

อิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมอง The Influence of Electromagnetic Field on Heat Transfer within the Brain Tissue

<u>พรทิพย์ แก่งอินทร์¹* และผดุงศักดิ์ รัตนเดโช²</u>

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล 25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170 ² ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต 99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 *ติดต่อ E-mail: pornthip.kea@mahidol.ac.th, เบอร์โทรศัพท์ 0-2889-2138 ต่อ 6401-3, เบอร์โทรสาร 0-2889-2138 ต่อ 6429

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ผลกระทบของการได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic field) ภายในเนื้อเยื่อสมอง (Brain tissue) โดยพิจารณาให้เนื้อเยื่อสมองมีคุณสมบัติเป็นวัสดุพรุน (Porous media) การ วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบไม่สมดุลทางความร้อน (Local thermal non-equilibrium : LTNE) ถูกใช้ในการ แก้ปัญหาสมการถ่ายเทความร้อนสองสมการ สำหรับเนื้อเยื่อและเลือด โดยการวิเคราะห์ จะครอบคลุมทั้งเทอมการ ถ่ายเทความร้อนด้วยการนำความร้อน (Conduction heat transfer term) ภายในเนื้อเยื่อและระบบการไหลเวียนของ ้เลือด เทอมการแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือด (Tissue-blood convective heat exchange term) และเทอมกระบวนการสันดาปภายใน (Metabolic heat generation term) โดยเนื้อเยื่อสมองจะถูก พิจารณาให้มีลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยม อิทธิพลของกำลังและความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจนอิทธิพลของ ้ค่าความพรุนและความเร็วเลือดของชนิดหลอดเลือดภายในเนื้อเยื่อสมองที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดจะถูกวิเคราะห์ สมการการแพร่กระจายตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าควบคู่กับสมการถ่ายเทความร้อน ภายใต้การวิเคราะห์แบบสมมติฐานที่ไม่สมดุลทางความร้อนจะถูกแก้ปัญหาผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์ เอลิเมนต์ (Finite element method : FEM) โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานใน การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อชีวภาพ (Biological ชนิดอื่นๆ เมื่อได้รับอิทธิพล จาก tissue) ้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งตัวอย่างของการนำไปใช้งาน เช่น การประยุกต์การใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการรักษาโรคมะเร็ง โดยใช้ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

้*คำหลัก:* เนื้อเยื่อสมอง, ไม่สมดุลทางความร้อน, ไฟไนต์เอลิเมนต์, สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

Abstract

This paper present an analysis of the effects of an electromagnetic field within the brain tissue. The brain tissue is considered a porous media. Analysis of heat transfer under local thermal non-equilibrium (LTNE) is taken into account by solving the two-energy equation for tissue and blood phases. A comprehensive analysis of conduction heat transfer term in the tissue and the circulation of the blood, tissue-blood convective heat exchange term and metabolic heat generation term. A rectangular shape of a brain tissue model is considered. The effects of electromagnetic wave power and electromagnetic wave frequency including the effects of porosity and blood velocity of blood vessels within the brain tissue on the tissue and



blood temperature distributions are systematically investigated. The coupled equations of electromagnetic wave propagation and heat transfer under LTNE assumption are solved using the finite element method (FEM). The numerical models in this study can be used as a basis to study the heat transfer in biological tissues when exposed to an electromagnetic field. Examples of applications such as the applications that related to the treatment of cancer using heat from electromagnetic wave.

Keywords: Brain tissue, Local thermal non-equilibrium, Finite element, Electromagnetic field

1. บทน้ำ

พลังงาน ความร้อน จากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ า (Electromagnetic wave) เป็นแหล่งพลังงานความร้อน อีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจมากกว่าวิธีการให้ความร้อน ้จากแหล่งพลังงานแบบเดิม เนื่องจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแทรกซึมลงไปในชั้นของพื้นผิววัสดุ จึงส่งผลให้ แปลงเป็นพลังงานความร้อนได้อย่างรวดเร็ว และ ให้ ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานที่สูง [1] ดังนั้นในปีที่ผ่าน มาจึงได้มีการศึกษาและใช้ประโยชน์จากพลังงานจาก คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในงานด้านต่างๆ มากมายทั้งใน อุตสาหกรรมและในครัวเรือน เช่น อุตสาหกรรมสำหรับ การอบแห้งอาหาร (Food drying) การพาสเจอไรซ์ (Pasteurization) ด้านความงาม (Beauty) และอื่นๆ รวมทั้งใช้ในการรักษาโรคมะเร็ง (Thermal ablation) ทำให้เกิดการความกังวลของประชาชน ด้วย [2-3] ้เกี่ยวกับความเสี่ยงต่อสุขภาพอันเกิดจากอิทธิพลของการ ใช้พลังงานจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เหล่านี้จะมีอิทธิพลต่อร่างกายของมนุษย์ และอาจนำไปสู่ ผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเนื้อเยื่อสมอง (Brain tissue) ซึ่งถือ ้ว่าเป็นส่วนเนื้อเยื่อที่มีความอ่อนไหวได้ง่ายและถือเป็น ้อวัยวะที่สำคัญในร่างกายมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจาก การแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [4] การเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิเพียงเล็กน้อยในอวัยวะที่สำคัญอย่างเช่นสมอง อาจส่งผลต่อการตอบสนอง ด้านสรีรวิทยาทางความร้อน (Thermo-physiologic) ได้ [5] เช่น เกิดอาการปวดศีรษะ เมื่อคุยโทรศัพท์เป็นเวลานานๆ เป็นต้น ดังนั้นการศึกษา การถ่ายเทความร้อนและการตอบสนอง ด้านสรีรวิทยา ทางความร้อนของเนื้อเยื่อสมองเมื่อได้รับอิทธิพลจากการ แผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจึงเป็นหัวข้อที่กำลังได้รับ ความสนใจและมีความจำเป็น เพื่อเป็นพื้นฐานในการ

หาทางป้องกันอันตรายจาก การได้รับอิทธิพลจากการแผ่ รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในเนื้อเยื่อสมอง

การศึกษาการถ่ายเทความร้อน ภายในเนื้อเยื่อ สมองเมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้น ในอดีตที่ผ่านมามักจะถูกศึกษาโดยใช้แบบจำลอง ไบโอฮีท (Bioheat model) [6] ซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Pennes [7] มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งที่ใช้แบบจำลองไบ -โอฮีทในการศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิภายในสมอง ของมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นโทรศัพท์มือถือ [8-9] มีงานวิจัยบางส่วนที่ ศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิ โดยใช้แบบจำลองไบโอฮีทภายในสมองในระหว่าง กระบวนการรักษามะเร็งโดยใช้ความร้อนจากคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า [10] อย่างไรก็ตามเนื่องจากความง่ายและ ข้อจำกัดของสมมติฐานของแบบจำลอ งไบโอฮีทที่สมมติ ให้อุณหภูมิของเลือดภายในหลอดเลือดฝอย (Capillary) เท่ากับอุณหภูมิของแกนของร่างกาย ทำให้ อุณหภูมิภายในหลอดเลือดฝอยเท่ากับอุณหภูมิของเลือด ภายในเส้นเลือดหลัก (เส้นเลือดแดงใหญ่และเส้นเลือดดำ ใหญ่) ทำให้การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนภายใน เนื้อเยื่อสมองเมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสีของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า ที่ใช้แบบจำลองไบโอฮีทในการศึกษานั้น ยังคงไม่สมบูรณ์ นอกจากนั้นแล้วในความเป็นจริง ภายใน เนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ ยังประกอบไปด้วยหลอดเลือด ขนาดเล็ก (Microvascular) และหลอดเลือดฝอย (Capillary) ขนาดเล็กที่ไหลอยู่ภายใน จึงสามารถถือได้ ้ว่ามีโครงสร้างของวัสดุพรุน (Porous media) [11-12] การศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองของ วัสดุพรุน (Porous media model) ในวิเคราะห์ จะมี สมมติฐานที่เป็นข้อจำกัดที่น้อยกว่าการใช้แบบจำลอง ไบโอฮีท [13] โดยแบบจำลองของวัสดุพรุนสามารถแบ่ง

ความร้อนในการศึกษา ในงานวิจัยฉบับนี้จะนำเสนอการ
วิเคราะห์ผลกระทบของการได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า
ภายในเนื้อเยื่อสมองโดยพิจารณาให้เนื้อเยื่อสมองมี
คุณสมบัติเป็นวัสดุพรุน อิทธิพลของกำลังและความถี่ของ
สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจนอิทธิพลของ ค่าความพรุน
และความเร็วเลือดของชนิดหลอดเลือดภายในเนื้อเยื่อ
สมอง ที่ส่งผลต่อลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของ
เนื้อเยื่อและเลือดจะถูก นำเสนอ สมการการแพร่กระจาย
ตัวของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าควบคู่กับสมการถ่ายเท
ความร้อนแบบไม่สมดุลทางความร้อนจะถูกแก้ปัญหา
ผ่านระเบียบวิธีเซิงตัวเลขแบบไฟในต์เอลิเมนต์ (Finite
element method : FEM) โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขใน
การศึกษานี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาการ
ถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อชีวภาพชนิดอื่นๆ เมื่อ
ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าได้

ME NETT28

2. แบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ในงานวิจัยฉบับนี้ แบบจำลองที่ใช้ในการ วิเคราะห์ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการหาการกระจายตัว อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดภายในเนื้อเยื่อสมอง โดย แบบจำลองเนื้อเยื่อสมองจะถูกพิจารณาให้มี ลักษณะเป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมในพิกัดสองมิติในระนาบ x-y [16] โดยแบบจำลองเนื้อเยื่อสมองจะมีความสูง H และมีความกว้าง L แบบจำลองที่ศึกษาจะเป็นตัวแทน ของการศึกษาการได้รับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายใน เนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ ซึ่งแบบจำลองเนื้อเยื่อสมอง จะได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นแหล่ง ความร้อนจากภายนอกและฟลักซ์ความร้อนที่สม่ำเสมอ ทางด้านบน สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและฟลักซ์ความร้อน ที่ได้รับจะเป็นตัวแทนของการ ให้พลังงาน ความร้อน แบบร่วมกันในการประยุกต์ใช้งานด้านต่าง ๆ เช่น ใช้ใน การทำลายเซลล์มะเร็งระหว่างกระบวนการรักษาด้วย ความร้อน ฟลักซ์ความร้อนจะแสดงถึงการทำความร้อน บริเวณผิวของเซลล์มะเร็ง ในขณะที่สนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าจะเป็นตัวแทนแหล่งความร้อนจากภายนอก เช่น พลังงานจากคลื่นไมโครเวฟ ซึ่งสามารถทะลุลงไป ภายในผิวของเซลล์มะเร็งและแปลงเป็นพลังงานภายใน เพื่อทำลายเซลล์มะเร็ง การให้ทั้งความร้อนจาก

้ได้เป็นสองประเภทคือ แบบสมดุลทางความร้อน (Local thermal equilibrium : LTE) และแบบไม่สมดุลทาง ความร้อน (Local thermal non-equilibrium : LTNE) แบบจำลองที่ สมดุลทางความร้อน นั้นจะอยู่บน [13] สมมติฐานที่ให้อุณหภูมิของสถานะเนื้อเยื่อหรือของแข็ง (Tissue / Solid phase) เท่ากับอุณหภูมิของสถานะของ เลือดหรือของเหลว (Blood / Fluid phase) ในทุกๆ ้ตำแหน่งที่พิจารณาภายในแบบจำลองวัสดุพรุน ซึ่งจะใช้ สมการถ่ายเทความร้อนเพียงหนึ่งสมการในการวิเคราะห์ [14] อย่างไรก็ตาม แบบจำลองของวัสดุพรุนแบบสมดุล ทางความร้อนจะไม่เหมาะสมสำหรับสภาวะบางประการ อาทิ การถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลของเลือดที่ ้ความเร็วเลือดสูงๆ การถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อที่ มีค่าความพรุนค่อนข้างต่ำ และไม่เหมาะสมกับเนื้อเยื่อที่ ได้รับอิทธิพลจากแหล่งความร้อนค่อนข้างสูง [15] ดังนั้น ในกรณีนี้จึงควรใช้แบบจำลองของวัสดุพรุนแบบไม่สมดุล ทางความร้อนในการวิเคราะห์แทน โดยแบบจำลองการ ถ่ายเทความร้อนแบบไม่สมดุลทางความร้อนจะ ประกอบด้วยสมการถ่ายเทความร้อนสอง สมการ ้คือสมการของเนื้อเยื่อหรือของแข็งและสมการของเลือด หรือของเหลว และพิจารณาเทอมการแลกเปลี่ยน ้ความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดร่วมด้วย อย่างไรก็ ตามยังมีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่ศึกษาอิทธิพลจากการ แผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายในเนื้อเยื่อสมองโดย ใช้แบบจำลอง ที่ไม่สมดุลทางความร้อน เนื่องจากความ ซับซ้อนของโครงสร้างภายในเนื้อเยื่อสมองและความ ซับซ้อนของอันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างเนื้อเยื่อ สมองและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจนความซับซ้อนของ ระบบสมการที่ต้องใช้ทั้งแบบจำลองการแพร่กระจายตัว ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและแบบจำลองการถ่ายเท ้ความร้อน ดังนั้นเพื่อให้แบบจำลองที่ศึกษามีความ สมบูรณ์ใกล้เคียงกับลักษณะทางกายภาพจริงมากที่สุด และควบคุมทั้งปรากฏการณ์การแพร่กระจายตัวของคลื่น ้แม่เหล็กไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อ ้สมองเมื่อได้รับอิทธิพลจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า จึงควร พิจารณาทั้งแบบจำลองของการแพร่กระจายตัวของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าและการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบไม่สมดุลทาง

สนามแม่เหล็กไฟฟ้า และความร้อน จากบริเวณผิว (ฟลักซ์ความร้อน) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการ ทำลายเซลล์มะเร็งให้ดีมากยิ่งขึ้น

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น ในความเป็นจริง แล้วเนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ อย่างเช่นเนื้อเยื่อสมอง จะมีลักษณะเป็นวัสดุพรุน โดยส่วนมากงานวิจัยที่ ศึกษาเกี่ยวกับเนื้อเยื่อชีวภาพวัสดุพรุน มักจะแบ่ง ้ส่วนประกอบภายในออกเป็น สามส่วนประกอบหลักๆ คือ หลอดเลือด (Blood vessels) เนื้อเยื่อ (Cells) และ พื้นที่ภายในช่องว่างระหว่างหลอดเลือดและเนื้อเยื่อ (Interstitial space) และมักจะพิจารณาส่วนประกอบ ของหลอดเลือดว่าเป็นพื้นที่ของหลอดเลือด (Vascular region) หรือเรียกว่าสถานะของเลือด / ของเหลว และ รวมส่วนประกอบของเนื้อเยื่อและพื้นที่ภายในช่องว่าง ระหว่างหลอดเลือดและเนื้อเยื่อว่าเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ ของหลอดเลือด (Extra-vascular region) หรือเรียกว่า สถานะของเนื้อเยื่อ / ของแข็ง [11-12]

แบบจำลองเนื้อเยื่อสมอง ที่ศึกษา จะถูก พิจารณาให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogenous material) มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุก ทิศทาง (Isotropic) และช่องว่างเต็มเดิมไปด้วยเลือด (Saturated with blood) ไม่มีการเปลี่ยนสถานะหรือไม่ เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีภายในเนื้อเยื้อสมองวัสดุพรุน [16] เนื้อเยื่อและเลือดเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่ง กันและกัน (พิจารณาเทอมการแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากการพาความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือด (Tissue-blood convective heat exchange term)) แบบจำลองเนื้อเยื่อสมองที่ใช้ในการศึกษาจะแสดงใน รูปที่ 1

การไหลของ หลอด เลือดภายในแบบจำลอง เนื้อเยื่อสมองจะไหลด้วยความเร็วคงตัว ด้วยความเร็ว ค่าต่าง ๆ ตามชนิดของหลอดเลือด ชนิดของหลอดเลือด ที่พิจารณาจะมีค่าความพรุน ค่า ความเร็วของเลือด และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตรเฉพาะที่ (Local volumetric heat transfer coefficient, H_{tb}) ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 [17-18] โดยการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื้อและ เลือดภายในเนื้อเยื่อสมองจะมีความสัมพันธ์กับ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่เนื้อเยื่อสมองได้รับ โดยเมื่อ เนื้อเยื่อสมองได้รับอิทธิพลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แล้ว เนื้อเยื่อสมองจะดูดซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้าและ แปลงเป็น ความร้อนภายใน ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ อุณหภูมิของเนื้อเยื่อสมองเพิ่มขึ้น ดังนั้นการอธิบาย สมการสำหรับ การแพร่กระจายตัวของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้า และการถ่ายเทความร้อนจะกล่าวใน หัวข้อถัดไป

ME NETT28





3. การวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

<u>3.1 การวิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่น</u> <u>แม่เหล็กไฟฟ้า</u>

การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ภายในเนื้อเยื่อสมองจะถูกวิเคราะห์ในพิกัดสองมิติใน ระนาบ x-y และถูกคำนวณโดยใช้สมการของแมกซ์ -เวลล์ (Maxwell's equations) ในโหมดการแพร่กระจาย คลื่นแบบ ทรานสเวอร์อิเล็กตริกเวฟ (Transverse electric wave mode : TE mode) หรือเรียกว่าคลื่นที่มี แนวสนามไฟฟ้าวางตามขวาง หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ

ไม่มีสนามไฟฟ้าในทิศของการแพร่กระจายของคลื่นแต่ มีเฉพาะสนามแม่เหล็กในทิศทางนั้น สมการที่ได้จาก พื้นฐานของสมการ แมกซ์เวลล์ โดยแพร่กระจายตัว แบบฮาร์มอนิก (Harmonic propagation) หาได้จาก สมการต่อไปนี้ [19] :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \vec{E}_y\right) - \left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right) k_0^2 \vec{E}_y = 0 \qquad (1)$$

เมื่อ $ar{E}_y$ คือความเข้มของสนามไฟฟ้าในทิศทาง แนวแกน y (Electric field intensity in the y direction (V/m)) μ_{-} คือค่าการซึมผ่านสัมพัทธ์ (Relative Permeability) *ɛ*, คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ สัมพัทธิ์ (Relative Permittivity) \mathcal{E}_0 = 8.8542x10⁻¹² F/m คือค่าเปอร์มิตตีวิตี้ในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Permittivity of free space) σ คือค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity (S/m)) $\omega = 2\pi f$ คือความถึ่ เชิงมุม (Angular frequency (rad/s)) k_0 คือเลขคลื่น ในที่ว่างหรือฟรีสเปซ (Wave number of free space) (m^{-1}) และ $j=\sqrt{-1}$ โดยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก (Dielectric properties) ของเนื้อเยื่อสมอง ที่ใช้ในการ วิเคราะห์ จะกำ หนดให้มีค่าคงที่ โดยเงื่อนไขขอบเขต สำหรับการ วิเคราะห์การแพร่กระจายตัวของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าจะแสดงดังรูปที่ 1 คือ

เนื้อเยื่อสมองจะได้รับอิทธิพลจาก สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่สม่ำเสมอทางด้านบน ดังนั้น ด้านบนของแบบจำลองจะพิจารณาให้มีเงื่อนไข ขอบเขตของการแพร่กระจายตัวของสนามแม่เหล็ก ไฟฟ้าแบบพอร์ต (Port boundary condition) ที่มีการ ระบุค่ากำลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าคงที่ [19]:

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

ด้านนอกของเนื้อเยื่อสมองจะพิจารณาให้มี เงื่อนไขขอบเขตแบบตัวนำไฟฟ้าสมบูรณ์ (Perfect electric conductor boundary condition) ดังนั้นความ เข้มของสนามไฟฟ้าในทิศทางแนวแกน v ของทั้งสี่ ด้านของเนื้อเยื่อสมองจะมีค่าเท่ากับศูนย์ 3)

$$\bar{E}_{y} = 0 \tag{3}$$

3.2 การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน

ในการวิเคราะห์ การกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดจะได้จากการวิเคราะห์สมกา รถ่ายเท ความร้อนสองสมการภายใต้การวิเคราะห์แบบไม่สมดุล ทางความร้อน และเพื่อให้สอดคล้องกับ การวิเคราะห์ การแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การ วิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะพิจารณาในพิกัดสอง มิติในระนาบ x-v เช่นเดียวกัน

ME NETT28

สมการถ่ายเทความร้อนสำหรับปริมาตรเฉลี่ย ในสภาวะคงตัวที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Steady state) ที่ใช้ อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายใน เนื้อเยื่อสมองวัสดุพรุน ของสถานะเนื้อเยื้อและเลือดจะ แสดงในสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ คือ [16] : สถานะเนื้อเยื่อ:

$$\nabla \cdot (K_{t,eff} \nabla T_t) - H_{tb} (T_t - T_b) + (1 - \phi) Q_{met} + (1 - \phi) Q_{ext,t} = 0$$

$$(4)$$

สถานะเลือด:

$$\nabla \cdot (K_{b,eff} \nabla T_b) + H_{tb} (T_t - T_b) + \phi Q_{ext,b}$$
$$= \phi (\rho c_p)_b \mathbf{u} \cdot \frac{\partial T_b}{\partial x}$$
(5)

เมื่อ $K_{b,eff}=\phi K_b$ และ $K_{t,eff}=ig(1\!-\!\phiig)K_t$ (6) โดยตัวห้อย *eff t* และ *b* แทนค่าประสิทธิผล value) สถานะเนื้อเยื่อ และสถานะเลือด (Effective ตามลำดับ T คือค่าอุณหภูมิ (Temperature (°C)) hoี้คือค่าความหนาแน่น (Density (kg/m³)) c_p คือค่า ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity (J/kg .°C)) K คือค่าการนำความร้อนหรือสัมปะสิทธิ์ การนำความร้อน (Thermal conductivity (W/m·°C)) ϕ คือค่าความพรุน (Porosity (-)) ซึ่งค่าความพรุนจะ เป็นค่าที่แสดงถึงอัตราส่วนระหว่างปริมาตรของ ช่องว่างต่อปริมาตรรวมทั้งหมดภายในเนื้อเยื่อสมอง u ้คือค่าความเร็วเฉลี่ยของสถานะเลือด (Blood phase average velocity (m/s)) $H_{\imath b}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนปริมาตรเฉพาะที่ (Local volumetric heat transfer coefficient (W/m.K)

ในทางด้านซ้ายของสมการที่ (4) เทอมที่หนึ่ง สอง สาม และสี่ จะแสดงถึงเทอม การถ่ายเทความร้อน ด้วยการนำความร้อนภายในเนื้อเยื่อ เทอมการ

แลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่าง สถานะเนื้อเยื่อและเลือด เทอมแหล่งความร้อนจาก $Q_{\scriptscriptstyle met}$) ซึ่งในที่นี้จะ กระบวนการสันดาปภายใน (พิจารณาแหล่งความร้อน นี้จากสถานะ เนื้อเยื่อเท่านั้น [12,16] และเทอมสุดท้ายคือเทอมแหล่งความร้อนจาก ภายนอก ($Q_{\scriptscriptstyle ext}$) ซึ่งได้จากสนามไฟฟ้าอันเนื่องจาก อิทธิพลจากได้รับการแผ่รังสีจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยได้จากการคำนวณในสมการที่ (1) สำหรับเทอม ทางด้านขวาในสมการที่ (5) จะแสดงถึงเทอมการพา ความร้อนเนื่องจากการใหลของเลือด จะเห็นได้ว่า สมการที่ (4) และสมการที่ (5) จะควบคู่กันด้วยเทอม การแลกเปลี่ยนความร้อนโดยการพาความร้อนระหว่าง เนื้อเยื่อและเลือด โดยเทอม $Q_{\scriptscriptstyle ext}$ จะเท่ากับความร้อน ้ต้านทานที่เกิดจากสนามไฟฟ้าและสามารถนิยามได้ จาก [20] :

$$Q_{ext} = \frac{\sigma \left| \vec{E}_{y} \right|^{2}}{2} \tag{7}$$

สำหรับ เงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์การ ถ่ายเทความร้อนนั้นจะประกอบด้วย ด้านบนของ เนื้อเยื่อสมองวัสดุพรุนจะได้รับ อิทอิ ทธิพลจาก สนามแม่เหล็กไฟฟ้าและฟลักซ์ความร้อน [12,21] โดยฟลักซ์ความร้อนมีความสัมพันธ์คือ

$$q_{s} = -K_{b,eff} \left. \frac{\partial T_{b}}{\partial y} \right|_{y=H} - K_{t,eff} \left. \frac{\partial T_{t}}{\partial y} \right|_{y=H}$$
(8)

อุณหภูมิที่รอยต่อของผิวของเนื้อเยื่อสมองจะ มีค่าคงที่ไม่ว่าจะเชื่อมต่อกับเนื้อเยื่อหรือเลือด ดังนั้นจะ สมมติให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดที่ผิวของเนื้อเยื่อ สมองมีค่าเท่าดังสมการคือ [12,21]:

$$T_t\Big|_{y=H} \approx T_b\Big|_{y=H} \approx T_s \tag{9}$$

อุณหภูมิด้านล่างของเนื้อเยื่อสมอง (y = 0) จะอยู่ไกลจากการถ่ายเทความร้อนจึงพิจารณาให้ มี

คุณสมบัติเป็นฉนวน หรือไม่มีการถ่ายเทความร้อน: $q_s=0$ (10)

อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) ของ เนื้อเยื่อสมองจะสมมติให้มีความสม่ำเสมอและมีค่า เท่ากับอุณหภูมิปกติของร่างกายคือ 37 °C

ME NETT28

โดยค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริก และคุณสมบัติ ทางความร้อนของเนื้อเยื่อสมองจะกำหนดให้มีค่าคงที่ ดังแสดงในตารางที่ 2

4. ตัวแปรไร้มิติ

ผลการคำนวณกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดจะถูกนำเสนอในรูปแบบไร้มิติ (Dimensionless form) เพื่อให้ง่ายต่อการพิจารณา หน่วย โดยตัวแปรไร้มิติจะถูกนิยามโดย

$$\eta = \frac{y}{D}, Bi = \frac{H_{tb}H^{2}}{K_{t,eff}}, \theta = \frac{K_{t,eff}(T - T_{s})}{q_{s}H},$$

$$\Phi = \frac{(1 - \phi)HQ_{met}}{q_{s}}, P^{*} = \frac{P}{q_{s}H^{2}}, f^{*} = \frac{f}{f_{c}}$$
(12)

เมื่อ *f_c* คือความถี่ขอบเขต (Cut off frequency) ซึ่ง เป็นความถี่ที่ต่ำที่สุดในการแพร่กระจายตัวของคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าในโหมดทรานสเวอร์อิเล็กตริกเวฟ มีค่า เท่ากับ 1,500 GHz [16]

5. การจำลองเชิงตัวเลข

ระบบสมการทั้งหมด จะถูกแก้ปัญหา ด้วย ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ผ่าน โปรแกรม COMSOL[™] Multiphysics เพื่อศึกษาการ กระจายตัวอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในแบบจำลองเนื้อเยื่อ สมองในสภาวะคงตัว เมื่อได้รับอิทธิพลจากการแผ่รังสี คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยจะเริ่มจากการคำนวณ เทอม แหล่งความร้อนจากภายนอก (Q_{ext}) ด้วยการวิเคราะห์ สมการการแพร่กระจายตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และ คำนวณหาค่าอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดจากสมการ

การถ่ายเทความร้อน แบบไม่สมดุลทางความร้อน สมการการถ่ายเทความร้อนในสมการที่ (4) และ (5) จะ ควบคู่กับสมการที่ (1) ผ่านสมการที่ (7) แบบจำลอง เนื้อเยื่อสมองจะถูกคำนวณโดยใช้เอลิเมนต์ (Element) รูปสามเหลี่ยม และใช้ ฟังก์ชั่นการประมาณค่าในช่วง

แบบลากรองจ์อันดับที่สอง (Lagrange quadratic interpolation function) ในการประมาณค่าอุณหภูมิ ของสถานะเนื้อเยื่อและเลือดในแต่ละเอลิเมนต์

6. ผลและการวิเคราะห์ผล

6.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ ศึกษาจะทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของ อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดที่ได้จากการใช้ระเบียบ ้วิธีเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากงานวิจัยที่ [16] ้ด้วยเงื่อนไขในการวิเคราะห์เช่นเดียวกัน ซึ่งในงานวิจัย ที่ [16] จะเป็นการศึกษา อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก ้ไฟฟ้าภายในเนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ โดยการ เปรียบเทียบผลที่ศึกษาจะเป็นการเปรียบเทียบการ กระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดแบบไร้มิติ ภายในเนื้อเยื่อสมองเมื่อได้รับอิทธิพลของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ค่ากำลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ้ค่าต่างๆ คือที่ P* = 10 100 และ 500 เมื่อ f* = 0.6 , Φ = 0.1 และ Bi = 10 ผลจากการเปรียบเทียบในรูปที่ 2 พบว่าการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือด จากใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและผลจากงานวิจัยที่ [16] จะมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นแบบจำลองที่ ใช้ในการวิเคราะห์ในการนำเสนอนี้จึงมีความน่าเชื่อถือ สามารถใช้ในการศึกษาในส่วนอื่นๆ ต่อไปได้ 6.2 อิทธิพลของกำลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 3 จะแสดงอิทธิพลของกำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อการกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดภายในเนื้อเยื่อสมองวัสดุพรุนที่มีการ ไหลของหลอดเลือดต่างชนิดกันคือ (a) หลอดเลือดฝอย (b) กิ่งก้านของหลอดเลือดแดง (c) หลอดเลือดดำใหญ่ และ (d) กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ที่ f* = 0.2 และ Ф = 1 จากรูปจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดจะมีรูปแบบที่คล้ายกันและอุณหภูมิ ของเลือดจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของเนื้อเยื่อที่กำลัง ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าเดียวกัน เมื่อพิจารณาอิทธิพล ของกำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อการกระจายตัว อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดจะพบว่ากำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า จะส่งผลให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อ และเลือดสูงขึ้นตามไปด้วยในทุกชนิดหลอดเลือดที่ ้ต่างกัน เนื่องจากเมื่อกำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า มี ้ค่ามาก เนื้อเยื่อสมองก็จะดูดซับสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ได้มาก และถูกแปลงเป็น ความร้อนภายในซึ่งเป็น สาเหตุที่ทำให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อสมองเพิ่มขึ้นตามไป ้ด้วย นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อกำลังของ สนามแม่เหล็ก ไฟฟ้า เพิ่มขึ้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและอุณหภูมิของเลือดก็จะมีมากขึ้นตามไปด้วย จึงสามารถสรุปได้ว่าเนื้อเยื่อสมองที่ได้รับอิทธิพลจาก กำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีค่าสูงๆ ควรจะใช้ สมการถ่ายเทความร้อนแบบไม่สมดุลทางความร้อนใน การวิเคราะห์ เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือด จะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก และเมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดและชนิดของหลอดเลือดชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและ เลือดของหลอดเลือดชนิดกิ่งก้านของหลอดเลือดแดงจะ มีค่ามากกว่าหลอดเลือดฝอย หลอดเลือดดำใหญ่ และ กิ่งก้านของหลอดเลือดด*ิ*ตามลำดับ เนื่องจากค่าความ พรุนของของกิ่งก้านของหลอดเลือดแดงจะมีค่าน้อย กว่าหลอดเลือดฝอย หลอดเลือดดำใหญ่ และ กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ตามลำดับ ส่งผลให้ได้รับ อิทธิพลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่าและส่งผลให้ อุณหภูมิมากกว่า [15] และเมื่อพิจารณาความแตกต่าง ระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดที่ได้จากหลอด เลือดต่างชนิดกันจะเห็นได้ว่ากิ่งก้านของหลอดเลือด แดงจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและ เลือดที่มากที่สุด รองลงมาคือ หลอดเลือดดำใหญ่ และ กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ตามลำดับเช่นกัน แต่หลอด เลือดฝอยแทบจะไม่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิ ของเนื้อเยื่อและเลือดเลย โดยความแตกต่างระหว่าง อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดจะขึ้นอยู่กับค่าความเร็ว ของการไหลของเลือดและ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเท ความร้อนปริมาตร เฉพาะที่ (H_{th}) ดังจะเห็นได้จาก งานวิจัยของ [18] ยกตัวอย่างเช่น เมื่อพิจารณาการ กระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดภายในหลอด เลือดฝอยจะพบว่าการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อ และเลือดแทบจะไม่มีความแตกต่างกันเลย เนื่องจาก

หลอดเลือดฝอยเป็นหลอดเลือดที่มีขนาดเล็กมากจึงมี ้ความเร็วในการไหลของเลือดภายในหลอดเลือดที่น้อย มาก และมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตร เฉพาะที่ที่มีค่ามากดังจะเห็นได้จากในตารางที่ 2 ซึ่งค่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตร เฉพาะที่เป็น ้ค่าที่บ่งบอกถึงการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง เนื้อเยื่อและเลือด การที่มีอ่านี้มากจะแสดงว่าเนื้อเยื่อ และเลือดจะมีการถ่ายเทความร้อนระหว่างสองสถานะ ได้ดี ส่งผลให้ไม่มีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือด ดังนั้นเนื้อเยื่อสมองที่ได้รับอิทธิพล ้จากกำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ค่าน้อยๆ และมี หลอดเลือดขนาดเล็กไหลอยู่ภายใน สามารถจะใช้ สมการถ่ายเทความร้อนแบบสมดุลทางความร้อนใน การวิเคราะห์ได้ ในขณะที่กิ่งก้านของหลอดเลือดแดง ้นั้นแม้จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตร เฉพาะที่ที่ปานกลาง แต่มีค่าความเร็วของการไหลของ เลือดที่ค่อนข้างสูงมาก ดังจะเห็นได้จากในตารางที่ 2 ดังนั้นความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและ เลือดจะจึงมีค่อนข้างมาก จึงสามารถสรุปได้ว่าเนื้อเยื่อ ชีวภาพใดๆ ที่มีความเร็วในการไหลของเลือดที่มีค่า มากและมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตร เฉพาะที่ที่มีค่าน้อยควรจะใช้สมการถ่ายเทความร้อน แบบไม่สมดุลทางความร้อนในการวิเคราะห์แทน ผล การสรุปนี้เป็นผลที่มีความสอดคล้องกันกับข้อสรุปใน งานวิจัยของ [15]

<u>6.3 อิทธิพลของความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า</u>

รูปที่ 4 จะแสดงอิทธิพลของความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อการกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดภายในเนื้อเยื่อสมองวัสดุพรุนที่มีการ ไหลของหลอดเลือดต่างชนิดกันคือ (a) หลอดเลือดฝอย (b) กิ่งก้านของหลอดเลือดแดง (c) หลอดเลือดดำใหญ่ และ (d) กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ที่ P* = 500 และ Φ = 1 จากรูปจะเห็นได้ว่าการกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดจะมีรูปแบบที่คล้ายกันและอุณหภูมิ ของเลือดจะมีค่ามากกว่าอุณหภูมิของเนื้อเยื่อที่ความถี่ ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เดียวกัน อย่างไรก็ตามเมื่อ พิจารณาอิทธิพลของความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ต่อการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดจะ

พบว่าจะได้ผลตรงข้ามกับที่ได้จากการศึกษาอิทธิพล ของกำลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่ามากจะส่งผลให้อุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดลดลงไปในทุกชนิดหลอดเลือดที่ ต่างกัน เนื่องมาจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง กว่าจะมีความยาวคลื่น (Wavelength) ที่สั้นกว่า และมี ความลึกในการทะลทะลวง (Penetration depth) ของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สั้นกว่าเมื่อเทียบกับคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่ที่ต่ำกว่า ส่งผลให้พลังงานที่ ถูกดูดซับโดยเนื้อเยื่อสมองที่ได้รับอิทธิพลจากคลื่น แม่เหล็กไฟฟ้าที่มีค่าความถี่สูงจะมีค่าน้อย และถูก แปลงเป็น ความร้อนภายใน ได้น้อย ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำ ให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อสมองจะ ลดลงตามไปด้วย เช่นกัน นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เพิ่มขึ้นความแตกต่างระหว่าง อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและอุณหภูมิของเลือดก็จะมีลดลง ไปด้วย ดังนั้นเนื้อเยื่อสมองที่ได้รับอิทธิพลจากความถึ่ ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีค่าต่ำๆ ควรจะใช้สมการ ถ่ายเทความร้อนแบบไม่สมดุลทางความร้อนในการ ้วิเคราะห์ เนื่องจากอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดจะมี ความแตกต่างกันค่อนข้างมาก และเมื่อพิจารณา ความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัวอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดและชนิดของหลอดเลือดชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่า การกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและ เลือดของหลอดเลือดชนิดกิ่งก้านของหลอดเลือดแดงจะ มีค่ามากกว่าหลอดเลือดฝอย หลอดเลือดดำใหญ่ และ กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ตามลำดับ เนื่องจากค่าความ พรุนของของกิ่งก้านของหลอดเลือดแดงจะมีค่าน้อย หลอดเลือดดำใหญ่ กว่าหลอดเลือดฝอย และ ้กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ตามลำดับ ส่งผลให้ได้รับ อิทธิพลจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ามากกว่าและส่งผลให้ อุณหภูมิมากกว่าเช่นเดียวกัน และเมื่อพิจารณาความ แตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดที่ได้จาก หลอดเลือดต่างชนิดกันจะเห็นได้ว่ากิ่งก้านของหลอด เลือดแดงจะมีความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดที่มากที่สุด รองลงมาคือหลอดเลือด ู้ฝอย หลอดเลือดดำใหญ่ และกิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ตามลำดับส่วนหลอดเลือดฝอยจะพบว่าการกระจายตัว



อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดแทบจะไม่มีความ แตกต่างกันเลย เช่นเดียวกันกับผลที่ได้จากรูปที่ 3

7. สรุปผล

บทความฉบับ นี้จะนำเสนอการวิเคราะห์ ผลกระทบของ การได้รับ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ภายใน เนื้อเยื่อสมองวัสดุพรุนโดยใช้สมการการแพร่กระจาย ตัวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าควบคู่กับสมการถ่ายเท ความร้อนบนพื้นฐานการถ่ายเทความร้อนแบบไม่ สมดุลทางความร้อน ระบบสมการถูกแก้ปัญหาโดยใช้ ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบ ไฟในต์เอลิเมนต์ ผ่าน โปรแกรม COMSOL[™] Multiphysics อิทธิพลของ กำลังและความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ตลอดจน อิทธิพลของค่าความพรุนและความเร็วเลือดของชนิด ของหลอดเลือดที่ไหลภายในเนื้อเยื่อสมองที่ส่งผลต่อ ลักษณะการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือด จะถูกวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ แบบจำลองที่ใช้ วิเคราะห์จะถูกเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลที่ได้จาก แบบจำลองในงานวิจัยของ [16] ผลจากการศึกษา พบว่าเมื่อกำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า สูงขึ้นและ ้ความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ลดลงจะส่งผลให้ อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดสูงขึ้นและความแตกต่าง ระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดเพิ่มสูงขึ้นตามไป ้ด้วยในทุกชนิดของหลอดเลือด ดังนั้นเนื้อเยื่อสมองที่ ้ได้รับอิทธิพลจากกำลังของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีค่า ้สูงๆ และความถี่ของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีค่าต่ำๆ ควรจะใช้สมการถ่ายเทความร้อนแบบไม่สมดุลทาง ความร้อนในการวิเคราะห์ เนื่องจากอุณหภูมิของ เนื้อเยื่อและเลือดจะมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจายตัว อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดและชนิดของหลอดเลือด ชนิดต่างๆ จะเห็นได้ว่ากิ่งก้านของหลอดเลือดแดงจะมี ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดที่ มากที่สุด ในขณะที่หลอดเลือดฝอยแทบจะไม่มีความ แตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดเลย เนื่องจากอิทธิพลของค่าความเร็วของการไหลของเลือด และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตร เฉพาะที่ โดยหลอดเลือดที่มีความเร็วของการไหลของ

เลือดที่มีค่าสูงควรจะใช้สมการถ่ายเทความร้อนแบบไม่ สมดุลทางความร้อนในการวิเคราะห์ ในขณะที่หลอด เลือดที่มี ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนปริมาตร เฉพาะที่มากยังสามารถใช้สมการถ่ายเทความร้อนแบบ สมดุลทางความร้อนในการวิเคราะห์ได้ โดยแบบจำลอง เชิงตัวเลขในการศึกษานี้ สามารถใช้เป็นพื้นฐาน ใน การศึกษา การถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อชีวภาพ ชนิดอื่น ๆ เมื่อได้รับอิทธิพลของ สนามแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น การประยุกต์การใช้งานที่เกี่ยวข้องกับการ รักษา โรคมะเร็งโดยใช้ความร้อนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

ME NETT28

8. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ภายใต้หมายเลข ทุน TRG5780208 และมหาวิทยาลัยมหิดล

9. เอกสารอ้างอิง

[1] Klinbun, W. and Rattanadecho P. (2012). Numerical model of microwave driven convection in multi-layer porous pack bed using a rectangular waveguide (effects of layers configuration, layered thickness and frequency), *ASME journal of Heat Transfer*, vol. 134, April 2012, pp. 042605-1-042605-10.

[2] Izzo, F. (2003). Other thermal ablation techniques: microwave and interstitial laser ablation of liver tumors, *Annals of Surgical Oncology*, vol. 10(5), June 2003, June 2003, pp 491-497.

[3] Keangin, P., Wessapan, T. and Rattanadecho, P. (2011) An analysis of heat transfer in liver tissue during microwave ablation using single and double slot antenna, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 38, April 2011, pp. 757-766.

[4] Wessapan, T. and Rattanadecho. P. (2012) Numerical analysis of specific absorption rate and heat transfer in human head subjected to mobile phone radiation: effects of user age and radiated



power, ASME journal of Heat Transfer, vol. 134, December 2012, pp. 121101-1-121101-10.

[5] Adair, E.R., Adams, B.W., and Akel, G.M. (1984) Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior, *Bioelectromagnetics*, vol. 5(1), October 2005, pp. 13–30.

[6] Gunnar, B., Martin S., Gesine H. and Jurgen G. (2002) Estimation of heat transfer and temperature rise in partial-body regions during MR procedures: An analytical approach with respect to safety considerations, *Magnetic Resonance Imaging*, vol. 20(1), January 2002, pp. 65-76.

[7] Pennes, H.H. (1998) Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm, *Journal of Applied Physiology*, vol. 85(5-34), July 1998, pp. 65-76.

[8] G M J Van Leeuwen, J J W Lagendijk, B J A M Van Leersum, A P M Zwamborn, S N Hornsleth and A N T J Kotte (1999) Calculation of change in brain temperatures due to exposure to a mobile phone, *Physics in Medicine and Biology*, vol. 44, March 1999, pp. 2367–2379.

[9] Wessapan, T., Srisawatdhisukul, S. and Rattanadecho. P. (2012) Specific absorption rate and temperature distributions in human head subjected to mobile phone radiation at different frequencies, *International journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55(1-3), October 2011, pp. 347-359.

[10] Zhu, L. and Diao C. (2001) Theoretical simulation of temperature distribution in the brain during mild hypothermia treatment for brain injury, *Medical and Biological Engineering and Computing*, vol. 39, August 2001, pp. 681-689.

[11] Nakayama, A. and Kuwahara, F. (2008) A general bioheat transfer model based on the theory of porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 51, September 2007, pp. 3190-3199.

[12] Mahjoob, S. and Vafai, K. (2009) Analytical characterization of heat transport through biological media incorporating hyperthermia treatment, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 52 (5-6), October 2008, pp. 1608-1618.

[13] Klinbun, W., Vafai. K. and Rattanadecho. P. (2012) Electromagnetic field effects on transport through porous media, *International journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55 (1-3), October 2011, pp. 325-335.

[14] Khaled, A.-R.A. and Vafai, K. (2003) The role of porous media in modeling flow and heat transfer in biological tissues, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 46 (26), December 2003, pp. 4989-5003.

[15] Keangin, P. and Rattanadecho, P. (2013) Analysis of heat transport on local thermal nonequilibrium in porous liver during microwave ablation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 67, August 2013, pp.46-60,

[16] Keangin, P., Vafai, K. and Rattanadecho, P. (2013) Electromagnetic field effects on transport through biological materials, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 65, June 2013, pp. June 2013, pp. 389-399.

[17] Crezee, J., Lagendijk, J.J.W. (1992) Temperature uniformity during hyperthermia: the impact of large vessels, *Physics in Medicine and Biology*, vol. 37(6), October 1991, pp. 1321-1337.

[18] Yuan, P. (2008) Numerical analysis of temperature and thermal dose response of biological tissues to thermal non-equilibrium during hyperthermia therapy, *Medicine Engineering and Physics*, vol. 30(2), March 2008, pp. 135-143.

[19] Wessapan, T., Srisawatdhisukul, S. and Rattanadecho, P. (2011) The effects of dielectric shield on specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage microwave energy, *International Communications in Heat and*



Mass Transfer, vol. 38, December 2010, pp. 255-262.

[20] Thiebaut, C. and Lemonnier, D. (2005) Threedimensional modelling and optimisation of thermal fields induced in a human body during hyperthermia, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 41(6), May 2002, pp. 500-508.

[21] Lee, D.Y. and Vafai, K. (1999) Analytical characterization and conceptual assessment of solid and fluid temperature differentials in porous media, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42(3), February 1999, pp. 423-435.

[22] Wessapan, T., Srisawatdhisukul, S. and Rattanadecho, P. (2011) Numerical analysis of specific absorption rate and heat transfer in the human body exposed to leakage microwave power at 915 MHz and 2,450 MHz, *ASME journal of Heat Transfer*, vol. 133, May 2011, pp. 051101-1-051101-13.

ตารางที่ 1 ค่าความพรุน ขนาดรัศมีของหลอดเลือด ความเร็วของหลอดเลือด และค่าสัมประสิทธิ์การ ถ่ายเทความร้อนปริมาตรเฉพาะที่ของหลอดเลือดชนิดต่าง ๆ ที่พิจารณา [17-18]

ชนิดของหลอดเลือด	ค่าความพรุน	ขหาดรัศมีของ	ความเร็วของ	ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน
		หลอดเลือด	หลอดเลือด	ปริมาตรเฉพาะที่
	(-)	(mm)	(cm/s)	(W/m.K)
หลอดเลือดฝอย (Capillaries)	0.0659	4x10 ⁻³	0.092	1.99x10 ⁹
หลอดเลือดดำใหญ่ (Large veins)	0.2418	3	4.1	1.30×10^{4}
กิ่งก้านของหลอดเลือดแดง (Arterial branches)	0.0549	0.5	8.85	1.06×10^{5}
กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ (Venous branches)	0.2967	1.2	1.54	2.83x10 ⁴

ตารางที่ 2 แสดงค่าคุณสมบัติไดอิเล็กตริกและคุณสมบัติทางความร้อนของของเนื้อเยื่อสมองและเลือด

คุณสมบัติ	เนื้อเยื่อสมอง (สถานะเนื้อเยื่อ/ของแข็ง)	เลือด (สถานะเลือด/ของเหลว)
ค่าความหนาแน่น (Density (kg/m ³))	1038 [9]	1058 [22]
ี่ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity (J/kg .°C))	3650 [9]	3960 [22]
ี่ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity (W/m·°C))	0.535 [9]	0.450 [22]
ค่าเปอร์มิตติวิตี้สัมพัทธ์ (Relative Permittivity (-))	45.805 [9]	58.30 [22]
ี่ ค่าการนำไฟฟ้า (Electric conductivity (S/m))	0.765 [9]	2.54 [22]



รูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดที่ได้จากแบบจำลองกับงานวิจัยที่ [16] ที่ P* = 10 100 และ 500 เมื่อ f* = 0.6 , Φ = 0.1 และ Bi = 10



รูปที่ 3 อิทธิพลของกำลังของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดภายในเนื้อเยื่อสมอง วัสดุพรุนที่มีการไหลของหลอดเลือดต่างชนิดกันคือ (a) หลอดเลือดฝอย (b) กิ่งก้านของหลอดเลือดแดง (c) หลอดเลือดดำใหญ่ และ (d) กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ที่ f* = 0.2 และ Φ = 1



การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28

รูปที่ 4 อิทธิพลของความถี่ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าต่อการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดภายในเนื้อเยื่อสมอง วัสดุพรุนที่มีการไหลของหลอดเลือดต่างชนิดกันคือ (a) หลอดเลือดฝอย (b) กิ่งก้านของหลอดเลือดแดง (c) หลอดเลือดดำใหญ่ และ (d) กิ่งก้านของหลอดเลือดดำ ที่ P* = 500 และ Φ = 1