

Ventilator Room

Ventilator Waveforms : Made Easy (Part 4)

ผศ.นพ. สุทัศน์ รุ่งเรืองหิรัญญา, FCCP
หน่วยโรคทางเดินหายใจและเวชบำบัดวิกฤต
ภาควิชาอายุรศาสตร์ คณะแพทยศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

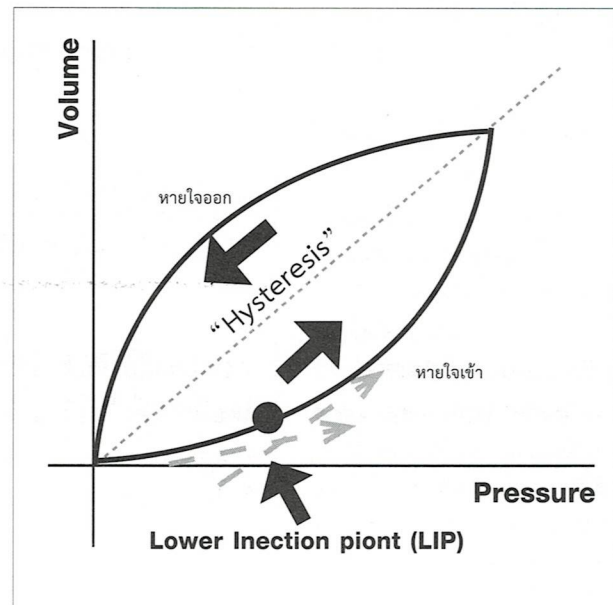
(ต่อจากตอนที่แล้ว)

Pressure-Volume Loop

เป็นกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดัน (แกน X) กับปริมาตร (แกน Y) โดยการหายใจแต่ละครั้งจะทำให้กำเนิดกราฟเป็นรูปคล้ายกระสวยวงตัวในแนวเฉียง มีปลายเรียวทั้งสองด้าน โดยเส้นกราฟที่เป็นขอบล่างของกระสวยจะเป็นเส้นกราฟจากการหายใจเข้า ในขณะที่เส้นกราฟด้านบนเกิดขึ้นจากการหายใจออก

กายวิภาคของกราฟ

รูปร่างของกราฟชนิดนี้ประกอบด้วยเส้นโค้ง 2 เส้นบรรจบกัน โดยกราฟเส้นล่างเกิดจากการหายใจเข้า เมื่ออากาศไหลเข้าสู่ปอด ทั้งแรงดันและปริมาตรของปอดก็จะเพิ่มขึ้นอย่าง exponential เห็นเป็นเส้นโค้งหงายขึ้น จุดสูงสุดของกราฟแทน tidal volume ของการหายใจในครั้งนั้น เมื่อการหายใจเข้าสิ้นสุด อากาศจะเริ่มไหลออกจากปอด ทำให้แรงดันและปริมาตรลดลงตามลำดับเกิดเป็นการหายใจออก เส้นกราฟของการหายใจออกก็จะเกิดขึ้นโดยมีจุดเริ่มต้นอยู่ที่จุดเดียวกันกับจุดสิ้นสุดของการหายใจเข้า จากนั้นเส้นกราฟจะโค้งลงไปบรรจบที่จุดเริ่มต้นของการหายใจเข้าเดิมถือเป็นการครบรอบของการหายใจครั้งนั้น เส้นกราฟของการหายใจออกจึงเห็นเป็นเส้นโค้งหงายลงประกบกับเส้นกราฟหงายขึ้นของการหายใจเข้า เห็นเป็นรูปคล้ายกระสวยในแนวเฉียงดังที่ได้กล่าวไปแล้ว (รูปที่ 15)



รูปที่ 15 : แสดงลักษณะของ pressure-volume loop ในภาวะปกติ

สาเหตุที่เส้นกราฟของการหายใจเข้าและการหายใจออกในแต่ละครั้งไม่ซ้อนทับเป็นเส้นเดียวกัน เกิดจากคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของปอดที่เรียกว่า hysteresis ซึ่งเป็นผลจาก compliance ของปอดและระบบการหายใจที่ไม่เท่ากัน ทั้งในช่วงการหายใจเข้าและหายใจออก ในการหายใจเข้านั้น โดยปกติจะต้องใช้พลังงานมากขึ้นในการ recruit ถุงลมปอดให้เปิดและขยายตัวเพิ่มเติม ทำให้ compliance ลดต่ำกว่าตอนหายใจออก

โดยทั่วไป compliance หรือความยืดหยุ่นของปอด หมายถึง การเปลี่ยนแปลงของปริมาตรต่อหนึ่งหน่วย

แรงดันที่เปลี่ยนหรืออาจเขียนเป็นสัญลักษณ์ง่าย ๆ
ดังที่ทราบกันดีอยู่แล้วดังนี้

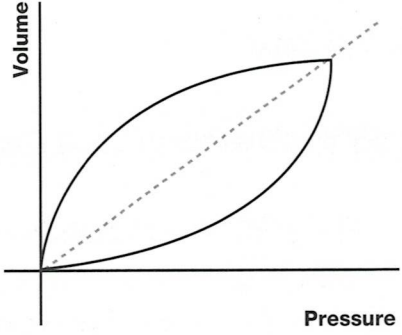
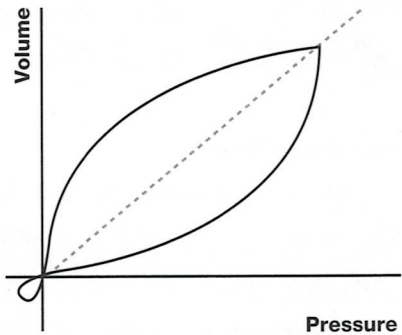
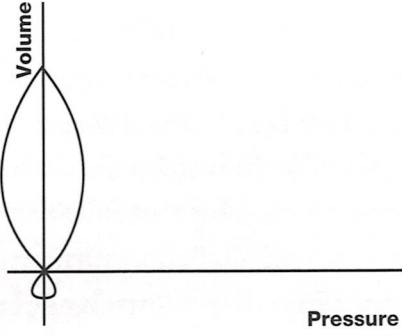
$$\text{Compliance} = \Delta \text{Volume} / \Delta \text{Pressure}$$

หากมองย้อนกลับมาพิจารณาที่ pressure-
volume loop แล้วเราจะเห็นได้ว่า อันที่จริง compliance

ก็คือ slope ของกราฟชนิดนี้นั่นเอง ดังนั้น หากเราเห็น
กราฟมีความลาดชันสูงก็ย่อมแสดงว่า ระบบการหายใจ
(ปอด + ผนังทรวงอก + ท้อง) ในขณะนั้นมีความยืดหยุ่นดี
ตรงกันข้าม หากเราพบว่า กราฟมีความลาดชันน้อย
ก็ย่อมบ่งชี้ว่า ระบบการหายใจในขณะนั้นมีความยืดหยุ่น
น้อยหรือกำลังสูญเสียคุณสมบัตินี้ไปด้วยสาเหตุใด ๆ ก็ตาม

ในภาวะปกติ รูปกราฟชนิดนี้อาจมีรูปร่างที่แตกต่าง
กันไปได้บ้างขึ้นอยู่กับชนิดของการหายใจนั้น ๆ ดังตาราง
ที่ 4

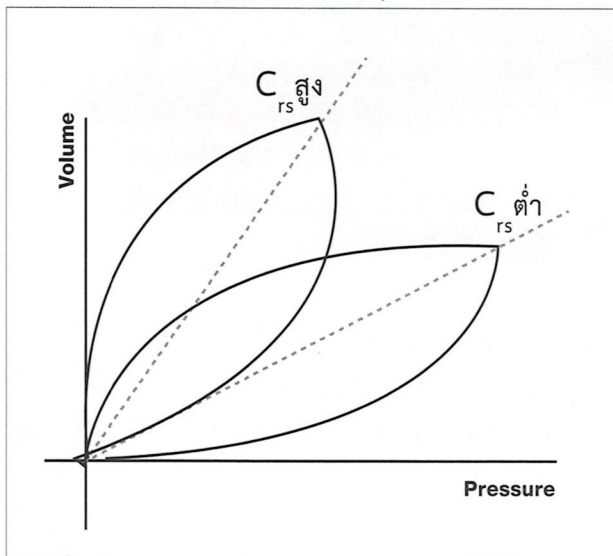
ตารางที่ 4 : ลักษณะของกราฟ pressure-volume loop ปกติที่เกิดจากการหายใจรูปแบบต่าง ๆ ^{3,7,9}

ชนิดของการหายใจ	ลักษณะของกราฟที่ปรากฏ	ตัวอย่างของรูปกราฟ
Machine breaths without inspiratory effort	กราฟจะเฉียงขึ้นด้านขวา โดยไม่มี การดึงให้เกิดแรงดันลบ (negative pressure deflection) ในช่วงเริ่มต้น	
Pressure-supported breaths with inspiratory effort	กราฟจะเฉียงขึ้นด้านขวา โดยมีการดึง ให้เกิดแรงดันลบเล็กน้อย (negative pressure deflection) ในช่วงเริ่มต้น	
Spontaneous breaths	กราฟจะชี้ขึ้นในแนวตั้งขนานหรือ ทับแกน Y โดยมีการดึงให้เกิดแรงดันลบ เล็กน้อย (negative pressure deflection)	

การประยุกต์ใช้ทางคลินิก

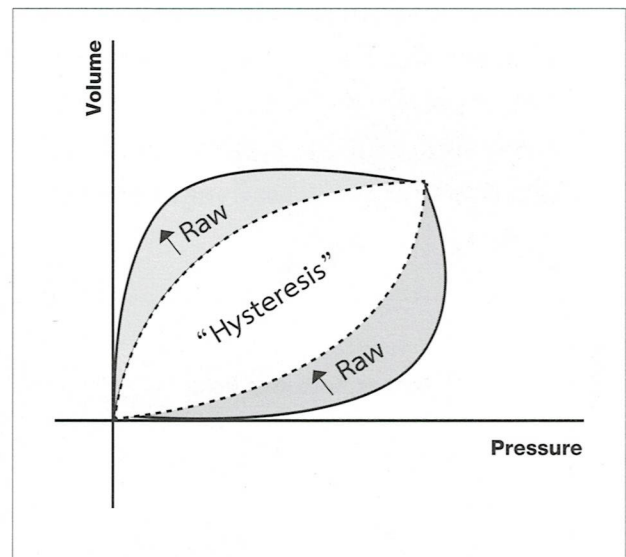
กราฟชนิดนี้อาจช่วยในการวินิจฉัยและติดตามภาวะต่าง ๆ ทางคลินิกได้หลายอย่าง เช่น

1. ใช้เปรียบเทียบ : ประเมินหรือคำนวณหา compliance ของระบบการหายใจ (C_{rs})⁹ : ตามที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นว่า compliance ของระบบการหายใจก็คือ slope ของกราฟชนิดนี้ ดังนั้น กราฟที่มี slope ที่ชันกว่าย่อมบ่งชี้ว่าระบบการหายใจในขณะนั้นมี compliance ที่ดีกว่านั่นเอง (รูปที่ 16) นอกจากนี้ อาจใช้ข้อมูลตัวเลขที่ปรากฏในกราฟมาคำนวณค่า compliance ได้จากสูตร $Compliance = \Delta Volume / \Delta Pressure$ อีกด้วย



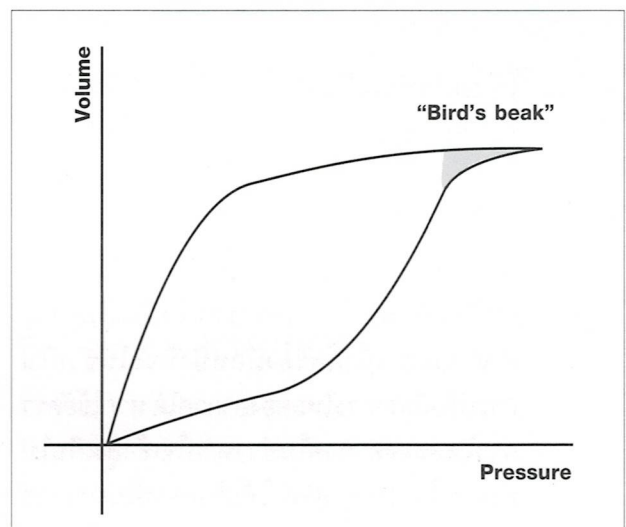
รูปที่ 16 : แสดง pressure-volume loop เปรียบเทียบระบบหายใจที่มี compliance แตกต่างกัน

2. ใช้ประเมิน airway resistance (R_{aw}) โดยพิจารณาจากความกว้างหรือพื้นที่ใต้กราฟของ loop หากความกว้างของกราฟเพิ่มขึ้นหรือกราฟป่องขึ้นกว่าเดิม แสดงว่า R_{aw} เพิ่มขึ้น⁸⁻⁹ (รูปที่ 17)
3. ใช้วินิจฉัยภาวะ alveolar overdistension : เมื่อถุงลมในปอดเกิดการขยายตัวมากเกินไปจะทำให้กราฟช่วงปลายของการหายใจเข้ามีลักษณะยื่นออกในแนวระนาบคล้ายปากนก (bird's beak pattern) ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ถุงลมได้ขยายตัวอย่างเต็มที่แล้ว แม้จะยังคงมีอากาศ



รูปที่ 17 : แสดง pressure-volume loop เมื่อระบบการหายใจมี resistance เพิ่มขึ้น

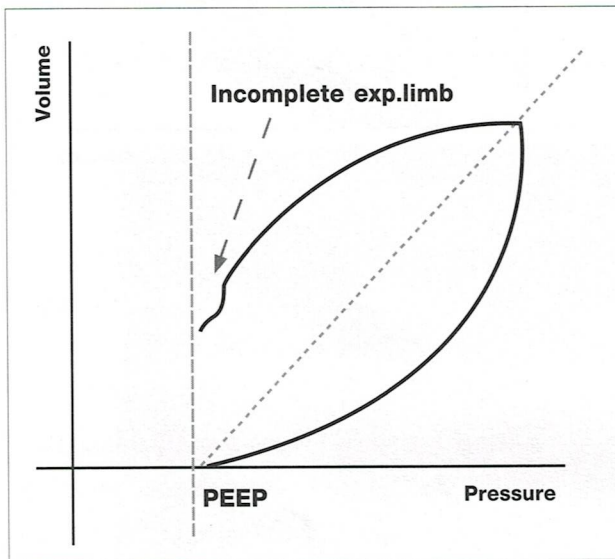
ไหลเข้าสู่ปอดอยู่ ปริมาตรก็จะไม่เปลี่ยนแปลง แต่แรงดันยังคงเพิ่มขึ้นได้ต่อเนื่อง กราฟช่วงท้ายของการหายใจเข้าจึงมีลักษณะเป็น plateau ขนานกับแกน X จนดูคล้ายจงอยปากของนกนั่นเอง^{2,7}



รูปที่ 18 : แสดง pressure-volume loop เมื่อเกิดภาวะ alveolar overdistension ขึ้น

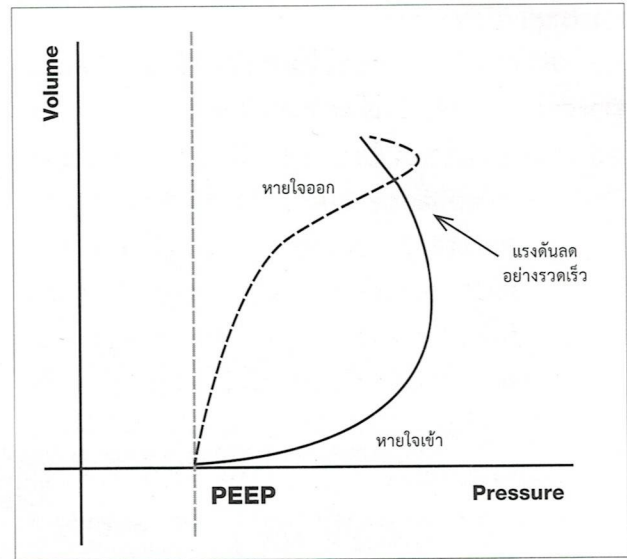
4. ใช้วินิจฉัยภาวะลมรั่วในระบบการหายใจและ PEEPi^{2,4-5,7} : การเกิดภาวะลมรั่วในระบบการหายใจและการเกิด PEEPi นั้นมีลักษณะคล้ายคลึงกันอยู่หนึ่งอย่าง นั่นก็คือ อากาศที่ไหล

ออกจากปอดช่วงการหายใจออกจะไหลออกมาได้ไม่หมดเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาตรที่เข้าไปตอนหายใจเข้า ดังนั้น จะเห็นเส้นกราฟช่วงการหายใจออกนี้ไม่ไปบรรจบลงจุดเดิมที่เริ่มต้นเส้นกราฟจะไม่กลับไปแตะที่จุดศูนย์บนแกน X (รูปที่ 19)



รูปที่ 19 : แสดง pressure-volume loop เมื่อเกิดภาวะลมรั่วในระบบการหายใจหรือเมื่อมี PEEPi เกิดขึ้น

- ใช้ในการประเมินและปรับอัตราการไหลของอากาศในช่วงการหายใจเข้า^{2,5,7,9} : การเลือกใช้อัตราการไหลของอากาศที่มากเกินไปหรือน้อยเกินไปแก่ผู้ป่วย ทำให้การช่วยหายใจด้วยเครื่องไม่ประสบความสำเร็จ ดังนั้น อัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งสำคัญ P-V loop เป็นเครื่องมือหนึ่งที่จะช่วยในการปรับอัตราการไหลของอากาศได้ หากใช้อัตราการไหลของอากาศในช่วงหายใจเข้าสูงเกินไป ย่อมทำให้ Raw สูงทำให้เส้นกราฟในช่วงการหายใจเข้าป่องขึ้นกว่าเดิม (รูปที่ 17) ในทางตรงกันข้าม หากใช้อัตราการไหลของอากาศต่ำเกินไป แรงดันอากาศในช่วงท้ายของการหายใจเข้าจะลดลงกว่าปกติ ทำให้ส่วนปลายของเส้นกราฟช่วงหายใจเข้าโค้งงอกลับเข้าหาแกน Y จากนั้นจึงม้วนกลับลงเข้าหาแกน X ในช่วงหายใจออกต่อไป ส่วนปลายของการหายใจเข้าในกราฟแบบนี้จึงเห็นเป็นลักษณะคล้ายเลข 8 (รูปที่ 20)



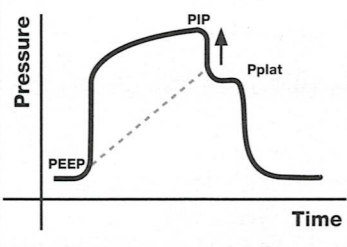
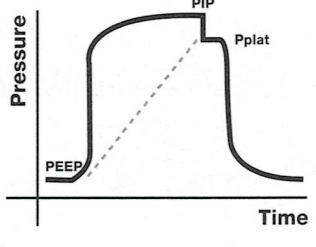
รูปที่ 20 : แสดง pressure-volume loop เมื่อใช้อัตราการไหลของอากาศที่ไม่เพียงพอ

การวิเคราะห์เพิ่มเติมด้วย maneuvers เพื่อหยุดการเคลื่อนไหวยของก๊าซ ชั่วขณะ

Inspiratory-Hold Maneuver

ในช่วงสิ้นสุดการหายใจเข้านั้น ตามปกติเป็นช่วงที่ expiratory valve ของเครื่องช่วยหายใจที่เคยปิดอยู่ กำลังจะเปิดออก แต่หากเรายืดระยะเวลาในการปิด expiratory valve นี้ไว้ให้นานขึ้นกว่าปกติราว 0.3-1 วินาที ที่เรียกว่า การทำ inspiratory hold maneuver นั้นจะทำให้เกิดช่วงเวลาที่ไม่มีการไหลเข้าและลมไหลออกจากระบบอย่างชัดเจน⁵⁻⁶ ในช่วงเวลาดังกล่าว แรงดันของระบบการหายใจจะปรับตัวลดลงเนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้น ณ ขณะนั้นเหลือแค่เพียงแรงดันที่ใช้ขยายปอดและผนังทรวงอก (static CRS) เท่านั้น แรงดัน ณ จุดนี้เรียกว่า plateau pressure หรือ Pplat (รูปที่ 21) ในขณะที่แรงดันสูงสุดที่เกิดขึ้นในขณะหายใจเข้าก่อนที่จะทำ maneuver นี้เรียกว่า Peak Inspiratory Pressure (PIP) ซึ่งเป็นระดับแรงดันที่รวมเอาแรงเสียดทานของระบบการหายใจ (Raw) เข้าไว้ด้วย การสังเกตระดับของ PIP, Pplat และความแตกต่างระหว่าง PIP & Pplat นั้นจะช่วยบอกถึง Raw และ CRS ได้ทางอ้อม โดยสามารถใช้ช่วยในการวินิจฉัยภาวะที่มีแรงเสียดทานเพิ่มและความยืดหยุ่นของระบบการหายใจลดลงได้ ดังตารางที่ 5

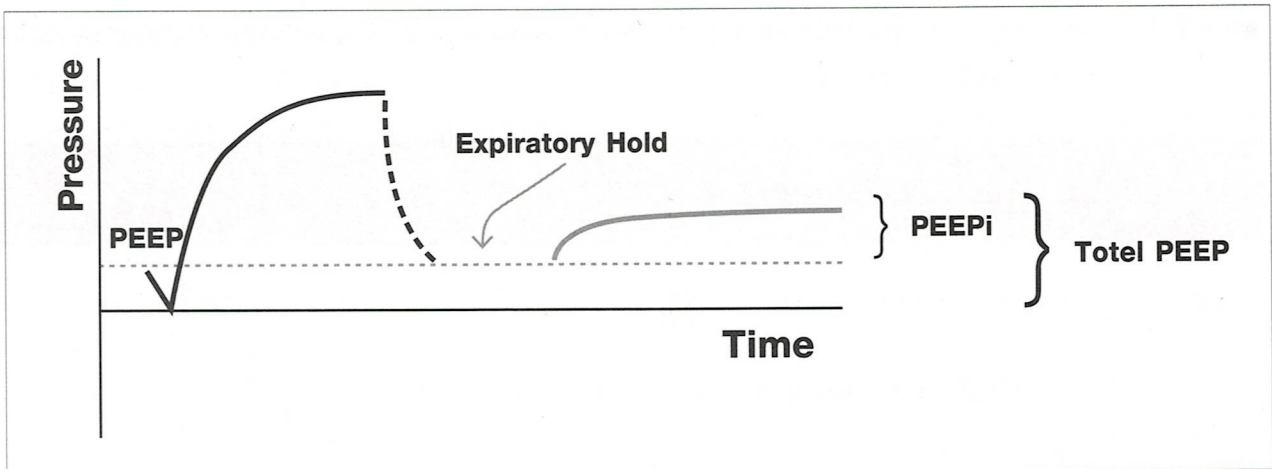
ตารางที่ 5 : แนวทางแบบง่าย ๆ ในการนำ inspiratory hold maneuver ไปใช้ในการช่วยหาสาเหตุของความผิดปกติในการช่วยหายใจ

ตัวแปร	ความสำคัญทางสรีรพยาธิวิทยา	แรงเสียดทานเพิ่ม ($\uparrow R_{aw}$)	ความยืดหยุ่นลด ($\uparrow C_{RS}$)
PIP	สัมพันธ์กับทั้ง R_{aw} และ C_{RS}	$\uparrow$	$\uparrow$
Pplat	สัมพันธ์กับเฉพาะ static C_{RS} เท่านั้น	ปกติ	$\uparrow$
$\Delta PIP-Pplat$	สัมพันธ์กับทั้ง R_{aw} และ C_{RS}	$\uparrow$	ปกติ
รูปกราฟ			
ตัวอย่างภาวะต่าง ๆ ทางคลินิก	ปกติ	ท่อช่วยหายใจอุดตัน, มากในท่อ, มี secretion ปริมาณ ท่อช่วยหายใจหักงอ, ผู้ป่วยกัดท่อ, bronchospasm	การใส่ท่อช่วยหายใจลึกเกินไป (ลงไปใน mainstem bronchus ด้านขวา), pneumothorax, atelectasis, pneumonia, pulmonary edema, abdominal distension

Expiratory-Hold Maneuver

ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการตรวจหา static PEEPi เท่านั้น ในการทำ maneuver นี้ ผู้ป่วยจะต้องหายใจด้วยเครื่องโดยสมบูรณ์ กล่าวคือ จะต้องได้รับยานอนหลับและยาคลายกล้ามเนื้ออย่างเพียงพอที่จะทำให้ไม่มีแรงในการหายใจหรือกระตุ้นการหายใจได้เองเลย การหายใจทั้งหมดขณะที่ทำ maneuver นี้จะต้องเป็นจากเครื่องเท่านั้น จากนั้นปรับเครื่องเป็น controlled mode แล้วทำการ

อุดช่อง expiratory valve ตอนช่วงท้ายของการหายใจออก การทำเช่นนี้จะส่งผลให้เกิดการปรับสมดุลระหว่าง alveolar pressure และ airway pressure⁵⁻⁷ ดังนั้นระดับแรงดันที่วัดได้ในขณะที่ทำ maneuver นี้จะเป็นผลรวมของ PEEP ทั้งหมดในระบบการหายใจ (total PEEP) หากนำค่าของ PEEP ที่ตั้งเครื่องไว้ลบออกก็จะได้ผลลัพธ์เป็น PEEPi นั่นเอง^{4,6-9}



รูปที่ 21: แสดง PEEPi ที่พบบน pressure-time curve ในขณะที่ทำ expiratory hold maneuver

เอกสารอ้างอิง

1. Dean RH, Richard DB. Mechanical ventilation. In: Dean RH, ed. Respiratory Care: Principles of Practice. W.B. Saunders USA 2002;782-809.
2. Holt TBO. Ventilator monitoring: Understanding the essentials of waveform analysis. AARC Times 1999;7:7-12.
3. Ouellet P. Waveform and Loop Analysis in Mechanical Ventilation. Solna, Sweden: Siemens-Elma; 1997.
4. Waugh J, Deshpande V, Harwood R. Rapid Interpretation of Ventilator Waveforms. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall; 1999.
5. Pilbeam S. Mechanical Ventilation: Physiological and Clinical Applications. 2nd ed. St Louis: Mosby; 1998.
6. A Nahum. Use of pressure and flow waveforms to monitor mechanically ventilated patients. Yearbook of Intensive Care and Emergency Medicine 1995, 89-114.
7. Rittner F, Döring M. Curves and Loops in Mechanical Ventilation. Telford, Pa: Draeger Medical; 1996.
8. Jurban A, Tobin MJ. Use of flow-volume curves in detecting secretions in ventilator dependent patients. Am J Respir Crit Care Med 1994;150:766-9.
9. Haas C. Volume-pressure curves during mechanical ventilation. AARC Times. 2000;24:64-68.