

การศึกษาผลการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในร่างกายมนุษย์จากแหล่งกำเนิด  
สัญญาณสถานีฐานโทรศัพท์และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า  
ในงานอุตสาหกรรม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

A STUDY OF THE DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN HUMAN  
BODY FROM BASE STATION AND INDUSTRIAL ELECTROMAGNETIC FIELD  
SOURCES USING 3D FINITE ELEMENT METHOD

วรา สุวรรณสินธุ์  
WARA SUWANSIN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2558

KMITL-2015-EN-M-045-029

การศึกษาผลการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในร่างกายมนุษย์จากแหล่งกำเนิด  
สัญญาณสถานีฐานโทรศัพท์และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า  
ในงานอุตสาหกรรม โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

A STUDY OF THE DISTRIBUTION OF ELECTROMAGNETIC FIELD IN HUMAN  
BODY FROM BASE STATION AND INDUSTRIAL ELECTROMAGNETIC FIELD  
SOURCES USING 3D FINITE ELEMENT METHOD



T139434

วรา สุวรรณสินธุ์  
WARA SUWANSIN

เลขหมู่.....139434  
เลขทะเบียน.....  
วันเดือนปี..... 3 พ.ย. 2558

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2558  
KMITL-2015-EN-M-045-029

COPYRIGHT 2015

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG





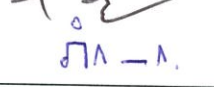
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาผลการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในร่างกายมนุษย์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณ  
สถานีฐานโทรศัพท์และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม โดยใช้ระเบียบ  
วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ

Thesis Title A Study of the Distribution of Electromagnetic Field in Human Body from  
Mobile Base Station and Industrial Electromagnetic Field Sources using 3D  
Finite Element Method

นักศึกษา นายวรา สุวรรณสินธุ์  
รหัสประจำตัว 55612716  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมชีวการแพทย์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2015-EN-M-045-029

| คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ |                | ลายมือชื่อ   |
|--------------------------|----------------|--|
| ผศ.ดร.สุพันธุ์           | ตั้งจิตกุลมั่น |  |
| รศ.ดร.ชูชาติ             | ปิณฑวิรุจน์    |  |
| ผศ.ดร.อาทร               | สรรพานิช       |  |
| ดร.สุรเดช                | ตรีไตรลักษณ์   |  |
| ผศ.ดร.ภัทรพงษ์           | ผาสุขกิจ       |  |

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558 เวลา 10.00-12.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
วันที่ 17 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2558

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์           | การศึกษาผลการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในร่างกายมนุษย์จากแหล่งกำเนิดสัญญาณสถานีฐานโทรศัพท์และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ |
| นักศึกษา                    | นายวรา สุวรรณสินธุ์   |
| รหัสประจำตัว                | 55612716  |
| ปริญญา                      | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  |
| สาขาวิชา                    | วิศวกรรมชีวการแพทย์   |
| พ.ศ.                        | 2558  |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ   |

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ เพื่อใช้ในการศึกษาศึกษาอัตราการดูดซับจำเพาะและความร้อนทางชีวภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อดูผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ โทรศัพท์เคลื่อนที่และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม บริเวณศีรษะและร่างกาย

การวิเคราะห์ด้วยระเบียบไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์ผลในทางฟิสิกส์ต่างๆ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ โทรศัพท์เคลื่อนที่และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม เพื่อสามารถทราบขีดจำกัดพารามิเตอร์ของปริมาณคลื่นที่ดูดซับในร่างกาย (ปริมาณ SAR) ได้โดยใช้การจำลองการทำงาน และแสดงผลที่สามารถทำให้เกิดความเข้าใจได้เป็นอย่างดี

|                |  |
|----------------|--|
| Thesis         | A Study of the Distribution of Electromagnetic Field in Human Body from Base Station and Industrial Electromagnetic Field Sources Using 3D Finite Element Method |
| Student        | Mr. Wara Suwansin  |
| Student ID.    | 55612716   |
| Degree         | Master of Engineering  |
| Program        | Biomedical Engineering   |
| Year           | 2015   |
| Thesis Advisor | Asst. Prof. Dr. Pattarapong Phasukkit  |

## ABSTRACT

This thesis presents three-dimensional finite element method for a study of the distribution of electromagnetic field from base station, mobile phone and industrial electromagnetic field sources in head and body.

Finite element method can analysis in physics for analysis of the effect the distribution of electromagnetic field from base station, mobile phone and industrial electromagnetic field sources to be able to know limit of the parameters of the electromagnetic wave absorption in the body (SAR) using simulation and shown that can cause it as well.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้และประสบการณ์ที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สุพันธ์ ตั้งจิตต์กุศลมัน รศ.ดร.ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ผศ.ดร. อาทร สรรพานิช และดร.สุรเดช ตริไตรลักษณะ ที่ให้แนวคิด คำปรึกษา และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆที่เกิดขึ้น

ขอขอบคุณ บริษัท CAD-IT CONSULTANATS (ASIA) PTE.LTD. ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำการใช้งานโปรแกรม ANSYS HFSS

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ส่วนบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้ความคำแนะนำให้การตรวจความถูกต้องของวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้คำแนะนำความรู้ด้านวิศวกรรมการแพทย์ที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คุณKANAE KOZAKAI ที่คอยดูแลเรื่องอาหารตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ ร่วมกับ ผศ.ดร.ภัทรพงษ์ ผาสุขกิจ

ขอบพระคุณ คุณย่าอาภรณ์ คุณพ่อทวิศักดิ์ คุณแม่มลิวัลย์ สุวรรณสินธุ์ คุณนุชญา เทียงตรง คุณนราวิชัย สุวรรณสินธุ์ และครอบครัวทุกคน ที่คอยสนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา ผู้วิจัยหวังว่าบทความวิจัยนี้จะ เป็นประโยชน์แก่ผู้สนใจและสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆได้

วรา สุวรรณสินธุ์

# สารบัญ

หน้า

|   |     |
|---|-----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....  | I   |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....   | II  |
| กิตติกรรมประกาศ.....  | III |
| สารบัญ.....   | IV  |
| สารบัญตาราง.....  | IX  |
| สารบัญรูป.....  | X   |
| บทที่ 1 บทนำ.....   | 1   |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....   | 1   |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....   | 2   |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา .....   | 2   |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....  | 3   |
| 1.5 ขอบเขตการวิจัย.....   | 3   |
| 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์.....   | 4   |
| บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง.....  | 5   |
| 2.1 บทนำ.....   | 5   |
| 2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method).....   | 5   |
| 2.2.1 การประยุกต์ใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....  | 6   |
| 2.3 การวิเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า.....   | 7   |
| 2.3.1 สมการแมกเวลล์ (Maxwell's Equation).....   | 8   |
| 2.3.2 สมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรตามเวลา.....  | 8   |
| 2.3.3 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำ.....  | 9   |
| 2.3.4 ตัวนำของไดอิเล็กตริก.....   | 11  |
| 2.4 ความรู้เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน.....   | 12  |
| 2.5 คลื่นแม่เหล็กกับสุขภาพ.....   | 12  |
| 2.5.1 อันตรายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการแผ่รังสีชนิดที่ทำให้แตกตัว.....   | 13  |
| 2.5.2 อันตรายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการแผ่รังสีชนิดไม่แตกตัว.....  | 13  |
| 2.6 ความรู้เกี่ยวกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และการส่งสัญญาณของสถานีฐาน.....   | 14  |
| 2.7 ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอาการหรือโรคต่างๆที่อาจเกี่ยวเนื่องกับผลกระทบของ<br>คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อสุขภาพ..... | 15  |
| 2.7.1 ผลกระทบระยะสั้น.....  | 16  |
| 2.7.2 ผลกระทบระยะยาว.....   | 16  |
| 2.7.3 อาการปวดศีรษะ.....  | 16  |
| 2.7.3.1 กลุ่มอาการปวดศีรษะชนิดไม่มีรอยโรคในสมองชัดเจน.....  | 16  |

## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 2.7.3.2 กลุ่มอาการปวดศีรษะชนิดมีสาเหตุ.....   | 17   |
| 2.7.4 โรคมะเร็ง.....  | 17   |
| 2.7.4.1 มะเร็งหรือเนื้องอกในสมอง.....   | 18   |
| 2.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเนื่อง.....                    | 18   |
| 2.8.1 อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ.....  | 18   |
| 2.8.2 สมการของอัตราดูดซับพลังงานจำเพาะ.....   | 19   |
| 2.8.3 สมการการถ่ายเทความร้อนในทางชีวภาพ.....  | 19   |
| 2.8.4 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อเนื่องภายในร่างกาย.....                                   | 19   |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....   | 21   |
| 3.1 การออกแบบ.....  | 21   |
| 3.1.1 โครงสร้างแบบจำลองของศีรษะ.....  | 21   |
| 3.2 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผล.....  | 24   |
| 3.3 ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....                                   | 24   |
| 3.4 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลอง.....  | 25   |
| 3.5 การเมชแบบจำลอง.....   | 25   |
| 3.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต.....   | 26   |
| 3.7 การประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลอง.....  | 28   |
| 3.8 เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า.....   | 28   |
| 3.9 ขั้นตอนกระบวนการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลจากสถานีโทรศัพท์เคลื่อนที่.....          | 29   |
| 3.9.1 การทดสอบจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่.....  | 29   |
| 3.9.1.1 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดสงขลา (ภาคใต้).....                           | 30   |
| 3.9.1.2 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดขอนแก่น (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ).....          | 31   |
| 3.9.1.3 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดกรุงเทพฯ (ภาคกลาง).....                       | 32   |
| 3.9.1.4 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดพะเยา (ภาคเหนือ).....                         | 33   |
| 3.9.1.5 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดกาญจนบุรี (ภาคตะวันตก).....                   | 34   |
| 3.9.2 การวิเคราะห์ผลจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่.....                                  | 35   |
| 3.10 ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบโทรศัพท์เคลื่อนที่.....                            | 36   |
| 3.11 ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลกระทบจากอุปกรณ์ไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม.....             | 37   |
| 3.12 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์.....           | 38   |
| บทที่ 4 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์..... | 57   |
| 4.1 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่.....                   | 57   |
| 4.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่.....                  | 64   |

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| 4.2.1 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา.....                                  | 64 |
| 4.2.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลความร้อนทางชีวภาพ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา.....   | 65 |
| 4.2.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอบ้านใหม่ จังหวัดขอนแก่น.....                            | 66 |
| 4.2.4 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลความร้อนทางชีวภาพ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านใหม่ อำเภอบ้านใหม่ จังหวัดขอนแก่น.....                                       | 67 |
| 4.2.5 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร.....                                | 68 |
| 4.2.6 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลความร้อนทางชีวภาพ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร.....   | 69 |
| 4.2.7 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลน้ำแวน อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา.....                                 | 70 |
| 4.2.8 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลความร้อนทางชีวภาพ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลน้ำแวน อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา.....  | 71 |
| 4.2.9 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี.....                              | 72 |
| 4.2.10 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลความร้อนทางชีวภาพ<br>จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี.....  | 73 |
| 4.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงาน<br>จำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงาน<br>อุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ ..... | 74 |
| 4.3.1 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับ<br>พลังงานจำเพาะที่บริเวณหลอดเลือดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า<br>ในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์.....       | 74 |
| 4.3.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูด<br>ซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระดูกจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า<br>ในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์.....          | 76 |
| 4.3.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับ<br>พลังงานจำเพาะที่บริเวณดวงตาจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใน<br>งานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์.....           | 78 |



## สารบัญ (ต่อ)

|   | หน้า |
|---|------|
| 4.4 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโทรศัพท์เคลื่อนที่.....  | 100  |
| 4.4.1 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตรการดูดซับ<br>พลังงานจำเพาะและ ผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>ย่านความถี่ 800-900 MHz กำลังส่ง 2 วัตต์.....  | 100  |
| 4.4.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตรการดูดซับ<br>พลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>ย่านความถี่ 1800-1900 MHz กำลังส่ง 2 วัตต์..... | 102  |
| 4.4.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตรการดูดซับ<br>บพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>ย่านความถี่ 2100 MHz กำลังส่ง 2 วัตต์.....     | 104  |
| บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ.....  | 106  |
| อ้างอิง.....  | 108  |
| ภาคผนวก ก.....  | 110  |
| ประวัติผู้เขียน.....  | 115  |

# สารบัญตาราง

| ตารางที่  | หน้า |
|---|------|
| 1.1 ขีดจำกัดความแรงสนามแม่เหล็กของกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไป.....           | 2    |
| 2.1 ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่าง ๆ.....  | 12   |
| 3.1 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 800 และ 900 MHz.....  | 38   |
| 3.2 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 1800 และ 1900 MHz.....  | 40   |
| 3.3 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 2100 MHz.....   | 42   |
| 3.4 ค่าหนาแน่นของเนื้อเยื่อต่างๆ.....   | 44   |
| 3.5 ค่าการสัมประสิทธิ์นำความร้อนของเนื้อเยื่อต่างๆ.....   | 48   |
| 4.1 ตารางขีดจำกัดค่า SAR ของผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นทั่วไป..                                      | 58   |
| 4.2 ขีดจำกัดความแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นทั่วไป.....                | 58   |
| 4.1 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสทิงพระจังหวัดสงขลา (ภาคใต้).....                   | 59   |
| 4.2 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)..... | 60   |
| 4.3 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (ภาคกลาง).....                 | 61   |
| 4.4 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา (ภาคเหนือ).....                            | 62   |
| 4.5 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี (ภาคตะวันตก).....            | 63   |

# สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า  |
|--------|---|
| 2.1    | แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด.....5  |
| 2.2    | รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระดูก.....7   |
| 2.3    | การแพร่กระจายรังสีจากสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่.....24   |
| 3.1    | โครงสร้างของแบบจำลองสี่ระยะ.....21  |
| 3.2    | โครงสร้างแบบจำลองสี่ระยะ (ก) โครงสร้างชั้นผิวหนัง (ข) โครงสร้างชั้นกระดูก<br>(ค) โครงสร้างชั้นกระดูก.....23   |
| 3.3    | ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย.....24   |
| 3.4    | การเมชแบบจำลองสี่ระยะ.....25  |
| 3.5    | การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแต่ละตำแหน่งประกอบด้วย<br>(ก) ตำแหน่งบริเวณผิวหนัง (ข) ตำแหน่งบริเวณกระดูก (ค) ตำแหน่งบริเวณสมอง<br>(ง) ตำแหน่งบริเวณจุดสัมผัสความแรงสนามไฟฟ้า.....26 |
| 3.6    | เครื่องตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ยี่ห้อ Narda.....28   |
| 3.7    | แสดงตำแหน่งการวัดค่าระดับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่<br>ความสูงจากพื้น P1-P4 เทียบกับตำแหน่งอวัยวะต่างๆ ที่สำคัญของร่างกายมนุษย์.....29                                   |
| 3.8    | ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่ง<br>สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา.....30   |
| 3.9    | ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่ง<br>สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น.....31   |
| 3.10   | ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่ง<br>สัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร.....32   |
| 4.1    | ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>จังหวัดสงขลา (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....64   |
| 4.2    | ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัด<br>สงขลา (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....65  |
| 4.3    | ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>จังหวัดขอนแก่น (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....66   |

## สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่   | หน้า |
|--|------|
| 4.4 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดขอนแก่น<br>(ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....  | 67   |
| 4.5 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>จังหวัดกรุงเทพมหานคร (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....  | 68   |
| 4.6 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ กรุงเทพมหานคร<br>(ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....   | 69   |
| 4.7 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัด<br>พะเยา (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....   | 70   |
| 4.8 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดพะเยา<br>แนวระนาบ (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....   | 71   |
| 4.9 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>จังหวัดกาญจนบุรี (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....  | 72   |
| 4.10 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่<br>จังหวัดกาญจนบุรี (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz.....   | 73   |
| 4.11 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหลอดเลือดจากแหล่งกำเนิดคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง<br>(ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง..... | 74   |
| 4.12 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระดูกจากแหล่งกำเนิดคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง<br>(ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....    | 76   |
| 4.13 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณสมองจากแหล่งกำเนิดคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง<br>(ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....      | 78   |
| 4.14 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณดวงตาจากแหล่งกำเนิดคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง<br>(ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....     | 80   |
| 4.15 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไขม้นจากแหล่งกำเนิดคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง<br>(ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....     | 82   |
| 4.16 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหัวใจจากแหล่งกำเนิดคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง<br>(ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....     | 84   |

## สารบัญญรูป (ต่อ)

| รูปที่  | หน้า |
|---|------|
| 4.17 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณลำไส้จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....   | 86   |
| 4.18 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไตจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....  | 88   |
| 4.19 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณตับจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....   | 90   |
| 4.20 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณปอดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....   | 92   |
| 4.21 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกล้ามเนื้อจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....  | 94   |
| 4.22 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณผิวหนังจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....   | 96   |
| 4.23 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไตจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง.....  | 98   |
| 4.24 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการ อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 800-900 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ.....   | 100  |
| 4.25 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการ อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 1800-1900 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ..... | 102  |
| 4.26 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการ อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 2100 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ.....      | 104  |

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ โทรศัพท์มือถือ ที่เราใช้กันอย่างแพร่หลายในชีวิตประจำวัน และสามารถทำให้เราพูดคุยติดต่อกันได้ทุกที่ ทุกเวลา ทั่วประเทศ หรือทั่วโลกนั้น มีหลักการสำคัญที่ทำให้การติดต่อสื่อสาร คือ การสื่อสารผ่าน “คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า” ซึ่งโทรศัพท์เคลื่อนที่เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ติดตัวผู้ใช้เกือบตลอดเวลา จึงทำให้มีคนสนใจเพิ่มมากขึ้นว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นมีผลต่อสุขภาพหรือไม่ สำหรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จัดอยู่ในจำพวกรังสีชนิดไม่แตกตัวเป็นไอออน (Non-ionizing radiation) ซึ่งมีพลังงานโฟตอนไม่สูงพอที่จะทำลายโครงสร้างของอะตอมหรือโมเลกุล กล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือ ไม่มีอำนาจเพียงพอที่จะทำลาย DNA ในสิ่งมีชีวิต ซึ่งรังสีชนิดนี้จะแตกต่างกับรังสีชนิดแตกตัวเป็นไอออน (Ionizing radiation) เช่น รังสียูวีในแสงอาทิตย์ รังสีเอ็กซ์ (x-ray) รังสีแกมมา (Gamma ray) เป็นต้น ซึ่งสามารถทำลายโครงสร้างของอะตอมและโมเลกุลได้

ความกังวลต่อสุขภาพของผู้ใช้อุปกรณ์สื่อสารไร้สายและเครื่องส่งวิทยุ-โทรทัศน์ ได้นำไปสู่การศึกษาทางวิทยาศาสตร์ เพื่อดูผลกระทบทางชีววิทยาจากการสัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และผลการศึกษาได้ถูกนำไปใช้ในการพัฒนามาตรฐานการสัมผัสสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

เพื่อความปลอดภัยของสุขภาพประชาชนที่ต้องเกี่ยวข้องกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อยู่รอบตัวเราตลอดเวลาเช่นเดียวกับอากาศที่เราหายใจ ประเทศต่าง ๆ จึงมีการจัดตั้งหน่วยงานเพื่อกำกับดูแลและกำหนดหลักเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับอุปกรณ์สื่อสารที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งจะทำให้ประชาชนมั่นใจได้ว่าคลื่นที่ได้สัมผัสนั้นจะไม่ทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยสำหรับประเทศไทยนั้น หน่วยงานที่ดูแลหลักเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยดังกล่าว คือ สำนักงานคณะกรรมการกิจการกระจายเสียง กิจการโทรทัศน์ และกิจการโทรคมนาคมแห่งชาติ (สำนักงาน กสทช.) ซึ่งมีหน้าที่กำกับดูแล และกำหนดค่ามาตรฐานการใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าให้มีความทันสมัย และสอดคล้อง เป็นไปตามหลักมาตรฐานสากล โดย สำนักงาน กสทช. ได้กำหนดขีดจำกัดความแรงของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไป ดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขีดจำกัดความแรงสนามแม่เหล็กของกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไป [12]

| กลุ่มผู้ได้รับคลื่น   | ผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า<br>จากการทำงาน |      |      | ผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า<br>ทั่วไป |      |      |
|---|--|------|------|---------------------------------------|------|------|
|   | ความถี่ (MHz)                              | 900  | 1800 | 2100                                  | 900  | 1800 |
| E-field strength (V/m)  | 90   | 127  | 137  | 41                                    | 58   | 61   |
| H-field strength (A/m)  | 0.24                                       | 0.33 | 0.36 | 0.11                                  | 0.15 | 0.16 |
| Equivalent plane wave<br>power density Seq<br>(W/m <sup>2</sup> ) | 22.5                                       | 45   | 50   | 4.5                                   | 9    | 10   |

เพื่อเป็นการสำรวจและศึกษาถึงผลกระทบจากการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ในแต่ละพื้นที่ในภูมิภาคต่างๆ ของประเทศไทย จึงได้ดำเนินการทดสอบระดับความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ ในการจำลองเพื่อศึกษาอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนทางชีวภาพการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะเพื่อดูผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่และโทรศัพท์เคลื่อนที่

2. ใช้ระเบียบวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ แบบ 3 มิติ ในการจำลองเพื่อศึกษาอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและความร้อนทางชีวภาพการของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อดูผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม

## 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เนื่องจากปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีประชาชนจำนวนมากเป็นกังวลและตั้งข้อสงสัยเกี่ยวกับอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ และที่พวกอาศัยใกล้กับสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ด้านอันตรายที่สุดของโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็คือ การแผ่รังสีของตัวโทรศัพท์ โดยเมื่อเราพูดโทรศัพท์เคลื่อนที่ และการแผ่รังสีสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อส่งสัญญาณติดต่อกับระบบเครือข่ายตลอดเวลาและแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็ก

ฟ้าในงานอุตสาหกรรมในกรณีเกิดการรั่วไหลของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงมีความสนใจเพื่อศึกษาอันตรายจากการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ อันตรายจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ แหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมในกรณีเกิดการรั่วไหลต่อประชาชน โดยทางผู้วิจัยได้ศึกษาอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะเพื่อเทียบกับค่ามาตรฐานที่ทางองค์การอนามัยโลกกำหนดว่าเกินขีดจำกัดมาตรฐานหรือไม่

#### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแก้สมการเชิงอนุพันธ์ในการแก้ปัญหา การวิเคราะห์ ด้านความร้อนใช้สมการความร้อนทางชีวภาพเพื่อศึกษาอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะเพื่อดูผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่, โทรศัพท์เคลื่อนที่และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม เพื่อศึกษาในรูปแบบ 3 มิติ รวมทั้งศึกษาผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทางความร้อนทางชีวภาพ

#### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

- การใช้ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษาการจำลองและวิเคราะห์อัตราการดูดซับจำเพาะและความร้อนทางชีวภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า
- ศึกษาอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อดูผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่, โทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่บริเวณศีรษะและแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่บริเวณลำตัว
- ศึกษาความร้อนทางชีวภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพื่อดูผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่, โทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่บริเวณศีรษะและแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่บริเวณลำตัว

## 1.6 โครงสร้างวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทในแต่ละบทจะมีเนื้อหาดังต่อไปนี้

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของงานวิจัย สมมติฐานของการศึกษา ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย และขอบเขตของงานวิจัย

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องซึ่งจะประกอบไปด้วย ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน การวิเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า ความรู้เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชีวิตประจำวัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสุขภาพ ความรู้เกี่ยวกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และการส่งสัญญาณของสถานีฐาน ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอาคารหรือโรคต่างๆ ที่อาจเกี่ยวเนื่องกับผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อสุขภาพ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเนื่อง

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกจำลองทางคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์วิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เครื่องมือวัดความแรงสนามไฟฟ้า ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการวัดความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่ ผลการจำลองอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานของโทรศัพท์เคลื่อนที่, โทรศัพท์เคลื่อนที่ และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะถึงแนวทางในงานวิจัยต่อไป

## บทที่ 2

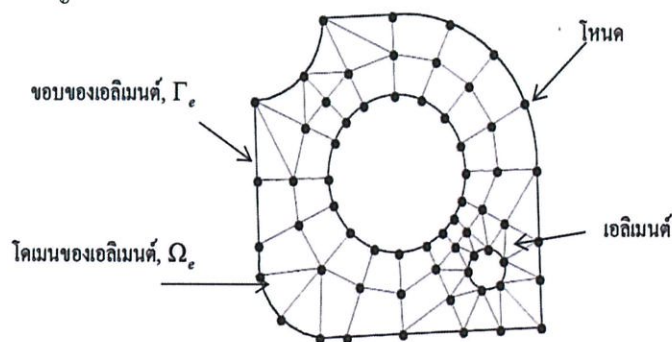
# หลักการและทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 บทนำ

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้องซึ่งจะประกอบไปด้วย ระเบียบวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์และการประยุกต์ใช้งาน การวิเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า ความรู้เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชีวิตประจำวัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสุขภาพ ความรู้เกี่ยวกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และการส่งสัญญาณของสถานีฐาน ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอาการหรือโรคต่างๆ ที่อาจเกี่ยวเนื่องกับผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อสุขภาพ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเนื่อง

### 2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method)

ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Method) หรือ FEM เป็นวิธีการคำนวณเชิงตัวเลขชนิดหนึ่งสำหรับแกสมการเชิงอนุพันธ์ ในการแก้ปัญหาหนึ่งๆ ด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ จะทำการแบ่งรูปร่างของปัญหาออกเป็นเนื้อที่หลายๆ ชิ้นที่เรียกว่าเอลิเมนต์ (Element) รูปแบบที่เที่ยงตรงดังรูปที่ 2.1 ในการแก้ปัญหาใดปัญหาหนึ่ง ปัญหานั้นจะต้องประกอบด้วย สมการเชิงอนุพันธ์และเงื่อนไขขอบเขตที่กำหนดมา การหาค่าผลเฉลยแม่นยำตรง (Exact solution) จะประกอบด้วยค่าต่างๆ เป็นจำนวนอนันต์ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่าผลเฉลยได้ จึงต้องเปลี่ยนค่าทั้งหมดที่เป็นอนันต์ให้เป็นจำนวนที่นับได้ (Finite) ทำการแทนรูปร่างลักษณะของปัญหาด้วยเอลิเมนต์ที่มีขนาดต่างๆ กัน หลักการทางไฟไนต์เอลิเมนต์จะเริ่มจากการพิจารณา เอลิเมนต์ทีละเอลิเมนต์ทำการสร้างสมการให้แต่ละเอลิเมนต์ที่สอดคล้องกับสมการเชิงอนุพันธ์ของปัญหานั้นๆ จากนั้นจึงนำสมการของแต่ละเอลิเมนต์ที่สร้างขึ้นมาประกอบเข้าด้วยกัน รวมเป็นระบบสมการชุดใหญ่ จากนั้น ทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตที่ให้มาลงในสมการชุดใหญ่ แล้วจึงทำการแก้สมการ และจะเกิดผลเฉลยโดยประมาณที่ตำแหน่งต่างๆ ของปัญหานั้น



รูปที่ 2.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์และโหนด [10]

กระบวนการวิเคราะห์ปัญหาใดๆโดยทั่วไปด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ จะประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งโดเมนของปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ย่อยๆ กระบวนการขั้นตอนแรกนี้โดยปกติจะใช้เวลามากในทางปฏิบัติ เพราะจำเป็นต้องสร้างรูปร่างของปัญหา (Geometry) อย่างถูกต้องขึ้นมาก่อน รูปร่างของปัญหาอาจประกอบด้วยส่วนเว้าส่วนโค้งที่มีความซับซ้อน ในขั้นตอนนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยความรู้อันประกอบไปด้วยประสบการณ์เป็นอย่างมาก

ขั้นตอนที่ 2 การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์ เอลิเมนต์ย่อยที่แบ่งบนโดเมนของปัญหานั้นอาจเป็นเอลิเมนต์ในรูปแบบของสามเหลี่ยมหรือสี่เหลี่ยมด้านไม่เท่าก็ได้ หากแบ่งออกเป็นเอลิเมนต์สามเหลี่ยม ตัวไม่รู้ค่า (Unknowns) จะอยู่ที่มุมทั้งสามของสามเหลี่ยมนั้น ซึ่งเรียกกันว่าจุดต่อ (Node) การเลือกใช้ชนิดของเอลิเมนต์จะสอดคล้องกับลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าที่สมมติขึ้นบนเอลิเมนต์นั้นๆ เช่นหากเลือกใช้เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบสาม จุดต่อที่มุมทั้งสามแล้ว ลักษณะการกระจายของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์นั้นจะถูกสมมติให้อยู่ในรูปแบบของแผ่นเรียบ เป็นต้น แต่หากเลือกใช้เอลิเมนต์แบบสี่เหลี่ยมแบบสี่ จุดต่อที่มุมทั้งสี่ลักษณะการกระจาย ของตัวไม่รู้ค่าบนเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมนี้อาจไม่เรียบแต่โค้งไปโค้งมาได้ ดังนั้นการเลือกใช้เอลิเมนต์ชนิดต่างๆกัน จึงมีผลโดยตรงกับผลลัพธ์ที่จะคำนวณได้

ขั้นตอนที่ 3 การประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการเชิงอนุพันธ์ที่สอดคล้องกับปัญหาที่วิเคราะห์อยู่นั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นสมการทางพีชคณิตที่เรียกกันว่า สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะถูกสร้างขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์เนื่องจากเอลิเมนต์ต่างมีขนาดไม่เท่ากัน กระบวนการประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากสมการเชิงอนุพันธ์นี้นับเป็นหัวใจหลักของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพราะหากมีความเข้าใจในขั้นตอนนี้แล้วก็สามารถประยุกต์ใช้วิธีการทำนองเดียวกันนี้ในการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์อื่นๆได้

ขั้นตอนที่ 4 การรวมสมการไฟไนต์เอลิเมนต์เข้าด้วยกันแล้วแก้ระบบสมการใหญ่ สมการไฟไนต์เอลิเมนต์อยู่ในรูปแบบของสมการทางพีชคณิตซึ่งได้ประดิษฐ์ขึ้นสำหรับแต่ละเอลิเมนต์ในขั้นตอนนี้แล้วจำเป็นต้องนำมารวมกันอย่างถูกต้องและมีหลักการ การประกอบสมการไฟไนต์เอลิเมนต์แต่ละสมการเข้าด้วยกัน จะก่อให้เกิดระบบสมการขนาดใหญ่ จากนั้นจึงประยุกต์เงื่อนไขขอบเขตของปัญหานั้นๆ ก่อนแก้ระบบสมการขนาดใหญ่ชุดนั้นเพื่อหาผลลัพธ์ที่จุดต่อ ซึ่งผลลัพธ์ที่จุดต่อเหล่านี้อาจแทนค่าอุณหภูมิหากเป็นการวิเคราะห์ ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อน เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 5 การคำนวณหาค่าอื่นๆที่เหลือจากนั้นจึงเป็นการหาค่าอื่นๆ ที่ต้องการทราบเพื่อที่จะทำให้ปัญหานั้นได้รับการวิเคราะห์โดยสมบูรณ์ เช่น ในการแก้ปัญหาด้านความร้อน เมื่อทราบอุณหภูมิตามตำแหน่งต่างๆ แล้วก็จะสามารถคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ความร้อนที่ไหลผ่านได้

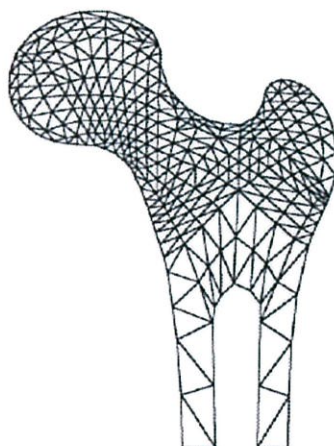
### 2.2.1 การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานต่างๆ ทางด้านวิศวกรรมโดยปกติแล้วพบว่ามีความซับซ้อนมาก วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จึงมีบทบาทเป็นอย่างมากในการช่วยแก้ปัญหาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นปัญหาด้านการยืดหยุ่นของแข็ง ปัญหาด้านการถ่ายเทความร้อนหรือจะเป็นปัญหาด้านการไหลของของไหล เป็นต้น และเมื่อศึกษาถึงภาพรวมและประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะพบว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์

สามารถนำไปใช้ประยุกต์กับงานชนิดต่างๆได้ หากปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นกับงานชนิดนั้นๆ สามารถอธิบายได้ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์จากประสิทธิภาพของวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ควบคู่กันกับวิวัฒนาการทางด้านคอมพิวเตอร์จะทำให้เราสามารถคำนวณหาปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้โดยสะดวกและยังทำให้ลดค่าใช้จ่ายที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการทดลองอีกด้วย

การแก้ปัญหาด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ในสมัยแรกๆ เริ่มปรากฏให้เห็นในงานทางด้านกลศาสตร์ของแข็งและโครงสร้างเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้แก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาที่มีรูปร่างซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้การประยุกต์ใช้วิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ขยายวงกว้างออกไปในงานที่นอกเหนือไปจากงานทางด้านวิศวกรรม เช่น ในงานทางด้าน การแพทย์ เป็นต้น จากรูปที่ 2.2 แสดงรูปแบบจำลองของไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อใช้หาการกระจายของความเค้นในกระดูก นอกเหนือจากนั้นวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ยังถูกนำไปประยุกต์ใช้กับงานทางด้าน การแพทย์ในรูปแบบอื่นๆ อาทิเช่น การคำนวณหาลักษณะการไหลของเลือดในเส้นเลือดและหัวใจ รวมทั้งความกดดันที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ ในเส้นเลือด เป็นต้น

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์มีส่วนช่วยเป็นอย่างมากในการศึกษาและออกแบบงานด้านต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นงานทางด้านวิศวกรรมต่างๆ หรือแม้แต่งานทางด้าน การแพทย์ดังที่กล่าวในข้างต้น ซึ่งวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์จะช่วยให้เราสามารถออกแบบงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และยังรวมถึงช่วยลดค่าใช้จ่ายที่จะต้องใช้ในการทดลองอีกด้วย



รูปที่ 2.2 รูปแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระดูก [10]

### 2.3 การวิเคราะห์ทางด้านแม่เหล็กไฟฟ้า

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปทั่วไปแล้วจะเป็นคลื่นซึ่งเป็นสัญญาณที่มีฮาร์โมนิก (Time Harmonic Field) หรืออีกนัยหนึ่งคือ เป็นสัญญาณที่มีคาบการแกว่งที่แน่นอน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วมักจะแทนด้วยผลรวมของสัญญาณในรูปไซน์ที่สามารถใช้ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ เขียนได้ทั้งฟังก์ชันโคไซน์ ฟังก์ชันไซน์ หรือฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียลเชิงซ้อน ถ้าพิจารณาสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็น

สัญญาณโคไซน์ก็ได้  $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = j\omega \vec{E}$  ในกรณีที่สนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณรูปไซน์นั้น สามารถวิเคราะห์ผลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีต่อตัวกลางได้ง่ายโดยพิจารณาการตอบสนองของช่วงเวลาที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสัญญาณไซน์คงตัว (Steady State) ซึ่งสามารถอนุมานอัตราการเปลี่ยนแปลงกับเวลา  $\frac{\partial}{\partial t}$  คือ การเฉลี่ยค่า  $j\omega$  ทำให้ได้สมการแม็กเวลล์ตามหัวข้อที่ 2.6.1 ซึ่งเป็นการเขียนในลักษณะเฟสเซอร์

### 2.3.1 สมการแม็กเวลล์ (Maxwell's Equation)

$$\nabla \times \vec{H} = -j\omega \vec{E} + \sigma \vec{E} \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.5)$$

เมื่อ

$$\vec{E} = \text{สนามไฟฟ้า}$$

$$\vec{D} = \text{ความหนาแน่นฟลักซ์ไฟฟ้า}$$

$$\vec{H} = \text{ความเข้มสนามแม่เหล็ก}$$

$$\sigma = \text{ความหนาแน่นของประจุเชิงปริมาตร}$$

$$\vec{B} = \text{ความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก}$$

$$\epsilon = \text{ค่าความยินยอมไฟฟ้า}$$

$$\mu = \text{ค่าความซึมซาบแม่เหล็ก}$$

### 2.3.2 สมการของแม็กเวลล์ที่แปรตามเวลา

ปฏิบัติแหล่งกำเนิดส่วนมากจะให้ความแตกต่างและกระแสไฟฟ้ารวมทั้งสนามไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กแปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ ตัวอย่างเช่น

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos \omega t = \vec{E}_0 \cos 2\pi f t$$

หรือ

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin \omega t = \vec{E}_0 \sin 2\pi f t \quad (2.6)$$

เมื่อเป็นความถี่ของการแปรเปลี่ยน จากสมการ (2.6) แสดงว่ามีแฟกเตอร์ (Factor) ของเวลาที่ เป็นเส้นโค้งรูปไซน์ปรากฏในทุกพจน์ในสมการใดๆ

เมื่อกำหนดให้

$$\vec{E}(r, t) \quad \text{เป็นสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา}$$

$$\vec{E}(r) \quad \text{เป็นสนามไฟฟ้าที่จุดๆ หนึ่งในปริภูมิ (Space)}$$

จะได้สนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลามีรูปแบบดังนี้

$$\vec{E}(r, t) = \text{Re}[\vec{E}(r)e^{j\omega t}] \quad (2.7)$$

เมื่อ  $\vec{E}(r)$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน (Complex Number) ในทำนองเดียวกัน จะได้การจัดไฟฟ้า ความเข้มของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า และสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาดังนี้

$$\vec{D}(r,t) = \text{Re}[\vec{D}(r)e^{j\omega t}] \quad (2.8)$$

$$\vec{H}(r,t) = \text{Re}[\vec{H}(r)e^{j\omega t}] \quad (2.9)$$

$$\vec{B}(r,t) = \text{Re}[\vec{E}(r)e^{j\omega t}] \quad (2.10)$$

เมื่อ  $\vec{D}(r), \vec{H}(r), \vec{B}(r)$  และเป็นจำนวนเชิงซ้อนพิจารณาจากสมการของแมกซ์เวลล์ เคิร์ลของสนามแม่เหล็ก เมื่อมีการแปรเปลี่ยนตามเวลา

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \quad (2.11)$$

แทนค่า  $\vec{D}(r,t)$  และ  $\vec{H}(r,t)$  จากสมการ (2.8) และ (2.9) ในสมการ (2.11) จะได้

$$\nabla \times [\text{Re} \vec{H}(r)e^{j\omega t}] = \frac{\partial}{\partial t} [\text{Re} \vec{D}(r)e^{j\omega t}] + \text{Re}[\vec{J}(r)e^{j\omega t}]$$

$$\text{Re}[\nabla \times \vec{H}(r)] = \text{Re}[j\omega \vec{D}(r) + \vec{J}(r)]$$

ถ้าความสัมพันธ์นี้เป็นจริงทุกค่าของ  $t$  จะได้

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (2.12)$$

ในทำนองเดียวกัน จากสมการของแมกซ์เวลล์ เคิร์ลของสนามไฟฟ้าที่แปรเปลี่ยนตามเวลา จะได้

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.13)$$

แทนค่า  $\vec{E}(r,t)$  และ  $\vec{B}(r,t)$  จากสมการ (2.8) และ (2.9) ในสมการ (2.13) จะได้

$$\nabla \times [\text{Re} \vec{E}(r)e^{j\omega t}] = -\frac{\partial}{\partial t} [\text{Re} \vec{B}(r)e^{j\omega t}]$$

$$\text{Re}[\nabla \times \vec{E}(r)] = -\text{Re}[j\omega \vec{B}(r)]$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (2.14)$$

ดังนั้น สมการของแมกซ์เวลล์ที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ จึงมีรูปแบบดังสมการ ทั้งสี่ (2.15) ข้างล่าง โดยจัดในรูปแบบอนุพันธ์

$$\nabla \cdot \vec{D} = \sigma$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega \vec{B}$$

$$\nabla \times \vec{H} = j\omega \vec{D} + \vec{J} \quad (2.15)$$

### 2.3.3 การเดินทางของคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำ

สำหรับสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กที่แปรเปลี่ยนตามเวลาเป็นเส้นโค้งรูปไซน์ สามารถหาผลเฉลยของสมการคลื่นในตัวกลางที่เป็นตัวนำได้ สมการคลื่นสามารถเขียนในรูปแบบสมการของเฮล์มโฮลทซ์ ได้ดังนี้

$$\nabla^2 \vec{E} - \gamma^2 \vec{E} = 0 \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\epsilon = j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon) \quad (2.17)$$

เรียก  $\gamma$  ว่า ค่าคงตัวการแผ่ (Propagation Constant) โดย  $\gamma$  เป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งมีส่วนจริง (real) คือ  $\alpha$  โดยมีหน่วยเป็น Neper/m และส่วนจินตภาพ (Imaginary Part) มีหน่วยเป็น Radian/m คือ  $\beta$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

เมื่อ

$$\alpha = \text{Re}\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

และ

$$\beta = \text{Im}\sqrt{j\omega\mu(\sigma + j\omega\epsilon)}$$

เรียก  $\alpha$  ว่า ค่าคงที่ของการลดทอน (Attenuation Constant) ตามความเป็นจริงแล้ว รากที่สองของ  $\gamma^2$  มี 2 ค่า คือ ค่าที่เป็นบวก และค่าที่เป็นลบ แต่เพื่อความสะดวกจะต้องใช้ค่าที่เป็นบวก เมื่อพิจารณาคลื่นระนาบสม่ำเสมอที่เคลื่อนที่ในทิศ  $z$  สนามไฟฟ้าต้องสอดคล้องกับเงื่อนไขดังนี้

$$\frac{\partial^2 \bar{E}}{\partial z^2} = \gamma^2 \bar{E} \quad (2.18)$$

ผลเฉลยที่เป็นไปได้คือ

$$E(z) = E_0 e^{z\gamma} \quad (2.19)$$

ในรูปแบบการแปรเปลี่ยนตามเวลา จะได้

$$\bar{E}(z, t) = \text{Re}[\bar{E}_0 e^{j(\omega t - \beta z)}] \quad (2.20)$$

สมการ (2.20) คือ ผลเฉลยของสมการของคลื่นที่ในทิศ  $z$  และมีสนามไฟฟ้าลดลงโดยแฟกเตอร์  $e^{-\alpha z}$  ตามระยะทางที่เพิ่มขึ้น เช่นเดียวกันกรณีของตัวกลางที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานค่าคงตัวของการเลื่อนเฟส และความเร็วเฟสของคลื่นมีค่าดังนี้

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{และ} \quad v = f\lambda = \frac{\omega}{\beta}$$

นอกจากนี้ยังสามารถเขียน  $\alpha$  และ  $\beta$  เป็นพจน์ของ  $\sigma, \mu$  และ  $\epsilon$  ดังนี้

$$\begin{aligned} \alpha &= \text{Re}\sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\epsilon)} \\ \alpha &= \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} - 1 \right]} \\ \beta &= \text{Im}\sqrt{(j\omega\mu)(\sigma + j\omega\epsilon)} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^2}} + 1 \right]} \quad (2.22)$$

### 2.3.4 ตัวนำและไดอิเล็กตริก

ในทางแม่เหล็กไฟฟ้า วัสดุถูกแบ่งออกเป็น 2 พวก คือ ตัวนำ และไดอิเล็กตริก หรือฉนวน (Insulator) เส้นแบ่งระหว่าง 2 พวกนี้ไม่ชัดเจน ในช่วงของความถี่วิทยุจัดเป็นตัวนำแต่ช่วยอื่นจัดเป็นไดอิเล็กตริก พิจารณาสมการของแมกซ์เวลล์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา

$$\vec{E} \times \vec{H} = \vec{J} \times j\omega\vec{D}$$

แทนค่า  $\vec{J} = \sigma\vec{E}$  และ  $\vec{D} = \epsilon\vec{E}$  จะได้

$$\vec{E} \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\epsilon\vec{E}$$

พจน์แรกทางขวาของสมการคือ ความหนาแน่นกระแสการนำไฟฟ้า (Conduction Current Density) และพจน์ที่สองคือ ความหนาแน่นกระแสการขจัด (Displacement Current Density)

อัตราส่วน  $\frac{J}{\omega D} = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  คือ อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นกระแสการนำ และความหนาแน่น

กระแสการขจัดในตัวกลางเรียกอัตรส่วนนี้ว่า แฟกเตอร์การกระจาย (Dissipation Factor) ดังนั้น

$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} = 1$  คือ เส้นที่แบ่งระหว่างตัวนำและไดอิเล็กตริก สำหรับตัวนำ  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} > 1$  ส่วนไดอิเล็กตริก

$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} < 1$  สำหรับตัวนำที่ดี เช่น โลหะ ในช่วงสเปกตรัมความถี่วิทยุ  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \gg 1$  จากสมการ (2.21)

และ (2.22) จะได้

$$\alpha = \beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\sigma}{2\omega}} = \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}$$

ตัวอย่างเช่น ถ้าพิจารณาทองแดงที่มีค่าความถี่สูงถึง 30,000 เมกะเฮิรตซ์  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  มีค่าประมาณ  $3.5 \times 10^8$

สำหรับไดอิเล็กตริกหรือฉนวนที่ดี ในช่วงความถี่วิทยุ  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$  ตัวอย่างเช่น ไมกาในช่วงความถี่วิทยุที่คนได้ยิน  $\frac{\sigma}{\omega\epsilon}$  อยู่ในระดับ 0.0002

สำหรับตัวนำที่ดี  $\sigma$  และ  $\epsilon$  เกือบจะไม่ขึ้นกับความถี่ แต่สำหรับไดอิเล็กตริก  $\sigma$  และ  $\epsilon$  เป็นฟังก์ชันของความถี่ แต่อัตราส่วน  $\sigma/\omega\epsilon$  เป็นค่าคงที่ในช่วงความถี่ที่พิจารณาด้วยเหตุผลนี้สมบัติของไดอิเล็กตริกถูกกำหนดด้วยพจน์ของค่าไดอิเล็กตริก  $\sigma$  และอัตราส่วน  $\sigma/\omega\epsilon$

## 2.4 ความรู้เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในชีวิตประจำวัน

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คืออะไร? เคยสังเกตไหมว่าเมื่อเรานำวัตถุร้อนกับวัตถุเย็นมาวางชิดกัน วัตถุที่เค็ร้อนก็จะเย็นลงไปพร้อม ๆ กับที่การอุ่นขึ้นของวัตถุที่เค็เย็น ปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “การถ่ายเทพลังงาน” โดยในที่นี้วัตถุร้อนซึ่งมีพลังงานสะสมสูงได้ถ่ายเทพลังงานที่เรามองไม่เห็นไปยังวัตถุเย็นที่มีพลังงานสะสมตํานั่นเอง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเองก็เป็นปรากฏการณ์การถ่ายเทพลังงานรูปแบบหนึ่ง โดยอาศัยคลื่นที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในการส่งผ่านพลังงานจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง และเนื่องจากการส่งผ่านพลังงานในรูปแบบนี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางจึงสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย

แต่ก่อนที่จะกล่าวถึงรูปแบบการใช้งานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เราพบเห็นได้ในชีวิตประจำวันนั้น ก็ต้องมาทำความรู้จักกับคำว่า “ความถี่” กันเสียก่อน โดยหากพิจารณาคลื่นที่เกิดขึ้นบนผิวนํ้าใด ๆ (เช่น คลื่นทะเล) ด้วยการมองไปยังจุด ๆ หนึ่งคํางไว้ เราจะสามารถหาความถี่ของคลื่นนํ้าได้จากจำนวนรอบที่ระดับผิวนํ้าเพิ่มระดับขึ้นและลดระดับลงไปมาภายในหนึ่งวินาที โดยความถี่ของคลื่นนั้นจะมีหน่วยเป็นเฮิรตซ์ (Hz) ซึ่งหมายถึงรอบต่อวินาที คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเองก็มีสมบัติที่เรียกว่าความถี่นี้เช่นเดียวกัน ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในแต่ละความถี่นั้นก็มึคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป การประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงถูกแบ่งใช้ตามความถี่เพื่อให้ได้คลื่นที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ และยังเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกันอีกด้วย

### ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่ต่างๆ

| การประยุกต์ใช้                 | ย่านความถี่                         |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| วิทยุกระจายเสียงระบบ AM และ FM | 526.5 – 1606.5 kHz และ 87 – 108 MHz |
| สัญญาณโทรทัศน์                 | 50 – 800 MHz                        |
| โทรศัพท์ไร้สาย                 | 800 – 1000 MHz 1800 – 2200 MHz      |
| อินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi)     | 2400 – 2485 MHz                     |
| อุปกรณ์ไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม | 2400 – 2485 MHz                     |

## 2.5 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสุขภาพ

ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมา มีความสนใจที่เพิ่มขึ้นของผลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อผลของสุขภาพ รายงานทางการแพทย์หลายฉบับกล่าวถึงผลในการก่อมะเร็ง ผลต่อระบบสืบพันธุ์ และผลต่อระบบประสาทพฤติกรรมศาสตร์ ปัจจุบันแม้จะยังไม่ได้ข้อสรุปที่ชัดเจนในแง่มุมมองทั้งหมด แต่ก็เริ่มมีข้อมูลบางอย่างที่ทำให้เราพอทราบถึงผลต่างๆ เหล่านี้ได้บ้างแล้ว จึงได้ทำการสรุปรวบรวม และนำมาเสนอ ดังนี้

รังสี คือ พลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรืออนุภาครังสีใดๆ ที่สามารถก่อให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ทั้งโดยทางตรงหรือโดยทางอ้อมในตัวกลางที่ผ่านไป รังสีที่เราพบในชีวิตประจำวันนั้น ในบางสภาวะพบว่าสามารถก่ออันตรายแก่สุขภาพของเราได้ ในการแบ่งประเภทของรังสีตามผลต่อสุขภาพ เราแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มคือ รังสีที่ทำให้แตกตัว (ionizing radiation) กับ รังสีที่ไม่ทำให้แตกตัว (non-ionizing radiation)

### 2.5.1 อันตรายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการแผ่รังสีชนิดที่ทำให้แตกตัว

รังสีที่ทำให้แตกตัว คือรังสีกำลังสูงที่มีคุณสมบัติทำให้อะตอม (atom) หรือโมเลกุล (molecule) ของสารที่รังสีนั้นไปตกกระทบ เกิดการแยกอนุภาคอิเล็กตรอน (electron) ออกไป สารที่ถูกรังสีตกกระทบนั้น จึงกลายเป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ซึ่งเป็นสาเหตุของการเกิดมะเร็งในสิ่งมีชีวิตได้ รังสีเหล่านี้มีทั้งที่อยู่ในรูปอนุภาคและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

รังสีในรูปอนุภาค (particle) เช่นรังสีแอลฟา (alpha) รังสีเบต้า (beta) ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ และอนุภาคที่ปกติไม่ได้เกิดการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ แต่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์เช่น โปรตรอน (proton) โพสิตรอน (positron) มิวออน (muon) และมีซอนประจุ (charge mesons) จะเห็นว่าอนุภาคที่มีประจุส่วนใหญ่ ล้วนทำตัวเป็น ionizing radiation ได้ทั้งสิ้น

รังสีในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งสามารถทำตัวเสมือนเป็นอนุภาคได้ (photon) ส่วนใหญ่เป็นรังสีกำลังสูงคือรังสีเอ็กซ์ (X-ray) และรังสีแกมมา (gamma ray) แต่ในบางกรณีก็พบว่ารังสีอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) ที่มีกำลังความถี่สูง ก็สามารถทำตัวเป็น ionizing radiation ได้เช่นกัน

### 2.5.2 อันตรายของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีการแผ่รังสีชนิดไม่แตกตัว

รังสีชนิดไม่แตกตัว คือรังสีที่มีพลังงานต่ำกว่า 12 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออน รังสีชนิดนี้จะแตกต่างจากรังสีชนิดที่ทำให้แตกตัว เช่น รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงสามารถทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้ รังสีชนิดไม่แตกตัว ตัวอย่างเช่น รังสียูวี แสงที่ตามองเห็น รังสีอินฟราเรด คลื่นไมโครเวฟ คลื่นวิทยุ

ปัจจุบันการผลิตอุปกรณ์อำนวยความสะดวกภายในบ้านหรือที่ทำงาน เช่น คอมพิวเตอร์ อุปกรณ์สื่อสาร จะมีอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบซึ่งส่วนใหญ่หรือบางส่วนมีความสามารถที่จะแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยปกติเราอาจได้รับรังสีชนิดไม่แตกตัวเป็นประจำทุกวัน เช่น จากการอุ่นอาหารด้วยไมโครเวฟ การบึ่งขนมปังโดยใช้คลื่นอินฟราเรด หรือการนั่งดูโทรทัศน์ การคุยโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือการฟังวิทยุ รวมถึงการถ่ายเอกสาร เป็นต้น

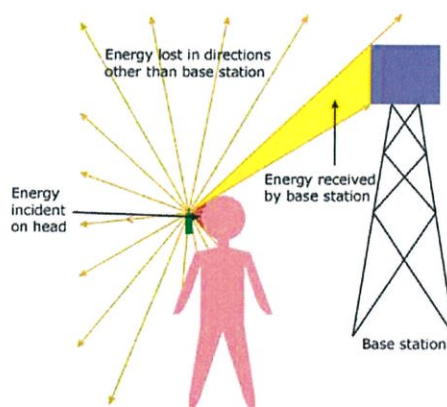
รังสีชนิดไม่แตกตัวทำให้เกิดการกระตุ้นและสั่นของอะตอมในโมเลกุล แต่ไม่สามารถทำให้อะตอมในโมเลกุลเกิดการแตกตัวได้ รังสีชนิดนี้จึงไม่เป็นอันตรายโดยตรงต่อร่างกายของมนุษย์ แต่รังสีชนิดนี้บางอย่างหากได้รับในปริมาณที่สูงมากก็สามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อได้ เช่น รังสียูวี จากแสงอาทิตย์ หากได้รับในปริมาณที่สูงและติดต่อกันนานๆ ผิวหนังบริเวณที่ไม่ได้รับการปกป้องหรือปกปิดอาจมีผลกระทบได้ ซึ่งจะปรากฏอาการภายใน 2-3 ชั่วโมง โดยจะมีอาการคล้ายกับ

ถูกแดดเผาลักษณะเป็นผื่นแดง ส่วนผลระยะยาว จะไม่ปรากฏให้เห็นเป็นเวลาหลายปี แต่การได้รับรังสีซ้ำๆกันเป็นเวลานานๆอาจทำให้ผิวหนังเหี่ยวก่อนวัยอันสมควรและอาจเกิดมะเร็งผิวหนังได้

รังสีชนิดไม่แตกตัวจะมีผลกระทบต่อพันธุกรรมหรือไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของรังสี แต่เนื่องจากการทะลุทะลวงต่ำ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อเพียงการกระตุ้นให้เกิดความร้อนในร่างกายและจะส่งผลกระทบต่อทางด้านชีววิทยาในผู้ที่สัมผัสรังสีเหล่านี้มาก อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานอุปกรณ์สื่อสารไร้สายและเครื่องมือต่าง ๆ ที่มีการแผ่รังสีประเภทนี้นั้น จะถูกควบคุมโดยหน่วยงานรัฐบาล โดยมีการกำหนดเกณฑ์มาตรฐานความปลอดภัยของปริมาณรังสีที่จะได้รับจากอุปกรณ์สื่อสารที่ใช้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งจะทำให้ผู้บริโภคมั่นใจได้ว่ารังสีที่ได้รับนั้นจะไม่เกิดอันตรายร้ายแรงทางชีวภาพและสิ่งมีชีวิต

## 2.6 ความรู้เกี่ยวกับระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่และการส่งสัญญาณของสถานีฐาน

โทรศัพท์มือถือ หรือ โทรศัพท์เคลื่อนที่ (และมีการเรียก วิทยูโทรศัพท์) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการสื่อสารสองทาง ผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ ใช้คลื่นวิทยุในการติดต่อกับเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่โดยผ่านสถานีฐาน โดยเครือข่ายของโทรศัพท์เคลื่อนที่แต่ละผู้ให้บริการจะเชื่อมต่อกับเครือข่ายของโทรศัพท์บ้านและเครือข่ายโทรศัพท์เคลื่อนที่ของผู้ให้บริการอื่น โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีความสามารถเพิ่มขึ้นในลักษณะคอมพิวเตอร์พกพาจะถูกกล่าวถึงในชื่อสมาร์ตโฟน



รูปที่ 2.3 การแพร่กระจายรังสีจากสถานีฐานไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่ [12]

เนื่องจากปัจจุบันโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก ดังนั้นจึงมีประชาชนจำนวนมากเป็นกังวลและตั้งข้อสงสัยเกี่ยวกับอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ ด้านอันตรายที่สุดของโทรศัพท์เคลื่อนที่ก็คือ การแผ่รังสี ของตัวโทรศัพท์ โดยเมื่อเราพูดโทรศัพท์เคลื่อนที่ คลื่นเสียงจะเปลี่ยนเป็นคลื่นวิทยุ ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง (Electromagnetic radiation) คลื่นนี้จะแพร่กระจายไปในอากาศและไปสู่สถานีของระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ เมื่อมีคนโทรติดต่อมา คลื่นเสียงจะแปลงเป็นคลื่นวิทยุ ส่งไปตามสถานีและส่งมายังผู้รับดังแสดงในรูปที่ 2.3 โดยความแรงของคลื่นส่วนใหญ่ประมาณ 0.75 ถึง 1 watt ในขณะที่เราพูด

สมองของเราจะอยู่ใกล้เสาอากาศของโทรศัพท์เคลื่อนที่มากที่สุด พลังงานจากคลื่นวิทยุจะเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนซึ่งอาจจะส่งผลเสียต่อสุขภาพ ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีว่า หากได้รับรังสีในปริมาณมากๆ ยิ่งมีความเข้มของรังสีสูงแล้ว ย่อมทำอันตรายต่อชีวิตได้ โดยโรคที่คาดว่าจะก่อให้เกิดได้จากการรับรังสีจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ก็คือ มะเร็งในสมอง คลื่นวิทยุจะมีผลต่อเนื้อเยื่อลึกประมาณ 1 ซม. ความลึกขึ้นกับความถี่ของคลื่น เมื่อเนื้อเยื่อได้รับคลื่นจะแปลงเป็นความร้อน

มะเร็ง ยังไม่มีหลักฐานยืนยันว่าคลื่นโทรศัพท์ทำให้เกิดมะเร็งโดยตรง และจากการทดลองในสัตว์ก็ไม่มีหลักฐานว่าทำให้เกิดมะเร็ง และจากการศึกษาทางระบาดวิทยาก็ไม่มีหลักฐานว่าคลื่นโทรศัพท์ทำให้เกิดมะเร็ง แต่ทว่าหน่วยงานวิจัยด้านมะเร็งขององค์การอนามัยโลก (IARC หรือ International Agency for Research on Cancer) ได้เผยแพร่ข้อมูลทางวิชาการที่ว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เป็นปัจจัยก่อมะเร็งประเภท 2B ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มที่ใช้โทรศัพท์มากกว่า 1,640 ชั่วโมง จะมีความเสี่ยงมากขึ้นต่อการเป็นมะเร็งสมองชนิด Glioma หรือเนื้องอกในสมองข้างเดียวกับที่ใช้โทรศัพท์ ซึ่งเป็นส่วนที่ได้รับคลื่นสูงที่สุด

การศึกษาที่ผ่านมาจะศึกษาผลกระทบของคลื่นวิทยุต่อทั้งร่างกาย การศึกษาผลกระทบของคลื่นโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อคนยังมีไม่มาก และยังมีหลักฐานทางวิทยาศาสตร์ที่ไม่เพียงพอที่จะกล่าวได้อย่างแน่ชัดเกี่ยวกับอันตรายของโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อสุขภาพ แต่อย่างไรก็ตามเพื่อความไม่ประมาท ผู้ใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ควรจะรู้วิธีป้องกันผลกระทบที่อาจจะเกิดขึ้น

## 2.7 ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับอาการหรือโรคต่างๆ ที่อาจเกี่ยวเนื่องกับผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อสุขภาพ

เป็นที่ทราบกันดีว่า เราไม่สามารถหลีกเลี่ยงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าได้ เพราะอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าประจำบ้านทั้งหลาย เช่น เครื่องเป่าผม โทรศัพท์ไร้สาย โทรทัศน์ คอมพิวเตอร์ หรือเตาไมโครเวฟ ก็ล้วนแต่เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั้งสิ้น โดยเฉพาะโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวันของเราไปแล้ว ทำให้ผู้ประกอบการโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่มีการติดตั้งสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวนมากเพื่อให้สามารถรองรับความต้องการของผู้ใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เพิ่มมากขึ้น จึงอาจก่อให้เกิดความกังวลแก่ผู้ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่บริเวณใกล้เคียงกับสถานีฐานถึงผลกระทบต่อสุขภาพในด้านต่างๆ

อย่างไรก็ตาม องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้ระบุว่า ในปัจจุบันได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อสุขภาพจากเสาส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่จำนวนมาก แต่ผลการศึกษาส่วนใหญ่เห็นว่ายังไม่เป็นผลร้ายต่อสุขภาพ โดยแบ่งออกเป็นผลกระทบระยะสั้นและผลกระทบระยะยาว ดังนี้

### 2.7.1 ผลกระทบระยะสั้น (Short-term effects)

พบว่า เนื้อเยื่อจะเกิดความร้อนและมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นน้อยมาก แต่ก็เป็นกลไกพื้นฐานของปฏิกิริยาระหว่างพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและร่างกายมนุษย์ และการศึกษาผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการทำงานของคลื่นสมอง (Brain electrical activity) การจดจำ (Cognitive function) การนอน การเต้นของหัวใจ และการไหลเวียนโลหิต ยังไม่มีหลักฐานที่แน่นอนหาพื่อที่จะระบุว่า การสัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะส่งผลร้ายต่อสุขภาพของมนุษย์

### 2.7.2 ผลกระทบระยะยาว (Long-term effects)

การศึกษาทางระบาดวิทยาระบุว่า การใช้โทรศัพท์มือถือมีความเสี่ยงต่อการเกิดเนื้องอกในสมอง อย่างไรก็ตาม สาเหตุของการเกิดมะเร็งไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นระยะเวลาที่ปีหลังจากมีการใช้หรือได้รับสัมผัสคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และแม้ว่าองค์การอนามัยโลก ได้กำหนดให้คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นสารก่อมะเร็งในมนุษย์ในกลุ่ม 2B (Group 2B) แต่ก็ไม่ได้เป็นการยืนยันการเกิดมะเร็งอย่างชัดเจน เพราะ Group 2B หมายถึง ผลการศึกษาน่าสงสัย ซึ่งยังมีหลักฐานยืนยันไม่เพียงพอทั้งในคนและสัตว์ว่าก่อให้เกิดมะเร็งจริง

ดังนั้น ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับโรคหรืออาการต่าง ๆ ที่อาจเกี่ยวเนื่องกับผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ เช่น อาการปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ความจำเสื่อมหรือแม่แต่มะเร็งหรือเนื้องอกในสมอง เป็นต้น ข้างท้ายนี้จะช่วยให้ประชาชนสามารถสังเกตอาการที่เกิดขึ้น และสามารถป้องกัน ดูแล และรักษาสุขภาพของตนได้อย่างยั่งยืนอีกด้วย

### 2.7.3 อาการปวดศีรษะ (Headaches)

อาการปวดศีรษะ (Headache) เป็นอาการผิดปกติของระบบประสาทที่พบได้บ่อยที่สุดเนื่องจากทุกวันนี้เราต้องพบกับปัญหามากมายในการดำรงชีวิต จึงส่งผลให้เกิดอาการปวดศีรษะได้ไม่ยากเลย อาการปวดศีรษะมีสาเหตุหลัก 2 ประการ ตามสาเหตุของการเกิดอาการ ดังนี้

#### 2.7.3.1 กลุ่มอาการปวดศีรษะชนิดที่ไม่มีรอยโรคในสมองชัดเจน (ไม่ร้ายแรง)

เป็นกลุ่มอาการปวดศีรษะชนิดที่ไม่ได้เกิดจากการมีรอยโรคในสมองที่ชัดเจน อาการปวดศีรษะเกิดจากสาเหตุกระตุ้นต่างๆ ได้แก่

ปวดศีรษะเนื่องจากความเครียด (Tension headache) ซึ่งเป็นสาเหตุของอาการปวดศีรษะที่พบมากที่สุด อาการปวดเกิดจากการเกร็งตัวของกล้ามเนื้อบริเวณศีรษะและใบหน้า สาเหตุของการปวดศีรษะจากความเครียดมักเกิดจากความเครียด หิวหรือรับประทานอาหารผิดเวลาอดนอน ใช้สายตามากเกินไป อาการปวดมักจะเกิดขึ้นนานเกิน 24 ชั่วโมง แต่ระดับความปวดจะคงที่และไม่มีอาการอื่น เช่น คลื่นไส้ อาเจียน เป็นต้น ร่วมด้วย

ปวดศีรษะไมเกรน เป็นอาการปวดศีรษะที่พบได้บ่อยโดยเฉพาะในผู้หญิงวัยทำงาน และพบในผู้หญิงมากกว่าผู้ชาย โดยผู้ป่วยมักมีอาการปวดศีรษะตื้อๆ ข้างเดียว เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมักปวดปานกลางถึงขั้นรุนแรงมากขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนไหว อาการปวดมักเกิดขึ้นนาน 4-72 ชั่วโมง และจะพบอาการอื่นร่วมด้วย เช่น เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน เป็นต้น

### 2.7.3.2 กลุ่มอาการปวดศีรษะชนิดมีสาเหตุ

คือ กลุ่มที่มีรอยโรคในสมอง ในเยื่อหุ้มสมอง เป็นต้น อาการปวดศีรษะนี้เกิดจากความผิดปกติของระบบประสาทและสมองรุนแรง เช่น ปวดศีรษะจากโรคทางสมองอื่นๆ ผู้ป่วยมักจะมีอาการปวดศีรษะ มากขึ้นเรื่อยๆ และมีอาการอื่นร่วม เช่น อาเจียน เห็นภาพซ้อน แขนขาอ่อนแรง ชัก มีไข้สูง ตาพร่ามัว เป็นต้น ดังนั้น หากสงสัยว่ามีอาการปวดศีรษะจากความผิดปกติของระบบประสาทและสมอง จะต้องรีบพบแพทย์เพื่อทำการวินิจฉัยและรักษาโดยด่วน

จะเห็นได้ว่า เราทุกคนสามารถเกิดอาการปวดศีรษะได้จากสาเหตุต่าง ๆ โดยปัจจัยหลักที่สำคัญของอาการปวดศีรษะที่พบมากที่สุด คือ ความเครียดและความวิตกกังวลในชีวิตประจำวัน ปัญหาการเมือง ปัญหาเศรษฐกิจ ฯลฯ อย่างไรก็ตาม เราสามารถลดโอกาสที่จะเกิดอาการปวดศีรษะได้เช่นกัน หากรู้ว่าตนหรือคนในครอบครัวมีความเครียดมากเกินไป ควรหาวิธีคลายเครียดที่ทำให้รู้สึกผ่อนคลาย เช่น นอนพักผ่อน ออกกำลังกาย อ่านหนังสือ ฯลฯ เป็นต้น

### 2.7.4 โรคมะเร็ง (Cancers)

สถาบันมะเร็งแห่งชาติ ได้จัดทำทะเบียนมะเร็งระดับโรงพยาบาล (Hospital-Based Cancer Registry) ซึ่งแสดงข้อมูลผู้ป่วยมะเร็งรายใหม่ที่มาใช้บริการตรวจวินิจฉัยและรักษาที่สถาบันมะเร็งแห่งชาติจากข้อมูลในรายงาน สรุปว่า ในปี พ.ศ. 2552 มีผู้ป่วยมะเร็งรายใหม่เข้ารับการรักษากว่า 3,314 ราย คิดเป็นร้อยละ 11.1 ของผู้ป่วยใหม่ทั้งหมดที่เข้ารับการรักษาที่สถาบัน (ชาย 1,244 ราย และหญิง 2,070 ราย) โดยมะเร็งที่พบมากที่สุดในผู้ชาย คือ มะเร็งปอดและหลอดลม (ร้อยละ 18.5) รองลงมา คือ มะเร็งลำไส้ใหญ่ (ร้อยละ 14.1) และมะเร็งที่พบมากที่สุดในผู้หญิง คือ มะเร็งเต้านม (ร้อยละ 37.0) รองลงมา คือ มะเร็งปากมดลูก (ร้อยละ 14.4) นอกจากนั้น ยังได้มีการรายงานชนิดของมะเร็ง 10 อันดับแรก ที่มีผู้ป่วยเข้ารับการรักษามากที่สุดในปี พ.ศ. 2552 ได้แก่

|                                       |             |
|---------------------------------------|-------------|
| ○ มะเร็งเต้านม                        | ร้อยละ 23.2 |
| ○ มะเร็งหลอดลมและปอด                  | ร้อยละ 11.2 |
| ○ มะเร็งลำไส้ใหญ่                     | ร้อยละ 10.3 |
| ○ มะเร็งปากมดลูก                      | ร้อยละ 9.0  |
| ○ มะเร็งปอดและถุงน้ำดี                | ร้อยละ 7.1  |
| ○ มะเร็งในช่องปาก                     | ร้อยละ 5.0  |
| ○ มะเร็งต่อมน้ำเหลืองชนิด Non-Hodgkin | ร้อยละ 3.0  |
| ○ มะเร็งในรังไข่                      | ร้อยละ 2.3  |
| ○ มะเร็งหลอดอาหาร                     | ร้อยละ 2.1  |
| ○ มะเร็งต่อมลูกหมาก                   | ร้อยละ 2.1  |

ในหัวข้อนี้จึงขอกล่าวถึงความรู้เกี่ยวกับโรคมะเร็งชนิดที่มีการกล่าวอ้างในเรื่องร้องเรียนต่างๆ (ว่าอาจมีผลมาจากการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐาน) เช่น มะเร็งหรือเนื้องอกในสมอง มะเร็งเต้านม และมะเร็งเม็ดเลือดขาว เป็นต้น เพื่อเป็นองค์ความรู้แก่ประชาชนในการดูแลรักษาสุขภาพดังต่อไปนี้

#### 2.7.4.1 มะเร็งหรือเนื้องอกในสมอง (Brain cancer/Brain tumor)

มะเร็ง คือ โรครที่เกิดจากความผิดปกติของเซลล์ในอวัยวะต่างๆ ของร่างกาย โดยมีการเจริญเติบโตที่ผิดปกติ เกิดเป็นก้อนเนื้อและลุกลามไปยังอวัยวะข้างเคียง หรือกระจายไปยังส่วนอื่น ๆ ของร่างกายผ่านทางระบบเลือด ระบบทางเดินน้ำเหลือง เป็นต้น โดยมะเร็งหรือเนื้องอกในสมอง เป็นมะเร็งที่พบได้ในทุกเพศ ทุกวัย ผู้ป่วยจะมีอาการปวดศีรษะเนื่องจากเนื้องอกขยายตัว จึงเพิ่มความกดดันในกะโหลกศีรษะและมักมีอาการอื่นร่วมด้วย ขึ้นอยู่กับว่าเนื้องอกไปอยู่ที่ตำแหน่งใดของสมอง และจะทำให้สูญเสียหน้าที่ของสมองในตำแหน่งนั้นๆ ไป ปัจจุบันยังไม่พบสาเหตุที่แน่ชัดของการเกิดโรค แต่พบว่าอาจมีสาเหตุจากปัจจัยทางพันธุกรรม ฮอโมนเพศ สารเคมีบางตัว เชื้อไวรัสบางตัว หรือมีประวัติการฉายแสงบริเวณศีรษะ เป็นต้น

ถึงแม้ว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจะถูกระบุว่าเป็นปัจจัยที่อาจก่อให้เกิดมะเร็งในมนุษย์ในกลุ่ม 2B (Group 2B) ก็ตาม แต่ยังไม่มีการสรุปว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ส่งผลกระทบต่อให้เกิดโรคมะเร็งอย่างชัดเจน โดยเฉพาะโรคมะเร็งหรือเนื้องอกในสมอง ซึ่งยังไม่มีการรายงานสาเหตุการเกิดโรคที่แน่ชัด ดังนั้น จึงควรดูแลสุขภาพร่างกายอย่างสม่ำเสมอ หมั่นตรวจสุขภาพและตรวจคัดกรองมะเร็งเป็นประจำโดยเฉพาะในผู้สูงอายุ ออกกำลังกายเป็นประจำ และรับประทานอาหารที่มีประโยชน์ก็จะช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็งทุกชนิดได้

## 2.8 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อเนื้อเยื่อ

### 2.8.1 อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ

นิยามของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (Specific Absorption Rate: SAR) หมายถึง อัตราที่พลังงานไฟฟ้าถูกดูดซับเข้าสู่เนื้อเยื่อของร่างกาย มีหน่วยเป็นวัตต์ต่อกิโลกรัม (W/Kg) อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ เป็นหน่วยการวัดปริมาณการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Dosimetric measurement) ซึ่งใช้กันทั่วไปสำหรับวัดการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความถี่สูงกว่า 100 KHz เช่น ปริมาณ SAR ที่ร่างกายจากการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เท่ากับ 1 วัตต์ต่อกิโลกรัม หมายความว่า ขณะใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่เนื้อเยื่อของร่างกายในส่วนต่างๆ 1 กิโลกรัมจะดูดกลืนพลังงานจากคลื่นความถี่วิทยุเป็นจำนวน 1 วัตต์

การวัดค่า SAR โดยทั่วไปคิดเฉลี่ยทั้งหมดของร่างกาย หรือในปริมาตรขนาดเล็ก (1 กรัม หรือ 10 กรัมของเนื้อเยื่อ) ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ทั่วโลกพยายามควบคุมให้ผลิตภัณฑ์หรือผลิตภัณฑ์ทางไฟฟ้าต่างๆ ใส่ใจถึงความปลอดภัยของผู้ใช้ผลิตภัณฑ์ที่มีการผลิตออกจำหน่าย ผู้ผลิตที่ได้รับอนุญาตต้องทำให้ผลิตภัณฑ์ที่จำหน่ายในตลาดมีค่าไม่เกินที่กำหนด การวัดค่า SAR ในประเทศสหรัฐอเมริกา Federal Communications Commission (FCC) มีการกำหนดค่า SAR สำหรับศีรษะ 1.6 W/kg ปริมาตรตัวอย่าง 1 กรัมของเนื้อเยื่อ ในยุโรปมีการกำหนดคือ 2 W/kg ปริมาตรตัวอย่าง 10 กรัมของเนื้อเยื่อ

### 2.8.2 สมการของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านั้นจะมียอดประกอบทั้งสนามแม่เหล็ก ( $H$ : Magnetic Field) และสนามไฟฟ้า ( $E$ : Electric Fields) ผลของการเกิดการดูดซับพลังงานจำเพาะ (SAR) นั้นมีผลโดยตรงกับขนาดของสนามไฟฟ้า (Electric Fields) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (2.23)

$$SAR = \frac{1}{\rho} Q_{ext} = \frac{\sigma}{\rho} |E^2| \quad (2.23)$$

เมื่อ  $SAR$  = อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อเยื่อ (W/kg)

$Q_{ext}$  = ค่าความร้อนที่เกิดขึ้นจากภายนอกเนื้อเยื่อ (W/m<sup>3</sup>)

$E$  = ความแรงของสนามไฟฟ้า (V/m)

$\sigma$  = สภาพความนำไฟฟ้าของเนื้อเยื่อ (S/m)

$\rho$  = ความหนาแน่นจำเพาะ (kg/m<sup>3</sup>)

สมการที่ (2.23) เป็นการคำนวณหาปริมาณ SAR ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีผลแปรผันกับขนาดสนามไฟฟ้ากำลังสอง ซึ่งสนามไฟฟ้านั้นเป็นผลที่เกิดจากการแพร่คลื่นสนามแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ คือ สภาพความนำไฟฟ้า ( $\sigma$ ) และความหนาแน่นจำเพาะ ( $\rho$ ) ซึ่งในเนื้อเยื่อแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกัน จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่จะศึกษาถึงระดับปริมาณ SAR ของเนื้อเยื่อต่างๆ โดยมีการใช้ SAR ในงานวิจัยเพื่อใช้เป็นดัชนีชี้วัดถึงปริมาณสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อเยื่อว่ามีขนาดตามค่าขีดจำกัดมาตรฐานหรือไม่

ในส่วนต่อไปจะกล่าวถึงความเชื่อมโยงของการเกิดความร้อนในเนื้อเยื่อหลังจากเกิด SAR โดยจะกล่าวถึงการถ่ายเทความร้อนในทางชีววิทยา

### 2.8.3 สมการการถ่ายเทความร้อนในทางชีวภาพ (The Bio-Heat Equation)

ในการถ่ายเทความร้อนทางชีวภาพนั้นจะกล่าวถึงหลักการทางด้านฟิสิกส์ การส่งผ่านความร้อน คือ การนำความร้อน ( $\nabla \cdot (-k\nabla T)$ ) เช่น เมื่อมือเราสัมผัสความร้อนก็จะเกิดการนำความร้อนจากผิวหนังชั้นบนสู่ผิวหนังในชั้นถัดไป และมีการพาความร้อน โดยผลจากการพาความร้อน ( $\rho_b C_b \omega_b (T_b - T)$ ) จะเป็นผลที่เกิดจากของเหลวในร่างกาย เช่น เลือด เป็นส่วนของการทำให้ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการสัมผัสความร้อนลดลง และยังมีส่วนของพลังงานความร้อน จากการเผาผลาญสารอาหาร ( $Q_{met}$ ) และผลจากความร้อนภายนอก ซึ่งอาจจะมามีที่มาได้หลายๆ สาเหตุ แต่ในส่วนของปริมาณ SAR ที่กล่าวถึงจะปรากฏในรูปแบบความร้อนภายนอก ( $Q_{ext}$ ) โดยความเชื่อมโยงกันของสมการความร้อนทางชีววิทยาแสดงได้ดังนี้

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (2.24)$$

|       |            |  |
|-------|------------|--|
| เมื่อ | $\rho$     | = ความหนาแน่นจำเพาะของเนื้อเยื่อ (kg/m <sup>3</sup> )            |
|       | $c$        | = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ (J/kg.K)                  |
|       | $k$        | = ค่าความนำความร้อนของเนื้อเยื่อ (W/m.K)                         |
|       | $h_b$      | = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากเลือดที่ไหลซึมอยู่ในเนื้อเยื่อ     |
|       | $\rho$     | = ความหนาแน่นเลือด (kg/m <sup>3</sup> )                          |
|       | $C_b$      | = ค่าความร้อนจำเพาะของเลือด (J/kg.K)                             |
|       | $\omega_b$ | = อัตราการไหลของเลือด (m/s)                                      |
|       | $T_b$      | = ค่าอุณหภูมิเลือด (37 °C)                                       |
|       | $Q_m$      | = ค่าความร้อนจากกระบวนการเมตาโบลิซึมของเลือด (W/m <sup>3</sup> ) |
|       | $Q_{ext}$  | = ค่าความร้อนจากภายนอก (W/m <sup>3</sup> )                       |

จากผลของความร้อนทางชีวภาพ จะเห็นได้ว่าปริมาณ SAR เป็นส่วนหนึ่งของการทำให้ความร้อนในเนื้อเยื่อสูงขึ้น ในการใช้งานโทรศัพท์นั้นหากมีการใช้งานโทรศัพท์เป็นระยะเวลานาน ตัวเครื่องโทรศัพท์เองก็จะเกิดความร้อนได้เช่นกัน เมื่อพิจารณาจากสมการจะเห็นว่าเมื่อใช้โทรศัพท์เป็นระยะเวลานาน เช่น มากกว่า 1 ชั่วโมงเป็นต้นไป จะรู้สึกร้อนบริเวณใบหูด้านที่สัมผัสกับโทรศัพท์ ซึ่งเป็นความร้อนที่เกิดจากการนำความร้อนมาจากเครื่องโทรศัพท์ และส่วนอีกส่วนหนึ่งเป็นความร้อนที่เป็นผลมาจากการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่กระจายจากภายในเครื่องโทรศัพท์ ในเนื้อเยื่อในรูปแบบของ SAR

หัวข้อต่อไปจะกล่าวถึงพารามิเตอร์ทางด้านไฟฟ้าของเนื้อเยื่อชนิดต่างๆ ซึ่งแต่ละเนื้อเยื่อจะมีค่าที่แตกต่างกัน มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.8.4 คุณสมบัติไดอิเล็กตริกต่อเนื้อเยื่อภายในร่างกายมนุษย์

ในร่างกายมนุษย์มีอวัยวะเป็นส่วนประกอบมากมาย แต่ละส่วนก็จะมีคุณสมบัติทางด้านไฟฟ้าแตกต่างกัน เนื่องจากมีโครงสร้างทางสรีระที่ต่างกัน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่หนึ่งๆ จะมีคุณสมบัติการส่งผ่านทางด้านไฟฟ้าของเนื้อเยื่อแต่ละชนิดต่างกัน ตัวอย่างเช่น ถ้ามีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่หนึ่งเดินทางในเนื้อเยื่อ 2 ชนิด ที่มีความแตกต่างกันทางด้านคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยเนื้อเยื่อชนิดที่ 1

คลื่นเดินทางผ่านได้ดี (นั่นคือ มีการลดทอนของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่ำ) แต่เนื้อเยื่ออีกชนิดหนึ่ง คลื่นเดินทางผ่านได้ไม่ดี ส่งผลให้ปริมาณสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในเนื้อเยื่อทั้งสองชนิดมีค่าแตกต่างกัน โดยในเนื้อเยื่อที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเดินทางผ่านได้ดี ก็จะมีสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าในเนื้อเยื่อที่สูงกว่าเนื้อเยื่อที่คลื่นเดินทางผ่านได้ไม่ดี ส่งผลให้ปริมาณ SAR ที่ปรากฏในเนื้อเยื่อชนิดแรก สูงกว่าเนื้อเยื่อชนิดที่สอง ตามสมการที่ (2.23) และจะเกิดความเชื่อมโยงกันกับสมการความร้อนทางชีวภาพในเนื้อเยื่อดังสมการที่ (2.24) ฉะนั้นพารามิเตอร์นี้จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมาก

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ โทรศัพท์เคลื่อนที่ และแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในอุตสาหกรรม ในบทนี้จะกล่าวถึง การออกแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ เครื่องมือวัดภาคสนาม กระบวนการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม

#### 3.1 การออกแบบ

##### 3.1.1 โครงสร้างแบบจำลองของศีรษะ

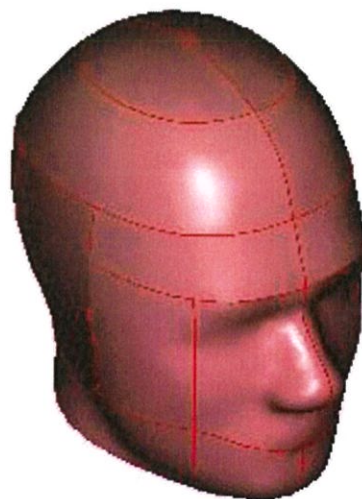
แบบจำลองศีรษะที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้ออกแบบเพื่อใช้วิเคราะห์อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพตามมาตรฐาน IEEE โดยแบบจำลองศีรษะประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

ผิวหนัง

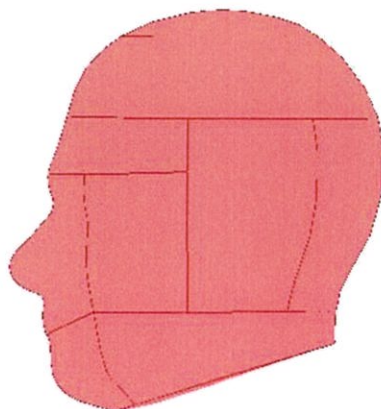
กะโหลกศีรษะ

สมอง

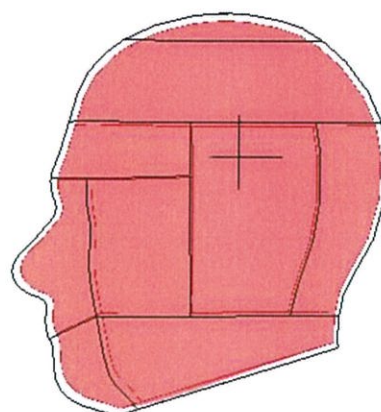
โดยแบบจำลองศีรษะนี้สร้างจากข้อมูลเครื่องสร้างภาพด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า โดยการถ่ายภาพจากส่วนบริเวณศีรษะของมนุษย์ จำนวน 109 สไลด์ แบบ 3 มิติ และส่งข้อมูลไปที่โปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อใช้ในการศึกษาอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ 3.2



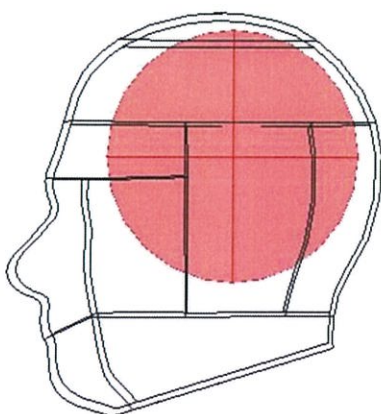
รูปที่ 3.1 โครงสร้างของแบบจำลองศีรษะ



(ก) โครงสร้างชั้นผิวน้ำ



(ข) โครงสร้างชั้นกะโหลก



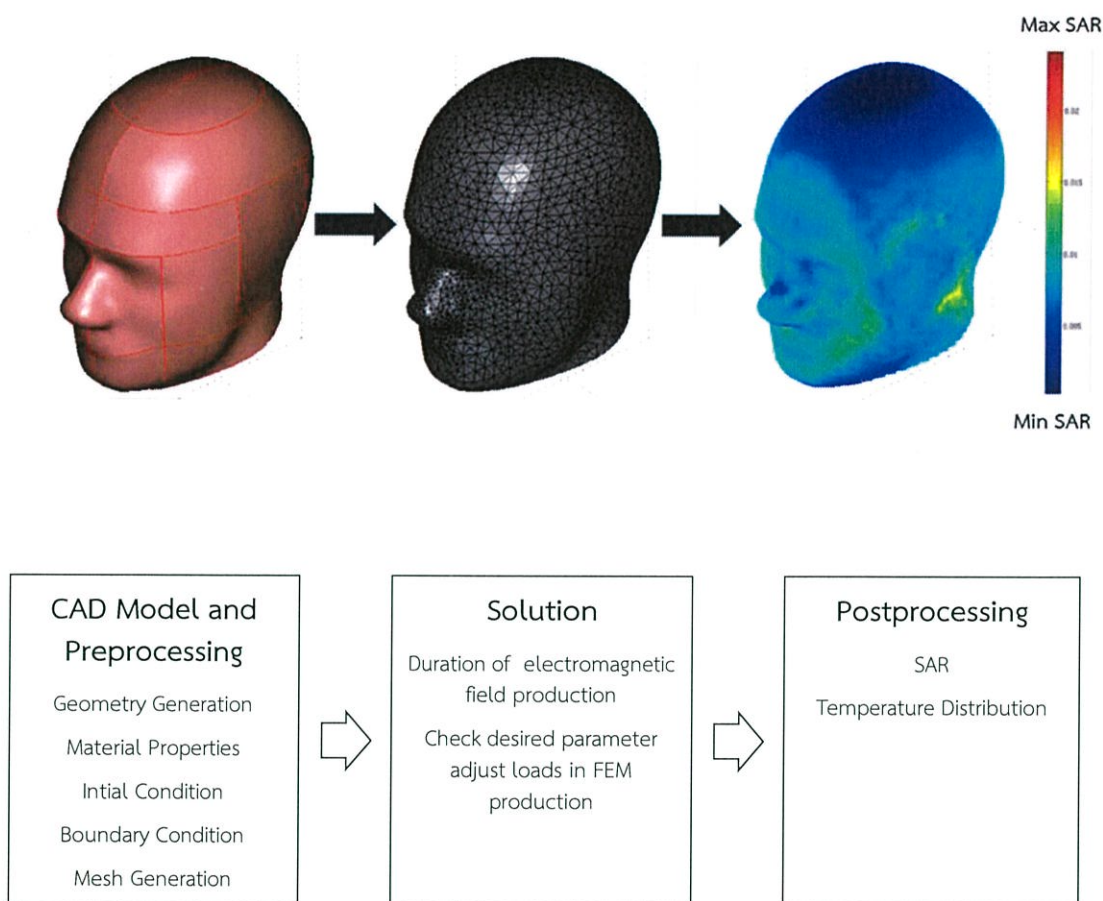
(ค) โครงสร้างชั้นกะโหลก

รูปที่ 3.2 โครงสร้างแบบจำลองศีรษะ (ก) โครงสร้างชั้นผิวน้ำ (ข) โครงสร้างชั้นกะโหลกศีรษะ (ค) โครงสร้างชั้นกะโหลก

### 3.2 ซอฟต์แวร์ที่ใช้ประมวลผล

ในการทดลองวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ใช้โปรแกรม COMSOL Multiphysics เวอร์ชัน 3.5a มาทำการสร้างแบบจำลอง การกำหนดค่าคุณสมบัติจำเพาะต่างๆ ของวัสดุภายในการทดลอง การกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ในระบบและการประมวลผลด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการประมวลผลแบบจำลองบนเครื่องคอมพิวเตอร์พีซี ระบบปฏิบัติการ Window 8 โดยมี CPU 3.4 GHZ 64 Bit 32 GB of RAM

### 3.3 ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วย

จากรูปที่ 3.3 แสดงถึงขั้นกระบวนการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics โดยประกอบไปด้วยขั้นตอนหลักๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. Preprocessing เป็นขั้นตอนแรกของการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยเริ่มจากการสร้างแบบจำลอง กำหนดส่วนต่างๆ ของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง กำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในแบบจำลอง กำหนดเงื่อนไขเริ่มต้น เงื่อนไขขอบเขตของแบบจำลอง และการเมชแบบจำลอง
2. Solution เป็นขั้นตอนของการกำหนดเวลาที่ใช้ประมวลผลของการจำลองซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการกำหนดเวลาที่ใช้ในการจำลองการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่
3. Postprocessing เป็นส่วนของการวิเคราะห์ผล ซึ่งในงานวิจัยนี้เป็นการจำลองการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่และสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จะทำการวิเคราะห์ผลอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและผลความร้อนทางชีวภาพ เป็นต้น

### 3.4 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆ ของแบบจำลอง

ในงานวิจัยผู้วิจัยได้ศึกษาถึงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและความร้อน โดยคุณสมบัติทางไฟฟ้าจะใช้ค่า พารามิเตอร์ที่อ้างอิงอุณหภูมิของมนุษย์ คือ 37 องศาเซลเซียส ส่วนค่าคุณสมบัติทางความร้อนของเนื้อ เยื่อจะใช้ค่าพารามิเตอร์ของมนุษย์ ส่วนประกอบของค่าพารามิเตอร์จะประกอบด้วยค่าพารามิเตอร์ของผิวหนัง ค่าพารามิเตอร์ของกระดูกสันหลัง ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพ แสดงดังตารางที่ 3.1 - 3.5

### 3.5 การเมช (Mesh) แบบจำลอง

ในรูปที่ 3.4 จะแสดงการเมชแบบจำลองด้วยโปรแกรม COMSOL Multiphysics ของแบบจำลองที่ประกอบไปด้วย ผิวหนัง กระดูกสันหลังและผิวหนัง โดยใช้เอลิเมนต์เป็นแบบ tetrahedral elements การเมชแบบจำลองหรือการแบ่งแบบจำลองออกเป็นเอลิเมนต์เล็กๆ จะเมชในลักษณะที่ไม่มีรูปแบบหรือขนาดตายตัวแต่ขนาดขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของแบบจำลอง

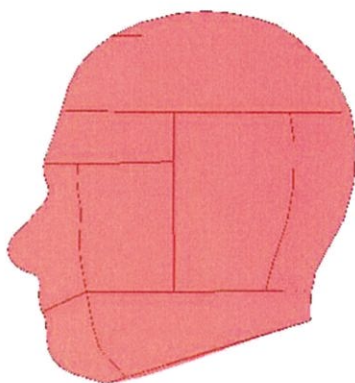


รูปที่ 3.4 การเมชแบบจำลองศีรษะ

### 3.6 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขต (Boundary Condition)

ในการวิเคราะห์ปัญหาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเกี่ยวเนื่องกับระบบอุณหภูมิจึงและระบบไฟฟ้า โปรแกรม COMSOL Multiphysics จะทำการวิเคราะห์ปัญหาแบบควบคู่กันไปในทั้งในทางด้านความร้อนและทางด้านไฟฟ้า หรือสามารถประมวลผลปัญหาทางด้านหนึ่งก่อน แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในอีกปัญหาหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้การประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลองจะเป็นการประมวลผลแบบควบคู่กันไปในทั้งสองด้านคือ ทางด้านความร้อนและทางไฟฟ้า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลอง

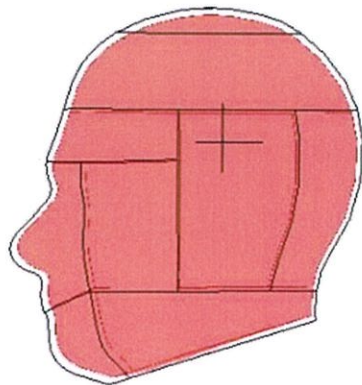
ในการกำหนดขอบเขตของการกำหนดเงื่อนไข ในระบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำการกำหนดเงื่อนไขของขอบเขตของโมดูล เพื่อกำหนดรายละเอียดที่ใช้ในการคำนวณด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ มีรายละเอียดดังรูปที่ 3.5



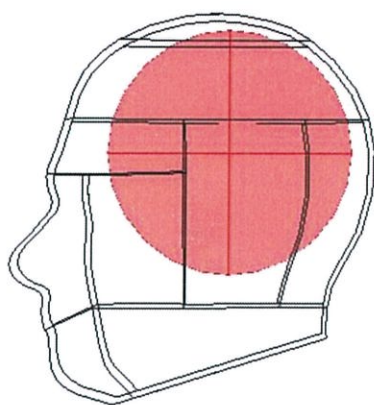
(ก) ตำแหน่งบริเวณผิวหนัง

รูปที่ 3.5 การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแต่ละตำแหน่งประกอบด้วย

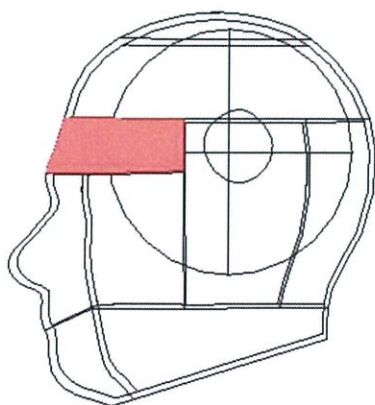
- (ก) ตำแหน่งบริเวณผิวหนัง
- (ข) ตำแหน่งบริเวณกระดูกศีรษะ
- (ค) ตำแหน่งบริเวณสมอง
- (ง) ตำแหน่งบริเวณจุดสัมผัสความแรงสนามไฟฟ้า



(ข) ตำแหน่งบริเวณกระโหลกศีรษะ



(ค) ตำแหน่งบริเวณสมอง



(ง) ตำแหน่งบริเวณจุดสัมผัสความแรงสนามไฟฟ้า

รูปที่ 3.5 (ต่อ) การกำหนดขอบเขตของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแต่ละตำแหน่งประกอบด้วย (ก) ตำแหน่งบริเวณผิวหนัง (ข) ตำแหน่งบริเวณกระโหลกศีรษะ (ค) ตำแหน่งบริเวณสมอง (ง) ตำแหน่งบริเวณจุดสัมผัสความแรงสนามไฟฟ้า

### 3.7 การประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลอง

ในการวิเคราะห์ปัญหาของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบอุณหภูมิจึงและระบบไฟฟ้า โปรแกรม COMSOL Multiphysics จะทำการวิเคราะห์ปัญหาแบบควบคู่กันไปในทั้งทางด้านความร้อนและทางด้านไฟฟ้า หรือสามารถประมวลผลปัญหาทางด้านหนึ่งก่อน แล้วจึงนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในอีกปัญหาหนึ่ง โดยในงานวิจัยนี้การประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลองจะเป็นการประมวลผลแบบควบคู่กันทั้งสองด้านคือ ทางด้านความร้อนและทางไฟฟ้า ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลบนแบบจำลอง

### 3.8 เครื่องมือวัดสนามไฟฟ้า

ในการวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องตรวจวัดสนามไฟฟ้า เพื่อเก็บข้อมูลค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 เครื่องตรวจวัดสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ยี่ห้อ Narda [12]

คุณสมบัติจำเพาะของเครื่อง

- ช่วงในการตรวจวัด 9 KHz ถึง 6 GHz
- หน่วยในการตรวจวัด V/m , A/m , ความแรงสัญญาณ (Power Density) และ เเปอร์เซ็นต์เทียบกับมาตรฐาน (STD)
- สามารถตรวจวัดได้ 3 Mode ดังนี้ Spectrum Analysis, Safety Evaluation และ Time Analysis
- สำหรับหน่วยงานการสื่อสาร (Telecommunications Service) ตัวเครื่องมือระบบ Automatic correlation of Results based on User-defined tables
- สามารถตรวจวัดได้ทั้งแบบครั้งละ 1 แกน (X, Y, Z) และค่าเฉลี่ยทั้ง 3 แกน (RMS)

### 3.9 ขั้นตอนกระบวนการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ผลจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

#### 3.9.1 การทดสอบจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

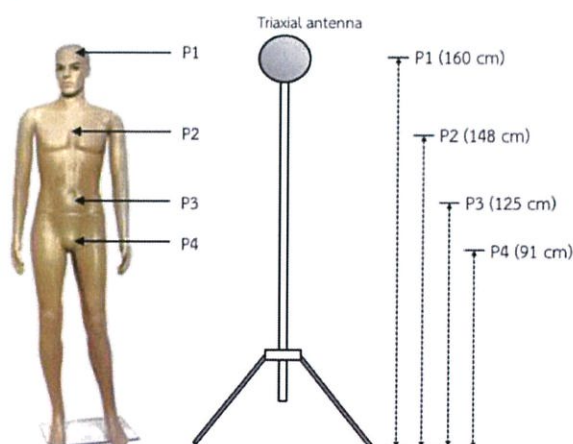
ได้ทำการออกทดสอบในพื้นที่จริงที่มีการติดตั้งสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ใน 5 ภูมิภาคทั่วประเทศ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคใต้ ภาคตะวันออก-ตก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นต้น โดยทำการทดสอบภูมิภาคละ 1 สถานีฐาน รวมทั้งสิ้น 5 สถานีฐานทั่วประเทศไทย ดังแสดงในรูป 3.8 – 3.12 เพื่อทำการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ โดยในแต่ละสถานีฐานจะทำการวัดที่ระยะห่างจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่างๆ จำนวน 6 ระยะ ได้แก่

- 5-50 เมตร
- 51-100 เมตร
- 101-200 เมตร
- 201-300 เมตร
- 301-400 เมตร
- 401-500 เมตร

โดยในแต่ละระยะ จะมีการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าอย่างละเอียดที่ความสูงจากพื้น 4 ตำแหน่ง (ดังแสดงในรูปที่ 3.4) อ้างอิงกับตำแหน่งของอวัยวะที่สำคัญในร่างกาย (คิดเทียบกับความสูงมาตรฐานของคนไทย ) ได้แก่

- |                                |                                    |
|--------------------------------|------------------------------------|
| - ตำแหน่ง P1 (ศีรษะ)           | ที่ความสูง 160 เซนติเมตรจากพื้นดิน |
| - ตำแหน่ง P2 (ช่องอก)          | ที่ความสูง 148 เซนติเมตรจากพื้นดิน |
| - ตำแหน่ง P3 (ช่องท้อง)        | ที่ความสูง 125 เซนติเมตรจากพื้นดิน |
| - ตำแหน่ง P4 (อวัยวะสืบพันธุ์) | ที่ความสูง 91 เซนติเมตรจากพื้นดิน  |

หลังจากได้ผลการวัด โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริง มาคำนวณผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ร่วมกับแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะ



รูปที่ 3.7 แสดงตำแหน่งการวัดค่าระดับความแรงของสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ความสูงจากพื้น P1-P4 เทียบกับตำแหน่งอวัยวะต่างๆ ที่สำคัญของร่างกายมนุษย์ [12]

### 3.9.1.1 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดสงขลา (ภาคใต้)

จากรูปที่ 3.8 แสดงภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา เพื่อวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่ระยะการวัดต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและผลความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา [12]

### 3.9.1.2 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดขอนแก่น (ภาควันออกเฉียงเหนือ)

จากรูปที่ 3.9 แสดงภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น เพื่อวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่ระยะการวัดต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และผลความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ



รูปที่ 3.9 ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น [12]

### 3.9.1.3 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดกรุงเทพฯ (ภาคกลาง)

จากรูปที่ 3.10 แสดงภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร เพื่อวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่ระยะการวัดต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และผลความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร [12]

### 3.9.1.4 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดพะเยา (ภาคเหนือ)

จากรูปที่ 3.11 แสดงภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลน้ำแวน อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา เพื่อวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่ระยะการวัดต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ห้ผลอัตราการผลิตซ้ำจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและผลความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ



รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลน้ำแวน อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา [12]

### 3.9.1.5 สถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดกาญจนบุรี (ภาคตะวันตก)

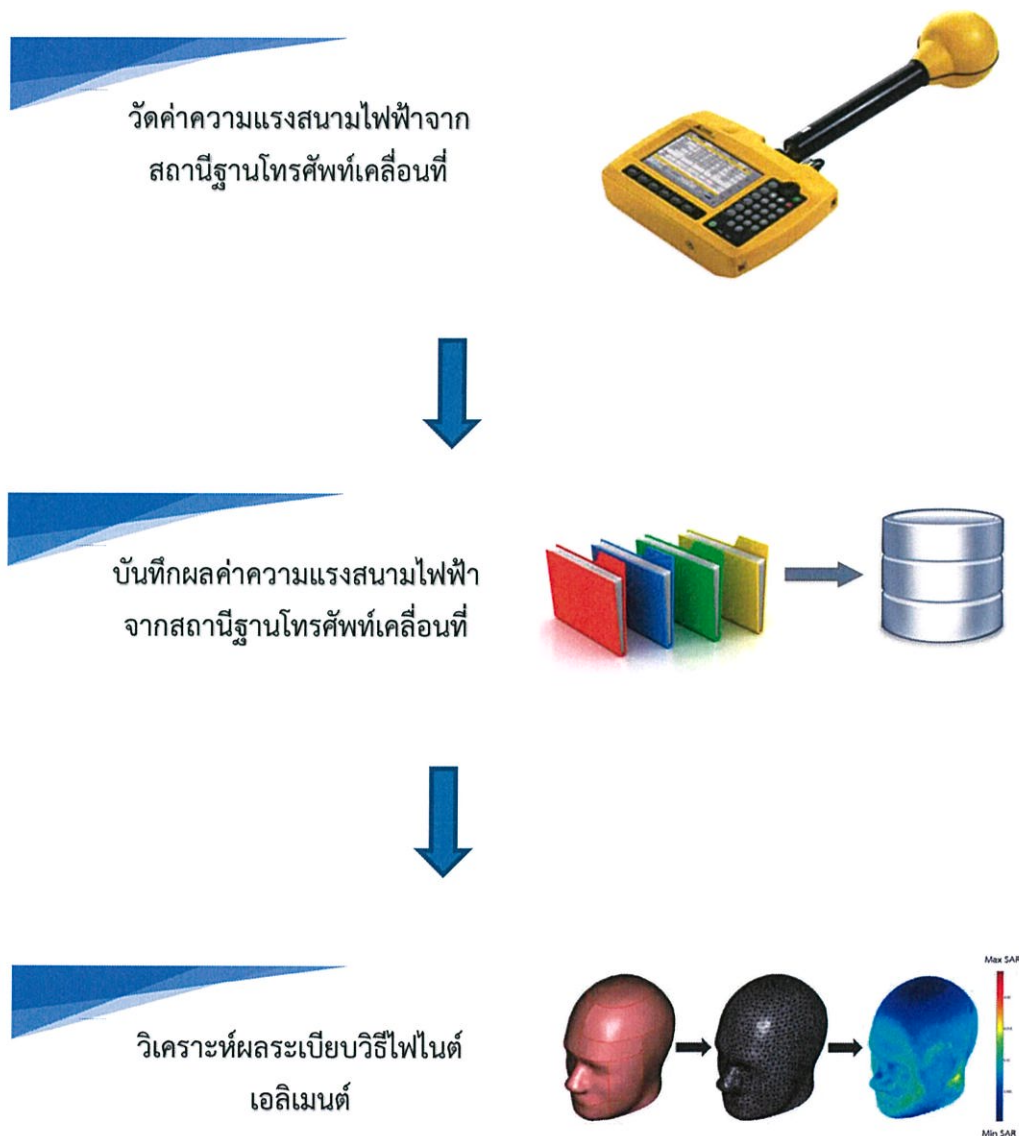
จากรูปที่ 3.12 แสดงภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี เพื่อวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าที่ระยะการวัดต่างๆ เพื่อนำไปวิเคราะห์ผลกระทบต่ออัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และผลความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ



รูปที่ 3.12 ภาพถ่ายสถานที่จริงในการทดสอบระดับความแรงการแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี [12]

### 3.9.2 การวิเคราะห์ผลจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

นำผลการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่ได้จากวัดจริงนำมาใส่ในค่าพารามิเตอร์ของโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อคำนวณผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะ ดังแสดงในรูป 3.13

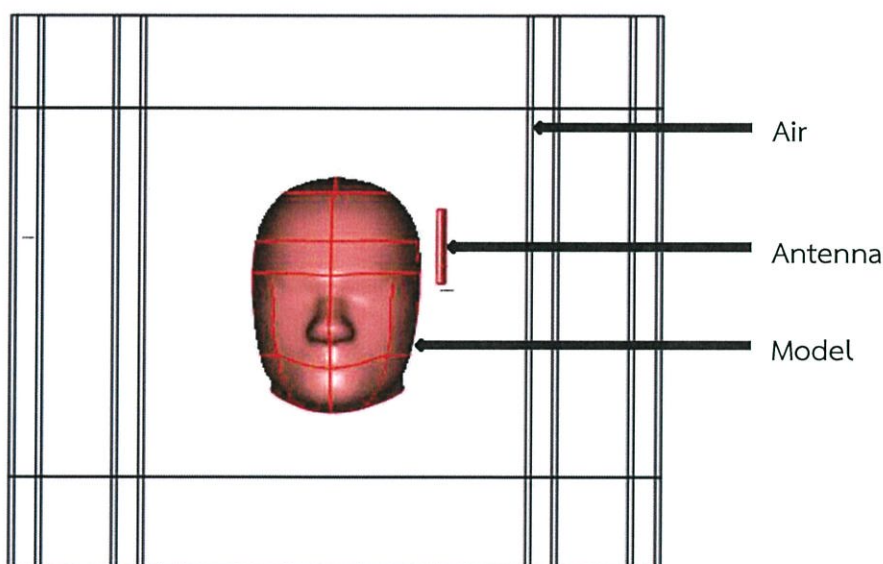


รูปที่ 3.13 ขั้นตอนขบวนการวิจัยการศึกษาคำนวณผลการกระจายคลื่นแม่เหล็กในร่างกายจากแหล่งกำเนิดสัญญาณสถานีฐานโทรศัพท์

### 3.10 ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลจากโทรศัพท์เคลื่อนที่

ทำการจำลองการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ในสภาวะการใช้งานปกติ ที่ย่านความถี่ของผู้ให้บริการในปัจจุบัน (True, DTAC, AIS, TOT) เพื่อแสดงผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะของโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่เกินขีดจำกัดตามมาตรฐานของ ICNIRP ( $1.6 \text{ W/Kg at } 1 \text{ g}$  หรือ  $2.0 \text{ W/Kg at } 10 \text{ g}$ ) และผลทางความร้อนทางชีวภาพ

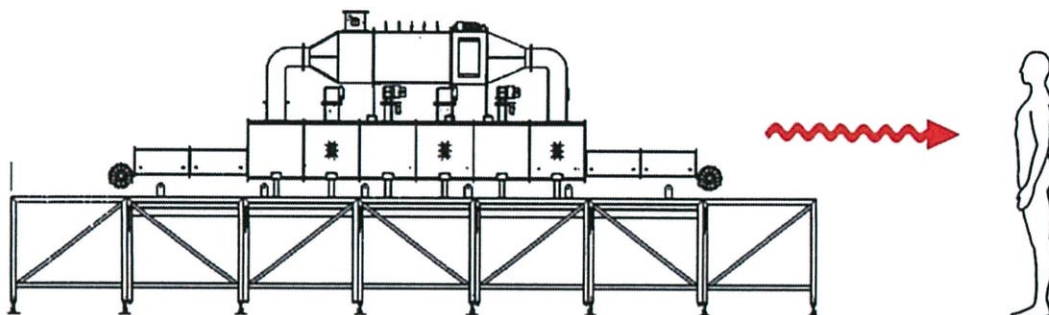
โดยจะวิเคราะห์หาค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ในย่านความถี่ 800-900 MHz, 1,800-1900 MHz และ 2100 MHz ที่กำลังส่ง 1 Watt ระยะเวลาการใช้งานต่อเนื่อง 10, 30, 50 นาทีและ 8 ชั่วโมง โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะ ดังรูป 3.14



รูปที่ 3.14 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลจากโทรศัพท์เคลื่อนที่

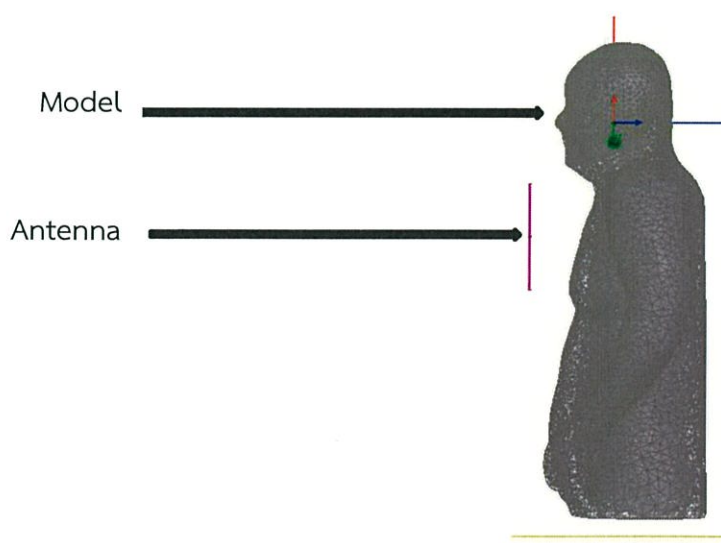
### 3.11 ขั้นตอนกระบวนการวิเคราะห์ผลจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม

ทำการจำลองการรบกวนของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรมที่ย่านความถี่ 2450 MHz กำลังงานขนาด 1000 วัตต์ เพื่อวิเคราะห์ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะของผู้ปฏิบัติงานในกรณีที่เกิดการรบกวนของอุปกรณ์ไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม ดังรูป 3.15



รูปที่ 3.15 จำลองการรบกวนของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม [4]

โดยจะวิเคราะห์หาค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะของผู้ปฏิบัติงานในกรณีที่เกิดการรบกวนของอุปกรณ์ไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม ที่ย่านความถี่ 2450 MHz กำลังงานขนาด 1000 วัตต์ ระยะเวลาปฏิบัติงานต่อเนื่อง 8 ชั่วโมง ที่มีระยะห่างจากตำแหน่งการรบกวนของแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะห่าง 20 เซนติเมตร โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณร่างกาย ดังรูป 3.16



รูปที่ 3.16 แบบจำลองการวิเคราะห์ผลการรบกวนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากอุปกรณ์ไมโครเวฟในงานอุตสาหกรรม

### 3.12 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการจำลองการทำงานโดยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 3.1 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 800 และ 900 MHz [13]

| Tissue name          | 800 MHz            |                       | 900 MHz            |                       |
|----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                      | Conductivity [S/m] | Relative permittivity | Conductivity [S/m] | Relative permittivity |
| Blood                | 1.4956             | 61.7                  | 1.5379             | 61.36                 |
| Body Fluid           | 1.6083             | 68.926                | 1.6362             | 68.902                |
| Brain Grey Matter    | 0.90044            | 53.252                | 0.94227            | 52.725                |
| Brain White Matter   | 0.56067            | 39.251                | 0.59079            | 38.886                |
| Breast Fat           | 0.045417           | 5.4409                | 0.048964           | 5.4244                |
| Cerebellum           | 1.218              | 50.151                | 1.2628             | 49.444                |
| Cerebro Spinal Fluid | 2.3736             | 68.871                | 2.4126             | 68.638                |
| Colon                | 1.0341             | 58.48                 | 1.0799             | 57.94                 |
| Duodenum             | 1.1447             | 65.362                | 1.1867             | 65.062                |
| Heart                | 1.1771             | 60.607                | 1.2298             | 59.893                |
| Liver                | 0.81402            | 47.343                | 0.85497            | 46.833                |
| Lung Deflated        | 0.82066            | 51.8                  | 0.85798            | 51.424                |
| Lung Inflated        | 0.43985            | 22.208                | 0.4567             | 22                    |

ตารางที่ 3.1 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 800 และ 900 MHz (ต่อ)

| Tissue name     | 800 MHz            |                       | 900 MHz            |                       |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                 | Conductivity [S/m] | Relative permittivity | Conductivity [S/m] | Relative permittivity |
| Mucous Membrane | 0.80864            | 46.518                | 0.84465            | 46.08                 |
| Muscle          | 0.90987            | 55.286                | 0.94294            | 55.032                |
| Ovary           | 1.2364             | 51.286                | 1.2904             | 50.471                |
| Pancreas        | 1.001              | 59.924                | 1.0385             | 59.684                |
| Prostate        | 1.1689             | 60.892                | 1.2096             | 60.553                |
| Skin Dry        | 0.83361            | 41.978                | 0.86674            | 41.405                |
| Skin Wet        | 0.80864            | 46.518                | 0.84465            | 46.08                 |
| Small Intestine | 2.1134             | 60.227                | 2.1652             | 59.488                |
| Spinal Cord     | 0.54807            | 32.861                | 0.57369            | 32.531                |
| Spleen          | 1.2236             | 57.856                | 1.2727             | 57.178                |
| Stomach         | 1.1447             | 65.362                | 1.1867             | 65.062                |
| Testis          | 1.1689             | 60.892                | 1.2096             | 60.553                |
| Thyroid         | 1.001              | 59.924                | 1.0385             | 59.684                |
| Uterus          | 1.2273             | 61.508                | 1.2699             | 61.115                |

ตารางที่ 3.2 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 1800 และ 1900 MHz [13]

| Tissue name          | 1800 MHz           |                       | 1900M Hz           |                       |
|----------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                      | Conductivity [S/m] | Relative permittivity | Conductivity [S/m] | Relative permittivity |
| Blood                | 2.0435             | 59.372                | 2.1135             | 59.196                |
| Body Fluid           | 2.0325             | 68.573                | 2.0924             | 68.524                |
| Brain Grey Matter    | 1.3913             | 50.079                | 1.4503             | 49.882                |
| Brain White Matter   | 0.91494            | 37.011                | 0.95748            | 36.868                |
| Breast Fat           | 0.093586           | 5.2692                | 0.099753           | 5.2509                |
| Cerebellum           | 1.7089             | 46.114                | 1.7652             | 45.885                |
| Cerebro Spinal Fluid | 2.9236             | 67.2                  | 2.9973             | 67.056                |
| Colon                | 1.5762             | 55.148                | 1.6417             | 54.935                |
| Duodenum             | 1.698              | 63.227                | 1.7694             | 63.058                |
| Heart                | 1.7712             | 56.323                | 1.8405             | 56.063                |
| Liver                | 1.2891             | 44.211                | 1.3456             | 44.012                |
| Lung Deflated        | 1.2792             | 49.384                | 1.3359             | 49.219                |
| Lung Inflated        | 0.63713            | 20.946                | 0.6608             | 20.867                |

ตารางที่ 3.2 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 1800 และ 1900 MHz (ต่อ)

| Tissue name     | 1800 MHz           |                       | 1900 MHz           |                       |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                 | Conductivity [S/m] | Relative permittivity | Conductivity [S/m] | Relative permittivity |
| Mucous Membrane | 1.232              | 43.85                 | 1.283              | 43.682                |
| Muscle          | 1.341              | 53.549                | 1.3963             | 53.418                |
| Ovary           | 1.8178             | 46.396                | 1.8827             | 46.102                |
| Pancreas        | 1.501              | 58.142                | 1.5659             | 57.995                |
| Prostate        | 1.6915             | 58.605                | 1.758              | 58.436                |
| Skin Dry        | 1.1847             | 38.872                | 1.2245             | 38.714                |
| Skin Wet        | 1.232              | 43.85                 | 1.283              | 43.682                |
| Small Intestine | 2.6959             | 55.903                | 2.764              | 55.648                |
| Spinal Cord     | 0.8429             | 30.867                | 0.87784            | 30.744                |
| Spleen          | 1.7799             | 53.848                | 1.8452             | 53.607                |
| Stomach         | 1.698              | 63.227                | 1.7694             | 63.058                |
| Testis          | 1.6915             | 58.605                | 1.758              | 58.436                |
| Thyroid         | 1.501              | 58.142                | 1.5659             | 57.995                |
| Uterus          | 1.7641             | 58.937                | 1.8317             | 58.754                |

ตารางที่ 3.3 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 2100 MHz [13]

| Tissue name          | 2100 MHz           |                       |
|----------------------|--------------------|-----------------------|
|                      | Conductivity [S/m] | Relative permittivity |
| Blood                | 2.2614             | 58.851                |
| Body Fluid           | 2.2218             | 68.418                |
| Brain Grey Matter    | 1.5738             | 49.51                 |
| Brain White Matter   | 1.0466             | 36.6                  |
| Breast Fat           | 0.11269            | 5.2136                |
| Cerebellum           | 1.8822             | 45.462                |
| Cerebro Spinal Fluid | 3.1541             | 66.764                |
| Colon                | 1.7787             | 54.531                |
| Duodenum             | 1.9204             | 62.727                |
| Heart                | 1.9849             | 55.579                |
| Liver                | 1.4637             | 43.638                |
| Lung Deflated        | 1.4553             | 48.903                |
| Lung Inflated        | 0.71038            | 20.717                |

ตารางที่ 3.3 ค่าไดอิเล็กตริกของเนื้อเยื่อต่างๆ ต่อค่าความถี่ 2100 MHz (ต่อ)

| Tissue name     | 2100 MHz           |                       |
|-----------------|--------------------|-----------------------|
|                 | Conductivity [S/m] | Relative permittivity |
| Mucous Membrane | 1.3897             | 43.365                |
| Muscle          | 1.5135             | 53.163                |
| Ovary           | 2.0167             | 45.556                |
| Pancreas        | 1.7033             | 57.705                |
| Prostate        | 1.8984             | 58.107                |
| Skin Dry        | 1.3075             | 38.431                |
| Skin Wet        | 1.3897             | 43.365                |
| Small Intestine | 2.906              | 55.174                |
| Spinal Cord     | 0.95085            | 30.514                |
| Spleen          | 1.9815             | 53.159                |
| Stomach         | 1.9204             | 62.727                |
| Testis          | 1.8984             | 58.107                |
| Thyroid         | 1.7033             | 57.705                |
| Uterus          | 1.9741             | 58.403                |

ตารางที่ 3.4 ค่าหนาแน่นของเนื้อเยื่อต่างๆ [14]

| Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Average | Standard<br>Deviation | Number<br>of Studies | Minimum | Maximum |
|---------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|---------|---------|
| Adrenal<br>Gland                | 1028    | 4                     | 2                    | 1025    | 1030    |
| Air                             | 1       | 0                     | 2                    | 1       | 1       |
| Bile                            | 928     | 0                     | 1                    | 928     | 928     |
| Blood                           | 1050    | 17                    | 4                    | 1025    | 1060    |
| Blood Plasma                    | 1020    | 0                     | 1                    | 1020    | 1020    |
| Blood Serum                     | 1024    | 0                     | 1                    | 1024    | 1024    |
| Blood Vessel<br>Wall            | 1102    | 64                    | 2                    | 1056    | 1147    |
| Bone<br>(Cancellous)            | 1178    | 149                   | 3                    | 1080    | 1350    |
| Bone<br>(Cortical)              | 1908    | 133                   | 5                    | 1800    | 2100    |
| Bone Marrow<br>(Red)            | 1029    | 2                     | 2                    | 1027    | 1030    |
| Bone Marrow<br>(Yellow)         | 980     | 0                     | 2                    | 980     | 980     |
| Brain                           | 1046    | 6                     | 2                    | 1041    | 1050    |
| Brain (Grey<br>Matter)          | 1045    | 8                     | 2                    | 1039    | 1050    |
| Brain (White<br>Matter)         | 1041    | 2                     | 3                    | 1040    | 1043    |
| Breast Fat                      | 911     | 53                    | 6                    | 812     | 961     |
| Breast Gland                    | 1041    | 45                    | 4                    | 990     | 1092    |
| Bronchi                         | 1102    | 64                    | 2                    | 1056    | 1147    |
| Bronchi<br>lumen                | 1       | 0                     | 2                    | 1       | 1       |
| Cartilage                       | 1100    | 1                     | 2                    | 1099    | 1100    |
| Cerebellum                      | 1045    | 7                     | 2                    | 1040    | 1050    |
| Cerebrospinal<br>Fluid          | 1007    | 0                     | 1                    | 1007    | 1007    |
| Cervix                          | 1105    | 74                    | 2                    | 1052    | 1157    |

ตารางที่ 3.4 ค่าหนาแน่นของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Average | Standard Deviation | Number of Studies | Minimum | Maximum |
|------------------------------|---------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| Commissura Anterior          | 1041    | 2                  | 3                 | 1040    | 1043    |
| Commissura Posterior         | 1041    | 2                  | 3                 | 1040    | 1043    |
| Connective Tissue            | 1027    | 0                  | 1                 | 1027    | 1027    |
| Diaphragm                    | 1090    | 52                 | 5                 | 1041    | 1178    |
| Ductus Deferens              | 1102    | 64                 | 2                 | 1056    | 1147    |
| Dura                         | 1174    | 0                  | 1                 | 1174    | 1174    |
| Epididymis                   | 1082    | 54                 | 2                 | 1044    | 1120    |
| Esophagus                    | 1040    | 0                  | 1                 | 1040    | 1040    |
| Esophagus Lumen              | 1       | 0                  | 2                 | 1       | 1       |
| Eye (Cornea)                 | 1051    | 15                 | 2                 | 1040    | 1061    |
| Eye (Lens)                   | 1076    | 21                 | 2                 | 1061    | 1090    |
| Eye (Sclera)                 | 1032    | 0                  | 1                 | 1032    | 1032    |
| Eye (Vitrous Humor)          | 1005    | 6                  | 2                 | 1000    | 1009    |
| Eye Lens (Cortex)            | 1076    | 21                 | 2                 | 1061    | 1090    |
| Eye Lens (Nucleus)           | 1076    | 21                 | 2                 | 1061    | 1090    |
| Fat                          | 911     | 53                 | 6                 | 812     | 961     |
| Fat (Average Infiltrated)    | 911     | 53                 | 6                 | 812     | 961     |
| Fat (Not Infiltrated)        | 911     | 53                 | 6                 | 812     | 961     |
| Gallbladder                  | 1071    | 63                 | 2                 | 1026    | 1115    |
| Heart Lumen                  | 1050    | 17                 | 4                 | 1025    | 1060    |
| Heart Muscle                 | 1081    | 36                 | 5                 | 1059    | 1143    |
| Fat (Not Infiltrated)        | 911     | 53                 | 6                 | 812     | 961     |

ตารางที่ 3.4 ค่าหนาแน่นของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Average | Standard<br>Deviation | Number<br>of Studies | Minimum | Maximum |
|---------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|---------|---------|
| Hypophysis                      | 1053    | 18                    | 2                    | 1040    | 1066    |
| Hypothalamus                    | 1053    | 18                    | 2                    | 1040    | 1066    |
| Intervertebral<br>Disc          | 1100    | 1                     | 2                    | 1099    | 1100    |
| Kidney                          | 1066    | 56                    | 4                    | 1019    | 1147    |
| Kidney<br>(Cortex)              | 1049    | 0                     | 1                    | 1049    | 1049    |
| Kidney<br>(Medulla)             | 1044    | 0                     | 1                    | 1044    | 1044    |
| Large Intestine                 | 1088    | 62                    | 2                    | 1044    | 1132    |
| Large Intestine<br>Lumen        | 1045    | 0                     | 1                    | 1045    | 1045    |
| Larynx                          | 1100    | 0                     | 1                    | 1100    | 1100    |
| Liver                           | 1079    | 53                    | 4                    | 1050    | 1158    |
| Lung                            | 394     | 174                   | 5                    | 255     | 604     |
| Lung<br>(Deflated)              | 1050    | 0                     | 1                    | 1050    | 1050    |
| Lung (Inflated)                 | 394     | 174                   | 5                    | 255     | 604     |
| Lymph                           | 1019    | 0                     | 1                    | 1019    | 1019    |
| Lymphnode                       | 1035    | 7                     | 2                    | 1030    | 1040    |
| Mandible                        | 1908    | 133                   | 5                    | 1800    | 2100    |
| Medulla<br>Oblongata            | 1046    | 6                     | 2                    | 1041    | 1050    |
| Meniscus                        | 1100    | 1                     | 2                    | 1099    | 1100    |
| Midbrain                        | 1046    | 6                     | 2                    | 1041    | 1050    |
| Mucous<br>Membrane              | 1102    | 0                     | 1                    | 1102    | 1102    |
| Muscle                          | 1090    | 52                    | 5                    | 1041    | 1178    |
| Nerve                           | 1075    | 52                    | 2                    | 1038    | 1112    |
| Ovary                           | 1048    | 0                     | 1                    | 1048    | 1048    |
| Pancreas                        | 1087    | 59                    | 2                    | 1045    | 1128    |
| Penis                           | 1102    | 64                    | 2                    | 1056    | 1147    |
| Pharynx                         | 1       | 0                     | 2                    | 1       | 1       |

ตารางที่ 3.4 ค่าหนาแน่นของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Density<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | Average | Standard<br>Deviation | Number<br>of Studies | Minimum | Maximum |
|---------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|---------|---------|
| Pineal Body                     | 1053    | 18                    | 2                    | 1040    | 1066    |
| Placenta                        | 995     | 0                     | 1                    | 995     | 995     |
| Pons                            | 1046    | 6                     | 2                    | 1041    | 1050    |
| Prostate                        | 1045    | 0                     | 1                    | 1045    | 1045    |
| SAT<br>(Subcutaneous<br>Fat)    | 911     | 53                    | 6                    | 812     | 961     |
| Salivary Gland                  | 1048    | 0                     | 1                    | 1048    | 1048    |
| Seminal<br>vesicle              | 1045    | 0                     | 1                    | 1045    | 1045    |
| Skin                            | 1109    | 14                    | 3                    | 1100    | 1125    |

ตารางที่ 3.5 ค่าการสัมประสิทธิ์นำความร้อนของเนื้อเยื่อต่างๆ [14]

| Thermal Conductivity (W/m/°C) | Average | Standard Deviation | Number of Studies | Minimum | Maximum |
|-------------------------------|---------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| Adrenal Gland                 | 0.44    | 0.07               | 4                 | 0.36    | 0.53    |
| Air                           | 0.03    | 0.00               | 4                 | 0.03    | 0.03    |
| Bile                          | 0.58    | 0.05               | 2                 | 0.55    | 0.62    |
| Blood                         | 0.52    | 0.03               | 7                 | 0.49    | 0.56    |
| Blood Plasma                  | 0.58    | 0.00               | 1                 | 0.58    | 0.58    |
| Blood Serum                   | NaN     | NaN                | 0                 | NaN     | NaN     |
| Blood Vessel Wall             | 0.46    | 0.02               | 3                 | 0.44    | 0.48    |
| Bone (Cancellous)             | 0.31    | 0.03               | 4                 | 0.29    | 0.36    |
| Bone (Cortical)               | 0.32    | 0.03               | 3                 | 0.30    | 0.36    |
| Bone Marrow (Red)             | 0.28    | 0.00               | 1                 | 0.28    | 0.28    |
| Bone Marrow (Yellow)          | 0.19    | 0.00               | 1                 | 0.19    | 0.19    |
| Brain                         | 0.51    | 0.02               | 4                 | 0.49    | 0.54    |
| Brain (Grey Matter)           | 0.55    | 0.03               | 2                 | 0.53    | 0.56    |
| Brain (White Matter)          | 0.48    | 0.03               | 2                 | 0.46    | 0.50    |
| Breast Fat                    | 0.21    | 0.00               | 1                 | 0.21    | 0.21    |
| Breast Gland                  | 0.33    | 0.02               | 2                 | 0.32    | 0.35    |
| Bronchi                       | 0.46    | 0.02               | 3                 | 0.44    | 0.48    |
| Bronchi lumen                 | 0.03    | 0.00               | 3                 | 0.03    | 0.03    |
| Cartilage                     | 0.49    | 0.03               | 3                 | 0.47    | 0.52    |
| Cerebellum                    | 0.51    | 0.00               | 1                 | 0.51    | 0.51    |
| Cerebrospinal Fluid           | 0.57    | 0.06               | 3                 | 0.50    | 0.62    |
| Cervix                        | 0.53    | 0.02               | 2                 | 0.51    | 0.54    |
| Commissura Anterior           | 0.48    | 0.03               | 2                 | 0.46    | 0.50    |

ตารางที่ 3.5 ค่าการสัมประสิทธิ์นำความร้อนของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Thermal Conductivity (W/m/°C) | Average | Standard Deviation | Number of Studies | Minimum | Maximum |
|-------------------------------|---------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| Commissura Posterior          | 0.48    | 0.03               | 2                 | 0.46    | 0.50    |
| Connective Tissue             | 0.39    | 0.00               | 1                 | 0.39    | 0.39    |
| Diaphragm                     | 0.49    | 0.04               | 8                 | 0.42    | 0.56    |
| Ductus Deferens               | 0.46    | 0.02               | 3                 | 0.44    | 0.48    |
| Dura                          | 0.44    | 0.00               | 1                 | 0.44    | 0.44    |
| Epididymis                    | 0.52    | 0.00               | 1                 | 0.52    | 0.52    |
| Esophagus                     | 0.53    | 0.00               | 1                 | 0.53    | 0.53    |
| Esophagus Lumen               | 0.03    | 0.00               | 3                 | 0.03    | 0.03    |
| Eye (Cornea)                  | 0.54    | 0.06               | 2                 | 0.50    | 0.58    |
| Eye (Lens)                    | 0.43    | 0.06               | 3                 | 0.40    | 0.50    |
| Eye (Sclera)                  | 0.58    | 0.00               | 1                 | 0.58    | 0.58    |
| Eye (Vitreous Humor)          | 0.59    | 0.01               | 5                 | 0.59    | 0.60    |
| Eye Lens (Cortex)             | 0.43    | 0.06               | 3                 | 0.40    | 0.50    |
| Eye Lens (Nucleus)            | 0.43    | 0.06               | 3                 | 0.40    | 0.50    |
| Fat                           | 0.21    | 0.02               | 8                 | 0.18    | 0.24    |
| Fat (Average Infiltrated)     | 0.21    | 0.02               | 8                 | 0.18    | 0.24    |
| Fat (Not Infiltrated)         | 0.21    | 0.02               | 8                 | 0.18    | 0.24    |
| Gallbladder                   | 0.52    | 0.00               | 1                 | 0.52    | 0.52    |
| Heart Lumen                   | 0.52    | 0.03               | 7                 | 0.49    | 0.56    |
| Heart Muscle                  | 0.56    | 0.04               | 7                 | 0.50    | 0.60    |
| Hippocampus                   | 0.55    | 0.03               | 2                 | 0.53    | 0.56    |
| Hypophysis                    | 0.51    | 0.00               | 1                 | 0.51    | 0.51    |
| Hypothalamus                  | 0.51    | 0.00               | 1                 | 0.51    | 0.51    |

ตารางที่ 3.5 ค่าการสัมประสิทธิ์นำความร้อนของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Thermal Conductivity (W/m/°C) | Average | Standard Deviation | Number of Studies | Minimum | Maximum |
|-------------------------------|---------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| Intervertebral Disc           | 0.49    | 0.03               | 3                 | 0.47    | 0.52    |
| Kidney                        | 0.53    | 0.02               | 5                 | 0.51    | 0.56    |
| Kidney (Cortex)               | 0.53    | 0.03               | 3                 | 0.50    | 0.55    |
| Kidney (Medulla)              | 0.54    | 0.00               | 1                 | 0.54    | 0.54    |
| Large Intestine               | 0.54    | 0.03               | 4                 | 0.50    | 0.56    |
| Large Intestine Lumen         | 0.56    | 0.02               | 8                 | 0.52    | 0.59    |
| Larynx                        | 0.49    | 0.03               | 3                 | 0.47    | 0.52    |
| Liver                         | 0.52    | 0.03               | 9                 | 0.48    | 0.57    |
| Lung                          | 0.39    | 0.09               | 5                 | 0.28    | 0.48    |
| Lung (Deflated)               | 0.39    | 0.09               | 5                 | 0.28    | 0.48    |
| Lung (Inflated)               | 0.39    | 0.09               | 5                 | 0.28    | 0.48    |
| Lymph                         | NaN     | NaN                | 0                 | NaN     | NaN     |
| Lymphnode                     | 0.46    | 0.00               | 1                 | 0.46    | 0.46    |
| Mandible                      | 0.32    | 0.03               | 3                 | 0.30    | 0.36    |
| Medulla Oblongata             | 0.51    | 0.02               | 4                 | 0.49    | 0.54    |
| Meniscus                      | 0.49    | 0.03               | 3                 | 0.47    | 0.52    |
| Midbrain                      | 0.51    | 0.02               | 4                 | 0.49    | 0.54    |
| Mucous Membrane               | 0.34    | 0.00               | 1                 | 0.34    | 0.34    |
| Muscle                        | 0.49    | 0.04               | 8                 | 0.42    | 0.56    |
| Nerve                         | 0.49    | 0.00               | 1                 | 0.49    | 0.49    |
| Ovary                         | 0.52    | 0.00               | 1                 | 0.52    | 0.52    |
| Pancreas                      | 0.51    | 0.05               | 5                 | 0.47    | 0.59    |
| Penis                         | 0.46    | 0.02               | 3                 | 0.44    | 0.48    |
| Pharynx                       | 0.03    | 0.00               | 3                 | 0.03    | 0.03    |
| Pineal Body                   | 0.51    | 0.00               | 1                 | 0.51    | 0.51    |

ตารางที่ 3.5 ค่าการสัมประสิทธิ์นำความร้อนของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Thermal Conductivity (W/m/°C) | Average | Standard Deviation | Number of Studies | Minimum | Maximum |
|-------------------------------|---------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| Placenta                      | 0.52    | 0.02               | 2                 | 0.50    | 0.53    |
| Pons                          | 0.51    | 0.02               | 4                 | 0.49    | 0.54    |
| Prostate                      | 0.51    | 0.03               | 2                 | 0.49    | 0.53    |
| SAT (Subcutaneous Fat)        | 0.21    | 0.02               | 8                 | 0.18    | 0.24    |
| Salivary Gland                | 0.51    | 0.03               | 2                 | 0.49    | 0.53    |
| Seminal vesicle               | 0.51    | 0.03               | 2                 | 0.49    | 0.53    |
| Skin                          | 0.37    | 0.06               | 8                 | 0.32    | 0.50    |
| Small Intestine               | 0.49    | 0.00               | 1                 | 0.49    | 0.49    |
| Small Intestine Lumen         | 0.56    | 0.02               | 8                 | 0.52    | 0.59    |
| Spinal Cord                   | 0.51    | 0.02               | 4                 | 0.49    | 0.54    |
| Spleen                        | 0.53    | 0.01               | 7                 | 0.51    | 0.55    |
| Stomach                       | 0.53    | 0.01               | 4                 | 0.51    | 0.53    |
| Stomach Lumen                 | 0.56    | 0.02               | 8                 | 0.52    | 0.59    |
| Tendon\Ligament               | 0.47    | 0.04               | 2                 | 0.44    | 0.50    |
| Testis                        | 0.52    | 0.00               | 1                 | 0.52    | 0.52    |
| Thalamus                      | 0.55    | 0.03               | 2                 | 0.53    | 0.56    |
| Thymus                        | 0.34    | 0.00               | 1                 | 0.34    | 0.34    |
| Thyroid Gland                 | 0.52    | 0.02               | 3                 | 0.50    | 0.53    |
| Tongue                        | 0.49    | 0.04               | 8                 | 0.42    | 0.56    |
| Tooth                         | 0.59    | 0.00               | 1                 | 0.59    | 0.59    |
| Tooth (Dentine)               | 0.52    | 0.08               | 3                 | 0.42    | 0.57    |
| Tooth (Enamel)                | 0.79    | 0.20               | 2                 | 0.65    | 0.93    |
| Trachea                       | 0.49    | 0.03               | 3                 | 0.47    | 0.52    |
| Trachea Lumen                 | 0.03    | 0.00               | 3                 | 0.03    | 0.03    |
| Ureter\Urethra                | 0.46    | 0.02               | 3                 | 0.44    | 0.48    |
| Urinary Bladder Wall          | 0.52    | 0.04               | 4                 | 0.48    | 0.56    |
| Urine                         | 0.56    | 0.00               | 1                 | 0.56    | 0.56    |
| Uterus                        | 0.53    | 0.02               | 2                 | 0.51    | 0.54    |

ตารางที่ 3.5 ค่าการสัมประสิทธิ์นำความร้อนของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Thermal Conductivity (W/m/°C) | Average | Standard Deviation | Number of Studies | Minimum | Maximum |
|-------------------------------|---------|--------------------|-------------------|---------|---------|
| Vagina                        | 0.54    | 0.03               | 4                 | 0.50    | 0.56    |
| Vertebrae                     | 0.32    | 0.03               | 3                 | 0.30    | 0.36    |
| Water                         | 0.60    | 0.01               | 2                 | 0.60    | 0.61    |

ตารางที่ 3.6 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อต่างๆ [14]

| Heat Capacity<br>(J/kg/°C) | Average | Standard<br>Deviation | Number<br>of<br>Studies | Minimum | Maximum |
|----------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|---------|---------|
| Adrenal Gland              | 3513    | 124                   | 2                       | 3425    | 3600    |
| Air                        | 1004    | 3                     | 3                       | 1000    | 1006    |
| Bile                       | 4037    | 194                   | 2                       | 3900    | 4174    |
| Blood                      | 3617    | 301                   | 3                       | 3300    | 3900    |
| Blood Plasma               | 3930    | 0                     | 1                       | 3930    | 3930    |
| Blood Serum                | NaN     | NaN                   | 0                       | NaN     | NaN     |
| Blood Vessel<br>Wall       | 3306    | 158                   | 3                       | 3171    | 3480    |
| Bone<br>(Cancellous)       | 2274    | 234                   | 3                       | 2060    | 2524    |
| Bone (Cortical)            | 1313    | 295                   | 6                       | 826     | 1650    |
| Bone Marrow<br>(Red)       | 2666    | 0                     | 1                       | 2666    | 2666    |
| Bone Marrow<br>(Yellow)    | 2065    | 0                     | 1                       | 2065    | 2065    |
| Brain                      | 3630    | 74                    | 2                       | 3578    | 3682    |
| Brain (Grey<br>Matter)     | 3696    | 34                    | 5                       | 3664    | 3753    |
| Brain (White<br>Matter)    | 3583    | 78                    | 5                       | 3452    | 3664    |
| Breast Fat                 | 2348    | 372                   | 6                       | 1806    | 2973    |
| Breast Gland               | 2960    | 0                     | 1                       | 2960    | 2960    |
| Bronchi                    | 3306    | 158                   | 3                       | 3171    | 3480    |
| Bronchi lumen              | 1003    | 4                     | 2                       | 1000    | 1006    |
| Cartilage                  | 3568    | 78                    | 4                       | 3500    | 3664    |
| Cerebellum                 | 3653    | 0                     | 1                       | 3653    | 3653    |
| Cerebrospinal<br>Fluid     | 4096    | 197                   | 4                       | 3800    | 4200    |
| Cervix                     | 3676    | 0                     | 1                       | 3676    | 3676    |
| Commissura<br>Anterior     | 3583    | 78                    | 5                       | 3452    | 3664    |

ตารางที่ 3.6 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Heat Capacity<br>(J/kg/°C)   | Average | Standard<br>Deviation | Number<br>of<br>Studies | Minimum | Maximum |
|------------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|---------|---------|
| Commissura<br>Posterior      | 3583    | 78                    | 5                       | 3452    | 3664    |
| Connective<br>Tissue         | 2372    | 0                     | 1                       | 2372    | 2372    |
| Diaphragm                    | 3421    | 460                   | 5                       | 2624    | 3799    |
| Ductus Deferens              | 3306    | 158                   | 3                       | 3171    | 3480    |
| Dura                         | 3364    | 0                     | 1                       | 3364    | 3364    |
| Epididymis                   | 3778    | 0                     | 1                       | 3778    | 3778    |
| Esophagus                    | 3500    | 0                     | 1                       | 3500    | 3500    |
| Esophagus<br>Lumen           | 1003    | 4                     | 2                       | 1000    | 1006    |
| Eye (Cornea)                 | 3615    | 0                     | 1                       | 3615    | 3615    |
| Eye (Lens)                   | 3133    | 297                   | 5                       | 3000    | 3664    |
| Eye (Sclera)                 | 4200    | 0                     | 1                       | 4200    | 4200    |
| Eye (Vitrous<br>Humor)       | 4047    | 230                   | 5                       | 3664    | 4200    |
| Eye Lens (Cortex)            | 3133    | 297                   | 5                       | 3000    | 3664    |
| Eye Lens<br>(Nucleus)        | 3133    | 297                   | 5                       | 3000    | 3664    |
| Fat                          | 2348    | 372                   | 6                       | 1806    | 2973    |
| Fat (Average<br>Infiltrated) | 2348    | 372                   | 6                       | 1806    | 2973    |
| Fat (Not<br>Infiltrated)     | 2348    | 372                   | 6                       | 1806    | 2973    |
| Gallbladder                  | 3716    | 0                     | 1                       | 3716    | 3716    |
| Heart Lumen                  | 3617    | 301                   | 3                       | 3300    | 3900    |
| Heart Muscle                 | 3686    | 62                    | 3                       | 3614    | 3724    |
| Hippocampus                  | 3696    | 34                    | 5                       | 3664    | 3753    |
| Hypophysis                   | 3687    | 0                     | 1                       | 3687    | 3687    |
| Hypothalamus                 | 3687    | 0                     | 1                       | 3687    | 3687    |
| Intervertebral<br>Disc       | 3568    | 78                    | 4                       | 3500    | 3664    |

ตารางที่ 3.6 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Heat Capacity<br>(J/kg/°C) | Average | Standard<br>Deviation | Number<br>of<br>Studies | Minimum | Maximum |
|----------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|---------|---------|
| Kidney                     | 3763    | 120                   | 3                       | 3653    | 3891    |
| Kidney (Cortex)            | 3587    | 52                    | 2                       | 3550    | 3624    |
| Kidney (Medulla)           | 3745    | 0                     | 1                       | 3745    | 3745    |
| Large Intestine            | 3655    | 64                    | 2                       | 3609    | 3700    |
| Large Intestine<br>Lumen   | 3801    | 230                   | 5                       | 3403    | 3990    |
| Larynx                     | 3568    | 78                    | 4                       | 3500    | 3664    |
| Liver                      | 3540    | 119                   | 5                       | 3332    | 3617    |
| Lung                       | 3886    | 0                     | 1                       | 3886    | 3886    |
| Lung (Deflated)            | 3886    | 0                     | 1                       | 3886    | 3886    |
| Lung (Inflated)            | 3886    | 0                     | 1                       | 3886    | 3886    |
| Lymph                      | NaN     | NaN                   | 0                       | NaN     | NaN     |
| Lymphnode                  | 3739    | 313                   | 2                       | 3517    | 3960    |
| Mandible                   | 1313    | 295                   | 6                       | 826     | 1650    |
| Medulla<br>Oblongata       | 3630    | 74                    | 2                       | 3578    | 3682    |
| Meniscus                   | 3568    | 78                    | 4                       | 3500    | 3664    |
| Midbrain                   | 3630    | 74                    | 2                       | 3578    | 3682    |
| Mucous<br>Membrane         | 3150    | 0                     | 1                       | 3150    | 3150    |
| Muscle                     | 3421    | 460                   | 5                       | 2624    | 3799    |
| Nerve                      | 3613    | 72                    | 2                       | 3562    | 3664    |
| Ovary                      | 3778    | 0                     | 1                       | 3778    | 3778    |
| Pancreas                   | 3164    | 484                   | 2                       | 2822    | 3506    |
| Penis                      | 3306    | 158                   | 3                       | 3171    | 3480    |
| Pharynx                    | 1003    | 4                     | 2                       | 1000    | 1006    |
| Pineal Body                | 3687    | 0                     | 1                       | 3687    | 3687    |
| Placenta                   | 3807    | 47                    | 2                       | 3773    | 3840    |
| Pons                       | 3630    | 74                    | 2                       | 3578    | 3682    |
| Prostate                   | 3760    | 28                    | 2                       | 3740    | 3780    |

ตารางที่ 3.6 ค่าความจุความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อต่างๆ (ต่อ)

| Heat Capacity<br>(J/kg/°C)   | Average | Standard<br>Deviation | Number<br>of<br>Studies | Minimum | Maximum |
|------------------------------|---------|-----------------------|-------------------------|---------|---------|
| SAT<br>(Subcutaneous<br>Fat) | 2348    | 372                   | 6                       | 1806    | 2973    |
| Salivary Gland               | 3760    | 28                    | 2                       | 3740    | 3780    |
| Seminal vesicle              | 3760    | 28                    | 2                       | 3740    | 3780    |
| Skin                         | 3391    | 233                   | 4                       | 3150    | 3662    |
| Small Intestine              | 3595    | 0                     | 1                       | 3595    | 3595    |
| Small Intestine<br>Lumen     | 3801    | 230                   | 5                       | 3403    | 3990    |
| Spinal Cord                  | 3630    | 74                    | 2                       | 3578    | 3682    |
| Spleen                       | 3596    | 191                   | 3                       | 3376    | 3724    |
| Stomach                      | 3690    | 0                     | 1                       | 3690    | 3690    |
| Stomach Lumen                | 3801    | 230                   | 5                       | 3403    | 3990    |
| Tendon\Ligament              | 3432    | 96                    | 2                       | 3364    | 3500    |
| Testis                       | 3778    | 0                     | 1                       | 3778    | 3778    |
| Thalamus                     | 3696    | 34                    | 5                       | 3664    | 3753    |
| Thymus                       | 3043    | 0                     | 1                       | 3043    | 3043    |
| Thyroid Gland                | 3609    | 0                     | 1                       | 3609    | 3609    |
| Tongue                       | 3421    | 460                   | 5                       | 2624    | 3799    |
| Tooth                        | 1255    | 0                     | 1                       | 1255    | 1255    |
| Tooth (Dentine)              | 1338    | 222                   | 3                       | 1170    | 1590    |
| Tooth (Enamel)               | 711     | 0                     | 1                       | 711     | 711     |
| Trachea                      | 3568    | 78                    | 4                       | 3500    | 3664    |
| Trachea Lumen                | 1003    | 4                     | 2                       | 1000    | 1006    |
| Ureter\Urethra               | 3306    | 158                   | 3                       | 3171    | 3480    |
| Urinary Bladder<br>Wall      | 3581    | 302                   | 3                       | 3300    | 3900    |
| Urine                        | 4178    | 0                     | 1                       | 4178    | 4178    |
| Uterus                       | 3676    | 0                     | 1                       | 3676    | 3676    |
| Vagina                       | 3655    | 64                    | 2                       | 3609    | 3700    |
| Vertebrae                    | 1313    | 295                   | 6                       | 826     | 1650    |
| Water                        | 4178    | 0                     | 1                       | 4178    | 4178    |

## บทที่ 4

# ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าและผลการ จำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในบทนี้กล่าวถึงผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งเป็นการจำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ โทรศัพท์เคลื่อนที่ และแห่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กในงานอุตสาหกรรม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

### 4.1 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

ได้ทำการออกทดสอบในพื้นที่จริงที่มีการติดตั้งสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ใน 5 ภูมิภาคทั่วประเทศ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคกลาง ภาคใต้ ภาคตะวันออก-ตก และภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นต้น โดยทำการทดสอบภูมิภาคละ 1 สถานีฐาน รวมทั้งสิ้น 5 สถานีฐานทั่วประเทศไทย ดังแสดงในรูป 3.8 – 3.11 เพื่อทำการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

สำหรับมาตรการในการกำกับดูแลความปลอดภัยต่อสุขภาพของมนุษย์ ประเทศไทยได้ใช้มาตรการขีดจำกัดและวิธีการวัดสำหรับการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของมนุษย์ในย่านความถี่วิทยุ 9 kHz – 300 GHz (หมายเลข กทช. มท. 5001 – 2550) อ้างอิงมาจากมาตรฐาน International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) ซึ่งมาตรฐานดังกล่าวได้แบ่งผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มที่ 1 ผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงาน (occupational exposure) หมายถึง กลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องวิทยุคมนาคมอันเป็นผลมาจากหน้าที่การงาน หรือผู้ที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเป็นประจำ และกลุ่มที่ 2 ผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไป (general public exposure) หมายถึง กลุ่มประชาชนทั่วไปที่ไม่รวมบุคคลในกลุ่มที่ 1 ที่ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากเครื่องวิทยุคมนาคม สำหรับขีดจำกัดการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการใช้เครื่องวิทยุคมนาคม ภายใต้มาตรฐานความปลอดภัยต่อสุขภาพมนุษย์เครื่องวิทยุคมนาคมได้กำหนดให้ เครื่องวิทยุคมนาคมซึ่งส่วนประกอบที่สามารถแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ใกล้ชิดกับบริเวณศีรษะหรืออยู่ห่างจากร่างกายน้อยกว่า 20 เซนติเมตร โดยกำหนดขีดจำกัดอัตราการดูดกลืนพลังงานจำเพาะ (SAR) ในย่านความถี่ 100 kHz – 10 GHz สำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงาน และกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไป แสดงในตารางที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.1 ตารางขีดจำกัดค่า SAR ของผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นทั่วไป [1]

| กลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า | ขีดจำกัด SAR (W/kg)                              |   |                                |
|----------------------------------|--|---|--------------------------------|
|                                  | ค่าเฉลี่ย SAR สำหรับทั่วทั้งร่างกาย (whole-body) | ค่า SAR เฉพาะส่วนศีรษะและลำตัว (head & trunk) | ค่า SAR เฉพาะส่วนแขนขา (limbs) |
| การทำงาน                         | 0.4  | 10  | 20                             |
| ทั่วไป                           | 0.08   | 2   | 4                              |

และได้กำหนดให้เครื่องวิทยุคมนาคมซึ่งส่วนประกอบที่สามารถแผ่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอยู่ห่างจากร่างกาย ไม่น้อยกว่า 20 เซนติเมตรในตำแหน่งใช้งานปกติ ขีดจำกัดความแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไปจะต้องมีค่าไม่เกินค่าดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขีดจำกัดความแรงสนามแม่เหล็กไฟฟ้าสำหรับกลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงานและกลุ่มผู้ได้รับคลื่นทั่วไป [1]

| ความถี่          | ผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากการทำงาน |                        |   | กลุ่มผู้ได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าทั่วไป |                        |   |
|------------------|--|------------------------|---|--|------------------------|---|
|                  | E-field strength (V/m)                 | H-field strength (A/m) | Equivalent plane wave power density Seq (W/m <sup>2</sup> ) | E-field strength (V/m)                 | H-field strength (A/m) | Equivalent plane wave power density Seq (W/m <sup>2</sup> ) |
| 9 kHz – 65 kHz   | 610                                    | 24.4                   | -   | 87                                     | 5                      | -   |
| 65 kHz – 1 MHz   | 610                                    | 1.6/f                  | -   | 87                                     | 0.73/f                 | -   |
| 1 MHz – 10 MHz   | 610/f                                  | 1.6/f                  | -   | 87/f <sup>1/2</sup>                    | 0.73/f                 | -   |
| 10 MHz – 400 MHz | 61                                     | 0.16                   | 10  | 28                                     | 0.073                  | 2   |
| 400 MHz – 2 GHz  | 3f <sup>1/2</sup>                      | 0.008f <sup>1/2</sup>  | f/40  | 1.375f <sup>1/2</sup>                  | 0.0037f <sup>1/2</sup> | f/200   |
| 2 GHz – 300 GHz  | 137                                    | 0.36                   | 50  | 61                                     | 0.16                   | 10  |

ตาราง 4.3 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา (ภาคใต้)

| ระดับการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า                              |                              |                      |
|---|------------------------------|----------------------|
| ระยะห่างจากแนวทดสอบ<br>เริ่มต้น                           | ระยะที่ทดสอบ/คำนวณ<br>(เมตร) | ค่าที่ทดสอบได้ (V/m) |
| 0 เมตร ถึง 50 เมตร<br>(ที่ความถี่ 951.5 MHz)              | 6                            | 0.0619               |
| 50 เมตร ถึง 100 เมตร<br>(ที่ความถี่ 959.8 MHz)            | 81                           | 0.1561               |
| 100 เมตร ถึง 200 เมตร<br>(ที่ความถี่ 959.7 MHz)           | 200                          | 0.1284               |
| 200 เมตร ถึง 300 เมตร<br>(ที่ความถี่ 942.7 MHz)           | 287                          | 0.0078               |
| 300 เมตร ถึง 400 เมตร<br>(ที่ความถี่ 959.8 MHz)           | 330                          | 0.0374               |
| 400 เมตร ถึง 500 เมตร<br>(ที่ความถี่ 2148.9 MHz)          | 494                          | 0.1181               |
| ระดับการแผ่ของคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดจาก<br>การทดสอบ | 81                           | 0.1561               |

จากผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสทิงพระ จังหวัดสงขลา จากผลการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ พบว่าที่ตำแหน่ง 81 เมตร ที่ความถี่ 959.8 MHz มีค่าความแรงสนามไฟฟ้าสูงสุดของค่าที่ทดสอบได้คือ 0.1561 V/m ซึ่งผลจากการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่สูงสุด ได้นำมาใช้ในแบบจำลองบริเวณศีรษะ โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงใส่ในโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อคำนวณผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติ ร่วมกับแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะ และค่าความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ

ตาราง 4.4 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)

| ระดับการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า                              |                              |                      |
|---|------------------------------|----------------------|
| ระยะห่างจากแนวทดสอบ<br>เริ่มต้น                           | ระยะที่ทดสอบ/คำนวณ<br>(เมตร) | ค่าที่ทดสอบได้ (V/m) |
| 0 เมตร ถึง 50 เมตร<br>(ที่ความถี่ 2111.3 MHz)             | 43                           | 0.0575               |
| 50 เมตร ถึง 100 เมตร<br>(ที่ความถี่ 2111.2 MHz)           | 87                           | 0.0620               |
| 100 เมตร ถึง 200 เมตร<br>(ที่ความถี่ 881.6 MHz)           | 163                          | 0.0992               |
| 200 เมตร ถึง 300 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1819.6 MHz)          | 253                          | 0.0958               |
| 300 เมตร ถึง 400 เมตร<br>(ที่ความถี่ 2111.3 MHz)          | 389                          | 0.0621               |
| 400 เมตร ถึง 500 เมตร<br>(ที่ความถี่ 2117.9 MHz)          | 484                          | 0.0935               |
| ระดับการแผ่ของคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้า<br>สูงสุดจากการทดสอบ | 163                          | 0.0992               |

จากผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น จากผลการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ พบว่าที่ตำแหน่ง 163 เมตร ที่ความถี่ 881.6 MHz มีค่าความแรงสนามไฟฟ้าสูงสุดของค่าที่ทดสอบได้ คือ 0.0992 V/m ซึ่งผลจากการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่สูงสุด ได้นำมาใช้ในแบบจำลองบริเวณศีรษะ โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงใส่ในโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อคำนวณผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า บริเวณศีรษะ และค่าความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ

ตาราง 4.5 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร (ภาคกลาง)

| ระดับการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า                      |                           |                      |
|---|---------------------------|----------------------|
| ระยะห่างจากแนวทดสอบเริ่มต้น                       | ระยะที่ทดสอบ/คำนวณ (เมตร) | ค่าที่ทดสอบได้ (V/m) |
| 0 เมตร ถึง 50 เมตร (ที่ความถี่ 2147.3 MHz)        | 20                        | 0.0919               |
| 50 เมตร ถึง 100 เมตร (ที่ความถี่ 1840.9 MHz)      | 95                        | 0.0472               |
| 100 เมตร ถึง 200 เมตร (ที่ความถี่ 1827.2 MHz)     | 172                       | 0.0909               |
| 200 เมตร ถึง 300 เมตร (ที่ความถี่ 2143.4 MHz)     | 232                       | 0.0749               |
| 300 เมตร ถึง 400 เมตร (ที่ความถี่ 2154.5 MHz)     | 310                       | 0.1294               |
| 400 เมตร ถึง 500 เมตร (ที่ความถี่ 946.4 MHz)      | 420                       | 0.1174               |
| ระดับการแผ่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงสุดจากการทดสอบ | 310                       | 0.1294               |

จากผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร จากผลการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ พบว่าที่ตำแหน่ง 310 เมตร ที่ความถี่ 2154.5 MHz มีค่าความแรงสนามไฟฟ้าสูงสุดของค่าที่ทดสอบได้คือ 0.1294 V/m ซึ่งผลจากการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่สูงสุด ได้นำมาใช้ในแบบจำลองบริเวณศีรษะ โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงใส่ในโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อคำนวณผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะ และค่าความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ

ตาราง 4.6 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่  
อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา (ภาคเหนือ)

| ระดับการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า                              |                              |                      |
|---|------------------------------|----------------------|
| ระยะห่างจากแนว<br>ทดสอบเริ่มต้น                           | ระยะที่ทดสอบ/คำนวณ<br>(เมตร) | ค่าที่ทดสอบได้ (V/m) |
| 0 เมตร ถึง 50 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1821.9<br>MHz)          | 50                           | 0.2371               |
| 50 เมตร ถึง 100 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1819.1 MHz)           | 89                           | 0.1374               |
| 100 เมตร ถึง 200 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1721.3<br>MHz)       | 174                          | 0.0934               |
| 200 เมตร ถึง 300 เมตร<br>(ที่ความถี่ 898.2 MHz)           | 252                          | 0.1304               |
| 300 เมตร ถึง 400 เมตร<br>(ที่ความถี่ 955.8 MHz)           | 379                          | 0.0927               |
| 400 เมตร ถึง 500 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1819.1<br>MHz)       | 443                          | 0.1217               |
| ระดับการแผ่ของคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้า<br>สูงสุดจากการทดสอบ | 89                           | 0.1374               |

จากผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา จากผลการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ พบว่าที่ตำแหน่ง 89 เมตร ที่ความถี่ 1819.1 MHz มีค่าความแรงสนามไฟฟ้าสูงสุดของค่าที่ทดสอบได้คือ 0.374 V/m ซึ่งผลจากการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่สูงสุด ได้นำมาใช้ในแบบจำลองบริเวณศีรษะ โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงใส่ในโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อคำนวณผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะ และค่าความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ

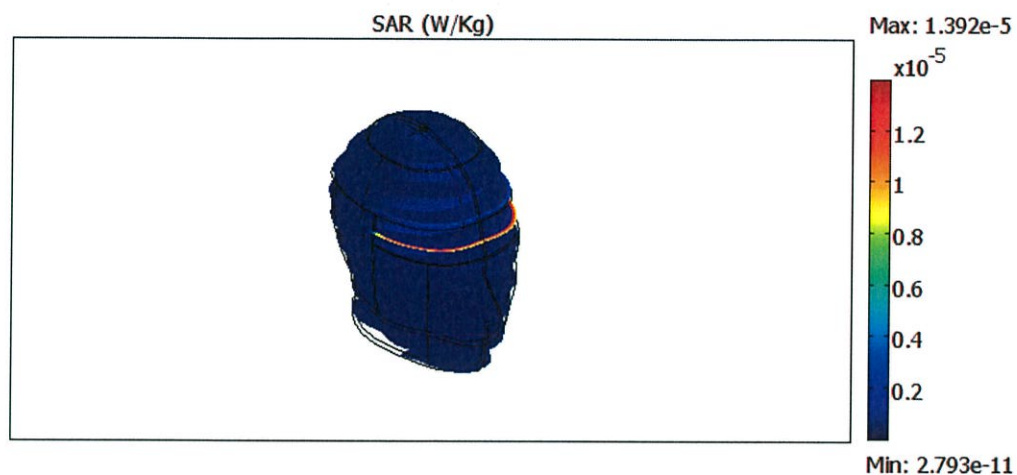
ตาราง 4.7 ผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่  
ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี (ภาคตะวันตก)

| ระดับการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า                              |                              |                      |
|---|------------------------------|----------------------|
| ระยะห่างจากแนว<br>ทดสอบเริ่มต้น                           | ระยะที่ทดสอบ/คำนวณ<br>(เมตร) | ค่าที่ทดสอบได้ (V/m) |
| 0 เมตร ถึง 50 เมตร (ที่<br>ความถี่ 1809.8 MHz)            | 50                           | 0.1042               |
| 50 เมตร ถึง 100 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1809.9 MHz)           | 100                          | 0.1461               |
| 100 เมตร ถึง 200 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1823.5 MHz)          | 200                          | 0.0930               |
| 200 เมตร ถึง 300 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1830.4 MHz)          | 280                          | 0.1259               |
| 300 เมตร ถึง 400 เมตร<br>(ที่ความถี่ 1809.9 MHz)          | 340                          | 0.1868               |
| 400 เมตร ถึง 500 เมตร<br>(ที่ความถี่ 898.5 MHz)           | 490                          | 0.2271               |
| ระดับการแผ่ของคลื่น<br>แม่เหล็กไฟฟ้า<br>สูงสุดจากการทดสอบ | 490                          | 0.2271               |

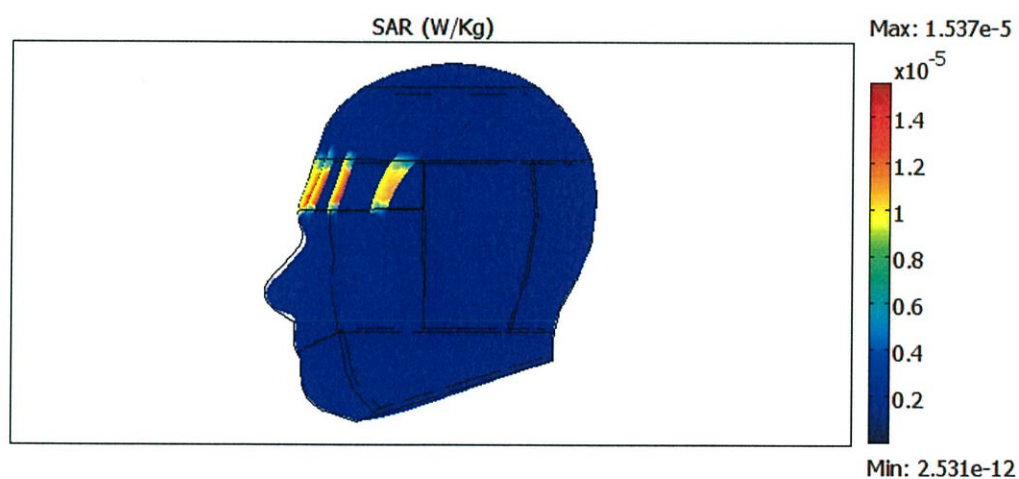
จากผลการตรวจวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี จากผลการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ พบว่าที่ตำแหน่ง 490 เมตร ที่ความถี่ 898.5 MHz มีค่าความแรงสนามไฟฟ้าสูงสุดของค่าที่ทดสอบได้คือ 0.2271 V/m ซึ่งผลจากการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่สูงสุด ได้นำมาใช้ในแบบจำลองบริเวณศีรษะ โดยการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดจริงใส่ในโปรแกรม COMSOL Multiphysics เพื่อคำนวณผลทางคณิตศาสตร์โดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับแบบจำลองผลทางคอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณศีรษะ และค่าความร้อนทางชีวภาพบริเวณศีรษะ

## 4.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

4.2.1 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสิงหนคร จังหวัดสงขลา



(ก) ระนาบ xyz

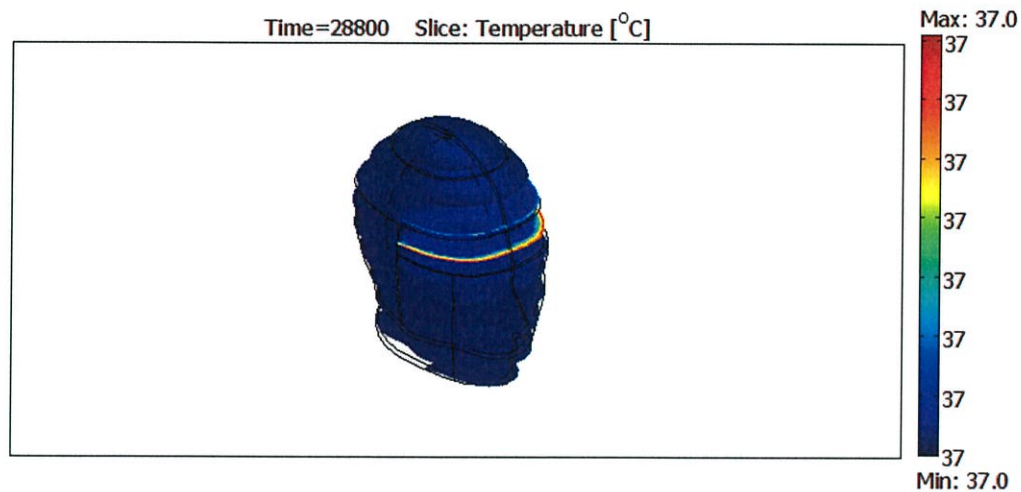


(ข) ระนาบ yz

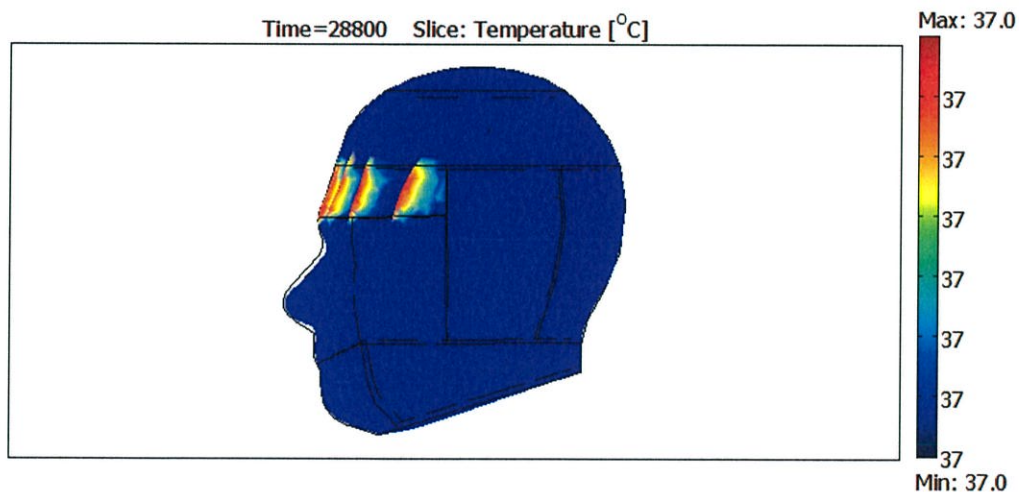
รูปที่ 4.1 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดสงขลา (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.1 ผลการจำลองอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดสงขลา พบว่าค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ  $1.392 \times 10^{-5}$  W/kg

4.2.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลสนามชัย อำเภอสิงหนคร จังหวัด สงขลา



(ก) ระนาบ xyz

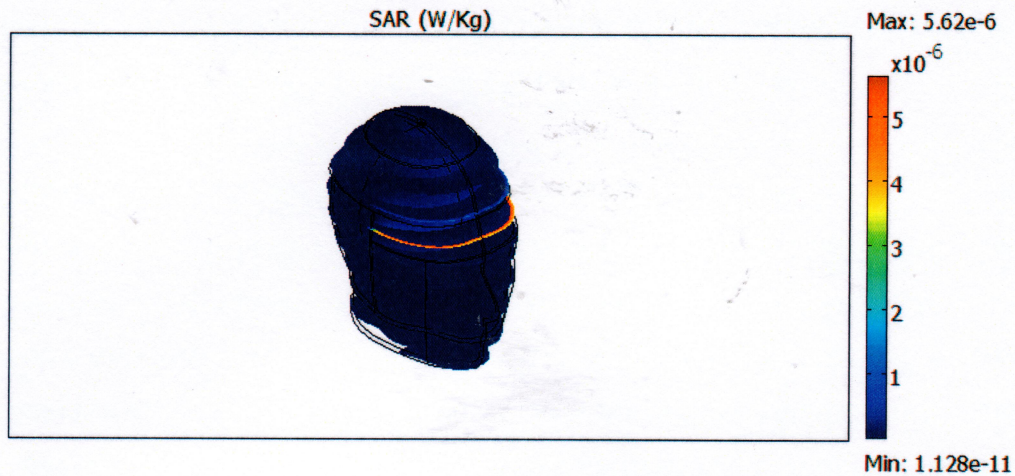


(ข) ระนาบ yz

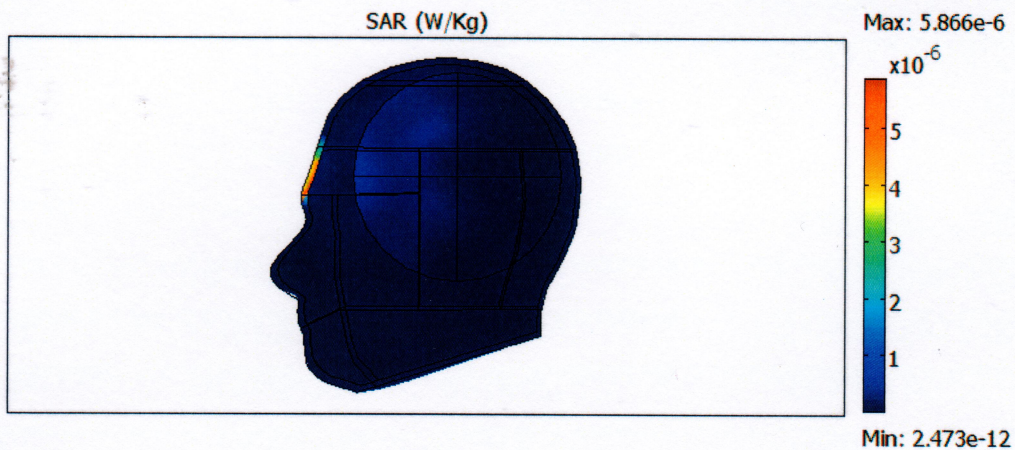
รูปที่ 4.2 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัด สงขลา (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.2 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัด สงขลา พบว่า ค่าสูงสุดของความร้อนทางชีวภาพคือ 37.06 องศาเซลเซียส

4.2.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ  
 สถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัด ขอนแก่น



(ก) ระนาบ xyz

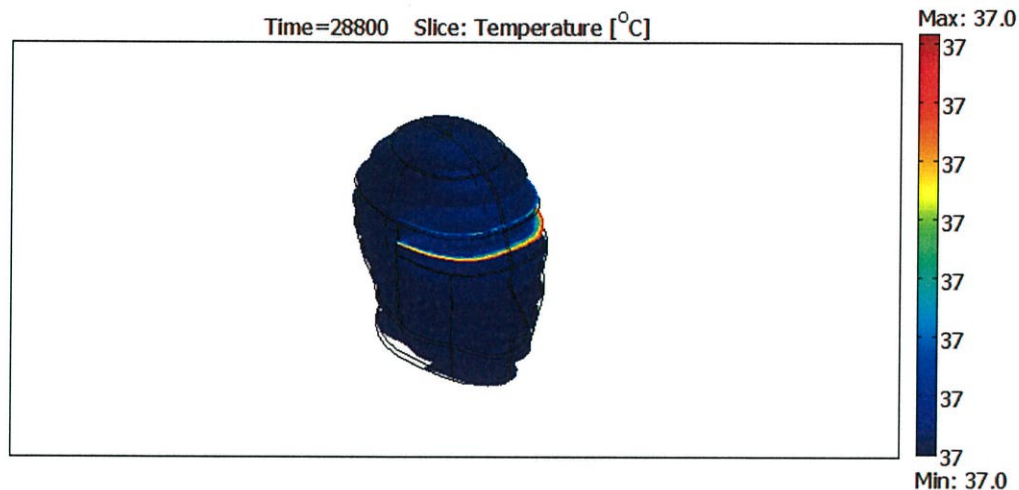


(ข) ระนาบ yz

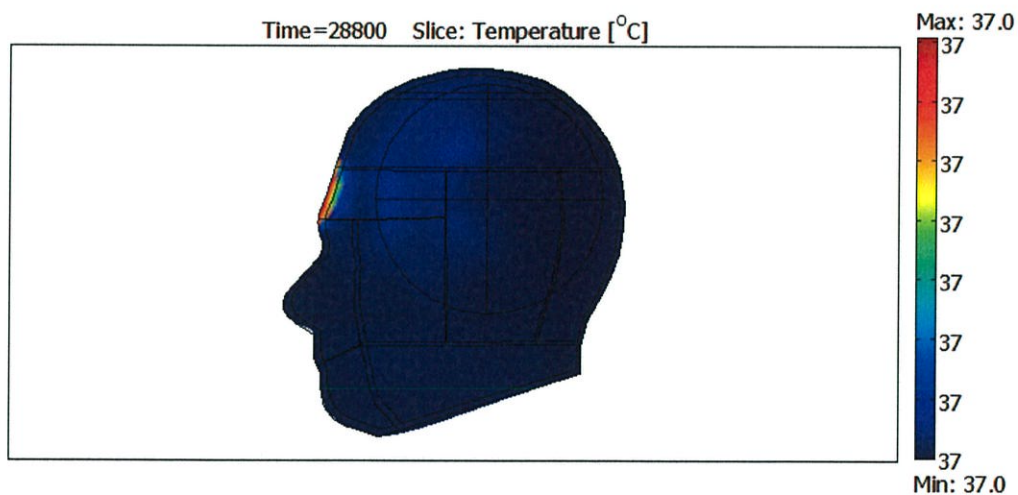
รูปที่ 4.3 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่  
 จังหวัดขอนแก่น (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.3 ผลการจำลองอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณ  
 โทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดขอนแก่น พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 5.866e-6  
 W/kg

4.2.4 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลทางความร้อนทางชีวภาพ  
 สถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลบ้านไผ่ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น



(ก) ระนาบ xyz

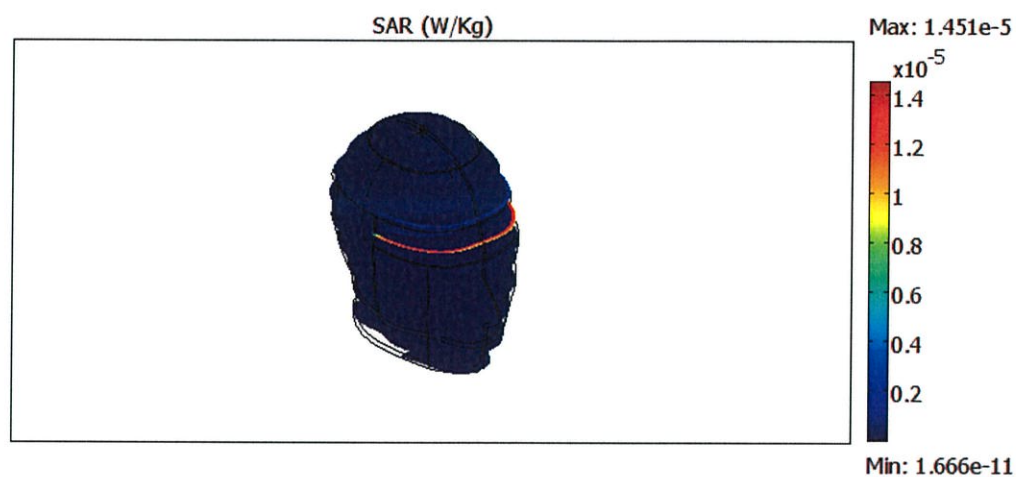


(ข) ระนาบ yz

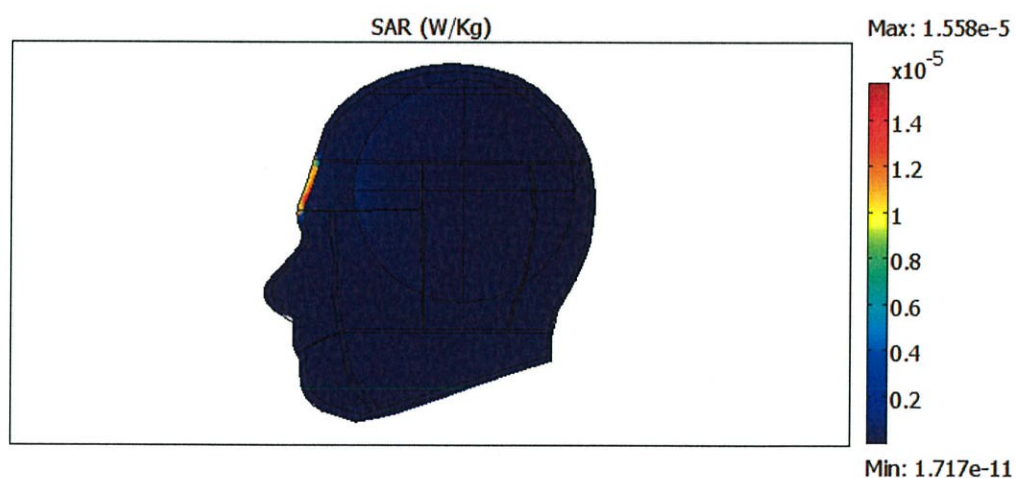
รูปที่ 4.4 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดขอนแก่น  
 (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.4 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดสงขลา พบว่า ค่าสูงสุดของความร้อนทางชีวภาพคือ 37.07 องศาเซลเซียส

4.2.5 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงาน  
จำเพาะสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร



(ก) ระนาบ xyz

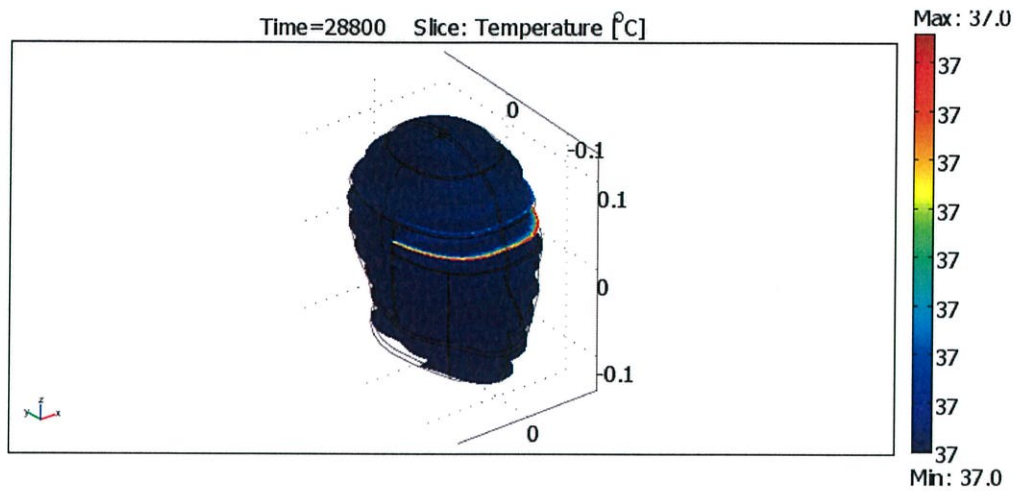


(ข) ระนาบ yz

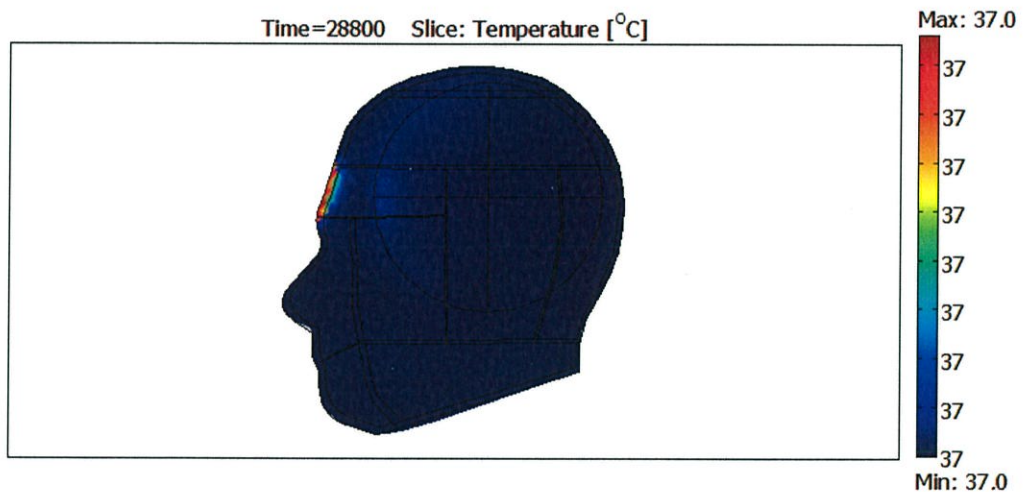
รูปที่ 4.5 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่  
จังหวัดกรุงเทพมหานคร (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.5 ผลการจำลองอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณ  
โทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดขอนแก่น พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 1.558e-5  
W/kg

4.2.6 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลทางความร้อนทางชีวภาพ  
 สถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ แขวงทับยาว เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร



(ก) ระนาบ xyz

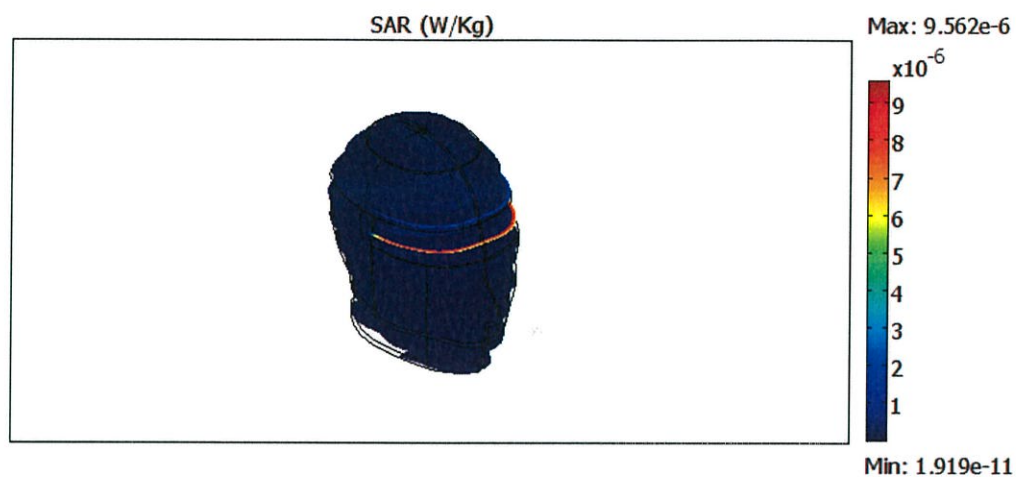


(ข) ระนาบ yz

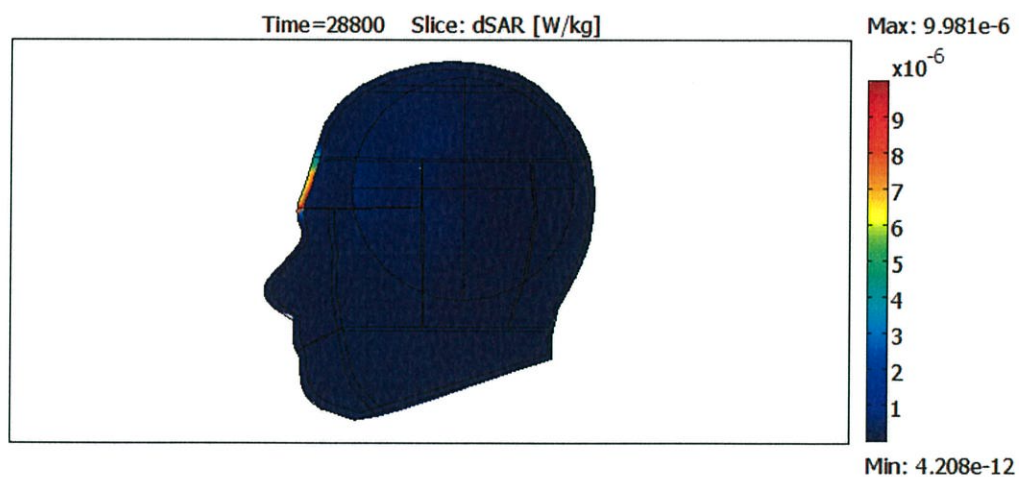
รูปที่ 4.6 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ กรุงเทพมหานคร  
 (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.6 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัด  
 กรุงเทพมหานคร พบว่า ค่าสูงสุดของความร้อนทางชีวภาพคือ 37.08 องศาเซลเซียส

4.2.7 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลน้ำแวน อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา



(ก) ระนาบ xyz

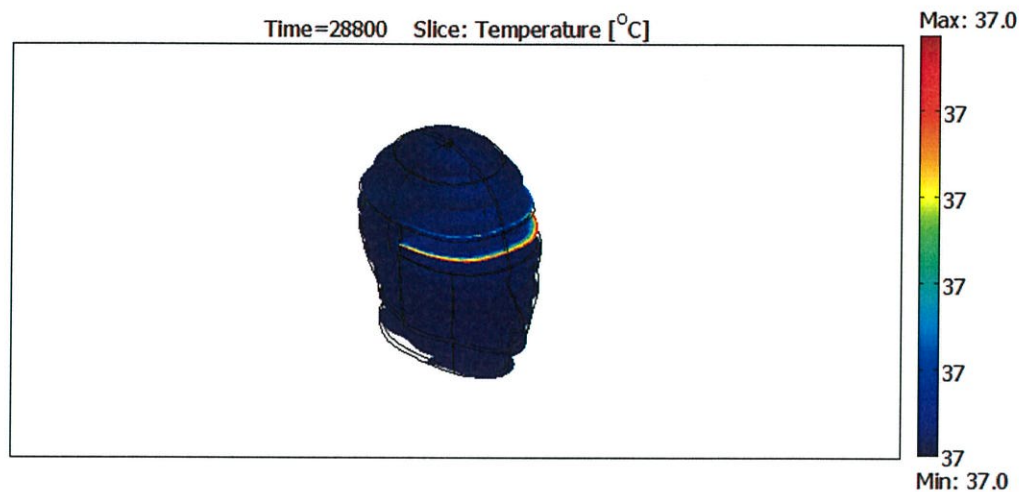


(ข) ระนาบ yz

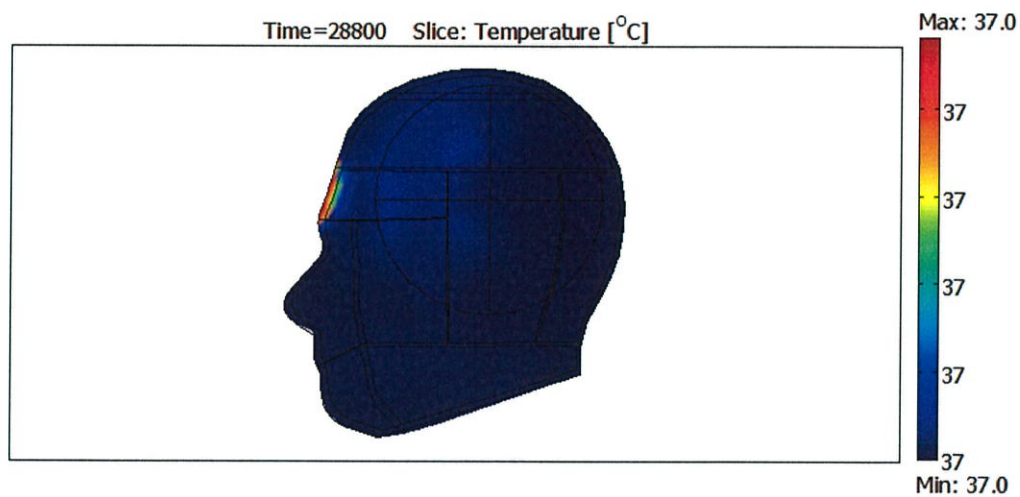
รูปที่ 4.7 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดพะเยา (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.7 ผลการจำลองอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดพะเยา พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 9.981e-6 W/kg

4.2.8 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลทางความร้อนทางชีวภาพ  
 สถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลน้ำแวน อำเภอเชียงคำ จังหวัดพะเยา



(ก) ระนาบ xyz

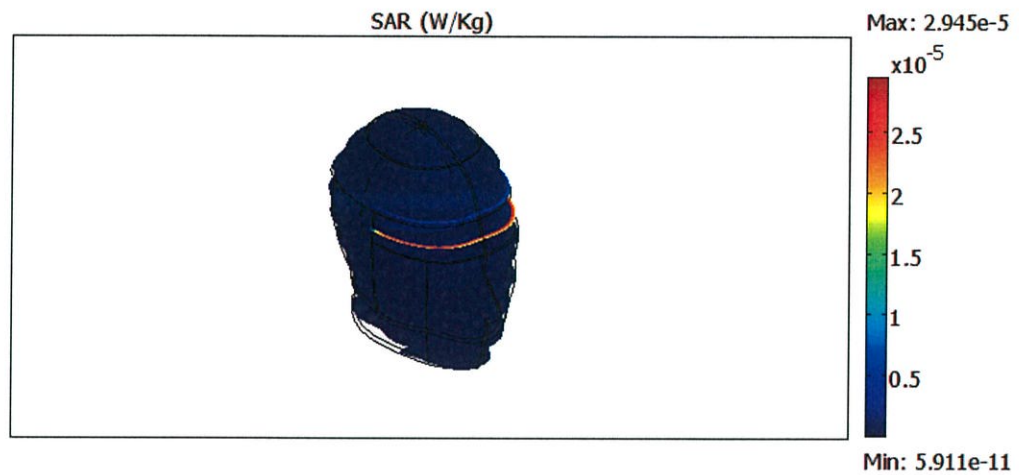


(ข) ระนาบ yz

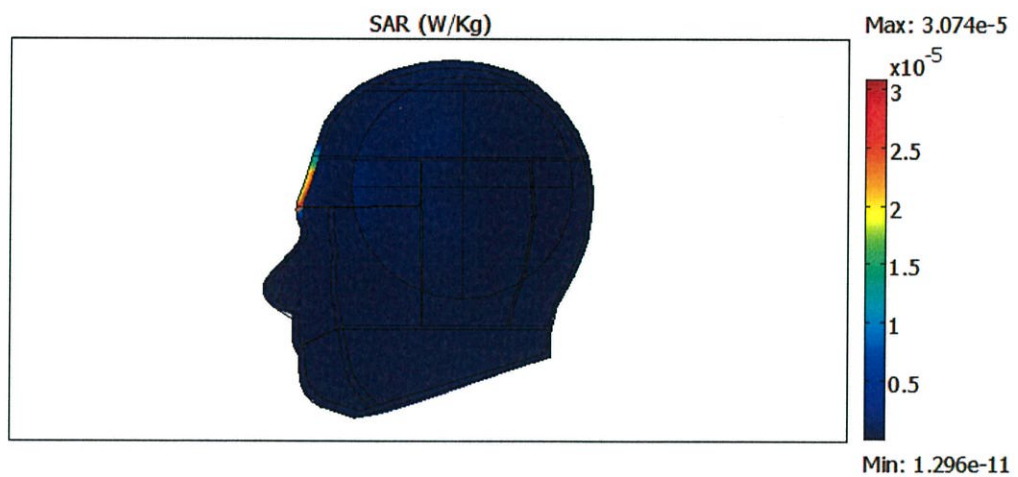
รูปที่ 4.8 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดพะเยา  
 แนวระนาบ (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.8 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัด  
 พะเยา พบว่า ค่าสูงสุดของความร้อนทางชีวภาพคือ 37.05 องศาเซลเซียส

4.1.9 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี



(ก) ระนาบ xyz

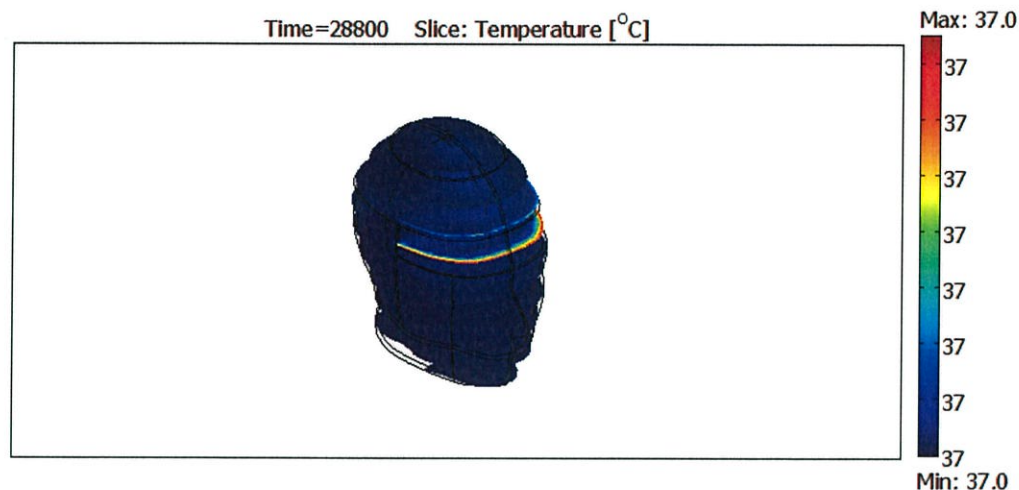


(ข) ระนาบ yz

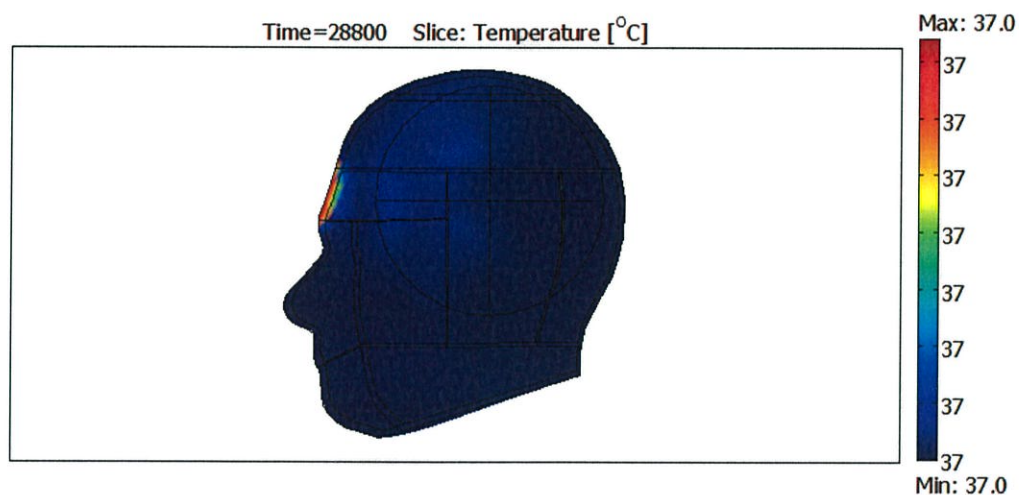
รูปที่ 4.9 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดกาญจนบุรี (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

จากรูปที่ 4.9 ผลการจำลองอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะจากสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดขอนแก่น พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 3.074e-5 W/kg

4.2.1.10 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ ตำบลไทรโยค อำเภอไทรโยค จังหวัดกาญจนบุรี



(ก) ระนาบ xyz



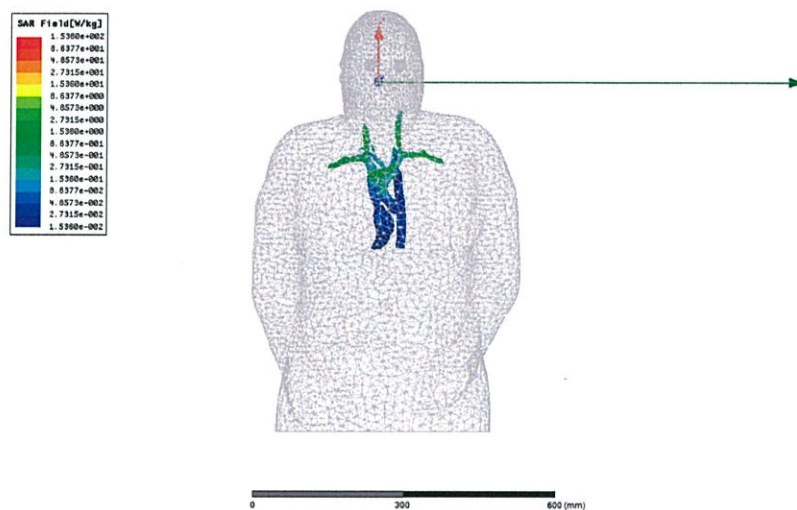
(ข) ระนาบ yz

รูปที่ 4.10 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดกาญจนบุรี (ก) แนวระนาบ xyz (ข) แนวระนาบ yz

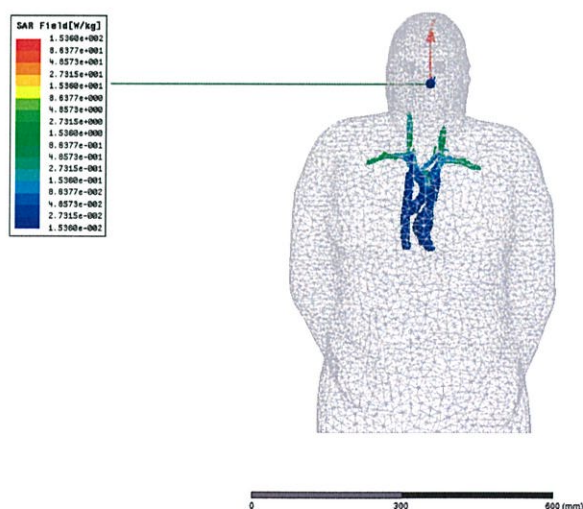
จากรูปที่ 4.10 ผลทางความร้อนทางชีวภาพสถานีฐานส่งสัญญาณโทรศัพท์เคลื่อนที่ จังหวัดกรุงเทพมหานคร พบว่า ค่าสูงสุดของความร้อนทางชีวภาพคือ 37.08 องศาเซลเซียส

#### 4.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

##### 4.3.1 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหลอดเลือดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

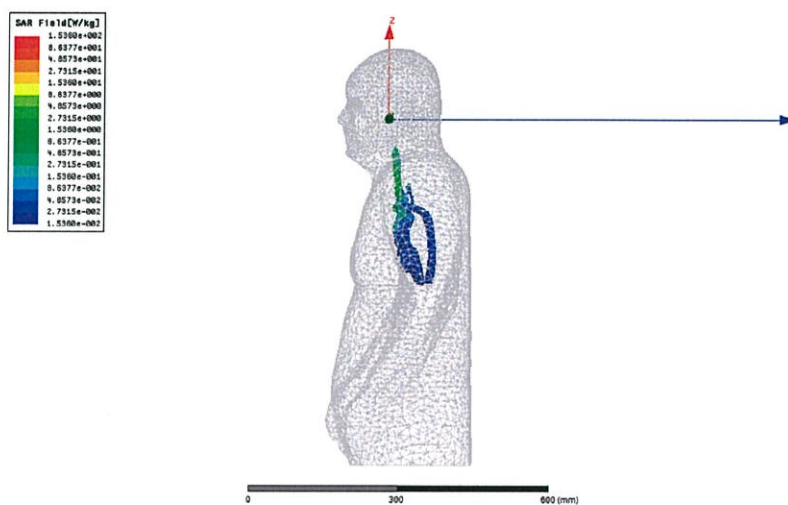


(ก) ด้านหน้า

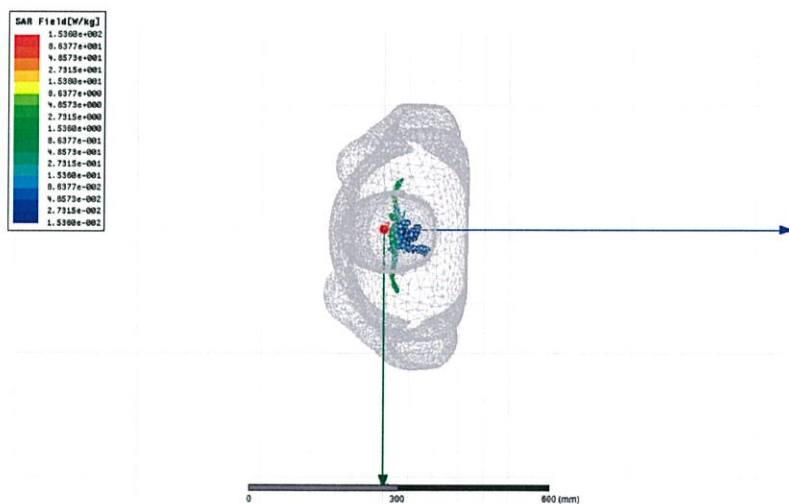


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.11 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหลอดเลือดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

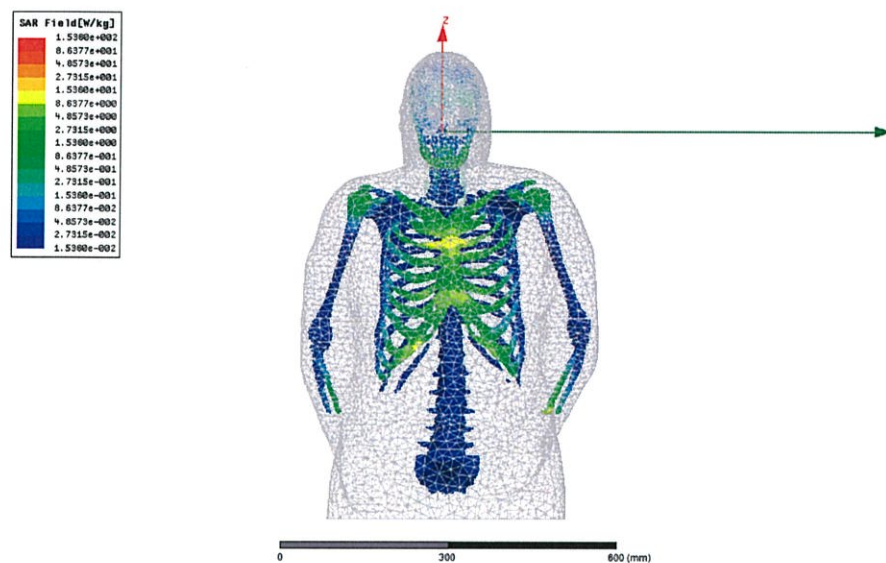


(ง) ด้านบน

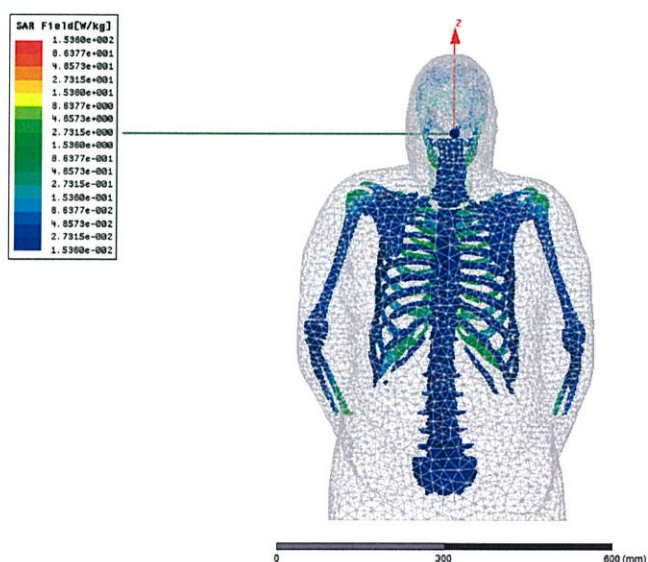
รูปที่ 4.11 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหลอดเลือดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.11 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหลอดเลือดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 2.731 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระดูกจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

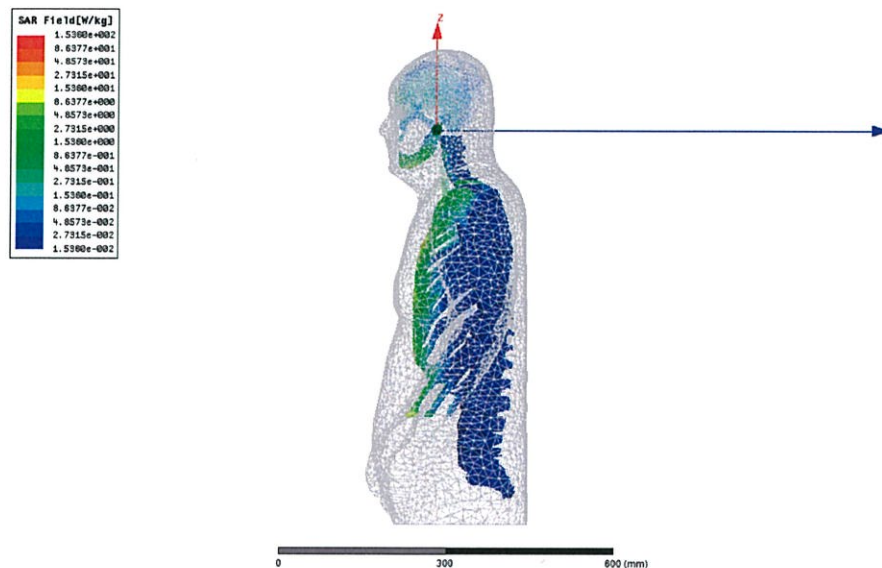


(ก) ด้านหน้า

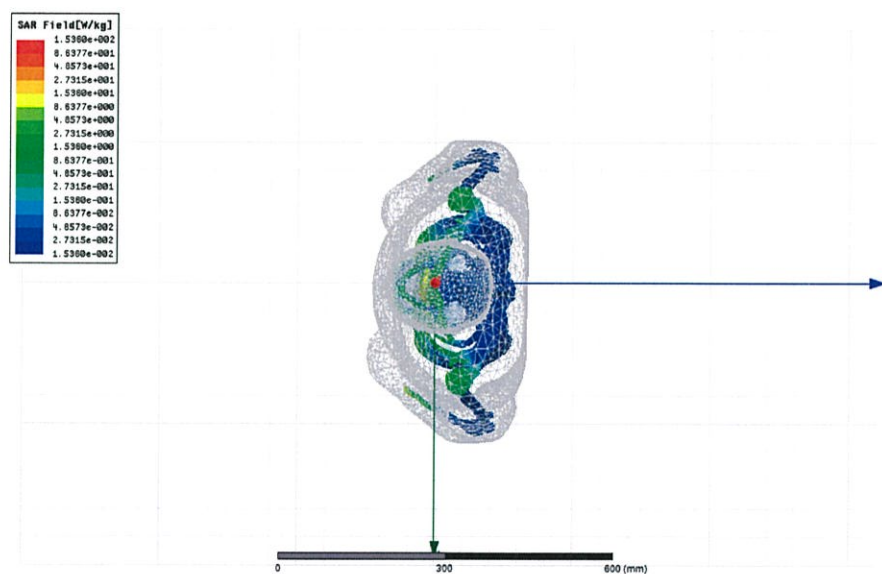


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.12 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระดูกจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

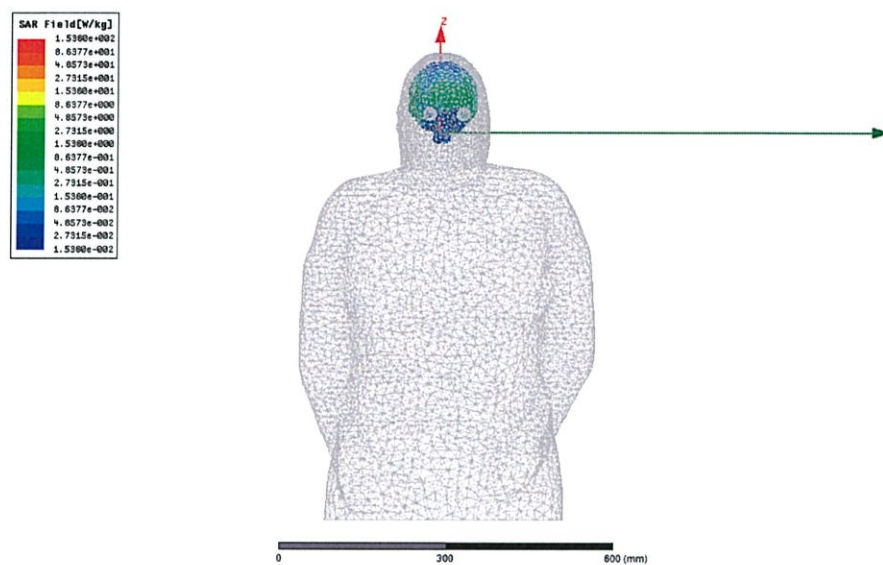


(ง) ด้านบน

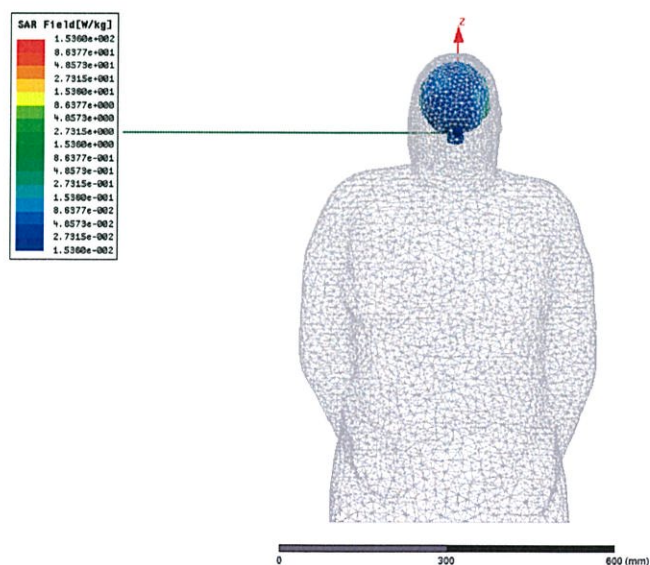
รูปที่ 4.12 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระดูกจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านบน

จากรูปที่ 4.12 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระดูกจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 1.54 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณสมองจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

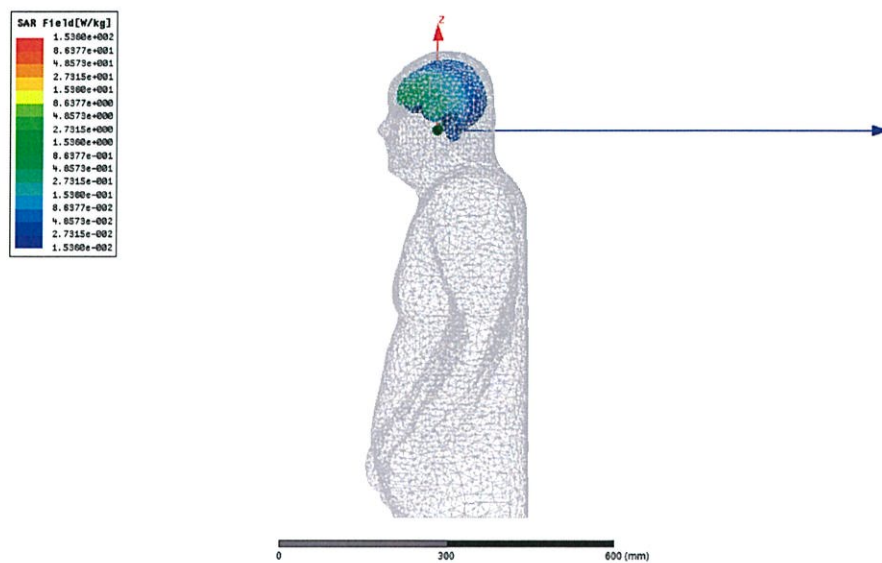


(ก) ด้านหน้า

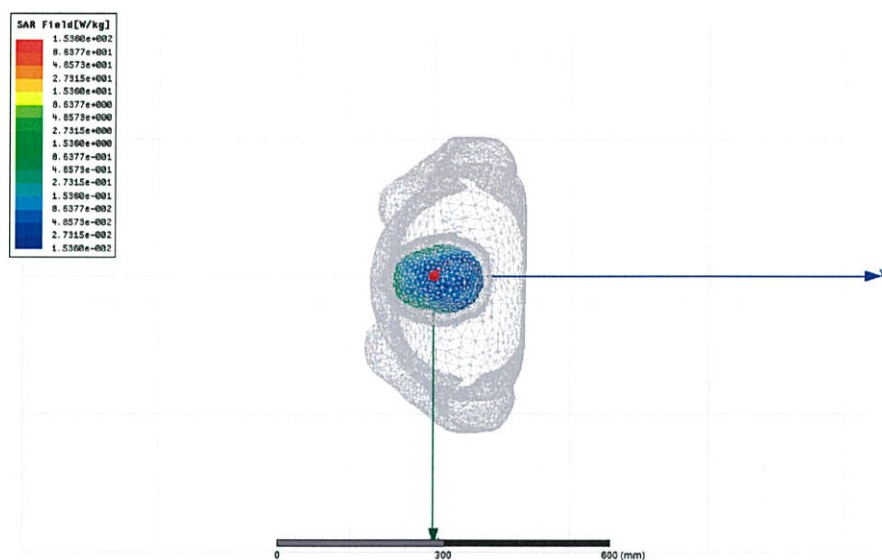


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.13 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณสมองจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

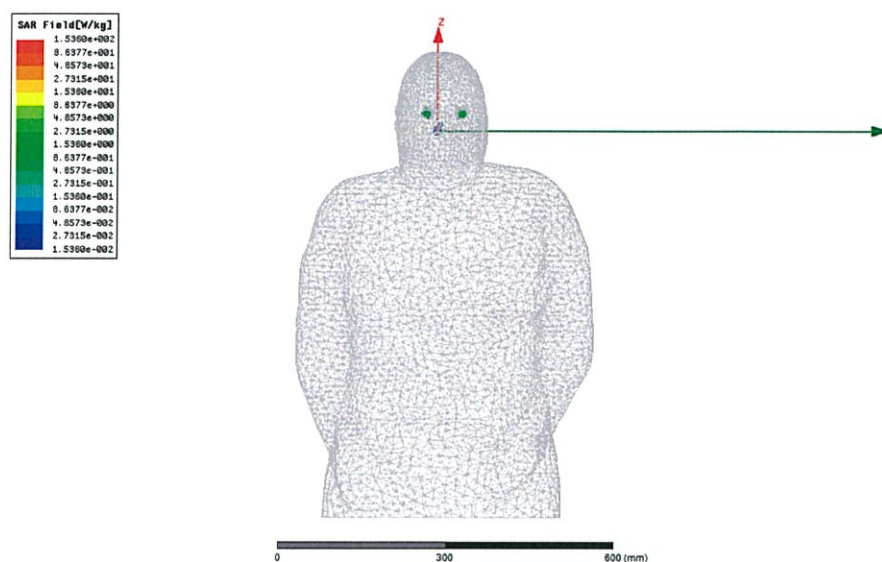


(ง) ด้านบน

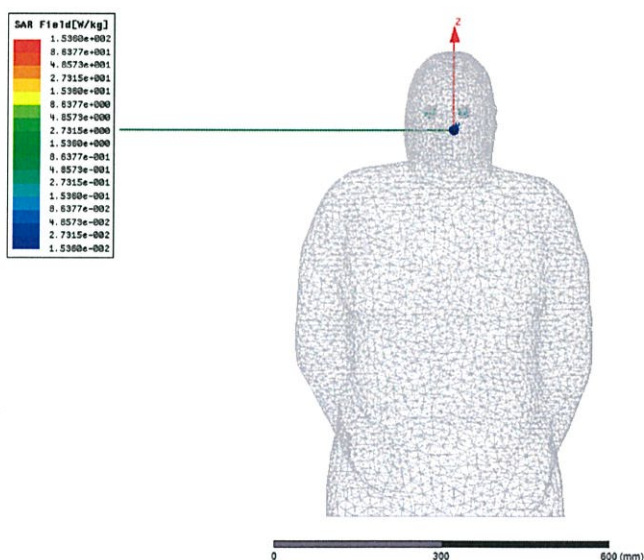
รูปที่ 4.13 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณสมองจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.13 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณสมองจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 4.87 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.4 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณดวงตาจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

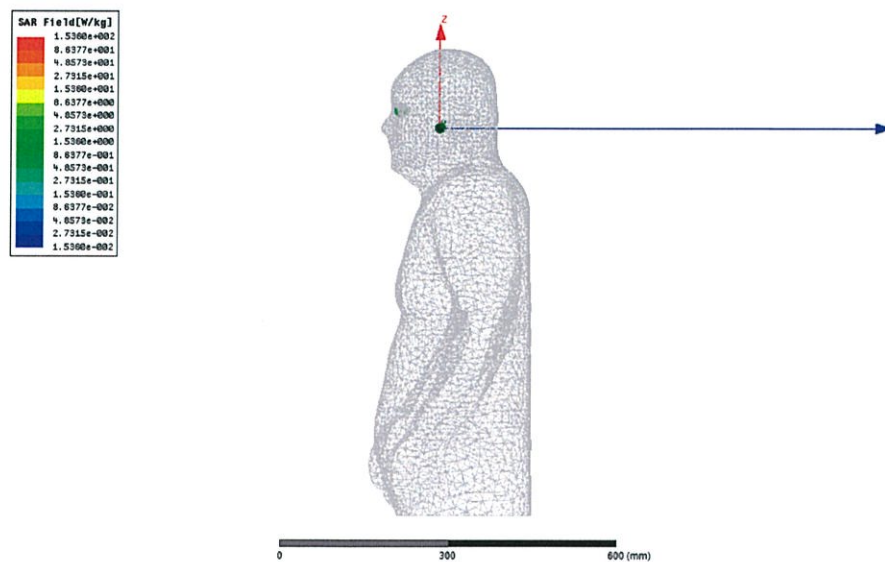


(ก) ด้านหน้า

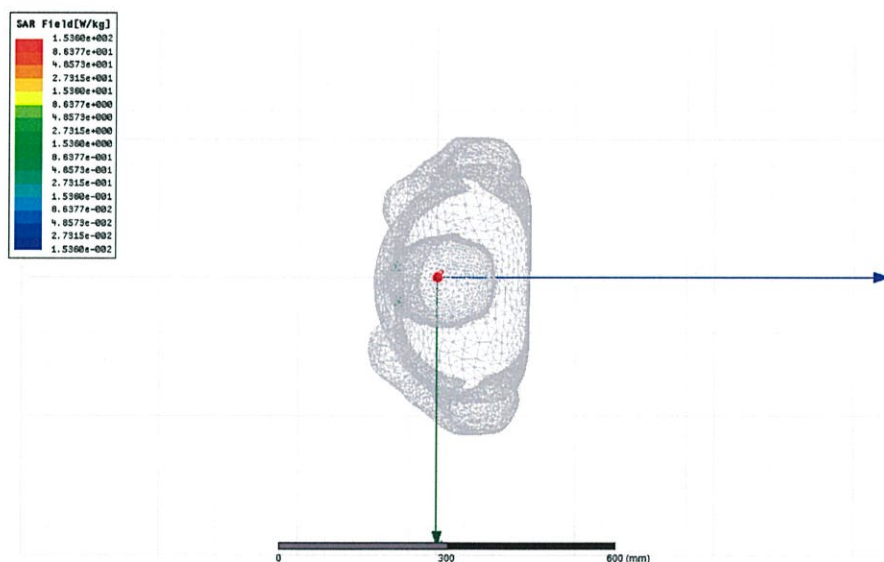


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.14 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณดวงตาจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

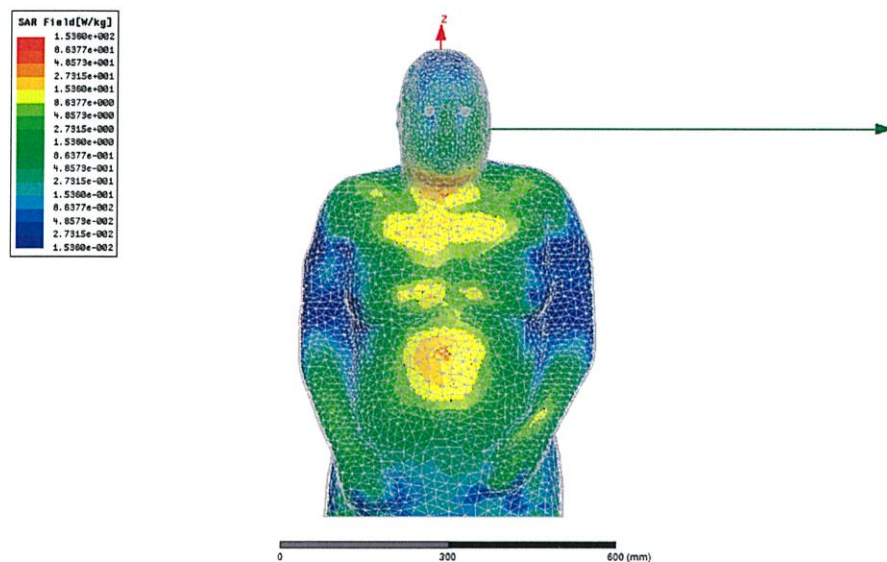


(ง) ด้านบน

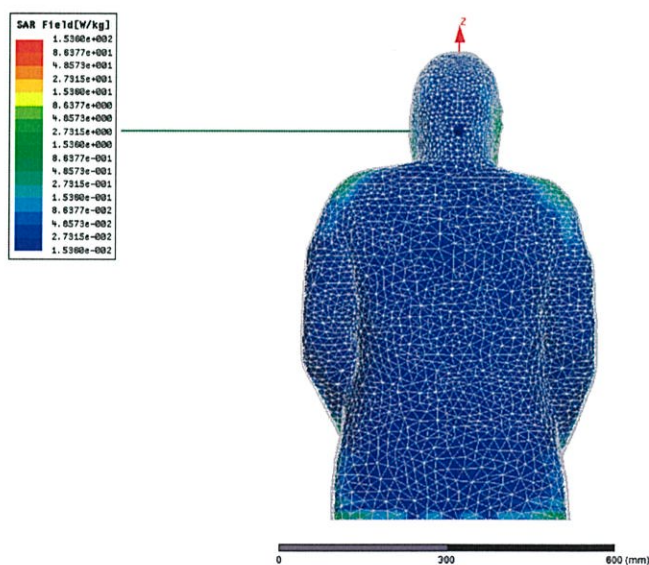
รูปที่ 4.14 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณดวงตาจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.14 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณดวงตาจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.27 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.5 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไขมันจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

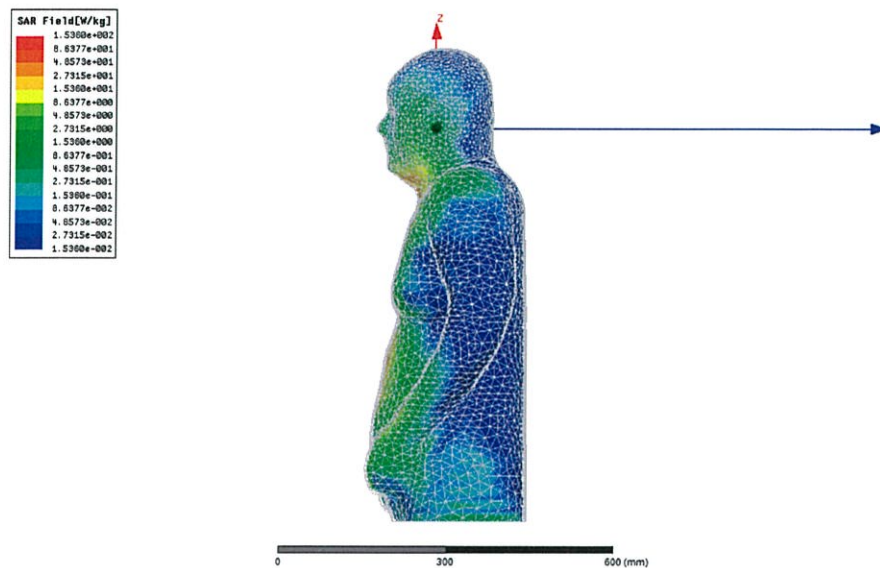


(ก) ด้านหน้า

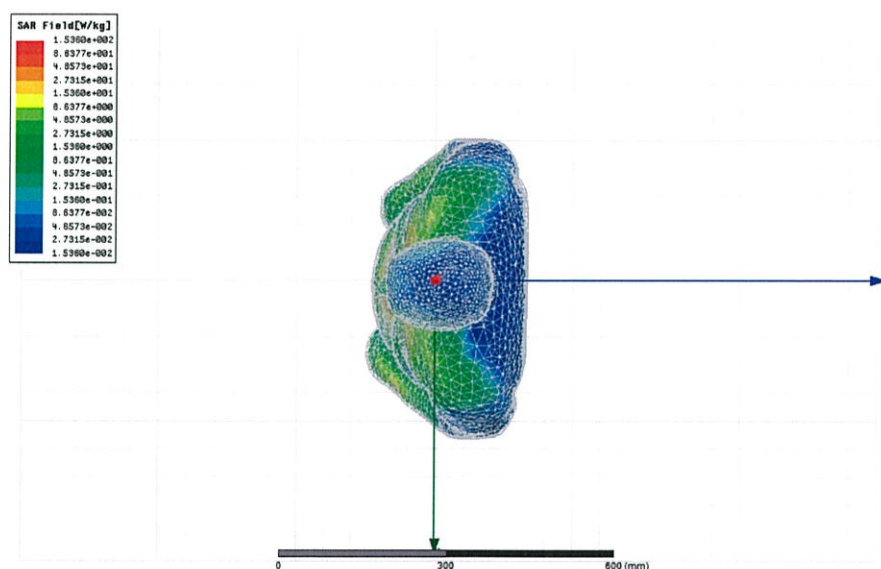


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.15 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไขมันจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

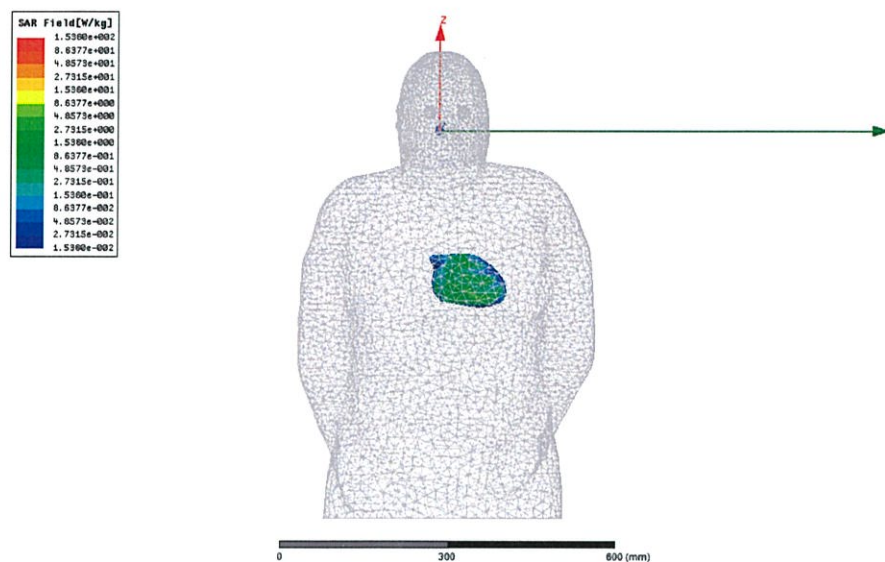


(ง) ด้านบน

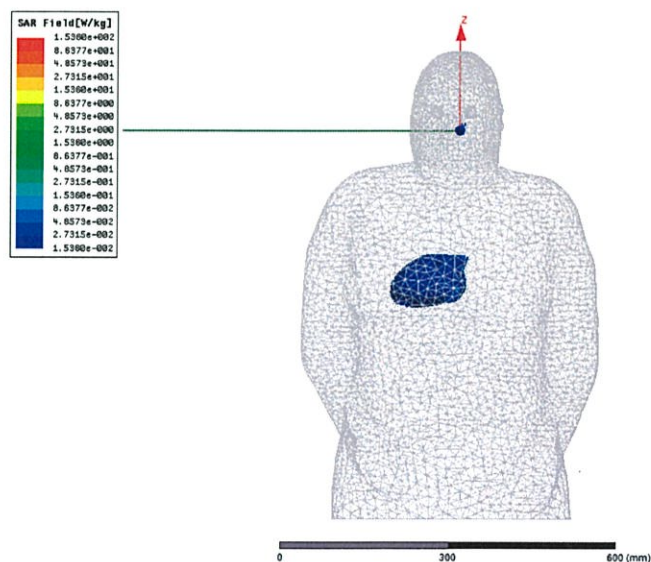
รูปที่ 4.15 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไขมันจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.15 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณสมองจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 15.36 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.6 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตรการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหัวใจจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

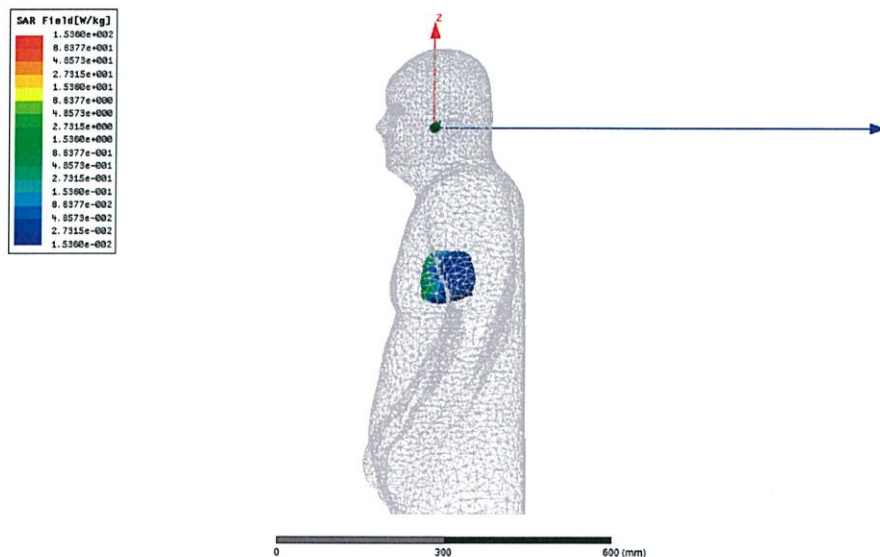


(ก) ด้านหน้า

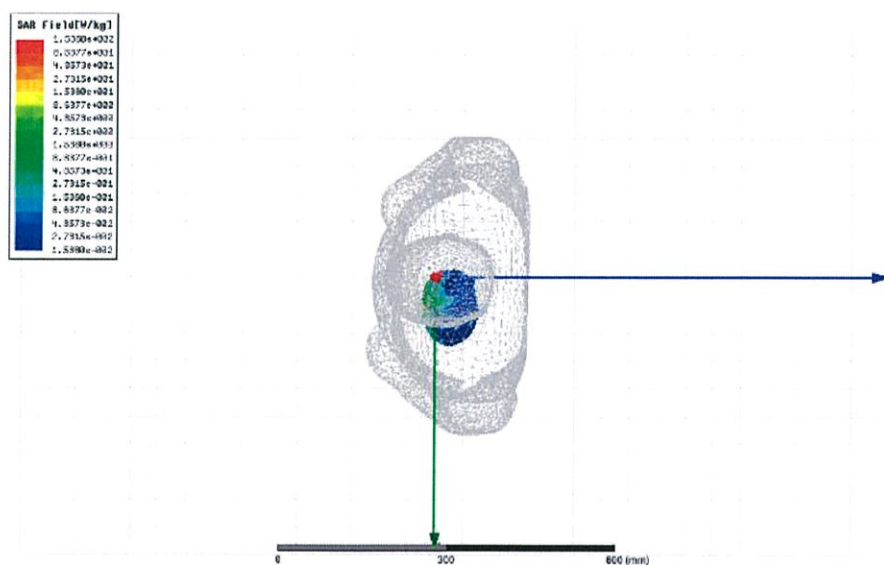


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.16 ผลอัตรการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหัวใจจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

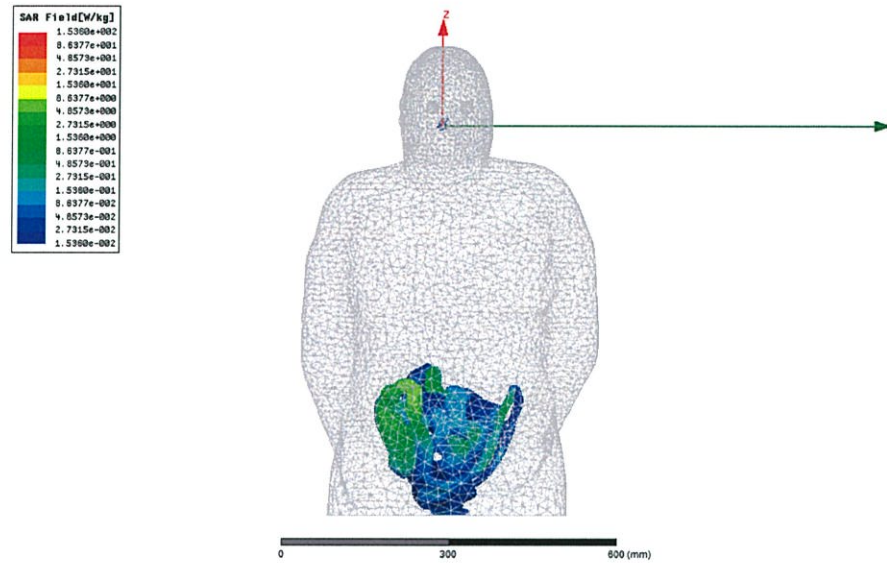


(ง) ด้านบน

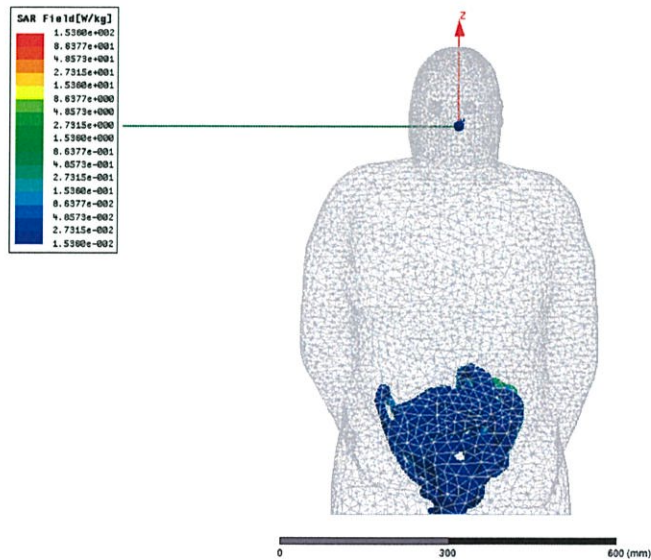
รูปที่ 4.16 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหัวใจจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.16 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณหัวใจจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 1.536 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.7 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณลำไส้จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

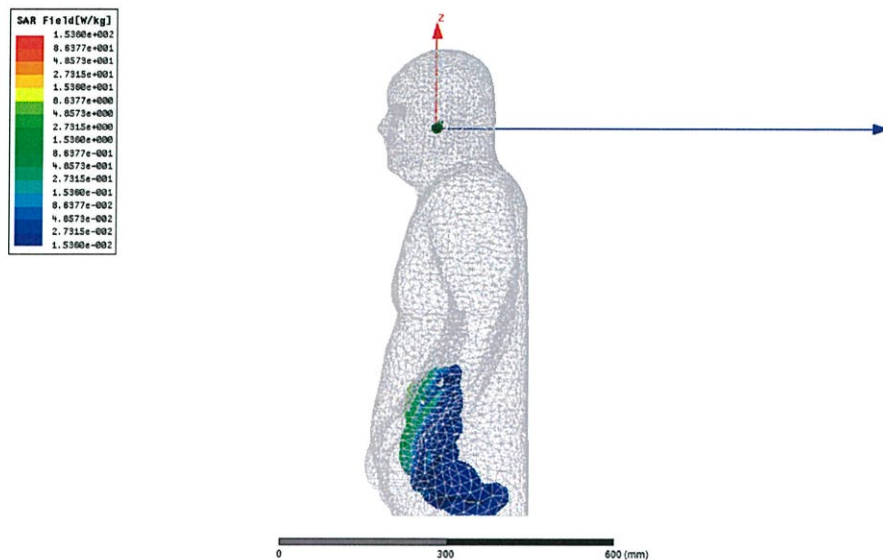


(ก) ด้านหน้า

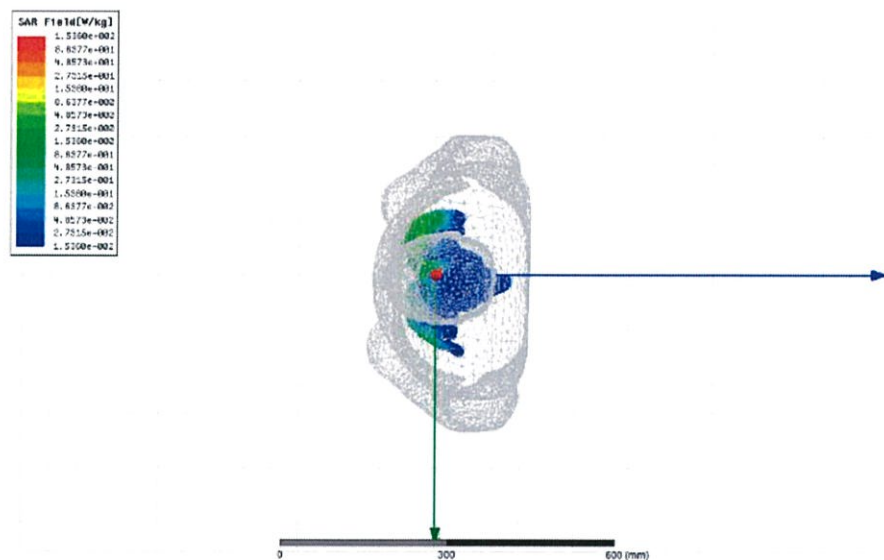


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.17 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณลำไส้จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์(ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

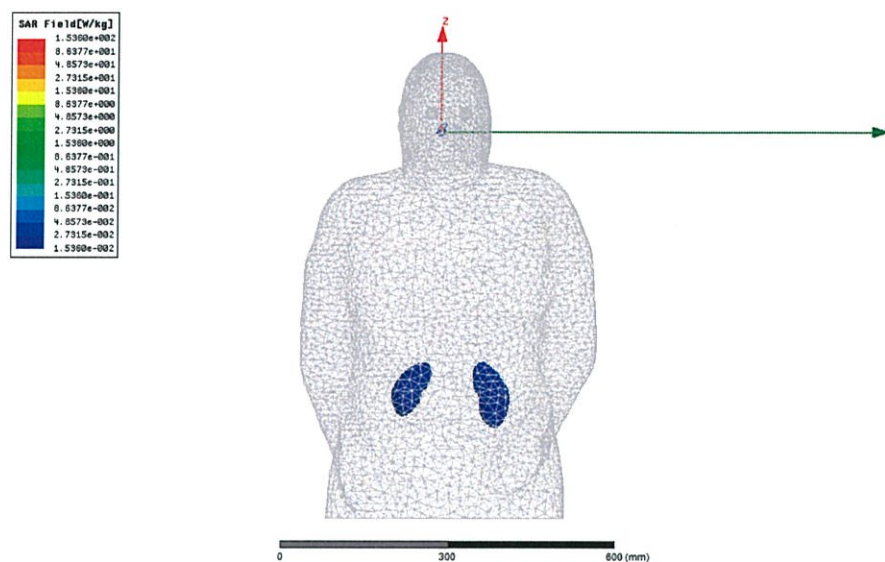


(ง) ด้านบน

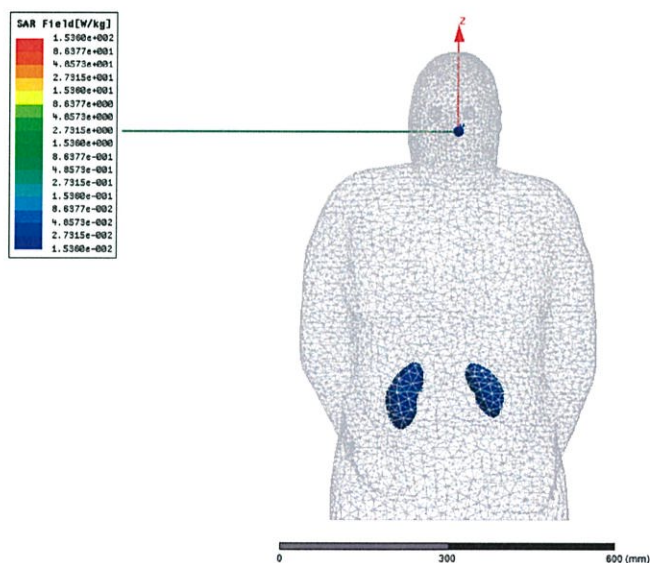
รูปที่ 4.17 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณลำไส้จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.17 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณลำไส้จากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 2.731 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.7 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไตจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

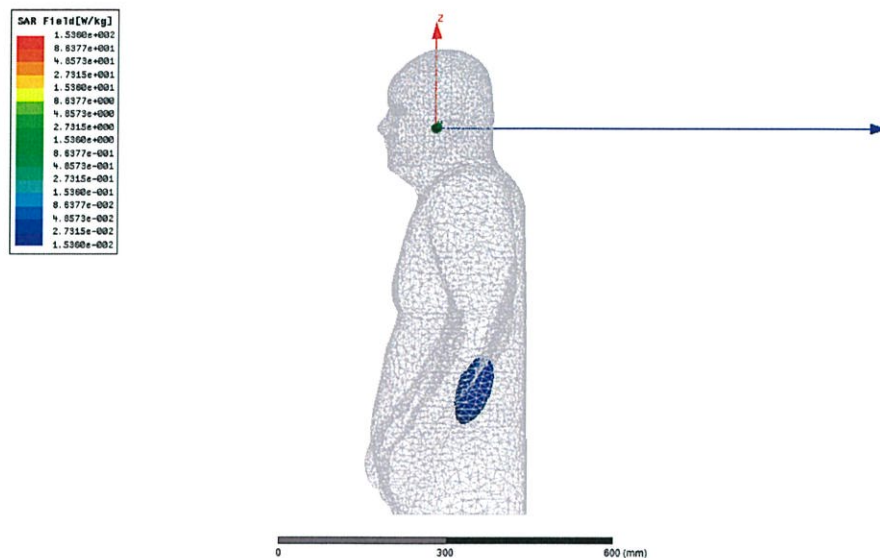


(ก) ด้านหน้า

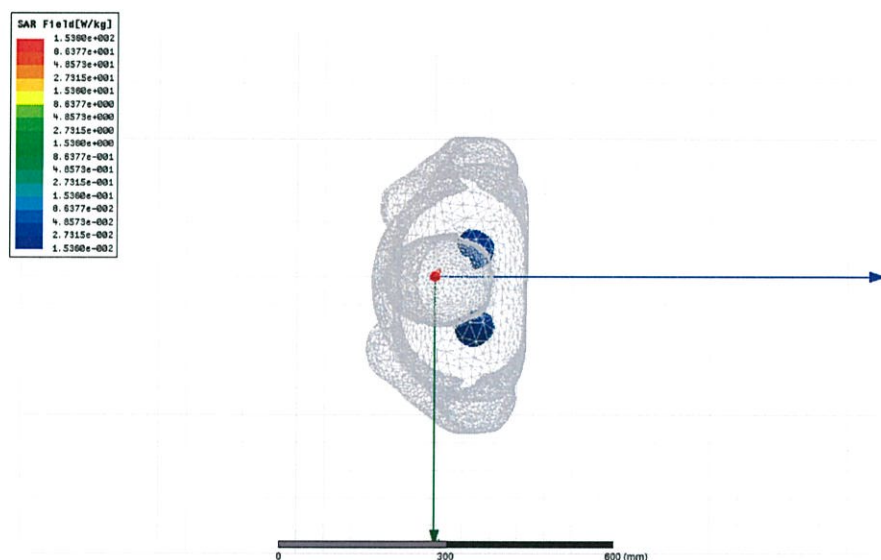


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.18 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไตจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ข) ด้านข้าง

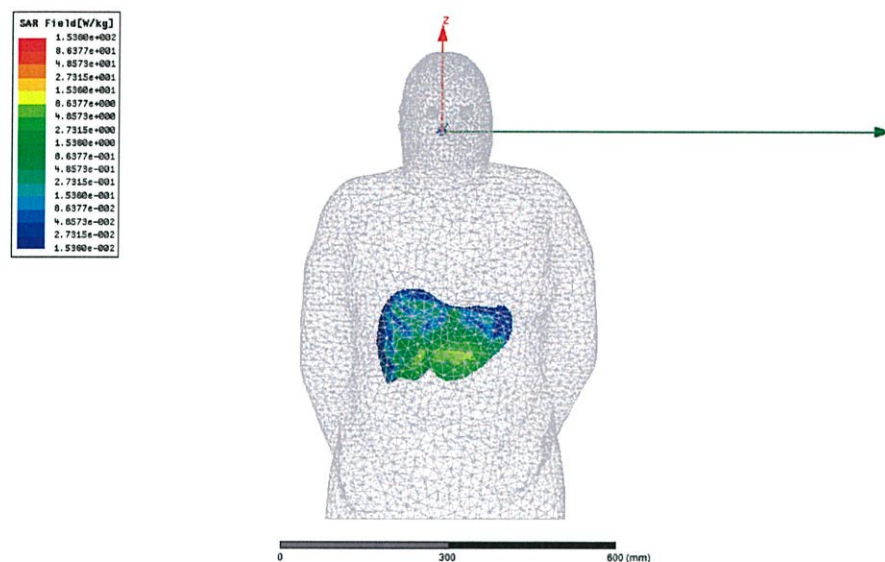


(ค) ด้านบน

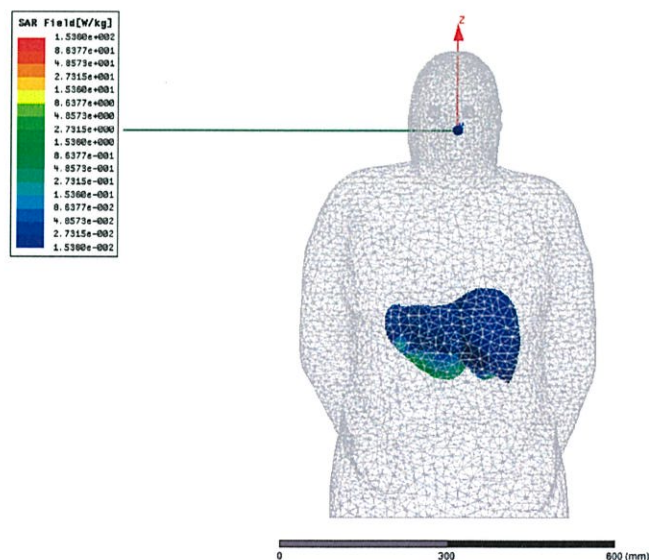
รูปที่ 4.18 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไตจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ง) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.18 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณไตจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.273 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.8 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณตับจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

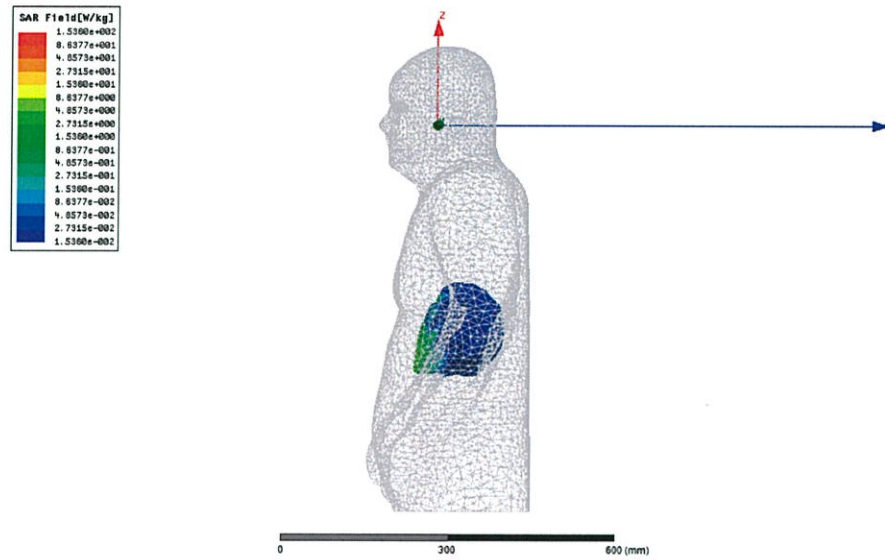


(ก) ด้านหน้า

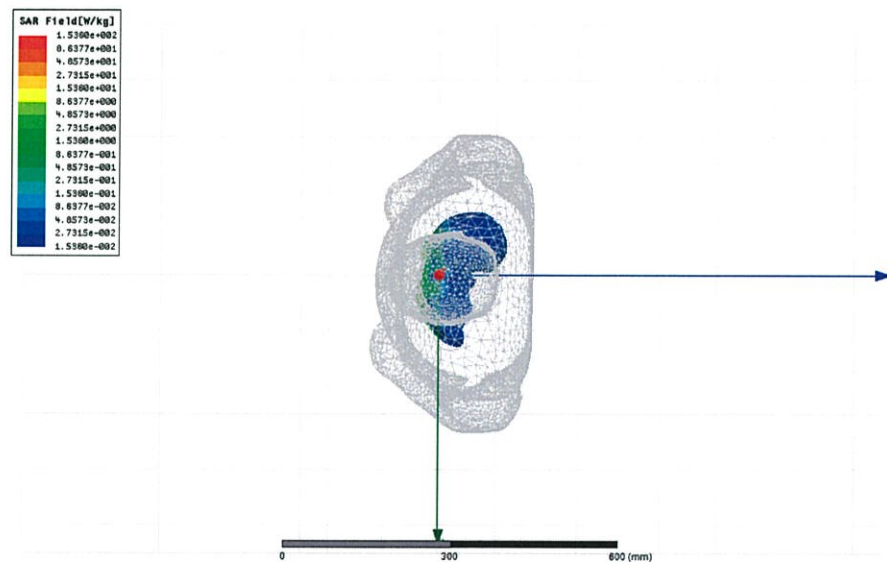


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.19 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณตับจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

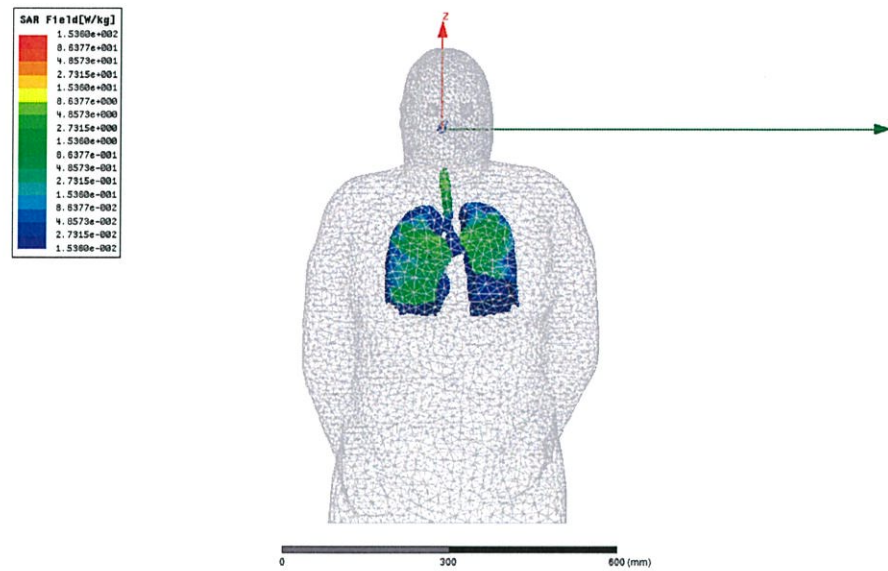


(ง) ด้านบน

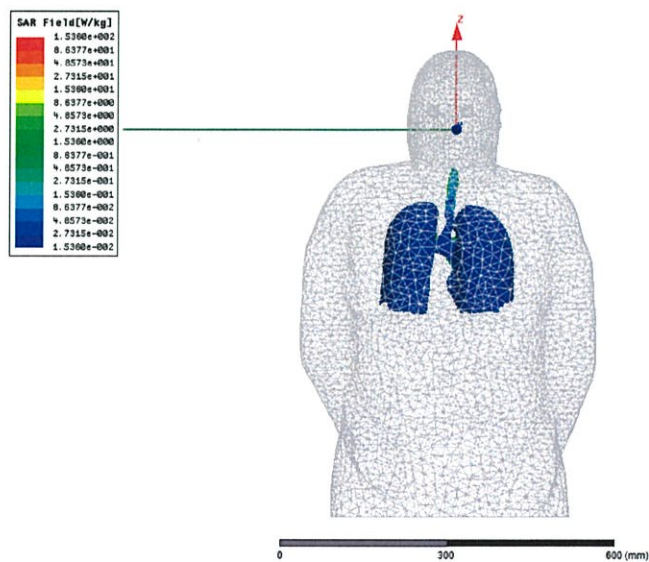
รูปที่ 4.19 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณตับจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.19 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณตับจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 8.63 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.9 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณปอดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

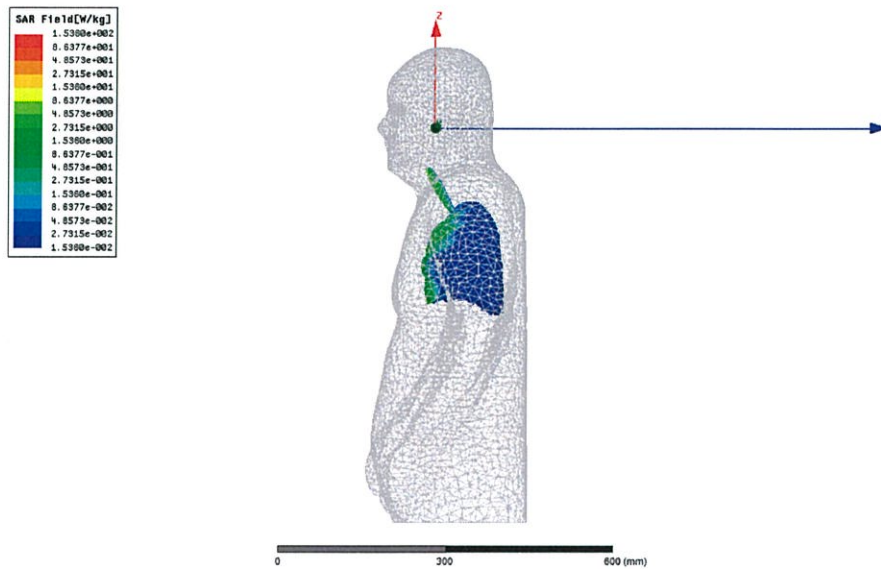


(ก) ด้านหน้า

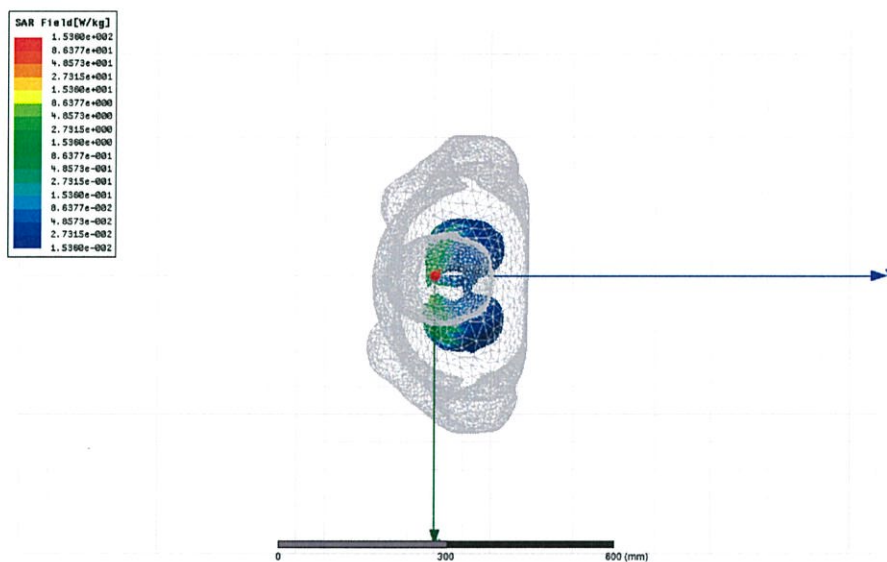


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.20 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณปอดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

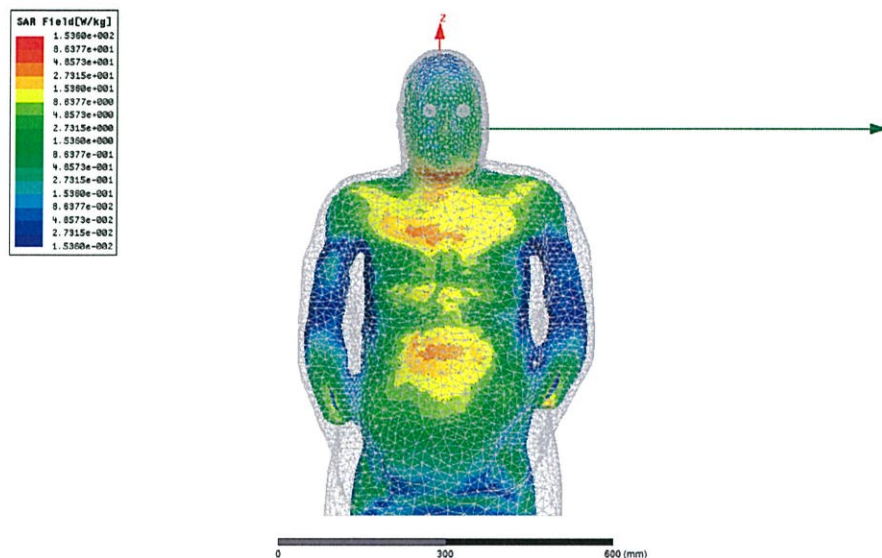


(ง) ด้านบน

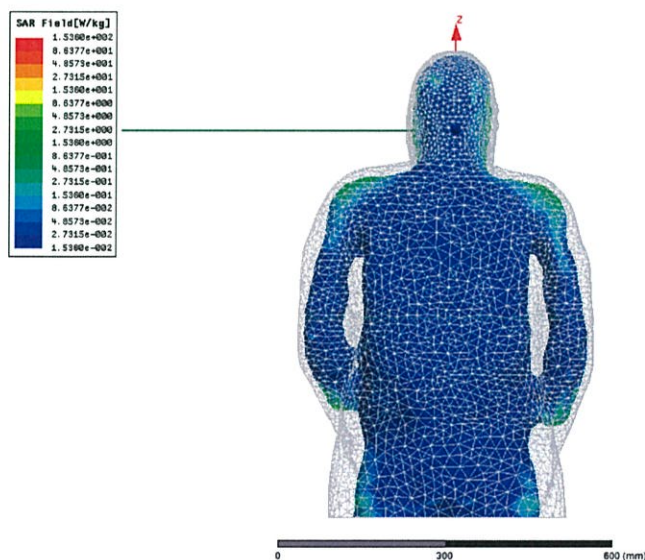
รูปที่ 4.20 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณปอดจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.20 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณตับจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 4.85 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.10 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการ อัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกล้ามเนื้อจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

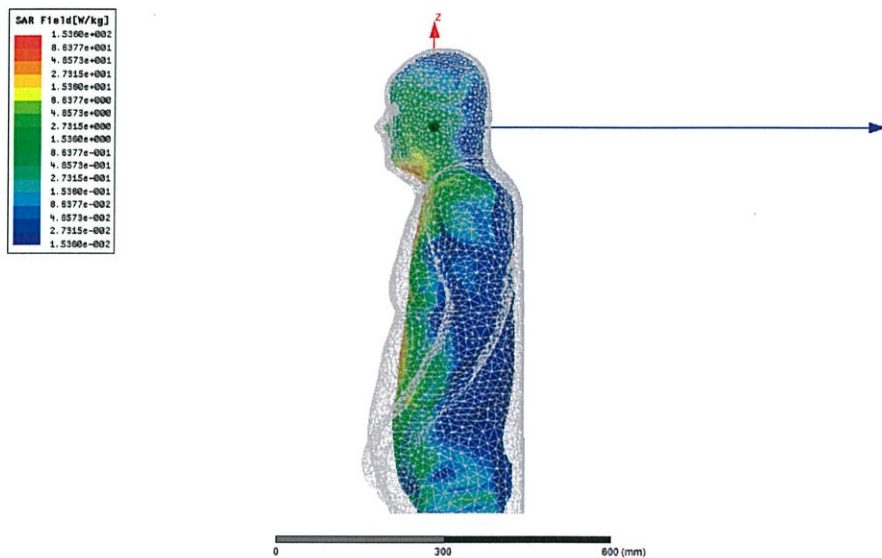


(ก) ด้านหน้า

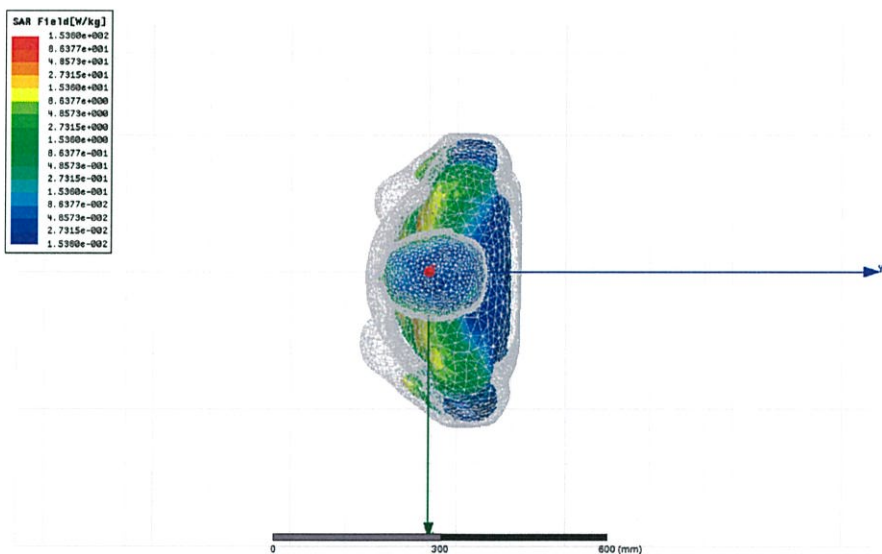


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.21 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกล้ามเนื้อจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

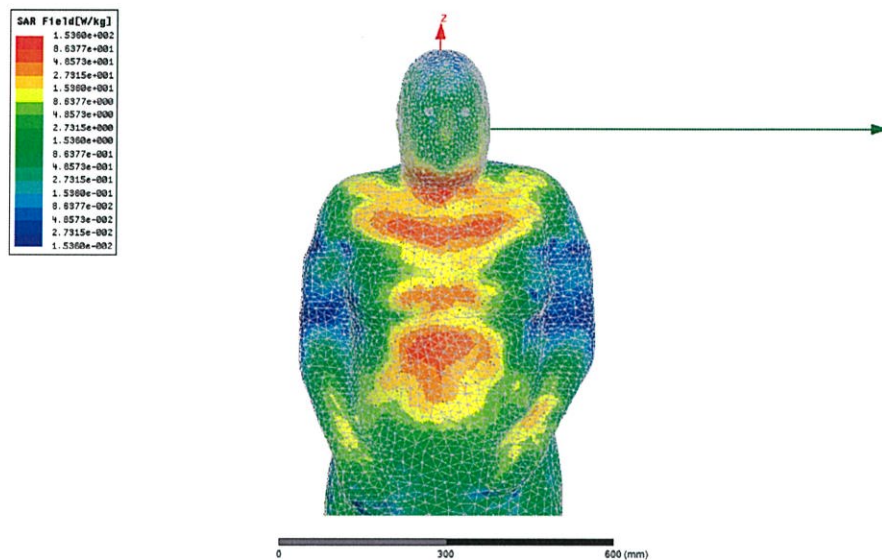


(ง) ด้านบน

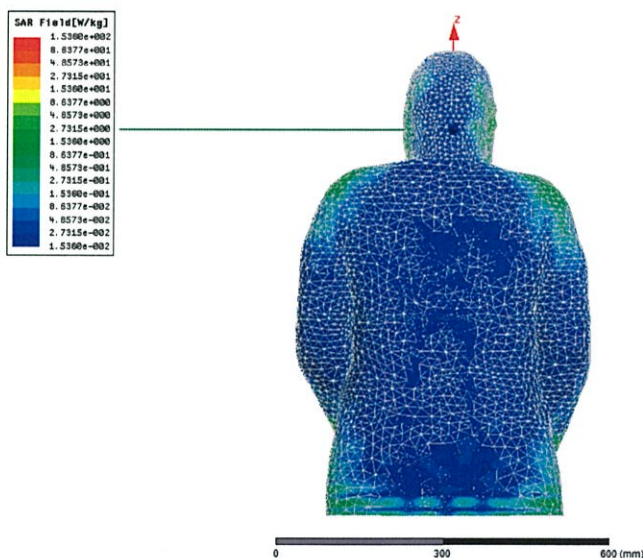
รูปที่ 4.21 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกล้ามเนื้อจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.21 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกล้ามเนื้อจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 48.57 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.11 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณผิวหนังจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

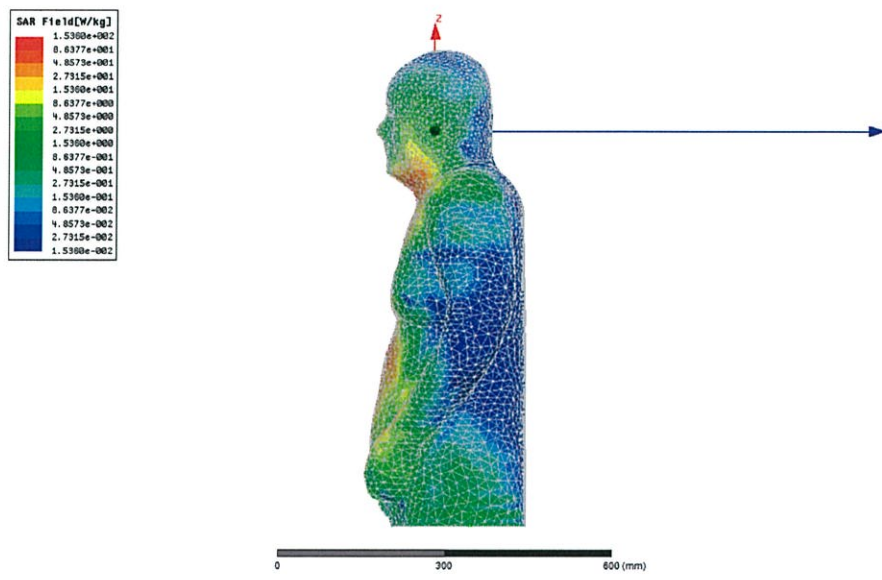


(ก) ด้านหน้า

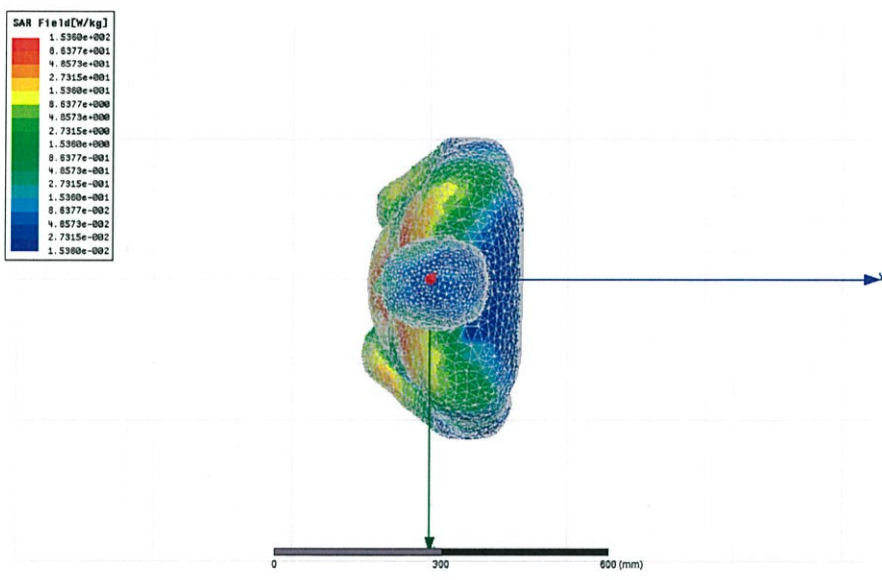


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.22 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณผิวหนังจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง

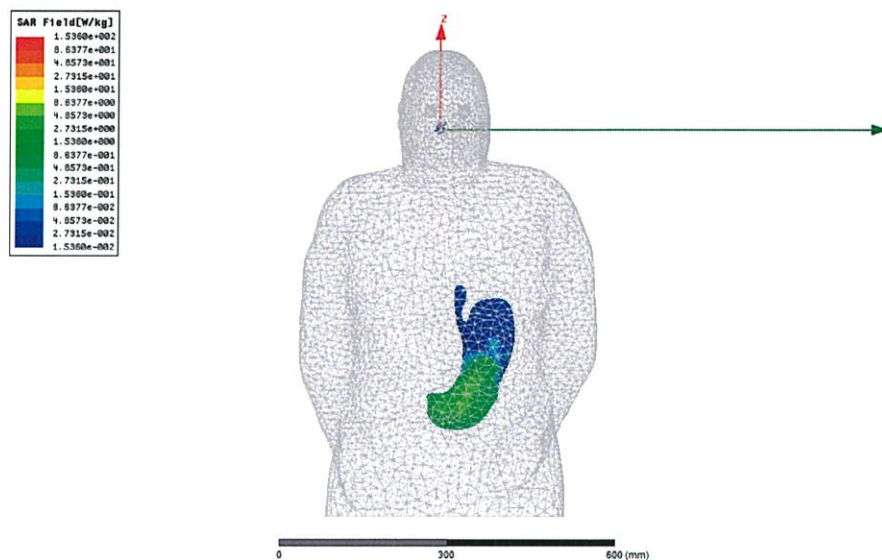


(ง) ด้านบน

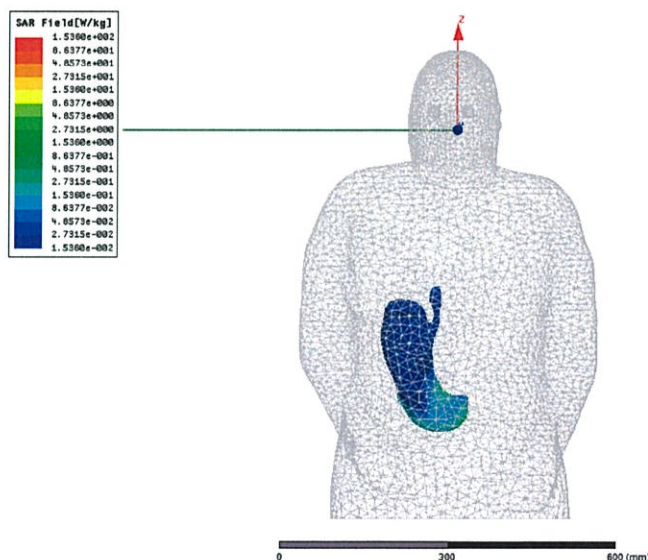
รูปที่ 4.22 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณผิวหนังจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

จากรูปที่ 4.22 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณผิวหนังจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 86.37 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

4.3.12 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการ ัฒนาการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระเพาะจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์

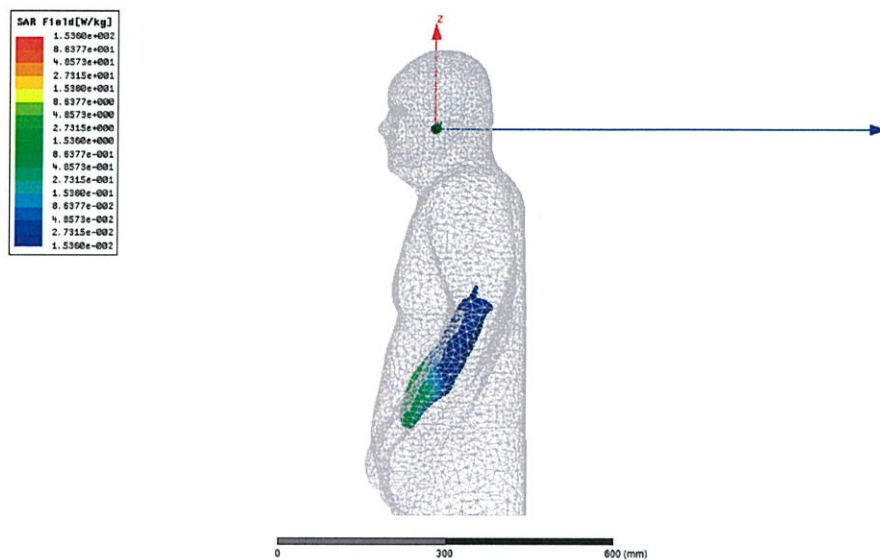


(ก) ด้านหน้า

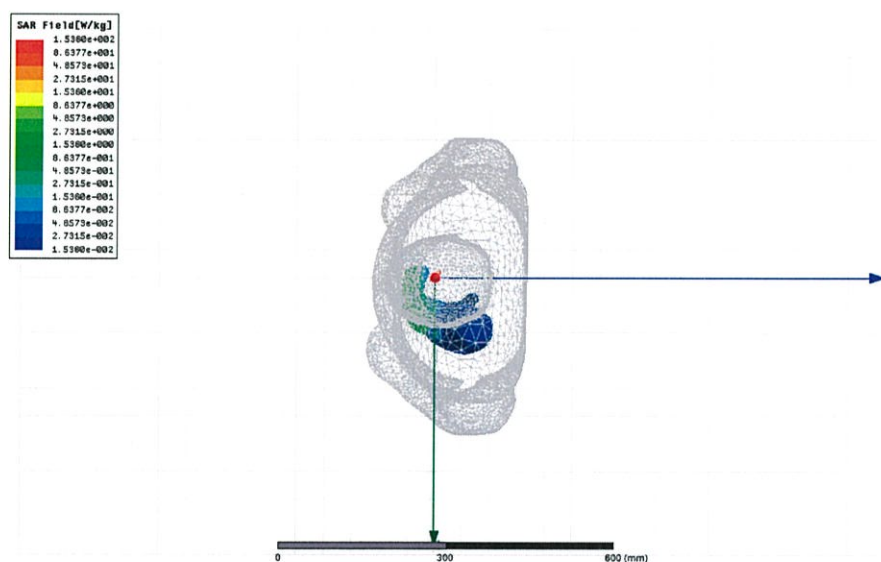


(ข) ด้านหลัง

รูปที่ 4.23 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระเพาะจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง



(ค) ด้านข้าง



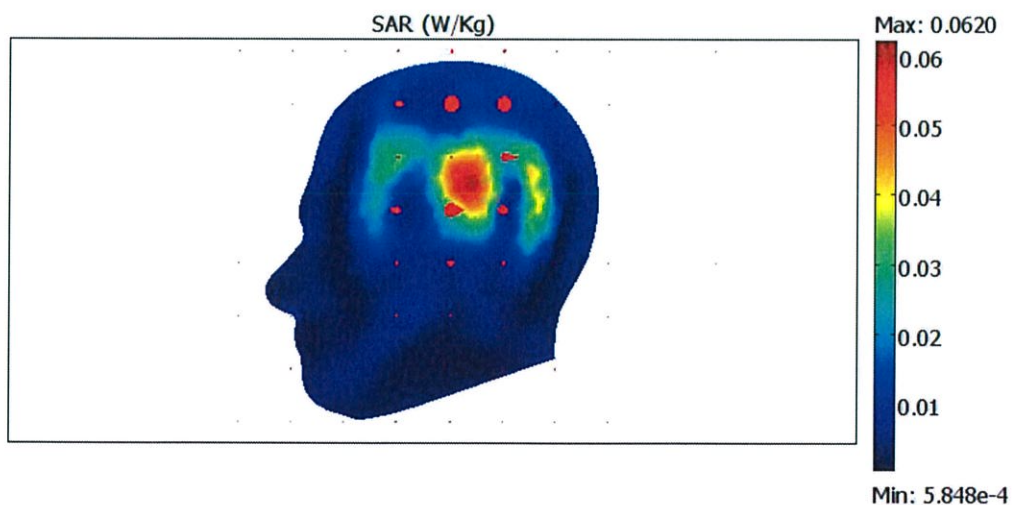
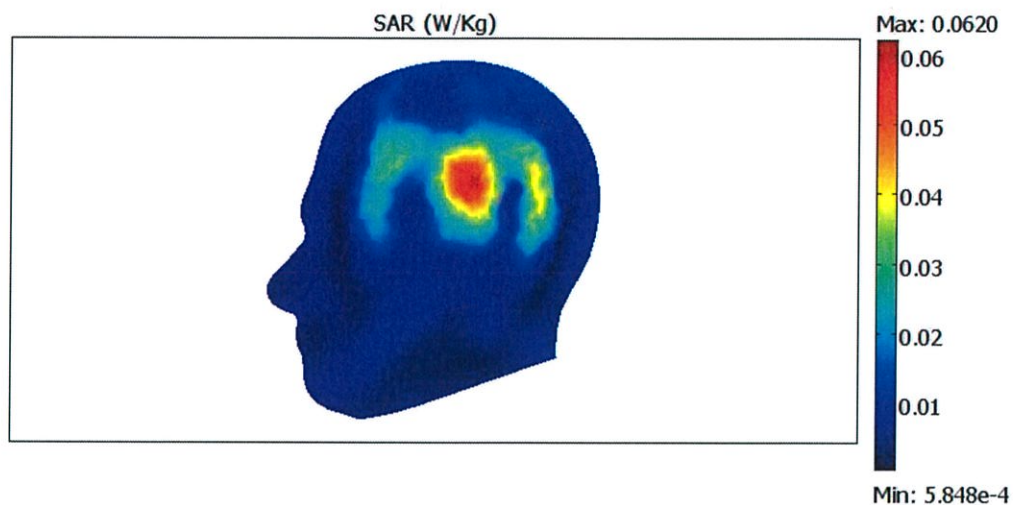
(ง) ด้านบน

รูปที่ 4.23 (ต่อ) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระเพาะจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านหลัง (ค) ด้านข้าง (ง) ด้านหลัง

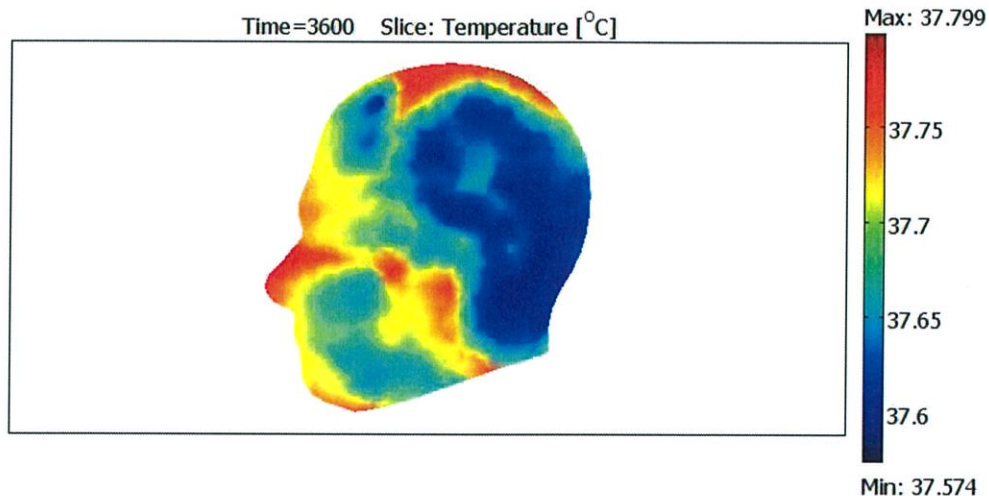
จากรูปที่ 4.23 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณกระเพาะจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรมที่กำลังงาน 1,000 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 1.537 W/kg และ ค่าต่ำสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.153 mW/kg

#### 4.4 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จากโทรศัพท์เคลื่อนที่

4.4.1 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 800-900 MHz กำลังส่ง 2 วัตต์



รูปที่ 4.24 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ และผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 800-900 MHz  
 (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่  
 (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ

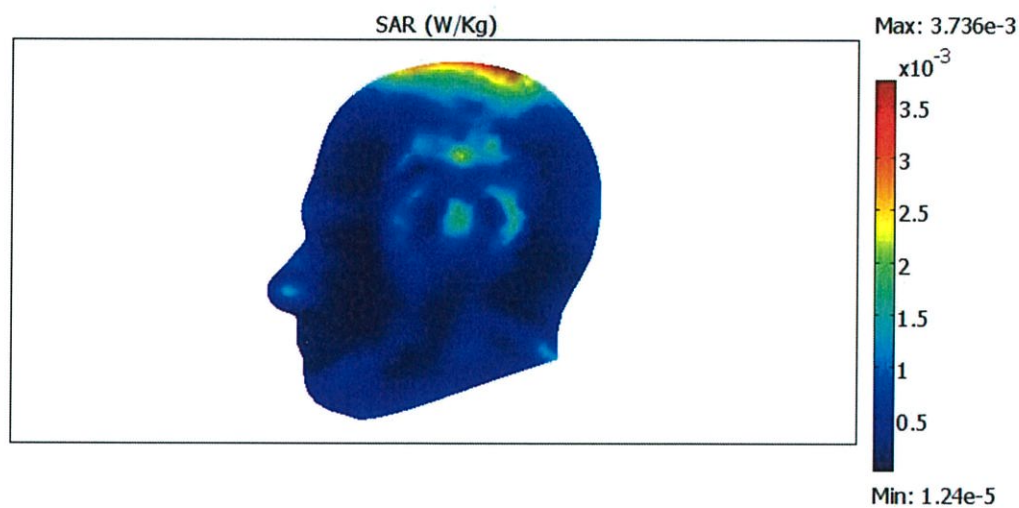


(ค)

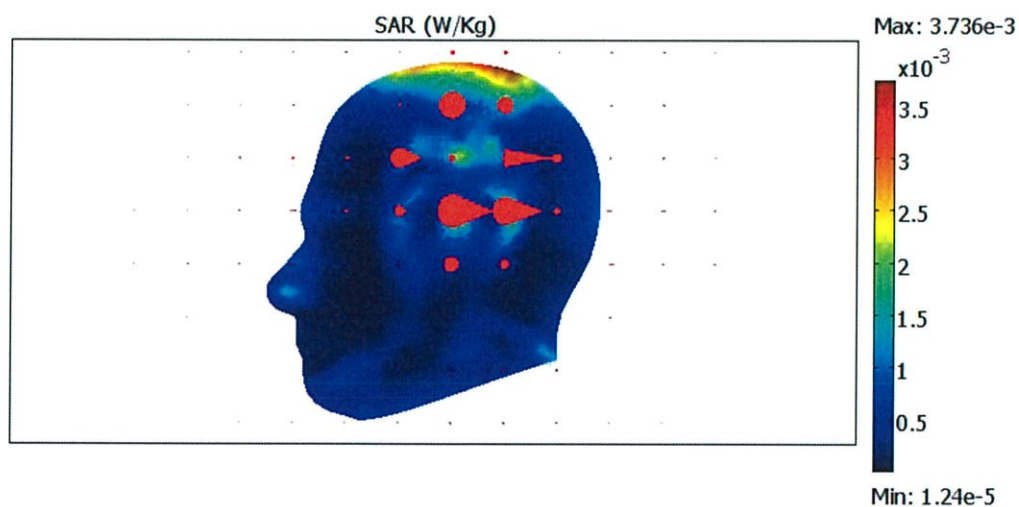
รูปที่ 4.24 (ต่อ) ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 800-900 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ

จากรูปที่ 4.24 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณศีรษะจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่กำลังงาน 2 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.0620 W/kg และ อุณหภูมิสูงสุดคือ 37.799 องศาเซลเซียส โดยตำแหน่งสูงสุดของค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณศีรษะจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความแรงสนามไฟฟ้า

4.4.2 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 1800-1900 MHz กำลังส่ง 2 วัตต์

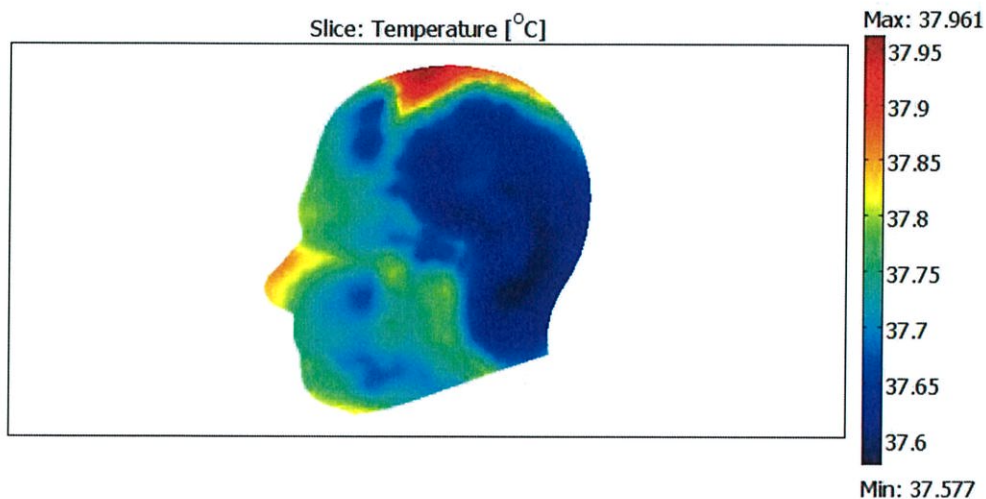


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.25 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 1800-1900 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ

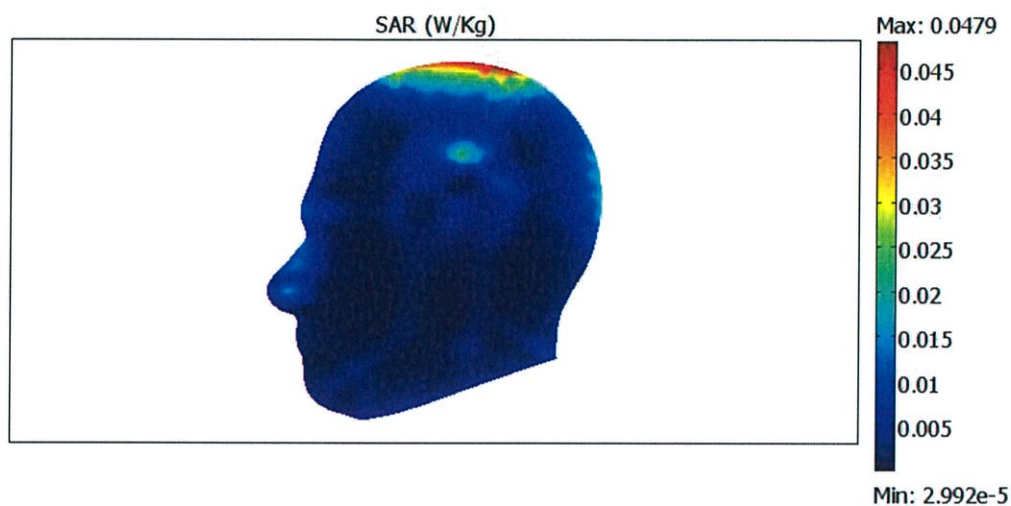


(ค)

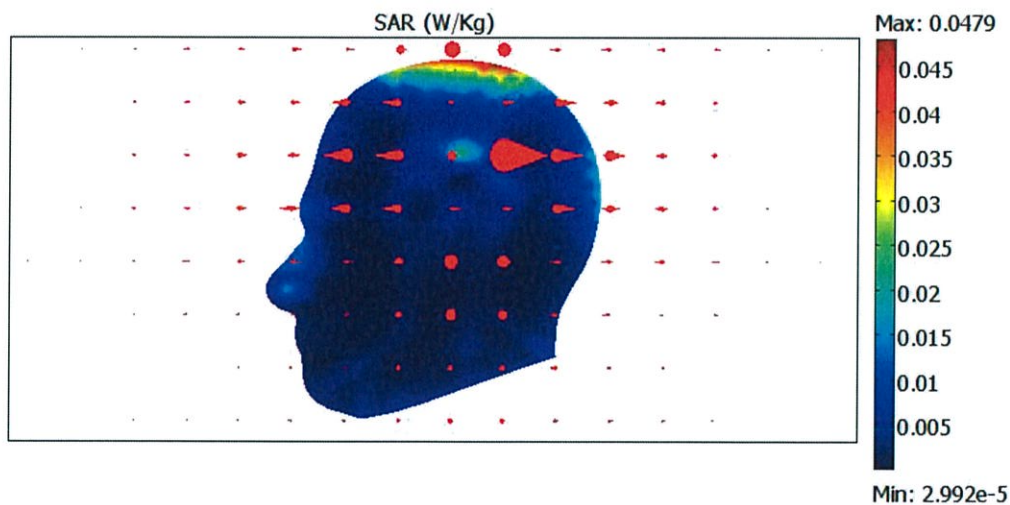
รูปที่ 4.25 (ต่อ) ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 1800-1900 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ

จากรูปที่ 4.25 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณศีรษะจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่กำลังงาน 2 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 37.36 mW/kg และ อุณหภูมิสูงสุดคือ 37.961 องศาเซลเซียส โดยตำแหน่งสูงสุดของค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณศีรษะจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความแรงสนามไฟฟ้า

4.4.3 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 2100 MHz กำลังส่ง 2 วัตต์

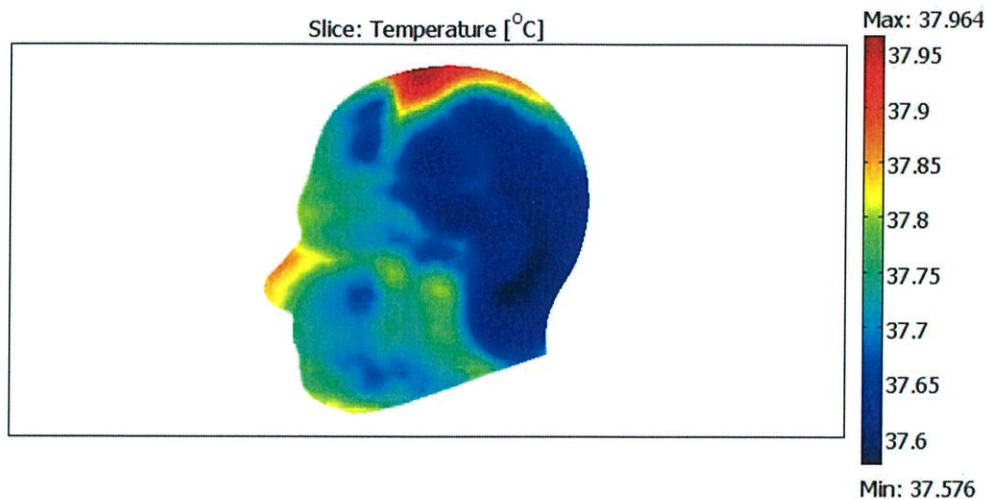


(ก)



(ข)

รูปที่ 4.26 ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ และผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 2100 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ



(ค)

รูปที่ 4.26 (ต่อ) ผลการจำลองโดยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์จำลองการอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะและผลทางความร้อนทางชีวภาพจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ย่านความถี่ 2100 MHz (ก) ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะ (ข) ผลของสนามไฟฟ้าจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ (ค) ผลทางความร้อนทางชีวภาพ

จากรูปที่ 4.26 ผลอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณศีรษะจากโทรศัพท์เคลื่อนที่ ที่กำลังงาน 2 วัตต์ พบว่า ค่าสูงสุดของอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะคือ 0.0479 W/kg และ อุณหภูมิสูงสุดคือ 37.964 องศาเซลเซียส โดยตำแหน่งสูงสุดของค่าอัตราการดูดซับพลังงานจำเพาะที่บริเวณศีรษะจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความแรงสนามไฟฟ้า

## บทที่ 5

### สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทางผู้วิจัยนำผลจากการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าเพื่อจำลองผลอัตราการดูดซับจำเพาะและความร้อนทางชีวภาพจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ เพื่อศึกษาผลกระทบจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับร่างกายมนุษย์บริเวณศีรษะ ผลจากการจำลองอัตราการดูดซับจำเพาะและความร้อนทางชีวภาพจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้ทางผู้วิจัยทราบว่าเมื่อความถี่ที่ต่างกันจะส่งอัตราการดูดซับจำเพาะและความร้อนทางชีวภาพที่บริเวณต่างกัน จากผลการสำรวจการวัดค่าความแรงสนามไฟฟ้าจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่พบว่าระยะห่างระหว่างสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่กับเครื่องวัดที่ระยะต่างๆ ค่าความแรงสนามไฟฟ้าไม่ได้ลดลงตามสัดส่วนตามระยะที่เพิ่มมากขึ้นจากสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากผลการจำลองการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่พบว่าค่าความร้อนทางชีวภาพจะสูงขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้งาน ส่วนค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของการทำงานโทรศัพท์เคลื่อนที่มีค่าต่างกัน เมื่อความถี่ที่ใช้งานของโทรศัพท์ต่างกัน เนื่องจากความค่าความนำไฟฟ้าในเนื้อเยื่อที่ความถี่ต่างๆ มีค่าแตกต่างกัน

จากผลการจำลองการรั่วของคลื่นแม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม ในย่านความถี่ 2.45 GHz ที่กำลังไฟฟ้า 1000 วัตต์ โดยกำหนดระยะห่างจากตำแหน่งการรั่วของคลื่นแม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าถึงผู้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ระยะ 20 เซนติเมตร จากงานวิจัยพบว่าที่ความถี่เดียวกัน อัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อวัยวะต่างๆ ในร่างกายมีผลที่แตกต่างกัน ซึ่งค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่อวัยวะที่มีส่วนประกอบที่เป็นน้ำและเนื้อเยื่อจะมีค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่อนข้างสูง

จากผลการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้นำมาเปรียบเทียบกับขีดจำกัดมาตรฐานการรับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่ทางองค์การอนามัยโลกกำหนดไว้เพื่อป้องกันผลกระทบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่อร่างกายทางด้านความร้อนทางชีวภาพ และเป็นการทดสอบว่าบริเวณที่ปกอาศัยใกล้กับสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่เกินเกณฑ์มาตรฐานที่องค์การอนามัยโลกกำหนดหรือไม่ และผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนที่ปกอาศัยใกล้กับสถานีฐานโทรศัพท์เคลื่อนที่ และมาตรฐานความปลอดภัยในการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ การวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ผลทางโทรศัพท์เคลื่อนที่ ทำให้ทราบว่าการทำงานโทรศัพท์เคลื่อนที่ต่อเนื่องเป็น

เวลานานๆ จะมีผลทำให้ความร้อนทางชีวภาพเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาในการใช้งานโทรศัพท์เคลื่อนที่ และการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์แบบ 3 มิติ ในการวิเคราะห์ผลการรั่วของคลื่นแม่เหล็กจากแหล่งกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานอุตสาหกรรม ที่ย่านความถี่สูงและกำลังสูง เมื่อเกิดการรั่วของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกิดขึ้น จะส่งผลให้ค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าสูงขึ้น ซึ่งบางอวัยวะในร่างกายมีค่าอัตราการดูดซับจำเพาะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเกินจากเกณฑ์มาตรฐานขององค์การอนามัยโลกกำหนด

## ภาคผนวก ก.

### ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

Wara Suwansin, Pattarapong Phasukkit, Chuchart Pintavirooj, Arthorn Sanpanich. "Analysis of Heat Transfer and Specific Absorption Rate of Electromagnetic Field in Human Body at 915 MHz and 2.45 GHz with 3D Finite Element Method" The 2012 Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON-2012), December 5-7, 2012, Ubon Ratchathani, Thailand.

# Analysis of Heat Transfer and Specific Absorption Rate of Electromagnetic Field in Human Body at 915 MHz and 2.45 GHz with 3D Finite Element Method

W. Suwansin<sup>1</sup>, P. Phasukkit<sup>1\*</sup>, C. Pintavirooj<sup>1</sup> and A. Sanpanich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, THAILAND.

<sup>2</sup>Institute of Molecular Biosciences, Mahidol University, Nakhon Pathom, THAILAND.

\*kppattar@kmitl.ac.th

**Abstract**—This paper presents 3D finite element analysis for heat transfer and specific absorption rate of electromagnetic field in human body at 915 MHz and 2.45 GHz. The purpose of this research is to study the effects and harmfulness of leakage electromagnetic field to organ in living tissue. We propose a simulation of microwave radiation by using a finite element method (FEM) to our system for studying heat transfer and specific absorption rate of electromagnetic field in multi-organs living tissue. Electromagnetic wave distribution source in our system was designed as a microstrip type and placed at 5 cm from multi-organs living tissue model. As a preliminary, leakage power was assumed at 100 W and exposure time was 1800 s. The result from finite element method show distribution of electromagnetic field in 3D air space of multi-organs tissue model, specific absorption rate (SAR) and temperature. The SAR value will be followed the standard of ICNIRP (1998) and the results at 915 MHz and 2.45 GHz shown that maximum temperature in organs are different if frequencies different, in 3D model can be obtained every point of view and benefit for development protection system in near future.

**Keywords**—Finite Element Analysis, Electromagnetic Field, SAR, Heat transfer, Human Body, Microwave Hazard

## I. INTRODUCTION

In present, we use microwave popularly for a benefit of life and including industrial and medical application in which sometime are harmful from an effect of electromagnetic field leakage. If an organ in human body receive an electromagnetic field over a safety level for a long time. Cell and organ will be affected from generated heat and energy absorption and generated heat. If human body cannot reduce this heat level to a normal condition, many organ systems in human body will injure and damage such as cataract, bone system. There are some researches for study effects of electromagnetic field to the organ system in human body. According to a standard of ICNIRP (1998) [1] and World Health Organization (WHO) recommendation, the guidelines for worker advise that SAR should not exceed 10 W/kg.

In the past, an experimental data on a correlation of SAR levels to a temperature increasing in human body are sparsely. There is a research on SAR distribution of three-layer human body, which simulates three-layer physical models of skin, fat and muscle tissues [2]. There are limited data available on thermal properties and dielectric properties of human tissues, as very few epidemiological studies have been conducted. There are some experimental studies in animals such as rat [3], and cow [4]. However, the results may not represent the practical behavior of human tissues. Most previous studies of human body exposed to an electromagnetic field did not consider a heat transfer, resulting in an incomplete analysis.

In this research, we present a simulation of microwave radiation in a simple phantom model of multi-organs living tissue by using a full 3D finite element method (FEM). The wave propagation was supposed to radiated from a common patched structural antenna while 915 MHz and 2.45 GHz was selected as a radiation microwave frequency. The simulation output not only shows a promising result of SAR, temperature and electric field in 3D space distribution through the multi-organs living tissue model but also guide us to validate these results with our experimental protection system in near future

## II. MODELLING OF MULTI-ORGANS LIVING TISSUE

The human body model with wave distribution source is shown in Fig.1. The simulation diagram of multi-organs living tissue was consisting of ten planar layers of tissues with different dielectric properties, skin, fat, muscles, bone, large intestine, small intestine, bladder, blood, stomach and liver as shown in Fig. 2. It is assumed that a wave distribution source in Fig.3 is plane wave with frequency 915 MHz and 2.45 GHz. And the interface distance between the air and the multi-organs living tissue is 5 cm.

The dimension of wave distribution source is shown in Table I and the dimension of multi-organs living tissue is shown in Table II. For physical parameter of dielectric properties of tissue for FEM simulation is shown in Table III.



Figure 1. Human model with wave distribution source.

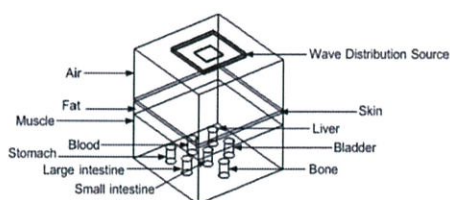


Figure 2. Multi-organs living tissue modeling.

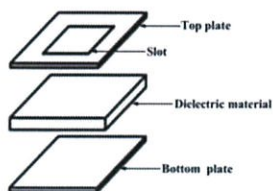


Figure 3. Wave distribution source.

TABLE I. DIMENSION OF WAVE DISTRIBUTION SOURCE

| Dimensions                      | Size WxHxL (mm.) |
|---------------------------------|------------------|
| Diameter of Top plate           | 50 x 50 x 1      |
| Diameter of Slot                | 20 x 20 x 1      |
| Diameter of Dielectric material | 50 x 50 x 2      |
| Diameter of Bottom plate        | 50 x 50 x 1      |

TABLE II. DIMENSION OF MULTI-ORGANS LIVING TISSUE MODELING

| Dimensions                  | Size W x H x L (mm.) |
|-----------------------------|----------------------|
| Diameter of Air             | 100 x 100 x 50       |
| Diameter of Skin            | 100 x 100 x 3        |
| Diameter of Fat             | 100 x 100 x 12.5     |
| Diameter of Muscle          | 100 x 100 x 44       |
| Dimensions                  | Size Dia. x H (mm.)  |
| Diameter of Stomach         | 10 x 14              |
| Diameter of Blood           | 10 x 14              |
| Diameter of Liver           | 10 x 14              |
| Diameter of Large intestine | 10 x 14              |
| Diameter of Small intestine | 10 x 14              |
| Diameter of Bladder         | 10 x 14              |
| Diameter of Bone            | 10 x 14              |

TABLE III. PHYSICAL PARAMETER OF DIELECTRIC PROPERTIES OF TISSUE FOR FEM SIMULATION\*

| Tissue          | Frequency 915 MHz |              | Frequency 2450 MHz |              |
|-----------------|-------------------|--------------|--------------------|--------------|
|                 | $\sigma$ (S/m)    | $\epsilon_r$ | $\sigma$ (S/m)     | $\epsilon_r$ |
| Skin            | 0.92              | 44.86        | 2.16               | 41.79        |
| Fat             | 0.09              | 5.97         | 0.13               | 5.51         |
| Muscle          | 1.33              | 50.44        | 1.60               | 46.40        |
| Bone            | 2.10              | 44.80        | 2.10               | 44.80        |
| Large intestine | 2.04              | 53.90        | 2.04               | 53.90        |
| Small intestine | 3.17              | 54.40        | 3.17               | 54.40        |
| Bladder         | 0.69              | 18.00        | 0.69               | 18.00        |
| Blood           | 2.54              | 58.30        | 2.54               | 58.30        |
| Stomach         | 2.21              | 62.20        | 2.21               | 62.20        |
| Liver           | 1.69              | 43.00        | 1.69               | 43.00        |

\*<http://www.niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>.

### III. IMPLEMENTATION OF FINITE ELEMENT ANALYSIS

The finite element method (FEM) involves dividing a complex geometry into small elements for a system of partial differential equation then evaluate at node or edges. In this study, two governing equations as bioheat equation and SAR distribution equation were carefully concerned due to a natural phenomenon of electromagnetic wave in tissue of human body.

#### A. Bioheat Equation

Analysis of heat generated in soft tissue due to an electromagnetic wave was employed by using a general bioheat equation as in (1). Solution obtains from this equation indicate a thermal distribution in soft palate tissue.

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(-k \nabla T) + \rho_b C_b \omega_b (T_b - T) + Q_{met} + Q_{ext} \quad (1)$$

Where

|            |   |   |
|------------|---|---|
| $\rho$     | = | Density of tissue [ $kg/m^3$ ]                          |
| $C$        | = | Specific heat of tissue [ $J/kg.K$ ]                    |
| $k$        | = | Thermal conductivity of tissue [ $W/m.K$ ]              |
| $\rho_b$   | = | Density of blood [ $kg/m^3$ ]                           |
| $c_b$      | = | Specific heat of the blood [ $J/kg.K$ ]                 |
| $\omega_b$ | = | Perfusion of blood [ $l/s$ ]                            |
| $T_b$      | = | Temperature of the blood [ $^{\circ}C$ ]                |
| $Q_{met}$  | = | Energy generated by the metabolic processes [ $W/m^3$ ] |

Since  $Q_{met}$  is negligible, we included it from our FE models.

#### B. SAR Distribution

In general, an energy which absorbs by living tissue when human body is exposed by electromagnetic field at radio frequency range can be measured in term of a specific absorption rate (SAR). This value indicates an absorption power per mass of living tissue or in watts per kilogram ( $W/kg$ ). SAR distribution is widely used in order to indicate a heating ability of microwave port (915 MHz, 2.45 GHz). Heat generated by an electric field in living tissue can be shown as SAR as in (2)

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

Where

|          |   |                                  |
|----------|---|----------------------------------|
| $\sigma$ | = | Conductivity of tissue [ $S/m$ ] |
| $\rho$   | = | Density of tissue [ $kg/m^3$ ]   |
| $E$      | = | Electric field [ $V/m$ ].        |

In this study, heat generated by port as SAR can be applied as an external heat source in bioheat consideration derived as shown in (3), a heat equation

$$Q_{ext} = \rho \cdot SAR \quad (3)$$

#### C. FEM Analysis

In this research, we use COMSOL Multi-physics (version 3.5a) solver to implement FEM analysis. Simulation module was selected on RF module with a harmonic propagation and also heat transfer module of living tissue. Microwave frequency was used at 915 MHz and 2.45 GHz according to an

industrial, scientific and medical (ISM) radio bands criteria [5]. The simulation was truly performed in full 3D tissue space on Intel Core-i7 2.5 GHz Notebook computer and 8 GB RAM.

#### IV. SIMULATION RESULTS

In this simulation, a number of meshing elements was compromisingly refined at 195,875 elements in tetrahedral shape with 1,288,074 degree of freedoms while the solution time is consumed about 3,316 seconds. Figure 4 show the meshing of our simulation model. After 915 MHz excited at 100 Watts was emitted for 1800 seconds excited time. And a number of meshing elements was compromisingly refined at 195,875 elements in tetrahedral shape with 1,288,074 degree of freedoms while the solution time is consumed about 3,316 seconds. After 2.45 GHz excited at 100 watts was emitted for 1800 seconds excited time, post-processing of full 3D space model was analyzed and synthesized for an interested result. Simulation results of this study are shown in Fig. 5 to 7.

Figure 5, 6 and 7 show a distribution pattern of specific absorption rate (SAR), temperature and electric field in the living tissue virtual model at 915 MHz and 2450 MHz.

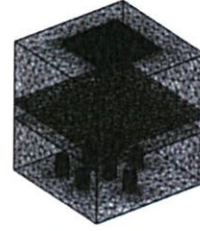
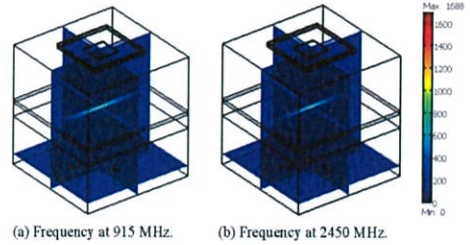


Figure 4. Meshing refinement.



(a) Frequency at 915 MHz. (b) Frequency at 2450 MHz.

Figure 5. SAR distribution pattern.

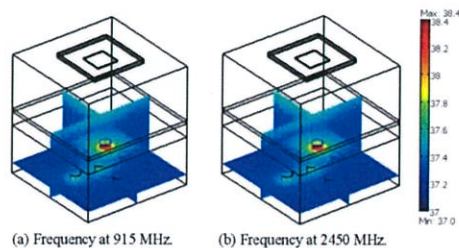


Figure 6. Temperature distribution pattern.

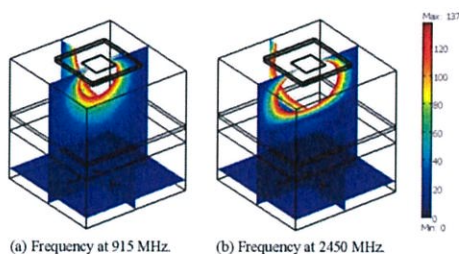


Figure 7. Electric field distribution pattern

#### V. DISCUSSION AND CONCLUSION

This paper presents analysis 3D finite elements and simulation specific absorption rate (SAR) and temperature distribution in the organs of human body exposed to electromagnetic field at frequencies of 915 MHz and 2.45 GHz. The finite element simulation in this research the results shown that maximum temperatures in organs are different if different frequencies. The results obtained from this research shows that the maximum temperature in each internal organ is different if a radiating frequency is changed in which 2.45 GHz provides higher temperature accumulation and also SAR.

In the future, we will validate by real measurement electric field in air space distance 5 cm via electric field meter compare to simulation result of electric field distribution pattern.

#### REFERENCES

- [1] ICNIRP: "Guideline for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, pp. 494-522, 1998.
- [2] Nishizawa, S., and Hashimoto, O., 1999, "Effectiveness Analysis of Lossy Dielectric Shields for a Three-Layered Human Model," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, 47(3), pp. 277-283.
- [3] Seufi, A. M., Ibrahim, S. S., Elmaghraby, T. K., and Hafez, E. E., 2009, "Preventive Effect of the Flavonoid, Quercetin, on Hepatic Cancer in Rats via Oxidant/Antioxidant Activity: Molecular and Histological Evidences," *J. Exp. Clin. Cancer Res.*, 28(1), p. 80.

- [4] Yang, D., Converse, M. C., Mahvi, D. M., and Webster, J. G., 2007, "Measurement and Analysis of Tissue Temperature During Microwave Liver Ablation," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 54(1), pp. 150-155.
- [5] A. Sampanich, P. Phasukkit, S. Tungjitkusolmun, C. Pintaviroj and W. Wongtrairat, "Basic Investigation of Breast Cancer Detection in Early Stage Using Microwave Radiation: Finite Element Analysis Approach," *Biomedical Engineering International Conference (BMEICON 2011) Changmai, THAILAND*, pp. 212-215.
- [6] [Online]. Available : <http://nirfm.tifac.cnr.it/tissprop/>.

## ประวัติผู้เขียน

|                  |  |
|------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล     | นายวรา สุวรรณสินธุ์  |
| วัน เดือน ปีเกิด | 19 กุมภาพันธ์ 2518 ที่พระนครศรีอยุธยา  |
| ที่อยู่          | 456/89 ถนนปัญญาอินทรา แขวงสามวาตะวันตก เขตคลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510            |
| ประวัติการศึกษา  | 2542 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร |