กลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลตและผลกระทบทางชีวภาพต่อผู้ปฏิบัติงาน

Energy Transfer Mechanisms of Ultraviolet Radiation and Biological Effects on Workers

นภสินธุ์ ชำนาญ[1*]

Noppasin Chamnan[1*]

[1] สาขาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยเฉลิมกาญจนา

[1] Occupational Safety and Health, Faculty of Public Health, Chalermkarnchana University

[*] E-mail: noppasinchamnan@gmail.com

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์กลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต โดยเชื่อมโยงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพลังงานของโฟตอนกับกระบวนการดูดกลืนพลังงานของสารชีวโมเลกุล ตลอดจนศึกษาผลกระทบทางชีวภาพและแนวทางการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสรังสีในสภาพแวดล้อมการทำงาน การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงเอกสาร ดำเนินการโดยรวบรวมข้อมูลจากตำราทางวิทยาศาสตร์ บทความวิชาการ บทความวิจัย วิทยานิพนธ์ และเอกสารจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์ เปรียบเทียบ และสังเคราะห์ตามประเด็นที่กำหนด ผลการวิจัยพบว่า การถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลตมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานของโฟตอน ซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและการดูดกลืนพลังงานของสารชีวโมเลกุล กระบวนการดังกล่าวสามารถนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง ความเสียหายต่อสารพันธุกรรม DNA และการเกิดอนุมูลออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา นอกจากนี้ การประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตจำเป็นต้องพิจารณาความเข้มรังสี ปริมาณรังสีสะสม และปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพร่วมกัน ผลการสังเคราะห์แสดงให้เห็นว่า การบูรณาการหลักการทางฟิสิกส์และกลไกทางชีวภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นพื้นฐานในการตรวจวัด ประเมินความเสี่ยง และกำหนดมาตรการควบคุมการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อส่งเสริมความปลอดภัยและลดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานได้อย่างเหมาะสม

คำสำคัญ : รังสีอัลตราไวโอเลต, การถ่ายเทพลังงาน, การดูดกลืนรังสี, การประเมินความเสี่ยง

Abstract

This study aims to analyze the energy transfer mechanisms of ultraviolet (UV) radiation by integrating the physical properties of electromagnetic waves and photon energy with the energy absorption processes of biomolecules. It also explores the biological effects of UV radiation and approaches to assessing exposure risks in occupational environments. This study employed a documentary research approach, collecting information from scientific textbooks, academic articles, research papers, theses, and relevant institutional publications. The collected information was analyzed, compared, and synthesized according to the established research themes. The findings indicate that the energy transfer mechanisms of UV radiation are associated with wavelength, frequency, and photon energy, which influence electronic energy transitions and energy absorption by biomolecules. These processes may lead to photochemical reactions, DNA damage, and the generation of Reactive Oxygen Species (ROS). Furthermore, the assessment of UV exposure risks requires consideration of irradiance, radiant exposure, and biologically effective exposure. The synthesis indicates that the integration of physical principles and biological mechanisms can provide a foundation for monitoring, assessing exposure risks, and establishing control measures for ultraviolet (UV) radiation exposure, thereby promoting occupational safety and reducing adverse health effects among workers.

Keywords: Ultraviolet Radiation, Energy Transfer, Radiation Absorption, Risk Assessment

บทนำ

รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Radiation) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึง 400 นาโนเมตร มีแหล่งกำเนิดทั้งจากธรรมชาติ โดยเฉพาะดวงอาทิตย์ และจากแหล่งกำเนิดประดิษฐ์ที่นำมาใช้ในกระบวนการทางอุตสาหกรรม การแพทย์ และการฆ่าเชื้อด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต รังสีชนิดนี้มีความสำคัญทั้งในด้านฟิสิกส์และชีววิทยา เนื่องจากสามารถถ่ายทอดพลังงานไปยังสสารและก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เคมี และชีวภาพได้ โดยเฉพาะเมื่อมีปฏิสัมพันธ์กับสารชีวโมเลกุลภายในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ดังนั้น การทำความเข้าใจกลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลตจึงมีความสำคัญต่อการประเมินความเสี่ยงและการกำหนดมาตรการป้องกันการสัมผัสรังสีในสภาพแวดล้อมการทำงาน

ในด้านคุณสมบัติทางฟิสิกส์ รังสีอัลตราไวโอเลตสามารถจำแนกตามช่วงความยาวคลื่นออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ รังสี UVA มีความยาวคลื่น 315 ถึง 400 นาโนเมตร รังสี UVB มีความยาวคลื่น 280 ถึง 315 นาโนเมตร และรังสี UVC มีความยาวคลื่น 100 ถึง 280 นาโนเมตร รังสีแต่ละประเภทมีคุณสมบัติด้านความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานแตกต่างกัน โดยพลังงานของโฟตอนมีความสัมพันธ์กับความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ รังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีพลังงานต่อโฟตอนสูงกว่ารังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า คุณสมบัติดังกล่าวเป็นพื้นฐานสำคัญในการอธิบายความสามารถของรังสีในการเกิดปฏิสัมพันธ์กับอะตอมและโมเลกุล รวมถึงการเปลี่ยนแปลงทางเคมีที่อาจเกิดขึ้นภายหลังการดูดกลืนพลังงาน เมื่อรังสีอัลตราไวโอเลตตกกระทบสารหรือเนื้อเยื่อชีวภาพ พลังงานของโฟตอนอาจถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลเป้าหมาย ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Electronic Energy Transition) จากสถานะพลังงานต่ำไปสู่สถานะพลังงานที่สูงขึ้น กระบวนการดังกล่าวเกิดขึ้นเมื่อพลังงานที่ได้รับสอดคล้องกับความแตกต่างระหว่างระดับพลังงานที่อนุญาตของโมเลกุล เมื่อโมเลกุลเข้าสู่สถานะกระตุ้น (Excited State) อาจเกิดกระบวนการคายพลังงาน การเปลี่ยนสถานะอิเล็กทรอนิกส์ หรือปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง (Photochemical Reactions) ซึ่งเป็นกลไกสำคัญที่เชื่อมโยงพลังงานของรังสีเข้ากับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและชีวภาพ กระบวนการถ่ายเทพลังงานดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับความสามารถในการดูดกลืนรังสีของตัวกลาง โดยสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการดูดกลืนแสงของเบียร์–แลมเบิร์ต (Beer–Lambert Law) ซึ่งเป็นหลักการที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของแสงที่ผ่านตัวกลางกับคุณสมบัติการดูดกลืนของตัวกลางและระยะทางที่แสงเดินทางผ่าน นอกจากนี้ สารชีวโมเลกุลแต่ละชนิดยังมีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมีและลักษณะของพันธะภายในโมเลกุล โดยเฉพาะกรดนิวคลีอิกและโปรตีนซึ่งมีองค์ประกอบที่สามารถดูดกลืนรังสีในช่วงอัลตราไวโอเลตได้ ความเข้าใจเกี่ยวกับค่าการดูดกลืนแสงของสารชีวโมเลกุลจึงมีความสำคัญต่อการอธิบายกลไกการถ่ายเทพลังงานและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อโครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์ นอกจากคุณสมบัติการดูดกลืนแล้ว การพิจารณาผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลตยังจำเป็นต้องคำนึงถึงความเข้มรังสี (Irradiance) ซึ่งหมายถึงกำลังของรังสีที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ โดยเป็นปัจจัยที่แสดงถึงระดับพลังงานรังสีที่เข้าสู่พื้นที่รับรังสีในช่วงเวลาหนึ่ง ขณะเดียวกัน ปริมาณรังสีสะสม (Radiant Exposure) เป็นปริมาณที่แสดงพลังงานรังสีที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตลอดระยะเวลาการสัมผัส ซึ่งมีความสัมพันธ์กับทั้งความเข้มรังสีและระยะเวลาที่ได้รับรังสี แนวคิดทั้งสองประการมีความสำคัญต่อการประเมินการสัมผัสรังสีในสภาพแวดล้อมการทำงาน เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับรังสีที่มีความเข้มและระยะเวลาการสัมผัสแตกต่างกันตามลักษณะของงานและแหล่งกำเนิดรังสี

อย่างไรก็ตาม การประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพจากรังสีอัลตราไวโอเลตไม่สามารถพิจารณาจากความเข้มรังสีหรือปริมาณรังสีสะสมทางกายภาพเพียงอย่างเดียว เนื่องจากรังสีแต่ละช่วงความยาวคลื่นมีประสิทธิผลในการก่อให้เกิดผลกระทบทางชีวภาพแตกต่างกัน จึงจำเป็นต้องพิจารณาการประเมินปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพ (Biologically Effective Exposure) ซึ่งเป็นแนวคิดที่นำความแตกต่างของประสิทธิผลทางชีวภาพตามช่วงความยาวคลื่นมาประกอบการประเมิน โดยใช้ฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักตามประสิทธิผลทางชีวภาพ (Biological Weighting Function) เพื่อให้สามารถสะท้อนความเสี่ยงต่อผลกระทบทางชีวภาพที่ต้องการประเมินได้เหมาะสมยิ่งขึ้น เช่น การเกิดผิวหนังแดงจากรังสีและผลกระทบต่อดวงตา ในด้านชีวภาพ การดูดกลืนพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเลตสามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและหน้าที่ของสารชีวโมเลกุล โดยเฉพาะสารพันธุกรรม DNA ซึ่งอาจเกิดความเสียหายจากปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง *(จุติวิบูลย์สุข, 2556, น.110–127)* ยกตัวอย่างเช่น การเกิดไดเมอร์ของไพริมิดีน ชนิดไซโคลบิวเทน (Cyclobutane Pyrimidine Dimers; CPDs) โดยเฉพาะจากรังสี UVB ขณะที่รังสี UVA สามารถกระตุ้นสารไวแสงภายในเซลล์และส่งเสริมการเกิดอนุมูลอิสระหรือ Reactive Oxygen Species (ROS) ซึ่งอาจก่อให้เกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน (Oxidative Stress) และความเสียหายต่อ DNA โปรตีน และไขมันภายในเซลล์ *(Cadet & Douki, 2018, pp.1816–1841)* กระบวนการเหล่านี้อาจส่งผลต่อการทำงานของเซลล์ การอักเสบของเนื้อเยื่อ ความเสื่อมสภาพของผิวหนัง และเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดโรคที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต *(Matsumura & Ananthaswamy, 2004, pp.298–301)* ในมิติด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย การสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตเป็นปัจจัยอันตรายทางกายภาพ (Physical Hazard) ที่พบได้ในสภาพแวดล้อมการทำงานหลายประเภท เช่น งานกลางแจ้งที่ได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์ งานเชื่อมโลหะที่เกิดรังสีอัลตราไวโอเลตจากกระบวนการอาร์ก และงานที่ใช้หลอดกำเนิดรังสีอัลตราไวโอเลตเพื่อการฆ่าเชื้อหรือกระบวนการทางอุตสาหกรรม ผู้ปฏิบัติงานที่สัมผัสรังสีโดยไม่มีมาตรการควบคุมที่เหมาะสมอาจมีความเสี่ยงต่อความผิดปกติของผิวหนังและดวงตา *(พรทิพย์ ภูวบัณฑิตสิน, 2548, น.1–23)* ดังนั้น การประเมินความเสี่ยงจึงควรพิจารณาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดรังสี ช่วงความยาวคลื่น ความเข้มรังสี ระยะเวลาการสัมผัส ปริมาณรังสีสะสม และประสิทธิผลทางชีวภาพของรังสีร่วมกัน

จากความสำคัญดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษากลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลตโดยเชื่อมโยงองค์ความรู้ทางฟิสิกส์ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพลังงานโฟตอน การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน กลไกการดูดกลืนแสงตามกฎเบียร์–แลมเบิร์ต คุณสมบัติการดูดกลืนของสารชีวโมเลกุล ตลอดจนหลักการประเมินความเข้มรังสี ปริมาณรังสีสะสม และปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพ

เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีกับการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ และนำองค์ความรู้ดังกล่าวไปประยุกต์ใช้เป็นพื้นฐานในการประเมินและจัดการความเสี่ยงจากการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตในสภาพแวดล้อมการทำงานด้านอาชีวอนามัยและความปลอดภัย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาและอธิบายคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของรังสีอัลตราไวโอเลต รวมถึงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น ความถี่ พลังงานของโฟตอน และการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน

2. เพื่อวิเคราะห์กลไกการดูดกลืนและการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลตที่มีปฏิสัมพันธ์กับสารชีวโมเลกุล ตลอดจนผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อโครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์

3. เพื่อศึกษาแนวทางการประเมินความเข้มรังสี ปริมาณรังสีสะสม และปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพ

สมมติฐาน

การศึกษากลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลตตั้งอยู่บนพื้นฐานของหลักฟิสิกส์และปฏิสัมพันธ์ระหว่างรังสีกับสารชีวโมเลกุล โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของโฟตอน การดูดกลืนพลังงาน และการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ จึงกำหนดสมมติฐานเชิงแนวคิดเพื่อใช้เป็นกรอบในการวิเคราะห์และสังเคราะห์องค์ความรู้ ดังต่อไปนี้

1. การดูดกลืนโฟตอนของรังสีอัลตราไวโอเลตโดยโมเลกุลเป้าหมายสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน และนำไปสู่การเกิดสถานะกระตุ้นของโมเลกุล

2. ความสามารถในการดูดกลืนรังสีอัลตราไวโอเลตของสารชีวโมเลกุลมีความสัมพันธ์กับโครงสร้างทางเคมี ความเข้มข้น และคุณสมบัติการดูดกลืนของสาร ซึ่งส่งผลต่อการถ่ายเทพลังงานภายในตัวกลาง

3. การถ่ายเทพลังงานจากรังสีอัลตราไวโอเลตไปยังสารชีวโมเลกุลสามารถกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง ความเสียหายต่อสารพันธุกรรม และการเกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อโครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์

4. การประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตจำเป็นต้องพิจารณาความเข้มรังสี ระยะเวลาการสัมผัส ปริมาณรังสีสะสม และประสิทธิผลทางชีวภาพร่วมกัน เพื่อให้สามารถประเมินความเสี่ยงต่อสุขภาพในสภาพแวดล้อมการทำงานได้อย่างเหมาะสม

กรอบแนวคิดการวิจัย

การศึกษากลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต มุ่งเน้นการเชื่อมโยงองค์ความรู้ทางฟิสิกส์เข้ากับกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ โดยพิจารณาคุณสมบัติของรังสีอัลตราไวโอเลต ได้แก่ ความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานของโฟตอน ตลอดจนกลไกการดูดกลืนและการถ่ายเทพลังงานระหว่างรังสีกับโมเลกุลทางชีวภาพ ซึ่งอาจนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ DNA การเกิดภาวะเครียดออกซิเดชัน และความเสียหายต่อเซลล์และเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ยังพิจารณาปัจจัยด้านปริมาณรังสีสะสมและระยะเวลาการสัมผัส เพื่อเชื่อมโยงไปสู่การประเมินความเสี่ยงและการกำหนดมาตรการป้องกันตามหลักอาชีวอนามัยและความปลอดภัย

จากกรอบแนวคิดเรื่อง กลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต สามารถกำหนดตัวแปรต้น (Independent Variables) และตัวแปรตาม (Dependent Variables) ได้ดังภาพที่ 1

ตัวแปรต้น (Independent Variables)	ตัวแปรตาม (Dependent Variables)
1. ชนิดของรังสีอัลตราไวโอเลต (UVA, UVB และ UVC)	**1. ความเสียหายของสารพันธุกรรม** (DNA Damage)
2. ความยาวคลื่นและพลังงานของโฟตอน (Wavelength / Photon Energy)	**2. ภาวะเครียดออกซิเดชัน** (Oxidative Stress / ROS)
3. ความเข้มของรังสี (Irradiance)	**3. ความเสียหายของเซลล์และเนื้อเยื่อ** (Cellular and Tissue Damage)
4. ระยะเวลาการสัมผัสรังสี (Exposure Duration)	**4. ผลกระทบต่อผิวหนังและดวงตา** (Skin and Ocular Effects)
5. ปริมาณรังสีสะสม (Radiant Exposure)	**5. ระดับคงวามเสี่ยงต่อสุขภาพ** (Health Risk)

ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัย

การวิจัยครั้งนี้การวิจัยเอกสาร (Documentary Research) โดยมุ่งศึกษาและสังเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต อาศัยการรวบรวมข้อมูลจากหนังสือตำราทางวิทยาศาสตร์ บทความวิชาการ บทความวิจัย และเอกสารจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง เพื่ออธิบายหลักการทางฟิสิกส์ กลไกการดูดกลืนพลังงาน และผลกระทบทางชีวภาพ โดยมีขั้นตอนการศึกษาดังนี้

1. รูปแบบการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงเอกสาร โดยมุ่งศึกษาหลักการทางฟิสิกส์และชีวฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติของรังสีอัลตราไวโอเลต การถ่ายเทพลังงาน และกระบวนการดูดกลืนพลังงานของสารชีวโมเลกุล ตลอดจนผลกระทบที่อาจเกิดขึ้นต่อเซลล์และเนื้อเยื่อของมนุษย์ การศึกษาครอบคลุมถึงปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสัมผัสรังสี ได้แก่ ความยาวคลื่น ความเข้มรังสี และระยะเวลาการสัมผัส เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของรังสีกับผลกระทบทางชีวภาพ นอกจากนี้ ยังมุ่งวิเคราะห์แนวทางการประเมินความเสี่ยงและมาตรการควบคุมการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตในสภาพแวดล้อมการทำงาน โดยอาศัยการรวบรวม วิเคราะห์ และสังเคราะห์ข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้อง

2. แหล่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

รวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการและแหล่งข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ได้แก่ หนังสือและตำราด้านฟิสิกส์ ควอนตัมฟิสิกส์ ชีวฟิสิกส์ และโฟโตชีววิทยา บทความวิจัยและบทความวิชาการที่เกี่ยวข้อง ตลอดจนเอกสารและแนวทางจากองค์การอนามัยโลก (WHO) และคณะกรรมาธิการระหว่างประเทศว่าด้วยการป้องกันรังสีที่ไม่มีไอออไนซ์ (ICNIRP) โดยใช้ฐานข้อมูลทางวิชาการ เช่น PubMed, ScienceDirect และ Google Scholar ในการสืบค้นข้อมูล

3. เครื่องมือที่ใช้ในการศึกษา

ใช้แบบบันทึกข้อมูลจากเอกสารเพื่อรวบรวมและจัดหมวดหมู่สาระสำคัญ โดยพิจารณาความถูกต้องของหลักการทางฟิสิกส์ สมการที่เกี่ยวข้อง คุณสมบัติการดูดกลืนรังสีของสารชีวโมเลกุล และข้อมูลด้านการประเมินการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต รวมถึงใช้ตารางเปรียบเทียบข้อมูลเพื่อสนับสนุนการวิเคราะห์และสังเคราะห์องค์ความรู้

4. การสืบค้นและรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยดำเนินการสืบค้นและรวบรวมข้อมูลจากเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับรังสีอัลตราไวโอเลต โดยกำหนดคำสำคัญในการสืบค้นทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ครอบคลุมประเด็นที่ศึกษา ได้แก่ รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Radiation) พลังงานของโฟตอน (Photon Energy) การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน (Electronic Energy Transition) กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์–แลมเบิร์ต (Beer–Lambert Law) การดูดกลืนรังสีของสารชีวโมเลกุล (Biomolecular Absorption) ความเข้มรังสี (Irradiance) ปริมาณรังสีสะสม (Radiant Exposure) และปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพ (Biologically Effective Exposure) จากนั้นดำเนินการคัดเลือกเอกสารที่มีเนื้อหาสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และขอบเขตของการวิจัย โดยพิจารณาจากความน่าเชื่อถือของแหล่งข้อมูล ความถูกต้องทางวิชาการ และความเกี่ยวข้องกับประเด็นที่ศึกษา

5. การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล

นำข้อมูลที่รวบรวมได้มาวิเคราะห์และจัดลำดับตามประเด็นการศึกษา ได้แก่ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของรังสีอัลตราไวโอเลต การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์–แลมเบิร์ต ค่าการดูดกลืนแสงของสารชีวโมเลกุล ความเข้มรังสี ปริมาณรังสีสะสม และการประเมินปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพ จากนั้นเปรียบเทียบและเชื่อมโยงองค์ความรู้ทางฟิสิกส์กับกลไกการเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพ เพื่อสังเคราะห์เป็นคำอธิบายเชิงวิชาการและแนวทางการประยุกต์ใช้ในการประเมินความเสี่ยงจากการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตในสภาพแวดล้อมการทำงาน

ผลการศึกษา

จากการศึกษาและสังเคราะห์เอกสารทางวิชาการเกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต สามารถอธิบายองค์ความรู้ทางฟิสิกส์และกลไกทางชีวภาพได้เป็น 5 ประเด็น ได้แก่ คุณสมบัติของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและพลังงานโฟตอน การดูดกลืนและการถ่ายเทพลังงาน การปฏิสัมพันธ์ระหว่างรังสีกับสารชีวโมเลกุล การประเมินปริมาณรังสี และผลกระทบทางชีวภาพ ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของรังสีอัลตราไวโอเลต

รังสีอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet Radiation: UV) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 100 ถึง 400 นาโนเมตร สามารถจำแนกออกเป็น UVA, UVB และ UVC โดยแต่ละช่วงมีความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานของโฟตอนแตกต่างกัน การอธิบายคุณสมบัติดังกล่าวสามารถใช้สมการพื้นฐานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ดังนี้

1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่น

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ด้วยอัตราเร็วแสงในสุญญากาศ โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความยาวคลื่นตามสมการ

$$f = c/\lambda \tag{1}$$

โดย f คือความถี่ของคลื่น มีหน่วยเป็น Hz, c คืออัตราเร็วแสงในสุญญากาศ มีหน่วยเป็น m/s และ λ คือความยาวคลื่น มีหน่วยเป็น m แสดงให้เห็นว่าความถี่แปรผกผันกับความยาวคลื่น กล่าวคือ รังสีที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีความถี่สูงกว่ารังสีที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า ซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการอธิบายความแตกต่างของพลังงานในรังสี UVA, UVB และ UVC

1.2 พลังงานของโฟตอน

ตามทฤษฎีควอนตัมของแสง *(วิไลวรรณ ภูละออ, 2542)* พลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถูกถ่ายทอดในรูปของโฟตอน (Photon) โดยพลังงานของโฟตอนหนึ่งตัวสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E = hf \tag{2}$$

โดย E คือพลังงานของโฟตอน มีหน่วยเป็น J และ h คือค่าคงที่ของพลังค์ มีหน่วยเป็น $J \cdot s$ หากนำสมการ (1) แทนในสมการ (2) จะได้

$$E = hc/\lambda \quad (3)$$

ในสมการที่ (3) แสดงความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างพลังงานของโฟตอนกับความยาวคลื่น โดยพลังงานของโฟตอนแปรผกผันกับความยาวคลื่น ดังนั้น UVC จึงมีพลังงานต่อโฟตอนสูงกว่า UVB และ UVA ตามลำดับ *(สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย, 2551)* ในกรณีที่ต้องการแสดงพลังงานในหน่วยอิเล็กตรอนโวลต์ eV สามารถใช้ความสัมพันธ์

$$E(eV) = \frac{E(J)}{1.6 \times 10^{-19}} \quad (4)$$

จากสมการที่ (3) และ (4) สามารถคำนวณช่วงพลังงานของรังสีแต่ละประเภทได้ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ช่วงความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต

ประเภท	ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	พลังงานโดยประมาณ (อิเล็กตรอนโวลต์)
UVA	315–400	3.10–3.94
UVB	280–315	3.94–4.43
UVC	100–280	4.43–12.40

2. กลไกการดูดกลืนและการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต

เมื่อรังสีอัลตราไวโอเลตเคลื่อนที่เข้าสู่ตัวกลางหรือเนื้อเยื่อชีวภาพ พลังงานของโฟตอนอาจถูกดูดกลืนโดยโมเลกุลเป้าหมาย ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอน กระบวนการดังกล่าวสามารถอธิบายด้วยหลักการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและกลศาสตร์ควอนตัม

2.1 การเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอน

เมื่อโมเลกุลดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเหมาะสม อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนจากระดับพลังงานเริ่มต้นไปสู่ระดับพลังงานที่สูงขึ้น โดยมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\Delta E = E_2 - E_1 = hf = hc/\lambda \quad (5)$$

โดย E_1 และ E_2 คือระดับพลังงานเริ่มต้นและระดับพลังงานหลังการกระตุ้น ตามลำดับ การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้โมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited State) ซึ่งอาจเกิดกระบวนการต่อเนื่อง เช่น การคายพลังงาน การเปลี่ยนสถานะอิเล็กทรอนิกส์ หรือปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง ทั้งนี้ การดูดกลืนจะเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อพลังงานโฟตอนสอดคล้องกับการเปลี่ยนระดับพลังงานของโมเลกุล

2.2 กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์–แลมเบิร์ต

การลดลงของความเข้มรังสีเมื่อผ่านตัวกลางที่มีคุณสมบัติดูดกลืน *(โมไนย ไกรฤกษ์, 2544)* สามารถอธิบายได้ด้วยกฎการดูดกลืนแสงของเบียร์–แลมเบิร์ต (Beer–Lambert Law) โดยเขียนในรูปสมการได้ดังนี้

$$I(x) = I_0 e^{-\mu_a x} \tag{6}$$

โดย I_0 คือ ความเข้มรังสีเริ่มต้น มีหน่วยเป็น W/m^2 , $I(x)$ คือ ความเข้มรังสีหลังผ่านตัวกลางเป็นระยะทาง x และ μ_a คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น ในสมการที่ (6) แสดงให้เห็นว่าความเข้มรังสีลดลงตามระยะทางที่เดินทางผ่านตัวกลาง โดยขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดกลืนของตัวกลาง ทั้งนี้ในเนื้อเยื่อชีวภาพจริงอาจเกิดการกระเจิงของรังสีร่วมด้วย จึงต้องใช้แบบจำลองที่เหมาะสมเมื่อประเมินการกระจายรังสีภายในเนื้อเยื่อ

2.3 ค่าการดูดกลืนแสงของสารชีวโมเลกุล

การดูดกลืนรังสีของสารชีวโมเลกุลสามารถอธิบายเพิ่มเติมด้วยสมการเบียร์–แลมเบิร์ต *(Harris & Lucy, 2015)* ในรูปของค่าการดูดกลืนแสง ดังนี้

$$A_l = \varepsilon c_m l \tag{7}$$

เมื่อ A_l คือค่าการดูดกลืนแสง (ตัวแปรไร้หน่วย), ε คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงโมล มีหน่วยเป็น $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$, c_m คือความเข้มข้นของสาร มีหน่วยเป็น $mol \cdot L^{-1}$ และ l คือระยะทางที่แสงผ่านสารละลายในหน่วยเซนติเมตร ในสมการที่ (7) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารและระยะทางที่แสงผ่าน โดยสามารถนำมาใช้อธิบายพื้นฐานการดูดกลืนรังสีของสารชีวโมเลกุล เช่น กรดนิวคลีอิกและโปรตีน

3. ความเข้มรังสีและปริมาณพลังงานที่ได้รับ

นอกจากพลังงานต่อโฟตอนแล้ว การประเมินผลกระทบจากรังสีอัลตราไวโอเลตยังต้องพิจารณาความเข้มรังสี จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบและระยะเวลาการสัมผัสร่วมด้วย

3.1 ความเข้มรังสี

ความเข้มรังสี (Irradiance) หมายถึง กำลังของรังสีที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ *(สุมามาลย์ บรรเทิง, 2548)* สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$E_e = P/A \tag{8}$$

โดย E_e คือความเข้มรังสี มีหน่วยเป็น W/m^2 , P คือกำลังรังสี มีหน่วยเป็น W และ A คือพื้นที่รับรังสี มีหน่วยเป็น m^2 ในสมการที่ (8) แสดงให้เห็นว่าความเข้มรังสีขึ้นอยู่กับกำลังของรังสีที่ตกกระทบและพื้นที่รับรังสี ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญในการประเมินระดับการสัมผัสรังสีในสถานประกอบการ

3.2 ปริมาณรังสีสะสม

ปริมาณรังสีสะสม (Radiant Exposure) เป็นค่าที่แสดงพลังงานรังสีที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ตลอดระยะเวลาการสัมผัส สามารถคำนวณได้จาก

$$H = \int_0^t E_e(t)\,dt \tag{9}$$

ในกรณีที่ความเข้มรังสีคงที่ตลอดระยะเวลาการสัมผัส สมการสามารถลดรูปได้เป็น

$$H = E_e t \tag{10}$$

โดย H คือปริมาณรังสีสะสม มีหน่วยเป็น J/m^2 และ t คือระยะเวลาการสัมผัส ในหน่วยวินาที ในสมการ (9) และ (10) แสดงให้เห็นว่าปริมาณรังสีสะสมเพิ่มขึ้นตามความเข้มรังสีและระยะเวลาการสัมผัส จึงเป็นพื้นฐานสำคัญในการประเมินการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตของผู้ปฏิบัติงาน

4. การประเมินปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพ

การประเมินความเสี่ยงจากรังสีอัลตราไวโอเลตจำเป็นต้องพิจารณาความแตกต่างของประสิทธิผลทางชีวภาพในแต่ละช่วงความยาวคลื่น เนื่องจากรังสีที่มีพลังงานโฟตอนแตกต่างกันอาจก่อให้เกิดผลกระทบทางชีวภาพแตกต่างกัน การคำนวณปริมาณรังสีที่ถ่วงน้ำหนักตามประสิทธิผลทางชีวภาพสามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$H_{eff} = \int_0^t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_\lambda(\lambda,t)\,S(\lambda)\,d\lambda\,dt \tag{11}$$

โดย H_{eff} คือปริมาณรังสีที่มีการถ่วงน้ำหนักทางชีวภาพ มีหน่วยเป็น J/m^2 , $E_\lambda(\lambda,t)$ คือความเข้มรังสีเชิงสเปกตรัม มีหน่วยเป็น W/m^2 และ $S(\lambda)$ คือฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักตามประสิทธิผลทางชีวภาพ ตามสมการที่ (11) แสดงให้เห็นว่า การประเมินปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพไม่ได้พิจารณาเฉพาะความเข้มของรังสีที่ได้รับเท่านั้น แต่ยังคำนึงถึงความแตกต่างของประสิทธิผลทางชีวภาพในแต่ละช่วงความยาวคลื่นด้วย โดยนำค่าความเข้มรังสีเชิงสเปกตรัมมาคูณกับฟังก์ชันถ่วงน้ำหนักทางชีวภาพ แล้วทำการรวมค่าตลอดช่วงความยาวคลื่นและระยะเวลาการสัมผัส ผลลัพธ์ที่ได้จึงสะท้อนปริมาณรังสีที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักตามประสิทธิผลทางชีวภาพ ซึ่งสามารถนำไปใช้ประกอบการประเมินความเสี่ยงและพิจารณามาตรการป้องกันอันตรายจากการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลตได้ แสดงให้เห็นว่าการประเมินความเสี่ยงทางชีวภาพควรพิจารณาทั้งความเข้มรังสีในแต่ละช่วงความยาวคลื่นและประสิทธิผลของรังสีต่อผลทางชีวภาพที่กำลังประเมิน เช่น การเกิดผิวหนังแดงจากรังสี (Erythema) หรือผลกระทบต่อดวงตา *(WHO, 1994)*

อภิปรายผล

จากการศึกษาและสังเคราะห์องค์ความรู้พบว่า กลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลตมีความสัมพันธ์กับความยาวคลื่น ความถี่ และพลังงานของโฟตอน ซึ่งเป็นปัจจัยกำหนดความสามารถในการกระตุ้นการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและการเกิดปฏิกิริยาเคมีเชิงแสง เมื่อรังสีถูกดูดกลืนโดยสารชีวโมเลกุล เช่น DNA และโปรตีน อาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างและหน้าที่ของเซลล์ โดย UVA มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการเกิดอนุมูลออกซิเจนที่ไวต่อปฏิกิริยา (ROS) ขณะที่ UVB สามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อ DNA ได้โดยตรง นอกจากนี้ การใช้กฎการดูดกลืนแสงของเบียร์–แลมเบิร์ต ช่วยอธิบายการดูดกลืนพลังงานของสาร แต่การประยุกต์ใช้กับเนื้อเยื่อจริงต้องคำนึงถึงการกระเจิงรังสีร่วมด้วย ในด้านการประเมินความเสี่ยง ความเข้มรังสีและปริมาณรังสีสะสมเป็นปัจจัยสำคัญในการแสดงระดับการสัมผัส ขณะที่การประเมินปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพช่วยสะท้อนความแตกต่างของการตอบสนองต่อรังสีแต่ละช่วงความยาวคลื่น ดังนั้น การประเมินและควบคุมความเสี่ยงจากรังสีอัลตราไวโอเลตในสถานประกอบการจึงควรพิจารณาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิด ปริมาณรังสี ระยะเวลาสัมผัส และผลกระทบทางชีวภาพร่วมกัน

ข้อเสนอแนะในการวิจัยครั้งต่อไป

การวิจัยครั้งต่อไปควรมุ่งเน้นการต่อยอดองค์ความรู้เกี่ยวกับกลไกการถ่ายเทพลังงานของรังสีอัลตราไวโอเลต ทั้งในระดับโมเลกุลและระดับเนื้อเยื่อ โดยอาจศึกษาผ่านการทดลองตรวจวัดความเข้มรังสีและปริมาณรังสีสะสมจากแหล่งกำเนิดในสถานประกอบการ ควบคู่กับการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์การดูดกลืนและการกระจายพลังงานภายในเนื้อเยื่อชีวภาพ นอกจากนี้ ควรศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างช่วงความยาวคลื่นกับผลกระทบต่อ DNA โปรตีน ผิวหนัง และดวงตา รวมถึงพัฒนาวิธีการประเมินปริมาณรังสีที่มีประสิทธิผลทางชีวภาพให้เหมาะสมกับลักษณะการสัมผัสแต่ละประเภท ผลการศึกษาดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาแนวทางการตรวจวัด การประเมินความเสี่ยง และมาตรการควบคุมการสัมผัสรังสีอัลตราไวโอเลต เพื่อส่งเสริมความปลอดภัยและลดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

จุติวิบูลย์สุข, อ. (2556). การใช้สารต้านอนุมูลอิสระจากธรรมชาติในการป้องกันผิวหนังจากการถูกทำลายโดยรังสีอัลตราไวโอเลต. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 5*(10), 110–127.

พรทิพย์ ภูวบัณฑิตสิน. (2548). Ultraviolet protection; Past, present and future. วารสารโรคผิวหนัง, 21(1), 1–23.

วิไลวรรณ ภูละออ. (2542). *ฟิสิกส์ของคลื่น: ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับคลื่นกล คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แสง และทฤษฎีควอนตัมเบื้องต้น*. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

โมไนย ไกรฤกษ์. (2544). *วิศวกรรมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า*. กรุงเทพฯ: พิมพ์สวย.

สุมามาลย์ บรรเทิง. (2548). *การศึกษาความเข้มรังสีอุลตราไวโอเลตจากดวงอาทิตย์ที่มีผลต่อผิวหนังของมนุษย์ในบริเวณประเทศไทย โดยอาศัยข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม* [วิทยานิพนธ์]. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.

สมเจตน์ ภัทรพานิชชัย. (2551). *การศึกษาสเปกตรัมของรังสีอัลตราไวโอเลตที่จังหวัดนครปฐม* [วิทยานิพนธ์]. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร.

Cadet, J., & Douki, T. (2018). Formation of UV-induced DNA damage contributing to skin cancer development. *Photochemical & Photobiological Sciences, 17*, 1816–1841. doi:10.1039/C7PP00395A

Harris, D. C., & Lucy, C. A. (2015). *Quantitative chemical analysis* (9th ed.). New York, NY: W. H. Freeman.

Matsumura, Y., & Ananthaswamy, H. N. (2004). Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin. *Toxicology and Applied Pharmacology, 195*(3), 298–308. doi:10.1016/j.taap.2003.08.019

World Health Organization. (1994). *Ultraviolet radiation*. Geneva, Switzerland: World Health Organization (WHO) .