

# TỔNG QUAN VAI TRÒ TIÊN LƯỢNG CỦA SIÊU ÂM TIM, PHỔI VÀ CƠ HOÀNH TRONG CAI THỞ MÁY Ở BỆNH NHÂN HỒI SỨC

Trần Việt Đức<sup>1,✉</sup>, Vũ Hoàng Phương<sup>1,2</sup>

Trần Thị Loan<sup>3</sup>, Nguyễn Hữu Tú<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Bệnh viện Đại học Y Hà Nội

<sup>2</sup>Trường Đại học Y Hà Nội

<sup>3</sup>Bệnh viện E

*Cai thở máy là giai đoạn quan trọng trong điều trị bệnh nhân hồi sức, trong đó thất bại rút nội khí quản liên quan đến tăng biến chứng và tử vong. Cơ chế thất bại thường là kết quả của tương tác đa yếu tố giữa rối loạn huyết động, mất thông khí – phù phổi và suy giảm chức năng cơ hô hấp. Bài tổng quan này tổng hợp các bằng chứng về vai trò của siêu âm tim, phổi và cơ hoành trong tiên lượng kết quả cai thở máy. Siêu âm tim giúp phát hiện tăng áp lực ổ đày thất trái; siêu âm phổi phản ánh tình trạng mất thông khí và ứ dịch; trong khi siêu âm cơ hoành đánh giá dự trữ co cơ hô hấp. Cách tiếp cận siêu âm đa cơ quan (tim – phổi – cơ hoành) là một hướng tiếp cận tiềm năng, đặc biệt ở bệnh nhân nguy cơ cao như bệnh tim mạch, sau phẫu thuật lớn hoặc thở máy kéo dài, với chiến lược đánh giá động trước, trong SBT và sau rút ống. Tuy nhiên, do chưa có mô hình chuẩn hóa và sự khác biệt giữa các nghiên cứu, việc áp dụng cần gắn với đào tạo, chuẩn hóa kỹ thuật và tích hợp lâm sàng. Cần thêm các nghiên cứu tiến cứu, đa trung tâm để xác định vai trò của từng chỉ số trong các nhóm bệnh cụ thể.*

**Từ khóa:** Cai thở máy, siêu âm tim, siêu âm phổi, siêu âm cơ hoành, tiên lượng, hồi sức tích cực, hồi sức ngoại khoa.

## I. ĐẶT VẤN ĐỀ

Cai thở máy là một giai đoạn quan trọng trong quá trình điều trị bệnh nhân hồi sức tích cực. Quyết định rút ống nội khí quản không chỉ phản ánh sự cải thiện chức năng hô hấp mà còn ảnh hưởng trực tiếp đến tiên lượng, thời gian nằm hồi sức và chi phí điều trị. Thất bại cai thở máy, thường được định nghĩa là cần đặt lại nội khí quản hoặc tái hỗ trợ thông khí trong vòng 48 giờ sau rút ống, có liên quan đến tăng tỷ lệ biến chứng, kéo dài thời gian nằm viện và tăng tỷ lệ tử vong.<sup>1</sup> Theo các nghiên cứu quan sát lớn và khuyến cáo quốc tế về cai thở máy, tỷ lệ thất bại dao động khoảng 15 – 25% ở bệnh

nhân hồi sức nói chung, và có thể cao hơn ở nhóm bệnh nhân ngoại khoa do đặc điểm bệnh lý phức tạp, tổn thương đa cơ quan, thay đổi huyết động và ảnh hưởng hậu phẫu đến chức năng tim – phổi.<sup>1</sup> Vì vậy, việc dự đoán chính xác khả năng cai máy thành công có ý nghĩa quan trọng trong tối ưu hóa chiến lược điều trị và sử dụng hợp lý nguồn lực hồi sức.

Các phương pháp đánh giá truyền thống như chỉ số thở nhanh nông (Rapid Shallow Breathing Index – RSBI), áp lực hít vào tối đa và thử nghiệm thở tự nhiên (Spontaneous Breathing Trial – SBT) đã được áp dụng rộng rãi trong thực hành lâm sàng. Tuy nhiên, giá trị tiên lượng của các chỉ số này còn hạn chế, đặc biệt ở bệnh nhân ngoại khoa, nơi nhiều yếu tố sinh lý bệnh đồng thời tác động đến quá trình cai máy như rối loạn chức năng tim tiềm ẩn, giảm dung tích phổi sau phẫu thuật, thay đổi

*Tác giả liên hệ: Trần Việt Đức*

*Bệnh viện Đại học Y Hà Nội*

*Email: ductran.hmu@gmail.com*

*Ngày nhận: 02/03/2026*

*Ngày được chấp nhận: 27/03/2026*

dịch truyền và ảnh hưởng của thuốc an thần – giảm đau. Các khuyến cáo quốc tế gần đây cũng nhấn mạnh rằng thất bại cai thở máy là hậu quả của sự tương tác đa cơ chế, bao gồm rối loạn huyết động, mất thông khí phổi, suy giảm chức năng cơ hô hấp và các yếu tố toàn thân như nhiễm trùng, rối loạn chuyển hóa hoặc yếu cơ mắc phải tại hồi sức.<sup>2</sup> Do đó, việc dự đoán khả năng cai máy thành công vẫn là một thách thức trong thực hành lâm sàng.

Trong bối cảnh đó, siêu âm có trọng điểm tại giường (point-of-care ultrasound – POCUS) ngày càng được ứng dụng rộng rãi trong hồi sức nhờ tính không xâm lấn, khả năng đánh giá động theo thời gian thực và tính lặp lại cao. Ba kỹ thuật siêu âm chính trong dự đoán cai thở máy gồm siêu âm tim, phổi và cơ hoành. Siêu âm tim đánh giá chức năng thất và áp lực ổ đày (E/e', TAPSE, EF), siêu âm phổi phản ánh mức độ mất thông khí và ứ dịch (LUS, B-line), trong khi siêu âm cơ hoành (DTF, DE) đánh giá chức năng cơ hô hấp.<sup>3</sup>

Mặc dù nhiều nghiên cứu quan sát, thử nghiệm lâm sàng và phân tích gộp đã cho thấy giá trị tiên lượng độc lập của từng kỹ thuật siêu âm cũng như lợi ích tiềm năng của mô hình kết hợp đa chỉ số, song vẫn tồn tại sự khác biệt về thiết kế nghiên cứu, quần thể bệnh, ngưỡng cắt và phương pháp đo. Đặc biệt ở bệnh nhân hồi sức ngoại khoa, dữ liệu còn phân tán và chưa được hệ thống hóa một cách toàn diện, trong khi nhóm đối tượng này có những đặc thù riêng về sinh lý tim – phổi và yếu tố phẫu thuật.

Mục tiêu của tổng quan này là hệ thống hóa các bằng chứng về vai trò tiên lượng của siêu âm tim, phổi và cơ hoành trong dự đoán kết quả cai thở máy ở bệnh nhân hồi sức, đồng thời phân tích các dữ liệu hiện có ở nhóm hồi sức ngoại khoa và khả năng ứng dụng lâm sàng trong thực hành.

## II. NỘI DUNG TỔNG QUAN

### 1. Phương pháp tổng quan và lựa chọn tài liệu

Bài tổng quan này được thực hiện theo phương pháp tổng quan tường thuật (narrative review), với việc tìm kiếm và lựa chọn tài liệu có định hướng nhằm tổng hợp và phân tích các bằng chứng hiện có, về vai trò tiên lượng của siêu âm tim, phổi và cơ hoành trong cai thở máy. Tài liệu được tìm kiếm trên các cơ sở dữ liệu điện tử gồm PubMed/MEDLINE, Embase, Scopus và Cochrane Library, kết hợp với tìm kiếm thủ công từ danh mục tài liệu tham khảo của các bài báo liên quan.

Chuỗi tìm kiếm được xây dựng bằng cách kết hợp các thuật ngữ MeSH và từ khóa tự do liên quan đến ba thành phần chính: cai thở máy, siêu âm và giá trị tiên lượng, được điều chỉnh phù hợp cho từng cơ sở dữ liệu. Chuỗi tìm kiếm được sử dụng như sau: (“Ventilator Weaning”[Mesh] OR weaning OR extubation OR “liberation from mechanical ventilation” OR “mechanical ventilation”) AND (“Echocardiography”[Mesh] OR echocardiography OR “cardiac ultrasound” OR “heart ultrasound” OR “Lung”[Mesh] AND ultrasound OR “lung ultrasound” OR LUS OR B-line OR “Diaphragm”[Mesh] OR “diaphragm ultrasound” OR “diaphragmatic excursion” OR “diaphragmatic thickening fraction” OR DTF) AND (“Prognosis”[Mesh] OR prognosis OR “prognostic value” OR predict OR “diagnostic accuracy” OR sensitivity OR specificity OR ROC OR AUC). Thời gian tìm kiếm bao phủ từ khi thành lập cơ sở dữ liệu đến ngày 31 tháng 01 năm 2026.

Các nghiên cứu được lựa chọn nếu thực hiện trên bệnh nhân người lớn điều trị tại đơn vị hồi sức (ICU), bao gồm cả hồi sức chung và hồi sức ngoại khoa, có sử dụng siêu âm tim, phổi hoặc cơ hoành trong đánh giá quá trình cai thở máy và báo cáo các kết cục liên quan đến tiên

lượng hoặc thất bại cai máy. Các nghiên cứu về bệnh nhân ngoại khoa được ưu tiên phân tích khi có dữ liệu phù hợp. Các nghiên cứu bị loại trừ bao gồm nghiên cứu trên trẻ em hoặc động vật, báo cáo ca bệnh hoặc loạt ca bệnh nhỏ ( $\leq 10$  bệnh nhân), thư trao đổi, bình luận hoặc tổng quan không có dữ liệu gốc, nghiên cứu không sử dụng siêu âm tim, phổi hoặc cơ hoành, nghiên cứu không báo cáo rõ kết cục liên quan đến cai thở máy, các bài báo không có toàn văn.

Chỉ các bài báo bằng tiếng Anh hoặc tiếng Việt có toàn văn được đưa vào tổng hợp. Các tài liệu trùng lặp được loại bỏ trong quá trình sàng lọc. Trong trường hợp có nhiều nghiên cứu về cùng một chủ đề, các nghiên cứu có cỡ mẫu lớn hơn, thiết kế mạnh hơn (phân tích gộp, nghiên cứu tiến cứu) và công bố gần đây được ưu tiên lựa chọn.

## 2. Nội dung

### **Cơ sở sinh lý bệnh của thất bại cai thở máy và biểu hiện trên siêu âm**

Cai thở máy là quá trình chuyển từ thông khí áp lực dương sang thở tự nhiên với áp lực âm trong lồng ngực. Sự chuyển đổi này làm thay đổi đột ngột tương tác tim – phổi – cơ hô hấp, làm tăng tải cho hệ tuần hoàn và hô hấp. Các biến đổi sinh lý này có thể được phát hiện và theo dõi bằng siêu âm tại giường, tạo cơ sở cho việc sử dụng siêu âm như một công cụ tiên lượng.<sup>3</sup>

#### **Khái niệm thất bại cai thở máy<sup>4</sup>:**

Trong bài tổng quan này, các khái niệm được sử dụng như sau:

- Thất bại thử nghiệm thở tự nhiên (SBT failure): không dung nạp SBT do suy hô hấp, rối loạn huyết động hoặc các dấu hiệu không ổn định, dẫn đến không thể rút nội khí quản.

- Suy hô hấp sau rút ống (post-extubation respiratory failure): xuất hiện suy hô hấp sau rút nội khí quản, có thể cần hỗ trợ bằng NIV, HFNC

hoặc đặt lại nội khí quản.

- Thất bại rút nội khí quản (extubation failure): cần đặt lại nội khí quản trong vòng 48 giờ sau rút ống.

- Thất bại cai thở máy (weaning failure): không thể duy trì hô hấp tự nhiên sau khi giảm hoặc ngừng hỗ trợ thở máy, bao gồm thất bại SBT hoặc thất bại rút nội khí quản.

Trong các nghiên cứu được tổng hợp, tiêu chí kết cục có thể khác nhau giữa các tác giả; do đó, khi trình bày kết quả, chúng tôi ghi rõ định nghĩa kết cục được sử dụng trong từng nghiên cứu.

### **Thay đổi huyết động và biểu hiện trên siêu âm tim**

Khi bắt đầu thở tự nhiên, áp lực âm trong lồng ngực làm tăng hồi lưu tĩnh mạch và tiền gánh thất phải, đồng thời tăng hậu gánh thất trái do tăng áp lực xuyên thành. Ở bệnh nhân có rối loạn chức năng tâm trương hoặc bệnh tim tiềm ẩn, áp lực đổ đầy thất trái có thể tăng nhanh, dẫn đến phù phổi do cai máy.

Trên siêu âm tim, những thay đổi này có thể biểu hiện bằng:

Tăng tỉ số E/e', phản ánh tăng áp lực đổ đầy thất trái.

Giãn nhĩ trái hoặc thất phải.

Giảm TAPSE trong trường hợp suy thất phải.

Tăng vận tốc dòng hở van ba lá gợi ý tăng áp động mạch phổi.

Giảm phân suất tống máu hoặc rối loạn vận động thành tim nếu xuất hiện thiếu máu cơ tim.

Sự gia tăng E/e' hoặc xuất hiện rối loạn chức năng thất trong giai đoạn thử nghiệm thở tự nhiên đã được chứng minh liên quan đến nguy cơ thất bại cai máy, đặc biệt trong cơ chế phù phổi do tim.

### **Thay đổi cơ học phổi và biểu hiện trên siêu âm phổi**

Khi chuyển sang thở tự nhiên, công hô hấp

tăng và áp lực xuyên phổi thay đổi, có thể làm mất huy động phế nang, tái xẹp phổi hoặc làm bộc lộ phù phổi tiềm ẩn. Đồng thời, tăng áp lực mao mạch phổi do tăng áp lực đổ đầy thất trái góp phần làm tăng dịch kẽ phổi.

Siêu âm phổi có thể phát hiện các thay đổi này thông qua:

Tăng số lượng và mật độ B-line, gợi ý hội chứng kẽ hoặc phù phổi.

Tăng điểm mất thông khí theo thang điểm LUS.

Xuất hiện hoặc lan rộng vùng đông đặc nhu mô.

Giảm trượt màng phổi hoặc mất thông khí vùng đáy phổi.

Các nghiên cứu gần đây cho thấy sự gia tăng số lượng B-line hoặc tăng LUS trong quá trình SBT có liên quan đến thất bại rút ống, đặc biệt khi kết hợp với dấu hiệu tăng áp lực đổ đầy thất trái trên siêu âm tim.

### **Rối loạn chức năng cơ hoành và biểu hiện trên siêu âm cơ hoành**

Thở máy kéo dài có thể gây rối loạn chức năng cơ hoành do bất động, quá tải hoặc bất tương hợp bệnh nhân – máy thở. Khi bắt đầu thở tự nhiên, nếu cơ hoành không đủ sức mạnh hoặc độ bền để đáp ứng tải hô hấp tăng lên, bệnh nhân dễ rơi vào tình trạng mỏi cơ và suy hô hấp.

Siêu âm cơ hoành cho phép đánh giá trực tiếp chức năng cơ hoành thông qua:

Giảm biên độ di động cơ hoành (diaphragmatic excursion – DE).

Giảm phần trăm thay đổi độ dày cơ hoành trong thì hít vào (diaphragmatic thickening fraction – DTF).

Bất đối xứng vận động giữa hai bên cơ hoành.

DTF thấp hoặc DE giảm trong giai đoạn đánh giá cai máy đã được ghi nhận có liên quan đến tăng nguy cơ thất bại, phản ánh mất cân bằng giữa tải thông khí và năng lực cơ hô hấp.

### **Tương tác tim – phổi – cơ hoành**

Thất bại cai thở máy thường không do một cơ chế đơn lẻ mà là sự phối hợp giữa:

Tăng áp lực đổ đầy thất trái dẫn đến phù phổi.

Mất thông khí và tăng công hô hấp.

Suy giảm chức năng cơ hoành.

Siêu âm đa cơ quan (tim – phổi – cơ hoành) cho phép đánh giá đồng thời các cơ chế này tại giường bệnh, giúp nhận diện sớm bệnh nhân có nguy cơ cao thất bại cai máy và hỗ trợ lựa chọn chiến lược điều trị phù hợp.

### **Đặc thù ở bệnh nhân hồi sức ngoại khoa**

Bệnh nhân hồi sức ngoại khoa có nhiều yếu tố đặc thù làm tăng nguy cơ thất bại cai thở máy thông qua các cơ chế sinh lý bệnh khác nhau. Tình trạng thừa dịch chu phẫu và truyền dịch tích cực trong mổ làm tăng tiền gánh và áp lực đổ đầy thất trái, đặc biệt ở bệnh nhân có rối loạn chức năng tim tiềm ẩn. Khi chuyển sang thở tự nhiên, áp lực âm trong lồng ngực làm tăng hồi lưu tĩnh mạch và hậu gánh thất trái, dẫn đến tăng áp lực mao mạch phổi và phù phổi do cai máy (weaning-induced pulmonary oedema, WiPO), từ đó gây giảm oxy máu và thất bại rút nội khí quản.<sup>5</sup>

Xẹp phổi hậu phẫu, thường gặp sau phẫu thuật ổ bụng và lồng ngực, làm giảm dung tích phổi chức năng, tăng shunt trong phổi và mất cân bằng thông khí – tưới máu. Hậu quả là bệnh nhân phải tăng công hô hấp để duy trì trao đổi khí, dễ dẫn đến mỏi cơ hô hấp và không dung nạp thử nghiệm thở tự nhiên. Đồng thời, đau sau mổ làm hạn chế hô hấp sâu và ho hiệu quả, góp phần duy trì xẹp phổi và tăng nguy cơ suy hô hấp sau rút ống.<sup>6</sup>

Tồn dư thuốc giãn cơ và thuốc an thần sau phẫu thuật có thể làm giảm dẫn truyền thần kinh – cơ, dẫn đến giảm lực co cơ hô hấp và giảm khả năng tạo áp lực hít vào. Điều này làm giảm dự trữ hô hấp và tăng nguy cơ thất bại khi giảm hỗ trợ thở máy. Ngoài ra, tổn thương thần

kinh hoành, đặc biệt sau phẫu thuật tim và lồng ngực, có thể gây liệt hoặc giảm vận động cơ hoành, dẫn đến giảm biên độ di động và giảm hiệu quả thông khí tự nhiên.

Trong các phẫu thuật lớn như phẫu thuật tim, phẫu thuật lồng ngực và phẫu thuật bụng trên, các yếu tố trên thường phối hợp với phản ứng viêm hệ thống và rối loạn cơ học hô hấp, làm tăng đáng kể nguy cơ suy hô hấp sau rút nội khí quản. Do đó, thất bại cai thở máy ở bệnh nhân ngoại khoa thường mang tính đa cơ chế, liên quan đồng thời đến tim, phổi và cơ hô hấp.

### ***Vai trò của siêu âm tim trong tiên lượng cai thở máy***

#### ***Đánh giá chức năng tâm trương thất trái***

Rối loạn chức năng tâm trương và tăng áp lực ổ đày thất trái là cơ chế tim mạch thường gặp nhất trong thất bại cai thở máy, đặc biệt trong bối cảnh phù phổi do cai máy (WiPO). Siêu âm tim qua thành ngực cho phép đánh giá áp lực ổ đày thất trái thông qua các chỉ số Doppler dòng qua van hai lá và Doppler mô cơ tim. Trong đó, tỉ số  $E/e'$  được xem là chỉ số thực hành quan trọng nhất. Các phân tích gộp cho thấy  $E/e'$  cao có liên quan chặt chẽ với thất bại cai máy; ngược lại, vận tốc  $e'$  giảm phản ánh giảm khả năng thư giãn thất trái.<sup>7</sup> Trong nghiên cứu của Lamia và cộng sự,  $E/e' > 8,5$  đo tại thời điểm cuối SBT cho thấy khả năng dự đoán tăng PAOP ( $\geq 18$  mmHg) với độ nhạy cao, phản ánh tình trạng tăng áp lực ổ đày thất trái và nguy cơ phù phổi do cai máy. Tuy nhiên, do độ đặc hiệu còn hạn chế, việc kết hợp với  $E/A > 0,95$  giúp cải thiện đáng kể giá trị chẩn đoán, nhấn mạnh vai trò của đánh giá đồng thời nhiều thông số siêu âm tim trong nhận diện cơ chế tim mạch của thất bại cai thở máy.<sup>8</sup> Ngoài giá trị tuyệt đối, biến thiên động của  $E/e'$  trong quá trình SBT được cho là có giá trị dự báo tốt hơn so với đo tại một thời điểm đơn lẻ.

Các chỉ số bổ sung như  $E/A$ , thời gian giảm tốc sóng E (DT) và vận tốc hờ van ba lá (TR

velocity  $> 2,8$  m/s) có thể hỗ trợ xác định tăng áp lực nhĩ trái. Tuy nhiên, khuyến cáo hiện nay nhấn mạnh cần phối hợp nhiều thông số thay vì dựa vào một chỉ số đơn độc do ảnh hưởng của tiền gánh và nhịp tim.

Việc kết hợp siêu âm tim với các marker sinh học như BNP/NT-proBNP giúp nâng cao độ chính xác phát hiện WiPO. Nhiều nghiên cứu cho thấy thất bại cai thở máy có liên quan chặt chẽ đến rối loạn huyết động và tăng áp lực ổ đày thất trái trong quá trình SBT. Các nghiên cứu sinh lý học ghi nhận phù phổi do cai máy (WiPO) chiếm tới khoảng 50 – 60% các trường hợp thất bại và thường gặp ở bệnh nhân có bệnh tim nền.<sup>9</sup> Trong bối cảnh này, sự gia tăng các dấu ấn sinh học như BNP/NT-proBNP trong SBT được xem là phản ánh gián tiếp tình trạng quá tải áp lực/thể tích và có liên quan đến thất bại cai máy.

#### ***Đánh giá chức năng tâm thu thất trái***

Phân suất tổng máu thất trái (LVEF) là chỉ số thường được sử dụng để đánh giá chức năng tâm thu. Tuy nhiên, các bằng chứng hiện có cho thấy LVEF đơn độc không phải là yếu tố tiên lượng đáng tin cậy cho kết quả cai thở máy. Phân tích gộp gần đây của Santonocito và cộng sự cho thấy mặc dù LVEF ở nhóm thất bại có xu hướng thấp hơn, sự khác biệt không đạt ý nghĩa thống kê và mức độ không đồng nhất giữa các nghiên cứu cao.<sup>10</sup> Thực tế lâm sàng cho thấy nhiều bệnh nhân thất bại cai máy có LVEF bảo tồn. Điều này phù hợp với cơ chế sinh lý bệnh, trong đó rối loạn tâm trương và tăng hậu gánh thất trái khi chuyển sang tự thở đóng vai trò quan trọng hơn suy giảm tâm thu toàn bộ. Một số chỉ số nhạy hơn như biến dạng dọc toàn bộ (global longitudinal strain – GLS) được đề xuất có thể phát hiện rối loạn co bóp tiềm ẩn trước khi EF giảm, song bằng chứng trong bối cảnh cai thở máy còn hạn chế.

Do đó, LVEF chỉ có giá trị tiên lượng trong những trường hợp suy tim tâm thu rõ rệt hoặc

ở quần thể đặc thù như bệnh nhân sau phẫu thuật tim.

#### *Chức năng thất phải*

Chuyển từ thở máy sang tự thở có thể làm tăng hậu tải phổi và ảnh hưởng đến chức năng thất phải, đặc biệt ở bệnh nhân COPD, ARDS hoặc tăng áp phổi. Các chỉ số thường dùng để đánh giá chức năng thất phải gồm TAPSE, RVFAC và vận tốc S' vòng van ba lá.

Một số nghiên cứu nhỏ cho thấy TAPSE giảm có thể liên quan đến kéo dài quá trình cai máy hoặc thất bại SBT, tuy nhiên bằng chứng còn hạn chế và chưa đồng nhất. Hiện chưa có ngưỡng cắt chuẩn của TAPSE hay RVFAC được xác lập để tiên lượng cai máy trên quy mô lớn. Vì vậy, đánh giá thất phải nên được xem là một phần của tiếp cận toàn diện hơn,

đặc biệt trong các bệnh lý phổi mạn tính hoặc tăng áp phổi.

#### *Đặc điểm ở bệnh nhân hồi sức ngoại khoa*

Ở bệnh nhân hồi sức ngoại khoa, đặc biệt sau phẫu thuật tim hoặc phẫu thuật lớn, yếu tố thừa dịch chu phẫu và rối loạn chức năng tâm trương tiềm ẩn làm tăng nguy cơ WiPO.<sup>11</sup> Trong nhóm này, các chỉ số phản ánh tăng áp lực ổ đầy thất trái ( $E/e'$ ,  $e'$ ) và sự thay đổi động trong SBT có giá trị tiên lượng cao hơn LVEF.

Sự kết hợp giữa siêu âm tim, theo dõi BNP/ $\Delta$ BNP và nghiệm pháp nâng chân thụ động (PLR) giúp phân tầng nguy cơ và hướng dẫn chiến lược rút dịch trước khi rút nội khí quản.<sup>12</sup> Ngược lại, việc dựa vào một chỉ số đơn lẻ, đặc biệt LVEF, ít mang lại giá trị thực hành trong quần thể hậu phẫu.

**Bảng 1. Tổng hợp các nghiên cứu chính về siêu âm tim trong tiên lượng cai thở máy**

Tác giả (năm)	Thiết kế	Quần thể	Cỡ mẫu	Thời điểm đo	Chỉ số/ Ngưỡng cắt	Kết cục chính	Nhận xét ứng dụng
Lamia và cộng sự (2009) <sup>8</sup>	Quan sát tiến cứu	ICU nội khoa, thất bại SBT tái diễn	39	Trong SBT	$E/e' > 8,5$ $E/A > 0,95$	Tăng PAOP (WiPO)	Siêu âm tim phát hiện không xâm lấn phù phổi do cai máy; $E/e'$ có giá trị cao (Se 94%, Sp 73%)
Liu J và cộng sự (2016) <sup>9</sup>	Quan sát tiến cứu	ICU nội khoa	81 (283 lượt SBT)	Trước & trong SBT	LVEF ở nhóm không có WiPO (55%) cao hơn nhóm WiPO (21%)	Thất bại SBT và WiPO	WiPO liên quan bệnh tim nền; vai trò đánh giá huyết động và đáp ứng dịch

Tác giả (năm)	Thiết kế	Quần thể	Cỡ mẫu	Thời điểm đo	Chỉ số/ Ngưỡng cắt	Kết cục chính	Nhận xét ứng dụng
Sanfilippo và cộng sự (2021) <sup>7</sup>	Phân tích gộp	ICU nội khoa	11 nghiên cứu	Trước SBT	Thất bại cai máy liên quan với tăng E/e', tăng E (0,97), giảm e' (-1,22); không liên quan với LVEF và E/A	Thất bại cai máy	Các chỉ số tâm trương thất trái E/e', E có ý nghĩa tiên lượng hơn so với chức năng tâm thu thất trái
Santonocito và cộng sự (2025) <sup>10</sup>	Phân tích gộp	ICU nội khoa	14 nghiên cứu	Trước SBT	Tăng E/e', tăng E (8,32), giảm DT (-12 ms) liên quan thất bại; LVEF có liên quan nhưng yếu	Thất bại cai máy	Các chỉ số tâm trương thất trái E/e', E, DT có ý nghĩa tiên lượng hơn so với chức năng tâm thu thất trái

Se: độ nhạy; Sp: độ đặc hiệu; AUC: diện tích dưới đường cong ROC; SBT: thử nghiệm thở tự nhiên; WiPO: phù phổi do cai thở máy; PAOP: áp lực mao mạch phổi bít

### Vai trò của siêu âm phổi trong tiên lượng cai thở máy

#### Cơ sở sinh lý và chỉ số chính

Trong quá trình cai thở máy, chuyển từ áp lực dương sang thở tự nhiên làm tăng hồi lưu tĩnh mạch và có thể gây phù phổi do tăng áp lực đổ đầy thất trái (WiPO). Đồng thời, mất huy động phế nang và xẹp phổi sau giảm PEEP làm gia tăng mất thông khí.

Siêu âm phổi phản ánh trực tiếp các thay đổi này thông qua:

B-line lan tỏa thể hiện phù phổi kẽ.

Tăng điểm LUS tương quan chặt chẽ với mức độ mất thông khí.

Gia tăng LUS trong SBT ( $\Delta$ LUS) thể hiện mất huy động tiến triển.

Do đó, LUS vừa phản ánh phù phổi do tim,

vừa phản ánh xẹp phổi cơ học.

#### Giá trị tiên lượng của LUS trong cai thở máy

Trong nhiều nghiên cứu, LUS được tính theo sơ đồ quét 12 vùng phổi với tổng điểm dao động từ 0 đến 36, trong khi các sơ đồ khác có thể sử dụng số vùng ít hơn và thang điểm tương ứng khác nhau. Nhiều bằng chứng gần đây khẳng định siêu âm phổi là công cụ có giá trị cao trong dự báo thất bại cai thở máy. Cơ sở sinh lý bệnh nằm ở chỗ LUS phản ánh trực tiếp tình trạng mất thông khí nhu mô và ứ dịch kẽ phổi – hai cơ chế phổ biến nhất của suy hô hấp sau rút ống, đặc biệt là phù phổi do cai máy (WiPO).

Phân tích gộp của Zhang và cộng sự (2024), bao gồm 13 nghiên cứu với 988 bệnh nhân hồi sức, cho thấy hiệu lực chẩn đoán của LUS ở mức cao<sup>13</sup>: độ nhạy 0,86 (95% CI: 0,77 – 0,91),

độ đặc hiệu: 0,75 (95% CI: 0,66 – 0,83), AUC: 0,87 (95% CI: 0,84 – 0,89). Khi xác suất tiền nghiệm thất bại cai máy là 50%: LUS dương tính làm tăng xác suất hậu nghiệm lên khoảng 78%, LUS âm tính làm giảm xuống khoảng 16%. Các nghiên cứu thành phần thường sử dụng ngưỡng LUS  $\geq 14 - 15$  điểm (thang 0 – 36) làm điểm cảnh báo lâm sàng, với độ nhạy khoảng 80 – 90%, độ đặc hiệu khoảng 70 – 80%

Bên cạnh giá trị tĩnh, nhiều nghiên cứu nhấn mạnh ý nghĩa của biến thiên động học trong SBT. Soummer và cộng sự (2012) cho thấy sự gia tăng LUS trong SBT dự báo suy hô hấp sau rút ống với AUC = 0,86.<sup>14</sup> Một số nghiên cứu khác ghi nhận  $\Delta$ LUS  $\geq 2 - 3$  điểm trong SBT liên quan rõ rệt đến thất bại cai máy.

Sự xuất hiện lan tỏa B-line trong SBT thường đi kèm cơ chế WiPO.<sup>15</sup> Tuy nhiên, cần lưu ý mức độ không đồng nhất giữa các nghiên cứu còn cao ( $I^2$  khoảng 65 – 80%), do khác biệt về số vùng khảo sát (6–12–14 vùng), thời điểm đo (trước, trong hoặc sau SBT), định nghĩa thất bại (tái đặt NKQ, cần NIV/HFNC, tử vong sớm).

Dù vậy, xu hướng chung cho thấy LUS là chỉ số nhạy, có giá trị thực hành cao trong nhận diện sớm nguy cơ thất bại.

#### *Giá trị ở bệnh nhân hồi sức ngoại khoa*

Ở bệnh nhân ngoại khoa, đặc biệt sau phẫu thuật lớn, tình trạng thừa dịch và xẹp phổi hậu phẫu làm tăng vai trò của siêu âm phổi trong phân tầng nguy cơ. Nghiên cứu của Alansary và Hakim (2020) trên 130 bệnh nhân sau mổ nội sọ cho thấy việc bổ sung LUS vào chiến lược đánh giá giúp cải thiện rõ rệt tỷ lệ cai máy thành công, nhóm có LUS hỗ trợ 84,6%, nhóm chuẩn: 66,2%, khác biệt có ý nghĩa thống kê.<sup>16</sup>

Thử nghiệm ngẫu nhiên đa trung tâm WIN IN WEAN (Rouby và cộng sự, 2024) tiếp tục củng cố vai trò phân tầng nguy cơ của LUS. Ở 240 bệnh nhân ICU có LUS  $\geq 14$  trong SBT: tỷ lệ suy hô hấp sau rút ống (PRF) 48h giảm với RR = 0,52 (95% CI: 0,31 – 0,88; p = 0,01), tỷ lệ PRF ngày 7: RR = 0,62 (95% CI: 0,44 – 0,96; p = 0,02).<sup>17</sup> Điều này cho thấy LUS không chỉ có giá trị tiên lượng mà còn có thể định hướng chiến lược hỗ trợ hô hấp sau rút ống (NIV/HFNC).

**Bảng 2. Tổng hợp các nghiên cứu chính về siêu âm phổi trong tiên lượng cai thở máy**

Tác giả (năm)	Thiết kế	Quần thể	Cỡ mẫu	Thời điểm đo	Chỉ số/ Ngưỡng cắt	Kết cục chính	Nhận xét ứng dụng
Soummer và cộng sự (2012) <sup>14</sup>	Quan sát tiến cứu	ICU	100	Trước và cuối SBT	LUS (tăng $\geq 17 - 19$ )	Thất bại rút ống	LUS cuối SBT cao (19 vs 10) dự đoán thất bại (AUC 0,86); phản ánh mất thông khí
Antonio và cộng sự (2014) <sup>15</sup>	Quan sát/ nghiên cứu can thiệp	ICU nội khoa + ngoại khoa	250	Trước SBT	Mô hình B-line ưu thế	Thất bại rút ống	Mất thông khí trước SBT liên quan thất bại rút ống

Tác giả (năm)	Thiết kế	Quần thể	Cỡ mẫu	Thời điểm đo	Chỉ số/ Ngưỡng cắt	Kết cục chính	Nhận xét ứng dụng
Alansary & Hakim (2020) <sup>16</sup>	Quan sát tiến cứu	ICU ngoại khoa	130	Trước SBT	Số B-line ở nhóm thành công < 2	Cai thở máy thành công	Kết hợp siêu âm làm tăng tỷ lệ cai máy thành công
Zhang Z và cộng sự (2024) <sup>13</sup>	Phân tích gộp	ICU	13 nghiên cứu (988 BN)	Trước/ trong SBT	LUS (không đồng nhất cut-off) Se 0,86; Sp 0,75; AUC 0,87	Thất bại rút ống	Độ chính xác cao nhưng chưa đồng nhất cut-off giữa các nghiên cứu
Rouby và cộng sự (2024) <sup>17</sup>	Can thiệp ngẫu nhiên đa trung tâm	ICU hỗn hợp	240	Trong SBT	Hướng dẫn hỗ trợ NIV/ HFNC ở nhóm nguy cơ thất bại cai máy cao (LUS ≥ 14)	Thất bại cai máy	Siêu âm phổi được dùng để hướng dẫn chiến lược hỗ trợ sau cai máy

### ***Vai trò của siêu âm cơ hoành trong tiên lượng cai thở máy***

Rối loạn chức năng cơ hoành là một trong những cơ chế trung tâm dẫn đến thất bại cai thở máy, đặc biệt ở bệnh nhân thở máy kéo dài. Thở máy kiểm soát hoàn toàn có thể gây rối loạn chức năng cơ hoành do máy thở (ventilator-induced diaphragmatic dysfunction, VIDF) thông qua teo cơ do bất động, tăng phân giải protein và stress oxy hóa. Zambon và cộng sự ghi nhận độ dày cơ hoành giảm trung bình khoảng 7,5% mỗi ngày khi thở máy kiểm soát hoàn toàn, trong khi có thể tăng 2,3% mỗi ngày nếu bệnh nhân còn duy trì được nỗ lực tự thở. Đáng chú ý, 41 – 63% bệnh nhân ICU có giảm độ dày cơ hoành > 10% trong những ngày đầu, và nhóm này thường có thời gian thở máy kéo dài hơn.<sup>18</sup>

Siêu âm cơ hoành cho phép đánh giá trực tiếp chức năng cơ hô hấp thông qua hai chỉ số chính: biên độ di động cơ hoành (diaphragmatic excursion – DE) và tỷ lệ dày lên cơ hoành (diaphragmatic thickening fraction – DTF). Trong đó, DTF phản ánh khả năng co cơ và tương quan với áp lực xuyên cơ hoành trong các nghiên cứu sinh lý, còn DE phản ánh biên độ vận động toàn bộ vòm cơ hoành trong thì hít vào. Trong thực hành lâm sàng, DTF < 20 – 30% hoặc DE < 10 – 12 mm khi thở tự nhiên thường gợi ý rối loạn chức năng cơ hoành.

Các phân tích gộp gần đây đã cung cấp bằng chứng định lượng tương đối nhất quán. Một meta-analysis năm 2022, bao gồm 19 nghiên cứu với hơn 1200 bệnh nhân, cho thấy DTF có độ nhạy khoảng 85 – 90%, độ đặc hiệu 75 – 80% và AUC xấp xỉ 0,85 – 0,88 trong dự đoán

thành công cai máy; trong khi DE có độ nhạy 75 – 80%, độ đặc hiệu 70 – 75% và AUC khoảng 0,80 – 0,83.<sup>19</sup> Phân tích hệ thống của Parada-Gereda và cộng sự (2023) tiếp tục khẳng định hiệu lực tương đương giữa hai chỉ số, với AUC 0,87 cho cả DE và DTF. Khi sử dụng ngưỡng tham khảo như DE > 1,0 – 1,2 cm hoặc DTF > 29 – 30% trong thử nghiệm thở tự nhiên, xác suất thành công cai máy sau test dương tính có thể tăng lên khoảng 87 – 90%.<sup>20</sup>

Ngoài các chỉ số cổ điển, một số thông số mới đã được đề xuất nhằm cải thiện độ chính xác tiên lượng. Spadaro và cộng sự đưa ra chỉ số DE-RSBI (tần số thở chia cho DE), cho thấy AUC 0,89 so với 0,72 của RSBI truyền thống. Điều này cho thấy việc tích hợp yếu tố vận động cơ hoành có thể cải thiện khả năng dự báo thất bại.<sup>21</sup>

Ở nhóm bệnh nhân hồi sức ngoại khoa, siêu âm cơ hoành đặc biệt có ý nghĩa do nguy cơ cao yếu cơ sau phẫu thuật, đau và rối loạn thần kinh hoành. Hasanin và cộng sự (2025) trên 70 bệnh nhân ICU ngoại khoa ghi nhận DE đo 2 giờ sau rút nội khí quản có giá trị dự báo rất cao nhu cầu thở máy lại trong 48 giờ, với AUC 0,98 ở bên phải và 0,97 ở bên trái; ngưỡng khoảng 20 - 21 mm cho độ nhạy và độ đặc hiệu trên 90%.<sup>22</sup> Sự khác biệt về ngưỡng cắt giữa các nghiên cứu chủ yếu liên quan đến thời điểm đo. Các nghiên cứu đánh giá trước hoặc trong SBT thường ghi nhận giá trị thấp hơn ( $\approx 10 - 13$  mm), trong khi nghiên cứu của Hasanin và cộng sự đo sau rút ống ghi nhận ngưỡng cao hơn ( $\approx 20$  mm). Một nghiên cứu khác trên 105 bệnh nhân hậu phẫu cho thấy DE bên phải > 7,3 mm dự báo thành công với độ nhạy 76,9% và độ đặc hiệu 69,2%.<sup>23</sup> Tuy nhiên, trong phẫu thuật tim, dù DTF giảm rõ sau mổ (từ khoảng 36% xuống 12 – 17%), tỷ lệ thất bại rút nội khí quản vẫn thấp (< 3%), cho thấy DTF đơn độc có thể chưa đủ để dự báo ở nhóm này.<sup>24</sup> Nhìn chung, bằng chứng hiện tại cho thấy siêu âm

cơ hoành, đặc biệt DTF, có giá trị tiên lượng tương đương hoặc cao hơn nhiều chỉ số sinh lý truyền thống, với AUC trung bình khoảng 0,85 – 0,88. Tuy nhiên, sự khác biệt về kỹ thuật đo và ngưỡng cắt giữa các nghiên cứu vẫn là hạn chế cần được chuẩn hóa trong tương lai (Bảng 3).

### **Giá trị tiên lượng của mô hình phối hợp siêu âm tim – phổi – cơ hoành**

Thất bại cai thở máy thường không do một cơ chế đơn lẻ mà là sự phối hợp giữa tăng áp lực ổ đầy thất trái, phù phổi, mất thông khí và suy giảm dự trữ cơ hoành. Do đó, tiếp cận siêu âm đa cơ quan ngày càng được xem là chiến lược hợp lý nhằm phản ánh toàn diện tương tác tim – phổi – cơ hô hấp.

Xu và cộng sự (2020) trên 105 bệnh nhân cho thấy BNP (OR = 1,120; p = 0,004), áp lực nhĩ trái (OR = 1,333; p = 0,005), LUS (OR = 1,736; p = 0,001) và DE < 1,0 cm (OR = 3,942; p = 0,014) đều liên quan độc lập với thất bại cai máy; mô hình kết hợp LAP + LUS + DE đạt AUC 0,919, vượt trội so với từng chỉ số riêng lẻ.<sup>25</sup> Song và cộng sự (2024) báo cáo DTF đơn độc có AUC 0,678, LUS 0,719, nhưng khi tích hợp LUS + TTE + DTF, AUC tăng lên 0,92 – 0,97, cho thấy lợi ích rõ rệt của tiếp cận đa mô thức.<sup>26</sup>

Tổng hợp các bằng chứng hiện có cho thấy siêu âm tim (đặc biệt E/e'), siêu âm phổi (LUS) và siêu âm cơ hoành (DTF/DE) đều có AUC dao động 0,80 – 0,88 khi đánh giá riêng lẻ; tuy nhiên, khi kết hợp, AUC có thể đạt trên 0,90. Cách tiếp cận tích hợp này không chỉ tăng độ chính xác tiên lượng mà còn giúp xác định cơ chế chủ đạo của thất bại (tim, phổi hay cơ hô hấp), từ đó định hướng can thiệp cá thể hóa trước và sau rút nội khí quản.

### **Hạn chế của tổng quan**

Tổng quan này có một số hạn chế. Thứ nhất, đây là tổng quan tường thuật nên không áp dụng quy trình tìm kiếm và đánh giá chất lượng

Bảng 3. Tổng hợp các nghiên cứu chính về siêu âm cơ hoành trong tiên lượng cai thở máy

Tác giả (năm)	Thiết kế	Quần thể	Cỡ mẫu	Thời điểm đo	Chỉ số / ngưỡng cắt (kèm số liệu)	Kết cục chính	Nhận xét ứng dụng
Spadaro và cộng sự (2016) <sup>21</sup>	Quan sát tiến cứu	ICU	63	Trong SBT	D-RSBI (RR/fraction excursion); AUC 0,89 (cao hơn RSBI)	Thất bại cai thở máy	D-RSBI tích hợp tải và chức năng cơ hoành, dự đoán tốt hơn RSBI
Mahmoodpoor và cộng sự (2022) <sup>19</sup>	Phân tích gộp	ICU	19 nghiên cứu	Trước SBT	DTF: Se 0,80; Sp 0,80; DE: Se 0,75; Sp 0,75	Kết quả cai thở máy	DTF có độ chính xác cao hơn DE
Parada-Gereda và cộng sự (2023) <sup>20</sup>	Phân tích gộp	ICU	19 nghiên cứu	Trước/trong SBT	DTF: AUC 0,87; Se 0,82; Sp 0,81	Kết quả cai thở máy	DTF là chỉ số đáng tin cậy nhất
Moury và cộng sự (2019) <sup>24</sup>	Quan sát tiến cứu	Sau mổ tim	100	Chu phẫu	Giảm DTF sau mổ (giảm 30 – 50% so với nền)	Rối loạn cơ hoành	Phẫu thuật tim gây suy giảm chức năng cơ hoành
Hasanin và cộng sự (2025) <sup>22</sup>	Quan sát tiến cứu	ICU ngoại khoa	70	Sau rút ống	DE thấp < 2,1 cm liên quan nhu cầu hỗ trợ cơ học sau rút ống	Hỗ trợ cơ học sau rút ống	DE sau rút ống có giá trị tiên lượng kết cục thất bại cai máy
Busayarasamee và cộng sự (2025) <sup>23</sup>	Quan sát tiến cứu	Chu phẫu	100	Trước rút ống	DE > 7,3 mm dự đoán cai thở máy thành công	Kết quả cai thở máy	Ứng dụng tốt ở bệnh nhân ngoại khoa

ngiên cứu một cách hệ thống, do đó có thể tồn tại sai lệch lựa chọn. Thứ hai, các nghiên cứu được tổng hợp có sự không đồng nhất đáng kể về quần thể bệnh, thiết kế, thời điểm đo, chỉ số siêu âm và định nghĩa kết cục, làm hạn chế khả năng so sánh trực tiếp và khái quát hóa kết quả. Cuối cùng, phần lớn dữ liệu hiện có được thực hiện trên quần thể ICU chung, trong khi bằng chứng riêng cho bệnh nhân hồi sức ngoại khoa còn hạn chế.

### III. KẾT LUẬN

Siêu âm tim, phổi và cơ hoành cung cấp các thông tin sinh lý bệnh quan trọng trong quá trình cai thở máy, bao gồm đánh giá áp lực ổ đầy thất trái, tình trạng mất thông khí – ứ dịch phổi và chức năng cơ hô hấp. Các dữ liệu hiện có cho thấy các kỹ thuật này có tiềm năng hỗ trợ phân tầng nguy cơ thất bại cai thở máy, đặc biệt khi được tích hợp theo tiếp cận đa cơ quan.

Tuy nhiên, độ chính xác và giá trị tiên lượng của từng chỉ số còn phụ thuộc vào quần thể bệnh, thời điểm đánh giá và định nghĩa kết cục được sử dụng trong từng nghiên cứu. Do đó, việc ứng dụng siêu âm trong thực hành lâm sàng nên được thực hiện theo cách tiếp cận động, ưu tiên đánh giá trước và trong SBT, cũng như sau rút ống ở các bệnh nhân nguy cơ cao.

Hiện chưa có mô hình siêu âm đa cơ quan được chuẩn hóa và kiểm định rộng rãi; vì vậy, việc triển khai cần dựa trên đào tạo phù hợp, quy trình đo thống nhất và tích hợp với đánh giá lâm sàng toàn diện. Các nghiên cứu tiến cứu quy mô lớn, đa trung tâm là cần thiết để xác định rõ vai trò của từng kỹ thuật trong các nhóm bệnh cụ thể, đặc biệt ở bệnh nhân hồi sức ngoại khoa.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Zhou L, Zhou P, Gao C, et al. Real-Time Predictive Analysis of ICU Ventilator Weaning

Failure: A Prospective Validation Study. *Clin Respir J* 2025;19(11):e70136. doi:10.1111/crj.70136.

2. Perren A, Brochard L. Managing the apparent and hidden difficulties of weaning from mechanical ventilation. *Intensive Care Med* 2013;39(11):1885-1895. doi:10.1007/s00134-013-3014-9.

3. Santangelo E, Mongodi S, Bouhemad B, et al. The weaning from mechanical ventilation: a comprehensive ultrasound approach. *Curr Opin Crit Care* 2022;28(3):322-330. doi:10.1097/mcc.0000000000000941.

4. Boles JM, Bion J, Connors A, et al. Weaning from mechanical ventilation. *Eur Respir J*. 2007;29(5):1033-1056. doi:10.1183/09031936.00010206.

5. Nicolotti D, Grossi S, Nicolini F, et al. Difficult Respiratory Weaning after Cardiac Surgery: A Narrative Review. *J Clin Med* 2023;12(2). doi:10.3390/jcm12020497.

6. Lagier D, Zeng C, Fernandez-Bustamante A, et al. Perioperative Pulmonary Atelectasis: Part II. Clinical Implications. *Anesthesiology* 2022;136(1):206-236. doi:10.1097/aln.0000000000004009.

7. Sanfilippo F, Di Falco D, Noto A, et al. Association of weaning failure from mechanical ventilation with transthoracic echocardiography parameters: a systematic review and meta-analysis. *Br J Anaesth* 2021;126(1):319-330. doi:10.1016/j.bja.2020.07.059.

8. Lamia B, Maizel J, Ochagavia A, et al. Echocardiographic diagnosis of pulmonary artery occlusion pressure elevation during weaning from mechanical ventilation. *Crit Care Med* 2009;37(5):1696-1701. doi:10.1097/CCM.0b013e31819f13d0.

9. Liu J, Shen F, Teboul JL, et al. Cardiac dysfunction induced by weaning from mechanical ventilation: incidence, risk factors, and effects of fluid removal. *Crit Care* 2016;20(1):369.

doi:10.1186/s13054-016-1533-9.

10. Santonocito C, Messina S, Zawadka M, et al. Left ventricular systolic function and mechanical ventilation weaning failure: An updated systematic review and meta-analysis with trial sequential analysis. *Med Intensiva (Engl Ed)* 2025;50:2231. doi:10.1016/j.medic.2025.502231.

11. Hajjar L, Lara T, Almeida J, et al. High levels of B-type natriuretic peptide predict weaning failure from mechanical ventilation in adult patients after cardiac surgery. *Crit Care* 2012;16(Suppl 1)(P127). doi:10.1186/cc10734.

12. Dres M, Teboul JL, Anguel N, et al. Extravascular lung water, B-type natriuretic peptide, and blood volume contraction enable diagnosis of weaning-induced pulmonary edema. *Crit Care Med* 2014;42(8):1882-1889. doi:10.1097/ccm.0000000000000295.

13. Zhang Z, Guo L, Wang H, et al. Diagnostic accuracy of lung ultrasound to predict weaning outcome: a systematic review and meta-analysis. *Front Med (Lausanne)* 2024;11:1486636. doi:10.3389/fmed.2024.1486636.

14. Soummer A, Perbet S, Brisson H, et al. Ultrasound assessment of lung aeration loss during a successful weaning trial predicts postextubation distress\*. *Crit Care Med* 2012;40(7):2064-2072. doi:10.1097/CCM.0b013e31824e68ae.

15. Pecanha Antonio AC, Souza Castro P, Schulz LF, et al. Lung ultrasound findings predict weaning failure from mechanical ventilation. *Crit Care* 2014;14(18(Suppl 1)):298. doi:10.1186/cc13488.

16. Alansary AM, Hakim KY. Role of lung ultrasound in weaning from mechanical ventilation in postoperative neurosurgical ICU patients. *Sri Lankan Journal of Anaesthesiology* 2020;28(1):25-30. doi:10.4038/slja.v28i1.8481.

17. Rouby J-J, Perbet S, Quenot J-P, et al.

Weaning of non COPD patients at high-risk of extubation failure assessed by lung ultrasound: the WIN IN WEAN multicentre randomised controlled trial. *Critical Care* 2024;28(1):391. doi:10.1186/s13054-024-05166-w.

18. Zambon M, Beccaria P, Matsuno J, et al. Mechanical Ventilation and Diaphragmatic Atrophy in Critically Ill Patients: An Ultrasound Study. *Crit Care Med* 2016;44(7):1347-1352. doi:10.1097/ccm.0000000000001657.

19. Mahmoodpoor A, Fouladi S, Ramouz A, et al. Diaphragm ultrasound to predict weaning outcome: systematic review and meta-analysis. *Anaesthesiol Intensive Ther* 2022;54(2):164-174. doi:10.5114/ait.2022.117273.

20. Parada-Gereda HM, Tibaduiza AL, Rico-Mendoza A, et al. Effectiveness of diaphragmatic ultrasound as a predictor of successful weaning from mechanical ventilation: a systematic review and meta-analysis. *Crit Care* 2023;27(1):174. doi:10.1186/s13054-023-04430-9.

21. Spadaro S, Grasso S, Mauri T, et al. Can diaphragmatic ultrasonography performed during the T-tube trial predict weaning failure? The role of diaphragmatic rapid shallow breathing index. *Crit Care* 2016;20(1):305. doi:10.1186/s13054-016-1479-y.

22. Hasanin A, Helmy MA, Aziz A, et al. The ability of diaphragmatic excursion after extubation to predict the need for resumption of ventilatory support in critically ill surgical patients. *J Anesth* 2025;39(2):189-197. doi:10.1007/s00540-024-03442-1.

23. Busayarasamee S, Chittawatanarat K, Wannasopa Y. Ultrasonic Assessment of Diaphragm Function in the Ventilator Liberation of Perioperative Patients. *The THAI Journal of SURGERY* 2025;46(2):83-90. doi:10.64387/tjs.2025.271718.

24. Moury PH, Cuisinier A, Durand M, et al. Diaphragm thickening in cardiac surgery:

a perioperative prospective ultrasound study. *Ann Intensive Care* 2019;9(1):50. doi:10.1186/s13613-019-0521-z.

25. Xu X, Wu R, Zhang YJ, et al. Value of Combination of Heart, Lung, and Diaphragm Ultrasound in Predicting Weaning Outcome of Mechanical Ventilation. *Med Sci Monit*

2020;26:e924885. doi:10.12659/msm.924885.

26. Song J, Luo Q, Lai X, et al. Combined cardiac, lung, and diaphragm ultrasound for predicting weaning failure during spontaneous breathing trial. *Annals of Intensive Care* 2024;14(1):60. doi:10.1186/s13613-024-01294-2.

## Summary

### A REVIEW OF THE PROGNOSTIC ROLE OF CARDIAC, LUNG, AND DIAPHRAGM ULTRASOUND IN WEANING FROM MECHANICAL VENTILATION IN INTENSIVE CARE UNIT

Weaning from mechanical ventilation is a critical step in the management of critically ill patients, with extubation failure being associated with increased complications and mortality. Weaning failure is typically the result of multifactorial interactions among hemodynamic disturbances, loss of lung aeration and pulmonary edema, and impaired respiratory muscle function. This narrative review summarizes current evidence on the prognostic role of cardiac, lung, and diaphragmatic ultrasound in predicting weaning outcomes. Cardiac ultrasound helps identify elevated left ventricular filling pressures, lung ultrasound reflects loss of aeration and pulmonary congestion, while diaphragmatic ultrasound assesses respiratory muscle reserve. A multimodal ultrasound approach (cardiac–lung–diaphragm) represents a promising strategy - particularly in high-risk patients such as those with cardiovascular disease, after a major surgery, or prolonged mechanical ventilatio - using a dynamic assessment before and during spontaneous breathing trials and after extubation. However, due to the lack of standardized models and heterogeneity across studies, clinical application requires adequate training, standardized measurement protocols, and integration with overall clinical assessment. Further prospective, multicenter studies are needed to clarify the role of each parameter in specific patient populations.

**Keywords:** Weaning, cardiac ultrasound, lung ultrasound, diaphragm ultrasound, prognosis, intensive care, surgical critical care.