

CST-2017

**การจำลองการกระจายอุณหภูมิของร่างกายทารกที่มีภาวะ hypothermia ที่ได้รับการ
รักษาด้วยตู้อบทารก ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์**

**Simulation of Temperature Distribution in infant: treatment with the incubator by
using Finite Element Method**

ภัสวดี ภัคดีสาร^{1*} และ วิโรจน์ ลิ้มตระการ²

^{1,2} คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ เลขที่ 99 หมู่ 18 ถ. พหลโยธิน

ต. คลองหนึ่ง อ. คลองหลวง จ. ปทุมธานี 12120

*ติดต่อ: tphatphak@hotmail.com, 0-2564-3001-9, 0-2564-3010

บทคัดย่อ

ทารกแรกเกิดโดยเฉพาะอย่างยิ่งทารกที่คลอดก่อนกำหนดมีความสามารถจำกัดในการปรับตัวเพื่อให้ อุณหภูมิร่างกายคงที่ (homeothermia) เนื่องจากศูนย์ควบคุมความร้อนในสมองส่วนไฮโปธาลามัส (hypothalamus) ยังทำหน้าที่ไม่สมบูรณ์ และยังมีพื้นที่ผิวของร่างกายมากเมื่อเทียบกับน้ำหนักตัวทำให้สูญเสียความร้อนได้ง่าย ประกอบกับไขมันสีน้ำตาล (brown fat) ใต้ผิวหนังมีน้อย ด้วยเหตุนี้ทำให้ร่างกายสูญเสียความร้อนออกไปได้ง่าย ส่งผลให้อุณหภูมิแกนกลางของร่างกาย (core body temperature) มีการเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมตลอดเวลา ซึ่งจะมีผลทำให้อัตราการเกิดโรค (morbidity) ทางด้านพัฒนาการทางสมองและสติปัญหาด้านต่างๆ และส่งผลต่ออัตราการตาย (mortality) ในทารกเพิ่มขึ้น การให้การดูแลทารกที่ให้ผลดีคือ เพิ่มอุณหภูมิร่างกายด้วยการลดปัจจัยการการสูญเสียความร้อนที่เกิดจากสิ่งแวดล้อมดังกล่าวข้างต้น และให้ความร้อนด้วยตู้อบทารก (incubator) เพื่อรักษาให้อุณหภูมิอยู่ในช่วง 36.5-37.5°C โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่สมองไม่ควรเกินที่กำหนด การศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อจำลองและวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่ตัวทารกได้รับจากตู้อบทารก และการกระจายความร้อนไปยังสมองส่วนสีเทา (gray matter) และสมองสีขาว (white matter) โดยใช้สมการชีวความร้อน (Bioheat equation) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ด้วยโปรแกรม ANSYS โดยกำหนดให้ทารกมีอัตราเมตาบอลิซึมภายในร่างกาย รวมทั้งสมองด้วย และถือว่าผลของการไหลของเลือดไปที่อวัยวะต่างๆ มีค่าน้อยมาก ขณะที่ทารกนอนจะไม่มีเปิดปิดตู้ ในการศึกษาพบว่า อุณหภูมิของที่ศีรษะมีความแตกต่างกัน เมื่อปรับอุณหภูมิไปที่ 36°C, 36.5°C และ 37°C จะไม่ทำให้อุณหภูมิของสมองทารกสูงเกิน 37.5°C คืออยู่ในช่วง 37.2-37.4°C ส่วนที่ลำตัวอุณหภูมิจะกระจายเท่ากัน ไม่มีความแตกต่างกัน เพียงแต่จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามสิ่งแวดล้อมที่ปรับค่า ทำให้ลำตัวมีอุณหภูมิสูงกว่าสมอง ในขณะที่อุณหภูมิสมองทั้ง 3 กรณีมีค่าใกล้เคียงกัน

คำหลัก: Infant incubator, Bioheat, Finite element method

CST-2017

Abstract

Premature infant has a limited ability to control body temperature due to hypothalamus is incomplete and cannot control core body temperature. Additionally, a ratio of surface area to body weight is more than adult. Then they will increase morbidity of brain and slowly development of Intelligence. If core body temperature decreases, mortality of infant increases. From this reason, Infant is treated by increasing body temperature and decreased the factor of heat lose by using the Incubator. In this study, the finite element method (FEM), bioheat equation and human physiological properties were used to simulate the temperature distribution in infant body under three constant air temperature conditions, i.e. 36°C, 36.5°C, and 37°C. The result showed that the temperature distribution in infant was in the range of 36°C - 37.37°C under constant air temperature 36°C. The maximum temperature in brain was 37.37 °C. In constant air temperature 36.5°C, the temperature distribution in newborn was between 36.5°C and 37.39°C. The maximum temperature in brain was 37.39 °C. The third condition, constant air temperature 37°C, the temperature distribution in body was 37°C - 37.40 °C. The maximum temperature in brain was 37.40 °C. In Summary, incubator is harmless for infant because the maximum temperature in brain is lower than 37.5°C if the constant air temperature is not over 37.5°C.

Keywords: Infant incubator, Bioheat , Finite element method

1. บทนำ

ทารกแรกเกิดที่มีอุณหภูมิร่างกายต่ำคือ ทารกที่มีอุณหภูมิแกนกลางน้อยกว่า 36.5 °C และไม่สามารถปรับตัวเพื่อให้อุณหภูมิกลับมาคงเดิมได้ เพราะหากปล่อยให้ทารกมีอุณหภูมิต่ำต่อไปจะส่งผลให้ทารกเกิดความพิการในอนาคตตามมา เพราะฉะนั้นจึงได้มีการใช้เครื่องให้ความอบอุ่นทารกเข้ามาช่วย เช่น ตู้อบอุ่นทารก (incubator) หรือ เครื่องแผ่รังสีความร้อน (radiant warmer) ได้มีงานวิจัยหลายงานที่มีการเปรียบเทียบผลของการใช้ตู้อบอุ่นทารก และเครื่องแผ่รังสีความร้อน โดยแสดงให้เห็นว่าการใช้ตู้อบอุ่นทารกสามารถควบคุมอุณหภูมิทารกได้ดีกว่าเครื่องแผ่รังสีความร้อน เนื่องจากเป็นระบบปิด สามารถควบคุมอากาศที่ผ่านทารกได้ อีกทั้งในปัจจุบันนี้ยังเป็นที่ยอมรับใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากว่ามีความสะดวกในการใช้งานและมีประสิทธิภาพในการรักษาอุณหภูมิทารกได้เป็นอย่างดี [1,2,3,4,5] นอกจากนี้ยังได้มีการศึกษาเปรียบเทียบตู้อบอุ่นทารกในแบบต่างๆ เช่น กรณีที่มีฝาปิดด้านบนและไม่มีฝาปิดด้านบน ก็พบว่าแบบที่มีฝาปิดด้านดีกว่าแบบที่ไม่มี [6] งานวิจัยส่วน

ใหญ่จะเป็นการศึกษาภายนอกตัวทารกและการไหลของอากาศภายในตู้อบอุ่นทารก แต่ยังไม่มีการศึกษาในอวัยวะภายในตัวทารก โดยเฉพาะสมองซึ่งเป็นส่วนที่ในทางการแพทย์ให้ความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากหากควบคุมอุณหภูมิไม่ดีจนเกิดภาวะ hyperthermia จะส่งผลให้สมองทารกมีความพิการในอนาคตได้

สำหรับตู้อบอุ่นทารกแบ่งตามระบบ

ควบคุมอุณหภูมิได้เป็น 2 ชนิด

1. ปรับอุณหภูมิด้วยมือ (manual control)
2. ปรับอุณหภูมิอัตโนมัติ (servo control)

2.1. ควบคุมด้วยการตั้งอุณหภูมิในตู้อบอุ่น (air servo control mode) โดยพิจารณาจากน้ำหนักและอายุของทารก เรียกว่า neutral thermal environment temperature

2.2. ควบคุมด้วยการตั้งอุณหภูมิผิวหนัง (skin servo control mode) โดยจะมี skin probe ติดที่ผิวของทารกแบบแนบสนิท [7]

เพราะฉะนั้น การศึกษาในครั้งนี้จะเป็นการศึกษาเพื่อจำลองและวิเคราะห์การถ่ายเทความ

CST-2017

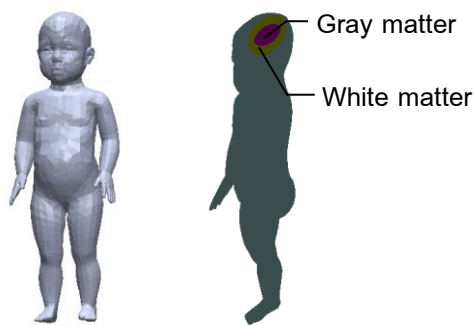
ร้อนที่ตัวทารกได้รับจากเครื่อง incubator และการกระจายความร้อนไปยังสมองส่วนสีเทา(gray matter) และสมองสีขาว (white matter) โดยใช้สมการชีวความร้อน (Bioheat equation) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม ANSYS 14.0 ในแบบ 3 มิติ การตรวจสอบผลการวิเคราะห์จะนำไปเทียบกับการวัดอุณหภูมิแกนกลาง (core body temperature) ที่ทำการวัดจริงตามแผนการพยาบาลในขั้นต่อไป

2. แบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณ

แบบจำลองของทารกและสมองที่ใช้ในการวิเคราะห์มีดังนี้

2.1 แบบจำลองทารก

แบบจำลองของทารกเป็นแบบจำลองเสมือนจริงซึ่งอ้างอิงมาจาก [8] แล้วนำโมเดลที่ได้มาปรับแต่งพื้นผิว จะได้ไฟล์ที่เป็นผิวออกมา หลังจากนั้นนำเข้าไฟล์ไปที่โปรแกรม Solidworks เพื่อทำให้เป็น solid ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 โมเดลของทารกแรกเกิด

หลังจากนั้นนำโมเดล solid เข้าสู่โปรแกรม ANSYS 14.0 เพื่อทำ simulation ต่อไป โดยกำหนดค่าคุณสมบัติทางความร้อน [9,10] ดังตารางที่ 1

กำหนดค่าอุณหภูมิเริ่มต้นของร่างกายเท่ากับ 36 °C และทำการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนแบบ Steady-state เนื่องจากต้องการทราบว่าในการศึกษาทั้งหมดนี้ ทารกจะมีโอกาสที่จะมีอุณหภูมิสมองสูงกว่า 37.5°C หรือไม่

ตารางที่ 1 ค่าคุณสมบัติความร้อนของทารก

Tissue	Heat capacity (J/kg-K)	Thermal conduction W/(m-k)	Density (Kg/m ³)
1. body	3471	0.7	1070
2. gray matter	3700	0.5	1050
3. white matter	3700	0.5	1050

2.2 เงื่อนไขขอบเขต (Boundary condition)

การศึกษาในครั้งนี้จะศึกษาภายใต้ขอบเขตที่ทารกมีการสูญเสียความร้อนด้วยการพาความร้อน (convection) ที่ผิวทั่วตัว เนื่องจากอากาศภายในตู้อบทารก ส่วนตัวทารก สมองส่วนสีขาว และสมองส่วนสีเทา จะเกิดความร้อนภายในจากกระบวนการเมตาบอลิซึม (metabolism) ดังนั้นนั้นสมการชีวความร้อน (bioheat equation) ที่ใช้คือ [11]

$$\rho_i c_i \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k_t \nabla T_t) + \dot{q}_{met}''' + \omega \rho_b c_b (T_a - T_v) \quad (1)$$

การศึกษาในครั้งนี้เกิดขึ้นภายใต้สถานการณ์ที่ทารกมีภาวะอุณหภูมิกาย 36°C และได้รับการรักษาด้วยการให้ความร้อนทางตู้อบทารก ปรับอุณหภูมิแบบอัตโนมัติ (servo control) ควบคุมด้วยการตั้งอุณหภูมิผิวหนัง (skin probe) ภายในศีรษะมีสมองส่วนสีเทาและสีขาวแยกชั้นส่วนและสัมผัสกันอยู่ การศึกษาในครั้งนี้จะยังไม่พิจารณาถึงสภาวะที่มีเลือดไหล (blood circulation) ในทางปฏิบัติการพยาบาลจะมีการวัดอุณหภูมิแกนกลาง ทางทวารหนักของทารกทุกครั้ง-1 ชั่วโมง เพื่อประเมินมิให้ทารกมีภาวะไฮเปอร์โธเมีย

3. ผลการศึกษา

3.1 ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลอง

จากการศึกษาโดยใช้แบบจำลองทารกแรกเกิดได้กำหนดการศึกษาภายใต้สภาวะขอบเขตเงื่อนไข ของตู้อบทารกดังต่อไปนี้

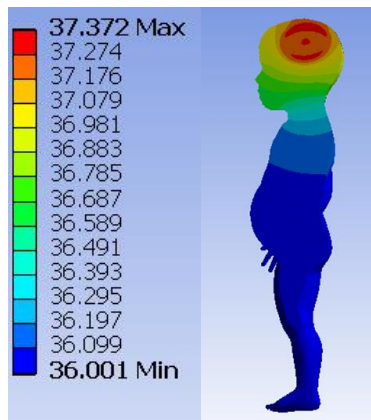
CST-2017

1. สภาวะอุณหภูมิของตู้อบทารก 36 °C
2. สภาวะอุณหภูมิของตู้อบทารก 36.5 °C
3. สภาวะอุณหภูมิของตู้อบทารก 37 °C

การกำหนดอุณหภูมิดังกล่าวเป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างที่เกิดขึ้น เนื่องจากว่าหลังจากที่ตั้งการทำงานของตู้อบทารก เป็นแบบปรับอุณหภูมิอัตโนมัติทางผิวหนัง ตู้จะมีการปรับอุณหภูมิขึ้นลงตลอดเวลาเพื่อให้อุณหภูมิของเด็กได้ตามที่กำหนด

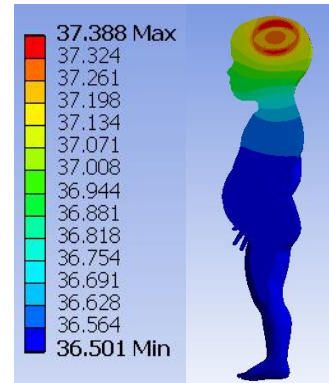
3.2 ผลการจำลองการถ่ายเทความร้อนโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM)

หลังจากที่ได้ใช้โปรแกรม ANSYS 14.0 ในการวิเคราะห์แล้วสามารถแสดงได้ดังภาพต่อไปนี้



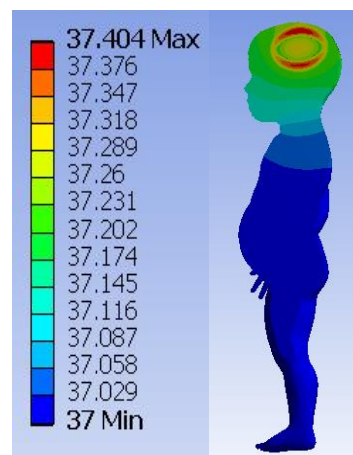
รูปที่ 2 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในร่างกายที่สภาวะอุณหภูมิของตู้อบทารก 36 °C

จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าขณะที่ทารกอยู่ในสภาวะที่อุณหภูมิตู้อบ 36 °C พบว่าที่ลำตัวทารกมีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 36 °C กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอโดยอุณหภูมิที่สมองส่วนสีเทาจะมีค่าอุณหภูมิประมาณ 37.3°C และสมองส่วนสีขาวประมาณ 37.1°C และมีการกระจายอุณหภูมิที่ทั่วบริเวณทั่วศีรษะ เนื่องจากสมองมีเมตาบอลิซึม



รูปที่ 3 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในร่างกายที่สภาวะอุณหภูมิของตู้อบทารก 36.5 °C

จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าขณะที่ทารกอยู่ในตู้อบที่มีสภาวะอุณหภูมิตู้ 36.5 °C พบว่าบริเวณลำตัวของทารกมีอุณหภูมิอยู่ที่ประมาณ 36.5 °C และมีการกระจายอุณหภูมิกันอย่างสม่ำเสมอ ต่อมาอุณหภูมิจะเริ่มร้อนขึ้นไปทีละคอ ศีรษะ และสมอง ตามลำดับ โดยอุณหภูมิที่สมองส่วนสีเทาจะประมาณ 37.3°C และสมองส่วนสีขาวจะประมาณ 37.1-37.2°C จะเห็นได้ว่าถึงแม้อุณหภูมิของตู้จะเพิ่มขึ้นเป็น 36.5°C อุณหภูมิของสมองทั้ง 2 ส่วนมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิตู้ที่ 36°C แต่อย่างไรก็ตามพบว่าอุณหภูมิของลำตัวสูงขึ้น โดยเพิ่มเป็น 36.5°C



รูปที่ 4 ผลการจำลองการกระจายอุณหภูมิในร่างกายที่สภาวะอุณหภูมิของตู้อบทารก 37 °C

CST-2017

จากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าขณะที่ทารกอยู่ในตู้อบที่มีสภาวะอุณหภูมิตู้ 37°C พบว่าบริเวณลำตัวของทารกอยู่ที่ประมาณ 37°C เท่ากับอุณหภูมิตู้ และมีการกระจายอุณหภูมิอย่างสม่ำเสมอ ต่อมาอุณหภูมิจะเริ่มสูงขึ้นไปที่ลำคอ ศีรษะ และสมอง ตามลำดับ เนื่องจากสมองทั้ง 2 อุณหภูมิที่สมองส่วนสีเทาจะประมาณ 37.4°C และสมองส่วนสีขาวจะประมาณ 37.2-37.3 °C จะเห็นว่าได้ว่าในสภาวะนี้อุณหภูมิของสมองเพิ่มสูงขึ้นกว่าเดิม แต่ยังคงไม่เกิน 37.5°C

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการศึกษาโดยใช้สมการชีวความร้อน (bioheat equation) และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วทำการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม ANSYS 14.0 โดยคำนวณแบบ steady-state สามารถนำมาสู่บทสรุปได้ว่า ทารกที่มีภาวะอุณหภูมิกายต่ำและได้รับการรักษาด้วยตู้อบทารก โดยที่อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 36.0 - 37°C จะไม่ทำให้ทารกเกิดภาวะ hyperthermia หรือวัดค่าอุณหภูมิแกนกลาง ได้ไม่เกิด 37.5°C โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุณหภูมิดังกล่าวเป็นอุณหภูมิของสมอง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการพยาบาลที่ต้องการรักษาอุณหภูมิของทารกไม่ต่ำจนเกินไป ซึ่งในขณะเดียวกันก็ต้องการรักษาอุณหภูมิสมองไม่ให้อุ่นจนเกินไปตามเกณฑ์ของ WHO ที่กำหนดให้อุณหภูมิทารกอยู่ในช่วง 36.5 – 37.5 °C เพราะจึงทำให้เกิดอันตรายต่อทารกได้

อย่างไรก็ตามการควบคุมอุณหภูมิตู้อบยังคงเป็นสิ่งสำคัญเนื่องจากว่าขณะที่ทารกอยู่ในตู้อบ ยังคงต้องได้รับการรักษา โดยอาจจะต้องทำการเปิดตู้เพื่อทำหัตถการต่าง ๆ ซึ่งเป็นเหตุให้อุณหภูมิของตู้มีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งหากมีการเปิดปิดบ่อยและนาน จะทำให้ตู้ต้องเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตความร้อนซึ่งทำให้อุณหภูมิของอากาศในตู้เพิ่มสูงขึ้น อาจเป็นเหตุให้ทารกเกิดภาวะ hyperthermia ที่สมองได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หลักสูตรวิศวกรรมการแพทย์ และ หน่วย วิจัย กล ศาส ตร์ ก า ร ค ำ น ว ณ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ รวมทั้งหอผู้ป่วยวิกฤตกุมาร เวชกรรม โรงพยาบาลธรรมศาสตร์เฉลิมพระเกียรติ ในการสนับสนุนแหล่งความรู้ วัสดุอุปกรณ์ และทุนในการทำวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] New K, Flenady V, Davies MW. Transfer of preterm infants from incubator to open cot at lower versus higher body weight (Review). The Cochrane Collaboration and published in The Cochrane Library 2007, Issue 4
- [2] Edward F. Bell. Infant incubators and radiant warmers. Volume 8, Issues 3–4, October 1983, Pages 351–375
- [3] Luiz C. Wrobel, Maciej K. Ginalski, Andrzej J. Nowak, Derek B. Ingham and Anna M. Fic. An overview of recent applications of computational modelling in neonatology. Phil. Trans. R. Soc. A 2010 368, doi: 10.1098/rsta.2010.0052, published 3 May 2010.
- [4] Flenady V, Woodgate PG. Radiant warmers versus incubators for regulating body temperature in newborn infants. Cochrane Database of Systematic Reviews 2003, Issue 4. Art. No.: CD000435. DOI: 10.1002/14651858.CD000435.
- [5] Michael P. Meyer, Matthew J. Payton, Andrew Salmon, Chris Hutchinson and Alan de Klerk. A Clinical Comparison of Radiant Warmer and Incubator Care for Preterm Infants From Birth to 1800 Grams. Pediatrics 2001;108;395, DOI: 10.1542/peds.108.2.395
- [6] Maciej K. Ginalski, A combined analysis of heat and mass flow in an infant incubator, MSc

CST-2017

Thesis, Silesian University of Technology,
Gliwice, Poland, 2002.

[7] เกรียงศักดิ์ จีระแพทย์ (2536). การดูแลระบบการ
หายใจในทารกแรกเกิด. กรุงเทพฯ : เรือนแก้วการ
พิมพ์, หน้า 51-67.

[8] ณิชากัทธ ช่วยชูหนู และคณะ.การวิเคราะห์และ
การเปรียบเทียบการกระจายของอุณหภูมิและการไหล
ของอากาศภายในตู้อบเด็กแรกเกิด โดยระเบียบวิธีไฟ
ไนท์อีลีเมนต์.สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ชีว
การแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

[9] Riikka Holopainen. A human thermal model for
improved thermal comfort, Termisellä ihmismallilla
parempaan lämpöviihtyvyyteen. Espoo 2012. VTT
Science 23. 141 p.

[10] Michael Christiansen, Nikolai Rakhilin, Anna
Tarakanova, Kevin Wong. Modeling brain cooling
treatment approved for hypoxic-ischemic
encephalopathy in infants to treat stroke and
cardiac arrest in adult patients. BEE 4530, Cornell
University, 2010. pp22

[11] Eda Didem YILDIRIM. A mathematical model
of the human thermal system. January 2005

[12] BIOHEAT EQUATIONS: Heat transfer in
blood vessels and tissues ,
<http://www3.nd.edu/~msen/Teaching/BioHT>