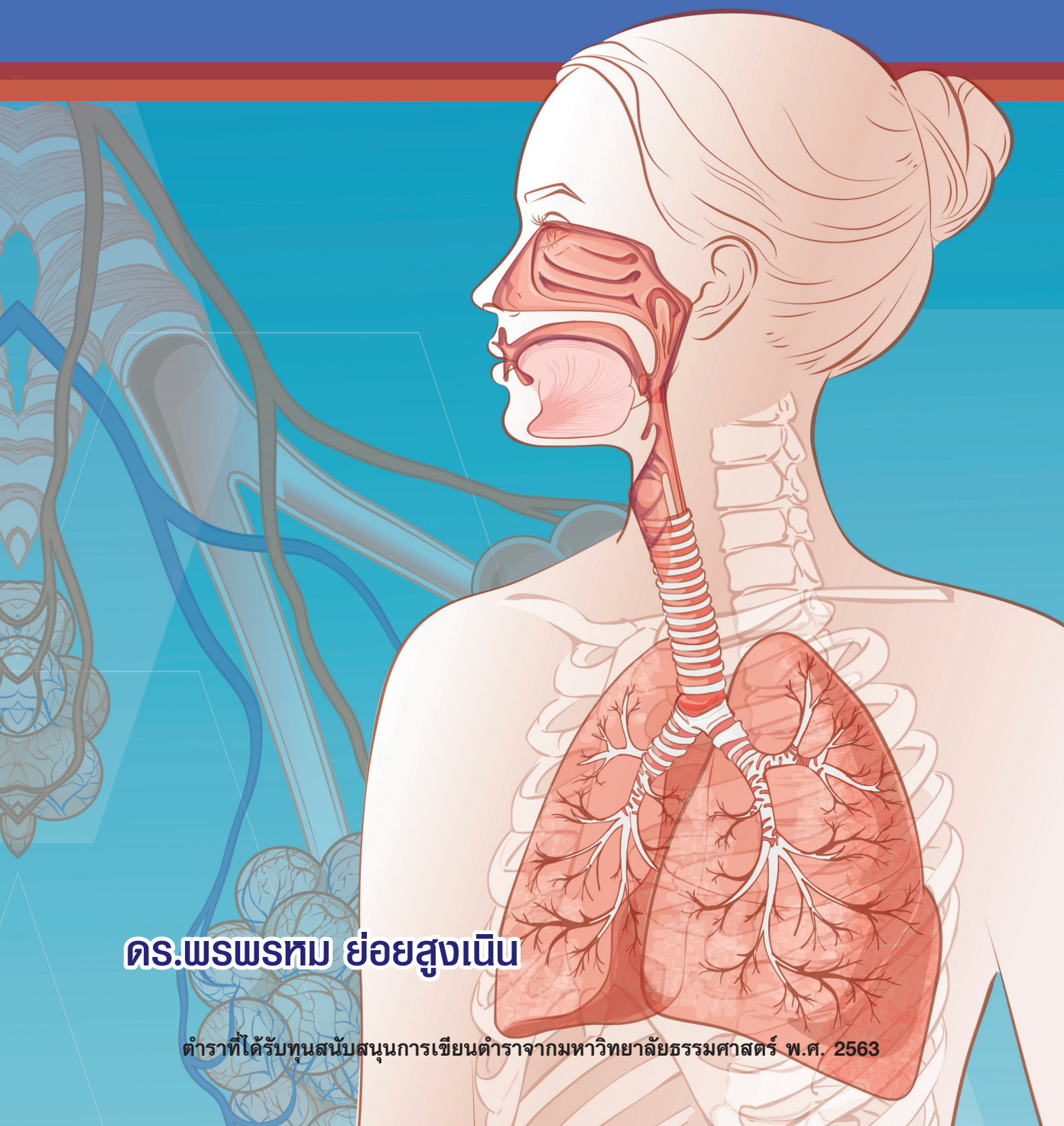
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สรีรวิทยาระบบหายใจ
(Physiology of Respiratory System)



ดร.พรพรหม ย่อยสูงเนิน

ตำราที่ได้รับทุนสนับสนุนการเขียนตำราจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2563

สรีรวิทยาระบบหายใจ

(Physiology of Respiratory System)

โครงการหนังสือวิชาการที่น่าพิมพ์ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ให้จัดพิมพ์และจำหน่ายในราคาย่อมเยา

ถ่ายเอกสารแทนการใช้หนังสือ
คือการทำลายภูมิปัญญาสร้างสรรค์

สรีรวิทยาระบบหายใจ
(Physiology of Respiratory System)

ดร. พรพรหม ย่อยสูงเนิน
รองศาสตราจารย์
สาขาสรีรวิทยา สถานวิทยาศาสตร์พรีคลินิก
คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
2564

ตำราที่ได้รับทุนสนับสนุนการเขียนตำราจากมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ พ.ศ. 2563

พรพรหม ย่อยสูงเนิน.

สรีรวิทยาระบบหายใจ. = Physiology of Respiratory System.

1. สรีรวิทยาการหายใจ. 2. ระบบหายใจ -- สรีรวิทยา.

WF102

ISBN 978-616-314-775-2

ISBN (e-book) 978-616-314-777-6

ลิขสิทธิ์ของ**รองศาสตราจารย์ ดร. พรพรหม ย่อยสูงเนิน**

สงวนลิขสิทธิ์

ฉบับพิมพ์ครั้งที่ 1 เดือนกันยายน 2564

จำนวน 50 เล่ม

ฉบับอิเล็กทรอนิกส์ (e-book) เดือนกันยายน 2564

จัดพิมพ์และจำหน่ายโดย**สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**

ท่าพระจันทร์: อาคารธรรมศาสตร์ 60 ปี ชั้น U1 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ถนนพระจันทร์ กรุงเทพฯ 10200 โทร. 0-2223-9232

ศูนย์รังสิต: อาคารโดมบริหาร ชั้น 3 ห้อง 317 มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 โทร. 0-2564-2859-60 โทรสาร 0-2564-2860

http://thammasatpress.tu.ac.th, e-mail: unipress@tu.ac.th

พิมพ์ที่**โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์**

ภาพปกโดยนางสาวอาภัสสรา ณรงค์น้อย

ราคาเล่มละ 290.- บาท

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

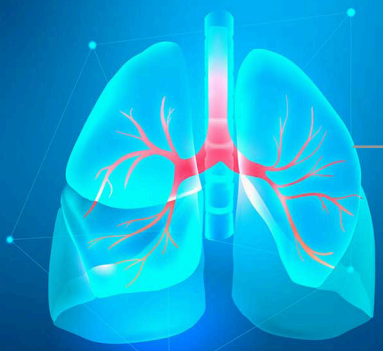
เอกสารอ้างอิง 179
ดัชนี (Index) 180

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 สถานวิทยาศาสตร์พรีคลินิก
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**

ส่วนประกอบของระบบหายใจ (Components of respiratory system)

อวัยวะที่เป็นส่วนประกอบของระบบหายใจ เป็นอวัยวะที่เป็นทางผ่านของอากาศ เริ่มตั้งแต่ จมูก ไปจนถึงสิ้นสุดที่ปอด หากแบ่งส่วนประกอบของระบบหายใจ ในทางกายวิภาคศาสตร์ (Anatomical division) สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ดังนี้ (รูปที่ 1.1)

1. ท่อทางเดินอากาศส่วนบน (upper respiratory tract) ประกอบด้วย จมูก (nose) รูจมูก (nosetril) ช่องจมูก (nasal cavity) คอหอย (pharynx) และ กล่องสียง (larynx)

2. ท่อทางเดินอากาศส่วนล่าง (lower respiratory tract) ประกอบด้วย หลอดลม (Trachea) แขนงของหลอดลม (Bronchus, Bronchi) และปอด (Lung)

ท่อทางเดินอากาศส่วนบน (Upper respiratory tract)

1. จมูก (Nose)

จมูกเป็นอวัยวะที่ทำหน้าที่รับกลิ่น เนื่องจากภายในรูจมูก (Nostril) มีเยื่อบุผิวที่ทำหน้าที่รับกลิ่น (olfactory mucosa) และเส้นประสาทรับกลิ่น (Olfactory nerve) เชื่อมต่ออยู่ นอกจากนี้จมูกยังทำหน้าที่ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ โดยหลอดเลือดฝอยซึ่งมีอยู่มากมายตามแผ่นเยื่อเมือกจะถ่ายเทความร้อนออกมาทำให้อากาศชุ่มชื้น แผ่นเยื่อเมือกเองก็จะทำหน้าที่ปรับความชื้นให้กับอากาศพร้อมทั้งดักจับฝุ่นละอองหรือสิ่งแปลกปลอมที่ปนมากับลมหายใจที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน น้ำเมือกที่ขับออกมากจากแผ่นเยื่อเมือกในจมูกประกอบด้วย อิมมิวโนโกลบูลิน (Immunoglobulins) และอินเตอร์เฟอรอน (interferons) จะช่วยกำจัดเชื้อโรคที่ผ่านเข้ามาทางลมหายใจอีกทางหนึ่ง และขับออกมาเป็นน้ำมูกนั่นเอง ที่สำคัญจมูกเป็นส่วนของทางเดินหายใจที่มีแรงต้านทานต่อการไหลของอากาศถึง 50% และแรงต้านทานนี้จะเพิ่มมากขึ้น เช่น ในภาวะที่มีการติดเชื้อไวรัส ในโรคไข้หวัด เป็นต้น

2. คอหอย (Pharynx)

คอหอยของมนุษย์โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ คอหอยหลังโพรงจมูก (Nasopharynx) คอหอยหลังช่องปาก (Oropharynx) และคอหอยหลังกล่องเสียง (Laryngopharynx)

คอหอยหลังโพรงจมูก อยู่ด้านหลังโพรงจมูก ผนังด้านบนติดต่อกับกระดูกสฟีนอยด์ (Sphenoid bone) และกระดูกท้ายทอย (Occipital bone) ของกะโหลกศีรษะ ผนังด้านล่างประกอบด้วยพื้นผิวด้านบนของเพดานอ่อน มีท่อ posterior nares และ eustachian tube เปิดเชื่อมต่อคอหอยส่วนนี้ ดังนั้นการอักเสบที่เกิดขึ้นบริเวณนี้ ทำให้หูชั้นกลางอักเสบได้ นอกจากนี้ผนังด้านหลังส่วนบนของคอหอยหลังโพรงจมูก มีต่อมทอนซิลอยู่ด้วย ซึ่งต่อมทอลซิลจะโตขึ้นได้จากการอักเสบติดเชื้อ อาจทำให้เกิดการอุดกั้นทางเดินหายใจส่วนนี้ได้

คอหอยหลังช่องปาก เป็นคอหอยส่วนที่ต่อลงมาจากคอหอยหลังโพรงจมูก อยู่ด้านหลังช่องปากตรงกับเพดานอ่อนระดับ (C1) และเหนือต่อกระดูกไฮออยด์ (Hyoid bone) ผนังด้านหน้าประกอบด้วย 1/3 ของลิ้นส่วนหลัง ผนังด้านข้างเป็นต่อมทอนซิล ผนังด้านบนเป็นส่วนของเพดานอ่อนและลิ้นไก่ ขอบเขตด้านล่างไปสิ้นสุดที่บริเวณฝาปิดกล่องเสียง เป็นทางผ่านของอากาศและอาหาร

คอหอยหลังกล่องเสียง ส่วนนี้เริ่มตั้งแต่ขอบบนของฝาปิดกล่องเสียงลงไปถึงขอบล่างของกระดูกอ่อนคริคอยด์ (Cricoid cartilage)(C3 ถึง C6) เป็นส่วนที่ยาวที่สุดและแคบลงเรื่อยๆ จนต่อกับหลอดอาหาร บริเวณนี้จะมีจุดเชื่อมต่อกับกล่องเสียงและหลอดอาหาร ดังนั้นคอหอยส่วนนี้จะเป็นส่วนทางผ่านของทั้งอากาศและอาหาร

3. กล่องเสียง (Larynx)

กล่องเสียงเป็นอวัยวะที่อยู่ส่วนบนสุดของหลอดลม ใต้ต่อกระดูกไฮออยด์ ประกอบด้วยกระดูกอ่อนหลายชิ้น ได้แก่ กระดูกอ่อนไทรอยด์ (Thyroid cartilage) กระดูกอ่อนคริคอยด์ (Cricoid cartilage) ฝาปิดกล่องเสียง (Epiglottis) กระดูกอ่อนอาริทีนอยด์ (Arytenoid cartilage) กระดูกอ่อนคอร์นิคิวเลท (Corniculate cartilage) กระดูกอ่อนคิวนิฟอร์ม (cuneiform cartilage) และเส้นเสียง (Vocal cords)

ฝาปิดกล่องเสียงและกระดูกอ่อนอาริทีนอยด์จะปิดกล่องเสียงขณะกลืนอาหารเพื่อป้องกันการสำลักอาหารเข้าสู่ทางเดินอากาศ ในผู้ป่วยที่ไม่รู้สึกตัวหรือขณะได้รับยาสลบ การปิดของฝาปิดกล่องเสียงจะไม่สมบูรณ์ อาจจะทำให้เกิดการสำลักเอาน้ำหรืออาหารเข้าสู่ทางเดินอากาศและปอด ทำให้เกิดภาวะปอดอักเสบจากการสำลัก (Aspiration pneumonia) ได้ นอกจากนี้กระดูกอ่อนอาริทีนอยด์ จะมีขนาดใหญ่ขึ้นในระหว่างที่มีการติดเชื้อ โดยเฉพาะในเด็ก มีผลทำให้มีแรงต้านทานของท่อทางเดินอากาศ (airway resistance) เพิ่มสูงขึ้น

ขณะมีการกลืนจะเกิดรีเฟล็กซ์ที่มีการหดตัวของ adductor muscle ของกล่องเสียง ทำให้กล่องเสียงปิด ป้องกันไม่ให้อาหารตกไปอยู่ในทางเดินหายใจ ดังนั้นหากมีการอัมพาตของกล้ามเนื้อดังกล่าว อาจเกิดภาวะปอดอักเสบจากการสำลักได้ นอกจากนี้การอ่อนแรงหรือการเป็นอัมพาตของ adductor muscle ของกล่องเสียง จะทำให้มีอาการหายใจเข้ามีเสียงดัง (Inspiratory stridor) กล้ามเนื้อดังกล่าวถูกเลี้ยงด้วยเส้นประสาทเวกัส (Vagus nerve) ดังนั้นการเสียหายของเส้นประสาทเวกัส จะทำให้เกิดภาวะปอดอักเสบ (Pneumonia) ภาวะเลือดคั่งในปอด (Pulmonary congestion) และภาวะปอดบวมน้ำ (Pulmonary edema) จากการสำลักได้

ท่อทางเดินอากาศส่วนล่าง (Lower respiratory tract)

1. หลอดลม (Trachea)

หลอดลมเป็นส่วนของท่อทางเดินอากาศที่ต่อมาจากกล่องเสียง ประกอบด้วยกระดูกอ่อนที่มีลักษณะเป็นวง (cartilage ring หรือ trachea ring) รูปตัว C ซึ่งวางอยู่ด้านหลัง การที่หลอดลมมีกระดูกอ่อนจึงทำให้เปิดอยู่ตลอดเวลา ไม่แฟบเข้าหากัน หลอดลมจะมีลักษณะเป็นท่อตรงทอดยาวไปถึงส่วนที่โค้งของหลอดเลือดแดงใหญ่ (arch of aorta) จากนั้นจะแตกแขนงออกเป็นแขนงของหลอดลม (bronchi) ด้านซ้ายและด้านขวา ซึ่งจะอยู่ด้านนอกของเนื้อเยื่อปอด เยื่อบุผิวด้านในของหลอดลมเป็นเซลล์คล้ายทรงกระบอกชนิดที่มีขน (ciliated columnar epithelium) นอกจากนี้หลอดลมยังประกอบด้วยกล้ามเนื้อเรียบ ทำหน้าที่หดและคลายตัวเพื่อปรับขนาดของหลอดลม

2. แขนงของหลอดลม (Bronchus, Bronchi)

แขนงของหลอดลมเป็นส่วนของท่อทางเดินอากาศที่ต่อมาจากหลอดลม ที่แตกแขนงออกเป็นแขนงด้านซ้ายและด้านขวา (left and right bronchi) แต่ละข้างจะแตกแยกเข้าไปในเนื้อปอดเป็นแขนงขั้วปอด (bronchial tree) ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงเรื่อยๆ จนเป็นแขนงขั้วปอดที่มีขนาดเล็กที่สุด กระดูกอ่อนที่ประกอบเป็นผนังของแขนงหลอดลม (Bronchi) จะเรียงตัวห่างกันออกไปเรื่อยๆ จนถึงประมาณการแตกแขนงที่ 10 ของแขนงหลอดลม ส่วนหลอดลมฝอย (Bronchioles) เป็นส่วนที่ไม่มีกระดูกอ่อนเลย

หลอดลมและแขนงของหลอดลมถูกบุด้วยเยื่อบุผิวคล้ายทรงกระบอกชนิดที่มีขนและเซลล์ที่มีการสร้างสารคัดหลั่ง หรือ เซลล์กอบเลท (Globlet cells) ด้วยจำนวนมาก โดยเซลล์เยื่อบุผิวชนิดที่มีขนนี้จะพบในแขนงของหลอดลมไปจนถึงส่วนหลอดลมฝอยส่วนปลายสุด (Terminal bronchioles) และ หลอดลมฝอยแลกเปลี่ยนก๊าซ (Respiratory bronchioles) ส่วน globlet cells จะไม่พบที่ส่วน terminal bronchioles และ respiratory bronchioles

หลอดลมฝอย (Bronchioles) เป็นส่วนของแขนงหลอดลมที่ไม่มีกระดูกอ่อนเลย แต่จะมีส่วนของกล้ามเนื้อเรียบเข้าไปแทนที่เป็นจำนวนมาก หลอดลมฝอยส่วนปลายสุดเรียกว่า terminal bronchioles (รูปที่ 1.1 และ 1.2) ซึ่งยังไม่มีถุงลมมาเปิดติดต่อ จึงเป็นเพียงส่วนทางผ่านของอากาศ แต่ไม่มีการแลกเปลี่ยนก๊าซ หรือเรียกว่า ส่วนนำอากาศ (conducting zone) และเรียกปริมาตรอากาศที่อยู่ในส่วนนำอากาศว่า อากาศสูญเปล่าทางกายวิภาค (anatomic dead space) ดังนั้น ปริมาตรอากาศในส่วนตั้งแต่จมูกจนถึงหลอดลมฝอยปลายสุด เรียกว่า anatomical dead space

3. ปอด (Lung)

ภายในปอด แขนงของหลอดลมแต่ละข้างจะแตกแขนงย่อยเป็นท่อขนาดเล็กลงเรื่อยๆ เหมือนกับการแตกแขนงของกิ่งไม้ (bronchial tree) ดังนี้ (รูปที่ 1.1 และ 1.2)

หลอดลมฝอยแลกเปลี่ยนก๊าซ (Respiratory bronchioles) เป็นส่วนที่เริ่มปรากฏมีถุงลม (Alveolus, alveoli) มาเปิดเข้าเป็น**จุดเริ่มต้นการแลกเปลี่ยนก๊าซ**

ท่อถุงลม (Alveolar ducts) เป็นท่อขนาดเล็กต่อจาก respiratory bronchioles ในผนังไม่มีกล้ามเนื้อเรียบ มีถุงลมมาเปิดเข้าจำนวนมาก

กลุ่มถุงลม (Alveolar sacs) เป็นช่องว่างร่วมที่ถุงลมหลายๆ ถุงมาเปิดเข้าร่วมกัน ทำให้มีลักษณะเป็นถุง ในผนังไม่มีกล้ามเนื้อเรียบ

ปอดของผู้ใหญ่ประกอบด้วยถุงลมจำนวนมากประมาณ 300 ล้านถุง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 75 ถึง 300 ไมครอน มีพื้นที่ผิวทั้งหมดประมาณ 50-100 ตารางเมตร หรือประมาณหนึ่งสนามเทนนิส ดังนั้นถุงลมจึงถือเป็น biological membranes ที่มีพื้นที่ผิวมากที่สุดในร่างกาย

แต่ละถุงลมจะเรียงตัวชิดกัน มีผนังร่วมกันเรียกว่า interalveolar septum ถุงลมจะถูกล้อมรอบไว้ด้วยหลอดเลือดฝอยของปอดจำนวนมาก มีลักษณะเป็นร่างแห โดยจะมี ISF เป็นชั้นบางๆ กั้นไว้ระหว่างผนังของถุงลมกับผนังของหลอดเลือดฝอย

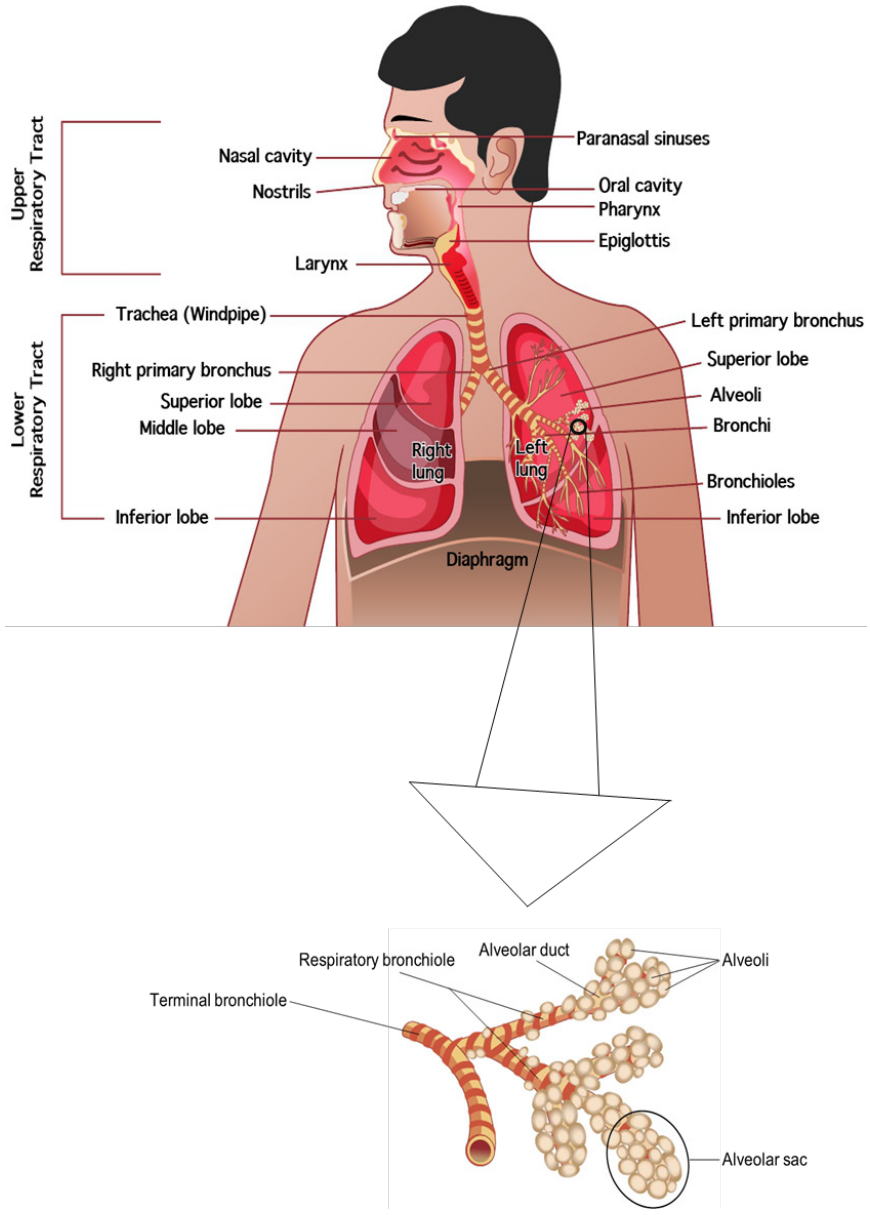
ในโรคถุงลมโป่งพอง (emphysema) มีการทำลายของ interalveolar septum ทำให้ถุงลมขนาดเล็กจำนวนมาก กลายเป็นถุงลมที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่จำนวนของถุงลมลดลง ผลคือพื้นที่ผิวในการแลกเปลี่ยนก๊าซลดลงอย่างมาก ซึ่งทำให้การแลกเปลี่ยนก๊าซลดลง

ผนังของถุงลมประกอบด้วยเซลล์และเนื้อเยื่อดังต่อไปนี้

1) elastic fibers จำนวนมาก ทำให้ถุงลมมีคุณสมบัติยืดหยุ่นได้ดีมากหรือมี elasticity สูง

2) epithelial cells มี 2 ชนิด คือ

- Type I cells เป็น alveolar membrane ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนก๊าซ พบประมาณ 95% ของผนังถุงลม
- Type II cells ทำหน้าที่สร้างและหลั่งสารลดแรงตึงผิว (surfactant) ออกมาที่ผิวของถุงลม สารนี้มีคุณสมบัติลดแรงตึงผิว (surface tension) ของถุงลม
- Pulmonary alveolar macrophage หรือ dust cells ทำหน้าที่ทำลายสิ่งแปลกปลอมต่างๆ ที่เข้ามาในถุงลม
- mast cells เซลล์ชนิดนี้สร้างและหลั่งสารหลายชนิด เช่น histamine, slow reactive substances, heparin, lipid และ polypeptides สารดังกล่าวมีส่วนร่วมในการทำให้เกิดอาการแพ้ (allergic reactions)



รูปที่ 1.1 องค์ประกอบส่วนต่างๆ ในระบบหายใจตามการแบ่งทางกายวิภาคศาสตร์

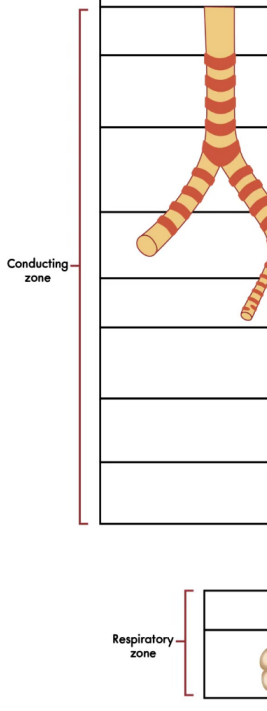
นอกจากนี้การแบ่งส่วนอวัยวะในระบบทางเดินหายใจ ทางสรีรวิทยา (Physiological division) สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน (รูปที่ 1.2) ดังนี้ 1) ส่วนนำอากาศ และ 2) ส่วนแลกเปลี่ยนก๊าซ

1. ส่วนนำอากาศ (Conducting zone)

ส่วนนำอากาศ (Conducting zone) เป็นส่วนที่เป็นทางผ่านของอากาศเริ่มตั้งแต่ nose, pharynx, larynx, trachea, bronchi, bronchioles, terminal bronchioles ตามลำดับ เป็นส่วนที่**ไม่มีการแลกเปลี่ยนก๊าซกับเลือด** ในส่วนนี้มีปริมาตรของอากาศอยู่ประมาณ 150 มิลลิลิตร**หรือ 2 มิลลิลิตรต่อน้ำหนักของร่างกาย 1 กิโลกรัม** อากาศในส่วนนี้จะยังไม่มีการแลกเปลี่ยนก๊าซกับเลือด แต่ถูกปรับอุณหภูมิและความชื้น ทำให้อากาศที่หายใจเข้าปราศจากสิ่งแปลกปลอมและฝุ่นละอองก่อนที่อากาศจะเข้าสู่ถุงลม

2. ส่วนแลกเปลี่ยนก๊าซ (Respiratory zone)

ส่วนแลกเปลี่ยนก๊าซ (Respiratory zone) เริ่มต้นตั้งแต่ respiratory bronchioles, alveolar ducts, alveolar sacs และ alveoli ตามลำดับ มีปริมาตรของอากาศอยู่ประมาณ 350 มิลลิลิตรในขณะหายใจเข้าปกติ ซึ่ง**เป็นส่วนที่มีการแลกเปลี่ยนก๊าซกับเลือด**



Structute	Inner diameter (mm)	Cilia	Goblet cells	Cartilage	Smooth muscle
Larynx	35-45	+++	+++	+++	0
Trachea	20-25	+++	+++	+++ (C-shaped)	0
Primary bronchi	12-16	+++	++	+++ (rings)	++
Secondary bronchi	10-12	+++	++	+++ (plates)	++
Tertiary bronchi	8-10	+++	++	++ (plates)	++
Smaller bronchi	1-8	+++	+	+ (plates)	++
Bronchioles	0.5-1	++	+	0	+++
Terminole bronchioles	< 0.5	++	0	0	+++
Respiratory bronchioles	< 0.5	+	0	0	+
Alveolar sacs	0.3	0	0	0	0

รูปที่ 1.2 โครงสร้างและองค์ประกอบต่างๆ ของระบบหายใจตามการแบ่งทางสรีรวิทยา

หน้าที่ของระบบหายใจ (Functions of respiratory system)

หน้าที่ของระบบหายใจ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ส่วน ดังนี้ 1) หน้าที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ (respiratory functions) 2) หน้าที่ไม่เกี่ยวข้องกับการหายใจ (nonrespiratory functions)

หน้าที่ที่เกี่ยวข้องกับการหายใจ (Respiratory fuctions)

1. การแลกเปลี่ยนก๊าซ (Gas exchange) ระบบหายใจทำหน้าที่ควบคุมปริมาณของก๊าซออกซิเจนในร่างกายให้เพียงพอกับความต้องการของเซลล์ทั่วร่างกายและขับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกนอกร่างกาย ทั้งนี้เพื่อรักษาสภาวะแวดล้อมภายในร่างกายให้อยู่ในสภาพคงที่ (Constant internal environment) นั่นคือ ระดับความดันย่อยก๊าซออกซิเจนในหลอดเลือดแดง (Partial pressure of oxygen in arterial blood, PaO_2) อยู่ในช่วงประมาณ 95-100 มิลลิเมตรปรอท (mm Hg) และความดันย่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหลอดเลือดแดง (Partial pressure of carbondioxide in arterial blood, $PaCO_2$) อยู่ในช่วงประมาณ 35-45 มิลลิเมตรปรอท

2. ควบคุมความเป็นกรด-ด่างของเลือด (Regulation of blood pH) โดยปรับ pH ของร่างกายให้อยู่ที่ประมาณ 7.35-7.45 โดยการควบคุมระดับของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลต่อความเข้มข้นของไบคาร์บอเนตในเลือด

หน้าที่ไม่เกี่ยวข้องกับการหายใจ (Non-respiratory functions)

1. แหล่งสำรองเลือด: หลอดเลือดที่ไปเลี้ยงปอด (Pulmonary vessels) จะมีความสามารถในการยืดขยาย (compliance) สูง จึงมีความสามารถจุเลือดได้ถึงประมาณ 500 มิลลิลิตร ซึ่งปริมาตรเลือดดังกล่าวจะเป็นแหล่งของเลือดจะไหลกลับไปเติมเลือดเข้าสู่หัวใจข้างซ้าย (Left ventricular filling) ต่อไป

2. ควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย โดยการระบายความร้อนออกมากับน้ำที่ระเหยออกมาจากลมหายใจ (Evaporation: Insensible loss)

3. ป้องกันและทำลายสิ่งแปลกปลอมที่ติดเข้ามากับอากาศที่หายใจเข้า เรียกหน้าที่นี้ว่า defense mechanism หรือ phagocytic function โดยอาศัยกลไกดังต่อไปนี้

3.1 แมคโครฟาจที่ปอด (Pulmonary alveolar macrophages) ทำหน้าที่กำจัดเชื้อโรค (phagocytosis) ที่มีขนาดเล็กกว่า 2 ไมครอน ที่หลุดรอดมาถึงถุงลม ส่วนเชื้อโรคหรือสารที่มีขนาด 2-10 ไมครอน จะถูกกำจัดที่ส่วน conducting airways ดังนั้นปอดจึงมีบทบาทเป็น nonspecific defence ของร่างกาย

3.2 Secretory IgA เป็นแอนติบอดีที่เคลือบอยู่บนเยื่อบุผิวตั้งแต่จมูก ทางเดินหายใจส่วนบนและหลอดลม

3.3 ขนจมูก สารที่มีขนาดใหญ่กว่า 10 ไมครอน เช่น ฝุ่นละออง ละอองเกสร จะถูกดักจับไว้ด้วยขนจมูก

4. เกี่ยวข้องกับการทำงานของฮอร์โมนบางชนิด โดยเซลล์บุผนังหลอดเลือดที่ปอด (endothelium of pulmonary blood vessels) จะหลั่งเอนไซม์ที่ชื่อว่า angiotensin converting enzyme (ACE) เป็นหลัก ซึ่ง ACE จะทำหน้าที่เปลี่ยน angiotensin I ให้เป็น angiotensin II นอกจากนี้ยังมีสารบางชนิดสร้างที่ปอดได้ เช่น prostaglandins, kallikrein และ histamine เป็นต้น

5. ทำลายลิ่มเลือดขนาดเล็กๆ ที่มีอยู่ในเลือดโดยกระบวนการที่เรียกว่า fibrinolytic system หรือกล่าวว่าทำหน้าที่เป็นตัวกรอง (circulatory filter) โดยปกติเลือดดำจะมีลิ่มเลือดหรือฟองอากาศขนาดเล็กอยู่ ถ้าสิ่งเหล่านี้ไหลผ่านไปอยู่ในระบบไหลเวียนเลือดแดงทั่วไป อาจมีผลทำให้เกิดเนื้อเยื่อถูกทำลายจากการที่ลิ่มเลือดไปอุดตันหลอดเลือดที่ไปเลี้ยงเนื้อเยื่อเหล่านั้นได้ หลอดเลือดที่ปอดจะมีการดักจับลิ่มเลือดก่อนที่เลือดจะไหลเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือดร่างกาย (Systemic circulatiom) อย่างไรก็ตาม ถ้าลิ่มเลือดมีขนาดใหญ่ เกินความสามารถของระบบไหลเวียนเลือดของปอด (Pulmonary circulation) ในการกำจัด ก็จะทำให้ส่งผลเสียต่อเนื้อเยื่อปอดได้

ระบบประสาทที่มาควบคุมอวัยวะของระบบการหายใจ (Neural control of respiratory system)

ผนังของท่อทางเดินอากาศในระบบหายใจส่วนใหญ่เป็นกล้ามเนื้อเรียบ ดังนั้นจึงถูกควบคุมโดยระบบประสาทอัตโนวัติ (Autonomic Nervous System, ANS) ดังนี้

1. ระบบประสาทพาราซิมพาเทติก (Parasympathetic system) ซึ่งเส้นประสาทที่มาเลี้ยงทางเดินอากาศเป็นเส้นประสาทเวกัส (Vagus nerves) ปลายประสาทหลั่ง acethylcholine (ACh)

2. ระบบประสาทซิมพาเทติก (Sympathetic system) ซึ่งเป็น sympathetic nerve fibers ปลายประสาทหลั่ง norepinephrine (NE)

ระบบประสาทอัตโนวัติจะควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อเรียบ และต่อมที่หลั่ง mucus ที่อยู่ในเยื่อบุผิวของอวัยวะของการหายใจ

ผนังเซลล์ของกล้ามเนื้อเรียบในระบบหายใจจะมีตัวรับ (receptors) ต่อไปนี้

1. Muscarinic-3 receptors (M_3-receptors) ถูกกระตุ้นด้วย acethycholine (ACh)

2. β_2-adrenergic receptors ถูกกระตุ้นด้วย norepinephrine และ epinephrine

ถ้ามีการกระตุ้นระบบประสาทพาราซิมพาเทติก จะทำให้มีการหลั่ง ACh ออกมาจากปลายประสาทและจับกับ M_3-receptors ส่งผลทำให้เกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดลมเล็กลง เกิด**ภาวะหลอดลมตีบ (Bronchoconstriction)** ทำให้แรงต้านทานของท่อทางเดินอากาศ สูงขึ้น อากาศจะไหลผ่านเข้า-ออกจากถุงลมได้ยากขึ้น

ส่วนการกระตุ้นระบบประสาทซิมพาเทติก จะทำให้มีการหลั่ง NE ออกมาจากปลายประสาทและจับกับ β_2-adrenergic receptors ส่งผลทำให้เกิดการคลายตัวของกล้ามเนื้อเรียบ เกิด**ภาวะหลอดลมขยายตัว (Bronchodilation)** ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดลมเพิ่มขึ้น แรงต้านทานของท่อทางเดินอากาศลดลง อากาศไหลผ่านเข้า-ออกจากถุงลมได้ง่ายขึ้น ดังนั้นสารหรือยาที่ออกฤทธิ์กระตุ้น muscarinic receptors (muscarinic agonist) จะทำให้เกิดภาวะ bronchoconstriction ส่วนสารหรือยาที่ออกฤทธิ์กระตุ้นผ่าน β_2-adrenergic receptors (β_2-adrenergic agonist) จะทำให้เกิดภาวะ bronchodilation

การกระตุ้น β_2-adrenergic receptors ที่ต่อมคัดหลั่งยังมีผลทำให้เพิ่มการหลั่งสารคัดหลั่งมากขึ้น (increases bronchial secretion) ในทางตรงกันข้ามถ้ากระตุ้นผ่าน α_2-adrenergic receptors จะยับยั้งการหลั่งสารคัดหลั่ง (inhibits bronchial secretion)

นอกจากนี้หลอดลมยังถูกเลี้ยงด้วยเส้นประสาทที่เป็นชนิด noncholinergic-nonadrenergic nerve fiber ด้วย ซึ่งปลายประสาทจะหลั่ง vasoactive intestinal peptide (VIP) ซึ่งมีผลทำให้เกิดภาวะ bronchodilation

เส้นประสาทที่มาเลี้ยงกล้ามเนื้อของการหายใจ (Nerve of respiratory muscles)

เส้นประสาทที่มาควบคุมการทำงานของกล้ามเนื้อของการหายใจเป็นเส้นประสาทจากเซลล์ประสาทสั่งการ (motor neurons) ในระดับไขสันหลัง ที่ไปเลี้ยงกล้ามเนื้อของการหายใจซึ่งเป็นกล้ามเนื้อลาย ถูกเลี้ยงโดยเส้นประสาทดังต่อไปนี้

1. กล้ามเนื้อกะบังลม ถูกควบคุมโดย phrenic nerves ซึ่งออกมาจากไขสันหลังระดับคอที่ 3, 4, และ 5 (cervical spinal roots C3, C4 และ C5)

2. กล้ามเนื้อลายมัดอื่นๆ ที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการหายใจเข้าและหายใจออกถูกควบคุมโดยเส้นประสาทที่ออกมาจากไขสันหลังระดับทรวงอก คือ intercostal nerves