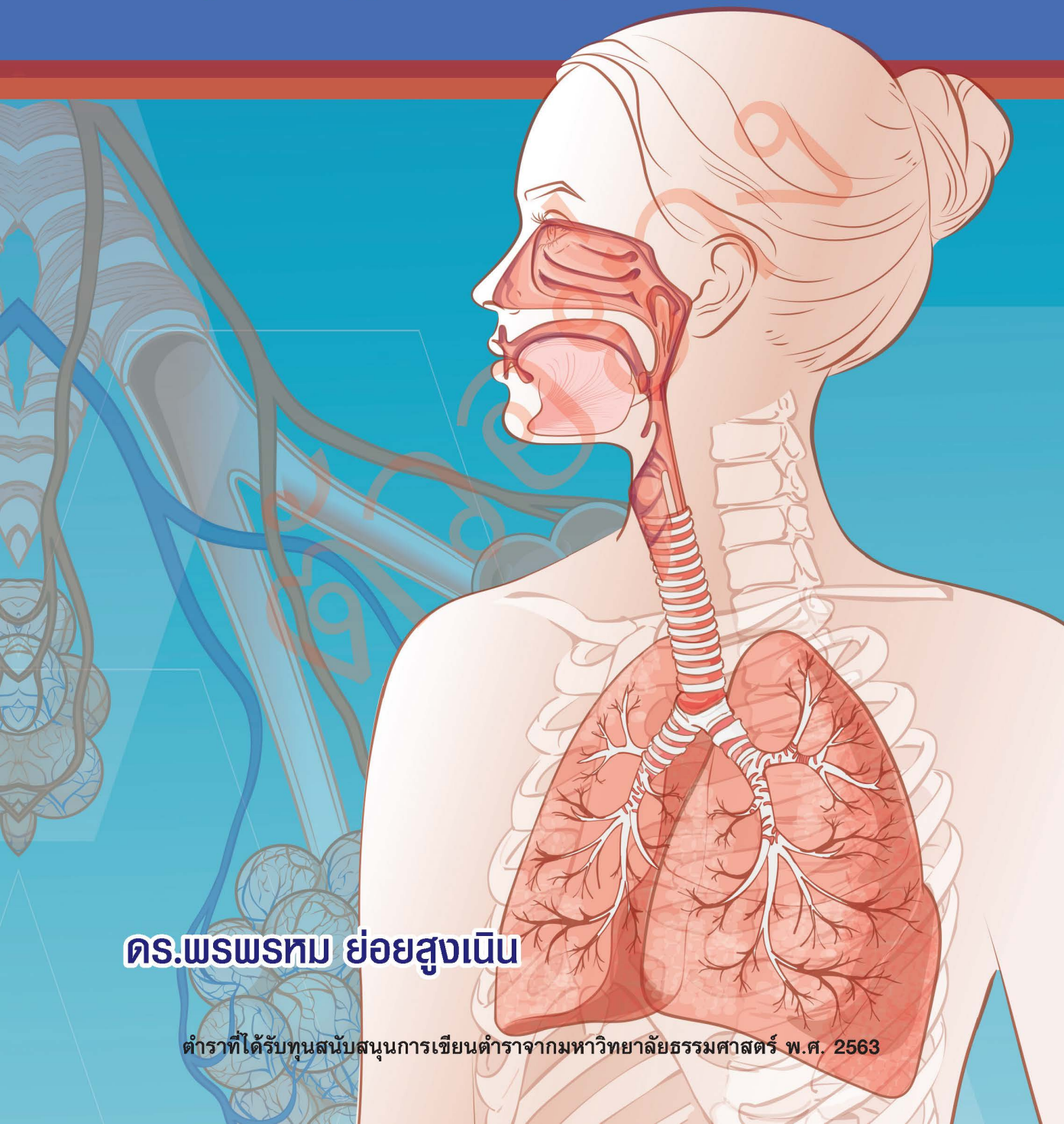
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สรีรวิทยาระบบหายใจ
(Physiology of Respiratory System)



ดร.พรพรหม ย่อยสูงเนิน

ตำราที่ได้รับทุนสนับสนุนการเขียนตำราจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2563

สารบัญ

คำนำ *(8)*

บทที่ 1 ส่วนประกอบและหน้าที่ของระบบหายใจ 1

ส่วนประกอบของระบบหายใจ 3

หน้าที่ของระบบหายใจ 9

ระบบประสาทที่มาควบคุมอวัยวะของระบบการหายใจ 10

เส้นประสาทที่มาเลี้ยงกล้ามเนื้อของการหายใจ 11

ระบบไหลเวียนเลือดของปอด 12

สรุปบทที่ 1 18

คำถามท้ายบท 19

เฉลยคำถามท้ายบท 20

บทที่ 2 กลศาสตร์ของการสูดลมหายใจ 21

ความดันที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ 23

การหายใจเข้า 26

การหายใจออก 30

ความสัมพันธ์ทางคลินิก: pneumothorax 33

แรงต้านทานการหายใจ 34

แรงต้านทานยืดหยุ่น 34

แรงต้านทานไม่ยืดหยุ่น 38

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงต้านทานของท่อทางเดินอากาศ 39

ความสัมพันธ์ทางคลินิก: ภาวะ dynamic compression of airway 42

ความสามารถในการยืดขยายของปอด 44

ปริมาตรและความจุปอด 47

การวัดสมรรถภาพปอด 49

สรุปบทที่ 2 60

คำถามท้ายบท 61

เฉลยคำถามท้ายบท 64

บทที่ 3 การระบายอากาศของปอดและการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ปอด **66**

การระบายอากาศของปอด 67

ปริมาตรอากาศสูญเปล่า 68

ความสัมพันธ์ทางคลินิก: alveolar hypoventilation และ hyperventilation 72

การกระจายตัวของเลือดในปอด 72

การควบคุมปริมาณการไหลของเลือดที่ปอด 74

สัดส่วนของการระบายอากาศกับเลือดที่ถุงลมปอด 77

ความไม่สัมพันธ์กันระหว่างการระบายอากาศและจำนวนเลือดที่ไหลผ่านปอด 79

ความสัมพันธ์ทางคลินิก: ภาวะลิ่มเลือดอุดกั้นในปอด (pulmonary embolism) 82

การแลกเปลี่ยนก๊าซที่ปอด 82

กฎของก๊าซ (Gas Laws) 83

ปัจจัยที่มีผลต่ออัตราการแพร่ของก๊าซผ่าน respiratory membrane 87

การแลกเปลี่ยนก๊าซถูกจำกัดโดยความสามารถในการแพร่ผ่าน
และถูกจำกัดโดยปริมาณเลือดที่ไหลผ่านปอด 94

สรุปบทที่ 3 98

คำถามท้ายบท 99

เฉลยคำถามท้ายบท 102

บทที่ 4 การขนส่งก๊าซ **105**

การขนส่งออกซิเจน 106

กราฟการจับ –ปล่อยออกซิเจนกับฮีโมโกลบิน 110

สิ่งที่ใช้บ่งชี้ถึงการเปลี่ยนแปลงของความชอบของฮีโมโกลบินในการจับกับออกซิเจน 113

ปัจจัยที่มีผลต่อการเลื่อนของกราฟการจับ-ปล่อยของออกซิเจนกับฮีโมโกลบิน 114

ปัจจัยอื่นๆ ที่มีผลต่อการขนส่งออกซิเจน 118

ความสัมพันธ์ทางคลินิก: Methemoglobinemia 122

การขนส่งคาร์บอนไดออกไซด์ 123

กราฟการจับ-ปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ 125

สรุปเปรียบเทียบการขนส่งออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ 128
สรุปบทที่ 4 129
คำถามท้ายบท 130
เฉลยคำถามท้ายบท 132

บทที่ 5 การควบคุมการหายใจ 133
การควบคุมการหายใจโดยระบบประสาท 134
ศูนย์ควบคุมการหายใจระดับพอนด์ 135
ศูนย์ควบคุมการหายใจระดับเมดัลลา 138
วิธีการศึกษาความสัมพันธ์ของการทำงานของศูนย์ควบคุมการหายใจ 141
การควบคุมการหายใจโดยสารเคมี 143
การควบคุมการหายใจโดยปัจจัยที่ไม่ใช่สารเคมี 154
บทบาทของระบบหายใจต่อระบบสมดุลของกรด – ด่างของร่างกาย 155
ความสัมพันธ์ทางคลินิก: diabetic ketoacidosis 161
ผลของการออกกำลังกายต่อระบบหายใจ 161
กลไกและผลการเพิ่มการระบายอากาศขณะออกกำลังกาย 162
ปริมาณการไหลของเลือดที่ปอดขณะออกกำลังกาย 165
ผลของการขึ้นไปบนที่สูงต่อระบบหายใจ 167
ภาวะเจ็บป่วยจากการขึ้นไปบนที่สูง 172
สรุปบทที่ 5 174
คำถามท้ายบท 175
เฉลยคำถามท้ายบท 177

เอกสารอ้างอิง 179
ดัชนี (Index) 180

ตัวอย่าง

คำนำ

การหายใจเป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดระหว่างถุงลมกับหลอดเลือดฝอยที่อยู่รอบ ๆ ถุงลม และระหว่างเลือดกับเซลล์ของเนื้อเยื่อ ดังนั้นระบบหายใจจึงมีหน้าที่ควบคุมปริมาณก๊าซออกซิเจนให้เพียงพอกับความต้องการของเซลล์ทั่วร่างกายและขับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกนอกร่างกาย ทั้งนี้เพื่อรักษาสภาวะแวดล้อมภายในร่างกายให้อยู่ในสภาพคงที่ (homeostasis) กระบวนการหายใจ แบ่งเป็น 2 แบบคือ การหายใจภายนอก (External respiration) และการหายใจภายใน (Internal respiration) โดยเนื้อหาในตำราเล่มนี้จะกล่าวถึงกระบวนการหายใจภายนอกเท่านั้น *นอกจากนี้เนื้อหาจะรวมถึงการควบคุมการหายใจ บทบาทของระบบหายใจต่อการรักษาสมดุลกรด-ด่างในร่างกายมนุษย์ อีกทั้งการปรับตัวของร่างกายโดยเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบหายใจในภาวะต่างๆ เช่น ขณะออกกำลังกาย และขณะขึ้นไปบนที่สูง* พร้อมทั้งเน้นจุดสำคัญที่ควรทราบ การเชื่อมโยงทางคลินิก และคำถามท้ายบท เพื่อทบทวนและประเมินความรู้ความเข้าใจในแต่ละบทอีกด้วย ตำราเล่มนี้มีการอธิบายเนื้อหาโดยใช้ศัพท์ที่อ้างอิงจากศัพท์บัญญัติ อังกฤษ-ไทย ไทย-อังกฤษ ฉบับราชบัณฑิตยสถาน รูปแบบซีดีรอม รุ่น 1.1 พ.ศ. 2545 และคำศัพท์สรีรวิทยา สรีรวิทยาสมาคมแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2542

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการเขียนตำราเล่มนี้ และขอขอบคุณข้อเสนอแนะจากผู้ทรงคุณวุฒิในการปรับปรุงตำราเล่มนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น อนึ่งผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่าตำราเล่มนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษาแพทย์ ทันตแพทย์ นักศึกษาด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์ และผู้สนใจทั่วไป เพื่อเป็นประโยชน์ในการเรียน และสามารถประยุกต์ความรู้ใช้ในทางคลินิกต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร. พรพรหม ย่อยสูงเนิน
สาขาสรีรวิทยา สถาบันวิทยาศาสตร์พรีคลินิก
คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

บทที่ 1

ส่วนประกอบและหน้าที่ของระบบหายใจ

(Components and Functional Organization of Respiratory System)

วัตถุประสงค์การเรียนรู้ (Learning objectives)

1. อธิบายหน้าที่และความสำคัญของระบบหายใจได้
2. บอกส่วนประกอบและหน้าที่แต่ละส่วนของระบบหายใจได้
3. อธิบายการแบ่งส่วนของทางเดินหายใจเป็นส่วนนำอากาศ (conducting zone) และส่วนแลกเปลี่ยนก๊าซ (respiratory zone) ได้
4. บอกระบบประสาทที่มาควบคุมอวัยวะของระบบการหายใจ (Nervous system control of respiratory system) ได้
5. อธิบายลักษณะของระบบไหลเวียนเลือดของปอด (Pulmonary circulation) ได้

กรอบแนวคิด (BASIC CONCEPT)

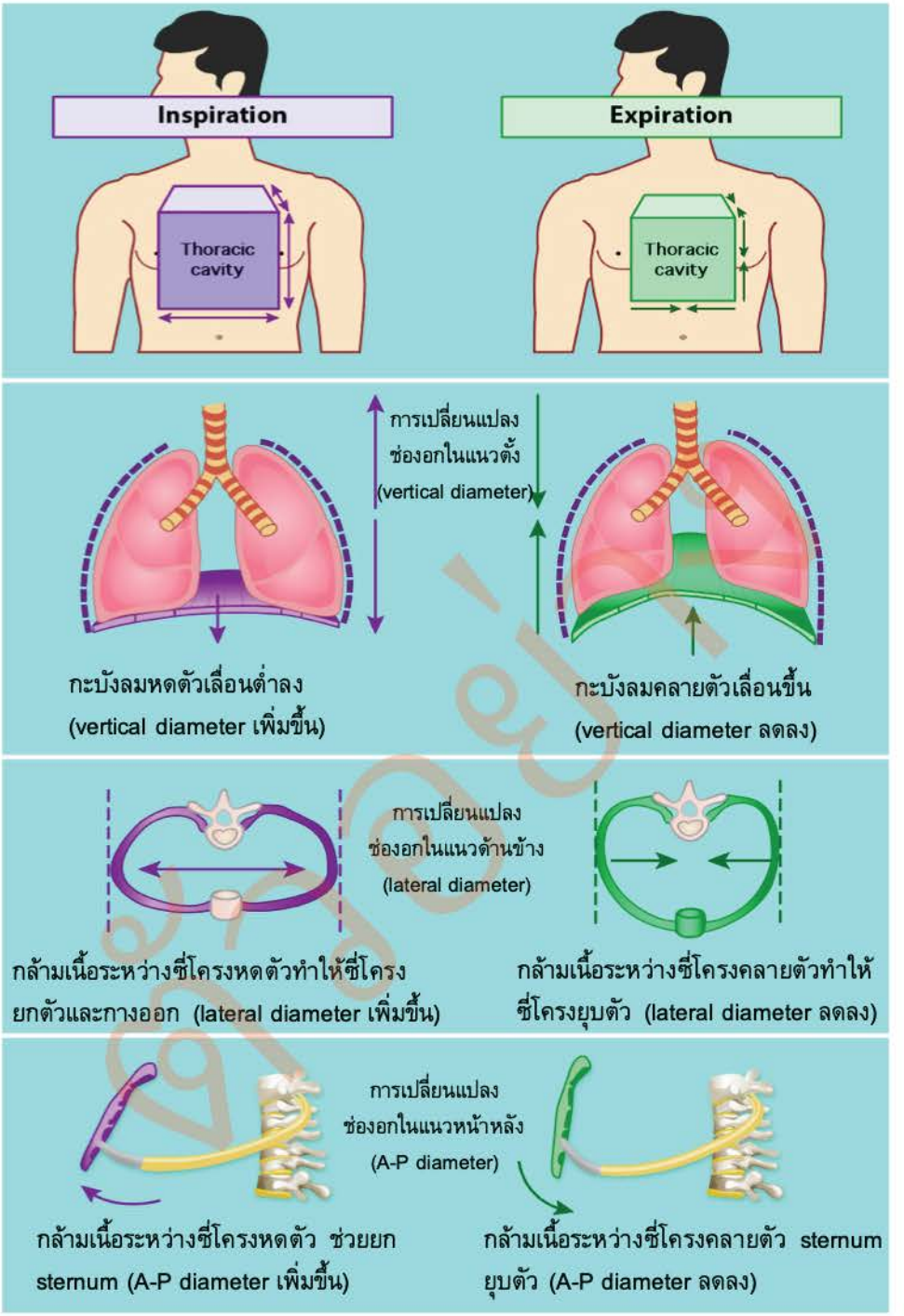
การหายใจเป็นกระบวนการ การแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ โดยอาศัยการทำงานร่วมกันของ 2 ระบบในร่างกายคือ ระบบการหายใจและระบบไหลเวียนเลือด กระบวนการหายใจ แบ่งเป็น 2 แบบคือ การหายใจภายนอก (External respiration) และการหายใจภายใน (Internal respiration) การหายใจภายนอก เป็นกระบวนการ การแลกเปลี่ยนก๊าซออกซิเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดขึ้น 2 บริเวณ ได้แก่ ระหว่างถุงลมกับหลอดเลือดฝอยที่อยู่รอบๆ ถุงลม และระหว่างเลือดกับเซลล์ของเนื้อเยื่อ ส่วน การหายใจภายใน เป็นการหายใจระดับเซลล์ (Cellular respiration) หรือเมตาบอลิซึมของเซลล์นั่นเอง โดยเซลล์จะมีการใช้ก๊าซออกซิเจนและปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา ในบทเรียนนี้จะกล่าวถึงกระบวนการหายใจภายนอกเท่านั้น ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

1. **การระบายอากาศ (Ventilation)** เป็นกระบวนการที่อากาศเคลื่อนที่เข้าสู่ปอดในขณะหายใจเข้าสลับกับการเคลื่อนที่ของอากาศออกจากปอดในขณะหายใจออก ผ่านการสูดลมหายใจเข้าออกหรือ breathing นั่นเอง

2. **การแลกเปลี่ยนก๊าซ (Gas exchange)** เป็นกระบวนการ การแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างถุงลมกับหลอดเลือดฝอยที่อยู่รอบ ๆ ถุงลม โดยการแพร่ของก๊าซสามารถแพร่ผ่านเยื่อบางๆ ระหว่างถุงลมกับหลอดเลือดฝอยในปอด (alveolar capillary membrane, respiratory membrane) โดยอาศัยความแตกต่างของความดันของก๊าซระหว่างเยื่อทั้งสองด้าน ซึ่งจะแพร่ผ่านจากด้านที่มีความดันของก๊าซสูงไปสู่ด้านที่มีความดันของก๊าซต่ำกว่า ตามหลักการของการแพร่ (simple diffusion) โดยการแลกเปลี่ยนของอากาศจะสมบูรณ์ได้เมื่ออากาศที่เข้าสู่ปอดมีปริมาตรที่เพียงพอและมีการกระจายไปยังถุงลมแต่ละอันอย่างสม่ำเสมอ (even หรือ uniform distribution) นอกจากนี้เลือดที่ไหลเวียนผ่านปอด (lung perfusion) ต้องมีปริมาณเพียงพอและมีการกระจายไปยังถุงลมแต่ละอันอย่างสม่ำเสมอและเป็นสัดส่วนที่เหมาะสมกับอากาศที่เข้าสู่ปอดด้วย

3. **การขนส่งก๊าซ (Gas transportation)**

4. ขั้นตอนสุดท้าย เป็น**การแลกเปลี่ยนก๊าซระหว่างเลือดกับเซลล์ของเนื้อเยื่อ**



รูปที่ 2.3 การเปลี่ยนแปลงขนาดของทรวงอกขณะหายใจเข้าและออก

สรุปบทที่ 3

1. Alveolar ventilation = $(V_T - V_D) \times$ RR
2. Physiological V_D = Anatomic V_D (conducting airway) + Alveolar V_D (non-perfused alveoli)
3. ปริมาตรอากาศสูญเปล่าสามารถคำนวณได้จากสมการ (Bohr's equation)
   $V_D = V_T \times (PaCO_2 - PECO_2)/PaCO_2$
4. คนปกติ (V_D/V_T) จะมีค่าประมาณ 150/500 หรือ 0.3 ถ้า V_D/V_T มากกว่า 0.3 แสดงว่าน่าจะมี dead space เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ alveolar ventilation ลดลง
5. Alveolar ventilation แปรผกผันกับระดับ $PaCO_2$
6. การหายใจแบบช้าและลึก ทำให้เพิ่ม tidal volume จะมีประสิทธิภาพในการเพิ่ม alveolar ventilation ได้ดีกว่าการเพิ่มอัตราการหายใจ
7. V/Q ratio โดยเฉลี่ยของปอด ~ 0.8-1 ซึ่งแต่ละส่วนจะมี V/Q ratio ไม่เท่ากัน โดยส่วนยอดปอดจะมี ventilation มากกว่า perfusion (Apex → high V/Q ratio) ที่ฐานปอดจะมี ventilation น้อยกว่า perfusion (Base → low V/Q ratio)
8. V/Q mismatch เป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดภาวะ hypoxemia (PaO_2 < 80 mm Hg)
9. Low V/Q ratio (shunt effect) พบได้ใน โรคหอบหืด หลอดลมอักเสบ ปอดบวมน้ำ ปอดแฟบ เป็นต้น
10. High V/Q ratio (dead space effect) พบได้ใน โรคถุงลมโป่งพอง โรคหลอดเลือดปอดถูกอุดกั้นที่ปอด เป็นต้น
11. ปัจจัยที่มีการแลกเปลี่ยนก๊าซ ขึ้นอยู่กับ V/Q ratio, คุณสมบัติของก๊าซ และลักษณะของ respiratory membrane
12. CO_2 มีความสามารถละลายได้ดีกว่า O_2 จึงแพร่ได้ดีกว่าออกซิเจน ทำให้ผู้ป่วยที่ปอดมีการแพร่บกพร่อง จะเกิดภาวะ hypoxemia ก่อนเกิดภาวะ hypercapnia
13. สามารถหาความจุก๊าซแพร่ผ่าน ได้จากการแพร่ผ่านของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ นั่นคือค่า D_LCO
14. D_LCO ขึ้นอยู่กับลักษณะของ respiratory membrane, ความเข้มข้นของฮีโมโกลบิน และ cardiac output
15. ค่า D_LCO ช่วยแยกโรคที่มีความผิดปกติของ respiratory membrane และหลอดเลือดฝอยที่ปอด ออกจากกลุ่มโรคที่มีภาวะทางเดินอากาศอุดกั้นได้

เฉลย คำถามท้ายบท บทที่ 4

1. ตอบ ข้อ ค

Fetal hemoglobin หรือ HbF เป็นฮีโมโกลบินที่พบมากในทารกในครรภ์ มีคุณสมบัติในการจับกับออกซิเจนได้สูง ทั้งนี้เพื่อช่วยการขนส่งออกซิเจนในเลือดแม่ไปยังทารก

2. ตอบ ข้อ ก

คาร์บอนมอนอกไซด์ มีความสามารถในการแย่งจับกับฮีโมโกลบิน ดีกว่าออกซิเจนถึง 230 เท่า ทำให้ SaO_2 ลดลง และ O_2 content ลดลงด้วย อย่างไรก็ตาม ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ PaO_2

ดังนั้นพิษของคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO poisoning) มีผลทำให้ลดการขนส่ง O_2 (CO แย่งจับกับ Hb) และลดการปล่อย O_2 ให้กับเนื้อเยื่อ ซึ่งทำให้ oxyhemoglobin dissociation curve เลื่อนไปทางซ้าย

3. ตอบ ข้อ ข

ค่า P50 ของ oxyhemoglobin dissociation curve เพิ่มขึ้น จะทำให้ oxyhemoglobin dissociation curve เลื่อนไปทางขวา (O_2-Hb affinity ลดลง) ภาวะ hypoxemia เซลล์เม็ดเลือดแดงจะมี 2,3 BPG เพิ่มขึ้น ทำให้ O_2-Hb affinity ลดลง

4. ตอบ ข้อ ค

ผลของออกซิเจนในเลือดเพิ่มขึ้น ทำให้ เพิ่มการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากฮีโมโกลบิน หรือ เพิ่ม CO_2 unloading ซึ่งก็คือ Haldane effect นั่นเอง

5. ตอบ ข้อ ข

ภาวะเลือดจาง หรือ anemia จะมีความเข้มข้นของฮีโมโกลบินลดลง ดังนั้น O_2 content (CaO_2) จะลดลง แต่ระดับ PaO_2 และ SaO_2 ไม่เปลี่ยนแปลง

6. ตอบ ข้อ ง

โรคถุงลมโป่งพอง จะความผิดปกติของการแลกเปลี่ยนก๊าซ จาก V/Q mismatch ทำให้เกิดภาวะ hypoxemia ดังนั้นค่า PaO_2, SaO_2 และ CaO_2 จะลดลง

กรอบแนวคิด (Basic Concept)

การหายใจเกิดขึ้นได้เองเป็นจังหวะๆ (spontaneous respiration) ทั้งนี้เกิดจากการผลิตกระแสประสาท (nerve impulses) ของ motor neurons ที่ควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อสำหรับการหายใจ (respiratory muscles) ซึ่งเป็นกล้ามเนื้อลาย เซลล์ประสาท motor neurons ไม่สามารถผลิตกระแสประสาทได้ด้วยตัวเอง ซึ่งจะถูกกระตุ้นโดยกระแสประสาทที่จะส่งมาจากสมองเท่านั้น โดยสมองส่วนที่ควบคุมการหายใจอยู่ที่ก้านสมอง (brain stem) ซึ่งผลิต nerve impulses ออกมาเป็นจังหวะๆ (rhythmic discharge) เพื่อทำให้เกิดการหายใจเป็นจังหวะ และการหายใจจะหยุดเมื่อมีการตัดขาดของ nerve impulses ระหว่างสมองกับไขสันหลังเหนือระดับ C3,4,5 ซึ่งเป็นจุดกำเนิดของ phrenic nerves ที่มาควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อกะบังลม (diaphragm)

นอกจากระบบประสาทที่ควบคุมการหายใจแล้ว ยังมีปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการหายใจ เช่น การเปลี่ยนแปลงระดับของ PaO_2, $PaCO_2$ และความเข้มข้นของ H^+ ในเลือดแดง นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกซึ่งไม่ใช่สารเคมีที่มีผลทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของการหายใจอีกด้วย

กลไกที่ร่างกายใช้ควบคุมการหายใจมีดังนี้

1. การควบคุมโดยระบบประสาท (Neural or nervous control)
2. การควบคุมโดยสารเคมี (chemical control)
3. การควบคุมโดยปัจจัยที่ไม่ใช่สารเคมี (Non-chemical influences)

อย่างไรก็ตาม กลไกหลักที่สำคัญที่สุดคือ การควบคุมโดยระบบประสาท และโดยสารเคมี

การควบคุมการหายใจโดยระบบประสาท (Neural Control of Respiration)

การทำงานของระบบประสาทในการควบคุมการหายใจจะดำเนินไปได้ตามปกติเมื่อ PaO_2 ประมาณ 95-100 mm Hg, $PaCO_2$ 35-45 mm Hg และ pH ของเลือดแดงประมาณ 7.35-7.45

ระบบการควบคุมของการหายใจ โดยระบบประสาทแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือ

1) ระบบประสาทที่สามารถบังคับการหายใจ ให้เป็นไปตามความต้องการ หรืออยู่ในอำนาจของจิตใจ เรียกว่า voluntary control

2) ระบบประสาทที่ทำให้เกิดการหายใจเป็นไปได้เองโดยอัตโนมัติ เรียกว่า automatic control การทำงานของระบบนี้ทำให้มีการหายใจได้เองติดต่อกันตลอดเวลาโดยไม่ต้องมีคำสั่งจากจิตใจ เช่น การหายใจในขณะนอนหลับ ในขณะอ่านหนังสือ ในขณะทำงาน เป็นต้น

ความสัมพันธ์ทางคลินิก (Clinical correlation)

โรคเบาหวานชนิดที่ 1 (type 1 diabetes mellitus) เป็นภาวะที่ระดับกลูโคสหรือน้ำตาลในเลือดสูงเกินไปเนื่องจากร่างกายไม่สามารถผลิตฮอร์โมนอินซูลินได้ ทำให้พบอาการ ปัสสาวะบ่อยมีน้ำตาลออกมาในปัสสาวะและหากมีอาการรุนแรง ร่างกายจะสลายไขมันมาใช้เป็นพลังงานแทนน้ำตาลทำให้มี "ketone acid" ในเลือดเพิ่มขึ้น เกิดภาวะ **diabetic ketoacidosis** ได้ซึ่งจะมีอาการหายใจหอบลึก (Kussmaul breathing) คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้อง สับสน

การตรวจ arterial blood gas (ABG) พบ pH 7.30, PO_2 105 mm Hg, PCO_2 30 mm Hg (ค่าปกติ 35–45 mm Hg), และ HCO_3^- 20 mEg/L (ค่าปกติ 22–26 mEq/L) จากผล ABG วิเคราะห์ภาวะกรด-ด่าง ได้เป็น **primary metabolic acidosis** ร่วมกับ **secondary respiratory alkalosis** เนื่องจาก H^+ จาก ketone bodies จะถูกบัฟเฟอร์ด้วย HCO_3^- ทำให้ระดับ HCO_3^- ในเลือดลดลง (15 mEg/L) นอกจากนี้ระดับ H^+ ที่สูงขึ้นในเลือดจะกระตุ้น PCR ส่งผลให้หายใจเร็วและลึกขึ้น (hyperventilation) **ทำให้ระดับ $PaCO_2$ ลดลง** (20 mm Hg)

การเพิ่มขึ้นของ H^+ ในเลือด**ไม่มีผลกระตุ้นต่อ** CCR เนื่องจาก H^+ ในเลือดไม่สามารถผ่าน BBB ได้ นอกจากนี้ $PaCO_2$ ที่ลดลงจะส่งผลให้ระดับ H^+ ใน CSF ต่ำลงด้วย (pH CSF เพิ่มขึ้น) ทำให้การทำงานของ CCR ลดลงในระยะแรก ถ้าภาวะ metabolic acidosis ยังคงเกิดขึ้นอยู่นานจะเกิดการปรับตัวของร่างกายโดยการขนส่ง HCO_3^- ออกจาก CSF (pH CSF กลับสู่ปกติ) ทำให้ร่างกายยังจะคงตอบสนองด้วยหายใจเร็วและลึกมากอยู่ได้อย่างต่อเนื่องในภาวะ metabolic acidosis

ผลของการออกกำลังกายต่อระบบหายใจ (Effects of exercise on respiratory system)

ขณะออกกำลังกายจะมีการระบายอากาศเพิ่มขึ้นหรือเพิ่ม minute ventilation โดยจะเพิ่มเป็นสัดส่วนกับ oxygen consumption และ การผลิต CO_2 อย่างไรก็ตามการเพิ่ม minute ventilation จะเกิดขึ้นก่อนการเปลี่ยนแปลงของ oxygen consumption โดย minute ventilation ที่เพิ่มขึ้น จะเพิ่มทั้งความลึกและความเร็วของอัตราการหายใจ หรือเรียกว่า hyperpnea (hyperpnea หมายถึง การหายใจที่เพิ่มขึ้นทั้งความเร็วและลึก โดยสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของ metabolic demand และระดับ $PaCO_2$)

คนปกติขณะออกกำลังกายสามารถเพิ่ม minute ventilation ได้ประมาณ 80-100 ลิตร/นาที สูงสุดได้ถึง 150 ลิตร/นาที หรือประมาณ 25 เท่าเมื่อเทียบกับขณะพัก โดยอัตราการหายใจขณะออกกำลังกายมีค่าประมาณ 40-50 ครั้ง/นาที (เพิ่มได้สูงสุดประมาณ 70 ครั้ง/นาที) และ tidal volume ประมาณ 2-2.5 ลิตร สรุปการเปลี่ยนแปลงของ minute ventilation ในแต่ละสภาวะของร่างกายดังตารางที่ 5.1

สรีรวิทยาระบบหายใจ

ตำรา *สรีรวิทยาระบบหายใจ* เล่มนี้ ได้เขียนโดยอ้างอิงจากตำราทั้งในและต่างประเทศที่ทันสมัย ประกอบด้วยเนื้อหาจำนวน 5 บท ได้แก่ 1) ส่วนประกอบและหน้าที่ของระบบหายใจ 2) กลศาสตร์ของการสูดลมหายใจ 3) การระบายอากาศของปอดและการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ปอด 4) การขนส่งก๊าซ และ 5) การควบคุมการหายใจ โดยในแต่ละบทจะเน้นจุดสำคัญที่ควรทราบ ประเด็นที่ควรรู้ การเชื่อมโยงทางคลินิก นอกจากนี้ยังมีคำถามท้ายบท พร้อมเฉลยเพื่อเป็นการทบทวนและประเมินความรู้ความเข้าใจในแต่ละบทอีกด้วย ทำให้ตำราเล่มนี้เหมาะแก่การนำไปใช้เป็นตำราประกอบการเรียนการสอนในรายวิชาสรีรวิทยาระบบหายใจ สำหรับนักศึกษาแพทย์ ทันตแพทย์ เภสัช และนักศึกษาด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพ รวมถึงผู้สนใจทั่วไปที่ต้องการเพิ่มพูนความรู้ด้านสรีรวิทยาของระบบหายใจ ซึ่งเป็นประโยชน์ในการเรียน และสามารถนำความรู้ไปประยุกต์ใช้ในทางคลินิกได้ต่อไป

ดร.พรพรหม ย่อยสูงเนิน
รองศาสตราจารย์ สาขาสรีรวิทยา สถานวิทยาศาสตร์พรีคลินิก
คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ISBN 978-616-314-775-2
ราคา 290 บาท
หมวดแพทยศาสตร์
http://thammasatpress.tu.ac.th