

## Lung Recruitment and PEEP Titration

เรียบเรียงโดย พญ.พิชญา วิจารณ์านนท์

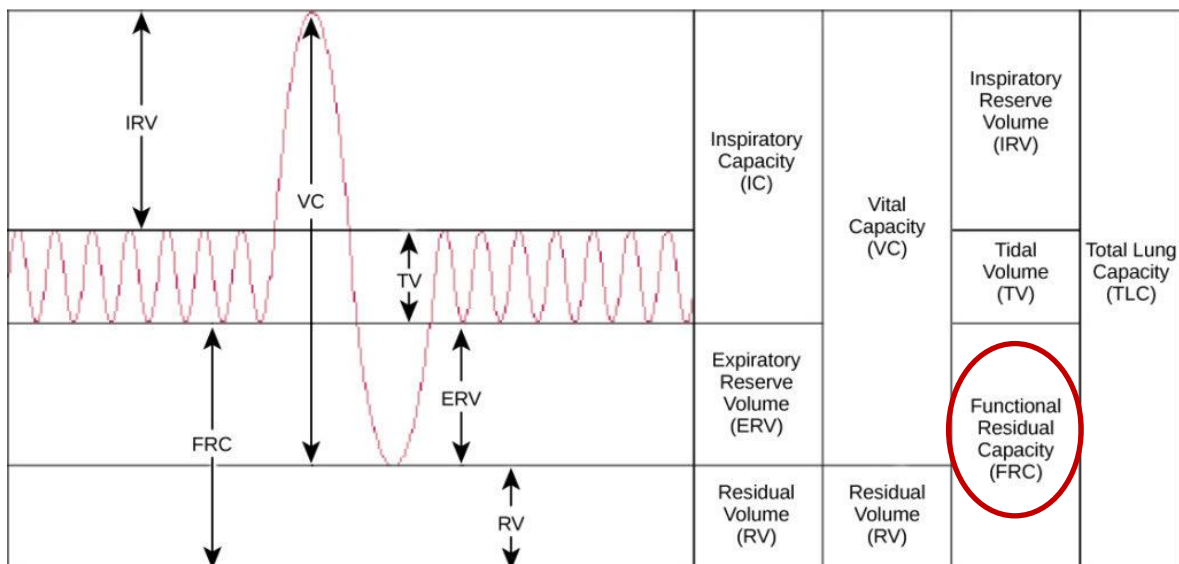
อาจารย์ที่ปรึกษา อ.นพ.กรัณชัย ตริตรอง

### Outlines

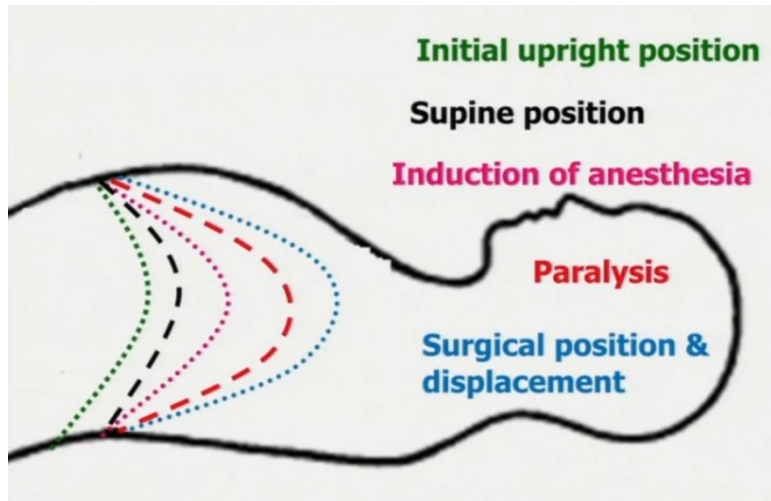
- PEEP
- Lung recruitment
- PEEP titration

### Positive End Expiratory Pressure (PEEP)

- Definition
  - PEEP คือ alveolar pressure above atmospheric pressure that exists at the end of expiration
  - Physiologic PEEP คือ เมื่อคนเราหายใจออกสุด glottis จะปิด และ lung มี surfactant ทำให้ alveoli ไม่ collapse มี pressure ค้างอยู่ในปอด เรียกว่า physiologic PEEP
  - Functional Residual Capacity (FRC) คือ lung volume ที่คงเหลืออยู่ หลังจากหายใจออกสุดในภาวะปกติ ดังแสดงใน รูปที่ 1



รูปที่ 1 lung volume graph



รูปที่ 2 ระดับ diaphragm ในภาวะต่างๆ

เมื่อผู้ป่วยได้รับยาดมสลบ จะเกิด muscle relaxant ทำให้ diaphragm ยกสูงขึ้น ทำให้ lung volume ลดลง เพราะฉะนั้นทุก case ที่ทำผ่าตัด under GA วิสัญญีแพทย์จะทำ recruitment maneuver ให้ผู้ป่วยทุกราย ทุกๆ 30 นาที เพื่อป้องกันการเกิด atelectasis

ผู้ป่วยที่เข้ารับการผ่าตัดในช่องท้อง ที่มีการ pack swab ในช่องท้องระหว่างการผ่าตัด ทำให้ diaphragm ถูกดันขึ้นข้างบน ทำให้ FRC ลดลงเกิด basal lung atelectasis ตามมา

#### Extrinsic PEEP/External PEEP

Provided by mechanical ventilator ปกติเวลาเราหายใจออกสุด vocal cord จะปิด ทำให้เกิด physiologic PEEP แต่ผู้ป่วยที่ได้รับการใส่ ETT vocal cord จะไม่มีทางปิดสนิท เพราะฉะนั้น จึงต้องตั้งค่า PEEP ที่ ventilator ด้วย

- Physiologic PEEP : 3-5 cmH<sub>2</sub>O
- Therapeutic PEEP : >5 cmH<sub>2</sub>O เช่น ในภาวะ ARDS

#### Intrinsic PEEP/Auto PEEP

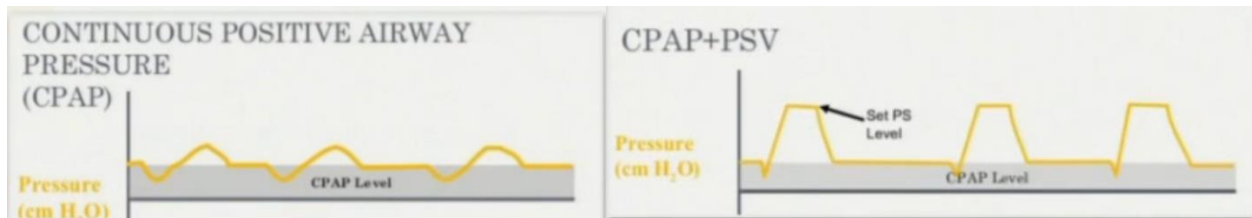
- Secondary to incomplete expiration
- Air trapping
- obstructive lung disease ex. COPD, asthma

#### PEEP vs CPAP

- Positive End Expiratory Pressure (PEEP) ventilator support
- Continuous Positive Airway Pressure (CPAP) Spontaneous breathing

เป็นความดันที่เครื่องช่วยหายใจคงไว้ในระบบทางเดินหายใจในขณะที่หายใจออกสุดในผู้ป่วยที่ช่วยการหายใจด้วยเครื่อง ในกรณีที่ผู้ป่วยหายใจเอง คำดังกล่าวจะเรียกว่า CPAP ซึ่งโดยนัยของความหมายแล้วไม่แตกต่างกัน ดังนั้น ในเครื่องช่วยหายใจบาง

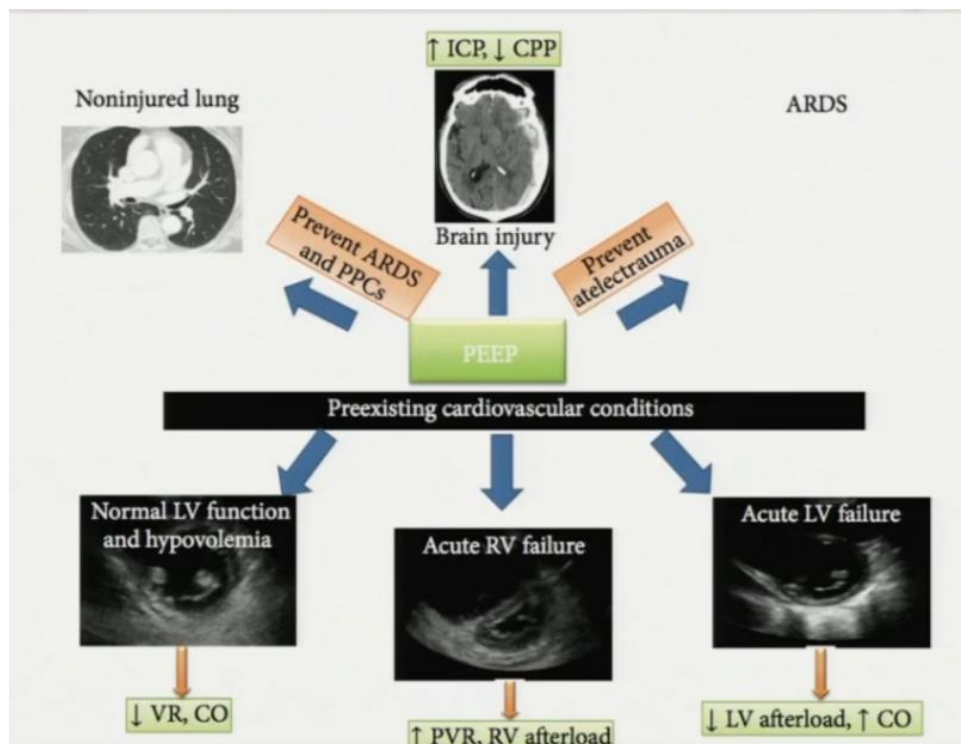
รุ่นจึงมีปุ่มหน้าที่ของการปรับของ PEEP และ CPAP อยู่ในปุ่มเดียวกัน เนื่องจากการคงไว้ของความดัน ซึ่งเครื่องเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวจากวาล์วกำหนดการหายใจออก ความแตกต่างของ waveform ของการหายใจทั้ง 2 แบบ (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและเวลาที่แสดงในเครื่องช่วยหายใจ

#### Effect of PEEP

PEEP มีทั้งประโยชน์และโทษ ขึ้นอยู่กับสถานะของผู้ป่วยแต่ละคน ซึ่งจะส่งผลต่อระบบไหลเวียนโลหิตและการทำงานของอวัยวะต่างๆ แตกต่างกันไป (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ผลของ PEEP ที่มีต่อระบบไหลเวียนโลหิตและอวัยวะต่างๆ ในสถานะที่ต่างกันของผู้ป่วย

การเพิ่ม PEEP ทำให้เกิด increased intrathoracic pressure ซึ่งจะส่งผลต่อผู้ป่วยในสถานะที่ต่างกัน ดังต่อไปนี้

- Normal LV function and hypovolemia : PEEP → Increased intrathoracic pressure → Decreased Venous Return (VR) → Decreased Cardiac Output (CO)
- Acute RV failure : PEEP → Increased intrathoracic pressure → Increased Pulmonary Vascular Resistance (PVR), Increased RV afterload → Rt sided HF แย่ลง

- Acute LV failure : PEEP → Increased intrathoracic pressure → Decreased Venous Return (VR) → Decreased preload → Decreased LV afterload → Increased Cardiac Output (CO) → Lt sided HF ดีขึ้น
- Brain Injury : PEEP → Increased intrathoracic pressure → Decreased Venous Return (VR) → Increased Intracranial Pressure (ICP) → Decreased Cerebral Perfusion Pressure (CPP)

#### Benefit of PEEP

- Increased airway pressure : improve gas exchange
- Maximize alveolar recruitment : increase PaO<sub>2</sub>
- Minimize cyclic atelectasis : decrease atelectrauma

#### Potential harm of PEEP

- Injury from alveolar over distention
- Increased intrapulmonary shunt
- Increased dead space
- Higher pulmonary vascular resistance (PVR) leading to cor-pulmonale

#### Contraindication of PEEP

- No absolute contraindication
- Cautiously use in patient with  
Intracranial abnormalities  
Unilateral or focal lung disease  
Hypotension & hypovolemia  
Pulmonary embolism  
Bronchopleural fistula

#### The use of PEEP

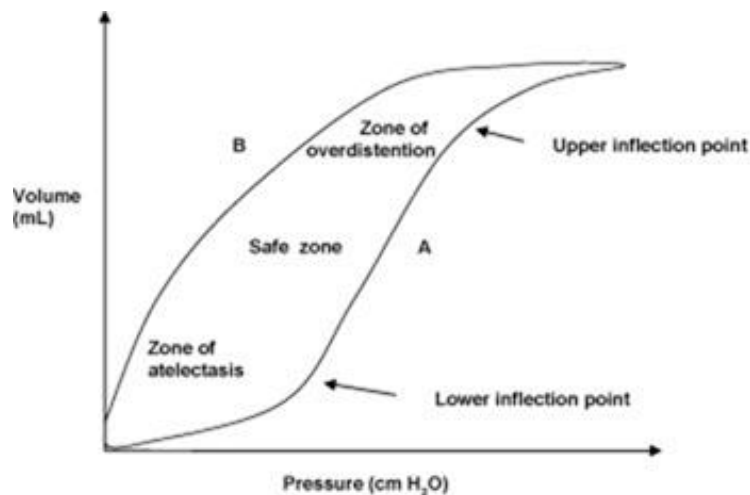
- Physiologic PEEP in MV patient
- ARDS
- Cardiogenic pulmonary edema
- Auto PEEP with expiratory airflow limitation
- Intra-operative and post-operative period

## Lung Recruitment

### Definition

- Transient elevations in applied airway pressures intended to open collapsed lung and increase the number of alveolar units participating in tidal ventilation
- Usually associated with short-term physiological benefits
  - Reduced intrapulmonary shunt
  - Increased pulmonary compliance

### Basic Principle



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรของปอดในขณะหายใจเข้าและหายใจออก

จากรูป จะสังเกตได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่างความดันและปริมาตรมีความแตกต่างกันระหว่างการหายใจเข้าและหายใจออก กราฟความสัมพันธ์จึงมีลักษณะแยกออกจากกัน เรียกว่า “hysteresis” ระดับความดันที่เท่ากันจะมีปริมาตรคงเหลือในปอดที่ต่างกัน โดยในระหว่างหายใจออกจะมีปริมาตรคงค้างที่มากกว่าและมีความสัมพันธ์เป็นขนานจนกระทั่งถึงจุดวิกฤตส่วนล่างที่เรียกว่า “lower inflection point, LIP” ความแตกต่างของปริมาตรจะต่างกันลดลงไปเรื่อยๆ จนกระทั่งเข้าสู่วงจรการหายใจเข้าใหม่ ในขณะหายใจเข้า เมื่อปริมาตรในปอดเพิ่มขึ้น ความดันในระบบจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในสัดส่วนที่คงที่ จนกระทั่งถึงจุดวิกฤตของยอดกราฟ “upper inflection point, UIP” ปริมาตรจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แม้ว่าจะเพิ่มความดันในสัดส่วนที่เท่ากัน ซึ่งถือว่าเป็นส่วนที่มีการขยายของปอดที่มากเกินไป (over-distention of alveoli)

- Transpulmonary pressure ( $P_{tp}$ )  
 $\text{Alveolar pressure (} P_{alv}) - \text{Pleural pressure (} P_{pl})$
- Lung opening pressure  
End-inspiratory plateau pressure ( $P_{plat}$ )
- Lung closing pressure  
PEEP

Open lung PEEP

- Barotrauma

Depend on driving pressure ( $P_{in} - P_{out}$ )

$P_{alv} - P_{pl}$

$P_{plat} - P_{es} < 25 \text{ cmH}_2\text{O}$

$P_{plat} < 28 \text{ cmH}_2\text{O}$

- Ppl เกิดจาก respiratory effort เวลาที่ผู้ป่วยต้องการหายใจดึงอากาศเข้า Ppl จะเป็นลบมากขึ้น ถ้าปล่อยให้ผู้ป่วยมี respiratory effort มากเกินไป  $\rightarrow$  Ppl เป็นลบมาก  $\rightarrow$  Ptp มีค่าเป็นบวกมาก  $\rightarrow$  lung injury

#### Method of lung recruitment

- Treatment of underlying disease process
- Recruitment maneuvers
- Airway pressure release ventilation
- High frequency oscillatory ventilation
- Prone positioning

#### Recruitment Maneuvers

วิธีการขยายปอดถือเป็นส่วนหนึ่งในการบำบัดการหายใจในผู้ป่วยที่ใช้เครื่องช่วยหายใจ โดยเฉพาะในกลุ่มผู้ป่วยที่มีโอกาสของปอดแฟบ (atelectasis) สูง เช่น ผู้ป่วยหลังผ่าตัด ARDS เป็นต้น recruitment maneuver (RM) คือ การทำให้มีการเพิ่มระดับความดันในช่องอกในระดับสูงทันที ในช่วงระยะเวลาหนึ่งเพื่อให้ถุงลมที่แฟบตัวบางส่วนหรือทั้งหมด (atelectasis) ให้กลับมาขยายตัวอีกครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อการแลกเปลี่ยนออกซิเจนและการขับคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มขึ้น ภายหลังจาก RM ต้องมีการตั้งระดับ positive end expiratory pressure (PEEP) ที่เหมาะสมด้วยเพื่อป้องกันถุงลมแฟบอีกครั้งที่เรียกว่า “anti-derecruiting force” โดยระดับความดันที่เหมาะสมควรสูงกว่าระดับวิกฤตของการแฟบตัวของถุงลม ระดับวิกฤตดังกล่าวอยู่ในตำแหน่งของ “lower inflection point” ของกราฟระหว่างความดันและปริมาตรเนื่องจาก RM เป็นการรักษาเสริมของผู้ป่วยที่ใช้เครื่องช่วยหายใจ หลักฐานเชิงประจักษ์ปัจจุบันนี้ นอกจากการลดระดับความพร่องของออกซิเจนแล้วผลของ RM ต่อผลการรักษาหลักยังไม่ชัดเจนมากนัก

#### Recruitment Maneuvers : Benefit

- Reversing atelectasis
- Improve oxygenation

#### Recruitment Maneuvers : Potential Harm

- Hemodynamic compromise
- Barotrauma
- May decrease cerebral perfusion

## Recruitability Assessment

### ARDS-related factors

- ระยะเวลาของ ARDS กรณีที่เป็นในระยะแรก (<72 ชั่วโมง) RM จะมีประสิทธิภาพดีกว่า
- ลักษณะของโรค กรณีถ้าเป็น ARDS หากเป็นสาเหตุที่ไม่ได้เริ่มต้นจากปอด จะตอบสนองได้ดีกว่าและกรณีที่มีพยาธิสภาพจากปอด
- พยาธิสภาพที่เป็นการกระจายทั่วๆปอดจะสามารถตอบสนองได้ดีกว่าพยาธิสภาพที่เกิดขึ้นจากปอดกลีบใดกลีบหนึ่ง
- ความสามารถในการขยายตัวของช่องทรวงอก (chest wall compliance)

เนื่องจากขณะทำ RM จะต้องมีการเพิ่มความดันของทางเดินหายใจอย่างสูง ดังนั้น จึงควรทำอย่างระมัดระวังในผู้ป่วยที่มีโอกาสที่เกิดลมรั่วในปอด (pneumothorax) หรือผู้ป่วยที่มีภาวะไหลเวียนไม่ปกติ และ RM อาจไม่ได้ผลในผู้ป่วยที่มีลมรั่วในช่องปอด (bronchopleural fistula)

### RM-related factors

- Type of lung recruitment
- Transpulmonary pressure
- Timing of application
- Patient positioning

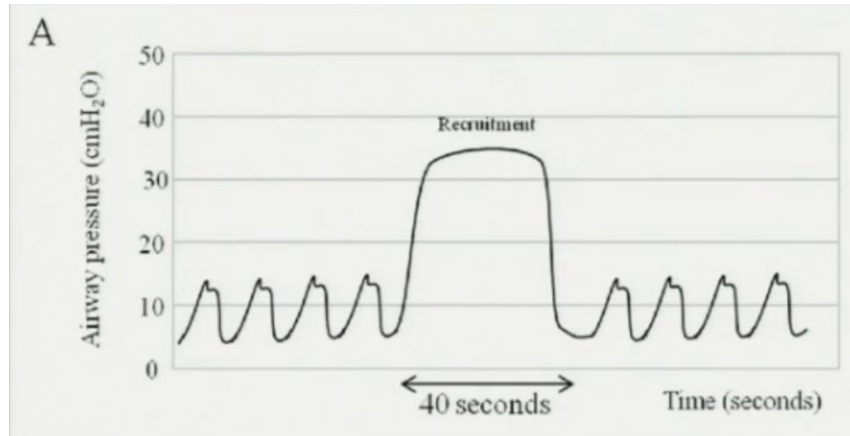
### Post RM strategy

- Post-RM PEEP เพื่อให้ปอดที่เปิดแล้วไม่กลับไปปิดอีก

### Type of Recruitment Maneuver

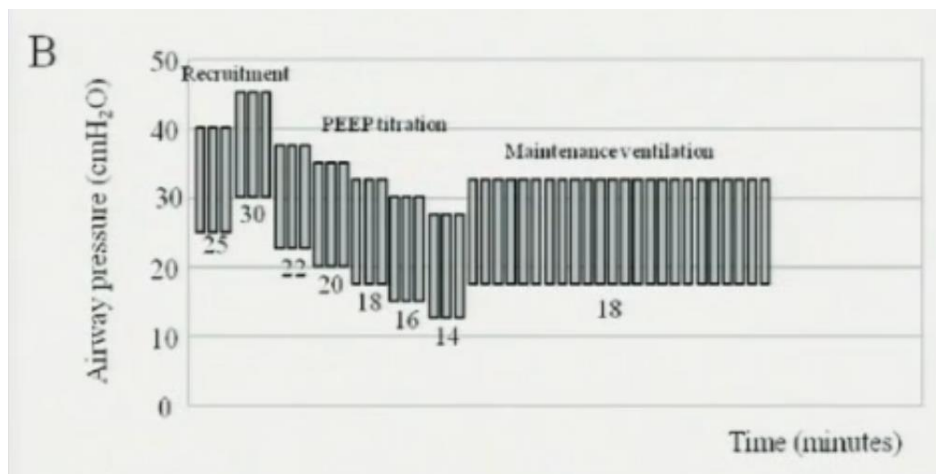
เมื่อประเมิน recruitability แล้ว ในผู้ป่วยที่มีโอกาสสำเร็จของ RM ต่ำ (low recruitability) การทำ RM อาจเกิดผลเสียและภาวะแทรกซ้อนได้ ผู้ป่วยเหล่านี้ให้พิจารณาให้การรักษาด้วยวิธีการอื่น โดยใช้ PEEP ไม่เกิน 10 ซม.น้ำ ในกรณีที่ผู้ป่วยมีโอกาสสำเร็จของ RM สูง (high recruitability) ให้พิจารณาทำ RM ซึ่งกรณีที่ทำให้ผู้ป่วยที่มีภาวะหายใจล้มเหลวของ ARDS ตั้งแต่เริ่มแรกผู้ป่วยส่วนใหญ่ประมาณร้อยละ 80 สามารถทำ RM ได้ จึงแนะนำให้ทำ RM ตั้งแต่เริ่มแรกของ ARDS จะได้ผลที่ดีกว่าและโอกาสสำเร็จมากกว่า ปัจจุบันมีวิธีที่นิยมในการทำ RM หลัก 3 วิธี ได้แก่

1. Sustained inflation เป็นวิธีที่นิยมและใช้กันบ่อยที่สุด มีหลายเทคนิค ได้แก่
  - a. ตั้งเครื่องช่วยหายใจด้วย CPAP 30-40 ซม.น้ำ เป็นระยะเวลา 30-40 วินาที (ง่ายกว่า 40 ซม.น้ำ – 40 วินาที) (รูปที่ 7) เป็นวิธีที่นิยมและทำบ่อยที่สุด อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของ Arnal และคณะ พบว่าระยะเวลาของการทำ RM ทำได้สำเร็จตั้งแต่ 10 วินาทีแรกอย่างปลอดภัยและมีการเปลี่ยนแปลงของระบบการไหลเวียนน้อยมาก ระยะเวลาของ RM ตั้งแต่ 10 วินาทีขึ้นไป จะมีภาวะแทรกซ้อนจากระบบการไหลเวียนมากขึ้น ดังนั้น กรณีที่จำเป็นต้องทำ RM ในผู้ป่วยที่มีระบบการไหลเวียนยังไม่คงที่มากนัก อาจใช้ระยะเวลาเพียง 10 วินาทีก็เพียงพอ



รูปที่ 6 Sustained inflation maneuver

- b. PCV โดยตั้ง PEEP 30-40 ซม.น้ำ และตั้ง Pset ไว้ที่ 10-20 ซม.น้ำ เหนือ PEEP อัตราการหายใจ 10-20 ครั้ง/นาที และสัดส่วนการหายใจ คือ 1:1 ระยะเวลา RM คือ 30-40 วินาที วิธีการนี้ผู้รักษาแน่ใจว่าผู้ป่วยได้รับอากาศระหว่าง RM แต่ระดับความดันจะสูงกว่า 10-20 ซม.น้ำ
2. Cycling maneuvers ใช้เครื่องช่วยหายใจแบบ VCV หรือ PCV ก็ได้ กรณี VCV จะรักษาระดับ (tidal volume, TV) ปริมาณ 6 มล./กก. กรณี PCV จะใช้ Pset เหนือ PEEP หรือ driving pressure ที่ 15 ซม.น้ำ (PCV จะดีกว่า VCV เนื่องจาก การใช้ VCV จะทำให้ระดับความดันมีการเปลี่ยนแปลงมากเมื่อมีการปรับระดับ PEEP) เพิ่มระดับ PEEP 2-5 ซม.น้ำ แต่ละระดับใช้เวลา 3-5 นาที (รูปที่ 8) บันทึกค่า ปริมาตรอากาศ (TV) กรณี PCV หรือ driving pressure กรณี VCV , compliance, SpO<sub>2</sub>, ความดันโลหิต ปรับระดับลงเมื่อพบว่าปอดขยายตัวมากเกินไป ได้แก่ compliance ลดลง, TV ลดลง, driving pressure สูงขึ้น ความดันเลือดลดลง หรือ SpO<sub>2</sub> ลดลง เมื่อถึงระดับดังกล่าวให้เริ่มลดระดับ PEEP ลงเรื่อยๆ จนถึงระดับ PEEP ที่เหมาะสมหรือที่ตั้งไว้ในคราวแรก



รูปที่ 7 Cycling maneuvers



ตารางที่ 1 เปรียบเทียบระหว่าง cycling maneuvers และ sustained inflation maneuvers

|                                       | Cycling Maneuvers                                                                                   | Sustained inflation<br>Maneuvers                             |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Duration in recruitment pressure (RM) | 2-3 minutes                                                                                         | 10-60 seconds                                                |
| Total time in RM                      | Long                                                                                                | Short                                                        |
| Hemodynamics                          | Less effect due to less pressure in expiration phase                                                | More effect due to continuous high pressure                  |
| Respiratory monitoring                | Need monitoring                                                                                     | No monitoring                                                |
| Choices of PEEP after RM              | Need evaluation of lung closing pressure to identified open-lung PEEP                               | No evaluation of lung closing pressure                       |
| Stress effect to lung                 | Less due to intermittent increasing of pressure, helps to distribute pressure in opening of alveoli | More due to continuous and rapid increasing of high pressure |

#### Monitoring during recruitment maneuver

- Gas exchange  
SpO<sub>2</sub>
- Lung mechanics  
VT, compliance, driving pressure
- Hemodynamics  
MAP

#### Steps of recruitment maneuver

##### Patients selection

- Early severe ARDS
- Deeply sedated and/or paralysis
- Invasive continuous BP monitoring is preferred

##### Hemodynamic pre-conditioning phase

- PCV mode PEEP 10-15, Pi 15 titrate PEEP up q 2 min, Fix Pi, FiO<sub>2</sub> 1.0
- MAP or C.O. ↓ 15% decrease PEEP to previous and give fluids

### Recruitment phase

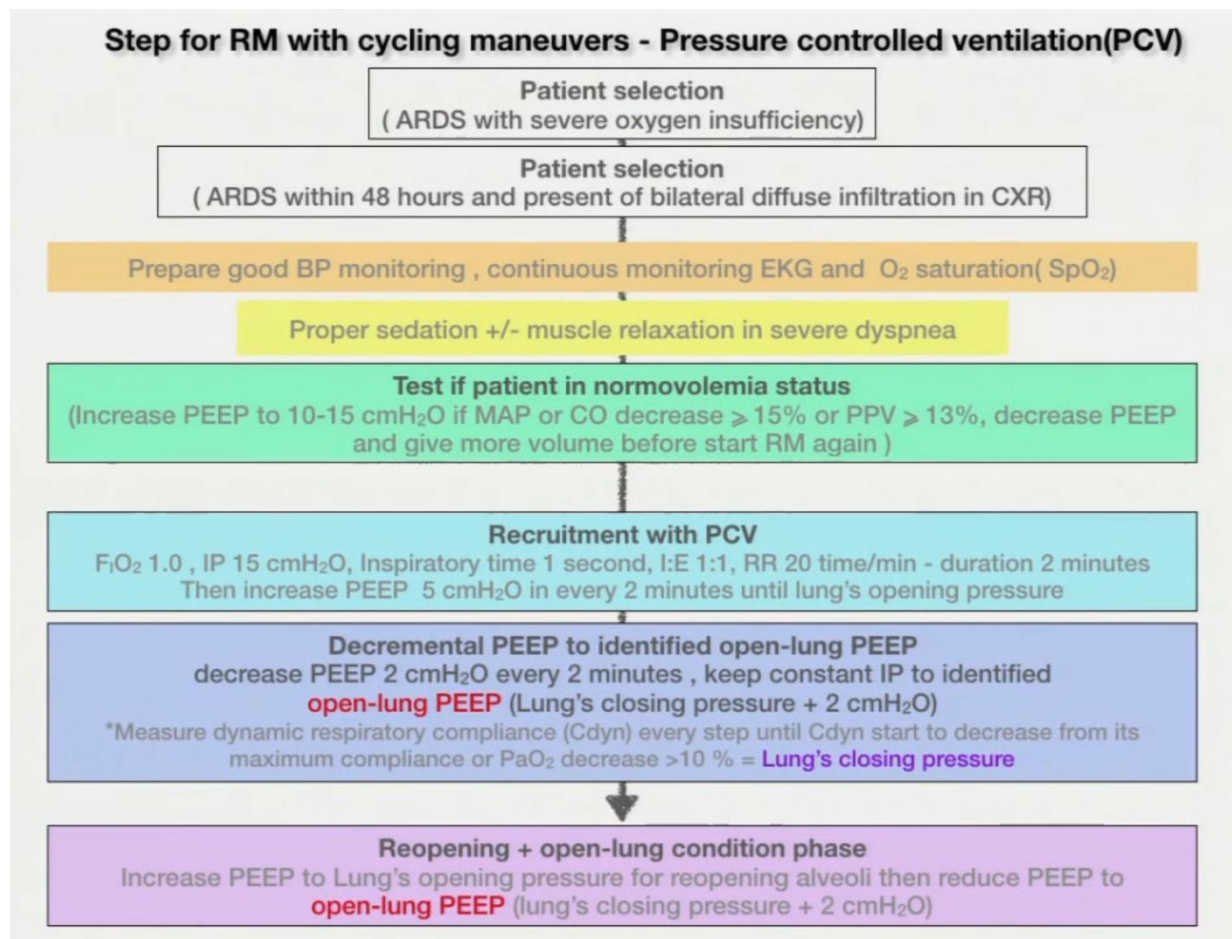
- Titrate PEEP up to 5 cmH<sub>2</sub>O q 2 mins
- Until Pplt reach lung's opening pressure (35-60 cmH<sub>2</sub>O)

### PEEP titration trial phase

- To detect lung's closing pressure
- Titrate PEEP down 2 cmH<sub>2</sub>O q 2 mins
- Monitor Cdyn, SpO<sub>2</sub>, crepitation at basal lungs

### The reopening & open-lung condition phase

- After alveoli started to collapse
- Re-recruitment to re-expand it before keeping it open
- Then apply open lung-PEEP (2-4 cmH<sub>2</sub>O above lung's closing pressure)



รูปที่ 8 ขั้นตอนการทำ recruitment maneuver ใน PCV mode

#### Assessment of recruitment maneuver

- Increase respiratory compliance >30%
- P/F ratio >400
- $\text{PaO}_2 + \text{PaO}_2 > 400 \text{ mmHg}$
- Atelectasis <5% from imaging study

#### Limitations of recruitment maneuver

- May increase mortality
- No standardization  
Method, position, optimum PEEP
- Show benefit in some patients
- Other treatment have better outcome  
Prone positioning, NMB, ECMO

#### PEEP Titration

##### PEEP setting in surgical patient

- ARDS
- Cardiogenic pulmonary edema
- Auto PEEP with expiratory airflow limitation
- Post-operative atelectasis
- IAH & ACS
- Increase ICP

#### ARDS

หลักการสำคัญของการรักษา ARDS คือรักษาสาเหตุที่เป็นต้นเหตุของขบวนการอักเสบที่เหนี่ยวนำให้เกิด ARDS ปัจจุบันนี้เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายแล้วว่าปริมาตรอากาศต่อครั้ง (tidal volume, TV) ประมาณ 6 มล./กก. (ขอบเขต 4-8 มล./กก.) และระดับของความดัน (plateau pressure, Pplat) ไม่ควรเกินกว่า 30 ซม.น้ำ โดยอาจจะเริ่มต้นด้วยในช่วงแรก TV อาจตั้งไว้ 8 มล./กก. และให้ลดเหลือ 6 มล./กก. ภายใน 2-4 ชม. และถ้า Pplat ยังคงมากกว่า 30 ซม.น้ำ ให้ลด TV เหลือ 4 มล./กก. ทั้งนี้เพื่อป้องกันการขยายตัวของปอดมากเกินไปจนได้รับบาดเจ็บ (alveolar hyperinflation) ขณะเดียวกันควรตั้งความดันในขณะหายใจออกสุด (positive end expiratory pressure, PEEP) ที่เหมาะสม เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการยุบตัวของถุงลมขณะหายใจออก (alveolar cycling collapse) จนเกิดภาวะยืดขยายและหดตัวระหว่างการหายใจเข้าและออก (alveolar recruitment-derecruitment) และการเสียดสีกันของถุงลมจนเกิดการบาดเจ็บเพิ่มขึ้น

ระดับ PEEP ที่เหมาะสม (optimal PEEP)

สำหรับการตั้ง PEEP ที่เหมาะสมในผู้ป่วย ARDS สามารถทำได้หลายวิธี โดยทั่วไปจะทำการร่วมกับการขยายของปอดก่อนทำการปรับ PEEP (recruitment maneuver) ส่วนการปรับระดับ PEEP มีความหลายวิธีขึ้นอยู่กับเครื่องมือ ชนิดของเครื่องช่วยหายใจและความเชี่ยวชาญของแพทย์ในไอซียูนนั้นๆ ได้แก่

1. PEEP/FiO<sub>2</sub> tables แนะนำการตั้ง PEEP ตามข้อแนะนำของ ARDSnet โดยพยายามรักษาระดับของความอิ่มตัวของออกซิเจน (oxygen saturation, SaO<sub>2</sub>) ให้อยู่ระหว่างร้อยละ 88-95 หรือ PaO<sub>2</sub> ระหว่าง 55-80 มม.ปรอท และ pH >7.30 โดยการเพิ่ม FiO<sub>2</sub>/PEEP ตามสถานะของผู้ป่วย (ตารางที่ 2) ซึ่งมี 2 แนวทาง คือ แนวทางการให้ PEEP ต่ำ ร่วมกับการให้ FiO<sub>2</sub> ที่สูงกว่า หรือ แนวทางการให้ PEEP สูงร่วมกับการให้ FiO<sub>2</sub> ที่ต่ำกว่า อย่างไรก็ตามหนึ่ง เช่น ผู้ป่วยที่มีความไหลเวียนโลหิตไม่คงที่ อาจเลือกแนวทางการให้ PEEP ต่ำและให้ FiO<sub>2</sub> สูงกว่า เป็นต้น และระดับ PEEP ไม่ควรตั้งต่ำกว่า 5 ซม.น้ำ เนื่องจากอาจเป็นผลเสียมากกว่าในผู้ป่วยที่เป็น ARDS ในระยะแรก แนวทางการตั้งตามข้อแนะนำของ ARDSnet เป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย เนื่องจากง่ายและสามารถนำไปใช้ในวงกว้างได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งไม่จำเป็นต้องทำการฝึกฝนมาก อย่างไรก็ตามพยาธิสภาพของปอดอาจไม่เหมือนกันในผู้ป่วยแต่ละราย แม้ว่าตารางดังกล่าวได้อ้างอิงจากหลายการศึกษา แต่จุดเริ่มต้นตารางได้สร้างขึ้นจากความเห็นของผู้เชี่ยวชาญในกลุ่มวิจัยและไม่มีหลักฐานเชิงประจักษ์ใดๆในการกำหนดค่าต่างๆ ผู้เชี่ยวชาญทางเวชบำบัดวิกฤตหลายท่านจึงแนะนำให้ทำการปรับ PEEP ตามสรีรศาสตร์และกลศาสตร์ของปอด (lung mechanic) น่าจะเหมาะสมกว่า

ตารางที่ 2 การปรับ PEEP (PEEP titration table) ของ ARDSnet

| Lower PEEP/higher FiO <sub>2</sub> |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| FiO <sub>2</sub>                   | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.7 |
| PEEP                               | 5   | 5   | 8   | 8   | 10  | 10  | 10  | 12  |

| FiO <sub>2</sub> | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 0.9 | 1.0   |  |  |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|--|--|
| PEEP             | 14  | 14  | 14  | 16  | 18  | 18-24 |  |  |

| Higher PEEP/lower FiO<sub>2</sub> |  |  |  |  |  |  |  |  |
| FiO<sub>2</sub> | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 0.5 |
| PEEP | 5 | 8 | 10 | 12 | 14 | 14 | 16 | 16 |

| FiO <sub>2</sub> | 0.5 | 0.5-0.8 | 0.8 | 0.9 | 1.0 | 1.0 |  |  |
|------------------|-----|---------|-----|-----|-----|-----|--|--|
| PEEP             | 18  | 20      | 22  | 22  | 22  | 24  |  |  |

2. ปรับตามค่า transpulmonary pressure (PL) เป็นการปรับระดับ PEEP คล้ายกับตารางที่แนะนำโดย ARDSnet แตกต่างเพียงแต่ต้องใส่สายสวนเข้าไปยังหลอดอาหาร (esophageal catheter) เพื่อวัดระดับความดันของช่องเยื่อหุ้มปอดที่วัดจากหลอดอาหาร (esophageal pressure, P<sub>eso</sub>) ค่า PL คำนวณได้จากผลต่างของความดันของที่วัดจากเครื่องช่วยหายใจ (airway pressure, P<sub>aw</sub>) และค่า P<sub>eso</sub> ( $PL = P_{aw} - P_{eso}$ ) ค่า PL ที่นำมาใช้ในการปรับค่า PEEP คือค่า PL ในช่วงหายใจออกสุด (P<sub>Lexp</sub>) โดยให้ปรับค่าของ PEEP เพื่อรักษาระดับของ P<sub>Lexp</sub> ระหว่าง 0-10 ซม.น้ำ ร่วมกับการรักษาให้ระดับของ PL ในขณะหายใจเข้าสุด (end-inspiration occlusion PL, P<sub>Lins</sub>) ไม่เกิน 25 ซม.น้ำ รักษาระดับ PaO<sub>2</sub> ระหว่าง 55-120 มม.ปรอท หรือ SaO<sub>2</sub> ร้อยละ 88-98 ระดับที่เหมาะสมของ P<sub>Lexp</sub> จะมีการปรับตามระดับ FiO<sub>2</sub> ของผู้ป่วยที่ใช้ในขณะนั้น ปรับโดยทั่วไปคือประมาณ 2 ซม.น้ำเหนือต่อ lower inflection point (LIP) ปรับระดับของ PEEP และ TV ให้ P<sub>plat</sub> ไม่เกิน 30 ซม.น้ำ และอัตราการหายใจไม่เกิน 35 ครั้ง/นาที แนวทางการปรับ PEEP จะพิจารณาจากตาราง P<sub>Lexp</sub>/FiO<sub>2</sub> (ตารางที่ 3) ปัจจุบันแนะนำว่าควรใช้ PL ในผู้ป่วยที่อ้วนมาก มีความดันในช่องท้องสูง ผู้ป่วยที่ต้องใช้ความดันในการจ่ายอากาศสูง (P<sub>plat</sub> >35-45 ซม.น้ำ) หรือผู้ป่วยที่มีความเป็นกรดในเลือดที่เกิดจากการคั่งของคาร์บอนไดออกไซด์ (severe respiratory acidosis) ที่ pH <7.15 ในขณะให้การรักษาด้วยปริมาตรอากาศตามข้อแนะนำ (lung protective ventilation)

ตารางที่ 3 การปรับระดับ PEEP โดยใช้ end expiration transpulmonary pressure

| PEEP titration by transpulmonary pressure at end expiration (P <sub>Lexp</sub> = P <sub>aw</sub> - P <sub>seo</sub> ) |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| FiO <sub>2</sub>                                                                                                      | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 0.6 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 0.8 | 0.9 | 0.9 | 1.0 |
| P <sub>Lexp</sub>                                                                                                     | 0   | 0   | 2   | 2   | 4   | 4   | 6   | 6   | 8   | 8   | 10  | 10  |

3. การหาความสามารถของการขยายตัวของปอดมากที่สุด (the best compliance) เป็นวิธีที่นิยมกันมากที่สุด เนื่องจากสามารถทำข้างเดียวได้ไม่ยาก แต่ต้องอาศัยความเข้าใจในหลักการ โดยแนะนำทำ PEEP titration โดยค่อยๆเพิ่มระดับ PEEP และติดตามระดับ compliance เรียกว่า “incremental PEEP titration” อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันวิธีการดังกล่าว จะทำร่วมกับการทำ RM เสมอ เพื่อทำการหาระดับของ PEEP titration หลังจากที่ทำปอดขยายตัวสูงสุดแล้ว เรียกว่า “decremental PEEP titration” วิธีดังกล่าวทำได้โดย ภายหลัง RM จะลดระดับ PEEP ที่ระดับ 20-25 ซม.น้ำ ลดระดับ PEEP ครั้งละ 2 ซม.น้ำ นาน 4-5 นาที ในแต่ละระดับ มีการติดตาม compliance, SpO<sub>2</sub> เมื่อพบระดับของ PEEP ที่มีผลให้ระดับ compliance เปลี่ยนแปลง หรือมีการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญแล้ว ระดับของ PEEP ที่ต่ำสุด ยังคงรักษาระดับของการแลกเปลี่ยนก๊าซที่ดีในระดับที่ compliance ดี คือระดับ PEEP ที่เหมาะสม (optimal PEEP) ให้ทำ RM อีกครั้ง และลดระดับของ PEEP ลงที่เหนือต่อ optimal PEEP 2 ซม.น้ำ (optimal PEEP + 2 ซม.น้ำ)
4. การใช้ PV curve วิธีนี้ทำได้จากเครื่องช่วยหายใจบางรุ่นเท่านั้น PV curve ที่สร้างขึ้นโดยอาศัยการจ่ายอากาศแบบ “supersyringe, constant slow inflation (<10 ลิตร/นาที)” PV curve ที่สร้างขึ้นขณะหายใจแบบ PCV หรือ PSV ไม่สามารถใช้ได้ เนื่องจากอัตราการไหลของอากาศไม่คงที่ โดยทั่วไปมักจะวัดระดับของ PV curve ที่ความดัน 0-40 ซม.น้ำ กราฟที่ได้ของ PV curve ดังแสดงในรูปที่ 5 ระดับ PEEP ที่เหมาะสม คือ 2 ซม.น้ำ เหนือต่อ LIP อย่างไรก็ตาม PV curve ควรวัดในกรณีที่ผู้ป่วยสงบหรือได้รับยาลดการเคลื่อนไหว เพื่อตัดปัจจัยรบกวนอื่นๆ และในบางครั้ง กราฟที่ได้ไม่สามารถระบุตำแหน่งของ LIP ได้

5. ค่าที่ใช้ในการประเมินอื่นๆ ได้แก่ Stress index (SI) เป็นวิธีการที่ใช้ในการประเมินรูปร่างของกราฟ pressure time curve ขณะตั้งเครื่องด้วย VCV constant flow ด้วยโปรแกรมของเครื่องช่วยหายใจ พบได้เฉพาะเครื่องช่วยหายใจบางรุ่น SI = 1 คือปกติ, SI >1 คือ over-distention – upward concavity (ควรลด PEEP) และ SI <1 คือ tidal-recruitment – downward concavity (ควรเพิ่ม PEEP หรือ RM) นอกจากนี้ยังมีการใช้อัลตราซาวด์ electrical impedance analysis (EIA) หรือ CT scan เพื่อใช้ในการปรับ PEEP ส่วนใหญ่ยังไม่มีการใช้โดยทั่วไปของไอซียูในประเทศไทย