Hemodynamic monitoring & end point of resuscitation

ผู้บรรยาย รศ.นพ.ศุภฤกษ์ ปรีชายุทธ
ผู้เรียบเรียง นพ.ศิรวิชญ์ บุญวิวัฒนาการ
อาจารย์ผู้ควบคุม อ.พญ.กนิษฐา สกลประกายกิจ

ภาวะ shock คือ ภาวะที่เนื้อเยื่อและเซลล์ต่างๆขาดออกซิเจนอันเนื่องมาจากเกิดการบกพร่องในการขนส่งออกซิเจนหรือมีการใช้ออกซิเจนในปริมาณมากขึ้นเกินสภาวะปกติ โดยสาเหตุที่พบบ่อยที่สุดของภาวะช็อคคือความดันต่ำ

Sign of shock

1. Alternation of conscious
2. Oliguria
3. Hypotension
4. Tachycardia
5. Cool/clammy/cyanotic skin
6. Metabolic acidosis
7. Hyperlactatemia

shock แบ่งเป็น 4 ประเภท ในผู้ป่วย 1 รายอาจมีลักษณะของ shock ประเภทต่างๆ ร่วมกันได้

1. Distributive shock
2. Cardiogenic shock
3. Hypovolemic shock
4. Obstructive shock

Hemodynamic monitoring

Hemodynamic monitoring เป็นอุปกรณ์เฝ้าระวังที่มีบทบาทสำคัญที่ใช้ในระหว่างการดูแลผู้ป่วย โดยมีหน้าที่หลักสำคัญ 2 ประการ ได้แก่ ช่วยในการวินิจฉัยกรณีที่มีการเปลี่ยนของระบบไหลเวียนโลหิต และ การประเมินการตอบสนองของผู้ป่วยต่อการรักษาที่ให้สำหรับอุปกรณ์เฝ้าระวังที่มีอยู่ในปัจจุบันมีตั้งแต่ อุปกรณ์ขั้นพื้นฐาน ไปจนถึงอุปกรณ์ที่มีความซับซ้อนและเป็นชนิด invasive ทั้งนี้การเลือกใช้อุปกรณ์ต่างๆ ควรคำนึงถึง อาการทางคลินิกและพยาธิสภาพของผู้ป่วยตลอดจนสถานที่ที่ให้การดูแลผู้ป่วยรายนั้นๆ สำหรับในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงชนิดของอุปกรณ์เฝ้าระวัง และ การประยุกต์ parameter ใหม่ๆ ที่มีการนำมาใช้ในปัจจุบัน ได้แก่การประเมินการตอบสนองต่อการให้สารน้ำ ,อุปกรณ์สำหรับการวัด cardiac output, การประเมินโดยใช้ค่า venous oximetry

การวัดการตอบสนองของผู้ป่วยต่อการให้สารน้ำ (Fluid responsiveness)

- Systolic pressure variation (SPV)

ในผู้ป่วยที่ได้รับการใส่เครื่องช่วยหายใจจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่าความดัน systole ที่สัมพันธ์กับช่วงเวลาของการหายใจนั้น ถ้าวัดความแตกต่างระหว่างค่าสูงสุด และต่ำสุดของความดัน systole ในระหว่างการหายใจเข้าและออกตามลำดับ เรียกการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนี้ว่า systolic pressure variation โดยค่าความแตกต่างของ systolic pressure นั้นจะถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. Delta up ซึ่งนับตั้งแต่ช่วงแรกของการหายใจเข้าซึ่งความดัน systole เริ่มมีค่าสูงขึ้นจนกระทั่งมีค่าสูงที่สุด โดยเปรียบเทียบกับค่าความดันในช่วงสิ้นสุดการหายใจออก (end expiration) เนื่องจากในระหว่างการหายใจเข้าพบว่าความดันในช่องอกเพิ่มขึ้นจะทำให้เลือดถูกบีบออกจาก right ventricle (RV) ไปยังปอดและหัวใจห้องซ้ายเพิ่มขึ้น จะพบว่าเลือดที่ออกจากหัวใจห้องซ้ายมีปริมาณมากขึ้น (left ventricular output)
2. Delta down มีการลดลงของความดัน systole เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความดันในช่วง end–expiration เกิดเนื่องจากการไหลของหลอดเลือดดำเข้าสู่หัวใจ (venous return) ลดลง ซึ่งพบได้ในระยะเวลาสั้นๆโดยปกติค่าของ systolic pressure variation ในผู้ป่วยที่ใส่เครื่องช่วยหายใจไม่ควรเกิน 10 มม.ปรอท โดยค่า delta down น่าจะสัมพันธ์โดยตรงกับภาวะพร่องน้ำ (hypovolemia) และอาจใช้สำหรับการทำนายการตอบสนองของผู้ป่วยต่อการให้สารน้ำ (fluid responsiveness) ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงของ delta up อาจจะไม่มีความสัมพันธ์กับภาวะดังกล่าวเลย อย่างไรก็ตามในกรณีผู้ป่วยที่มีการเปลี่ยนของ delta up ชัดเจนอาจบอกได้ว่าผู้ป่วยรายนั้นมีภาวะสารน้ำเกิน (hypervolemia) หรือ มีภาวะ left ventricular dysfunction

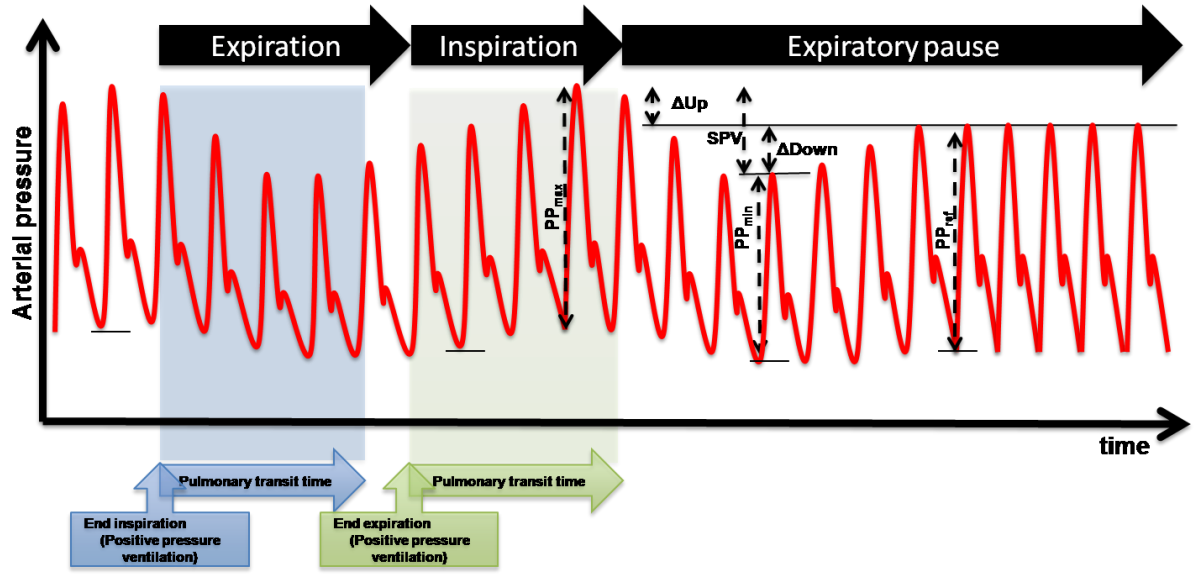

Fig. 1 Arterial pressure variation during positive pressure ventilation without spontaneous effort

- Pulse pressure variation

เป็นค่าความแตกต่างระหว่าง pulse pressure ที่มากที่สุด และ น้อยที่สุดในระหว่างการช่วยหายใจ 1 ครั้ง หารด้วยค่าเฉลี่ย (mean) ของ pulse pressure ทั้งสองค่า โดยค่า pulse pressure variation จะมีประโยชน์กว่า systolic pressure variation ในการบอกภาวะ fluid responsiveness เนื่องจากค่าดังกล่าวจะสัมพันธ์กับค่าของ left ventricular stroke volume โดยตรง นอกจากนี้ยังถือว่าเป็นค่าที่ดีสุดที่ช่วยบอกถึง fluid responsiveness โดยเฉพาะในผู้ป่วยที่ได้รับการรักษาด้วย positive end expiratory pressure (PEEP) ซึ่งอาจมีค่า pulse pressure variation เพิ่มขึ้นได้การเปลี่ยนแปลงของค่า pulse pressure variation อาจจะสามารถแยกผู้ป่วยที่กลุ่ม responder ออกจาก non-responder โดยมี sensitivity และ specificity ประมาณ 94 และ96 % ตามลำดับ กรณีที่พบการเปลี่ยนแปลงของ delta up อย่างมากหรือผู้ป่วยที่มีภาวะ right ventricular infarction การพิจารณาค่า pulse pressure variation อาจจะไม่สามารถทำนายภาวะ fluid responsiveness ได้

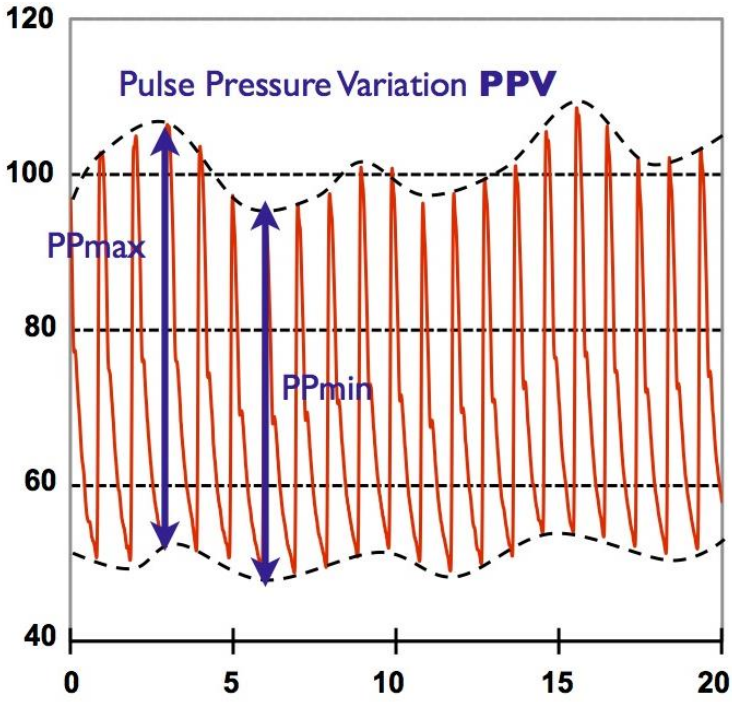

Fig. 2 Pulse pressure variation PPV

$$PPV\ (\%) = \frac{PP_{max} - PP_{min}}{(PP_{max} + PP_{min})} \times 100$$

- Stroke volume variation (SVV)

หลักการเคียงใกล้เคียงกันกับ pulse pressure variation คือ ค่าความแตกต่างระหว่าง stroke volume ที่มากที่สุด และ น้อยที่สุดในระหว่างการช่วยหายใจ 1 ครั้ง หารด้วยค่าเฉลี่ย (mean) ของค่า stroke volume ทั้งสอง เป็นค่าที่ sensitive ที่จะบอกถึงภาวะ fluid responsiveness ในระหว่างการได้ยาระงับความรู้สึก และ สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของค่าcardiac output หลังจากที่ให้สารน้ำไปแล้วอย่างรวดเร็วการประเมินโดยใช้ค่า SVV จะบอกภาวะ fluid responsiveness ในผู้ป่วยที่มีการทำงานของหัวใจปกติ ได้ดีกว่าผู้ป่วยที่มี ejection fraction ต่ำตั้งแต่ก่อนผ่าตัด และผู้ป่วยที่มีขนาดของ left ventricle end diastolic area ใหญ่ในระหว่างการผ่าตัด เนื่องจากผู้ป่วยเหล่านี้จะมีการเปลี่ยนแปลง delta up อย่างชัดเจน ซึ่งจะไม่สัมพันธ์กับภาวะ fluid responsiveness โดยตรงโดยสรุปพบว่าการประเมินการตอบสนองของ fluid responsiveness โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงของ ค่า systolic pressure variation, pulse pressure variation และ stroke volume variation จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน และมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของ parameter อื่นๆ เช่น การศึกษาปริมาณของ aortic blood flow, การวัดการเปลี่ยนแปลงของหลอดเลือด inferior vena cava เป็นต้น อย่างไรก็ตามค่าดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการประเมินการตอบสนองของผู้ป่วยต่อการให้สารน้ำได้ดีกว่าการใช้ประเมินค่า filling pressure เช่น CVP หรือค่า pulmonary capillary wedge pressure เป็นต้น

$$SV\ (\%) = \frac{SV_{max} - SV_{min}}{(SV_{max} + SV_{min})/2} \times 100$$

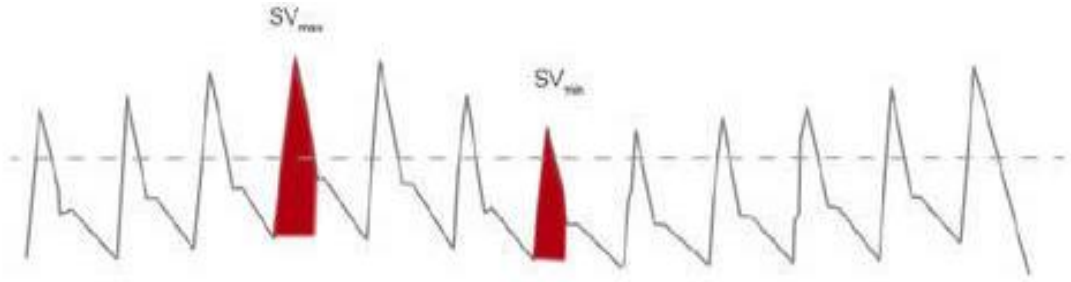

Fig. 3 SVV Stroke volume variation

- Central venous pressure

คือ แรงดันของเลือดที่กระทำกับผนังของหลอดเลือดดำใหญ่ในช่องทรวงอกที่ส่งเลือดกลับสู่หัวใจ โดยแรงดันใน great vein จะต่างกับ right atrial pressure ไม่เกิน 1 mmHg Pressure ใน central vein หรือ CVP บอกถึงความแรงของเลือดที่จะเข้าสู่หัวใจในช่วง diastole ซึ่งเป็นตัวกำหนด RV
end-diastolic volume (preload) อีกต่อหนึ่ง และบอกถึง back pressure ที่ขัดขวางเลือดจาก peripheral blood vessel จะกลับมาที่หัวใจ

การแปลผล

Low CVP (< 10 cmH_2O) หรือ low Rt atrial pressure แปลว่า เลือดกลับเข้าสู่ Rt heart ลดลง แสดงว่าต้องการ fluid หรือ blood เพิ่ม หรือแปลว่า vasomotor tone ลดลง ซึ่งพบได้ในภาวะ sepsis, spinal cord injury, หรือ sympathetic interruption อื่นๆ

High CVP (> 15 cmH_2O) แปลว่า หัวใจไม่สามารถทำให้เลือดไหลเวียนได้ดี เช่น LVH (มี poor ventricular compliance); ภาวะ volume-overload หรือ pump failure จากสาเหตุอื่นๆ เช่น pericardial tamponade, restrictive pericarditis, pulmonary stenosis, tricuspid regurgitation, pulmonary hypertension, pulmonary embolism intrathoracic pressure ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ CVP สูงได้ เช่น ไอ, เบ่ง, กระสับกระส่าย, positive pressure ventilator, pneumatic anti-shock garment, tension pneumothorax

Normal CVP ต้องดูตามอาการทางคลินิก ซึ่งเป็นภาพรวมของ blood volume, vessel tone, และ cardiac function ซึ่งการดูการเปลี่ยนแปลงของ CVP หลังให้ IVF จะดีกว่าการดูค่า CVP ตั้งต้นอย่างเดียว

Fluid challenge เป็นการบอกความสามารถของ Rt heart ในการรับ fluid load (PCWP จะบอกถึง Lt heart ได้ดีกว่า) ซึ่งบอกได้ถึง volume deficit และ pump failure

Table 1 Fluid challenge test

Initial CVP cmH_2O (mmHg)	Fluid infusion rate 10 – 15 min	Evaluation
<10 (8)	200 mL	Fluid response - CVP increase < 2 (2) - MAP increase > 10%
10 – 15 (8 – 12)	100 mL	
>15 (>12)	50 mL	Not response to fluid - CVP increase > 5 (3 – 4) - MAP not increase

ถ้า CVP เพิ่ม < 2 แสดงว่ายังให้ fluid ได้อีก ถ้า CVP เพิ่ม > 5 แสดงว่า volume expansion เพียงพอแล้ว

ถ้า CVP เพิ่ม 2-5 ให้รอ 10 นาที แล้ววัด CVP ซ้ำ ถ้าเพิ่ม > 2 แสดงว่า volume expansion เพียงพอแล้ว

ให้ fluid challenge ซ้ำๆจนกว่าจะพ้นจากภาวะ shock หรือ volume expansion เพียงพอแล้ว (CVP เพิ่ม > 2-5) หรือมีอาการแสดงของ cardiac incompetence เกิดขึ้น

- Cardiac output monitoring

pulmonary artery catheter ได้ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ ปี 1970 และ เป็นอุปกรณ์ชนิดแรกที่ใช้สำหรับการวัดปริมาณ cardiac output เนื่องจากอุปกรณ์นี้มีข้อจำกัดหลายอย่างทำให้ปัจจุบันมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่เป็น less invasive และ noninvasive เพื่อทดแทนการใช้ pulmonary artery catheter สำหรับติดตามการเปลี่ยนแปลงในผู้ป่วยที่มารับการผ่าตัด โดยเฉพาะ major surgery และผู้ป่วยหนัก (critical patients) อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการวัด cardiac output ที่ดีควรมีลักษณะดังต่อไปนี้ ได้แก่ มีความน่าเชื่อถือ, การวัดค่าอย่างต่อเนื่อง, noninvasive, ไม่จำเป็นต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญสำหรับการตรวจ (operator independent), วัดการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว (beat to beat) ปัจจุบันมีอุปกรณ์หลายชนิดที่สามารถวัดปริมาณของ cardiac output ได้ โดยแบ่งตามระดับของความ invasive ของอุปกรณ์ ได้แก่

Invasive thermodilution technique

1. Pulmonary artery catheter

อาศัยหลักการของ thermodilution โดยวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของเลือดภายในปอดในช่วงเวลาหนึ่ง สามารถวัดเป็นครั้งคราว (intermittent) และ วัดแบบต่อเนื่อง (continuous) ซึ่งมีการติดตั้ง thermistor ที่สายของ pulmonary artery catheter และสามารถเพิ่มอุณหภูมิได้ จากนั้นระบบจะวัดความแตกต่างของอุณหภูมิ และคำนวณการเปลี่ยนแปลงของ cardiac output อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ยังสามารถวัดค่า right ventricular ejection fraction (RVEF) และ right ventricular end diastolic volume (RVEDV) , pulmonary artery pressureและ mixed venous oxygen saturation (SVO2) อย่างไรก็ตามอุปกรณ์นี้อาจทำให้เกิดภาวะแทรกซ้อนมากมายและยังมีการถกถียงกันเมื่อเปรียบเทียบกับประโยชน์ที่ผู้ป่วยจะได้รับดังนั้นอุปกรณ์นี้จึงถูกจำกัดไว้ใช้สำหรับผู้ป่วยบางกลุ่มเท่านั้น เช่น ผู้ป่วยที่มีการทำงานของหัวใจล้มเหลว หรือมีภาวะปอดบวมน้ำ เป็นต้น และจำเป็นต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในการใส่สายและการแปลผล

2. Transpulmonary thermodilution cardiac output

จะใช้ arterial thermodilution สำหรับวัด stroke volume และ cardiac output ซึ่งจะใส่ arterial thermistor tipped catheter ไว้ในหลอดเลือด femoral artery ,axillary artery หรือ brachial artery ร่วมกับการใช้ central venous catheter เพื่อใช้สำหรับการฉีดน้ำเย็น ใช้สำหรับการวัดเป็นครั้งคราว สำหรับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชนิดนี้ใกล้เคียงกับ pulmonary artery catheter และถือว่าเป็นอุปกรณ์ชนิด invasive และโอกาสเกิดภาวะแทรกซ้อนน้อยกว่า และใช้ได้บ่อยกว่า pulmonary artery catheter ในกรณีที่ต้องการคาสายไว้นาน

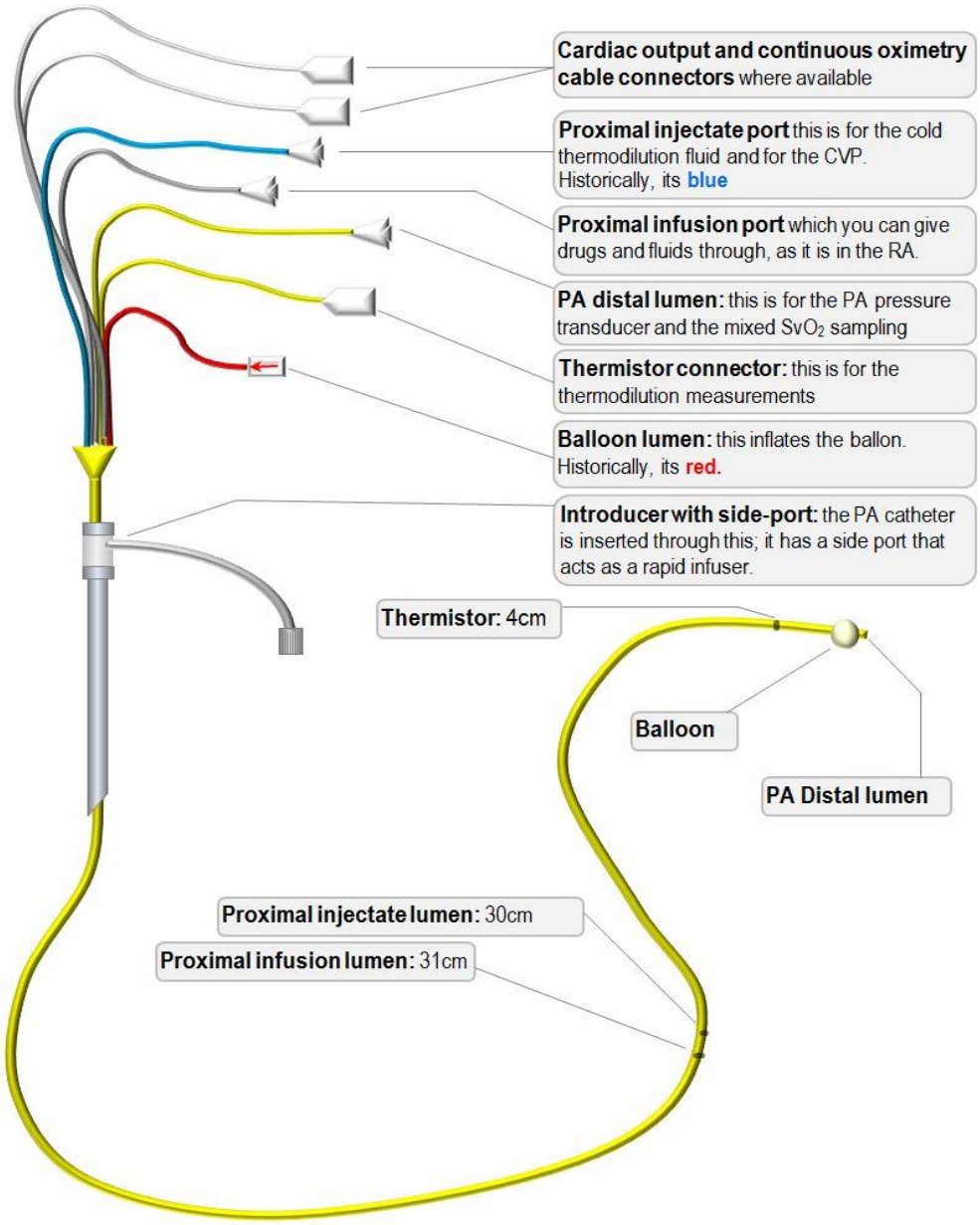

Fig. 4 Pulmonary artery catheter

3. Lithium dilution cardiac output

ใช้หลักการของ dye dilution โดยการฉีด lithium chloride ทางหลอดเลือดดำโดยไม่จำเป็นต้องให้ทาง central venous catheter จากนั้นระบบจะทำวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของ lithium ในเลือดในหนึ่งหน่วยเวลาจากการดูดเลือดที่ sensor ที่ติดไว้ที่ peripheral arterial catheter โดยวิธีนี้จะมีความถูกต้องในกรณีที่เลือดที่ผ่าน sensor มีปริมาณคงที่ และ indicator ไม่มีการสูญหายไปในบริเวณที่ทำการฉีด และตำแหน่งของ sensor

Minimally invasive continuous arterial pulse waveform analysis

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์ 3 ชนิดที่สามารถวัดการเปลี่ยนแปลงของ cardiac output อย่างต่อเนื่องโดยวิเคราะห์จาก arterial waveform ได้แก่ Vigileo/ Flotrac ,PiCCO และ LiDCO

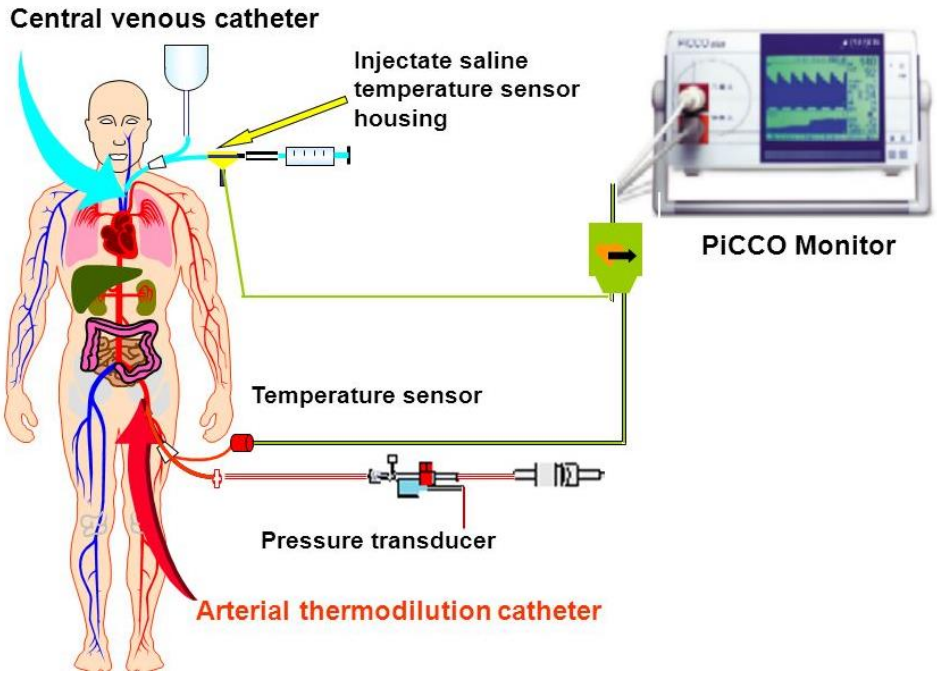

Fig. 5 Cardiac output measurement with a transpulmonary thermodilution method

4. Noncalibrated arterial pressure – based cardiac output

Vigileo / FloTrac system จะใช้ pressure transducer ชนิดพิเศษ (FloTrac) ต่อเข้ากับ peripheral arterial catheter ที่บริเวณ radial artery ,brachial artery และ femoral artery โดยไม่จำเป็นต้อง calibration ซึ่งจะทำการวิเคราะห์ arterial waveform และข้อมูลต่างๆของผู้ป่วย รวมถึงคำนวณปริมาณของ cardiac output ทุกๆ 20 วินาที โดยคำนวณจากค่า stroke volume ที่ได้ และ อัตราการเต้นของหัวใจของผู้ป่วย อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีข้อจำกัดหลายประการ ได้แก่ ปัจจัยที่มีผลต่อ vascular tone เช่น ผู้ป่วยที่รับการรักษาด้วยยา inotrope หรือ vasopressor , คุณภาพของของ arterial waveform หรือ arrhythmia เป็นต้น อาจทำให้ค่าที่ได้ไม่ถูกต้องนัก

Fig. 6 Calibrated continuous arterial pulse contour cardiac output

5. Calibrated continuous arterial pulse contour cardiac output

เป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นต้องทำการ calibration ก่อนการใช้ และทำการวิเคราะห์stroke volume จากส่วนของ systolic phase ของ arterial pressure waveform สำหรับ pulse contour cardiac output system (PiCCO) และอาศัยหลักการของ transpulmonary thermo dilution ในขณะที่ Lithium indicator dilution cardiac output (LiDCO) โดยใช้ lithium dilution สำหรับการ calibration และทั้งสองวิธีต้องการการทำ calibration เป็นระยะ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของ vascular compliance เช่น ผู้ป่วยที่มีภาวะ sepsis หรือ ในระหว่างผ่าตัดหลังจากการทำ cardiopulmonary bypass เป็นการวัดค่า cardiac output อย่างต่อเนื่อง ข้อจำกัดการใช้อุปกรณ์นี้เช่นเดียวกันกับ Vigeleo / Flotrac system

Less invasive technique

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาอุปกรณ์หลายชนิด ที่มีลักษณะของ less invasive หรือ noninvasive อุปกรณ์เหล่านี้ ได้แก่

6. Transesophageal aortic doppler ultrasound

การคำนวณ cardiac output โดยการวัดความเร็วของเลือดทีอยู่ภายในหลอดเลือด descending aorta โดยใช้ Doppler probe และสามารถคำนวณหาค่า stroke volume อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของวิธีนี้ ได้แก่ ไม่สามารถใช้ในผู้ป่วยที่ความผิดปกติของหลอดอาหาร(esophageal disorder) ที่ปัญหาของการรับสัญญาณ, จำเป็นต้องปรับตำแหน่งของ probe เป็นระยะ, ต้องอาศัยผู้ที่มีความเชี่ยวชาญ, ในระหว่างทำผ่าตัดบริเวณ aorta อาจจะประเมินผลได้ยาก, และมักจะทำได้ในระหว่างผ่าตัดและผู้ป่วยได้รับการใส่ท่อช่วยหายใจเท่านั้น นอกจากนี้ไม่สามารถใช้ร่วมกับ transesophageal echocardiography

7. Transesophageal echocardiography

สามารถวิเคราะห์หา cardiac output โดยดูการเปลี่ยนแปลงจากขนาดของ left ventricle ในช่วงท้ายของ systole และ diastole หรือ วัดโดยใช้ Doppler flow บริเวณ ลิ้น aortic หรือ บริเวณ left หรือ right ventricular outflow tract ซึ่งสามารถวัดความเร็วและพื้นที่หน้าตัดบริเวณที่เลือดไหลผ่าน โดยสามารถประเมินในระหว่างและหลังผ่าตัดได้ นอกจากนี้ยังช่วยในการวินิจฉัยภาวะที่หัวใจมีการบีบตัวผิดปกติ (wall motion abnormality), ประเมินการทำงานของ ventricle ได้ในระหว่างผ่าตัด อย่างไรก็ตามเครื่องมือนี้ต้องอาศัยผู้ใช้ที่มีความชำนาญ และเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพดี รวมถึงภาวะแทรกซ้อนที่อาจเกิดขึ้นได้จากการใส่ TEE probe

8. Pulse dye densitometry

โดยการฉีดสี indocyanine green เข้าทางหลอดเลือดดำ แล้วอาศัยเครื่องมือที่ติดบริเวณปลายนิ้ว ซึ่งดัดแปลงมากจาก pulse oximetry เพื่อวิเคราะห์ปริมาณของ indocyanine green ในหลอดเลือดดำ อย่างไรก็ตามภาวะที่เลือดไปเลี้ยงน้อย หรือมีการหดตัวของของหลอดเลือด, ผู้ป่วยมีการเคลื่อนไหว, แสงที่สว่างจ้า อาจจะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง

9. Bioimpedance cardiography

การกระตุ้นร่างกายด้วยกระแสไฟฟ้าที่ต่ำและคงที่ โดยการวางเครื่อง electrical bioimpedance ไว้บริเวณทรวงอก และ วิเคราะห์หาค่าความต้านทานของทรวงอกที่เปลี่ยนแปลงไป ทำให้สามารถหาค่า stroke volume ได้อย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตามค่าที่ได้เปรียบเทียบกับthermodilution อาจได้ผลที่ไม่แน่นอน และข้อจำกัดของการใช้อุปกรณ์นี้ ได้แก่ ผู้ป่วยที่มีหน้าอกผิดปกติ, ผู้ป่วยที่มีภาวะ pulmonary edema หรือ intracardiac shunt หรือมีลิ้นหัวใจที่ผิดปกติอาจจะมีผลต่อค่าที่วัดได้

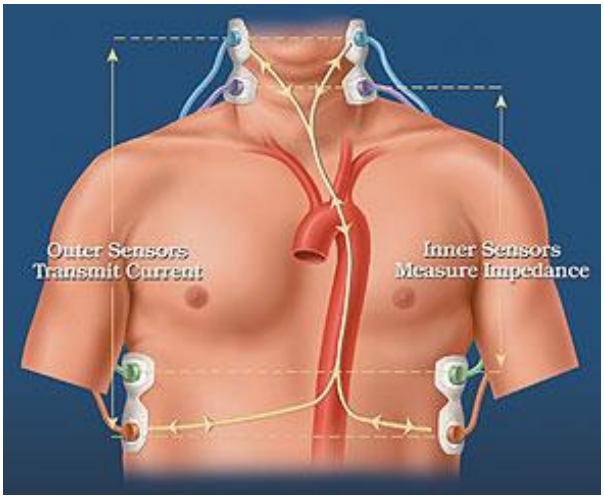

Fig. 7 Bioimpedance cardiography

10. Partial carbon dioxide rebreathing

คือ noninvasive cardiac output monitoring (NICO) system ซึ่งใช้หลักการของ Fick method โดยใช้การวิเคราะห์ปริมาณ ของ carbon dioxide แทน แล้วจำลองให้เกิด ภาวะ rebreathing เพื่อดูการเปลี่ยนแปลงของ carbon dioxide ที่ถูกกำจัดออก และความแตกต่างของ carbon dioxide content การวิเคราะห์ค่า CO_2 โดยใช้เครื่อง mainstream และ airflow sensor ทำให้สามารถคำนวณปริมาณของ CO_2 ภายในร่างกายและ ในเลือดแดง เป็นวิธีที่สามารถประเมิน cardiac output ได้ค่อนข้างแม่นยำและถูกต้อง ข้อจำกัดของวิธีนี้ ได้แก่ ใช้ได้เฉพาะในผู้ป่วยที่ใส่ท่อช่วยหายใจเท่านั้น หรือ ผู้ป่วยที่มีปัญหาของปอดอาจจะได้ค่าที่ไม่ถูกต้อง

11. Ultrasound IVC

จากหลักการที่ Inferior vena cava (IVC) diameter สัมพันธ์กับค่าของ Central venous pressure ซึ่งถูก ใช้เป็นเครื่องประเมินภาวะน้ำในร่างกาย นำมาสู่การตรวจขนาดของ IVC ด้วย Ultrasound โดยมีหลักการคือขนาดของ IVC เป็นไปในแนวทางเดียวกับปริมาตรเลือดในระบบไหลเวียน และการหายใจตามปกติที่มีความดันเป็นลบของทรวงอก ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงของขนาด IVC

วิธีการวัด แนะนำให้ใช้ curvilinear transducer วางลงบนท้องบริเวณ Subxyphoid เพื่อให้เห็นลักษณะ Sagittal view ของ Inferior vena cava ที่ต่อกับ Right atrium โดยวัดที่ต่ำกว่า Cavo-atrial junction 2 cm โดยมีการ แปลผลดังนี้

Table 2 Ultrasound IVC interpretation

Expiratory IVC diameter (cm) and change	Estimated CVP (cmH_2O)
<1.5 - Total collapse	 0 – 5
1.5 – 2.5 - >50% collapse - <50% collapse	 6 – 10 11 – 15
>2.5 - <50% collapse - No change	 16 – 20 >20

Venous oximetry

Mixed venous oxygen saturation (SVO_2)

ในการรักษาผู้ป่วยหนักในระยะเริ่มแรก มักติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณชีพ, ปริมาณของปัสสาวะ, ค่า filling pressure เช่น central venous pressure, pulmonary capillary wedge pressure เป็นต้น เพื่อประเมินการตอบสนองต่อการรักษา อย่างไรก็ตามแม้ค่าต่างๆ เหล่านี้ จะอยู่ในเกณฑ์ปกติ อาจพบว่ามีผู้ป่วยจำนวนหนึ่งที่เกิดภาวะ global tissue hypoxia ซึ่งบ่งบอกว่าผู้ป่วยกลุ่มนี้อาจมีระบบไหลเวียนโลหิตที่ผิดปกติจนทำให้เกิดความผิดปกติในระดับเซลล์ตามมา ในกรณีที่ไม่ได้รับการแก้ไขอาจจะนำไปสู่การทำงานของอวัยวะต่างๆ ในร่างกายล้มเหลว ค่า mixed venous oxygen saturation (SVO_2) เป็นค่าหนึ่งที่แสดงถึงความสมดุลของร่างกายระหว่างความต้องการออกซิเจน(oxygen consumption) และ การส่งออกซิเจนไปเลี้ยงเนื้อเยื่อต่างๆ (oxygen delivery) ซึ่งค่าปกติจะเท่ากับ 75% ค่าดังกล่าวจะแปรผันตรงกับค่า cardiac output, ระดับ hemoglobin และ oxygen saturation และแปรผกผันกับค่า oxygen delivery สำหรับการเปลี่ยนแปลงของค่า SVO_2 มีความสำคัญมากเนื่องจากพบว่าถ้าค่า SVO_2 ลดลงเหลือ 50% จะตรวจภาวะ lactic acidosis และ ถ้าค่า < 25% เนื้อเยื่อต่างๆ อาจตายได้ อย่างไรก็ตามการหาค่า SVO_2 มีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ต้องดูดเลือดจาก pulmonaryartery catheter (PAC) มาตรวจ, ปลายสายควรอยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสม, เครื่องมือต้องได้รับการ calibration ที่ถูกต้อง เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการศึกษาค่าของ central venous oxygen saturation ($ScVO_2$) โดยปัจจุบันจึงมีการศึกษาโดยใช้การดูดเลือดจาก central venous catheter เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของออกซิเจนที่ถูกนำใช้ไปจากเลือดดำที่กลับจากส่วนบนของร่างกาย ได้แก่ SVC และสมอง

ความสัมพันธ์ระหว่าง $ScVO_2$ และ SVO_2

SVO_2 เป็นเลือดที่ดูดจาก pulmonary artery catheter ซึ่งเป็นเลือดที่กลับมาจากส่วนต่างๆ ของร่างกายทั้งหมด ซึ่งโดยปกติพบว่าปริมาณ oxygen saturation ในหลอดเลือด inferior vena cava จะสูงกว่า ในหลอดเลือด superior vena cava ดังนั้นค่า SVO_2 จึงมีค่าสูงกว่า $ScVO_2$ ประมาณ 2 – 3% หรืออาจจะแตกต่างกันถึง 5 – 18% อย่างไรความสัมพันธ์นี้อาจเปลี่ยนแปลงไปในผู้ป่วยที่ได้รับยาระงับความรู้สึก, ผู้ป่วยบาดเจ็บที่ศีรษะ หรือผู้ป่วยที่อยู่ในภาวะ shock อาจพบว่าค่า SVO_2 มีค่าลดลงได้ เนื่องจากปัจจัยที่อาจมีผลเปลี่ยนแปลงปริมาณเลือดที่ไปเลี้ยงสมอง หรือการที่ metabolism ของสมองลดลง ดังนั้นค่า $ScVO_2$ อาจมีค่าสูงกว่า SVO_2 ถึง 6% แม้ว่าปัจจุบันยังเป็นที่ถกเถียงกันถึงการใช้ค่า $ScVO_2$ แทนค่า SVO_2 เนื่องจากค่าทั้งสองจะค่อนข้างใกล้เคียงกันในภาวะปกติ และอาจจะเกิดความแตกต่างกันจากสาเหตุที่กล่าวไว้ข้างต้น อย่างไรก็ตามในกรณีที่ร่างกายมีพยาธิสภาพเกิดขึ้นการเปลี่ยนแปลงของค่าทั้งสองก็ยังคงมีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกัน และการประเมินโดยใช้ค่า $ScVO_2$ น่าจะสามารถบอกความสัมพันธ์ระหว่าง oxygen supply และ demand ของร่างกายได้คร่าวๆ โดยพบว่าถ้าระดับของ $ScVO_2$ มากกว่า 70% พบว่าผู้ป่วยมีอัตราการเสียชีวิตน้อยกว่า อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ควรพิจารณาร่วมกับค่า mean arterial pressure (MAP) และ central venous pressure (CVP) ปัจจุบันมีการศึกษาและใช้ $ScVO_2$ สำหรับติดตามการรักษาผู้ป่วย sepsis หรือ septic shock และในผู้ป่วยที่มารับการผ่าตัด major surgery

Endpoint of resuscitation

ในภาวะช็อคร่างกายเกิดการสันดาปแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้เกิดกรดส่วนเกินและภาวะขาดออกซิเจนขึ้น เพราะฉะนั้นเป้าหมายของการรักษาภาวะช็อคคือ การทำให้ระบบไหลเวียนกลับมาทำงานเป็นปกติเพื่อให้เนื้อเยื่อได้รับออกซิเจนที่เพียงพอที่จะกลับมาเกิดการสันดาปโดยใช้ออกซิเจนและกำจัดการคั่งของกรดแลคติกส่วนเกิน

ภาวะช็อค ไม่ได้เกิดจากระดับความดันโลหิตต่ำเพียงอย่างเดียว ยังมีผลของ regional hypoperfusion จากการลัดทางเดินของเลือดในเนื้อเยื่อส่วนปลายซึ่งเป็นผลมาจากผนังหลอดเลือดผิดปกติหรือเกิดก้อนเลือดเล็กๆ อุดกั้นในหลอดเลือดส่วนปลาย (micro thrombi) รวมทั้ง cytokines และ mediators ต่างๆจากภาวะช็อค ทำให้เซลล์นำออกซิเจนและสารอาหารต่างๆ ไปใช้ไม่ได้ถึงแม้มีเลือดไปสู่เซลล์อย่างเพียงพอ เพราะฉะนั้น ในการรักษาต้องพิจารณาทั้ง Macro และ micro perfusion ไปพร้อมกัน

Table 3 End point of resuscitation

Systemic / global
Lactate
Base deficit
Cardiac output
Oxygen delivery and consumption
Tissue specific
Gastric tonometry
Tissue pH, oxygen, carbon dioxide levels
Near infrared spectroscopy
Cellular
Membrane potential
Adenosine triphosphate

Global perfusion ในทางคลินิกที่วัดได้สะดวก คือ ระดับความดันโลหิต เป้าหมายรักษาระดับ MAP มากกว่า 60 – 70 mmHg การพิจารณา MAP แทนระดับ SBP เนื่องจาก MAP มีความสัมพันธ์กับระดับ autoregulation ของอวัยวะต่างๆ มากกว่า นอกจากระดับ MAP แล้วต้องประเมินอาการแสดงทางระบบต่างๆ เช่น ซึมลง ปัสสาวะออกน้อยและปลายมือเท้าเย็น รวมทั้งต้องพิจารณาปัจจัยอื่นๆ ร่วมด้วย ดังนี้ Cardiac output (CO) สามารถใช้ติดตามและดูการตอบสนองต่อการให้สารน้ำหรือ vasopressor รวมทั้งนำค่ามาคำนวณ oxygen transport และ tissue oxygenation เช่น oxygen delivery (DO_2), oxygen consumption (VO_2) และ oxygen extraction ratio (ERO_2) ดังตารางที่ 4 ค่า CO สามารถวัดได้โดยวิธี non-invasive เช่น การทำ echocardiography ทั้ง transthoracic และ transesophageal หรือวิธี electric bioimpedance โดย pulse contour analysis รวมทั้งวิธี invasive โดยใช้ pulmonary artery catheter ซึ่งวัดได้ทั้งแบบครั้งคราว เช่น วิธี thermodilution และแบบตลอดเวลา ค่า hemodynamic parameter ต่างๆ แสดงในตารางที่ 5 Mixed venous oxygen saturation (SvO_2) เป็นค่าออกซิเจนที่เหลืออยู่ในเลือดดำรวมก่อนไปฟอกที่ปอด วัดได้โดยการใส่สายสวนหัวใจด้านขวา (pulmonary artery catheter หรือ Swan-Ganz catheter) วัดได้ทั้งแบบชั่วคราวและตลอดเวลาโดยใช้ fiberoptic oximeter ค่า SvO_2 ขึ้นกับระดับออกซิเจนในเลือดฮีโมโกลบิน ความต้องการออกซิเจนของร่างกาย และระดับ Cardiac output ซึ่งค่านี้จะบ่งบอกความสัมพันธ์ระหว่างการขนส่งออกซิเจนและการใช้ออกซิเจนของเนื้อเยื่อส่วนปลาย หากมีค่าน้อยแสดงว่าส่งไปน้อยหรือเนื้อเยื่อส่วนปลายดึงไปใช้มาก ค่าปกติของ SvO_2 อยู่ระหว่าง 70 – 75% ในผู้ป่วย shock ซึ่งมีการลัดทางเดินของเลือดในเนื้อเยื่อส่วนปลายควรมีค่า SvO_2 ที่สูงขึ้นกว่าผู้ป่วยกลุ่มอื่น ดังนั้นหาก SvO_2 มีค่าต่ำกว่า 70% แสดงถึงการขนส่งออกซิเจนไปสู่เนื้อเยื่อส่วนปลายบกพร่อง ควรได้รับการแก้ไขอย่างรวดเร็วเพื่อเพิ่มการขนส่งออกซิเจนไปยังเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ central venous saturation ($ScvO_2$) เป็นการตรวจวัดระดับออกซิเจนในหลอดเลือดดำใหญ่ สามารถ

ตรวจวัดได้ง่ายทาง CVP line ซึ่งสะดวกกว่าการวัด SvO_2 มีการศึกษาเปรียบเทียบว่าสามารถใช้ $ScvO_2$ ทดแทน SvO_2 ได้ โดยพบว่าสามารถใช้ค่า $ScvO_2$ เป็นเป้าหมายหนึ่งในการ resuscitation

Table 4 Oxygen transport parameter

Parameter	Calculation	Normal values
Arterial oxygen content (CaO_2)	(1.34 x Hb x SaO_2) + 0.003 x PaO_2	16 – 22 mL O_2/dL blood
Venous oxygen content (CvO_2)	(1.34 x Hb x SvO_2) + 0.003 x PvO_2	12 – 17 mL O_2/dL blood
Oxygen delivery (DO_2)	(CaO_2) x CO x 10	800 – 1,600 mL/min
Oxygen delivery index (DO_2I)	DO_2 / BSA	520 – 720 mL/min/m^2
Oxygen consumption (VO_2)	(CaO_2 – CvO_2) x CO x 10	150 – 400 mL/min
Oxygen consumption index (VO_2I)	VO_2 / BSA	115 – 165 mL/min/m^2
Oxygen extraction ratio (ERO_2)	[1 – (VO_2/DO_2)] x 100	22 – 32%

SaO_2 = oxygen saturation in arterial blood, PaO_2 = partial pressure in arterial blood, SvO_2 = oxygen saturation in venous blood, PvO_2 = partial pressure in venous blood, Hb = hemoglobin, CO = cardiac output, BSA = body surface area

Table 5 Hemodynamic parameter

Parameter	Calculation	Normal values
Cardiac output (CO)	SV x HR	4 – 8 L / min
Cardiac index (CI)	CO / BSA	2.6 – 4.2 (L / min) / m^2
Stroke volume (SV)	CO / HR	50 – 100 mL / beat
Systemic vascular resistance (SVR)	[(MAP – RAP) / CO] x 80	700 – 1,600 dyne.s / cm^5
Left ventricular stroke work (LVSW)	SV [MAP – PAOP) x 0.0136	60 – 80 g – m / beat

HR = heart rate, BSA = body surface area, MAP = mean arterial pressure, RAP = right arterial pressure, PAOP = pulmonary artery occlusion pressure

Lactate สร้างมาจากการเปลี่ยน Pyruvate โดยเอนไซม์ lactate dehydrogenase ในภาวะกรสันดาปแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อ lactate ถูกสร้างขึ้นมา จะถูกปล่อยเข้าระบบไหลเวียนและถูกทำลายที่ตับและไต ระดับ serum lactate มีค่าสูงขึ้นได้ในภาวะช็อคจากหลายสาเหตุ ซึ่งบ่งบอกถึงการไหลเวียนบกพร่องและมีการสันดาปโดยขบวนการไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic metabolism) โดยจากการศึกษาพบว่าระดับ lactate ในระบบไหลเวียนตอนแรก จุดสูงสุด และเวลาที่สามารถกำจัด lactate ออกจากระบบไหลเวียน เป็นปัจจัยที่สามารถบ่งบอกอัตรารอดชีวิตได้ เช่น ผู้ป่วยที่สามารถจำกัด lactate ออกจากกระแสโลหิตภายใน 24 ชั่วโมงจะมีอัตรารอดชีวิตที่ 100%, 24 – 48 ชั่วโมง รอดชีวิต 78%, มากกว่า 48 ชั่วโมง รอดชีวิตเพียง 14% เป็นต้น

Base deficit คือ ปริมาณ base ในหน่วย mmol ที่ใช้ titrate เลือด 1 ลิตร ให้มี pH ที่ 7.40 ที่อุณหภูมิปกติร่างกาย ในทางปฏิบัติสามารถวัดได้จากการส่ง arterial blood gas โดยสามารถแบ่งความรุนแรงได้เป็น 3 ระดับคือ mild (3 – 5 mmol/L), moderate (6 – 14 mmol/L), severe (>14 mmol/L) ซึ่งในระดับความรุนแรงที่มากขึ้นจะสัมพันธ์โดยตรงกับอัตราตายที่เพิ่มขึ้น

Gastric tonometry ใช้วัดการไหลเวียนในระบบทางเดินอาหารซึ่งสามารถบ่งบอกถึงระบบการไหลเวียนโดยรวมได้ โดยการวัดทำได้โดยใช้nasogastric tubeที่ผลิตมาพิเศษเพื่อสามารถวัดระดับ bicarbonateในกระเพาะอาหารและคำนวนออกมาเป็น intramucosal pH ซึ่งพบว่า ระดับ pHที่ต่ำกว่า 7.3 บ่งบอกถึงผลการรักษาที่แย่กว่า

Near infrared spectroscopy ใช้หลักการดูดกลืนของแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆในการวัดระดับความเข้มข้นของออกซิเจนและ redox cytochrome