

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายตัวอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะและการกระจายตัวอุณหภูมิ
ภายในหูมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือ

Numerical Analysis of Specific Absorption Rate and Heat Transfer Distributions
within the Human Ear Subjected to Mobile Phone Radiation

พรทิพย์ แก่งอินทร์^{1*}, พชรกร แสงบุญ¹, ณัฐนันท์ ศรีโสภณ¹, พิพัฒน์ คงพาณิชย์ตระกูล¹ และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: pornthip.kea@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2889-2138 ต่อ 6401-3, เบอร์โทรสาร 0-2889-2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

ปัจจุบันโลกมีการใช้โทรศัพท์มือถือเพิ่มขึ้นอย่างมากทุกปีองค์กรภาครัฐหลายแห่งจึงเกิดความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบจากการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือที่ส่งผลต่อสุขภาพของมนุษย์โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่เนื้อเยื่อที่อยู่ใกล้กับโทรศัพท์มือถือ พลังงานที่ถูกดูดซับในหูจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นซึ่งอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาภายใน ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในหูของมนุษย์เนื่องจากการได้รับการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือ การศึกษานี้เป็นการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในหูมนุษย์สามมิติระหว่างการได้รับการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ควบคุมสมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการไบโอฮีทคอนดักชันเพื่ออธิบายการกระจายตัวของอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate (SAR)) และการกระจายตัวอุณหภูมิภายในหูของมนุษย์ ผลจากการคำนวณโดยใช้วิธีการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะถูกเปรียบเทียบความถูกต้องด้วยวิธีการทดลอง ผลการศึกษาที่ได้จะเป็นประโยชน์ในการกำหนดขีดจำกัดของระยะเวลาในการทำงานและค่าความถี่ในการใช้งานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (SAR) และการกระจายตัวอุณหภูมิภายในหูของมนุษย์ ผลการวิจัยนี้จะสามารถใช้เป็นแนวทางสำหรับทางคลินิกที่เกี่ยวข้องกับอันตรายระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับร่างกายมนุษย์

คำหลัก: การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ ; หูมนุษย์ ; โทรศัพท์มือถือ ; อัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ ; อุณหภูมิ

Abstract

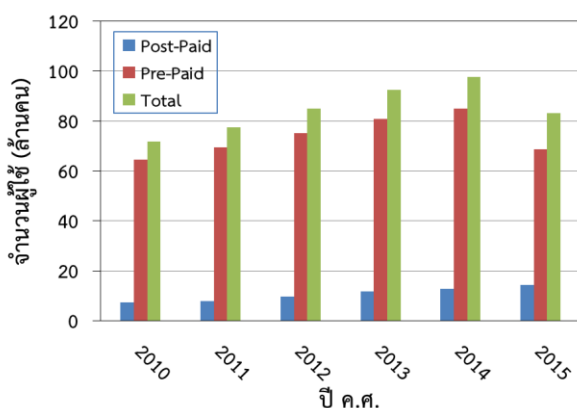
Currently the world has been an enormous increase in mobile phone usage every year. Various public organizations concern about the effects of mobile phone radiation on human health, especially at the ear tissue that close proximity to the mobile phone. The power absorption in the ear induces temperature increase inside it, which may affect internal reactions. For that reason, it is interesting to analyze the heat transfer in the human ear due to mobile phone radiation. This study presents the numerical analysis of heat transfer phenomena occurring in the 3-D human ear due to exposure to mobile phone radiation. The mathematical model combining electromagnetic wave

propagation equation and bioheat equation are used to describe the distributions of specific absorption rate (SAR) and temperature in human ear. The result calculated from simulation study is validated with an experimental study. The obtained results will be of assistance in determining exposure limits for the operating times and operating frequencies on distributions of SAR and temperature in human ear. The results will also be used as a guideline to clinical practitioners in electromagnetic waves relates the interaction of the radiated waves with the human body.

Keywords: Computer Simulation; Human Ear; Mobile Phone; SAR; Temperature

1. บทนำ

ในสังคมปัจจุบันโทรศัพท์มือถือมีความสำคัญอย่างมากในการติดต่อสื่อสารและการติดตามข่าวสาร จึงทำให้คนในสังคมต้องมีโทรศัพท์มือถือใช้กันอย่างน้อยคนละ 1 เครื่อง จากผลการสำรวจผู้ใช้โทรศัพท์มือถือในประเทศไทยตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 ถึง 2015 พบว่าผู้ใช้โทรศัพท์ทั้งแบบประเภทจ่ายเงินหลังจากใช้งาน (Post-Paid) และประเภทจ่ายเงินก่อนใช้งาน (Pre-Paid) มีจำนวนเพิ่มสูงขึ้นทุกปี [1] ดังแสดงในกราฟรูปที่ 1 และจากผลสำรวจผู้ใช้โทรศัพท์มือถือในประเทศไทยในปี ค.ศ. 2016 พบว่ามีผู้ใช้โทรศัพท์มือถือทั้งสิ้น 83 ล้านราย [1] โดยมีผู้ใช้โทรศัพท์มือถือตั้งแต่อายุ 6 – 60 ปี โดยตารางที่ 1 แสดงจำนวนผู้ใช้โทรศัพท์มือถือโดยจำแนกตามช่วงอายุ จากตารางที่ 1 จะพบว่าช่วงอายุ 20 – 24 ปี เป็นช่วงอายุที่มีการใช้โทรศัพท์จำนวนมากที่สุด



รูปที่ 1 จำนวนผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือในประเทศไทย ตั้งแต่ปี ค.ศ. 2010 ถึง 2015 [1]

ตารางที่ 1 จำนวนผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือในประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2016 โดยจำแนกตามช่วงอายุ [1]

ช่วงอายุ	จำนวน
อายุ 6 – 10 ปี	302,330
อายุ 11 – 14 ปี	1,331,156
อายุ 15 – 19 ปี	3,487,255
อายุ 20 – 24 ปี	3,505,607
อายุ 25 – 29 ปี	3,290,503
อายุ 30 – 34 ปี	3,007,003
อายุ 35 – 39 ปี	2,595,373
อายุ 40 – 49 ปี	3,463,652
อายุ 50 – 59 ปี	1,779,641
อายุ 60 ปี ขึ้นไป	639,911

คลื่นโทรศัพท์ในปัจจุบันจัดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Wave) ประเภทหนึ่ง โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะประกอบด้วยสนามไฟฟ้า (Electric Field) และสนามแม่เหล็ก (Magnetic Field) ซึ่งตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยคลื่นโทรศัพท์จะมีความถี่อยู่ในช่วง 300 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 3 จิกะเฮิร์ตซ์ [2] ซึ่งในประเทศไทยนั้นมีการเปิดประมูลคลื่นโทรศัพท์มือถืออยู่ในช่วงคลื่นความถี่ 850 เมกะเฮิร์ตซ์ ถึง 2300 เมกะเฮิร์ตซ์

เนื่องจากปัจจุบันมีผู้ใช้งานโทรศัพท์มือถือเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีดังที่ได้กล่าวข้างต้น องค์การภาครัฐหลายแห่งจึงเกิดความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบจากการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือที่อาจส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์ อย่างไรก็ตามองค์การภาครัฐส่วนใหญ่มักกำหนด

หลักเกณฑ์ด้านความปลอดภัยของการใช้โทรศัพท์มือถือ โดยใช้ค่าอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate (SAR)) เป็นเกณฑ์หลัก [3-4] โดยหน่วยงาน International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) ได้กำหนดค่าขีดจำกัดของค่าอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ หรือค่า SAR ไว้ที่ 2 วัตต์ต่อกิโลกรัม [3] แต่อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงแล้วการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยภายในอวัยวะหรือร่างกายมนุษย์อาจส่งผลกระทบต่อตอบสนองทางด้านสรีรวิทยา (Physiological Effect) ได้ [5] โดยในงานวิจัยของ Guyton และ Hall [6] ได้ระบุไว้ว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในสมองมนุษย์ 3.5 องศาเซลเซียส จะไม่ก่อให้เกิดความเสียหายทางสรีรวิทยาแก่สมองมนุษย์ ดังนั้นเพื่อให้การวิเคราะห์ปัญหาด้านความปลอดภัย และการวิเคราะห์อิทธิพลของการแพร่กระจายตัวของคลื่นโทรศัพท์มือถือต่ออวัยวะสำคัญภายในร่างกายจึงควรพิจารณาครอบคลุมทั้งการวิเคราะห์ค่า SAR และค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

ส่วนใหญ่งานวิจัยที่ผ่านมาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาผลกระทบของการใช้โทรศัพท์มือถือพบว่า งานวิจัยส่วนมากเป็นการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของการใช้โทรศัพท์มือถือต่อศีรษะมนุษย์ อาทิ Wessapan และคณะ [7] ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายตัวของค่า SAR และการกระจายตัวอุณหภูมิภายในศีรษะมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นโทรศัพท์มือถือที่คลื่นความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยทำการศึกษาอิทธิพลของค่าความถี่ที่ใช้งาน และระยะห่างระหว่างศีรษะมนุษย์และโทรศัพท์มือถือ จากการศึกษาพบว่าค่า SAR สูงสุดที่คลื่นความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ มีค่า 0.823 วัตต์ต่อกิโลกรัม และ 1.187 วัตต์ต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และพบว่าตำแหน่งการเกิดค่า SAR สูงสุด และตำแหน่งการเกิดค่าอุณหภูมิสูงสุดไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ดังนั้นการศึกษาอิทธิพลจากคลื่นโทรศัพท์มือถือต่อเนื้อเยื่อมนุษย์จึงควร

ศึกษาให้ครอบคลุมทั้งการกระจายตัวของ SAR และการกระจายตัวอุณหภูมิ Karli และคณะ [8] ศึกษาการกระจายตัวของ SAR ภายในศีรษะมนุษย์ที่ได้รับอิทธิพลจากแหล่งปล่อยคลื่นโทรศัพท์มือถือ 2 ประเภท คือแบบชั่วคราว และแบบแผ่น โดยทำการศึกษาที่คลื่นความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ จากผลการศึกษาพบว่า หลังจากที่ถูกคลื่นได้ผ่านชั้นผิวหนังแล้ว เนื้อเยื่อชั้นไขมัน และชั้นกล้ามเนื้อ จะดูดซับพลังงานในปริมาณที่น้อยมากเมื่อเทียบกับชั้นผิวหนัง และค่า SAR จากแหล่งปล่อยคลื่นโทรศัพท์มือถือแบบชั่วคราว จะสูงกว่าค่า SAR จากแหล่งปล่อยคลื่นโทรศัพท์มือถือแบบแผ่น ต่อมา Andriamiharinjaka และคณะ [9] ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของ SAR และการกระจายตัวอุณหภูมิภายในศีรษะมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นโทรศัพท์มือถือที่คลื่นความถี่ 3 ค่าคือคลื่นความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 2450 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างภายในเนื้อเยื่อ 4 ชั้นคือชั้นผิวหนัง (Skin) ชั้นไขมัน (Fat) ชั้นกะโหลกศีรษะ (Skull) และชั้นเนื้อเยื่อสมอง (Brain) และภายในเนื้อเยื่อ 7 ชั้น คือชั้นผิวหนัง (Skin) ชั้นไขมัน (Fat) ชั้นกล้ามเนื้อ (Muscle) ชั้นกะโหลกศีรษะ (Skull) ชั้นเยื่อหุ้มสมองชั้นนอกหรือเยื่อ dura (Dura) ชั้นน้ำหล่อเลี้ยงสมอง (CSF) และชั้นเนื้อเยื่อสมอง (Brain) ผลจากการศึกษาพบว่าอิทธิพลของจำนวนชั้นของเนื้อเยื่อส่งผลโดยตรงต่อการกระจายตัวของ SAR และการกระจายตัวของอุณหภูมิ ในปีที่ผ่านมาการศึกษาอิทธิพลของคลื่นโทรศัพท์มือถือในระบบ 3 จี (3 G) ที่ค่าความถี่ 2100 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาออกซิเดชันของดีเอ็นเอ (DNA Oxidation) ภายในสมองของหนูในช่วงระยะเวลา 10 วัน และ 40 วัน ถูกศึกษาโดย Sahin และคณะ [10] และเมื่อเร็วๆ นี้ การศึกษาผลกระทบแบบเฉียบพลันของการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือต่ออวัยวะภายในร่างกายของกลุ่มตัวอย่างวัยรุ่นโดยใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยไฟฟ้าถูกนำเสนอโดย Bhargav และคณะ [11] โดยทำการเปรียบเทียบระหว่าง

การใช้โทรศัพท์มือถือในโหมด "เปิด" ทางด้านหูด้านขวา และโหมด "ปิด" จากการศึกษาพบว่า การได้รับการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือในระยะเวลา 15 นาที ส่งผลต่อระบบการทำงานของต่อมไร้ท่อ ระบบประสาท ตับ ไต ม้าม และระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย

อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ทำการศึกษาผลกระทบของการใช้โทรศัพท์มือถือต่อเนื้อเยื่อหูของมนุษย์ (Human Ear Tissue) นั้นยังพบว่า มีอยู่จำนวนน้อยมาก ซึ่งเนื้อเยื่อหูของมนุษย์เป็นอวัยวะแรกที่สัมผัสกับโทรศัพท์มือถือโดยตรง และเป็นอวัยวะที่อยู่ใกล้กับโทรศัพท์มือถือมากที่สุดเมื่อมีการใช้งาน โดยหูของมนุษย์จะแบ่งออกเป็น 3 ชั้น ได้แก่ หูชั้นนอก (External Ear) หูชั้นกลาง (Middle Ear) และหูชั้นใน (Inner Ear) ซึ่งพลังงานที่ถูกดูดซับภายในเนื้อเยื่อหูจะส่งผลให้อุณหภูมิภายในเพิ่มขึ้นซึ่งอาจส่งผลต่อปฏิกิริยาภายใน และอาจส่งผลต่อความสามารถในการได้ยินของหูลดน้อยลงได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขของการกระจายตัวของ SAR และการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อหูมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่คลื่นโทรศัพท์มือถือ โดยใช้แบบจำลองของโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์สามมิติในการวิเคราะห์อิทธิพลของระยะเวลาและค่าความถี่ในการใช้งานจะถูกวิเคราะห์ โดยใช้สมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการไบโอฮีทผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) และเปรียบเทียบผลความถูกต้องกับการทดลองผลที่ได้จากการศึกษาสามารถเป็นประโยชน์ในการกำหนดขีดจำกัดด้านความปลอดภัยของระยะเวลาและค่าความถี่ในการใช้งานที่ไม่ก่อให้เกิดอันตราย

2. การทดลอง

เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาจากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ ในส่วนของการทดลองจะทำการทดลองในห้องทดลองที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก และไม่มีลมโกรก โดยอุณหภูมิเริ่มต้นของห้องทดลองจะกำหนดให้อยู่ที่ 25

± 2 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิร่างกายจะกำหนดให้อยู่ที่ 37 องศาเซลเซียส [7] โดยโทรศัพท์มือถือที่ใช้ในการทดลองจะมีขนาดความยาว 123.83 มิลลิเมตร ความกว้าง 58.87 มิลลิเมตร และความหนา 7.31 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 ในการทดลองเลือกใช้คลื่นความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิรตซ์ และกำหนดให้ใช้ระยะเวลาในการใช้งานเป็นระยะเวลา 10 นาที และ 15 นาที และทำการวัดอุณหภูมิของหูมนุษย์ก่อน และหลังจากการใช้โทรศัพท์มือถือโดยใช้กล้องอินฟราเรดดังแสดงในรูปที่ 3 และวิธีการวัดอุณหภูมิของหูมนุษย์โดยใช้กล้องอินฟราเรดจะแสดงในรูปที่ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 2 โทรศัพท์มือถือที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 3 กล้องอินฟราเรดสำหรับวัดค่าอุณหภูมิ



รูปที่ 4 วิธีการวัดค่าอุณหภูมิของหูมนุษย์ก่อนและหลัง
การใช้งานโทรศัพท์มือถือโดยใช้กล้องอินฟราเรด

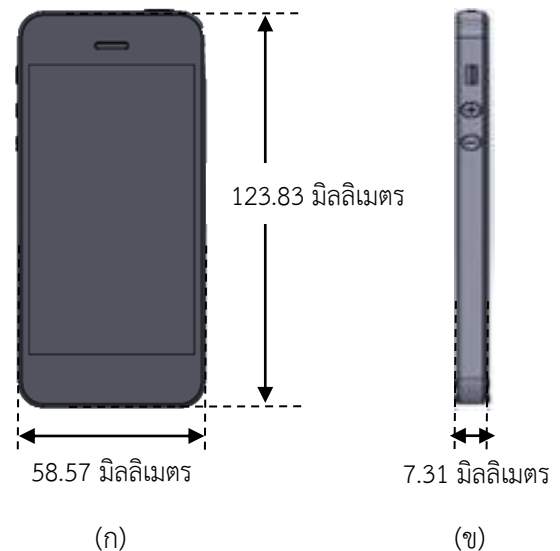
วิธีการทดลองจะเริ่มจากการตรวจสอบความสมบูรณ์ของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง และทำการวัดอุณหภูมิของหูมนุษย์ก่อนการใช้งานโทรศัพท์มือถือโดยใช้กล้องอินฟราเรดทำการใช้งานโทรศัพท์มือถือเป็นระยะเวลา 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ และทำการวัดอุณหภูมิของหูมนุษย์หลังการใช้งานโทรศัพท์มือถือโดยใช้กล้องอินฟราเรด เพื่อนำค่าอุณหภูมิที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะนำเสนอในส่วนถัดไป

3. การจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

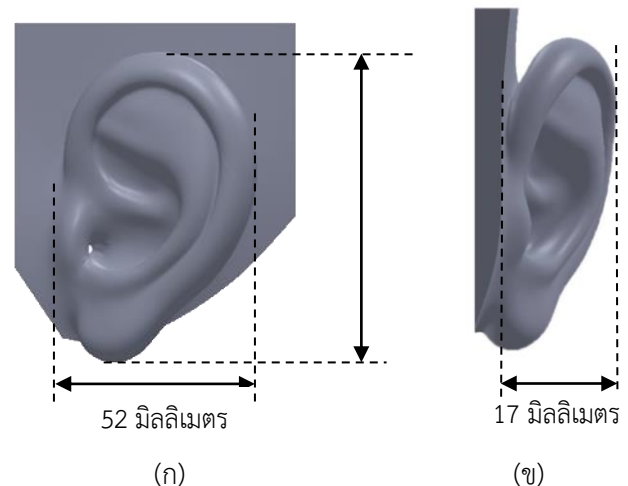
3.1 แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยนี้จะวิเคราะห์แบบจำลองสามมิติในระนาบแกน x แกน y และแกน z ของโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ โดยพิจารณาให้หูมนุษย์เป็นวัสดุเนื้อเดียวกัน (Homogeneous Material) โดยหูมนุษย์จะได้รับอิทธิพลจากการแพร่กระจายตัวของคลื่นโทรศัพท์มือถือที่สัมผัสด้วยกำลังคงที่ โดยแบบจำลองของโทรศัพท์มือถือมีขนาดความยาว 123.83 มิลลิเมตร ความกว้าง 58.87 มิลลิเมตร และความหนา 7.31 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดสอดคล้องกับการทดลองและแสดงดังรูปที่ 5 และ

แบบจำลองของหูมนุษย์จะจำลองจากขนาดของหูมนุษย์ผู้ใหญ่ ซึ่งมีขนาดความยาว 52 มิลลิเมตร ความกว้าง 33 มิลลิเมตร และความหนา 17 มิลลิเมตร และแสดงดังรูปที่ 6 และกำหนดให้อุณหภูมิเริ่มต้นของอากาศภายในห้องมีค่า 25 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกับการเงื่อนไขในการทดลอง



รูปที่ 5 แบบจำลองของโทรศัพท์มือถือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) ทางด้านหน้า และ (ข) ทางด้านข้าง



รูปที่ 6 แบบจำลองของหูมนุษย์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ (ก) ทางด้านหน้า และ (ข) ทางด้านข้าง

3.2 สมการที่ใช้ในการวิเคราะห์

1) การวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในหุ่นมนุษย์จะถูกระบุวิเคราะห์ในพิกัดสามมิติในระนาบแกน x แกน y และ z โดยสมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะอยู่บนพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's Equations) โดยพิจารณาการแพร่กระจายตัวแบบฮาร์มอนิก (Harmonic Propagation) [12] คือ

$$\nabla \times \mu_r^{-1} \nabla \times \vec{E} - k_0^2 \epsilon_r \vec{E} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ $\vec{E}$ คือความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity (V/m)) μ_r คือค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ (Relative Permeability (-)) ϵ_r คือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity (-)) และ k_0 คือเลขคลื่นในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Wave Number of Free Space (m^{-1})) โดยเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 7 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตำแหน่งการปล่อยคลื่นใต้โทรศัพท์มือถือจะมีเงื่อนไขขอบเขตแบบ Lumped port (Lumped Port Boundary Condition) ดังสมการที่ (2) [12] ด้วยกำลังคงที่

$$Z_{in} = \frac{V_1}{I_1} = \frac{\vec{E}_1 l_1}{I_1} \quad (2)$$

เมื่อ Z_{in} คือความต้านทานทางเข้า (Input Impedance (Ω)), V_1 คือแรงดันไฟฟ้า (Voltage Along the Edge (V)), I_1 คือกระแสไฟฟ้า (Electric Current Magnitude (A)), $\vec{E}_1$ คือสนามไฟฟ้า (Electric Field Along the Source Edge (V/m)), l_1 คือความยาว (Edge Length (m))

ผิวด้านในและด้านนอกของโทรศัพท์มือถือจะพิจารณาให้มีเงื่อนไขขอบเขตแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect Electric Conductor Boundary Condition) คือ

$$\hat{n} \times \vec{E} = 0 \quad (3)$$

เงื่อนไขขอบเขตระหว่างรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อหุ้มและอากาศภายนอกจะพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบต่อเนื่อง (Continuity Boundary Conditions)

$$\hat{n} \times (\vec{E}_1 - \vec{E}_2) = 0 \quad (4)$$

ผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อหุ้มจะพิจารณาเงื่อนไขขอบเขตแบบได้รับการกระเจิงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Scattering Boundary Condition) [12]

2) การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาเฉพาะภายในแบบจำลองหุ่นมนุษย์เท่านั้น โดยกระจายตัวอุณหภูมิภายในแบบจำลองหุ่นมนุษย์จะได้รับการคำนวณสมการถ่ายเทความร้อนในวัสดุชีวภาพ หรือสมการไบโอฮีท โดยการกระจายตัวอุณหภูมิภายในแบบจำลองหุ่นมนุษย์จะมีความสัมพันธ์กับคลื่นโทรศัพท์มือถือที่แบบจำลองหุ่นมนุษย์ได้รับ โดยเมื่อหุ่นมนุษย์ได้รับอิทธิพลจากคลื่นโทรศัพท์มือถืออุณหภูมิของมนุษย์จะดูดซับคลื่นโทรศัพท์มือถือ หรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นความร้อนภายใน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิของมนุษย์เพิ่มขึ้น โดยการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในพิกัดสามมิติในระนาบแกน x แกน y และแกน z เช่นเดียวกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยสมการไบโอฮีทที่ขึ้นกับเวลา (Unsteady State Bioheat Equation) ที่ใช้ในการ

วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในมนุษย์มีสมการดังนี้ [7,12] :

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (5)$$

เมื่อตัวห้อย b แทนเลือด (Blood) k คือค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity (W/m.K)) ρ คือค่าความหนาแน่น (Density (kg/m³)) C คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity (J/kg.K)) ω คืออัตราการแพร่กระจายตัวของเลือด (Blood Perfusion Rate (1/s)) T คือ ค่าอุณหภูมิ (Temperature (°C)) Q_{met} คือแหล่งความร้อนจากกระบวนการสันดาปภายในเนื้อเยื่อ (Metabolic Heat Generation Source (W/m³)) และ Q_{ext} คือแหล่งความร้อนจากภายนอก (External Heat Source (W/m³)) ซึ่งอยู่ในรูปเทอมของสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอิทธิพลจากคลื่นโทรศัพท์มือถือ โดยได้จากการคำนวณในสมการที่ (6) [7,12] :

$$Q_{ext} = \frac{1}{2} \sigma |\vec{E}|^2 \quad (6)$$

เมื่อ $\vec{E}$ คือความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric Field Intensity (V/m)) และ σ คือค่าการนำไฟฟ้า (Electric Conductivity (S/m))

อันตรกิริยาระหว่างคลื่นโทรศัพท์มือถือหรือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและเนื้อเยื่อจะถูกกำหนดในเทอมของค่าอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะหรือ ค่า SAR ในหน่วยวัตต์ต่อกิโลกรัม (W/kg) ซึ่งจะแสดงดังสมการที่ (7) [13]

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |\vec{E}|^2 \quad (7)$$

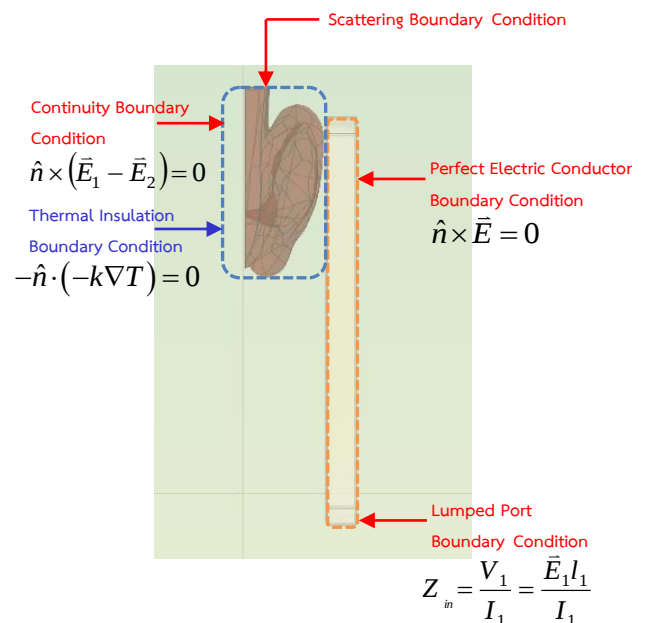
สำหรับเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนคือ ผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อจะ

พิจารณาให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวนหรือไม่มีการถ่ายเทความร้อนกับอากาศรอบนอก (Thermal Insulation Boundary Condition) คือ

$$-\hat{n} \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad (8)$$

และค่าอุณหภูมิเริ่มต้น (Initial Temperature) ของมนุษย์จะสมมติให้มีค่าคงที่และมีค่าเท่ากับอุณหภูมิปกติของร่างกายคือ 37 °C ซึ่งสอดคล้องกับค่าอุณหภูมิเริ่มต้นจริงจากการทดลอง และเงื่อนไขขอบเขตสำหรับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อนจะแสดงในรูปที่ 7

โดยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าการนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับค่าความถี่ และค่าคุณสมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อจะกำหนดให้มีค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 7 เงื่อนไขขอบเขตที่ใช้ในการวิเคราะห์ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าการนำไฟฟ้าที่ขึ้นกับค่าความถี่ของเนื้อเยื่อ [7]

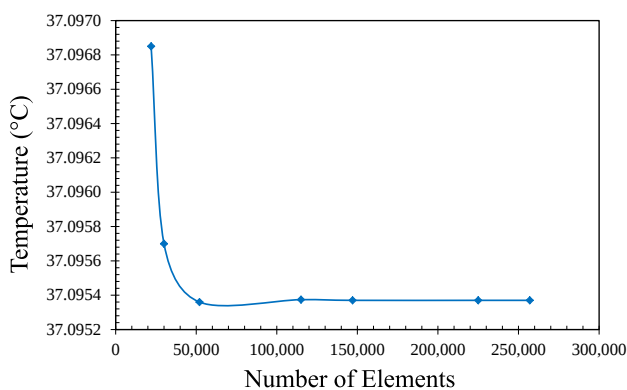
เนื้อเยื่อ	900 MHz		1800 MHz	
	ϵ_r (-)	σ (S/m)	ϵ_r (-)	σ (S/m)
เนื้อเยื่อ	41.1	0.87	32.5	0.52

ตารางที่ 3 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของเนื้อเยื่อหู
[7]

เนื้อเยื่อ	C (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)	k (W/m.K)	ω (1/s)	Q_{met} (W/m ³)
เนื้อเยื่อหู	3600	1125	0.42	0.02	1620

3.3 การจำลองเชิงตัวเลข

สมการหลักในการวิเคราะห์จะถูกแก้ปัญหาคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method (FEM)) ผ่านโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics เพื่อศึกษาการกระจายตัวของ SAR และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหูมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่กระจายตัวจากคลื่นโทรศัพท์มือถือ โดยสมการการแผ่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการไบโอฮีทจะควบคู่กันด้วยเทอมแหล่งความร้อนจากภายนอก (Q_{ext}) ในสมการที่ (6) ซึ่งแบบจำลองจะถูกคำนวณโดยใช้เอลิเมนต์ (Element) รูปสามเหลี่ยม โดยการวิเคราะห์ความเป็นอิสระของจำนวนเอลิเมนต์ (Element-Independent Analysis) จะแสดงดังรูปที่ 8 เพื่อหาจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการคำนวณและเพื่อความแม่นยำของผลการคำนวณ โดยรูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิของหูมนุษย์ที่เปลี่ยนแปลงตามจำนวนเอลิเมนต์ โดยจะพบว่าจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในการวิเคราะห์ปัญหาคือ 147,000 เอลิเมนต์



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าอุณหภูมิและจำนวนเอลิเมนต์

4. ผลและการวิเคราะห์ผล

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาและค่าความถี่ในการใช้งานที่ส่งผลต่อการกระจายตัวของ SAR และการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อหูมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่กระจายตัวจากคลื่นโทรศัพท์มือถือ

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ จึงนำผลที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ในกรณีการใช้อำนาจที่ 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และคลื่นความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ระยะเวลาการใช้งาน 0 นาที 10 นาที และ 15 นาที ดังแสดงในรูปที่ 9 รูปที่ 10 และรูปที่ 11 ตามลำดับ ผลจากการศึกษาทั้ง 3 ระยะเวลาการใช้งาน พบว่าค่าอุณหภูมิของหูมนุษย์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการใช้งานที่เพิ่มขึ้น และพบว่าผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์จะมีความสอดคล้องกัน ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์และวิธีการจำลองเชิงตัวเลขที่ใช้จึงมีความน่าเชื่อถือสามารถนำไปใช้ในการศึกษาในส่วนอื่นๆ ต่อไปได้ อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิที่ได้จากการวัดโดยใช้กล้องอินฟราเรดจะแสดงค่าศนิยมเพียง 1 ตำแหน่ง

4.2 อิทธิพลของระยะเวลาในการใช้งาน

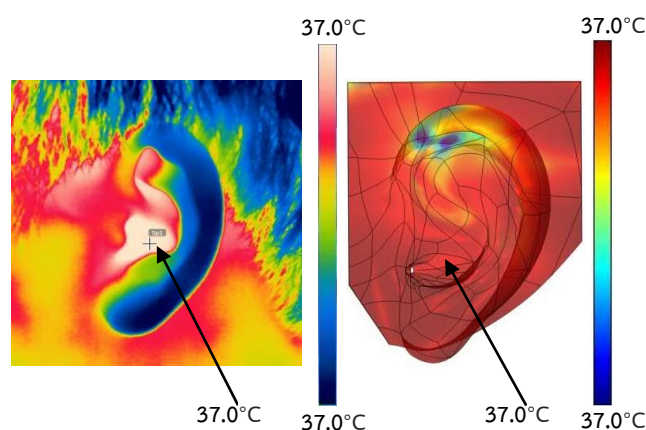
ในส่วนนี้จะนำเสนออิทธิพลของระยะเวลาในการใช้งาน โดยรูปแบบการกระจายตัวของ SAR ที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ โดยใช้อำนาจ 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และค่าความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ระยะเวลาการใช้งานต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 12 โดยรูปที่ 12(ก) 12(ข) และ 12(ค) ที่ระยะเวลาการใช้งาน 5 นาที 10 นาที และ 15 นาที

ตามลำดับ จากรูปพบว่ารูปแบบการกระจายตัวของ SAR ในแต่ละช่วงระยะเวลาการใช้งานมีความคล้ายคลึงกันคือมีค่าสูงบริเวณหูด้านบน โดยบริเวณหูตรงกลาง ด้านข้าง และใบหูจะมีค่า SAR ต่ำลง และพบว่าค่า SAR จะไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลา โดยรูปที่ 13 แสดงรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และคลื่นความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ระยะเวลาการใช้งานต่างๆ โดยรูปที่ 13(ก) 13(ข) และ 13(ค) ที่ระยะเวลาการใช้งาน 5 นาที 10 นาที และ 15 นาที ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่ารูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิในแต่ละช่วงระยะเวลาการใช้งานมีความคล้ายคลึงกันคือมีค่าอุณหภูมิที่สูงบริเวณใบหู และค่าอุณหภูมิลดลงจากบริเวณใบหู ไปยังส่วนบริเวณหูตรงกลาง ด้านข้าง และบริเวณหูด้านบน เนื่องจากใบหูด้านล่างได้รับอิทธิพลจากแหล่งกำเนิดคลื่นโทรศัพท์มือถือทางด้านล่าง และพบว่าตำแหน่งในการเกิดค่า SAR สูงสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงต่อกัน ซึ่งผลที่ได้นี้สอดคล้องกับผลการศึกษาในงานวิจัย [7]

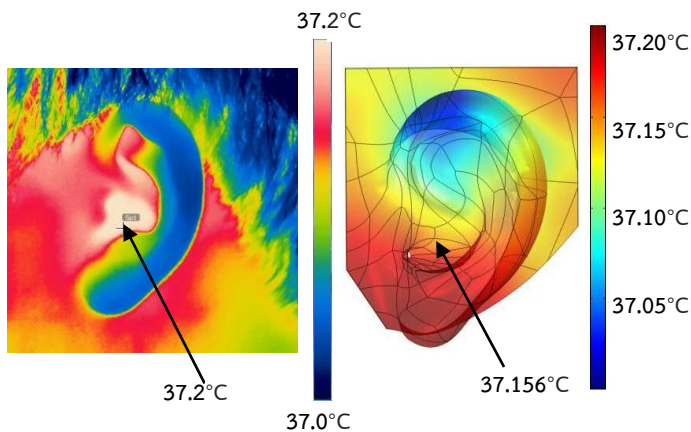
4.3 อิทธิพลของค่าความถี่ในการใช้งาน

อิทธิพลของค่าความถี่ในการใช้งานที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของ SAR ที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และระยะเวลาการใช้งาน 15 นาที ที่ค่าความถี่ในการใช้งานค่าต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 14 โดยรูปที่ 14(ก) และ 14(ข) จะแสดงผลการศึกษาที่ค่าความถี่ที่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ จากรูปพบว่าค่า SAR จะมีค่าสูงบริเวณด้านบนของหู และค่า SAR ที่ค่าความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ จะมีค่ามากกว่าค่า SAR ที่ค่าความถี่ที่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และอิทธิพลของค่าความถี่ในการใช้งานที่ส่งผลต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่าง

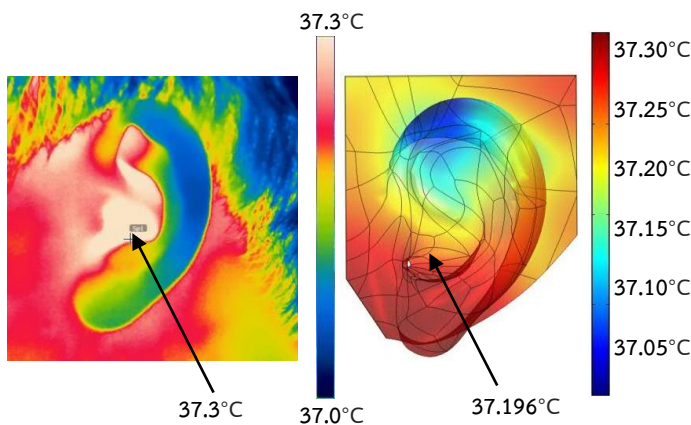
โทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และระยะเวลาการใช้งาน 15 นาที ที่ค่าความถี่ในการใช้งานค่าต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 15 โดยรูปที่ 15(ก) และ 15(ข) จะแสดงผลการศึกษาที่ค่าความถี่ที่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และค่าความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่าได้ผลตรงข้ามกับรูปแบบการกระจายตัวของ SAR โดยค่าอุณหภูมิจะมีค่าสูงบริเวณใบหูด้านล่าง และค่าอุณหภูมิที่ค่าความถี่ที่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ จะมีค่ามากกว่าค่าอุณหภูมิที่ค่าความถี่ที่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ในรูปที่ 16 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหูมนุษย์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาจากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และระยะเวลาการใช้งานตั้งแต่ 0 ถึง 15 นาที โดยใช้คลื่นความถี่ที่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ ผลที่ได้พบว่าเมื่อเวลามากขึ้นค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์จะเพิ่มสูงขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และค่าอุณหภูมิที่ค่าความถี่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์ จะมีค่ามากกว่าค่าอุณหภูมิที่ค่าความถี่ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยผลที่ได้จะสอดคล้องกันกับรูปที่ 15



(ก) การทดลอง (ข) การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์
รูปที่ 9 เปรียบเทียบรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในหูมนุษย์ ที่ระยะเวลาการใช้งาน 0 นาที โดยใช้ (ก) การทดลอง และ (ข) การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์



(ก) การทดลอง (ข) การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์
รูปที่ 10 เปรียบเทียบรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ
ภายในหูมนุษย์ ที่ระยะเวลาการใช้งาน 10 นาที โดยใช้
(ก) การทดลอง และ (ข) การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์



(ก) การทดลอง (ข) การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์
รูปที่ 11 เปรียบเทียบรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิ
ภายในหูมนุษย์ ที่ระยะเวลาการใช้งาน 15 นาที โดยใช้
(ก) การทดลอง และ (ข) การจำลองเชิงคอมพิวเตอร์

5. สรุปผล

บทความฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์หัตถิพลของ
ระยะเวลาในการใช้งานและค่าความถี่ในการใช้งานที่
ส่งผลต่อการกระจายตัวของ SAR และการกระจายตัว
อุณหภูมิภายในหูของมนุษย์เมื่อได้รับหัตถิพลจากการแผ่
คลื่นโทรศัพท์มือถือ จากผลการศึกษาพบว่าระยะเวลาใน

การใช้งานที่เพิ่มขึ้นจะไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า
SAR แต่ส่งผลโดยตรงให้ค่าอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่
ค่าความถี่ในการใช้งานที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า SAR เพิ่ม
สูงขึ้น แต่ส่งผลให้ค่าอุณหภูมิลดลง จากกรณีศึกษาพบว่า
การใช้โทรศัพท์มือถือในระยะเวลาการใช้งาน 15 นาที
หากพิจารณาโดยใช้อัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ
หรือค่า SAR เป็นเกณฑ์ พบว่าอาจก่อให้เกิดอันตรายแก่
เนื้อเยื่อหู (พิจารณาขีดจำกัดที่ 2 วัตต์ต่อกิโลกรัม [3])
แต่หากพิจารณาโดยใช้ค่าอุณหภูมิเป็นเกณฑ์ พบว่าไม่ก่อ
เกิดให้อันตรายแก่เนื้อเยื่อหู (พิจารณาขีดจำกัดที่ 3.5
องศาเซลเซียส [6]) และในการใช้งานโทรศัพท์มือถือ
ที่คลื่นความถี่ 900 เมกะเฮิรตซ์ พบว่าหากพิจารณาโดย
ใช้อัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะหรือ ค่า SAR และค่า
อุณหภูมิเป็นเกณฑ์ พบว่าไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่เนื้อเยื่อ
หู ในขณะที่การใช้งานโทรศัพท์มือถือที่คลื่นความถี่ 1800
เมกะเฮิรตซ์ พบว่าหากพิจารณาโดยใช้อัตราการดูดกลืน
พลังงานจำเพาะหรือค่า SAR เป็นเกณฑ์ พบว่าอาจก่อ
เกิดให้อันตรายแก่เนื้อเยื่อหู แต่หากพิจารณาโดยใช้ค่า
อุณหภูมิเป็นเกณฑ์ พบว่าไม่ก่อให้เกิดอันตรายแก่เนื้อเยื่อ
หู โดยตารางที่ 4 จะแสดงค่า SAR สูงสุดและค่าอุณหภูมิ
สูงสุดภายในหูของมนุษย์ในแต่ละเงื่อนไขการศึกษา โดย
ผลจากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ในการศึกษานี้จะเป็น
ประโยชน์พื้นฐานในการประเมินด้านความปลอดภัยใน
การใช้โทรศัพท์มือถือ

6. กิตติกรรมประกาศ

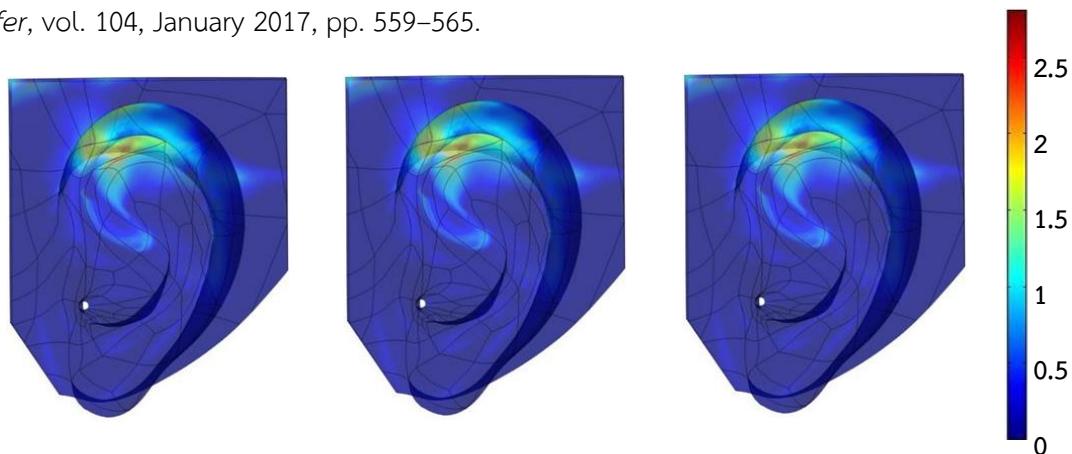
ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
รัตนโกสินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์กล้องอินฟราเรดในการ
ทำการทดลอง

7. เอกสารอ้างอิง

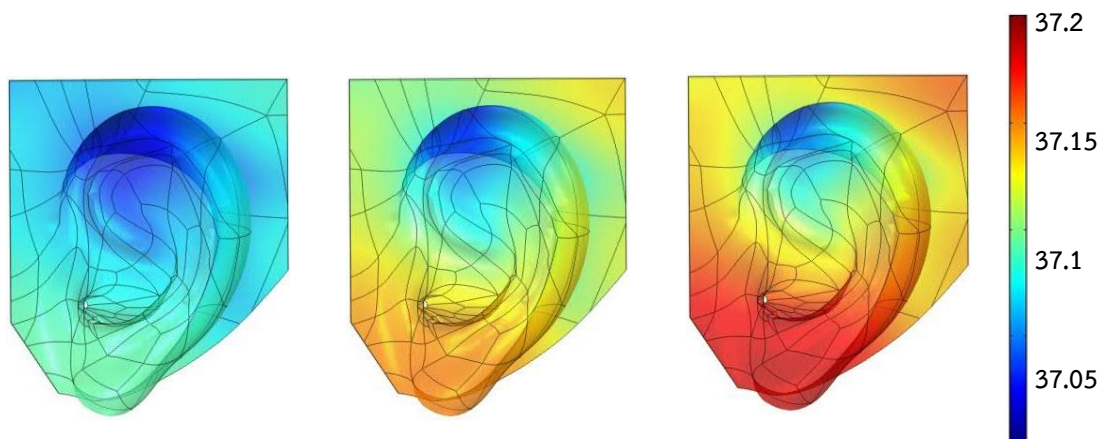
- [1] ผลสำรวจผู้ใช้โทรศัพท์มือถือในประเทศไทยปี
(2016), URL: [http://www.veedvil.com/news/
mobile-users-and-smartphone-in-thailand-2016/](http://www.veedvil.com/news/mobile-users-and-smartphone-in-thailand-2016/).

- [2] Pi, Z. and Khan, F. (2011). An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems, *IEEE Communications Magazine*, June 2011, pp. 101–107.
- [3] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). (1998). Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), *Health Physics*, vol. 74, pp. 494–522.
- [4] IEEE Standard for Safety Levels With Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz. (1999). IEEE Standard C95.1–1999.
- [5] Adair, E. R., Adams, B. W., and Akel, G. M. (1984). Minimal Changes in Hypothalamic Temperature Accompany Microwave-Induced Alteration of Thermoregulatory Behavior, *Bioelectromagnetics*, vol. 5(1), pp. 13–30.
- [6] Guyton, A.C., and Hall, J.E. (1996) Textbook of Medical Physiology, Saunders, Philadelphia, PA, Chap. 73.
- [7] Wessapan, T., Srisawatthisukul, S. and Rattanadecho, P. (2012). Specific Absorption Rate and Temperature Distributions in Human Head Subjected to Mobile Phone Radiation at Different Frequencies, *International journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55 (1-3), January 2012, pp. 347–359.
- [8] Karli, R., Ammor, H. and Terhzaz, J. (2014). Dosimetry in the Human Head for Two Types of Mobile Phone Antennas at GSM Frequencies, *Central European Journal of Engineering*, vol. 4(1), March 2014, pp 39–46.
- [9] Andriamiharinjaka, H., Razafimahery, F. and Rakotomanana, L. R. (2015). Effect of Wave Propagation and Heat Transfer in Skull-Csf-Brain System Exposed to Electromagnetic Wave, paper presented in the VI International Conference on Computational Bioengineering ICCB 2015, Barcelona, Spain, pp. 1–10.
- [10] Sahin, D., Ozgur, E., Guler, G., Tomruk, A., Unluc, I., Sepici-Dinçeld, A. and Seyhanb, N. (2016). The 2100 MHz Radiofrequency Radiation of a 3G-Mobile Phone and the DNA Oxidative Damage in Brain, *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol. 75(Part B), September 2016, pp. 94–98.
- [11] Bhargav, H., Srinivasan, T.M., Bista, S., Mooventhan, A., Suresh, V., Hankey, A. and Nagendra, H.R. (2017). Acute Effects of Mobile Phone Radiations on Subtle Energy Levels of Teenagers using Electrophotonic Imaging Technique: A Randomized Controlled Study, *International Journal of Yoga*, vol. 10(1), July 2016, pp. 16–23.
- [12] Wessapan, T. and Rattanadecho, P. (2012). Numerical Analysis of Specific Absorption Rate and Heat Transfer in Human Head Subjected to Mobile Phone Radiation: Effects of User Age and Radiated Power, *ASME Journal of Heat Transfer*, December 2012, vol. 134 / 121101–1–121101–10.
- [13] Stanković, V., Jovanović, D., Krstić, D., Marković, V. and Cvetković, N. (2017). Temperature Distribution and Specific Absorption Rate inside a Child's Head, *International Journal of Heat and Mass*

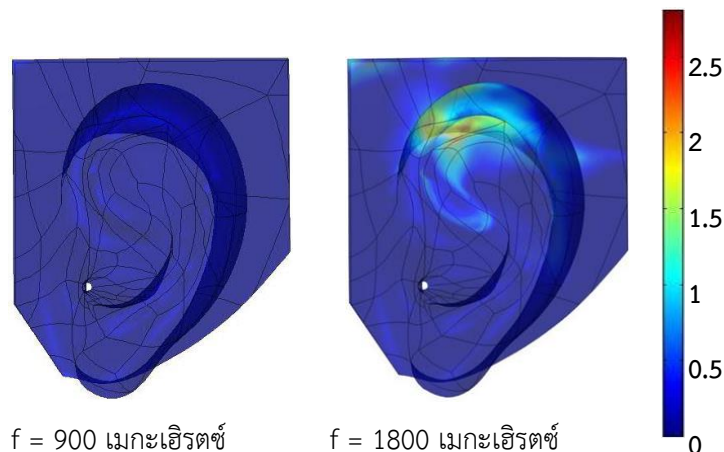
Transfer, vol. 104, January 2017, pp. 559–565.



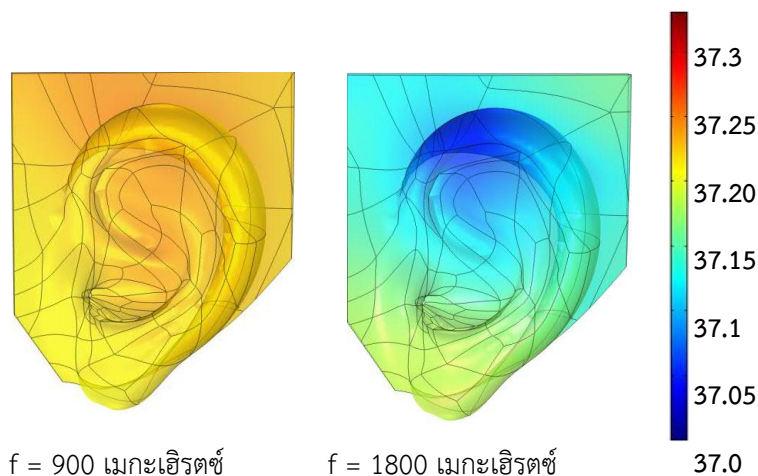
รูปที่ 12 รูปแบบการกระจายตัวของอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ จากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และคลื่นความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์ ที่ระยะเวลาการใช้งาน (ก) 5 นาที่ (ข) 10 นาที่ และ (ค) 15 นาที่



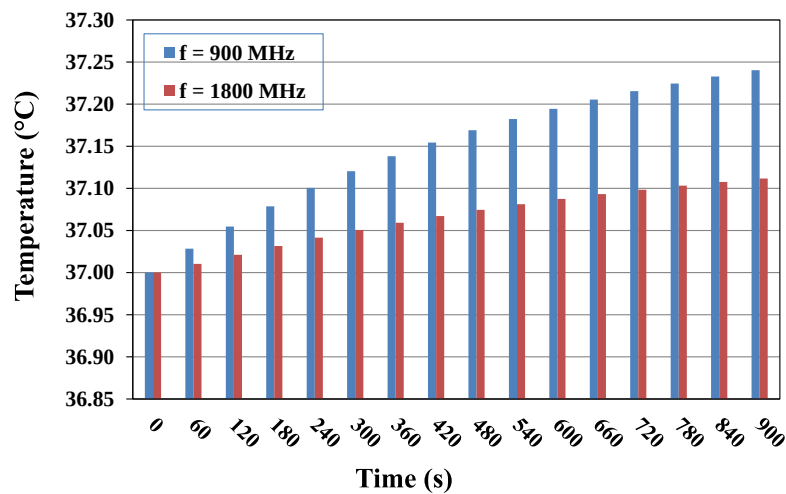
รูปที่ 13 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ จากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และคลื่นความถี่ 1800 เมกะเฮิรตซ์ ที่ระยะเวลาการใช้งาน (ก) 5 นาที่ (ข) 10 นาที่ และ (ค) 15 นาที่



รูปที่ 14 รูปแบบการกระจายตัวของอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ จากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และระยะเวลาการใช้งาน 15 นาที โดยใช้คลื่นความถี่ที่ (ก) 900 เมกะเฮิรตซ์และ (ข) 1800 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 15 รูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในหูมนุษย์ จากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหูมนุษย์ 0 เซนติเมตร และระยะเวลาการใช้งาน 15 นาที โดยใช้คลื่นความถี่ที่ (ก) 900 เมกะเฮิรตซ์และ (ข) 1800 เมกะเฮิรตซ์



รูปที่ 16 การกระจายตัวอุณหภูมิภายในหุ่นมนุษย์ที่เปลี่ยนแปลงตามระยะเวลาจากการจำลองเชิงคอมพิวเตอร์ โดยใช้กำลัง 1 วัตต์ ระยะห่างระหว่างโทรศัพท์มือถือและหุ่นมนุษย์ 0 เซนติเมตร และระยะเวลาการใช้งาน ตั้งแต่ 0 ถึง 15 นาที โดยใช้คลื่นความถี่ที่ 900 เมกะเฮิร์ตซ์และ 1800 เมกะเฮิร์ตซ์

ตารางที่ 4 ค่า SAR สูงสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดภายในของมนุษย์ในแต่ละเงื่อนไขการศึกษา

เงื่อนไขการศึกษา				ค่า SAR (W/kg)	ค่าอุณหภูมิ (°C)
ระยะเวลา (min)	ระยะห่าง (cm)	กำลัง (W)	ความถี่ (MHz)		
5	0	1	1800	2.8234 (มีผลกระทบ)	37.096 (ไม่มีผลกระทบ)
10	0	1	1800	2.8234 (มีผลกระทบ)	37.156 (ไม่มีผลกระทบ)
15	0	1	1800	2.8234 (มีผลกระทบ)	37.196 (ไม่มีผลกระทบ)
15	0	1	900	0.5255 (ไม่มีผลกระทบ)	37.260 (ไม่มีผลกระทบ)
15	0	1	1800	2.8234 (มีผลกระทบ)	37.196 (ไม่มีผลกระทบ)