

การวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวอุณหภูมิในสมองมนุษย์  
แบบหลายชั้นภายใต้อิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

Analysis of Electric Field and Temperature Distributions in Multi-Layer  
Human Brain Subjected to Electromagnetic Wave Effects

พรทิพย์ แก่งอินทร์<sup>1</sup>\* และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

<sup>2</sup> 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

การศึกษานี้จะนำเสนอการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวอุณหภูมิ (Electric field and temperature distributions) ในแบบจำลองสมองมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) โดยแบบจำลองสมองมนุษย์ที่พิจารณามีรูปร่างเป็นครึ่งวงกลมแบบหลายชั้น (Multi-layer) ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และผลกระทบจากสิ่งแวดล้อมภายนอกต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิภายในสมองมนุษย์แบบหลายชั้นจะถูกตรวจสอบอย่างเป็นระบบ ค่ากำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 1 50 100 และ 200 วัตต์ และค่าความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ 900 และ 1800 เมกะเฮิรตซ์ จะถูกเลือกเพื่อพิจารณา ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) จะถูกใช้เพื่อแก้สมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการถ่ายเทความร้อน การจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นคุณลักษณะที่สำคัญของการถ่ายโอนความร้อนในสมองมนุษย์ ผลที่ได้จากการจำลองเชิงตัวเลขพบว่าค่ากำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลกระทบมีนัยสำคัญต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและอุณหภูมิ ค่ากำลังที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สนามไฟฟ้าและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าตำแหน่งที่เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดจะไม่สอดคล้องกัน

**คำหลัก:** คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า, ไฟไนต์เอลิเมนต์, สมองมนุษย์, หลายชั้น

Abstract

This study presents an analysis of electric field and temperature distributions in the human brain model exposed to electromagnetic wave effects. A human brain model that is considered is a multi-layer half circle shape. The effects of variations of electromagnetic wave power and electromagnetic wave frequency and external environment on the electric field and temperature distributions are systematically investigated. The values of electromagnetic wave power at 1 50 100 and 200 W and electromagnetic wave frequency at 900 and 1800 MHz are selected. The finite element method (FEM) is used for solve the equations of electromagnetic wave propagation and heat transfer. The numerical simulations in this study show several important features of the heat transport in the human brain. The results from numerical simulation found that the electromagnetic wave power and electromagnetic wave frequency significantly influences the electric field and temperature distributions. Greater power provides greater electric field and temperature distributions. It also found that the location of maximum electric field and maximum temperature are inconsistent.

**Keywords:** Electromagnetic wave, Finite element method, Human brain, Multi-layer

## BME-06

### 1. บทนำ

สมอง (Brain) ถือเป็นอวัยวะที่สำคัญซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมอวัยวะส่วนอื่นๆ สั่งการการเคลื่อนไหว และเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมด้านต่างๆ ของร่างกาย นอกจากนั้นสมองยังถือเป็นส่วนอวัยวะที่มีความอ่อนไหวได้ง่ายในร่างกายมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic wave) [1] ผลกระทบทางด้านสรีรวิทยาทางความร้อน (Thermo-physiologic) จากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น จากการใช้เตาอบไมโครเวฟและการใช้โทรศัพท์มือถืออาจจะส่งผลต่อการทำงานในอวัยวะที่สำคัญอย่างเช่นสมอง ในงานวิจัยของ Guyton และ Hall [2] ระบุว่าขีดจำกัดของการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ไม่นำไปสู่ความเสียหายทางด้านสรีรวิทยาทางความร้อนคือ 3-5 °C เท่านั้น ในปีที่ผ่านมาจึงมีความกังวลของประชาชนเพิ่มขึ้นเกี่ยวกับผลกระทบด้านสุขภาพจากการใช้เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [3] ดังนั้นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการตอบสนองด้านสรีรวิทยาทางความร้อนภายในสมองมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นหัวข้อที่กำลังได้รับความสนใจและมีความจำเป็นเพื่อเป็นพื้นฐานในการหาทางป้องกันอันตรายจากการได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในระหว่างการใช้งานด้านต่างๆ

เนื่องจากการข้อจำกัดทางด้านจริยธรรมการศึกษาอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในสมองมนุษย์จากการทดลองจึงสามารถทำได้ยาก การพัฒนาแบบจำลองของสมองมนุษย์จึงผ่านการศึกษาจากการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation) จึงมีความสะดวกมากกว่าวิธีการทดลอง นอกจากนั้นยังสามารถศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ภายใต้เงื่อนไขที่มีความหลากหลายและเสมือนจริงได้สะดวกมากขึ้นด้วยการใช้การจำลองเชิงตัวเลข ด้วยเหตุนี้ในหลายปีที่ผ่านมาจึงมีงานวิจัยมากมายที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในสมองมนุษย์จากการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขโดยใช้สมการไบโอฮีท (Bioheat equation) [4] ในการจำลองการกระจายตัวอุณหภูมิอยู่มากมาย [5-7] Zhu และ Diao [5] ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิภายในสมองระหว่างการรักษาสมองที่ถูกทำลาย

ด้วยการลดอุณหภูมิ (Hypothermia treatment) โดยใช้สมการไบโอฮีท Diao และคณะ [6] ทำการวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิในระหว่างการทำความเย็นภายในสมองโดยใช้แบบจำลองสมอง 3 มิติ เพื่อศึกษาอิทธิพลของขนาดและชั้นของสมอง ตลอดจนอิทธิพลของอัตราการแพร่กระจายตัวของเลือด (Blood perfusion rate) ที่ส่งผลต่อการกระจายตัวอุณหภูมิ Elwassif และคณะ [7] ใช้แบบจำลองไบโอฮีทเพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิภายในแบบจำลองสมองระหว่างถูกกระตุ้นด้วยไฟฟ้า และมีงานวิจัยบางส่วนที่ศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในสมองของมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นโทรศัพท์มือถือ [1,3] อย่างไรก็ตามยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่ศึกษาครอบคลุมทั้งการแพร่กระจายตัวจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อน รวมทั้งอิทธิพลของค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจนอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมภายนอกต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวอุณหภูมิ (Electric field and temperature distributions) ภายในสมองมนุษย์แบบหลายชั้น (Multi-layer human brain) เนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างภายในสมองและความซับซ้อนของอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างสมองและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจนความซับซ้อนของค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Dielectric and Thermal properties) ภายในสมองชั้นต่างๆ

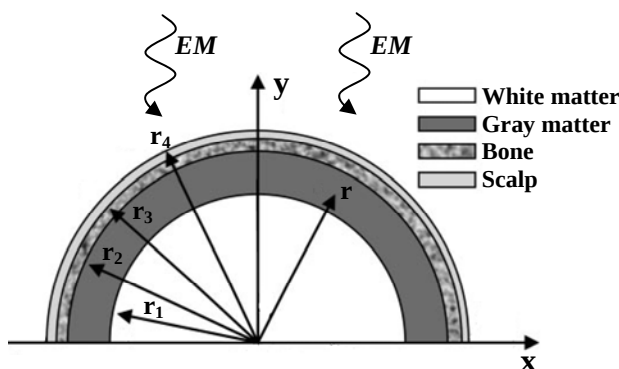
การศึกษานี้จะนำเสนอการวิเคราะห์การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวอุณหภูมิในแบบจำลองสมองมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบบจำลองสมองมนุษย์ที่ใช้ในการศึกษาจะมีรูปร่างเป็นครึ่งวงกลมแบบหลายชั้น (Multi-layer) ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) ชั้นกระดูก (Bone) และชั้นหนังศีรษะ (Scalp) อิทธิพลของค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวอุณหภูมิภายในสมองมนุษย์จะถูกวิเคราะห์ โดยค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ศึกษาจะประกอบด้วย 1 W 50 W 100 W และ 200 W ซึ่งเป็นตัวแทนของค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริงจากการใช้เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อาทิ ในการอุ่นอาหารด้วยการใช้เตาอบ

## BME-06

ไมโครเวฟ เป็นต้น และค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ศึกษาจะประกอบด้วย 900 MHz 1800 MHz ซึ่งเป็นค่าความถี่ของโทรศัพท์มือถือที่ใช้งานในปัจจุบัน [3] โดยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกจะแปรเปลี่ยนตามค่าความถี่ที่พิจารณา สมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและสมการถ่ายเทความร้อนไปไอ้จะถูกแก้ปัญหาผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) แบบจำลองที่ศึกษาจะถูกเปรียบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองกับผลจากแบบจำลองในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยผลจากการจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้จะแสดงให้เห็นลักษณะการถ่ายโอนความร้อนภายในสมองมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 2. แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

แบบจำลองสมองที่ใช้ในการศึกษาจะจำลองจากขนาดของสมองมนุษย์ผู้ใหญ่ (Adult) [8] โดยมีลักษณะรูปร่างเป็นรูปครึ่งวงกลมแบบหลายชั้น (Multi-layer) ซึ่งประกอบไปด้วยชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) ชั้นกระดูก (Bone) และชั้นหนังศีรษะ (Scalp) โดยพิจารณาในพิกัดสองมิติในระนาบแกน x และ y ดังแสดงในรูปที่ 1 ขนาดของรัศมี r จากจุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมและความหนาของชั้นต่างๆ ภายในสมองจะแสดงดังตารางที่ 1 ด้านบนของแบบจำลองจะได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยจะพิจารณาให้แบบจำลองสมองที่ศึกษามีคุณสมบัติเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogenous material) และมีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะและไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีภายในแบบจำลองสมองเมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 1 แบบจำลองสมองที่ใช้ในการศึกษา

### 3. การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

#### 3.1 การวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในแบบจำลองสมองจะถูกวิเคราะห์ในพิกัดสองมิติในระนาบ x - y และถูกคำนวณโดยใช้สมการแมกซ์เวลล์ (Maxwell's equations) ในโหมดการแพร่กระจายคลื่นแบบทรานสเวอร์อิเล็กตริกเวฟ (Transverse electric wave mode : TE mode) หรือเรียกว่าคลื่นที่มีแนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง คือไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศของการแพร่กระจายของคลื่นแต่มีเฉพาะสนามแม่เหล็กในทิศทางนั้น สมการที่ได้จากพื้นฐานของสมการแมกซ์เวลล์ โดยการแพร่กระจายตัวแบบฮาร์มอนิก (Harmonic propagation) จะแสดงดังสมการต่อไปนี้ [9] :

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E} \right) - \left( \epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0} \right) k_0^2 \vec{E} = 0 \quad (1)$$

เมื่อ  $\vec{E}$  คือความเข้มของสนามไฟฟ้า (Electric field intensity (V/m))  $\mu_r$  คือค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ (Relative Permeability)  $\epsilon_r$  คือค่าเปอร์มิตติวิตีสัมพัทธ์ (Relative Permittivity)  $\epsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}$  F/m คือค่าเปอร์มิตติวิตีในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Permittivity of free space)  $\sigma$  คือค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity (S/m))  $\omega = 2\pi f$  คือความถี่เชิงมุม (Angular frequency (rad/s))  $k_0$  คือเลขคลื่นในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Wave number of free space) ( $m^{-1}$ ) และ  $j = \sqrt{-1}$  โดยเงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition) สำหรับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะมีดังต่อไปนี้

แบบจำลองสมองจะได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สม่ำเสมอทางด้านบนของแบบจำลอง ดังนั้นด้านบนของแบบจำลองจะพิจารณาให้มีเงื่อนไขขอบเขตของการแพร่กระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าแบบพอร์ต (Port boundary condition) ที่มีการระบุค่ากำลังของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ [9] :

$$S = \int (\vec{E} - \vec{E}_1) \cdot \vec{E}_1 / \int \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1 \quad (2)$$

## BME-06

ด้านล่างของแบบจำลองสมอง (แนวแกน x) จะพิจารณาให้มีเงื่อนไขขอบเขตแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor boundary condition) ดังนั้นความเข้มของสนามไฟฟ้าจะมีค่าเท่ากับศูนย์ :

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

### 3.2 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

การวิเคราะห์การกระจายตัวอุณหภูมิภายในแบบจำลองสมองจะได้รับการคำนวณสมการไบโอฮีท โดยการกระจายตัวอุณหภูมิภายในแบบจำลองสมองจะมีความสัมพันธ์กับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แบบจำลองสมองได้รับ โดยเมื่อสมองได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสมองจะดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นความร้อนภายใน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิของสมองเพิ่มขึ้น และเพื่อให้สอดคล้องกับการวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในพิกัดสองมิติในระนาบ x - y เช่นเดียวกับสมการไบโอฮีทในสถานะคงตัว (Steady state Bioheat equation) ที่ใช้ในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายในสมองจะสามารถเขียนได้เป็น [3,10] :

$$\nabla \cdot (k \nabla T) + \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} = 0 \quad (4)$$

เมื่อตัวห้อย  $b$  แทนเลือด (Blood)  $k$  คือค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity (W/m.K))  $\rho$  คือค่าความหนาแน่น (Density (kg/m<sup>3</sup>))  $C$  คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity (J/kg.K))  $\omega$  คืออัตราการแพร่กระจายตัวของเลือด (Blood perfusion rate (ml/min.100g))  $T$  คือค่าอุณหภูมิ (Temperature (°C))  $Q_{met}$  คือแหล่งความร้อนจากกระบวนการสันดาปภายใน (Metabolic heat generation source (W/m<sup>3</sup>)) และ  $Q_{ext}$  คือแหล่งความร้อนจากภายนอก (External heat source (W/m<sup>3</sup>)) ซึ่งอยู่ในรูปเทอมของสนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้จากการคำนวณในสมการที่ (5) [11] :

$$Q_{ext} = \frac{\sigma |\vec{E}|^2}{2} \quad (5)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะประกอบด้วย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมภายนอกต่อการกระจายตัวอุณหภูมิภายในแบบจำลองสมอง ดังนั้นเงื่อนไขขอบเขตทางด้านบนของแบบจำลองสำหรับการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะแบ่งออกเป็น 2 เงื่อนไข คือ เงื่อนไขที่ 1 จะใช้ในส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะพิจารณาให้อุณหภูมิชั้นหนังศีรษะมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งในที่นี้ให้เท่ากับ 30 °C [5]

$$\text{ที่ } r = r_4, \quad T_{scalp} = T_{ambient} \quad (6)$$

เงื่อนไขที่ 2 จะใช้ในส่วนการวิเคราะห์อิทธิพลของการแปรเปลี่ยนสถานะของสิ่งแวดล้อมภายนอก โดยจะพิจารณาให้มีเงื่อนไขคือผิวด้านนอกของชั้นหนังศีรษะจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนด้วยการพาความร้อน (Convection heat transfer) กับสิ่งแวดล้อมภายนอกคือ

$$\text{ที่ } r = r_4, \quad \hat{n} \cdot (k \nabla T) = h(T_{ambient} - T) \quad (7)$$

รอยต่อระหว่างแต่ละชั้นของสมองจะสมมติให้อุณหภูมิมีค่าเท่ากันและไม่มีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ (Heat flux) ความร้อน [5]

ด้านล่างของแบบจำลองสมอง ( $x = 0$ ) จะพิจารณาให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวน หรือไม่มีการถ่ายเทความร้อน:

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

อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) ของสมองจะสมมติให้มีความสม่ำเสมอและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิปกติของร่างกายคือ 37 °C

โดยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับค่าความถี่และค่าคุณสมบัติทางความร้อนของชั้นต่างๆ ภายในสมองจะกำหนดให้มีค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 2 และตารางที่ 3 ตามลำดับ

## BME-06

ตารางที่ 1 ขนาดของรัศมี  $r$  จากจุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลมและความหนาของชั้นต่างๆ ภายในสมอง [8]

| ชนิดชั้นต่างๆ ภายในสมอง                         | ขนาดของรัศมี $r$ (mm) | ขนาดความหนา (mm)   |
|-------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| ชั้นหนังศีรษะ (Scalp)                           | 93 ( $r_4$ )          | 4 ( $r_4 - r_3$ )  |
| ชั้นกระดูก (Bone)                               | 89 ( $r_3$ )          | 4 ( $r_3 - r_2$ )  |
| ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) | 85 ( $r_2$ )          | 18 ( $r_2 - r_1$ ) |
| ชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) | 67 ( $r_1$ )          | 67 ( $r_1$ )       |

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกที่ขึ้นกับค่าความถี่ของชั้นต่างๆ ภายในสมอง [12-13]

| ชนิดชั้นต่างๆ ภายในสมอง                         | 900 MHz        |                  | 1800 MHz       |                  |
|-------------------------------------------------|----------------|------------------|----------------|------------------|
|                                                 | $\sigma$ (S/m) | $\epsilon_r$ (-) | $\sigma$ (S/m) | $\epsilon_r$ (-) |
| ชั้นหนังศีรษะ (Scalp)                           | 0.87           | 41.41            | 0.52           | 32.5             |
| ชั้นกระดูก (Bone)                               | 0.34           | 20.79            | 0.16           | 8.0              |
| ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) | 0.765*         | 45.805*          | 1.7*           | 53.0*            |
| ชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) | 0.765*         | 45.805*          | 1.7*           | 53.0*            |

\*หมายเหตุ ค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกของชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) และชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) จะมีค่าเท่ากันที่ความถี่เท่ากัน เนื่องจากถือว่าชั้นทั้งสองสามารถรวมเป็นเนื้อเยื่อส่วนสมองส่วนใน (Brain tissue) ได้ [14]

ตารางที่ 3 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของชั้นต่างๆ ภายในสมอง [8]

| ชนิดชั้นต่างๆ ภายในสมอง                         | $C$      | $\rho$               | $k$     | $\omega$      | $Q_{met}$           |
|-------------------------------------------------|----------|----------------------|---------|---------------|---------------------|
|                                                 | (J/kg.K) | (kg/m <sup>3</sup> ) | (W/m.K) | (ml/min.100g) | (W/m <sup>3</sup> ) |
| ชั้นหนังศีรษะ (Scalp)                           | 4000     | 1000                 | 0.342   | 2             | 363.4               |
| ชั้นกระดูก (Bone)                               | 2300     | 1520                 | 1.16    | 1.8           | 368.3               |
| ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) | 3700     | 1030                 | 0.49    | 80            | 16700               |
| ชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) | 3700     | 1030                 | 0.49    | 20            | 4175                |
| เลือด (Blood)                                   | 3800     | 1050                 | 0.5     | N/A           | N/A                 |

N/A คือ Non-applicable

#### 4. การจำลองเชิงตัวเลข

สมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าควบคู่กับสมการถ่ายเทความร้อนจะถูกแก้ปัญหาคำนวณด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่านโปรแกรม COMSOL<sup>TM</sup> Multiphysics เพื่อศึกษาการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในสมองชั้นต่างๆ โดยสมการทั้งสองจะควบคู่กันด้วยเทอมแหล่งความร้อนจากภายนอก ( $Q_{ext}$ ) ในสมการที่ (5) โดยแบบจำลองจะถูกคำนวณโดยใช้เอลิเมนต์ (Element) รูปสามเหลี่ยม และใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงแบบลากรองจันดับที่สอง (Lagrange quadratic interpolation function) ในการประมาณค่าอุณหภูมิในแต่ละเอลิเมนต์

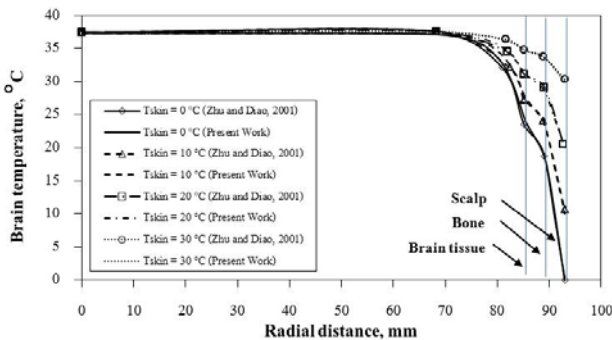
#### 5. ผลและการวิเคราะห์ผล

##### 5.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ศึกษาจะทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของสมองที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากงานวิจัยที่ [5] ด้วยสมการถ่ายเทความร้อนไบโอฮีทและเงื่อนไขในการวิเคราะห์เช่นเดียวกัน โดยในการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้แบบจำลองของสมองผู้ใหญ่ซึ่งประกอบด้วยชั้นของเนื้อเยื่อสมอง (Brain tissue) ชั้นกระดูก และชั้นหนังศีรษะ ซึ่งไม่ได้พิจารณาอิทธิพลของการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิวของชั้นหนังศีรษะแตกต่างกัน 4 อุณหภูมิ คือ

## BME-06

0 °C 10 °C 20 °C และ 30 °C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของเลือดมีค่าคงที่ที่ 37 °C ผลจากการเปรียบเทียบจะแสดงในรูปที่ 2 จากรูปพบว่า การกระจายตัวของอุณหภูมิของสมองในชั้นสมองทั้ง 3 ชั้น ที่อุณหภูมิผิวทั้ง 4 อุณหภูมิจากใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้และผลจากงานวิจัยที่ [5] จะมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการนำเสนอจึงมีความน่าเชื่อถือสามารถใช้ในการศึกษาในส่วนอื่นๆ ต่อไปได้



รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของชั้นต่างๆ ภายในสมองที่ได้จากแบบจำลองกับงานวิจัยที่ [5]  
ที่  $T_{skin} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$   $10\text{ }^{\circ}\text{C}$   $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  และ  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 5.2 อิทธิพลของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ในรูปที่ 3 จะแสดงอิทธิพลของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อรูปแบบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในสมองชั้นต่างๆ โดย ก) ที่ความถี่ 900 MHz และ ข) ที่ความถี่ 1800 MHz ตามลำดับ จากรูปจะเห็นได้ว่าค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าสนามไฟฟ้าภายในสมองชั้นต่างๆ มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อพิจารณาแบบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าที่ความถี่ต่างกัน จะพบว่าที่ความถี่ 900 MHz ค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงบริเวณชั้นหนังศีรษะและภายในชั้นสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน ในขณะที่ความถี่ 1800 MHz ค่าสนามไฟฟ้าจะมีค่าสูงบริเวณชั้นหนังศีรษะเท่านั้น โดยอิทธิพลของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสมองชั้นต่างๆ จะแสดงในรูปที่ 4 โดย ก) ที่ความถี่ 900 MHz และ ข) ที่ความถี่ 1800 MHz ตามลำดับ จากรูปจะพบว่าค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิภายในสมองมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ตรงกันข้ามกับอิทธิพลของค่าความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดย

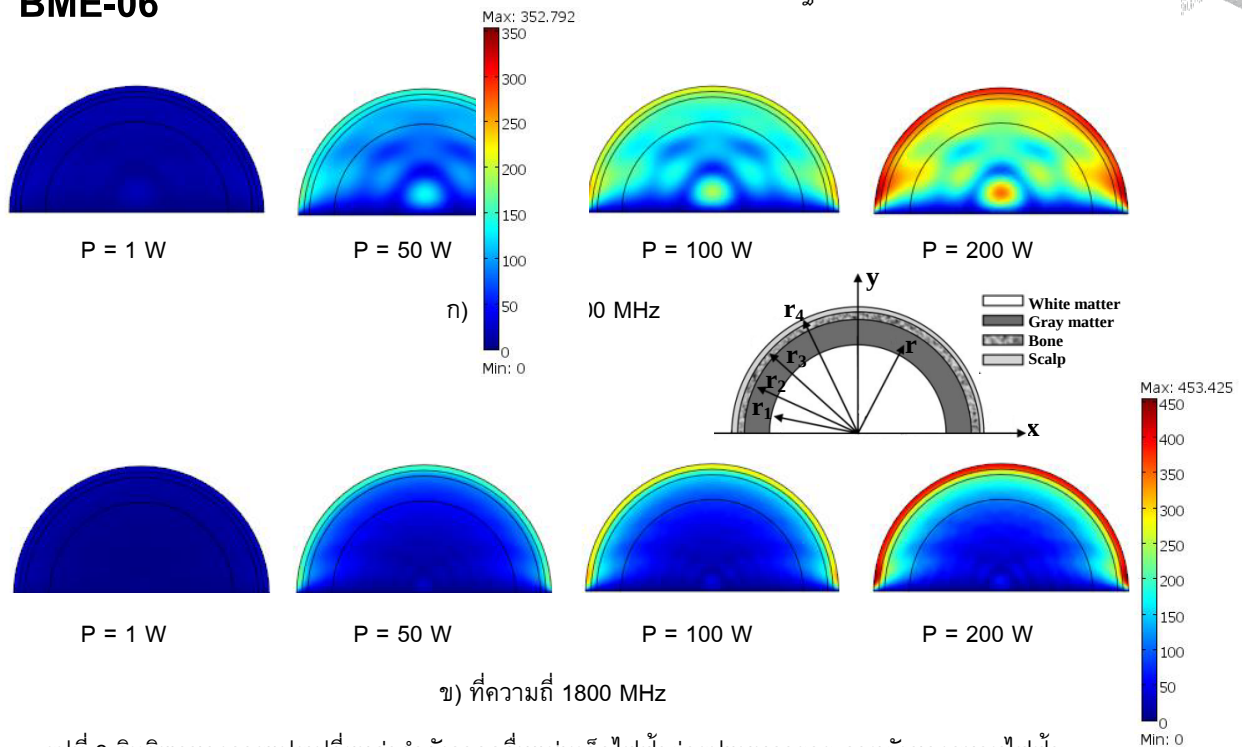
ค่าความถี่ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การกระจายอุณหภูมิภายในสมองมีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบความสัมพันธ์ของรูปแบบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าและรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิในรูปที่ 3 และ 4 จะพบว่ามีความสอดคล้องกัน บริเวณที่มีค่าสนามไฟฟ้ามากก็จะส่งผลให้มีค่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เนื่องจากเมื่อสมองได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สมองจะดูดซับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแปลงเป็นความร้อนภายใน ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น โดยพบว่าตำแหน่งของค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดจะไม่สอดคล้องกัน ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ จะแสดงดังตารางที่ 4

รูปที่ 5 และ รูปที่ 6 จะแสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิเมื่อแปรเปลี่ยนค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่าความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าอุณหภูมิภายในชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อนและชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้มจะมีความแตกต่างของค่าอุณหภูมิอย่างไม่มีนัยสำคัญ เนื่องจากชั้นภายในสมองทั้งสองชั้นมีค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและค่าคุณสมบัติทางความร้อนบางตัว ( $C$ ,  $\rho$  และ  $k$ ) ที่เท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยความเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิภายในชั้นกระดูกและชั้นหนังศีรษะเมื่อแปรเปลี่ยนค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz จะแสดงดังรูปที่ 5 และ รูปที่ 6 ตามลำดับ

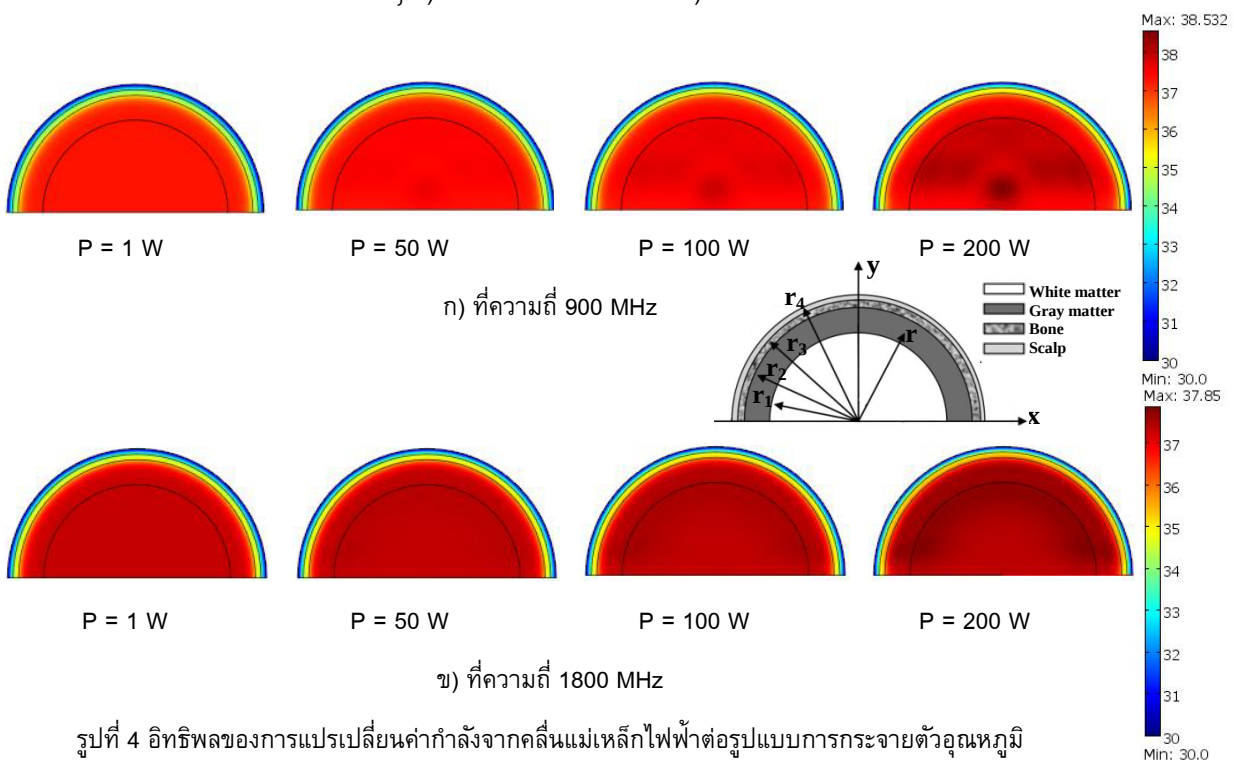
### 5.3 อิทธิพลของการแปรเปลี่ยนสภาวะของสิ่งแวดล้อมภายนอก

ในรูปที่ 7 แสดงการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในชั้นกระดูกและชั้นหนังศีรษะเมื่อพิจารณาให้ชั้นหนังศีรษะมีการถ่ายเทความร้อนด้วยการพาความร้อนกับสิ่งแวดล้อมภายนอก เมื่อศึกษาที่ค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 100 W และที่ความถี่ 900 MHz และ 1800 MHz โดยพิจารณาที่ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Heat transfer coefficient) 2 ค่า คือ  $h = 4\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  และอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอก  $T_{ambient} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$  [15] และ  $h = 8\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{ambient} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  [6] จากรูปจะเห็นได้ว่า ที่ความถี่เท่ากัน ที่  $h = 4\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{ambient} = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$  จะมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าที่  $h = 8\text{ W/m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$  และ  $T_{ambient} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

## BME-06



รูปที่ 3 อิทธิพลของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อรูปแบบการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าภายในสมองชั้นต่างๆ ก) ที่ความถี่ 900 MHz และ ข) ที่ความถี่ 1800 MHz

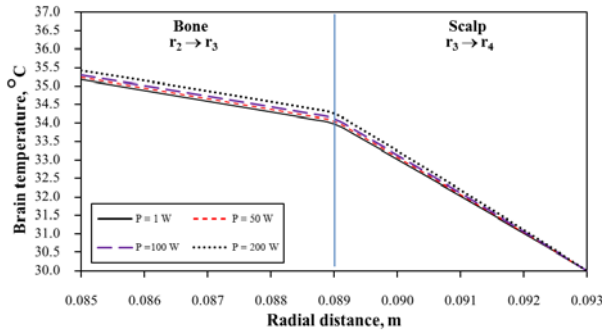


รูปที่ 4 อิทธิพลของการแปรเปลี่ยนค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อรูปแบบการกระจายตัวของอุณหภูมิภายในสมองชั้นต่างๆ ก) ที่ความถี่ 900 MHz และ ข) ที่ความถี่ 1800 MHz

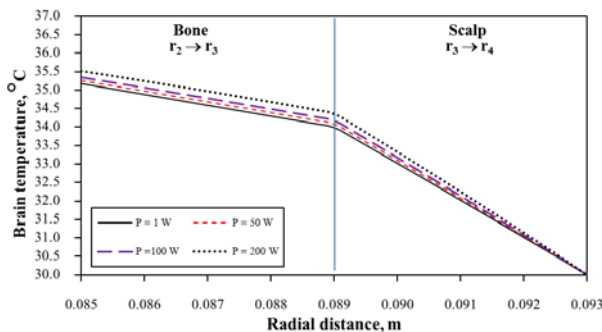
ตารางที่ 4 ค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดในสมองที่ค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ

| ค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า | ที่ความถี่ 900 MHz     |                 | ที่ความถี่ 1800 MHz    |                 |
|-------------------------------|------------------------|-----------------|------------------------|-----------------|
|                               | $\bar{E}_{\max}$ (V/m) | $T_{\max}$ (°C) | $\bar{E}_{\max}$ (V/m) | $T_{\max}$ (°C) |
| P = 1 W                       | 24.946                 | 37.320          | 32.062                 | 37.315          |
| P = 50 W                      | 176.396                | 37.618          | 226.712                | 37.446          |
| P = 100 W                     | 249.462                | 37.923          | 320.620                | 37.581          |
| P = 200 W                     | 352.792                | 38.532          | 453.425                | 37.850          |

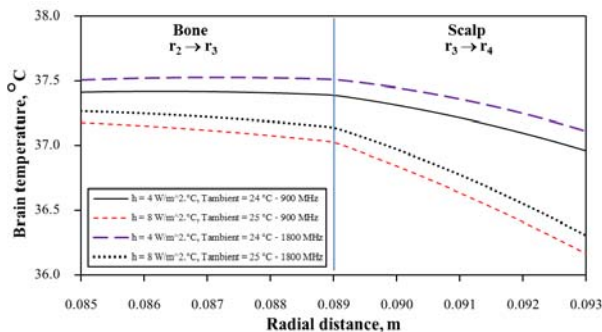
## BME-06



รูปที่ 5 การกระจายตัวอุณหภูมิที่ความถี่ 900 MHz  
เมื่อแปรเปลี่ยนค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 6 การกระจายตัวอุณหภูมิที่ความถี่ 1800 MHz  
เมื่อแปรเปลี่ยนค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า



รูปที่ 7 การกระจายตัวอุณหภูมิเมื่อพิจารณาให้ชั้นหนัง  
ศีรษะมีการพาความร้อนกับสิ่งแวดล้อมภายนอก เมื่อค่า  
กำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า 100 W และที่ความถี่  
900 MHz และ 1800 MHz

### 6. สรุปผล

บทความฉบับนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์การกระจาย  
ตัวของสนามไฟฟ้าและการกระจายตัวอุณหภูมิใน  
แบบจำลองสมองมนุษย์ชั้นต่างๆ เมื่อได้รับอิทธิพลจาก

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงค่า  
กำลังและความถี่จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และผลกระทบ  
จากสภาวะของสิ่งแวดล้อมภายนอกจะถูกศึกษา จากผล  
การศึกษาพบว่าค่ากำลังและค่าความถี่จากคลื่น  
แม่เหล็กไฟฟ้าจะแปรผันตรงกับการกระจายตัวของ  
สนามไฟฟ้า ส่วนค่ากำลังจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะแปร  
ผันตรงกับการกระจายตัวอุณหภูมิในขณะที่ค่าความถี่จะ  
แปรผกผันกับการกระจายตัวอุณหภูมิ และพบว่าตำแหน่ง  
ที่เกิดค่าสนามไฟฟ้าสูงสุดและค่าอุณหภูมิสูงสุดจะไม่  
สอดคล้องกัน ในกรณีที่ค่าความถี่ต่างกัน สำหรับ  
การศึกษาอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมภายนอกจะพบว่าที่  
ค่าความถี่เท่ากันที่  $h = 4 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  และ  $T_{\text{ambient}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$  จะมีค่าอุณหภูมิสูงกว่าที่  $h = 8 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  และ  $T_{\text{ambient}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  โดยผลจากการจำลองเชิงตัวเลขใน  
การศึกษานี้จะเป็นประโยชน์พื้นฐานในการแสดงให้เห็น  
ลักษณะการถ่ายโอนความร้อนภายในสมองมนุษย์และ  
อวัยวะส่วนอื่นๆ เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

### 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงาน  
กองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้หมายเลขทุน  
TRG5780208 และมหาวิทยาลัยมหิดล

### 8. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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*, vol. 134, December 2012, pp. 121101-1 – 121101-10.
- [2] Guyton, A. C., and Hall, J. E. (1996) *Textbook of Medical Physiology*, Saunders, Philadelphia, PA, Chap. 73.
- [3] 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), October 2011, pp. 347 – 359.

## BME-06

- [4] Pennes, H.H. (1998) Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm, *Journal of Applied Physiology*, vol. 85(5-34), July 1998, pp. 65 – 76.
- [5] Zhu, L. and Diao, C. (2001) Theoretical simulation of temperature distribution in the brain during mild hypothermia treatment for brain injury, *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 39, August 2001, pp. 681 – 687.
- [6] Diao, C., Zhu, L. and Wang, H. (2003) Cooling and rewarming for brain ischemia or injury: theoretical analysis, *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 31(3), December 2002, pp. 346–353.
- [7] Elwassif, M. M., Kong, Q., Vazquez, M. and Bikson, M. (2006) Bio-heat transfer model of deep brain stimulation - induced temperature changes, *Journal of Neural Engineering*, vol. 3, November 2006, pp. 306 – 315.
- [8] Konstas, A.A., Neimark, M.A., Laine, A.F. and Spellman, J.P. (2007) A theoretical model of selective cooling using intracarotid cold saline infusion in the human brain, *Journal of Applied Physiology*, vol. 102, April 2007, pp. 1329 – 1340.
- [9] Wessapan, T., Srisawatthisukul, S. and Rattanadecho, P. (2011) The effects of dielectric shield on specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage microwave energy, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, December 2010, pp. 255–262.
- [10] Shen, W., and Zhang, J. (2005) Modeling and numerical simulation of bioheat transfer and biomechanics in soft tissue, *Mathematical and Computer Modeling*, vol. 41(11-12), May 2005, pp.1251 – 1265.
- [11] Keangin, P., Wessapan, T. and Rattanadecho, P. (2011) An analysis of heat transfer in liver tissue during microwave ablation using single and double slot antenna, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, April 2011, pp. 757–766.
- [12] Wang, J., Fujiwara, O. and Watanabe, S. (2006) Approximation of aging effect on dielectric tissue properties for SAR assessment of mobile telephones, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 48(2), May 2006, pp. 408 – 413.
- [13] Park, S., Jeong, J. and Lim, Y. (2004) Temperature rise in the human head and brain for portable handset at 900 and 1800 MHz, in: *Proceedings of the Fourth Microwave and Millimeter Wave Technology Conference, IEEE, Beijing, China*, 18-21 August 2004, pp. 966 – 969.
- [14] Van Leeuwen, G.M.J., Lagendijk, J. J.W., Van Leersum, B.J.A.M., Zwamborn, A.P.M., Hornsleth, S.N. and Kotte, A.N.T.J. (1999) Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone, *Physics in Medicine and Biology*, vol. 44, March 1999, pp. 2367 – 2379.
- [15] Datta, A. Elwassif, M. and Bikson, M. (2009) Bio-heat transfer model of transcranial DC stimulation: comparison of conventional pad versus ring electrode, 31<sup>st</sup> Annual International Conference of the IEEE EMBS Minneapolis, Minnesota, USA, September 2-6 2009, pp. 670-673