

Research article

การออกแบบกรอบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ
ในหน่วยงานจ่ายกลางและทำให้ปราศจากเชื้อ

A Process-Based Framework to Calculate the Carbon Footprint of Sterile
Processing in Central Sterile Supply Departments

วิทยา ชัญชัย^{1*}, โสภาสินี จิตจรุรัตนมณี², กัตติกา สุขวัลย์³
Withaya Chanchai^{1*}, Sobhasinee Chitrachulrattanamanee²,
Kattika Sukaval³

¹ภาควิชาสาธารณสุขศาสตร์ สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย

คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยสยาม

²งานเวชภัณฑ์ปลอดเชื้อ โรงพยาบาลรามธิบดีจักรีนฤเบดินทร์

สถาบันการแพทย์จักรีนฤเบดินทร์ คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล

³ศูนย์การเรียนรู้และนวัตกรรมทางการแพทย์เฮลท์เมดิค

¹Department of Public Health, Major in Occupational Health and Safety,

Faculty of Medicine, Siam University

²Central Sterile Supply Department,

Ramadhibodi Chakri Naruebodindra Hospital Chakri Naruebodindra Medical Institute

Faculty of Medicine Ramathibodi Hospital Mahidol University

³Center for Biomedical Innovation, Healthmedic Innovation Academy

*Corresponding Author, email: withaya.cha@siam.edu

Received: 20 February 2026; Revised: 21 April 2026; Accepted: 20 May 2026

บทคัดย่อ

ความเป็นมาและวัตถุประสงค์: หน่วยจ่ายกลางและทำให้ปราศจากเชื้อเป็นระบบสนับสนุนสำคัญของการผ่าตัดและหัตถการที่ใช้เครื่องมือแพทย์แบบใช้ซ้ำ โดยมีการใช้พลังงาน น้ำ วัสดุบรรจุภัณฑ์ และก่อให้เกิดของเสียอย่างต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม โรงพยาบาลส่วนใหญ่ยังขาดกรอบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เชื่อมโยงกับการปฏิบัติงานจริงและแปลงผลลัพธ์เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ตัดสินใจได้ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอกรอบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อในหน่วยจ่ายกลาง โดยบูรณาการมิติคุณภาพ ความปลอดภัยในการทำงาน และความยั่งยืน **วิธีการศึกษา:** บทความวิชาการเชิงสังเคราะห์และเชิงวิวิธวิทยา โดยพัฒนากรอบการคำนวณจากแนวคิดการทำบัญชีคาร์บอนเชิงกระบวนการและการประเมินวงจรชีวิต ครอบคลุม 7 ขั้นตอน ได้แก่ การกำหนดขอบเขตและหน่วยหน้าที่ การจัดทำฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ การเก็บข้อมูลกิจกรรมรายวันของเครื่องล่างและเครื่องนั่ง การคำนวณคาร์บอนต่อรอบเครื่องจากข้อมูลกิจกรรมและปัจจัยการปล่อย การจัดสรรคาร์บอนสู่ระดับชุดและเครื่องมือรายชิ้น การรวมผลกระทบจากระบบท่อหุ้มปราศจากเชื้อและการจัดการของเสีย และการเชื่อมโยงผลลัพธ์สู่ระดับเคลผ่าตัด **ผลการศึกษา:** กรอบที่เสนอทำให้คาร์บอนต่อรอบเครื่องเป็นค่าตั้งต้นที่ตรวจสอบได้ และสามารถจัดสรรเป็นคาร์บอนต่อชุด ต่อเครื่องมือ และต่อเคลผ่าตัด ตัวชี้วัดดังกล่าวสะท้อนประสิทธิภาพการใช้ความจุเครื่อง การทำซ้ำจากเหตุการณ์คุณภาพ การเลือกบรรจุภัณฑ์ และเส้นทางการจัดการของเสีย พร้อมกำหนดจุดควบคุมคุณภาพในแต่ละขั้นตอนเพื่อลดความเสี่ยงต่อความปลอดภัยของผู้ป่วยและบุคลากร **สรุป:** กรอบการคำนวณนี้เป็นเครื่องมือเชิงระบบสำหรับหน่วยจ่ายกลางที่ทำซ้ำได้ โปร่งใส และใช้สนับสนุนการตัดสินใจด้านคุณภาพ ความปลอดภัย และความยั่งยืน ทั้งยังเป็นฐานสำหรับการทดสอบในระบบงานจริงและการพัฒนาคาร์บอนอ้างอิงของโรงพยาบาลต่อไป

คำสำคัญ: คาร์บอนฟุตพริ้นท์, หน่วยจ่ายกลางและทำให้ปราศจากเชื้อ, ระบบท่อหุ้มปราศจากเชื้อ, การทำให้ปราศจากเชื้อ, ความยั่งยืน

Abstract

Background and Purpose: Central sterile supply departments are essential to surgical and procedural services using reusable medical devices. Their workflows consume energy, water, and packaging materials, continuously generating waste. However, practical frameworks for calculating carbon footprints from routine sterile processing activities and translating them into decision-ready indicators remain limited. This article proposes a process-based framework for calculating the carbon footprint of sterile processing in central sterile supply departments, integrating quality management, occupational safety, and sustainability. **Methods:** This methodological academic article synthesized relevant evidence and developed a seven-step framework based on process-based carbon accounting and life-cycle thinking. The steps include defining system boundaries and functional units; developing an instrument set database; collecting daily activity data for washer-disinfectors and steam sterilizers; calculating per-cycle emissions from activity data and emission factors; allocating emissions to instrument sets and individual instruments; incorporating sterile barrier systems and waste-management pathways; and linking the results to surgical case-level indicators. **Results:** The proposed framework establishes per-cycle emissions as an auditable starting point and converts them into per-set, per-instrument, and per-case indicators. These indicators reflect machine capacity utilization, quality-related reprocessing, packaging choices, and waste-management pathways. Quality control points are embedded in each step to support carbon reduction without compromising patient safety, infection prevention, or occupational safety. **Conclusions:** The framework provides a transparent and repeatable management tool for central sterile supply departments. It can support integrated decision-making on quality, safety, and sustainability, and can serve as a basis for field testing and the development of hospital-specific carbon reference values.

Keywords: Carbon footprint, Central sterile supply department, Sterile barrier system, Sterile processing, Sustainability

บทนำ (Introduction)

ระบบบริการสุขภาพเป็นภาคส่วนที่ใช้ทรัพยากร พลังงาน วัสดุทางการแพทย์ และระบบโลจิสติกส์อย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่การผลิตและจัดหาเวชภัณฑ์ การใช้ในกระบวนการรักษา ไปจนถึงการจัดการของเสียภายหลังการใช้งาน หลักฐานเชิงประจักษ์ในช่วงที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า กิจกรรมทางการแพทย์มีส่วนต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งในระดับประเทศและระดับโลก โดยเฉพาะบริการผ่าตัดและหัตถการที่มีการใช้เครื่องมือแพทย์จำนวนมาก ดังนั้น การลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมของระบบสุขภาพจึงเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องดำเนินการควบคู่กับการรักษาคุณภาพการดูแล ความปลอดภัยของผู้ป่วย และมาตรฐานการควบคุมการติดเชื้อ¹⁻³

หน่วยจ่ายกลางและทำให้ปราศจากเชื้อ หรือ Central Sterile Supply Department (CSSD) เป็นหน่วยงานสนับสนุนหลักของโรงพยาบาลที่มีบทบาทโดยตรงต่อความปลอดภัยของการผ่าตัดและหัตถการ หน่วยงานนี้รับผิดชอบการรับคืนเครื่องมือปนเปื้อน การล้าง การตรวจสอบ การบรรจุ การทำให้ปราศจากเชื้อ การจัดเก็บ และการกระจายเครื่องมือแพทย์แบบใช้ซ้ำ กระบวนการดังกล่าวมีการใช้ไฟฟ้า น้ำ ไอน้ำ สารเคมี วัสดุบรรจุภัณฑ์ และก่อให้เกิดของเสียอย่างต่อเนื่อง จึงเป็นพื้นที่สำคัญที่สามารถพัฒนาระบบข้อมูลเพื่อประเมินและ

ลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของโรงพยาบาลได้อย่างเป็นรูปธรรม โดยงานวิจัยด้านการประเมินวงจรชีวิตของเครื่องมือแพทย์ชี้ให้เห็นว่า กระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ โดยเฉพาะการนึ่งฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ เป็นหนึ่งในแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกสำคัญของการใช้เครื่องมือแพทย์แบบใช้ซ้ำ⁴⁻⁵ แม้เครื่องมือแบบใช้ซ้ำมักถูกมองว่าเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนกว่าเครื่องมือแบบใช้ครั้งเดียว แต่ความได้เปรียบด้านสิ่งแวดล้อมของเครื่องมือแบบใช้ซ้ำขึ้นกับประสิทธิภาพของระบบรีไซเคิลเป็นสำคัญ ปัจจัยที่มีผลต่อการคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ได้แก่ พลังงานที่ใช้ผลิตไอน้ำ การใช้น้ำและไฟฟ้าในการล้าง ประสิทธิภาพการใช้ความจุของเครื่องล้างและเครื่องนึ่ง จำนวนชุดเครื่องมือในแต่ละรอบการบรรจุเวชภัณฑ์ และเส้นทางการจัดการของเสีย⁵⁻⁷ การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในหน่วยจ่ายกลางจึงไม่ควรพิจารณาเฉพาะเครื่องล้างหรือเครื่องนึ่งเป็นรายอุปกรณ์เท่านั้น แต่ควรมองทั้งกระบวนการตั้งแต่เครื่องมือเข้าสู่หน่วยจ่ายกลางจนถึงการส่งมอบเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อพร้อมใช้ การใช้ความจุของเครื่องในแต่ละรอบมีผลโดยตรงต่อการปล่อยชุดเครื่องมือหากจำนวนชุดในรอบเครื่องน้อย คาร์บอนต่อชุดจะสูงขึ้นแม้การใช้พลังงานต่อรอบเครื่องจะใกล้เคียงเดิม นอกจากนี้ การแยกเครื่องมือออกจากชุดมาตรฐานเพื่อลดจำนวนเครื่องมือที่ไม่บ่อย อาจทำให้เกิดการบรรจุแยกชิ้นและผ่านกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อเพิ่มเติมส่งผลให้การ

ใช้ทรัพยากรต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้นสูงขึ้นโดยไม่ตั้งใจ⁵

ระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อ หรือ sterile barrier system (SBS) เป็นอีกองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของหน่วยจ่ายกลาง เนื่องจากเกี่ยวข้องทั้งการเลือกวัสดุบรรจุภัณฑ์การคงสภาพความปราศจากเชื้อ การเกิดของเสีย และวิธีการจัดการของเสียหลังใช้งาน การเลือกใช้วัสดุและเส้นทางการกำจัด เช่น การเผา การจัดการเป็นขยะติดเชื้อ หรือการคัดแยกเพื่อรีไซเคิลในกรณีที่เหมาะสม สามารถทำให้คาร์บอนฟุตพริ้นท์ของเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อแตกต่างกันได้อย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม การลดคาร์บอนจากบรรจุภัณฑ์ต้องไม่เพิ่มความเสียหายต่อห่อหุ้ม ความเป็นพิษ การปนเปื้อน หรือการสูญเสียความคงสภาพความปราศจากเชื้อ^{5,8} นอกจากนี้มิติสิ่งแวดล้อมแล้ว หน่วยจ่ายกลางยังเป็นพื้นที่ปฏิบัติงานที่มีความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย บุคลากรอาจสัมผัสความร้อน ไอน้ำแรงดันสูง สารเคมี ของมีคม การยกเคลื่อนย้ายของหนัก และการทำงานซ้ำภายใต้ข้อจำกัดด้านเวลา การออกแบบระบบที่ลดรอบเครื่องที่ไม่จำเป็น ลดการทำซ้ำจากข้อผิดพลาดด้านคุณภาพ และเพิ่มความสม่ำเสมอของกระบวนการ จึงมีศักยภาพในการลดทั้งคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ภาระงาน และความเสี่ยงต่อบุคลากรไปพร้อมกัน

แม้ปัจจุบันมีงานวิจัยจำนวนมากเกี่ยวกับคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของเครื่องมือแพทย์ การเปรียบเทียบเครื่องมือแบบใช้ซ้ำกับแบบใช้ครั้งเดียว และผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ แต่ยังมีช่องว่างขององค์ความรู้ในการแปลงข้อมูลเหล่านี้เป็นกรอบการคำนวณที่ใช้ได้จริงในระดับหน่วยงาน โดยเฉพาะกรอบที่เชื่อมโยงข้อมูลการทำงานประจำของหน่วยจ่ายกลางกับตัวชี้วัดที่ใช้ตัดสินใจได้ เช่น กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อชุดเครื่องมือ ต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้นและต่อเคสผ่าตัด ช่องว่างดังกล่าวมีความสำคัญต่อโรงพยาบาลที่ต้องการขับเคลื่อนนโยบายความยั่งยืน แต่ยังมีข้อจำกัดด้านข้อมูล บุคลากร และระบบสารสนเทศ⁵⁻¹⁴ บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอกรอบการออกแบบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อในหน่วยจ่ายกลาง โดยสังเคราะห์หลักฐานด้านเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อ การประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ การบริหารคุณภาพ และความปลอดภัยในการทำงาน¹⁵⁻¹⁷ เพื่อพัฒนาแนวทางที่สามารถประยุกต์ใช้กับบริบทโรงพยาบาลไทย กรอบดังกล่าวมุ่งให้หน่วยจ่ายกลางสามารถใช้ข้อมูลการปฏิบัติงานประจำในการคำนวณ วิเคราะห์ และสื่อสารผลลัพธ์อย่างเป็นระบบ โดยยังคงหลักสำคัญว่า การลดคาร์บอนต้องไม่ลดทอนความปลอดภัยของผู้ป่วย คุณภาพของเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อ หรือความปลอดภัยของบุคลากร^{1-3,18}

วิธีการศึกษา

บทความนี้เป็นบทความวิชาการเชิงสังเคราะห์และเชิงวิธีวิทยา มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนารอบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อในหน่วยจ่ายกลาง และทำให้ปราศจากเชื้อ โดยอาศัยแนวคิดการทำบัญชีคาร์บอนเชิงกระบวนการ การประเมินวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ และการบริหารคุณภาพในงานเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อเป็นฐานในการออกแบบกรอบที่พัฒนาขึ้นมุ่งให้สามารถใช้ข้อมูลจากงานประจำของหน่วยจ่ายกลาง ได้แก่ จำนวนรอบเครื่องล่าง จำนวนรอบเครื่องนั่ง จำนวนชุดเครื่องมือที่ผ่านกระบวนการ วัสดุบรรจุภัณฑ์ และข้อมูลการจัดการของเสีย มาแปลงเป็นตัวชี้วัดคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่ใช้ตัดสินใจได้ในระดับชุดเครื่องมือ เครื่องมือรายชิ้น และเคสผ่าตัด โดยการศึกษาเริ่มจากการทบทวนและสังเคราะห์เอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้องกับคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของระบบบริการสุขภาพ การประเมินวงจรชีวิตของเครื่องมือแพทย์การเปรียบเทียบเครื่องมือแพทย์แบบใช้ซ้ำกับแบบใช้ครั้งเดียว การทำให้ปราศจากเชื้อด้วยไอน้ำ ระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อและการจัดการของเสียจากกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อจากนั้นนำหลักฐานที่ได้มาวิเคราะห์ร่วมกับลำดับงานจริงของหน่วยจ่ายกลาง เพื่อกำหนดขอบเขตของระบบตัวแปรที่ต้องเก็บข้อมูล วิธีการจัดสรรคาร์บอนและจุดควบคุมคุณภาพในแต่ละขั้นตอน ซึ่งขอบเขตของกรอบการคำนวณกำหนดให้เริ่มตั้งแต่เครื่องมือแพทย์ปนเปื้อนเข้าสู่กระบวนการของหน่วยจ่ายกลาง และสิ้นสุดเมื่อเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อถูกส่งออกจากหน่วยงานพร้อมใช้งาน กิจกรรมที่รวมอยู่ในขอบเขต ได้แก่ การล้างด้วยเครื่องล่าง การทำให้แห้ง การบรรจุด้วยระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อ การนั่งฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำ การจัดเก็บ การขนย้ายภายในหน่วยงาน และการจัดการของเสียจากบรรจุภัณฑ์ กิจกรรมที่อยู่นอกขอบเขต ได้แก่ การผลิตเครื่องมือแพทย์ตั้งแต่ต้นทาง การก่อสร้างอาคาร ระบบสาธารณูปโภคถาวร และการขนส่งภายนอกโรงพยาบาล เนื่องจากไม่ใช่กิจกรรมที่หน่วยจ่ายกลางสามารถควบคุมหรือปรับปรุงได้โดยตรงในระดับงานประจำ

การกำหนดหน่วยหน้าที่ของการคำนวณแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อชุดเครื่องมือ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้น และ กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเคสผ่าตัด หน่วยต่อชุดเครื่องมือใช้สำหรับการบริหารภายในหน่วยจ่ายกลาง หน่วยต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้นใช้สำหรับการทบทวนความเหมาะสมของการจัดชุดเครื่องมือ และหน่วยต่อเคสผ่าตัดใช้สำหรับสื่อสารกับทีมผ่าตัดและผู้บริหารโรงพยาบาลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจด้านคุณภาพ ความปลอดภัยและความยั่งยืนร่วมกัน การพัฒนารอบการคำนวณดำเนินการเป็น 7 ขั้นตอน ได้แก่ การกำหนดขอบเขตและหน่วยหน้าที่ การจัดทำฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ การเก็บข้อมูลกิจกรรมรายวันของเครื่องล่างและเครื่องนั่ง การคำนวณคาร์บอนต่อรอบเครื่อง การจัดสรรคาร์บอนสู่ระดับชุดเครื่องมือและเครื่องมือรายชิ้น การรวมผลกระทบจากระบบ

ห่อหุ้มปราศจากเชื้อและการจัดการของเสีย และการเชื่อมโยงผลลัพธ์สู่ระดับเซลล์ระดับต้นตอดังกล่าวถูกออกแบบให้เรียงตามลำดับการทำงานจริงของหน่วยจ่ายกลางเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจสอบข้อมูลย้อนหลังและทำซ้ำได้ในระยะยาว ข้อมูลกิจกรรมที่เสนอให้เก็บประกอบด้วยจำนวนรอบเครื่องล้างต่อวัน จำนวนรอบเครื่องหนึ่งต่อวันความจุสูงสุดของเครื่อง จำนวนชุดเครื่องมือที่ผ่านกระบวนการในแต่ละรอบ จำนวนเครื่องมือในแต่ละชุดชนิดและน้ำหนักของระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อ เหตุการณ์ที่ทำให้เกิดการทำให้ซ้ำ เช่น ห่อขึ้น ห่อฉีก การปนเปื้อน หลังบรรจุ การคืนชุดไม่ครบ และรอบลูกเงินที่จำเป็นต้องเดินเครื่องโดยใช้ความจุไม่เต็มรอบ ข้อมูลเหล่านี้ถูกกำหนดให้เป็นข้อมูลขั้นต่ำที่จำเป็นต่อการคำนวณและการติดตามคุณภาพโดยยังคงลดภาระการบันทึกของบุคลากรให้มากที่สุด

การคำนวณคาร์บอนต่อรอบเครื่องใช้หลักการนำข้อมูลกิจกรรมคูณกับปัจจัยการปล่อยของทรัพยากรแต่ละชนิด ได้แก่ ไฟฟ้า น้ำ เชื้อเพลิงหรือพลังงานที่ใช้ผลิตไอน้ำ และสารเคมีในกรณีที่มีข้อมูลพร้อม ค่าคาร์บอนต่อรอบเครื่องล้างและเครื่องหนึ่งถูกใช้เป็นค่าตั้งต้นสำหรับการจัดสรรต่อไปยังชุดเครื่องมือ โดยนำคาร์บอนต่อรอบหารด้วยจำนวนชุดที่ผ่านกระบวนการจริงในรอบนั้น จากนั้นนำคาร์บอนต่อชุดหารด้วยจำนวนเครื่องมือในชุด เพื่อคำนวณคาร์บอนต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้น เมื่อเชื่อมโยงกับข้อมูลการใช้ชุดเครื่องมือในห้องผ่าตัด จึงสามารถคำนวณคาร์บอนต่อเซลล์ผ่าตัดได้จากผลรวมของคาร์บอนของชุดเครื่องมือหลัก ชุดเสริม และรายการบรรจุแยกชิ้นที่ถูกเปิดใช้จริง กรณีที่งานมีความผันแปร เช่น จำนวนชุดต่อรอบยังไม่เต็มความจุของเครื่อง หรือมีความจำเป็นต้องเปิดรอบลูกเงิน กรอบนี้เสนอให้บันทึกสถานะของรอบเครื่องแยกจากรอบปกติ เพื่อป้องกันการตีความว่าคาร์บอนต่อชุดที่สูงขึ้นเกิดจากความไม่มีประสิทธิภาพเพียงอย่างเดียว การตัดสินใจว่าจะรอให้จำนวนชุดครบก่อนเริ่มหนึ่งหรือเริ่มหนึ่งทันที ควรพิจารณาร่วมกันระหว่างความพร้อมของเครื่องมือ ความเร่งด่วนของการใช้งาน ความปลอดภัยของผู้ป่วย ตารางผ่าตัด และข้อกำหนดทางเทคนิคของเครื่องหนึ่งไม่ควรเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความจุของเครื่องโดยแลกกับความล่าช้าที่กระทบต่อการรักษา หรือเพิ่มความเสี่ยงต่อคุณภาพของเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อ ในแต่ละขั้นตอนของกรอบการคำนวณกำหนดให้มีจุดควบคุมคุณภาพควบคู่กัน ได้แก่ การตรวจสอบความครบถ้วนของฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ การตรวจสอบความถูกต้องของจำนวนรอบเครื่องและจำนวนชุด การยืนยันแหล่งที่มาของปัจจัยการปล่อย การทวนสอบความสอดคล้องของหน่วยวัด การบันทึกเหตุการณ์ซ้ำ และการทบทวนผลลัพธ์ที่ผิดปกติ เช่น คาร์บอนต่อชุดสูงกว่าค่าปกติอย่างมาก จุดควบคุมเหล่านี้ช่วยให้การลดคาร์บอนดำเนินไปโดยไม่ลดทอนความปลอดภัยของผู้ป่วย มาตรฐานการควบคุมการติดเชื้อ หรือความปลอดภัยของบุคลากร

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า

kgCO₂e เป็นหน่วยวัดที่ใช้แสดงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า โดยคำว่า kg หมายถึงกิโลกรัม CO₂ หมายถึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ e หมายถึงค่าเทียบเท่า เมื่อรวมกันแล้ว kgCO₂e จึงหมายถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดที่ถูกแปลงให้มีผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนเทียบเท่ากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วยกิโลกรัม ในทางวิชาการ หน่วย kgCO₂e ถูกใช้เพื่อรวมผลกระทบจากก๊าซเรือนกระจกหลายชนิดให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน แม้ว่าก๊าซแต่ละชนิดจะมีศักยภาพในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนไม่เท่ากันก็ตาม การแปลงดังกล่าวอาศัยค่าอ้างอิงที่เรียกว่า ศักยภาพก่อภาวะโลกร้อน หรือ Global Warming Potential ซึ่งกำหนดในช่วงเวลาอ้างอิงมาตรฐาน เช่น 100 ปี เพื่อสะท้อนผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศในระยะยาว ตัวอย่างเช่น ก๊าซมีเทนมีศักยภาพก่อภาวะโลกร้อนสูงกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์หลายเท่า แม้การปล่อยมีเทนจะมีปริมาณน้อย แต่ผลกระทบต่อภาวะโลกร้อนอาจเทียบเท่ากับการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่มากกว่า เมื่อนำผลกระทบของก๊าซชนิดต่าง ๆ มาแปลงให้อยู่ในหน่วยเดียวกัน ผลลัพธ์จะถูกรายงานในรูปของ kgCO₂e ทำให้สามารถเปรียบเทียบและประเมินผลได้อย่างเป็นระบบ⁹

ในบริบทของงานจ่ายกลางและกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ การรายงานผลการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในหน่วย kgCO₂e ช่วยให้เราสามารถรวมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากแหล่งต่าง ๆ เช่น การใช้ไฟฟ้า การใช้ไอน้ำ การผลิตไอน้ำ การใช้เชื้อเพลิง และการจัดการของเสีย ไว้ในตัวเลขเดียวที่เข้าใจง่ายและเปรียบเทียบได้ นอกจากนี้ยังเอื้อให้เราสามารถเปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมระหว่างชุดเครื่องมือ เครื่องมือรายชิ้น หรือเซลล์ผ่าตัดได้อย่างเป็นมาตรฐาน และนำไปใช้เป็นตัวชี้วัดเชิงระบบสำหรับการบริหารคุณภาพ ความปลอดภัย และความยั่งยืนของโรงพยาบาลได้อย่างเหมาะสม กล่าวโดยสรุป kgCO₂e ทำหน้าที่เป็นภาษากลางทางวิชาการที่ช่วยให้ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการทำงานในระบบสุขภาพสามารถถูกวัด วิเคราะห์ เปรียบเทียบ และนำไปใช้ประกอบการตัดสินใจเชิงบริหารได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีความหมาย โดยยังคงสอดคล้องกับมาตรฐานสากลด้านการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก^{4,5,9}

กรอบการออกแบบการคำนวณแบบรายขั้นตอนในหน่วยจ่ายกลาง

แนวทางนี้ออกแบบตามหลักแนวทางการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ที่เริ่มต้นจากกระบวนการทำงานจริง ที่ละขั้นตอน (process based carbon accounting) เพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถใช้ข้อมูลที่มีอยู่แล้วในงานประจำ โดยแบ่งเป็น 7 ขั้นตอนที่ทำซ้ำได้และขยายผลได้⁹

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขอบเขตและหน่วยงานรวมถึงหน้าที่ให้สื่อสารได้

การคำนวณควรเริ่มจากการกำหนดขอบเขตระบบให้ชัดเจน โดยรวมเฉพาะกิจกรรมที่หน่วยจ่ายกลางสามารถควบคุมและปรับปรุงได้จริง ได้แก่ การล้างด้วยเครื่องล้างอัตโนมัติ การทำให้ปราศจากเชื้อด้วยไอน้ำ การทำให้แห้ง การบรรจุด้วยระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อ (sterile barrier system: SBS) การขนย้ายภายใน และการจัดการของเสียจากวัสดุบรรจุภัณฑ์ ส่วนกิจกรรมที่ไม่เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจเชิงปฏิบัติการประจำวัน เช่น การผลิตเครื่องมือแพทย์ตั้งแต่ต้นทาง การก่อสร้างอาคาร และระบบสาธารณูปโภคอาคาร ควรกำหนดให้อยู่นอกขอบเขตการประเมินในระยะเริ่มต้น โดยระบบควรกำหนดให้เริ่มตั้งแต่เครื่องมือปนเปื้อนเข้าสู่กระบวนการของหน่วยจ่ายกลาง และสิ้นสุดเมื่อเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อผ่านการตรวจปล่อยและพร้อมส่งมอบให้หน่วยงานผู้ใช้ การกำหนดขอบเขตควรเริ่มจากข้อมูลที่เก็บได้จริงในงานประจำ และสามารถขยายรายละเอียดเพิ่มเติมได้เมื่อระบบข้อมูลมีความพร้อม⁹

หน่วยงานที่สำหรับการรายงานผลควรกำหนดให้สื่อสารได้ทั้งระดับหน่วยงาน ระดับห้องผ่าตัด และระดับผู้บริหาร โดยใช้ 3 ระดับ ได้แก่ kgCO₂e ต่อชุดเครื่องมือ kgCO₂e ต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้น และ kgCO₂e ต่อเคสผ่าตัด หน่วยต่อชุดเหมาะสำหรับติดตามประสิทธิภาพของรอบเครื่อง หน่วยต่อชิ้นเหมาะสำหรับการออกแบบชุดเครื่องมือ ส่วนหน่วยต่อเคสผ่าตัดเหมาะสำหรับสื่อสารผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมกับทีมคลินิกและผู้บริหาร^{9,15-17}

เพื่อให้ผลการคำนวณมีความน่าเชื่อถือ ควรกำหนดนิยามของชุดเครื่องมือ เครื่องมือหนึ่งชิ้น รอบเครื่องล้าง รอบเครื่องนึ่ง และเคสผ่าตัดให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งหน่วยงาน รวมถึงจัดทำแผนผังระบบที่ระบุจุดเก็บข้อมูลหลัก ได้แก่ จุดรับเครื่องมือปนเปื้อน รอบเครื่องล้าง รอบเครื่องนึ่ง จุดบรรจุ จุดตรวจปล่อย และจุดส่งมอบเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อ นอกจากนี้ ควรกำหนดวิธีควบคุมคุณภาพข้อมูลตั้งแต่ขั้นตอนแรก เช่น การตรวจสอบจำนวนรอบเครื่อง จำนวนชุดต่อรอบ ความครบถ้วนของข้อมูล และการแยกรอบพิเศษหรือรอบฉุกเฉินออกจากรอบปกติ เพื่อให้การตีความผลไม่คลาดเคลื่อนในกรณีที่ไหลดเครื่องไม่เต็มความแรงควมของงาน หรือความผันแปรของปริมาณงานประจำวัน โดยสรุป ขั้นตอนนี้เป็นฐานสำคัญของการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในหน่วยจ่ายกลาง เพราะช่วยให้การเก็บข้อมูล การคำนวณ และการนำผลไปใช้ปรับปรุงระบบงานมีความชัดเจนเป็นมาตรฐาน และสอดคล้องกับบริบทการปฏิบัติงานจริงของโรงพยาบาลไทย⁹

ขั้นตอนที่ 2 การจัดทำฐานข้อมูลชุดเครื่องมือและการนิยามโครงสร้างงานให้พร้อมต่อการคำนวณ

ภายหลังการกำหนดขอบเขตระบบและหน่วยหน้าที่หน่วยจ่ายกลางควรจัดทำฐานข้อมูลชุดเครื่องมือให้เป็นมาตรฐานเดียวกันทั้งหน่วยงาน เพื่อใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นในการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ฐานข้อมูลควรครอบคลุมชุดเครื่องมือที่ใช้จริง ได้แก่ ชุดมาตรฐาน ชุดเฉพาะทาง ชุดย่อย และรายการห่อเดี่ยว เนื่องจากแต่ละรายการอาจมีจำนวนเครื่องมือ วิธีบรรจุ และเส้นทางการทำความสะอาดและทำให้ปราศจากเชื้อแตกต่างกัน โครงสร้างข้อมูลขั้นต่ำควรประกอบด้วยรหัสชุด ชื่อชุด หน่วยงานผู้ใช้งาน จำนวนเครื่องมือในชุด ชนิดของระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อ (sterile barrier system: SBS) และเส้นทางการขนถ่ายของแต่ละชุด เช่น การล้างด้วยเครื่องล้างอัตโนมัติ การล้างด้วยมือก่อนเข้าเครื่อง การใช้ถาดเฉพาะ หรือการใช้อุปกรณ์เสริม ข้อมูลเหล่านี้ช่วยให้การจัดสรรคาร์บอนจากระดับรอบเครื่องไปสู่ระดับชุดและระดับเครื่องมือหนึ่งชิ้นมีความถูกต้องมากขึ้น เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อน ควรกำหนดนิยามและกติกาก่อนนับให้ชัดเจน เช่น ความหมายของชุดเครื่องมือ รายการที่ไม่นับรวม เช่น วัสดุสิ้นเปลืองหรือของใช้ครั้งเดียว และวิธีการจัดการกรณีมีการเพิ่มหรือลดเครื่องมือชั่วคราว นอกจากนี้ควรกำหนดกระบวนการควบคุมคุณภาพข้อมูล เช่น การตรวจสอบความครบถ้วนของรายการเครื่องมือ การทวนสอบรหัสชุด การตรวจสอบชนิดบรรจุภัณฑ์ และการปรับปรุงฐานข้อมูลเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรายการเครื่องมือหรือแนวปฏิบัติของหน่วยงาน^{5,8-9}

ในระยะเริ่มต้น ฐานข้อมูลไม่จำเป็นต้องครอบคลุมทุกชุดเครื่องมือทั้งหมด แต่ควรเริ่มจากชุดที่มีปริมาณการใช้งานสูงหรือมีผลกระทบต่อภาระงานของหน่วยจ่ายกลางมากที่สุดก่อน เพื่อให้เห็นประโยชน์เชิงบริหารอย่างชัดเจน จากนั้นจึงขยายไปยังชุดเฉพาะทาง ชุดใช้น้อย และรายการห่อเดี่ยวเมื่อระบบข้อมูลมีความพร้อม ตัวอย่างเช่น หน่วยจ่ายกลางอาจเริ่มจากชุดผ่าตัดทั่วไป รหัส GS-01 ซึ่งใช้ในห้องผ่าตัดศัลยกรรมทั่วไป ประกอบด้วยเครื่องมือโลหะ 29 ชิ้น ใช้ผ้าห่อสองชั้นแบบใช้ครั้งเดียว ผ่านการล้างด้วยเครื่องล้างอัตโนมัติ และผ่านการทำให้ปราศจากเชื้อด้วยไอน้ำ ข้อมูลชุดนี้สามารถใช้เป็นตัวแปรตั้งต้นในการคำนวณคาร์บอนต่อชุด คาร์บอนต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้น และคาร์บอนต่อเคสผ่าตัดที่ใช้ชุดดังกล่าว โดยสรุป ขั้นตอนนี้เป็นกรสร้างฐานข้อมูลกลางของหน่วยจ่ายกลาง เพื่อให้การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์มีความถูกต้อง ตรวจสอบได้ และเชื่อมโยงกับการพัฒนาคุณภาพ ความปลอดภัยในการทำงาน และความยั่งยืนของระบบงานปราศจากเชื้อได้อย่างเป็นรูปธรรม

ขั้นตอนที่ 3 การออกแบบการเก็บข้อมูลกิจกรรมรายวัน และตัวชี้วัดประสิทธิภาพการโหลดเครื่องให้พร้อมต่อการจัดสรรคาร์บอน

เมื่อมีขอบเขต หน่วยหน้าที่ และฐานข้อมูลชุดเครื่องมือที่เป็นมาตรฐานแล้ว ขั้นตอนถัดมาคือการออกแบบระบบเก็บข้อมูลกิจกรรมที่สะท้อนการปฏิบัติงานจริงของหน่วยจ่ายกลาง โดยมุ่งให้ได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการจัดสรรคาร์บอนจากระดับรอบเครื่องไปสู่ระดับชุดและรายชิ้น ขณะเดียวกันต้องลดภาระการบันทึกให้ทำได้ต่อเนื่องอย่างน้อยหนึ่งเดือนโดยไม่ลดคุณภาพข้อมูล หลักการจึงอยู่ที่การเลือกตัวแปรขึ้นต่ำที่อธิบายผลลัพธ์ได้มากที่สุด โดยเฉพาะจำนวนรอบเครื่องและประสิทธิภาพการโหลด ซึ่งเป็นตัวกำหนดคาร์บอนต่อหน่วยผลผลิตโดยตรงเชิงโครงสร้าง การเก็บข้อมูลควรแบ่งเป็นสามชุดข้อมูลที่เชื่อมโยงกันได้แก่ ข้อมูลรอบเครื่องล่าง ข้อมูลรอบเครื่องนั่ง และข้อมูลการบรรจุ โดยเน้นการบันทึกแบบรายวันเพื่อสะท้อนความแปรผันตามตารางผ่าตัดและเหตุการณ์ฉุกเฉิน สำหรับเครื่องล่างและเครื่องนั่ง ข้อมูลขึ้นต่ำที่ควรบันทึกคือจำนวนรอบต่อวัน ความจุสูงสุดต่อรอบ ปริมาณการใช้จริง และจำนวนชุดที่ผ่านกระบวนการในวันนั้น พร้อมทั้งแยกรอบพิเศษที่มีข้อจำกัดด้านการจัดวางหรือวัสดุ เพื่อป้องกันการตีความประสิทธิภาพที่อาจคลาดเคลื่อน นอกจากนั้นควรบันทึกเหตุการณ์ที่ทำให้เกิดการทำให้ชำหรือเพิ่มรอบเครื่องในรูปแบบที่ง่าย เช่น ทำเครื่องหมายที่ชัดเจนหรือใส่จำนวนครั้ง ได้แก่ การนั่งซ้ำจากความขึ้นหรือการปนเปื้อน การคืนชุดเพราะไม่ครบ และรอบฉุกเฉิน เหตุการณ์เหล่านี้เป็นตัวแทนของคุณภาพกระบวนการและมีผลต่อคาร์บอนโดยตรงผ่านการเพิ่มรอบเครื่องและภาระงานบุคลากร นอกจากนี้ควรกำหนดตัวชี้วัดการโหลดของเครื่องอย่างน้อยสองตัว ได้แก่ สัดส่วนการใช้ความจุจริงต่อความจุสูงสุด และจำนวนชุดเฉลี่ยต่อรอบ เพื่อใช้ทั้งเป็นตัวแปรคำนวณและตัวชี้วัดบริหารร่วมกับมิติความปลอดภัยในการทำงาน^{4,5}

ตัวอย่างการบันทึกหนึ่งวัน เครื่องล่างทำงาน 10 รอบ ความจุ 12 ช่อง ใช้จริงเฉลี่ย 8 ช่อง ล้างได้ 80 ชุด ขณะเดียวกันเครื่องนั่งทำงาน 8 รอบ ความจุ 18 ช่อง ใช้จริงเฉลี่ย 12 ช่อง นั่งได้ 72 ชุด ข้อมูลนี้สะท้อนการใช้ความจุประมาณสองในสามของศักยภาพ ซึ่งเป็นช่องว่างที่สามารถนำไปวางแผนมาตรการเพิ่มประสิทธิภาพการโหลด ลดจำนวนรอบ และลดคาร์บอนต่อชุดได้ การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้เครื่องจักรเพื่อการลดคาร์บอนจำเป็นต้องดำเนินภายใต้ข้อจำกัดทางเทคนิคและมาตรฐานคุณภาพอย่างเคร่งครัด โดยเฉพาะหลักการจัดวางโหลดที่คงความสามารถในการแทรกซึมของไอน้ำ การไหลเวียนของไอน้ำและการระบายอากาศภายในห้องนั่ง รวมถึงการควบคุมสภาวะที่ป้องกันการเกิดความชื้นตกค้างซึ่งอาจกระทบต่อความสมบูรณ์ของบรรจุภัณฑ์และความคงสภาพความปราศจากเชื้อ เพื่อให้การคำนวณคาร์บอนทำได้ ตรวจสอบได้ และเชื่อมโยงเข้ากับการบริหารคุณภาพและความปลอดภัยในการทำงานของหน่วยจ่ายกลางได้ในตัวเดียวกัน⁵

ขั้นตอนที่ 4 การกำหนดข้อมูลการใช้ทรัพยากรต่อรอบเครื่องและค่าปัจจัยการปล่อย เพื่อคำนวณคาร์บอนต่อรอบอย่างตรวจสอบได้

เมื่อหน่วยงานมีข้อมูลกิจกรรมรายวันและตัวชี้วัดการโหลดเครื่องแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการคำนวณคาร์บอนต่อรอบเครื่องอย่างเป็นระบบโดยใช้หลักการผลรวมของกิจกรรมการใช้ทรัพยากรคูณด้วยค่าปัจจัยการปล่อยของทรัพยากรนั้น คาร์บอนต่อรอบถือเป็นค่าตั้งต้นของการจัดสรรไปสู่ระดับชุด เครื่องมือและเคสผ่าตัด ดังนั้นความถูกต้องและความโปร่งใสของขั้นตอนนี้เป็นเงื่อนไขสำคัญต่อความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์และการนำไปใช้เชิงบริหาร โดยการกำหนดองค์ประกอบทรัพยากรต้องสอดคล้องกับระบบจริงของโรงพยาบาล โดยเครื่องล่างอัตโนมัติ มักมีไฟฟ้าและน้ำเป็นทรัพยากรหลัก และอาจรวมสารเคมีเมื่อมีข้อมูลพร้อม ขณะที่เครื่องนั่งไอน้ำมีพลังงานเพื่อผลิตไอน้ำเป็นแกนหลัก ซึ่งอาจมาจากหม้อไอน้ำกลางหรือระบบผลิตไอน้ำเฉพาะเครื่อง และมีไฟฟ้าสำหรับระบบควบคุมและปั๊มประกอบ การรวบรวมข้อมูลการใช้ทรัพยากรต่อรอบควรเริ่มจากคู่มือเครื่อง เอกสารทางเทคนิคผู้ผลิต หรือข้อมูลจากฝ่ายวิศวกรรม และหากเป็นไปได้ให้ตรวจสอบภาคสนามเป็นระยะเพื่อยืนยันความสอดคล้องกับสภาพการใช้งานจริง การเลือกค่าปัจจัยการปล่อยควรใช้ค่าที่หน่วยงานรับรองหรือใช้ในการรายงานด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อให้เปรียบเทียบได้ในระยะยาว โดยต้องระบุชนิดเชื้อเพลิงหรือแหล่งไอน้ำอย่างชัดเจน เนื่องจากมีผลต่อค่าคาร์บอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยสมการคำนวณควรถูกเขียนให้เรียบง่ายแต่ครอบคลุมองค์ประกอบ และแยกสำหรับเครื่องล่างและเครื่องนั่งเพื่อสะท้อนการใช้ทรัพยากรที่แตกต่างกัน โดยกำหนดหน่วยของทุกตัวแปรเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนจากการแปลงหน่วย ควบคู่กับมาตรฐานการจัดการคุณภาพข้อมูล เช่น การบันทึกแหล่งที่มาตัวเลข เวอร์ชันของค่าปัจจัยการปล่อย และการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ โดยเฉพาะกรณีที่ค่าคาร์บอนต่อรอบเปลี่ยนแปลงผิดปกติ ซึ่งอาจเกิดจากการเปลี่ยนโปรแกรมเครื่อง ชนิดโหลด หรือแหล่งพลังงาน รวมถึงความคลาดเคลื่อนของการบันทึก⁹

ตัวอย่างการคำนวณเครื่องล่าง สามารถเริ่มจากข้อมูลที่เข้าถึงได้ง่าย เช่น เครื่องล่างใช้ไฟฟ้า 6 kWh ต่อรอบ และค่าปัจจัยการปล่อยไฟฟ้า 0.50 kgCO₂e ต่อ kWh จะได้คาร์บอนจากไฟฟ้า 3.00 kgCO₂e ต่อรอบ หากใช้น้ำ 60 ลิตรต่อรอบ และค่าปัจจัยการปล่อยของน้ำ 0.0005 kgCO₂e ต่อลิตร จะได้คาร์บอนจากน้ำ 0.03 kgCO₂e ต่อรอบ รวมขึ้นต่ำเป็น 3.03 kgCO₂e ต่อรอบ สำหรับเครื่องนั่ง หากประเมินคาร์บอนรวมต่อรอบได้ 12.0 kgCO₂e จากพลังงานผลิตไอน้ำและไฟฟ้าประกอบ สามารถใช้เป็นค่าฐานสำหรับการจัดสรรคาร์บอนต่อชุดในขั้นตอนถัดไปได้ทันที โดยเฉพาะในระยะเริ่มต้นที่ยังไม่มีข้อมูลไอน้ำแยกรายละเอียด นอกจากความถูกต้องเชิงคำนวณ ขั้นตอนนี้ยังเชื่อมโยงกับคุณภาพและความปลอดภัยในการทำงานโดยตรง เพราะจำนวนรอบเครื่องที่เพิ่มขึ้นจากการ

ไหลลดต่ำหรือการทำซ้ำย่อมเพิ่มการใช้พลังงาน เพิ่มความร้อน ใอน้ำ และการสัมผัสสารเคมีในพื้นที่ปฏิบัติงาน การทำให้คาร์บอน ต่อรอบเป็นภาษากลางเดียวกับจำนวนรอบเครื่องจึงเอื้อต่อการ กำหนดมาตรการที่ลดทั้งคาร์บอนและความเสี่ยงของบุคลากร ไปพร้อมกัน โดยสรุป ขั้นตอนที่ 4 คือการสร้างค่าคาร์บอน

ขั้นตอนที่ 5 การจัดสรรคาร์บอนจากระดับรอบเครื่องสู่ ระดับชุดเครื่องมือและเครื่องมือรายชิ้นอย่างเป็นระบบ

เมื่อได้ค่าคาร์บอนต่อรอบเครื่องแล้ว ขั้นตอนสำคัญคือ การจัดสรรคาร์บอนดังกล่าวไปยังหน่วยหน้าที่ใช้ตัดสินใจ จริง ได้แก่ คาร์บอนต่อชุดเครื่องมือและคาร์บอนต่อเครื่องมือ รายชิ้น หลักคิดพื้นฐานคือคาร์บอนต่อรอบเครื่องมีลักษณะกึ่ง คงที่ในสภาวะปกติ ดังนั้นคาร์บอนต่อหน่วยผลผลิตจึงขึ้นกับ จำนวนชุดที่แบ่งปันคาร์บอนของรอบนั้นเป็นหลัก การจัดสรรควรอิงจำนวนชุดในรอบเดียวกัน ไม่ใช่น้ำหนักหรือมูลค่าเครื่องมือ เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานจริงของหน่วยจ่ายกลาง และ

ต่อรอบเครื่องด้วยสมการที่ตรวจสอบได้และสอดคล้องกับระบบ พลังงานจริงของโรงพยาบาล เพื่อให้การจัดสรรคาร์บอนใน ขั้นตอนถัดไปมีความถูกต้อง และทำให้ผลลัพธ์สามารถใช้ สนับสนุนการบริหารคุณภาพและความปลอดภัยของหน่วยจ่าย กลาง ได้อย่างเป็นรูปธรรม^{4-5,9}

ชี้ให้เห็นประเภทงานที่ปรับปรุงได้ เชิงปฏิบัติให้คำนวณแยก ตามกระบวนการอย่างน้อยสองส่วน คือการล้างและการนึ่ง โดยนำคาร์บอนต่อรอบของแต่ละเครื่องหารด้วยจำนวนชุดที่ ผ่านกระบวนการในรอบเดียวกัน แล้วรวมเป็นคาร์บอนจาก กระบวนการต่อชุด จากนั้นแปลงเป็นคาร์บอนต่อเครื่องมือ โดยนำคาร์บอนต่อชุดหารด้วยจำนวนเครื่องมือในชุดตามฐาน ข้อมูลมาตรฐาน การจัดสรรในรูปแบบนี้ทำให้ผลของการไหลลด เครื่องปรากฏชัด หากไหลลดต่ำ คาร์บอนต่อชุดจะสูงขึ้นทันที แม้คาร์บอนต่อรอบจะเท่าเดิม^{4-5,9}

ตัวอย่าง

เครื่องล้างปล่อย 3.03 kgCO₂e ต่อรอบ และรอบนั้นล้าง 10 ชุด จะได้ 0.303 kgCO₂e ต่อชุด
เครื่องนึ่งปล่อย 12.0 kgCO₂e ต่อรอบ และรอบนั้นนึ่ง 12 ชุด จะได้ 1.00 kgCO₂e ต่อชุด
ดังนั้นคาร์บอนจากกระบวนการต่อชุดเท่ากับ 1.303 kgCO₂e ต่อชุด
หากชุดมาตรฐานมี 29 เครื่องมือ คาร์บอนต่อเครื่องมือเท่ากับ 1.303 หาร 29 ได้ประมาณ
0.045 kgCO₂e ต่อชิ้น หรือ 45 gCO₂e ต่อชิ้น
หากรอบหนึ่งเดียวกันมีเพียง 6 ชุด คาร์บอนจากการนึ่งต่อชุดจะเพิ่มเป็น 2.0 kgCO₂e ต่อชุด
สะท้อนผลของการไหลลดต่ำอย่างตรงไปตรงมา

เพื่อให้ข้อมูลเทียบเคียงได้ ควรกำหนดคติดิามาตรฐานของ การนับ เช่น นับเฉพาะชุดที่ผ่านกระบวนการครบถ้วนในรอบนั้น และใช้จำนวนเครื่องมือตามชุดการใช้งานหลัก (master set list) โดยไม่เปลี่ยนตามการเพิ่มลดชั่วคราว พร้อมทั้งแยกกรณีรอบ พิเศษหรือรอบฉุกเฉินที่มีข้อจำกัดด้านการจัดวางหรือความเร่งด่วน เพื่อป้องกันการตีความว่าคาร์บอนสูงเท่ากับไร้ประสิทธิภาพ โดยอัตโนมัติ นอกจากนี้ การจัดสรรคาร์บอนยังเชื่อมกับความ ปลอดภัยในการทำงาน เพราะการเพิ่มจำนวนรอบเครื่องจาก

ขั้นตอนที่ 6 การคำนวณคาร์บอนจากระบบบรรจุภัณฑ์ ปลอดภัยและการจัดการของเสียเพื่อให้คาร์บอนต่อชุด สะท้อนความจริงทั้งกระบวนการ

ภายหลังจัดสรรคาร์บอนจากระดับรอบเครื่องสู่ระดับชุดและ รายชิ้นแล้ว ขั้นตอนต่อมาคือการรวมองค์ประกอบที่มีนัยสำคัญ ต่อคาร์บอนรวมแต่ถูกมองข้ามบ่อย ได้แก่ ระบบบรรจุภัณฑ์ ปลอดภัยและการจัดการของเสีย การรวมส่วนนี้ทำให้คาร์บอน

การไหลลดต่ำหรือการทำซ้ำย่อมเพิ่มภาระยกของ การจัดวาง และ การสัมผัสความร้อน ใอน้ำ และสารเคมี ดังนั้นคาร์บอนต่อชุด ควรถูกใช้ร่วมกับตัวชี้วัดจำนวนรอบเครื่อง เพื่อบริหารจัดการที่ ลดทั้งคาร์บอนและความเสี่ยงของบุคลากรไปพร้อมกัน โดยสรุป ขั้นตอนนี้คือสะพานที่ทำให้คาร์บอนต่อรอบกลายเป็นตัวชี้วัดเชิง บริหารในระดับชุดและรายชิ้นที่นำไปใช้ปรับปรุงระบบงานได้จริง

ต่อชุดสะท้อนกระบวนการครบวงจรในระดับหน่วยงาน และทำให้ เห็นปัจจัยหรือจุดแทรกแซงในระบบที่แม้มีการเปลี่ยนแปลง เพียงเล็กน้อยที่ไม่ได้อยู่ที่เครื่องจักรโดยตรง แต่เป็นการตัดสินใจด้านวัสดุ วิธีบรรจุ และการคัดแยกของเสียซึ่ง หน่วยจ่ายกลาง สามารถปรับปรุงได้จริง โดยแกนแนวคิดคือคาร์บอนของบรรจุ ภัณฑ์ต้องพิจารณาทั้งตัววัสดุและเส้นทางปลายทาง เนื่องจาก วัสดุชนิดเดียวกันอาจให้คาร์บอนต่างกันตามการกำจัด เช่น

เผาขยะติดเชื้อ รีไซเคิล หรือระบบกู้คืนพลังงาน ในบริบทไทย ที่มีข้อจำกัดด้านการควบคุมการติดเชื้อเข้มงวด การออกแบบต้องเริ่มจากการแยกข้อมูลของเสียให้ถูกต้องและชัดเจนก่อน แล้วจึงประเมินตามเส้นทางที่ปฏิบัติจริงของโรงพยาบาล^{5,8}

เชิงวิธีคำนวณ ควรจำแนกบรรจุภัณฑ์เป็นแบบใช้ครั้งเดียว และแบบใช้ซ้ำ เพราะตรรกะต่างกันโดยพื้นฐาน แบบใช้ครั้งเดียว คำนวณได้ตรงไปตรงมาด้วยมวลวัสดุต่อชุดคูณค่าปัจจัยการ

ปล่อยที่ครอบคลุมการผลิตและการกำจัด ส่วนแบบใช้ซ้ำต้องเฉลี่ยผลกระทบตลอดอายุการใช้งาน โดยกระจายคาร์บอนจากการผลิตตามจำนวนครั้งใช้งานจริง และบวกภาระจากการล้างต่อครั้ง รวมถึงการกำจัดเมื่อหมดอายุในรูปค่าเฉลี่ยต่อครั้ง ทั้งนี้ควรตั้งสมมติฐานแบบอนุรักษ์นิยมเมื่อข้อมูลยังไม่สมบูรณ์ เพื่อหลีกเลี่ยงการประเมินต่ำกว่าความเป็นจริง^{5,8}

ตัวอย่างแบบใช้ครั้งเดียว

ผ้าห่อสองชั้นน้ำหนักเฉลี่ย 0.12 kg ต่อชุด และค่าปัจจัยการปล่อยรวมผลิต และกำจัด 2.0 kgCO₂e ต่อ kg
คาร์บอนบรรจุภัณฑ์ต่อชุดเท่ากับ 0.12 คูณ 2.0 ได้ 0.24 kgCO₂e ต่อชุด
หากคาร์บอนจากการล้างและนึ่งในขั้นตอนที่ 5 เท่ากับ 1.30 kgCO₂e ต่อชุด
คาร์บอนรวมต่อชุดเท่ากับ 1.54 kgCO₂e
เมื่อชุดมี 29 เครื่องมือ คาร์บอนเฉลี่ยต่อชิ้นเท่ากับ 1.54หาร 29
ได้ประมาณ 0.053 kgCO₂e ต่อชิ้น หรือ 53 gCO₂e ต่อชิ้น

การตีความผลลัพธ์ต้องเชื่อมกับคุณภาพและความปลอดภัยเสมอ เพราะระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อ (SBS) มีบทบาทหลักในการคงความปราศจากเชื้อจนถึงจุดใช้งาน การลดคาร์บอนที่เพิ่มความเสี่ยงต่อห่อฉีกขาด ความชื้นตกค้าง หรือการปนเปื้อนภายหลังการนึ่งถือว่าไม่เหมาะสม ดังนั้นควรบันทึกตัวชี้วัดคุณภาพควบคู่ เช่น อัตราห่อขึ้น อัตราห่อฉีก และการคืนชุดจากความ

ไม่สมบูรณ์ของบรรจุภัณฑ์ เช่นเดียวกับมิติความปลอดภัยของการคัดแยกของเสียที่ต้องลดความเสี่ยงต่อการสัมผัสของมีคมและการปนเปื้อนในบุคลากร โดยสรุป ขั้นตอนนี้ทำให้คาร์บอนต่อชุดเป็นตัวชี้วัดครบวงจรที่ตรวจสอบได้และใช้ตัดสินใจเชิงระบบได้จริง โดยคงความสมดุลระหว่างความยั่งยืน คุณภาพเวชภัณฑ์ปลอดภัย และความปลอดภัยในการทำงานของบุคลากร^{5,8}

ขั้นตอนที่ 7 การเชื่อมโยงคาร์บอนจากงานปราศจากเชื้อสู่ระดับหัตถการและการใช้ผลลัพธ์เพื่อการตัดสินใจเชิงคลินิกและเชิงนโยบาย

ขั้นตอนสุดท้ายคือการยกระดับผลการคำนวณจากระดับหน่วยสนับสนุนไปสู่ระดับหัตถการ เพื่อให้คาร์บอนฟุตพริ้นท์มีความหมายต่อระบบการดูแลผู้ป่วยและถูกใช้ประกอบการตัดสินใจด้านทรัพยากร คุณภาพ และความยั่งยืน หลักการสำคัญคือยึดการใช้งานจริงในห้องผ่าตัดเป็นฐาน โดยบันทึกว่าหนึ่งเคสใช้ชุดเครื่องมือใด จำนวนเท่าใด และมีการเปิดเพิ่ม

รายการบรรจุแยกชิ้นหรือไม่ ข้อมูลดังกล่าวมักดึงได้จากแบบฟอร์มเตรียมเคสหรือระบบบันทึกการใช้เวชภัณฑ์ที่มีอยู่เดิม หากออกแบบการเชื่อมโยงข้อมูลให้สอดคล้องกับเวิร์กโฟลว์เดิม นอกจากนั้นการคำนวณคาร์บอนต่อเคสดำเนินการโดยนำคาร์บอนรวมต่อชุดจากขั้นตอนที่ 6 คูณด้วยจำนวนชุดที่ใช้ในเคส และบวกคาร์บอนจากรายการที่เปิดเผย ผลลัพธ์ช่วยสะท้อนผลของการเตรียมความพร้อมและการตัดสินใจหน้างานของทีมนัดผ่าตัดในรูปตัวเลขเดียวที่สื่อสารได้ข้ามวิชาชีพ¹⁵⁻¹⁷

ตัวอย่าง

หากคาร์บอนรวมต่อชุดเท่ากับ 1.54 kgCO₂e และเคสหนึ่งใช้ชุดหลัก 1 ชุด พร้อมเปิดเพิ่มรายการแยกชิ้นรวม 0.30 kgCO₂e
คาร์บอนต่อเคสเท่ากับ 1.54 + 0.30 = 1.84 kgCO₂e

การแปลงสู่ระดับเคสทำให้เห็นรูปแบบเชิงระบบที่ระดับหน่วยงานไม่สามารถอธิบายได้ เช่น หัตถการใดมีคาร์บอนสูงจากการใช้หลายชุดหรือเปิดเพิ่มบ่อย เคสใดมีความแปรผันสูง

ระหว่างทีมผ่าตัด และแนวทางเตรียมเคสหรือการออกแบบชุดแบบใดที่ลดการเปิดเพิ่มได้โดยไม่กระทบความปลอดภัยผู้ป่วย ข้อมูลนี้จึงใช้สนับสนุนการปรับมาตรฐานชุดเครื่องมือ การฝึก

อบรม และการสื่อสารระหว่าง หน่วยจ่ายกลาง กับห้องผ่าตัด อย่างมีหลักฐาน นอกจากนั้นในเชิงคุณภาพ การตีความต้อง ตั้งอยู่บนหลักไม่ลดทอนความปลอดภัยและการควบคุมการ ติดเชื้อ เพราะบางสถานการณ์การเปิดเพิ่มหรือการมีชุดสำรอง อาจลดภาวะแทรกซ้อนและความสูญเสียในระยะยาวได้ ดังนั้น การใช้คาร์บอนต่อเคสควรพิจารณาควบคู่กับข้อมูลผลลัพธ์ทาง คลินิกเพื่อคงสมดุลระหว่างความยั่งยืนและคุณภาพการดูแล โดยสรุป ขั้นตอนนี้ทำให้คาร์บอนฟุตพริ้นท์จากงานปราศจาก เชื้อกลายเป็นตัวชี้วัดเชิงระบบที่ตรวจสอบได้และใช้กำหนด มาตรการได้จริง ทั้งในระดับคลินิกและระดับนโยบายของโรง พยาบาล พร้อมสร้างวงจรการพัฒนาอย่างต่อเนื่องด้วยการ เก็บข้อมูลซ้ำและประเมินผลหลังการปรับปรุง

จากหลักการดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนารอบแนวคิด การคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของชุดเครื่องมือปราศจากเชื้อ โดยแบ่งองค์ประกอบออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่ ปัจจัยนำเข้า กระบวนการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ ตัวชี้วัดผลลัพธ์ การตีความและการตัดสินใจ และผลลัพธ์เชิงระบบ ดังนี้

1. ปัจจัยนำเข้า (Input Factors) ปัจจัยนำเข้าเป็น ข้อมูลพื้นฐานที่ใช้สำหรับการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของชุด เครื่องมือปราศจากเชื้อ โดยครอบคลุมข้อมูลของชุดเครื่องมือ กิจกรรมการปฏิบัติงาน การใช้ทรัพยากร บรรจุภัณฑ์ และของเสีย ที่เกิดขึ้นในกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ

1.1 ฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ ประกอบด้วยข้อมูลจำแนกชุด เครื่องมือ ได้แก่

- รหัสชุดเครื่องมือ
- ชื่อชุดเครื่องมือ
- จำนวนเครื่องมือในแต่ละชุด
- ประเภทหรือกลุ่มของชุดเครื่องมือ
- หน่วยงานผู้ใช้
- ชนิดของบรรจุภัณฑ์ปราศจากเชื้อ

1.2 ข้อมูลกิจกรรมรายวันของหน่วยจ่ายกลาง ประกอบด้วย ข้อมูลการปฏิบัติงานที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละวัน ได้แก่

- จำนวนรอบเครื่องล้าง
- จำนวนรอบเครื่องนึ่ง
- จำนวนชุดเครื่องมือต่อรอบ
- ประเภทของรอบการทำงาน ได้แก่ รอบปกติ รอบฉุกเฉิน และรอบนิ่งซ้ำ

- อัตราการใช้ความจุของเครื่องล้างและเครื่องนึ่ง

1.3 ข้อมูลการใช้ทรัพยากร ประกอบด้วยทรัพยากรที่ใช้ใน กระบวนการล้าง ทำให้แห้ง บรรจุ และทำให้ปราศจากเชื้อ ได้แก่

- ไฟฟ้า
- น้ำ
- ไอน้ำ
- เชื้อเพลิง
- สารเคมี
- วัสดุสิ้นเปลือง

- ค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของทรัพยากรแต่ละ ประเภท

1.4 ข้อมูลบรรจุภัณฑ์และของเสีย ประกอบด้วยข้อมูลที่ เกี่ยวข้องกับวัสดุห่อหุ้มปราศจากเชื้อและของเสียที่เกิดขึ้น หลังการใช้งาน ได้แก่

- ระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อ
- ชนิดของวัสดุบรรจุภัณฑ์
- น้ำหนักของวัสดุ
- ปริมาณของเสีย
- ประเภทของของเสีย
- เส้นทางการจัดการของเสีย เช่น การฝังกลบ การเผา หรือการรีไซเคิล

2. กระบวนการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ (Process-Based Carbon Accounting) กระบวนการคำนวณ คาร์บอนฟุตพริ้นท์ใช้แนวทางการประเมินตามกระบวนการปฏิบัติ งานจริง โดยเชื่อมโยงข้อมูลกิจกรรมกับค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซ เรือนกระจก และจัดสรรคาร์บอนจากระดับรอบเครื่องสู่ระดับ ชุดเครื่องมือ รายชิ้น และระดับเคสผ่าตัด

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดขอบเขตการประเมินและหน่วย หน้าที่

กำหนดขอบเขตของการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ใน กระบวนการจัดการเครื่องมือปราศจากเชื้อ ตั้งแต่การล้าง การ บรรจุ การทำให้ปราศจากเชื้อ การจัดเก็บ การส่งมอบ และ การจัดการของเสีย โดยหน่วยหน้าที่ที่ใช้ในการประเมิน ได้แก่

- kgCO₂e ต่อรอบเครื่อง
- kgCO₂e ต่อชุดเครื่องมือ
- kgCO₂e ต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้น
- kgCO₂e ต่อเคสผ่าตัด

ขั้นตอนที่ 2 จัดทำฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ

รวบรวมและจัดระบบข้อมูลชุดเครื่องมือ เพื่อใช้เป็นฐานใน การเชื่อมโยงข้อมูลกิจกรรม ทรัพยากร และผลลัพธ์ด้านคาร์บอน

ขั้นตอนที่ 3 เก็บข้อมูลกิจกรรมรายวัน

บันทึกข้อมูลการปฏิบัติงานประจำวันของหน่วยจ่ายกลาง ได้แก่ จำนวนรอบเครื่องล้าง จำนวนรอบเครื่องนึ่ง จำนวนชุด เครื่องมือต่อรอบ และลักษณะของรอบการทำงาน

ขั้นตอนที่ 4 คำนวณคาร์บอนต่อรอบเครื่อง

คำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากทรัพยากร ที่ใช้ในแต่ละรอบของเครื่องล้างและเครื่องนึ่ง โดยใช้ข้อมูล กิจกรรมคูณกับค่าปัจจัยการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

หลักการคำนวณ

ปริมาณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ = ข้อมูลกิจกรรม × ค่าปัจจัย การปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ขั้นตอนที่ 5 จัดสรรคาร์บอนสู่ระดับชุดเครื่องมือและรายชิ้น

นำปริมาณคาร์บอนต่อรอบเครื่องมาจัดสรรให้กับชุดเครื่องมือแต่ละชุด โดยพิจารณาจากจำนวนชุดในรอบนั้น น้ำหนักเครื่องมือ ขนาดชุด หรือสัดส่วนการใช้ความจุของเครื่อง

ขั้นตอนที่ 6 รวมคาร์บอนจากบรรจุกัมมันต์และของเสีย

คำนวณคาร์บอนจากวัสดุห่อหุ้มปราศจากเชื้อ วัสดุสิ้นเปลือง และกระบวนการจัดการของเสีย แล้วรวมเข้ากับคาร์บอนจากกระบวนการล้างและทำให้ปราศจากเชื้อ

ขั้นตอนที่ 7 เชื่อมโยงผลลัพธ์สู่ระดับเคสผ่าตัด

นำค่าคาร์บอนของชุดเครื่องมือแต่ละชุดไปเชื่อมโยงกับประเภทของการผ่าตัดหรือหัตถการ เพื่อคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อเคสผ่าตัด

3. ตัวชี้วัดผลลัพธ์ (Output Indicators) ผลลัพธ์จากการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์สามารถแสดงได้หลายระดับ เพื่อใช้เปรียบเทียบ วิเคราะห์ และสนับสนุนการตัดสินใจเชิงระบบ

3.1 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อรอบเครื่อง ใช้ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องล้างและเครื่องึ่งในแต่ละรอบการทำงาน

3.2 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อชุดเครื่องมือ ใช้เปรียบเทียบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมระหว่างชุดเครื่องมือแต่ละประเภท

3.3 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้น ใช้วิเคราะห์ความเหมาะสมของจำนวนเครื่องมือในแต่ละชุด และใช้ประกอบการปรับปรุงรายการเครื่องมือ

3.4 คาร์บอนฟุตพริ้นท์ต่อเคสผ่าตัด ใช้เชื่อมโยงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมของกระบวนการทำให้เครื่องมือปราศจากเชื้อกับการให้บริการทางศัลยกรรม

4. การตีความผลและการตัดสินใจ (Interpretation and Decision-Making)

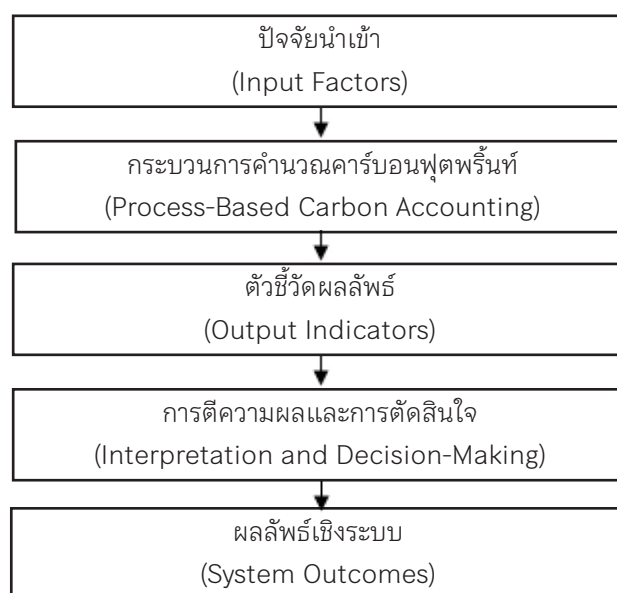
ผลลัพธ์จากการคำนวณสามารถ

นำไปใช้เพื่อสนับสนุนการบริหารจัดการหน่วยจ่ายกลาง ห้องผ่าตัด และระบบบริการสุขภาพ โดยเน้นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมควบคู่กับการคงมาตรฐานความปลอดภัยของผู้ป่วย โดยแนวทางการใช้ผลลัพธ์ ได้แก่

- เพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความจุของเครื่องล้างและเครื่องึ่ง
- ลดรอบหนึ่งซ้ำที่เกิดจากปัญหาคุณภาพ
- ปรับรายการเครื่องมือในชุดให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง
- เลือกระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อที่เหมาะสม
- ลดการใช้วัสดุสิ้นเปลืองที่ไม่จำเป็น
- ปรับปรุงการคัดแยกและการจัดการของเสีย
- สื่อสารข้อมูลคาร์บอนฟุตพริ้นท์ให้กับห้องผ่าตัด ผู้บริหาร และหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

5. ผลลัพธ์เชิงระบบ (System Outcomes) กรอบแนวคิดนี้มุ่งให้เกิดผลลัพธ์เชิงระบบที่สมดุลระหว่างสิ่งแวดล้อม คุณภาพ ความปลอดภัย และความยั่งยืนของโรงพยาบาล โดยผลลัพธ์ที่คาดหวัง ได้แก่

- ลดคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากกระบวนการจัดการเครื่องมือปราศจากเชื้อ
- คงคุณภาพของเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อ
- คงมาตรฐานการป้องกันและควบคุมการติดเชื้อ
- ลดความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยของบุคลากร
- สนับสนุนเป้าหมายด้านความยั่งยืนของโรงพยาบาล
- ส่งเสริมการใช้ข้อมูลเชิงประจักษ์ในการบริหารจัดการทรัพยากร
- โครงสร้างกรอบแนวคิดแบบย่อสำหรับใส่ในภาพประกอบบทความ



ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของชุดเครื่องมือปราศจากเชื้อ

ภาพที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของชุดเครื่องมือปราศจากเชื้อ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้า ได้แก่ ฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ ข้อมูลกิจกรรมรายวัน ข้อมูลการใช้ทรัพยากร และข้อมูลบรรจุภัณฑ์และของเสีย กับกระบวนการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ตามกิจกรรมจริงของหน่วยจ่ายกลาง เพื่อนำไปสู่ตัวชี้วัดผลลัพธ์ในระดับรอบเครื่องชุดเครื่องมือ เครื่องมือรายชิ้น และเศษผ้าตัด ผลลัพธ์ดังกล่าวสามารถใช้ในการตีความเชิงบริหาร การปรับปรุงกระบวนการ และการสนับสนุนเป้าหมายความยั่งยืนของโรงพยาบาล โดยยังคงไว้ซึ่งคุณภาพของเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อและมาตรฐานการควบคุมการติดเชื้อ โดยกรอบแนวคิดการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของชุดเครื่องมือปราศจากเชื้อ

อภิปรายผล (Discussion)

กรอบการออกแบบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อในหน่วยจ่ายกลางที่นำเสนอในบทความนี้ ช่วยเชื่อมข้อมูลการปฏิบัติงานประจำกับการตัดสินใจด้านคุณภาพ ความปลอดภัย และความยั่งยืนของโรงพยาบาลได้อย่างเป็นระบบ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า การคำนวณควรเริ่มจากระดับรอบเครื่อง แล้วจัดสรรคาร์บอนไปสู่ระดับชุดเครื่องมือ เครื่องมือรายชิ้น และเศษผ้าตัด วิธีดังกล่าวทำให้หน่วยงานสามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอบเครื่อง การใช้ทรัพยากร ประสิทธิภาพการใช้ความจุของเครื่อง และผลลัพธ์ด้านคาร์บอนได้ชัดเจนขึ้น^{1-5,9}

ประเด็นสำคัญประการแรก คือ การกำหนดขอบเขตและหน่วยหน้าที่มีผลโดยตรงต่อความน่าเชื่อถือของผลการคำนวณ หากขอบเขตไม่ชัดเจน ผลลัพธ์ที่ได้อาจเปรียบเทียบระหว่างช่วงเวลา ระหว่างชุดเครื่องมือ หรือระหว่างหน่วยงานได้ยาก กรอบนี้จึงกำหนดให้เริ่มตั้งแต่เครื่องมือปนเปื้อนเข้าสู่หน่วยจ่ายกลาง จนถึงเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อพร้อมใช้งาน และกำหนดตัวชี้วัด 3 ระดับ ได้แก่ 1) กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อชุดเครื่องมือ 2) กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้น และ 3) กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อเศษผ้าตัด ตัวชี้วัดทั้งสองระดับช่วยให้การสื่อสารระหว่างหน่วยจ่ายกลาง ห้องผ่าตัด และผู้บริหารมีความชัดเจนและใช้ประกอบการตัดสินใจได้จริง⁹

ประเด็นที่สอง คือ การใช้คาร์บอนต่อรอบเครื่องเป็นค่าตั้งต้นของการคำนวณมีความเหมาะสมกับลักษณะงานของหน่วยจ่ายกลาง เนื่องจากเครื่องล้างและเครื่องึ่งใช้พลังงาน น้ำ ไอน้ำ และทรัพยากรอื่นเป็นรอบการทำงาน การจัดสรรคาร์บอนจากระดับรอบเครื่องไปยังชุดเครื่องมือจึงสะท้อนผลของประสิทธิภาพการใช้ความจุของเครื่องได้โดยตรง หากจำนวนชุดในรอบเครื่องน้อย คาร์บอนต่อชุดจะสูงขึ้น แม้การใช้ทรัพยากรต่อรอบจะใกล้เคียงเดิม แนวคิดนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Lemonnier และ Talon ที่แสดงให้เห็นว่า หน่วยทำให้ปราศจากเชื้อสามารถประเมินคาร์บอนในระดับหน่วยงาน

และใช้ข้อมูลดังกล่าวเพื่อระบุแหล่งปล่อยคาร์บอนสำคัญได้⁹

ประเด็นที่สาม คือ ความผันแปรของงานจริงต้องถูกนำมาพิจารณาในการตีความผลลัพธ์ หน่วยจ่ายกลางมีปริมาณงานที่เปลี่ยนแปลงตามตารางผ่าตัด หัตถการฉุกเฉิน การคืนชุดเครื่องมือ และเหตุการณ์คุณภาพ เช่น ห่อขึ้น ห่อฉีก หรือการนึ่งซ้ำ ดังนั้น ค่าคาร์บอนต่อชุดที่สูงขึ้นในบางรอบไม่ควรถูกตีความว่าเกิดจากความไม่มีประสิทธิภาพเพียงอย่างเดียว แต่ควรพิจารณาร่วมกับเหตุผลทางคลินิก ความเร่งด่วนของการใช้เครื่องมือ และข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของผู้ป่วย การแยกรอบปกติ รอบฉุกเฉิน และรอบทำซ้ำออกจากกันจึงช่วยให้การวิเคราะห์มีความเป็นธรรมและตรงกับสภาพงานจริงมากขึ้น⁴

ประเด็นที่สี่ คือ การจัดทำฐานข้อมูลชุดเครื่องมือเป็นรากฐานสำคัญของการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ หากฐานข้อมูลไม่ครบถ้วนหรือไม่มีความมาตรฐานเดียวกัน การจัดสรรคาร์บอนต่อชุดและต่อเครื่องมือหนึ่งชิ้นจะคลาดเคลื่อนได้ ฐานข้อมูลจึงควรระบุรหัสชุด ชื่อชุด จำนวนเครื่องมือ หน่วยงานผู้ใช้ ชนิดของระบบ ห่อหุ้มปราศจากเชื้อ และเส้นทางกระบวนการของแต่ละชุดอย่างชัดเจน ข้อมูลดังกล่าวยังช่วยสนับสนุนการทบทวนความเหมาะสมของชุดเครื่องมือร่วมกับห้องผ่าตัด เช่น การลดเครื่องมือที่ไม่จำเป็น การลดการเปิดเครื่องมือเพิ่ม และการลดการทำซ้ำจากความไม่ครบถ้วนของชุด⁴⁻⁵

ประเด็นที่ห้า คือ ระบบห่อหุ้มปราศจากเชื้อและการจัดการของเสียเป็นองค์ประกอบที่ควรรวมอยู่ในการคำนวณคาร์บอนต่อชุด ไม่ควรพิจารณาเฉพาะการใช้พลังงานของเครื่องล้างและเครื่องึ่งเท่านั้น การเลือกชนิดบรรจุภัณฑ์ น้ำหนักวัสดุ การใช้ครั้งเดียวหรือใช้ซ้ำ และเส้นทางจัดการของเสียหลังใช้งาน ล้วนมีผลต่อคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อ งานของ Rizan และคณะสนับสนุนว่า การเพิ่มประสิทธิภาพการนึ่งและการเลือกบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมสามารถช่วยลดทั้งคาร์บอนและต้นทุนของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อได้อย่างไรก็ตาม การลดคาร์บอนจากบรรจุภัณฑ์ต้องไม่เพิ่มความเสี่ยงต่อห่อชำรุด ความขึ้นตกค้าง หรือการปนเปื้อนหลังการทำให้ปราศจากเชื้อ^{5,9}

ประเด็นที่หก คือ การเปรียบเทียบเครื่องมือแพทย์แบบใช้ซ้ำกับแบบใช้ครั้งเดียวต้องพิจารณาตลอดกระบวนการ ไม่ควรสรุปจากชนิดของผลิตภัณฑ์เพียงอย่างเดียว หลักฐานจากงานวิจัยเกี่ยวกับ ureterscope, bronchoscope, central venous catheter insertion kit และ laryngeal mask airway แสดงให้เห็นว่า ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมขึ้นกับจำนวนครั้งใช้ การทำความสะอาด การทำให้ปราศจากเชื้อ การขนส่ง บรรจุภัณฑ์ และการกำจัดของเสีย ดังนั้น กรอบการคำนวณที่ใช้ข้อมูลจริงของหน่วยจ่ายกลางจึงช่วยให้โรงพยาบาลมีข้อมูลเฉพาะบริบทสำหรับประกอบการตัดสินใจด้านการใช้ซ้ำ การจัดซื้อ และการจัดการทรัพยากร^{5,8}

ประเด็นที่เจ็ด คือ การเชื่อมผลลัพธ์จากหน่วยจ่ายกลางไปสู่ระดับเคสผ่าตัดช่วยให้ข้อมูลคาร์บอนมีความหมายต่อทีมคลินิกมากขึ้น การรายงานเฉพาะคาร์บอนต่อรอบเครื่องหรือคาร์บอนต่อชุดอาจเป็นประโยชน์ต่อการบริหารภายในหน่วยจ่ายกลาง แต่การรายงานคาร์บอนต่อเคสผ่าตัดช่วยให้ทีมผ่าตัดเห็นผลของการใช้ชุดเครื่องมือหลายชุด การเปิดรายการแยกชิ้น และการเตรียมเครื่องมือเกินจำเป็น ข้อมูลนี้สามารถใช้สนับสนุนการปรับมาตรฐานชุดเครื่องมือ การลดการเปิดเครื่องมือที่ไม่จำเป็น และการวางแผนทรัพยากรโดยไม่กระทบต่อความปลอดภัยของผู้ป่วย^{6,7,10-14,18}

ประเด็นที่แปด คือ จุดควบคุมคุณภาพควรถูกกำหนดไว้ในทุกขั้นตอนของกระบวนการคำนวณ การลดคาร์บอนในหน่วยจ่ายกลางต้องไม่ลดมาตรฐานการทำให้ปราศจากเชื้อหรือมาตรฐานการควบคุมการติดเชื้อ จุดควบคุมที่สำคัญ ได้แก่ การตรวจสอบความถูกต้องของฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ การยืนยันจำนวนรอบเครื่องและจำนวนชุด การตรวจสอบแหล่งที่มาของปัจจัยการปล่อย การทวนสอบหน่วยวัด การบันทึกเหตุการณ์ทำซ้ำ และการทบทวนค่าคาร์บอนที่ผิดปกติ การมีจุดควบคุมเหล่านี้ช่วยให้การลดคาร์บอนดำเนินไปพร้อมกับการรักษาคุณภาพเวชภัณฑ์ปราศจากเชื้อ ความปลอดภัยของผู้ป่วย และความปลอดภัยในการทำงานของบุคลากร¹⁵⁻¹⁷

ในเชิงนโยบาย กรอบนี้สามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนการพัฒนาโรงพยาบาลสู่ความยั่งยืน เพราะช่วยเปลี่ยนข้อมูลการทำงานประจำให้เป็นตัวชี้วัดที่ตรวจสอบได้และสื่อสารได้กับหลายฝ่าย หน่วยจ่ายกลางสามารถใช้ข้อมูลนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความจุของเครื่อง ลดรอบทำซ้ำ ปรับรูปแบบการจัดชุดเครื่องมือ เลือกระบบท่อหุ้มปราศจากเชื้อที่เหมาะสม และปรับปรุงการคัดแยกของเสีย ภายใต้หลักการสำคัญว่า การลดคาร์บอนต้องไม่ลดทอนคุณภาพการดูแลหรือความปลอดภัยของผู้ป่วย⁹ อย่างไรก็ตาม บทความนี้เป็นการพัฒนากรอบเชิงวิธียาจากการสังเคราะห์หลักฐานและลำดับงานของหน่วยจ่ายกลาง ยังไม่ใช่การทดลองใช้ในระบบงานจริงของโรงพยาบาล ผลลัพธ์ที่นำเสนอจึงควรตีความในฐานะกรอบการคำนวณและแนวทางการประยุกต์ใช้ ไม่ใช่ค่าคาร์บอนมาตรฐานของเครื่องมือหรือกระบวนการใดกระบวนการหนึ่ง การศึกษาระยะต่อไปควรนำกรอบนี้ไปทดลองใช้ในหน่วยจ่ายกลางจริง เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการเก็บข้อมูล ความถูกต้องของการจัดสรรค่าคาร์บอน จุดอ่อนของกระบวนการคำนวณ และการพัฒนาค่าคาร์บอนอ้างอิงสำหรับเครื่องมือ ชุดเครื่องมือ และกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อในบริบทของโรงพยาบาลไทย

โดยสรุป กรอบการคำนวณที่นำเสนอช่วยให้หน่วยจ่ายกลางสามารถประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์จากข้อมูลการปฏิบัติงานจริง และเชื่อมผลลัพธ์กับการบริหารคุณภาพ ความปลอดภัย และความยั่งยืนได้อย่างเป็นระบบ จุดเด่นของกรอบนี้คือ การเริ่มคำนวณจากระดับรอบเครื่อง การจัดสรรคาร์บอนสู่ระดับชุดและรายชิ้น การรวมบรรจุภัณฑ์และของเสีย และการเชื่อมโยงผลลัพธ์

สู่ระดับเคสผ่าตัด แนวทางดังกล่าวช่วยให้การลดคาร์บอนเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาคุณภาพงานปราศจากเชื้อ ไม่ใช่งานด้านสิ่งแวดล้อมที่แยกออกจากระบบบริการสุขภาพ

บทสรุป (Conclusion)

บทความนี้นำเสนอกรอบการออกแบบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อในหน่วยจ่ายกลางและทำให้ปราศจากเชื้อ โดยพัฒนาจากหลักฐานด้านการประเมินวงจรชีวิต การทำบัญชีคาร์บอนเชิงกระบวนการ การบริหารคุณภาพ การควบคุมการติดเชื้อ และความปลอดภัยในการทำงาน กรอบดังกล่าวมุ่งแปลงข้อมูลจากการปฏิบัติงานประจำ เช่น จำนวนรอบเครื่องล้าง จำนวนรอบเครื่องึ่ง จำนวนชุดเครื่องมือ วัสดุท่อหุ้มปราศจากเชื้อ และข้อมูลการจัดการของเสีย ให้เป็นตัวชี้วัดที่สามารถตรวจสอบ เปรียบเทียบ และใช้ประกอบการตัดสินใจได้

กรอบการคำนวณประกอบด้วยขั้นตอนสำคัญ ได้แก่ การกำหนดขอบเขตและหน่วยหน้าที่ การจัดทำฐานข้อมูลชุดเครื่องมือ การเก็บข้อมูลกิจกรรมรายวัน การคำนวณคาร์บอนต่อรอบเครื่อง การจัดสรรคาร์บอนสู่ระดับชุดเครื่องมือและเครื่องมือรายชิ้น การรวมผลกระทบจากระบบท่อหุ้มปราศจากเชื้อ และการจัดการของเสีย และการเชื่อมโยงผลลัพธ์สู่ระดับเคสผ่าตัด ขั้นตอนเหล่านี้ช่วยให้หน่วยจ่ายกลางสามารถเห็นความสัมพันธ์ระหว่างการใช้ทรัพยากร ประสิทธิภาพของรอบเครื่อง เหตุการณ์คุณภาพ และผลกระทบด้านคาร์บอนได้ชัดเจนขึ้น โดยสาระสำคัญของกรอบนี้คือ การลดคาร์บอนไม่ควรดำเนินแยกจากคุณภาพและความปลอดภัย การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ความจุของเครื่อง การลดการทำซ้ำจากเหตุการณ์คุณภาพ การปรับรายการเครื่องมือให้เหมาะสม และการเลือกใช้ระบบท่อหุ้มปราศจากเชื้ออย่างเหมาะสม อาจช่วยลดการใช้ทรัพยากรลดภาระงาน และลดความเสี่ยงด้านอาชีวอนามัยได้ โดยต้องไม่กระทบต่อความปลอดภัยของผู้ป่วย ความคงสภาพความปราศจากเชื้อ และมาตรฐานการควบคุมการติดเชื้อ

อย่างไรก็ตาม บทความนี้เป็นกรอบการนำเสนอเชิงวิธียา ยังไม่ใช่ผลการทดลองใช้จริงในระบบงานของโรงพยาบาล และยังไม่สามารถสรุปเป็นค่าคาร์บอนอ้างอิงของเครื่องมือหรือกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งได้ การศึกษาต่อไปควรนำกรอบนี้ไปทดลองใช้ในหน่วยจ่ายกลางจริง เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการเก็บข้อมูล ความถูกต้องของการจัดสรรคาร์บอน จุดอ่อนของกระบวนการคำนวณ และการพัฒนาค่าคาร์บอนอ้างอิงที่เหมาะสมกับบริบทของโรงพยาบาลไทย โดยสรุป กรอบการคำนวณที่นำเสนอเป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับการพัฒนาระบบข้อมูลด้านคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในหน่วยจ่ายกลาง ช่วยสนับสนุนการบริหารงานที่เชื่อมโยงคุณภาพ ความปลอดภัย และความยั่งยืนเข้าด้วยกันอย่างเป็นระบบ และสามารถใช้เป็นฐานสำหรับการวิจัยภาคสนามและการพัฒนามาตรการลดคาร์บอนในโรงพยาบาลต่อไป

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณงานเวชภัณฑ์ปลอดเชื้อ โรงพยาบาลรามาธิบดี จักรีนฤพดินทร์ สถาบันการแพทย์จักรีนฤพดินทร์ คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี มหาวิทยาลัยมหิดล ที่ให้ข้อมูลพื้นฐานเกี่ยวกับกระบวนการปฏิบัติงานในหน่วยจ่ายกลาง อันเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนากรอบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อ ขอขอบคุณบุคลากรที่เกี่ยวข้องในหน่วยงานจ่ายกลางและหน่วยงานสนับสนุน ที่ให้ข้อคิดเห็นเกี่ยวกับลักษณะงานจริง ขั้นตอนการทำงาน การควบคุมคุณภาพ และประเด็นด้านความปลอดภัยในการทำงาน ซึ่งช่วยให้กรอบการคำนวณที่น่าเสนอมีความสอดคล้องกับบริบทการปฏิบัติงานของโรงพยาบาลมากยิ่งขึ้น ข้อคิดเห็นและการสนับสนุนดังกล่าวมีส่วนสำคัญต่อการพัฒนาบทความวิชาการฉบับนี้ให้มีความชัดเจน เป็นระบบ และสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางเบื้องต้นสำหรับการประเมินคาร์บอนฟุตพริ้นท์ในหน่วยจ่ายกลางต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. The Shift Project. *Décarboner la santé pour soigner durablement*. The Shift Project; 2023. <https://theshiftproject.org/publications/decarboner-sante-soigner-durablement/>. Accessed December 29, 2025.
2. Keller RL, Muir K, Roth F, Jattke M, Stucki M. From bandages to buildings: Identifying the environmental hotspots of hospitals. *J Clean Prod*. 2021;319:128479. doi:10.1016/j.jclepro.2021.128479
3. Cimprich A, Young SB. Environmental footprinting of hospitals: Organizational life cycle assessment of a Canadian hospital. *J Ind Ecol*. 2023;27(5):1335-1353. doi:10.1111/jiec.13425
4. Lemonnier J, Talon D. 1ISG-027 Carbon footprint of a sterilisation unit. *Eur J Hosp Pharm*. 2021;28(Suppl 1):A4.1. doi:10.1136/ejpharm-2021-eahpconf.8
5. Rizan C, Lillywhite R, Reed M, Bhutta MF. Minimising carbon and financial costs of steam sterilisation and packaging of reusable surgical instruments. *Br J Surg*. 2022;109(2):200-210. doi:10.1093/bjs/znab406
6. Goubil A, Lefèvre K, Couret C, et al. Understanding and quantifying the environmental impact of sterile medical devices: A carbon footprint study of single-use electrosurgical scalpels and their reusable alternatives. *BMJ Surg Interv Health Technol*. 2025;7:e000348. doi:10.1136/bmjsit-2024-000348
7. Davis NF, McGrath S, Quinlan M, et al. Carbon footprint in flexible ureteroscopy: A comparative study on the environmental impact of reusable and single-use ureteroscopes. *J Endourol*. 2018;32(3):214-217. doi:10.1089/end.2018.0001
8. Krohn M, Fengler J, Mickley T, Flessa S. Analysis of processes and costs of alternative packaging options of sterile goods in hospitals: A case study in two German hospitals. *Health Econ Rev*. 2019;9(1):1. doi:10.1186/s13561-018-0218-2
9. Greenhouse Gas Protocol. *Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard*. World Resources Institute; World Business Council for Sustainable Development; 2011. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/Product-Life-Cycle-Accounting-Reporting-Standard_041613.pdf. Accessed December 29, 2025.
10. Lilholt Sørensen B. Comparative study on environmental impacts of reusable and single-use bronchoscopes. *Am J Environ Prot*. 2018;7(4):55-62. doi:10.11648/j.ajep.20180704.11
11. McGain F, McAlister S, McGavin A, Story D. A life cycle assessment of reusable and single-use central venous catheter insertion kits. *Anesth Analg*. 2012;114(5):1073-1080. doi:10.1213/ANE.0b013e31824e9b69
12. Eckelman MJ, Mosher M, Gonzalez A, Sherman JD. Comparative life cycle assessment of disposable and reusable laryngeal mask airways. *Anesth Analg*. 2012;114(5):1067-1072. doi:10.1213/ANE.0b013e31824f6959
13. Hogan D, Rauf H, Kinnear N, et al. The carbon footprint of single-use flexible cystoscopes compared with reusable cystoscopes. *J Endourol*. 2022;36(11):1460-1464. doi:10.1089/end.2021.0891
14. Rizan C, Bhutta MF. Re: The carbon footprint of single-use flexible cystoscopes compared

with reusable cystoscopes: Methodological flaws led to the erroneous conclusion that single-use is better. *J Endourol.* 2022;36(11):1466-1467. doi:10.1089/end.2022.0482

15. Thiel CL, Eckelman M, Guido R, Huddleston M, Landis AE, Sherman JD. Environmental impacts of surgical procedures: Life cycle assessment of hysterectomy in the United States. *Environ Sci Technol.* 2015;49(3):1779-1786. doi:10.1021/es504719g
16. McGain F, Wickramarachchi K, Aye L, et al. The carbon footprint of total knee replacements. *Aust Health Rev.* 2024;48(6):664-672. doi:10.1071/AH24154
17. Boberg L, Singh J, Montgomery A, et al. Environmental impact of single-use, reusable, and mixed trocar systems used for laparoscopic cholecystectomies. *PLoS One.* 2022;17(7):e0271601. doi:10.1371/journal.pone.0271601
18. MacNeill AJ, Hopf H, Khanuja A, et al. Transforming the medical device industry: Road map to a circular economy. *Health Aff (Millwood).* 2020;39(12):2088-2097. doi:10.1377/hlthaff.2020.01118

Online Access

<https://he02.tci-thaijo.org/index.php/jcra/article/view/279637>



การอ้างอิง

วิทยา ขาญชัย, โสภาสีณี จิตรจุลรัตน์มณี, และกัตติกา สุขวัลย์. การออกแบบกรอบการคำนวณคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของกระบวนการทำให้ปราศจากเชื้อในหน่วยงานจ่ายกลางและทำให้ปราศจากเชื้อ. *วารสารวิชาการราชวิทยาลัยจุฬาภรณ์.* 2569; 8(4): 335-348. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/jcra/article/view/279637>

Chanchai W, Chitrachulrattanamanee S, and Sukaval K. A Process-Based Framework to Calculate the Carbon Footprint of Sterile Processing in Central Sterile Supply Departments. *J Chulabhorn Royal Acad.* 2026;8(4): 335-348. <https://he02.tci-thaijo.org/index.php/jcra/article/view/279637>