

บทความวิจัย

การบูรณาการแผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลวและกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นสำหรับการประเมินความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด

ณัฏชนกฤต ทองดอนหัน^{1,2} วท.ม., อารุณ เกตุสาคร^{3,*} Ph.D.

Received: August 25, 2024

Revised: December 5, 2024

Accepted: December 11, 2024

บทคัดย่อ

การติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัดเป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ป่วยนำไปสู่ภาวะแทรกซ้อนและเพิ่มระยะเวลาการรักษา ระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศ (HVAC) มีบทบาทสำคัญในการป้องกันการติดเชื้อทางอากาศ อย่างไรก็ตาม การทำงานที่บกพร่องของระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศ (HVAC) เพิ่มความเสี่ยงในการติดเชื้อทางอากาศ ดังนั้นงานวิจัยนี้ประยุกต์เทคนิคการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว และกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) เพื่อประเมินความเสี่ยงการติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัดโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (FTA) ในการระบุสาเหตุของความล้มเหลวในระบบ HVAC และใช้เทคนิค AHP ในการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญ (มาตรลำดับ 1-9) ของแต่ละสาเหตุ

ผลการวิจัยพบว่า ปริมาณลม มีโอกาสบกพร่อง ร้อยละ 99.4 โดยมีสาเหตุความน่าจะเป็นจากพัดลมของเครื่องปรับอากาศบกพร่อง ร้อยละ 67.4 ระบบท่อลมบกพร่อง ร้อยละ 73.8 แผ่นกรองอากาศบกพร่องร้อยละ 75.8 คอยล์เย็นบกพร่อง ร้อยละ 80.4 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่เพิ่มความเสี่ยงต่อการติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัด ดังนั้นการตรวจสอบและทดสอบประสิทธิภาพของระบบ HVAC อย่างสม่ำเสมอตามมาตรฐานสิ่งแวดล้อมของสหรัฐอเมริกา (NEBB) จึงมีความสำคัญ โดยเฉพาะการทดสอบปริมาณลม การรั่วซึมของแผ่นกรองอากาศ HEPA แรงดันอากาศ ปริมาณฝุ่น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ สรุปได้ว่า การบูรณาการเทคนิค FTA และ AHP สามารถใช้ประเมินความเสี่ยงของการติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัดได้ และช่วยเพิ่มคุณภาพและความปลอดภัยในการดูแลผู้ป่วยในห้องผ่าตัด

คำสำคัญ: การวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น การวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว การประเมินความเสี่ยงแบบความน่าจะเป็น

¹ นักศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² กรรมการผู้จัดการ บริษัท คิว แอนด์ อี อินเทอร์เน็ตเซ็นแนล จำกัด

³ รองศาสตราจารย์ คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

* ผู้รับผิดชอบบทความ: arroon.k@fph.tu.ac.th

Integrating the fault tree analysis and analytic hierarchy process for assessing the probabilistic risk to airborne infections from heating, ventilation, and air conditioning in the operating room

Nutthanakrit Tongdonhun^{1, 2} M.Sc., Arroon Ketsakorn^{3, *} Ph.D.

ABSTRACT

Airborne infections in operating rooms significantly impact patient health, potentially leading to complications and extended recovery times. The heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) system plays a crucial role in preventing these infections. However, any malfunction in the HVAC system can increase the risk of airborne infections. Therefore, this research applied fault tree analysis (FTA) and analytic hierarchy process (AHP) to assess the risk of airborne infections in operating rooms. The FTA was used to identify the causes of HVAC system failures, while AHP was used to assign important weight (scale 1-9) to each contributing factor.

The findings revealed low airflow with a failure probability of 99.4%, with the possible cause being the air conditioner fan defective at 67.4%, the air duct system defective at 73.8%, the air filter defective at 75.8%, and the cooling coil defective at 80.4%, which were important factors that increased the risk of airborne infections in operating rooms. Therefore, regular inspection and testing of HVAC system performance according to the National Environmental Balancing Bureau (NEBB) standards are essential. This includes testing for airflow, HEPA filter leakage, air pressure, dust levels, and the control of temperature and humidity. In conclusion, integrating FTA and AHP techniques can be used to assess the risks of airborne infections in operating rooms, thereby enhancing the quality and safety of patient care in the operating room.

Keywords: Analytic hierarchy process (AHP), Fault tree analysis (FTA), Probabilistic risk assessment

¹ Student in Master of Science Program in Occupational Health and Safety, Faculty of Public Health, Thammasat University

² Managing Director, Q&E International Co., Ltd.

³ Associate Professor, Faculty of Public Health, Thammasat University

* Corresponding author: arroon.k@fph.tu.ac.th

บทนำ

การติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัด เป็นปัญหาที่มีผลกระทบอย่างรุนแรงต่อสุขภาพของผู้ป่วยสามารถนำไปสู่ภาวะแทรกซ้อนที่รุนแรงและเพิ่มระยะเวลาในการรักษา ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของผู้ป่วยและค่าใช้จ่ายในการรักษาพยาบาล (Wagner & Schreiber, 2014) ด้วยเหตุนี้ การประเมินและจัดการความเสี่ยงของการติดเชื้อทางอากาศ จึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง ระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศ (Heating, ventilation, and air conditioning: HVAC) ในห้องผ่าตัดมีบทบาทสำคัญในการควบคุมคุณภาพอากาศและลดความเสี่ยงของการติดเชื้อทางอากาศ อย่างไรก็ตาม การทำงานที่บกพร่องของระบบ HVAC สามารถนำไปสู่การเพิ่มความเสี่ยงในการติดเชื้อได้ ระบบ HVAC ในห้องผ่าตัดต้องได้รับการออกแบบและดำเนินการตามมาตรฐานของสมาคมวิศวกรรมปรับอากาศและทำความเย็นที่เป็นที่ยอมรับมากที่สุดแห่งหนึ่ง (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers: ASHRAE) โดยอ้างอิงมาตรฐาน ASHRAE 170 ventilation of health care facilities (ASHRAE, 2021) เพื่อให้แน่ใจว่าระบบ HVAC สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมภายในห้องผ่าตัดได้ตามเกณฑ์มาตรฐานเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบ HVAC ในห้องผ่าตัด การทดสอบประสิทธิภาพระบบปรับอากาศ และระบายอากาศของห้องสะอาด (Cleanroom performance testing: CPT) จึงเป็นสิ่งที่จำเป็น โดยมีพารามิเตอร์หลัก 5 หัวข้อ ในการทดสอบ ได้แก่ 1. การทดสอบปริมาณลม (Airflow volume test) 2. การทดสอบการติดตั้งแผ่นกรองอากาศ (Filter installation leak test) 3. การทดสอบแรงดันอากาศ (Room pressurization test) 4. การทดสอบปริมาณฝุ่นในอากาศ (Airborne particle count test) 5. การทดสอบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature and relative humidity tests)

การทดสอบทั้ง 5 หัวข้อนี้ ช่วยให้เห็นใจได้ว่าระบบ HVAC สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมภายในห้องผ่าตัดให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานสากลเรื่อง Procedural standards for certified testing of cleanrooms

(NEBB, 2009) นอกจากนี้ ห้องผ่าตัดยังมีเอกลักษณ์เฉพาะตัว มีข้อกำหนดทางการแพทย์และมาตรฐานทางวิศวกรรม โดยออกแบบมาเพื่อปกป้องผู้ป่วยและเจ้าหน้าที่ปฏิบัติงานจากความเสี่ยงต่อการติดเชื้อและการปนเปื้อนข้าม (Cross contamination) ดังนั้นในการออกแบบห้องผ่าตัด การควบคุมฝุ่นละอองเป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการออกแบบห้องผ่าตัด รวมทั้งออกแบบให้สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมของห้องผ่าตัดได้ตามมาตรฐาน ASHRAE 170 (ASHRAE, 2021) เพื่อลดความเสี่ยงในการติดเชื้อทางอากาศ ขณะเดียวกันการออกแบบต้องรองรับข้อกำหนดหลายด้านเพื่ออำนวยความสะดวกแก่ผู้ปฏิบัติงาน รวมทั้งอุปกรณ์ทางการแพทย์ ในปัจจุบันการออกแบบห้องผ่าตัดเป็นระบบห้องสะอาดสามารถควบคุมระดับความสะอาด (Cleanliness class) และสภาพแวดล้อมของห้องผ่าตัดเพื่อช่วยลดความเสี่ยงการติดเชื้อได้ ซึ่งเป็นส่วนสำคัญช่วยให้การรักษาด้านการแพทย์ที่ดีขึ้น เช่น ห้องผ่าตัด (ศัลยกรรมกระดูก ตา ผ่าคลอด ผ่าเปิดช่องท้อง ผ่าเปิดหน้าอก ห้องสวนหลอดเลือดหัวใจ) ห้องผู้ป่วยที่มีระบบภูมิคุ้มกันอ่อนแอ (Protective environmental room: PE) ปลุกถ่ายไขกระดูก (Blood and marrow transplantation)

การติดเชื้อจากการผ่าตัด (Surgical site infection: SSI) ตามที่กระทรวงบริการสุขภาพและมนุษย์ของประเทศสหรัฐอเมริกา (Health and Human Services: HHS) ได้ประมาณการการติดเชื้อจากการผ่าตัดมีมากกว่า 290,000 เหตุการณ์ต่อปี มีผู้เสียชีวิตมากกว่า 13,000 ราย ในแต่ละปี โดยเป็นการเสียชีวิตเนื่องมาจากการติดเชื้อที่เกิดขึ้นระหว่างการผ่าตัด การติดเชื้อจากการผ่าตัดยังคงเป็นเรื่องที่พบบ่อยที่สุดเมื่อเทียบกับการติดเชื้อในโรงพยาบาลทั้งหมด ซึ่งการติดเชื้อจากการผ่าตัดประมาณ 157,500 ราย ที่เกิดขึ้นทุกปี คิดเป็น ร้อยละ 22.0 ของการติดเชื้อในโรงพยาบาลทั้งหมด จากการศึกษาการป้องกันการติดเชื้อบริเวณแผลผ่าตัด พบว่า ร้อยละ 98.0 ของการติดเชื้อมีสาเหตุมาจากฝุ่นละอองในอากาศ (Wagner & Schreiber, 2014) สำหรับประเทศไทย มีสถาบันรับรองคุณภาพสถานพยาบาล (องค์การมหาชน)

กระทรวงสาธารณสุข จัดทำระบบรายงานและเรียนรู้อุบัติการณ์ความเสี่ยงทางคลินิกและเหตุการณ์ไม่พึงประสงค์ (National Reporting and Learning System: NRLS) โดยมีข้อมูลด้านเป้าหมายความปลอดภัยของผู้ป่วยพบว่า ข้อมูลอุบัติการณ์ที่เป็นประเภทความปลอดภัยจากการผ่าตัดมี ร้อยละ 14.6 และเป็นอันดับที่ 3 จากอุบัติการณ์ทั้งหมด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความปลอดภัยจากการผ่าตัดยังคงมีความเสี่ยงที่ค่อนข้างสูง (NRLS, 2023)

จากการค้นคว้าข้อมูลและศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัด รวมทั้งงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศ เพื่อเป็นแนวทางดำเนินการวิจัย พบว่า การปรับปรุงห้องผ่าตัดเพื่อการควบคุมการปนเปื้อน กรณีศึกษา: การเปรียบเทียบ การออกแบบไว้ 4 แบบ ในแต่ละแบบมีการจัดวางตำแหน่งหัวจ่ายลม ขนาดหัวจ่ายลมที่แตกต่างกันในแต่ละแบบ โดยมีการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamic: CFD) เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในอากาศและวัดจำนวนอนุภาคเชื้อจุลชีพในอากาศเพื่อเปรียบเทียบผล ในแต่ละแบบ โดยการออกแบบให้กระแสอากาศให้มีการไหลแบบราบเรียบ (Laminar air flow: LAF) สามารถลดจำนวนอนุภาคเชื้อจุลชีพและควบคุมอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การศึกษาเชิงตัวเลขของผลกระทบของความปั่นป่วนต่อพฤติกรรมของการไหลของอากาศ อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดผลการศึกษาพบว่า การลดความปั่นป่วนสามารถควบคุม อุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาดให้อยู่ในเกณฑ์การยอมรับได้ (Sukjit, 2006) จากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมามุ่งเน้นภายในห้องผ่าตัดในเรื่องการออกแบบ การจัดวางตำแหน่งหัวจ่ายลม จำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคในอากาศโดยเฉพาะเรื่องการไหลอากาศเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการลดความเสี่ยงการติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัด พบว่าการศึกษางานวิจัยต่างๆ ยังไม่ได้มีการดำเนินการศึกษาเรื่องการบำรุงรักษาระบบต้นกำลังของระบบห้องสะอาด โดยระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (HVAC) ค่อนข้างมีอย่างจำกัด

ซึ่งระบบดังกล่าว เป็นระบบที่สำคัญทำให้ระบบห้องสะอาดของห้องผ่าตัดสามารถทำงานและควบคุมห้องให้ได้ตามที่ออกแบบ โดยที่ระบบจะต้องควบคุมแต่ละพารามิเตอร์และมีการทดสอบตามมาตรฐานห้องสะอาด ดังนั้น งานวิจัยนี้ จึงมุ่งศึกษาการบูรณาการประยุกต์ใช้แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault tree analysis: FTA) เพื่อใช้ในการจำแนกแต่ละสาเหตุที่ส่งผลต่อระบบปรับอากาศและระบายอากาศในการควบคุมสภาพแวดล้อมทั้ง 5 พารามิเตอร์ จนสามารถค้นหาสาเหตุพื้นฐานได้ (Basic event) และใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic hierarchy process: AHP) เพื่อประเมินหาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละสาเหตุสำหรับประเมินความเสี่ยงแบบความน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบปรับอากาศและระบายอากาศ (HVAC) ภายในห้องผ่าตัด เพื่อเป็นประโยชน์ให้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องกับระบบปรับอากาศและระบายอากาศ ช่วยให้ผู้สามารถระบุและจัดการปัจจัยเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพและพัฒนามาตรการป้องกันที่เหมาะสม ดูแลบำรุงรักษาให้ระบบสามารถควบคุมสภาพแวดล้อม และทดสอบประสิทธิภาพระบบปรับอากาศและระบายอากาศของห้องสะอาดทั้ง 5 พารามิเตอร์ของห้องผ่าตัดตามเกณฑ์การยอมรับตามมาตรฐานสากลและที่สำคัญต้องมีการทดสอบตามรอบประจำปี เพื่อสร้างความเชื่อมั่นในเรื่อง ความปลอดภัยสุขอนามัย และคุณภาพอากาศที่ปราศจากเชื้อสำหรับผู้ป่วยที่มาเข้ารับบริการ

เทคนิคการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความล้มเหลว (FTA) มีรูปแบบเป็นแผนภูมิจากบนลงล่าง (Top down diagram) เป็นการคิดวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ โดยอาศัยหลักการทางตรรกะวิทยาในการหาเหตุและผล ซึ่งสาเหตุตั้งต้น (Top event) จะอยู่ส่วนบนสุดของแผนภูมิและแตกกิ่งก้านด้วยสาเหตุย่อยๆ (Intermediate event) ที่ถูกแจกแจงออกมาว่ามีอะไรบ้างและเกิดขึ้นได้อย่างไร วิเคราะห์ไปจนถึงสาเหตุพื้นฐาน จึงหยุดทำการวิเคราะห์สาเหตุต่างๆ ที่ถูกวิเคราะห์และถูกเชื่อมโยงด้วยสัญลักษณ์ตรรกะของ Boolean ได้แก่ AND Gate หรือ OR Gate เป็นต้น ทั้งนี้สาเหตุพื้นฐานจากแผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลวเกิดจากความบกพร่องจากเครื่องจักรหรือ

อุปกรณ์ ทำให้สามารถทราบค่าความเชื่อมั่นของเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ได้ อย่างไรก็ตาม การเกิดเหตุการณ์อื่นไม่พึงประสงค์อาจเกิดจากสาเหตุพื้นฐานจากการกระทำที่ไม่ปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าน้ำหนักความสำคัญหรือค่าความเชื่อมั่นของผู้ปฏิบัติงาน ซึ่งกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวัดระดับกระบวนการตัดสินใจในเรื่องต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ผลการตัดสินใจที่ถูกต้องกับเป้าหมายของการตัดสินใจได้มากที่สุด ซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากและเป็นที่ยอมรับกันในระดับสากลอย่างแพร่หลาย โดยเป็นเทคนิคที่ใช้การแยกและแบ่งองค์ประกอบของปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปของแผนภูมิตามลำดับชั้น แล้วมีการหาค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบ นำมาคำนวณหาค่าน้ำหนักความสำคัญ เพื่อนำไปสู่กระบวนการวิเคราะห์ค่าลำดับ ความสำคัญของแต่ละทางเลือก โดยโครงสร้างกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นเลียนแบบกระบวนการคิดของมนุษย์ ดังนั้น เทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับการตัดสินใจที่เป็นรายบุคคลและรายกลุ่ม

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อประเมินความเสี่ยงแบบความน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศภายในห้องผ่าตัด โดยประยุกต์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลวและกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ผ่านผู้เชี่ยวชาญจำนวน 7 คน โดยแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 จำนวน 5 คน ที่มีคุณสมบัติเป็นผู้เชี่ยวชาญหรือนักวิชาการมีความรู้และวุฒิการศึกษา ระดับปริญญาตรีหรือปริญญาโท หรือปริญญาเอกเกี่ยวข้องกับด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์ อาชีวอนามัยและความปลอดภัย มีประสบการณ์ด้านการวิจัย การออกแบบ การก่อสร้าง การตรวจวัด และการปฏิบัติงานดูแลรักษาซ่อมบำรุง เกี่ยวกับห้องสะอาดในห้องผ่าตัดหรือ

โรงงานผลิตยา อย่างน้อย 5 ปี หรือผู้ที่ได้รับการรับรองจากสถาบัน NEBB Certified CPT Professional ที่มีความรู้ความชำนาญ กลุ่มที่ 2 จำนวน 2 คนที่มีคุณสมบัติเป็นผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับการปฏิบัติงานในโรงพยาบาล ระดับเจ้าหน้าที่ความปลอดภัยในการทำงานระดับวิชาชีพหรือวิศวกรของโรงพยาบาล โดยต้องมีประสบการณ์การทำงานไม่น้อยกว่า 3 ปี ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 คน จะเป็นผู้ประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ตามมาตรฐานลำดับ 1-9 ได้ตามตาราง 1 หลังจากนั้นหาค่าน้ำหนักความสำคัญรายบุคคล มาหาค่าเฉลี่ยแล้วนำเข้าสู่โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Expert Choice V.11 เพื่อหาค่าอัตราความสอดคล้องกันของเหตุผลจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 7 คน สำหรับการประเมินความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด โดยการบูรณาการแผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลวและกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น มีวิธีการดังนี้

1. เริ่มต้นจากการกำหนดสาเหตุแต่ละสาเหตุที่จะก่อให้เกิดสาเหตุย่อยจนไปถึงสาเหตุสุดท้าย โดยเลือกสาเหตุความเสี่ยงต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด เป็นสาเหตุเริ่มต้น (Top event) โดยพิจารณาโอกาสซึ่งอาจเกิดสาเหตุย่อยสาเหตุใดสาเหตุหนึ่งเท่านั้น ใช้สัญลักษณ์ "หรือ (OR)" ถ้าเกิดสาเหตุย่อยหลายสาเหตุพร้อมกันใช้สัญลักษณ์ "และ (AND)" สามารถคำนวณค่าความน่าจะเป็นของสาเหตุได้จากสมการที่ (1) และ (2) (Hyun, Min, Choi, Park, & Lee, 2015)

$$AND = F1 \times F2 \times Fn \quad (1)$$

$$OR = 1 - (1 - F1) \times (1 - F2) \times (1 - Fn) \quad (2)$$

F1, F2, Fn คือ ความน่าจะเป็นของสาเหตุนั้นๆ

2. การเปรียบเทียบคู่ (Pairwise comparisons) โดยจัดทำเมทริกซ์การตัดสินใจ (Decision matrix) เพื่อทำการเปรียบเทียบเป็นคู่ในตารางมาตรฐานลำดับ 1-9 ดังตาราง 1 (Saaty, 1996)

3. คำนวณค่าดัชนีความสอดคล้อง โดยค่า CI คือ ดัชนีความสอดคล้องกัน (Consistency index: CI) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

4. คำนวณค่าอัตราความสอดคล้องกันของ เหตุผล (Consistency ratio, CR) จากสมการ (4) โดยผลการคำนวณอัตราส่วนความสอดคล้องที่ได้หาก CR มีค่าเท่ากับ 0 หมายความว่า ภายในชุดของดุลยพินิจนั้น จะมีความสอดคล้องอย่างสมบูรณ์ แต่หาก CR มีค่าเท่ากับ 1 หมายความว่า ความไม่สอดคล้องเทียบเท่ากับ ดุลยพินิจที่ได้จากการสุ่ม ถ้า CR มีค่ามาก (โดยทั่วไป ค่าวิกฤตจะอยู่ที่ 0.1) แสดงว่า ดุลยพินิจนั้นไม่น่าเชื่อถือ โดยช่วงที่จะยอมรับได้ของค่า CR ขึ้นอยู่กับขนาดของ เมตริกซ์ เช่น ถ้าเมตริกซ์ขนาด 3 x 3 ค่า CR ไม่ควรเกิน 0.05 ถ้าเมตริกซ์ขนาด 4 x 4 ค่า CR ไม่ควรเกิน 0.08 และสำหรับเมตริกซ์ที่มีขนาดมากกว่า 5 x 5 ขึ้นไป ค่า CR ไม่ควรเกิน 0.1 (Saaty, 1996)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

RI คือ ความไม่สอดคล้องแบบสุ่ม (Random inconsistency: RI) โดยพิจารณาได้ตามตาราง 2

5. วิเคราะห์ความน่าจะเป็นของสาเหตุโอกาสของการเกิดสาเหตุพื้นฐานแต่ละสาเหตุจะแตกต่างกันออกไป ตามปัจจัยต่างๆ

6. หาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละสาเหตุ โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น เป็นการให้ ดุลยพินิจเชิงเปรียบเทียบเพื่อคำนวณลำดับความสำคัญ โดยการให้คะแนนจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 7 ท่าน แสดงใน ตาราง 1 โดยมีข้อมูลประกอบ คือ ข้อมูลการประเมิน ความเสี่ยงจากกระบวนการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความ ล้มเหลวและใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Expert Choice V.11 ในการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญและค่าดัชนี แสดงความสอดคล้อง (CR)

7. นำค่าโอกาสการเกิดสาเหตุหรือความน่าจะเป็น ที่ได้จากกระบวนการบูรณาการวิเคราะห์ต้นไม้แห่งความ ล้มเหลวและการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น มาจัดลำดับ ความเสี่ยง

ตาราง 1 ค่าน้ำหนักความสำคัญของสาเหตุ

ระดับ โอกาส	ระดับความเสี่ยง	น้ำหนักความสำคัญ ของสาเหตุ
1	ระดับความเสี่ยงเท่ากัน	0.01-0.10
2	ระดับความเสี่ยงเท่ากัน และค่อนข้างสำคัญกว่าบ้าง	0.11-0.20
3	ระดับความเสี่ยงกว่าบ้าง	0.21-0.30
4	ระดับความเสี่ยงกว่าบ้าง และค่อนข้างมีความสำคัญกว่ามาก	0.31-0.40
5	ระดับความเสี่ยงกว่ามาก	0.41-0.50
6	ระดับความเสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้างมีความสำคัญกว่าค่อนข้างมาก	0.51-0.60
7	ระดับความเสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก	0.61-0.70
8	ระดับความเสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้างมีความสำคัญอย่างยิ่ง	0.71-0.80
9	ระดับความเสี่ยงอย่างยิ่ง	> 0.80

ที่มา: Saaty, 1996

ตาราง 2 ความไม่สอดคล้องแบบสุ่ม (Random inconsistency)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

ผลการวิจัย

กระบวนการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault tree analysis: FTA)

กระบวนการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว (FTA) จากความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด ดังแสดงในภาพ 1 ประกอบด้วย 5 พารามิเตอร์ คือ

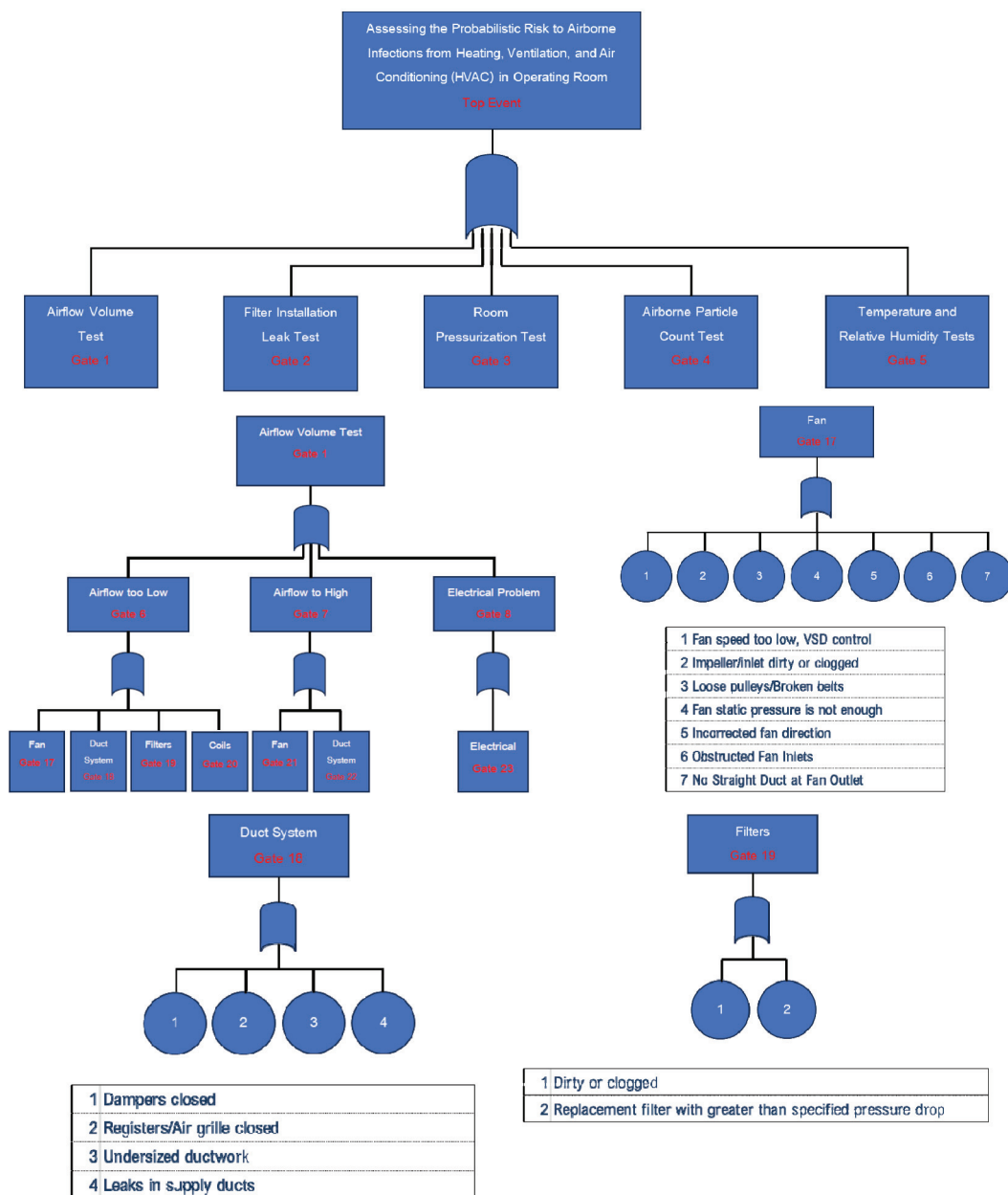
1. การทดสอบปริมาณลม (Airflow volume test) มีโอกาสเกิดความบกพร่องจากสาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยสาเหตุหลักที่ 1 คือ ปริมาณลมต่ำเกินไป (Airflow too low) สาเหตุหลักที่ 2 คือ ปริมาณลมสูงเกินไป (Airflow too high) และสาเหตุหลักที่ 3 คือ ระบบไฟฟ้ามีปัญหา (Electrical problem) ซึ่งสาเหตุหลักที่ 1 ปริมาณลมต่ำเกินไป เกิดมาจากสาเหตุย่อยอย่างใดอย่างหนึ่งอาจเป็นผลมาจากปัญหาพัดลมของเครื่องปรับอากาศ (Fan) ระบบท่อ (Duct system) แผ่นกรองอากาศ (Filters) หรือ คอยล์เย็น (Coil) สาเหตุหลักที่ 2 ปริมาณลมสูงเกินไป เกิดมาจากสาเหตุย่อยอย่างใดอย่างหนึ่ง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปัญหาพัดลมของเครื่องปรับอากาศ ระบบท่อ สาเหตุหลักที่ 3 ระบบไฟฟ้ามีปัญหา

2. จากสาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยสาเหตุหลักที่ 1 คือ เกิดจากการรั่วหรือเสียหาย (Leak/damage) สาเหตุหลักที่ 2 คือ ใช้งานเกินอายุการใช้งานหรือประสิทธิภาพลดลง (Over lifetime/low efficiency)

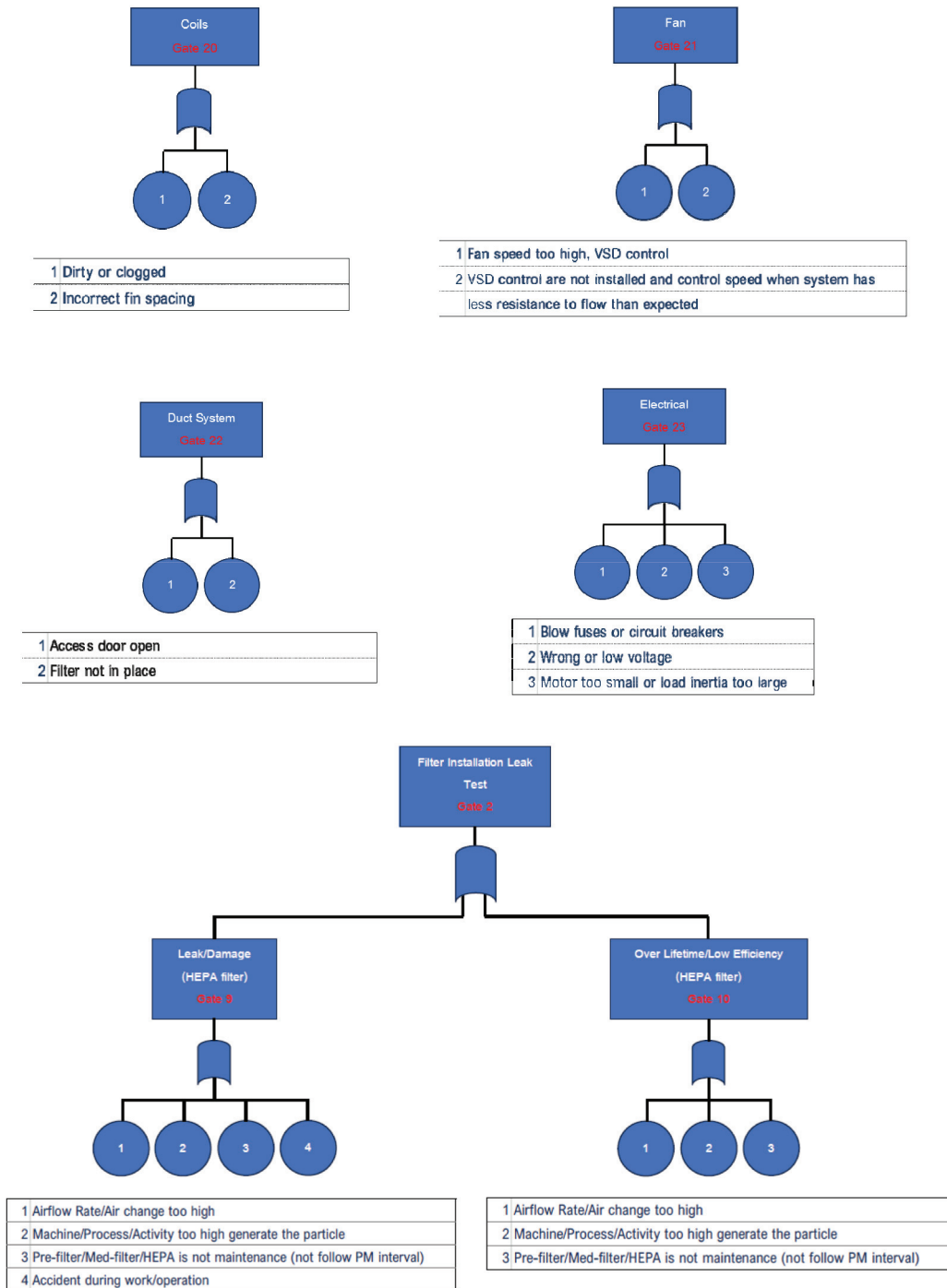
3. การทดสอบแรงดันอากาศ (Room pressurization test) มีโอกาสเกิดความบกพร่องจากสาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยสาเหตุหลักที่ 1 คือ ผลมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด สาเหตุหลักที่ 2 คือ ผลมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

4. การทดสอบปริมาณฝุ่นในอากาศ (Airborne particle count test) มีโอกาสเกิดความบกพร่องจากสาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยสาเหตุหลักที่ 1 คือ จำนวนอนุภาคค่อนข้างสูง แต่ไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนด สาเหตุหลักที่ 2 คือ จำนวนอนุภาคสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด

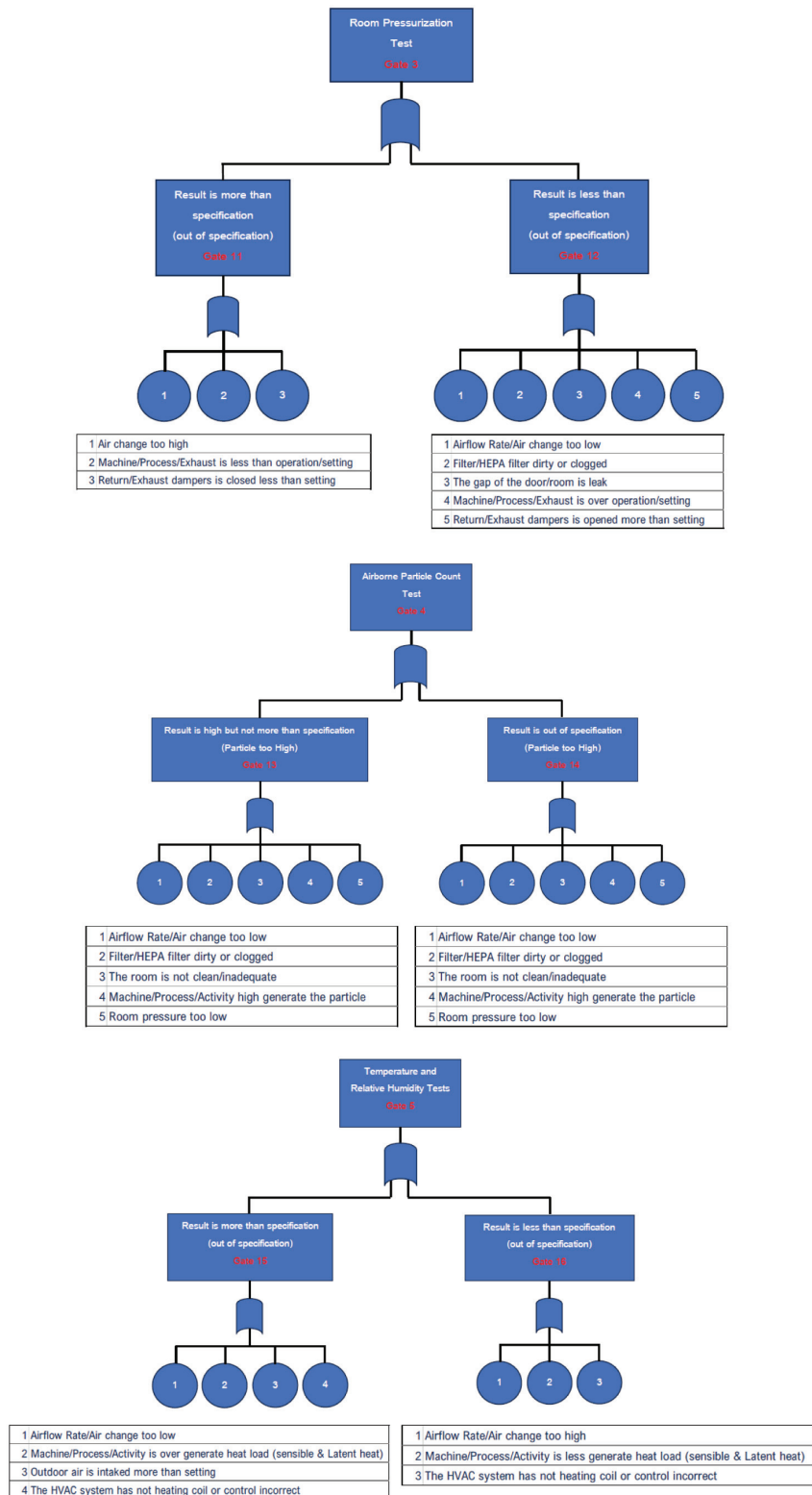
5. การทดสอบอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Temperature and relative humidity tests) มีโอกาสเกิดความบกพร่องจากสาเหตุอย่างใดอย่างหนึ่ง โดยสาเหตุหลักที่ 1 คือ ผลมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด สาเหตุหลักที่ 2 คือ ผลมีค่าต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด



ภาพ 1 กระบวนการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault tree analysis: FTA) จากความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด



ภาพ 1 กระบวนการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault tree analysis: FTA) จากความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด (ต่อ)



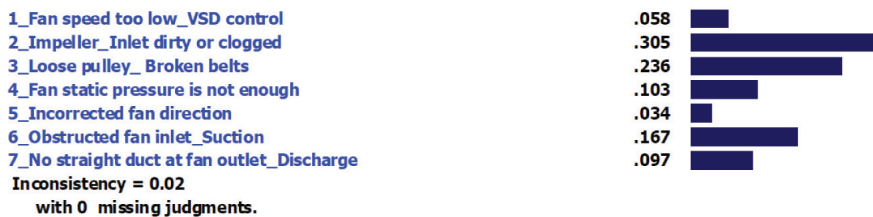
ภาพ 1 กระบวนการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว (Fault tree analysis: FTA) จากความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด (ต่อ)

กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analytic hierarchy process: AHP)

การเปรียบเทียบคู่ของสาเหตุของการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Expert Choice V.11 ในการหาค่าอัตราส่วนความสอดคล้อง (CR) พิจารณาตามภาพ 2 จากนั้นหา ร้อยละ โอกาสการเกิดสาเหตุ (% Probability) ของการติดเชื้อทางอากาศ

ได้ค่าน้ำหนักของสาเหตุ (Gate) จากนั้นทำการวิเคราะห์น้ำหนักความสำคัญของการเกิดสาเหตุเหตุย่อย (Event) โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นทำการเปรียบเทียบรายคู่เหมือนกับการหาค่าน้ำหนักของสาเหตุ เมื่อได้ค่าน้ำหนัก ความสำคัญแล้วนำมาเข้าสมการวิเคราะห์หาค่าโอกาสการเกิดสาเหตุ ดังสมการที่ (1) และสมการที่ (2) โดยผลการวิจัยแสดงในตาราง 3

Priorities with respect to:
Assessing the Risk to Airborne Infection from HVAC in Operating Room
>Airflow Volume Test
>Fan_Low



สาเหตุจาก Airflow volume test-Fan (a)

Priorities with respect to:
Assessing the Risk to Airborne Infection from HVAC in Operating Room
>Airflow Volume Test
>Duct System_Low



สาเหตุจาก Airflow volume test-Duct system (b)

Priorities with respect to:
Assessing the Risk to Airborne Infection from HVAC in Operating Room
>Filter Installation Leak Test
>HEPA Filter_Leak_Damage



สาเหตุจาก Filter installation leak test-HEPA filter leak (c)

ภาพ 2 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรม Expert Choice V.11 ของแต่ละสาเหตุ

Priorities with respect to:
Assessing the Risk to Airborne Infection from HVAC in Operating Room
 >Room Pressurization Test
 >Result is more than specification

1_Airflow rate_Air change too high	.499	
2_Machine_Process_Exhaust is less than operating_setting	.168	
3_Return_Exhaust damper is closed less than setting	.333	
Inconsistency = 0.01 with 0 missing judgments.		

สาเหตุจาก Room pressurization test-Result is more than specification (d)

Priorities with respect to:
Assessing the Risk to Airborne Infection from HVAC in Operating Room
 >Airborne Particle Count Test
 >Out of Specification

1_Airflow Rate_Air change too low	.362	
2_Filter_HEPA filter dirty or dogged	.104	
3_The room is not clean_inadequate	.269	
4_Machine_Process_Activity high generate the particle	.202	
5_Room pressure too low	.064	
Inconsistency = 0.04 with 0 missing judgments.		

สาเหตุจาก Airborne particle count test-Out of specification (e)

Priorities with respect to:
Assessing the Risk to Airborne Infection from HVAC in Operating Room
 >Temperature and Relative Humidity Tests
 >Result is more than specification

1_Airflow Rate_Air change too low	.226	
2_Machine_Process_Activity is over generate heat load (sensible & Latent heat)	.378	
3_Outdoor air is intaked more than setting	.187	
4_The HVAC system has not heating coil or control incorrect	.209	
Inconsistency = 0.02 with 0 missing judgments.		

สาเหตุจาก Temperature and relative humidity tests-Result is more than specification (f)

ภาพ 2 น้ำหนักความสำคัญที่คำนวณได้จากการใช้โปรแกรม Expert Choice V.11 ของแต่ละสาเหตุ (ต่อ)

ยกตัวอย่างการอธิบายภาพ 2 สาเหตุจาก Airflow volume test-Fan (a) แสดงปัจจัยผลกระทบโดยการคำนวณน้ำหนักความสำคัญในแต่ละเมตริกซ์ของสาเหตุจากพัดลมของเครื่องปรับอากาศ (Fan) Gate 17 พบว่า ปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุดอันดับที่ 1 คือ Impeller/inlet dirty or clogged 0.305 (30.5%) อันดับที่ 2 คือ Loose pulleys/Broken belts 0.236 (23.6%)

อันดับที่ 3 คือ Obstructed fan inlets/Suction 0.167 (16.7%) อันดับที่ 4 คือ Fan static pressure is not enough 0.103 (10.3%) อันดับที่ 5 คือ No straight duct at fan outlet/Discharge 0.097 (9.7%) อันดับที่ 6 คือ Fan speed too low, VSD control 0.058 (5.8%) อันดับที่ 7 คือ Incorreced fan direction 0.034 (3.4%)

ตาราง 3 ระดับความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด

สาเหตุ	น้ำหนัก ความสำคัญ ของสาเหตุ	โอกาส ในการ เกิดสาเหตุ (%)	ระดับ โอกาส	ระดับความเสี่ยง
Gate 1 Airflow volume test	1.000	100.0	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 6 Airflow too low	0.994	99.4	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 17 Fan	0.674	67.4	7	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก
Gate 18 Duct system	0.738	73.8	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง
Gate 19 Filters	0.758	75.8	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง
Gate 20 Coils	0.804	80.4	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 7 Airflow too high	0.966	96.6	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 21 Fan	0.776	77.6	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง
Gate 22 Duct system	0.847	84.7	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 8 Electrical problem	0.727	72.7	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง
Gate 23 Electrical	0.727	72.7	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง
Gate 2 Filter installation leak test	0.915	91.5	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 9 Leak/Damage (HEPA filter)	0.696	69.6	7	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก
Gate 10 Over lifetime/Low efficiency (HEPA filter)	0.719	71.9	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง
Gate 3 Room pressurization test	0.914	91.4	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 11 Result is more than specification (out of specification)	0.722	72.2	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง

ตาราง 3 ระดับความเสี่ยงแบบน่าจะเป็นต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด (ต่อ)

	สาเหตุ	น้ำหนัก ความสำคัญ ของสาเหตุ	โอกาส ในการ เกิดสาเหตุ (%)	ระดับ โอกาส	ระดับความเสี่ยง
Gate 12	Result is less than specification (out of specification)	0.691	69.1	7	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก
Gate 4	Airborne particle count test	0.903	90.3	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 13	Result is high but not more than specification (Particle too high)	0.688	68.8	7	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก
Gate 14	Result is out of specification (Particle too high)	0.688	68.8	7	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก
Gate 5	Temperature and relative humidity tests	0.925	92.5	9	เสี่ยงอย่างยิ่ง
Gate 15	Result is more than specification (out of specification)	0.690	69.0	7	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก
Gate 16	Result is less than specification (out of specification)	0.757	75.7	8	เสี่ยงกว่าค่อนข้างมาก และค่อนข้าง มีความสำคัญอย่างยิ่ง

สรุปและอภิปรายผล

เทคนิคกระบวนการวิเคราะห์แผนภูมิต้นไม้แห่งความล้มเหลว (FTA) เป็นเครื่องมือที่สามารถวิเคราะห์สาเหตุของความล้มเหลว ทำให้ทราบถึงสาเหตุพื้นฐานของความล้มเหลวของสาเหตุตั้งต้นที่จะเกิดขึ้นได้ จากการวิเคราะห์พบว่าระบบปรับอากาศที่ส่งปริมาณลมต่ำกว่าที่ออกแบบ (Airflow too low) มีโอกาสในการเกิดความบกพร่องร้อยละ 99.4 เป็นสาเหตุที่มีความเสี่ยงสูงสุดต่อการติดเชื้อทางอากาศในห้องผ่าตัดและการนำเทคนิค AHP มาประยุกต์ใช้ร่วมกับ FTA โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Expert

Choice V.11 ในการคำนวณค่าน้ำหนักความสำคัญและค่าดัชนีความสอดคล้อง สามารถเปรียบเทียบค่าน้ำหนักความสำคัญของสาเหตุต่างๆ และคำนวณค่าโอกาสในการเกิดความบกพร่องได้ ผลการวิเคราะห์ชี้ให้เห็นว่าระดับความเสี่ยงของสาเหตุทั้งหมดมีระดับความเสี่ยงสูงอย่างยิ่งต่อการติดเชื้อทางอากาศจากระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัดพบว่า ปริมาณลมต่ำกว่าที่ออกแบบ มีโอกาสบกพร่อง ร้อยละ 99.4 โดยมีสาเหตุความน่าจะเป็นจากพัดลมของเครื่องปรับอากาศ บกพร่อง ร้อยละ 67.4

ระบบท่อลมบกพร่อง ร้อยละ 73.8 แผ่นกรองอากาศบกพร่อง ร้อยละ 75.8 คอยล์เย็นบกพร่อง ร้อยละ 80.4 มีสาเหตุมาจากคอยล์เย็นสกปรกหรือเกิดการอุดตัน (Dirty or clogged) อาจเกิดจากการไม่ได้ล้างทำความสะอาด โดยเฉพาะช่วงที่มีฝุ่นละอองขนาดเล็ก (Particulate matter: PM) ปริมาณสูงกว่าปกติในช่วงนั้นมีโอกาสที่แผ่นกรองอากาศเกิดการอุดตันมากขึ้นหรือไม่ได้เปลี่ยนแผ่นกรองอากาศตามรอบที่กำหนด ส่งผลให้คอยล์เย็นสกปรกหรือเกิดการอุดตันและไม่ทำความสะอาดคอยล์เย็นตามรอบที่กำหนด หากไม่ได้มีการดำเนินการแก้ไขจะส่งผลให้คอยล์เย็นเกิดการอุดตันและกลายเป็นแหล่งสะสมของเชื้อโรค เนื่องจากมีความเย็นและความชื้นที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของเชื้อโรค นอกจากนี้ การที่คอยล์เย็นสกปรกหรือเกิดการอุดตันส่งผลให้ระบบปรับอากาศส่งปริมาณลมที่น้อยกว่าที่ออกแบบ ส่งผลทำให้แรงดันอากาศในห้องลดลง ปริมาณฝุ่นในอากาศสูงขึ้น อีกทั้งยังส่งผลให้อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์สูงขึ้นกว่าที่ออกแบบไว้ ซึ่งทั้งหมดนี้เพิ่มความเสี่ยงต่อการติดเชื้อทางอากาศ จากสาเหตุความบกพร่องของระบบความร้อน ระบายอากาศ และปรับอากาศภายในห้องผ่าตัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Wagner & Schreiber (2014) และ Sukjit (2006) ที่พบว่าพฤติกรรมของการไหลของอากาศส่งผลต่ออุณหภูมิ ความชื้น และฝุ่นละอองภายในห้องสะอาด อีกทั้งงานวิจัยของ Khankari (2018), Cook & Int-Hout (2009) และ Schurk (2019) ที่พบว่า การออกแบบทิศทาง การไหลและปริมาณลมที่เหมาะสมสามารถลดการปนเปื้อนอนุภาคที่จะถูกพัดพาอนุภาคไปสัมผัสกับผู้ป่วยและลดความเสี่ยงต่อการติดเชื้อได้ ดังนั้น การจัดการและบำรุงรักษาระบบปรับอากาศและระบายอากาศในห้องผ่าตัดเป็นสิ่งสำคัญ ฝ่ายบำรุงรักษาเชิงป้องกันของห้องผ่าตัดต้องดำเนินการทดสอบประสิทธิภาพระบบปรับอากาศและระบายอากาศของห้องสะอาด การทดสอบทั้งหมดนี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่าระบบความร้อน ระบบปรับอากาศ และระบายอากาศ (HVAC) สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมภายในห้องผ่าตัดให้เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานสากล

ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการนำผลวิจัยไปใช้

ผู้ที่เกี่ยวข้องและฝ่ายบำรุงรักษาเชิงป้องกันของห้องผ่าตัดสามารถนำผลการศึกษาไปพิจารณาระบุและจัดการปัจจัยเสี่ยงได้อย่างมีประสิทธิภาพและพัฒนามาตรการป้องกันที่เหมาะสมในการปรับปรุงบำรุงรักษาห้องผ่าตัดให้มีประสิทธิภาพผ่านตามเกณฑ์มาตรฐานสากล NEBB (NEBB, 2009), ASHRAE 170 (ASHRAE, 2021) โดยมีการวางแผนการบำรุงรักษาและเปลี่ยนแผ่นกรองอากาศ เช่น เปลี่ยนแผ่นกรองอากาศ ชั้นที่ 1 (Pre filter) ทุกๆ 1 เดือน แผ่นกรองอากาศ ชั้นที่ 2 (Medium filter) ทุกๆ 3 เดือน แผ่นกรองอากาศประสิทธิภาพสูง (HEPA filter) ทุกๆ 1 ปี รวมทั้งมีการตรวจสอบความดันตกคร่อมของแผ่นกรองอากาศ ทุกๆ 1 เดือน หรือตามการใช้งานของแต่ละสถานที่ ประเด็นสำคัญควรวางแผนบำรุงรักษาเชิงป้องกันและการทำความสะอาดคอยล์เย็นตามรอบที่กำหนด

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

ควรทำการศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประเมินความเสี่ยงระหว่างกระบวนการวิเคราะห์ลำดับขั้นเชิงและกระบวนการประเมินความเสี่ยงแบบอื่นๆ เช่น การประยุกต์วิธีกระบวนการวิเคราะห์แบบฟัซซี่ (Fuzzy logic) เพื่อช่วยลดความคลุมเครือของผู้ประเมินในกระบวนการตัดสินใจประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจ นอกจากนี้ ควรพิจารณาปัจจัยกวนเพิ่มเติมที่มีผลต่อการประเมินความเสี่ยง เพื่อให้การศึกษาในอนาคตมีความครอบคลุมและสามารถประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงได้ดียิ่งขึ้น เช่น จำนวนเวลาการใช้ห้องผ่าตัด การเข้า-ออกของบุคลากร จำนวนบุคลากรในห้องผ่าตัด ร่วมกับการใช้วิธีการประเมินความเสี่ยงแบบฟัซซี่ สามารถช่วยลดความคลุมเครือ เพิ่มความแม่นยำในการตัดสินใจ และสร้างความน่าเชื่อถือของการประเมินความเสี่ยงในระบบ HVAC ของห้องผ่าตัดได้ดียิ่งขึ้น ทั้งนี้ยังเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบการดูแลสุขภาพให้มีมาตรฐานและปลอดภัยยิ่งขึ้นสำหรับผู้ป่วยและบุคลากรทางการแพทย์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการประเมินและให้คำแนะนำในการดำเนินการวิจัยครั้งนี้ รวมถึงทุกภาคส่วนที่สนับสนุนการวิจัยให้สำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

- ASHRAE. (2021). *ANSI/ASHRAE/ASHE standard 170-2021*, ventilation of health care facilities. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Cook, G., & Int-Hout, D. (2009). Air motion control in the hospital operating room. *ASHRAE Journal*, 51(3), 30-36.
- Hyun, K. C., Min, S., Choi, H., Park, J., & Lee, I. M. (2015). Risk analysis using Fault-Tree Analysis (FTA) and Analytic Hierarchy Process (AHP) applicable to shield TBM tunnels. *Tunnelling and underground space technology*, 49, 121-129.
- Khankari, K. (2018). Hospital operating room ventilation systems. *ASHRAE Journal*, 60(6), 16-26.
- NEBB. (2009). *Procedural standards for certified testing of cleanrooms*. (3rd ed.). Gaithersburg, Maryland: National Environmental Balancing Bureau.
- NRLS. (2023, August 19). *Patient safety goals*. Retrieved August 21, 2023, from <https://thai-nrls.org/>. (in Thai)
- Saaty, T. L. (1996). *Decision making with dependence and feedback: The analytic network process* (Vol. 4922, No. 2). Pittsburgh: RWS publications.
- Schurk, D. (2019). Hospital operating rooms: Conditioning for the environment of critical care. *ASHRAE Journal*, 61(10), 16-22.
- Sukjit, E. (2006). *Numerical study of turbulence effects on behaviors of airflow, temperature, humidity and particles in a clean room*. Thesis of Master of Engineering Major in Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. (in Thai)
- Wagner, J. A., & Schreiber, K. J. (2014). Improving operating room contamination control. *ASHRAE Journal*, 56(2), 18-27.