

บทที่ 5

ผลการจำลองและผลการทดลอง

ในบทนี้เราจะแสดงให้เห็นถึงผลการจำลองและผลการทดลอง โดยในการจำลองจะแสดงให้เห็นถึงการกระจายของอุณหภูมิ การกระจายของอัตราการดูดซับความร้อนจำเพาะของเนื้อเยื่อ Specific heat Absorption Rate (SAR) และลักษณะของบาดแผลที่เกิดจากสายอากาศทั้งสามแบบคือ สายอากาศโคแอกเซียลแบบปลายเปิด (Open-Tip Antenna: OTCA) หนึ่งสล็อต (One-Slot Antenna: OSCA) และสองสล็อต (Two-Slot Antenna: TSCA) ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวในแบบสามมิติว่ามีลักษณะการกระจายของอุณหภูมิและ SAR อย่างไร มีลักษณะรอยแผลอย่างไร หลังจากนั้นเราจะทำการวิเคราะห์ผลการกระจายของอุณหภูมิและ SAR ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวของสายอากาศแต่ละแบบด้วยกราฟเพื่อให้เห็นถึงความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิและ SAR ระหว่างปอดในขณะหดและขยายตัว จากนั้นจึงทำการทดลองในเนื้อเยื่อปอดแบบบนอกร่างกาย (*in vitro*) เพื่อเปรียบเทียบและพิสูจน์ผลการจำลองว่ามีความถูกต้องเพียงใด จากนั้นเราจะทำการเพิ่มขนาดรอยแผลโดยใช้วิธีนำสายอากาศสามเส้นแทงเข้าไปในเนื้อเยื่อปอดพร้อมกันเพื่อเพิ่มขนาดของรอยแผลโดยใช้วิธีการจำลอง โดยเราได้ทำการวิเคราะห์ผลและเลือกเอาสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปใช้แบบสามเส้นพร้อมกันดังจะแสดงในรายละเอียดต่อไปในบทนี้

โดยหลักในการจำลอง เนื่องจากสายอากาศแต่ละแบบจะมีการปล่อยกำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ความถี่ 2.45 GHz ออกสู่เนื้อเยื่อที่แตกต่างกัน ดังนั้นเราจะทำการปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานที่ใส่เข้าไปในสายอากาศแต่ละแบบและทำการคำนวณทางไฟไนต์เอลิเมนต์หลายครั้งเพื่อดูว่าสายอากาศแบบไหนใช้กำลังเท่าไรจึงจะได้ประสิทธิภาพในการกระจายกำลังงานไปสู่เนื้อเยื่อปอดได้ดีที่สุด โดยจะเน้นในแง่ของพื้นที่ในการทำลายและรูปร่างของการกระจายความร้อนที่ใช้ในการทำลายเนื้อเยื่อ หลังจากนั้นจึงทำการแสดงผลจากการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์และเปรียบเทียบผลตามที่กล่าวมาข้างต้นอีกครั้ง

5.1 การตั้งค่าสำหรับการจำลอง

สำหรับกระบวนการจำลองเราจะทำการเปลี่ยนแปลงค่ากำลังงานคลื่นไมโครเวฟที่ใส่เข้าไปในสายอากาศแต่ละแบบแล้วสังเกตค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ออกมาสู่เนื้อเยื่อของแต่ละสายอากาศว่ามีค่าเท่าใด โดยอุณหภูมิสูงสุดไม่ควรเกิน 100 °C เนื่องจากเนื้อเยื่ออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพบางอย่าง แต่เนื่องจากอุณหภูมิสัมพันธ์กับขนาดบาดแผล ยิ่งอุณหภูมิยิ่งสูงยิ่งได้ขนาดบาดแผลที่ใหญ่ โดยในการจำลองเราตั้งค่าเวลาในการให้ความร้อนแก่เนื้อเยื่อเท่ากับ 3 นาที (เพื่อให้

เหมาะสมกับการรักษา) แล้วทำการใส่กำลังงานคลื่นเข้าไปในสายอากาศแต่ละแบบแล้วดูว่าอุณหภูมิสูงสุด (ประมาณ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) เกิดขึ้นจากการใช้กำลังที่วัตต์ โดยมีตัวแปรที่ใช้ในการทดลองดังต่อไปนี้

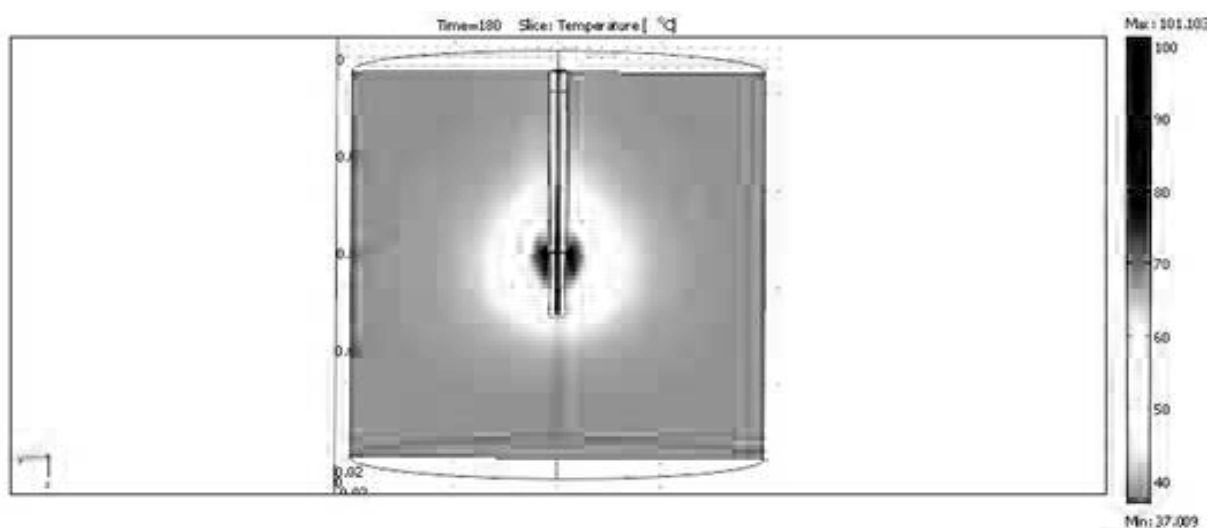
การทดลองเราจึงกำหนดให้อุณหภูมิของแต่ละสายอากาศอยู่ในช่วงใกล้ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วทำการเปลี่ยนแปลงกำลังที่ใส่ไปในสายอากาศแต่ละชนิดแล้วดูว่าสายอากาศแต่ละแบบต้องการกำลังอินพุตที่วัตต์จึงจะก่อให้เกิดขนาดผลขนาดใหญ่ที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

5.2 ผลการจำลองที่ได้จากสายอากาศปลายเปิด (OTCA) ในเนื้อเยื่อปอดขณะหัดและขยายตัว

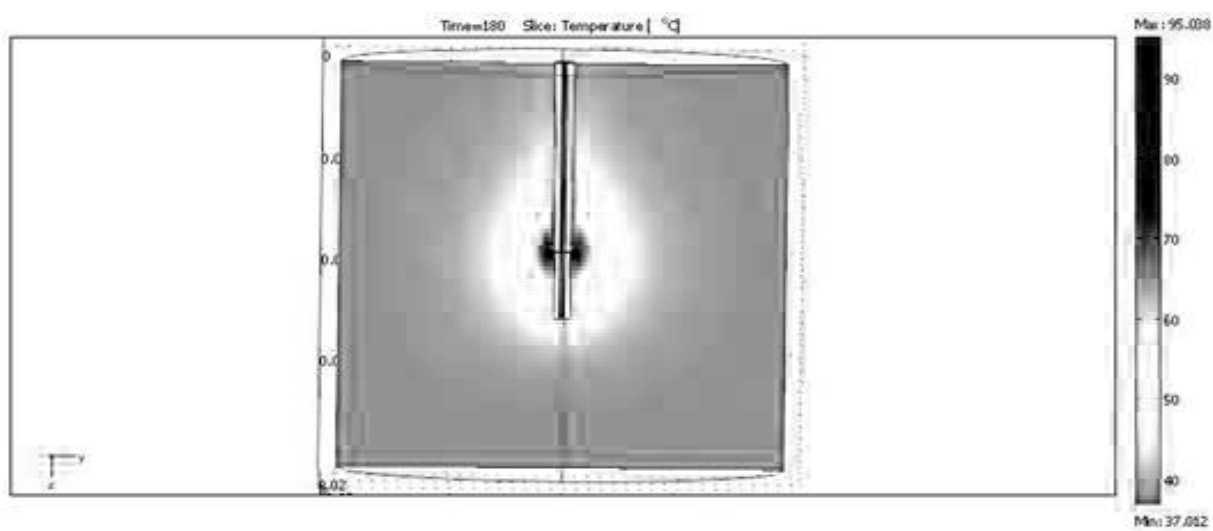
ในการทดลองสายอากาศในแบบต่างๆ ในเนื้อเยื่อปอดเราจะทำการสร้างแบบจำลองเนื้อเยื่อซึ่งมีสายอากาศอยู่ข้างในและจากนั้นจึงทำการกำหนดพารามิเตอร์และเงื่อนไขขอบให้กับเนื้อเยื่อและสายอากาศจากนั้นทำการกำหนดเงื่อนไขขอบให้กับโมเดลที่สร้างขึ้นสุดท้ายทำการใส่ค่ากำลังของคลื่นที่พอร์ตของสายอากาศและทำการจำลอง โดยจำเป็นต้องทำการจำลองสายอากาศในปอดสองกรณีหลักๆ คือ สายอากาศที่อยู่ในปอดตอนหดตัวกับสายอากาศที่อยู่ในปอดตอนขยายตัวโดยความแตกต่างของสองกรณีนี้อยู่ที่ค่าพารามิเตอร์ของปอดที่ต่างกันทำให้เกิดผลทางการจำลองที่ต่างกัน ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดในหัวข้อย่อยของสายอากาศแต่ละแบบต่อไป

5.2.1 การกระจายอุณหภูมิที่ได้จากสายอากาศปลายเปิด (OTCA)

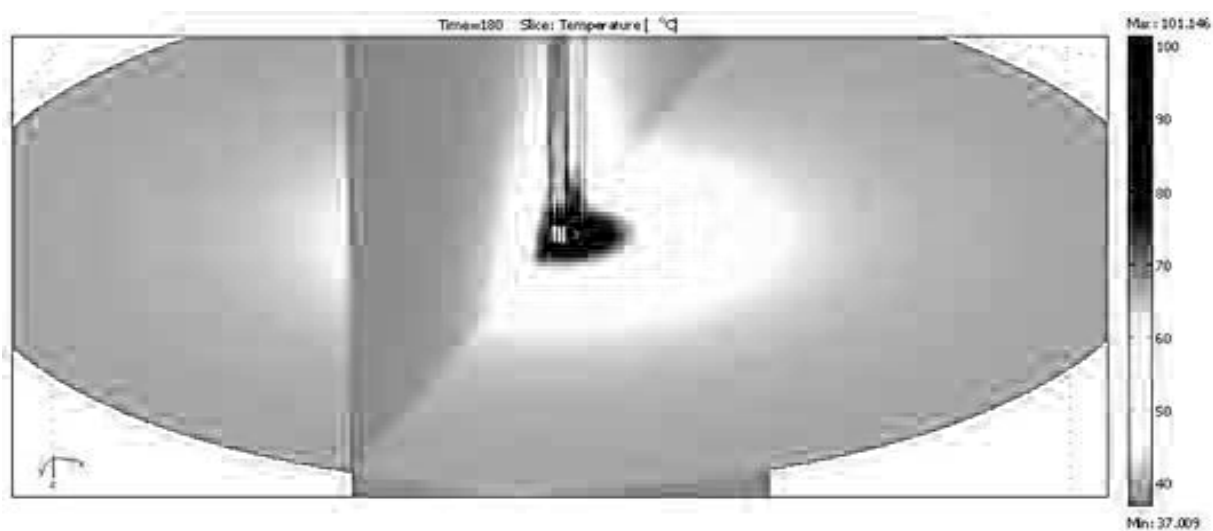
กระจายอุณหภูมิของสายอากาศแบบปลายเปิดจะเกิดบริเวณจุดต่อระหว่างตัวนำนอก (outer conductor) กับชั้นไดอิเล็กตริก (dielectric sheet) ดังรูปที่ 5.1 โดยจากการทดลองหลายครั้งพบว่าวัตต์ที่ทำให้เกิดขนาดผลใหญ่ที่สุดโดยอุณหภูมิอยู่ใกล้ร้อยของสาคือมากที่สุดมีค่า 7 W .



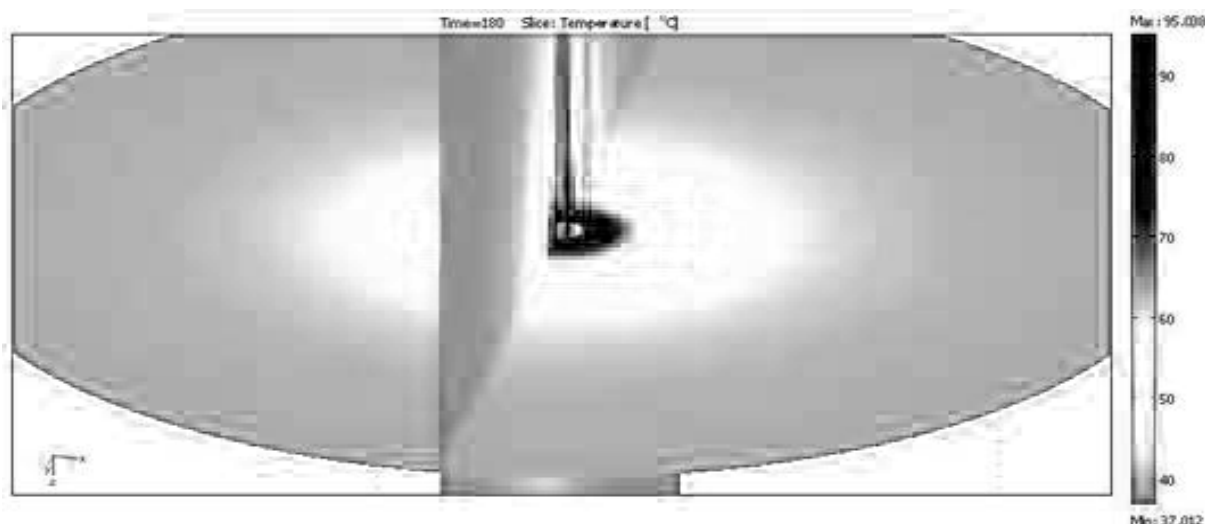
(ก) หดตัว



(ข) ขยายตัว



(ค) หดตัว



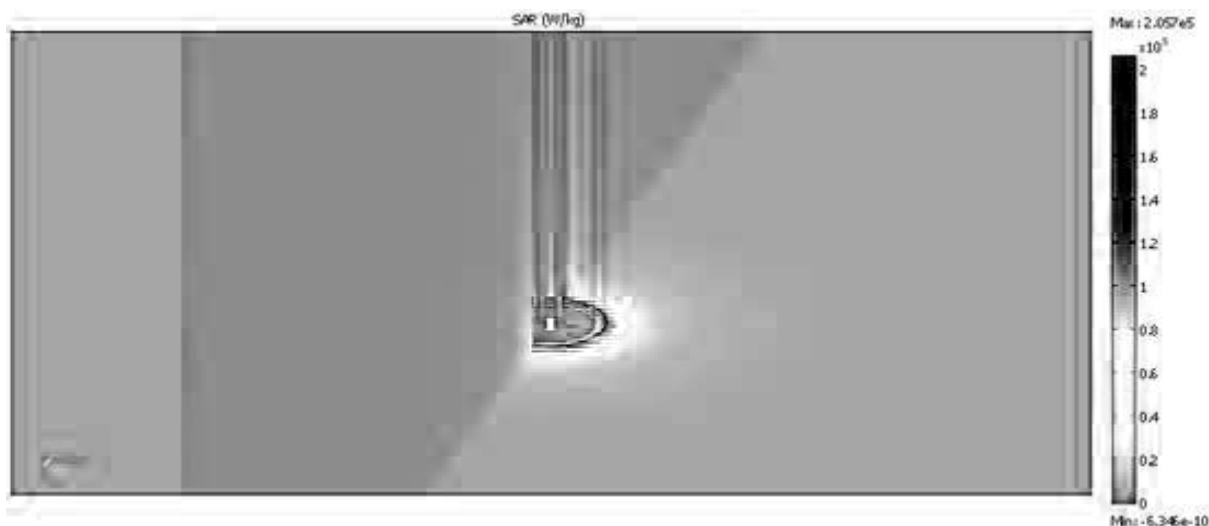
(ง) ขยายตัว

รูปที่ 5.1 การกระจายของอุณหภูมิของสายอากาศปลายเปิดในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวในแบบสามมิติ ภาพ (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นด้านหน้าของสายอากาศ (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นในแบบด้านข้าง

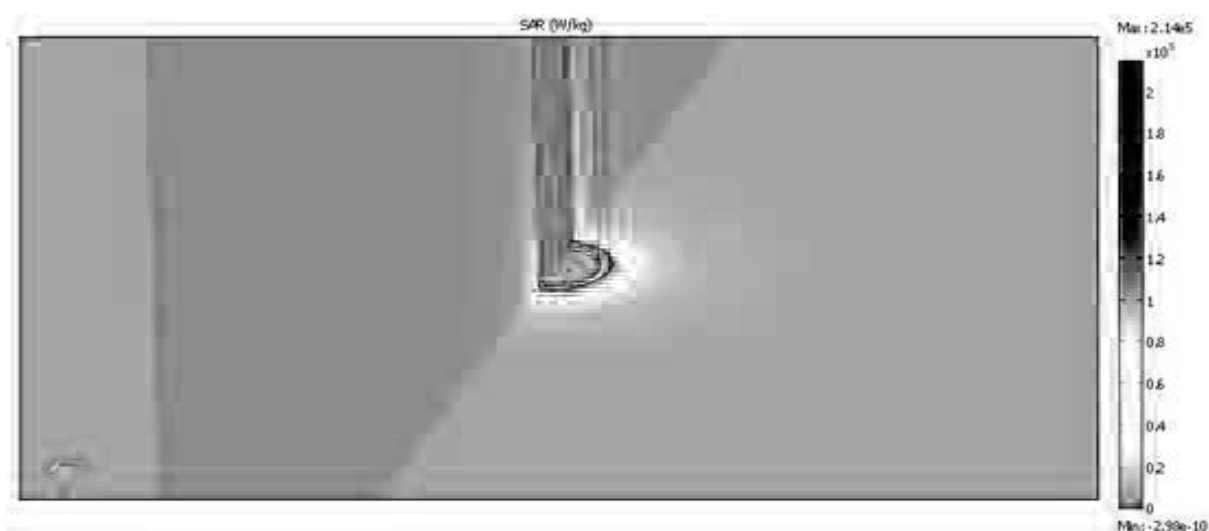
รูปที่ 5.1(ก) แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในปอดขณะหดตัวโดยอุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากสไลด์ตามยาวมีค่าเท่ากับ 101.1°C และรูปที่ 5.1(ข) อุณหภูมิสูงสุดขณะขยายตัวเท่ากับ 95°C ต่างกัน 6.1°C ซึ่งจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดนี้จะอยู่บริเวณจุดต่อระหว่างตัวนำนอกกับชั้นไดอิเล็กตริกนั่นเอง นั่นหมายถึงอุณหภูมิสูงสุดในการทำสายของสายอากาศแบบปลายเปิดในขณะปอดหดตัวมีค่าสูงกว่าในขณะขยายตัว

5.2.2 การกระจาย SAR ที่ได้จากสายอากาศปลายเปิด (OTCA)

ลักษณะการกระจายของ SAR จะแสดงถึงการกระจายของสนามไฟฟ้าตามสมการของ SAR สมการที่ (2.3.2.1) โดยการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดตัวมีค่าสูงสุดประมาณ $2.05 \times 10^5 \text{ W/kg}$ และในเนื้อเยื่อปอดขณะขยายตัวประมาณ $2.14 \times 10^5 \text{ W/kg}$ ซึ่งทั้งสองค่านี้ถือว่าใกล้เคียงกันมาก รูปที่ 5.2 เป็นการแสดงการกระจายของ SAR แสดงโดยสไลด์ตามยาวและตามขวาง



(ก) หดตัว

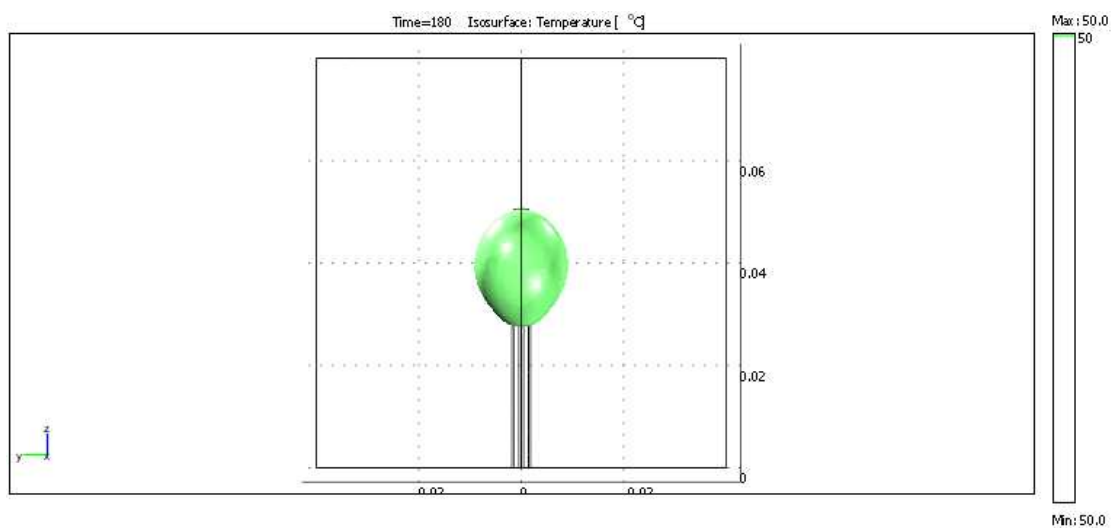


(ข) ขยายตัว

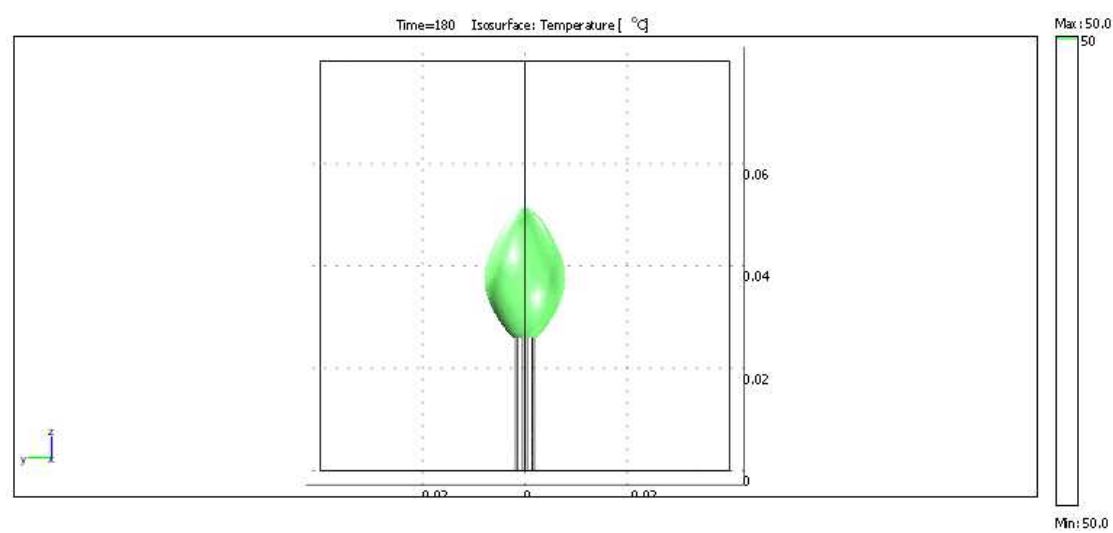
รูปที่ 5.2 แสดงการกระจายของ SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัว

5.2.3 รอยแผลที่เกิดจากสายอากาศปลายเปิด (OTCA) ที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป

จากการทดลองรอยแผลที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบ ellipsoid ซึ่งเป็นลักษณะรอยแผลแบบสมมาตรที่เกิดจากการใช้สายอากาศแบบปลายเปิด โดยปริมาตรของรอยแผลในขณะปอดหดตัวเท่ากับ 3.601081 cm^3 และในขณะปอดขยายตัวเท่ากับ 2.732425 cm^3 ดังนั้นปริมาตรรอยแผลของปอดขณะปอดหดตัวมีค่ามากกว่าขณะขยายตัวเท่ากับ 0.868656 cm^3



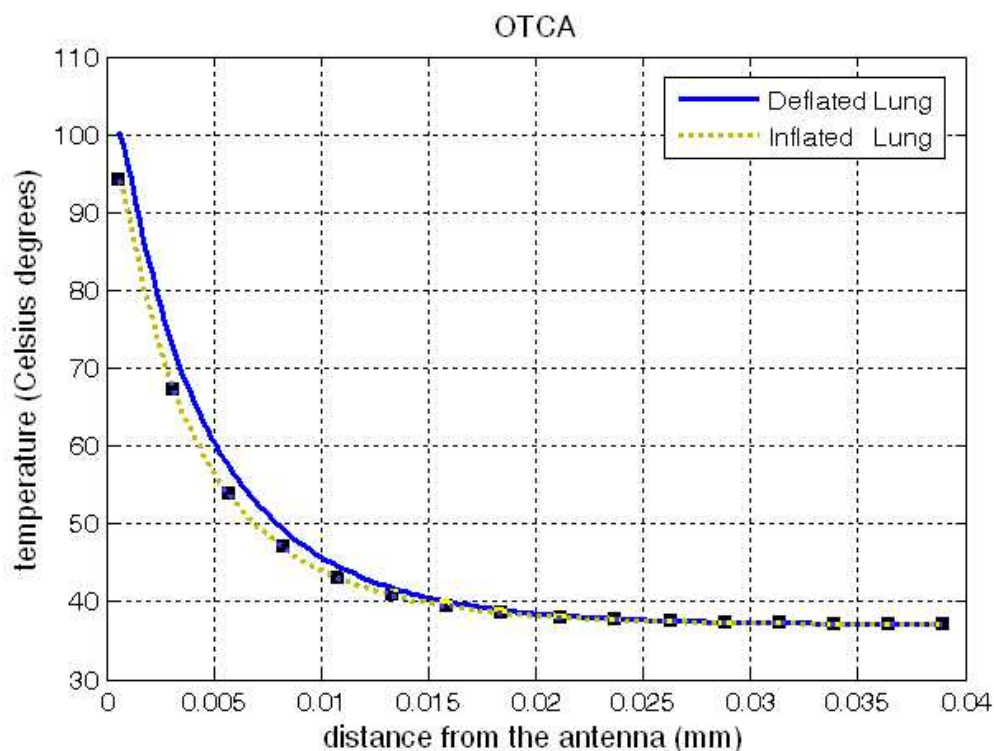
(ก) หดตัว



(ข) ขยายตัว

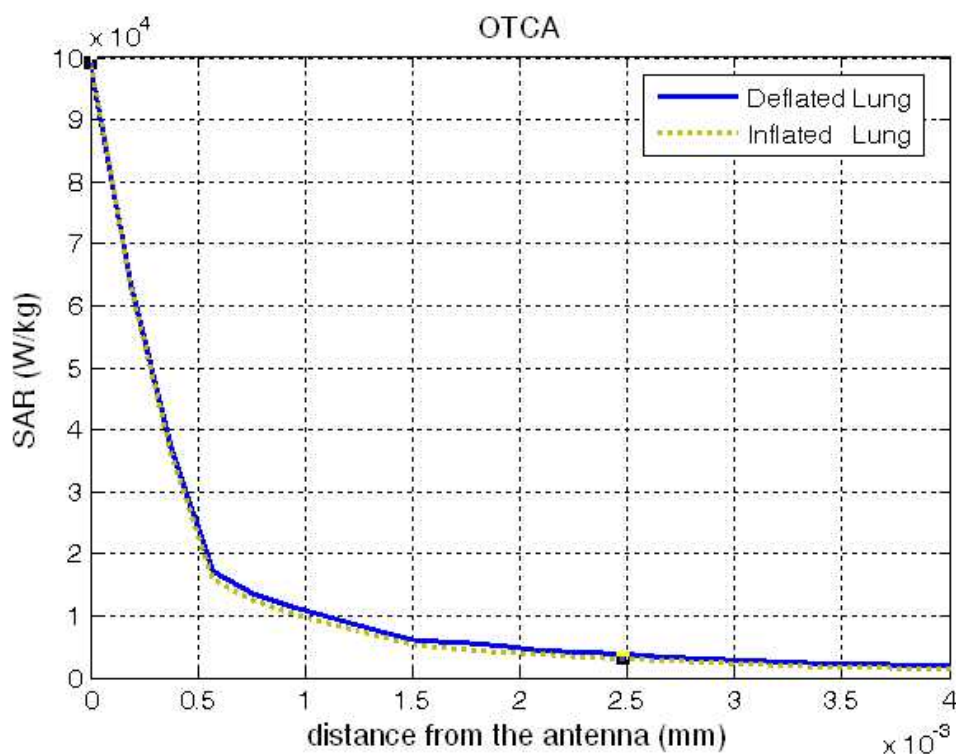
รูปที่ 5.3 รอยแผลที่เกิดขึ้นจากสายอากาศปลายเปิดในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป

5.2.4 กราฟการกระจายอุณหภูมิ และ SAR ที่ได้จากสายอากาศปลายเปิด (OTCA)



รูปที่ 5.4 แสดงการกระจายอุณหภูมิจากจุดต่อของปลายเปิดสายอากาศไปยังขอบของเนื้อเยื่อ

รูปที่ 5.4 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศในขณะปอดหดและขยายตัว โดยวัดในแนวรัศมีจากสายอากาศ ณ จุดต่อของตัวนำนอกกับชั้นไดอิเล็กทริก จะพบว่าระยะการทำลายเนื้อเยื่อในแนวรัศมีในขณะปอดหดตัวมีค่าประมาณ 7.8 mm และขณะปอดขยายตัวมีค่าประมาณ 6.9 mm ต่างกัน 0.9 mm (วัดที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไปซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เซลล์มะเร็งถูกทำลาย)



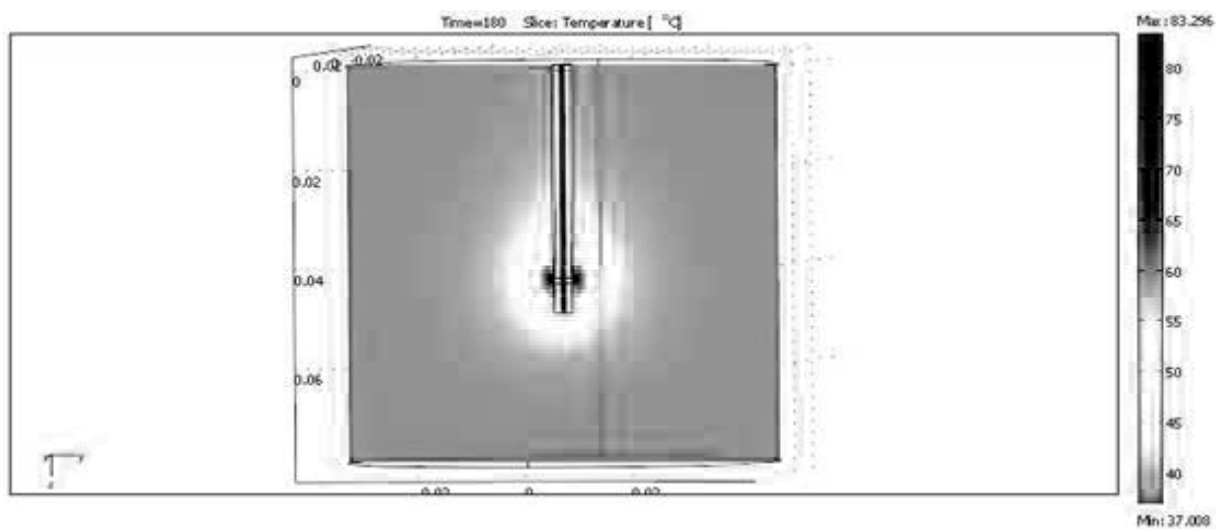
รูปที่ 5.5 แสดงการกระจาย SAR จากจุดต่อของสายอากาศปลายเปิดไปยังขอบของเนื้อเยื่อ

รูปที่ 5.5 แสดงการเปรียบเทียบการกระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดในแบบจำลองสามมิติบนแกนซึ่งค่าสูงสุดของ SAR ปรากฏ(วัดในแนวตั้งฉากกับสายอากาศ) ณ จุดต่อระหว่างตัวนำนอกกับชั้นไดอิเล็กตริก พบว่าระยะความลึกผิวของกำลังซึ่งปล่อยออกมาในขณะปอดหดตัวเท่ากับ 1.1758 mm และในขณะปอดขยายตัวเท่ากับ 1.1750 mm (วัดจากระยะที่ SAR ลดลง $1/e$ ของค่าสูงสุด)

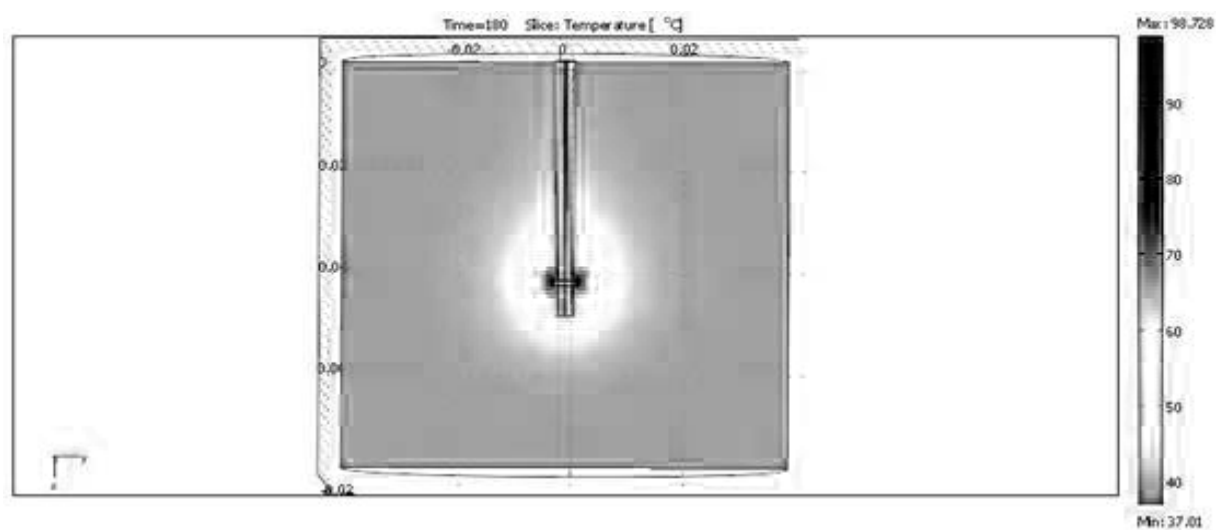
5.3 ผลการจำลองที่ได้จากสายอากาศหนึ่งสล็อต (OSCA) ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัว

สายอากาศแบบหนึ่งสล็อตจะมีการกระจายของอุณหภูมิอยู่ตรงบริเวณสล็อตและจะมีอุณหภูมิสูงที่สุดที่กลางสล็อตและค่อยๆ ลดลงตามระยะทางจากสล็อต ดังรูปที่ 5.3 จากการทดลองหลายครั้งพบว่าวัดได้ทำให้เกิดบาดแผลใหญ่ที่สุดโดยอุณหภูมิอยู่ใกล้รอยของสาคือ 4 W. ถ้าเทียบกับสายอากาศที่มีสล็อตมากกว่าหนึ่งสล็อตขึ้นหรือสายอากาศหลายสล็อต สายอากาศแบบหนึ่งสล็อตจะให้อุณหภูมิ max มีค่าสูงที่สุดแต่จะมีการกระจายของอุณหภูมิในบริเวณแคบกว่าสายอากาศแบบหลายสล็อต

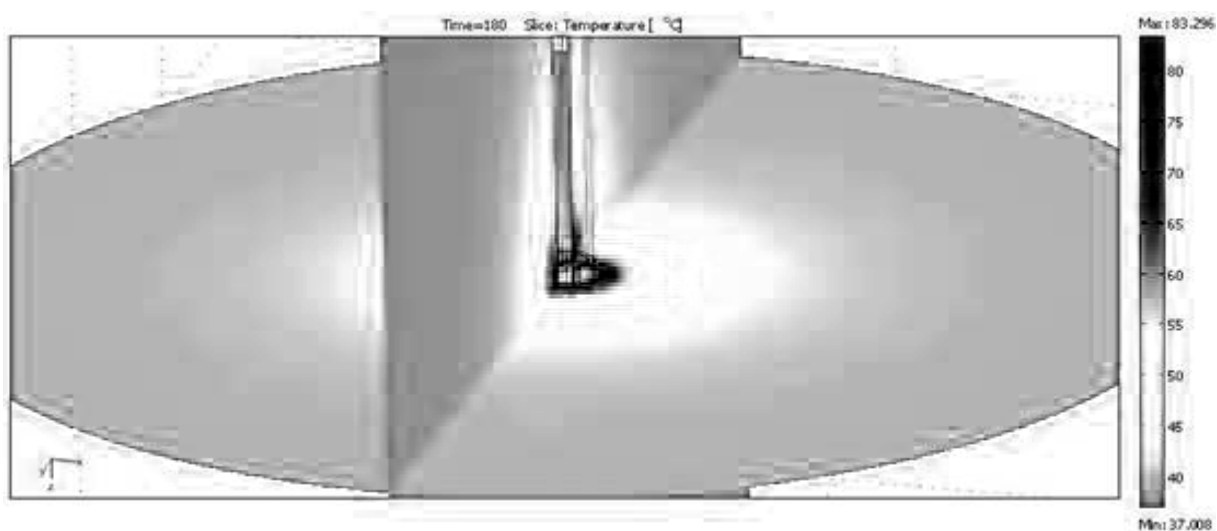
5.3.1 การกระจายอุณหภูมิที่ได้จากสายอากาศหนึ่งสล็อต (OSCA)



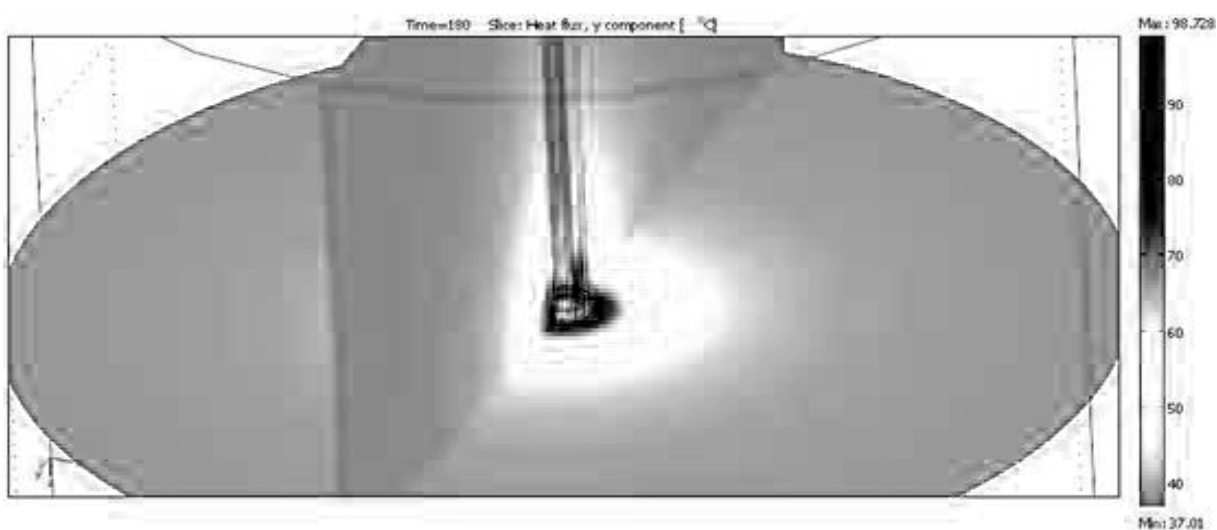
(ก) หดตัว



(ข) ขยายตัว



(ก) หดตัว



(ง) ขยายตัว

รูปที่ 5.6 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของสายอากาศแบบหนึ่งสล็อตในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวในแบบสามมิติ ภาพ (ก) และ (ข) แสดงสไลด์ตามยาวและตามขวาง ภาพ (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นส่วนใต้ของสายอากาศ

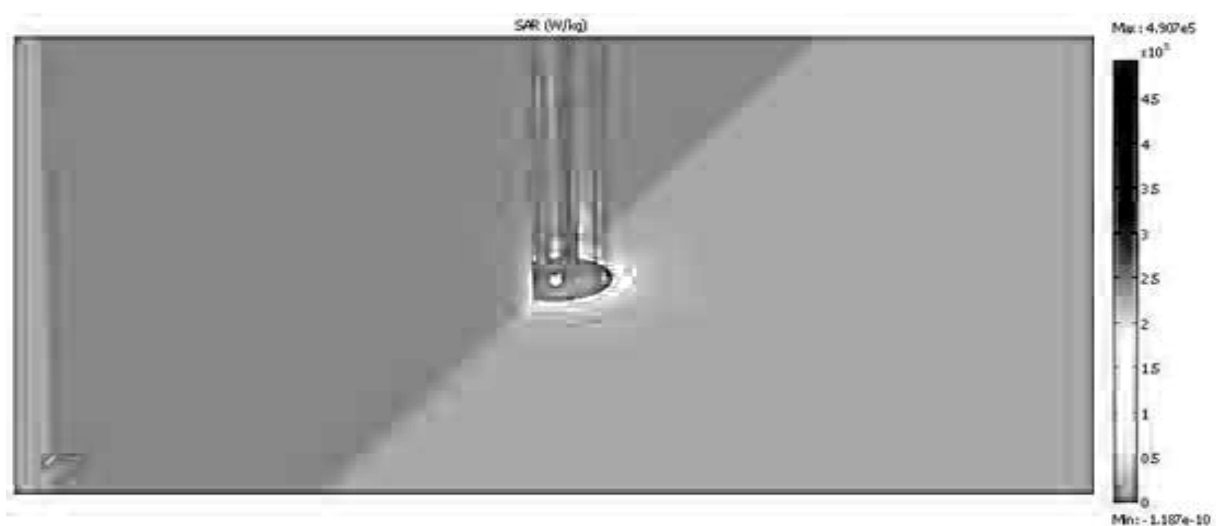
รูปที่ 5.6(ก) แสดงการกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในปอดขณะหดตัวโดยอุณหภูมิสูงสุดที่จากสไลด์ตามยาวมีค่าเท่ากับ 83.3°C และรูปที่ 5.6(ข) อุณหภูมิสูงสุดขณะขยายตัวเท่ากับ 98.7°C อุณหภูมิสูงสุดในขณะปอดหดตัวน้อยกว่าในขณะปอดขยายตัวเท่ากับ 15.4°C ซึ่งจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดนี้จะอยู่บริเวณกลางสล็อต

5.3.2 การกระจาย SAR ที่ได้จากสายอากาศหนึ่งสล็อต (OSCA)

ลักษณะการกระจายของ SAR จะแสดงถึงการกระจายของสนามไฟฟ้าตามสมการของ SAR (2.3.2.1) โดยการกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดตัวมีค่าสูงสุดประมาณ 3.68×10^5 W/kg และในขณะปอดขยายตัวมีค่าประมาณ 4.91×10^5 W/kg รูปที่ 5.7 เป็นการแสดงการกระจายของ SAR โดยสไลด์ตามยาวและตามขวาง



(ก) หดตัว

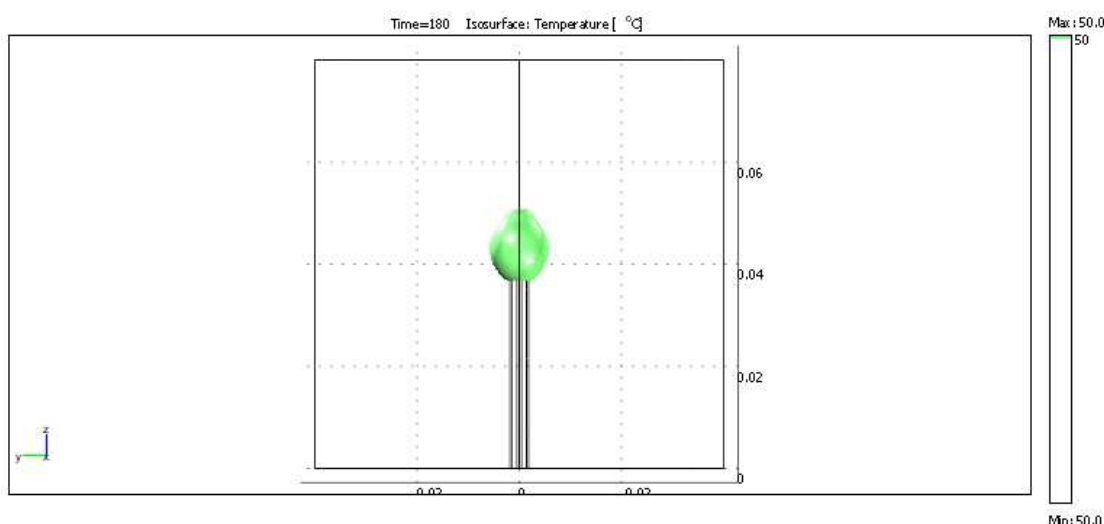


(ข) ขยายตัว

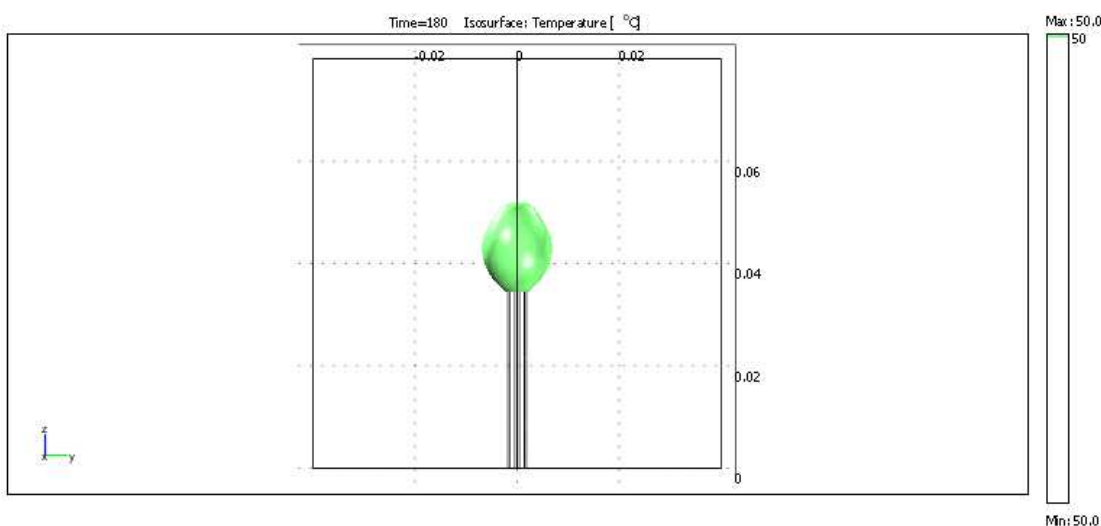
รูปที่ 5.7 แสดงการกระจายของ SAR ของสายอากาศแบบปลายเปิดในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัว

5.3.3 รอยแผลที่เกิดจากสายอากาศหนึ่งสล็อตที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป

รูปที่ 5.8 เป็นลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแบบสองสล็อตในบริเวณที่มีอุณหภูมิมากกว่า 50°C ของสายอากาศขณะหดและขยายตัว โดยปริมาตรของรอยแผลในปอดขณะหดตัวที่เกิดจากสายอากาศชนิดนี้มีค่าเท่ากับ 0.818086 cm³ และในขณะขยายมีปริมาตรเท่ากับ 1.505612 cm³ ดังนั้นปริมาตรรอยแผลของปอดขณะปอดหดตัวมีค่าน้อยกว่าขณะขยายตัวเท่ากับ 0.687526 cm³



(ก) หดตัว

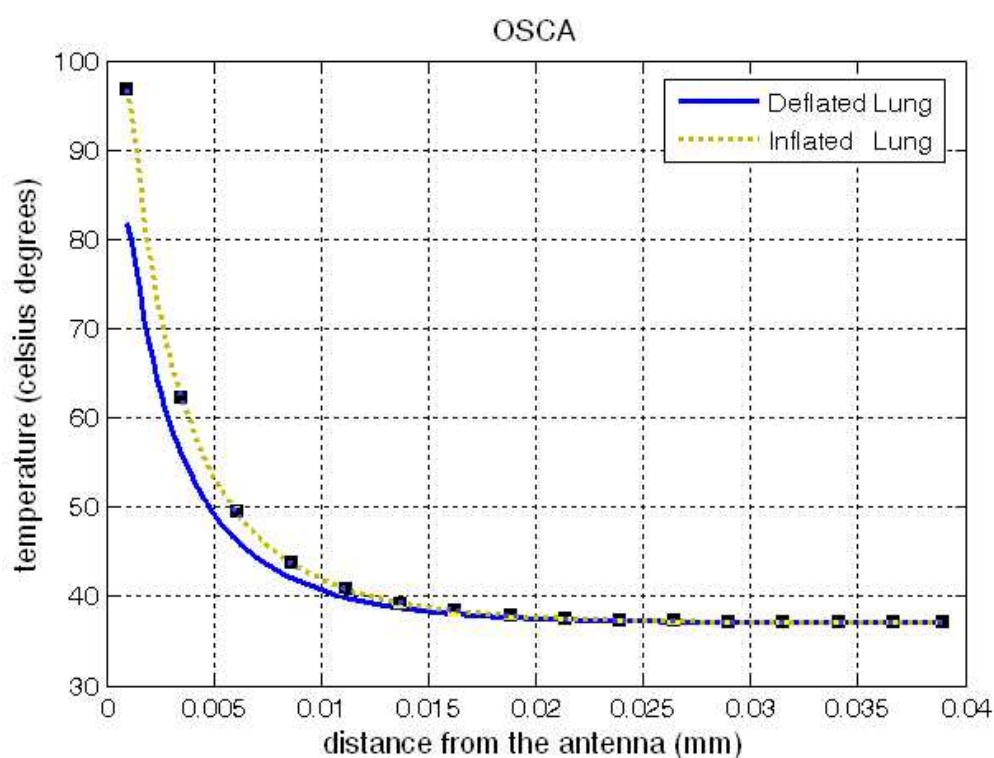


(ข) ขยายตัว

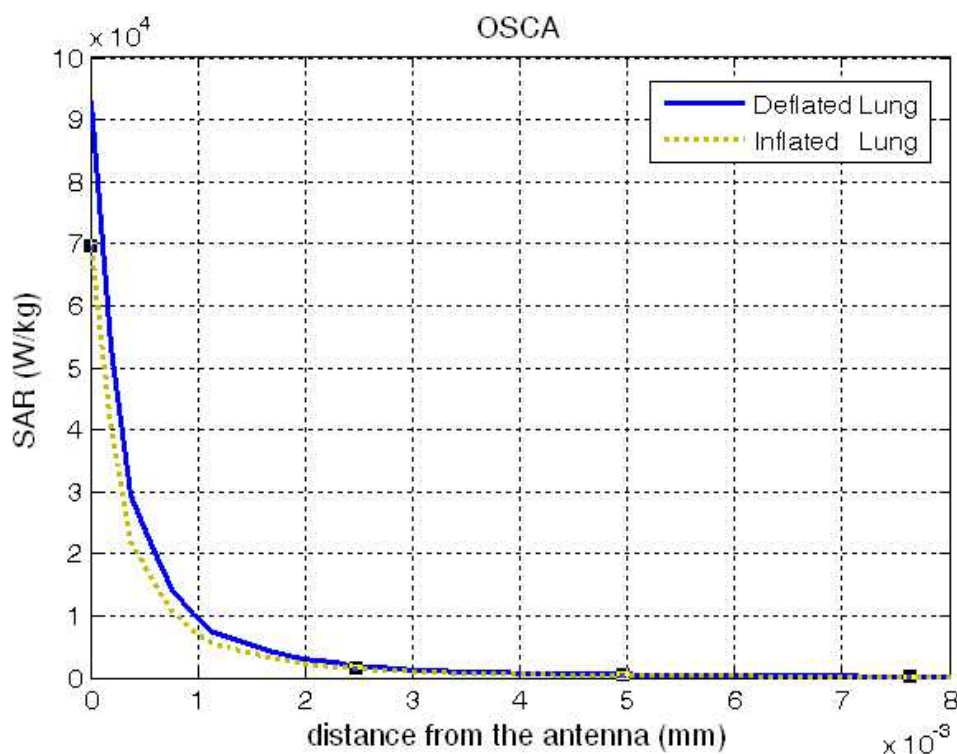
รูปที่ 5.8 รอยแผลที่เกิดขึ้นจากสายอากาศหนึ่งสล็อตในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป

5.3.4 กราฟการกระจายอุณหภูมิ และ SAR ที่ได้จากสายอากาศหนึ่งสล็อต (OSCA)

รูปที่ 5.9 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศในขณะปอดหดและขยายตัว โดยวัดในแนวรัศมีจากสายอากาศ ณ จุดกึ่งกลางของสล็อตซึ่งเป็นจุดที่ให้ค่าอุณหภูมิสูงที่สุดของสายอากาศแบบหนึ่งสล็อต จากกราฟจะพบว่าระยะการทำลายเนื้อเยื่อในแนวรัศมีในขณะปอดหดตัวอยู่ที่ 4.70 mm และขณะปอดขยายอยู่ที่ 6.07 mm ต่างกัน 1.37 mm (วัดที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เซลล์มะเร็งเริ่มถูกทำลาย)



รูปที่ 5.9 แสดงการกระจายอุณหภูมิจากสล็อตของสายอากาศหนึ่งสล็อตไปยังขอบของเนื้อเยื่อ



รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบการกระจาย SAR ของสายอากาศแบบหนึ่งสล็อตบนแกนซึ่งค่าสูงสุด

รูปที่ 5.10 แสดงการเปรียบเทียบการกระจาย SAR ของสายอากาศแบบปลายหนึ่งสล็อตในแบบจำลองสามมิติบนแกนซึ่งค่าสูงสุดของ SAR ปรากฏ(วัดในแนวตั้งฉากกับสายอากาศ) พบว่าระยะความลึกผิวของกำลังซึ่งปล่อยออกมาในเนื้อเยื่อขณะหดตัวประมาณ 0.979 mm และในขณะปอดขยายตัวประมาณ 0.932 mm (วัดจากระยะที่ SAR ลดลง $1/e$ ของค่าสูงสุด)

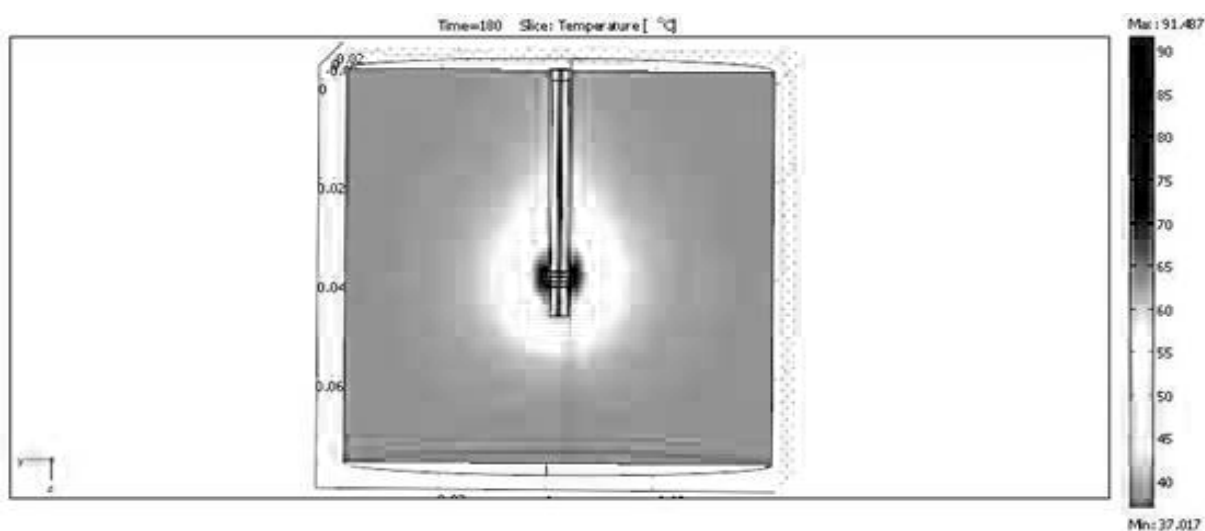
5.5 ผลการจำลองที่ได้จากสายอากาศสองสล็อต (TSCA) ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัว

โดยปกติแล้วสายอากาศแบบสองสล็อตจะเป็นสายอากาศที่มีความกว้างของการกระจายอุณหภูมิมากกว่าสายอากาศแบบหนึ่งสล็อตแต่จะแคบกว่าสองสล็อต ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดจะมีต่ำกว่าหนึ่งสล็อตและแบบปลายเปิด แต่ในการทดลองนี้เราจะทำการหาประสิทธิภาพสูงสุดของสายอากาศแบบสองสล็อต เราจึงพยายามใส่กำลังวัตน์ที่มากที่สุดที่ทำให้เกิดอุณหภูมิสูงที่สุด(100 °C) เราจึงทำการปรับเปลี่ยนวัตน์โดยให้ค่าเวลาคงที่ๆ 180 s. จากการทดลองหลายครั้งพบว่าวัตน์ที่

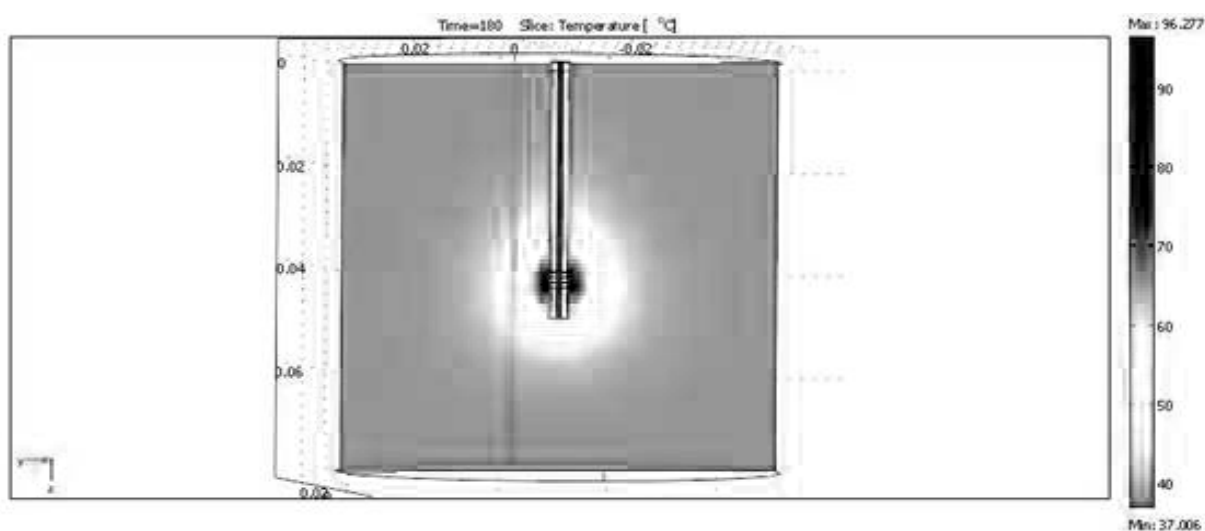
ทำให้เกิดบาดแผลใหญ่ที่สุดโดยอุณหภูมิอยู่ที่ใกล้ร้อยละ 5 W. โดยส่วนต่อไปจะอธิบายถึงผลที่ได้จากการทดลองสายอากาศแบบสองสล็อต

5.5.1 การกระจายอุณหภูมิที่ได้จากสายอากาศสองสล็อต (TSCA)

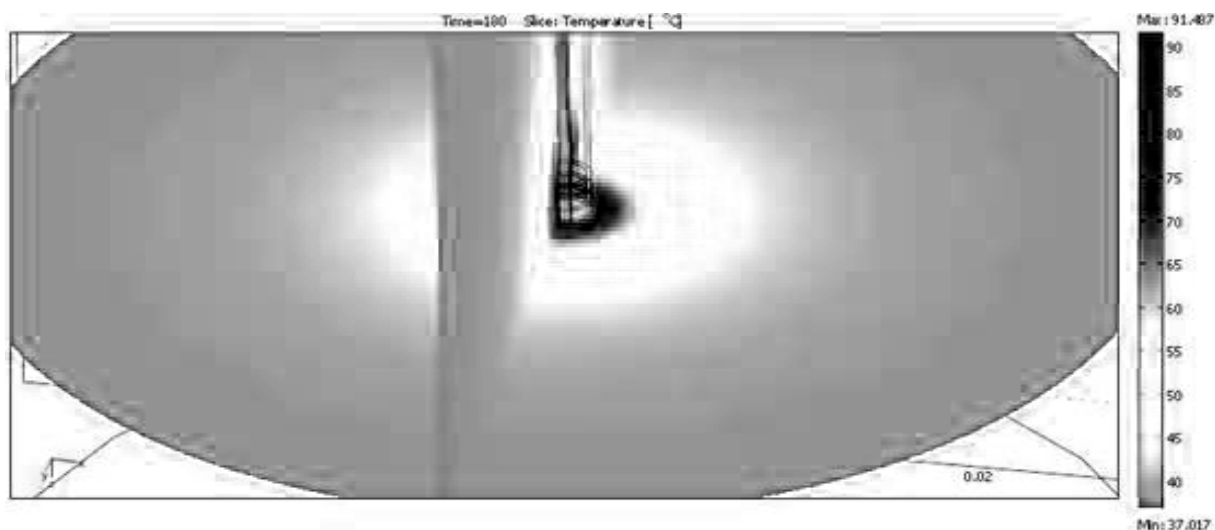
รูปที่ 5.11 แสดงลักษณะการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศแบบสองสล็อต ซึ่งการกระจายของอุณหภูมิจะเกิดขึ้นบริเวณสล็อตทั้งสอง แต่การกระจายอุณหภูมิของสายอากาศชนิดนี้จะมีลักษณะต่างกันระหว่างปอดหัดกับขยายตัว โดยในขณะปอดหัดตัวการกระจายจะเกิดขึ้นสูงบริเวณสล็อตอันบนแต่ในขณะขยายตัวการกระจายอุณหภูมิจะมีความหนาแน่นบริเวณสล็อตอันล่าง แต่อุณหภูมิสูงสุดจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก



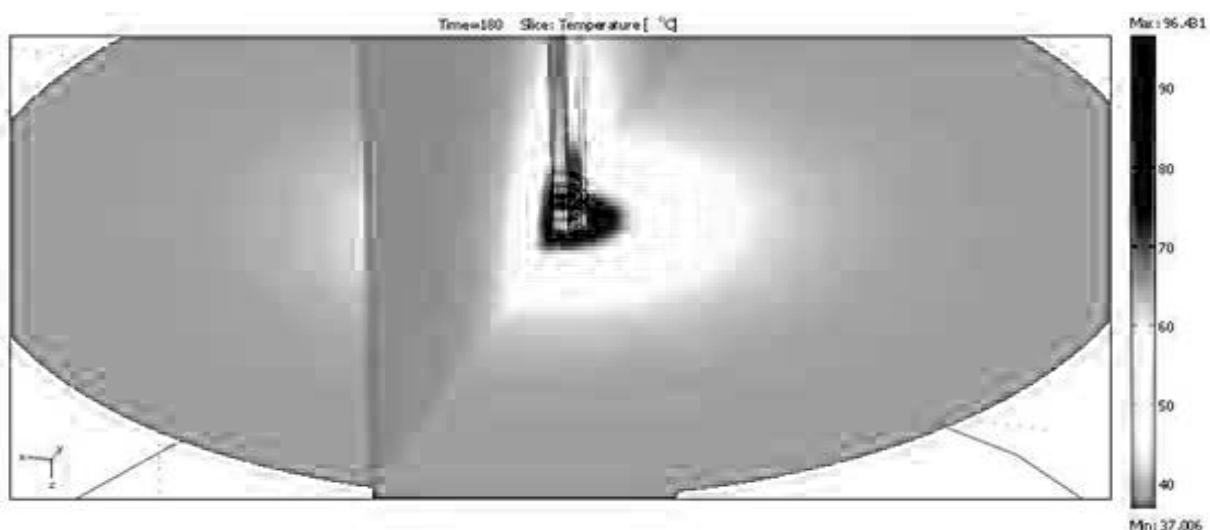
(ก) หดตัว



(ข) ขยายตัว



(ก) หดตัว



(ข) ขยายตัว

รูปที่ 5.11 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของสายอากาศสองสล็อตในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวในแบบสามมิติ ภาพ (ก) และ (ข) แสดงสไลด์ตามยาวและตามขวาง ภาพ (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นส่วนใต้ของสายอากาศ

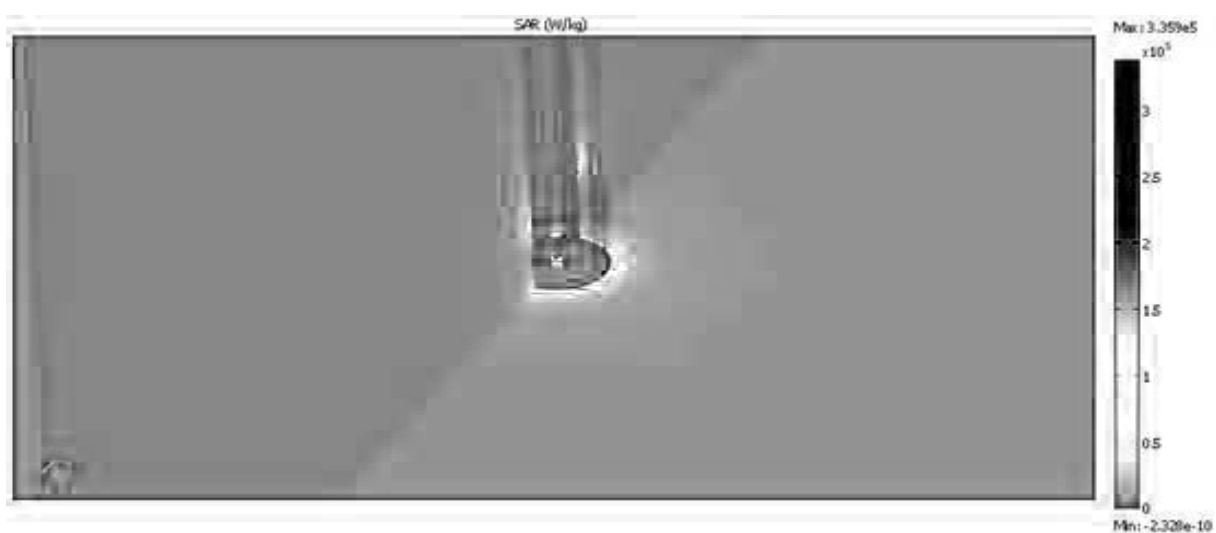
การกระจายของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในปอดขณะหดตัวที่ได้จากสายอากาศแบบสองสล็อตมีค่าประมาณ 91.49°C และอุณหภูมิสูงสุดขณะปอดขยายตัวประมาณ 96.28°C อุณหภูมิสูงสุดขณะปอดหดตัวต่ำกว่าขณะปอดขยายตัวประมาณ 4.79°C ซึ่งต่างกันน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบหนึ่งสล็อตกับปลายเปิด

5.5.2 การกระจาย SAR ที่ได้จากสายอากาศสองสล็อต (TSCA)

การกระจายของ SAR ในเนื้อเยื่อปอดขณะหัดตัวมีค่าสูงสุดประมาณ 5.36×10^5 W/kg และในเนื้อเยื่อปอดขณะขยายตัวคือ 3.36×10^5 W/kg รูปที่ 5.2 เป็นการแสดงการกระจายของ SAR แสดงโดยสไลด์ตามยาวและตามขวาง



(ก) หัดตัว

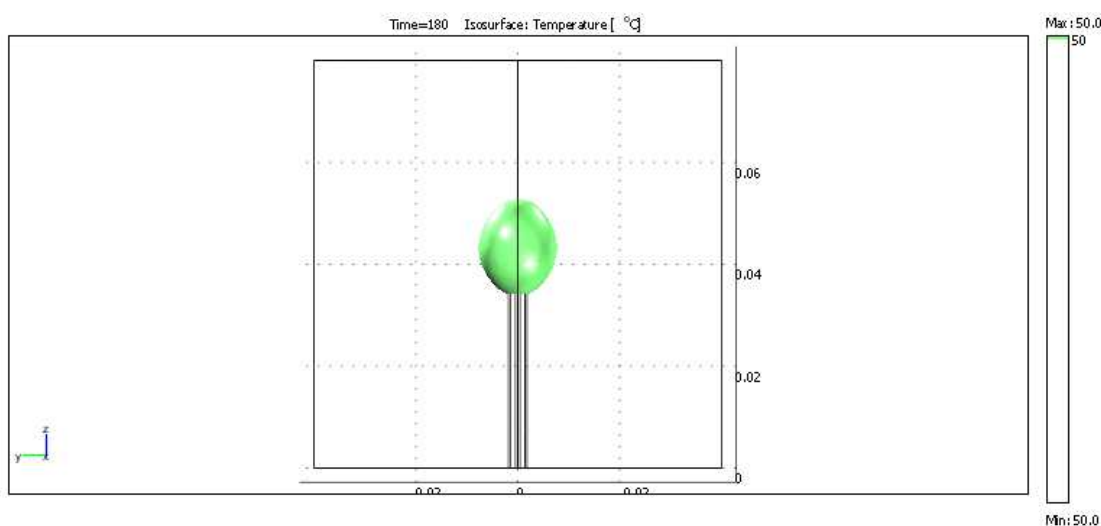


(ข) ขยายตัว

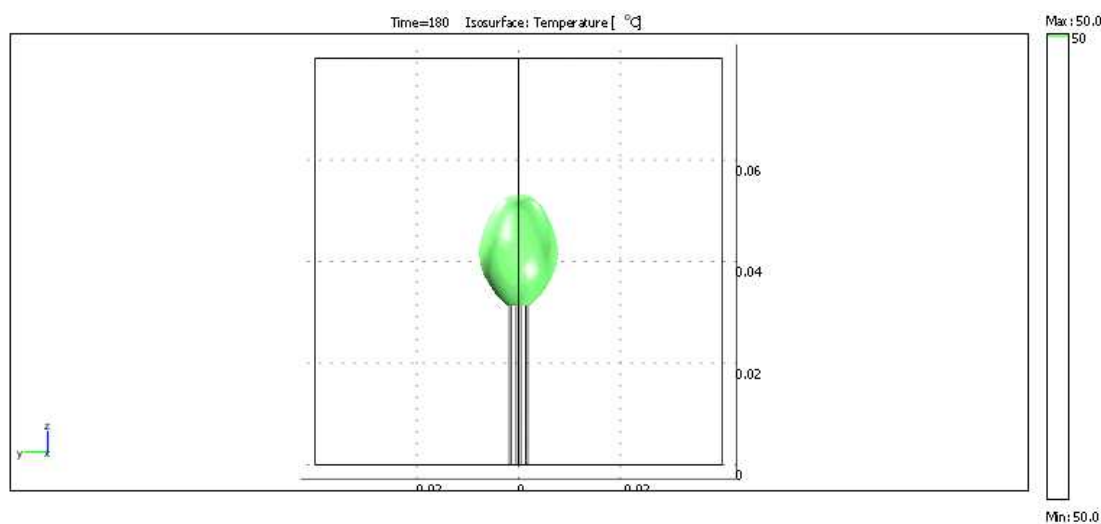
รูปที่ 5.12 แสดงการกระจายของ SAR ของสายอากาศแบบสองสล็อตในเนื้อเยื่อปอดขณะหัดและขยายตัว

5.5.3 รอยแผลที่เกิดจากสายอากาศสองสล็อต (TSCA) ที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป

จากรูปที่ 5.6 เป็นลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแบบสองสล็อตในขณะปอดหดและขยายตัว โดยปริมาตรของรอยแผลในปอดขณะหดตัวที่เกิดจากสายอากาศชนิดนี้มีค่าเท่ากับ 2.08774 cm^3 และในขณะขยายตัวมีปริมาตรเท่ากับ 2.405959 cm^3 ดังนั้นปริมาตรรอยแผลของปอดขณะปอดหดตัวมีค่าน้อยกว่าขณะขยายตัวเท่ากับ 0.318 cm^3



(ก) หดตัว

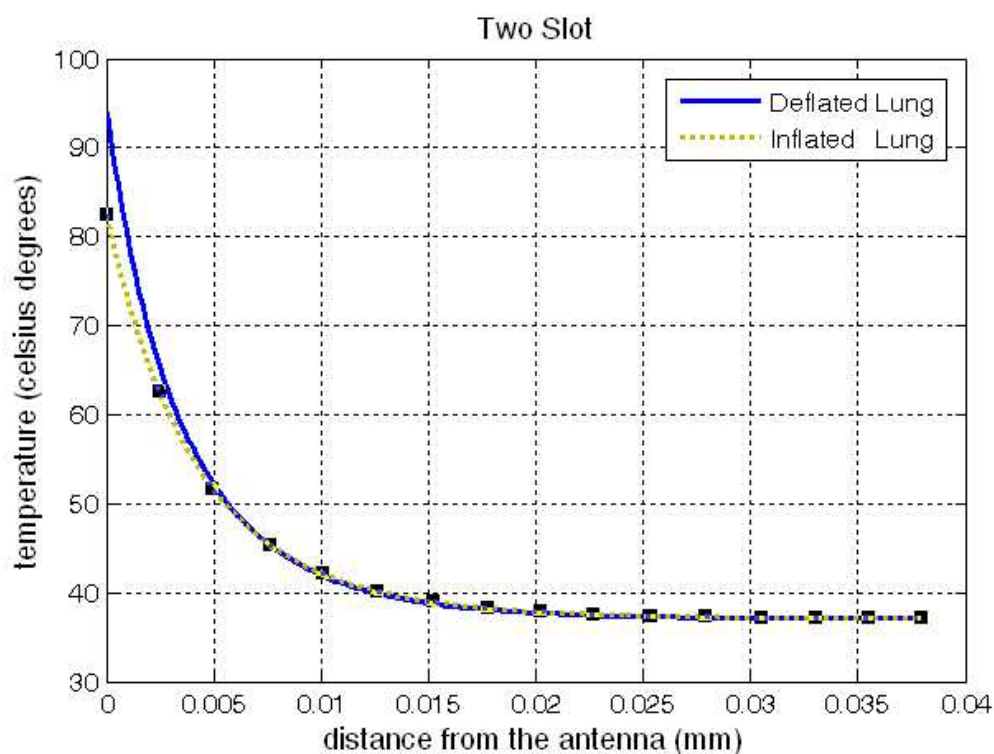


(ข) ขยายตัว

รูปที่ 5.13 แสดงรูปร่างของบาดแผลที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแบบปลายเปิดในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป

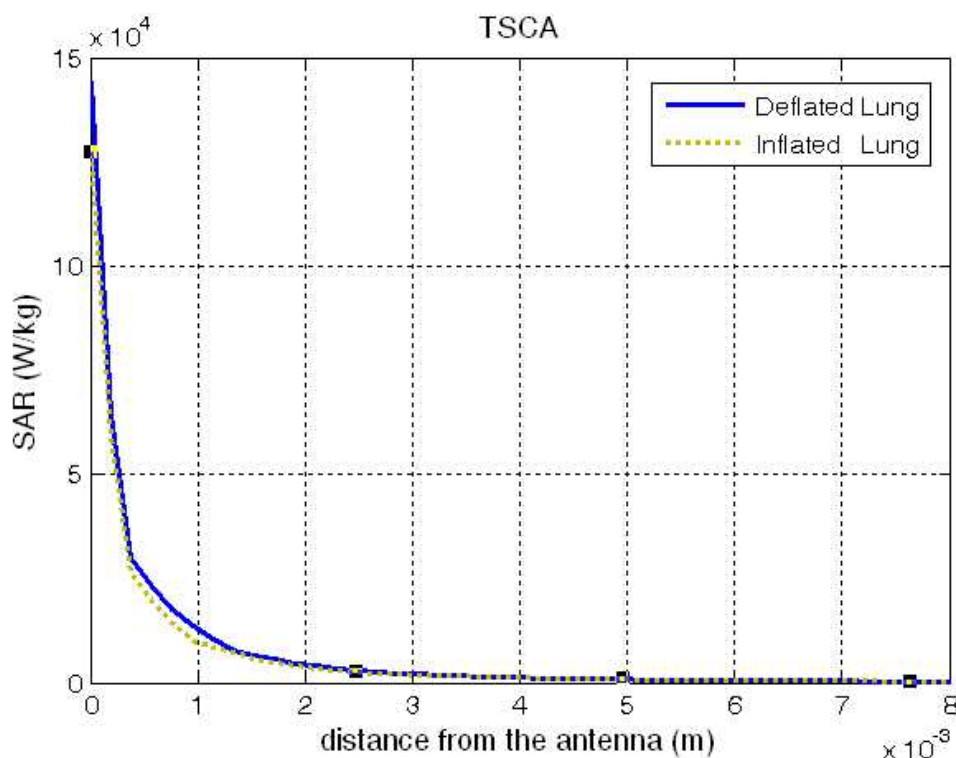
5.5.4 กราฟการกระจายอุณหภูมิ และ SAR ที่ได้จากสายอากาศสองสล็อต (TSCA)

การกระจายอุณหภูมิของสายอากาศชนิดสองสล็อตในแนวนอนมีจากสล็อตในขณะปอดหดและขยายตัวจะมีค่าใกล้เคียงกันมากกว่าผลที่ได้จากสายอากาศแบบอื่นๆ ซึ่งเป็นข้อดีในการรักษา เนื่องจากการควบคุมการกระจายอุณหภูมิด้วยการเปลี่ยนแปลงวัติน์ในขณะปอดหดและขยายตัวอาจไม่แม่นยำนัก แต่เนื่องจากสายอากาศแบบสองสล็อตมีการกระจายอุณหภูมิที่สม่ำเสมอใกล้เคียงกัน ในขณะปอดหดและขยายตัวจึงไม่จำเป็นต้องเปลี่ยนแปลงค่าวัติน์มากในขณะที่ทำการรักษา



รูปที่ 5.14 แสดงการกระจายอุณหภูมิจากสล็อตของสายอากาศสองสล็อตไปยังขอบของเนื้อเยื่อ

รูปที่ 5.14 แสดงการเปรียบเทียบการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศในขณะปอดหดและขยายตัวโดยวัดในแนวนอนมีจาก โดยวัดจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงสุดของสายอากาศแบบสองสล็อตนี้คือปลายสล็อตอันบนในขณะปอดหดตัว และปลายสล็อตอันล่างในขณะปอดขยายตัว โดยจากกราฟจะพบว่าระยะการทำลายเซลล์เนื้อเยื่อในแนวนอนมีในขณะปอดหดตัวอยู่ที่ 6.663 mm และขณะปอดขยายตัวอยู่ที่ 6.663 mm ต่างกัน 0 mm (วัดในช่วงที่อุณหภูมิ 50°C ขึ้นไป)



รูปที่ 5.15 แสดงการกระจาย SAR จากสล็อตของสายอากาศสองสล็อตไปยังขอบของเนื้อเยื่อ

รูปที่ 5.15 แสดงการเปรียบเทียบการกระจาย SAR ของสายอากาศแบบสองสล็อตบนแกนซึ่งค่าสูงสุดของ SAR ปรากฏ (วัดในแนวตั้งฉากกับสายอากาศ) พบว่าระยะความลึกผิวของกำลังซึ่งปล่อยออกมาในขณะปอดหดตัวเท่ากับ $2.5664654 \times 10^{-7} \text{ mm}$ และในขณะปอดขยายตัวเท่ากับ $1.1364655 \times 10^{-6} \text{ mm}$ วัดจากระยะที่ SAR ลดลง $1/e$ ของค่าสูงสุด) ซึ่งมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับสายอากาศทั้งสามแบบ

5.6 ผลการจำลองที่ได้จากสายอากาศสองสล็อตสามเส้นในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัว

เนื่องจากปอดมีค่าไดอิเล็กตริกที่ค่อนข้างต่ำคลื่นแพร่กระจายได้น้อย ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายหรือเพิ่มขนาดบาดแผลที่ใช้ในการทำลายเซลล์เนื้อเยื่อปอด เราสามารถทำได้โดยการเพิ่มจำนวนของสายอากาศเพื่อเพิ่มขนาดรอยแผลที่ใช้ในการทำลายเซลล์เนื้อเยื่อ แต่ปอดเป็นอวัยวะพิเศษที่มีการหดและขยายตัวอยู่ตลอดเวลา ซึ่งลักษณะการกระจายของอุณหภูมิและรอยแผลที่เกิดขึ้นขณะปอดหดตัวและขยายตัวมีค่าต่างกัน ดังนั้นสายอากาศที่จะถูกนำมาใช้ในแบบสามเส้นพร้อมกันควรจะมีความสมบัติดังต่อไปนี้

1. เป็นสายอากาศที่ทำให้ความแตกต่างของการกระจายอุณหภูมิน้อยที่สุดในระหว่างปอดหดตัวกับขยายตัวของสายอากาศทั้งสามแบบ
2. อุณหภูมิสูงสุดในระหว่างปอดหดตัวกับขยายตัว มีค่าแตกต่างกันน้อยที่สุดของสายอากาศทั้งสามแบบ
3. มีความแตกต่างในปริมาตรของบาดแผลในขณะปอดหดตัวและในขณะขยายตัวน้อยที่สุดในสายอากาศทั้งสามแบบ

จากการทดลองเราพบว่าเมื่อเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนเนื้อเยื่อวัดคนที่ใช้จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงไปด้วยเพื่อให้อุณหภูมิสูงสุดในเนื้อเยื่อมีค่าเท่ากับ 100°C ตัวอย่างเช่น เมื่อเรากำหนดเวลาให้ความร้อนเนื้อเยื่อเท่ากับ 6 นาที พบว่าต้องใช้กำลังเท่ากับ 2.5 W. เพื่อให้ได้อุณหภูมิประสิทธิผล ($\sim 100^{\circ}\text{C}$) และพบว่าปริมาตรบาดแผลที่ในขณะปอดหดตัวเท่ากับ 2.924 cm^3 และในขณะปอดขยายตัวมีค่าเท่ากับ 4.801 cm^3 ซึ่งน้อยกว่าเงื่อนไข 3 นาที 3 W. ซึ่งเราได้ทำการทดลองแปลเปลี่ยนค่ากำลังและเวลาจนกระทั่งพบว่าเงื่อนไข 3 นาที 3 W เป็นค่าดีที่สุด (optimum) ของสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้น

เราสามารถสรุปได้จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ก่อนหน้านี้ว่า จากสายอากาศทั้งสามแบบข้างต้นสายอากาศที่เหมาะสมจะนำมาใช้ในวิธีนี้คือ สายอากาศแบบสองสล็อต โดยสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้นจะมีลักษณะการวางตัวแบบสามเหลี่ยมด้านเท่า และมีระยะห่างจากสายอากาศถึงจุดกึ่งกลางของทั้งสามสายอากาศเท่ากับ 5 mm โดยตารางที่ 5.1 แสดงค่าพารามิเตอร์ของผลการจำลองของสายอากาศทั้งสามแบบที่กล่าวข้างต้น โดยตารางสรุปถึงสายอากาศที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปทำรูปแบบสายอากาศสามเส้นแทงเข้าไปในเนื้อเยื่อพร้อมกัน เพื่อให้ได้อุณหภูมิประสิทธิผลนั้นคือ 100°C มากที่สุดในเวลา 3 นาที โดยสามารถสรุปได้จากตารางว่าสายอากาศแบบสองสล็อตมีความเหมาะสมที่สุดเนื่องจาก

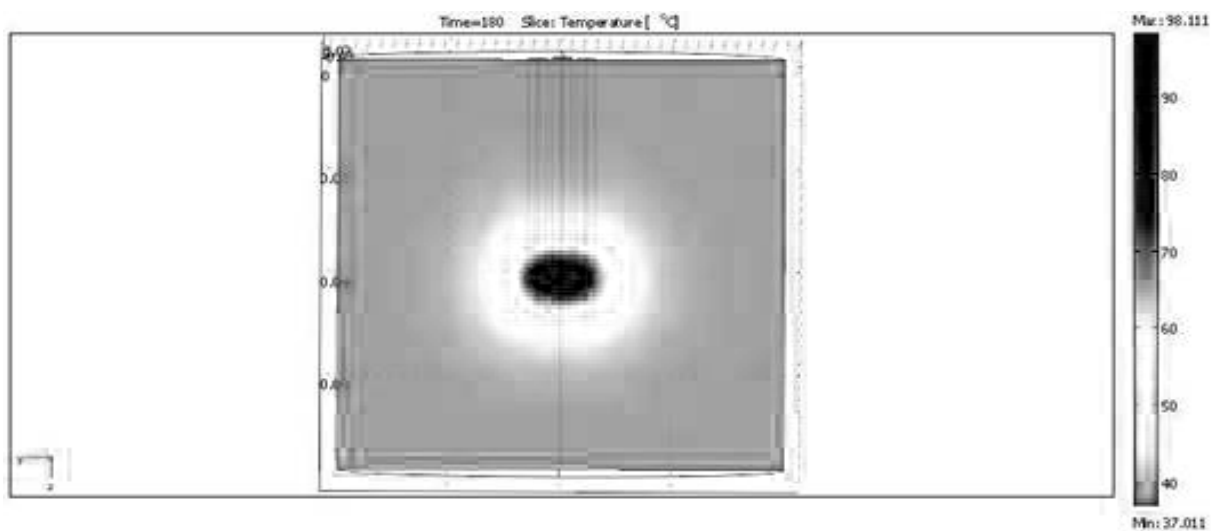
ตารางที่ 5.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญผลการจำลองทั้ง 3 รูปแบบ

1. ใช้ค่าวัตต์น้อยที่สุด (5W) ในสายอากาศทั้งสามแบบเพื่อให้ได้อุณหภูมิประสิทธิภาพ ซึ่งหมายถึงมีการส่งถ่ายกำลังคลื่นไมโครเวฟไปยังปอดได้ดี
2. มีค่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดในขณะปอดหดและขยายตัวน้อยที่สุด ($4.79\text{ }^{\circ}\text{C}$) ในสายอากาศทั้งสามแบบซึ่งหมายถึงมีอุณหภูมิของสายอากาศแบบสองสล็อต
3. มีความแตกต่างของปริมาตรรอยแผลระหว่างปอดหดและขยายตัวน้อยที่สุด (0.318 cm^3) ในสายอากาศทั้งสามแบบซึ่งไม่ทำให้เกิดผลผิดพลาดในการควบคุมขนาดรอยแผลมาก
4. มีความแตกต่างในรัศมีสูงสุดของรอยแผลน้อยที่สุด (0 mm) ในสายอากาศทั้งสามแบบ

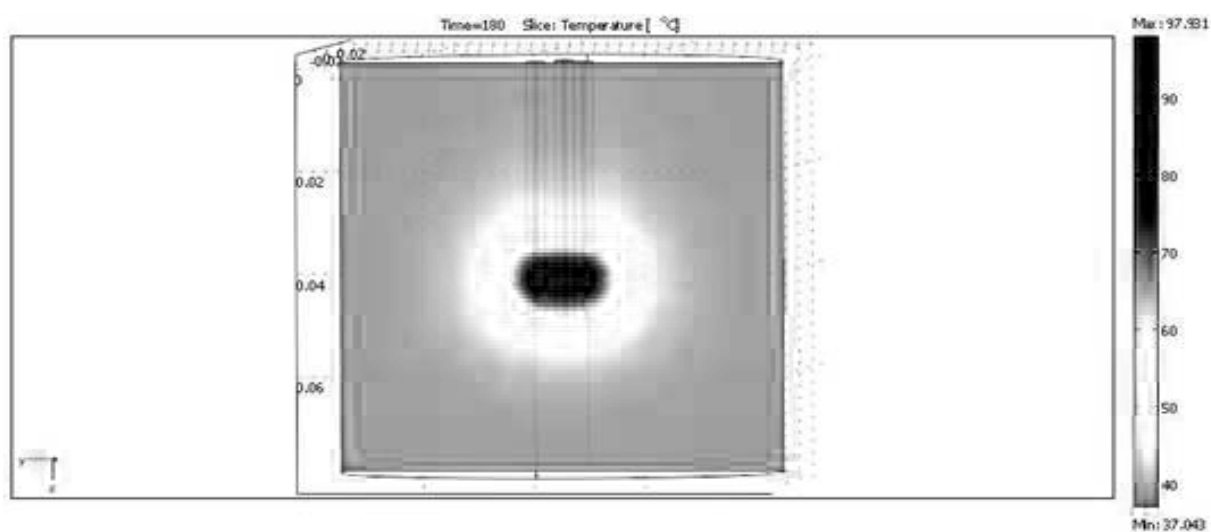
ด้วยเหตุนี้สายอากาศแบบสองสล็อตจึงถูกนำมาพัฒนาเป็นแบบสองสล็อตสามเส้นซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

5.6.1 การกระจายอุณหภูมิที่ได้จากสายอากาศสองสล็อตสามเส้น

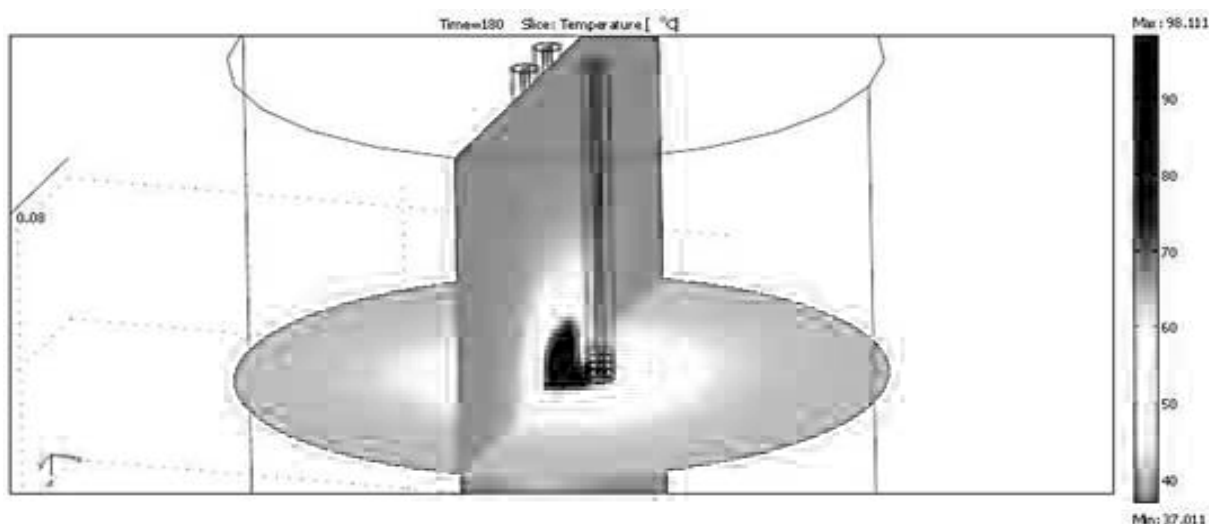
สำหรับสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้น (Three-TSCA) เราได้ทำการทดลองหลายครั้งโดยการเปลี่ยนแปลงกำลังที่ใส่เข้าไปในเนื้อเยื่อ และพบว่าวัตต์ที่ทำให้เกิดบาดแผลใหญ่ที่สุดโดยอุณหภูมิอยู่ใกล้ร้อยละ 3 W. ในเวลา 180 s.



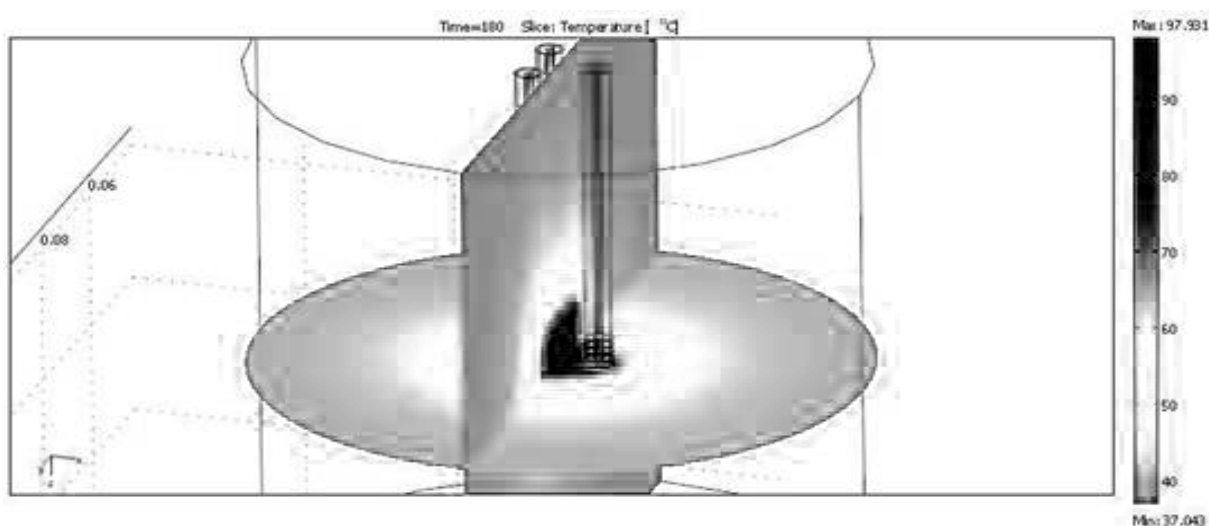
(ก) หดตัว



(ข) ขยายตัว



(ก) หดตัว



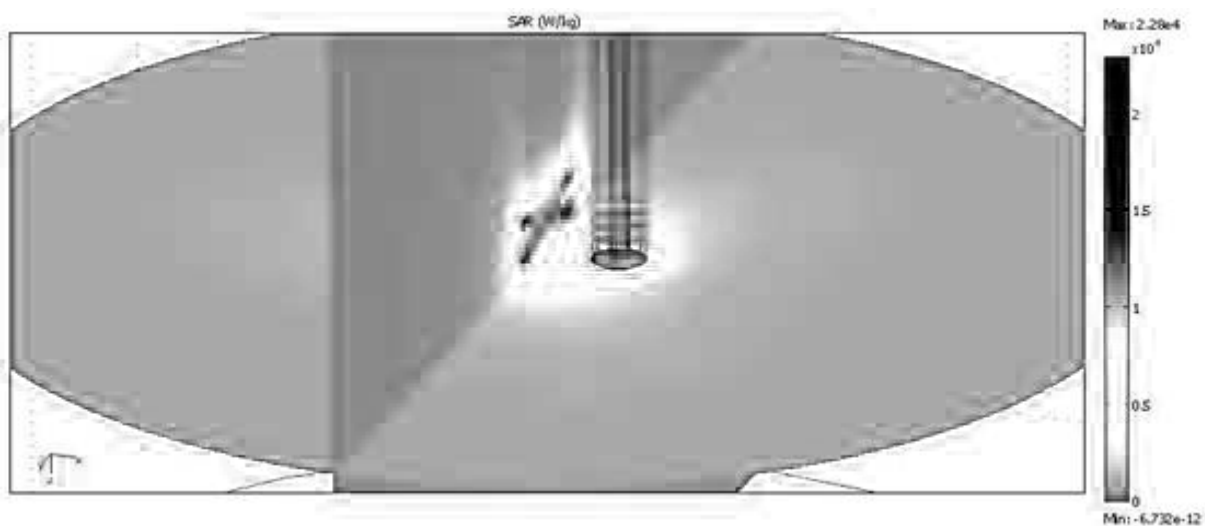
(ข) ขยายตัว

รูปที่ 5.16 แสดงการกระจายของอุณหภูมิของสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้นในเนื้อเยื่อปอด
ขณะหดและขยายตัวในแบบสามมิติ ภาพ (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นด้านหน้าของ
สายอากาศ (ค) และ (ง) แสดงให้เห็นในแบบสามมิติ

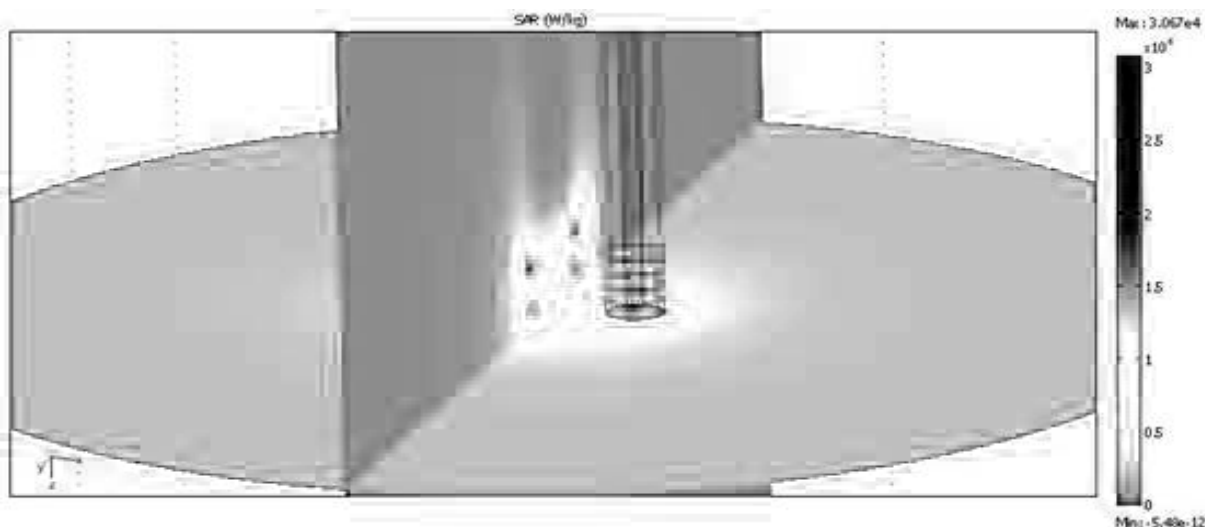
รูป 5.16(ก) และ (ข) แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิทางด้านหน้าของสายอากาศ โดยในขณะ
ปอดหดและขยายตัวมีลักษณะการกระจายที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน แต่จะมีความแตกต่างทางด้าน
อุณหภูมิสูงสุดคือ อุณหภูมิสูงสุดขณะปอดหดตัวมีค่าเท่ากับ 98.111 และในขณะขยายตัวเท่ากับ
97.981 ต่างกัน 0.13 °C ซึ่งเป็นความแตกต่างที่ค่อนข้างน้อย โดยอุณหภูมิสูงสุดนี้อ้างอิงจากสไลด์
ตามยาวซึ่งผ่านจุดศูนย์กลางของทั้งสามสายอากาศ

5.6.2 การกระจาย SAR ที่ได้จากสายอากาศสองสล็อตสามเส้น

ลักษณะการกระจายของ SAR ในสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้นจะมีความหนาแน่นสูงบริเวณภายในของสายอากาศทั้งสามเส้น เนื่องมาจากการเสริมกันของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าข้างใน ซึ่งจะมีลักษณะการกระจายดังรูปที่ 5.17



(ก) หดตัว

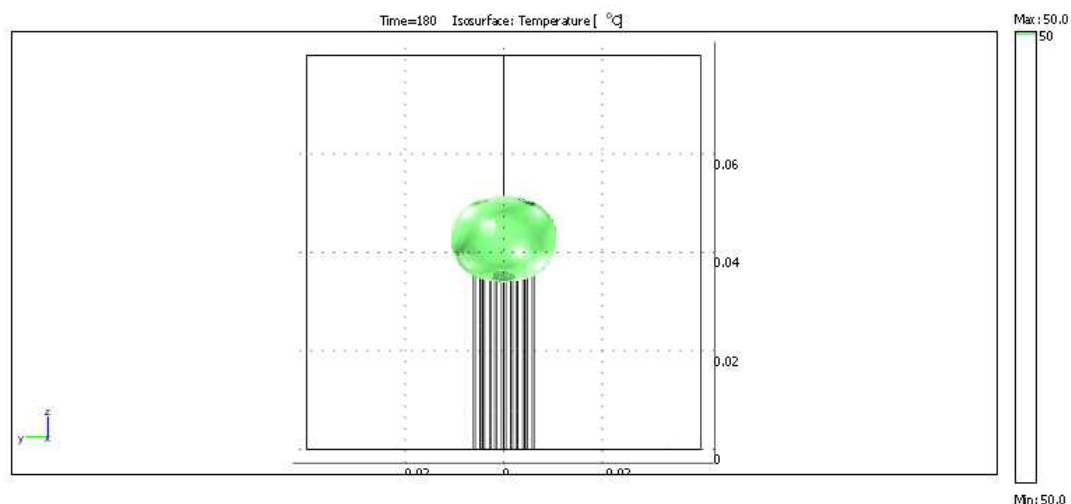


(ข) ขยายตัว

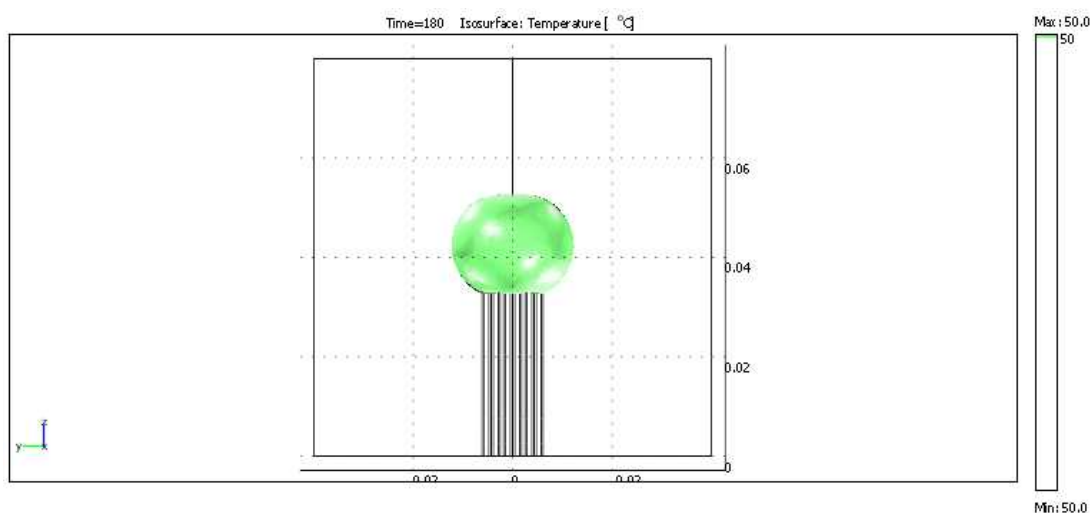
รูปที่ 5.17 แสดงการกระจาย SAR สำหรับสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้นในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัว แสดงโดยสไลด์ตามยาวและตามขวาง

สไลด์ตามยาวตัดผ่านจุดกึ่งกลางของสายอากาศทั้งสาม และสไลด์ตามขวางตัดบริเวณใต้สล็อตอันที่สองเพื่อให้เห็นการกระจายของ SAR จากสล็อตทั้งสอง โดยการกระจายของ SAR ตามสไลด์ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดตัวมีค่าสูงสุดคือ 2.28×10^4 W/kg และในเนื้อเยื่อปอดขณะขยายตัวคือ 3.067×10^4 W/kg

5.6.3 รอยแผลที่เกิดจากสายอากาศสองสล็อตตามเส้นที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป



(ก) หัว



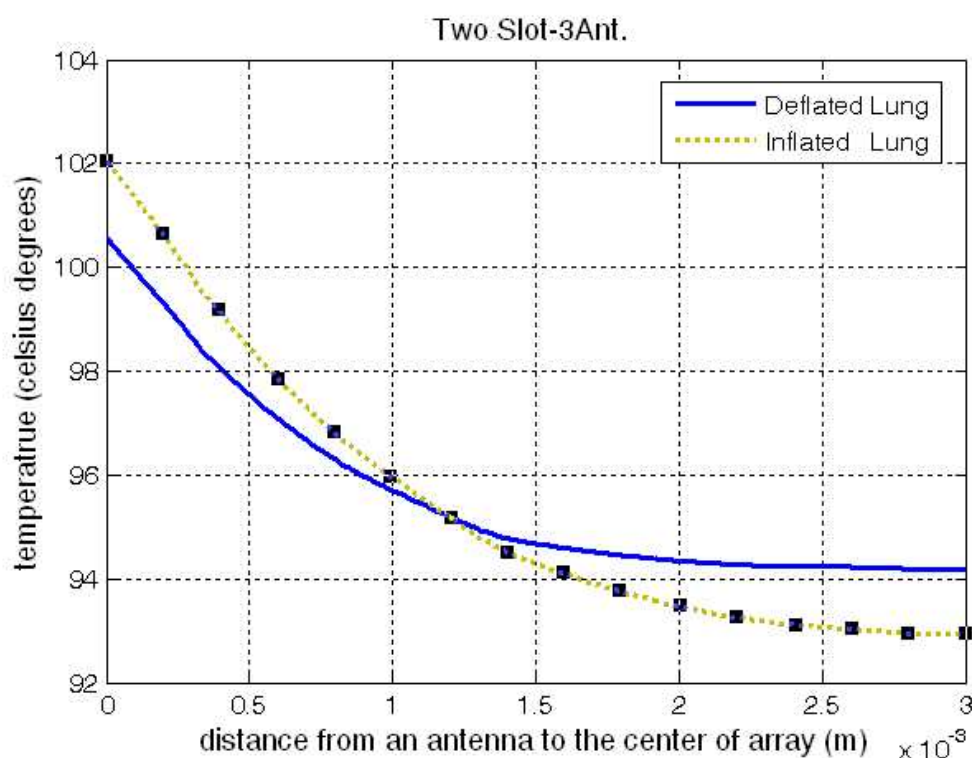
(ข) ขยายตัว

รูปที่ 5.18 รอยแผลที่เกิดขึ้นจากสายอากาศแบบปลายเปิดในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป

จากการทดลองรอยแผลที่เกิดขึ้นมีลักษณะแบบ sphere ซึ่งเป็นลักษณะรอยแผลแบบสมมาตร ที่เกิดจากการใช้สายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้น โดยปริมาตรของรอยแผลเท่ากับในขณะปอดหดตัวเท่ากับ 3.897708 cm^3 และในขณะปอดขยายตัวเท่ากับ 6.308141 cm^3 ดังนั้นปริมาตรรอยแผลของปอดขณะปอดหดตัวมีค่าน้อยกว่าขณะขยายตัวเท่ากับ 2.410433 cm^3

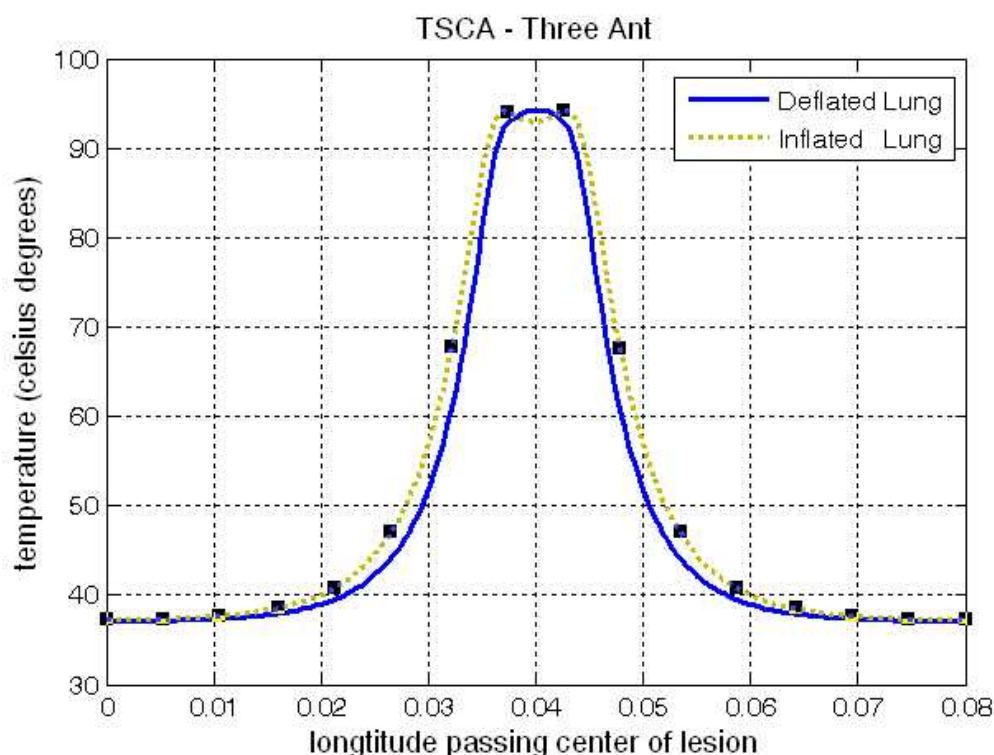
5.6.4 กราฟการกระจายอุณหภูมิ และ SAR ที่ได้จากสายอากาศสองสล็อตสามเส้น

รูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศเส้นใดเส้นหนึ่งไปยังจุดศูนย์กลางของสายอากาศทั้งสาม จะเห็นว่าอุณหภูมิที่จุดศูนย์กลางจะมีค่ามากที่สุดและค่อยๆ ลดลงเมื่อไปยังสายอากาศเส้นใดเส้นหนึ่ง โดยในกรณีของปอดขณะหดตัวอุณหภูมิสูงสุดจะมีค่ามากกว่ากรณีของปอดขยายตัว แต่อุณหภูมิของของปอดขณะหดตัวจะมีค่าลดลงเร็วกว่าจากจุดศูนย์กลางไปยังสายอากาศ จนกระทั่งอุณหภูมิทั้งสองเท่ากันที่ระยะ 1.15 mm (จากจุดศูนย์กลาง) และลดลงจนอุณหภูมิต่ำกว่าในที่สุด



รูปที่ 5.19 แสดงการกระจายอุณหภูมิของสายจากสายอากาศไปยังจุดศูนย์กลางของสายอากาศทั้งสามเส้น

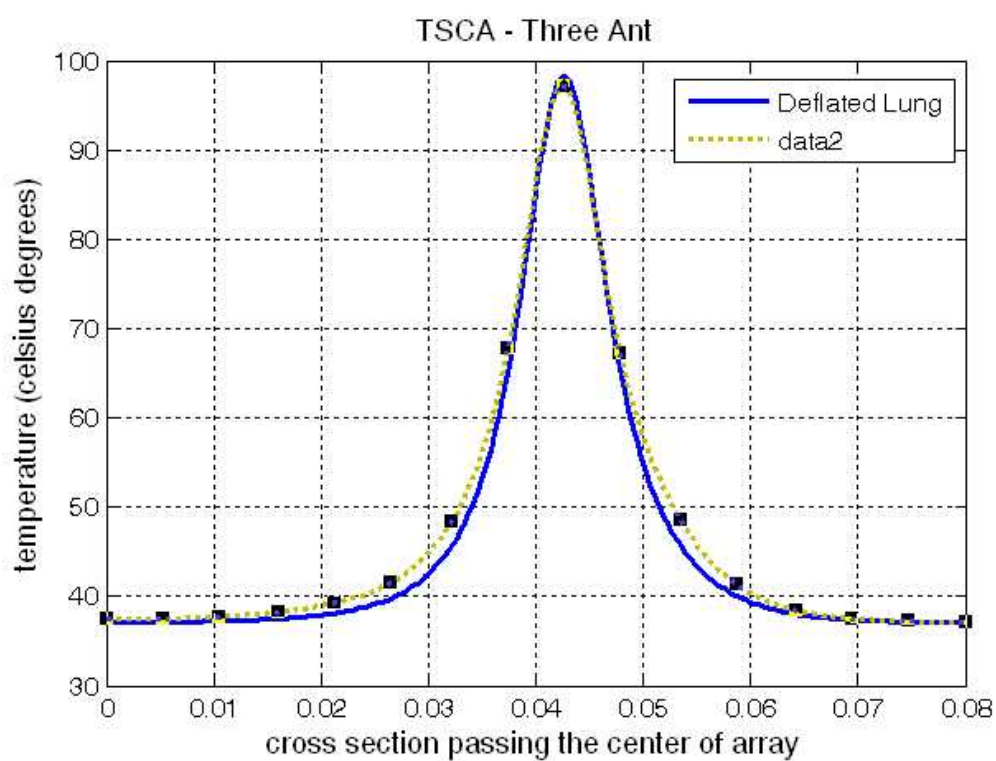
รูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นถึงลักษณะการกระจายอุณหภูมิตามแนวกึ่งกลางของสายอากาศทั้งสาม พบว่าอุณหภูมิจะมีค่าสูงสุดอยู่ที่ความลึกผิวตรงช่วงสล็อตทั้งสองของสายอากาศโดยในขณะปอดหดตัวจะมอยู่ฟิคเดียวส่วนในขณะขยายตัวจะมีอยู่สองฟิค แต่อุณหภูมิของปอดทั้งในขณะหดและขยายตรงบริเวณฟิค จะมีค่าค่อนข้างคงตัวอยู่ระยะหนึ่งแล้วอุณหภูมิจึงลด โดยจากกราฟยังสามารถบอกถึงเส้นผ่าศูนย์กลางตามแนวยาวของรอยแผลได้ด้วยโดยดูบริเวณที่กราฟมีอุณหภูมิ 50°C ขึ้นไป โดยสำหรับปอดในขณะหดตัวมีค่าประมาณ 2 cm และในขณะขยายตัวมีค่าประมาณ 2.45 cm



รูปที่ 5.20 แสดงการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อของสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้นวัดในแนวความลึกผิวตลอดแนวศูนย์กลางของสายอากาศทั้งสาม

รูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นถึงการกระจายอุณหภูมิของสายอากาศทั้งสามโดยวัดที่ปลายของสล็อตที่สองซึ่งเป็นจุดที่ให้ค่าอุณหภูมิสูงสุดสำหรับสายอากาศแบบสองสล็อตโดยวัดในแนวตัดผ่านศูนย์กลางของสายอากาศทั้งสาม จากรูป ที่ระยะแกน $x=0$ คือปลายของเนื้อเยื่อด้านหนึ่ง(ตามแนวขวาง) และ $x=0.04$ คือจุดกึ่งกลางของสายอากาศทั้งสาม $x=0.08$ คือปลายของเนื้อเยื่ออีกด้านหนึ่ง โดยการกระจายอุณหภูมิของปอดขณะหดและขยายตัวมีค่าใกล้เคียงกันมาก จากรูปที่ 5.15 เราสามารถบอกเส้นผ่าศูนย์กลางตามขวางของรอยแผลได้โดยดูจากบริเวณที่เส้นกราฟบริเวณที่มี

อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป โดยในขณะปอดหดตัวมีค่าเท่ากับ 2.130653 cm และในขณะปอดขยายตัวมีค่าเท่ากับ 2.41 cm



รูปที่ 5.21 แสดงการกระจายอุณหภูมิในเนื้อเยื่อของสายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้นวัดในแนวตั้งฉากกับสายอากาศโดยวัดผ่านจุดศูนย์กลางของสายอากาศทั้งสาม

รูปที่ 5.22 แสดงการเปรียบเทียบการกระจาย SAR ของสายอากาศแบบสองสล็อตบนแกนซึ่งค่าสูงสุดของ SAR ปรากฏ(วัดในแนวตั้งฉากกับสายอากาศ) โดยปลายของสล็อตที่สองไปยังจุดศูนย์กลางของสายอากาศทั้งสาม

รูปที่ 5.22 แสดงการกระจาย SAR ในเนื้อเยื่อปอดขณะหดและขยายตัวของสายอากาศแบบสอง
สล็อตตามเส้นวัดในแนวตั้งฉากกับสายอากาศโดยวัดผ่านจุดศูนย์กลางของสายอากาศ
ทั้งสาม

ตารางที่ 5.2 สรุปค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญผลการจำลองทั้ง 4 รูปแบบ

จากตารางเราสามารถสรุปผลได้ดังต่อไปนี้ โดยทำการกำหนดเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนแก่เนื้อเยื่อเท่ากับ 3 นาทีผลที่ได้เป็นดังต่อไปนี้

สายอากาศแบบปลายเปิดจะมีการกระจายอุณหภูมิอยู่บริเวณจุดต่อระหว่างตัวนำนอกและชั้นไดอิเล็กตริก กำลังที่ก่อให้เกิดอุณหภูมิใกล้เคียงของสามมากที่สุดคือ 7 W อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากสายอากาศปลายเปิดในขณะปอดหดตัวมีค่ามากกว่าในขณะปอดขยายตัว 6.1°C และปริมาตรของรอยแผลในปอดขณะหดตัวมากกว่าตอนขยายตัว 0.868656 cm^3 รัศมีของรอยแผลในขณะปอดหดตัวมากกว่าขณะขยายตัวประมาณ 0.9 mm การกระจายของ SAR ในขณะปอดหดตัวมากกว่าขณะขยายตัวประมาณ $1.23 \times 10^5\text{ W/kg}$ ระยะความลึกผิวที่กำลังส่งผ่านไปเนื้อเยื่อคือในปอดขณะหดตัวมากกว่าในขณะขยายตัวเท่ากับ $8 \times 10^{-4}\text{ mm}$

สายอากาศแบบหนึ่งสล็อตจะมีการกระจายอุณหภูมิอยู่บริเวณสล็อตโดยอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่บริเวณกลางสล็อต กำลังประสิทธิผลคือ 4 W. อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากสายอากาศหนึ่งสล็อตในขณะปอดขยายตัวมีค่ามากกว่าในขณะปอดหดตัว 15.4°C และปริมาตรของรอยแผลในปอดขณะขยายตัวมากกว่าตอนหดตัว 0.6875 cm^3 รัศมีของรอยแผลในขณะปอดขยายตัวมากกว่าขณะหดตัวประมาณ 1.37 mm การกระจายของ SAR ในขณะปอดขยายตัวมากกว่าขณะหดตัวประมาณ $1.23 \times 10^5\text{ W/kg}$ ระยะความลึกผิวที่กำลังส่งผ่านไปเนื้อเยื่อคือในปอดขณะหดตัวมากกว่าในขณะขยายตัวเท่ากับ $4.7 \times 10^{-2}\text{ mm}$

สายอากาศแบบสองสล็อตจะมีการกระจายอุณหภูมิอยู่บริเวณสล็อตทั้งโดยอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่บริเวณปลายสล็อตโดยในขณะปอดหดตัวอุณหภูมิสูงสุดจะอยู่บริเวณปลายสล็อตอันบนและในขณะปอดขยายตัวจะอยู่บริเวณปลายสล็อตอันล่าง กำลังประสิทธิผลคือ 5 W. อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากสายอากาศสองสล็อตในขณะปอดขยายตัวมีค่ามากกว่าในขณะปอดหดตัว 4.79°C และปริมาตรของรอยแผลในปอดขณะขยายตัวมากกว่าตอนหดตัว 0.318 cm^3 รัศมีของรอยแผลในขณะปอดขยายตัวเท่ากับกับขณะปอดหดตัว การกระจายของ SAR ในปอดขณะขยายตัวมากกว่าขณะหดตัวประมาณ $2 \times 10^5\text{ W/kg}$ ระยะความลึกผิวที่กำลังส่งผ่านไปเนื้อเยื่อคือในปอดขณะขยายตัวมากกว่าในขณะหดตัวเท่ากับ $8.79 \times 10^{-7}\text{ mm}$

สายอากาศแบบสองสล็อตสามเส้นจะวางตัวแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าและมีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของสายอากาศทั้งสามเท่ากับ 5 mm. โดยการกระจายของอุณหภูมิจะอยู่บริเวณรอบสายอากาศทั้งสามแต่จะมีความหนาแน่นสูงบริเวณภายในสายอากาศทั้งสาม กำลังประสิทธิผลคือ 3 W. อุณหภูมิสูงสุดที่ได้จากสายอากาศสองสล็อตสามเส้นในขณะปอดหดตัวมีค่ามากกว่าในขณะปอดขยายตัว 0.13°C และปริมาตรของรอยแผลในปอดขณะหดตัวมากกว่าตอนขยายตัว 2.41 cm^3 รัศมีของรอยแผลในขณะปอดขยายตัวมากกว่าในขณะปอดหดตัวประมาณ 1.45 mm การกระจายของ SAR ในขณะปอดขยายตัวมากกว่าขณะหดตัวประมาณ $7.87 \times 10^3\text{ W/kg}$

จากผลการทดลองทั้งหมดแสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติในการส่งผ่านคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไปสู่เนื้อเยื่อที่ต่างกันของสายอากาศแต่ละชนิดในเนื้อเยื่อปอดที่มีการหดและขยายตัว โดยนำการนำเอาคุณสมบัติที่ต่างกันนี้มาวิเคราะห์ เราสามารถหาสายอากาศที่เหมาะสมจะนำมาใช้แบบหลายเส้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำลายเนื้อเยื่อได้ ในที่นี้คือสายอากาศแบบสองสล็อต เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสูงสุดในขณะปอดหดและขยายตัวมีค่าต่างกันไม่มากจึงเป็นข้อดี ทำให้ไม่จำเป็นในการควบคุมหรือเปลี่ยนแปลงกำลังเพื่อรักษาอุณหภูมิให้คงที่มากนักในการรักษาปฏิบัติงานจริง และปริมาตรรอยแผลในขณะปอดหดและขยายตัวยังมีค่าต่างกันไม่มากนักเมื่อเทียบกับสายอากาศแบบหนึ่งสล็อตและปลายเปิด และอุณหภูมิสูงสุดก็ยังมีค่าไม่มากนักเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังวัตต์ที่ใช้และอุณหภูมิที่ได้(หากเทียบกับสายอากาศอีกสองชนิดที่เหลือ) ทำให้เราสามารถเพิ่มกำลังวัตต์ได้อีกเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการทำลายเซลล์เนื้อเยื่อ (การเพิ่มกำลังวัตต์ทำให้ได้พื้นที่ในการทำลายมากขึ้นแต่อุณหภูมิสูงสุดในเนื้อเยื่อต้องไม่เกินร้อยละสามมากนักเพื่อไม่ให้เนื้อเยื่อเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพ)

5.7 ผลการทดลองในเนื้อเยื่อปอดหมู (*in vitro*)

5.7.1 การเตรียมการทดลองในเนื้อเยื่อปอดหมูแบบ *in vitro*

การทดลองจริงในปอดหมูมีกระบวนการดังต่อไปนี้

1. นำปอดหมูสดหาซื้อได้ทั่วไปมาล้างให้สะอาดแล้วเตรียมไว้ในโถที่สะอาดจนกระทั่งอุณหภูมิเนื้อเยื่อปอดหมูคงที่ทั่วกันทั้งปอด โดยปอดหมูที่นำมาทดลองนี้มีคุณสมบัติแบบหดตัว (deflated lung)



รูปที่ 5.23 ปอดหมูแบบ *in vitro*

2. นำสายอากาศทั้งสามแบบที่เตรียมไว้มาต่อกับเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz ตั้งค่ากำลังประสิทธิภาพตามแต่ละสายอากาศนั้นคือ แบบปลายเปิด 7 W, แบบหนึ่งสล็อต 4 W, และแบบสองสล็อต 5 W รูปที่ 5.73 (ก) แสดงสายอากาศทั้งสามแบบที่ใช้ในการทดลองโดยจากซ้ายไปขวามือคือ ปลายเปิด หนึ่งสล็อต สองสล็อต รูปที่ 5.74 (ข) แสดงเครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ในการทดลอง



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.24 (ก) สายอากาศแบบปลายเปิด หนึ่งสล็อต และสองสล็อต (ข) เครื่องกำเนิดคลื่นไมโครเวฟ 2.45 GHz



รูปที่ 5.25 ลักษณะการคับปลิงของสายอากาศกับโพรบ

จากนั้นทำการต่อ (coupling) สายอากาศ (โพรบ) แต่ละแบบเข้ากับสายโคแอกเซียลดังรูปที่ 5.25

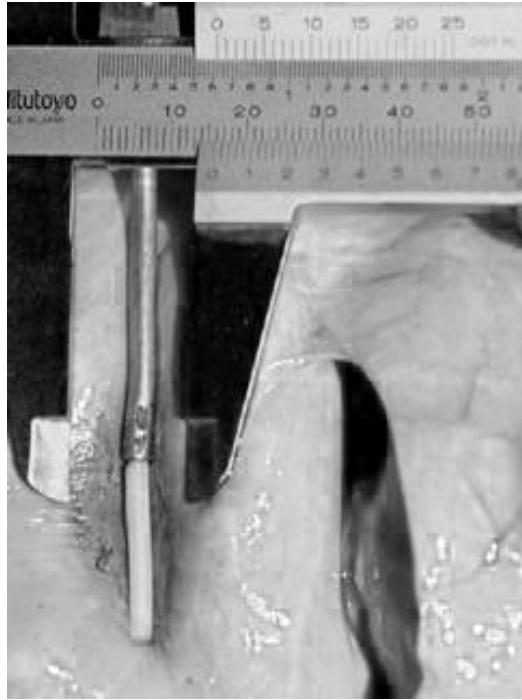
3. นำสายอากาศแทงเข้าไปในปอดแบบ *in vitro* (deflated lung) แล้วจับเวลาเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นอยู่ที่อุณหภูมิร่างกายแล้วจับเวลา 3 นาทีจากนั้นดูรอยแผลที่เกิดขึ้น



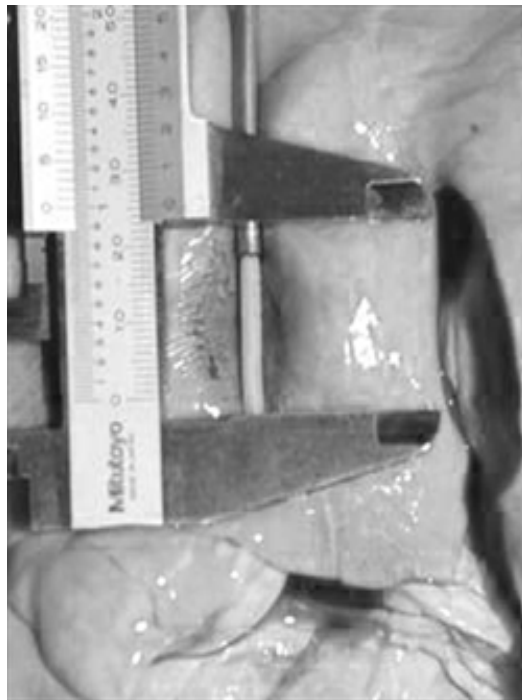
รูปที่ 5.26 สายอากาศแบบปลายเปิด หนึ่งสล็อต และสองสล็อต

5.7.2 ลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นจาสายอากาศปลายเปิด

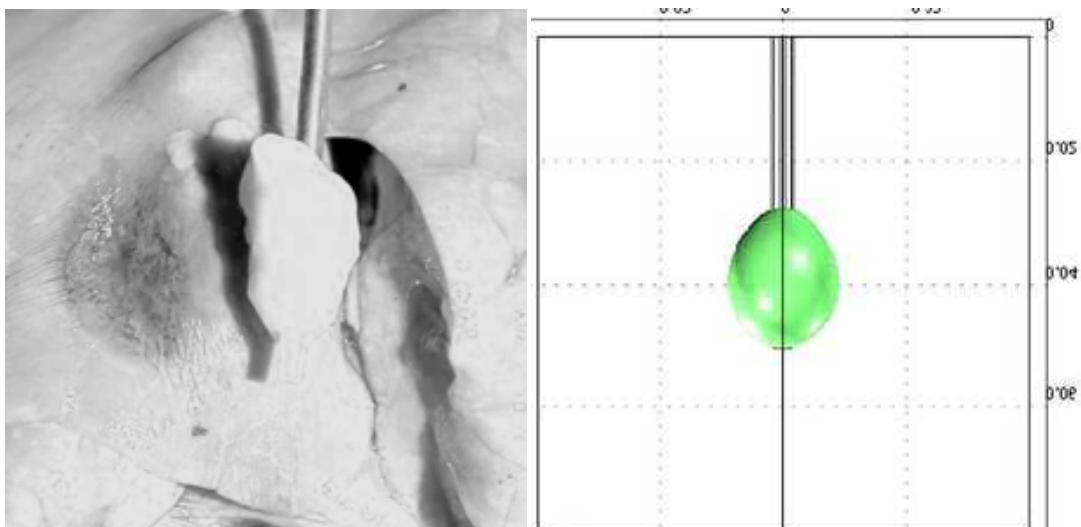
Kazuyuki Saito อ้างว่ารอยแผลของเนื้อเยื่อจะเริ่มเกิดรอยไหม้ที่อุณหภูมิเริ่มต้น 60 °C [8] ซึ่งจะทำให้สามารถวัดขนาดรอยแผลให้สอดคล้องกับผลทางการจำลองได้ดังต่อไปนี้ โดยรูปที่ 5.27 แสดงรอยแผลที่เกิดจากสายอากาศแบบปลายเปิด โดยสามารถวัดขนาดรอยแผลได้ดังนี้ รูปที่ 5.27 (ก) แสดงเส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุดของรอยแผลในแนวรัศมีของสายอากาศปลายเปิดมีค่าเท่ากับ 1.56 cm รูปที่ 5.27 (ข) แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวสายอากาศปลายเปิด 2.53 cm รูปที่ 5.27 (ค) แสดงการเปรียบเทียบลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นในไขขาว ในเนื้อเยื่อปอดและ ผลจากการจำลอง โดยผลจากการจำลองเป็นรอยแผลที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป



(n)



(v)

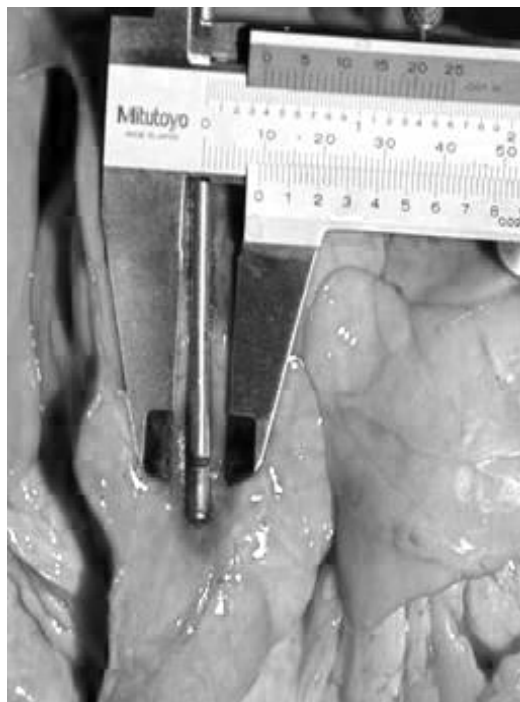


(ก)

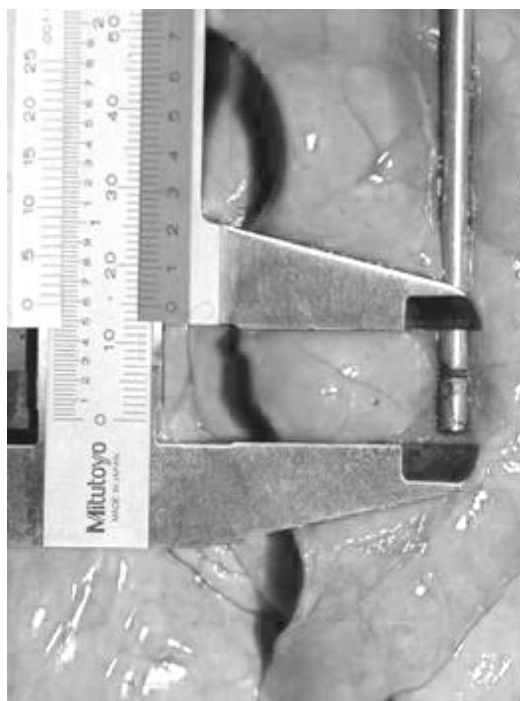
รูปที่ 5.27 แสดงรอยแผลในปอดแบบ *in vitro* ที่เกิดจากสายอากาศปลายเปิด

5.7.3 ลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นจาสายอากาศหนึ่งสล็อต

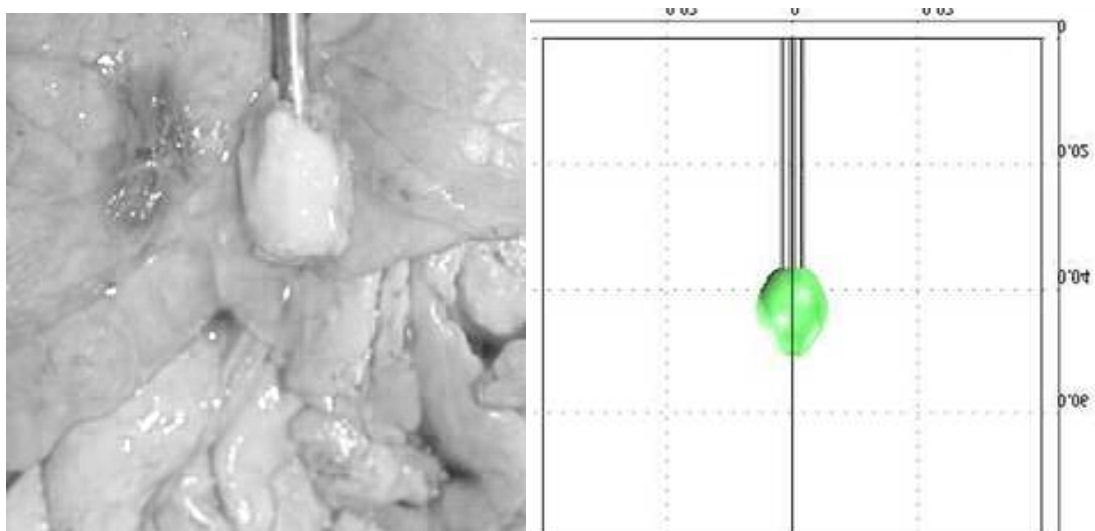
รูปที่ 5.28 แสดงรอยแผลที่เกิดจากสายอากาศแบบหนึ่งสล็อต โดยสามารถวัดขนาดรอยแผลได้ ดังนี้ รูปที่ 5.28 (ก) แสดงเส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุดของรอยแผลในแนวรัศมีของสายอากาศปลายเปิดมีค่าเท่ากับ 0.96 cm รูปที่ 5.28 (ข) แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวสายอากาศปลายเปิด 1.93 cm รูปที่ 5.28 (ค) แสดงการเปรียบเทียบลักษณะรอยแผลที่เกิดในไขขาว ในเนื้อเยื่อปอด และผลจากการจำลอง โดยผลการจำลองเป็นรอยแผลที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป



(n)



(u)

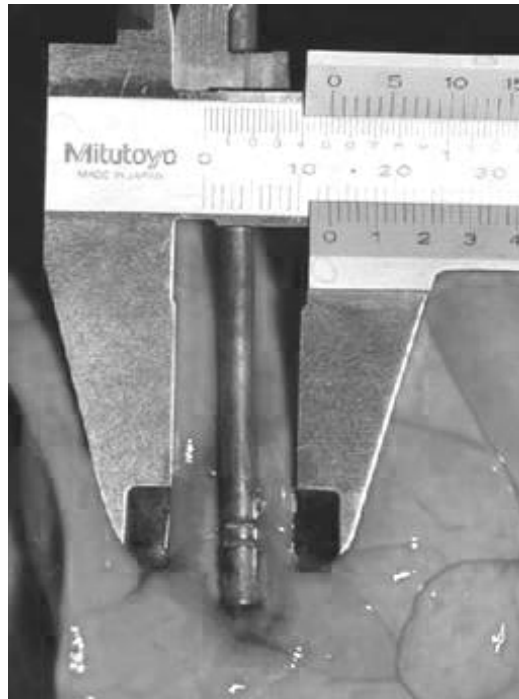


(ค)

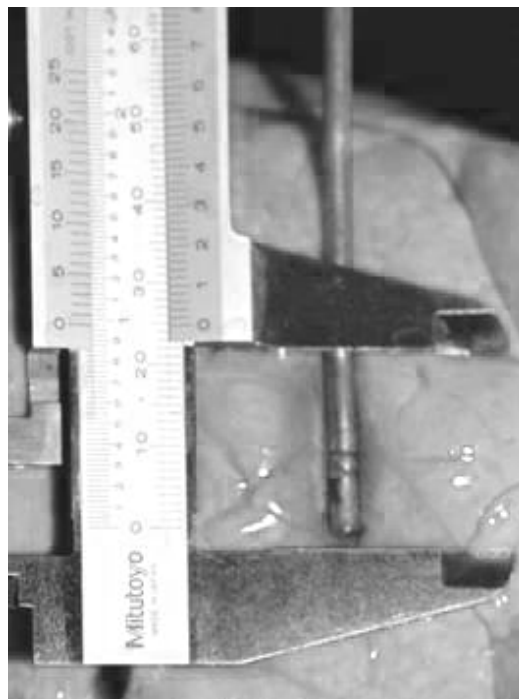
รูปที่ 5.28 แสดงรอยแผลในปอดแบบ *in vitro* ที่เกิดจากสายอากาศหนึ่งสล็อต

5.7.4 ลักษณะรอยแผลที่เกิดขึ้นจาสายอากาศสองสล็อต

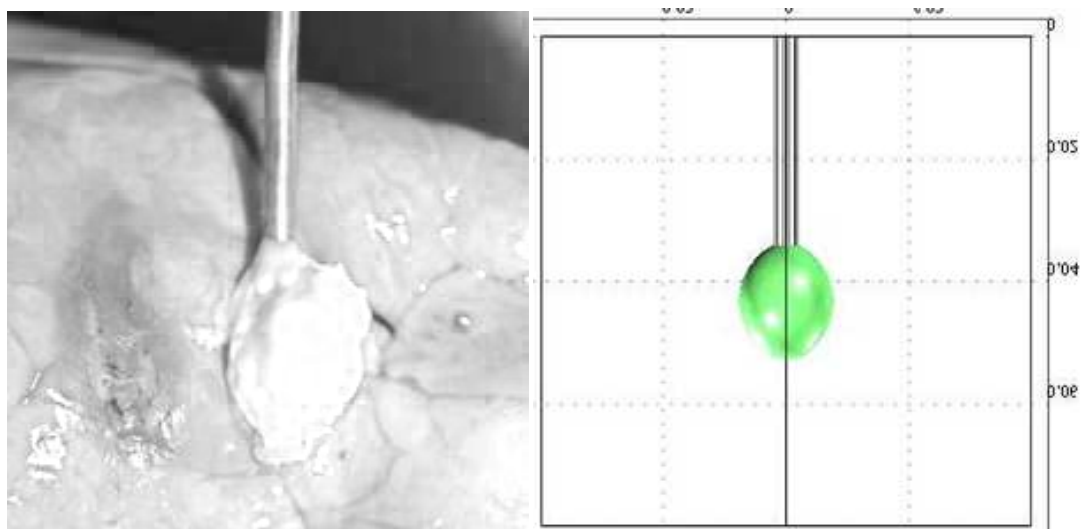
รูปที่ 5.29 แสดงรอยแผลที่เกิดจากสายอากาศสองสล็อต โดยสามารถวัดขนาดรอยแผลได้ดังนี้ รูป (ก) แสดงเส้นผ่าศูนย์กลางสูงสุดของรอยแผลในแนวรัศมีของสายอากาศปลายเปิดมีค่าเท่ากับ 1.34 cm รูป (ข) แสดงเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวสายอากาศปลายเปิด 2.48 cm รูป (ค) แสดงการเปรียบเทียบลักษณะรอยแผลที่เกิดในไข่ขาว ในเนื้อเยื่อปอด และผลจากการจำลอง โดยผลการจำลองเป็นรอยแผลที่เกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 50 °C ขึ้นไป



(n)



(o)



(ค)

รูปที่ 5.29 แสดงรอยแผลในปอดแบบ *in vitro* ที่เกิดจากสายอากาศสองสัลด