเล็กลงเป็นผลให้ความดันเลือดภายในเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ AV valves เปิดออกและเลือดไหลจาก atria เข้าสู่ ventricles ผนัง ventricles จะยังคงคลายตัวจนกระทั่ง atria เลิกหดตัว เมื่อผนังของห้องหัวใจคลายตัว ความดันเลือดในห้องจะลดลง (รูปที่ 1.11 บน)

เมื่อผนัง ventricles หดตัว ความดันเลือดใน ventricles จะเพิ่มสูงกว่าใน arteries ทำให้เลือดใน ventricles ไปดัน semilunar valves ให้เปิดออกและเลือดไหลเข้า arteries ขณะเดียวกัน AV valves จะถูกดันให้ปิดเพื่อป้องกันไม่ให้เลือดจาก ventricles ไหลเข้าสู่ atria ซึ่งขณะนี้มีค่าความดันเลือดต่ำกว่าเพราะผนัง atria คลายตัว (รูปที่ 1.11 ล่าง)



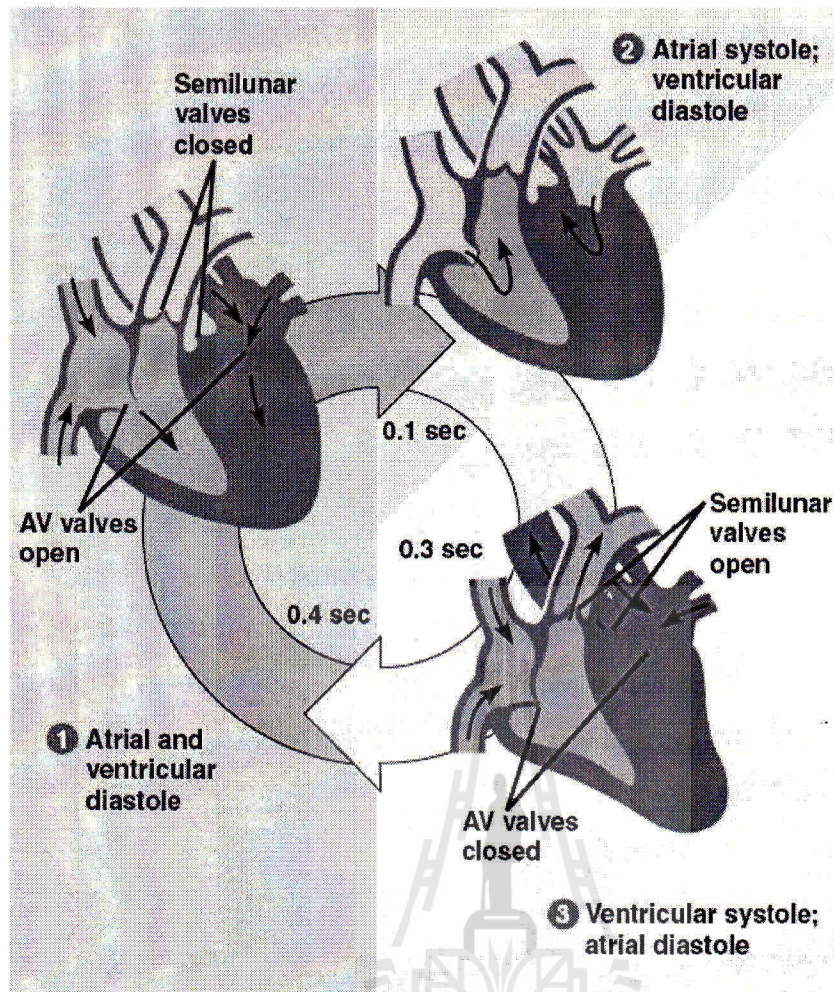
รูปที่ 1.11 การทำงานของลิ้นหัวใจ (บน) Atrioventricular valves (ล่าง) Semilunar valves (Marieb และ Hoehn, 2008)

วัฏจักรหัวใจ (Cardiac Cycle)

หมายถึง ลำดับของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการเต้นของหัวใจจนครบวงจร 1 ครั้ง ซึ่งเป็นการหดตัวและคลายตัวของกล้ามเนื้อหัวใจ การหดตัวเรียกว่า **systole** และการคลายตัวเรียกว่า **diastole** ซึ่งเกิดเป็นลำดับ แบ่งออกเป็น 3 ระยะ (phases) ดังนี้ (รูปที่ 1.12)

1. **Relaxation period** ในช่วงสุดท้ายของ cardiac cycle เมื่อ ventricles เริ่มคลายตัว ห้องหัวใจทั้ง 4 ห้องจะเป็น **diastole** ซึ่งเป็นการเริ่มต้นของ **relaxation** ในขณะที่ ventricles คลายตัว ความดันใน ventricles ลดลงและเลือดเริ่มไหลย้อนจาก pulmonary trunk และ aorta เข้าสู่ ventricles แต่จะเข้าไม่ได้เพราะ semilunar valves ปิด (รูปที่ 1.12) ดังนั้นเลือดจะถูกกักอยู่ใน semilunar cusps เมื่อความดันใน ventricles ลดลงจนต่ำกว่าความดันใน atria จะทำให้ AV valves เปิดและเลือดจะไหลจาก atria เข้าสู่ ventricles (ventricular filling)
2. **Ventricular filling** 75% ของเลือดที่ไหลเข้าสู่ ventricles ใน phase นี้เกิดขึ้นหลังการเปิดของ AV valves (รูปที่ 1.12) ซึ่งเกิดโดยไม่มีการหดตัวของ atria โดย SA node ส่ง impulse มาทำให้ atrial เกิด depolarization (P wave ใน EKG) การหดตัวของ atria เกิดตามหลัง P wave ซึ่งถือเป็นการสิ้นสุด relaxation period เลือดอีก 25% ที่ไหลเข้า ventricles มาจากการหดตัวของ atria ตลอด phase นี้ AV valves จะเปิดและ semilunar valves ปิด
3. **Ventricular systole** (contraction) เมื่อ AV node ได้รับ impulse จะทำให้ ventricles เกิด depolarization (QRS complex ใน EKG) ventricles เริ่มหดตัวและเลือดจะถูกดันไปผลัก AV valves ทำให้ AV valves ปิด ภายในช่วงเวลาสั้นๆ ลึนทั้ง 4 จะถูกปิดอีกครั้ง ในขณะที่ ventricles ยังคงหดตัวความดันเลือดใน ventricles จะสูงขึ้นไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสูงกว่าความดันใน arteries. Semilunar valves ทั้งคู่จะเปิดออกและดันเลือดออกจากหัวใจเข้าสู่ arteries เลือดจะไหลออกไปเรื่อยๆจนกว่า ventricles จะเริ่มคลายตัว semilunar valves ปิดและเกิด phase ที่ 1 อีกครั้ง

ระยะเวลา (Timing) ของแต่ละ phase (รูปที่ 1.12) ถ้าอัตราหัวใจเป็น 75 ครั้งต่อนาที แต่ละ cardiac cycle จะใช้เวลา~0.8 วินาที โดยแยกเป็น atrial systole 0.1 วินาที (เลข 2) และ ventricular systole 0.3 วินาที (เลข 3) ส่วนอีก 0.4 วินาทีเป็นของ relaxation period (เลข 1)



รูปที่ 1.12 ลำดับการทำงานของหัวใจใน 1 cardiac cycle (Campbell และคณะ, 2008)

Heart sounds เสียงการเต้นของหัวใจเป็นเสียงจากการไหลของเลือดที่เกิดจากการปิด valves ไม่ใช่จากการหดตัวของกล้ามเนื้อหัวใจ จังหวะพื้นฐานของเสียงจะเป็น lub-dup, หยุด, lub-dup, หยุด, ไปเรื่อยๆ เสียงแรก (S1) คือ lub เป็นเสียงนุ่มยาวจากการปิด AV valves หลัง ventricular systole เริ่มต้น เสียงที่ 2 (S2) คือ dup เป็นเสียงจากการปิด semilunar valves ในช่วงท้ายของ ventricular systole ส่วนช่วงหยุดคือ relaxation period

Cardiac Output (CO)

ปริมาณของเลือดที่ถูกขับออกจากแต่ละ ventricle ในหนึ่งนาที (left ventricle เข้าสู่ aorta, right ventricle เข้าสู่ pulmonary trunk) เรียกว่า **cardiac output (CO)** ซึ่งขึ้นกับปัจจัย 2 อย่างได้แก่

1. ปริมาณของเลือดที่ปั๊มโดย left หรือ right ventricle ระหว่างแต่ละ cardiac cycle
2. จำนวนของ heartbeat หรือ heart rate (ชีพจร, อัตราการเต้นของหัวใจ) ต่อนาที

ปริมาณของเลือดที่ขับออกโดย ventricle ระหว่างการหดตัวแต่ละครั้ง เรียกว่า **stroke volume (SV)** หน่วยของ CO จะเป็นลิตรต่อนาที (l/min) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้ stroke volume คูณกับ heart rate ตัวอย่างเช่น คนที่อยู่ในระยะพัก stroke volume~75 มิลลิเมตร (ml) และ heart rate~70 ครั้งต่อนาที ดังนั้นค่าเฉลี่ยของ CO ในคนผู้นี้จะเท่ากับ

$$\begin{aligned}\text{Cardiac output} &= \text{stroke volume} \times \text{heart rate} \\ &= 75 \text{ ml/ครั้ง} \times 70 \text{ ครั้ง/min} \\ &= 5250 \text{ ml/min หรือ } 5.25 \text{ liters/min}\end{aligned}$$

การควบคุม heart rate

มีปัจจัยหลายอย่างที่ควบคุม heart rate แต่ปัจจัยที่สำคัญที่สุดที่ควบคุม heart rate และความแรงของการหดตัว คือ autonomic nervous system (ANS)

1. Autonomic control (รูปที่ 1.13) หัวใจถูกควบคุมโดย autonomic nerves ที่มีจุดเริ่มต้นจาก cardiac center ใน medulla oblongata และทำงานผ่านทาง ANS คือ parasympathetic และ sympathetic nerves ซึ่งทั้งคู่ทำงานเป็นปฏิปักษ์ต่อกัน

Vagus nerves (parasympathetic) จะควบคุม SA node และ AV node และกล้ามเนื้อของ atria โดยจะไปปลดอัตราการสร้าง impulse ลดอัตราและความแรงของการเต้นของหัวใจ

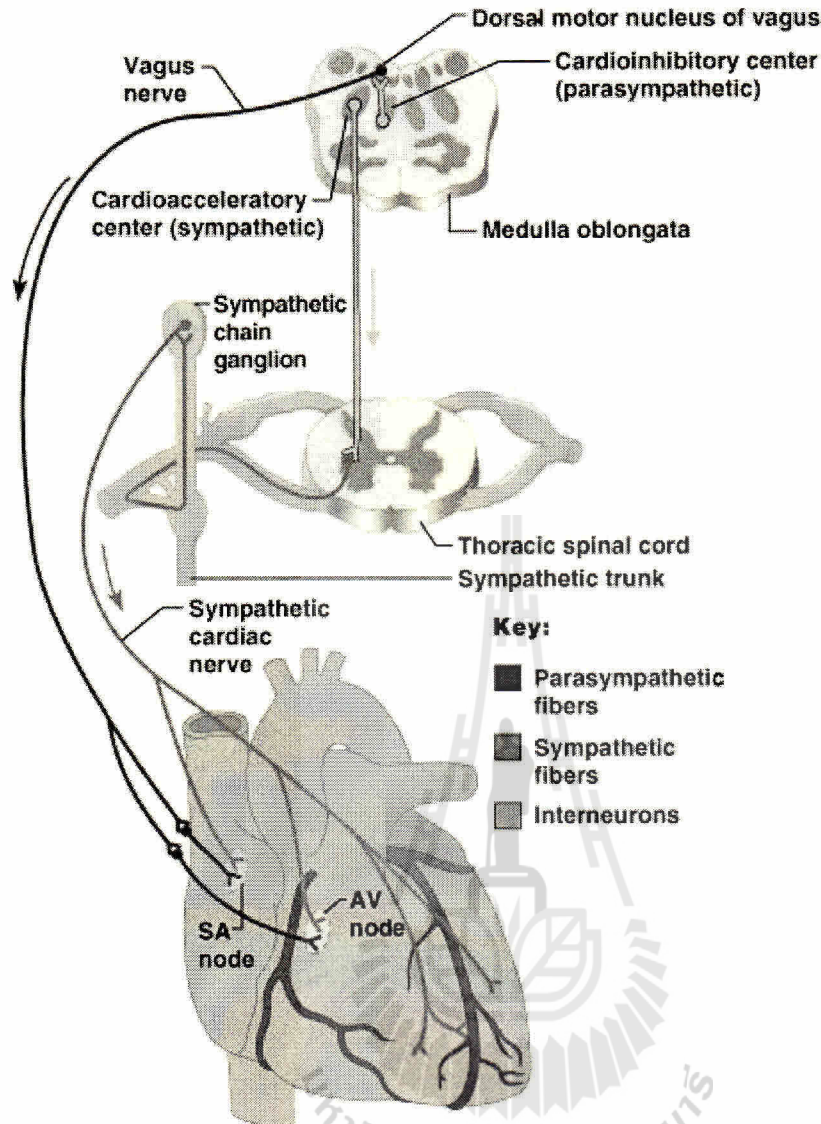
Sympathetic nerves จะควบคุม SA node, AV node และกล้ามเนื้อของ atria และ ventricle โดยจะไปเพิ่มอัตราและความแรงของการเต้นของหัวใจ

2. สารเคมี สารเคมีบางชนิดมีผลต่อ heart rate เช่น สารกลุ่ม catecholamines, epinephrine (adrenaline) และ norepinephrine (noradrenaline) จะมีผลคล้ายกับการกระตุ้นของ sympathetic nerves คือเพิ่ม heart rate ส่วน thyroxine (thyroid hormone) จะเพิ่ม heart rate โดยผลทาง metabolism นอกจากนี้ยังยาบางชนิด แก๊สและ electrolytes ในเลือดอาจมีผลทำให้ heart rate เพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ เช่น ถ้าระดับของ K^+ หรือ Na^+ เพิ่มขึ้นจะทำให้ heart rate และความแรงของการหดตัวลดลง

3. อุณหภูมิ heart rate สูงขึ้นหรือลดลงตามอุณหภูมิของร่างกาย

4. ความรู้สึก (emotions) ความรู้สึกที่รุนแรง เช่น กลัว โกรธ กังวล

5. เพศและวัย heart rate ของผู้หญิงเร็วกว่าของผู้ชาย เด็กแรกเกิดมี heart rate เร็วที่สุด เร็วมากในวัยเด็ก เร็วปานกลางในคนโตเต็มวัยและต่ำกว่าความเร็วเฉลี่ยในคนแก่

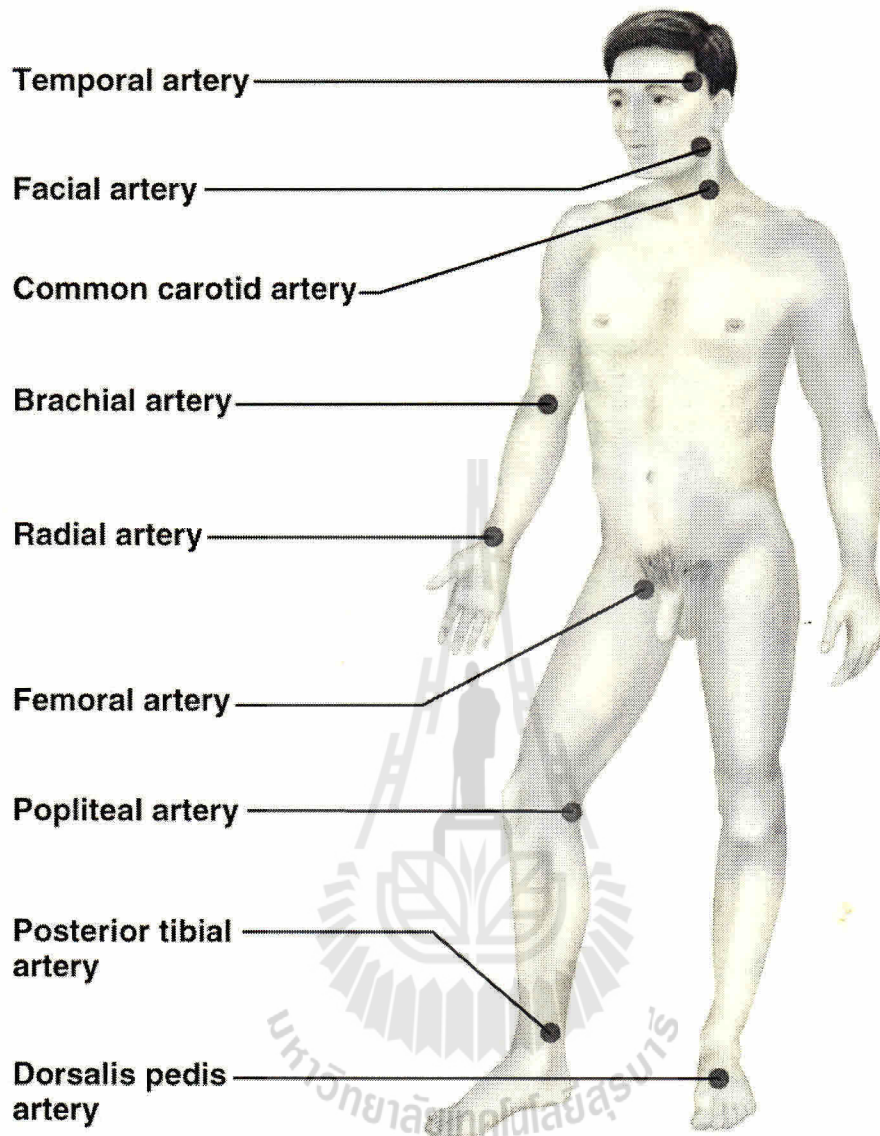


รูปที่ 1.13 การควบคุม heart rate โดย autonomic nerves (Marieb และ Hoehn, 2008)

ชีพจร (Pulse)

หมายถึงการขยายตัวและหดตัวสลับกันของ arteries ในการหดตัวแต่ละครั้งของ left ventricle ชีพจรจะแรงที่สุดใน arteries ที่อยู่ใกล้หัวใจ สามารถตรวจจับชีพจรได้ที่ arteries ที่อยู่ใกล้กับผิวหนัง เช่น ที่ข้อมือและลำคอ และยังมีตำแหน่งอื่นๆของร่างกายที่สามารถตรวจจับชีพจรได้อีกหลายตำแหน่ง (รูปที่ 1.14) นอกจากนี้ตำแหน่งเหล่านี้ยังเป็นจุดที่ใช้กดห้ามเลือดเมื่อเกิดการเสียเลือดอย่างรุนแรงจากบาดแผลในบริเวณนั้นๆด้วย

ชีพจรมีค่าเท่ากับ heart rate โดยปกติประมาณ 75 ครั้งต่อนาทีขณะพัก คำว่า **tachycardia** หมายถึง ชีพจรเต้นเร็ว (heart rate หรือ pulse rate มากกว่า 100 ครั้ง/นาที) **bradycardia** หมายถึง ชีพจรเต้นช้า (ต่ำกว่า 60 ครั้ง/นาที)



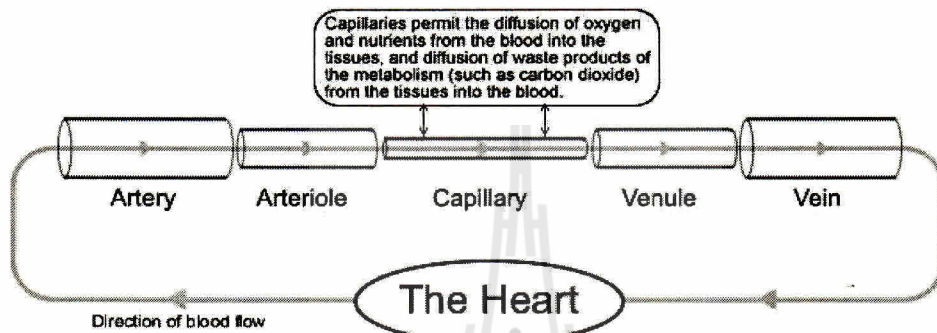
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

รูปที่ 1.14 ตำแหน่งของร่างกายที่สามารถตรวจจับชีพจรได้และกวดห้ามเลือดได้ในกรณีที่เกิดบาดแผลและเสียเลือดมาก (Marieb และ Hoehn, 2008)

บทที่ 2

The Cardiovascular system: Blood vessels (หลอดเลือด)

หลอดเลือดเป็นตาข่ายของท่อมีขนาดแตกต่างกัน ได้แก่ artery, arteriole, capillary, venule และ vein หลอดเลือด artery นำเลือดจากหัวใจไปยังเนื้อเยื่อของร่างกาย และ vein นำเลือดที่ถูกใช้แล้วกลับคืนไปยังหัวใจ (รูปที่ 2.1) โครงสร้างของหลอดเลือดจะปรับตัวไปตามหน้าที่ (รูปที่ 2.2 และ 2.3)



รูปที่ 2.1 ทิศทางการไหลของเลือดในร่างกายตามหลอดเลือด (<http://www.google.com>)

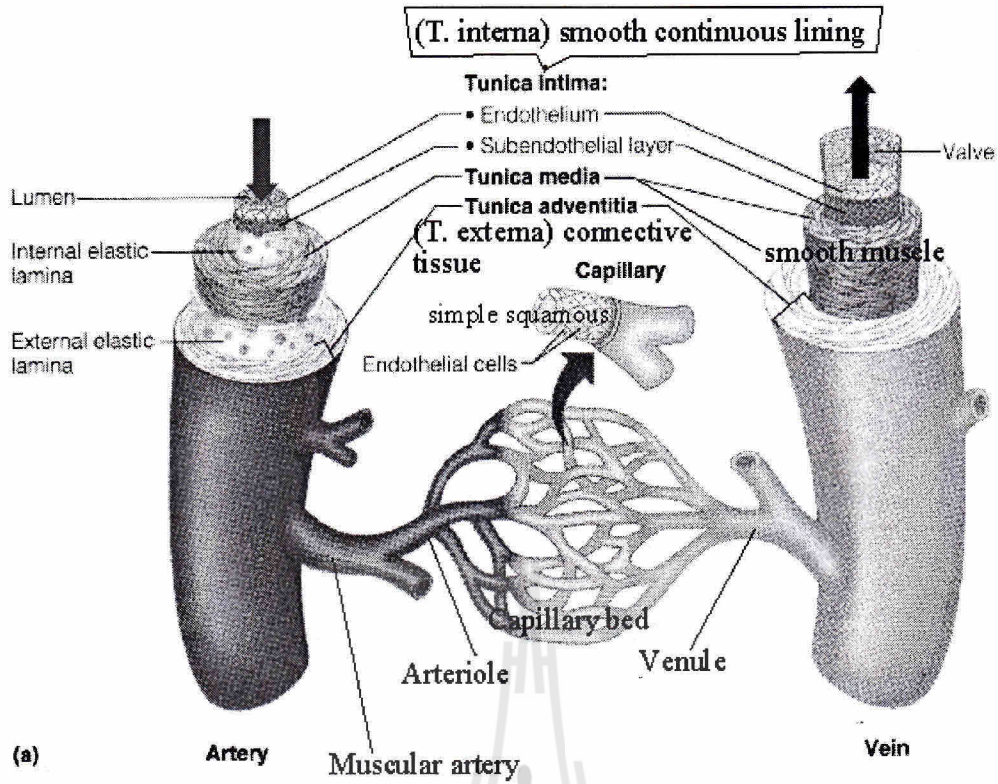
โครงสร้างโดยทั่วไปของหลอดเลือด

ผนังของหลอดเลือดเหล่านี้แบ่งเป็น 3 ชั้น ได้แก่ (รูปที่ 2.2)

1. **Tunica adventitia** เป็นชั้นนอกประกอบด้วย loose connective tissue
2. **Tunica media** เป็นชั้นกลางประกอบด้วยกล้ามเนื้อเรียบและ elastic tissue
3. **Tunica intima** หรือ **endothelium** เป็นชั้นในประกอบด้วย simple squamous epithelium

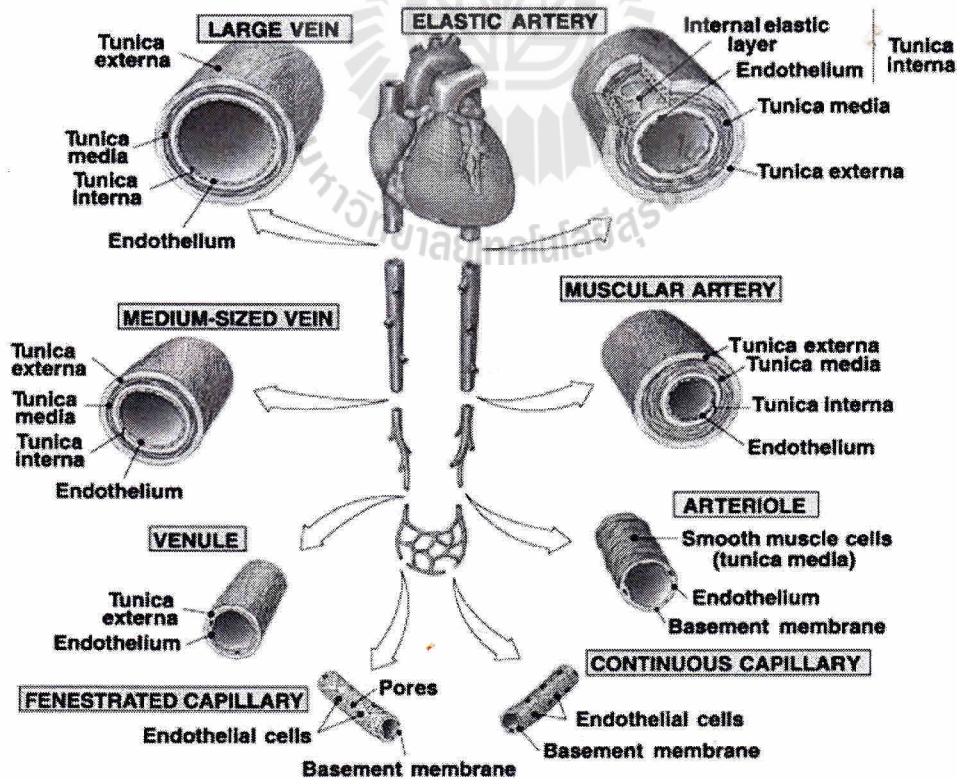
1. Arteries และ arterioles

เป็นหลอดเลือดแดงที่นำเลือดออกจากหัวใจ มีขนาดแตกต่างกัน แบ่งเป็น 4 ขนาดคือ **elastic arteries** (ขนาดใหญ่ เช่น aorta), **medium (muscular) arteries** (ขนาดกลาง), **small arteries** (ขนาดเล็ก), และ **arterioles** (ขนาดเล็กที่สุด) ผนัง 3 ชั้นของ artery มีปริมาณของกล้ามเนื้อเรียบ และ elastic tissue ขึ้นกับขนาดของ arteries ใน **elastic arteries** ชั้น media จะมี elastic tissue มากกว่ากล้ามเนื้อเรียบ สัดส่วนนี้จะเปลี่ยนไปเรื่อยๆ ในขณะที่ arteries มีการแตกแขนงหลายครั้งและมีขนาดเล็กลงตามลำดับ (medium arteries และ small arteries) จนกระทั่งกลายเป็น **arterioles** ซึ่งชั้น media จะประกอบด้วยกล้ามเนื้อเรียบเพียง 2-3 ชั้น arteries มีผนังหนากว่า veins ทำให้ทนต่อความดันเลือดสูงได้ (รูปที่ 2.2 และ 2.3)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของหลอดเลือด artery, capillary และ vein

(<http://www.unm.edu/~jimmy/vessels.jpg>)

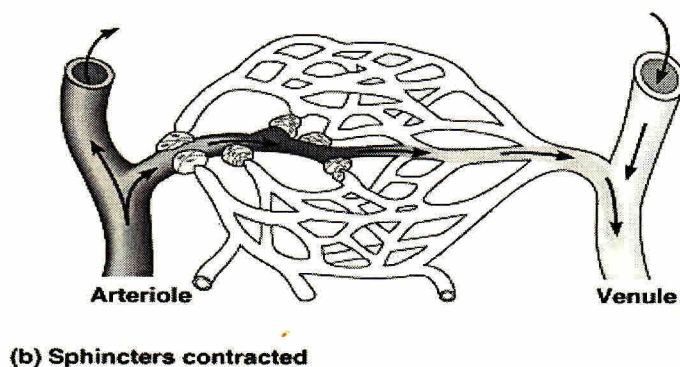
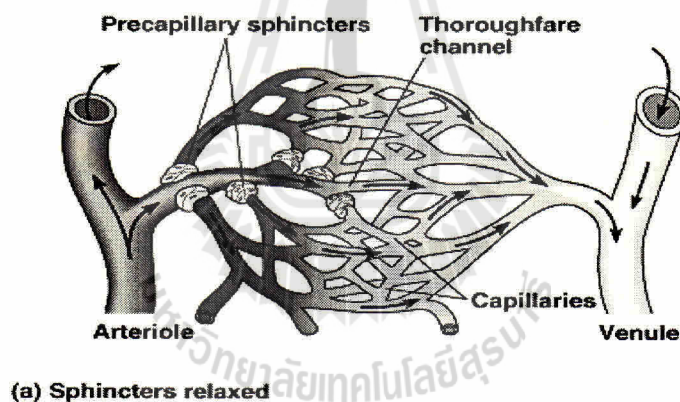


รูปที่ 2.3 โครงสร้างของหลอดเลือดขนาดต่างๆ (<http://www.google.com>)

2. Capillaries (หลอดเลือดฝอย)

เป็นหลอดเลือดขนาดเล็กที่สุดในร่างกาย จะแทรกอยู่ตามเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ของร่างกาย มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 4-10 ไมโครเมตร เป็นส่วนเชื่อมต่อระหว่าง arterioles และ venules (รูปที่ 2.3 และ 2.4) ผนังบางมากประกอบด้วย endothelium ชั้นเดียว ไม่มีชั้นกล้ามเนื้อเรียบ ทำให้การแลกเปลี่ยน แก๊ส สารอาหาร น้ำและของเสียระหว่างเลือดและเซลล์ของเนื้อเยื่อ เกิดได้สะดวก โดยออกซิเจนและอาหารจะแพร่ผ่านผนังของหลอดเลือดฝอยเข้าสู่เซลล์ ส่วนคาร์บอนไดออกไซด์กับของเสียต่างๆ จากเซลล์จะแพร่ผ่านผนังของหลอดเลือดฝอยเพื่อส่งต่อไปกำจัดออกที่ปอดและแหล่งขับถ่ายต่างๆ ในร่างกาย แต่เซลล์เม็ดเลือดและโปรตีนขนาดใหญ่ไม่สามารถผ่านได้ ยกเว้นเซลล์เม็ดเลือดแดงที่สามารถบีบตัวแทรกผ่านได้ กลไกที่ควบคุมการไหลของเลือดใน capillary bed ขึ้นกับกล้ามเนื้อเรียบ มี 2 กลไก (รูปที่ 2.4) ได้แก่

1. การหดตัวของชั้นกล้ามเนื้อเรียบในผนังของ arteriole ทำให้หลอดเลือดตีบ เลือดไหลผ่านไปยัง capillaries ได้ช้าลง
2. การหดตัวของ **precapillary sphincters** ซึ่งเป็นวงแหวนของกล้ามเนื้อเรียบที่ทางเข้าของ capillary bed ควบคุมการไหลของเลือดระหว่าง arteriole และ venule

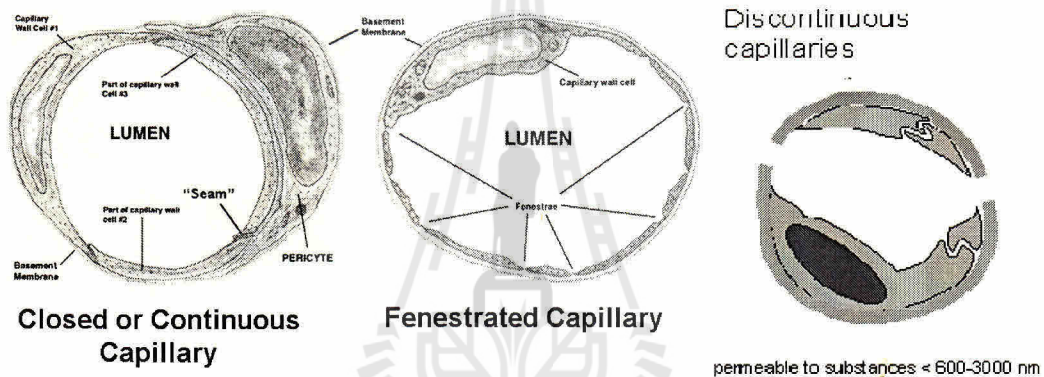


Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

รูปที่ 2.4 Arteriole, capillaries, venule และ precapillary sphincters ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของเลือดจาก arteriole ไปยัง venule (Campbell และคณะ, 2008)

Capillaries แบ่งออกเป็น 3 ชนิด (รูปที่ 2.5) ได้แก่

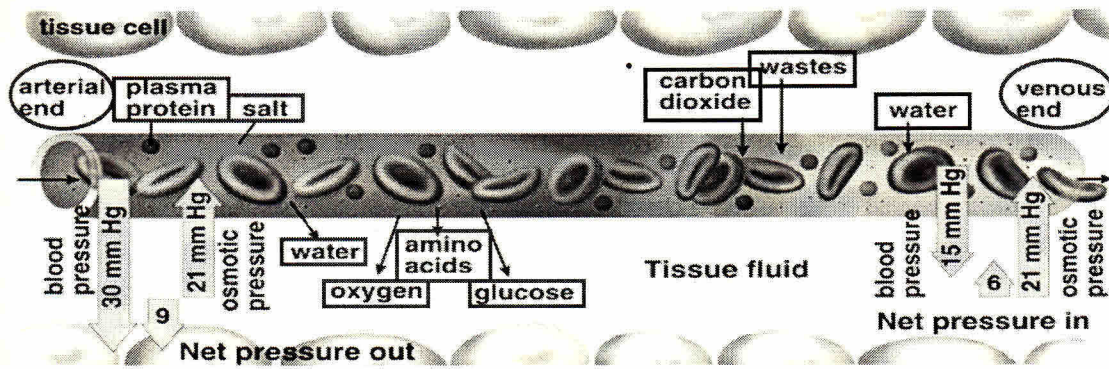
1. **Continuous capillaries** มี endothelium ปิดสนิท ยอมให้เฉพาะโมเลกุลขนาดเล็กเท่านั้นที่แพร่ผ่านได้ เช่น น้ำ ไอออน พบในกล้ามเนื้อโครงร่าง (skeletal muscle) ปอด ผิวหนัง อวัยวะสืบพันธุ์ ระบบประสาทส่วนกลาง
2. **Fenestrated capillaries** ประกอบด้วยเซลล์ endothelium มีรูซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 60-80 นาโนเมตร (nm) ยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กแพร่ผ่านได้ และจำกัดการแพร่ผ่านของโปรตีนและโมเลกุลขนาดใหญ่ พบในไต ต่อมไร้ท่อ ลำไส้เล็ก ตับอ่อน
3. **Sinusoids (Discontinuous capillaries)** เป็น fenestrated capillaries ชนิดพิเศษที่มีช่องเปิดขนาดใหญ่ใน endothelium (เส้นผ่าศูนย์กลาง 30-40 ไมโครเมตร) ซึ่งยอมให้เซลล์เม็ดเลือดแดงและโปรตีนเซรัม (serum) ผ่านได้ พบมากในตับ ม้าม ไชกระดูก ต่อมน้ำเหลือง ต่อมหมวกไตส่วน cortex



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ capillaries 3 ชนิด ตัดตามขวาง
(<http://education.vetmed.vt.edu> และ <http://pcwww.liv.ac.uk>)

การแลกเปลี่ยนสารที่ capillaries

การแลกเปลี่ยนสารที่ capillaries เกิดขึ้นผ่านผนัง endothelium แบบ endocytosis, exocytosis, และ diffusion ความดันเลือดภายใน capillary จะดันของเหลว (น้ำและ solutes เช่น น้ำตาล กลีโค โปรตีน ยูเรีย) ให้ผ่านผนัง ทำให้ส่วนปลายสุดของ capillary ด้าน arteriole เสีย น้ำออกไป คงเหลือเฉพาะเซลล์เม็ดเลือดและโปรตีนที่มีขนาดใหญ่จนผ่าน endothelium ไม่ได้ อยู่ใน capillary เป็นผลให้ blood osmolarity สูงขึ้น ในขณะที่เลือดเสียน้ำไปในช่วงที่ไหลผ่าน capillary น้ำจะถูกดึงเข้าสู่ capillary โดย osmosis ที่บริเวณใกล้กับ venule ความแตกต่างระหว่าง blood pressure และ osmotic pressure ดันให้ของเหลวไหลออกผ่านผนังส่วนปลายสุดของ capillary ด้าน arteriole และไหลเข้าผ่านผนัง capillary ด้าน venule (รูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 การแลกเปลี่ยนสารและของเหลวระหว่าง capillary และ tissue fluid

(<http://www.google.com>)

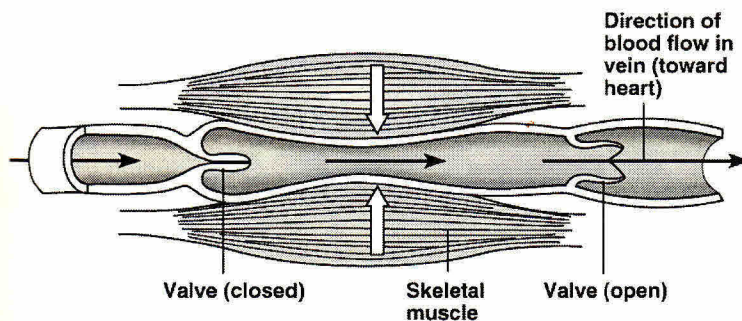
3. Venules

Capillaries จำนวนมากมารวมกันกลายเป็น vein ขนาดเล็กเรียกว่า venule (รูปที่ 2.4) ซึ่งทำหน้าที่รวบรวมเลือดจาก capillaries และนำเข้าสู่ veins โครงสร้างของ venules คล้ายกับ arterioles แต่ผนังบางกว่าใกล้เคียงกับ capillaries ผนังจะเริ่มหนาขึ้นเมื่อเข้าใกล้หัวใจ

4. Veins

Veins เป็นหลอดเลือดที่นำเลือดเข้าสู่หัวใจ มีขนาดแตกต่างกัน แบ่งเป็น 3 ขนาดคือ **large veins** (ขนาดใหญ่), **medium veins** (ขนาดกลาง), **small veins** (ขนาดเล็ก) (รูปที่ 2.3) ทั้งหมดมีผนัง 3 ชั้น คล้าย arteries แต่ชั้น media และ intima บางกว่าเพราะว่ามีกล้ามเนื้อและ elastic tissue น้อยกว่าในชั้น media (รูปที่ 2.2) ช่องว่างตรงกลาง (lumen) มีความกว้างมากกว่า arteries เมื่อตัดตามขวาง veins จะพับย่น ส่วน arteries จะยังคงเปิดกว้าง

Veins ที่พบตามแขนและขาจะมีลิ้น (valve) ช่วยป้องกันการไหลย้อนกลับของเลือดที่จะไปยังหัวใจ (รูปที่ 2.7) ไม่พบลิ้นใน veins ขนาดเล็กมากและใหญ่มาก ในส่วนอก (thorax) และท้อง การไหลของเลือดใน veins ตามแขนและขา เกิดจากการหดตัวของกล้ามเนื้อโครงร่าง ซึ่งจะบีบ vein ทำให้ลิ้นทางด้านบนเปิดส่วนลิ้นที่อยู่ทางด้านล่างยังคงปิด เลือดจึงไหลเข้าสู่หัวใจโดยไม่ไหลย้อนกลับ หากคนนั่งหรือยืนนานๆ โดยไม่มีการเคลื่อนไหวที่ กล้ามเนื้อไม่ได้ทำงาน จะทำให้เท้าบวมเนื่องจากเลือดไม่สามารถไหลกลับคืนหัวใจได้



รูปที่ 2.7 การทำงาน

ของ valves ใน vein

ของแขนและขา

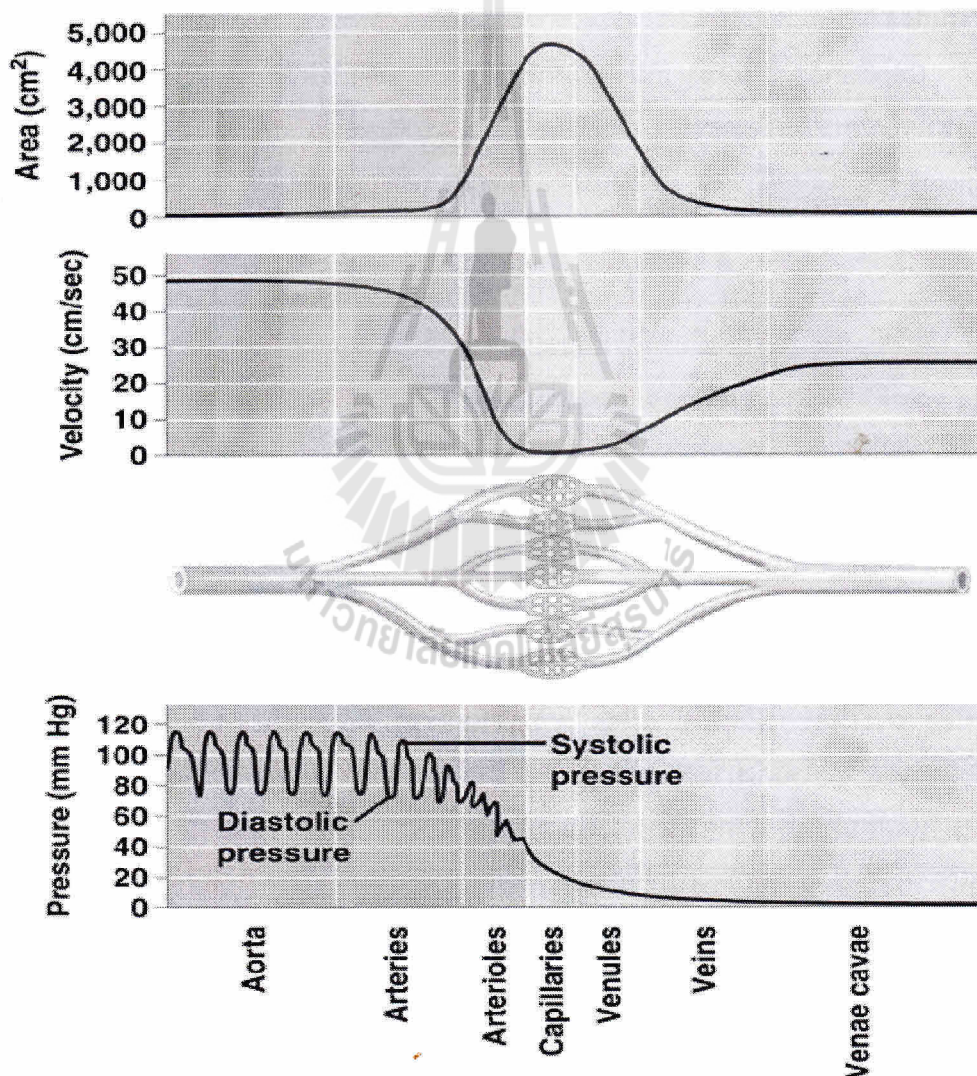
(Marieb, 1997)

Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

การไหลและความดันเลือด (Blood flow and blood pressure)

กฎทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับการไหลของเลือดในหลอดเลือดคือ

1. กฎของความต่อเนื่อง (Law of continuity) ในท่อที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยกว่าของเหลวจะไหลได้เร็วกว่า แต่ใน capillary เลือดจะไหลช้ากว่าใน artery และ aorta ตามลำดับ เพราะพื้นที่หน้าตัดรวมของ capillary ในร่างกายมีมากกว่า ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนสารได้ดีใน capillary (รูปที่ 2.8)
2. ความดันเลือด คือแรงดันที่เลือดดันไปบนผนังของหลอดเลือด ความดันเลือดใน arteries สูงกว่าใน veins และสูงที่สุดใน arteries เมื่อหัวใจหดตัว (systolic pressure) ความดันเลือดต่ำที่สุดเมื่อหัวใจคลายตัว (diastolic pressure) (รูปที่ 2.8)



รูปที่ 2.8 การไหลและความดันเลือด (Campbell และคณะ, 2008)

ความดันเลือด (Blood Pressure, BP)

ความดันเลือดหมายถึงแรงหรือความดันที่เลือดดันไปบนผนังของหลอดเลือด Arterial blood pressure เป็นผลของการปล่อยเลือดออกจาก left ventricle ที่เต็มแล้วเข้าสู่ aorta

เมื่อ left ventricle หดตัวและดันเลือดเข้าสู่ aorta ความดันที่เกิดขึ้น เรียกว่า **systolic blood pressure** ในคนโตเต็มวัยมีค่าประมาณ 120 mmHg (มิลลิเมตรปรอท) หรือ 16 kPa (kilopascals)

เมื่อหัวใจเกิด cardiac diastole สมบูรณ์และหัวใจหยุดพักภายหลังการขับเลือด ความดันภายใน arteries เรียกว่า **diastolic blood pressure** ในคนโตเต็มวัยมีค่าประมาณ 80 mmHg หรือ 11 kPa ความแตกต่างระหว่าง systolic และ diastolic blood pressure คือ **pulse pressure** (pulse pressure = systolic pressure - diastolic pressure)

สามารถวัด arterial blood pressure ได้โดยการใช้ sphygmomanometer (รูปที่ 2.10) และเขียนผลออกมาในรูปดังนี้

$$BP = \frac{120}{80} \text{ mmHg} \quad \text{หรือ} \quad BP = \frac{16}{11} \text{ kPa}$$

ความดันเลือดสามารถคำนวณได้จาก

$$BP = \text{cardiac output} \times \text{peripheral resistance}$$

A. Cardiac output = stroke volume x heart rate การเพิ่มขึ้นของ cardiac output จะทำให้ systolic และ diastolic pressure เพิ่มขึ้น ส่วนการเพิ่ม stroke volume จะเพิ่ม systolic pressure มากกว่า diastolic pressure

B. Peripheral resistance (arteriolar resistance, ความต้านทานส่วนปลายรวม) การหดตัวหรือขยายตัวของ arterioles เป็นตัวกำหนด peripheral resistance การหดตัวทำให้ความดันเลือดเพิ่มขึ้น การขยายตัวทำให้ความดันเลือดลดลง

ค่าเฉลี่ยความดันเลือดแดง (Mean arterial pressure (MAP))

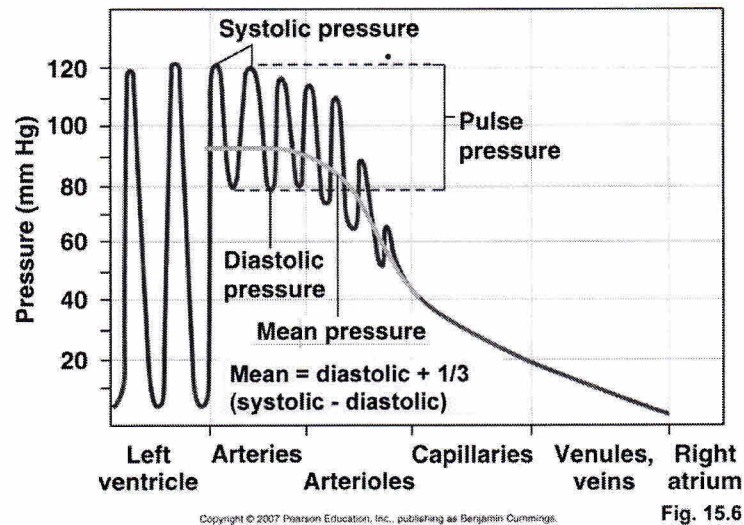
MAP เป็นความดันที่ดันเลือดไปยังเนื้อเยื่อต่างๆในร่างกาย เนื่องจาก diastole มักมีระยะจะนานกว่า systole ดังนั้น MAP จึงมีค่าโดยประมาณเท่ากับค่า diastolic pressure บวกกับ 1/3 ของ pulse pressure (รูปที่ 2.9) นั่นคือ

$$MAP = \text{diastolic pressure} + \frac{1}{3} (\text{systolic pressure} - \text{diastolic pressure})$$

หากคนมี systolic pressure = 120 mmHg และ diastolic pressure = 80 mmHg จะคำนวณค่า MAP ได้ดังนี้

$$MAP = 80 \text{ mmHg} + \frac{1}{3} (120 \text{ mmHg} - 80 \text{ mmHg}) = 93 \text{ mmHg}$$

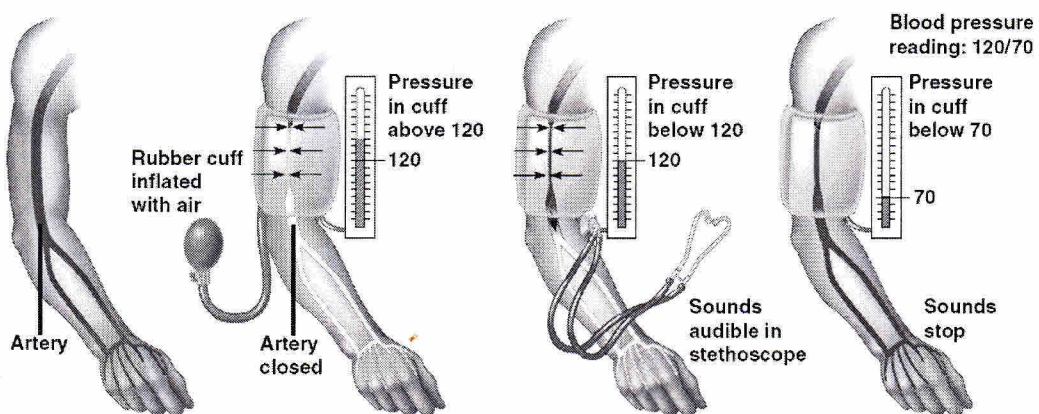
MAP และ pulse pressure จะลดลงไปเรื่อยเมื่ออยู่ห่างจากหัวใจ



รูปที่ 2.9 กราฟแสดง systolic pressure, diastolic pressure, pulse pressure และ mean arterial pressure (Silverthorn, 2004)

การวัดความดันเลือด (รูปที่ 2.10)

1. ในรูปที่ 2.10 กำหนดให้คนอายุ 20 ปีมีความดันเลือด = 120/70 mmHg
2. **Sphygmomanometer** เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดความดันเลือด ประกอบด้วย cuff ที่ต่อกับมาตรวัด พัน cuff รอบโคนแขน บีบลมเข้าจน artery ปิดและเลือดหยุดไหล (ความดันใน cuff จะสูงกว่าความดันเลือดใน artery)
3. ใช้ **stethoscope** ฟังเสียงการไหลของเลือด ถ้า artery ปิดจะไม่มีเสียงชีพจรได้ cuff ปลดลมออกช้าๆจนได้ยินเสียงการไหลของเลือด ความดันเลือดที่จุดนี้เรียก **systolic pressure** (ความดันเลือดใน artery สูงกว่าใน cuff)
4. คลาย cuff ให้หลวมจนกว่าเลือดจะไหลเป็นปกติและเสียงได้ cuff หายไป ความดันเลือดที่จุดนี้เรียก **diastolic pressure**



รูปที่ 2.10 วัด arterial blood pressure โดยการใช้ sphygmomanometer (Campbell และคณะ, 2008)

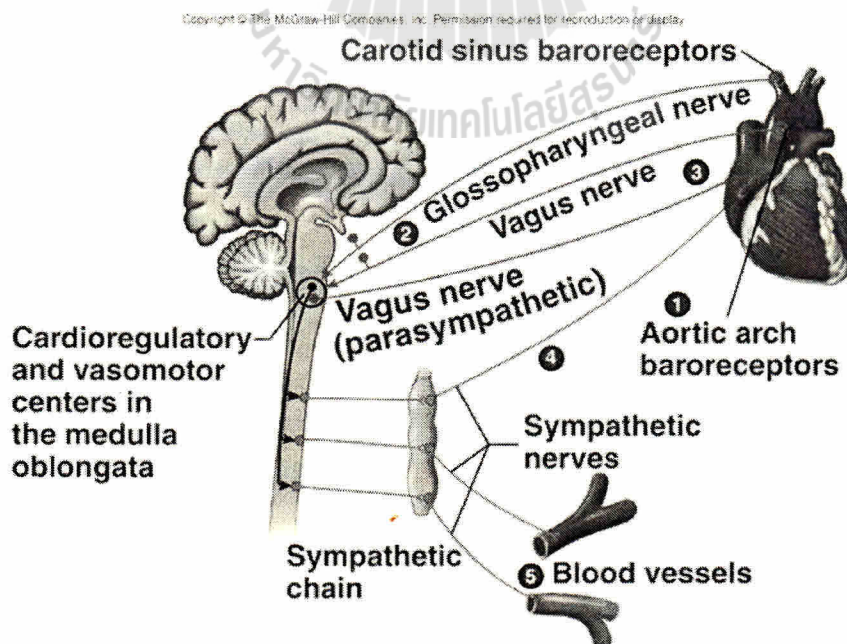
กลไกการควบคุมความดันเลือด

การควบคุมความดันเลือดให้อยู่ในระดับปกติมี 2 กลไกคือกลไกทางระบบประสาท (nervous system) และกลไกทางฮอร์โมน (hormones)

1. กลไกทางระบบประสาท (Nervous system)

การควบคุมความดันเลือดโดยระบบประสาทส่วนมากทำงานผ่าน reflex arcs คือ baroreceptors และ nerve fibers, vasomotor center ใน medulla oblongata, vasomotor fibers และกล้ามเนื้อเรียบในหลอดเลือด ในบางกรณีจะมี chemoreceptors เข้ามาาร่วมด้วย

Baroreceptor reflex เมื่อ arterial blood pressure สูงขึ้น จะไปยึดตัวรับ baroreceptors ที่อยู่ใน aortic arch และในผนังของ large arteries ในคอและอกและที่ carotid sinus เป็นผลให้ baroreceptors ส่ง impulses ไปตาม vagus nerve และ glossopharyngeal nerve ไปยับยั้งการทำงานของ vasomotor center ใน medulla oblongata (ศูนย์ควบคุมการหดและขยายตัวของหลอดเลือดและ peripheral resistance) ทำให้ arterioles และ veins ขยายตัว (vasodilation) และ blood pressure ลดลง ในขณะที่เดียวกัน baroreceptors ยังส่ง impulses ไปยัง cardiac center ซึ่งจะไปกระตุ้นการทำงานของประสาท parasympathetic และยับยั้งการทำงานของ cardioacceleratory center ใน medulla oblongata (ควบคุมอัตราการเต้นของหัวใจและการบีบตัวของหัวใจ) ทำให้ heart rate และความแรงของการบีบตัวของหัวใจลดลง เมื่อ MAP ลดลงจะไปกระตุ้น reflex ของการหดตัวของหลอดเลือด (vasoconstriction) และเพิ่ม cardiac output ทำให้ blood pressure เพิ่มขึ้น ดังนั้นร่างกายจึงมีการควบคุม peripheral resistant และ cardiac output เพื่อให้ blood pressure เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 กลไกการควบคุมความดันเลือดโดยระบบประสาท (Seeley และคณะ, 2008)

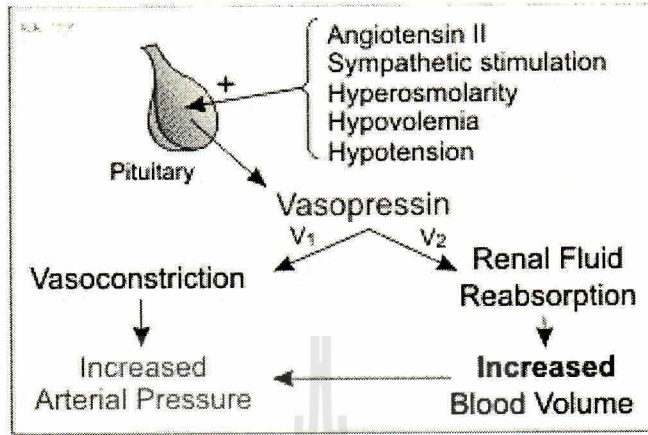
2. **ฮอร์โมน** ฮอร์โมนหลายชนิดในระบบไหลเวียนเลือดจะมีผลต่อระบบหลอดเลือดและมีผลทำให้หลอดเลือดหดหรือคลายตัว

2.1 Atrial natriuretic peptide (ANP) สร้างจากหัวใจ เป็นสารที่มีผลต้านการทำงานของสารที่ทำให้หลอดเลือดหดตัวหลายชนิด ทำให้ปริมาตรเลือด (blood volume) และความดันเลือดต่ำลง

2.2 Antidiuretic hormone (ADH) หรือ vasopressin หรือ arginine vasopressin (AVP) เป็น peptide ฮอร์โมนที่สร้างขึ้นใน hypothalamus และส่งมาเก็บที่ต่อมใต้สมองส่วนหลัง (posterior pituitary gland) ADH มีแหล่งออกฤทธิ์ 2 ตำแหน่งคือที่ไตและหลอดเลือด ที่ไต ADH จะทำหน้าที่ควบคุมปริมาตรของของเหลวภายนอกเซลล์ (extracellular fluid) โดยไปลดการสร้างน้ำปัสสาวะ มีผลทำให้ปริมาตรเลือด, cardiac output และ atrial blood pressure เพิ่มขึ้น ส่วนที่หลอดเลือด ADH จะมีผลต่อกล้ามเนื้อเรียบของหลอดเลือด ทำให้หลอดเลือดหดตัว และความดันเลือดจะเพิ่มขึ้น กลไกสำคัญที่ควบคุมการหลั่ง ADH คือ (1) hypervolemia คือการเสียเลือดมากและการขาดน้ำ ทำให้ความดันเลือดลดลง (2) ภาวะความดันต่ำ (hypotension) และ (3) มีการหลั่ง angiotensin II เพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.12)

2.3 Adrenal medulla hormones (epinephrine และ norepinephrine) ในช่วงเวลาที่เกิดความเครียด (เช่น ออกกำลังกาย หัวใจล้มเหลว เสียเลือดมาก เจ็บปวด) ต่อมหมวกไต (adrenal gland) จะหลั่งสารกลุ่ม catecholamines คือ epinephrine (adrenaline) และ norepinephrine (noradrenaline) เข้าสู่กระแสเลือด โดยการกระตุ้นของ preganglionic sympathetic nerve สารที่หลั่งออกมา 80% จะเป็น epinephrine และอีก 20% จะเป็น norepinephrine ฮอร์โมนเหล่านี้จะมีผลต่อ adrenoceptors 2 กลุ่มคือ alpha adrenoceptors และ beta adrenoceptors ซึ่งมี beta1 และ beta2 ถ้า catecholamine จับกับ alpha adrenoceptor จะทำให้หลอดเลือดหดตัว ถ้าจับกับ beta adrenoceptor ทำให้หลอดเลือดขยายตัว โดยทั่วไป norepinephrine จะเลือกจับกับ alpha adrenoceptor มากกว่า จึงมีผลให้หลอดเลือดหดตัว แต่ epinephrine สามารถจับกับ beta2 adrenoceptor ได้ดีกว่า norepinephrine ซึ่งมีผลทำให้กล้ามเนื้อเรียบในหลอดเลือดขยายตัว ทำให้หลอดเลือดที่มาเลี้ยงกล้ามเนื้อโครงร่าง หัวใจ และตับ ขยายตัว ดังนั้นการกระตุ้น sympathetic nerve จึงมีผลให้หลอดเลือดในหัวใจและกล้ามเนื้อโครงร่างขยายตัว เพิ่มการไหลเวียนเลือดมายังอวัยวะเหล่านี้ ในขณะที่หลอดเลือดในอวัยวะอื่นหดตัว ทำให้เลือดไหลมายังอวัยวะที่สำคัญเพิ่มขึ้น ซึ่งมีความสำคัญในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความดันเลือด ในกรณีที่ epinephrine ไปจับกับ beta1 จะกระตุ้นให้หัวใจหดตัวและความดันเลือดจะเพิ่มขึ้น

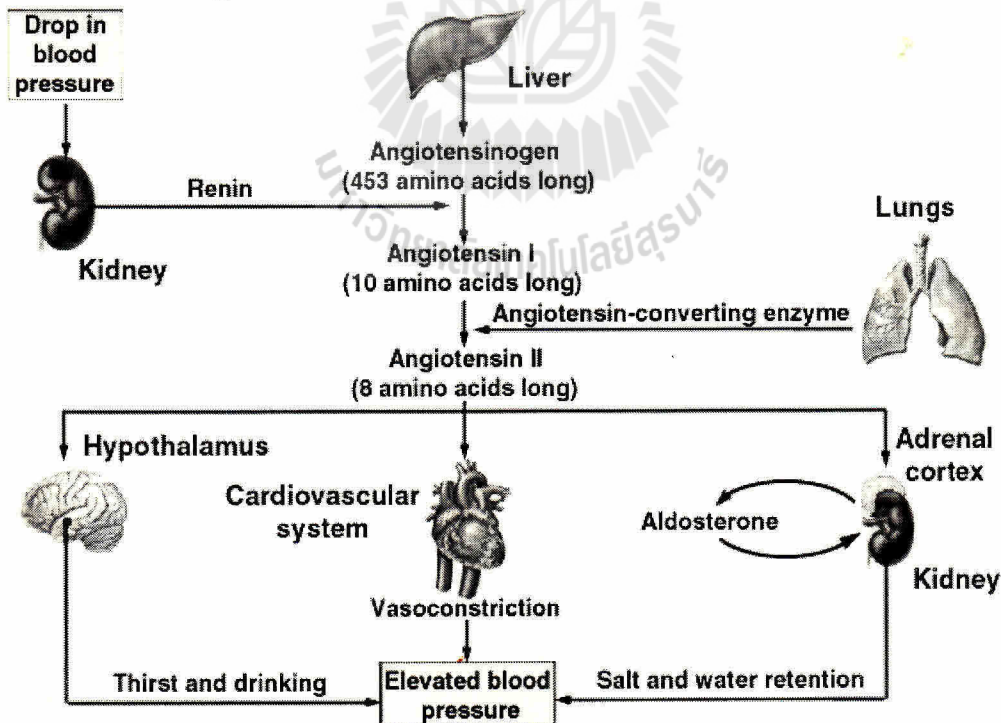
2.4 Angiotensin II (รูปที่ 2.13) สร้างจาก angiotensin I ซึ่งเป็นสารที่เปลี่ยนมาจาก angiotensinogen โดยสาร renin ที่คัดหลังจากไตเมื่อความดันเลือดลดลง สาร angiotensin II ทำให้หลอดเลือดหดตัวได้รุนแรงที่สุดเป็นผลให้ความดันเลือดสูงขึ้น



รูปที่ 2.12 กลไกการทำงานของ vasopressin (ADH)
 (<http://www.cvphysiology.com/Blood%20Pressure/BP016.htm>)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Renin-Angiotensin-Aldosterone Mechanism



รูปที่ 2.13 กลไกการทำงานร่วมกันของ renin, angiotensin และ aldosterone
 (<http://www.google.com>)

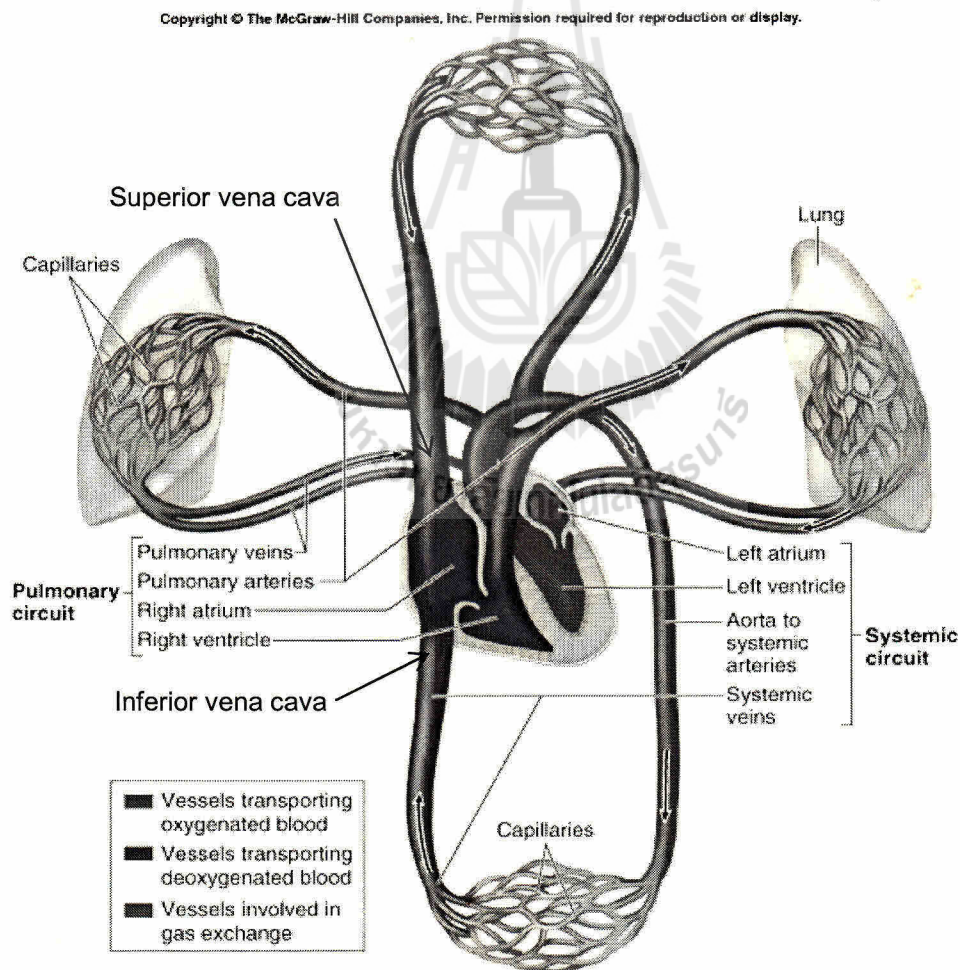
การไหลเวียนของเลือด (รูปที่ 2.14)

การไหลเวียนในร่างกายแบ่งออกเป็น 2 เส้นทางใหญ่ๆ ได้แก่ (1) Pulmonary circulation (circuit) และ (2) Systemic circulation (circuit)

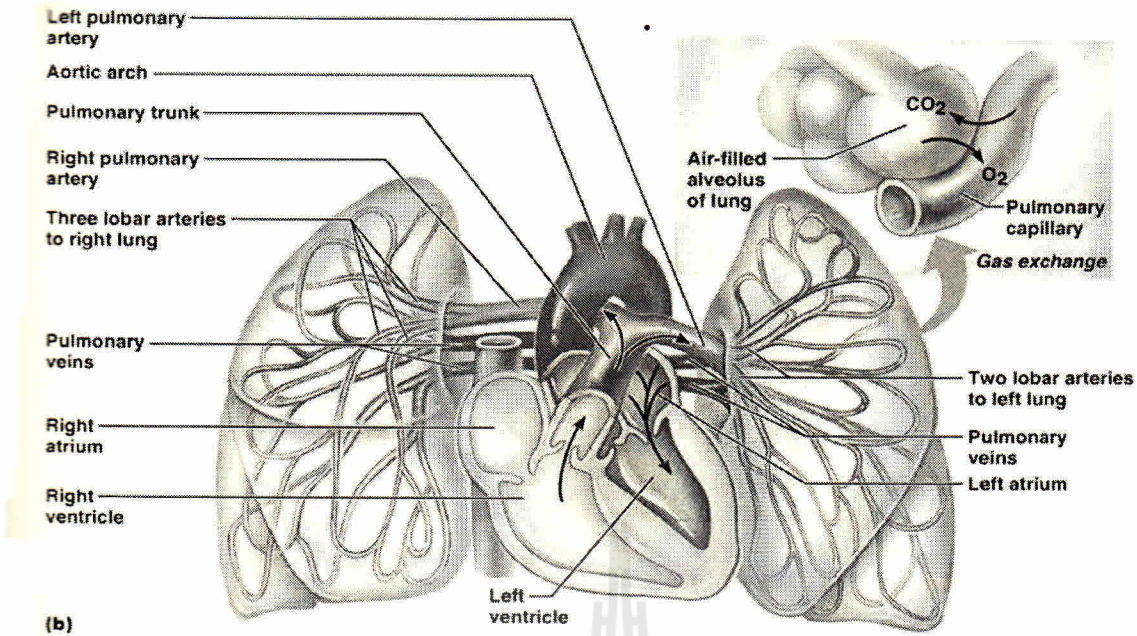
Pulmonary circulation

ประกอบด้วย การไหลเวียนของ deoxygenated blood จากหัวใจห้อง right ventricle ไปยังปอด และ oxygenated blood จากปอดกลับมาที่หัวใจห้อง left atrium (รูปที่ 2.14 และ 2.15)

Pulmonary trunk (artery) ออกจาก right ventricle แล้วแตกออกเป็น 2 กิ่ง right และ left pulmonary artery ซึ่งแยกไปปอดขวาและซ้ายตามลำดับ หลังจากนั้นจะแตกแขนงเล็กไปเรื่อยๆ จนเป็น capillary ล้อมรอบ air sac (ถุงลม) ในปอด CO_2 จากเลือดจะผ่านเข้าไปใน air sac และถูกขับออกจากปอด O_2 จาก air sac จะผ่านเข้ามาในเลือด หลังจากนั้น oxygenated blood จะผ่านเข้า left atrium ทาง pulmonary veins 2 เส้น เมื่อ left ventricle หดตัวเลือดจะถูกส่งเข้าไปใน systemic circulation



รูปที่ 2.14 Systemic circulation และ Pulmonary circulation (McKinley และ O'Loughlin, 2006)



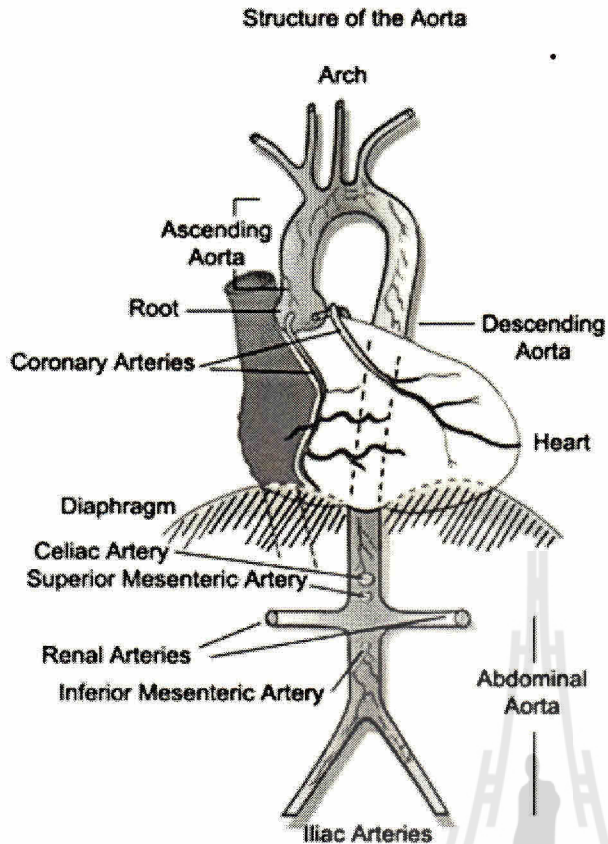
รูปที่ 2.15 Pulmonary circulation (Marieb และ Hoehn, 2008)

Systemic circulation

เป็นการไหลเวียนของ oxygenated blood จาก left ventricle ไปยังส่วนต่างๆของร่างกายแล้วกลับเข้าสู่ right atrium ทำหน้าที่ (1) นำ O_2 และสารอาหารไปให้เนื้อเยื่อทั่วร่างกาย (2) ดึง CO_2 และของเสียอื่นๆออกจากเนื้อเยื่อ หลอดเลือด arteries ทั้งหมดของ systemic circulation แยกแขนงมาจาก aorta ซึ่งออกมาจาก left ventricle (รูปที่ 2.14)

ในขณะที่ aorta ออกจาก left ventricle จะพาดขึ้นข้างบนและอยู่ด้านหลังของ pulmonary trunk (รูปที่ 2.16) ที่จุดนี้เรียกว่า **ascending aorta** ซึ่งจะแยกออกเป็น coronary arteries 2 เส้น จากนั้น ascending aorta จะวกมาทางด้านซ้ายมือเกิดเป็น **arch of the aorta** ก่อนที่จะกลายเป็น **descending aorta** ซึ่งจะแตกแขนงอีกครั้งบริเวณกระดูกสันหลังเอวข้อที่ 4 กลายเป็น 2 **common iliac arteries** นำเลือดไปเลี้ยงขาทั้งสองข้าง ส่วนของ descending aorta ที่อยู่ระหว่าง arch of aorta (aortic arch) กับกะบังลม เรียกว่า **thoracic aorta** และส่วนที่อยู่ระหว่างกะบังลมและ common iliac arteries เรียกว่า **abdominal aorta** แต่ละ aorta จะแตกแขนงเป็น arteries เข้าสู่อวัยวะต่างๆ

Deoxygenated blood กลับสู่หัวใจทาง systemic veins หลอดเลือด veins ทั้งหมดของ systemic circulation จะเข้าสู่ **superior** และ **inferior vena cava** หรือ coronary sinus และเข้า right atrium (รูปที่ 2.14)



รูปที่ 2.16 Systemic circulation
(<http://www.thaigoodview.com>)

ภาพแสดงส่วนต่างๆ ของหลอดเลือด Aorta

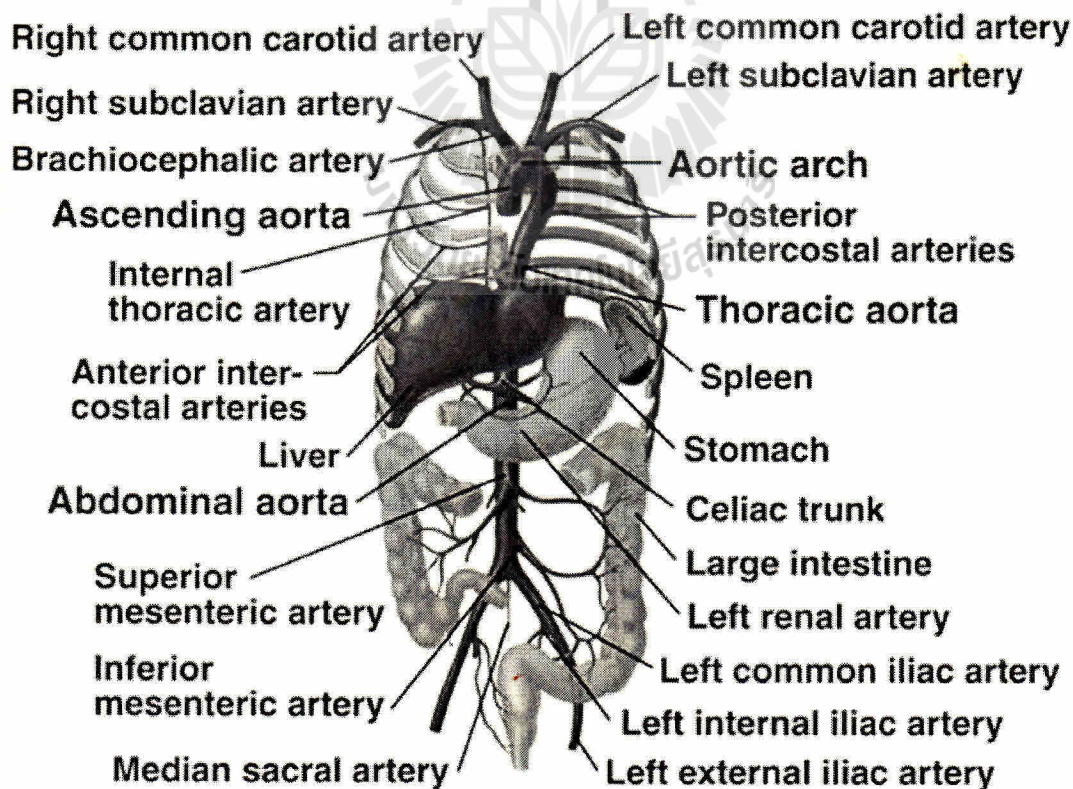
หลอดเลือด artery หลักของ systemic circulation (รูปที่ 2.17 - 2.22 และ 2.28)

1. แขนงหลอดเลือดแดงของ ascending aorta มีเพียง right และ left coronary arteries ที่ส่งไปเลี้ยงหัวใจ
2. แขนงหลอดเลือดแดงของ aortic arch
 - a. แขนงที่ 1 คือ **Brachiocephalic artery** จะแยกเป็น right common carotid artery และ right subclavian artery
 - b. แขนงที่ 2 คือ **left common carotid artery** จะแยกเป็น left internal และ external carotid artery ไปเลี้ยงผิวหนังและกล้ามเนื้อของหัวและคอ
 - c. แขนงที่ 3 คือ **left subclavian artery** จะแยกเป็น vertebral artery ไปเลี้ยงบางส่วนของสมอง, axillary artery ไปที่ไหล่, brachial artery ไปที่ต้นแขน, radial และ ulna artery ไปที่ปลายแขน
3. แขนงหลอดเลือดแดงของ thoracic aorta
 - a. Intercostal arteries (10 คู่) ไปเลี้ยงกล้ามเนื้อของผนังทรวงอก, bronchial arteries ไปที่ปอด, esophagus arteries ไปที่หลอดอาหาร และ phrenic arteries ไปที่กะบังลม

4. แขนงหลอดเลือดแดงของ abdominal aorta

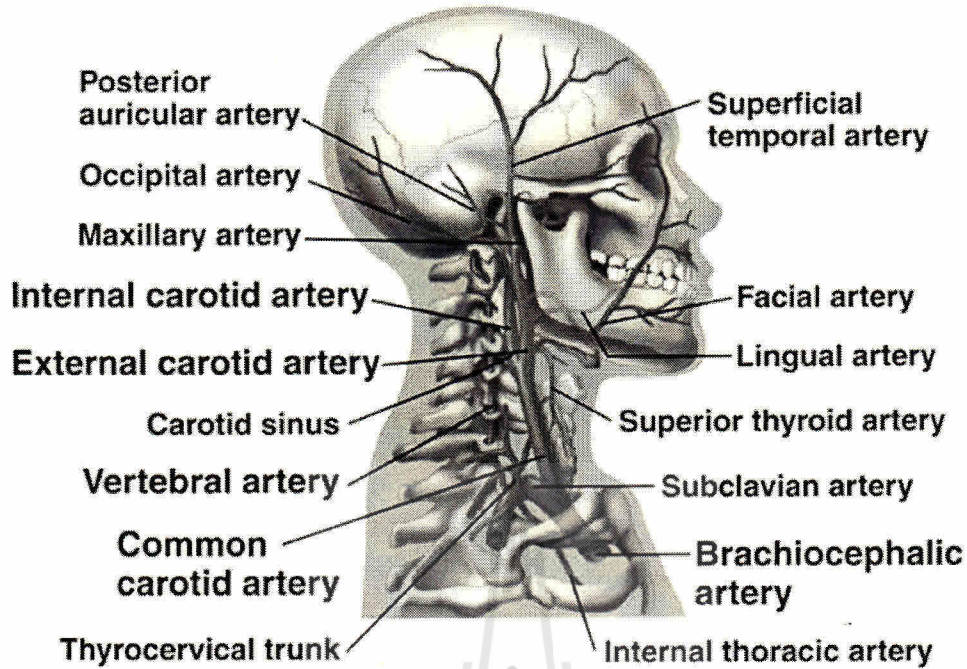
- a. Celiac trunk เป็นหลอดเลือดเดี่ยวที่แยกเป็น 3 กิ่ง
 - i. Left gastric artery ไปเลี้ยงกระเพาะอาหาร
 - ii. Splenic artery ไปเลี้ยงม้าม
 - iii. Common hepatic artery ไปเลี้ยงตับ
- b. Superior mesenteric artery ไปเลี้ยงลำไส้เล็กส่วนมากและครึ่งแรกของลำไส้ใหญ่
- c. Inferior mesenteric artery ไปเลี้ยงครึ่งหลังของลำไส้ใหญ่
- d. Renal arteries (right และ left) ไปเลี้ยงไต
- e. Ovarian arteries ในผู้หญิงไปเลี้ยงรังไข่, testicular arteries ในผู้ชายไปเลี้ยงอัณฑะ (testes)
- f. Common iliac arteries (right และ left) เป็นแขนงสุดท้ายของ abdominal aorta แต่ละข้างจะแยกออกเป็น internal iliac artery ไปเลี้ยงอวัยวะในส่วนสะโพก (เช่น rectum, กระเพาะปัสสาวะ) และ external iliac artery ซึ่งจะผ่านเข้าไปที่ต้นขาแล้วกลายเป็น femoral artery ซึ่งจะแตกกิ่งย่อยต่อไปเป็น popliteal artery ที่หัวเข่า, anterior และ posterior tibial artery ที่หน้าแข้ง

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

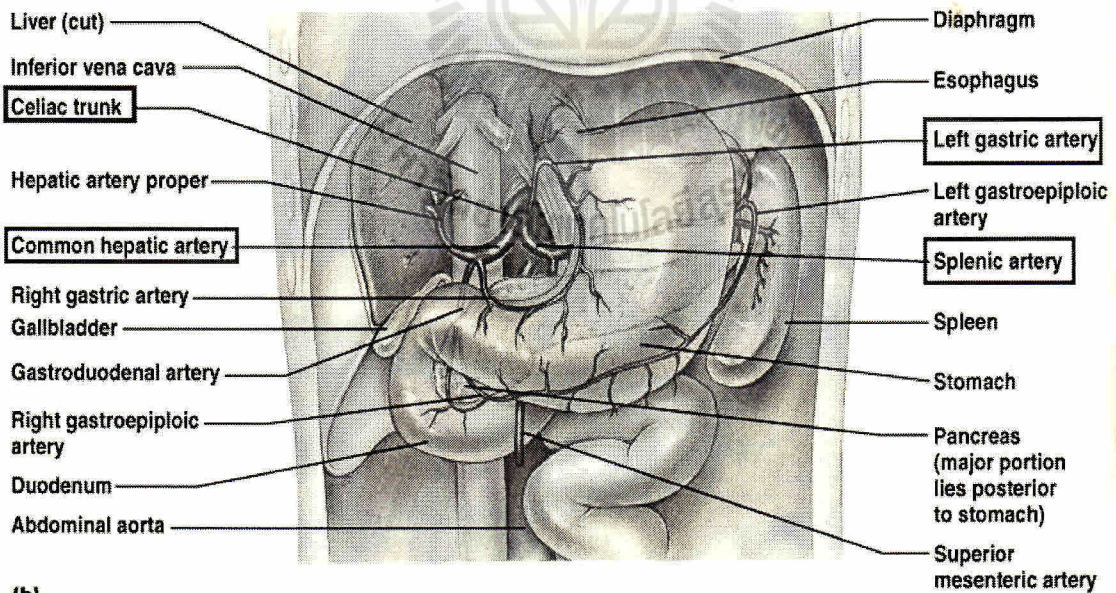


รูปที่ 2.17 Arteries ในส่วนอกและท้อง (Marieb และ Hoehn, 2008)

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display

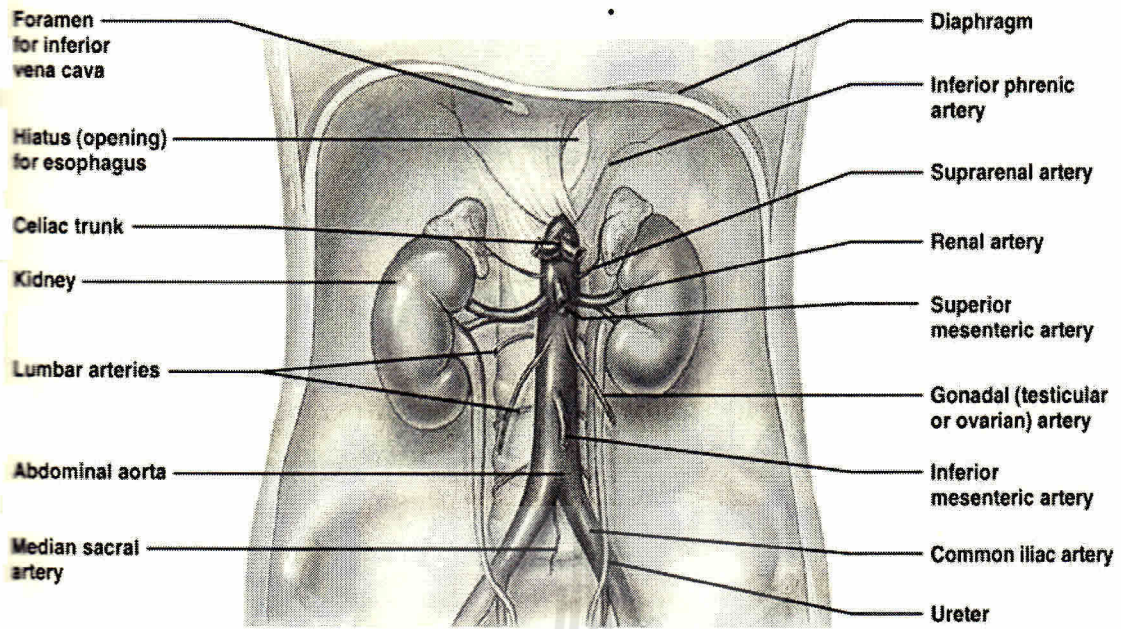


รูปที่ 2.18 Arteries ในส่วนหัวและคอ (Marieb และ Hoehn, 2008)

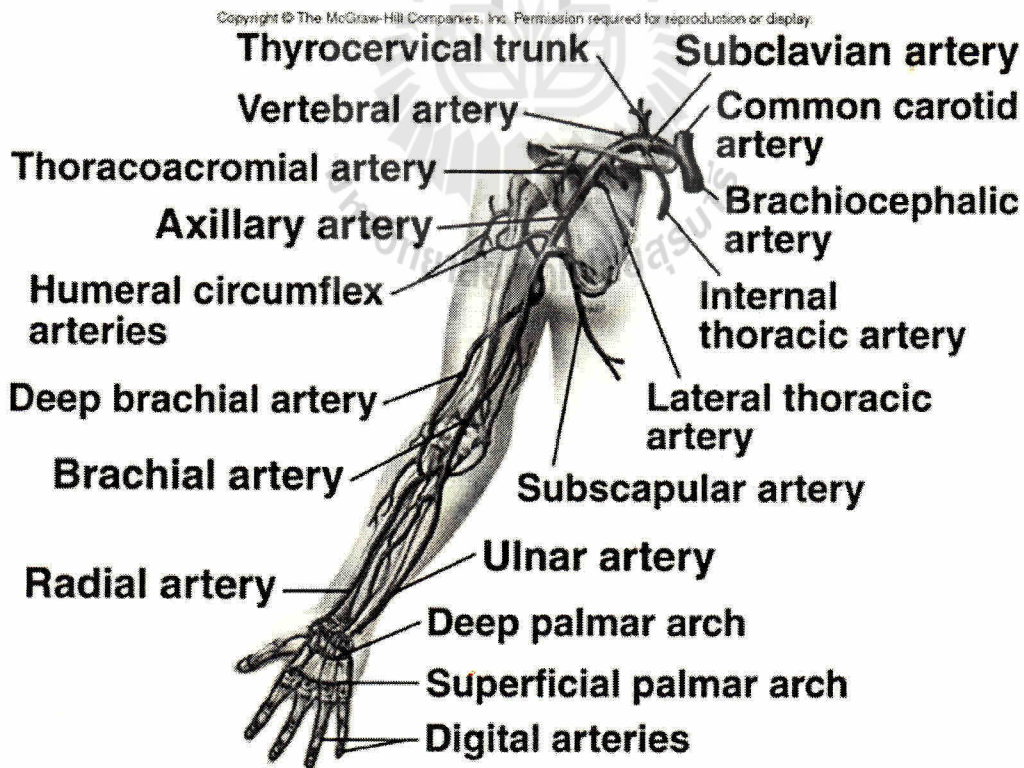


(b)

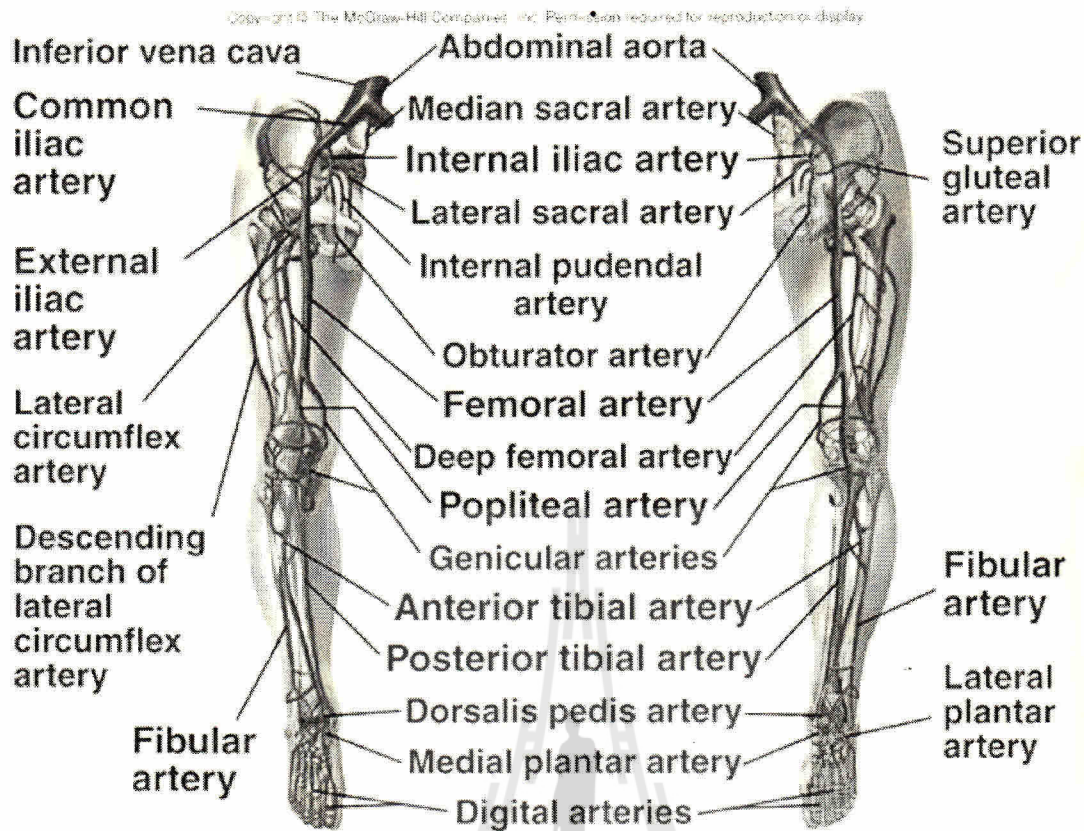
รูปที่ 2.19 Arteries ในส่วนท้อง (Marieb และ Hoehn, 2008)



รูปที่ 2.20 Arteries ในส่วนท้อง ตัดอวัยวะส่วนทางเดินอาหารออก (Marieb และ Hoehn, 2008)



รูปที่ 2.21 Arteries ในส่วนแขน (Marieb และ Hoehn, 2008)



รูปที่ 2.22 Arteries ในส่วนขา (Marieb และ Hoehn, 2008)

หลอดเลือด veins หลักของ systemic circulation

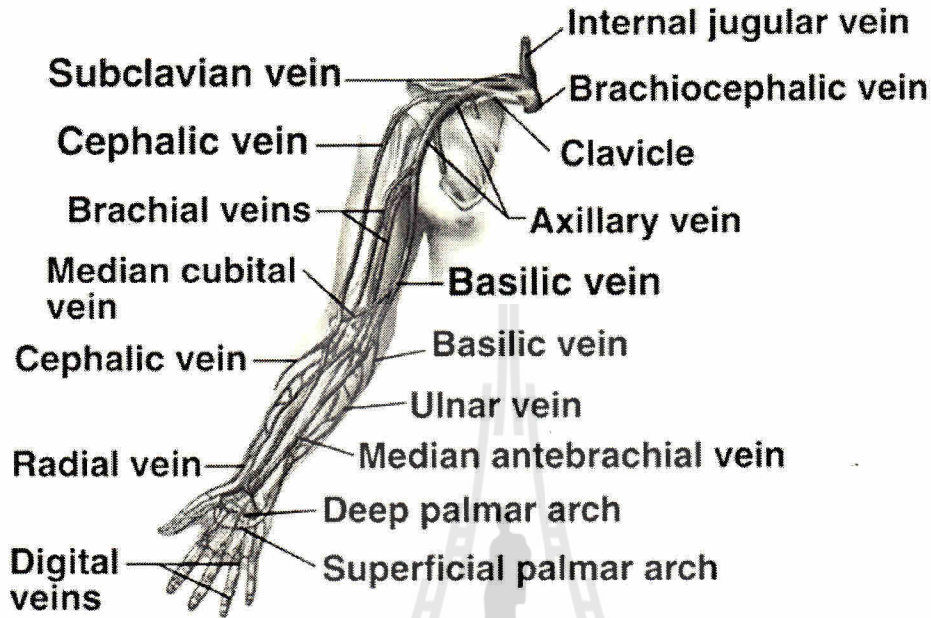
หลอดเลือด veins หลักที่รับเลือดใช้แล้วจากส่วนหัวและแขนคือ superior vena cava และ veins หลักที่รับเลือดใช้แล้วจากส่วนล่างของร่างกายคือ inferior vena cava

1. หลอดเลือด veins ที่นำเลือดมาส่งเข้า superior vena cava (รูปที่ 2.23, 2.24 และ 2.28)

- หลอดเลือดจากส่วนนิ้วมือและแขนได้แก่ radial และ ulnar veins, brachial vein, axillary vein
- Cephalic vein ส่งเลือดเข้าสู่ axillary vein
- Basilic vein ส่งเลือดเข้าสู่ brachial vein, basilic vein และ cephalic vein มาเชื่อมต่อกันที่ข้อศอกกลายเป็น median cubital vein
- Subclavian vein รับเลือดจากแขนผ่าน axillary vein และรับเลือดจากผิวหนังและกล้ามเนื้อของหัวผ่าน external jugular vein
- Vertebral vein รับเลือดจากส่วน posterior ของหัว
- Internal jugular vein รับเลือดจากส่วน dura sinus ของสมอง

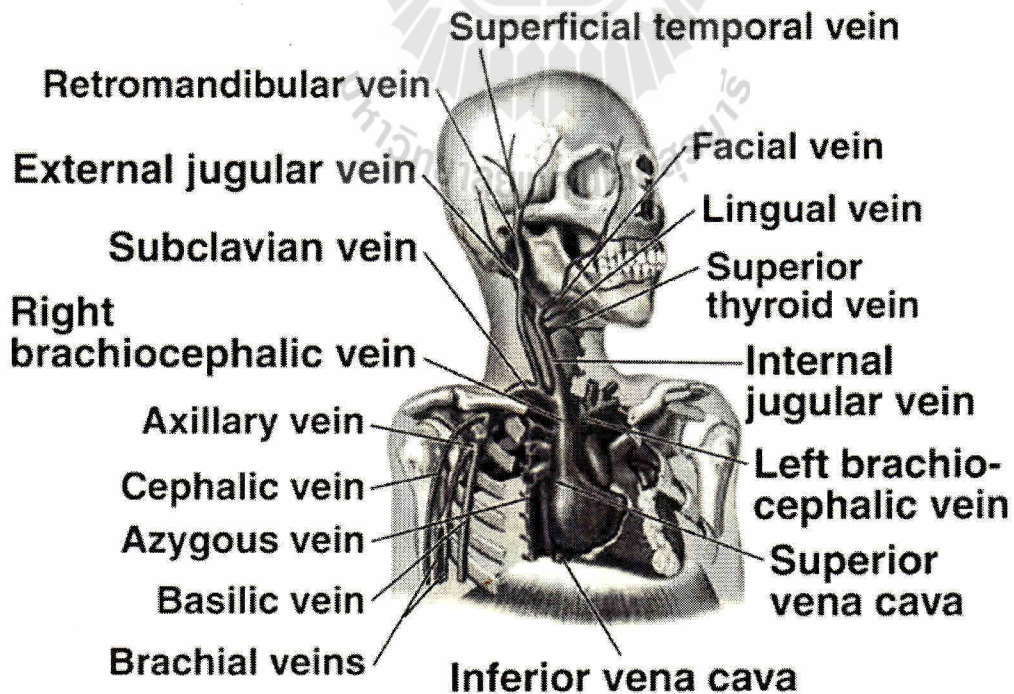
- g. Brachiocephalic veins เป็น large veins ที่รับเลือดจาก subclavian vein, vertebral vein, Internal jugular vein. Brachiocephalic veins จะรวมกัน กลายเป็น superior vena cava

Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display



รูปที่ 2.23 Veins ในส่วนแขน (Marieb และ Hoehn, 2008)

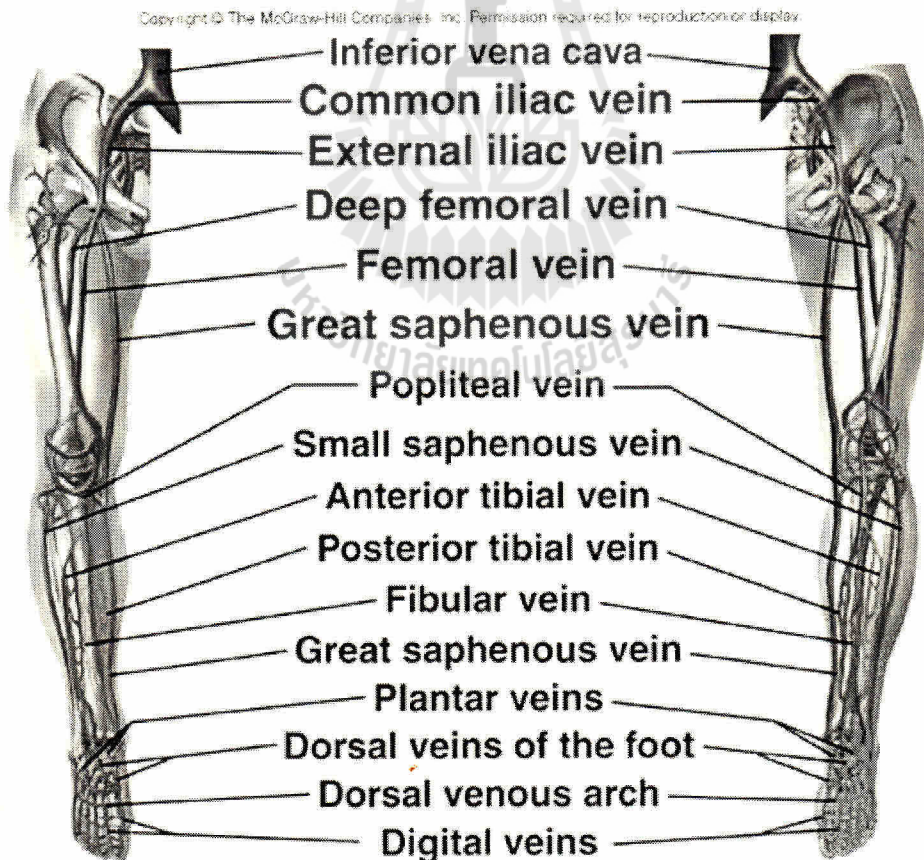
Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display



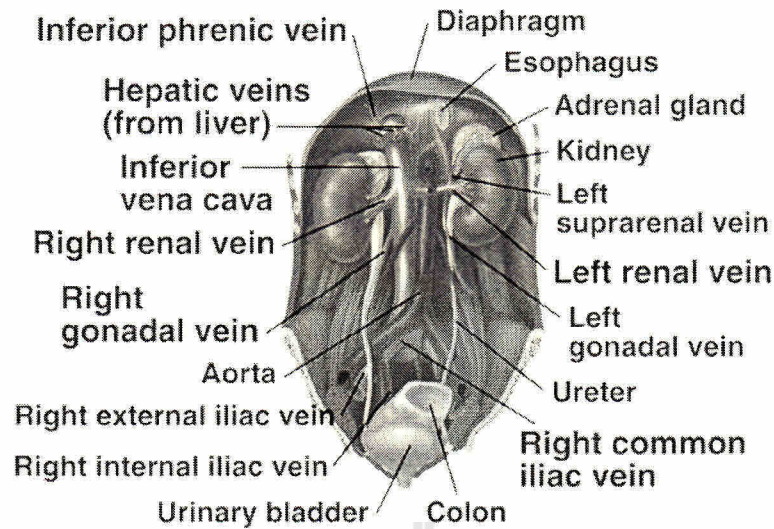
รูปที่ 2.24 Veins ในส่วนหัวและอก (Marieb และ Hoehn, 2008)

2. หลอดเลือด veins ที่นำเลือดมาส่งเข้า inferior vena cava (รูปที่ 2.25, 2.26 และ 2.28)

- Anterior และ posterior tibial veins และ peroneal vein รับเลือดจากส่วนล่างของขา posterior tibial veins จะกลายเป็น popliteal vein เมื่อมาถึงหัวเข่าและเป็น femoral vein เมื่อมาถึงต้นขา
- Great saphenous veins เป็น vein ที่ยาวที่สุดในร่างกาย โดยเริ่มต้นที่ dorsal venous arch ในเท้า
- Common iliac veins (right และ left) เกิดจากการรวมกันของ external iliac vein และ internal iliac vein เมื่อ common iliac veins (right และ left) มารวมกันจะกลายเป็น inferior vena cava
- Gonadal veins รับเลือดจากรังไข่หรืออัณฑะ
- Renal veins รับเลือดจากไต
- Hepatic portal vein เป็นหลอดเลือดเดี่ยวที่รับเลือดจากทางเดินอาหารแล้วนำเลือดผ่านตับก่อนที่จะเข้าสู่ systemic circulation
- Hepatic veins รับเลือดจากตับ



รูปที่ 2.25 Veins ในส่วนขา (Marieb และ Hoehn, 2008)



รูปที่ 2.26 Veins ในส่วนท้อง ตัดอวัยวะส่วนทางเดินอาหารออก (Marieb และ Hoehn, 2008)

Hepatic portal circulation

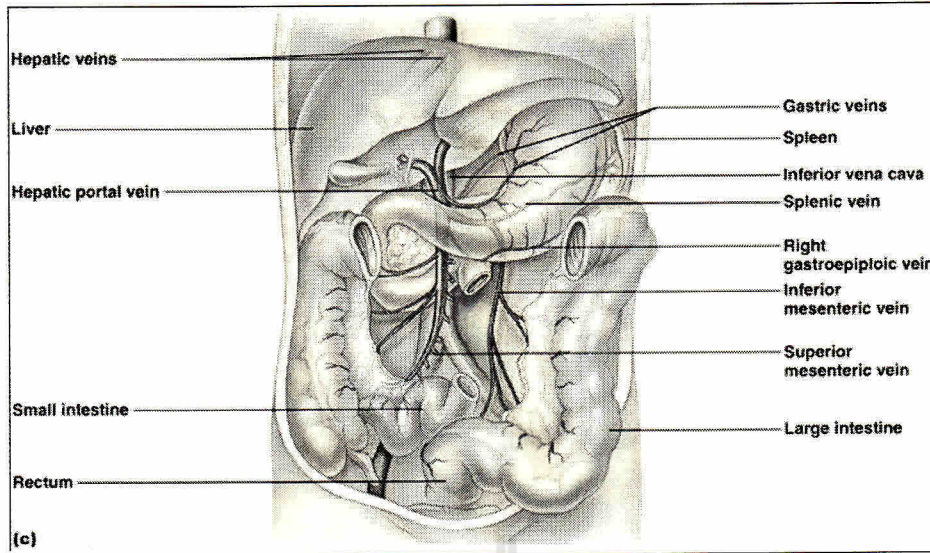
โดยทั่วไป veins จะนำเลือดเข้าสู่หัวใจโดยตรง แต่ veins ที่รับเลือดจากอวัยวะภายในช่องท้องจะเป็นข้อยกเว้น veins เหล่านี้เริ่มต้นในร่างแห capillaries ในกระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก ตับอ่อนและม้าม และนำเลือดจากอวัยวะเหล่านี้ผ่าน hepatic portal vein เข้าสู่ตับที่ซึ่งเลือดจะเข้าไปใน hepatic sinusoids (หลอดเลือดฝอยในตับ) เส้นทางการไหลของเลือดเช่นนี้เรียกว่า hepatic portal system (รูปที่ 2.27) โดยมีหลอดเลือดที่เกี่ยวข้องดังนี้

1. **Right และ left gastric veins** รับเลือดจากกระเพาะอาหาร
2. **Superior mesenteric vein** รับเลือดจาก ลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ส่วน ascending colon และ transverse colon
3. **Splenic vein** เกิดจากการรวมกันของ veins หลายเส้นที่รับเลือดจากม้าม ตับอ่อน และกระเพาะอาหารบางส่วน แขนงของ splenic vein ที่ใหญ่ที่สุดคือ **Inferior mesenteric vein** ที่รับเลือดจาก descending colon, sigmoid colon และ rectum

เลือด 80% ที่ไหลเข้าสู่ตับใน hepatic portal system มาจาก capillaries ในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก เป็นเลือดที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำแต่มีสารอาหารมาก ตับจะควบคุมความเข้มข้นของกลูโคสในเลือดโดยเปลี่ยนกลูโคสที่มากเกินไปให้เป็นไกลโคเจนและเก็บสะสมไว้ในตับ หรือเปลี่ยนไกลโคเจนให้เป็นกลูโคสเมื่อระดับกลูโคสในเลือดต่ำกว่าระดับปกติ

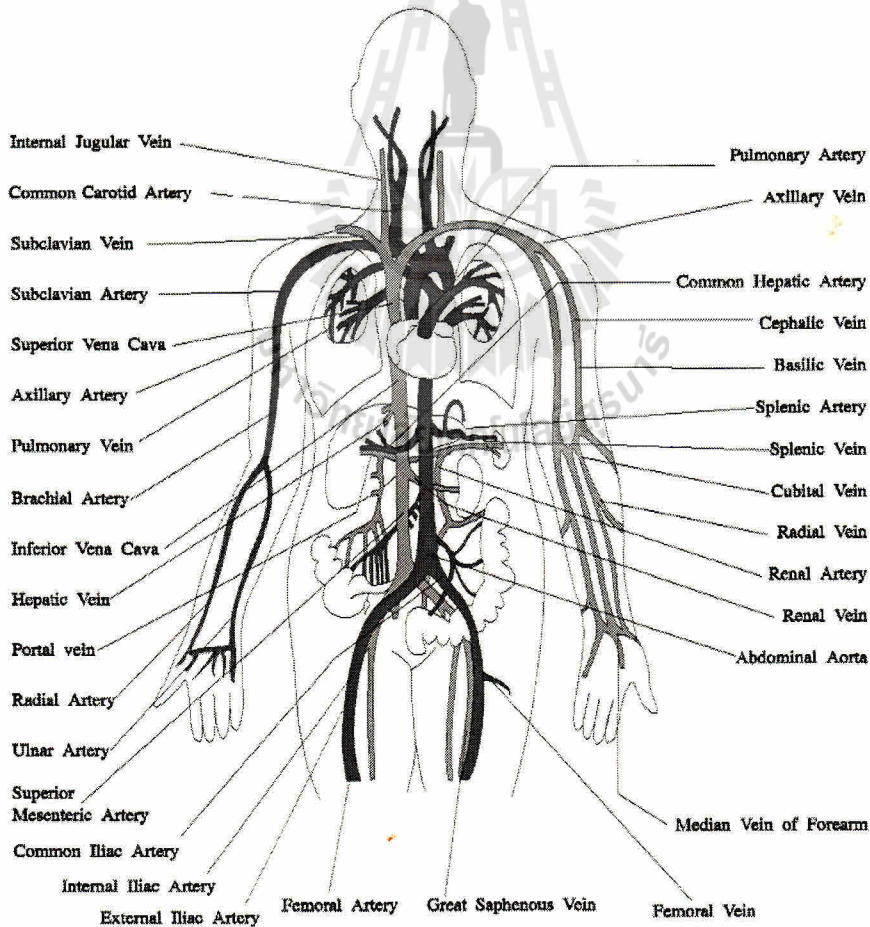
หลังจากผ่าน hepatic sinusoids ของตับแล้ว เลือดใน portal system จะไหลเข้า hepatic veins ซึ่งจะส่งเลือดทั้งหมดเข้า inferior vena cava และกลับคืนการไหลเวียนของเลือดตามปกติ

Hepatic portal vein เป็นหลอดเลือดเดียวที่รับเลือดจากทางเดินอาหารแล้วนำเลือดผ่านตับก่อนที่จะเข้าสู่ systemic circulation ตับรับ oxygenated blood จาก hepatic artery



รูปที่ 2.27 Hepatic portal circulation (Marieb และ Hoehn, 2008)

Blood Circulation Principal Veins and Arteries



รูปที่ 2.28 หลอดเลือดหลักใน Systemic circulation (<http://www.tvdsb.on.ca/saunders/courses/online>)

บทที่ 3

The Cardiovascular system: Blood (เลือด)

เลือดเป็นเนื้อเยื่อเกี่ยวพันที่เป็นของเหลว คิดเป็น 7-8% ของน้ำหนักร่างกาย (ประมาณ 5.6 ลิตรในผู้ชายหนัก 70 กิโลกรัม) เป็นของเหลวข้นเหนียว มีอุณหภูมิ~38°C (100.4°F) มี pH~7.35-7.45 มีความเข้มข้นของ NaCl~0.9% การศึกษาเกี่ยวกับเซลล์เม็ดเลือดซึ่งเป็นเซลล์ที่สำคัญในการดำรงชีวิตของมนุษย์ คือวิชาโลหิตวิทยา (Hematology)

หน้าที่ของเลือด

1. ขนส่งแก๊ส สารอาหาร ภูมิต้านทาน โปรตีน และสารอื่นๆ
2. ป้องกันร่างกายด้วยระบบภูมิคุ้มกัน
3. ควบคุมความสมดุลของร่างกายและอุณหภูมิของร่างกาย

ส่วนประกอบของเลือด

เลือดประกอบด้วย 2 ส่วน คือ

- (1) ส่วนที่เป็นของเหลวใสเรียกว่า **plasma** (พลาสมา) = 55% ของปริมาตรเลือด
- (2) ส่วนที่เป็นเซลล์และชิ้นส่วนของเซลล์ที่แขวนลอยอยู่ใน plasma เรียกว่า **formed elements (cellular elements)** = 45% ของปริมาตรเลือด (รูปที่ 3.1)

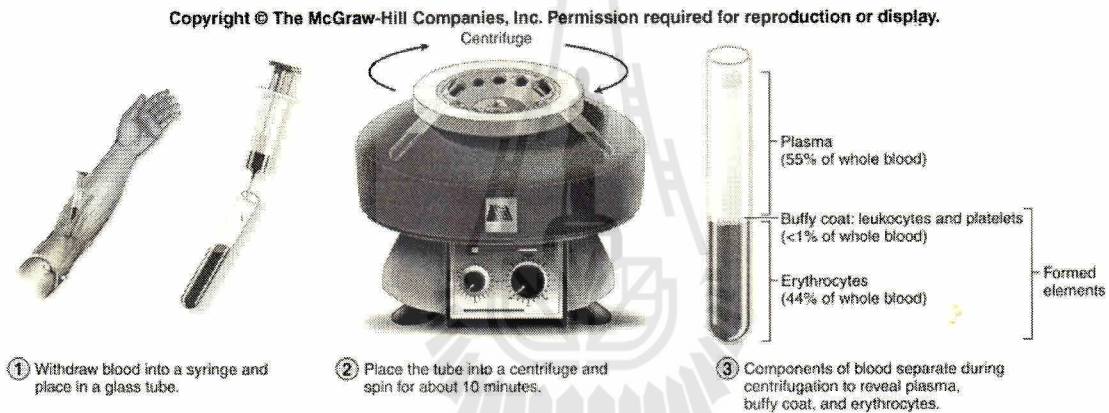
ถ้านำเลือดไปปั่นด้วยเครื่อง centrifuge (รูปที่ 3.1) ส่วนของ formed elements จะตกตะกอนอยู่ด้านล่างและ plasma จะลอยอยู่ด้านบน ตะกอนสีแดงชั้นล่างสุดคือ erythrocytes (เม็ดเลือดแดง) ชั้นสีขาวที่อยู่ระหว่าง erythrocytes และ plasma เรียกว่า **buffy coat** คือส่วนของ leukocytes (เม็ดเลือดขาว) และ platelets โดยปกติจะมี erythrocytes 44% ของปริมาตรทั้งหมดของตัวอย่างเลือด เปอร์เซ็นต์ของเม็ดเลือดแดงในเลือดดังกล่าวนี้เรียกว่า **hematocrit** (ฮีมาโทคริต; Hct) (ผู้หญิงมี~38-46% เฉลี่ย=42% ส่วนผู้ชายมี~40-54 % เฉลี่ย=47%) ส่วน leukocytes และ platelets รวมกันมี~1% ที่เหลือ 55% เป็น plasma

Plasma ประกอบด้วยน้ำ 92% และสารที่ถูกละลายได้แก่ plasma proteins (albumin, globulin, fibrinogen, clotting factors), เกลือแร่ต่างๆ, สารอาหาร, ของเสียต่างๆ (urea, uric acid, creatinine), ฮอร์โมน, เอนไซม์, ภูมิคุ้มกัน (immunoglobulins) และแก๊ส (O₂, N₂, CO₂) (รูปที่ 3.1) plasma ที่ถูกแยกเอา fibrinogen ออกไปแล้วเรียกว่า **serum** (เซรัม, ซีรัม)

Formed elements แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่ (รูปที่ 3.1)

1. Erythrocytes หรือเซลล์เม็ดเลือดแดง (red blood cells)
2. Leukocytes หรือเซลล์เม็ดเลือดขาว (white blood cells)
3. Platelets (เกล็ดเลือด) หรือ Thrombocytes

กระบวนการสร้างเซลล์เม็ดเลือดเรียกว่า **hematopoiesis** หรือ **hemopoiesis** ในเอ็มบริโอและใน fetus ที่อยู่ในครรภ์มารดาเกิดในเนื้อเยื่อหลายแหล่งได้แก่ yolk sac, thymus, lymph nodes ตับ ม้าม และไขกระดูกแดง (red bone marrow) หลังจากคลอดแล้ว hematopoiesis เกิดในไขกระดูกแดงเป็นหลักและมี lymphoid tissues บางส่วนช่วยสร้าง lymphocytes ในเด็กไขกระดูกทั้งหมดเป็นไขกระดูกแดง แต่เมื่อเป็นผู้ใหญ่จะพบไขกระดูกแดงเฉพาะในกะโหลกศีรษะ กระดูกซี่โครง กระดูกอก กระดูกสันหลัง กระดูกเชิงกราน (pelvis) กระดูกต้นแขนและต้นขา ส่วนในบริเวณอื่นๆ ไขกระดูกแดงจะถูกแทนที่ด้วยไขกระดูกเหลือง (yellow marrow) ซึ่งไม่ได้ทำหน้าที่สร้างเซลล์เม็ดเลือดแดงอีกต่อไป



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

Plasma		
Water 92% by weight	Proteins 7% by weight	Other solutes 1% by weight
	Albumins 58%	Electrolytes
	Globulins 37%	Nutrients
	Fibrinogen 4%	Respiratory gases
	Regulatory proteins 1%	Waste products

Erythrocytes
Erythrocytes 4.2–6.2 million per cubic mm

Buffy Coat	
Platelets 12–300 thousand per cubic mm	Leukocytes 5–10 thousand per cubic mm
	Lymphocytes 20–25%
	Neutrophils 60–70%
	Monocytes 3–8%
	Eosinophils 2–4%
	Basophils 0.5–1%

รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบของเลือดสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนม (McKinley และ O'Loughlin, 2006)

Erythrocytes (Red Blood Cells, RBC)

เป็นเซลล์ไม่มีนิวเคลียสและออร์แกเนลล์อื่นๆ รูปร่างกลม ด้านข้างบุ๋มตรงกลางทั้งสองข้าง (biconcave disc) เส้นผ่าศูนย์กลาง~7.5 μm ส่วนประกอบหลักคือโปรตีน **hemoglobin** ที่มีเหล็ก (heme) เป็นส่วนประกอบ ซึ่งทำให้ RBC มีสีแดง ส่วนประกอบอื่นๆ ได้แก่ ลิพิด ATP และเอนไซม์ carbonic anhydrase. RBC มีหน้าที่สำคัญคือ ขนส่ง O_2 ไปยังเนื้อเยื่อต่างๆและขนส่ง CO_2 ไปยังปอด โดยมี **hemoglobin** เป็นผู้ลำเลียงแก๊สเหล่านี้ (รูปที่ 3.2a, b)

การเจริญและอายุขัยของ Erythrocytes

Erythrocytes ถูกสร้างในไขกระดูกแดงและผ่านขั้นตอนการเจริญอีกหลายระยะก่อนจะเข้าสู่กระแสเลือด อายุขัยในกระแสเลือดนานประมาณ 120 วัน

กระบวนการเจริญของเซลล์เม็ดเลือดแดงจาก hemocytoblast ใช้เวลาประมาณ 7 วัน เรียกกระบวนการเจริญนี้ว่า **erythropoiesis** (รูปที่ 3.2c) แบ่งเป็น 2 กระบวนการ คือ

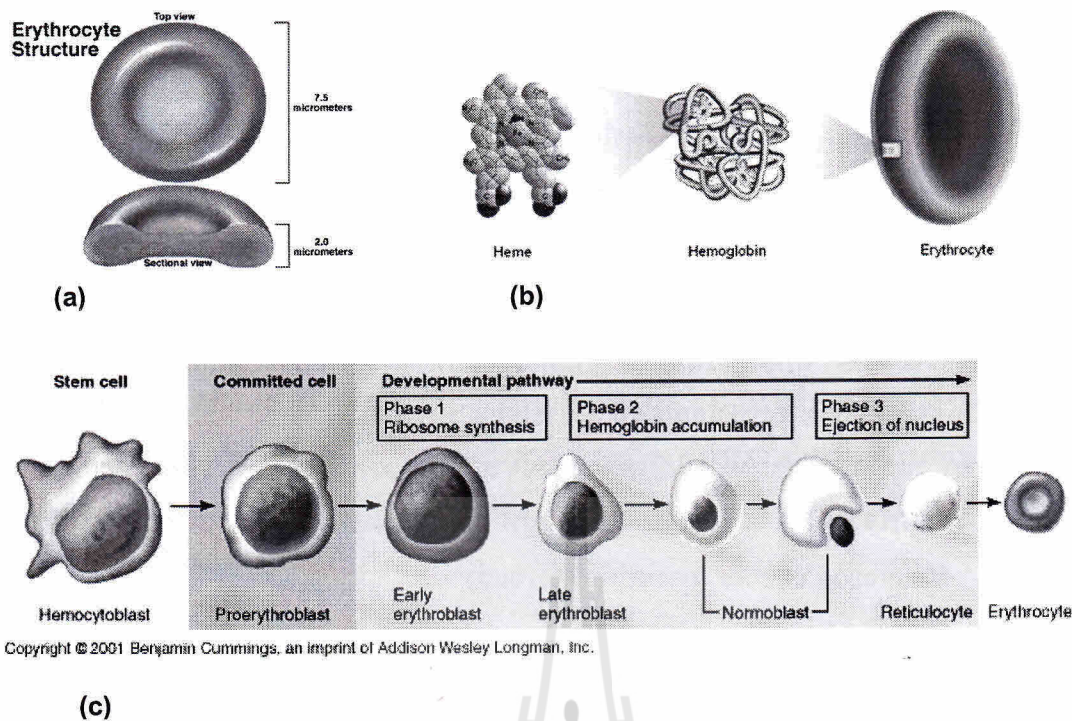
1. Maturation of cells (การแก่ตัวของเซลล์)
2. การสร้าง hemoglobin ภายในเซลล์

1. Maturation of cells (รูปที่ 3.2c) ในระหว่างกระบวนการนี้เซลล์มีขนาดลดลง และเสียนิวเคลียสไป การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง โดยเฉพาะการมี vitamin B₁₂ และ folic acid ที่จำเป็นต่อการสังเคราะห์ DNA ซึ่งจะมีเพียงพอในอาหารประเภทนม เนื้อ และผักใบเขียว ถ้าหากได้รับมากเกินไปจะถูกเก็บไว้ในตับ

อวัยวะที่ทำหน้าที่สร้างเซลล์เม็ดเลือดแดงในระยะเอ็มบริโอได้แก่ตับ ม้าม ไขกระดูกแดง เมื่อคลอดแล้วอวัยวะที่ทำหน้าที่หลักคือไขกระดูก hemocytoblast จะเจริญไปเป็น proerythroblast, erythroblast และ normoblast ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีนิวเคลียสสามารถสังเคราะห์ฮีโมโกลบินได้ เมื่อ normoblast มีฮีโมโกลบินเต็มที่นิวเคลียสจะสลายตัวและถูกขับออกจากเซลล์ normoblast กลายเป็น reticulocyte ซึ่งเป็น immature erythrocytes ที่มีร่างแหของ endoplasmic reticulum อยู่เต็มเซลล์ เมื่อ reticulocyte ออกจากไขกระดูกเข้ามายังกระแสเลือด endoplasmic reticulum จะสลายไปภายใน 1-2 วัน และ reticulocytes กลายเป็น erythrocytes ที่โตเต็มที่ ในกระแสเลือดมี reticulocytes ปะปนอยู่ 1-3% (รูปที่ 3.2c)

2. การสร้าง hemoglobin ในเซลล์ Hemoglobin เป็นโปรตีนเชิงซ้อน ประกอบด้วย 4 protein chains แต่ละ protein เรียกว่า **globin** ซึ่งจับกับ 1 heme (ฮีม) แต่ละ heme เป็นโมเลกุลสารสีสีแดงที่มีอะตอมเหล็กหนึ่งอะตอม ถูกสังเคราะห์ภายใน erythrocytes ที่กำลังเจริญอยู่ในไขกระดูกแดง อาหารประเภทเนื้อ ไข่ และผักใบเขียว มีเหล็กมากกว่าที่ร่างกายต้องการต่อวัน

Hemoglobin ใน erythrocytes จับกับออกซิเจนเกิดเป็น **oxyhemoglobin** ทำให้เลือดมีสีแดง วิธีนี้ทำให้สามารถดูดซึมออกซิเจนจากปอดและส่งไปทั่วร่างกายได้ นอกจากนั้นยังช่วยขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์จากเซลล์ทั่วร่างกายไปยังปอดเพื่อขับออกจากร่างกายด้วย



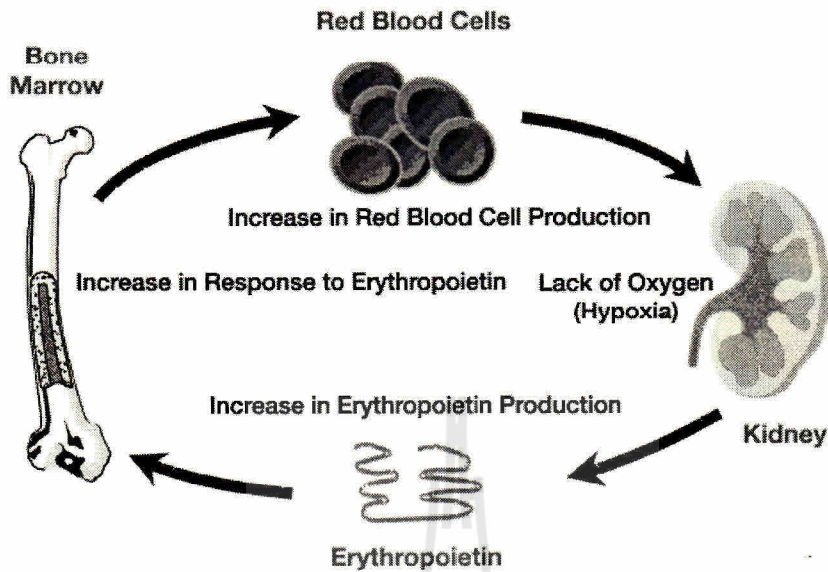
รูปที่ 3.2 Erythrocyte (a) โครงสร้างภายนอก (b) hemoglobin และ (c) erythropoiesis
(http://www.sigmaaldrich.com/img/assets/12680/Hemo_Banner.jpg, Marieb และ Hoehn, 2008,)

การควบคุมการสร้างเม็ดเลือดแดง จำนวนของเม็ดเลือดแดงจะค่อนข้างคงที่ ซึ่งหมายความว่าไขกระดูกสร้างเม็ดเลือดแดงในอัตราเร็วเท่ากับที่ถูกทำลาย ทั้งนี้เกิดจากกลไกการควบคุมแบบ negative feedback

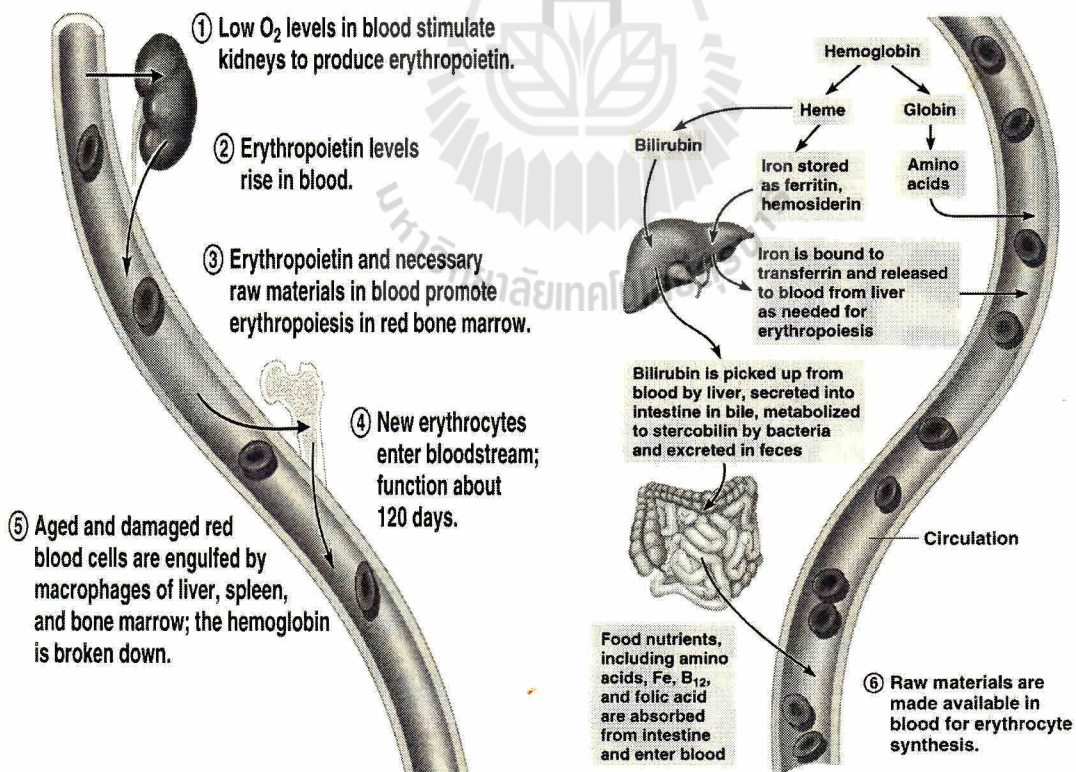
การสร้างเม็ดเลือดแดงจะเพิ่มขึ้นเมื่อเซลล์ร่างกายขาดออกซิเจน (hypoxia) ซึ่งไปกระตุ้นให้ไตสร้าง erythropoietin (EPO) ซึ่งเป็นฮอร์โมนที่ไปกระตุ้นให้มีการสร้างเซลล์ proerythroblast เพิ่มขึ้นและมีการปล่อย reticulocytes เข้าสู่กระแสเลือดเพิ่มมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้จะไปเพิ่มความสามารถในการนำออกซิเจนของเลือด ทำให้เซลล์และเนื้อเยื่อได้รับออกซิเจนพอเพียง อาการ hypoxia จะหายไปซึ่งมีผลให้การสร้างเม็ดเลือดแดงกลับคืนสู่สภาพปกติ (รูปที่ 3.3)

การทำลายเม็ดเลือดแดง (รูปที่ 3.4) เม็ดเลือดแดงมีอายุ~120 วัน และจะแตกสลาย (hemolysis) แล้วถูกกำจัดโดย macrophages ในม้าม ไขกระดูกแดง และตับ hemoglobin ของเม็ดเลือดแดงถูกนำกลับมาใช้ โดยที่ globin สลายเป็น amino acids ซึ่งถูกเซลล์อื่นนำไปใช้สังเคราะห์โปรตีน ส่วน heme แยกตัวเป็น iron (เหล็ก) และ bilirubin. Iron ถูกเก็บไว้ในตับในรูปของ ferritin และ hemosiderin ซึ่งจะถูกละลายออกและส่งไปยังไขกระดูกแดง เพื่อใช้สร้าง hemoglobin อีกครั้ง ส่วน bilirubin ถูกดึงออกจากเลือดโดยตับและเข้าสู่ลำไส้เล็กในลักษณะ

ของน้ำดี (bile) bilirubin ถูกแบคทีเรียเปลี่ยนเป็น **urobilinogen** ซึ่งจะถูกละลายเป็นสารสีสีน้ำตาล (stercobilin) ที่ทำให้อูจจาระเป็นสีน้ำตาล bilirubin บางส่วนถูกขับออกทางปัสสาวะ



รูปที่ 3.3 การควบคุมการสร้างเม็ดเลือดแดง (McKinley และ O'Loughlin, 2006)



Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings

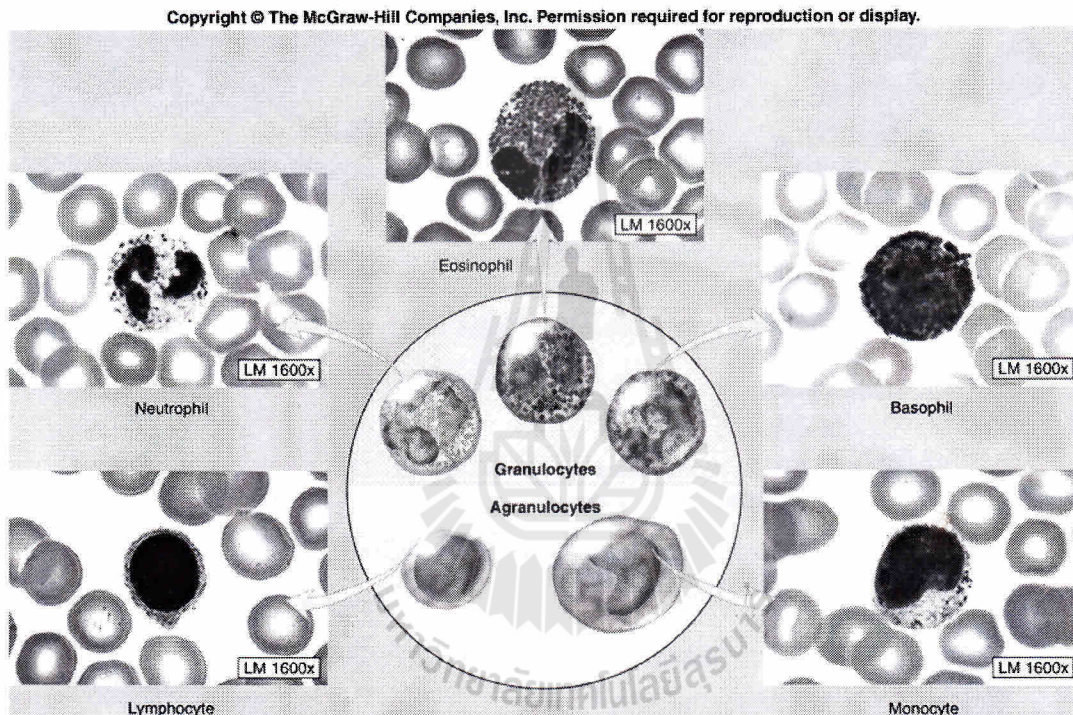
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

รูปที่ 3.4 วัฏจักรของเซลล์เม็ดเลือดแดง (Marieb และ Hoehn, 2008)

Leukocytes (White Blood Cells, WBCs)

เป็นเซลล์ที่มีหน้าที่สำคัญในการต่อสู้กับสิ่งแปลกปลอมและเชื้อโรคที่เข้ามาในร่างกาย เป็นเซลล์เม็ดเลือดที่มีขนาดใหญ่ที่สุด มีนิวเคลียสและมี granules อยู่ภายในไซโทพลาซึม (รูปที่ 3.5) มีประมาณ 1% ของปริมาตรเลือด แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ

1. **Granulocytes (Polymorphonuclear leukocytes)** ได้แก่ neutrophils, eosinophils และ basophils (รูปที่ 3.5)
2. **Agranulocytes (Mononuclear leukocytes)** ได้แก่ monocytes และ lymphocytes (รูปที่ 3.5)



รูปที่ 3.5 ชนิดของเซลล์เม็ดเลือดขาว (Marieb และ Hoehn, 2008)

1. Granulocytes

การสร้าง granulocytes เกิดในไขกระดูกเรียกว่า **granulopoiesis** Granulocytes ทั้งหมดมีนิวเคลียสที่แยกเป็นพู (multilobed nuclei) ชื่อของ granulocytes แต่ละชนิดมาจากสีย้อมที่ติด granules ภายในเซลล์ (รูปที่ 3.5 และ 3.6)

1.1 Neutrophils มี~60-70% ของ leukocytes ทั้งหมด มีเส้นผ่าศูนย์กลาง~10-12 ไมโครเมตร นิวเคลียสมักแบ่งเป็น 2-3 พู มี granules ติดสีม่วง ทำหน้าที่ป้องกันสิ่งแปลกปลอมที่เข้ามาในร่างกายและกำจัดของเสีย เช่น phagocytosis เศษเซลล์

1.2 Eosinophils มี~1-4% ของ leukocytes ทั้งหมด มีเส้นผ่าศูนย์กลาง~10-14 ไมโครเมตร นิวเคลียสมักแบ่งเป็น 2 พู granules ขนาดใหญ่ติดสีส้มหรือแดง ช่วย

ป้องกันสิ่งแปลกปลอมโดยเฉพาะปรสิตที่เข้าร่างกาย จำนวน eosinophils เพิ่มขึ้นเมื่อเกิดอาการแพ้ (allergy) เช่น แพ้อาหาร แพ้ยา ฯลฯ

1.3 Basophils มี~0.5-1% ของ leukocytes ทั้งหมด มีเส้นผ่าศูนย์กลาง~10-12 ไมโครเมตร นิวเคลียสรูปตัวเอส (S), granules ติดสีน้ำเงิน ภายใน granules มีสาร **heparin** และ **histamine** ซึ่งทำให้หลอดเลือดขยายตัวและเพิ่ม permeability ของหลอดเลือดขนาดเล็ก มีส่วนร่วมในกระบวนการอักเสบ (inflammatory) และการแพ้ (allergy)

2. Agranulocytes

เป็น leukocytes ที่มีนิวเคลียสใหญ่ ภายในไซโทพลาซึมมี granules ขนาดเล็กมากไม่ติดสีย้อม ทำให้ไม่สามารถเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง แบ่งเป็น 2 ชนิด (รูปที่ 3.5) คือ

2.1 Lymphocytes มี~20-25% ของ leukocytes ทั้งหมด มี 2 ขนาดคือ ขนาดเล็กและขนาดใหญ่ ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 5-8 และ 10-17 ไมโครเมตรตามลำดับ lymphocytes มีนิวเคลียสกลมใหญ่อยู่กลางเซลล์ไม่แบ่งเป็นพู เป็นแกนหลักของระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ส่วนมากจะอยู่ใน lymphoid tissue (lymph nodes, thymus, tonsils, ม้าม ฯลฯ) ทำหน้าที่สร้างภูมิคุ้มกันให้กับร่างกาย แบ่งเป็น 2 ชนิดคือ **T cells** (T lymphocytes) และ **B cells** (B lymphocytes)

2.2 Monocytes มี~3-8% ของ leukocytes ทั้งหมด มีเส้นผ่าศูนย์กลาง~14-24 ไมโครเมตร นิวเคลียสมักเป็นรูปเกือบวงหรือรูปเมล็ดถั่ว จะอยู่ในกระแสเลือดประมาณ 30-40 ชั่วโมงแล้วเข้าไปอยู่ในเนื้อเยื่อกลายเป็น **macrophage** ซึ่งทำหน้าที่ phagocytosis สิ่งแปลกปลอมและเศษเซลล์ และยังมีหน้าที่สำคัญในการกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายด้วย

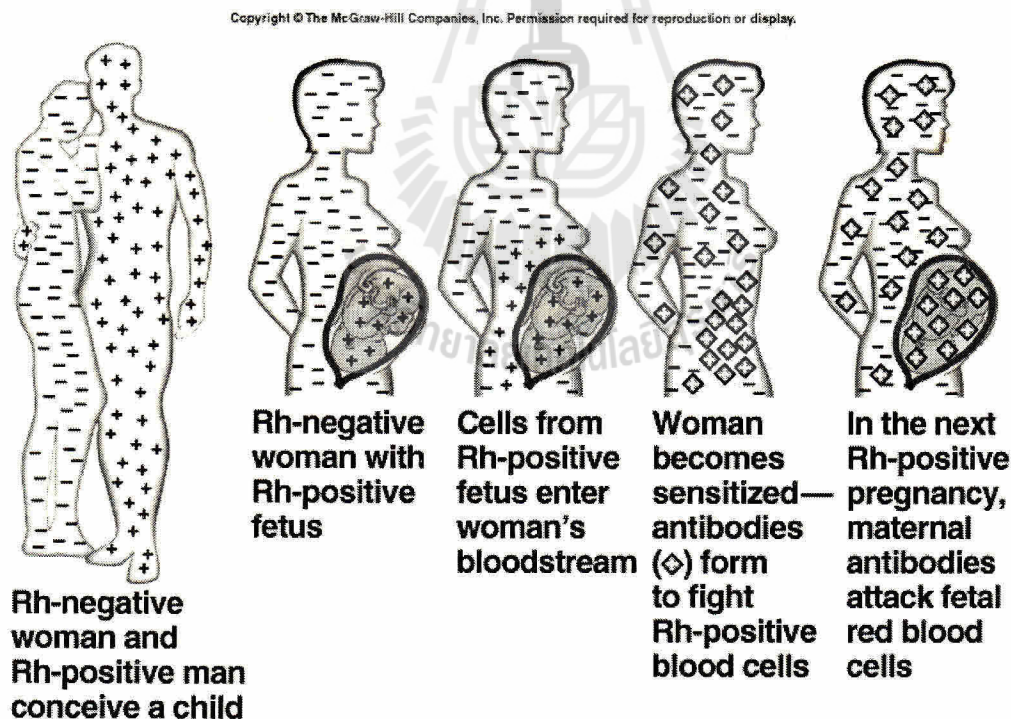
การเกิดและการเจริญของเซลล์เม็ดเลือดขาว

กระบวนการเจริญของเซลล์เม็ดเลือดขาวในไขกระดูกแดง เริ่มจากเซลล์ **hemocytoblast** (pluripotent stem cells) (รูปที่ 3.6) ซึ่งจะแยกเป็น 2 กลุ่มคือ **myeloid stem cell** และ **lymphoid stem cell** ซึ่งจะมีการเจริญต่อไปเป็นรุ่นๆ แต่ละรุ่นมีชื่อเซลล์ต่างกันออกไป สำหรับ **myeloid stem cell** จะแบ่งการเจริญเป็นเซลล์เม็ดเลือดขาว 2 กลุ่มคือ **granulocytes** และ **agranulocytes** ในกลุ่ม **granulocytes** มีเซลล์อ่อนที่สุดคือ **myeloblast** ถัดไปคือ **promyelocyte** ซึ่งจะเจริญต่อไปเป็นเซลล์ **myelocytes** และ **band cells** 3 ชนิดคือ **eosinophils, neutrophils** และ **basophils** ตามลำดับ ส่วนกลุ่ม **agranulocytes** มีเซลล์อ่อนที่สุดคือ **monoblast** ถัดไปคือ **promonocyte** ซึ่งจะเจริญเป็นเซลล์สุดท้ายคือ **monocytes** สำหรับ **lymphoid stem cell** จะเจริญเป็นเซลล์เม็ดเลือดขาวกลุ่ม **agranulocytes** โดยเซลล์อ่อนที่สุดคือ **lymphoblast** ซึ่งจะเจริญไปเป็น **prolymphocyte** และ **lymphocytes** ตามลำดับ

2. ระบบ Rh เป็นระบบกลุ่มเลือดที่ได้ชื่อมาจากการทำงานกับเลือดของลิง (Rhesus monkey) ระบบ Rh ใช้ antigen บนเยื่อหุ้มเซลล์เม็ดเลือดแดงเป็นพื้นฐานเช่นเดียวกับระบบ ABO คนที่เซลล์เม็ดเลือดแดงมี Rh antigen เรียกว่ามี **Rh positive (Rh⁺)** ส่วนคนที่ไม่ได้มี Rh antigen เรียกว่า **Rh negative (Rh⁻)**

ในสภาวะปกติ plasma ของคนจะไม่มี **anti-R antibody** ในระบบ Rh antibody จะเกิดขึ้นเมื่อมี Rh antigen เช่น ถ้าคนที่มี Rh⁻ ได้รับเลือด Rh⁺ ร่างกายจะเริ่มสร้าง anti-Rh antibody ขึ้นในเลือด ถ้ามีการได้รับเลือด Rh⁺ อีกเป็นครั้งที่สอง anti-Rh antibody ที่เกิดขึ้นในครั้งแรกจะเข้าทำปฏิกิริยากับเลือดของผู้ให้และเกิดอันตรายได้

ปัญหาที่พบบ่อยเกี่ยวกับเลือดหมู่ Rh อาจเกิดขึ้นระหว่างการตั้งครรภ์ เมื่อเลือดของทารกรั่วจากรกเข้าสู่กระแสเลือดของแม่ ถ้าทารกมีเลือด Rh⁺ และแม่มี Rh⁻ จะมีการสร้าง anti-Rh antibody ขึ้นในเลือดของแม่ ถ้าแม่มีการตั้งครรภ์อีกครั้ง anti-Rh antibody ของแม่จะผ่านรกเข้าสู่กระแสเลือดของลูก หากทารกมีเลือด Rh⁺ จะไม่เกิดปัญหาขึ้น เพราะ Rh⁻ ไม่มี Rh antigen แต่ถ้าทารกมีเลือด Rh⁺ อาจเกิดการแตกของเม็ดเลือดขึ้นในเลือดทารก (รูปที่ 3.12) นำไปสู่โรคที่เรียกว่า **Hemolytic disease of the newborn (HDN)** หรือ **Erythroblastosis fetalis**



รูปที่ 3.12 ถ้าผู้ชายมีเลือด Rh⁺ และผู้หญิงมีเลือด Rh⁻ ตั้งครรภ์เด็กทารกที่มีเลือด Rh⁺ ร่างกายของมารดาจะสร้าง anti-Rh antibody ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อลูกคนต่อไป (Shier และคณะ, 2008)

บทที่ 4

The Lymphatic System (ระบบน้ำเหลือง)

Lymphatic system ทำงานใกล้ชิดกับ cardiovascular system ช่วยป้องกันร่างกายจากการติดเชื้อและโรคร้ายต่างๆ โดยการสร้างภูมิคุ้มกัน (immunity) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน

หน้าที่หลักของ Lymphatic system

1. นำของเหลวจากเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกายคืนกลับสู่เลือด ทำให้ปริมาณเลือดอยู่ในระดับปกติและป้องกันการบวมของเนื้อเยื่อ
2. นำฮอร์โมน สารอาหาร และของเสียจากแหล่งกำเนิดไปสู่การไหลเวียนตามปกติ โดยผ่านทาง lymphatic vessels
3. ป้องกันร่างกายจากการติดเชื้อและโรคต่างๆ โดยอาศัยเม็ดเลือดขาว (lymphocytes, white blood cells) lymphocytes มีปฏิกิริยาตอบสนองต่อ (1) เชื้อโรค (pathogen) เช่น แบคทีเรียหรือไวรัส (2) เซลล์ร่างกายที่ผิดปกติ เช่น เซลล์ที่ติดเชื้อไวรัสหรือเซลล์มะเร็ง (3) โปรตีนแปลกปลอม เช่น สารพิษ (toxin) ที่แบคทีเรียบางชนิดปล่อยออกมา lymphocytes จะทำหน้าที่กำจัดสิ่งเหล่านี้ การต้านทานต่อบาดแผลและโรคที่เกิดจากสารประกอบแปลกปลอมและเชื้อโรคเหล่านี้ เรียกว่า ภูมิคุ้มกัน

โครงสร้างของ Lymphatic System

Lymphatic system ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ (1) ร่างแหของ **lymphatic vessels** ที่จะนำของเหลวและโปรตีนใน plasma ที่หลุดลอดออกจากระบบไหลเวียนเลือดส่งกลับคืนสู่เลือดของเหลวและโปรตีนนี้เมื่อผ่านเข้าไปใน lymphatic vessels จะถูกเรียกว่า **lymph** (= น้ำใส) หรือน้ำเหลืองและ (2) **lymphoid tissues และ organs** ที่กระจายอยู่ทั่วร่างกาย ประกอบด้วย phagocytic cells หรือ phagocytes (เซลล์กิน) และ lymphocytes และเนื้อเยื่ออื่นๆ (รูปที่ 4.1)

Lymph และ Lymphatic Vessels

โดยพื้นฐาน lymph และ interstitial fluid คือของเหลวชนิดเดียวกัน ต่างกันที่ตำแหน่งที่อยู่ ถ้าเป็นของเหลวที่ล้อมรอบเซลล์เรียกว่า interstitial fluid (หรือ intercellular fluid) แต่เมื่อของเหลวนี้ไหลผ่าน lymphatic vessels จะถูกเรียกว่า lymph. Lymph มีส่วนประกอบคล้ายกับ blood plasma แต่จะมีความเข้มข้นของโปรตีนน้อยกว่า เพราะว่าโปรตีนใน plasma ไม่สามารถผ่านผนังของ capillary ได้ การเคลื่อนที่ของ lymph ใน lymphatic vessels จะไหลไปในทิศทางเดียวและไปสิ้นสุดเมื่อ lymph ไหลเข้าสู่ venous system (รูปที่ 4.1)

การกระจายและโครงสร้างของ lymphatic vessels

Lymphatic vessels มีจุดเริ่มต้นเป็นถุงตันขนาดเล็กเรียกว่า **lymphatic capillaries** (รูปที่ 4.1) แทรกตัวอยู่ระหว่างเซลล์ของเนื้อเยื่อและ blood capillaries ใน loose connective tissues ของร่างกาย lymphatic capillaries กระจายอยู่ทั่วร่างกาย ยกเว้นในกระดูก ฟัน ไขกระดูก และระบบประสาทส่วนกลางทั้งหมด

Lymphatic capillaries มีโครงสร้างเฉพาะตัว 2 อย่างที่ทำให้การยอมให้ของเหลวผ่านได้ (permeability) ต่างไปจาก blood capillaries คือ

(1) **Endothelial cells** ที่ประกอบเป็นผนังของ lymphatic capillaries **ไม่เชื่อมติดกันสนิท** จะมีการหลวมกันของขอบเซลล์ที่อยู่ติดกันอย่างหลวมๆ เกิดเป็นบานพับเล็กๆ ुकคล้ายกับลิ้นขนาดเล็ก (minivalves) ที่เปิดได้ง่าย (รูปที่ 4.2b)

(2) มี **collagen filaments** ยึด endothelial cells กับโครงสร้างที่อยู่ล้อมรอบ ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของปริมาตรของ interstitial fluid จะเป็นผลให้ minivalves เปิดออก (รูปที่ 4.2b)

เมื่อความดันของของเหลวใน interstitial space สูงกว่าความดันใน lymphatic capillary จะดันให้ minivalves เปิดออกและของเหลวไหลเข้าสู่ lymphatic capillary แต่เมื่อความดันใน lymphatic capillary สูงกว่าใน interstitial space, minivalves จะถูกปิดเพื่อป้องกันการรั่วของ lymph กลับคืนสู่ภายนอก

Lymphatic capillaries พิเศษที่พบใน villi ของผนังลำไส้เล็กเรียกว่า **lacteal** มีหน้าที่หลักในการดูดซึมไขมันจากลำไส้เล็ก Lymph ที่เต็มไปด้วยไขมันนี้เรียกว่า **chyle** มีสีขาวคล้ายน้ำมัน จะถูกนำส่งเข้ากระแสเลือดผ่านทางกระแสโลหิต

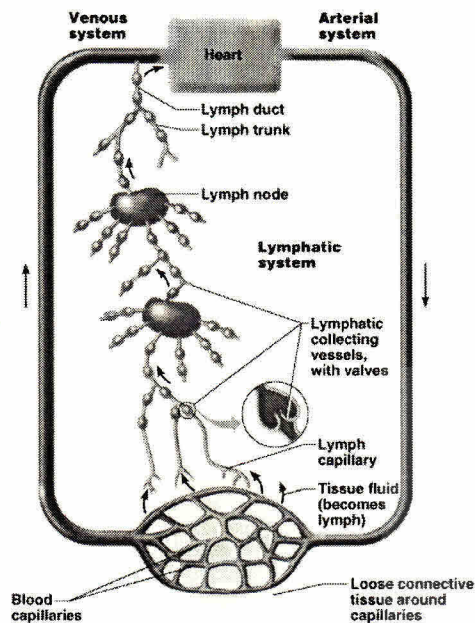
จาก lymphatic capillaries, lymph จะไหลเข้าสู่หลอดที่มีผนังหนาและขนาดใหญ่ขึ้น เริ่มจาก lymphatic collecting vessels, lymphatic trunks และ lymphatic ducts (ใหญ่ที่สุด) (รูปที่ 4.1)

(1) **Lymphatic collecting vessels** มีผนัง 3 ชั้นคล้ายกับ veins แต่ผนังบางกว่า ภายในมี valves มากกว่าและแตกแขนงเป็นร่างแหมากกว่า โดยทั่วไป lymphatic vessels ในผิวหนังจะวางคู่ไปกับ veins แต่ในส่วนลำตัวและอวัยวะทางเดินอาหาร lymphatic vessels วางคู่ไปกับ arteries

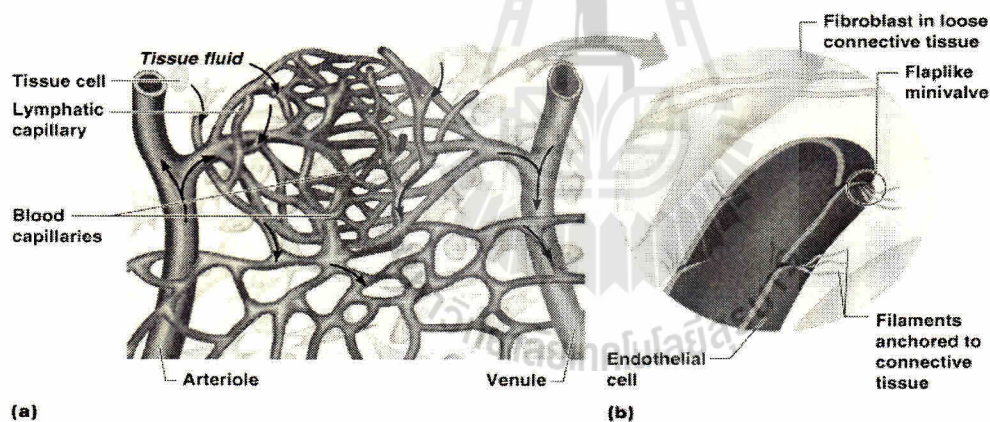
(2) **Lymphatic trunks** เกิดจากการรวมกันของ lymphatic collecting vessels ขนาดใหญ่ ชื่อของ trunks ตั้งตามบริเวณที่รับ lymph มาได้แก่ lumbar, bronchomediastinal, subclavian, และ jugular trunks ซึ่งเป็นเส้นคู่ ส่วน intestinal trunk เป็นเส้นเดี่ยว

(3) **Lymphatic ducts** มี 2 ducts ในบริเวณทรวงอกได้แก่ (a) **Right lymphatic duct** จะรวบรวม lymph จากต้นแขนขวาและซีกขวาของหัวและอก แล้วส่งเข้าสู่บริเวณรอยต่อของ right internal jugular vein และ right subclavian vein (รูปที่ 4.3) (b) **Thoracic duct** มีขนาดใหญ่กว่า รวบรวม lymph จากส่วนที่เหลือของร่างกาย thoracic duct เริ่มต้นจาก **cisterna chyli** ซึ่งเป็นถุงขนาดใหญ่ที่รวบรวม lymph จาก lumbar trunk ที่รับมาจากขาและ intestinal

trunk ที่รับมาจากอวัยวะทางเดินอาหาร ในขณะที่ผ่านขึ้นสู่ด้านหัว thoracic duct จะรับ lymph จากซีกซ้ายของอก ต้นแขนซ้ายและหัว จากนั้นจะส่ง lymph เข้าสู่ venous system ที่อยู่ใกล้กับรอยต่อระหว่าง left internal jugular vein และ left subclavian vein (รูปที่ 4.3)



รูปที่ 4.1 Lymphatic system ประกอบด้วย lymphatic capillaries, lymphatic collecting vessels, lymphatic nodes, lymphatic trunk และ lymphatic duct ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของของเหลว (Marieb และ Hoehn, 2008)

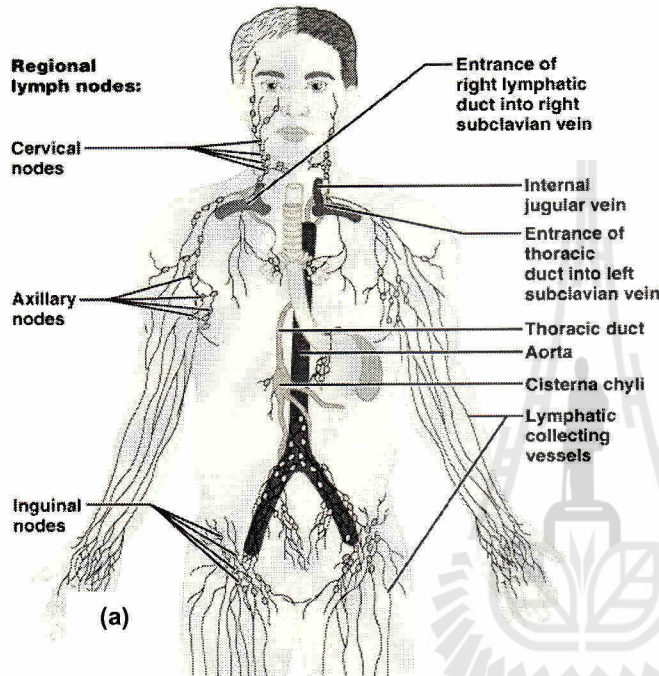


รูปที่ 4.2 (a) โครงสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง capillary bed ของ blood vascular system และ lymphatic capillaries ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของของเหลว (b) lymphatic capillary เป็นหลอดปลายตัน ผนังมี endothelial cells วางเหลื่อมกันเกิดเป็น minivalves คล้ายประตูบานพับ (Marieb และ Hoehn, 2008)

การลำเลียง lymph

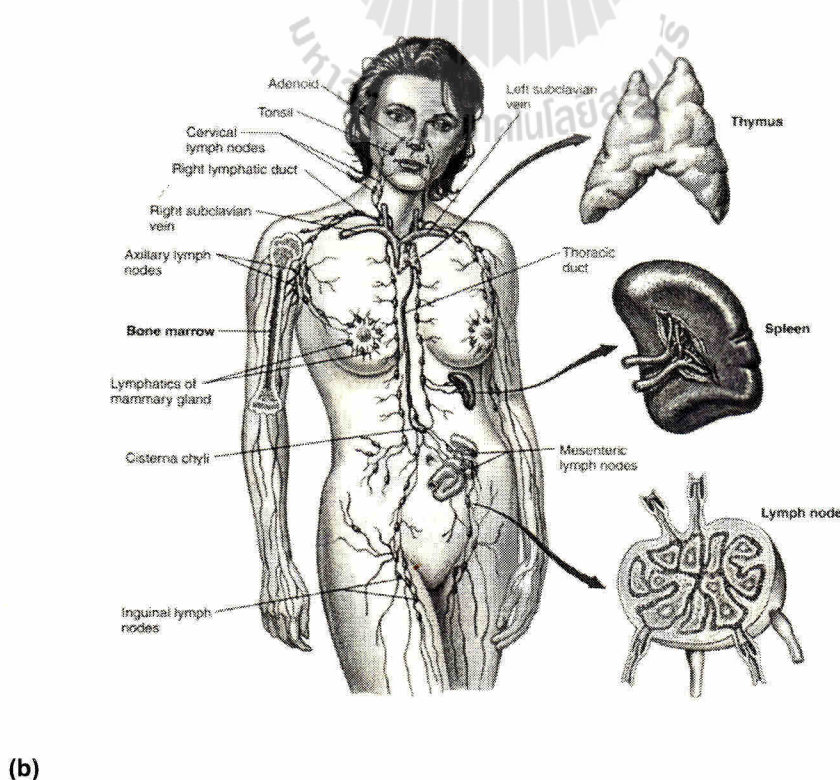
Lymphatic system ไม่มีอวัยวะที่เป็นตัวบีบ ในสภาวะปกติ lymphatic vessels มีความดันต่ำ กลไกการไหลของ lymph จึงคล้ายกับการไหลของเลือดใน veins คือ กล้ามเนื้อโครงร่างหดตัว ความดันในทรวงอกเปลี่ยนแปลงระหว่างการหายใจและเส้นช่วยป้องกันการไหลย้อนกลับปกติ lymphatic vessels จะอยู่ร่วมกับแผ่น connective tissue ของหลอดเลือด การเดินเป็น

จังหวะของ arteries จึงช่วยส่งเสริมการไหลของ lymph ด้วย นอกจากกลไกเหล่านี้แล้ว การหดตัวเป็นจังหวะของกล้ามเนื้อเรียบในผนังของ lymphatic trunk และ thoracic duct ยังช่วยดันให้ lymph ไหลไปได้ตลอดเส้นทาง แต่อย่างไรก็ตามการไหลของ lymph ยังคงช้าและไม่ต่อเนื่อง ในทุกๆ 24 ชั่วโมงจะมี lymph ประมาณ 3 ลิตรไหลเข้ากระแสเลือด ซึ่งมีปริมาตรเกือบเท่ากับปริมาณของของเหลวที่หลุดลอดออกมาจากกระแสเลือดเข้าสู่ช่องว่างในเนื้อเยื่อ การเคลื่อนไหวของเนื้อเยื่อใกล้เคียงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการไหลของ lymph ใน lymphatic vessels



รูปที่ 4.3 Lymphatic system

(a) การกระจายของ lymphatic collecting vessels และ lymph nodes. Lymph ในบริเวณซีกซ้ายที่สีเข้ม (สีเขียว) จะถูกนำไปส่งเข้า right lymphatic duct ส่วนที่เหลือของร่างกายจะถูกส่งไปที่ thoracic duct (Marieb และ Hoehn, 2008)
 (b) ส่วนประกอบหลักได้แก่ lymphatic vessels, lymphatic tissues และ organs (<http://www.google.com>)



Lymphoid Cells, Lymphoid Tissues และ Lymphoid Organs

Lymphoid organs ประกอบด้วย lymphoid cells และ lymphoid tissues

1. Lymphoid Cells

Lymphocytes เป็นเซลล์ที่ทำหน้าที่ต่อสู้เชื้อโรคและสิ่งแปลกปลอมที่เข้ามาในร่างกาย เกิดในไขกระดูกแดง เซลล์เริ่มต้นในไขกระดูก (haemocytoblasts หรือ pluripotent stem cells) จะสร้าง lymphoid stem cells ที่จะแบ่งตัวต่อไปเป็น 2 กลุ่ม โดยกลุ่มที่ 1 ยังคงอยู่ในไขกระดูกแดงและสร้าง **B cells (B lymphocytes)** และ **Natural killer cells (NK lymphocytes)** ซึ่งจะโตเต็มที่ในไขกระดูกแล้วจึงส่งเข้าไปในกระแสเลือด กลุ่มที่ 2 เคลื่อนตัวเข้าไปอยู่ใน **thymus** และแบ่งตัวอย่างต่อเนื่อง (ภายใต้อิทธิพลของ thymic hormones) ให้เป็น **T cells (T lymphocytes)** จำนวนมากซึ่งจะโตเต็มที่ใน thymus แล้วจึงเคลื่อนตัวกลับสู่กระแสเลือด (รูปที่ 4.4) ในขณะที่ lymphocytes เหล่านี้เคลื่อนย้ายไปตามเนื้อเยื่อต่างๆ lymphocytes จะแบ่งตัวให้เซลล์ลูกชนิดเดียวกัน เช่น B cells สร้าง B cells หรือ T cells สร้าง T cells อักษร **T** และ **B** หมายถึง **Thymus** และ **Bone marrow** (ไขกระดูก) 3 ใน 4 ของ lymphocytes ที่ไหลเวียนอยู่ในร่างกายเป็น T cells ซึ่งแบ่งออกได้เป็นหลายกลุ่มที่มีหน้าที่แตกต่างกัน

B cells เป็นเพียง 1/8 ของ lymphocytes ที่ไหลเวียนในร่างกาย B cells ที่โตเต็มที่ จะเปลี่ยนเป็น **plasma cells** ทำหน้าที่สร้าง **antibodies (immunoglobulins)** ซึ่งเป็นโปรตีนที่จะทำปฏิกิริยากับ **antigens** โดยทั่วไป antigen มักเป็นเชื้อโรคหรือส่วนของเชื้อโรคหรือสารแปลกปลอม เมื่อ antibodies ทำปฏิกิริยากับ antigens เกิด antigen-antibody complex จะทำให้เกิดปฏิกิริยาถูกโซ่ทำลายเชื้อโรคหรือสารประกอบนั้นๆ

Lymphoid macrophages มีบทบาทสำคัญในการป้องกันร่างกายและตอบสนองทางภูมิคุ้มกันโดยการกิน (phagocytosis) สิ่งแปลกปลอมและโดยการช่วยกระตุ้น T cells เช่นเดียวกับ **dendritic cells** ที่จับ antigens และนำกลับไปยัง lymph nodes สุดท้ายคือ **reticular cells** (คล้าย fibroblasts) จะสร้าง reticular fibers stroma ซึ่งเป็นร่างแหที่ช่วยค้ำจุนเซลล์ชนิดอื่นๆใน lymphoid organs

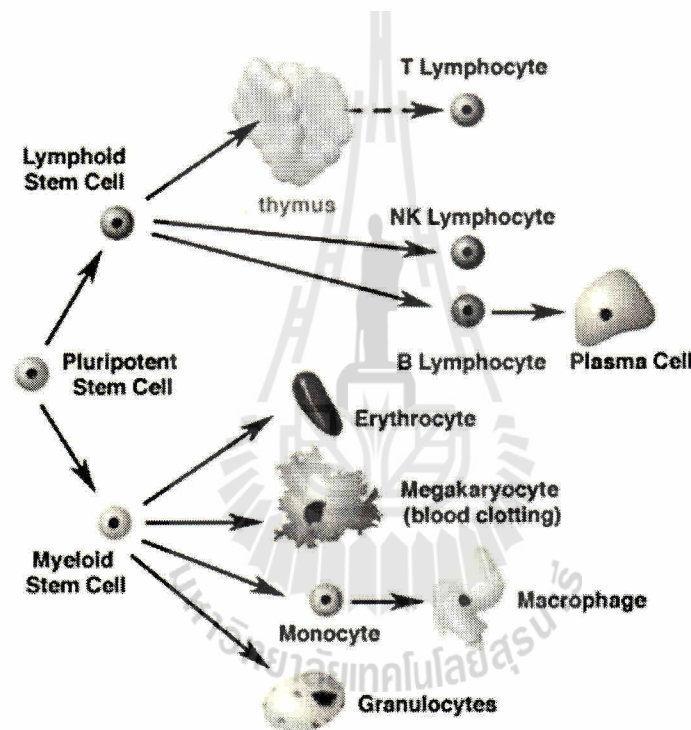
2. Lymphoid (lymphatic) tissue

Lymphoid tissue เป็นส่วนประกอบหลักของ lymphoid organs ส่วนมาก ยกเว้น thymus. Lymphoid tissue ประกอบด้วย reticular connective tissue เป็นหลักและมี lymphoid cells อื่นๆ ร่วมด้วยเช่น lymphocytes, macrophages

Lymphoid tissue มีหลายรูปแบบได้แก่ diffuse lymphatic tissue และ lymphoid nodules (follicles)

2.1 Diffuse lymphatic tissue ประกอบด้วย reticular tissue เล็กน้อย พบทั่วไปในท่อน้ำลาย แต่พบรวมกันเป็นกลุ่มใหญ่ในชั้น lamina propria ของเยื่อเมือก (mucous membrane) และ lymphoid organs

2.2 Lymphoid nodules (follicles) เป็นกลุ่มของ lymphoid tissues ที่**ไม่มี capsule** หุ้ม พบอยู่ใต้เยื่อบุผิวของทางเดินอาหาร (รูปที่ 4.8) ทางเดินการหายใจและการขับถ่าย เป็นก้อนกลมแข็งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 มิลลิเมตร ศูนย์กลางของ nodules เรียกว่า **germinal center** (ย้อมติดสีจาง) จะมี dendritic cells และ B cells เป็นจำนวนมาก germinal center จะมีขนาดใหญ่ขึ้นมากเมื่อ B cells แบ่งตัวอย่างรวดเร็วและสร้าง plasma cells หน้าที่ของ nodules คือกรอง interstitial fluid (ไม่ใช่ lymph) ในหลายกรณี lymphoid follicles ถูกพบเป็นส่วนหนึ่งของ lymphoid organs ขนาดใหญ่ เช่น lymph nodes แต่ยังคงพบว่ามีารรวมเป็นกลุ่มเดี่ยวๆของ lymphoid follicles ในผนังของลำไส้เล็กเรียกว่า **Peyer's patches** (รูปที่ 4.8) และในไส้ติ่ง (appendix)



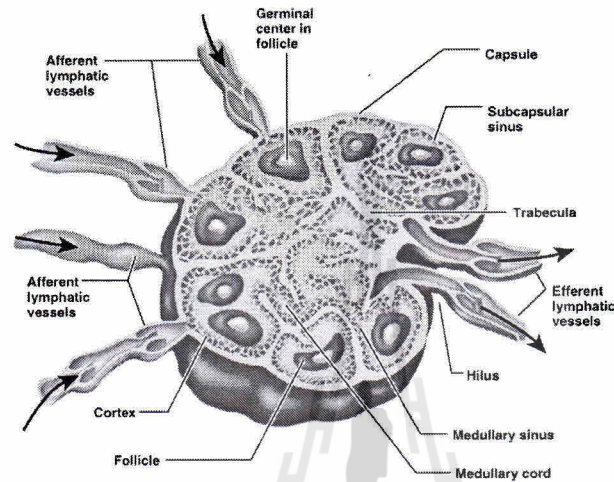
รูปที่ 4.4 กำเนิดของ lymphocytes และเซลล์เม็ดเลือดชนิดอื่นๆ

(<http://www.itmonline.org/image/antler4.jpg>)

3. Lymphoid organs แยกจาก lymphoid nodules ได้ คือ lymphoid organs มี **capsule** หุ้ม ได้แก่ lymph nodes, thymus, spleen (ม้าม) และ tonsils

3.1 Lymph nodes มีรูปร่างคล้ายเมล็ดถั่ว เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1-25 มิลลิเมตร กระจายอยู่ทั่วร่างกาย (รูปที่ 4.3 และ 4.5) แต่ละ node มี capsule หุ้ม ภายใน node แบ่งออกเป็น follicles ซึ่งเป็นที่รวมของ lymphocytes และ macrophages มี reticular fibers และ lymphatic sinuses

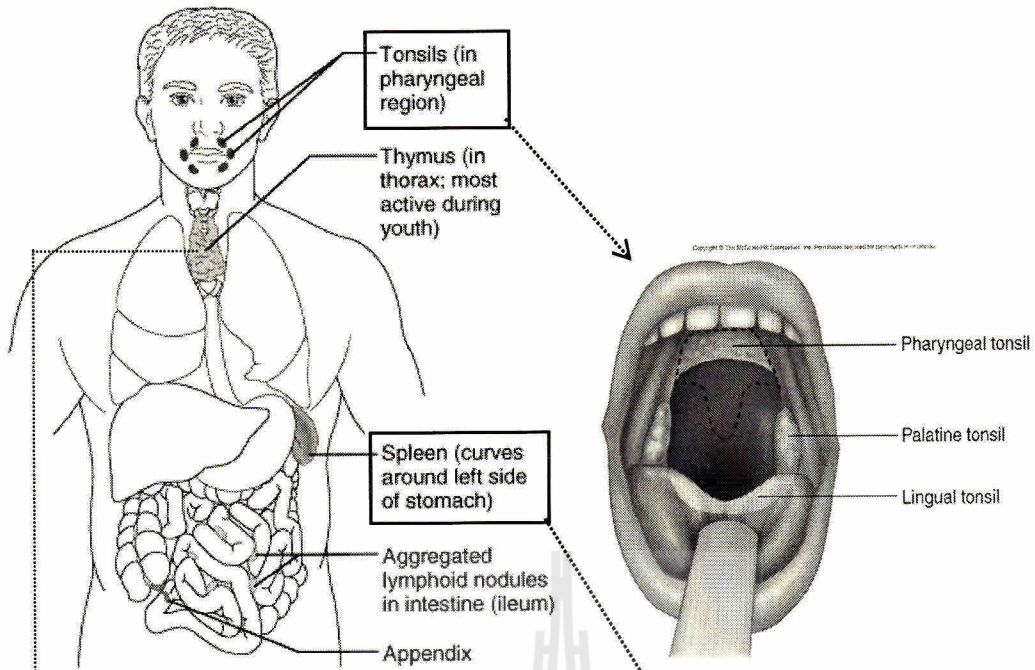
Lymph node ทำหน้าที่กรอง lymph ที่มาจากช่องว่างในเนื้อเยื่อ จากนั้นจึงส่งผ่านเข้า lymphatic vessels เพื่อส่งเข้า venous system. Lymph ผ่านเข้า node ทาง afferent lymphatic vessels ซึ่งมี valves เปิดเข้า node ทำให้ lymph ไหลผ่านเข้าได้โดยตรง Lymph ไหลผ่านไปยัง lymphatic sinuses และไหลออกทาง efferent lymphatic vessels (รูปที่ 4.5) จำนวนของ afferent lymphatic vessels มีมากกว่า efferent lymphatic vessels



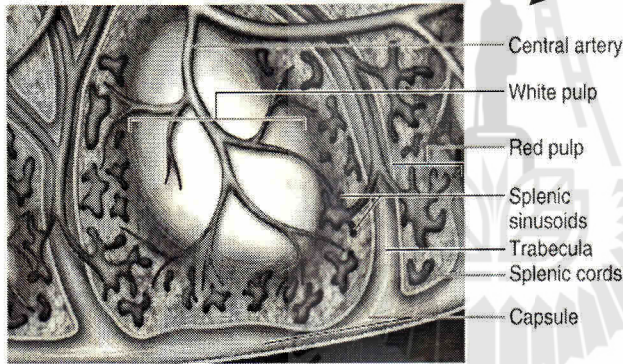
รูปที่ 4.5 โครงสร้างของ lymph node ผ่าตามแนวยาว ลูกศรแสดงทิศทางการไหลของ lymph เข้าและออก lymph node (Seely และ คณะ, 2008)

3.2 Thymus อยู่หลังกระดูกอก แบ่งเป็น 2 พู (รูปที่ 4.3) แต่ละพูแบ่งเป็นพูย่อยๆ เรียกว่า lobules แต่ละ lobule แบ่งเป็น 2 ชั้น ชั้นนอกเรียก cortex และชั้นในเรียก medulla (รูปที่ 4.6) T cells จะแบ่งตัวในชั้น cortex และในขณะที่เริ่มแก่ตัว T cells จะเคลื่อนเข้ามาอยู่ใน medulla และเข้าไปในหลอดเลือดกระจายไปสู่ส่วนต่างๆของร่างกาย ส่วน epithelial-reticular cells จะสร้าง **thymic hormones (thymosin)** เมื่อมีอายุมากขึ้น ต่อมานี้จะหมดความสำคัญ และฝ่อไปในที่สุด

3.3 Spleen เป็นกลุ่ม lymphatic tissue ที่ใหญ่ที่สุดในร่างกาย ยาวประมาณ 12 เซนติเมตร หนักประมาณ 160 กรัม วางอยู่ในช่องท้องซีกซ้ายใต้กะบังลม ระหว่างกระเพาะอาหารและไตข้างซ้าย ปกติมีสีแดงคล้ำเพราะมีเลือดมาก (รูปที่ 4.3) spleen แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ red pulp ซึ่งเป็นส่วนที่มีเลือดมาก และ white pulp ซึ่งมี lymphocytes จำนวนมาก (รูปที่ 4.6) spleen ทำหน้าที่ (1) กำจัดเซลล์เม็ดเลือดที่ผิดปกติ (2) สะสมเหล็กที่ถูก recycle จากเซลล์เม็ดเลือดแดง (3) สะสม platelets (4) ตรวจจับและตอบสนองต่อเชื้อโรคและ antigen แปลกปลอมที่ไหลเวียนในเลือด (5) สร้างเซลล์เม็ดเลือดแดงในระยะที่เป็นเอ็มบริโอ



Copyright © The McGraw-Hill Companies, Inc. Permission required for reproduction or display.

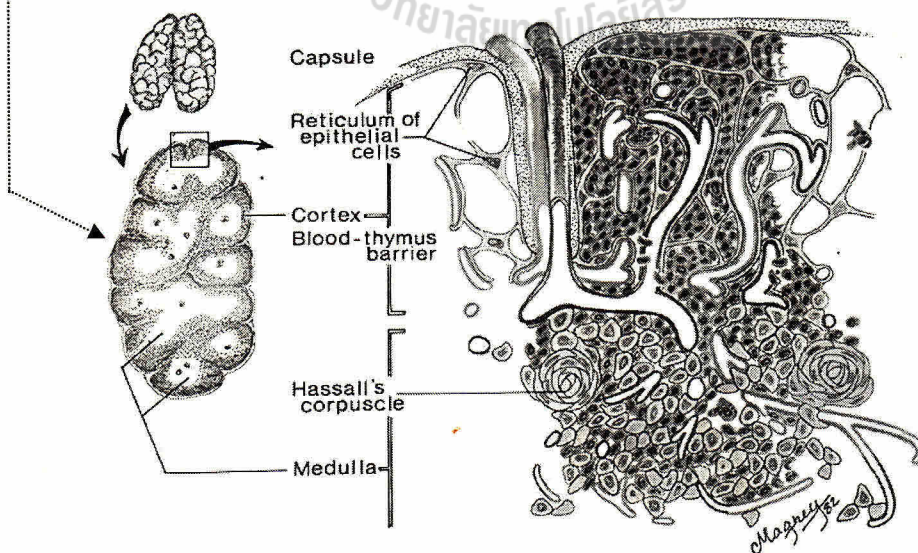


รูปที่ 4.6 ตำแหน่งของ

lymphoid tissues:

thymus, spleen และ tonsils ในร่างกาย

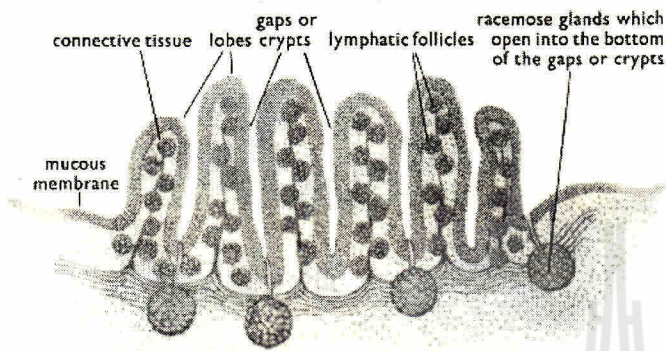
(Seely และ คณะ, 2008, <http://www.skn.ac.th/skl/project1/hor48/hor38.jpg>)



Structure of the thymus.

3.4 Tonsils เป็น lymphoid organ ที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด อยู่ภายในผนังของ pharynx (คอหอย) มีชื่อเรียกตามตำแหน่งที่อยู่ ได้แก่ **pharyngeal tonsil** 1 อัน (ถูกเรียกเป็น adenoids เมื่อบวมโต) อยู่ในผนังด้านหลังของ nasopharynx, **palatine tonsils** 1 คู่ อยู่ที่ส่วนปลายของช่องปากแต่ละด้าน เป็น tonsil ที่ใหญ่ที่สุดและติดเชื้อบ่อยที่สุดและ **lingual tonsils** 1 คู่ อยู่ที่ส่วนฐานของลิ้น (รูปที่ 4.3 และ 4.6)

DIAGRAM OF A TONSIL (as seen through a microscope)

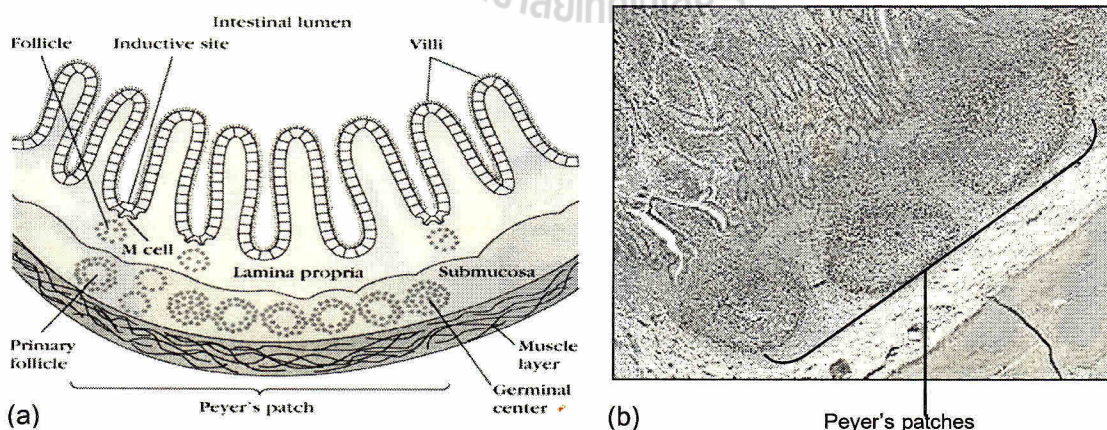


รูปที่ 4.7 ใต้เยื่อแกรมของ tonsil

(http://www.daviddarling.info/images/tonsil_diagram.jpg)

การรวมกลุ่มกันของ lymphoid follicles

Lymphoid follicles ที่รวมเป็นกลุ่มขนาดใหญ่อยู่ภายในผนังของลำไส้เล็กส่วน ileum เรียกว่า **Peyer's patches** (รูปที่ 4.8) และในผนังของไส้ติ่งด้วย ทั้ง Peyer's patches และไส้ติ่งอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม (1) ทำลายแบคทีเรีย ช่วยป้องกันไม่ให้เชื้อโรคผ่านผนังลำไส้เล็ก (2) ช่วยสร้าง memory lymphocytes สำหรับการสร้างภูมิคุ้มกันในระยะยาว ทั้ง Peyer's patches, ไส้ติ่งและ tonsils ที่ล้วนอยู่ในทางเดินอาหาร รวมถึง lymphoid follicles ในผนังของหลอดลม (bronchi) และในผนังของระบบสืบพันธุ์ร่วมกับระบบขับถ่าย เป็นส่วนของกลุ่ม lymphoid tissues ขนาดเล็กที่ถูกเรียกว่า **mucosa-associated lymphatic tissue (MALT)**



รูปที่ 4.8 ตำแหน่งของ Peyer's patches ในลำไส้เล็ก ภาพตัดขวาง (a) ใต้เยื่อแกรมของลำไส้เล็ก (<http://www.ugr.es/~oncoterm/csdata/Peyerspatchfigure02-21.jpg>) (b) เนื้อเยื่อของลำไส้เล็ก (<http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/basics/peyers.jpg>)

บรรณานุกรม

1. Campbell, N.A. and J.B. Reece. 2002. Biology. 6th ed. Pearson Education, Inc.: San Francisco.
2. Campbell, N.A., J.B. Reece, L.A. Urry, M.L. Cain, S.A. Wasserman, P.V. Minorsky, and R.B. Jackson. 2008. Biology. 8th ed. Pearson Benjamin Cummings: San Francisco.
3. McKinley, M. and V.D. O'Loughlin. 2006. Human Anatomy. McGraw-Hill: Boston.
4. Marieb, E.N. 1997. Essential of Human Anatomy and Physiology. 5th ed. Pearson Benjamin Cummings: San Francisco.
5. Marieb, E.N. and K. Hoehn. 2008. Human Anatomy and Physiology. 3th ed. Pearson Education: New York.
6. Martini, F.H. and E.F.Bartholomew. 2008. Essentials of Anatomy & Physiology. Prentice Hall: New York.
7. Saladin, S.D. 2004. Anatomy & Physiology: the Unity of Form and Function. 3th ed. McGraw-Hill: Boston.
8. Seeley, R.R., T.D. Stephens and P. Tate. 2008. Anatomy and Physiology. 6th ed. McGraw-Hill: Boston.
9. Shier, D., J. Butler and R. Lewis. 2008. Hole's human anatomy and physiology. 10th ed. McGraw-Hill: Boston.
10. Silverthorn, D.U. 2004. Human Physiology. An Integrated Approach. Pearson Benjamin Cummings: San Francisco.
11. <http://education.vetmed.vt.edu>
12. http://en.wikipedia.org/wiki/Blood_type
13. <http://pcwww.liv.ac.uk>
14. <http://webanatomy.net/anatomy/248unmguide.htm>
15. <http://www.biosbcc.net/doohan/sample/html/heart.htm>
16. <http://www.clevelandclinic.org>
17. <http://www.cvphysiology.com/Blood%20Pressure/BP016.htm>
18. http://www.daviddarling.info/images/tonsil_diagram.jpg
19. <http://www.google.com>
20. <http://www.itmonline.org/image/antler4.jpg>

21. http://www.ivy-rose.co.uk/Topics/Heart_Structure.htm
22. <http://www.pages.drexel.edu/~nag38/>
23. <http://www.rci.rutgers.edu/~uzwiak>
24. <http://www.skn.ac.th/skl/project1/hor48/hor38.jpg>
25. http://www.sigmaaldrich.com/img/assets/12680/Hemo_Banner.jpg
26. <http://www.thaigoodview.com>
27. <http://www.tvdsb.on.ca/saunders/courses/online>
28. <http://www.ugr.es/~oncoterm/csdata/Peyerspatchfigure02-21.jpg>
29. <http://www.unm.edu/~jimmy/vessels.jpg>
30. <http://www.vivo.colostate.edu/hbooks/pathphys/digestion/basics/peyers.jpg>

