

วัตถุประสงค์

1. เข้าใจจุดประสงค์ของการบำบัดด้วยออกซิเจน
2. ตระหนักถึง oxygen toxicity
3. เข้าใจชนิดของอุปกรณ์ในการบำบัดด้วยออกซิเจนและเลือกใช้ได้อย่างเหมาะสม

การบำบัดด้วยออกซิเจน (oxygen therapy)

ความต้องการออกซิเจนของร่างกายมนุษย์

ร่างกายของมนุษย์ใช้ออกซิเจนเป็นสารตั้งต้นในการสร้างพลังงานแบบ *aerobic metabolism* จากไขมัน คาร์โบไฮเดรต และโปรตีน หากร่างกายมนุษย์ขาดออกซิเจนซึ่งเป็นสารตั้งต้น การทำงานของเซลล์ในร่างกายจะเข้าสู่กระบวนการ *anaerobic metabolism* เพื่อสร้างพลังงานแทน แต่มีผลข้างเคียงเช่น สร้างพลังงานได้น้อย ทำให้มีกรด lactic คั่ง และที่สำคัญที่สุดคือ **สมอง** ซึ่งเป็นอวัยวะที่ไม่มีความสามารถในการทำ *anaerobic metabolism* ดังนั้นเซลล์สมองที่ขาดออกซิเจนจะสามารถอยู่ได้เพียง 4 นาที และจะเริ่มมีความเสียหายเกิดขึ้นหลังจากนั้น

แต่ทั้งนี้ ไม่ได้แปลว่าร่างกายของมนุษย์จำเป็นต้องอยู่ในสภาวะที่มีออกซิเจนสูง ในชั้นบรรยากาศทั่วไปมีความเข้มข้นของออกซิเจน (FiO_2) แค่ 0.21 เท่านั้น ดังนั้นร่างกายของมนุษย์ถือว่ายอยู่ในภาวะที่มีออกซิเจนจำกัด (*oxygen-restricted environment*) อยู่ตลอดเวลาจึงเรียกได้ว่ามนุษย์นั้นเป็น *microaerophilic organism* หรือสิ่งมีชีวิตที่ต้องการความเข้มข้นของออกซิเจนเพียงเล็กน้อยในการดำรงชีวิต

	Interstitial Fluid	Intracellular Fluid
PO_2	35 mm Hg	5 mm Hg
O_2 Content [†]	0.45 mL/L	0.15 mL/L
Fluid Volume [‡]	16 L	23 L
Volume of O_2	9.6 mL	3.5 mL

[†]Dissolved O_2 content = $\alpha \times PO_2$ where α (solubility coefficient) = 0.03 mL/L/mm Hg for O_2 in water at 37°C.

[‡]Volume estimates are based on total body water (TBW) of 42 liters, an intracellular volume that is 55% of TBW, and an interstitial volume that is 38% of TBW.

ภาพ 1 แสดงถึงระดับออกซิเจนในร่างกายของมนุษย์ ซึ่งมีปริมาณเพียงเล็กน้อยเทียบกับปริมาณทั้งหมด

Hypoxemia

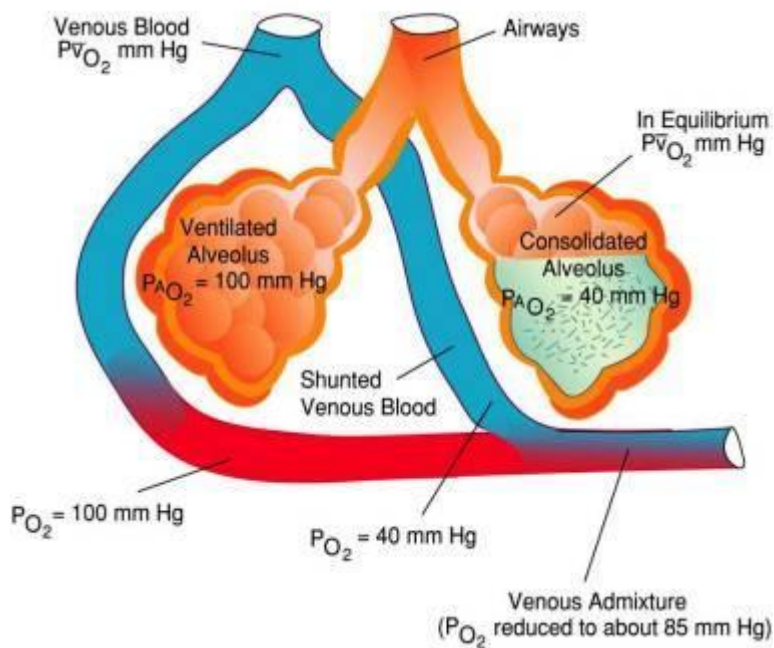
คำศัพท์ที่ควรทราบ

Hypoxemia = ภาวะที่ระดับออกซิเจนในเลือดต่ำกว่าปกติ

Hypoxia = ภาวะที่เนื้อเยื่อในร่างกายได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอต่อความต้องการ(ขาดออกซิเจน)

สาเหตุของ hypoxemia

1. Low P_{iO_2} (F_{iO_2})
2. Impair pulmonary gas exchange คือมีความผิดปกติในการแลกเปลี่ยนแก๊สของปอด ซึ่งมีกลไกต่างๆ ได้แก่
 - o Hypoventilation
 - o Diffusion defect
 - o V/Q abnormality
 - o Shunt hypoxemia



ซึ่งการบำบัดด้วยออกซิเจนไม่ใช่การแก้ที่สาเหตุโดยตรง จึงอาจต้องใช้การรักษาอื่นๆ เช่น airway pressure therapy ร่วมด้วย

3. Low mixed venous oxygen tension (low P_{vO_2}) ซึ่งพบในภาวะที่ความต้องการออกซิเจนของเซลล์มากกว่าปริมาณที่ได้รับ เช่น ภาวะ hypermetabolic state

เมื่อไหร่ถึงเริ่มการบำบัดด้วยออกซิเจนในภาวะ hypoxemia

การบำบัดออกซิเจนนั้นสามารถใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง แต่ในเอกสารประกอบการสอนนี้จะเน้นไปที่การบำบัดออกซิเจนเพื่อแก้ไขหรือป้องกันภาวะ hypoxemia เป็นหลัก

เนื่องจากการให้ออกซิเจนในปริมาณสูงสูงโดยไม่จำเป็นอาจทำให้เกิดภาวะออกซิเจนเป็นพิษ (oxygen toxicity) และร่างกายของมนุษย์สามารถรับมือกับภาวะออกซิเจนไม่เพียงพอได้ในระดับหนึ่ง ดังนั้นจึงมีเป้าหมายอยู่ที่ **อย่าให้ผู้ป่วยมี clinically significant hypoxemia จนทำให้เกิดภาวะที่มีอันตราย** เช่น ภาวะล้มเหลว (organ failure), เพิ่มแรงในการช่วยหายใจ (work of breathing) จนเป็นภาระแก่ระบบปอดและหัวใจ (increase cardiopulmonary workload) หรือมีภาวะ respiratory distress โดยแบ่งกลุ่มผู้ป่วยเป็น 2 กลุ่มคร่าวๆ ดังนี้

1. Acute hypoxemia

เป้าหมายคือ PaO₂ > 60 mmHg หรือ SaO₂ > 90%

2. Acute on top chronic hypoxemia

คนไข้ในกลุ่ม chronic hypoxemia เช่น COPD ร่างกายมักมีการปรับตัวเพื่อให้ทนต่อสภาวะออกซิเจนต่ำมาเป็นระยะเวลานาน การให้ออกซิเจนที่สูงเกินไปอาจจะทำให้ respiratory center หยุดทำงานได้

เป้าหมายคือ ลดอาการและอาการแสดงต่างๆ ที่เกิดจาก severe hypoxemia เช่น dyspnea, mental dysfunction, heart failure ในบางกรณีอาจให้ผู้ป่วยอยู่ที่ภาวะ hypoxemia เดิมของคนไข้ หรือให้อยู่ในภาวะ mild hypoxemia

การบำบัดด้วยออกซิเจนสำหรับภาวะอื่นๆ

- การบำบัดด้วยออกซิเจนเพื่อลดขนาดของอากาศหรือก๊าซอื่นใดที่อยู่ในโพรงปิดภายในร่างกาย (enhance absorption of air space)

เพื่อให้ออกซิเจนเข้าไปแทนที่ก๊าซในโพรงอากาศในร่างกาย เนื่องจากออกซิเจนจะถูกดูดซึมเข้ากระแสเลือดได้เร็ว ทำให้โพรงอากาศเล็กลงเร็ว เช่น

1. ลดอาการท้องอืดจากก๊าซหลงเหลือในช่องท้อง หลังการผ่าตัดในช่องท้อง (decrease abdominal distention after laparotomy and laparoscopy)
2. ช่วยเร่งการดูดซึมก๊าซในช่องเยื่อหุ้มปอด (enhance absorption of pneumothorax)
3. ลดอาการปวดศีรษะหลังทำ pneumoencephalography

ภาวะแทรกซ้อนจากการบำบัดด้วยออกซิเจนที่สำคัญและภาวะออกซิเจนเป็นพิษ (significant complication from oxygen therapy and oxygen toxicity)

ภาวะแทรกซ้อนของการบำบัดด้วยออกซิเจนมีดังนี้

1. Cut off hypoxemic ventilatory drive
2. Oxygen toxicity
3. Drying of secretion
4. Denitrogenation absorption atelectasis
5. Other complication

Cut off hypoxemic ventilatory drive

ในผู้ป่วยที่มีโรคปอดเรื้อรังบางกลุ่ม เช่น COPD ซึ่งมีภาวะคาร์บอนไดออกไซด์คั่งสูงมานาน ทำให้ศูนย์ควบคุมการหายใจ (respiratory center) ไม่ตอบสนองต่อภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูง แตกต่างจากคนปกติ แต่ในคนไข้กลุ่มนี้ respiratory center จะตอบสนองต่อภาวะออกซิเจนที่ต่ำลงในกระแสเลือดเท่านั้น ซึ่งปกติคนไข้กลุ่มนี้จะมีออกซิเจนในเลือดต่ำอยู่แล้ว เรียกว่า *hypoxic ventilatory drive*

แต่เมื่อได้รับออกซิเจนจนทำให้ค่า PaO₂ สูงเกิน 60-70 mmHg จะทำให้ไม่มี hypoxic ventilatory drive ผู้ป่วยจะหายใจช้าลงและคาร์บอนไดออกไซด์จะสูงขึ้น จนในที่สุดทำให้เกิดการกดการทำงานของสมอง หยุดหายใจ ไปจนถึงเสียชีวิตได้

ในผู้ป่วยที่เราสงสัยว่ามี ventilatory drive ผิดปกติ ให้เริ่มให้ออกซิเจนในความเข้มข้นน้อย ๆ ก่อนอย่างระมัดระวัง ซึ่งอุปกรณ์ที่ให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนได้อย่างแม่นยำ จะเป็นอุปกรณ์ประเภท fixed-performance หรือ venturi mask (เริ่มจาก FiO₂ 24%, 28%, 32%, 36% ไปจน 40%) หรือสามารถเริ่มจาก oxygen cannula น้อยๆ ก็ได้ (เริ่มจาก 1 LPM เพิ่มครั้งละ 0.5-1 LPM)

หากผู้ป่วยเกิดภาวะ Cut off hypoxemic ventilatory drive แล้ว (เกิดการหายใจช้าลง คาร์บอนไดออกไซด์คั่ง จนนำไปสู่การกดของสมอง หรือ CO₂ narcosis) การแก้ไขคือ ช่วยหายใจเพื่อลดภาวะ respiratory acidemia กระตุ้นหายใจถ้าสามารถทำได้ แล้วค่อยๆ ลด FiO₂ ลง ห้ามหยุดให้ออกซิเจนทันทีอย่างเด็ดขาดเพราะผู้ป่วยกำลังถูกกดการหายใจอย่างมาก ร่างกายจะขาดออกซิเจนและเสียชีวิตได้

Oxygen toxicity

ออกซิเจนเมื่อให้ในปริมาณที่สูงเกินไปจะเป็นอันตรายแก่ร่างกาย เนื่องจากใน aerobic metabolism หลังจากร่างกายได้พลังงานแล้ว เซลล์จากพยายามเปลี่ยนออกซิเจนให้กลายเป็นน้ำ โดยในกระบวนการนี้ออกซิเจน (oxygen metabolite) จะอยู่ในรูปแบบของ oxidants ซึ่งมีความสามารถในการทำลายเนื้อเยื่อและส่วนประกอบของเซลล์

โดยปกติแล้วภาวะออกซิเจนเป็นพิษไม่เกิดขึ้นเนื่องจากร่างกายสามารถเปลี่ยนออกซิเจนให้เป็นน้ำได้ถึง 95% และมีสารที่เป็นพิษ (oxygen metabolite) เพียงแค่ 3-5% เท่านั้น และร่างกายมีการทำงานของสารที่มีความสามารถในการต้านความเป็นพิษของออกซิเจนอยู่หรือที่เรียกว่า antioxidants

ซึ่งในผู้ป่วยวิกฤติหรือ Critically ill patient จะมีการลดลงของสาร antioxidants เป็นอย่างมากทำให้ผู้ป่วยกลุ่มนี้มีโอกาสจะมีภาวะออกซิเจนเป็นพิษได้ง่าย

Oxygen metabolite มีความสามารถในการกระตุ้น inflammatory response ทั้งที่บริเวณปอดและทั่วร่างกาย ซึ่งคนไข้ที่ได้รับออกซิเจนสูงเกินไป สามารถมีอาการแสดงได้ดังนี้:

Pulmonary oxygen toxicity

เมื่อมนุษย์หายใจแก๊สที่มีความเข้มข้นของออกซิเจนสูงมากกว่า 60% เป็นเวลานานมากกว่า 48 ชั่วโมงขึ้นไปจะทำให้มีการอักเสบของปอด (inflammatory lung injury) จากเม็ดเลือดขาว (neutrophil) ที่เข้าไปสะสมในถุงลมของปอด เกิดการทำลายชั้นเซลล์ที่อยู่รอบถุงลม จนในที่สุดจะทำให้การแลกเปลี่ยนแก๊สของปอดแย่ลง ภาวะนี้เรียกว่า acute lung injury หรือในกรณีรุนแรงเรียกว่า acute respiratory distress syndrome

Systemic oxygen toxicity

สาร oxidants จัดเป็นสารประเภท free radical ซึ่งเมื่อเกิดภาวะเป็นพิษแล้ว จะเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่ทำให้เกิด oxygen toxicity ทั่วร่างกาย เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดภาวะการทำงานของอวัยวะล้มเหลวทั่วร่างกาย (multiorgan failure) ในกลุ่มคนไข้วิกฤต

Drying of secretion

ในอุปกรณ์ให้ออกซิเจนที่ให้ความชื้นไม่เพียงพอ จะทำให้เสมหะและสารคัดหลั่งในทางเดินหายใจแห้ง ทำให้เกิดการคั่งค้างของเสมหะ นำไปสู่ภาวะแทรกซ้อนอื่นๆ เช่น ปอดแฟบ ปอดบวม เป็นต้น

Absorption atelectasis

ในอากาศปกตินั้นจะมีแก๊สไนโตรเจนอยู่ ซึ่งแก๊สไนโตรเจนนั้นเป็นแก๊สที่ร่างกายไม่ได้ใช้ ในถุงลมจึงไม่มีการดูดซึม ก๊าซไนโตรเจน ทำให้ในการหายใจในชั้นบรรยากาศปกติถุงลม จะมีแก๊สไนโตรเจนเหลืออยู่และไม่ยุบตัว แต่เมื่อคนไข้ได้รับออกซิเจน 100% ถุงลมจะดูดซึมออกซิเจนออกไปจนหมด ทำให้ถุงลมปิดแฟบ

การป้องกันภาวะ absorption atelectasis ในขณะที่ให้การบำบัดผู้ป่วยด้วยออกซิเจน ทำได้โดยการใช้ FiO₂ ที่ต่ำที่สุดเท่าที่จะทำได้ และกระตุ้นให้ผู้ป่วยมีการหายใจเข้าลึกๆ เป็นระยะ

อุปกรณ์ให้ออกซิเจนและการเลือกใช้ (oxygen delivery system)

ประเภทของอุปกรณ์ให้ออกซิเจน

การแบ่งชนิดของอุปกรณ์ให้ออกซิเจนสามารถแบ่งได้หลายแบบในเอกสารประกอบการสอนครั้งนี้จะแบ่งตาม **ลักษณะการทำงานของอุปกรณ์**

1. Low flow system
2. Reservoir system
3. High flow system
4. Enclosure/environmental system ซึ่งอาจไม่มีการจัดประเภทอุปกรณ์ชนิดนี้ในหนังสือบางเล่ม โดยรวม Enclosure oxygen delivery system หมายถึงอุปกรณ์ให้ออกซิเจนที่ครอบผู้ป่วยทั้งตัว เช่น oxygen box หรือ hyperbaric chamber

Low flow oxygen delivery system

เป็นอุปกรณ์ให้ออกซิเจนที่ให้ flow ในระดับต่ำ กล่าวคือ **ต่ำกว่าที่ผู้ป่วยหายใจ (inspiratory flow demand)** โดยปกติคือน้อยกว่า 8-10 LPM ทำให้ทุกครั้งที่การหายใจของผู้ป่วยจะมีการดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมด้วยเสมอ ตัวอย่างอุปกรณ์ประเภท low flow system ที่พบได้ทั่วไปคือ *nasal cannula*

Nasal cannula



จัดเป็นหนึ่งในอุปกรณ์ให้ออกซิเจนที่พื้นฐานที่สุด เนื่องจากตัวอุปกรณ์ไม่มี reservoir จึงให้ออกซิเจนได้สูงสุดแค่ 6 LPM ซึ่งอัตราการไหลนี้ไม่เพียงพอกับอัตราการไหลของอากาศในลมหายใจปกติของคนใช้ (ในการหายใจปกติแบบ quiet breathing มี inspiratory flow rate ที่ 15 LPM) ทำให้มีการผสมของอากาศภายนอกเสมอ nasal cannula จึงจัดเป็นอุปกรณ์ที่เพิ่มออกซิเจนได้เพียงเล็กน้อย

จุดเด่นของ Nasal cannula คือสามารถใช้งานได้ง่ายและไม่ระคายเคืองผู้ป่วยมาก แต่มีข้อเสียคือไม่เหมาะสมอย่างยิ่งในผู้ป่วยที่หายใจหอบเหนื่อยหรือต้องการความเข้มข้นของออกซิเจนสูง ไม่ควรเปิด flow สูงกว่า 6 LPM เพราะจะเกิดการระคายเคืองเยื่อจมูกเป็นอย่างมาก

ตารางแสดงความเข้มข้นของออกซิเจนในผู้ป่วยมาตรฐานที่หายใจปกติ*

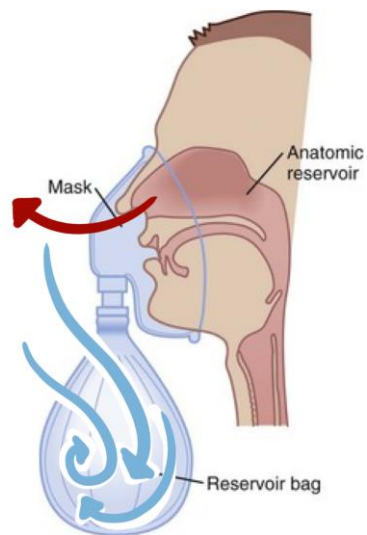
O2 delivery device	FGF(LPM)	Predicted FiO2
Nasal cannula	1	0.24
	2	0.28
	3	0.32
	4	0.36
	5	0.4
	6	0.44

* การหายใจปกติในที่นี้หมายถึงการหายใจสม่ำเสมอ ที่มี Tidal volume 300-700 mL และอัตราการหายใจ <25 ครั้งต่อนาที

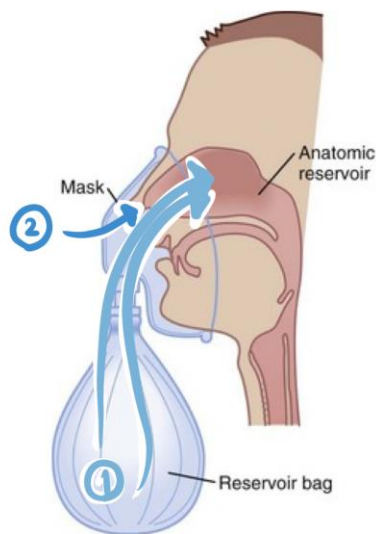
Reservoir system

Reservoir แปลภาษาไทยคือที่เก็บสะสม ในกรณีนี้หมายถึงช่องว่างที่สามารถเก็บออกซิเจนเพื่อนำไปใช้ในช่องหายใจเข้า Reservoir ธรรมชาติในร่างกายของมนุษย์คือโพรงไซนัส และ reservoir ในอุปกรณ์ให้ออกซิเจนสามารถเป็นได้ตั้งแต่ช่องของอุปกรณ์เอง เช่น ตัวยาน้ำกากให้ออกซิเจน ซึ่งมีความสามารถเป็นโพรงอากาศได้ หรือ bag ในอุปกรณ์ให้ออกซิเจน ซึ่งออกแบบมาให้เป็นที่กักเก็บออกซิเจนโดยตรง

เมื่อให้ออกซิเจนผ่านอุปกรณ์ให้ออกซิเจน ออกซิเจนจะเข้าไปในโพรง reservoir ก่อน ทำให้อากาศใน reservoir เป็นออกซิเจนปริมาณหนึ่ง เมื่อคนไข้หายใจเข้า ก็จะสูดอากาศที่เต็มไปด้วยออกซิเจนใน reservoir เข้าไป รวมกับออกซิเจนจากอุปกรณ์ให้ออกซิเจน ทำให้คนไข้ได้รับความเข้มข้นของออกซิเจนที่สูงขึ้น



รูปแสดงการทำงานของ reservoir ในช่วงหายใจออก ออกซิเจนจะเข้ามาในถุง reservoir



รูปแสดงการทำงานของ reservoir ในช่วงหายใจเข้า อากาศที่เต็มไปด้วยออกซิเจนใน reservoir จะถูกหายใจเข้าไปก่อน ตามด้วยอากาศภายนอก

Face mask



เป็น *reservoir system* ซึ่งสามารถให้ FiO_2 ได้สูงกว่า nasal cannula โดยไม่ระคายเคืองเยื่อจมูก สามารถให้ความชื้น (humidification) ได้ดีกว่า แต่มีข้อเสียคือ ผู้ป่วยจะไม่สามารถรับประทานอาหารหรือดื่มน้ำได้ และหากเป็นหน้ากากชนิดครอบแน่น อาจจะทำให้รู้สึกเหมือนหายใจไม่พอได้

Face mask มีหลายชนิด ในที่นี้จะพูดถึง *simple face mask*, *partial rebreathing mask*, *non-rebreathing mask*

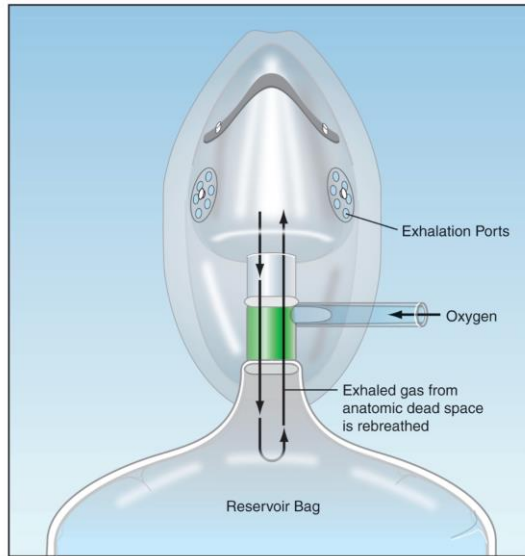
Simple face mask

เป็นหน้ากากธรรมดา ที่ไม่มี reservoir ติดอยู่ จึงนับตัวหน้ากากเป็น reservoir ขนาด 50 mL มีรูสำหรับรับออกซิเจนเป็นรูสำหรับสายเล็กๆ อุปกรณ์ให้ออกซิเจนที่จะต่อกับ simple face mask จึงไม่ควรเป็นอุปกรณ์ที่ให้ความชื้นแบบ nebulizer เพราะจะทำให้มีความชื้นตกค้างเป็นน้ำในสายได้ สามารถใช้ flow ได้ตั้งแต่ 6-12 LPM (FiO_2 35%-65%)

O2 delivery device	FGF(LPM)	Predicted FiO_2
Simple mask	6	0.4
	7	0.5
	8	0.6

Partial rebreathing mask

เป็นหน้ากากที่มี reservoir ขนาด 500 mL ด้วยแต่ระหว่าง mask และ reservoir มีทางให้อากาศจากการหายใจออก ส่วนต้น(ซึ่งยังไม่มีคาร์บอนไดออกไซด์)เข้าไปผสมใน reservoir อยู่บ้าง ควรใช้ flow ไม่ต่ำกว่า 6 LPM เพื่อป้องกันลมหายใจออกส่วนท้าย(ซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์สูง ออกซิเจนต่ำ)เข้ามาใน reservoir ปกตินิยมให้ flow 8-10 LPM (FiO₂ 0.6-0.9) แต่อาจใช้สูงกว่านั้นได้

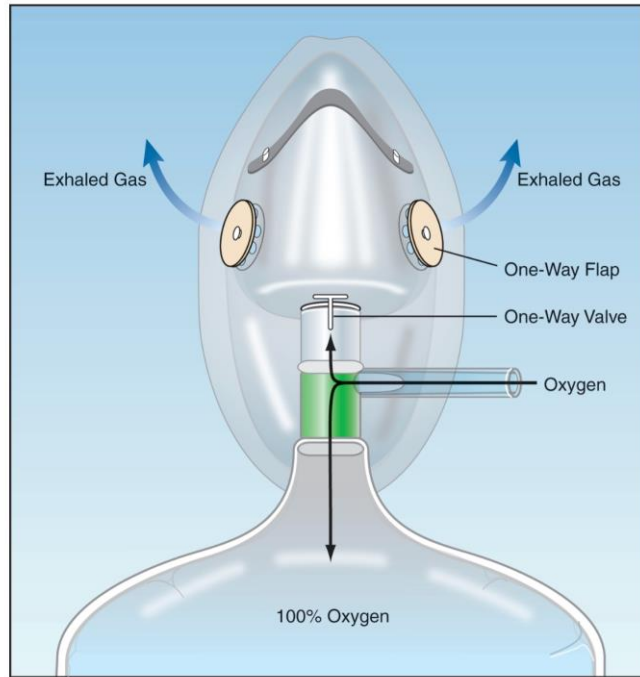


รูปแสดงการทำงานของ partial rebreathing mask ลมหายใจออกส่วนหนึ่ง(ประมาณ 100-150 mL) จะไหลกลับเข้ามาอยู่ใน reservoir bag ซึ่งมักเป็นอากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์น้อย อุปกรณ์ชนิดนี้จึงให้ค่าความเข้มข้นของออกซิเจนได้สูง แต่ไม่ถึง 100%

O ₂ delivery device	FGF(LPM)	Predicted FiO ₂
Partial rebreathing mask	6	0.6
	7	0.7
	8	0.8
	9	>0.8
	10	>0.9

Non-rebreathing mask

หน้ากากชนิดนี้จะมี One way valve คั่นอยู่ระหว่าง reservoir กับหน้ากาก ทำให้อากาศที่เข้ามาสู่ reservoir จะเป็นออกซิเจน 100% จากแหล่งจ่ายออกซิเจนเท่านั้น ดังนั้นในทางทฤษฎี ถ้าขนาดของ reservoir ใหญ่พอ เปิด flow มากพอ และครอบหน้ากากได้สนิทมิดชิด จะสามารถให้ความเข้มข้นออกซิเจน 100% กับผู้ป่วยได้ แต่ปฏิบัติได้ยากในการรักษาจริง นิยมเริ่มให้ flow ที่ 10 LPM แต่สามารถเพิ่มได้เพื่อเติม reservoir ให้เพียงพอกับการหายใจของผู้ป่วย

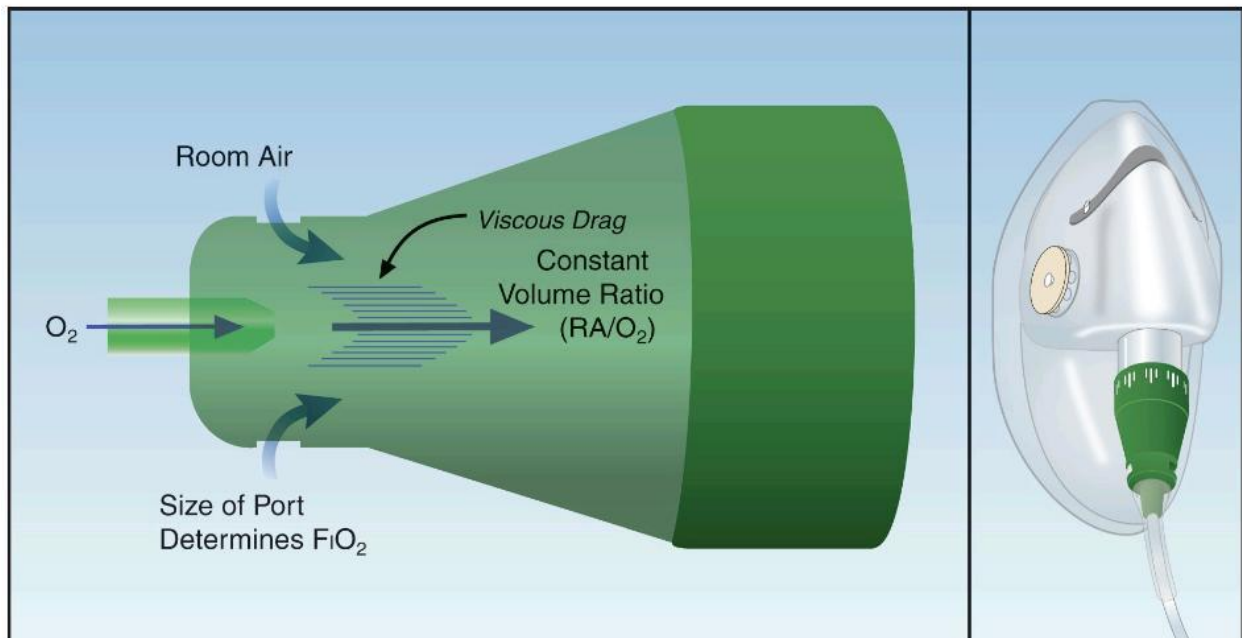


รูปแสดง One way valve ใน non-rebreathing mask การมี valve ทำให้ลมหายใจไม่ย้อนกลับเข้าไปในถุง reservoir

High flow oxygen delivery system

เป็นอุปกรณ์ให้ออกซิเจนที่สามารถให้ flow ได้สูงมากกว่าที่ผู้ป่วยหายใจอยู่ ทำให้ไม่มีการดึงอากาศภายนอกเข้ามา รวม คนไข้จึงได้รับความเข้มข้นของออกซิเจนที่หายใจเข้าไปในปริมาณที่สม่ำเสมอ (fixed performance) ซึ่งอุปกรณ์ที่สามารถให้ flow สูงเช่นนี้มีหลายประเภท คือ

1. **High flow meter** คือใช้ flow meter ที่มีความสามารถในการจ่าย flow ได้ในระดับสูง เช่น ถึง 70 LPM อุปกรณ์เช่นนี้ flow ที่ออกมาจะต้องผ่าน heated humidifier เพื่อให้ความชื้นและความร้อนให้เพียงพอไม่เช่นนั้นนั้นจะระคายเคืองทางเดินอากาศเป็นอย่างมาก ปัจจุบันอุปกรณ์ที่ใช้เทคนิคนี้ คือ high flow nasal cannula
2. **Gas blending system** เป็นระบบที่ใช้ใน ventilator มีทั้งแหล่งจ่ายออกซิเจนและอากาศความดันสูงผ่านตัวจ่ายที่จะควบคุมทั้งความดันและ flow ของอากาศที่เข้าสู่คนไข้ อุปกรณ์เช่นนี้ต้องการการดูแลสูงและมีการตรวจสอบจากบริษัทผู้ผลิตอย่างสม่ำเสมอ
3. **Air-entrainment system** คือระบบที่ใช้หลักการการทำงานของ venturi's effect โดยเป็นการดึงอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับออกซิเจนจาก flow meter จ่ายอากาศที่ใช้ทั่วไป มีสองประเภทคือ
 - o **Air-entrainment mask** ตัวอุปกรณ์ดูดอากาศจะอยู่ที่หน้ากาก
 - o **Air-entrainment nebulizer** คือตัวอุปกรณ์ดูดอากาศ จะอยู่ที่กระป๋อง nebulizer หรือคือกระป๋อง nebulizer ที่ต่อกับ flow meter ที่กำแพงที่เราพบเห็นทั่วไป ลมที่ออกมาจากกระป๋อง nebulizer นี้จะมีความเข้มข้นของออกซิเจนตามที่ปรับ และมี flow ที่สูงเพียงพอกับการสูดหายใจของคนไข้ สามารถนำไปต่อกับอุปกรณ์ได้หลายชนิดเช่น Aerosol mask, t-piece, tracheostomy mask (collar mask)



ภาพแสดงการทำงานของอุปกรณ์ชนิด air entrainment device การผ่านออกซิเจนเข้าไปในรูแคบๆ จะทำให้เกิดการดึงอากาศภายนอกเข้ามา ทำให้ปริมาณลมหลังจากผ่านรูนี้ มีปริมาณมากขึ้นจากอากาศที่เข้ามาผสม

Aerosol mask

คือหน้ากากที่มีช่องรับอากาศขนาดใหญ่ไว้สำหรับอุปกรณ์ที่มีการให้ความชื้นแบบ nebulizer ซึ่งช่องนี้อาจจะต่อกับยาขยายหลอดลม หรือนำไปต่อกับอุปกรณ์จ่ายอากาศแบบ air-entrainment device ก็จะได้ face mask ที่จ่ายอากาศแบบ high flow หรือที่นิยมเขียนว่า oxygen mask with nebulizer ดังนั้น ในใบคำสั่งการรักษาของแพทย์ อุปกรณ์ชนิดนี้จึงมีการเขียน FiO2 ควบคู่

การคำนวณ flow ที่ผู้ป่วยได้รับเมื่อใช้อุปกรณ์ชนิด air entrainment device



ก่อนอื่น ให้พึงเข้าใจว่า flow ที่เปิดจาก oxygen flow meter จะผ่านอุปกรณ์ air entrainment device และดูอากาศโดยรอบเข้าไปทำให้ flow ที่ผู้ป่วยได้รับสูงกว่า flow ที่เปิดจาก oxygen flow meter สูตรการคำนวณคือ

Air entertainment ratio =

$$\frac{V_A}{V_0} = \frac{(1 - F_{iO_2})}{(F_{iO_2} - 0.21)}$$

โดย VA คือ สัดส่วนอัตราการไหลของอากาศไปสู่ผู้ป่วย และ VO คือ สัดส่วนอัตราการไหลของออกซิเจนไปสู่ผู้ป่วย

ตัวอย่าง

หากตั้ง FiO₂ ที่อุปกรณ์ไว้ที่ 0.4 และเปิด oxygen flow meter ไว้ที่ 10 LPM ถามว่า ผู้ป่วยจะได้รับ total flow กี่ลิตร? เริ่มจากสูตร air entrainment ratio เราทราบ FiO₂ แล้ว และต้องการหาสัดส่วน(VA/VO)

$$\frac{V_A}{V_0} = \frac{(1 - 0.4)}{(0.4 - 0.21)}$$

$$\frac{V_A}{V_0} = \frac{0.6}{0.2} = \frac{3}{1}$$

ดังนั้น อัตราส่วน flow ของ air ต่อ oxygen คือ 3:1 (มีอากาศถูกดูดมา 3 ส่วนต่อออกซิเจน 1 ส่วน)

เปิด oxygen flow meter 10 LPM จึงมีอากาศถูกดูดเข้ามาผสม 30 LPM

ดังนั้น total flow = 10+30 = 40 LPM

จะเห็นว่าหากเปิด oxygen flow meter น้อยลง เช่น 8 LPM ก็จะทำให้ total flow ลดลง เหลือแค่ 32 LPM (oxygen 8 air 24) ดังนั้นการเปิด flow น้อยเกินไปในอุปกรณ์ชนิดนี้จะทำให้ผู้ป่วยรับ flow ไม่พอได้

นอกจากนั้น หากปรับ FiO₂ สูงๆ ที่ oxygen flow meter เท่าเดิม total flow จะลดลงเนื่องจาก air entrainment ratio ลดลง(มีอากาศถูกดูดเข้ามาน้อยลง) พิสูจน์สูตรได้ดังนี้

$$\frac{V_A}{V_0} = \frac{(1 - 0.8)}{(0.8 - 0.21)}$$

$$\frac{V_A}{V_0} = \frac{0.2}{0.6} = \frac{1}{3}$$

จะเห็นว่าอัตราส่วนกลายเป็น มีอากาศถูกดูดเข้ามา 1 ส่วน ต่อออกซิเจน 3 ส่วน

ดังนั้น ถ้าเปิด oxygen flow meter ที่ 10 LPM จะมี air เข้ามา 3.33 LPM ทำให้ total flow เหลือแค่ 10.33 LPM ซึ่งไม่เพียงพอกับการหายใจของผู้ป่วย ถ้าหากต้องการให้ได้ total flow 40 LPM ต้องเปิดออกซิเจนถึง 30 LPM!

High flow nasal cannula(HFNC)



โดยปกตินั้น การให้ออกซิเจนผ่านทาง nasal cannula ไม่สามารถเปิด flow ให้มากพอกับการสูดหายใจ(40-60 LPM) ได้ เพราะอากาศนั้นไม่มีความชื้นมากพอ การอัดอากาศเข้าไปในปริมาณมากๆ อากาศที่แห้งนั้นจะทำให้เกิดการระคายเคือง เยื่อจมูกเป็นอย่างมากจากการสูญเสียความชื้น

HFNC คืออุปกรณ์ที่ให้ความชื้นและความร้อนกับอากาศ (ความชื้นสัมพัทธ์ 100% และอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส) ทำให้ออกซิเจนจากอุปกรณ์นี้สามารถให้ทางจมูกด้วย flow ที่สูงได้ เนื่องจากอากาศจาก HFNC มีความชื้น(ไอน้ำ)100% จึงไม่ระคายเคืองเยื่อแม้มมี flow สูง

HFNC เป็นนวัตกรรมใหม่ที่เริ่มใช้กันแพร่หลาย เนื่องจากมีข้อดีดังนี้

1. เป็นอุปกรณ์ non-invasive คนไข้ให้ความร่วมมือดีกว่า
2. เป็นการให้ PEEP แก่คนไข้จากลมที่เข้าไปในบริเวณคอกหอย ทำให้ P/F ratio ดีขึ้น
3. งานวิจัยพบว่า ช่วยลดอัตราการ intubation ในคนไข้ hypoxemia บางกลุ่ม

HFNC สามารถตั้งค่า FiO_2 ได้ 21%-100% และ flow ตั้งแต่ 1-60 LPM

ความคงที่ของออกซิเจนที่ได้จากอุปกรณ์ให้ออกซิเจน (Fixed and variable performance of oxygen delivery system)

อุปกรณ์ให้ออกซิเจนบางประเภทอาจไม่สามารถทำให้ผู้ป่วยได้รับความเข้มข้นของออกซิเจนในอากาศที่หายใจ (FiO₂) อย่างคงที่ อุปกรณ์เหล่านี้เรียกว่า variable performance Oxygen delivery system (อุปกรณ์ที่ให้ความเข้มข้นของออกซิเจนไม่คงที่)

ในขณะเดียวกันอุปกรณ์ที่สามารถให้ FiO₂ ได้คงที่ โดยไม่ขึ้นกับการหายใจของผู้ป่วย อุปกรณ์เหล่านี้เรียกว่า fixed performance oxygen delivery system (อุปกรณ์ที่ให้ความเข้มข้นของออกซิเจนคงที่)

Fixed performance oxygen delivery system and its condition

อุปกรณ์ที่ให้ความเข้มข้นของออกซิเจนได้คงที่ จะเกิดขึ้นได้เมื่อ ตัวอุปกรณ์นั้นสามารถจ่ายก๊าซได้เพียงพอกับการหายใจของคนไข้ในแต่ละครั้ง โดยไม่มีการรบกวนจากอากาศภายนอก ทำให้ค่า FiO₂ ที่ผู้ป่วยได้รับคงที่

อุปกรณ์ที่เป็น fixed performance system

1. High flow system ที่ให้ total flow ได้เพียงพอกับการสูดหายใจของคนไข้
2. Reservoir system with non-rebreathing valve โดยทั่วไปหมายถึง oxygen mask with bag with non-rebreathing mask
3. Environmental oxygen delivery system

Variable performance oxygen delivery system and FiO₂ calculation

อุปกรณ์ที่ให้ความเข้มข้นของออกซิเจนไม่คงที่ ผู้ป่วยจะได้รับ FiO₂ ตามการเปลี่ยนแปลงของลักษณะการหายใจ เนื่องจากระบบไม่สามารถจ่ายก๊าซได้เพียงพอต่อการหายใจเข้าในแต่ละครั้ง จึงมีการสูดนำอากาศภายนอกเข้ามาผสมด้วย (air dilution) ซึ่งในผู้ป่วยที่หายใจตื้นหรือหายใจลึก การหายใจแต่ละครั้งก็จะทำให้ปริมาณอากาศที่ถูกดึงเข้ามาผสมในแต่ละลมหายใจไม่เท่ากัน ทำให้ FiO₂ ไม่คงที่

อุปกรณ์ที่เป็น variable performance system ได้แก่

1. Low flow system
2. Reservoir system ยกเว้น non-rebreathing mask
3. High flow system ที่จ่ายลมไม่เพียงพอกับการหายใจของคนไข้

ตัวอย่างการคำนวณค่าความเข้มข้นของออกซิเจนที่ผู้ป่วยจะได้รับ ในอุปกรณ์ชนิด variable performance

1. Simple mask FGF 6 LPM

- กำหนดให้ผู้ป่วยหายใจสม่ำเสมอด้วย tidal volume = 500 mL, RR = 20/min, $T_{in} = 1$ sec, $T_{ex} = 2$ sec
- Simple mask มี reservoir 50 mL
- FGF ที่ผู้ป่วยได้รับคือ 6LPM/1 sec = 100 mL
- ดังนั้นผู้ป่วยจะสูดออกซิเจน(FiO_2 1.0)จาก FGF 100 mL + reservoir 50 mL = 150 mL
- และสูดอากาศภายนอกอีก 500-150 mL = 350 mL (มี FiO_2 0.2)

	Volume	Concentration	Oxygen(mL)	
FGF	100	100%	100	
Reservoir	50	100%	50	
Air dilution	350	20%	70	
	500		220	=44%

2. High flow system: Oxygen mask with nebulizer FiO_2 0.4, 8 LPM

- กำหนดให้ผู้ป่วยหายใจสม่ำเสมอด้วย tidal volume = 800 mL, RR = 20/min, $T_{in} = 1$ sec, $T_{ex} = 2$ sec
- ดังนั้นผู้ป่วยจะสูดหายใจด้วย flow 800mL/1sec = 48 LPM
- Total flow ที่ FiO_2 0.4 oxygen flow 8 LPM = 32 LPM
- ดังนั้น FGF ที่ผู้ป่วยได้รับจึงไม่เพียงพอ จึงมีการสูดอากาศภายนอกเข้ามา
- ผู้ป่วยได้รับ FGF ที่มี FiO_2 0.4 = 533 mL
- Reservoir มี FiO_2 0.4 อีก 50 mL
- Air dilution = 217 mL ที่มี $FiO_2 = 0.2$

	Volume	Concentration	Oxygen(mL)	
FGF	533	40%	213	
Reservoir	50	40%	20	
Air dilution	217	20%	43	
	800		276	=34.5

- ดังนั้นใน High flow system ที่เราเปิด oxygen flow ไม่เพียงพอ FiO_2 ที่ผู้ป่วยได้รับจริงๆ จะไม่เท่ากับที่ตั้งไว้ ซึ่งกรณีนี้มักพบได้ในกลุ่มผู้ป่วยที่ 1. ตัวใหญ่ tidal volume มาก 2. หอบเหนื่อย สูดหายใจเข้าแรง ลึก 3. เปิด FiO_2 สูงๆ เพราะ total flow จะลดลง

โดยเฉพาะการเขียนคำสั่งให้ออกซิเจนแบบ routine จะเจอกรณีเช่นนี้ได้มาก การเลือกอุปกรณ์และปริมาณของออกซิเจนที่จะให้กับผู้ป่วย จึงต้องคำนึงถึงสภาพร่างกายของผู้ป่วยเสมอ