

การเปรียบเทียบผลการกระจายตัวอุณหภูมิในเนื้อเยื่อสมองแบบหลายชั้นจากแบบจำลองต่าง ๆ A Comparison of the Temperature Distribution in the Multi-Layer Brain Tissue from Multi-Models

พรทิพย์ แก่งอินทร์^{1*} และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

25/25 ถนนพุทธมณฑลสาย 4 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120

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

บทคัดย่อ

สมอง (Brain) ถือเป็นอวัยวะที่สำคัญซึ่งมีหน้าที่ในการควบคุมการเคลื่อนไหว รักษาสมดุลภายในร่างกาย (Homeostasis) และเกี่ยวข้องกับพฤติกรรมด้านต่างๆ ของร่างกาย เช่น การหายใจ หรือการเต้นของหัวใจ เป็นต้น ผลกระทบจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยภายในสมองอาจส่งผลกระทบต่อการทำงานของด้านสรีรวิทยาทางความร้อน (Thermo-physiologic) ได้ เนื่องจากการพิจารณาด้านจริยธรรมการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองในการทดลองจึงถูกจำกัด ดังนั้นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองจากการวิเคราะห์เชิงตัวเลข (Numerical analysis) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ งานวิจัยนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลการกระจายตัวอุณหภูมิ (Temperature distribution) ภายในเนื้อเยื่อสมองแบบหลายชั้น (Multi-layer) จากใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองไบโอฮีท (Bioheat model) แบบจำลองของ Klinger (Klinger model) แบบจำลองวัสดุพอร์นแบบสมดุลทางความร้อน (Local thermal equilibrium (LTE) model) และแบบจำลองวัสดุพอร์นแบบไม่สมดุลทางความร้อน (Local thermal non-equilibrium (LTNE) model) เพื่อหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด แบบจำลองของเนื้อเยื่อสมองจะประกอบไปด้วยชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) ชั้นกระดูก (Bone) และชั้นหนังศีรษะ (Scalp) และสมการถ่ายเทความร้อนจะถูกแก้ปัญหามาผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM))

คำหลัก: การกระจายตัวอุณหภูมิ, เนื้อเยื่อสมอง, ไฟไนต์เอลิเมนต์, วัสดุพอร์น

Abstract

Brain is an important organ which is responsible for movement control, homeostasis and related to the behaviors of the body such as breathing or heartbeat etc. The severity of the physiological effect produced by small temperature increases within the brain may affect the thermo-physiologic response. Due to ethical consideration, the study of heat transfer within the brain tissue for experimental purposes is limited. Therefore, the study of heat transfer within the brain tissue from numerical analysis is another alternative that is gaining attention. This research presents a comparison of temperature distributions by using the heat transfer models. This includes Bioheat model, Klinger model, Local thermal equilibrium (LTE) model and Local thermal non-equilibrium (LTNE) model to find a model that is most appropriate. The brain tissue model is consisted of white matter, grey matter, bone and scalp. In addition, heat transfer equations are solved using the finite element method (FEM).

Keywords: Temperature distribution, Brain tissue, Finite element, Porous media

BME-05

1. บทนำ

ความซับซ้อนภายในโครงสร้างของสมอง (Brain) และค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ของเนื้อเยื่อชั้นต่างๆ ภายในสมองถือเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองสามารถทำได้ยาก การศึกษาการถ่ายเทความร้อนจะทำให้ทราบการกระจายตัวของอุณหภูมิ (Temperature distribution) ที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อสมอง เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อมภายนอกเพียงเล็กน้อยเนื้อเยื่อสมองก็จะมีผลกระทบต่อทางด้านสรีรวิทยาทางความร้อน (Thermo-physiologic) เพื่อปรับให้อุณหภูมิภายในมีความสมดุล อย่างไรก็ตามการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองจากการทดลองจริงนั้นเป็นวิธีการที่สามารถทำได้ยาก [1] เนื่องจากข้อจำกัดทางด้าน การทดลองในด้านต่างๆ เช่น การหาสมองมนุษย์จริงมาใช้ในการทดลอง หรือการจำลองพฤติกรรมจริงของอวัยวะจากสิ่งแวดล้อมภายนอกที่ต้องการศึกษา มีงานวิจัยจำนวนหนึ่งได้ศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากการทดลองโดยใช้สมองของสัตว์แทน [2-3] แต่อย่างไรก็ตามผลที่ได้ก็ยังไม่สามารถจะจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในสมองมนุษย์ได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากความแตกต่างของค่าคุณสมบัติของสมองของสัตว์และสมองมนุษย์ที่มีความแตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองจากการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีความสะดวกที่จะสามารถจำลองพฤติกรรม การตอบสนองด้านการถ่ายเทความร้อนจากการเปลี่ยนแปลงสิ่งแวดล้อมภายนอกได้ใกล้เคียงกับสมองมนุษย์จริงมากกว่าวิธีการทดลอง [1] ในหลายปีที่ผ่านมาจึงมีการพัฒนาแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อ สมองผ่านวิธีการจำลองเชิงตัวเลขอย่างมากมาย

ในอดีตการศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อชีวภาพ (Biological tissue) ชนิดต่างๆ อย่างเช่น เนื้อเยื่อ สมองโดยส่วนใหญ่มักจะใช้แบบจำลองไบโอฮีท (Bioheat model) ในการศึกษา โดยแบบจำลองไบโอฮีทจะอยู่บนพื้นฐานของสมการไบโอฮีท (Bioheat equation) ซึ่งถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Pennes [4] โดยแบบจำลองนี้จะสมมติให้อุณหภูมิของเลือดภายในหลอดเลือดฝอย (Capillary) เท่ากับอุณหภูมิของแกนของร่างกาย ทำให้

อุณหภูมิภายในหลอดเลือดฝอยเท่ากับอุณหภูมิของเลือดภายในเส้นเลือดหลัก (เส้นเลือดแดงใหญ่และเส้นเลือดดำใหญ่) [5] แม้แบบจำลองไบโอฮีทจะพิจารณาการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดซึ่งถูกแสดงด้วยเทอมการแพร่กระจายตัวของเลือด (Blood perfusion rate term) $(\rho_b C_b \omega_b (T_b - T_t))$ แต่การถ่ายเทความร้อนหลักในสมการไบโอฮีทจะเป็นการนำความร้อน (Conduction heat transfer) ด้วยเหตุนี้จึงอาจทำให้การศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ อาจยังไม่สมบูรณ์ได้ ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองไบโอฮีท สามารถพบได้ในงานวิจัย [6-9] เนื่องจากความง่ายของสมมติฐานของแบบจำลองไบโอฮีทข้างต้น จึงมีงานวิจัยบางส่วนพยายามจะปรับปรุงแบบจำลองไบโอฮีทเพื่อลดข้อจำกัดด้านต่างๆ การศึกษาการกระจายตัวของอุณหภูมิของเนื้อเยื่อที่ช่วงอุณหภูมิสูงในระหว่างการรักษาโรคมะเร็งโดยใช้ความร้อน (Thermal ablation) โดยใช้สมการไบโอฮีทที่ถูกปรับปรุง (Modified bioheat equation) ซึ่งเพิ่มเทอมการระเหยของน้ำภายในถูกนำเสนอโดย Yang และคณะ [10] Klinger [11] ได้พิจารณาเทอมการพาความร้อน (Convection heat transfer term) เนื่องจากการไหลของเลือดภายในสมการไบโอฮีท ซึ่งแบบจำลองของ Klinger ถูกใช้ในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนเพื่อเปรียบเทียบกับ การถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองไบโอฮีทในงานวิจัย [12-13]

ในความเป็นจริงแล้วภายในเนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ อย่างเช่นสมองมนุษย์ จะประกอบไปด้วยหลอดเลือดขนาดเล็ก (Microvascular) และหลอดเลือดฝอย (Capillary) ขนาดเล็กที่ไหลอยู่ภายในจำนวนมาก จึงสามารถถือได้ว่ามีโครงสร้างของวัสดุพรุน (Porous media) [14-15] การศึกษาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้แบบจำลองของวัสดุพรุน (Porous media model) จะมีสมมติฐานที่เป็นข้อจำกัดที่น้อยกว่าการใช้แบบจำลองไบโอฮีท [16] โดยแบบจำลองของวัสดุพรุนสามารถแบ่งได้เป็นสองประเภทคือ แบบสมดุลทางความร้อน (Local thermal equilibrium (LTE)) และแบบไม่สมดุลทางความร้อน (Local thermal non-equilibrium (LTNE)) [13,16] แบบจำลองที่สมดุลทางความร้อนจะอยู่บน

BME-05

สมมติฐานที่ให้อุณหภูมิของสถานะเนื้อเยื่อหรือของแข็ง (Tissue / Solid phase) เท่ากับอุณหภูมิของสถานะของเลือดหรือของเหลว (Blood / Fluid phase) ในทุกๆ ตำแหน่งที่พิจารณาภายในแบบจำลองวัสดุพอร์น ซึ่งจะใช้สมการถ่ายเทความร้อนเพียงหนึ่งสมการในการวิเคราะห์ [17] อย่างไรก็ตามแบบจำลองนี้จะไม่เหมาะสมสำหรับสภาวะบางประการ อาทิ การถ่ายเทความร้อนที่มีการไหลของเลือดที่ความเร็วเลือดสูงๆ การถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อที่มีค่าความพอร์นค่อนข้างต่ำ และไม่เหมาะสมกับเนื้อเยื่อที่ได้รับอิทธิพลจากแหล่งความร้อนค่อนข้างสูง [13] ดังนั้นในกรณีนี้จึงควรใช้แบบจำลองของวัสดุพอร์นแบบไม่สมดุลทางความร้อนในการวิเคราะห์แทน โดยแบบจำลองแบบไม่สมดุลทางความร้อนจะประกอบด้วยสมการถ่ายเทความร้อนสองสมการคือสมการของเนื้อเยื่อหรือของแข็งและสมการของเลือดหรือของเหลว และพิจารณาเทอมการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดรวมด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากความซับซ้อนของโครงสร้างภายในเนื้อเยื่อสมองที่พิจารณาเป็นวัสดุพอร์น ในปัจจุบันจึงยังมีงานวิจัยอยู่จำนวนน้อยมากที่ศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของวัสดุพอร์น

เพื่อให้แบบจำลองเนื้อเยื่อสมองที่ศึกษามีความสมบูรณ์ใกล้เคียงกับลักษณะทางกายภาพจริงมากที่สุด และสามารถอธิบายปรากฏการณ์การถ่ายโอนความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองเมื่อได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงจากสิ่งแวดล้อมภายนอก งานวิจัยนี้ฉบับนี้จึงทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบผลการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองแบบหลายชั้น (Multi-layer) จากการใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองไมโอฮิท แบบจำลองของ Klinger แบบจำลองวัสดุพอร์นแบบสมดุลทางความร้อนและไม่สมดุลทางความร้อน เพื่อหาแบบจำลองที่มีความเหมาะสมมากที่สุด สมการถ่ายเทความร้อนจะถูกแก้ปัญหาค่าผ่านระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM)) ผลจากแบบจำลองที่ศึกษาจะถูกเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลจากแบบจำลองในงานวิจัยก่อนหน้านี้ โดยแบบจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้สามารถใช้เป็นพื้นฐานในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและศึกษาพฤติกรรมกรรมการตอบสนองทางด้าน

ความร้อนภายในสมองมนุษย์เมื่อได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งแวดล้อมภายนอก

2. แบบจำลองและการวิเคราะห์เชิงทฤษฎี

2.1 แบบจำลองเนื้อเยื่อสมองที่ใช้ในการวิเคราะห์

ลักษณะของสมองมนุษย์จะมีลักษณะคล้ายกับครึ่งวงกลม [1,9] ดังนั้นแบบจำลองเนื้อเยื่อสมองที่ใช้ในการศึกษานี้จะจำลองให้มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปครึ่งวงกลมแบบหลายชั้น (Multi-layer) โดยขนาดของเนื้อเยื่อสมองจะจำลองจากขนาดของสมองมนุษย์ผู้ใหญ่ (Adult) [8] รูปที่ 1(ก) จะแสดงรูปจำลองสมองมนุษย์จริงทางด้านหน้า [1] และรูปที่ 1(ข) จะแสดงแบบจำลองของชั้นต่างๆ ภายในเนื้อเยื่อสมอง โดยชั้นของแบบจำลองเนื้อเยื่อสมองจะประกอบไปด้วยชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter) ชั้นกระดูก (Bone) และชั้นหนังศีรษะ (Scalp) ซึ่งแต่ละชั้นจะมีค่าคุณสมบัติทางความร้อน (Thermal properties) ที่แตกต่างกัน แบบจำลองที่ศึกษาจะพิจารณาในพิกัดสองมิติในระนาบแกน x และ y ดังแสดงในรูปที่ 1(ข) ขนาดของรัศมี r จากจุดศูนย์กลางของครึ่งวงกลม (จุดกำเนิด $(0,0)$) และค่าคุณสมบัติทางความร้อนของชั้นต่างๆ ภายในเนื้อเยื่อสมองจะแสดงในตารางที่ 1

รูปที่ 2 จะแสดงแบบจำลองเนื้อเยื่อสมองที่พิจารณาเป็นวัสดุพอร์น ซึ่งขนาดของชั้นต่างๆ ภายในเนื้อเยื่อสมองและค่าคุณสมบัติทางความร้อนจะมีค่าเท่ากันดังแสดงในตารางที่ 1 โดยส่วนประกอบภายในเนื้อเยื่อสมองวัสดุพอร์นจะแบ่งออกเป็นสามส่วนประกอบหลักๆ คือ หลอดเลือด (Blood vessels) เนื้อเยื่อ (Cells) และพื้นที่ภายในช่องว่างระหว่างหลอดเลือดและเนื้อเยื่อ (Interstitial space) และจะพิจารณาให้ส่วนประกอบของหลอดเลือดเป็นพื้นที่ของหลอดเลือด (Vascular region) หรือเรียกว่าสถานะของเลือด / ของเหลว และรวมส่วนประกอบของเนื้อเยื่อและพื้นที่ภายในช่องว่างระหว่างหลอดเลือดและเนื้อเยื่อเป็นพื้นที่ส่วนใหญ่ของหลอดเลือด (Extra-vascular region) หรือเรียกว่าสถานะของเนื้อเยื่อ / ของแข็ง [14-15]

แบบจำลองเนื้อเยื่อสมองที่ศึกษาจะถูกพิจารณาให้มีความสมบัติเป็นวัสดุเนื้อเดียว (Homogenous material) มีความสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง (Isotropic) ไม่มีการ

BME-05

เปลี่ยนแปลงสถานะ และไม่เปลี่ยนแปลงปฏิกิริยาเคมีภายในแบบจำลองเนื้อเยื่อสมองเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในกรณีของแบบจำลองวัสดุพรุนจะพิจารณาให้ช่องว่างระหว่างเนื้อเยื่อเต็มเต็มไปด้วยเลือด (Saturated with blood) เนื้อเยื่อและเลือดเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน (พิจารณาเทอมการแลกเปลี่ยนความร้อนเนื่องจากการพาความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือด (Tissue-blood convective heat exchange term) และเลือดจะมีการไหลด้วยความเร็วคงตัว

2.2 การวิเคราะห์เชิงทฤษฎีของการถ่ายเทความร้อน

ในการศึกษานี้จะทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองจากการใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ โดยเริ่มจากการศึกษาแบบจำลองไบโอฮีท สมการไบโอฮีทในสภาวะไม่คงตัว (Transient bioheat equation) ที่ใช้ในแบบจำลองไบโอฮีทจะแสดงในสมการที่ (1) [6-7] :

$$(\rho C)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \nabla \cdot (k_t \nabla T_t) + \rho_b C_b \omega_b (T_b - T_t) + Q_{met} \quad (1)$$

เมื่อตัวห้อย t และ b แทนเนื้อเยื่อ (Tissue) และเลือด (Blood) ตามลำดับ k คือค่าการนำความร้อนหรือสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal conductivity (W/m.K)) ρ คือค่าความหนาแน่น (Density (kg/m³)) C คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity (J/kg.K)) ω คืออัตราการแพร่กระจายตัวของเลือด (Blood perfusion rate (ml/min.100g)) T คือค่าอุณหภูมิ (Temperature (°C)) และ Q_{met} คือแหล่งความร้อนจากกระบวนการสันดาปภายใน (Metabolic heat generation source (W/m³)) โดยค่าอุณหภูมิของเลือด T_b จะสมมติให้มีความสม่ำเสมอและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิปกติของร่างกายคือ 37 °C

แบบจำลองของ Klinger ซึ่งอยู่บนสมมติฐานแบบ Quasi-steady state จะสามารถเขียนได้เป็น [18] :

$$(\rho C)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} + \phi(\rho C)_b (u \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k_t \nabla T_t) + Q_{met} \quad (2)$$

เมื่อ ϕ คือค่าความพรุน (Porosity (-)) ของเนื้อเยื่อ และ u คือค่าความเร็วของเลือด (Blood velocity (m/s)) โดยความแตกต่างหลักของสมการที่ (1) และ (2) คือในสมการไบโอฮีทในสมการที่ (1) จะพิจารณาเทอมการแพร่กระจายตัวของเลือด (Blood perfusion rate) ในขณะที่เทอมนี้ในสมการที่ (2) จะถูกแทนที่ด้วยเทอมการพาความร้อน เนื่องจากการไหลของเลือดภายในเนื้อเยื่อ

สำหรับสมการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาโดยใช้แบบจำลองวัสดุพรุนที่ไม่สมดุลทางความร้อนที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์การถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองวัสดุพรุนของสถานะเนื้อเยื่อและเลือดจะแสดงในสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ คือ [13] :

สถานะเนื้อเยื่อ:

$$(1-\phi)(\rho C)_t \frac{\partial T_t}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{t,eff} \nabla T_t) - h_{tb} a_{tb} (T_t - T_b) - \omega_b C_b (T_t - T_b) + (1-\phi) Q_{met,t} \quad (3)$$

สถานะเลือด:

$$\phi(\rho C)_b \left(\frac{\partial T_b}{\partial t} + u \cdot \nabla T_b \right) = \nabla \cdot (k_{b,eff} \nabla T_b) + h_{tb} a_{tb} (T_t - T_b) + \omega_b C_b (T_t - T_b) + \phi Q_{met,b} \quad (4)$$

$$\text{เมื่อ } k_{b,eff} = \phi k_b \text{ และ } k_{t,eff} = (1-\phi) k_t \quad (5)$$

โดยตัวห้อย eff , t และ b แทนค่าประสิทธิภาพ (Effective value) สถานะเนื้อเยื่อ และสถานะเลือดตามลำดับ h_{tb} คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือด (Tissue-blood interfacial heat transfer coefficient (W/m.K)) ซึ่งในที่นี้จะพิจารณาให้มีค่าคงที่ซึ่งเท่ากับ 170 W/m.K [18] และ a_{tb} คือพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือด (Volumetric transfer area between the tissue and the blood (m²/m³) ซึ่งเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับค่าความเร็วของหลอดเลือดชนิดต่างๆ

โดยค่าความพรุนที่เลือกพิจารณาจะมีค่าเท่ากับ 0.025 [13] ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของเลือดและพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดที่ค่าความพรุน 0.025 จะแสดงดังตารางที่ 2 [13]

BME-05

เมื่อพิจารณาแบบจำลองวัสดุพหุที่สมดุลทางความร้อน สมการถ่ายเทความร้อนที่ขึ้นกับเวลาจะได้อากการรวมสมการที่ (3) และสมการที่ (4) และกำหนดให้ $T_t = T_b = T$ สมการถ่ายเทความร้อนที่ได้จะเขียนได้เป็น [18] :

$$\left((1-\phi)(\rho C)_t + \phi(\rho C)_b \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \phi(\rho C)_b (\mathbf{u} \cdot \nabla T_b) = \nabla \cdot \left((1-\phi)k_t + \phi k_b \right) \nabla T + Q_{met} \quad (6)$$

สำหรับเงื่อนไขขอบเขตในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจะประกอบด้วย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของสิ่งแวดล้อมภายนอกต่อการกระจายตัวอุณหภูมิภายในแบบจำลองเนื้อเยื่อสมอง ดังนั้นเงื่อนไขที่ผิวด้านนอกของชั้นหนังศีรษะจะมีค่าอุณหภูมิคงที่เท่ากับอุณหภูมิของสิ่งแวดล้อม ซึ่งในที่นี้คือ 30 °C [6] :

$$\text{ที่ } r = r_4, \quad T_{scalp} = T_{ambient} = 30 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (7)$$

รอยต่อระหว่างแต่ละชั้นของเนื้อเยื่อสมองจะสมมติให้มีอุณหภูมิเท่ากันและไม่มีการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ความร้อน (Heat flux) [6]

และด้านล่างของเนื้อเยื่อสมอง ($x = 0$) เนื่องจากเป็นบริเวณแกนของสมอง ดังนั้นจะพิจารณาให้มีคุณสมบัติเป็นฉนวน หรือไม่มีการถ่ายเทความร้อน:

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

อุณหภูมิเริ่มต้น (Initial temperature) ของเนื้อเยื่อสมองจะสมมติให้มีความสม่ำเสมอและมีค่าเท่ากับอุณหภูมิปกติของร่างกายคือ 37 °C

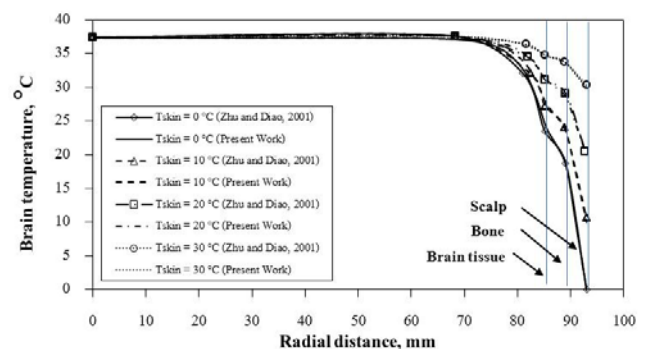
สมการถ่ายเทความร้อนในทุกแบบจำลองจะถูกแก้ปัญหาคด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method (FEM)) ผ่านโปรแกรม COMSOLTM Multiphysics เพื่อศึกษาการกระจายตัวอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในเนื้อเยื่อสมองชั้นต่างๆ ในระยะเวลาการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด 720 s โดยแบบจำลองจะถูกคำนวณโดยใช้เอลิเมนต์ (Element) รูปสามเหลี่ยม และใช้ฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงแบบ

ลากรองจอันดับที่สอง (Lagrange quadratic interpolation function) ในการประมาณค่าอุณหภูมิในแต่ละเอลิเมนต์

3. ผลและการวิเคราะห์ผล

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่ศึกษาจะทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของอุณหภูมิของเนื้อเยื่อสมองที่ได้จากการใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในงานวิจัยนี้กับผลที่ได้จากงานวิจัยที่ [6] ด้วยสมการและเงื่อนไขในการวิเคราะห์เช่นเดียวกันกับในงานวิจัยที่ [6] โดยในการตรวจสอบความถูกต้องจะใช้แบบจำลองของสมองผู้ใหญ่ซึ่งประกอบด้วยชั้นของเนื้อเยื่อสมอง (Brain tissue) ชั้นกระดูก และชั้นหนังศีรษะ ที่อุณหภูมิที่ผิวของชั้นหนังศีรษะมีอุณหภูมิที่แตกต่างกัน 4 อุณหภูมิ คือ 0 °C 10 °C 20 °C และ 30 °C โดยอุณหภูมิของเลือดมีค่าคงที่ที่ 37 °C และใช้สมการไปโออีทีในการวิเคราะห์ ผลจากการเปรียบเทียบจะแสดงในรูปที่ 3 จากรูปพบว่า การกระจายตัวอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 30 °C จะมีค่ามากกว่าที่ 20 °C 10 °C และ 0 °C ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบกับผลจากงานวิจัยที่ [6] พบว่าการกระจายตัวอุณหภูมิของสมองในชั้นสมองทั้ง 3 ชั้น ที่อุณหภูมิที่ผิวทั้ง 4 อุณหภูมิ จากการใช้แบบจำลองเชิงตัวเลขในการศึกษานี้ และผลจากงานวิจัยที่ [6] จะมีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ดังนั้นแบบจำลองที่ใช้ในการวิเคราะห์ในการนำเสนอนี้ จึงมีความน่าเชื่อถือสามารถใช้ในการศึกษาในส่วนอื่นๆ ต่อไปได้



รูปที่ 3 ผลการเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิของชั้นต่างๆ ภายในสมองที่ได้จากแบบจำลองกับงานวิจัยที่ [6] ที่ $T_{skin} = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ 10 °C 20 °C และ 30 °C

BME-05

3.2 การกระจายตัวอุณหภูมิจากการใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อสมองแบบต่างๆ

ในรูปที่ 4 จะแสดงรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองไบโอฮีทที่เวลา 60 s 240 s 480 s และ 720 s โดยรูปที่ 5 จะแสดงรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของ Klinger ที่เวลา 60 s 240 s 480 s และ 720 s ที่ค่า $\phi = 0.025$ และ $u = 3.4$ cm/s ส่วนรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของวัสดุพอร์นที่สมดุลทางความร้อน ที่เวลา 60 s 240 s 480 s และ 720 s ที่ค่า $\phi = 0.025$ และ $u = 3.4$ cm/s จะแสดงในรูปที่ 6 และรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของวัสดุพอร์นที่ไม่สมดุลทางความร้อนที่เวลา 60 s 240 s 480 s และ 720 s ที่ค่า $\phi = 0.025$, $u = 3.4$ cm/s, $h_{tb} = 170$ W/m.K และ $a_{tb} = 143$ m²/m³ จะแสดงในรูปที่ 7 และ 8 ตามลำดับ จากการเปรียบเทียบพบว่ารูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิจากการใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน 4 ชนิดพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยจะเห็นว่ารูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิจากการใช้แบบจำลองไบโอฮีทจะมีความสมดุลกันทางด้านซ้ายมือและด้านขวามือ เนื่องจากมีการนำความร้อนเป็นการถ่ายเทความร้อนหลัก โดยอุณหภูมิจะมีค่าเริ่มต้นจากอุณหภูมิที่ได้กำหนดไว้ของชั้นหนังศีรษะคือ 30 °C และเพิ่มขึ้นในแต่ละชั้นจนถึงชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter) ส่วนรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิจากการใช้แบบจำลองของ Klinger และแบบจำลองวัสดุพอร์นที่สมดุลทางความร้อนจะมีลักษณะที่คล้ายกันคือด้านซ้ายมือของเนื้อเยื่อสมองจะมีอุณหภูมิที่ต่ำและด้านขวามือจะมีอุณหภูมิที่สูง เนื่องจากสมการถ่ายเทความร้อนจากแบบจำลองทั้งสองจะมีลักษณะที่คล้ายกันแตกต่างกันเพียงสัมประสิทธิ์หน้าเทอมที่ขึ้นกับเวลา (Transient term) และสัมประสิทธิ์หน้าเทอมการนำความร้อน (Conduction heat transfer term) ซึ่งในแบบจำลองของ Klinger จะพิจารณาเพียงสถานะของเนื้อเยื่อเท่านั้นดังแสดงในสมการที่ (2) ในขณะที่แบบจำลองวัสดุพอร์นที่สมดุลทางความร้อนจะพิจารณาทั้งสถานะของเนื้อเยื่อและเลือดดังแสดงในสมการที่ (6) จึงทำให้รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะคล้ายกัน แต่ค่า

อุณหภูมิในแต่ละช่วงเวลาจะมีความแตกต่างกันเล็กน้อย เมื่อพิจารณาแบบจำลองการกระจายตัวอุณหภูมิจากการใช้แบบจำลองวัสดุพอร์นที่ไม่สมดุลทางความร้อนจะพบว่ารูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อจะแตกต่างกับอุณหภูมิของเลือดอย่างชัดเจนเนื่องจากในงานวิจัยนี้พิจารณาที่ค่าความเร็วของเลือดที่ค่อนข้างสูงคือ 3.4 cm/s ซึ่งที่ค่าความเร็วนี้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดที่ค่อนข้างน้อยส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดน้อย ทำให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดแตกต่างกันมาก เมื่อพิจารณาค่าอุณหภูมิสูงสุดในแต่ละช่วงเวลาจากการใช้แบบจำลองชนิดต่างๆ จะพบว่าในทุกๆ แบบจำลองค่าอุณหภูมิสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ยกเว้นเพียงอุณหภูมิของเลือดจากการใช้แบบจำลองของวัสดุพอร์นที่ไม่สมดุลทางความร้อนที่มีค่าน้อยลงตามเวลาที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากอิทธิพลจากการพาความร้อน การกระจายตัวอุณหภูมิตามแนวแกนด้านล่างของเนื้อเยื่อสมองจากจุดศูนย์กลาง (0,0) ถึงความยาวตามแนวรัศมีของชั้นต่างๆ ภายในเนื้อเยื่อสมองที่ช่วงเวลาต่างๆ โดยใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนทั้ง 4 ชนิด จะแสดงในรูปที่ 9 จากรูปที่ 9 จะพบว่ามีความสอดคล้องกันเป็นอย่างดีกับรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิในรูปที่ 4 ถึงรูปที่ 8

เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่ส่งผลต่อความแตกต่างระหว่างการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดจากการใช้แบบจำลองของวัสดุพอร์นที่ไม่สมดุลทางความร้อน จึงทำการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วของเลือดตามค่าที่แสดงในตารางที่ 2 จากรูปที่ 10 พบว่าที่ค่าความเร็วของเลือด $u = 0.4$ cm/s และ $u = 2$ cm/s การกระจายตัวของเนื้อเยื่อและเลือดจะมีความใกล้เคียงกัน เนื่องจากที่ค่าความเร็วของเลือดทั้ง 2 ค่านี้จะมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดที่ค่อนข้างมากดังแสดงในตารางที่ 2 ส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดมาก ทำให้อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดมีความใกล้เคียงกัน ผลที่ได้จะตรงกันข้ามกับที่ค่าความเร็วของเลือด $u = 3$ cm/s และ $u = 3.4$ cm/s คืออุณหภูมิระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากที่ค่าความเร็วของเลือดทั้ง 2 ค่านี้มีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดที่ค่อนข้างน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้นที่ค่าความเร็วของเลือด $u = 3$ cm/s และ $u =$

BME-05

3.4 cm/s ควรจะใช้แบบจำลองของวัสดุพูนที่ไม่สมดุลทางความร้อนในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อน โดยพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดที่ค่าความเร็วของเลือด $u = 3$ cm/s จะมีความแตกต่างกันน้อยกว่าที่ค่าความเร็วของเลือด $u = 3.4$ cm/s

4. สรุปผล

บทความวิจัยนี้จะนำเสนอการเปรียบเทียบผลการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองแบบหลายชั้นจากใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ 4 ชนิด ซึ่งประกอบด้วยแบบจำลองไปโอฮีท แบบจำลองของ Klinger แบบจำลองวัสดุพูนแบบสมดุลทางความร้อน และแบบจำลองวัสดุพูนแบบไม่สมดุลทางความร้อน ผลจากการศึกษาผลพบว่ารูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองทั้ง 4 ชนิดจะมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยรูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิที่ได้จากแบบจำลองของ Klinger และแบบจำลองวัสดุพูนแบบสมดุลทางความร้อนจะมีความคล้ายคลึงกันที่ค่าความพูนและค่าความเร็วของเลือดที่เท่ากัน เมื่อพิจารณาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิจากการใช้แบบจำลองวัสดุพูนที่สมดุลทางความร้อนและไม่สมดุลทางความร้อนที่ค่าความพูนและค่าความเร็วของเลือดที่เท่ากันจะพบว่ามี ความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากค่าความพูนที่พิจารณามีค่าค่อนข้างต่ำ ($\phi = 0.025$) และค่าความเร็วเลือดที่พิจารณามีค่าค่อนข้างสูง ($u = 3.4$ cm/s) ซึ่งทำให้ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก ในกรณีนี้จึงควรใช้แบบจำลองวัสดุพูนแบบไม่สมดุลทางความร้อนในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนมากกว่าการใช้แบบจำลองวัสดุพูนแบบสมดุลทางความร้อน ซึ่งผลที่ได้นี้จะมีความสอดคล้องกันผลการวิจัยในงานวิจัยที่ผ่านมา [13] โดยค่าความเร็วของเลือดและพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดจะเป็นปัจจัยที่จะส่งผลต่อค่าความต่างระหว่างอุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือด โดยค่าความเร็วที่มากจะมีพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดที่น้อยส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดน้อย ทำให้ อุณหภูมิของเนื้อเยื่อและเลือดมีความแตกต่างกันมากในกรณีนี้จึงควรใช้แบบจำลองวัสดุพูนแบบไม่สมดุลทางความร้อนในการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแทน แม้

แบบจำลองไปโอฮีทจะมีข้อจำกัดด้านสมมติที่ค่อนข้างมาก แต่ก็เป็นแบบจำลองการถ่ายเทความร้อนที่นิยมนำมาศึกษาการถ่ายเทความร้อนภายในเนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ อย่างมากมาย การเลือกใช้แบบจำลองวัสดุพูนแบบสมดุลทางความร้อนหรือไม่สมดุลทางความร้อนก็ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ อาทิ ค่าความเร็วของเลือดและพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือด รวมทั้งค่าความพูน และแหล่งความร้อนจากภายนอก อย่างไรก็ตามแม้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแต่ละช่วงเวลาและในแต่ละแบบจำลองที่ศึกษาจะมีการเปลี่ยนแปลงไปไม่มาก แต่การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเพียงเล็กน้อยเพียง $0.2-0.3$ °C อาจส่งผลต่อการตอบสนองด้านพฤติกรรมเพื่อควบคุมอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงภายในเนื้อเยื่อสมองได้ [19] ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษานี้จะสามารถเป็นพื้นฐานในการศึกษาการถ่ายเทความร้อนและการตอบสนองทางด้านสรีรวิทยาทางความร้อนภายในเนื้อเยื่อชีวภาพชนิดต่างๆ ได้โดยไม่ต้องทำการทดลองในเนื้อเยื่อจริง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยภายใต้หมายเลขทุน TRG5780208 และมหาวิทยาลัยมหิดล

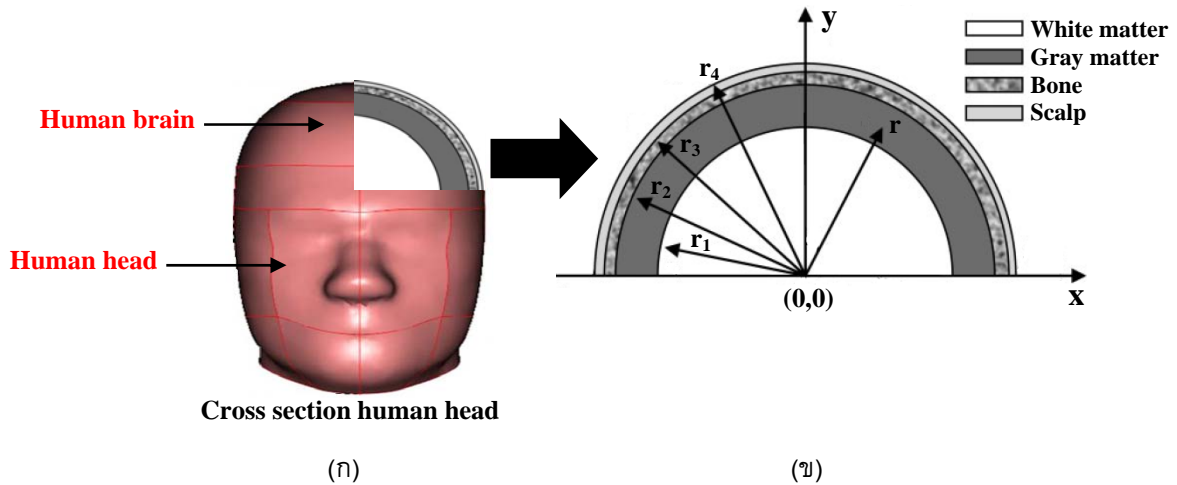
6. เอกสารอ้างอิง

- [1] 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.
- [2] Hayward, J.N. and Baker, M.A. (1968) Role of cerebral arterial blood in the regulation of brain temperature in the monkey, *American Journal of Physiology*, vol. 215, August 1968, pp. 389 – 403.
- [3] Fuller, A., Carter, R.N. and Mitchell, D. (1998) Brain and abdominal temperatures at fatigue in rats exercising in the heat, *Journal of Applied Physiology*, vol. 84(3), March 1998, pp. 877 – 883.

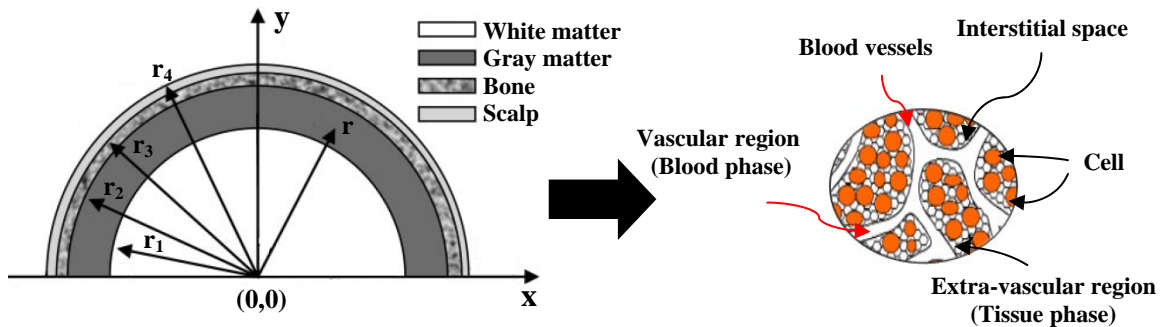
BME-05

- [4] Pennes, H.H. (1998) Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm, *Journal of Applied Physiology*, vol. 85(5-34), July 1998, pp. 65 – 76.
- [5] Becker, S. (2012) Analytic one dimensional transient conduction into a living perfuse/non-perfuse two layer composite system, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48(2), February 2012, pp. 317 – 327.
- [6] Zhu, L. and Diao, C. (2001) Theoretical simulation of temperature distribution in the brain during mild hypothermia treatment for brain injury, *Medical & Biological Engineering & Computing*, vol. 39, August 2001, pp. 681 – 687.
- [7] Diao, C., Zhu, L. and Wang, H. (2003) Cooling and rewarming for brain ischemia or injury: theoretical analysis, *Annals of Biomedical Engineering*, vol. 31(3), December 2002, pp. 346–353.
- [8] Konstas, A.A., Neimark, M.A., Laine, A.F. and Spellman, J.P. (2007) A theoretical model of selective cooling using intracarotid cold saline infusion in the human brain, *Journal of Applied Physiology*, vol. 102, April 2007, pp. 1329 – 1340.
- [9] Wessapan, T. 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.
- [10] Yang, D., Converse, M. and Mahvi, D. (2007) Expanding the bioheat equation to include tissue internal water evaporation during heating, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 54(8), August 2007, pp. 1382 – 1388.
- [11] Klinger, H. (1974) Heat transfer in perfused biological tissue I: general theory, *Bulletin of Mathematical Biology*, vol. 36(4), August 1974, pp. 403 – 415.
- [12] Peng, T., O'Neill, D.P. and Payne, S.J. (2011) A two-equation coupled system for determination of liver tissue temperature during thermal ablation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, January 2011, pp. 2100 – 2109.
- [13] Keangin, P. and Rattanadecho, P. (2013) Analysis of heat transport on local thermal non-equilibrium in porous liver during microwave ablation, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 67, August 2013, pp.46 – 60,
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Yuan, P. (2008) Numerical analysis of temperature and thermal dose response of biological tissues to thermal non-equilibrium during hyperthermia therapy, *Medical Engineering & Physics*, vol. 30, March 2007, pp. 135 – 143.
- [19] Adair, E.R., Adams, B.W. and Akel, G.M. (1984) Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior, *Bioelectromagnetics*, vol. 5(1), pp. 13 – 30.

BME-05



รูปที่ 1 แบบจำลองเนื้อเยื่อสมองที่ใช้ในการศึกษา 1(ก) รูปจำลองสมองมนุษย์จริงทางด้านหน้า [1] และ 1(ข) แบบจำลองของชั้นต่างๆ ภายในเนื้อเยื่อสมอง



รูปที่ 2 แบบจำลองเนื้อเยื่อสมองวัสดุพอร์นที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติทางความร้อนของชั้นต่างๆ ภายในสมอง [8]

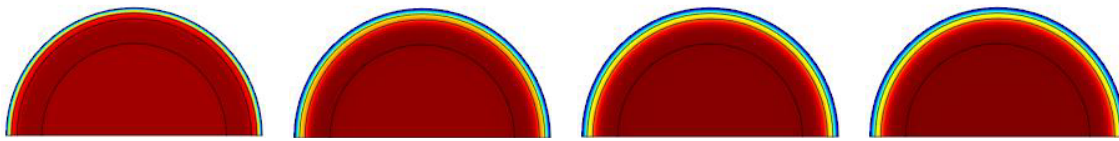
ชนิดชั้นต่างๆ ภายในสมอง	C	ρ	k	ω	Q_{met}	r
	(J/kg.K)	(kg/m ³)	(W/m.K)	(ml/min.100g)	(W/m ³)	(mm)
ชั้นหนังศีรษะ (Scalp)	4000	1000	0.342	2	363.4	93 (r_4)
ชั้นกระดูก (Bone)	2300	1520	1.16	1.8	368.3	89 (r_3)
ชั้นของสมองส่วนชั้นนอกที่มีสีเข้ม (Grey matter)	3700	1030	0.49	80	16700	85 (r_2)
ชั้นของสมองส่วนชั้นในที่มีสีอ่อน (White matter)	3700	1030	0.49	20	4175	67 (r_1)
เลือด (Blood)	3800	1050	0.5	N/A	N/A	N/A

N/A คือ Non-applicable

ตารางที่ 2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของเลือดและพื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือดที่ค่าความพอร์น 0.025 [13]

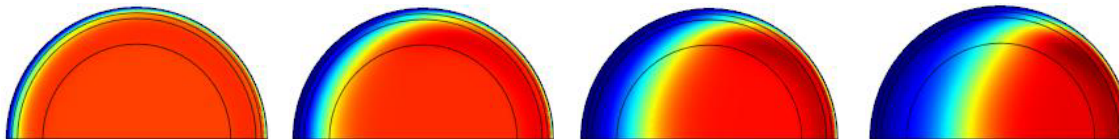
ค่าความพอร์น (Porosity (-))	พื้นที่การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรระหว่างเนื้อเยื่อและเลือด (Volumetric transfer area between the tissue and the blood (m ² /m ³))			
	u = 0.4 cm/s	u = 2 cm/s	u = 3 cm/s	u = 3.4 cm/s
$\phi = 0.025$	667	400	200	143

BME-05



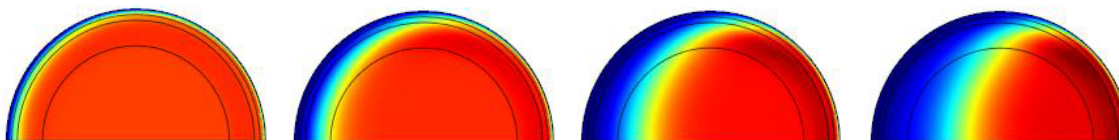
(ก) $t = 60$ s ($T_{\max} = 37.160$ °C) (ข) $t = 240$ s ($T_{\max} = 37.279$ °C) (ค) $t = 480$ s ($T_{\max} = 37.302$ °C) (ง) $t = 720$ s ($T_{\max} = 37.308$ °C)

รูปที่ 4 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองไบโอฮีท



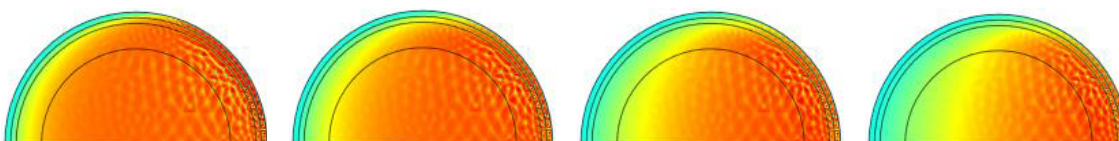
(ก) $t = 60$ s ($T_{\max} = 37.570$ °C) (ข) $t = 240$ s ($T_{\max} = 37.903$ °C) (ค) $t = 480$ s ($T_{\max} = 38.378$ °C) (ง) $t = 720$ s ($T_{\max} = 38.692$ °C)

รูปที่ 5 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของ Klinger
ที่ $\phi = 0.025$ และ $u = 3.4$ cm/s



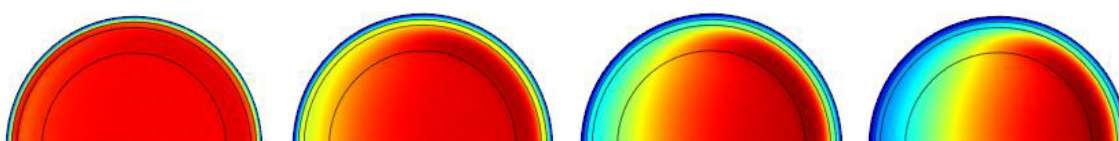
(ก) $t = 60$ s ($T_{\max} = 37.539$ °C) (ข) $t = 240$ s ($T_{\max} = 37.867$ °C) (ค) $t = 480$ s ($T_{\max} = 38.345$ °C) (ง) $t = 720$ s ($T_{\max} = 38.669$ °C)

รูปที่ 6 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของวัสดุพอรันที่สมดุลทางความร้อน
ที่ $\phi = 0.025$ และ $u = 3.4$ cm/s



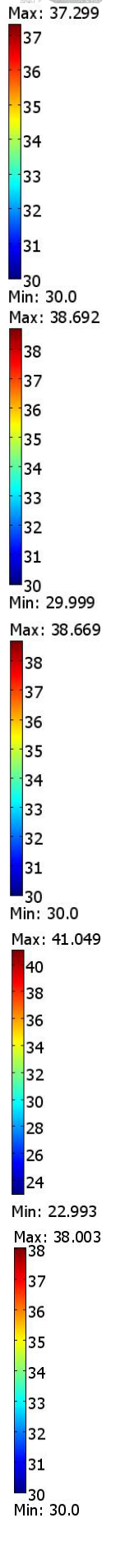
(ก) $t = 60$ s ($T_{\max} = 41.049$ °C) (ข) $t = 240$ s ($T_{\max} = 40.198$ °C) (ค) $t = 480$ s ($T_{\max} = 39.940$ °C) (ง) $t = 720$ s ($T_{\max} = 39.714$ °C)

รูปที่ 7 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของเลือดภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของวัสดุพอรันที่ไม่สมดุลทางความร้อน
ที่ $\phi = 0.025$, $u = 3.4$ cm/s, $h_{tb} = 170$ W/m.K และ $a_{tb} = 143$ m²/m³

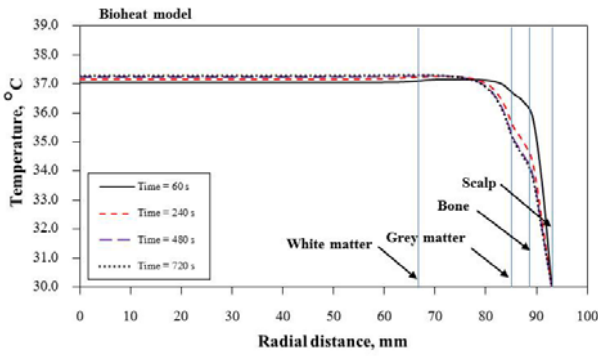


(ก) $t = 60$ s ($T_{\max} = 37.307$ °C) (ข) $t = 240$ s ($T_{\max} = 37.691$ °C) (ค) $t = 480$ s ($T_{\max} = 37.922$ °C) (ง) $t = 720$ s ($T_{\max} = 38.003$ °C)

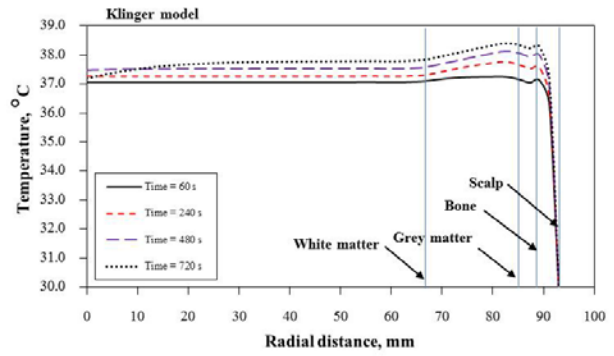
รูปที่ 8 รูปแบบการกระจายตัวอุณหภูมิของเนื้อเยื่อภายในเนื้อเยื่อสมองโดยใช้แบบจำลองของวัสดุพอรันที่ไม่สมดุลทางความร้อน
ที่ $\phi = 0.025$, $u = 3.4$ cm/s, $h_{tb} = 170$ W/m.K และ $a_{tb} = 143$ m²/m³



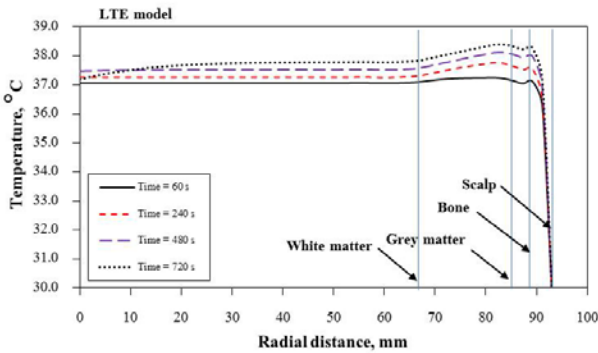
BME-05



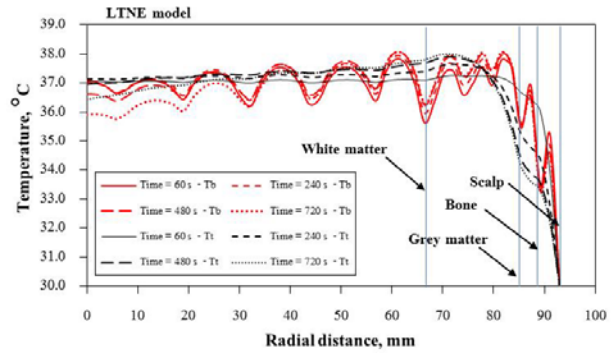
(ก) แบบจำลองไบโอฮีท



(ข) แบบจำลองของ Klinger

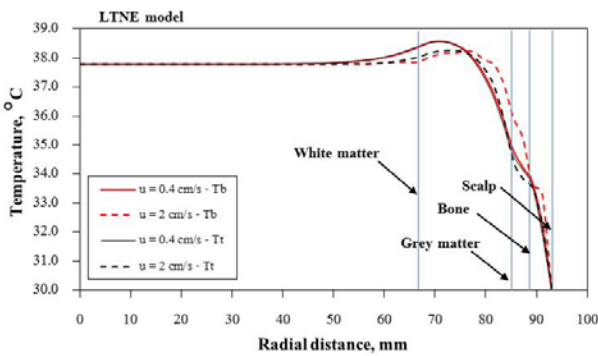


(ค) แบบจำลองของวัสดุพอร์นที่สมดุลทางความร้อน

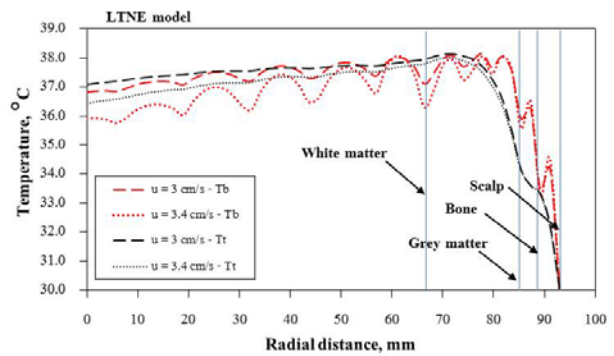


(ง) แบบจำลองของวัสดุพอร์นที่ไม่สมดุลทางความร้อน

รูปที่ 9 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ โดยใช้แบบจำลองการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆ



(ก) ที่ความเร็วของเลือด $u = 0.4 \text{ cm/s}$ และ $u = 2 \text{ cm/s}$



(ข) ที่ความเร็วของเลือด $u = 3 \text{ cm/s}$ และ $u = 3.4 \text{ cm/s}$

รูปที่ 10 การเปรียบเทียบการกระจายตัวอุณหภูมิที่ความเร็วของเลือดค่าต่างๆ
(แบบจำลองของวัสดุพอร์นที่ไม่สมดุลทางความร้อน)