

ความก้าวหน้าและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเลเซอร์ในการแพทย์สมัยใหม่

Advancements and Applications of Laser Technology in Modern Medicine

อาทิตย์ เรืองศรี¹, พัฒน์ศรีณีย์ เลหาไพบุณย์², อรณิชา คงวุฒิ^{3*}

Artit Ruangsri¹, Phatsaran Laohhapaiboon², Ornicha Kongwut^{3*}

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์ความรู้เกี่ยวกับแนวทางการใช้เลเซอร์เพื่อการแพทย์ โดยกล่าวถึงหลักการทำงานของเลเซอร์ คุณสมบัติสำคัญ กลไกที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อ ประเภทของเลเซอร์ที่ใช้ในทางการแพทย์ และการประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆ เช่น การรักษามะเร็ง การวินิจฉัย และรักษาโรค รวมถึงความปลอดภัยในการใช้งาน เลเซอร์มีบทบาทสำคัญในการแพทย์สมัยใหม่เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่น ทำให้ถูกนำมาใช้ในการวินิจฉัยและรักษาโรคหลากหลาย บทความนี้รวบรวมความรู้พื้นฐานของเลเซอร์ทางการแพทย์ตั้งแต่หลักการทำงาน ปฏิสัมพันธ์กับเนื้อเยื่อ และการประยุกต์ใช้ในสาขาต่างๆ เช่น ศัลยกรรม ทันตกรรม จักษุวิทยา โดยเลเซอร์มีประสิทธิภาพสูงในการรักษาโรคมะเร็ง โรคผิวหนัง โรคตา และโรคช่องปาก อย่างไรก็ตาม การใช้เลเซอร์ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยและป้องกันผลข้างเคียงจากรังสีด้วย แนวโน้มในอนาคต เทคโนโลยีเลเซอร์จะพัฒนาสู่ความแม่นยำมากขึ้นและบูรณาการกับเทคนิคอื่นๆ เพื่อให้ได้วิธีการที่มีประสิทธิภาพและจำเพาะต่อผู้ป่วยแต่ละราย การพัฒนาต้องมีการศึกษาวิจัยทั้งกลไกระดับเซลล์และการใช้ทางคลินิกในวงกว้างเพื่อพัฒนาการรักษาโรคเรื้อรังที่ท้าทายให้ได้ผลดียิ่งขึ้น ความก้าวหน้าของเลเซอร์ทางการแพทย์จึงต้องอาศัยความร่วมมือจากสหสาขาวิชา ซึ่งจะช่วยยกระดับคุณภาพการรักษาพยาบาลได้อย่างก้าวกระโดดต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: เลเซอร์, การแพทย์สมัยใหม่, เทคโนโลยี

Citation:

Ruangsri A, Laohhapaiboon P, Kongwut O. Advancements and applications of laser technology in modern medicine. Health Sci J Thai 2024; 6(4): 42-48. (in Thai); <https://doi.org/10.55164/hsjt.v6i4.268713>

¹ โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี 71190

² หจก.บุญพาวาสนาสง 84 เขตบางแค กรุงเทพมหานคร 10160

³ สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี 71190

¹ The Demonstration School of Kanchanaburi Rajabhat University, Kanchanaburi Rajabhat University Kanchanaburi 71190

² Boonpawassanasong Partnership, 84 Bangkake, Bangkok, 10160

³ Department of Physics, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University, 71190

Abstract

This article aims to synthesize knowledge about medical laser applications, discussing laser principles, key properties, tissue interactions, types of medical lasers, and their use in various fields such as cancer treatment, diagnosis, and disease treatment, including safety considerations. Lasers play a crucial role in modern medicine due to their outstanding properties, being used in diagnosing and treating various diseases. This article compiles fundamental knowledge of medical lasers, from operating principles and tissue interactions to applications in fields like surgery, dentistry, and ophthalmology. Lasers are highly effective in treating cancer, skin diseases, eye disorders, and oral conditions. However, laser use must consider safety and prevent radiation side effects. Future trends indicate laser technology will develop greater precision and integrate with other techniques to provide efficient and patient-specific treatments. Development requires research into both cellular mechanisms and broad clinical applications to improve treatment of challenging chronic diseases. Advancement in medical lasers necessitates multidisciplinary collaboration, which will significantly elevate the quality of healthcare in the future.

Keywords: Laser, Modern medicine, Technology

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีเลเซอร์ได้มีการพัฒนาก้าวหน้าไปอย่างรวดเร็วทั้งในด้านประสิทธิภาพความแม่นยำและความปลอดภัย ส่งผลให้เลเซอร์ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ อย่างแพร่หลายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในวงการแพทย์ ซึ่งเลเซอร์ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยพัฒนาการวินิจฉัยและรักษาโรคให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น⁽¹⁾ คุณสมบัติเฉพาะตัวของแสงเลเซอร์เช่น ความเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีเฟสตรงกัน (Coherence) ความเป็นลำแสงขนานที่มีการกระจายตัวต่ำ (Collimation) และความสามารถในการโฟกัสให้มีความเข้มสูงทำให้เลเซอร์สามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายในการแพทย์สมัยใหม่⁽²⁾

เลเซอร์มีบทบาทสำคัญในการยกระดับมาตรฐานการรักษาพยาบาลให้สูงขึ้น ช่วยเพิ่มความแม่นยำในการผ่าตัด ลดการสูญเสียเลือด ทำให้แผลหายเร็ว และฟื้นตัวได้เร็วกว่าการผ่าตัดแบบเดิม นอกจากนี้เลเซอร์ยังถูกใช้ในการวินิจฉัยโรคเช่น การถ่ายภาพรังสี การเพิ่มความคมชัดของภาพ และใช้ร่วมกับเทคนิคทางการแพทย์อื่นๆ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ละเอียดและแม่นยำยิ่งขึ้น จึงกล่าวได้ว่าเลเซอร์เป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์อย่างมากในการพัฒนาคุณภาพการดูแลสุขภาพของผู้ป่วย⁽³⁾

บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ความรู้เกี่ยวกับแนวทางการใช้เลเซอร์เพื่อการแพทย์ โดยจะกล่าวถึงหลักการทำงานของเลเซอร์ คุณสมบัติที่สำคัญ ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นกับเนื้อเยื่อ รวมถึงประเภทของเลเซอร์ที่ใช้ในทางการแพทย์ นอกจากนี้ยังจะอธิบายการประยุกต์ใช้เลเซอร์ในสาขาต่างๆ ทางกายภาพ เช่นการรักษาเมเร็งด้วยเลเซอร์ ตลอดจนข้อควรระวังและมาตรฐานความปลอดภัยในการใช้งาน เพื่อให้ผู้อ่านเกิดความเข้าใจและเห็นภาพรวมของการนำเทคโนโลยีเลเซอร์มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการดูแลสุขภาพ⁽⁴⁾

หลักการพื้นฐานของเลเซอร์ในการแพทย์สมัยใหม่

1) ปฏิสัมพันธ์ของแสงเลเซอร์กับเนื้อเยื่อชีวภาพ

กลไกการทำงานของเลเซอร์ในการแพทย์คือการอาศัยปฏิสัมพันธ์ของแสงเลเซอร์กับเนื้อเยื่อชีวภาพ เมื่อแสงเลเซอร์ตกกระทบเนื้อเยื่อจะเกิดปรากฏการณ์สำคัญ 4 ประการได้แก่ การสะท้อน (Reflection) การกระเจิง (Scattering) การดูดกลืน (Absorption) และการส่งผ่าน (Transmission) ปรากฏการณ์เหล่านี้ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์ และคุณสมบัติทางกายภาพของเนื้อเยื่อแต่ละชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและสัมประสิทธิ์การกระเจิงแสง ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดระยะทางเชิงแสง (Optical penetration depth) ของแสงเลเซอร์ในเนื้อเยื่อ⁽⁵⁾

การดูดกลืนแสงเป็นปฏิสัมพันธ์ที่สำคัญที่สุดในการประยุกต์ใช้เลเซอร์ทางการแพทย์เมื่อเนื้อเยื่อดูดกลืนโฟตอนของแสงเลเซอร์ พลังงานแสงจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนทำให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อเพิ่มสูงขึ้นและส่งผลกระทบต่อเนื้อเยื่ออย่างจำเพาะเจาะจง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ระยะเวลาในการฉายแสง และคุณสมบัติการนำความร้อนของเนื้อเยื่อด้วย ผลกระทบเชิงความร้อนจากการดูดกลืนแสงเลเซอร์ที่พบได้ในการแพทย์ได้แก่ การสลายหรือตัดเนื้อเยื่อ (Ablation/incision) การทำลายเนื้อเยื่อด้วยความร้อน (Thermal necrosis) การสมานแผลหรือการสร้างเนื้อเยื่อใหม่ (Coagulation) และการกระตุ้นการสร้างคอลลาเจน (Collagen remodeling)

นอกจากผลทางความร้อนแล้วแสงเลเซอร์ยังสามารถมีปฏิสัมพันธ์กับเนื้อเยื่อในรูปแบบอื่นๆ เช่น การเกิดปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากแสง (Photochemical reaction) ซึ่งเป็นหลักการสำคัญของการบำบัดด้วยแสง (Phototherapy) และการกระตุ้นสารไวแสงเพื่อทำลายเซลล์เฉพาะเป้าหมายดังเช่น ในกระบวนการโฟโตไดนามิกเทอราปี (Photodynamic therapy) และในด้าน

การรักษาด้วยแสงความเข้มต่ำ (Low-level laser therapy) ก่อให้เกิดปฏิกิริยาชีวเคมีในเชิงชีวกระตุ้น (Photobiomodulation) เพื่อลดการอักเสบและเพิ่มการซ่อมแซมเนื้อเยื่อ⁽⁶⁾

2) คุณสมบัติของเลเซอร์ที่ใช้ในการแพทย์สมัยใหม่

2.1) ความยาวคลื่นและการดูดกลืนในเนื้อเยื่อ

ความยาวคลื่นของแสงเลเซอร์เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดระดับการดูดกลืนแสงของเนื้อเยื่อชีวภาพ โดยองค์ประกอบหลักในเนื้อเยื่อที่มีบทบาทในการดูดกลืนแสงได้แก่ น้ำ เมลาโนอิน ฮีโมโกลบิน และคอลลาเจนช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานทางการแพทย์จึงอยู่ในช่วง "หน้าต่างการรักษา" (Therapeutic window) ประมาณ 600-1,200 นาโนเมตร ซึ่งแสงจะสามารถทะลุทะลวงเข้าไป ในเนื้อเยื่อได้ลึก โดยมีการดูดกลืนและการกระเจิงต่ำ

การเลือกความยาวคลื่นของเลเซอร์ให้เหมาะสมกับกลุ่มเป้าหมายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ และความจำเพาะเจาะจงในการรักษาเช่น เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นประมาณ 532 นาโนเมตร จะถูกดูดซับได้ดีโดยฮีโมโกลบินจึงเหมาะสำหรับการรักษาความผิดปกติของหลอดเลือด ในขณะที่เลเซอร์ความยาวคลื่นประมาณ 1,064 นาโนเมตร จะสามารถทะลุทะลวงผ่านผิวหนังได้ลึกและถูกดูดกลืนได้ดีโดยน้ำในชั้นผิวหนังส่วนล่างจึงนิยมใช้ในการกำจัดขนหรือลดริ้วรอย⁽⁷⁾ นอกจากนี้เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 9,300-10,600 นาโนเมตร ซึ่งอยู่ในช่วงอินฟราเรดไกล จะถูกดูดกลืนได้อย่างมากโดยน้ำในชั้นผิวหนังทำให้เกิดการระเหยและการสลายผิวหนังชั้นบาง (Superficial skin ablation) จึงมักใช้ในทางเวชสำอางเพื่อผลัดเซลล์ผิวหรือลดริ้วรอย

2.2) กำลังและระยะเวลาในการฉายแสง

กำลังหรือความเข้มของแสงเลเซอร์และระยะเวลาในการฉายแสง เป็นพารามิเตอร์สำคัญที่จะกำหนดผลกระทบเชิงความร้อนและเชิงกลต่อเนื้อเยื่อเป้าหมาย เลเซอร์ที่ใช้ในทางศัลยกรรมมักจะมีกำลังสูงถึง 10-100 วัตต์ และใช้ระยะเวลาฉายแสงสั้นมากเพียง 100 ไมโครวินาทีถึง 1 มิลลิวินาที เพื่อให้เกิดการสลายและตัดเนื้อเยื่ออย่างรวดเร็วและแม่นยำ ในทางกลับกันเลเซอร์ความเข้มต่ำ (Low-level laser) ที่ใช้เพื่อกระตุ้นกระบวนการชีวภาพเช่น ลดการอักเสบ เร่งการสมานแผล จะมีกำลังอยู่ที่ 5-500 มิลลิวัตต์ และใช้เวลาฉายแสงนานกว่าประมาณ 30 วินาที ถึง 1 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาชีวกระตุ้นในระดับเซลล์ได้ โดยไม่ทำให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อ

การกำหนดกำลังและระยะเวลาในการฉายแสงเลเซอร์อย่างเหมาะสมสามารถทำได้โดยอาศัยทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในเนื้อเยื่อชีวภาพ (Bioheat transfer theory) เพื่อประมาณการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉพาะที่และการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อโดยคำนึงถึงคุณสมบัติเชิงความร้อนและเชิงแสงของเนื้อเยื่อในแต่ละชนิดด้วย⁽⁸⁾ การเลือกพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของแสงเลเซอร์ทั้งความยาวคลื่น กำลัง และระยะเวลาจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ

การรักษา ลดการบาดเจ็บของเนื้อเยื่อข้างเคียง และเพิ่มความปลอดภัยในการใช้งานเลเซอร์ทางคลินิกได้

3) กลไกทางชีวภาพของเลเซอร์ต่อเซลล์และเนื้อเยื่อ

แสงเลเซอร์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับเซลล์และเนื้อเยื่อได้หลายรูปแบบทั้งในระดับโมเลกุล เซลล์และเนื้อเยื่อ ซึ่งนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงทางชีวภาพและสรีรวิทยาที่หลากหลายโดยกลไกหลักของผลกระทบทางชีวภาพจากเลเซอร์แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ผลทางความร้อน (Photothermal Effect) ผลทางเคมีเนื่องจากแสง (Photochemical Effect) และผลทางกลศาสตร์เนื่องจากแสง (Photomechanical Effect)

ผลทางความร้อนเกิดจากการดูดกลืนโฟตอนของแสงเลเซอร์โดยโครโมฟอร์ (Chromophore) ภายในเซลล์หรือเนื้อเยื่อ ทำให้เกิดการสั่นและเพิ่มพลังงานจลน์ของโมเลกุล ส่งผลให้อุณหภูมิเฉพาะที่เพิ่มสูงขึ้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอย่างรวดเร็วสามารถทำให้เกิดการสลายตัวของโปรตีนและการเสียสภาพของเยื่อหุ้มเซลล์นำไปสู่การตายของเซลล์ในที่สุด กระบวนการเหล่านี้เป็นพื้นฐานของการใช้เลเซอร์ในการตัดและทำลายเนื้อเยื่ออย่างเฉพาะเจาะจงเช่น ในการผ่าตัดเลเซอร์และการรักษามะเร็งด้วยความร้อน (Laser hyperthermia)⁽⁹⁾

ผลทางเคมีเนื่องจากแสงเกิดจากปฏิกิริยาเคมีหรือชีวเคมีที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์โดยอาจเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหรือการทำงานของโมเลกุลชีวภาพสำคัญเช่น การกระตุ้นเอนไซม์ การปลดปล่อยสารสื่อชีวโมเลกุล (Biological mediators) หรือการเปลี่ยนแปลงการแสดงออกของยีน⁽¹⁰⁾ ผลทางชีวเคมีเหล่านี้มีบทบาทสำคัญในการบำบัดด้วยแสง (Phototherapy) เช่น ในการส่งเสริมการสังเคราะห์คอลลาเจน การกระตุ้นการสร้างหลอดเลือดใหม่ และการลดการอักเสบ ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ในการรักษาแผล บาดแผลเรื้อรัง และภาวะข้ออักเสบต่างๆ

ผลทางกลศาสตร์เนื่องจากแสงเกิดจากการเปลี่ยนรูปพลังงานแสงเป็นคลื่นกระแทกหรือคลื่นความดันที่เคลื่อนที่ผ่านเนื้อเยื่อซึ่งมักเกิดขึ้นเมื่อใช้เลเซอร์พัลส์สั้นพิเศษที่มีความเข้มสูงมากเช่น Qswitched laser หรือ Ultrashort Pulse Laser คลื่นความดันที่เกิดขึ้นสามารถทำให้เกิดการแตกของเซลล์ (Photodisruption) หรือการระเบิดของเมตาสีหรือวัสดุแปลกปลอม (Selective photothermolysis) ซึ่งเป็นหลักการสำคัญในการรักษาต้อหิน การเอาหินปูนในหลอดเลือดหัวใจออก และการกำจัดรอยสักหรือรอยดำ เป็นต้น⁽¹¹⁾

การประยุกต์ใช้เลเซอร์ในการวินิจฉัยโรคทางการแพทย์สมัยใหม่

1) กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์

กล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ (Confocal laser scanning microscopy) เป็นเทคนิคการถ่ายภาพที่มีความละเอียดสูงและมีความสามารถในการสร้างภาพ 3 มิติของเนื้อเยื่อ

ชีวภาพโดยอาศัยหลักการสแกนด้วยลำแสงเลเซอร์และการใช้รูเล็กๆ (Pinhole aperture) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนจากแสงนอกโฟกัสทำให้ได้ภาพที่มีความคมชัดเฉพาะในระนาบโฟกัสที่ต้องการ⁽¹²⁾ ข้อดีของกล้องจุลทรรศน์คอนโฟคอลเลเซอร์ “ได้แก่ความสามารถในการถ่ายภาพเนื้อเยื่อที่มีชีวิตโดยไม่ต้องเตรียมตัวอย่าง (Non-invasive imaging) การมีความละเอียดสูงถึงระดับ Sub-micron ทั้งในแนวราบและแนวลึก และการสร้างภาพ 3 มิติของโครงสร้างเนื้อเยื่อจากภาพตัดขวางหลายๆ ระนาบในแนวลึกได้ (Optical sectioning)

2) การถ่ายภาพรังสีด้วยเลเซอร์

2.2) เทคนิคการถ่ายภาพรังสีด้วยเลเซอร์

การถ่ายภาพรังสีด้วยเลเซอร์ (Laser radiation imaging) เป็นเทคนิคการสร้างภาพทางการแพทย์ที่อาศัยปฏิสัมพันธ์ระหว่างแสงเลเซอร์กับเนื้อเยื่อเพื่อให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูงและความคมชัดลึกโดยเทคนิคหลักที่ใช้ในปัจจุบันได้แก่ Optical Coherence Tomography (OCT), Photoacoustic Imaging (PAI) และ Laser Speckle Contrast Imaging (LSCI)⁽¹³⁾

OCT เป็นเทคนิคที่อาศัยการแทรกสอดของแสงเลเซอร์ความเข้มต่ำที่สะท้อนกลับจากเนื้อเยื่อที่มีความลึกต่างๆ เพื่อสร้างภาพตัดขวางคล้ายอัลตราซาวด์ที่มีความละเอียดสูงถึงระดับไมครอนใช้ในการตรวจโครงสร้างและความผิดปกติของชั้นเนื้อเยื่อต่างๆ เช่น จอประสาทตา ผิวหนัง และผนังหลอดเลือด ส่วน PAI เป็นเทคนิคไฮบริดที่รวมหลักการของเลเซอร์และคลื่นเสียงความถี่สูงโดยอาศัยการดูดกลืนพลังงานจากเลเซอร์พัลส์ของโครโมฟอรในเนื้อเยื่อ ทำให้เกิดการขยายตัวเชิงความร้อนและปล่อยคลื่นอะคูสติกออกมาซึ่งสามารถตรวจวัดและประมวลผลเป็นภาพได้ PAI ใช้สำหรับสร้างภาพของเส้นเลือด และการทำงานของระบบหลอดเลือดรวมถึงระบุตำแหน่งของเนื้องอกที่มีการสร้างหลอดเลือดผิดปกติได้⁽¹⁴⁾

ในขณะที่ LSCI เป็นเทคนิคถ่ายภาพที่ไม่รุกราน (Non-Invasive Imaging) ซึ่งใช้ Laser Speckle Pattern ที่เกิดจากการกระเจิงของแสงเลเซอร์เมื่อกระทบกับเนื้อเยื่อมาวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของเซลล์เม็ดเลือด และการไหลเวียนเลือดในเนื้อเยื่อบริเวณผิว เช่น ผิวหนังและเยื่อเมือก โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของเซลล์เม็ดเลือดกับความคมชัดของ Speckle pattern⁽¹⁵⁾ LSCI สามารถใช้ประเมินความผิดปกติของการไหลเวียนเลือดในโรคต่างๆ เช่น โรคหลอดเลือดสมอง โรคเบาหวาน และเนื้องอกผิวหนัง

2.2) ข้อดีในการวินิจฉัยมะเร็งและโรคอื่นๆ

เทคนิคการถ่ายภาพรังสีด้วยเลเซอร์มีข้อดีหลายประการในการประยุกต์ใช้เพื่อการวินิจฉัยโรคโดยเฉพาะมะเร็งและความผิดปกติของหลอดเลือด เนื่องจากสามารถสร้างภาพโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเยื่อที่มีความละเอียดสูงคล้ายกับการตรวจทางพยาธิวิทยา แต่ไม่จำเป็นต้องตัดชิ้นเนื้อออกมา ทำให้ลดความเสี่ยงและ

ความไม่สะดวกในการวินิจฉัยลงได้ นอกจากนี้ภาพที่ได้ยังมีความคมชัดลึกสามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของเนื้อเยื่อในระดับต่างๆ ตั้งแต่ผิวหนังจนถึงใต้ผิวหนังได้พร้อมกัน⁽¹⁶⁾

PAI ที่สามารถใช้ตรวจหา มะเร็งเต้านมระยะเริ่มต้นได้โดยอาศัยความผิดปกติของเส้นเลือดที่เกิดขึ้นรอบๆ ก้อนเนื้องอกและความแตกต่างของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงระหว่างเนื้อเยื่อเต้านมปกติและมะเร็ง ทำให้สามารถสร้างภาพตัดขวางที่มีความคมชัดของต้นตอเนื้องอกได้เมื่อนำมาใช้ร่วมกับเทคนิคอัลตราซาวด์หรือเอกซเรย์เต้านม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับมะเร็งระยะเริ่มแรกมากขึ้นได้⁽¹⁷⁾

สำหรับ LSCI นั้นมีประโยชน์ในการวินิจฉัยโรคหลอดเลือดหัวใจ โรคหลอดเลือดสมอง ภาวะแทรกซ้อนจากเบาหวานที่เท้า และการติดตามการตอบสนองต่อการรักษามะเร็ง เนื่องจากสามารถสร้างภาพของการไหลเวียนโลหิตในระดับจุลภาคแบบ Real-time และไม่รุกราน เมื่อนำข้อมูลการไหลเวียนเลือดปกติในอวัยวะต่างๆ มาเปรียบเทียบ จะสามารถบ่งชี้ถึงความผิดปกติของหลอดเลือดในระยะเริ่มต้นและติดตามการเปลี่ยนแปลงของการไหลเวียนเลือดในระหว่างการดำเนินของโรคหรือการตอบสนองต่อการรักษาได้⁽¹⁸⁾

3) ออปติคัลโคฮีเรนซ์โทโมกราฟี (Optical Coherence Tomography: OCT)

3.1) หลักการของ OCT ในการสร้างภาพตัดขวางของเนื้อเยื่อ

เป็นเทคนิคการถ่ายภาพทางการแพทย์แบบไม่รุกราน (Non-Invasive Imaging) ที่อาศัยการสะท้อนของแสงเลเซอร์ความเข้มต่ำในย่านอินฟราเรดใกล้จากเนื้อเยื่อชีวภาพที่มีความลึกต่างๆ มาสร้างภาพตัดขวางคล้ายการอัลตราซาวด์ที่มีความละเอียดสูงระดับไมโครเมตร หลักการพื้นฐานของ OCT คือการวัดความแตกต่างของเวลาและความเข้มของแสงที่สะท้อนกลับจากโครงสร้างเนื้อเยื่อที่ตำแหน่งและความลึกต่างๆ โดยอาศัยเทคนิคการแทรกสอดของแสง (Optical interferometry)⁽¹⁹⁾

ในทางปฏิบัติ OCT จะใช้แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์หรือไดโอดเปล่งแสงชนิดความกว้างแถบกว้าง (Broadband light source) เพื่อให้ได้แสงที่มีความยาวคลื่นต่อเนื่องในช่วงอินฟราเรดใกล้ แสงนี้จะถูกแยกออกเป็น 2 ลำ โดยลำหนึ่งจะส่องไปยังเนื้อเยื่อเป้าหมาย ส่วนอีกลำหนึ่งจะส่องไปยังกระจกอ้างอิงซึ่งสามารถเลื่อนตำแหน่งเพื่อปรับระยะทางเดินแสงได้ แสงที่สะท้อนกลับจากเนื้อเยื่อและกระจกอ้างอิงจะถูกนำมารวมกันเพื่อเกิดสัญญาณการแทรกสอดซึ่งจะถูกตรวจวัดโดยตัวรับแสงเมื่อเลื่อนตำแหน่งของกระจกอ้างอิงที่ระยะต่างๆ ก็จะเกิดสัญญาณแทรกสอดที่รับได้จากแสงสะท้อนที่มีความลึกต่างๆ ในเนื้อเยื่อ เมื่อประมวลผลข้อมูลความเข้มของสัญญาณเทียบกับความลึกก็จะได้ภาพตัดขวาง (Cross-sectional image) ที่มีความละเอียดสูงของเนื้อเยื่อในระนาบตั้ง⁽²⁰⁾

3.2) การใช้ OCT ในการวินิจฉัยโรคทางจักษุวิทยาและโรคผิวหนัง

ปัจจุบัน OCT ถูกนำมาประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในการตรวจวินิจฉัยโรคทางจักษุวิทยาโดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวข้องกับจอประสาทตาและชั้นใต้จอประสาทตา เนื่องจากความสามารถในการสร้างภาพรายละเอียดโครงสร้างจุลภาคของเนื้อเยื่อในลูกตาได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีความละเอียดและความลึกมากกว่าการตรวจด้วยกล้องจุลทรรศน์หรือเครื่องมือทางจักษุวิทยาแบบดั้งเดิม อีกทั้งยังไม่ต้องสัมผัสโดยตรงกับลูกตาทำให้ผู้ป่วยไม่เจ็บและไม่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ

การศึกษาพบว่า OCT มีประโยชน์อย่างมากในการวินิจฉัยและติดตามโรคที่พบบ่อย เช่น โรคหลอดเลือดจอประสาทตาตีบ (Retinal vein occlusion) โดยสามารถแสดงภาพการบวมน้ำและเลือดออกใต้จอประสาทตาได้อย่างชัดเจน และประเมินการตอบสนองต่อการรักษาได้อย่างแม่นยำ⁽²¹⁾ นอกจากนี้ OCT ยังช่วยวินิจฉัยภาวะผิดปกติของจุดรับภาพโพเวีย (Macular disorders) ต่างๆ เช่น หลุมจอประสาทตา (Macular hole) จอประสาทตาหลุดลอก (Retinal detachment) รูรั่วของหลอดเลือด (Vascular leakage) และเยื่อหุ้มตาหนาตัว (Epiretinal membrane) ได้ตั้งแต่ระยะแรก ทำให้สามารถเลือกแนวทางการรักษาได้เหมาะสมและทันเวลา

การประยุกต์ใช้เลเซอร์ในการรักษาทางการแพทย์สมัยใหม่

1) การรักษาเนื้อเยื่อด้วยเลเซอร์

กลไกของเลเซอร์ในการทำลายเซลล์มะเร็ง เลเซอร์ถูกนำมาใช้ในการรักษาเนื้อเยื่อหลายประเภทโดยอาศัยกลไกที่หลากหลายในการทำลายเซลล์มะเร็งอย่างจำเพาะเจาะจงขึ้นอยู่กับชนิดของเลเซอร์ พารามิเตอร์ที่ใช้ และวิธีการนำส่งพลังงานเลเซอร์ไปยังเนื้อเยื่อ กลไกหลักๆ ที่เกี่ยวข้องได้แก่ ผลทางความร้อน (Thermal effects) ผลทางกลศาสตร์เชิงแสง (Optomechanical effects) และปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากแสง (Photochemical reactions)⁽²²⁾

ผลทางความร้อนจากเลเซอร์เกิดจากการดูดกลืนพลังงานแสงโดยโครโมฟอร์ (Chromophores) เป้าหมายในเนื้อเยื่อเช่น เม็ดสีเมลานิน ฮีโมโกลบิน และน้ำ ส่งผลให้เกิดความร้อนเฉพาะที่สูงอย่างรวดเร็วนำไปสู่การสลายตัวของเซลล์มะเร็งโดยตรง (Direct cell death) หรือการทำลายหลอดเลือดที่ไปเลี้ยงเนื้อเยื่อ (Vascular destruction) เลเซอร์ที่มักใช้ในการรักษาเนื้อเยื่อโดยอาศัยผลทางความร้อนเช่น Nd:YAG⁽²³⁾ Laser, Diode laser และ CO₂ laser โดยต้องมีการกำหนดพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น ความยาวคลื่น ความเข้ม และระยะเวลาในการฉายแสงให้เหมาะสมเพื่อให้เกิดการสลายเฉพาะในบริเวณเป้าหมายโดยไม่ทำลายเนื้อเยื่อปกติโดยรอบ

ผลทางกลศาสตร์เชิงแสงของเลเซอร์ที่ใช้ในการรักษาเนื้อเยื่อได้แก่ กระบวนการ Photodisruption และ Laser-induced shockwaves ซึ่งเกิดจากการใช้เลเซอร์พัลส์สั้นพิเศษเช่น

Femtosecond laser และ Nanosecond laser ที่มีความเข้มสูงมาก ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะอย่างรวดเร็วของเนื้อเยื่อเป้าหมาย เป็นพลาสมาและเกิดคลื่นกระแทกความดันสูงส่งผลให้เกิดการระเบิดและสลายตัวของโครงสร้างเซลล์ อย่างทันทีทันใด เลเซอร์ชนิดนี้จึงเหมาะสำหรับการตัดและทำลายเนื้อเยื่อที่มีขนาดเล็กและอยู่ในตำแหน่งที่เข้าถึงยาก

ส่วนปฏิกิริยาเคมีเนื่องจากแสงที่ใช้ในการรักษามะเร็งมักเป็นการกระตุ้นสารไวแสง หรือยาเคมีบำบัดด้วยแสงเลเซอร์เพื่อเพิ่มความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งอย่างจำเพาะเจาะจงเช่น ในกระบวนการ Photodynamic therapy (PDT) ที่ใช้เลเซอร์กระตุ้นสารไวแสงให้ปล่อยออกซิเจนอะตอมเดี่ยวที่มีฤทธิ์ในการทำลายเซลล์มะเร็งหรือในการ Photothermal therapy (PTT) ที่ใช้อนุภาคนาโนเป็นตัวกลางในการดูดกลืนและเปลี่ยนแสงเลเซอร์เป็นความร้อนเพื่อฆ่าเซลล์มะเร็งโดยตรง ปฏิบัติการเหล่านี้ต้องอาศัยความจำเพาะ ในการสะสมของสารไวแสงในเนื้อเยื่อและการกำหนดพารามิเตอร์ของเลเซอร์ที่เหมาะสมเพื่อให้เกิดการทำลายเซลล์มะเร็งอย่างมีประสิทธิภาพโดยมีผลข้างเคียงน้อย

ความปลอดภัยและข้อควรระวังในการใช้เลเซอร์ทางการแพทย์สมัยใหม่

1) ผลกระทบของรังสีเลเซอร์ต่อดวงตาและผิวหนัง

แม้ว่าเลเซอร์จะมีประโยชน์มากมายในทางการแพทย์ แต่รังสีของมันก็อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพได้หากใช้อย่างไม่ถูกต้องหรือขาดการป้องกันที่เหมาะสม อวัยวะที่มีความเสี่ยงสูงสุดต่ออันตรายจากเลเซอร์ได้แก่ ดวงตา และผิวหนังเนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับแสงและพลังงานจากเลเซอร์โดยตรง⁽²⁴⁾

ผลกระทบของเลเซอร์ต่อดวงตานั้นขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น ความเข้ม และระยะเวลาในการสัมผัสรังสี โดยเลเซอร์ที่มีช่วงความยาวคลื่นในย่านรังสีอัลตราไวโอเล็ต (UV) และอินฟราเรด (IR) จะถูกดูดกลืนโดยกระจกตาและจอประสาทตาได้มากกว่าแสงที่ตามองเห็น จึงมีโอกาสทำลายเนื้อเยื่อส่วนหน้าและส่วนหลังของลูกตาได้ง่าย อาการบาดเจ็บของดวงตาเนื่องจากเลเซอร์ที่พบได้ ได้แก่ ตาพร่ามัว เห็นจุดดำหรือแสงกะพริบ ปวดตา ตาแดง รุมาตาผิดปกติ จนถึงภาวะจอประสาทตาลอกหรือบวมในรายที่ได้รับรังสีปริมาณมากซึ่งอาจนำไปสู่ตาบอด หรือสูญเสียการมองเห็นถาวรได้หากไม่ได้รับการรักษาที่ทันท่วงที

2) มาตรการป้องกันสำหรับบุคลากรทางการแพทย์และผู้ป่วย

เพื่อลดความเสี่ยงต่ออันตรายจากเลเซอร์ในทางการแพทย์ จึงต้องมีการกำหนดและปฏิบัติตามมาตรการป้องกันขั้นพื้นฐานอย่างเคร่งครัด ทั้งสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ที่ใช้งานเครื่องมือเลเซอร์โดยตรงและผู้ป่วยที่เข้ารับการตรวจหรือรักษา โดยองค์ประกอบของความปลอดภัยจากเลเซอร์ประกอบด้วย การควบคุมการเข้าถึงบริเวณที่มีการใช้เลเซอร์ การใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคล การจำกัดการสะท้อน และการกระเจิงของลำแสง

และการตรวจสอบความปลอดภัยของอุปกรณ์เป็นประจำ⁽²⁵⁾

มาตรการที่สำคัญที่สุดคือการสวมอุปกรณ์ป้องกันดวงตาที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นของเลเซอร์ โดยเฉพาะแว่นตานิรภัยที่มีตัวกรองแสงเลเซอร์โดยเฉพาะตามมาตรฐาน ANSI: American National Standards Institute (สถาบันมาตรฐานแห่งชาติอเมริกัน) และ IEC : International Electrotechnical Commission (คณะกรรมการระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานสาขาอิเล็กทรอนิกส์) รวมถึงการใช้ฉากกันหรือม่านปิดล้อมบริเวณที่มีการยิงเลเซอร์เพื่อป้องกันการสะท้อนหรือกระเจิงของลำแสง การสวมอุปกรณ์ป้องกันผิวหนังเช่น เสื้อคลุม ถุงมือ และหน้ากาก ก็มีความจำเป็น โดยเฉพาะเมื่อต้องสัมผัสกับเลเซอร์กำลังสูงหรือเป็นเวลานาน สำหรับผู้ป่วยควรมีการปิดหรือหลบตาในขณะที่ถูกฉายแสงเลเซอร์ไปยังใบหน้าหรือลำคอ หากเป็นการรักษาบริเวณอื่นก็ควรมีการปกคลุมผิวหนังด้วยผ้าหรือวัสดุที่เหมาะสม และหลีกเลี่ยงเครื่องประดับที่อาจสะท้อนแสงได้⁽²⁶⁾

แนวโน้มในอนาคตของการใช้เลเซอร์ในการแพทย์สมัยใหม่

1) การพัฒนาเทคโนโลยีเลเซอร์ใหม่ๆ เพื่อการแพทย์

ในปัจจุบันเทคโนโลยีเลเซอร์ได้รับการพัฒนาอย่างก้าวกระโดดทั้งในด้านประสิทธิภาพ ความแม่นยำและความปลอดภัย ส่งผลให้มีการนำเลเซอร์มาประยุกต์ใช้ในการแพทย์อย่างกว้างขวางมากขึ้น โดยเทคโนโลยีเลเซอร์ใหม่ๆ ที่น่าจับตามองได้แก่ เลเซอร์พัลส์สั้นยิ่งยวด (Ultrashort pulse laser) เช่น Femtosecond laser ที่ให้พลังงานสูงในช่วงเวลาสั้นมาก ทำให้สามารถตัดเนื้อเยื่อได้อย่างแม่นยำระดับไมครอน โดยมีความเสียหายต่อเนื้อเยื่อข้างเคียงน้อยมากจึงเป็นประโยชน์ในการผ่าตัดจุดศัลยกรรมที่ต้องการความแม่นยำสูงเช่น การผ่าตัดตาด การผ่าตัดสมอง และการผ่าตัดเซลล์และโมเลกุล⁽²⁷⁾

นอกจากนี้เลเซอร์ที่สามารถปรับความยาวคลื่นได้ (Tunable laser) ก็เป็นอีกเทคโนโลยีที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถเลือกความยาวคลื่นให้ตรงกับดูดกลืนของโครโมฟอร์ในเนื้อเยื่อเป้าหมายได้อย่างจำเพาะเจาะจงทำให้การรักษามีประสิทธิภาพและความปลอดภัยสูงขึ้น ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เช่น การรักษาภาวะผิวหนังอักเสบ การกำจัดขน การรักษาต้อหิน และการตรวจคัดกรองมะเร็งผิวหนังระยะเริ่มต้น⁽²⁸⁾ ขณะเดียวกัน เลเซอร์ที่มีลำแสงแคบและมีความเข้มสูง (High intensity focused laser) ก็ถูกนำมาใช้ในการรักษามะเร็งบางชนิด โดยอาศัยผลทางความร้อนและคลื่นกระแทกที่เกิดขึ้นเฉพาะจุดในเนื้อเยื่อเพื่อทำลายเซลล์มะเร็งอย่างจำเพาะ

2) ทิศทางการวิจัยและพัฒนาการใช้เลเซอร์ในอนาคต

แม้ว่าเลเซอร์จะมีการนำมาใช้ในวงการแพทย์อย่างกว้างขวางแล้วแต่ก็ยังมียังช่องว่างทางความรู้อีกมากที่ต้องการการศึกษาวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติมทั้งในแง่ของกลไกการทำงาน ประสิทธิภาพทางคลินิกความปลอดภัยในระยะยาว และการประยุกต์ใช้ในโรคต่างๆ ที่ซับซ้อน ทิศทางการวิจัยเลเซอร์ทางการแพทย์ใน

อนาคตจึงน่าจะมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาความรู้พื้นฐานควบคู่กับการทดลองทางคลินิก⁽²⁹⁾

วิจัยในระดับโมเลกุลและเซลล์การศึกษากลไกภูมิคุ้มกันระหว่างแสงเลเซอร์กับส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์เช่น ไมโทคอนเดรีย ไลโซโซม และโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ จะช่วยให้เข้าใจการตอบสนองของเซลล์และเนื้อเยื่อต่อเลเซอร์ในระดับลึกขึ้น ซึ่งจะ เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพและความจำเพาะของการรักษา ส่วนในระดับเนื้อเยื่อและอวัยวะ การศึกษาผลของเลเซอร์ต่อการไหลเวียนโลหิต การอักเสบ และการสมานแผลในสภาวะโรคต่างๆ จะช่วยพัฒนาโปรโตคอลการรักษาให้เหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละราย⁽³⁰⁾

สรุป

เทคโนโลยีเลเซอร์ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการแพทย์สมัยใหม่ เนื่องจากมีคุณสมบัติเฉพาะตัวที่โดดเด่น ทำให้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการวินิจฉัยและรักษาโรคต่างๆ อย่างกว้างขวาง บทความนี้ได้รวบรวมความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับหลักการท างาน คุณสมบัติ และการนำเลเซอร์ไปใช้ในสาขาต่างๆ ทาง การแพทย์ โดยเลเซอร์มีประสิทธิภาพสูงในการรักษาโรคมะเร็ง โรคผิวหนัง โรคทางตา และโรคช่องปาก แต่ต้องให้ความสำคัญกับความปลอดภัยและการป้องกันผลข้างเคียงจากรังสีด้วย

แนวโน้มในอนาคต เทคโนโลยีเลเซอร์จะพัฒนาไปสู่การใช้เลเซอร์ที่แม่นยำขึ้นและผสมผสานกับเทคนิคการแพทย์อื่นๆ เพื่อให้ได้วิธีการรักษาที่มีประสิทธิภาพและความจำเพาะต่อผู้ป่วยมากขึ้น ทิศทางการวิจัยจะเน้นศึกษากลไกการทำงานในระดับโมเลกุลและเซลล์ ควบคู่กับการศึกษาทางคลินิกในวงกว้าง เพื่อพัฒนาการใช้เลเซอร์ในโรคเรื้อรังที่ยังรักษาได้ไม่หายขาด ความก้าวหน้าของเลเซอร์ทางการแพทย์ยังคงต้องอาศัยความร่วมมือในการวิจัยจากหลายสาขาวิชา ซึ่งจะช่วยยกระดับคุณภาพการรักษาพยาบาลได้อย่างก้าวกระโดดต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- Huang Z, Chen H. Advances in medical applications of laser technology. *Frontiers in Physics*. 2020; 8: 312.
- Niemz MH. Laser-tissue interactions: Fundamentals and applications (Forth ed.). Springer; 2019.
- Choy DSJ, Percutaneous laser disc decompression: History and scientific rationale. *Techniques in Regional Anesthesia and Pain Management* 2019; 13(2): 46–54.
- Steiner R. Laser-tissue interactions. In C. Raulin and S. Karsai (Eds.); *Laser and IPL technology in dermatology and aesthetic medicine*; 2021.
- Vo-Dinh T. Biomedical photonics handbook:

- Fundamentals (Second edition): devices, and techniques CRC Press; 2014.
6. Karu TI. Photobiomodulation: Mechanisms at the cellular and molecular levels. In M. R. Hamblin. Pan Stanford Publishing; Handbook of low-level laser therapy; 2020.
7. Raulin C, Karsai S. Laser and IPL technology in dermatology and aesthetic medicine: Springer; 2011.
8. Welch AJ, van Gemert MJC (Eds.). Optical-thermal response of laser-irradiated tissue (second edition): Springer; 2011.
9. Chu KF, Dupuy DE. Thermal ablation of tumours: Biological mechanisms and advances in therapy. Nature Reviews Cancer. 2014; 14(3): 199-208.
10. Karu T. Mitochondrial mechanisms of photobiomodulation in context of new data about multiple roles of ATP. Photomedicine and Laser Surgery 2010; 28(2): 159-160.
11. Vogel A, Venugopalan V. Pulsed laser ablation of soft biological tissues. In C. Phipps (Ed.), Springer: Laser ablation and its applications 2011; 395-431.
12. Jonkman J, Brown CM. Any way you slice it-A comparison of confocal microscopy techniques. Journal of Biomolecular Techniques 2015; 26(2): 54-65.
13. Dhawan AP, D'Alessandro B, Fu X. Optical imaging modalities for biomedical applications. IEEE Reviews in Biomedical Engineering 2010; 3: 69-92.
14. Beard P. Biomedical photoacoustic imaging. Interface Focus 2011; 1(4): 602-631.
15. Heeman W, Steenbergen W, van Dam GM, Boerma EC. Clinical applications of laser speckle contrast imaging: A review. Journal of Biomedical Optics 2019; 24(8): 080901.
16. Ivaskevych IB, Bachynskyy VT, Vanchulyak OY, Palyvoda OH. Mapping of azimuths of polarization of laser microscopic images of histological sections of human organs in the differentiation of poisoning by ethanol and carbon monoxide. Modern medical technology. 2019; 4.: 70-74.
17. Manohar S, Dantuma M. Current and future trends in photoacoustic breast imaging. Photoacoustics 2019; 16: 100134.
18. Roustit M, Millet C, Blaise S, Dufournet B, Cracowski JL. Excellent reproducibility of laser speckle contrast imaging to assess skin microvascular reactivity. Microvascular Research 2010; 80(3): 505-511.
19. Fercher AF. Optical coherence tomography – Development principles applications. Zeitschrift fur Medizinische Physik 2010; 20(4): 251-276.
20. Drexler W, Fujimoto JG. State-of-the-art retinal optical coherence tomography. Progress in Retinal and Eye Research 2008; 27(1): 45-88.
21. Spaide RF, Klancnik JM, Cooney MJ. Retinal vascular layers imaged by fluorescein angiography and optical coherence tomography angiography. JAMA Ophthalmology 2015; 133(1): 45-50.
22. Tao XH, Guan Y, Shao D, Xue W, Ye FS, Wang M, He SL. Efficacy and safety of photodynamic therapy for cervical intraepithelial neoplasia: A systemic review. Photodiagnosis and Photodynamic Therapy 2014; 11(2), 104-112.
23. Khalil AS, Tamish NM, Elkalza AR. Assessment of chemical, ultrasonic, diode laser, and Er: YAG laser application on debonding of ceramic brackets. BMC Oral Health 2022; 22(79).
24. Penny J. Laser safety. Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences 2018; 49(3): S5-S8.
25. Smalley PJ. Laser safety: Risks, hazards, and control measures. Laser Therapy 2011; 20(2): 95-106.
26. Ash C, Town G, Bjerring P, Webster S. Lasers and intense pulsed light: Safety and skin interactions. Journal of Cosmetic and Laser Therapy 2016; 18(6): 360-367.
27. Chung SH, Mazur E. Surgical applications of femtosecond lasers. Journal of Biophotonics 2009; 2(10): 557-572.
28. Peng Q, Juzeniene A, Chen J, Svaasand O, Warloe T, Giercksky KE, Moan J. Lasers in medicine. Reports on Progress in Physics 2008; 71(5): 056701.
29. Benedicenti S, Amaroli A. Photobiomodulation: A new frontier in dentistry?. Dentistry Journal 2020; 8(4): 125.
30. Farivar S, Malekshahabi T, Shiari R. Biological effects of low level laser therapy. Journal of Lasers in Medical Sciences 2014; 5(2): 58-62.