

ความก้าวหน้าในการแยกและการแปรรูปส่วนประกอบโลหิต: จากเลือดทั้งถุงสู่ผลิตภัณฑ์โลหิตที่เหมาะสมเพื่อการรักษา

วาสิตา นวจิตไพบูลย์ นภาพร โมสิกันนท

ภาคบริการโลหิตแห่งชาติที่ 11 นครศรีธรรมราช สภาอากาศไทย

Corresponding author, Email: wasita.n@redcross.or.th

(วันรับบทความ : 31 มีนาคม 2569, วันแก้ไขบทความ : 18 พฤษภาคม 2569, วันตอบรับบทความ : 11 มิถุนายน 2569)

บทคัดย่อ

การให้เลือดและส่วนประกอบโลหิตเป็นองค์ประกอบสำคัญของเวชปฏิบัติสมัยใหม่ โดยมีบทบาทในการรักษาผู้ป่วยหลากหลายกลุ่ม อย่างไรก็ตาม แนวทางการให้เลือดได้เปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากการใช้เลือดทั้งถุง (whole blood) ไปสู่การใช้ส่วนประกอบโลหิตเฉพาะชนิด (component therapy) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและลดความเสี่ยงของภาวะแทรกซ้อน บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสรุปความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการแยกและแปรรูปส่วนประกอบโลหิต ตั้งแต่หลักการพื้นฐานของการแยกตามความหนาแน่น การปั่นแยกแบบดั้งเดิม ระบบอัตโนมัติ ไปจนถึงเทคโนโลยี apheresis ซึ่งช่วยเพิ่มคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์โลหิต

นอกจากนี้ บทความยังครอบคลุมกระบวนการแปรรูปเพื่อปรับปรุงคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์ เช่น leukoreduction การฉายรังสี การล้างส่วนประกอบโลหิต และเทคโนโลยีลดเชื้อก่อโรค (pathogen reduction technologies) รวมถึงบทบาทของ additive solutions ในการยืดอายุการเก็บรักษา ทั้งนี้ การเก็บรักษาส่วนประกอบโลหิตก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงที่เรียกว่า storage lesions ซึ่งส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางชีวภาพของเม็ดเลือดแดง เกล็ดเลือด และพลาสมา และอาจมีผลต่อผลลัพธ์ทางคลินิกในบางบริบท

การควบคุมคุณภาพและการปฏิบัติตามมาตรฐานสากล เช่น WHO, AABB และ EDQM มีความสำคัญในการรับประกันความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์โลหิตตลอดกระบวนการตั้งแต่ผู้บริจาคจนถึงผู้รับเลือด ในอนาคต แนวโน้มของเวชศาสตร์การให้เลือดจะมุ่งสู่การบูรณาการเทคโนโลยีขั้นสูงและแนวทางการแพทย์แม่นยำ เพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์โลหิตที่มีประสิทธิภาพสูง ปลอดภัย และเหมาะสมกับผู้ป่วยเฉพาะราย อันจะนำไปสู่แนวทางการให้เลือดที่เหมาะสมและยั่งยืนในระดับสากล

คำสำคัญ : การแยกส่วนประกอบโลหิต เวชศาสตร์การให้เลือด การแปรรูปโลหิต อะเฟอเรซิส การกำจัดเม็ดเลือดขาว เทคโนโลยีลดเชื้อก่อโรค การเปลี่ยนแปลงระหว่างการเก็บรักษา คุณภาพส่วนประกอบโลหิต สารละลายเพิ่มประสิทธิภาพ การควบคุมคุณภาพ

Advances in Blood Component Separation and Processing: From Whole Blood to Optimized Transfusion Products

Wasita Navajitpaiboon Napaporn Mosikanon

Regional Blood Centre XI, Nakhon Si Thammarat, Thai Red Cross Society.

Abstract

Blood transfusion and blood component therapy are vital elements of contemporary therapeutic practice, significantly contributing to the care of various medical disorders. In recent decades, transfusion strategies have markedly progressed from whole blood utilisation to component-based therapy, with the objective of enhancing therapeutic efficacy while reducing adverse reactions. This review offers a thorough examination of advancements in blood component separation and processing, encompassing fundamental principles of density-based separation, traditional centrifugation methods, automated processing systems, and apheresis technologies, all of which enhance product quality and consistency.

This review examines essential processing procedures aimed at enhancing the safety and efficacy of blood components, including leukoreduction, irradiation, and pathogen reduction technologies. The significance of additive solutions in prolonging shelf life and preserving cellular integrity is emphasised. Nonetheless, the preservation of blood components eventually results in biochemical, structural, and functional modifications generally referred to as storage lesions, which may impact red blood cells, platelets, and plasma, potentially influencing clinical consequences.

Quality control and compliance with international standards, such as those set by the World Health Organization (WHO), the Association for the Advancement of Blood & Biotherapies (AABB), and the European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare (EDQM), are crucial for guaranteeing the safety and dependability of blood products within the transfusion chain. Future advances in technology and the incorporation of precision medicine are expected to support the development of tailored, patient-specific transfusion approaches, thereby improving clinical outcomes and advancing transfusion medicine.

Keywords: Blood component separation, Blood processing, Apheresis, Leukoreduction, Pathogen reduction technologies, Storage lesion, Quality control, Transfusion medicine

บทนำ

การให้เลือดและส่วนประกอบโลหิต (blood transfusion and blood component therapy) เป็นหนึ่งในหัตถการพื้นฐานที่มีบทบาทสำคัญในระบบบริการสุขภาพสมัยใหม่ โดยเฉพาะในการรักษาผู้ป่วยที่มีภาวะเสียเลือดเฉียบพลัน โรคโลหิตจาง โรคกระดูกพรุน และการผ่าตัดขนาดใหญ่ การพัฒนาทางเวชศาสตร์การให้เลือดในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาได้เปลี่ยนแปลงแนวคิดจากการใช้เลือดทั้งถุง (whole blood transfusion) ไปสู่การใช้ส่วนประกอบโลหิตเฉพาะชนิด (component therapy) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา ลดความเสี่ยงของภาวะแทรกซ้อน และส่งเสริมการใช้ทรัพยากรโลหิตอย่างคุ้มค่า^(1,2)

หลักการของ component therapy อาศัยการแยกเลือดออกเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เม็ดเลือดแดง เกล็ดเลือด และพลาสมา โดยอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่นและคุณสมบัติทางกายภาพของเซลล์ การพัฒนาเทคโนโลยีการปั่นแยก (centrifugation) และระบบอัตโนมัติได้ช่วยให้สามารถผลิตส่วนประกอบโลหิตที่มีคุณภาพสูงและมีความสม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้ เทคโนโลยี apheresis ยังเปิดโอกาสให้สามารถเก็บส่วนประกอบเฉพาะจากผู้บริจาคได้โดยตรง ซึ่งช่วยเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ และลดการสัมผัสผู้บริจาคหลายราย (donor exposure)^(3,4)

แม้ว่าการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวจะช่วยยกระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์โลหิต แต่กระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษายังคงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางชีวภาพของส่วนประกอบโลหิต ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงที่เรียกว่า “storage lesions” ที่อาจมีผลต่อประสิทธิภาพและความ

ปลอดภัยในการให้เลือด^(5,6) ด้วยเหตุนี้ จึงมีการพัฒนาเทคนิคเพิ่มเติม เช่น leukoreduction การฉายรังสี (irradiation) และ pathogen reduction technologies เพื่อลดความเสี่ยงของปฏิกิริยาหลังการให้เลือดและการถ่ายทอดเชื้อโรค⁽⁷⁾

ในปัจจุบัน แนวคิดด้านเวชศาสตร์แม่นยำ (precision medicine) ได้เข้ามามีบทบาทในการให้เลือดมากขึ้น โดยมุ่งเน้นการเลือกใช้ผลิตภัณฑ์โลหิตที่เหมาะสมกับลักษณะเฉพาะของผู้ป่วย เช่น สถานะทางภูมิคุ้มกัน ภาวะการอักเสบ และลักษณะทางพันธุกรรม แนวโน้มดังกล่าวนำไปสู่แนวคิดของ personalized transfusion medicine ซึ่งมีเป้าหมายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการรักษาและลดผลข้างเคียง⁽⁸⁾

อย่างไรก็ตาม แม้จะมีความก้าวหน้าอย่างมากในด้านเทคโนโลยีการแยกและแปรรูปส่วนประกอบโลหิต แต่ยังคงมีความท้าทายที่สำคัญ เช่น ความแปรปรวนของคุณภาพผลิตภัณฑ์ ต้นทุนของเทคโนโลยีขั้นสูง และข้อจำกัดของหลักฐานทางคลินิกในการประเมินผลลัพธ์ของผู้ป่วย ดังนั้น บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสรุปและวิเคราะห์ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีการแยกและการแปรรูปส่วนประกอบโลหิต ตั้งแต่การใช้เลือดทั้งถุงไปจนถึงการพัฒนาผลิตภัณฑ์โลหิตที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุดสำหรับการรักษาผู้ป่วยในปัจจุบันและอนาคต แม้ว่าจะมีบทความปริทัศน์เกี่ยวกับ storage lesions และ precision transfusion medicine ตีพิมพ์มาก่อนหน้านี้ แต่บทความนี้มุ่งเน้นการบูรณาการภาพรวมของกระบวนการตั้งแต่การแยกส่วนประกอบโลหิต การแปรรูป การควบคุมคุณภาพ ไปจนถึงแนวโน้มของ personalized transfusion medicine ภายใต้บริบทของการพัฒนาเทคโนโลยีและระบบบริการ

สุขภาพสมัยใหม่ ซึ่งแตกต่างจากบทความที่มุ่งเน้นเฉพาะประเด็นด้าน storage lesion หรือ transfusion outcomes เพียงอย่างเดียว

วิธีการสืบค้นข้อมูล

การทบทวนวรรณกรรมในบทความนี้ฟูวิขาการฉบับนี้ดำเนินการโดยการสืบค้นข้อมูลจากฐานข้อมูลวิชาการสากล ได้แก่ PubMed, Scopus และ ScienceDirect รวมถึงแหล่งข้อมูลอ้างอิงที่เกี่ยวข้องในด้านเวชศาสตร์การให้เลือด โดยใช้คำค้นหลัก (keywords) เช่น blood component separation, apheresis, leukoreduction, pathogen reduction, storage lesion และ transfusion medicine

เกณฑ์การคัดเลือกบทความ (inclusion criteria) ได้แก่ บทความวิจัยและบทความปริทัศน์ที่ตีพิมพ์ในช่วงปี ค.ศ. 2010–2025 และมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับการแยกและการแปรรูปส่วนประกอบโลหิต เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง และผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์และผลลัพธ์ทางคลินิก โดยพิจารณาบทความที่มีความน่าเชื่อถือและผ่านการตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (peer-reviewed articles)

บทความที่ไม่มีความเกี่ยวข้องโดยตรง มีข้อมูลไม่เพียงพอ หรือไม่สามารถเข้าถึงข้อความเต็มได้ จะถูกคัดออกจากการวิเคราะห์ ทั้งนี้ ข้อมูลที่ได้จากการสืบค้นถูกนำมาวิเคราะห์และสังเคราะห์เชิงเนื้อหา (narrative synthesis) เพื่อสรุปองค์ความรู้และแนวโน้มสำคัญในการแยกและการแปรรูปส่วนประกอบโลหิตในเวชศาสตร์การให้เลือดปัจจุบัน

เอกสารอ้างอิงที่ผ่านการคัดเลือกตามเกณฑ์ที่กำหนดจำนวน 25 รายการ ถูกนำมา

วิเคราะห์และสังเคราะห์เชิงเนื้อหา เพื่อสรุปองค์ความรู้และแนวโน้มสำคัญด้านการแยกและการแปรรูปส่วนประกอบโลหิตในเวชศาสตร์การให้เลือด

เนื้อหาที่ทบทวน

3.1 หลักการพื้นฐานของการแยกส่วนประกอบโลหิต

การแยกส่วนประกอบโลหิต (blood component separation) เป็นกระบวนการพื้นฐานในเวชศาสตร์การให้เลือด โดยมีเป้าหมายเพื่อแยกเลือดทั้งถุงออกเป็นองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เม็ดเลือดแดง เกล็ดเลือด และพลาสมา เพื่อให้สามารถนำไปใช้รักษาผู้ป่วยได้อย่างเหมาะสมตามข้อบ่งชี้ทางคลินิก และเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้ทรัพยากรโลหิต^(1,3)

หลักการสำคัญของการแยกอาศัยความแตกต่างของความหนาแน่น ขนาด และคุณสมบัติทางกายภาพขององค์ประกอบแต่ละชนิด โดยเมื่อเลือดถูกปั่นเหวี่ยงภายใต้แรง centrifugation จะเกิดการจัดเรียงตัวเป็นชั้น ได้แก่ เม็ดเลือดแดงอยู่ด้านล่าง ชั้น buffy coat อยู่ตรงกลาง และพลาสมาอยู่ด้านบน ซึ่งสามารถนำไปใช้ผลิตผลิตภัณฑ์โลหิตชนิดต่าง ๆ ได้^(1,9)

นอกจากนี้ การควบคุมพารามิเตอร์ของกระบวนการ เช่น ความเร็วรอบ เวลา และอุณหภูมิ มีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ รวมถึงการลด hemolysis และการคงสภาพการทำงาน of เซลล์ โดยเฉพาะเกล็ดเลือดซึ่งมีความไวต่อสภาวะแวดล้อม⁽⁵⁾

3.2 เทคโนโลยีการแยกส่วนประกอบโลหิต

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในการแยกส่วนประกอบโลหิตได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องจากการ

ปั่นแยกแบบดั้งเดิมไปสู่ระบบอัตโนมัติและเทคโนโลยี apheresis (การแยกเก็บส่วนประกอบโลหิตเฉพาะชนิดจากผู้บริจาค) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำ ความสม่ำเสมอ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์โลหิต^(1,4)

การปั่นแยกแบบดั้งเดิม (conventional centrifugation) ยังคงเป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและสามารถผลิตผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย อย่างไรก็ตาม วิธีนี้อาจมีความแปรปรวนจากผู้ปฏิบัติงานและมีข้อจำกัดด้านระบบเปิด⁽³⁾

ระบบอัตโนมัติ (automated processing systems: ระบบแปรรูปส่วนประกอบโลหิตแบบอัตโนมัติ) ได้รับการพัฒนาเพื่อลดข้อจำกัดดังกล่าว โดยช่วยเพิ่มความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ลดความผิดพลาดจากมนุษย์ และเพิ่มความปลอดภัยผ่านระบบปิด นอกจากนี้ ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในเวชศาสตร์การให้เลือดยังครอบคลุมการใช้ digital monitoring systems (ระบบติดตามข้อมูลแบบดิจิทัล), automated quality control (ระบบควบคุมคุณภาพอัตโนมัติ) และ smart processing platforms (แพลตฟอร์มอัจฉริยะสำหรับการแปรรูปส่วนประกอบโลหิต) ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและติดตามผลิตภัณฑ์โลหิต^(9,21,23)

ในขณะเดียวกัน เทคโนโลยี apheresis ช่วยให้สามารถเก็บส่วนประกอบเฉพาะ เช่น แกล็ดเลือดหรือพลาสมา จากผู้บริจาคโดยตรง ซึ่งช่วยเพิ่มความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ลด donor exposure และสามารถปรับแต่งให้เหมาะสมกับผู้ป่วยเฉพาะราย⁽⁴⁾

3.3 การแปรรูปและปรับปรุงคุณภาพ

การแปรรูปส่วนประกอบโลหิตมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มความปลอดภัยและลด

ภาวะแทรกซ้อนจากการให้เลือด โดยเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ได้แก่ leukoreduction การฉายรังสี (irradiation) การล้างเซลล์ และ pathogen reduction technologies^(1,7)

Leukoreduction เป็นกระบวนการกำจัดเม็ดเลือดขาวออกจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งช่วยลด febrile non-hemolytic transfusion reactions ลด HLA alloimmunization และลดความเสี่ยงของการถ่ายทอดเชื้อ cytomegalovirus (CMV) ที่สัมพันธ์กับเม็ดเลือดขาว เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในผู้ป่วยที่ต้องได้รับเลือดซ้ำหลายครั้ง เช่น ผู้ป่วยธาลัสซีเมียและผู้ป่วยมะเร็งโลหิตวิทยา⁽¹⁰⁾ ผลิตภัณฑ์โลหิตที่ผ่านการฉายรังสีมักใช้ในผู้ป่วยที่มีความเสี่ยงสูงต่อ transfusion-associated graft-versus-host disease (TA-GVHD) เช่น ผู้ป่วยปลูกถ่ายเซลล์ต้นกำเนิดเม็ดเลือด ผู้ป่วยที่มีภาวะภูมิคุ้มกันบกพร่อง ผู้ป่วยที่ได้รับเลือดจากญาติสายตรง รวมถึงทารกในครรภ์หรือทารกแรกเกิดบางกลุ่มที่ต้องได้รับเลือดเฉพาะทาง การฉายรังสีช่วยยับยั้งการแบ่งตัวของ donor lymphocytes อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวอาจเร่งการร้าวของโพแทสเซียมและเพิ่มการเกิด storage lesion ในเม็ดเลือดแดง ส่งผลให้อายุการเก็บรักษาลดลง⁽¹¹⁾

ในขณะที่ pathogen reduction technologies เป็นแนวทางที่สำคัญในการลดความเสี่ยงจากเชื้อก่อโรคในผลิตภัณฑ์โลหิต โดยใช้กลไกการทำลายหรือยับยั้ง nucleic acids ของเชื้อก่อโรค ทำให้เชื้อไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ เทคโนโลยีนี้มีบทบาทสำคัญต่อการเพิ่มความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์เกล็ดเลือด และอาจช่วยลดความเสี่ยงจาก emerging infectious agents ในระบบบริการโลหิต^(7,25)

3.4 Storage lesions และผลต่อ clinical outcomes

การเก็บรักษาส่วนประกอบโลหิตทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมี โครงสร้าง และหน้าที่ของเซลล์ ซึ่งเรียกว่า “storage lesions” โดยพบได้ในเม็ดเลือดแดง เกล็ดเลือด และพลาสมา^(5,12) ในเม็ดเลือดแดง การลดลงของ ATP และ 2,3-DPG ส่งผลต่อความสามารถในการปลดปล่อยออกซิเจน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของเยื่อหุ้มเซลล์และการเกิด hemolysis ระดับต่ำ^(6,13) สำหรับเกล็ดเลือด storage lesion ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การลดลงของการทำงาน และการสะสมของสารชีวโมเลกุล ซึ่งอาจมีผลต่อการห้ามเลือดและประสิทธิภาพของ platelet transfusion โดยเฉพาะเมื่อเก็บรักษาเป็นเวลานาน^(14,15) นอกจากนี้ platelet storage lesion ยังสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการเมแทบอลิซึมของเกล็ดเลือด (platelet metabolism) การหลั่งสารชีวโมเลกุล และการลดลงของการคงอยู่ของเกล็ดเลือดภายหลังการให้เลือด (post-transfusion recovery) ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ในทางคลินิก⁽²²⁾ ในพลาสมา การลดลงของกิจกรรม coagulation factors โดยเฉพาะ factor V และ VIII อาจส่งผลต่อประสิทธิภาพในการห้ามเลือด⁽¹⁶⁾ แม้ storage lesions จะมีผลชัดเจนในระดับการศึกษาในหลอดทดลอง (in vitro) แต่ความสัมพันธ์กับผลลัพธ์ทางคลินิกยังคงมีความซับซ้อนและขึ้นกับบริบทของผู้ป่วยแต่ละราย⁽¹⁷⁾

3.5 การควบคุมคุณภาพและมาตรฐาน

การควบคุมคุณภาพของส่วนประกอบโลหิตเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ช่วยรับประกันความปลอดภัยของผู้ป่วยตลอดกระบวนการตั้งแต่

ผู้บริจาคจนถึงผู้รับเลือด โดยต้องอาศัยระบบคุณภาพที่ครอบคลุมทุกขั้นตอนของการผลิต⁽¹⁸⁾

มาตรฐานสากล เช่น AABB และ EDQM ได้กำหนดเกณฑ์สำหรับคุณภาพของผลิตภัณฑ์โลหิต เช่น ปริมาตร จำนวนเซลล์ ความบริสุทธิ์ และความปลอดเชื้อ รวมถึงระบบที่สามารถตรวจสอบย้อนกลับ (traceability) และการควบคุมกระบวนการผลิต^(19,20)

การประยุกต์ใช้หลัก Good Manufacturing Practice (GMP: หลักเกณฑ์วิธีการที่ดีในการผลิต) ในงานธนาคารเลือดมีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากผลิตภัณฑ์โลหิตเป็น biological products ที่มีความแปรปรวนสูง และไม่สามารถพึ่งพาการตรวจสอบปลายทางเพียงอย่างเดียวได้⁽¹⁸⁾

ดังนั้น การควบคุมคุณภาพในเวชศาสตร์การให้เลือดจึงต้องเป็นระบบแบบบูรณาการครอบคลุมทั้ง in-process control การติดตามแนวโน้ม (trend monitoring) และการอ้างอิงแนวทางสากล เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงสุด⁽²⁾

วิจารณ์

ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในการแยกและแปรรูปส่วนประกอบโลหิตได้เปลี่ยนแปลงแนวทางเวชศาสตร์การให้เลือดอย่างมีนัยสำคัญ จากเดิมที่อาศัยเลือดทั้งถุงเป็นหลัก ไปสู่การใช้ผลิตภัณฑ์โลหิตเฉพาะส่วนที่ตอบสนองต่อข้อบ่งชี้ทางคลินิกได้อย่างเหมาะสมมากขึ้น เทคโนโลยีการปั่นแยก ระบบอัตโนมัติ และ apheresis มีข้อดีเด่นในด้านการเพิ่มคุณภาพและความสม่ำเสมอของผลิตภัณฑ์ ลด donor exposure และสนับสนุนการดูแลผู้ป่วยเฉพาะกลุ่มที่ต้องการผลิตภัณฑ์เฉพาะทาง เช่น apheresis platelets, leukoreduced units หรือ irradiated components^(1,4,21) นอกจากนี้ การแปร

รูปเพิ่มเติม เช่น leukoreduction, irradiation และ pathogen reduction technologies ยังมีบทบาทสำคัญในการลดความเสี่ยงของปฏิกิริยาหลังการให้เลือดและการถ่ายทอดเชื้อก่อโรค ทำให้ห่วงโซ่ความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์โลหิตมีความเข้มแข็งมากขึ้น^(7,10,11)

อย่างไรก็ตาม แม้เทคโนโลยีเหล่านี้จะให้ประโยชน์อย่างชัดเจน แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่ต้องพิจารณาอย่างรอบด้าน หนึ่งในประเด็นสำคัญคือความแตกต่างด้านทรัพยากรระหว่างสถาบันและประเทศ เนื่องจากระบบอัตโนมัติ เทคโนโลยี apheresis และ pathogen reduction technologies ต้องอาศัยการลงทุนสูง ทั้งในด้านเครื่องมือ บุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญ และระบบคุณภาพที่เข้มงวด ทำให้การประยุกต์ใช้ในวงกว้างยังมีข้อจำกัดในบริบทที่มีทรัพยากรจำกัด^(18,20) อีกทั้ง การแปรรูปบางชนิดแม้ช่วยเพิ่มความปลอดภัย แต่ก็อาจส่งผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ เช่น การฉายรังสีที่อาจเร่งการเกิด storage lesion ในเม็ดเลือดแดง หรือการล้างเซลล์ที่อาจลดอายุการเก็บและเพิ่มความเสี่ยงของการปนเปื้อนในระบบเปิด^(1,11)

ในบริบทของประเทศไทย การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในเวชศาสตร์การให้เลือด เช่น automated processing systems, apheresis และ pathogen reduction technologies ยังมีข้อจำกัดหลายประการ ทั้งด้านงบประมาณ โครงสร้างพื้นฐาน ความพร้อมของบุคลากรเฉพาะทาง และต้นทุนการบำรุงรักษาเครื่องมือ โดยเทคโนโลยีดังกล่าวมักกระจุกตัวอยู่ในศูนย์บริการโลหิตหรือโรงพยาบาลขนาดใหญ่ ส่งผลให้โรงพยาบาลระดับภูมิภาคหรือโรงพยาบาลชุมชนอาจยังไม่สามารถเข้าถึงได้อย่างทั่วถึง นอกจากนี้ ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (cost-effectiveness) ของการนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาใช้

ในระบบบริการสุขภาพของประเทศกำลังพัฒนายังคงต้องการหลักฐานเพิ่มเติมเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจเชิงนโยบายในอนาคต

ในด้านองค์ความรู้ แม้งานวิจัยจำนวนมากได้อธิบายกลไกของ storage lesions และผลกระทบต่อคุณสมบัติของเม็ดเลือดแดง แกล็ดเลือด และพลาสมาไว้อย่างชัดเจนในระดับ in vitro แต่ความเชื่อมโยงระหว่างการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้กับผลลัพธ์ทางคลินิกของผู้ป่วยยังคงไม่ชัดเจนเพียงพอ โดยเฉพาะในผู้ป่วยเฉพาะกลุ่ม เช่น ทารกแรกเกิด ผู้ป่วยวิกฤต ผู้ป่วยที่ต้องได้รับ massive transfusion หรือผู้ที่มีภาวะอวัยวะอย่างรุนแรง^(12,13,17) นอกจากนี้ ยังมีช่องว่างความรู้เกี่ยวกับผลของความแปรปรวนระหว่างผู้บริจาค ชนิดของ additive solutions วิธีการเตรียมผลิตภัณฑ์ และผลกระทบระยะยาวของผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการแปรรูปขั้นสูงต่อผู้ป่วยแต่ละกลุ่ม ซึ่งเป็นประเด็นที่ยังต้องการหลักฐานเชิงคลินิกเพิ่มเติม

อีกประเด็นหนึ่งที่ต้องให้ความสำคัญคือ แม้มาตรฐานสากลจาก WHO, AABB และ EDQM จะมีบทบาทสำคัญในการกำหนดกรอบคุณภาพและความปลอดภัยของผลิตภัณฑ์โลหิต แต่การนำมาตรฐานเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในบริบทจริงยังต้องอาศัยการปรับให้สอดคล้องกับระบบบริการสุขภาพในแต่ละประเทศ ไม่ว่าจะเป็นโครงสร้างพื้นฐาน ความพร้อมของห้องปฏิบัติการ งบประมาณ และระบบติดตามย้อนกลับ ดังนั้น การพัฒนาคุณภาพในอนาคตจึงไม่ควรเน้นเพียงการยกระดับเทคโนโลยี แต่ต้องรวมถึงการพัฒนาคุณภาพทั้งกระบวนการและการสร้างสมดุลระหว่าง “มาตรฐานสูง” กับ “ความเป็นไปได้ในการปฏิบัติจริง” ด้วย^(18,19)

สำหรับทิศทางในอนาคต เวชศาสตร์การให้เลือดมีแนวโน้มจะพัฒนาไปสู่การเลือกใช้

ผลิตภัณฑ์โลหิตให้เหมาะสมกับผู้ป่วยเฉพาะรายมากขึ้น โดยไม่ยึดเพียงชนิดของผลิตภัณฑ์หรืออายุการเก็บเป็นเกณฑ์หลัก แต่คำนึงถึงลักษณะเฉพาะของผู้ป่วย ความเสี่ยงทางภูมิคุ้มกัน สถานะการอักเสบ และบริบททางคลินิกที่แตกต่างกัน การบูรณาการ ข้อมูลหลายมิติ เช่น omics technologies (เทคโนโลยีการวิเคราะห์ข้อมูลชีวภาพระดับโมเลกุล) ซึ่งครอบคลุม genomics (ข้อมูลพันธุกรรม), transcriptomics (ข้อมูลการแสดงออกของยีน), proteomics (ข้อมูลโปรตีน) และ metabolomics (ข้อมูลเมแทบอลิซึม) ร่วมกับ biomarkers (ตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ), donor biology (ลักษณะทางชีววิทยาของผู้บริจาค) และระบบวิเคราะห์ข้อมูลด้วย artificial intelligence อาจช่วยให้สามารถคัดเลือกหรือออกแบบผลิตภัณฑ์โลหิตที่เหมาะสมต่อผู้ป่วยแต่ละรายได้แม่นยำมากขึ้นในอนาคต^(2,24)

พร้อมกันนี้ งานวิจัยในระยะต่อไปควรมุ่งเน้นการสร้างหลักฐานเชิงเปรียบเทียบในผู้ป่วยกลุ่มเฉพาะ การประเมิน cost-effectiveness ของเทคโนโลยีขั้นสูง และการพัฒนาเกณฑ์คุณภาพที่สะท้อน “functional quality” ของผลิตภัณฑ์มากกว่าการอาศัยตัวชี้วัดเชิงปริมาณเพียงอย่างเดียว

โดยสรุป แม้เทคโนโลยีการแยกและการแปรรูปส่วนประกอบโลหิตจะช่วยยกระดับความปลอดภัยและประสิทธิภาพของการให้เลือดอย่างมาก แต่การนำเทคโนโลยีเหล่านี้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดจำเป็นต้องพิจารณาทั้งข้อดีข้อจำกัด ช่องว่างของหลักฐาน และบริบทการใช้งานจริงควบคู่กัน การพัฒนางานในอนาคตจึงควรมุ่งสู่การสร้างระบบการให้เลือดที่มีความแม่นยำ ยืดหยุ่น และยั่งยืน ทั้งในเชิงเทคโนโลยีและเชิงระบบบริการสุขภาพ

เอกสารอ้างอิง

1. Fung MK, Eder AF, Spitalnik SL, Westhoff CM, editors. Technical manual. 20th ed. Bethesda: AABB; 2019.
2. Kleinman S, Busch MP. Assessing the impact of blood transfusion safety interventions. Transfusion. 2021;61(S1):S3-S9.
3. McCullough J. Transfusion medicine. 4th ed. Wiley-Blackwell; 2017.
4. Winters JL. Apheresis: Principles and practice. Hematol Oncol Clin North Am. 2020;34(4):689-702.
5. Hess JR. Red cell changes during storage. Transfus Apher Sci. 2010;43(1):51-59.
6. Zimring JC. Established and theoretical factors in red cell storage lesion. Blood. 2015;125(14):2185-90.
7. Stramer SL, Hollinger FB, Katz LM, et al. Emerging infectious disease agents. Transfusion. 2016;56(Suppl 2):S38-45.

8. Delaney M, Wendel S, Bercovitz RS, et al. Transfusion reactions. *Lancet*. 2016; 388(10061):2825-36.
9. Klein HG, Anstee DJ. *Mollison's blood transfusion in clinical medicine*. 12th ed. Wiley-Blackwell; 2018.
10. Yazer MH, Triulzi DJ. Leukoreduction in transfusion medicine. *Curr Opin Hematol*. 2017;24(6):565-71.
11. Treleaven J, Gennery A, Marsh J, et al. Irradiated blood components. *Br J Haematol*. 2011;152(1):35-51.
12. Yoshida T, Prudent M, D'Alessandro A. RBC storage lesion. *Blood Transfus*. 2019;17(1):27-52.
13. García-Roa M, Vicente-Ayuso MC, Bobes AM, et al. RBC storage time. *Blood Transfus*. 2017;15(3):222-31.
14. Ng MSY, Davidow RB, Acker JP. Platelet storage lesions. *Transfus Med Rev*. 2018;32(3):144-54.
15. Liu C, Su J, Lu G, Hu Z. Platelet storage lesion. *J Clin Lab Anal*. 2024;38(1):e24994.
16. Noordin SS, Noor FAM, Nawi AM, Othman A. Coagulation factors in FFP. *Egypt J Haematol*. 2017;42(4):167-72.
17. Tissot JD, Rubin O, Canellini G. Storage lesions. *Transfus Clin Biol*. 2017;24(3):159-63.
18. World Health Organization. *Good practices for blood establishments*. Geneva: World Health Organization; 2025. Available from: <https://www.who.int>
19. AABB. *Fundamental standards for blood collection and transfusion services*. 33rd ed. Bethesda: AABB; 2025. Available from: <https://www.aabb.org>
20. European Directorate for the Quality of Medicines & HealthCare. *Guide to the preparation, use and quality assurance of blood components*. 22nd ed. Strasbourg: EDQM; 2025. Available from: <https://www.edqm.eu>

21. Custer B, Bloch EM, Bryant BJ, D'Alessandro A, Delaney M, Goel R, et al. Proceedings of the 2022 NHLBI and OASH state of the science in transfusion medicine symposium. *Transfusion*. 2023;63(5):1074-91.
22. Devine DV, Serrano K. The platelet storage lesion. *Clin Lab Med*. 2010;30(2):475-87.
23. Allen ES, Vincent AG, Zimring JC. Current advances in transfusion medicine 2020: a critical review of selected topics by the AABB Clinical Transfusion Medicine Committee. *Transfusion*. 2021;61(12):3473-82.
24. D'Alessandro A, Bugert P. Omics and machine learning in transfusion medicine. *Transfus Med Hemother*. 2023;50(3):161-2.
25. Piccin A, Allameddine A, Spizzo G, Lappin KM, Prati D. Platelet pathogen reduction technology—should we stay or should we go? *J Clin Med*. 2024;13(18):5359.